



EnDrin FM-Lørebog for Maskinmester- og Ingeniørstuderende

Jakobsen, Arne; Kolarik, Jakub

Publication date:
2018

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Jakobsen, A., & Kolarik, J. (Eds.) (2018). *EnDrin FM-Lørebog for Maskinmester- og Ingeniørstuderende*. Technical University of Denmark.

General rights

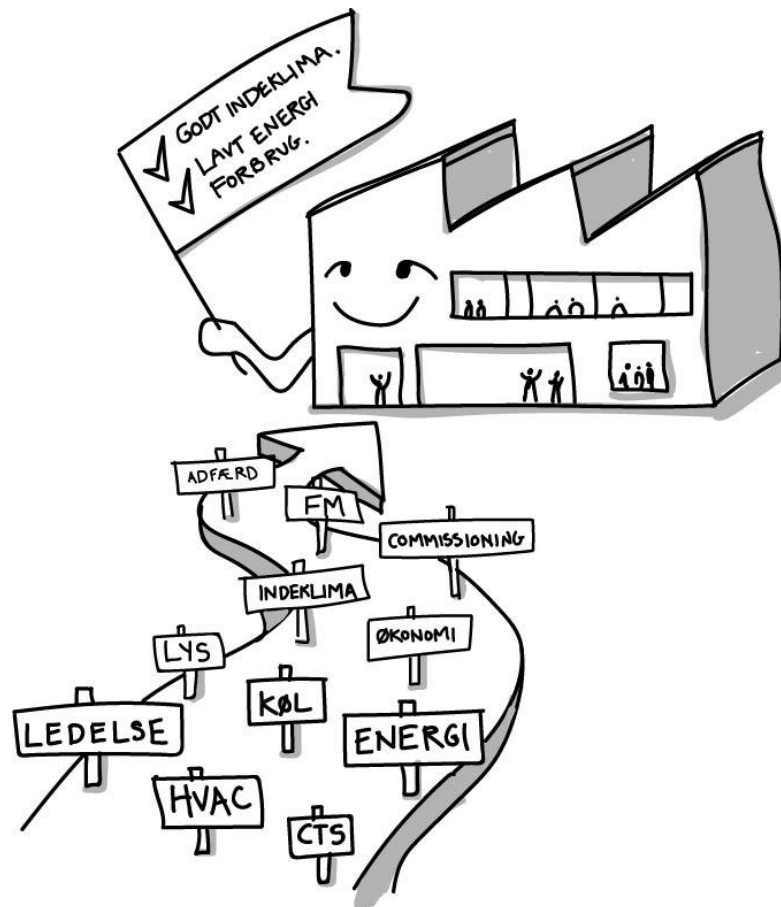
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

EnDrIn FM-Lærebog for Maskinmester- og Ingeniørstuderende

Faglig viden og discipliner som er nødvendige i et samspil for at sikre samtidigt lavt energiforbrug og godt indeklima i bygninger



Redaktører – Arne Jakobsen og Jakub Kolarik

Version april 2018



DTU Byg
Institut for Byggeri og Anlæg

Center for Facilities Management - Realdania Forskning
Institut for Systemer, Produktion og Ledelse



DEAS

HØGHØJ
byggerådgivning aps

BETTER BUILDINGS
WITH EISE



Honeywell



ELFORSK

Denne lærebog er udarbejdet som del af projektet **Energirigtigt drift af det rette indeklima i bygninger – ENDRIN** støttet af ELFORSK i periode 2016–2017, projektnummer 348-006 (www.elforsk.dk).

FAGLIGE DISCIPLINER OG VIDEN I RELATION TIL ENERGI OG INDEKLIMA I BYGNINGSDRIFT

Supplerende lærebog for Maskinmestre og
Ingeniører

"Energirigtig Drift af det rette Indeklima i bygninger"

PSO2016; 348-006

Forord

Denne ”lærebog” er et resultat af et udviklingsprojekt finansieret af den offentlige støtteordning ELFORSK (<http://www.elforsk.dk>), som er Dansk Energis forsknings- og udviklingsprogram, som årligt uddeler 25 mio. kr. til projekter, som bidrager til ”effektiv energianvendelse”

Projektet var 2-årigt og blev gennemført 2016-2017 med en kort forlængelse ind i 2018.

Bygningens primære formål – udover at have rumdeling og inventar, som matcher brugsformålet - er at sikre behageligt indeklima for mennesker. Dette er selvfølgelig relateret til energiforbrug af diverse ”tekniske installationer”.

Det er mest projektering og opførelse af bygninger der er i fokus når man snakker om sunde og bæredygtige bygninger. Selve bygningsdriften, bliver ofte glemt i disse diskussioner, selvom den faktiske drift har betydelig indvirkning på både energiforbrug og indeklima. Selvom at viden og tekniske muligheder indenfor ”indeklima-drift” aldrig har været bedre, så er praksis ofte at energiforbruget er væsentlig større end det burde være og indeklimaet har en forholdsvis lav prioritering i forhold til bygningens primære brugsformål.

Effektiv bygningsdrift er et stærkt tværfagligt område og en af motivationerne bag denne lærebog er at præsentere ”hele paletten”. Følgende udsagn - mange af dem hørte projektgruppen i løbet af besøg af forskellige bygninger rundt omkring Danmark - giver en fornemmelse for dybden og bredden af ambitionen med denne bog:

- ”Indkøringen er sparet væk.”
- ”Jeg bruger kun skærbillede nr. 5 på vores CTS anlæg...”
- ”Der har altid været træk her.”
- ”Det er ikke til at vide om køleanlægget burde virke bedre – bare der er koldt nok.”
- ”Jeg ved faktisk ikke hvor der blæses ind og hvor der suges ud...”
- ”Jeg ved hvad der burde gøres men ingen lytter til mig.”
- ”Jeg ved ikke om vi har CAV, VAV, SEL, COP, Genvex, FM, ESCO, eller hvad det nu hedder.”
- ”Jeg kan ikke vurdere om det er teknisk godt det som leverandøren tilbyder.”
- ”Jeg tror ikke rigtig at der er nogen der har overblik over anlægget nu – vores mand der var med under opstarten har fået nyt arbejde.”
- ”Jeg ved ikke om det kan betale sig af få kølebafler.”
- ”Vi taler altså ikke ”samme sprog” her i bygningen.”
- ”Lyset er tændt selvom der ikke er brug for det, ventilationen er bedst i den anden ende af bygningen, der sker ikke rigtig noget selvom jeg drejer på termostaten.”
- ”Jeg håber nogle andre har forstand på det...”
- ”Det kan nok ikke betale sig – ellers var det vel gjort?!”
- ”Hvis ansvar er det egentligt?”

Ambitionen er, at give en balanceret beskrivelse af teori, praksis, opmærksomhedspunkter og indblik i ”best practice” til de studerende som i deres fremtidige job bliver ansvarlige for – eller inddraget i - drift i danske bygninger. Disse folk kan være ansatte på forskellige niveauer. Som en tekniker der sørger for drift og vedligehold af bygningens tekniske installationer, går rundt of

skifter filtre i ventilationsanlægget, udskifter termostatventiler på radiatorerne eller lysstofrør (nok i stigende grad LED) eller indstiller set-punkter i CTS. Eller som ”facility managers”, der har ansvar for både den tekniske drift og rengøring, kantine, affald og inventar i bygningen. På ”operationelle niveau” skal de have en bred teknisk viden, men de skal også kende til de krav der stilles til indeklima. Herudover skal de være i stand at håndtere klager og hverdagsproblemer med hensyn til de målsætninger, der blev defineret for den pågældende bygning. Det er en person på -”facility manager”- niveau, der skal sørge for, at der defineres målsætninger, retningslinjer og strategier for bygningens drift. Da det er godt indeklima der er målet, handler dette ikke kun om serviceaftaler og planer til vedligeholdelse. En bygning med godt indeklima kræver konstant opmærksomhed, analyse af forskellige driftsparametre og sidst men ikke mindst dialog med brugere.

Vejen til en bygning med godt indeklima starter ved design og projektering. Det er i design processen hvor der tages grundlæggende beslutninger, der påvirker bygningens mulighedsrum for præstation både med hensyn til energiforbrug og indeklima. Derefter følger projektering, opførelse, installation, idriftsættelse og overdragelse. Allerede i de tidlige faser er det afgørende at inddrage driftsaspektet. Det er en win-win situation af inddrage driftspersonale forholdsvis tidligt i disse processer. Dels vil jordbunden praktisk erfaring kunne berige disse processer dels er denne inddragelse med til at sikre et ejerskab for driften, når bygningen ”afleveres” til brug.

Den omfattende projektgruppe, i projektet bag denne lærebog, indbefatter eksperter på rigtig mange delområder og også i denne gruppe var der ingen – inden projektets start – som havde tilstrækkelig bred og dyb viden på alle væsentlige områder, der knytter an til indeklima og energiforbrug i bygninger.

Projektgruppens medlemmer kan ses på næste side.


Det er ambitionen at rette, opdatere og forbedre denne lærebog også efter ELFORSK projektets ophør. Derfor bliver der oprettet en hjemmeside www.endrin-textbook.org der skal i fremtiden bruges som platform til opdatering og videre udvikling af lærebogen. Hjemmesiden bliver primært administreret af DTU Byg i tæt samarbejde med DTU Management/CFM og Maskinmesterskolen København. Alle kapitler har en eller flere forfattere, hvis navn, e-mail og ansættelsessted er anført på kapitlets første side. Det er ønsket at du som studerende eller underviser giver feedback til forfatterne – det kan være stort som småt – bare det er i en konstruktiv ånd.

Projektgruppen

	Dorte Lindholm i følgegruppe
	Hans Dilling, Søren Hviid Junker, Finn Jørgensen, Tommy Birkebæk og Arne Jakobsen
	Jakub Kolarik og Jørgen Erik Christensen
	Helle Lohmann Rasmussen og Susanne Balslev Nielsen
	Hans Andersen og Fazal Sahibzada
	Jacob Steen Harbo
	Claus Høghøj
	Peter Poulsen
	Henrik Poulsen og Niels Kjær
	Georg Markhovski og Mads Aulby Mather

Derudover har

Peter og Daniel Oldendow - **OLDENDOWJANTZEN** | **EL-TEKNIK & ENERGIOPTIMERING** bidraget omkring temaet ”energirenovering”

og Esben Bækmark ,  har bidraget om temaet ”Commisioning”.

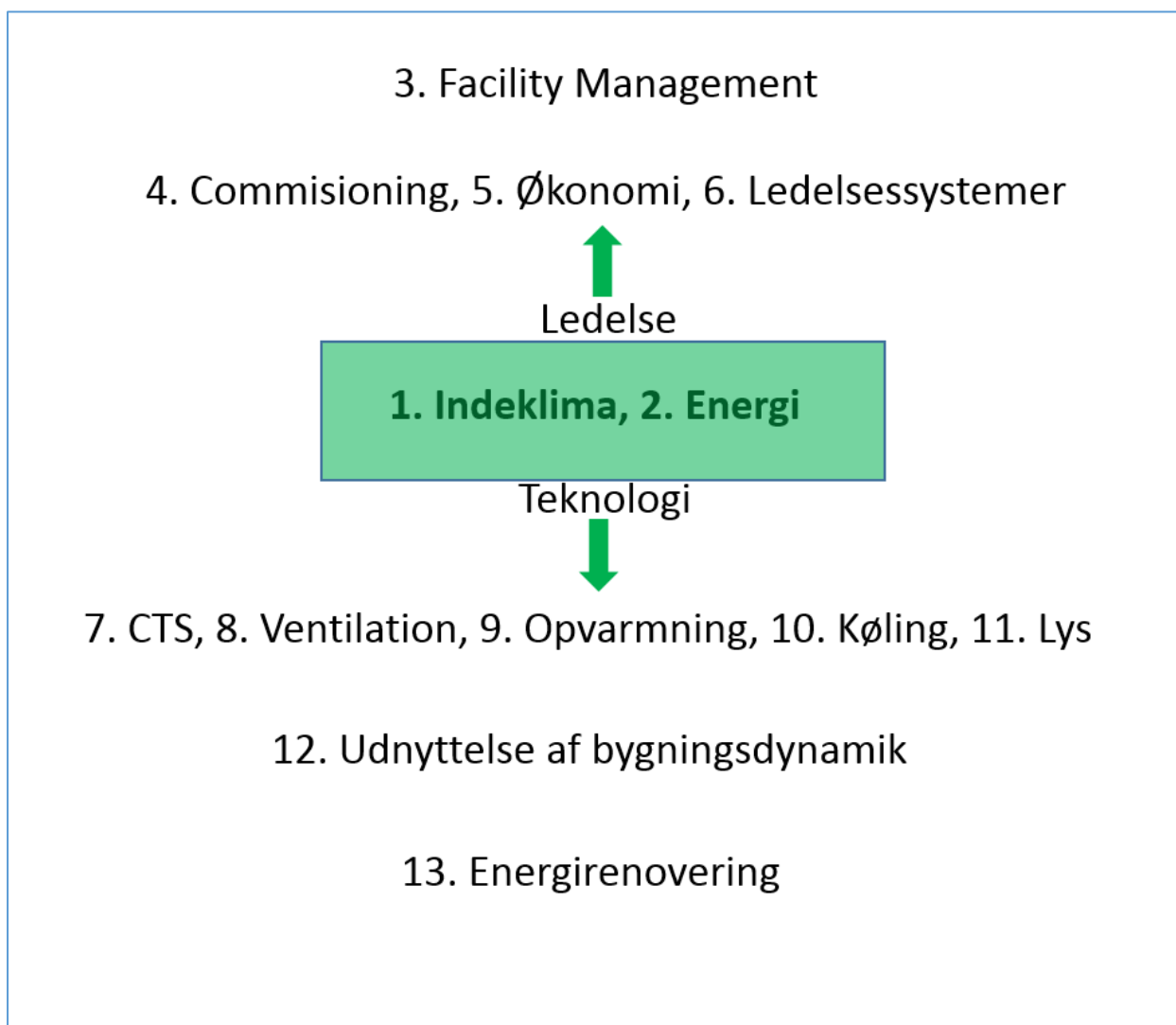
Indledning

Bogen indeholder 13 faglige kapitler. Det at disse repræsenterer forskellige fagfelter og er skrevet af forskellige forfattere bevirker at kapitlerne vil have forskellig dybde, bredde, sproglig stil mv. Nomenklatur kan indenfor forskellige fagfelters traditioner også være forskellige.

Det kan bestemt hævdes at en større ensartethed kunne være ønskelig, men dels er der den praktiske tidsbegrænsning dels kan et synspunkt også være at det kan være berigende at møde forskellige fagtraditioner – og forfatterstile – på deres egne præmisser.

Alle kapitler indledes med læringsmål og nomenklatur for det pågældende kapitel. Kapitlerne kan læses uafhængigt af hinanden, men selvsagt også med fordel i en sammenhæng.

Figuren nedenfor giver et indtryk af indholdet. Tallet foran emnet svarer til kapitel nummeret.



Indhold

1.1	Indeklima	1-1
1.2	Energi.....	2-1
1.3	Facilities Management.....	3-1
1.4	Commissioning	4-1
1.5	Økonomi	5-1
1.6	Lovgivning og standarder.....	6-1
1.7	CTS	7-1
1.8	Ventilation	8-1
1.9	Opvarmning	9-1
1.10	Køling	10-1
1.11	Lys og belysning.....	11-1
1.12	Bygningsdynamik.....	12-1
1.13	Energirenovering	13-1

1. INDEKLIMA

Jakub Kolarik, lektor

*Institut for Byggeri og Anlæg, Danmarks Tekniske Universitet
jakol@byg.dtu.dk*

Peter Poulsen

Better Buildings

pepo@betterbuildings.dk

Mange af driftspersonalets daglige opgaver er relateret til indeklima. Der findes allerede mange bøger, lærebøger og anvisninger om indeklima. Dette kapitel tager udgangspunkt i driftspersonalets perspektiv og søger at bibringe relevant indeklimatekni viden til den tekniske ledelse heraf, som typisk vil være en ingeniør eller maskinmester, der beskæftiger sig med bygningsdrift både på teknisk og ledelsesmæssigt niveau. Kapitlet fokuserer hovedsageligt på det termiske indeklima i kontorbyggeri. Med hensyn til det atmosfæriske indeklima, dagslys og belysning henvises til kapitlerne 8 og 11 i denne lærebog. Støj og akustik tilhører bestemt også til problematikken vedrørende indeklima, men bliver ikke behandlet i denne lærebog.

I begyndelsen af kapitlet introduceres empiriske modeller, der danner grundlag for evaluering af indeklima i nuværende kontor- og ikke-industrielle bygninger. Efterfølgende beskrives de nuværende krav og anbefalinger vedrørende indeklima, der bruges i praksis ved projektering og bygningsdrift. Den tredje del af kapitlet fokuserer på de problemer og udfordringer, driftspersonalet møder i deres hverdag. Denne del tager udgangspunkt i de undersøgelser, der blev udført som del af ENDRIN-projektet samt i forfatterens praktiske erfaringer.



ELFORSK

Dette kapitel er udarbejdet som del af projektet **Energirigtigt drift af det rette indeklima i bygninger – ENDRIN** støttet af ELFORSK i periode 2016–2017, projektnummer 348-006 (www.elforsk.dk).

1.1. Indhold

1.1.	Indhold	1-2
1.2.	Læringsmål	1-4
1.3.	Nomenklatur	1-5
1.4.	Bygninger skal sikre behageligt og sundt indeklima	1-6
	Hvorfor er indeklima vigtigt	1-6
	Hvad er det bedste indeklima?	1-8
1.5.	Termisk indeklima og termisk komfort	1-9
	Hvad er termisk komfort	1-9
	Modeller for termisk komfort.....	1-9
	PMV/PPD-model	1-10
	PMV - forventet middelvotering	1-16
	PPD - Forventet procent utilfredse.....	1-17
1.6.	Lokal termisk diskomfort.....	1-18
	Træk	1-18
	Strålingsasymmetri.....	1-20
	Lodret lufttemperaturdifferens	1-21
	Gulvtemperatur.....	1-22
1.7.	Krav, målsætninger og standarder	1-23
1.8.	Analyse af indeklima i praksis	1-27
	Detaljerede målinger ifølge standarder	1-27
	Evaluering af indeklima på basis af data fra CTS-anlæg eller indeklimaloggere	1-28
1.9.	Indeklimate strategi – et værktøj til indeklimate bevist drift.....	1-37
	Fortolkning af indeklimate krav i praksis	1-37
1.10.	Indeklimate drift og -projektering i praksis	1-42
	Brugerklager og drift.....	1-42
	Arbejdsmiljølovgivningen versus byggeprogram	1-43
	Én standardperson beskriver alle brugerne	1-44
	Kun én standardperson giver komfortkonsekvenser	1-44
	Ny tilgang for komfort – dipol-brugere og fælles accept.....	1-45
	Simpel overbygning til nuværende metoder i standarderne.....	1-45
	Der er behov for nye aftaleeksempler, som kan anvendes i byggeprogrammer	1-46
	Udskudt arbejde, kurs og strandede bygningsværdier	1-47
1.11.	Litteratur.....	1-48

1.2. Læringsmål

Studerende, der læser dette kapitel, skal være i stand til at:

- Forklare indeklimategret – hvad er indeklimate, hvordan definerer vi det, hvilke ”komponenter” findes der.
- Nævne og beskrive vigtige parametre, der påvirker termisk komfort/luftkvalitet.
- Beskrive, hvilke krav der bruges i Danmark vedrørende indeklimate i kontorbyggeri og anvende indeklimatekravene i praksis.
- Nævne de danske standarder, der er relevante med hensyn til indeklimate.
- Definere indeklimatemålsætninger, der passer til bygningen.
- Analysere målinger med de vigtigste indeklimateparametre og på basis af analyserne identificere indeklimateoverskridelser, som er uacceptable og som bør rettes op i bygningen.

1.3. Nomenklatur

Benævnelse og symbol	Enhed	Beskrivelse
h	m	Højde
m	kg	Vægt
t_a	°C	Lufttemperatur
t_g	°C	Overfladetemperatur - gulv
t_{mrt}	°C	Middelstrålingstemperatur
t_o	°C	Operativ temperatur
v_a	m/s	Middellufthastighed
v_{ar}	m/s	Relativ lufthastighed
α_r	W/m ² ·K	Varmeovergangskoefficient for stråling
α_c	W/m ² ·K	Varmeovergangskoefficient for konvektion
ϕ_a	%	Relativluftfugtighed
$\Delta t_{a,v}$	°C	Lodret lufttemperaturdifferens
Δt_{pr}	°C	Plan strålingstemperaturasymmetri
M	met, W/m ²	Metabolisme
W	W/m ²	Udført arbejde
H	W/m ²	Tør varmetab (varmetab fra kropsoverfladen ved konvektion, stråling og ledning)
E	W/m ²	Varmetab med fordampning af sved fra huden
E_{res}	W/m ²	Varmetab med fordampning ved respiration
C_{res}	W/m ²	Varmetab med konvektion ved respiration
I _{cl}	clo, m ² K/W	Beklædningsisolans
DR	%	Draught Rating - procent utilfredse med træk
PD	%	Percent Dissatisfied - procent utilfredse
PPD	%	Predicted Percent Dissatisfied - procent utilfredse med det termiske indeklima
STD _v	m/s	Lufthastighedens standardafvigelse
TU	%	Turbulensintensitet
Forkortelser		
APV		Arbejdspladsvurdering
AT		Arbejdstilsynet
BR		Bygningsreglement
FM		Facilities Management
TAD		Termo-aktiv dæk system

1.4. Bygninger skal sikre behageligt og sundt indeklima

I Danmark opholder vi os omkring 90 % af vores tid inden døre (på arbejde, hjemme, i fitnesscentret eller i bus/tog), og det har derfor stor betydning for vores velbefindende, hvilket indeklima vi omgiver os med. Indeklimaet påvirker mennesker med en lang række fysiske, kemiske og biologiske faktorer. Det er for eksempel temperatur, luftkvalitet, lys, lyd og støj, træk, fugt, mikroorganismer, partikler, allergener og kemiske stoffer, der kommer udefra eller som er produkter af vores aktiviteter eller som afgasninger fra forskellige byggematerialer. Det er bygningens opgave at sikre behageligt og sundt indeklima for mennesker. Som regel kan selve bygningens konstruktion ikke klare opgaven alene og har derfor brug for hjælp fra varme- og klimasystemer der kan bruges aktivt til at styre forskellige indeklimaparametre.

Indeklima er et meget tværfagligt fag, der indeholder mange forskellige discipliner. Generelt opdeles indeklima i fire hovedområder:

- Termisk indeklima – termisk komfort/ubehag og det lokale ubehag, såkaldt lokal termisk diskomfort som træk eller strålingstemperatursymmetri
- Atmosfærisk indeklima – luftkvalitet, gener relaterede til lugte- såkaldt sensorisk luftforurening
- Visuel – visuel komfort, dagslys, belysning
- Akustisk – lyd og støj

Hvorfor er indeklima vigtigt

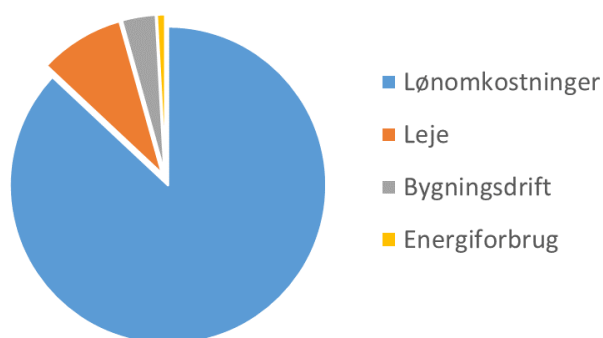
Hvis indeklimaet ikke er i orden, kan det have store konsekvenser for menneskets komfort og helbred. Påvirkningen fra indeklimaet kan medføre akutte symptomer som ubehag, irritation af slimhinderne i øjne, næse, mund og svælg, hudirritation, hovedpine, træthed og utilpashed, og langtids (kronisk) eksponering til kemisk forurening eller allergener kan resultere i alvorlige sygdomme som kræft, hjerte- og karsygdomme, astma og allergi.

I praksis indikeres et dårligt indeklima oftest med de akutte symptomer. Mennesker føler ubehag eller er generede, når de opholder sig i bygningen. Hvis symptomerne bliver mindre og forsvinder gradvist, når mennesker har forladt bygningen, snakker man tit om såkaldt SBS: Syg Bygnings Syndrom (Sick Building Syndrom). Imidlertid er det vigtigt at sige, at det er mennesker der bliver ”syge” og ikke selve bygningen (Figur 1-1).



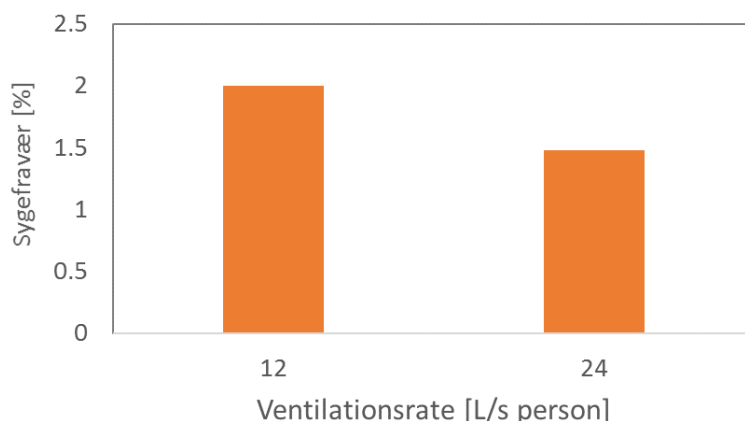
Figur 1-1 En ”syg bygning” betyder faktisk syge mennesker. Kilde: Center for Indeklima og Energi, DTU, www.iciee.byg.dtu.dk

SBS-symptomer er ikke kun ubehagelige, de påvirker også menneskers arbejdspræstation. Forskning viser, at når lufttemperaturen i kontorlokaler er mellem 21-25 °C påvirker det termiske indeklime ikke medarbejdernes præstation, mens hver en grads stigning i et interval mellem 25-30 °C betyder et præstationsfald på cirka 2 %. Når temperaturen når over 30 °C falder præstationen 10 %. Dette kan have en stor betydning for arbejdsgiveren, fordi medarbejdernes løn som regel er den største udgift. Figur 1-2 illustrerer resultater fra et forskningsstudie, der sammenlagde forskellige udgifter for en typisk kontorbygning. Resultaterne viste, at lønudgifterne var cirka 100 gange højere end udgifter til drift og energiforbrug. Derfor kan omkostninger relaterede til nedsat arbejdspræstation hurtigt blive højere end en energiregning for hele året.



Figur 1-2 Omkostninger per år for en typisk kontorbygning (45 m² kontor, 11 m²/person). Kilde: baseret på Woods (1989)

Dårligt indeklime forringer klart medarbejdernes livskvalitet og øger deres sygefravær. Relationen mellem sygefravær og ventilation i en kontorbygning er vist på Figur 1-3. Lignende sammenhæng er også påvist i daginstitutioner og skoler.



Figur 1-3 Sammenhæng mellem indblæsningsluftmængde og sygefravær. Kilde: baseret på Wargocki (2006)

Når dårligt indeklime signaleres med de akutte symptomer (SBS), er det et klart tegn til driftspersonalet om, at der er noget galt, som der bør handles på. Langtids (kronisk) eksponering (for eksempel til kemisk forurening) er generelt et endnu større problem, fordi driftspersonalet som regel ikke er i stand at identificere årsagerne til problemet.

INFOBOKS:

I praksis kan der nævnes følgende typiske tegn på dårligt indeklima i bygningen:

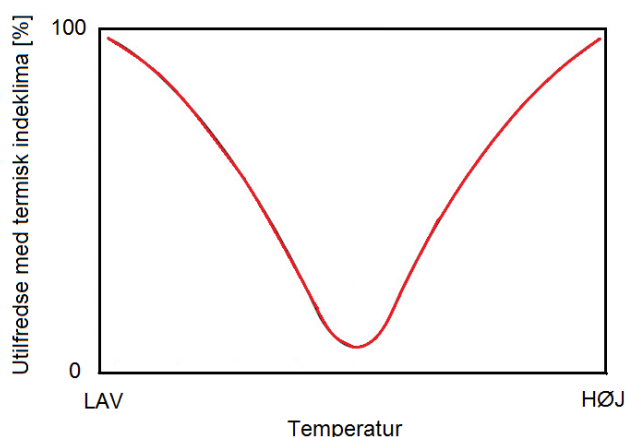
- Kulde og træk
- Overophedning
- Dårlig lugt
- Hovedpine og træthed
- Irritation i øjne, næse og hals
- Kvalme og svimmelhed
- Udslæt, rødme og kløe i huden

Hvad er det bedste indeklima?

Mennesker reagerer ofte forskelligt på de samme påvirkninger. Nogle er f.eks. mere følsomme over for træk og kulde, og andre reagerer mere på luftforurening eller støj. På grund af mange individuelle forskelle i menneskers præferencer er det praktisk umuligt at levere 100 % acceptabelt indeklima til alle.

I praksis søger vi derfor altid et kompromis – vi prøver at levere et indeklima, der kan accepteres af flest mulige mennesker. Som acceptabelt indeklima vælges normalt en kombination af indeklimaparametre, som mere end 80-90 % af en stor gruppe mennesker finder ”acceptabelt”.

En sådan definition er baseret på indeklimateforskning, der i mange år har prøvet at forklare relationer mellem menneskers oplevelser og fysiske indeklima-parametre, der kan måles i bygninger. Målsætning er at etablere relationer, der synliggør, hvor stor en andel af mennesker (i en rimelig stor gruppe) der vil være utilfredse ved eksponering til bestemte omgivelser. Figur 1-4 illustrerer en sådan relation for rumtemperatur. Det er tydeligt, at der findes en optimal temperatur, hvor næsten alle er tilfredse. Når temperaturen stiger eller falder, oplever flere mennesker ubehag, og procenten af utilfredse stiger. De opnåede relationer bruges i empiriske modeller, der bagefter anvendes til både opsætning af målsætninger ved projektering og evaluering af indeklima i eksisterende bygninger.



Figur 1-4 Empirisk relation mellem antal utilfredse og rumtemperatur. Kilde: baseret på tegning fra Jørn Toftum, DTU Byg

1.5. Termisk indeklima og termisk komfort

Hvad er termisk komfort

Mennesker higer hele tiden efter at skabe en termisk komfort – klæder sig på, når de skal udenfor og bygger bygninger for at opnå komfort trods dårlige vejrforhold udendørs. Historiske byggetraditioner i verdens forskellige klimazoner afspejler som regel menneskets indsats for at opnå komfort. Også i dag er termisk komfort en af de vigtigste parametre, der skal tages hensyn til ved projektering og drift af bygninger. Men hvad er termisk komfort egentlig? Det er vigtigt at sige, at begrebet ”komfort” er et psykologisk fænomen. Termisk komfort er derfor ikke direkte og udelukkende relateret til fysisk miljø/omgivelser. Der er også mange personlige faktorer, tidligere oplevelse, det aktuelle humør osv., der spiller en rolle i ens oplevelse af komfort. Den britiske forsker Ken Parsons siger, at termisk komfort er en tilstand, mennesker stræber efter, når de føler ubehag. Både internationale og danske standarder kommer med definitioner af termisk komfort. Dansk standard DS 474 (Dansk Standard 1993) definerer termisk komfort som ”den tilstand, hvor en person udtrykker tilfredshed med de termiske omgivelser”. International standarder, der også er adopteret i standard DS/EN ISO 7730 (Dansk Standard 2006) definerer termisk komfort som ”den betingelse i sindet, som udtrykker tilfredshed med termisk miljø”. En definition, de fleste mennesker kan blive enige om, men også en definition, som ikke direkte kan omdannes til fysiske parametre. Det er jo præcist den psykologiske faktor – oplevelsen af tilfredshed – der afgør, om vi er i komfort eller ej. Figur 1-5 illustrerer kompleksiteten af komfort-begrebet. Begge personer på billedet vil sandsynligvis beskrive deres termiske tilstand som komfortabel, men de er udsat for helt forskellige termiske omgivelser.



Figur 1-5 Termisk komfort er et kompliceret fænomen. Kilde: Brüel&Kjær (1996)

Modeller for termisk komfort

Relationen vist på Figur 1-4 er et eksempel på en meget simpel model, der kan bruges til evaluering af det termiske indeklima. Men Figur 1-5 minder os om, at det er mange fysiske parametre der kan påvirke termisk komfort, og ikke bare én, som for eksempel lufttemperaturen. Vi har derfor brug for en mere kompliceret model, der involverer flere parametre der kan bruges til at estimere menneskets komfort under bestemte omgivelser. Der bruges generelt to modeller for termisk komfort i dag: en model baseret på menneskets varmebalance, den såkaldte PMV/PPD-model udviklet af P.O. Fanger på DTU i 1970'erne, og så den adaptive model, baseret på data fra feltstudier gennemført i eksisterende bygninger over hele verden. Den adaptive model udnytter en sammenhæng mellem den temperatur, folk betragter som

komfortabel, og temperaturen udendørs. Forudsætningen er, at mennesker naturligt vil adaptere deres beklædning og adfærd til vejret og de termiske forhold i bygningen. Yderligere forskning samt erfaringer fra praksis viser, at PMV/PPD-model giver bedre resultater (bedre estimering af menneskets komfort) i bygninger, hvor indeklimaet er kontrolleret automatisk og beboere ikke har mulighed for at påvirke det (bygninger med mekanisk køling og air-conditioning). Omvendt giver en adaptiv model bedre resultater for bygninger uden mekanisk køling, hvor beboere selv kan åbne vinduer (Figur 1-6).

Bygninger med mekanisk køling



"PMV/PPD" model

- Baseret på laboratorie forsøg
- Sammenhæng mellem fysiske faktorer og personens opfattelse
- Vigtige faktorer:
 - Varmebalance
 - Der må ikke opstå lokal diskomfort

Bygninger uden mekanisk køling, vinduerne kan åbnes



Adaptiv model

- Baseret data fra felt studier
- Sammenhæng "komfort" temperatur og temperatur udendørs
- Mennesker ændre deres adfærd for at opnå komfort (klæde sig ud, åben et vindue)

Figur 1-6 Modeller til termisk komfort. Kilde: forfatteren

INFOBOKS:

Modeller for det termiske indeklima i danske standarder og lovgivning:

Bygningsreglement (BR15) henviser direkte til PMV/PPD-modellen ved at nævne standard DS/EN ISO 7730 *Ergonomi inden for termisk miljø - Analytisk bestemmelse og fortolkning af termisk komfort ved beregning af PMV- og PPD-indekser og lokale termisk komfortkriterier*. PMV/PPD-modellen er således den mest brugte model i Danmark.

Standard DS/EN 15 251 *Input-parametre til indeklimaet ved design og bestemmelse af bygningers energimæssige ydeevne vedrørende indendørs luftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustik* nævner en adaptiv model, men da standarden ikke er direkte nævnt i lovgivningen, bruges den adaptive model meget sjældent i praksis.

PMV/PPD-model

Selv om driftspersonalet ikke er direkte involveret i design hvor PMV/PPD-modellen bruges til bestemmelse af opvarmnings- og kølingsset-punkter, er det vigtigt, at de driftsansvarlige har kendskab til modellen, fordi den også kan bruges til evaluering af indeklimaet, når bygningen er i drift.

Kroppens varmebalance og regulering af kropstemperatur

PMV/PPD – den mest brugte model for termisk komfort i dag – er baseret på den forudsætning, at menneskers termiske oplevelser er direkte relateret til kroppens varmebalance. Modellen antager, at der findes en direkte sammenhæng mellem det fysiske miljø og

menneskenes/personens subjektive oplevelse. Modellen tager ikke hensyn til psykologiske faktorer som for eksempel tidligere oplevelser, forventninger osv. I dag bruges modellen som basis for evaluering af termisk komfort i Danmark og de fleste ilande. Det er vigtigt at kende de basale principper for menneskets varmeregulering for at forstå modellens funktionalitet. Mennesker har som alle andre pattedyr et meget effektivt varmereguleringssystem der sørger for at kroppens kernetemperatur holdes på ca. 37 °C. Kroppens ”varmeregulator” findes i den del af hjernen der hedder hypothalamus og bruger to sæt af nerveender – ”følere” – såkaldte termoreceptorer, der findes både i selve hypothalamus og under huden. De kan opdeles i to grupper: nerveender, der er sensitive over for varme, og nerveender, der er sensitive over for kulde. Signaler fra receptorerne bruges til at aktivere kroppens varmereguleringsmekanismer (Tabel 1-1).

Tabel 1-1 Menneskenes varmereguleringsmekanismer

”Det er for varmt” <i>Kroppens kernetemperatur overstiger 37 °C</i>	”Det er for koldt” <i>Hudtemperaturen falder til under 34 °C</i>
<ol style="list-style-type: none"> 1. Hudens blodkar løsner op og der kommer mere blod til huden. Dette medfører en større varmeafgivelse til omgivelserne. 2. Svedproduktion stiger. Fordampning af sved er et meget effektivt køleværktøj. Stigning af kropstemperatur i omkring 0,1 K kan allerede stimulere svedproduktion, der er i stand at firedoble kroppens varmetab. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Blodkar trækker sig sammen, hvilket reducerer blodtilførslen gennem huden og dermed mindsker varmeafgivelsen til omgivelserne. 2. Aktiviteten i skeletmuskulaturen øges, hvilket fører til ”kulderystelser”. Musklernes sammentrækninger vil få kroppens varmeproduktion til at stige til det firedobbelte.

Betingelser for termisk komfort

Generelt betragter mennesker deres termiske omgivelser som komfortable, hvis der ikke findes nogen form for termisk ubehag. To betingelser skal være opfyldt for at opretholde termisk komfort. Den første betingelse for komfort er såkaldt **termisk neutralitet**. Kort sagt betyder det, at en person hverken føler sig for varm eller for kold. I detaljen er det den faktiske kombination af hudtemperatur og kroppens kernetemperatur, der giver en følelse af termisk neutralitet. Den anden er opfyldelsen af **kroppens varmebalance** - den varme, der produceres af stofskiftet bør være lig med mængden af varme tabt fra kroppen (Ligning 1-1):

$$M - W = H + E + C_{res} + E_{res} \qquad \text{Ligning 1-1}$$

hvor M er metabolisme, W er udført arbejde, H er tør varmetab (varmetab fra kropsoverfladen ved konvektion, stråling og ledning), E er varmetab med fordampning fra huden og E_{res} og C_{res} repræsenterer varmetab med fordampning og konvektion ved respiration.

Forholdet/kombinationerne mellem parametrene hudtemperatur, kroppens kernetemperatur og personens aktivitet resulterer i følelse af termisk neutralitet og er baseret på et stort antal forsøg.

Under disse forsøg, der faktisk repræsenterer en mere detaljeret udgave af vores ”model” fra Figur 1-4, blev kroppens kernetemperatur, hudtemperaturen og mængden af produceret sved målt ved forskellige kendte aktivitetsniveauer, mens testpersonerne fandt deres termiske omgivelser komfortable. I sådan tilfælde kaldes Ligning 1-1 for en ”komfort”-ligning. Detaljer kan findes for eksempel i Danvaks Varme- og Klimateknik Grundbog (Hansen et al. 2006). Kroppens varmebalance er generelt bestemt af seks parametre. Fire af dem er relateret til omgivelserne, mens de sidste to er afhængige af personen, se Tabel 1-2.

Tabel 1-2 Seks ”indeklima” parametre der bestemmer personens varmebalance

Relateret til	Parameter	Hvor kan den findes?
Personen	Beklædningsisolans, I_{cl} [clo]	Tabeller med isolans for forskellige beklædninger (se eksempel i Fig. 8)
	Personens aktivitetsniveau/stofskifte, M [met]	Tabeller med stofskifte ved typiske aktiviteter (se eksempel i Tabel 3)
Rummet	Lufttemperatur, t_a [°C]	Målinger af middeltemperaturen i opholdszonen
	Middelstrålingstemperatur, t_{mrt} [°C]	Beregnes fra målinger i opholdszonen
	Middellufthastighed, v_a [m/s]	Målinger af middelhastigheden i opholdszonen
	Relativ luftfugtighed, ϕ_a [%]	Målinger i opholdszonen

Indeklimaparametre

Lufttemperatur

Temperatur i opholdszonen omkring personen: Middeltemperaturen af luften har betydning for den konvektive varmetransport mellem mennesker og omgivelserne. For siddende personer skal t_a måles i 0,6 m højde over gulv. Dette svarer cirka til højden af en siddende persons tyngdepunkt. Yderligere målinger af lufttemperaturen i ankelhøjde (0,1 m og hovedhøjde 1,1 m) kan anbefales, hvis mere detaljerede evaluering af det termiske indeklima skal udføres, for eksempel evaluering af lokal diskomfort.

Lufthastighed, relativ lufthastighed

Lufthastighed påvirker personens konvektive varmeafgivelse. For siddende personer bruges middellufthastigheden i omgivelserne (v_a), men hvis personen bevæger sig, er det nødvendigt at regne med den relative lufthastighed i forhold til kroppen. Relativ lufthastighed udregnes som funktion af personens aktivitet ifølge Ligning 1-2:

$$v_{ar} = v_a + 0,005 \cdot (M - 58) \text{ [m/s]} \quad \text{Ligning 1-2}$$

hvor M er personens aktivitetsniveau-metabolisme i W/m^2 .

Middelstrålingstemperatur

Middelstrålingstemperaturen påvirker den måde, mennesker afgiver deres varme via stråling mod overflader omkring dem (vægge, gulv og loft). Denne varmeafgivelse er afhængig af forskellen mellem kroppens og overfladens temperatur. Middelstrålingstemperaturen defineres som den ensartede temperatur af de omgivende flader, der ville medføre samme varmeafgivelse ved stråling fra en person, som de faktiske omgivelser (mange flader med forskellige temperaturer). Anvendelse af middelstrålingstemperaturen hjælper med at simplificere beregning af de komplicerede strålingsforhold i bygninger.

Operativ temperatur

Operativ temperatur er en størrelse, der kombinerer de to vigtigste typer af menneskets varmeudveksling med omgivelserne – stråling og konvektion. De to er hver for sig afhængige af luft- og middelstrålings temperatur. Den operative temperatur er den ensartede temperatur af luft og omgivende flader, der ville medføre samme varmeafgivelse fra personen som de faktiske (ikke-ensartede) omgivelser. Dvs. i ensartede rum med en bestemt operativ temperatur vil en person have samme samlet varmetab ved stråling og konvektion som i det faktiske ikke-ensartede rum, hvor luften har en bestemt t_a og omgivende flader en bestemt t_{mrt} temperatur. Operativ temperatur bruges meget hyppigt i både indeklimastandarder samt praktiske målinger. I de fleste bygninger, hvor den relative lufthastighed (v_{ar}) i praksis ikke overstiger 0,2 m/s og $|t_a - t_{mrt}| < 4$ K, kan den operative temperatur beregnes som gennemsnit af luft- og middelstrålingstemperaturen. I tilfælde af højere hastigheder kan bruges Ligning 1-3:

$$t_o = A \cdot t_a + (1 - A) \cdot \overline{t_{mrt}} \quad [^\circ\text{C}] \quad \text{Ligning 1-3}$$

hvor A er afhængig af v_{ar} ifølge nedestående:

v_{ar}	< 0,2 m/s	0,2 – 0,6 m/s	0,6 – 1,0 m/s
A	0,5	0,6	0,7

I øvrige tilfælde bruges den oprindelige formel til operativ temperatur, der indeholder vægtning på baggrund af et konvektivt varmeovergangstal og et strålings-varmeovergangstal, Ligning 1-4:

$$t_o = \frac{\alpha_r \cdot t_{mrt} + \alpha_k \cdot t_a}{\alpha_r + \alpha_k} \quad [^\circ\text{C}] \quad \text{Ligning 1-4}$$

hvor t_o er operativ temperatur, t_a og t_{mrt} er luft og middelstrålingstemperatur, α_r er strålings-varmeovergangstal og α_k er konvektivt varmeovergangstal.

Den operative temperatur kan også måles direkte ved brug af specielle sensorer, se venligst detaljer i kapitel om praktiske målinger af det termiske indeklima.

Luftfugtighed

Luftfugtigheden har betydning for fordampning af sved fra hudens overfalde. Men denne meget kraftfulde køle-mekanisme bruger kroppen sjældent i termiske omgivelser, der findes i vores bygninger. I sådanne neutrale omgivelser har luftfugtigheden derfor en minimal betydning for personens termisk komfort. Energiforbrug relateret til befugtning af luften er meget højere end

energiforbrug relateret til justering af komforttemperatur (for eksempel har en ændring af den relative luftfugtighed fra 80 % til 50 % ifølge komfortligningen den samme betydning som sænkning af temperaturen på 0,7 °C).

Aktivitetsniveau/metabolisme

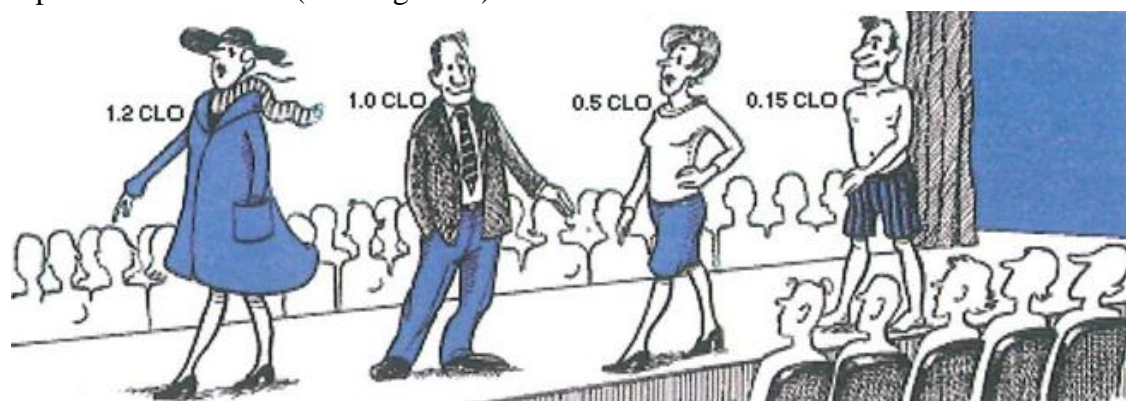
Afhængig af personens muskulære aktivitet produceres metabolismeenergi. Under normale omstændigheder bliver hele den muskulære aktivitet transformeret til varme i kroppen. Energien produceret af metabolisme måles i Met (1 Met = 58,15 W/m² kropsoverflade). En normal voksen har et areal på cirka 1,7 m² (mere præcist kan kropsoverfaldet udregnes som et så kaldt Dubois Areal ligning hvor højde og vægt bruges som inputparametre). En person i termisk komfort med et aktivitetsniveau på 1,2 Met vil have et varmetab på cirka 70 W/m². Metabolismen er lavest, mens vi sover - 0,8 Met, højeste værdier findes under sportsaktiviteter, hvor 6-10 Met ofte nås. Nogle eksempler på forskellige aktivitetsniveauer findes i Tabel 1-3:

Tabel 1-3 Menneskets interne varmeproduktion/metabolisme for forskellige aktiviteter

Aktivitet	Varme produktion [W/m ²]	M [met]
Liggende	46	0,8
Stillesiddende, hvile	58	1,0
Siddende aktivitet, kontorarbejde	70	1,2
Stående, hvile/bilkørsel	81	1,4
Stående let aktivitet, laboratorium, reception	93	1,6
Stående middel aktivitet, rengøring, ekspedient	116	2,0
Høj aktivitet, gang 5 km/h	175	3,0
Løb 15 km/t	550	9,5

Beklædningsisolans

Tøj reducerer kroppens varmetab. Dette udtrykkes med beklædningsisolansen. Den enhed, der normalt bruges til måling af isolansen (I_{cl}) er den såkaldte clo-værdi. 1 clo svarer til isolansen af 0,155 m²K/W. Dette er en værdi etableret med målinger af isoleringsevnen af klassisk herrebeklædning, der inkluderer jakkesæt med vest. En nøgen person har en beklædningsisolans på 0,0 clo. I praksis kan I_{cl} estimeres med brug af tabeller, der specificerer I_{cl} -værdierne for enkelte beklædningsgenstande. Den samlede I_{cl} beregnes som summen af de enkelte I_{cl} -værdier. Figur 1-7 viser eksempler af I_{cl} . I_{cl} -værdier for typiske beklædningsgenstande kan findes i for eksempel Dansk Standard (2007 og 2006).



Figur 1-7 Eksempler på clo værdier. Kilde: Brüel&Kjær (1996)

I praksis er det normalt tilstrækkelig nøjagtigt at opnå I_{cl} ved beregning ved brug af tabellerne. I tilfælde af atypisk beklædning (diverse arbejdsdragter, tøj fremstillet af moderne ”intelligente” materialer, osv.) kan det være nødvendigt at foretage målinger ved brug af en termisk mannequin, se Figur 1-8.

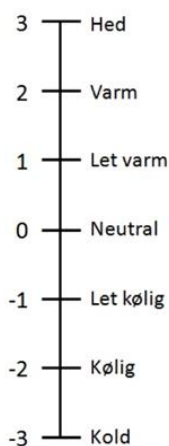
Det er vigtigt at huske, at polstrede sæder, bilsæder og senge også reducerer varmetabet fra kroppen. Derfor skal deres I_{cl} altid indgå i den samlede beregning. En typisk polstret kontorstol har $I_{cl} = 0.15 \text{ clo}$.



Figur 1-8 Termisk mannequin i et klima kammer tilhørende til Center for Indeklima og Energi, DTU Byg. Kilde: Danmarks Tekniske Universitet

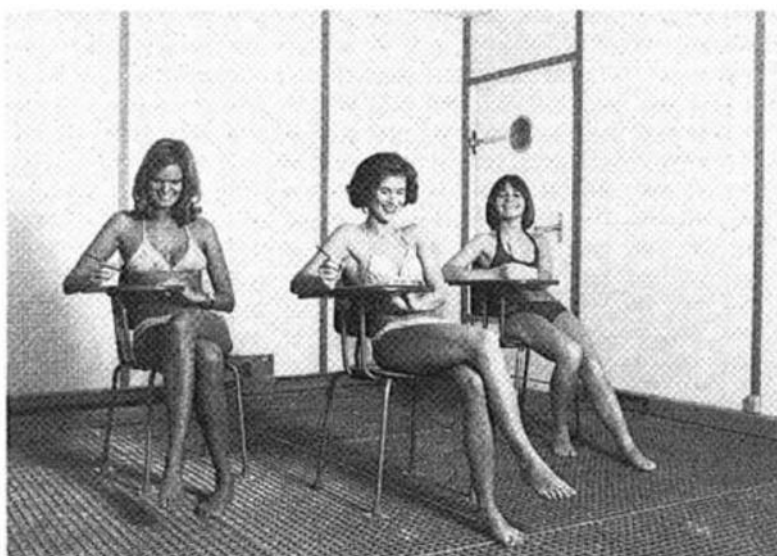
PMV - forventet middelvotering

De ovennævnte seks indeklimaparametre fortæller om indeklimaet på en objektiv måde, men de siger ikke noget om, hvordan mennesker oplever indeklimaet. PMV (Predicted Mean Vote - forventet middelvotering) er et indeks, der sætter de objektive målte indeklimaparametre i sammenhæng med subjektive evalueringer af det termiske indeklima (såkaldt votering) foretaget af en gruppe af mennesker, der er eksponeret for det samme termiske indeklima. Voteringen foregår på en syv-punkt-skala der vises i Figur 1-9.



Figur 1-9 Syv-punkt-skala til evaluering af generel termisk komfort

Da professor P.O. Fanger udviklede PMV, blev en stor gruppe mennesker udsat for termisk klima med forskellige kombinationer af de seks indeklimaparametre i et laboratorium (Figur 1-10). Forsøgspersonerne blev bedt om at foretage votering på syv-punkt-skalaen. Deres oplevelse vedrørende indeklima (varmt/koldt) blev omsat til numeriske værdier (se Figur 1-9) og sat i en matematisk model, der beskriver deres relation til indeklimaparametrene. Som resultat udtrykker PMV den forventede gennemsnitlige votering for en gruppe mennesker udsat for en bestemt kombination af de seks indeklimaparametre.



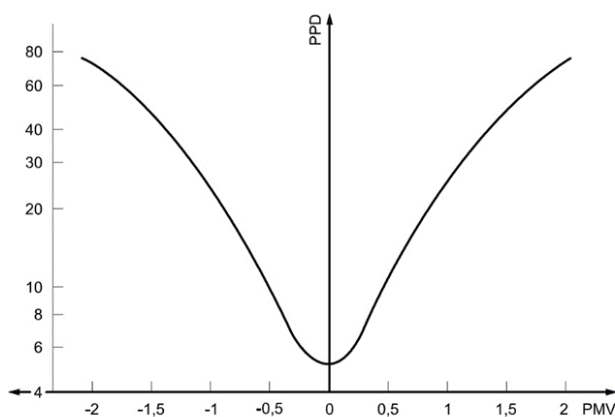
Figur 1-10 Forsøg i et klima kammer ved Center for indeklima og energi på Danmarks Tekniske Universitet. Kilde: Olesen (1982)

PPD - Forventet procent utilfredse

PMV-indekset udtrykker, hvordan mennesker oplever/føler det termiske indeklima (varmt, let varmt, køligt, osv.) men det beskriver ikke, om de er tilfredse eller utilfredse; dvs. der mangler information om deres komfort. For at opnå information om komforten, bruges PPD-indekset (Predicted Percent Dissatisfied - forventet procent utilfredse). PPD beregnes ud fra PPM indekset (Ligning 1-5), hvor det antages at de personer, som på PMV-skalaen vil votere -3, -2, +2 og +3, er utilfredse med de givne termiske omgivelser. PPD kan forstås som en indikator på, hvor stor en andel af en gruppe mennesker (udsat for bestemte termiske omgivelser og med et bestemt aktivitetsniveau og beklædningsisolans), der kan forventes at være utilfredse.

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2) \quad \text{Ligning 1-5}$$

Figur 1-11 viser relationen mellem PMV og PPD. Det viser sig, at det ikke er muligt at opnå 0 % utilfredse blandt en bestemt (stor) gruppe mennesker. Selv om gennemsnitligt PMV er 0, vil der altid være omkring 5 % mennesker, der ikke oplever termisk neutralitet.



Figur 1-11 Relation mellem PMV og PPD indekser. Kilde: Dansk Standard (2006)

INFOBOKS:

Selv om en gruppe mennesker oplever termisk neutralitet i gennemsnit ($PMV = 0$), vil der altid være utilfredse i gruppen!

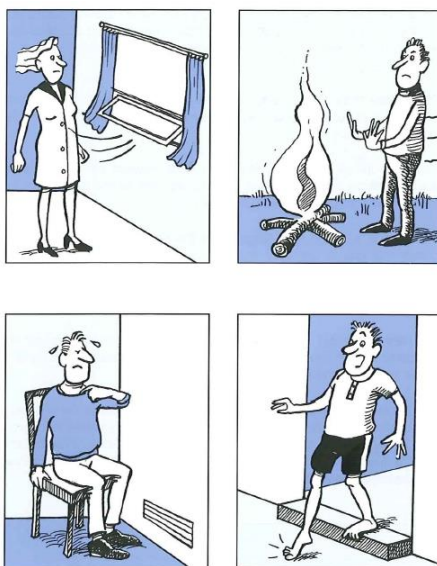
- Dette er en udfordring for driftspersonalet i kontorer og andre rum hvor der sidder flere mennesker, fordi der altid vil være enkelte personer, der finder omgivelserne varme eller kolde, selv om indeklimaparametrene (t_a , t_{mrt} , ϕ_a , v_a , I_{cl} , M) svarer til termisk neutralitet ifølge PMV-indekset.
- Den bedste løsning er at styre temperaturen, så flest muligt bliver tilfredse, og være i konstruktiv dialog med dem, der oplever ubehag.

Det er hverken muligt eller hensigtsmæssigt at holde en konstant temperatur i bygningen i praksis. Selv om set-punkterne for opvarmning eller køling tit er konstante, eller kun varierer med årstiderne, varierer den operative temperatur i bygningen, fordi både intern og ekstern varmebelastning forandrer sig i løbet dagen. For at være i stand at evaluere det termiske

indeklima i praksis, defineres et såkaldt komfortinterval. Som udgangspunkt bruges PPD og følgelig PMV til at definere intervallet. Se flere detaljer i afsnit 1.7.

1.6. Lokal termisk diskomfort

PMV-PPD-modellen estimerer menneskers oplevelse af det termiske indeklima samt deres tilfredshed med de aktuelle termiske omgivelser. Men selv om en person generelt har en følelse af termisk neutralitet ($PMV = 0$), kan det ske, at nogle dele af kroppen udsættes for forhold, der resulterer i termisk diskomfort (Figur 1-12). Denne lokale diskomfort kan ikke fjernes ved at ændre indeklimaparametre som operativ temperatur eller luftfugtighed. Det plejer at være nødvendigt at fjerne årsagen til ubehagelig lokal opvarmning eller køling.



Figur 1-12 Fire typer af lokal termisk diskomfort – træk, strålingsasymmetri, lodret temperaturdifference, gulvtemperatur. Kilde: Brüel&Kjær (1996)

Lokal termisk diskomfort opdeles i følgende fire faktorer:

- Lokal konvektiv afkøling af kroppen (ofte nakke eller ankler) forårsaget af luftbevægelser – træk.
- Afkøling eller opvarmning af forskellige kropsdele af ved stråling – strålingsasymmetri.
- ”Kolde fødder og et varmt hoved” på samme tid, forårsaget af store vertikale lufttemperaturforskelle - lodret lufttemperaturdifferens.
- Varme eller kolde fødder forårsaget af ubehagelig gulvtemperatur.

INFOBOKS:

Det er vigtigt at huske, at kun når både de lokale og generelle termiske komfortparametre er undersøgt, kan kvaliteten af det termiske indeklima bedømmes!

Træk

Hvis driftspersonalet i kontorbygninger skal nævne den mest almindelige klage, vil de sige, at det er klage over træk. Forskning har vist, at mennesker faktisk ikke kan mærke selve lufthastigheden. Til gengæld kan mennesker mærke temperaturændringer på hudoverfladen. Træk, med uregelmæssige luftbevægelser, der ændrer sig i størrelse og/eller retning, vil netop

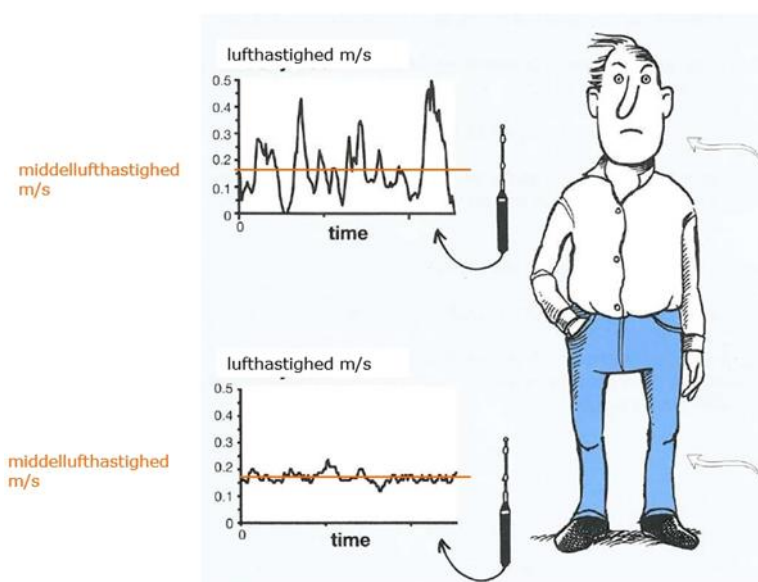
medføre ændringer i hudens overfladetemperatur, som føles ubehageligt. Mennesker er mest følsomme over for træk i de afklædte dele af kroppen som ansigt, nakke, ankler, arme og ben. Forskning har også vist, at træk kan mærkes også ved ret lave lufthastigheder, når lufttemperaturen er under 23 °C. Risikoen for træk bliver mindre ved højere lufttemperaturer. Varmetab fra huden forårsaget af træk er afhængig af den gennemsnitlige lufthastighed, såvel som såkaldt turbulens i luftstrømmen og lufttemperaturen. En høj turbulent luftstrøm mærkes som mere irriterende end en lav turbulent luftstrøm, selv om de resulterer i samme varmetab gennem hudoverfalden. Luftstrømmens turbulens vurderes kvantitativt med en såkaldt turbulensintensitet, se Ligning 1-6. Figur 1-13 illustrerer forskellen mellem lufthastighedsmålinger med henholdsvis høj og lav turbulensintensitet.

$$Tu = 100 \cdot \frac{STD_v}{\bar{v}_a}$$

Ligning 1-6

INFOBOKS:

Det er svært at påvirke luftstrømmens turbulens i praksis. Derfor er det vigtigt at holde lufthastigheden lav for at minimere klager over træk.



Figur 1-13 Forskellen på turbulens intensitet på målt lufthastighed. Kilde: baseret på illustration fra Brüel&Kjær (1996)

Model for vurdering af trækrisiko

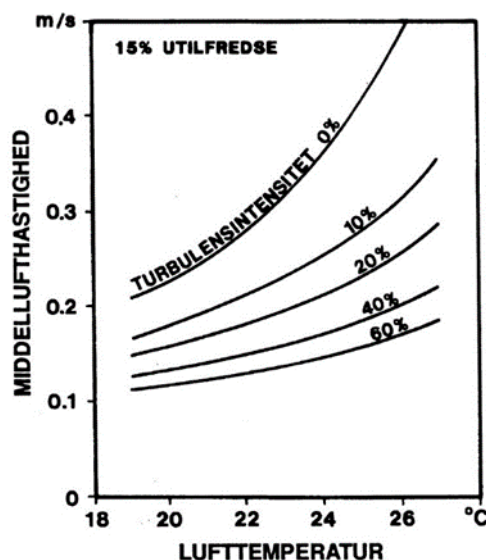
En model for vurdering af procentdelen af personer, der forventes at være utilfredse på grund af træk (DR – Draught Rating), er, lige som PMV-PPD-modellen udarbejdet på baggrund af forsøg i klimakamre. DR-indekset kan beregnes ved hjælp af Ligning 1-7:

$$DR = (34 - t_a) \cdot (\bar{v}_a - 0,05)^{0,62} \cdot (0,37 \cdot \bar{v}_a \cdot Tu + 3,14)$$

Ligning 1-7

Modellen bruges i praksis til at stille krav til middellufthastigheden. Figur 1-14 kommer fra dansk standard DS 474 og viser tilladte middellufthastigheder for at holde $DR \leq 15\%$. I rum

ventileret med opblandingsventilation kan der generelt forventes $T_u = 40\%$. Derfor bruges denne værdi i praksis, hvis konkret information vedrørende turbulensintensiteten ikke er tilgængelig.



Figur 1-14 Tilladte middellufthastigheder som funktion af lufttemperatur. Kilde: Dansk Standard (1993)

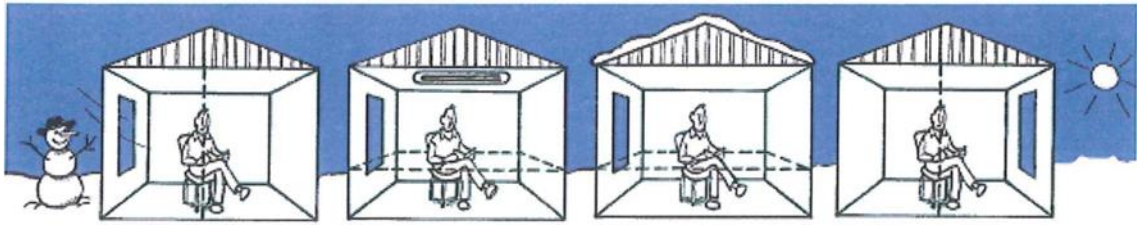
Strålingsasymmetri

Asymmetrisk stråling kan resultere i termisk ubehag. Et sådant ubehag oplever for eksempel en person, der sidder ved siden af et gammelt vindue, som er dårligt isoleret (Figur 1-15).

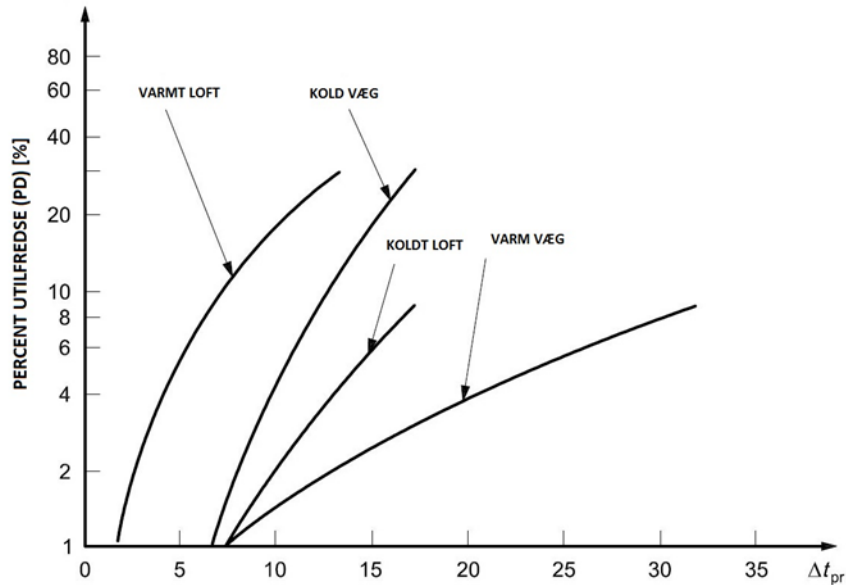
Strålingsasymmetri kan også stamme fra en varm flade, for eksempel et opvarmet loft eller en radiator. Ligesom træk, resulterer også strålingsasymmetri i lokal afkøling eller opvarmning af huden, som de fleste oplever som ubehag. Strålingsasymmetri er defineret som forskellen mellem overfladetemperatur (Plane Radiant Temperature - stråletemperaturasymmetri) på to sider af et lille, fladt element – Δt_{pr} . Strålingsasymmetri kan opnås på to måder. Ved at måle Δt_{pr} med en speciel sensor, eller ved at måle temperaturen på alle de omgivende overflader og derefter bruge beregningsmetoden som beskrevet for eksempel i Hansen et al. (2006). Forsøg i klimakamre har vist, at varme lofter og kolde vinduer giver det største ubehag, mens kolde lofter og varme vægge giver det mindste ubehag. Under disse forsøg blev alle de andre overflader i rummet og luften holdt ved samme temperatur. Figur 1-16 viser resultater fra disse forsøg, der muliggør at bestemme procent utilfredse på grund af Strålingsasymmetri ved brug af Δt_{pr} .

INFOBOKS:

Det er vigtigt for praksis, at det generelt er svært for mennesker at kende forskel på diskomfort forårsaget af strålingsasymmetri og træk. Derfor bør begge dele altid undersøges, når klager over "træk" opstår på arbejdspladsen.



Figur 1-15 Forskellige typer af strålingsasymmetri. Kilde: Brüel&Kjær (1996)



Figur 1-16 Procent utilfredse med strålingsasymmetri fra forskellige flader. Kilde: Dansk Standard (2006)

DS 474 (Dansk Standard 1993) anbefaler stråletemperatursasymmetri $\Delta t_{pr} < 10$ °C ved vinduer og andre kolde vertikale overflader samt $\Delta t_{pr} < 5$ °C ved varmt loft.

Lodret lufttemperaturdifferens

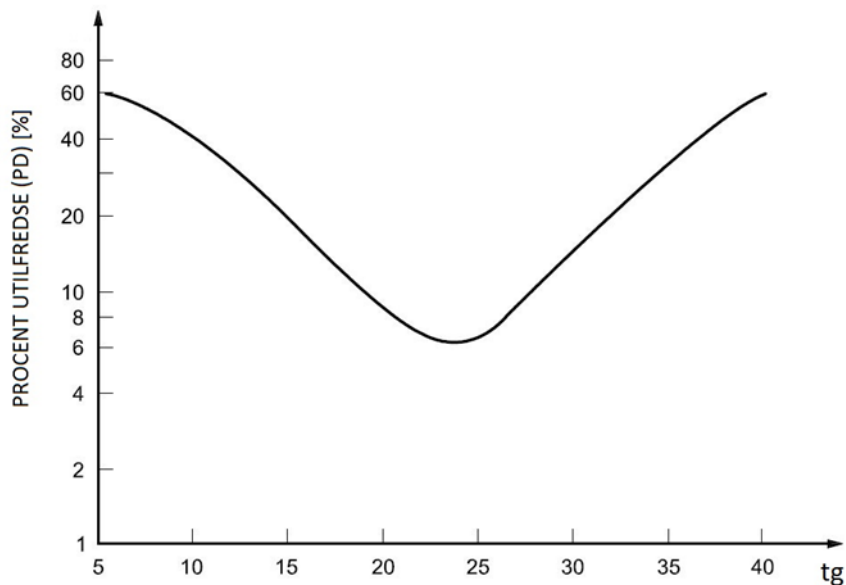
Generelt kan mennesker ikke lide at have det varmt ved hovedet og koldt ved fødderne, uanset om det skyldes stråling eller konvektion. Derfor er det vigtigt, at den vertikale lufttemperaturforskel – forskellen mellem lufttemperaturen på ankelniveauet og lufttemperaturen på halsniveau ($\Delta t_{a,v}$) – ikke overskrider komfortable grænser. Disse grænser er undersøgt i en række termiske forsøg og viser at en lufttemperaturforskel på 3 °C mellem hoved og fødder giver 5 % af utilfredse personer, der har en stillesiddende aktivitet.

INFOBOKS:

DS 474 anbefaler en forskel i vertikal lufttemperatur mellem 1,1 m og 0,1 m over gulvet $\Delta t_{a,v} < 3$ °C. Ved måling af lufttemperaturforskelle er det vigtigt at bruge en føler, der er beskyttet mod stråling. Dette sikrer, at det er lufttemperaturen, der måles, og ikke en udefineret kombination af luft- og stråletemperatur.

Gulvtemperatur

For høj eller for lav gulvtemperatur kan også føre til ubehag. For personer, der bærer indendørs sko med tynd sål er det gulvets overfladetemperatur (t_g), der har betydning for komfort. I bygninger, hvor mennesker går med bare fødder, er det til gengæld gulvmaterialet, der har betydning for komforten. Der findes en ligning, der beskriver sammenhæng mellem gulvtemperatur og antal utilfredse på grund af for varme eller for kolde fødder bestemt i indeklimaforsøg gennemført med termisk neutrale, siddende eller stående personer. Figur 1-17 illustrerer sammenhængen. I praksis skal gulvets overfladetemperatur holdes inden for følgende grænser: $19\text{ °C} < t_g < 26\text{ °C}$.



Figur 1-17 Procent utilfredse med gulvtemperatur. Kilde: Dansk Standard (2006)

1.7. Krav, målsætninger og standarder

I Danmark er der fastsat en række krav og anbefalinger vedrørende det termiske og atmosfæriske indeklima for forskellige bygningstyper. Disse bygningstyper udgør enfamiliehuse, lejligheder, kontorer, undervisningsbygninger, hospitaler, hoteller og restauranter, sportsfaciliteter samt erhvervsbygninger.

Det er primært Byggeloven, der udspecificerer krav til indeklima i bygninger. Byggelovens regler og principper detaljeres i Bygningsreglementet (BR18 2018):

<http://bygningsreglementet.dk>, der skal bruges i forbindelse med projektering og opførelse af bygninger. Bygningsreglementet beskriver blandt andet, hvordan et byggeri håndværksmæssigt skal udføres korrekt, samt teknisk og sikkerhedsmæssigt forsvarligt. Bygningsreglementet skal altid følges, med mindre der er tale om dispensation. Alle ansøgninger om byggetilladelser behandles, så de overholder kravene i bygningsreglementet.

Med hensyn til indeklima på arbejdspladser er det Arbejds miljølovgivningen, der gælder for alle arbejdspladser i Danmark og det er Arbejdstilsynet (AT – <https://arbejdstilsynet.dk>), der varetager den daglige administration og udgiver såkaldte vejledninger, der præciserer kravene for bestemte områder, herunder indeklima. I forbindelse med indeklimaet kan følgende vejledninger nævnes: *At-vejledning A.1.2 Indeklima*, *At-vejledning A.1.12 Temperatur i arbejdsrum på faste arbejdssteder*, *At-vejledning A.1.1 Ventilation på faste arbejdspladser*. Arbejdstilsynet har ansvaret for at føre tilsyn med virksomheder for at sikre, at de ansatte har et godt indeklima. Tilsynet gennemføres ved en APV (arbejdspladsvurdering), som er med til at skabe et sikkert, sundt og udviklende arbejdsmiljø.

Både Bygningsreglementet og Arbejdstilsynet refererer i sine meddelelser til en række danske standarder, der giver detaljerede anbefalinger vedrørende forskellige aspekter af indeklima (termisk komfort, luftkvalitet og ventilation, dagslys og belysning, m.m.). Danske standarder er udgivet af Dansk Standard (www.ds.dk). En standard beskrives som: ”et dokument til fælles og gentagen anvendelse, der giver regler, retningslinjer eller karakteristiske træk ved aktiviteter eller ved resultaterne af disse. Dokumentet er fastlagt ved konsensus og vedtaget af et anerkendt organ. Hensigten er at opnå optimal orden i en given sammenhæng”. Det er som udgangspunkt frivilligt at benytte en standard, men der er enkelte undtagelser, hvor standarden skal efterleves. For eksempel når love eller direktiver påbyder, at bestemte standarder skal følges. Tabel 1-4 præsenterer et overblik over nuværende krav/anbefalinger ifølge ovennævnte dokumenter.

Med hensyn til det termiske og atmosfæriske indeklima henviser Bygningsreglementet til følgende standarder:

- *DS 474 ”DS 474 Norm for specifikation af termisk indeklima”* der skal bruges i projekteringsfasen. Derudover indeholder normen også anbefalinger vedrørende vurdering af indeklimaet i bygningens driftsfase samt mulige overskridelser af grænseværdier.
- *DS/EN ISO 7730 Ergonomi inden for termisk miljø - Analytisk bestemmelse og fortolkning af termisk komfort ved beregning af PMV- og PPD-indekser og lokale termisk komfortkriterier.*
- *DS 447 Ventilation i bygninger – Mekaniske, naturlige og hybride ventilationsystemer.*

Desuden findes der også to andre relevante standarder der ikke direkte nævnes i Bygningsreglementet:

Standard *DS/EN 15 251 "Input-parametre til indeklimaet ved design og bestemmelse af bygningers energimæssige ydeevne vedrørende indendørs luftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustik"*. Standarden kan bruges til projektering samt verificering af bygningens funktionalitet med numeriske simuleringer eller målinger, men dens brug er ikke påkrævet af Bygningsreglementet.

Standard DS 3033 (2011) "Frivillig klassificering af indeklimaets kvalitet i boliger, skoler, daginstitutioner og kontorer" er målrettet bygningsejere og brugere. Standarden indeholder grundlaget for en ny, frivillig mærkningsordning der skal hjælpe til at synliggøre indeklimaets kvalitet. Klassificering ifølge standarden skal foregå på grund af tekniske vurderinger samt målinger der foretages af certificerede personer. Dansk Standard er ansvarlig for certificeringen.

Standarden arbejder med følgende parametre, der har størst betydning for brugernes sundhed og komfort på kort eller langt sigt.

- Ventilationsrate
- CO₂-koncentration
- Termiske forhold
- Radon
- Formaldehyd
- Partikler
- Fugt/skimmelsvampe
- Dagslys og kunstig belysning
- Akustiske forhold

I boliger medtages akustiske forhold ikke. Herudover, efter en grundig analyse og vurdering af indeklimaets kvalitet, tildeles bygningen en af fem indeklimaklasser, se Tabel 1-4.

Tabel 1-4 Opsummering af krav til det termiske og atmosfæriske indeklima (luftkvalitet) i dansk kontorbyggeri

		Generelt termisk indeklima			
Krav/vejledning	Brug	Rumtemperatur(*)	Luftfugtighed	Luftkvalitet	Overskridelser af krav og andre noter/ bemærkninger
Arbejdstilsynet	Bygningsdrift	Ved stillesiddende og stillestående arbejde skal rumtemperaturen ligge mellem 18 °C og 25 °C, bedst ca. ved 21-22°C. Temperaturen ved stillesiddende arbejde og normale klima- og arbejdsforhold må ikke overstige 25°C.	Der anbefales, at den relative luftfugtighed (RF) normalt bør ligge mellem 25 % og 60 % (lavest om vinteren og højest om sommeren)	Koncentration af kuldioxid (CO ₂) må maks. være 1000 ppm	Bør ikke overskrides. Under særlige forhold fx hedebløge må der accepteres højere temperatur.
Bygningsreglement (BR18)	Projektering	Henviser til DS 474	Henviser til DS 474	Koncentration af kuldioxid (CO ₂) må maks. være 900 ppm, hvis byggeriet er opført efter Bygningsklasse 2020	Bygherren fastlægger et maksimalt antal af timer pr. år, hvor temperaturkraverne må overskrides.
DS474(**)	Projektering + bygningsdrift	Rumtemperaturintervaller, der er acceptable for mindst 90 % af siddende personer med almindelig beklædning svarende til årstiden: • Vinterforhold: 20 °C – 24 °C • Sommerforhold: 23 °C – 26 °C	Intet krav	Ikke relevant	Temperatur må højst være > 26 °C i 100 timer/år og > 27 °C i 25 timer/år. Der findes også krav mht. lokale påvirkninger (lufthastighed, stråletemperaturasymmetri, mm.) i DS 474.
DS/EN 15251(**)	Projektering + bygningsdrift	Standarden fastlægger krav for fire forskellige indeklimaklasser: Klasse I (bygninger til særlig følsomme personer) • Vinterforhold: 21 – 23 °C • Sommerforhold: 23,5 - 25,5 °C Klasse II (bygninger med normale forventninger til indeklima) • Vinterforhold: 20 - 24 °C • Sommerforhold: 23 - 26 °C Klasse III (lave forventninger, acceptabelt i eksisterende bygninger) • Vinterforhold: 19 – 25 °C • Sommerforhold: 22 - 27 °C Klasse VI (uacceptabelt) • Vinterforhold: < 19 °C • Sommerforhold: > 27 °C	Det maksimale vandindhold i fugtig luft $x = 12 \text{ g/kg}$ Anbefalende værdier for relativt luftfugtighed: Klasse I (bygninger til særlig følsomme personer) • 30 % – 50 % Klasse II (bygninger med normale forventninger til indeklima) • 25 % – 60 % Klasse III (lave forventninger, acceptabelt i eksisterende bygninger) • 20 % – 70 % Klasse VI (uacceptabelt) • < 20 % og > 70 %	Den anbefalende koncentration af kuldioxid (CO ₂): Klasse I (bygninger til særlig følsomme personer) • 750 ppm Klasse II (bygninger med normale forventninger til indeklima) • 900 ppm Klasse III (lave forventninger, acceptabelt i eksisterende bygninger) • 1200 ppm Klasse VI (uacceptabelt) • > 1200 ppm	Der anbefales at grænseværdier for bestemt klasse må maks. overskrides i 5 % af brugstid.
DS 3033	Bygningsdrift (projektering)	Standarden udspecificerer fem kvalitetsklasser (A++, A+, A, B, C) hvor A++ er den bedste og C er den dårligste. Klasse A svarer til kraverne fra Bygningsreglementet. For mindre kontorbygninger (<600 m ²) vurderes de faktorer der påvirker indeklima (rudetyper, varmeanlæg, solafskærmning, osv.), i store kontorbygninger (>600 m ²) bruges målinger.			I op til 10 % af rummene kan accepteres mindre afvigelser fra kriterierne.

(*) I alle standarder repræsenteres rumtemperatur med operativ temperatur.

(**) Temperaturgrænser er beregnet for en voksen person med aktivitetsniveau 1,2 met og beklædningsisolans 1,0 clo om vinteren og 0,5 om sommeren.

I Bygningsreglementet er der fastsat et specifikt krav for det termiske indeklima i boliger. Her må temperaturen maksimalt overstige 27 °C i 100 timer og 28 °C i 25 timer pr. år. For andre bygninger end boliger, dette inkluderer således også kontorbyggeri, er det bygherren der vælger at fastlægge et maksimalt antal af timer per år, hvor en operativ temperatur på 26 °C og 27 °C må overskrides. Her definerer Bygningsreglementet så to grænser, og bygherren skal vurdere, hvor mange timer medarbejdere i bygningen må være udsat for diskomfort. Bygherren kan også vælge at bruge den europæiske standard DS/EN 15251 (Dansk Standard 2007), som er del af det danske standardsystem, for at stille mere præcise krav. Standarden arbejder med 4 forskellige klasser af indeklima:

Klasse 1 imødekommer et højt forventet indeklimaniveau. Denne kategori anbefales til personer, der har brug for mere plads såsom meget følsomme og skrøbelige personer med særlige krav, eksempelvis handicappede, syge, meget små børn og ældre personer.

Klasse 2 imødekommer et normalt forventet indeklima niveau og bør bruges til nybyggerier og renoverede bygninger.

Klasse 3 imødekommer et acceptabelt, moderat niveau af forventning og kan anvendes til eksisterende bygninger.

Klasse 4 repræsenterer uacceptabel indeklima og gør sig kun gældende for en begrænset del af året.

Hvis der i praksis tages udgangspunkt i anbefalingerne i DS/EN 15251, bør værdierne i klasse 2 anvendes, da disse imødekommer et normalt forventet indeklimaniveau medmindre andre kategorier stemmer overens med det pågældende indeklima, som ønskes bestemt.

Det er vigtigt at nævne, at overnævnte krav er baseret på en PMV/PPD-model. Modellen er baseret på personens varmebalance og er derfor afhængig af de seks indeklimaparametre (se Tabel 1-2). For at fastlægge temperatur-komfort-grænser antages der et bestemt aktivitetsniveau og beklædningsisolans. Aktivitetsniveauet skønnes ifølge Tabel 1-3. Det er meget svært at estimere beklædningsisolansen, fordi det ikke kun er vejrforhold, folk klæder sig efter. Der er en række andre faktorer, som kan være lige så vigtige som vejrudsigten. For eksempel ”dress code” i firmaet, mode eller personlige præferencer. Både de danske og internationale standarder estimerer at typisk vinterbeklædning svarer til isolansen 1,0 (for eksempel jakkesæt med vest). Typisk sommerbeklædning skønnes til at være 0,5 clo (lette bukser og skjorte eller t-shirt med korte ærmer). Det er vigtigt, at førnævnte antagelser tilpasses hver enkelt projekt/bygning, se flere detaljer vedrørende dette i afsnit 1.8 om indeklima i praksis.

DS/EN 15251 (Dansk Standard 2007) angiver både projekteringsværdier og anbefaler temperaturgrænser for det termiske indeklima. Projekteringsværdierne er angivet som sætpunkter og antages ved dimensionering af opvarmning, køling og ventilation; se Tabel A.2 i standarden. De anbefalede temperaturgrænser (se Tabel 1-4) anvendes ved analyse af bygningens præstation med målinger eller dynamiske simuleringer.

1.8. Analyse af indeklima i praksis

De ansvarlige for drift af ventilations-, varme- og køleanlæg oplever næsten hver dag, at brugere klager over indeklimaet. Disse klager bør der reageres på. I den daglige drift er det ikke nødvendigt at ringe efter en certificeret indeklimakonsulent. Det er vigtigt at undersøge indeklimaforhold i den del af bygningen, hvor utilfredsheden opstår, og danne sig en kvalificeret vurdering af situationen. Endvidere, selv om der ikke kommer klager over indeklimaet, er det vigtigt at overvåge situationen og analysere indeklima parametre for at identificere optimeringsmuligheder. Det bedste er, hvis både indeklimaparametre og data vedrørende drift af forskellige systemer analyseres. Figur 1-18 viser et eksempel - driftsdata for termoaktivt dækssystem (TAD) i en stor kontorbygning. Udvikling af rumtemperatur kan følges sammen med systemets tilstand, fremløbstemperatur og overfladetemperatur på gulvet.

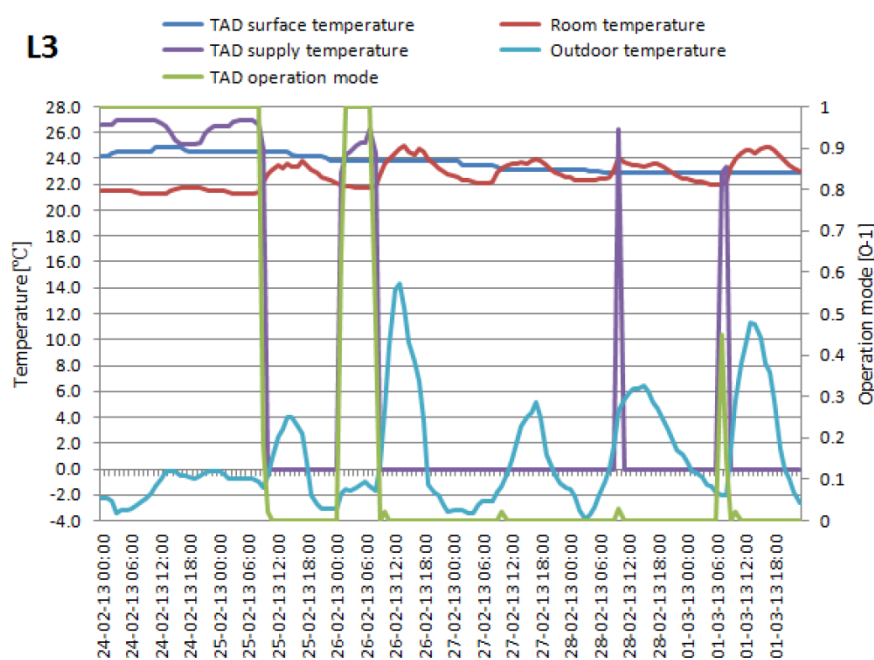


Figure 52: Illustration of a weekly operation control used in location L3, 24th of February 2013 – 3rd of Marts 2013.

Figur 1-18 Drift data for gulvvarme- og køling system (TAD – termoaktiv dæk) i en kontor bygning. Kilde: Hansen (2013)

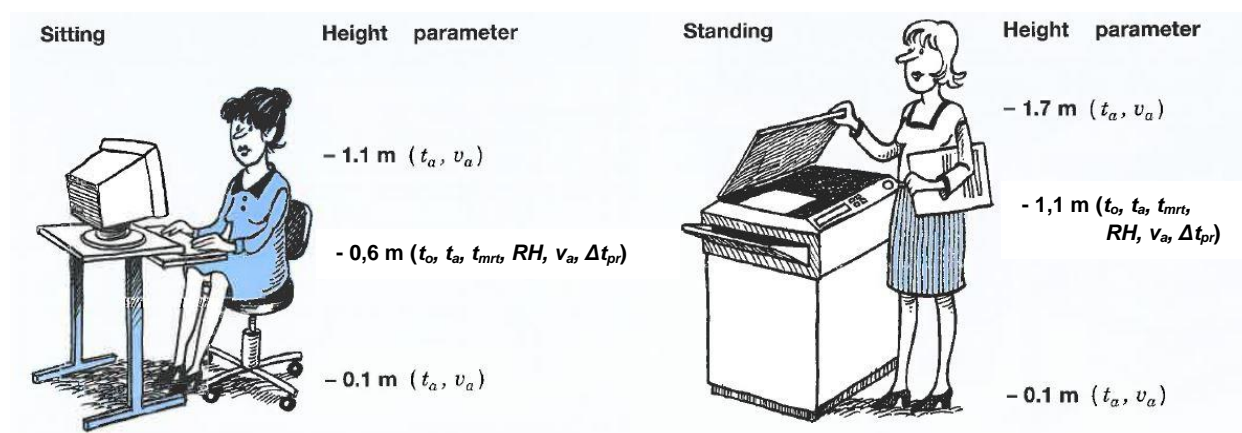
I de næste afsnit beskrives forskellige metoder til opsamling og visualisering af indeklimadata.

Detaljerede målinger ifølge standarder

De standarder, der nævnes i afsnit 1.7, specificerer krav og anbefalinger til målinger af indeklima. Herudover bruges også standard ISO 7726 (Dansk Standard 2001), der specificerer krav til måleapparater og placering af sensorer. DS 474 (Dansk Standard 1993) giver en enkelt vejledning til kontrol af termisk indeklima:

”Målingerne skal udføres så de dækker både de mest kritiske forhold og typiske forhold. De mest kritiske steder i opholdszonen er de steder, hvor der forventes de højeste og laveste operative temperaturer, største lufthastigheder, største strålingstemperatursymmetrier mv. På steder, hvor personer opholder sig siddende, måles normalt i højderne 0,1, 0,6 og 1,1 m over gulv, og hvor personer opholder sig stående, i højderne 0,1, 1,1 og 1,7 m over gulv (Figur 1-19). I særlige tilfælde også i andre højder. Man bør tilstræbe at måle såvel under typiske som under

ekstreme forhold. Da det ikke altid er muligt at opnå de mest kritiske forhold, kan målinger udføres ved mindre kritiske forhold og kombineres med beregning, så de mest kritiske forhold dækkes. Instrumenter til måling af termisk indeklima bør vælges så de opfylder krav i ISO 7726. Herudover henvises til SBI-anvisning nr. 130, Måling af termisk indeklima, 1983”.



Figur 1-19 Højder for målinger af det termiske indeklima i kontor bygninger. Kilde: Brüel&Kjær (1996)

Tabel 1-5 opsummerer DS 474's anbefalinger vedrørende målinger af temperaturforhold. Tabel 1-6 giver overblik over måling af træk og fugtforhold.

Evaluering af indeklima på basis af data fra CTS-anlæg eller indeklimaloggere

Brug af data fra CTS

I mange tilfælde har driftspersonalet ikke det nødvendige udstyr og heller ikke tid til at foretage detaljerede målinger af de termiske forhold. Mange nuværende bygninger har CTS-anlæg der, ved siden af sin hovedfunktion, som er regulering af bygningens systemer, også tilbyder data vedrørende indeklima. I de fleste bygninger med CTS måles der rumtemperatur (Figur 1-21) i de enkelte rum eller i det mindste i hver zone (der kan være flere zoner per etage – etagen kan være delt ifølge verdenshjørne osv.). I mange tilfælde måles der også relativ luftfugtighed og CO₂-koncentration, som dog bruges til evaluering af det atmosfæriske indeklima. Ved brug af CTS-data er det vigtigt at huske, at følere typisk installeres på repræsentative steder i de forskellige rum/zoner. Det er derfor umuligt at få overblik over kritiske steder i bygningen med analyse af CTS-data. Yderligere skal det undersøges, om er det muligt at logge og downloade måledata fra systemet. Mange CTS-systemer logger ikke indeklimadata på en hensigtsmæssig måde. Brugeren skal først oprette såkaldte "trends". En trend er en gruppe af tidsserier med forskellige parametre (rumtemperatur, rumfugtighed, position af radiatorventil, osv.) der logges i et bestemt interval (hver 5. minut, hver time, osv.). I de fleste CTS-systemer er det muligt at visualisere trends som grafer eller tabeller, men der mangler værktøjer til videregående analyse. I de fleste tilfælde er det derfor nødvendigt at downloade trend-data og analysere dem separat, for eksempel i MS Excel eller MATLAB.

Tabel 1-5 Dokumentation af det termiske indeklima ifølge DS 474 - Temperaturforhold

Operativ temperatur	Den operative temperatur kan enten måles direkte eller beregnes på basis af måling af luft- og middelstrålingstemperatur. Ved direkte måling af den operative temperatur bør anvendes et instrument med ellipsoideformet føler (se Figur 1-20).
Lufttemperatur	For at reducere indflydelsen af stråling, når lufttemperaturen måles bør føleren gøres så lille som muligt, afskærms og eventuelt ventileres. Et eksempel på lufttemperaturføler vises i Figur 1-20.
Middelstrålingstemperatur	Middelstrålingstemperaturen kan ikke måles direkte, men den kan beregnes: -på grund af måling af t_a of v_a sammen med t_o -som vægtet middelværdi af den plane strålingstemperatur målt i seks hovedretninger (DS/ISO 7736) -ud fra måling af de omgivende fladers temperaturer når vinkelforholdene til fladerne kendes (se DS/ISO 7736).
Strålingstemperaturasymmetri	Δt_{pr} kan måles direkte med særlige instrumenter eller kan beregnes ud fra måling af de omgivende fladers temperaturer, når vinkelforholdene til fladerne kendes (DS/EN ISO 7730)
Overfaldetemperatur	Ved måling af overfladetemperatur med kontaktermometer bør der sikres god termisk kontakt mellem føler og overflade. Der skal tages hensyn til, at føleren i sig selv kan ændre temperaturen af målestedet. Ved berøringsfri måling vil overfladens emissivitet oftest være nær 1,0.

Tabel 1-6 Dokumentation af det termiske indeklima ifølge DS 474 – Træk og fugtforhold

Middellufthastighed	Ved måling af lufthastigheder bør anvendes instrumenter, der kan give middelværdier over længere perioder (ca. 3 min). Normalt bør der ikke anvendes retningsbestemte følere. Lufthastighedens tidsmæssige variation kan angives ved standardafgivelsen eller turbulensintensiteten. De mest kritiske steder i opholdszonen kan fx lokaliseres med røg. Da mennesker er mest følsomme for træk ved ankler og nakke bør der altid måles mindst i disse højder (se Figur 1-19).
Turbulensintensitet	Turbulensintensiteten bør måles over samme periode som middellufthastigheden. De anvendte instrumenter bør have så lille tidskonstant som muligt og kunne registrere svingninger i lufthastighed op til 1,0 Hz.
Fugtforhold	Der er normalt kun ringe variation i luftfugtigheden i et rum, hvorfor det normalt kun er nødvendigt at måle i et enkelt punkt i rummet. Da luftfugtigheden kun har ringe betydning for den termiske komfort, kan kontrol normalt udelades.



Figur 1-20: Venstre: Føler til direkte målinger af operativ temperatur. Højre: Føler til målinger af lufthastighed. Kilde: forfatteren



Figur 1-21 Temperatursensor til væginstallation. Kilde: forfatteren

Brug af indeklimadataloggere

I mindre bygninger etableres ofte ikke avanceret CTS-system der tilbyder data logging. Med nuværende fremdrift af *internet of things* (IoT) findes der stadigvæk muligheder for at udføre indeklimamålinger ved brug af indeklimaloggere, der er bredt tilgængelige og kan købes på internettet eller i byggemarkeder osv. IC-meter (www.ic-meter.com) eller Netatmo (www.netatmo.com) er bare to eksempler på indeklimaloggere, der har opnået stor popularitet for nylig (se Figur 1-22).

Disse loggere tilbyder som regel måling af temperatur, relativ luftfugtighed, CO₂ og i nogle tilfælde også illuminance ("lux"-niveau) eller flygtige organiske forbindelser (VOC).

Nøjagtigheden af disse målere er ikke på niveau med de professionelle måleapparater, der bruges til forskning eller detaljerede undersøgelser udført af indeklimakonsulenter, men ovennævnte målere fra IC-meter og Netatmo er faktisk eksempler på, at der findes kommercielle produkter, der tilbyder meget rimelig nøjagtighed. De fleste indeklimaloggere tilbyder mulighed for trådløs dataforbindelse til "cloud", og måledata er derfor tilgængelige 24/7 med brug af mobil-app eller almindelig PC. Det er vigtigt at nævne, at lige som i tilfælde af CTS-systemer tilbyder dataloggere ikke værktøjer til dataanalyse. Mobil-app eller browserbaseret adgang til data muliggør som regel kun visning af data som tidsserier eller søjlediagrammer. I nogle tilfælde bruges også "trafiklys"-visning, hvor data farves rød, gul eller grøn afhængig af tidligere definerede grænseværdier. Eksport af data til tekstformat er muligt for de fleste loggere. Bagefter kan der foretages analyse på den samme måde som med CTS-data.



Figur 1-22 Eksempel på kommercielt tilgængelige indeklimaloggere: IC-meter (til venstre) og Netatmo (til højre). Kilde: forfatteren

Gode råd ved brug af CTS- eller indeklimaloggeranalyse af indeklima

1. Lær din bygning at kende – identificer kritiske og repræsentative steder. Identificer hvor CTS-følerne er placeret. Repræsenterer følerne kritiske eller repræsentative steder i bygningen? Brug plantegning af bygningen (Figur 1-23). Hvis du bruger indeklimaloggere, så fordel dem så både kritiske og repræsentative steder i bygningen bliver dækket. Fordelen ved loggere er, at de ikke er skruet fast til bygningens vægge, så de kan placeres tæt på arbejdspladser.
2. Lær dit CTS-system at kende, undersøg hvordan du kan logge data og hvordan data kan downloades. Husk, at nogle CTS-systemer komprimerer data efter et bestemt tidsrum for at spare plads på harddisken. For eksempel 1 minutters data komprimeres til 5 minutters data efter 1 måned, til 10 minutters data efter 3 måneder og til 1 times data efter 6 måneder. Det er kun 10 minutters data der kan stadigvæk bruges til en ordentlig indeklimaanalyse. Hvis du bruger loggere, så husk, at måleintervallet maksimum må være 10 minutter. Husk, at variablerne i CTS tit har uforståelige navne/koder. Det er vigtigt at lave en liste, der fortolker disse koder og relaterer dem til bygningens plantegninger.
3. Identificer, hvilke indeklimamålsætninger der skal bruges i bygningen. Er der nogle særlige krav? Findes der en indeklimastrategi for bygningen? Hvis ikke, bruges der dokumentation fra projekteringsfasen eller gældende standarder? Se Tabel 1-4.
4. Download data fra CTS, der dækker en tilstrækkelig tidsperiode – mindst 10 dage (se infoboks på denne side).
5. Brug af en af de metoder, der er beskrevet længere nede i dette kapitel til at danne dig overblik over indeklimaet.

INFOBOKS:

DS/EN 15 2512 anbefaler, at målinger skal foretages, hvor beboerne er vidende om at tilbringe det meste af deres tid og under repræsentative vejrforhold i kold og varm sæson. For vintersæsonen skal der måles når udendørstemperatur er mindre eller lige med gennemsnitstemperatur for de 3 koldeste måneder i året. For sommersæsonen skal målinger foretages når udendørstemperatur er højere eller lige med gennemsnitstemperatur for de 3 varmeste måneder i året med klar himmel. Måleperioden for alle målte parametre skal være lang nok til at være repræsentativ, for eksempel 10 dage.

Lufttemperatur i et rum kan bruges i langtidsmålinger. For at estimere operativ temperatur skal lufttemperaturen korrigeres for store varme eller kolde overflader.



Figur 1-23 Plantegning af en kontorbygning med afmærkede målepunkter; bygningen er delt i zoner – nord (N), syd (S), øst (E), vest (W). Målepunkter i midten af zonerne er repræsentative, målepunkter tæt på facaden eller i hjørner er kritiske steder. Kilde: Døi (2016)

Metoder til analyse

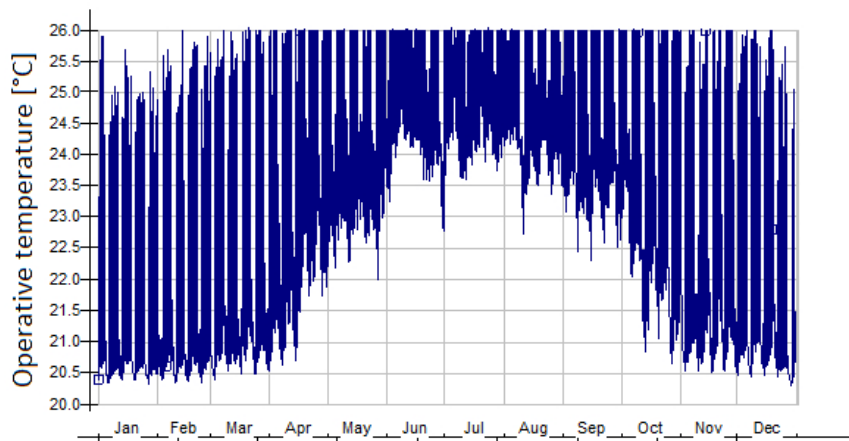
Indeklimamålinger kan visualiseres på forskellige måder. I hver tilfælde er formålet at undersøge, om indeklimaet i bygningen opfylder de tidligere definerede krav/målsætninger. Følgende tre metoder er nemme at bruge i praksis og giver driftspersonalet et klart overblik:

1. Tidsserie
2. "Carpet plot"
3. Varighedskurve

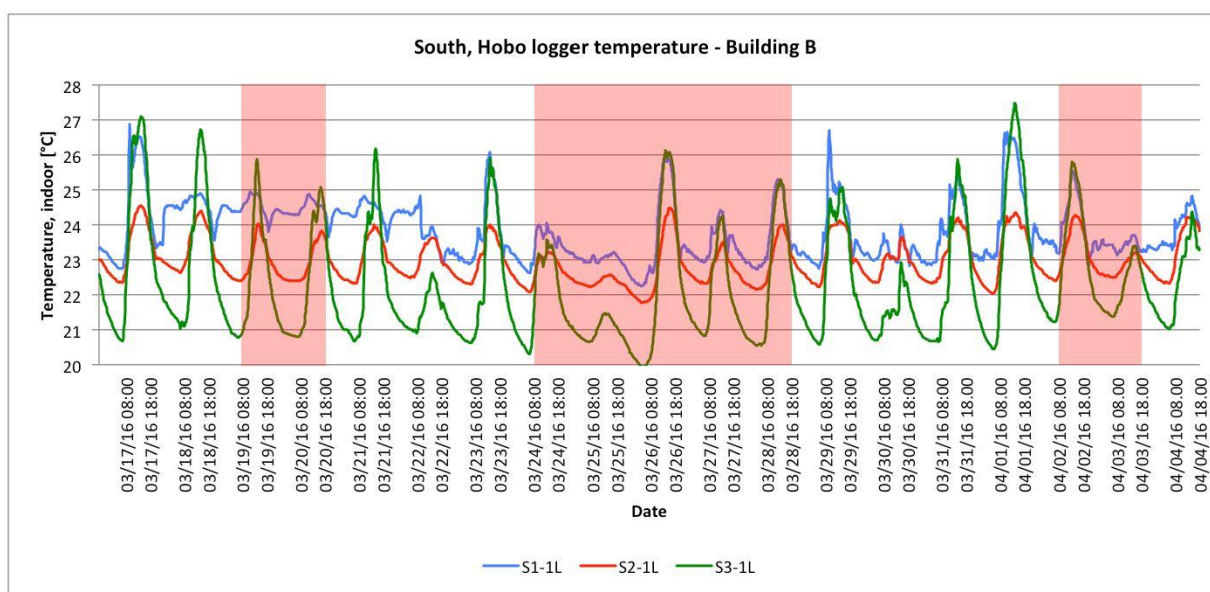
Tidsserie

Tidsserie er den nemmeste måde til datapræsentation. Der plottes tid på x-aksen, og den analyserede variabel på y-aksen. En tidsserie kan nemt fremstilles i forskellige databehandlingsprogrammer. Problemet med tidsserier er, at hvis man plottes data over en lang periode (flere måneder, et år osv.), bliver grafen meget uoverskuelig, og det er svært at udtrække værdifuld information af den. Figur 1-24 viser et eksempel på en sådan uoverskuelig tidsserie.

Det er klart fra grafen at den operative temperatur varierer meget i løbet af dagene. Grafen viser, at de store fluktuationer ("peaks") kommer regelmæssigt, men det er umuligt at se på hvilke tidspunkter om dagen. Ved brug af grafen kan man konstatere, at der er problemer med overophedning om vinteren, men det er svært at analysere temperaturudviklingen grundligt. Det er derfor bedre at bruge tidsserier til at fokusere på bestemte, korte perioder for at vise nogle karakteristiske mønstre i data. For eksempel temperaturudvikling i løbet af "typisk" uge i sommer eller vinter. Det er også vigtigt at tilføje flere informationer i grafen, der giver kontekst til de data, der analyseres. På Figur 1-25 findes også farvede områder, der indikerer weekender og helligdage ved siden af selve temperaturdata.



Figur 1-24 Eksempel på uhensigtsmæssigt præsentation af tidsserie. Kilde: forfatteren



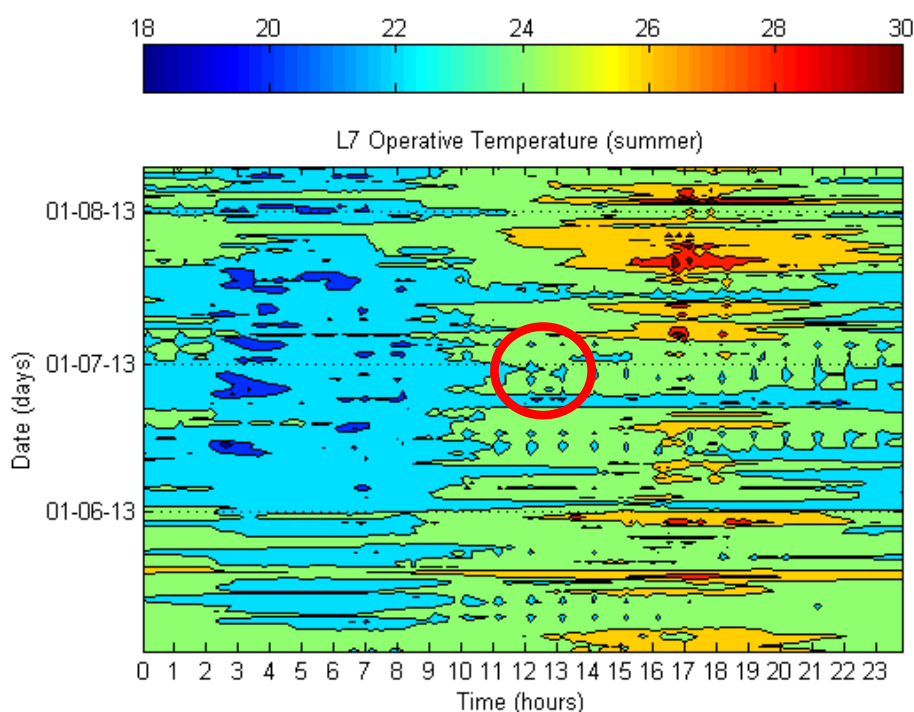
Figur 1-25 Passende anvendelse af tidsserie: Målinger af operativ temperatur fra sydvendte zoner i en kontorbygning, farvede områder indikerer weekender og helligdage; for placering af målepunkter i bygningen se Figur 1-23. Kilde: Døi (2016)

Ved brug af tidsserie på Figur 1-25 ses temperaturudviklingen i løbet af enkelte dage. Tidsserierne på grafen hører til et repræsentativt sted (S2-1L) og et kritisk sted (S1-1L) i kontor mod syd (se Figur 1-23) samt et kritisk sted i et syd-vestvendt hjørne af kontoret (S3-1L). Målinger fra et repræsentativt sted viser, at selvom temperaturen fluktueres omkring 1,5 K i løbet af arbejdsdagen, kommer den aldrig over 26 °C. Målinger fra et kritisk sted, en

arbejdsplads ved sydvendt facade, viser, at der er mindre temperaturfluktuation, men enkelte peaks højere end ved det repræsentative sted (på grund af højere solindfald). Yderligere er også det overordnede temperaturniveau omkring 0,5 K højere. Et kritisk sted i det vest-sydvendte hjørne af bygningen er karakteriseret af meget store temperaturfluktuationer, der skyldes både meget høj påvirkning fra solindfald og højere varmetab om natten forårsaget af kuldebroer.

”Carpet plot”

Carpet plot (tæppediagram) er en meget effektivt grafisk metode til visualisering af driftsrelaterede data. Døgntimerne vises på x-aksen, mens dato (dage) vises på y-aksen (omvendt disposition er også muligt). Den analyserede variabel visualiseres ved brug af farvekode/-skala. På Figur 1-26 vises den operative temperatur i storrums kontor i løbet af sommer. Figuren giver overblik over temperaturudvikling både i løbet af dagen og i løbet af hele sommersæsonen. Det er også muligt at se effekten af automatisk vinduesåbningskontrol (se temperaturmønster i den røde cirkel).



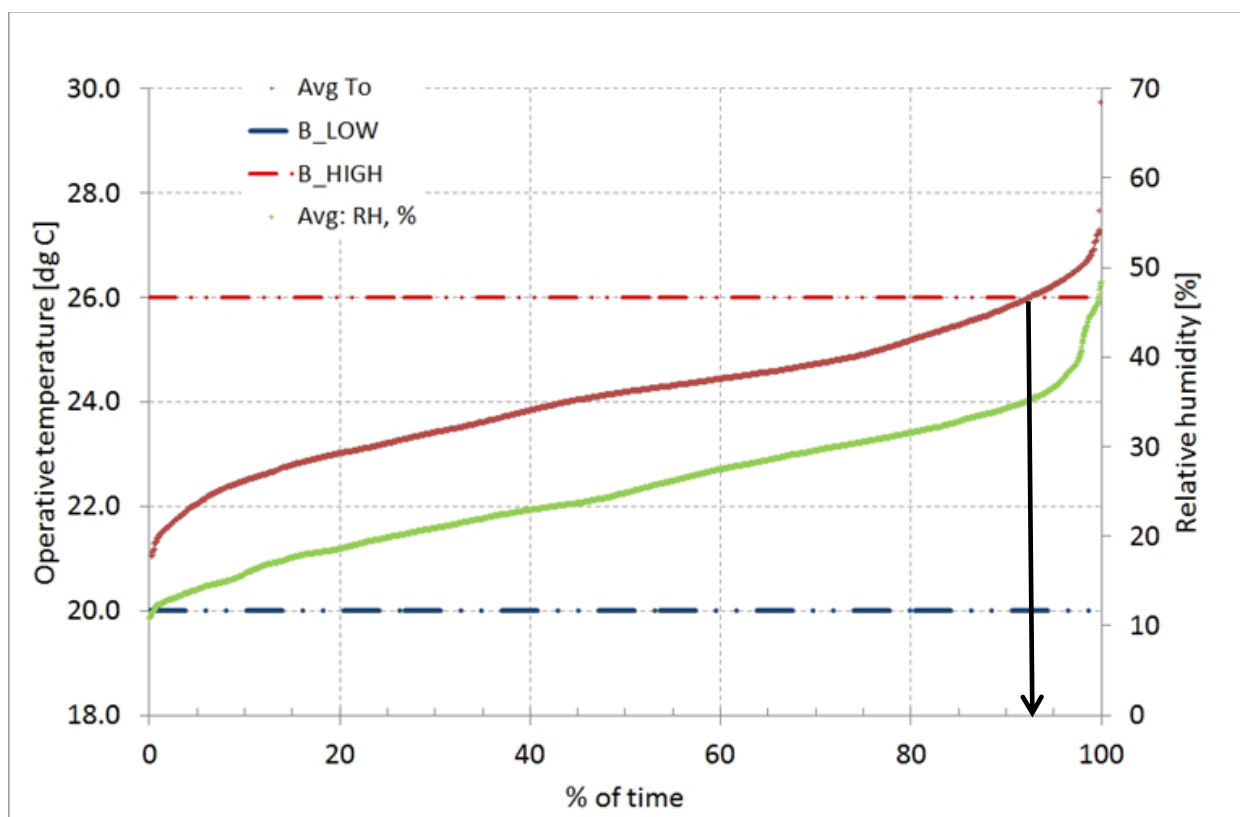
Figur 1-26 Et eksempel på ”carpet plot” – operativ temperatur i et storrums kontor. Kilde: Hansen (2013)

Carpet plot kan bruges til visualisering af forskellige driftsdata: temperatur, CO₂-koncentration, relativ luftfugtighed, luftmængder, position af spjæld eller ventiler, mm. En ulempe ved denne type af diagram er, at den er ikke nemt at fremstille i MS Excel og andre regneark-baserede programmer. Der findes ”scripts” i MATLAB, PHYTON eller andre programmeringssprog, der producerer carpet plots.

Varighedskurve

Varighedskurven er et nyttigt værktøj til at påvise, om bygningen opfylder påkrævede indeklimakrav. Varighedskurven repræsenterer en kumulativ fordeling af en udvalgt variabel (variable) i løbet af bestemt periode. Figur 1-27 viser varighedskurver for operativ temperatur og relativ luftfugtighed. På x-aksen præsenteres procent (%) af brugstid. De vandrette linjer viser

maksimum og minimum tilladt operativ temperatur. Det er tydeligt fra figuren, at temperaturforhold i bygningen er lige over grænsen med hensyn til krav fra DS/EN 15 251, der tillader overskridelse af komfortgrænser i maksimum 5 % af brugstid. Operative temperatur er under 26 °C i cirka 92,5 % af brugstiden.



Figur 1-27 Varighedskurve for operative temperatur (rød) og relativ luftfugtighed (grøn) i en kontorbygning; blå og røde linjer indikerer maksimum og minimum tilladt operativ temperatur.
Kilde: forfatteren

Varighedskurver kan nemt produceres i MS Excel, hvor der først importeres data fra CTS/indeklimateklogger. Efterfølgende tilføjes to kolonner. Den første kolonne skal indeholde et serienummer for hver bestemt datapunkt. I den anden kolonne beregnes en kumulativ procentdel tid (τ), som datapunktet repræsenterer i hele datasættet; se *Ligning 1-8*

$$\tau_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^{i=k} n_i} \cdot 100 [\%] \quad \text{Ligning 1-8}$$

hvor τ_i er en kumulativ procentdel af tiden i den i 'te datapunkt, n_i er et serienummer i den i 'te datapunkt og k er samlet antal af datapunkter i datasættet. Efterfølgende sorteres en kolonne med måleværdier for den analyserede variabel stigende og plottes på y-aksen sammen med τ på x-aksen.

1.9. Indeklimastrategi – et værktøj til indeklimabevist drift

En undersøgelse blandt driftspersonale i 23 danske virksomheder og offentlige institutioner, som er lavet som del af Endrin-projektet, viste, at der sjældent findes en klar og nedskrevet **indeklimastrategi**, der kan bruges både i den daglige drift og til langvarig evaluering af indeklimaforhold i bygningen. En indeklimastrategi skal indeholde de krav til indeklima, der blev aftalt mellem bygherren/ejeren og entreprenøren, udlejer og lejer osv. Disse krav skal reflektere ejernes/udlejernes aktuelle ønsker og præferencer, men den skal også tage hensyn til de aktiviteter og brugermønstre, der forventes i bygningen. Det er ikke hensigtsmæssigt bare at kopiere krav fra projekterings-/udbudsmaterialer for bygningen. Projekteringsfasen er en lang og kompliceret proces, og det er ikke sandsynlig, at den tager hensyn til ejernes/lejerens aktuelle behov.

En indeklimastrategi vil typisk være baseret på gældende standarder, Arbejdstilsynets vejledninger eller på lejernes/ejernes specifikke behov (i rum til arkiv med gamle papirdokumenter kræves eksempelvis en meget skarp kontrol af luftfugtighed osv.). Standarder fra Tabel 1-4 kan bruges til udvikling af indeklimastrategien. Det er vigtigt at der både defineres indeklimakrav og evalueringsmetoder til kontrol af deres overholdelse. Disse metoder skal indeholde regler vedrørende tolerance for overskridelse af definerede komfortgrænser. En uundværlig del af indeklimastrategien er desuden metoder til rapportering/kommunikation af evalueringsresultater til forskellige interessenter. Figur 1-28 Skematisk overblik over indhold af indeklimastrategi viser et forslag til struktur og indhold af indeklimastrategi.



Figur 1-28 Skematisk overblik over indhold af indeklimastrategi

Fortolkning af indeklimakrav i praksis

Som sagt er det ikke hensigtsmæssigt at kopiere projekteringskrav direkte i indeklimastrategien. Nedstående tekst giver to par eksempler, der illustrerer nødvendigheden af detaljeret vurdering af indeklimakrav, der bruges i indeklimastrategien.

I løbet af projekteringen bruges ofte en brugerprofil, der skal karakterisere brugere af bygningen. Problemet er, at der i praksis meget ofte bruges et standardeksempel fra DS 474 (Dansk Standard 1993), uden at der foregår yderlige diskussion om de faktiske formål med bygningen, brugeraktiviteter og selve de brugere, der skal opholde sig i bygningen. For eksempel fastsættes beklædningen i de fleste tilfælde til 1 clo om vinteren. Dette betyder, at der projekteres med temperaturinterval 20-24 °C om vinteren (maksimum 10 % utilfredse, se Tabel 1-4). Tidligere nævnte undersøgelse samt andre erfaringer fra praksis viser, at de faktiske temperaturer i virkeligheden tit befinder sig mellem 23-27 °C. Årsagen til, at lav-temperaturgrænsen ligger 3 K højere end planlagt, er ofte klager fra brugere, der ikke har beklædning, der svarer til 1 clo. En undersøgelse i danske kontorbygninger (Døi 2016) viste, at den gennemsnitlige beklædningsisolans var 0,8 clo incl. stol (0,65 clo ekskl. stol) i perioden mellem februar og april.

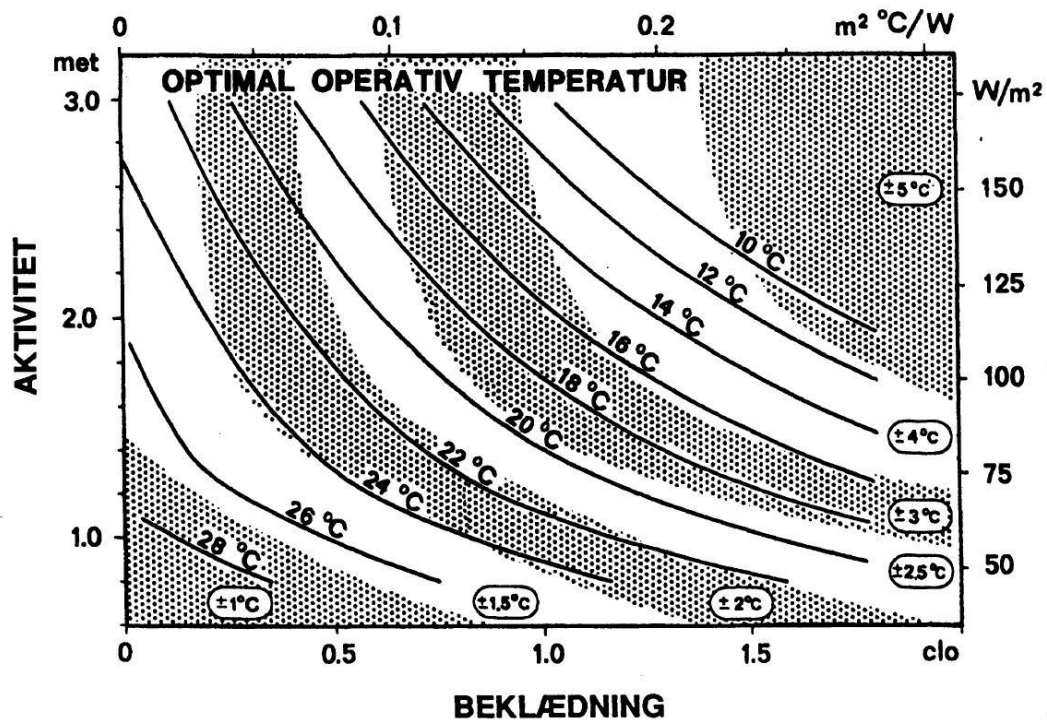
Det fornævnte demonstrerer, at indeklimastrategien skal tage hensyn til bygningens faktiske forhold. Det modsatte har konsekvenser enten for brugeres komfort eller for bygningens energiforbrug, fordi bygningen skal varmes op til højere temperatur end forudset i projekteringen.

Kontrol af det termiske indeklima i praksis

I størstedelen af projektering af danske kontorbygninger følges standarderne DS 474 eller DS/EN 15 251 (Dansk Standard 1993 og 2007). Der findes desværre mange eksempler i praksis, at bygningens præstation ikke svarer til projekteringen. Årsagen er standarden misforstået eller bruges forkert i løbet af projektering.

I vejledning til DS 474s afsnit 2.2 (Brugere og deres aktivitet) står der: *”Det bør altid specificeres, hvilke aktiviteter og hvilken beklædning der er forudsat i et givet lokale.”* Alligevel bruger mange rådgivere standardens eksempel, der beskriver brugere som en ”repræsentativ” person, der har aktivitetsniveau 1,2 met og beklædningsisolans svarende til 0,5 clo om sommeren og 1,0 clo om vinteren. Brug af fornævnte værdier leder til bestemte grænser for operativ temperatur (antal utilfredse skal være < 10%). I projekteringspraksis bruges eksemplet ofte uden videregående analyse. Når bygningen tages i brug, bruges der tilsvarende set-punkter til opvarmning- og køleanlæg. Problemet er, at selvom en gennemsnitlig beklædningsisolans hos de mennesker, der arbejder i bygningen, måske svarer til cirka 1,0 clo (og dette er heller ikke altid rigtigt) findes der også medarbejdere, hvis beklædningsisolans er så lav som 0,5 clo, selvom det er vinter. Mennesker med beklædning, der askiller sig fra gennemsnittet (typisk tilgodeses brugere i jakkesæt ikke om sommeren, mens brugere i let beklædning med fri nakke, arme eller ben ikke tilgodeses om vinteren), var ikke repræsenteret i projekteringsfasen, men i driftsfasen skal der tages hensyn til dem for at undgå klager.

Figur 1-29 viser optimum operativtemperatur som funktion af beklædning og aktivitetsniveau ved forventning af maks. 10 % af utilfredse. Figuren kan bruges som et hurtigt værktøj til at estimere, hvordan ændring af beklædning eller aktivitet påvirker komforttemperaturer. Med det samme skal der altid huskes, at det er alle seks indeklimaparametre, som beskrevet i sektion 1.5, der har indflydelse på termisk komfort. Diagram på Figur 1-29 er konstrueret for $\phi_a = 50\%$ og $v_a = 0.1$ m/s.



Figur 1-29 Optimum operativ temperatur som funktion af beklædning og aktivitetsniveau; med skravering er angivet acceptable temperaturvariationer, når højst 10 % må forventes at være utilfredse med det termiske indeklima; der antages $\phi_a = 50\%$ og $v_a = 0.1$ m/s. Kilde: Dansk Standard (1993)

Beklædnings effekt på komforttemperaturer

Lad os tage et eksempel. En undersøgelse af medarbejdernes beklædning i en kontorbygning for 600 medarbejdere i København viste, at medianen for vinterbeklædningsisolans var 0,86 clo med maksimum 1,08 clo og minimum 0,57 clo (inkl. stolens isolans).

Det skal beregnes, hvilke grænser for operative temperaturer, der skal bruges for at holde PMV-indeks $-0,5 < PMV < 0,5$ og dermed det maksimale antal af utilfredse-PPD $< 10\%$.

Der antages $\phi_a = 50\%$, $M = 1,2$ met og $v_a = 0.1$ m/s. Der bruges et beregningsværktøj "CBE Thermal Comfort Tool" - <http://comfort.cbe.berkeley.edu/> (Tyler et al. 2017) til at beregne operative temperaturer der svarer til $-0,5 < PMV < 0,5$ for ovennævnte beklædningsisolanser. Resultater opsummeres i Tabel 1-7.

Tabel 1-7 Resultater fra CBE beregningsværktøjet

I_{cl} [clo]	$t_{o \text{ min}}$ [°C]	$t_{o \text{ maks}}$ [°C]
0,50*	23,1	26,3
0,57	22,6	26,0
0,86	20,4	24,5
1,00*	19,4	23,8
1,08	18,7	23,4

*0,5 clo og 1,0 clo repræsenterer standardværdier, der bruges i DS/EN 15 251 og DS 474

Resultater viser, at hvis et eksempel fra DS 474 følges (der antages 1 clo om vinteren), og minimumtemperaturgrænsen sættes til 19,4 °C, bliver den minimale operative temperatur hele

3.2 K lavere end det minimum, der svarer til brugere med den mindste beklædningsisolans i bygningen - 0,57 clo. For at undgå klager og utilfredshed blandt medarbejdere er det derfor oplagt at sætte den minimale operative temperatur til det, der svarer til den minimale observerede beklædningsisolans, nemlig $t_{o \text{ min}} = 22,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Omvendt kan der forventes klager fra medarbejdere med beklædningsisolans over 1 clo (dem der går i jakkesæt), når temperaturen stiger over $24 \text{ }^\circ\text{C}$. Det er derfor oplagt at bruge $t_{o \text{ maks}}$ svarende til den maksimale beklædningsisolans som den øverste grænse, $t_{o \text{ maks}} = 23,4 \text{ }^\circ\text{C}$. I praksis vil man selvfølgelig runde de beregnede temperaturer op, men det er tydeligt, at temperaturområdet beregnet for en bygning fra overstående eksempel er ret smal – 0,8 K. Den tidligere nævnte Endrin-undersøgelse om indeklima og driftspraksis viste, at 40 % af det interviewede driftspersonale oplyste, at de bruger komforttemperaturområde svarende til $22\text{-}24 \text{ }^\circ\text{C}$ i deres bygninger. Hvis der skal defineres et komforttemperaturområde ifølge et eksempel fra DS 474, bruges der $20\text{-}26 \text{ }^\circ\text{C}$. Dette illustrerer, at klager presser driftspersonalet til at justere på set-punkter i deres bygninger. I vejledningen til DS 474 forudsættes, at brugere selv bidrager til opnåelse af termisk komfort ved at ”tilpasse beklædningen hensigtsmæssigt”. Dette kan være en god strategi for at nedbringe energiforbrug, fordi en stigning på 0,1 clo i beklædningsisolans har den samme effekt som 0,8 K stigning i operativ temperatur (McCullough et al. 1994). Dog er det vigtigt at nævne, at en sådan strategi skal være klart kommunikeret til medarbejdere i bygningen. Det er næsten nødvendigt at gøre den til en del af virksomhedens strategi med om bæredygtighed og reduktion af CO₂-udledning, hvilket sker meget sjældent.

INFOBOKS:

Det er ikke altid muligt at undersøge medarbejdernes beklædningsisolans i detaljer, men det er altid muligt at bruge komfortgrænser fra standarder nævnt i Tabel 1-4.

Det er vigtigt at huske, at grænseværdier for operativ temperatur behøver ikke falde sammen med set-punkter til opvarmning eller køling. Et eksempel kan være at i zoner mod syd i en bygning, hvor der mangler solafskærmning, bruges køle-set-punkt $24,5 \text{ }^\circ\text{C}$ for at undgå en temperaturstigning over $26 \text{ }^\circ\text{C}$ i løbet af en solrig eftermiddag.

Lufthastighed – en forsømt faktor

DS 474 antager, at der højst må være 15 % utilfredse på grund af træk. I DS/EN ISO 7730 (Dansk Standard 2006) arbejders der med < 10 %, < 20 % og < 30 % utilfredse for indeklimaklasser henholdsvis A, B og C. Standard DS/EN 15 251 arbejder ikke med lokal diskomfort og henviser til den fornævnte DS/EN ISO 7730. Standard DS 447 (Dansk Standard 2013) anbefaler direkte værdier af middellufthastighed, der bør bruges ved projektering. I praksis er det vigtigt at huske, at trækmodellen, der bruges i standarderne (se sektion 1.6), blev udarbejdet for mennesker, der udfører let siddende aktivitet og deres votering på såkaldt syv-punkts termisk komfortskala er tæt på ”neutralt” (se Figur 1-9). Herudover estimerer modellen følelsen af træk på nakken. Standard DS/EN 7730 angiver, at for arme og ben kan modellen have en tendens til at overvurdere følelsen af træk. Men erfaringer fra praksis viser, at følsomme brugere i let beklædning (med fri nakke, arme, ben og sko uden strømper) allerede klager over træk, når middellufthastigheden overstiger 0,12 m/s ved lufttemperatur af $23 \text{ }^\circ\text{C}$. Det er

nødvendig at lytte til medarbejdere, der klager over træk, fordi følelsen af lokalt diskomfort er meget forstyrrende og påvirker medarbejdernes præstation. Selv om en DR-model ikke indikerer trækforhold udenfor forudbestemte komfortgrænser, bør der findes en løsning for hver medarbejder.

Turbulensintensitet spiller også en vis rolle, men selve forhøjet Tu leder ikke direkte til væsentligt højere procent af utilfredse. Ifølge standarderne kan der antages $Tu = 40\%$ for normal opblandingsventilation. Ved sådan forudsætning kan der forventes 10 % af utilfredse med træk ($DR = 10\%$) ved $t_a = 23\text{ °C}$ og $v_a = 0,12\text{ m/s}$. 20 % stigning i Tu leder ved den samme lufttemperatur og middellufthastighed til 12 % utilfredse. Det vil sige, at 20 % stigning i Tu ikke ændrer indeklimaklassen ifølge DS/EN ISO 7730 (klasse B svarer til $DR < 20\%$). DS 447 anbefaler, at middellufthastigheden ikke overstiger 0,15 m/s ved opvarmning og 0,22 m/s ved mekanisk køling. Disse værdier leder til henholdsvis 14 % og 23 % utilfredse ($Tu = 40\%$) og praksis viser, at der i bygninger med målte middellufthastigheder, der nærmer sig førnævnte værdier, er stor sandsynlighed for trækgener blandt medarbejderne. Både DS 474 og DS 447 giver en mulighed for brug af højere lufthastigheder (0,35 – 1,0 m/s) om sommeren, når den operative temperatur ligger i det øvre grænse af komfortområdet for at muliggør forstærket konvektiv køling af kroppen. Dette er kun tilladt, hvis luftbevægelsen er under fuld kontrol af medarbejderne (individuel kontrol).

Relativ luftfugtighed

Luftfugtigheden har generelt kun en lille indflydelse på termisk komfort. Typisk vil man sige, at for mennesker føles en 10 % stigning i relativ luftfugtighed til en 0,3 °C stigning i operativ temperatur. Lav relativ luftfugtighed modvirker risiko for skader på bygningen (kondens, skimmelsvamp, osv.), men på den anden side kan relativ luftfugtighed under ca. 20 % resultere i udtørring af menneskers slimhinder. Dette fører til øget irritation og i nogle tilfælde også til hals- og lungeinfektioner.

1.10. Indeklimadrift og -projektering i praksis

Forfatter Peter Poulsen

På danske arbejdspladser er der særligt fire emner med store udfordringer inden for indeklima: Det er temperaturen, træk, tør luft og støj. Det er dokumenteret i virksomhedernes arbejdspladsvurderinger, APV. Virksomhederne skal med jævne mellemrum gennemføre en arbejdspladsvurdering, og disse fire emner skiller sig ud i mange virksomheder.

Indeklima fastlægges allerede tidligt i et byggeprojekt. Det sker i byggeprogrammet, som indeholder alle væsentlige byggetekniske aftaler mellem byggeparterne. Hvad er det i de danske komfortaftaler, som brugerne i praksis ikke kan lide? Det gennemgår følgende kapitel.

Brugerklager og drift

Arbejds miljøloven skal bl.a. sikre, at virksomhederne har fokus på uhensigtsmæssigheder inden for arbejdsmiljø. Ledere og betroede medarbejdere klager sjældent over forhold i virksomheden, men medarbejderne holder sig ikke tilbage. Et eksempel, som vedrører komfort: Brugere i let beklædning (for eksempel 0,6 clo) om vinteren er ikke repræsenteret i byggeprogrammet, og de får ikke opfyldt deres behov. De bliver ved med at klage, indtil det sker. Ved en morgentemperatur på 23 °C estimerer PMV/PPD-modellen cirka 10 % utilfredse. Ved denne temperatur får driftsafdelingen ”fred for klager”.

Køling er kompliceret, når der er brugere med fri nakke, frie underarme og frie ben. Mange brugere i let beklædning og med frie kropsdele oplever træk (allerede ved 0,12 m/s når lufttemperaturen er 23 °C). Der er ofte klager over træk når lufttemperaturen er 23 grader og køling er frigivet til drift. Driftspersonalet bliver nødt til at reagere på klagerne. Tidlig efterår, når antallet af soltimer falder, stopper driftsafdelingen kølingen, hvilket reducerer lufthastigheder og trækudfordringer. Freden indfinder sig igen på arbejdspladsen. På solrige dage om vinteren, fx ved facader mod syd, går temperaturen amok, værdien kan overstige både 26 og 27 grader, fordi solindstrålingen gennem glas næsten er dobbelt så stor om vinteren som om sommeren. Næste dag er en gråvejrsdag, den ekstreme temperatur når ikke at blive til en klage, selvom alle brugere med varm beklædning, fx brugere i jakkesæt, oplevede en forfærdelig diskomfort på den solrige dag. Sådan går vinteren, og det bliver forår og på et tidspunkt er der sol mange dage i træk. Der kommer nu klager over manglende køling, og driftsafdelingen frigiver kølen. Når sommeren er forbi, stoppes kølen igen, og den årlige cyklus gentages.

I fyringssæsonen afkøles bygningen hver nat og morgentemperaturen er 23 °C. Der kan være 27 °C sidst på arbejdsdagen i sydvendte lokaler på solrige dage, mens der er 23 °C i nordvendte lokaler hele dagen. Hvis kølen bliver frigivet, vil brugerne (i vest, nord og øst) klage over træk. Det vil opstå en klagestorm fra brugerne om træk, hvis kølen bliver frigivet om vinteren. Om sommeren er afkølingen om natten gennem klimaskærmen minimal, og morgentemperaturen er ofte 1-1,5 °C højere, og det giver færre udfordringer med træk. Den beskrevne køleproblematik opstår, fordi aftalen, i byggeprogrammerne, giver anledning til for høje lufthastigheder i opholdszonen i fx kontorbygninger.

Der kommer en bivirkning, når komforten justeres, det giver gener for andre brugere. Der findes også medarbejdere, som går i jakkesæt. I forhold til denne målgruppe bør temperaturen ikke overstige 25 °C, fordi højere temperaturer resulterer i mere end 15 % utilfredse. Dette er som regel opfyldt på en gråvejsdag, men når solen skinner på facaderne, oplever brugere i jakkesæt ofte diskomfort. I praksis bliver de ikke hørt, fordi betroede medarbejdere ikke klager over deres virksomhed. De vælger at gå under radaren for arbejdsmiljø. Det paradoksale er, at det er de højt lønnede med stor arbejdsbyrde, som ikke får opfyldt deres komfort behov. Der er 100 arbejdsdage om året, hvor solen skinner flere timer på en facade, her opleves ofte diskomfort for brugere i jakkesæt eller tilsvarende varm beklædning.

Arbejdsmiljølovgivningen versus byggeprogram

I praksis bruger virksomhederne kun ét system, arbejdsmiljøloven. Facility Management (FM) bliver kun målt og vurderet efter dette system. Virksomhederne skal dokumentere, at de følger op på uhensigtsmæssigheder, der skal komme en respons på en klage. Alle i virksomhedsorganisationen kigger på driftsmænd/driftspersonalet og dikterer for eksempel, at varmen skal skrues op, så brugere i let beklædning ikke oplever ubehag. Arbejdsmiljøloven sikrer, at der kommer et pres på virksomheden, hvis den undlader at reagere på klager. FM reagerer som forventet, de gør ikke noget forkert, de afhjælper en klage og retter op på uhensigtsmæssig komfort for brugerne i let beklædning om vinteren.

I byggeprogrammet er brugerprofil beskrevet, og beklædningen er 1 clo om vinteren. Projekteringsoutput er 20-24 °C om vinteren ved kvalitetskravet 10 % utilfredse. I praksis er der 23-27 °C om vinteren, og vi kan ikke genkende aftalen i byggeprogrammet. Men det er jo heller ikke sandt, at alle har en beklædning 1 clo om vinteren. Hvis man aftaler en brugerprofil, som ikke er i overensstemmelse med faktiske forhold, så kan man ikke forudsige konsekvenserne. Beskrivelsen af den årlige cyklus i kontorbygninger er fremkommet på observationer i mange eksisterende kontorbygninger, der var ingen som kunne forudsige konsekvenserne dengang, de første kontorbygninger blev opført med den beskrevne brugerprofil i DS 474 (Dansk Standard 1993).

Der er to lovgivninger, som styrer komforten, og de er bygget på hver deres fundament. Byggeloven, herunder bygningsreglementet, omhandler bl.a. aftaler for brugerprofil og kvalitetskrav, der definerer rammerne for byggeriet. Den endelige komfortaftale er beskrevet i byggeprogrammet, som er blevet til en aftale mellem byggeparterne. Arbejdsmiljøloven tager hensyn til **alle brugere og deres klager** i virksomheden. Arbejdsmiljølovgivningen er dybt forankret ude i virksomhederne, mens byggeprogrammet blot er en aftale mellem byggeparter. Hvis byggeprogrammet ser bort fra brugere, som derved ikke får opfyldt deres behov, og disse brugere efterfølgende klager over diskomfort, så ændres komfort-setup for at tilgodese klager. Det sikrer arbejdsmiljøloven. Samtlige virksomheder i Danmark har gennemført denne korrektion i deres kontorbygninger, og klagerne har i alle virksomheder været brugere i let beklædning.

Arbejdsmiljøloven gælder alle brugere, mens byggeprogrammer ofte fravælger brugere i deres aftaler. Det ser ud til, at bygningsreglementet samt standarderne ikke repræsenterer dagligdagen i mange kontorbygninger. Bygningsreglementet og standarderne gør brug af aftaler, som fravælger brugere og ser bort fra deres behov. Byggeloven og arbejdsmiljøloven modarbejder

ikke hinanden når der tages hensyn til alle brugere i et byggeprogram. Byggeprogrammet bør derfor tilgodese alle brugerne, herved udebliver brugerklager i dagligdagen og der er ens setup under drift henholdsvis projektering. Når brugere og deres behov er fravalgt i byggeprogrammet, kommer der et drift-setup, som ikke svarer til det planlagte setup under projekteringen.

Én standardperson beskriver alle brugerne

DS 474 (Dansk Standard 1993) har været gældende de sidste 25 år og har hævet komfortkvaliteten i danske kontorbygninger på mange områder, men de projekterende kan alligevel ikke genkende den aftalte komfort, når bygningen er taget i brug. Det er tydeligt, at driftspraksis ikke svarer til projektering.

I standarderne er mangfoldigheden blandt aktuelle brugere beskrevet ved én repræsentativ person, herefter kaldet standardpersonen. Standardpersonen er fastlagt for mange år siden og anvendt lige siden. Standardpersonen repræsenterer ikke nødvendigvis gennemsnittet. Der ses en mangfoldighed for beklædningen blandt brugerne, clo-værdien varierer fra 0,5 til værdien 1 på kontoret. Alle standarder anvender en standardperson, som bærer en let beklædning om sommeren med værdien 0,5 clo. Om vinteren ændres standardbeklædningen til værdien 1 clo.

Standardpersonen repræsenterer ikke alle brugere. Brugere i jakkesæt tilgodeses ikke i standarden om sommeren, og brugere i let klædning med fri nakke, frie underarme eller ben er ikke repræsenteret om vinteren.

Kun én standardperson giver komfortkonsekvenser

Den projekterede komfort tilgodeses kun standardpersonen. Om sommeren er clo-værdien 0,5, svarende til en sommerkjole. Standarden DS 474 foreslår tillige, at man skal aftale, hvor mange timer temperaturen må overskride 26 °C og 27 °C. Det kan man gøre i forhold til standard personen. Men at tillade overskridelser over 25 °C er en aftalefejl, hvis man ønsker at tilgodese brugere i jakkesæt om sommeren. De aftalte overskridelser om sommeren giver nogle arkitektoniske friheder med store vinduer, og samtidig kan kølingen mindskes. Men de planlagte overskridelser forringer yderligere komforten for dem, som fravælges i byggeprogrammet, fx brugere i jakkesæt om sommeren.

Standarderne, som forholder sig til lufthastigheder, tager deres udgangspunkt i standardpersonen. De angiver én hastighed for sommer henholdsvis vinter, som er den dimensionerende tilladte hastighed. De tilladte hastighedsværdier er ofte 0,18 m/s og højere. Standardpersonen om vinteren bærer en beklædning svarende til 1,0 clo. Man kan ikke have frie underarme eller ben ved en clo-værdi på 1,0. Herved kan man tillade høje lufthastigheder i projekteringen, ligesom i sommertilfældet.

Det kommer bag på mange, at følsomme brugere i let beklædning med frie underarme og frie ben allerede klager over træk når middellufthastigheden overstiger 0,12 m/s, og temperaturen er 23 °C. Projekteringskrav for lufthastigheder i opholdszonen bør tage udgangspunkt i brugere, som har fri nakke, arme, ben og sko uden strømper. Ved lave luft temperaturer forårsager selv relativt små luftbevægelser oplevelsen af træk. Når lufttemperaturen stiger, øges tolerancen overfor lufthastigheder. Disse relative simple sammenhænge kan ikke synliggøres ved brug af én

standardperson. Konsekvensen er, at de projekterede lufthastigheder er alt for høje i forhold til brugere i let beklædning med frie underarme og ben.

Ny tilgang for komfort – dipol-brugere og fælles accept

Vi bliver nødt til at tage hensyn til brugernes mangfoldighed. For kontormiljø er der to poler: den ene er let beklædning med værdien 0,5 clo, den anden med varm beklædning med værdien 1,0 clo. Det gælder både for sommer- henholdsvis vintertilfældet. Hvis vi kan finde et fælles komfortområde for disse to målgrupper, så har vi fundet et område, hvor et større antal af brugerne kan opleve neutral komfort. Aktiviteten fastholdes i nedenstående gennemgang på 1,2 met, selvom brugernes middelvægt øges disse år, og selvom brugere i let beklædning kan veje under 55 kg.

Vi ved fra standarderne, at folk i jakkesæt (1 clo) elsker 22 °C og hader 25 °C. Når temperaturen overstiger 25 °C, stiger utilfredsheden markant (mere end 15% utilfredse). For let beklædning er det lige omvendt; de elsker 25 °C og hader, når temperaturen kommer under 22 °C (mere end 15 % utilfredse). Der er et fælles område på 22-25 °C, hvor det er muligt for mange brugere at opleve neutral komfort.

Der er begrænset viden om lufthastigheder ved 0,5 clo og 1,2 met, hvor nakke, arme og ben er frie, når temperaturen er 23 °C henholdsvis 25 °C, standarderne beskriver ikke dette tilfælde. Brugere i jakkesæt har ingen af disse udfordringer. Et gæt er, at mange af brugerne i let beklædning med frie kropsdele kan opleve neutral komfort ved 0,12 m/s og 23 °C for lufttemperatur. Et andet gæt er, at hastigheden kan stige til 0,15 m/s ved temperaturer under 25 °C. Der er virkelig behov for at dokumentere grænseværdier for lufthastigheder, når man ønsker at tilgodese alle brugere og ønsker, at flere brugere skal kunne opleve neutral komfort i et byggeprojekt.

Simpel overbygning til nuværende metoder i standarderne

Målet er at styrke komfortaftalen i byggeprogrammet. I hverdagen skal der være overensstemmelse med aktuell komfort og aftalen i byggeprogram. Et andet mål er, at flere brugere oplever neutral komfort. Der skal fokus på alle brugere og deres behov for at nå målene. Arbejdsmiljøloven har allerede udpeget brugere i let beklædning om vinteren. Der vælges tillige at sikre neutral komfort for brugere i jakkesæt.

Der er stor spredning på brugerne i kontormiljøer, derfor vælges dipol-brugere med fælles accept, og der kan ikke accepteres ringere komfort end 15 % utilfredse for hver af dipolerne. Dipolbrugerne er: Brugere i jakkesæt, 1 clo og 1,2 met henholdsvis brugere i let beklædning, 0,5 clo og 1,2 met. Brugere i jakkesæt kan, med givne krav, acceptere 19-25 °C og brugerne i let beklædning, med givne krav, acceptere 22-27 °C. Den fælles accept findes i intervallet 22-25 °C.

Der tillades ikke overskridelser, da krav til dipolbrugerne er lempet til 15 % utilfredse. Nu mangler de projekterende bare at tilgodese dipolbrugerne i forhold til lufthastigheder, det handler altid om tilfredsstillende forhold for brugerne i let beklædning med fri nakke, arme og ben under køling ved 23 °C henholdsvis 25 °C.

Projekterende og bygherre bør ikke lempe kravene vedrørende temperatur og lufthastigheder for brugere i let beklædning, da arbejdsmiljøloven er konsekvent ved klager. Derfor forventes det, at lufthastighederne skal ned på et niveau, hvor det giver få klager – middellufthastigheder fx 0,12 m/s ved 23 °C og fx 0,15 m/s ved 25 °C.

I projekteringen, med dipol-brugere med fælles accept, kan man skærpe kravene fra 15 % til 10 % for hver af dipolerne. Herved kan brugere i jakkesæt, med givne krav, acceptere 20-24 °C og brugerne i let beklædning, med givne krav, acceptere 23-26 °C. Det fælles acceptområde er intervallet 23-24 °C. Når kravet er skærpet fra 15 % til 10 % kan der aftales overskridelser under 23 °C henholdsvis over 24 °C. Det endelige resultat bliver omtrent 22-25 °C igen.

Den endelige aftalejustering i byggeprogram er blot en ændring af brugerprofilen, fra én standardperson til dipol-brugere med fælles accept:

Brugerprofil: Der er stor brugerspredning, som beskrives ved dipol-brugere med fælles accept: Brugere i jakkesæt, 1 clo og 1,2 met, henholdsvis brugere i let beklædning, 0,5 clo og 1 met om sommeren. Samme dipol-brugere om vinteren. Der kan ikke accepteres ringere komfort end 15 % utilfredse for hver dipol-målgruppe uanset årstid.

Output-data, som afviger fra eksemplet i DS 474, er: Operativ temperatur 22-25 °C hele året i arbejdstiden, ingen overskridelser er tilladt. Maksimale lufthastigheder ved lufttemperatur 23 °C henholdsvis 25 °C er xx og yy m/s (sandsynligvis xx=0,12 og yy=0,15).

Der er behov for nye aftaleeksempler, som kan anvendes i byggeprogrammer

I DS 474 er der et eksempel på en aftale, som parterne kan indgå i byggeprogrammet. Det eksempel går igen i næsten samtlige byggeprogrammer i Danmark. Teksten eller hensigten med teksten er direkte kopieret, uden yderligere overvejelser, i byggeprogrammerne de seneste 25 år. Læren af det er: Komfort er så tværfagligt, at der er nogen, som må konstruerer eksempler på aftaler, som kan anvendes af andre. Eksemplerne bør variere brugerprofil og kvalitetskrav. Det giver forskellige data-output, som definerer projektet.

Hvis der er brugere i let beklædning og bruger i jakkesæt, så er det dipol -brugere med fælles accept, som kunne være aftalegrundlaget. Hvis byggeprogrammet fravælger brugere, så er nuværende eksempel i DS 474 et velkendt aftalegrundlag. Det er aftalen i byggeprogrammet, som definerer komfortkvaliteten. Det handler ikke om at kassere det eksisterende eksempel, der har hævet niveauet i Danmark gennem 25 år, det handler om at udvide paletten, så kvaliteten kan øges yderligere.

Arbejdsmiljøloven i Danmark er unik. Men arbejdsmiljøloven har synliggjort, at der er et problem, når der er spredning i brugerprofilen. Resultatet er universelt og erfaringen er, at flere brugere oplever neutral komfort ved 22-25 °C i kontorbygninger. Værdier på 26 og 27 °C er for varmt, og der er problemer med træk for brugere med fri nakke, arme og ben. Vi kan nemt forklare det teoretisk og praktisk med ”dipol-standard brugere med fælles accept”.

Udskudt arbejde, kurs og strandede bygningsværdier

Der er mange ferie- og helligdage mellem påske og sommerferien i Danmark, fx er der kun 6 uger med 5 arbejdsdage i 2017. Deadlines kommer oftere i denne periode, og i samme periode stiger antallet af solskintimer. Der har været mange soltimer i foråret 2017 og derfor masser af arbejdsdage med høje temperaturer på 26 og 27 °C på arbejdspladserne i Danmark. Brugere i jakkesæt oplever mange arbejdsdage med diskomfort i en hektisk arbejdsperiode, diskomforten er en ekstra stressfaktor oveni i andre stressfaktorer for årstiden. Nogle afbryder arbejdet op ad dagen, når de har siddet for længe med høje temperaturer. Brugerne når deres deadlines, men de udskyder arbejde til et senere tidspunkt grundet ubehag, træthed eller koncentrationsbesvær.

Diskomfort medfører stress og er årsag til, at arbejde udskydes. Forårseksemplet er en af konsekvenserne, og et forsigtigt skøn er, at der udskydes arbejde svarende til 20 timer fra påske til sommerferien. Det er et årsværk per 100 medarbejdere, som er karakteriseret ved stress og udskudt arbejde grundet diskomfort. HR i virksomheden kan opgøre tabet, når omkostningerne ved et årsværk er kendt. Efterfølgende kan HR fastlægge en kursværdi for tabet, som beskriver, hvor meget virksomheden vil give i ekstra husleje for et tilsvarende lejemål uden disse komfortudfordringer. Denne samlede beregning er tabt lejeindtægt for bygningsejer grundet diskomfort. Bygningsværdien er omtrent lejeindtægt gange 20, den tabte lejeindtægt kan omregnes til en fremtidig værditilvækst af bygningen, som endnu ikke er realiseret. Denne værditilvækst er den sande værdisætning af diskomfort, det vedrører fx direkte landets BNP. Indeklima vedrører faste installationer i bygningen og kan videreføres til ny lejer, derfor vil indeklimaproblemer i sidste ende være ensbetydende med strandede bogførte værdier for bygningsejer.

Et eksempel: En virksomhed har 200 ansatte, og der er de traditionelle udfordringer med komforten mellem påske og sommerferien. Det giver 2 årsværk med stress og udskudt arbejde grundet diskomfort i forårsmånederne. Et årsværk koster 700.000 kr. per år, og virksomheden fastsætter kursværdien til 40%. I eksemplet vil virksomheden gerne betale 560.000 kr. ekstra per år for tilsvarende lejemål uden diskomfort. Ejers bygningsværdi og BNP kunne være vokset med 11.2 million kr. (20x560.000). Tabet kan omregnes til 56.000 kr. per medarbejder i eksemplet. Det er engangsomkostningen per medarbejder for dårligt arbejdsmiljø grundet diskomfort i forårsmånederne. Der er således en stor effektiviseringsudfordring i Danmark i kontorbygninger grundet diskomfort, og omfanget påvirker BNP.

1.11. Litteratur

- BR15, 2017. Bygningsreglementet 01.07.2017 – 03.06.2018, Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, København, Danmark, <http://historisk.bygningsreglementet.dk/br15/0/42>
- Brüel&Kjær, 1996. Thermal Comfort, Brüel&Kjær INNOVA AirTech Instruments, Nærum, Denmark
- Dansk Standard, 1993. DS 474 - Norm for specifikation af termisk indeklime. ICS: 91.040.01. Dansk Standard, Danmark
- Dansk Standard, 2001a. DS/EN ISO 7726 Ergonomi i teknisk miljø – Instrumenter til måling af fysiske størrelser, DS/EN. ICS: 13.180. Dansk Standard, Danmark
- Dansk Standard, 2001b. DS/CEN/CR 1752 - Ventilation i bygninger – Projekteringskriterier for indeklimaet. ICS: 91.140.30. Dansk Standard, Danmark
- Dansk Standard, 2006. DS/EN ISO 7730 - Ergonomi inden for termisk miljø – Analytisk bestemmelse og fortolkning af termisk komfort ved beregning af PMV- og PPD-indekser og lokale termiske komfortkriterier. ICS: 13.180, Dansk Standard, Danmark
- Dansk Standard, 2007. DS/EN 15251 – Input-parametre til indeklimaet ved design og bestemmelse af bygningers energimæssige ydeevne vedrørende indendørs luftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustik. DS/EN 15251:2007. ICS: 91.040.01. Danmark
- Dansk Standard, 2011. DS 3033 - Frivillig klassifikation af indeklimaet i boliger, skoler, daginstitutioner og kontorer. ICS: 91.040.01, Dansk Standard, Danmark
- Dansk Standard, 2013. DS 447 – Ventilation i bygninger – Mekaniske, naturlige og hybride ventilationssystemer. ICS: 91.140.30. Dansk Standard, Danmark
- Døi, A.U., 2016. Investigation of differences between design requirements and actual indoor environment in modern office buildings, M.Sc. Thesis at Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark
- Fanger, P.O. (1970). Thermal comfort. Danish Technical Press, Copenhagen, Denmark.
- Fanger, P.O., Melikov, A.K, Hanzawa, H., Ring, J. (1988). Air turbulence and sensation of draught. *Energy and Buildings*, 12, 21-39.
- Fanger, P.O., Ipsen, B.M., Langkilde, G., Olesen, B.W., Christensen, N.K., Tanabe, S. (1985). Comfort limits for asymmetric thermal radiation. *Energy and Buildings*, 8(3), 225-236.
- Hansen, H.E. (ed.), Kjerulf-Jensen, P. (ed.) & Stampe, O.B. (ed.), 2006. DANVAK – Varme- og klimateknik grundbog, 3. udgave, ISBN: 87-982652-8-8, DANVAK ApS, Danmark.
- Hansen, M., 2013. Investigation of indoor environment and energy consumption with respect to operation of floor heating/cooling system in a sustainable office building, M.Sc. Thesis at Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark
- Hoyt, T., Schiavon, S., Piccioli, A., et al., 2017. CBE Thermal Comfort Tool. Center for the Built Environment, University of California Berkeley, <http://comfort.cbe.berkeley.edu/>
- McCullough, E.A.; Olesen, B.W.. H.S., 1994. Thermal insulation provided by chairs. *ASHRAE Transactions*, ASHRAE, Atlanta, USA
- Olesen B.W., 1982. Thermal Comfort, In *Technical Review To Advance Techniques in Acoustical, Electrical and Mechanical Measurement*, No. 2, Brüel&Kjær, Nærum, Denmark, ISSN 0007-2621,
- Wargocki, P., 2006. Indoor Environment, Productivity, Performance, Learning. Lecture at Indoor Climate Course, International Centre for Indoor Environment and Energy, DTU, 15. February, 2006
- Woods, J.E. 1989. Cost avoidance and productivity in owning and operating buildings, *Journal of Occupational Medicine*, no. 4

2. ENERGI

*Arne Jakobsen, Docent
Maskinmesterskolen København
aj@msk.dk*

Kapitlet, Energi, kan læses selvstændigt, men er skrevet som et kapitel til en samlede lærebog indenfor Technical Facility Management, hvor omdrejningspunktet er indeklime og energiforbrug.



ELFORSK

Dette kapitel er udarbejdet som del af projektet **Energirigtigt drift af det rette indeklime i bygninger – ENDRIN** støttet af ELFORSK i periode 2016–2017, projektnummer 348-006 (www.elforsk.dk).

2.1. Indhold

2.1.	Indhold	2-2
2.2.	Læringsmål.....	2-3
2.3.	Nomenklatur.....	2-4
2.4.	Enheder	2-5
2.5.	Energi vs. Effekter og ”energikvalitet”	2-6
2.6.	Energikvaliteter	2-6
2.7.	Energiforbrugende komponenter og kredspocesser – idealitet og virkningsgrader	2-7
2.8.	Energiforbrug i Danmark	2-7
2.9.	Kort om energinøgletal	2-9
2.10.	Litteratur/henvisninger	2-10

2.2. Læringsmål

Studerende der læser følgende kapitel skal være i stand til at

- Anvende gængse enheder og præfix for energi
- Skelne mellem energi og effekt
- Kort redegøre for virkningsgrad i forhold til ideelle energifremstillende og forbrugende processer
- Redegøre for energikvalitets-forskellen mellem el og varme
- Forholde sig til energi-nøgletal for bygninger
- Relatere energiforbrug i forhold til Danmarks energiforbrug opdelt på el, varme og hovedsektorer

2.3. Nomenklatur

Benævnelse og symbol	Enhed	Beskrivelse
Q	J	Varme eller kulde
P (Power, typisk el)	W	Effektforbrug
T	°C	Temperatur
η	-, %	Virkningsgrad
Ex	J	Exergi
COP (EER)	-	Effektfaktor for køle- og/eller varmepumpeanlæg
Carnot		Betegnelse for den ideelle kredsproces hvor el, varme og køling indgår

2.4. Enheder

Grundenheden for energi er J (Joule). Hvis vi skal reducere denne til de øvrige- SI grundenheder får vi:

$$J = N \cdot m = \frac{kg \cdot m}{s^2} \cdot m = \frac{kg \cdot m^2}{s^2} \quad (2.1)$$

Der benyttes ofte præfix da 1 J i de fleste sammenhænge er en ganske lille energimængde, se Tabel 2-1.

Tabel 2-1 Overblik over brugte enheder mht. energi

Enhed med præ-fix	Navn
$kJ = 10^3 J$	Kilojoule
$MJ = 10^6 J$	Megajoule
$GJ = 10^9 J$	Gigajoule
$TJ = 10^{12} J$	Terajoule
$PJ = 10^{15} J$	Petajoule

Enheden Wh (watt-time) bruges ofte

$$1Wh = 1 \frac{J}{s} \cdot 3600 s = 3600 J \quad (2.2)$$

Der benyttes ligeledes diverse præfix, eksempelvis $1kWh = 3600kJ$.

Lys har nogle særlige energi-enheder (lys-styrke). Effekten opgives i lumen: 1 lumen = 1/683 W.

Lysets intensitet på en flade angives i lux: 1 lux = 1 lumen/m².

Dvs. en pæres lystyrke angives i lumen, medens belysningen på en bordoverflade angives i lux.

Vi kan "for sjovs skyld" udregne en virkningsgrad for en belysning på 500 lux på et 2 m²

arbejdsbord. Lad os antage at der er indkøbt en nyere LED pære, hvor effektforbruget er 5 W.

Den nyttige effekt på arbejdsbordet er: $\frac{500 \cdot 2}{683} = 1,46W$ dvs. en "tænkt" virkningsgrad kan udregnes

til at være

$$\eta = \frac{1,46 \cdot 100\%}{5} = 29\%$$

2.5. Energi vs. Effekter og ”energikvalitet”

Energi pr tidsenhed er ”effekt” og måles i (W) Watt: $1W=1 J/s$.

INFO BOKS:

Man kan se folk forveksle effekt og energi! Vær opmærksom på, at eksempelvis følgende udsagn giver ingen mening:

Anlægget bruger nu 1000 kWh

Der bruges 1000 kW/h

I nogle tilfælde anvendes kWh/h, og hvis det er brugt bevidst, så er her tale om gennemsnitseffekten i kW i en time.

2.6. Energikvaliteter

Energi kan have forskellige kvaliteter. Eksempelvis kan 100 J-el energi – omsættes fuldt ud til 100 J varme, medens der er et tab ved omsætningen fra varme til el. Dette afspejles eksempelvis i virkningsgraden for et kraftværk og virkningsgraden for en forbrændingsmotor.

Man taler om energiindholdet i energien og dette er det arbejde, som i en ideel proces kan produceres ud fra energien. El-energi kan i princippet omformes fuldt ud til arbejde og er derfor ren exergi, medens energiindholdet i en varmemængde afhænger af dens temperaturniveau:

Exergien Ex i varmemængden Q udtrykkes som:

$$Ex_Q = Q \cdot \left(1 - \frac{(T_{omgivelser} + 273,15)}{(T_Q + 273,15)}\right) \quad (2.3)$$

Bemærk at temperaturen i udtrykket her er Celcius, da omregningen til Kelvin er inkluderet i udtrykket. Faktoren som ganges på energi-mængden kan (gen)kendes som virkningsgraden for den ideelle Carnot-kraftproces. Det bemærkes at varme ved omgivelsernes temperatur indeholder nul exergi. Dette stemmer med at denne varme ikke har noget ”arbejdspotentialer”. Jo højere temperatur en varmemængde har, jo højere exergiindhold.

Man kan tilsvarende tale om Exergi i køling. Køling er når vi fjerner varme ved en temperatur der er lavere end omgivelsernes temperatur.

Exergien Ex i kølemængden Q er:

$$Ex_Q = Q \cdot \left(\frac{T_{omgivelser}}{T_Q} - 1\right) \quad (2.4)$$

Dette kan fortolkes som det minimale arbejde der skal til for at tilvejebringe kølingen. Dette vil svare til at kølesystemet har en COP svarende til en ideel Carnot-køleproces.

2.7. Energiforbrugende komponenter og kredsprocesser – idealitet og virkningsgrader

Pumper og ventilatorer flytter volumenstrøm, hvor densiteten af mediet (luft, væske) er nogenlunde konstant. Derfor kan følgende udtryk for den teoretisk mindste tilførte effekt udtrykkes

$$P_{min} = V \cdot \Delta p. \text{ Altså den minimalt tilførte effekt er volumenstrøm gange trykstigning.}$$

Volumenstrømmen angives nogle gange som q_v .

Hvis volumenstrømmen angives i m^3/s og trykstigning i Pascal, så bliver effekten i W.

I en (køle)kompressor kan man ikke antage konstant densitet under processen, hvorfor man må benytte den isentrope proces som reference-proces. Arbejdet ved den isentrope proces kan findes i tilstandsdiagrammer ($h, \log(p)$) eller findes i passende beregningsprogrammer.

Virkningsgrader er forholdet mellem den teoretisk mindst tilførte effekt (ofte isentrope) divideret med den faktiske effekt.

For en "termisk" kredsproces, som arbejder mellem en høj temperatur (T_h), og en lav temperatur (T_l) er den såkaldte Carnot proces den mest ideelle proces.

Højeste virkningsgrad for arbejdsydende proces (motor, kraftværk, osv.):

$$\eta_{Carnot} = \left(1 - \frac{(T_l + 273,15)}{(T_h + 273,15)} \right)$$

$$\text{Højeste COP for en køleproces er } COP_{Carnot} = \frac{T_l + 273,15}{(T_h - T_l)}.$$

$$\text{Højeste COP for en varmepumpeproces er } COP_{Carnot} = \frac{T_h + 273,15}{(T_h - T_l)}$$

Alle temperaturer indsættes i °C.

2.8. Energiforbrug i Danmark

De følgende 2015-data er fra Energistyrelsens hjemmeside. (<https://ens.dk/service/statistik-data-noegletal-og-kort/noegletal-og-internationale-indberetninger>).

Det samlede energiforbrug i Danmark var 615 PJ.

Med 5,7 mio indbyggere bliver det 109 GJ/indbygger.

Dette er $109 \cdot 1000 \text{ MJ} / 3,6 \text{ MJ/kWh} \approx 30.000 \text{ kWh/indbygger}$

Rent sektor-mæssigt er det "Handel og Service" som bedst dækker kontorer og butikker.

Husholdninger udgjorde 191 PJ og Handel & Service 80 PJ.

I husholdninger er 20 % el-forbrug medens 80% går til varme. El-andelen er dog stigende i takt med udbredelse af solceller og varmepumper.

I handel og service udgør elforbruget knap halvdelen og den resterende del til varme er lidt over halvdelen af energiforbruget.

Det samlede energiforbrug til bygninger udgør ca 40 % af de nationale energiforbrug i EU. I Danmark er energiforbruget til husholdninger ca 30% og energiforbruget til kontorer og butikker udgør godt 10% af det samlede energiforbrug.

Det kan være nyttigt at have nogle niveauer for specifikke energiforbrug, når man står overfor at skulle vurdere en bygnings energiforbrug. Det er dog ikke nogen "eksakt videnskab" at finde præcise tal.

I en tidligere aktiv Energiledelses Ordning fremkommer følgende tal gældende for butikcentre:

EL: 50 kWh/(år m²)

Varme 75 kWh/(år m²)

De tilsvarende tal for kontor er

EL: 36 kWh/(år m²)

Varme 96 kWh/(år m²)

Disse tal skal blot tages som et fingerpeg af en størrelsesorden. Man må forvente at tallene er "på vej ned" i takt med skærpede energikrav fra myndigheder.

Konkret haves følgende tal for Lyngby Storcenter

EL: 50 kWh/(år m²)

Varme 77 kWh/(år m²).

Dette passer utrolig godt med tallene – af lidt ældre dato fra ELO ordningen. Det skal bemærkes at forbruget er ved at blive reduceret i Lyngby Storcenter i forbindelse med en Energirenovering.

Generelt reduceres energiforbruget i bygninger takt med skærpede krav i bygningsreglementet. BR2015 angiver at det samlede energiforbrug (eller rettere; energiramme, som er et beregnet forbrug, og erfaring viser at det faktiske forbrug ofte er større) for kontorer skal være mindre end:

$$(41 + 1000 / A) \frac{kWh}{m^2 \cdot \text{år}}, \text{ hvor } A \text{ er det opvarmede areal i } m^2.$$

Bemærk at energiproduktion fra egne solceller kan fratrækkes det samlede faktiske energiforbrug. Den tilsvarende energiramme for boliger/hoteller er:

$$(30 + 1000 / A) \frac{kWh}{m^2 \cdot \text{år}}$$

Der er primært to energikilder i en bygning: el og varme. I bygningsreglementer op til BR15 bliver el-forbruget ganget med en faktor 2,5, svarende til at det kraftværk der producerer el har en virkningsgrad på 40%. Altså der skal 2,5 gange mere brændsel ind end der produceres el. Da samfundet er ved at gå over til stigende grad af CO₂ neutral el-produktion primært vindmøller og solceller, så er den faktor der skal ganges på el ”på vej ned”.

Hvis varmen produceres af fjernvarme, så skal varmen ganges på med en faktor under 1. Eksempelvis 0,8. Rationalet er at her er tale om brug af en eller anden fra af spildvarme. Konklusionen er at energiramme-beregningerne er under løbende opdatering i takt med at samfundets mål om at reducere CO₂ belastningen af klimaet realiseres. Derfor konsulter det relevante Bygningsreglement, når der skal udføres energirammeberegninger for en bygning.

2.9. Kort om energinøgletal

I det foregående afsnit blev der nævnt specifikke forbrug for energi – typisk pr (år·m²).

I produktionssammenhæng ville man ofte tale om energi pr produkt.

Da varmekonsumet i bygninger er stærkt afhængigt af udetemperaturen, så har man indført betegnelsen ”graddage” (graddag eller graddøgn bruges i flæng som det samme) for at synliggøre og evt. korrigere for denne sammenhæng. Hvis lufttemperaturen er over 17 °C, så er den øjeblikkelige graddøgn-værdi lig med nul. Tanken er at der ikke er behov for opvarmning – udover gratisvarme – når temperaturen er så høj.

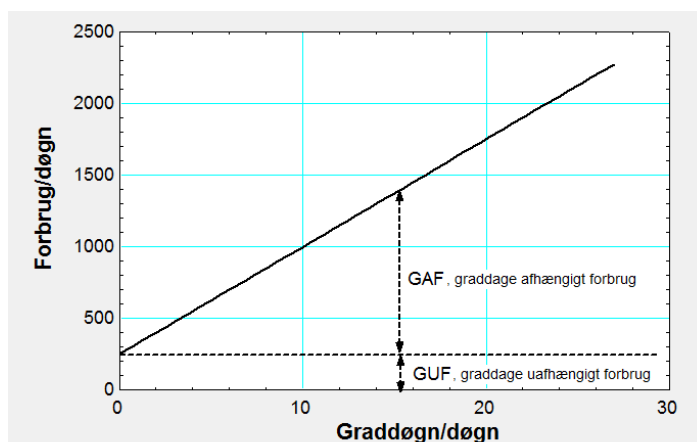
Beregning:

Denne kan gøres med en vilkårlig tidsopløsning. Hvis der eksempelvis måles en udetemperatur hvert femte minut (1/12 time), så vil dette tidsinterval være $\frac{1}{12 \cdot 24} = \frac{1}{288}$ døgn. Hvis den målte temperatur i dette interval var 10 °C, så ville denne måling bidrage med:

$$(17 - 10) \text{ grad} \cdot \frac{1}{288} \text{ døgn} \approx 0,035 \text{ grad} \cdot \text{døgn}$$

Energiforbrug vil ofte have et mere eller mindre fast bidrag, som ikke er afhængigt af det ”målte produktionsbehov”. I nogle

sammenhænge vil det være en slags tomgangsforbrug, i opvarmningssammenhæng vil det ofte være forbrug af varmtvand, da det oftest ikke er afhængigt af udetemperaturen. Man taler da om opdeling af forbruget i fast forbrug (GUF) og et der er uafhængigt af udetemperaturen og en andel, GAF, der er afhængigt (ofte proportional) med hvor koldt det er (målt i graddøgn).



Figur 1. GUF og GAF i energiforbrug

2.10. Litteratur/henvisninger

Energiramme bygningsreglement: http://historisk.bygningsreglementet.dk/br15_03_id104/0/42

Omkring diverse teknologier omkring ventilation, opvarmning, køling, mv henvises til de øvrige kapitler, som indgår i denne lærebog.

Omkring generel introduktion til energi-forståelse henvises til diverse lærebøger i fysik og termodynamik.

3. FACILITIES MANAGEMENT

*Helle Lohmann Rasmussen, Arkitekt og Ph.d. studerende
DTU Management Engineering
helr@dtu.dk*

*Claus Høghøj Nielsen, Ingeniør og Indehaver
HØGHØJ aps.
ch@hoghoj.dk*

*Susanne Balslev Nielsen, Chefkonsulent i Region Hovedstaden
Center for Ejendomme
Susanne.balslev.nielsen@regionh.dk*

Afsnittet "Facilities Management" (FM) giver en kort introduktion til fagområdet FM med særligt fokus på bygningsdrift. Afsnittet beskæftiger sig desuden med FM i relation til byggeprojekter og giver konkrete eksempler på hvordan viden om bygningsdrift bør inddrages tidligt i byggeprojekter for at bidrage til at byggerier projekteres så driftsvenligt som muligt.



ELFORSK

Dette kapitel er udarbejdet som del af projektet **Energirigtigt drift af det rette indeklima i bygninger – ENDRIN** støttet af ELFORSK i periode 2016–2017, projektnummer 348-006 (www.elforsk.dk).

3.1. Indhold

3.1.	Indhold	3-2
3.2.	Læringsmål.....	3-3
3.3.	Nomenklatur.....	3-4
3.4.	Introduktion til Facility management (FM)	3-5
	FM introduktion	3-5
	FM – En karrierevej	3-7
3.5.	Fokus på bygningsdrift.....	3-9
	Bygnings/FM-overblik – kend den nuværende tilstand	3-9
	Plan for bygningsdriften.....	3-10
3.6.	Byggeprojekter, en proces i flere faser	3-11
	Jura i byggeriet	3-12
3.7.	Driftsvenligt byggeri – forudsætninger og værktøjer	3-13
3.8.	Tre særligt vigtige værktøjer til mere driftsvenligt byggeri.....	3-17
	Detaljeret byggeprogram.....	3-17
	Performance test.....	3-18
	Projektgranskning med FM-fokus.....	3-19
3.9.	Litteratur.....	3-20
3.10.	Bilag – Ja til driftsvenligt byggeri – men hvordan i praksis	3-20

3.2. Læringsmål

Studerende der læser følgende kapitel skal være i stand til at

- Beskrive hvad Facilities Management (FM) er på et overordnet niveau.
- Redegøre for forskellige af typer af FM stillinger og arbejdsområder.
- Beskrive hovedfaser og primære aktører i byggeprojekter.
- Nævne forudsætninger og værktøjer for driftsvenligt byggeri.

3.3. Nomenklatur

FM: Facilities Management

ISO: Af engelsk; International Organization for Standardization,

CAFM: Computer Aided FM

HVAC: forkortelse fra engelsk: Heat, Ventilation, Air conditioning og Control.

VVS: forkortelse for Vand, Varme og Sanitet.

Serviceaftale: Aftalegrundlag mellem to parter, der beskriver en gentaget ydelse frem for en engangsydelse, f.eks. årligt eftersyn på et anlæg.

Bygningsdel: Del af bygning, f.eks. vindue eller tag.

Kritisk anlæg: Anlæg, hvor nedbrud vil have væsentlig negativ påvirkning af kerneforretningen, f.eks. vil nedbrud af ventilation i forbindelse med fremstilling af visse typer af medicin betyde produktionsstop.

Lovpligtige eftersyn: Eftersyn, der skal foretages i henhold til lov, f.eks. eftersyn af elevatorer, køleanlæg eller brandudstyr.

Danske Ark: Danske Arkitektvirksomheder.

FRI: Foreningen af Rådgivende Ingeniører.

AT anvisning: Arbejdstilsynets anvisning, f.eks. af indretning af arbejdspladser.

I afsnit 3.7 Driftsvenligt byggeri findes yderligere ordforklaringer.

3.4. Introduktion til Facility management (FM)

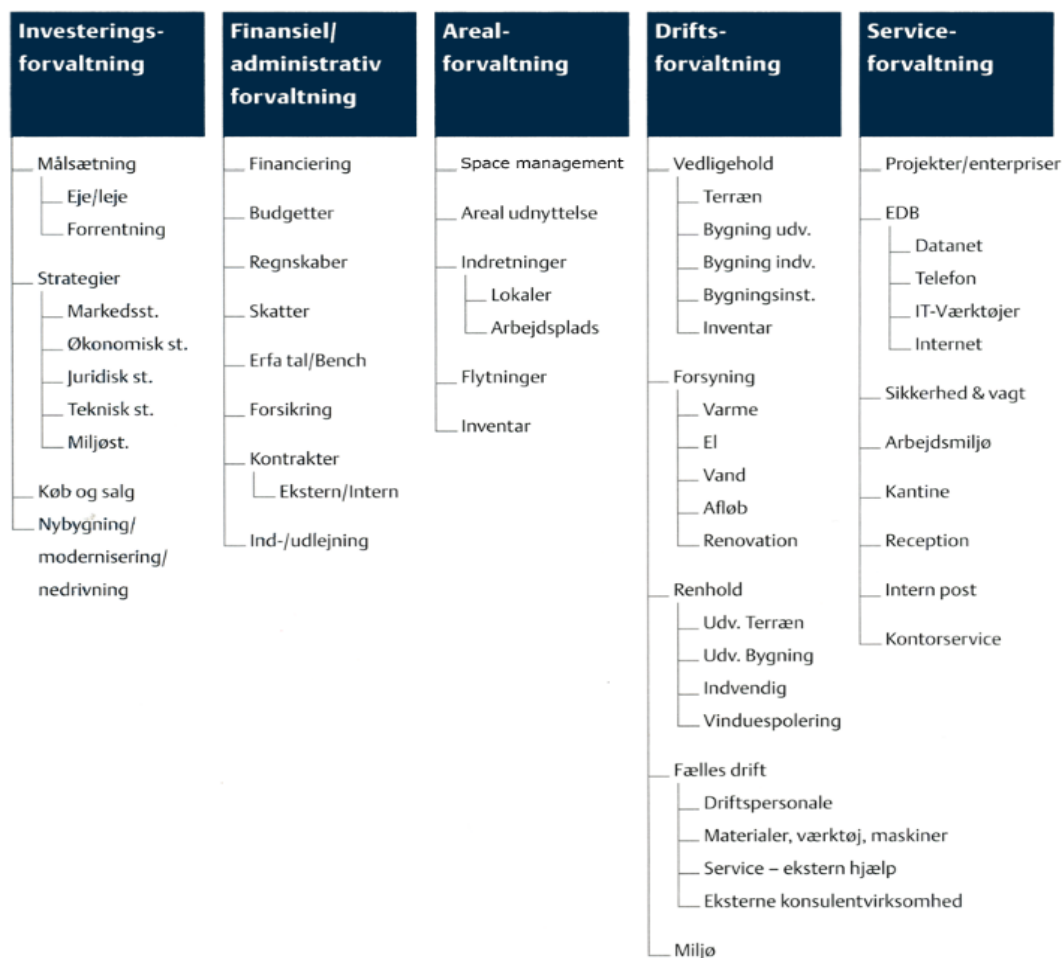
Facilities management (FM) er:

“Organizational function which integrates people, place and process within the built environment with the purpose of improving the quality of life of people and the productivity of the core business.” (ISO 41011, 2017)

FM introduktion

Det ovenstående citat fra FM ISO standarden definerer, at Facilities Management er en funktion i organisationen, der understøtter virksomhedens kerneforretning ved at skabe de bedste betingelser for medarbejdere, arealer og processer. FM er således en støttefunktion til virksomhedens primære produktion. Primær produktion, også kaldet kerneforretning, er f.eks. undervisning på en folkeskole eller patientbehandling på et hospital. Tidligere havde en virksomhed måske en ejendomsforvaltning eller en teknisk service enhed, men i dag bidrager FM med langt mere. Hvor det tidligere handlede om at finde den billigste løsning, handler det i dag også om hvilke løsninger, der bedst understøtter virksomhedens mål. Det kan f.eks. være at understøtte arbejdskulturen, branding eller opfyldelse af krav til en ønsket certificering.

FM begrebet omfatter således en lang række opgaver, der skal løses for at en virksomhed har passende faciliteter til at udføre kerneopgaven bedst muligt. Figur 3-1 herunder giver et indblik i variationen af FM opgaver, selvom omfanget vil være afhængig af den enkelte virksomhed.



Figur 3-1 Oversigt over FM opgaver i "Håndbog i Facilities Management" af Per Anker Jensen (2011)

FM udføres på tre niveauer; strategisk, taktisk og operationelt. På det strategiske niveau tages overordnede beslutninger om ejendomsporteføljen (f.eks. eje/leje, udvide, frasælge osv.), støttefunktioner (serviceniveau, principper for udlicitering/in-house, organisering osv.) og politikker (f.eks. energipolitik). De overordnede FM-strategier besluttet af eller i samråd med den øverste ledelse af virksomheden. På det taktiske niveau planlægges hvordan de overordnede strategier og politikker omsættes til handling. Planlægning af byggeopgaver, arealforvaltning, miljøledelse, budgettering, indgåelse og håndtering af kontrakter indgår i det taktiske arbejde. På det operationelle niveau varetages og udføres den daglige drift og service i overensstemmelse med beslutninger på strategisk og taktisk niveau.

FM opgaverne kan varetages internt i virksomheden eller af eksterne firmaer, eller i en kombination. Ofte ses en løsning, hvor det strategiske og taktiske niveau er in-house, mens de operationelle og oftest de mest rutineprægede opgaver varetages af eksterne firmaer, f.eks. rengøring, kantine, græsslåning og reception. Men der findes også eksempler hvor virksomheden har udliciteret stort set hele FM funktionen, eller omvendt har stort set hele funktionen in-house.

Der findes en lang række IT løsninger til at understøtte FM, og Computer Aided Facilities Management (CAFM) er i stor udvikling. Typisk tager FM-software udgangspunkt i digitale tegninger af virksomhedens arealer. Hertil kan der kobles en række moduler, afhængig af virksomhedens strategi for CAFM. Der findes moduler til at administrere arealer, husleje, energiforbrug, vedligeholdelsesplaner, håndtering af brugerhenvendelser (help desk), brandplaner, osv. BIM (Building Information Model) er allerede meget udbredt i forbindelse med byggeprojekter, og det vil brede sig til FM, således at 3D modeller kan være grundlag for CAFM, fremfor 2D tegninger.

FM – En karrierevej

Den danske forening for FM, Dansk Facilities Management Netværk startede i 1991, men det er først omkring år 2000, at man i Danmark rigtigt begynder at tale om Facilities Management. Her bliver det muligt at tage efteruddannelseskurser og egentlige FM uddannelser. Det er en af årsagerne til at dem, der arbejder med Facilities Management, har meget forskellige uddannelsesmæssige baggrunde. Nogle er ufaglærte, andre har mellemlange tekniske eller håndværksmæssige uddannelser, og andre igen har længerevarende uddannelser som arkitekter eller ingeniører.

Den Britiske FM forening (BIFM) har udarbejdet en karrierestige, som kan bruges til at beskrive hvordan man kan arbejde med FM på forskellige niveauer. I Tabel 3-1 gengives de engelske jobbetegnelser suppleret med et forslag på en dansk betegnelse. Jobbetegnelserne varierer dog mellem f.eks. offentlige og private organisationer, så beskrivelsen skal opfattes som retningsgivende.

Med en uddannelse inden for FM kan man arbejde i mange forskellige virksomheder og brancher, både i interne FM afdelinger eller i virksomheder, der leverer FM løsninger til en andre. For at give et indtryk af variationen af virksomheder, der arbejder med FM, viser Tabel 3-2 et udsnit af virksomheder og organisationer, der i 2017 var medlemmer af det danske FM netværk, DFM.

Udover at arbejde direkte med FM som del af en driftsorganisation eller leverandør, ses der nu også en udvikling inden for FM-rådgivning. Rådgivende ingeniørvirksomheder, ansætter i disse år flere og flere medarbejdere med FM-ekspertise, bl.a. maskinmestre, teknikere og ingeniører, til at udføre konsulent- eller rådgivningsarbejde for drifts- eller bygherrer. Leverandører af FM ansætter også i stigende grad f.eks. maskinmestre med henblik på rådgivning inden for den tekniske del af FM.

Tabel 3-1 Oversigt over FM jobs og karrieremuligheder

	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5
Danske jobbetegnelse	Service medarbejder	Tilsynsførende service medarbejder	Funktions-/projektleder eller Asset Manager.	Funktions-/projektchef eller senior Asset Manager.	Strategisk FM-leder, direktør af FM organisationen.
Engelsk job betegnelse	Support	Supervisor	Manager	Senior	Strategic
Eksempler på arbejdsopgaver	Opgaver vedr. drift og vedligehold: reparationer, affald, flytning mm.	Tilsyn med vedligehold, renoveringer og ombygninger	Ledelse af vedligeholdelses planer og kontrakter og ombygninger	Ledelse af vedligeholdelses- strategier, driftsplaner og arealanvendelser	Ledelse af drift og vedligeholdelses strategier, investeringsstrategier og arealanvendelse

Tabel 3-2 Eksempler på medlemmer i 2017 i DFM

Dansk Facilities Management Netværk (DFM-net.dk)		
ATP Ejendomme	DTU Campus Service	PLH Arkitekter
Bascon	Green Circle A/S	Rambøll
CBRE	Grundfos	Rigspolitiet
Coor	ISS Facilities Service	Signal Arkitekter
Compass group	Kommuner og Regioner	Siemens
Cowi	Niras	Sweco
Deloitte	Novo Nordisk A/S	Velux A/S

Internettet og de sociale medier giver mange muligheder for at følge med i den nyeste udvikling indenfor FM. Herunder er oplistet en række centrale danske og udenlandske organisationer, der har informative hjemmesider og kan følges på f.eks. LinkedIn, Twitter eller Facebook.

Centrale FM organisationer:

- British Institute of Facilities Management (BIFM)
- Center for Facilities Management – Realdania Forskning, DTU (CFM)
- Corporate Real Estate & Facilities Management Professionals (LinkedIn group)
- Dansk Facilities Management Netværk (DFM)
- European Facility Management Network (EuroFM)
- Facilities Management Group (FMG, LinkedIn group)
- German Facilities Management Association (GEFMA)
- International Facility Management Association (IFMA)

3.5. Fokus på bygningsdrift

Dette afsnit går lidt mere i dybden med bygningsdrift som en del af arbejdet i en FM-organisation. Med bygningsdrift menes den daglige drift af bygninger, installationer, forsyning og eventuelle udenoms arealer. Andre kapitler i kompendiet går i dybden med enkeltdelene, som her kun er behandlet ud fra et FM-perspektiv.

Det er virksomheden eller organisationens overordnede FM strategi, der skal afspejle arbejdet med bygningsdrift. Det er f.eks. vigtigt at vide, hvis arealer påtænkes afhændet eller der f.eks. er sat nye bæredygtighedsmål for virksomheden. Den overordnede strategi omsættes til konkrete mål og planer for driften. Målene kan være indeklimamål, vedligeholdelsesplaner, tiltag for reduktion af energiforbrug, specifikke renoveringsprojekter og andre konkrete ting, der medvirker til at opfylde de overordnede strategiske FM mål for virksomheden.

Bygnings/FM-overblik – kend den nuværende tilstand

Det ses ofte, at virksomhederne ikke har et reelt samlet overblik over tilstanden af bygningerne. Det kan dreje sig om bygningernes overordnede konstruktion (fundament, søjler, dæk), klimaskærm (tag og facade), tekniske anlæg (HVAC, vvs, el, it og øvrige tekniske anlæg), afløbsanlæg og udearealer. Nogle gange kendes forbrug af vand, el og strøm kun på hovedmålniveau, ligesom det kan knibe med overblikket over serviceaftaler eller eftersyn der enten er lovpligtige eller nødvendige for at opretholde garanti.

Oplysninger om den nuværende tilstand kan fremskaffes ved bygningsgennemgange/-registreringer, tilstandsvurderinger, energimærkningsrapporter, interne regnskabstal, interviews og søgninger i tidligere dokumenter. Som en del af FM strategien, bør det fastlægges i hvilken udstrækning man ønsker at benytte CAFM (Computer Aided FM), og hvordan man ønsker at arkivere og vedligeholde dokumentation. Det er også vigtigt at fastlægge hvilket detaljeringniveau, der er

nødvendigt, så man ikke fortaber sig i indsamling af detaljeret data. Det skal ligeledes besluttes hvordan overblikket løbende skal ajourføres, så man undgår at skulle ”starte forfra”. I mange tilfælde har man brug for oplysninger på bygningsdels- eller anlægsniveau.

Nedenstående er eksempler på hvad der kan være relevant at vide for hver bygningsdel/bygning/anlæg/område:

- Bygningsfunktion
- Er bygningen i brug og udnyttelsesgraden?
- Alder og tilstandsvurdering (herunder restlevetid) på passende detaljeringsniveau
- Anlægsværdi, nu-værdi
- Kritisk- eller ikke-kritisk anlæg
- Årlige vedligeholdelsesomkostninger (seneste 5 år)
- Årlige energiforbrug/-omkostninger (seneste 5 år)
- Lovpligtige eftersyn og garantioprettende vedligehold
- Eventuelle serviceaftaler
- Brugernes bemærkninger om indeklima og performance for tekniske anlæg
- Driftens bemærkninger til indeklima og performance for tekniske anlæg

Plan for bygningsdriften

Med et overblik over tilstanden kan man begynde at planlægge hvordan drift og vedligehold af bygninger og anlæg skal foregå for at opnå besluttede mål. Det er vigtigt, at vurdere og beslutte hvilke ændringer der er nødvendige, og hvordan bygninger og anlæg skal vedligeholdes på kort og lang sigt. Der vil typisk være brug for en indsats på flere områder for at nå et mål. Det kan f.eks. være indeklimamål, hvor både klimaskærm, installationer, automatik, indretning og brugeradfærd vil spille sammen. Det er derfor vigtigt, at drifts- og vedligeholdelsesplaner koordineres. Overblikket over tilstand, forbrug og medarbejderoplevelser skal også bruges til at vurdere virkningen af gennemførte tiltag, f.eks. effekt af energispare projekter.

Når man har langsigtede planer for hvordan bygnings- og anlægsmassen skal renoveres, vedligeholdes, ombygges eller evt. afhændes, har man et økonomisk overblik over de nødvendige bygnings- og anlægsmæssige investeringer. Planerne er nødvendige i forbindelse med planlægning af arealanvendelse eller ombygningsprojekter, så planlagte vedligeholdelses aktiviteter kan koordineres og udføres, når der alligevel pågår arbejder i en bygning eller i forbindelse med interne flytninger.

3.6. Byggeprojekter, en proces i flere faser

Som ansvarlig for drift af en eller flere bygninger (eller for et givent fagområde, eksempelvis ventilation), er det ofte nødvendigt at forstå værdikæden for bygningen (eller fagområdet) i hele dens levetid. Hver fase giver nogle muligheder for at optimere indeklima og energiforbrug, som det er en fordel at kende. Ved nybyggeri har man mulighed for at ”gøre det rigtigt fra starten”. Her skal man vide, at mange væsentlige beslutninger vedrørende den fremtidige drift træffes i de første faser af et byggeprojekt.

Ethvert byggeprojekt starter med en idé, et ønske eller behov for bygnings- eller installationsmæssige forandringer. Disse kan være konkrete behov i form af ønske om mere plads, ændret brug af bygningen, lavere energiforbrug eller bedre indeklima. Ønskerne kan også være mindre konkrete ved eksempelvis ønsket om ændret signalværdi eller ønske om ændring af virksomhedens arbejdskultur. På baggrund af ønsket udføres de første undersøgelser om bygnings størrelse, forventet samlet investering, finansiering, byggegrund m.m. Herfra bliver projektet mere og mere detaljeret og konkret. I Tabel 3-3 ses en faseopdeling med de benævnelser som Danske Ark og FRI benytter.

Tabel 3-3 Et byggeprojekts typiske faser og de primære aktører

Traditionel organisering af et byggeprojekt							
1. Beslutningsfasen		2. Projekteringsfase			3. Byggeperiode		4. Drift
Ideoplæg	Byggeprogram	Dispositions-forslag /Forprojekt	Projekt-forslag	Hovedprojekt	Udførelse	Aflevering	Drift
Bygherre og rådgivere		Arkitekter og Ingeniører			Entreprenør		Driftsorganisation

Der findes flere måder at organisere og udbyde et byggeprojekt på. Byggeriet kan f.eks. gennemføres i totalentreprise, hvor rådgivning og udførelse indkøbes samlet. Eller rådgiverydelsen og entreprenør ydelsen kan indkøbes hver for sig, opdelt i en eller flere grupper. Rammeaftaler kan benyttes hvis flere byggeprojekter udbydes samlet over en årrække. Offentligt byggeri, som f.eks. hospitaler eller skoler, er underlagt særlige regler for udbud, hvor EU’s udbudsdirektiv skal overholdes. Det gælder også ombygninger og renoveringsprojekter, og selv ved mindre projekter, skal man være opmærksom på hvilke regler man skal følge. De fleste byggeprojekter følger de samme faser, der dog i mindre projekter kan være lagt sammen.

I forsøg på at optimere byggeprojekter, er der i de seneste år sket en udvikling af nye samarbejdsformer. Det er blevet mere almindeligt at inddrage entreprenører og leverandører tidligt i projektet, for at drage nytte af deres ekspertise så tidligt som muligt. Strategiske partnerskaber er et eksempel på en ny samarbejdsform, hvor de traditionelle tydelige skel mellem aktørerne forsøges elimineret, så aktørerne i højere grad arbejder som et samlet projektteam, snarere end

repræsentanter for hver deres virksomhed/organisation. Tidlig inddragelse af brugere og FM personale spiller også en stadig større rolle i byggeprojekter i dag end tidligere.

Jura i byggeriet

Når et bygge- eller anlægsarbejde skal gennemføres, er der en række juridiske forhold der skal være på plads. Bl.a. skal bygningsreglementet, udbudsloven, AT-anvisninger, regler for sikkerhed og sundhed osv. følges. Selv for mindre renoveringsprojekter, kan der være ganske mange juridiske forhold at holde styr på. Et af forholdene handler om kontrakter med entreprenører, leverandører og rådgivere. Byggebranchen har udviklet en række standardaftaler, der sikrer begge parter interesser, som ofte danner grundlag for kontrakter. Herunder er oplyst nogle standardaftaler, der er gode at kende for FM'ere, der har en rolle i bygge- eller renoveringsprojekter. De kan findes på internettet til fri afbenyttelse.

ABR 89: Almindelige Bestemmelser for teknisk rådgivning og bistand. ABR 89 danner grundlag for kontrakter vedrørende rådgivning, dvs. arkitekt- og ingeniørydelser. Hvis rådgivning og entrepriser udbydes samlet i totalentreprise, bruges et andet grundlag (ABT 93) for kontrakt mellem bygherre og totalentreprenør, men totalentreprenøren kan anvende ABR 89 som grundlag for kontrakter med rådgivere.

AB 92¹: Almindelige Betingelser for arbejde og leverancer i bygge- og anlægsvirksomhed. AB 92 benyttes ved fag- eller hovedentreprisekontrakter i alle typer og størrelser af byggeri og renoveringsprojekter. Den fastsætter forhold omkring f.eks. tvister, aflevering, betalingsbetingelser mm.

ABT 93: Almindelige Betingelser for Totalentreprise. ABT 93 erstatter både ABR89 og AB92 hvis et projekt udbydes i totalentreprise, dvs. at rådgivning og udførelse udbydes samlet.

NU 15 (tidl. NU 06): Almindelige betingelser for vedligeholdelse og reparation. NU 06 er et fælles nordisk aftalegrundlag, der bruges af de tekniske fag, og benyttes både ved enkeltstående arbejder og ved serviceaftaler.

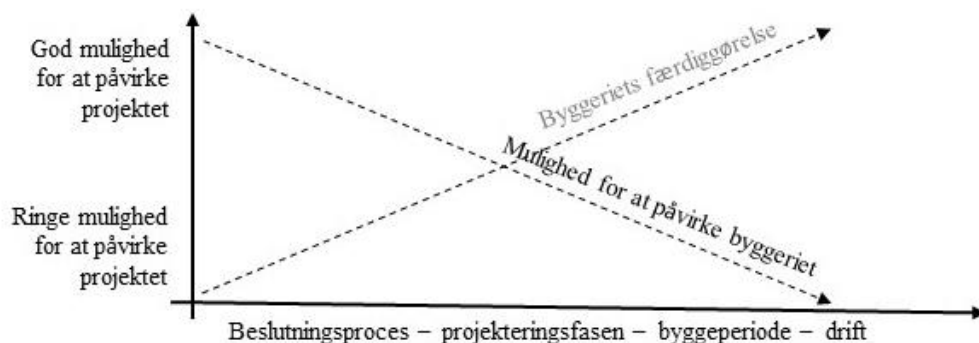
NL 92 og NLM 94: Almindelige betingelser for leverancer af maskiner og andet mekanisk, elektrisk og elektronisk udstyr i Danmark, Finland, Norge og Sverige.

¹ Revision af byggeriets aftalesystem, herunder AB 92, ABT 93 og ABR 89 pågår. Revision af systemet forventer at foreligge sommeren 2018.

3.7. Driftsvenligt byggeri – forudsætninger og værktøjer

Driftsvenligt byggeri er et byggeri der har et godt indeklima, er let at tilpasse, vedligeholde og rengøre, har et lavt energiforbrug og kan styres, reguleres og sikres på passende vis. Det er ikke alle nye bygninger, der er lige driftsvenlige og nogle byggerier har i en periode efter ibrugtagning behov for tilretninger for at alle dele fungerer optimalt sammen.

For at sikre at et byggeri er driftsvenligt ved ibrugtagning og i mange år frem, er det nødvendigt at byggeriets parter og særligt bygherren, har fokus på driftsvenligheden, fra ideoplæg til drift. Der er rigtig mange beslutninger i de tidlige faser af projektet, der har stor betydning for driftsvenligheden, og efterhånden som byggeprojektet skrider frem, bliver det vanskeligere og dyrere at ændre beslutninger om f.eks. tekniske installationer og overflader. De tidlige faser af et byggeprojekt er derfor de mest betydningsfulde for sikring af driftsvenligheden. Figur 3-2 viser hvordan muligheden for at påvirke byggeriet falder i takt med at byggeriet konkretiseres; projekteres, udføres og afleveres til drift.



Figur 3-2 Efterhånden som byggeprojektet skrider frem, bliver det vanskeligere at påvirke byggeprojektet med f.eks. forslag til forbedringer

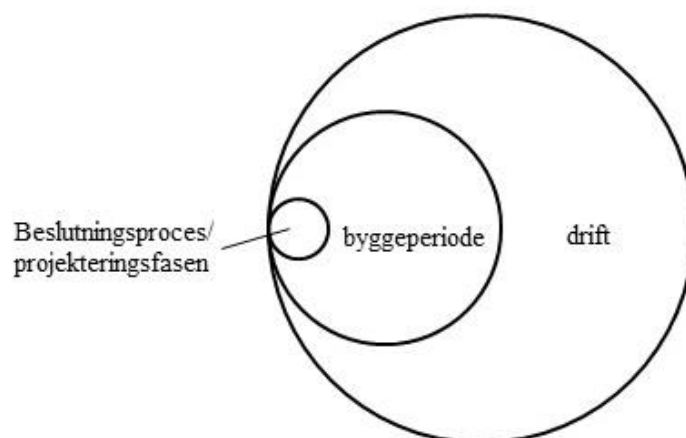
Mange faktorer er afgørende, når en byggeproces og dens slutprojekt, selve byggeriet, skal lykkes. Overordnet skal bygherren have en projektledelse, som forstår at få defineret, udført og afleveret projektet. Projektledelsen skal endvidere sikre, at projektet og projektets succeskriterier - igennem hele byggeprocessen er afstemt med brugerne, driftspersonalet og alle øvrige involverede.

Efterhånden er det mere og mere almindeligt at driftschefer og driftspersonale deltager i planlægning af nye bygninger, for at drage nytte af deres ekspertise så tidligt som muligt. Ved en god og effektiv inddragelse af driftspersonale opnår man dels at deres viden kan indgå rettidigt i beslutninger og dels at de kender byggeriet og kan forberede sig på at overtage det til drift. Ekspertisen findes ofte som en kombination af viden hos enkeltpersoner (personbunden viden) eller som frit tilgængelig viden (ikke-personbunden viden) som f.eks. beskrivelser, tilstandsvurderinger, tjeklister o.l. Hvis den fremtidige driftsorganisationen ikke er på plads endnu, tilbyder firmaer rådgivning om FM i byggeprojekter.

På samme måde anses inddragelse af de fremtidige brugere som vigtigt for at sikre at den færdige bygning passer til behovet. Der er mange måder at involvere brugere på og metoden vil variere

afhængig af hvor i projektet man er. I starten af byggeprojektet er det vigtigt at finde frem til hvilke arbejdsprocesser, den fremtidige bygning skal understøtte. Her kan en kortlægning af de nuværende arbejdsgange være en hjælp, f.eks. ved interviews, observationer og workshops, ligesom visioner for fremtidige arbejdsgange skal indgå. Senere kan man bede brugerne om at evaluere konkrete løsninger ud fra tegninger. Da det kræver en del træning at "læse" tegninger kan man også bygge modeller, enten fysiske eller virtuelle, eller udføre "mock-ups", som er opstillinger eller konstruktioner i fuld størrelse af vigtige dele, mens projektet stadig kan tilpasses og ændres. Inddragelse af brugere er et stort område, som ud over denne korte introduktion, ikke indgår her.

Der er meget at spare ved at bygge drifts- og brugervenligt. Figur 3-3 illustrerer princippet for hvordan udgiften til planlægning og projektering af et byggeprojekt udgør en lille del af entrepriseudgifterne, som igen udgør en lille del af de samlede driftsudgifter i byggeriets levetid. Regner man lønninger til medarbejdere med i "drift", udgør anlægssummen (samlede udgifter til et byggeri til og med aflevering af færdigt byggeri) en endnu mindre del. Der er altså god grund til at "bygge rigtigt" fra starten, også selvom det er vanskeligt at sætte nøjagtige tal på gevinsten.



Figur 3-3 Omkostninger forbundet med driften af byggeriet, overgår langt omkostningerne ved at beslutte/projektere og siden at bygge byggeriet.

Der er igennem de seneste år udviklet og implementeret en række tiltag, der har til hensigt at sikre driftsvenligt byggeri. Værdibyg har udgivet ”Driftsorienteret Byggeproces” som kan downloades gratis fra Værdibygs hjemmeside, ligesom problematikken er omtalt i både bøger og artikler i de seneste årtier. Per Anker Jensens ”Håndbog i Facilities Management” beskriver hvordan FM kan understøtte et driftsvenligt byggeri på en lang række områder. I dette afsnit præsenteres en række af de tiltag, der findes og bruges, men listen er ikke udtømmende og der udvikles også løbende nye initiativer, der har til hensigt at sikre driftsvenligt byggeri med input fra drift.

Initiativerne fordeler sig på to kategorier:

- 1) *Forudsætninger* hos Bygherren for at bygge driftsvenligt; ledelse og kompetencer.
- 2) *Værktøjer*, der kan implementeres i byggeprojektet. Her er tale om eksisterende værktøjer eller koncepter for mere driftsvenligt byggeri, som kan anvendes i byggeprojekter. Enkelte værktøjer, som f.eks. commissioning og DGNB er store koncepter, der indeholder en del af de andre værktøjer. Men værktøjerne kan også bruges alene eller i kombination. Der findes tilsvarende værktøjer til f.eks. brugerinddragelse, men de er ikke medtaget her.

I artiklen ”Ja til driftsvenligt byggeri på DTU – men hvordan i praksis?” fra Maskinmesteren, januar 2008, kan du læse om hvad DTU gør for at nye byggerier bliver så driftsvenlige som muligt. I artiklen ”Hvorfor lykkedes vi ofte ikke med installationerne?” fra HVAC Magasinet, februar 2016, kan du læse om hvad der ofte går galt og hvad der kan gøres bedre i byggeprojekter. Begge artikler findes i denne lærebog.

Forudsætninger for driftsvenligt byggeri:

Professionel Bygherre organisation. Det kræver særlige kompetencer og tid at stå i spidsen for et byggeprojekt. Hvis bygherren ikke selv i nødvendigt omfang råder over sådanne specialiserede kompetencer, kan bygherrerådgivning være en mulighed, evt. som supplement til egne kompetencer.

Professionel Driftsherre organisation. Det kræver særlige kompetencer og tid at levere FM viden til et byggeprojekt. Hvis Bygherren ikke selv råder over sådanne specialiserede kompetencer, eller disse ikke kan afsætte den fornødne tid, kan en FM rådgiver være en mulighed. Kan kompetencerne mobiliseres internt, er det at foretrække, da det øger chancerne for at viden fra projektet kan videreføres til driftsfasen.

Plan for involvering af FM ekspertise fra starten: Bygherren skal sørge for at organisere hvem, hvordan, hvorfor og hvornår FM personale inddrages i byggeprojektet fra start til slut. Inddragelse tager tid, både for dem der skal inddrages, og for byggeprojektet. Hvis driftsorganisationen ikke er etableret endnu, skal det planlægges hvordan input fra den fremtidige drift så skal tilvejebringes.

Bygherrens ledelsesmæssige fokus: Det er bygherren, der skal sætte driftsvenlighed på dagsordenen. Udover konkrete krav og juridiske bindinger, har det ledelsesmæssige fokus på driftsvenlighed stor betydning. Sæt ord på at driftsvenlighed har høj prioritet og at driftsvenlighed er et succeskriterie for projektet.

Relationer: Driftsvenligt byggeri kræver en indsats af alle byggeriets parter og et godt samarbejde er en forudsætning for at lykkes. Gode relationer styrker videndeling og ansvarsfølelse overfor hindandens interesser i byggeprojektet.

Betragt idriftsættelse som et projekt i sig selv: Idriftsættelse af et byggeri er et projekt i sig selv, og der skal sættes tid af til det i hovedtidsplanen. En tidsplan for idriftsættelse bør også indeholde oplæring af driftspersonale og brugere.

Strategi for IT-software for fremtidig drift og vedligehold: Bygherren skal allerede i programmeringsfasen kunne stille konkrete krav til aflevering af dokumentation i byggeprojektet, både af rådgiver og entreprenør. Udformningen af drifts- og vedligeholdelsesmateriale afhænger f.eks. af hvor digitaliseret den fremtidige drift skal være. De fornødne IT programmer og kompetencer skal også være på plads til at modtage informationer i god tid inden aflevering.

Strategi for den fremtidige styring og automatik: Der skal opstilles en strategi for hvordan den fremtidige bygning skal styres, og hvor ”intelligent” bygningen skal være. Det skal beskrives tidligt, så det kan indarbejdes i projektet og indgå i økonomien allerede fra starten.

Værktøjer til driftsvenligt byggeri:

Detaljeret byggeprogram: Målbare og klare krav er første skridt til et byggeri, der lever op til bygherrens forventninger. Byggeprogrammet bør stille klare krav til f.eks. energiforbrug, fleksibilitet, indeklima, rengøringsvenlighed, plads til betjening af installationer. Indgår også i Commissioning. Tiltaget er nærmere beskrevet senere.

Commissioning: Styringsredskab til at sikre at bygningen - herunder installationer og funktionskrav - planlægges, udføres og fungerer efter hensigten ved ibrugtagning. Der er udarbejdet en dansk standard for commissioning: DS3090. Indgår i både DGNB og Soft Landings. Tiltaget er nærmere beskrevet i et særskilt kapitel.

Incitaments aftaler: Der kan i forbindelse med udbud af både rådgivning og entreprenørydelser indarbejdes med økonomiske incitament (ex. bonus-ordninger) for opfyldelse af udvalgte krav.

Soft Landings: Britisk koncept, der med tidlig og kontinuerligt fokus sigter mod en ”blød landing” fra byggeri til drift. Konceptet har endnu ikke har vundet indpas i Danmark, men rummer mange af de enkeltdele, der bruges i dag. Konceptet har stor fokus på ledelse.

DGNB: Certificeringsordning for bæredygtigt byggeri som bygherren kan vælge at bruge i forbindelse med nybyggeri eller renovering. DGNB er oprindeligt udviklet i Tyskland, men DGNB-DK er en version tilpasset danske forhold. Byggerier, der ønsker DGNB certificering bedømmes af ekstern auditor på en række kriterier, herunder miljømæssige, økonomiske, social bæredygtighed samt tekniske kvaliteter og processer. Flere af parametrene er de samme som vurderes at give mere driftsvenligt byggeri. Der findes også andre certificeringsordninger, f.eks. BREEAM og LEED.

LCA (Life Cycle Assessment): Miljømæssig livscyklus vurdering af byggeriets dele. Vurderinger inkluderer hele livscyklus og også f.eks. transport og skal give et overblik over hvor bæredygtigt en løsning er. Vurderingerne kan være komplicerede og der er udviklet software til formålet. Indgår i DGNB.

LCC (Life Cycle Cost eller på dansk Totaløkonomi): Samlet vurdering af en bygnings eller en bygningsdels økonomiske omkostning over en årrække. Vurderingerne kan synliggøre at løsninger,

der er billigst i udførelse, muligvis ikke er billigst set over en årrække. Indgår i DGNB og er et lovkrav ved offentligt byggeri.

Projektgranskning med FM fokus: Granskning af projektet på flere stadier med vurdering af driftsvenlighed, f.eks. rengøring, vedligehold, indeklima, energiforbrug. Granskningen kan være intern eller ekstern. Kan indgå i Commissioning og Soft Landing. Er nærmere beskrevet senere.

Performancetest: Test af de færdige installationers funktion forud for aflevering af et byggeri. Test skal sikre, at den/de beskrevne konkrete ydelser (ex. varmebladeeffekt, W) og funktioner (ex. reguleringsstrategier) fungerer som beskrevet i projektet. Testen udføres oftest af en person, som ikke har været en del af udførelsen. Kan indgå i Commissioning. Tiltaget er nærmere beskrevet senere.

Bygherrens standarder for byggeri: En del større bygherrer har egen driftsafdeling og denne kan sammen med den øvrige bygherre organisation opstille en række skriftlige krav til kommende byggerier, f.eks. krav til bygningsautomatik. Det er særligt relevant ved flergangsbygherre.

POE: Post Occupancy Evaluation. Ved at lade byggeriet evaluere efter ibrugtagning sikres det at evt. ”løse ender” synliggøres, så der kan tages hånd om dem. Det er tillige hensigten at opsamle viden, der kan ledes tilbage til projekt teamet, der kan lære af evt. fejl. Uanset om POE benyttes som et redskab, bør der følges op på om bygningen lever op til forventninger f.eks. om energiforbrug svarer til det forventede. Indgår i Soft Landing.

Skærpet tilsyn: Hvis der er funktioner eller installationer i byggeriet, som for bygherren er særligt vigtigt fungerer ved afleveringen, kan der udføres særligt/skærpet tilsyn med disse. Tilsynet kan eksempelvis starte med fokus på byggeprocessen og på fastlæggelsen af de ydre vilkår, som skal være tilstede for at den givne funktion eller installation kan lykkes. Under selve udførelsen kan der føres ekstra modtage-, proces- og slutkontrol.

OPP: Offentligt-Privat-Partnerskab. En offentlig organisation kan indgå i et partnerskab med et privat konsortium, der projekterer, opfører, drifter og finansierer byggeriet – typisk i 30 år.

OPS: Offentligt-Privat-Samarbejde – også kaldet samlet udbud. Som OPP uden privat finansiering og typisk i 15 år.

Entreprenør ansvar for FM: Udbud af et byggeprojekt, hvor driften i en afgrænset periode efter opførelse, f.eks. 5 år, indgår i kontrakten. Dvs. at de der opfører byggeriet også skal drifte det efterfølgende, hvilket forventes at føre til øget fokus på driftsoptimering.

3.8. Tre særligt vigtige værktøjer til mere driftsvenligt byggeri

I det følgende gives lidt mere introduktion til tre af de ovennævnte tiltag; Detaljeret byggeprogram, FM projektgranskning og Performance test. Commissioning er beskrevet i et selvstændigt afsnit (afsnit 4).

Detaljeret byggeprogram

Et byggeprogram er bygherrens ”kravspecifikation” for det samlede byggeri. Det rummer både de store linjer og mange detaljer. Her er kun omtalt den del, der har størst betydning for

driftsvenligheden af den fremtidige bygning. De opstillede krav i byggeprogrammet skal stemme overens med den ønskede fremtidige brug og drift af bygningen, både på kort og på lang sigt. Bliver det nødvendigt at tilpasse et krav undervejs i byggeprojektet, skal det afstemmes med interessenterne og konsekvenser for fremtidig drift og brug skal undersøges. Det gælder i projekterings- såvel som udførelsesfasen.

Byggeprogrammet kan både indeholde specifikke krav til driftsvenlighed, men også beskrivende afsnit, hvor bygherren sætter ord på, hvorfor driftsvenlighed er vigtigt.

Krav, der er opstillet i byggeprogrammet skal kontinuerligt igennem projektets udvikling fastholdes og krævet indfriet. Kravene skal være så præcise og målbare som muligt, der er f.eks. meget forskellige opfattelser af hvad et "godt indeklima" er, så her er en præcisering nødvendig. Herunder er oplyst eksempler på krav, der kunne indgå i et byggeprogram, der bl.a. stammer fra "Håndbog i FM" og Værdibygs "Driftsorienteret Byggeproces".

Eksempler på krav, der kunne indgå og beskrives i et byggeprogram:

- Indeklima krav. Der kan henvises til kategorier i DS 3033:2011
- Arbejdsmiljøkrav
- Krav om fleksibilitet
- Minimering af energi og ressourceforbrug
- Vedligeholdelsesvenlighed af bygningen ude og inde
- Rengøringsvenlige overflader ude og inde.
- Tilgængelighed til bygningsdele ved rengøring og service, så arbejdet kan foregå under overholdelse af arbejdsmiljøkrav og uden bygningsmæssige indgreb.
- Tilgængelighed for anvendelse af hjælpemidler til service, rengøring mv.
- Robuste og let udskiftelige byggekomponenter og materialer
- Krav om depot-, rengørings og evt. værkstedsfaciliteter.
- Gode pladsforhold og transportmulighed for affald, ude og inde

Performance test

Performance test udføres, på bygherrens foranledning, før den juridiske aflevering af byggeriet fra entreprenør til bygherre. Det indebærer, at aftalte og udvalgte tekniske anlæg testes og eksempelvis indeklimakvalitet (ex. jf. Indeklimaklasse jf. DS/EN 15251:2007) dokumenteres. Test udføres for at kunne dokumentere, at de stille krav er opfyldt. Der måles varme- og køleeffekter, temperaturer, lufthastigheder og lign. Typisk testes ventilationsanlæg, varmeveksler, anlæg for varmt brugsvand og køleanlæg.

Allerede i udbudsmaterialet bør fremgå at bygherren vil lade performancetesten udføre inden aflevering. Der skal fremgå hvad der skal testes og hvilke krav til dokumentation og deltagelse i tests, der forventes af de udførende. Det kræver stor teknisk indsigt at udføre performancetest, men det kræver også indsigt i entrepriseret, udbudsteknik, ingeniørdiscipliner, krav til processer og kvalitetskontrol. Ved brugen af performancetesten opnår bygherren vished for, at de testede installationer opfylder projektkrav – og derved performer/leverer som beskrevet.

Lovkrav om funktionsafprøvning har tidligere alene fremgået af de standarder, som bygningsreglementet henviser til. Men pr. juli 2017 blev det i bygningsreglementet præciseret, at der er krav om at nye tekniske installationer skal funktionsafprøves før ibrugtagning.

Projektgranskning med FM-fokus

Granskning er en grundig gennemgang af projektet på forskellige stadier. På programmeringsniveau vil det primært være granskning af dokumenter. I projekteringsfaserne vil det være granskning af tegninger, beskrivelser og evt. 3D modeller. Granskning med FM-fokus erstatter ikke den projektgranskning, der allerede finder sted hos de projekterende f.eks. tværfaglig granskning. FM-granskningen kan foretages internt hvis bygherren har de rette kompetencer til rådighed, eller granskningen kan foretages af ekstern rådgiver med særlig viden om driftsforhold. Ekstern granskning af byggeprojekter er behandlet generelt i SBI-anvisning 246. Værdibyg har udviklet tjeklister til brug for FM granskning, der kan være nyttige. Uanset om granskningen foregår internt eller eksternt skal bygherren vurdere behovet og beslutte formålet, omfanget og niveauet for granskningen, ligesom det skal indarbejdes i tidsplanen.

Granskningen skal give en vurdering af om byggeriet kommer til at leve op til bygherrens krav om driftsvenligt byggeri. Det kan udføres samlet, eller særlige emner kan udvælges, f.eks. bygbarhed, rengøringsvenlighed, arbejdsmiljø, indeklimakvalitet, energiforbrug.

Som nævnt er det vigtigt kontinuerligt at følge op på om de stillede krav vil blive indfriet efterhånden som projektet skrider frem. FM granskning er en aktiv og effektiv måde at fastholde fokus på kravene og sikre at evt. afvigelser synliggøres så tidligt som muligt, så de fornødne tilpasninger kan sættes i værk.

På de næste sider følger en artikel fra medlemsbladet ”Maskinmesteren”, der udgives af Maskinmesterforeningen. Artiklen beskriver hvordan DTU’s FM organisation, Campus Service, arbejder med.

INFO BOKS:

Læs mere om driftsvenligt byggeri:

Der er god og gratis hjælp og praktiske anvisninger at finde på nettet, bl.a.:

- Værdibyg, www.vaerdibyg.dk: ”Driftorienteret byggeprocess” (2013) og ”Commissioning-processen” (2013)
- Green Building Council, www.dk-gbc.dk: ”Guide til DGNB for bygninger”
- BSRIA, www.bsria.co.uk: ”Soft Landings Framework”

3.9. Litteratur

Jensen, Per Anker, 2011, Håndbog i Facilities Management, 3. udvidede udgave, DFM.

FRI, 2012, Ydelsesbeskrivelsen for: Byggeri og Planlægning.

Rasmussen, H.L., Nielsen, S.B., og Møller, A.B., 2014, Ja! Til driftsvenligt byggeri på DTU – men hvordan i praksis? FM update, no. 3, pp. 22-25.

Værdibyg, 2013, Driftsorienteret byggeproces, Værdibyg.

Værdibyg, 2013, Commissioning processen, Værdibyg.

ISO 41011, 2017 Facility Management.

3.10. Bilag – Ja til driftsvenligt byggeri – men hvordan i praksis

Artikel fra Maskinmesteren, Januar 2017 – Inkluderet med tilladelse fra udgiveren:

Maskinmestrenes Forening • Sankt Annæ Plads 16 • 1250 København K

Ja til driftsvenligt byggeri – men hvordan i praksis?

Hvordan organiseres det i praksis at få overført viden om bygningsdrift til planlægning af nybyggeri, så både byggeafdelingen og driftsafdelingen oplever en god og effektiv proces?

AF HELLE LOHMANN RASMUSSEN, DTU CAMPUS SERVICE,
SUSANNE BALSLEV NIELSEN, CENTER FOR FACILITIES MANAGEMENT PÅ DTU
OG ANDERS B. MØLLER DTU CAMPUS SERVICE

At overføre viden og erfaring fra bygningsdrift til nybyggerier et aktuelt emne i byggebranchen, der forventes at kunne bidrage til øget kvalitet i byggeriet. DTU er en betydelig bygherre i disse år med investeringer for 5,2 milliarder kroner i perioden 2010-2020, og har med egen driftsorganisation gode muligheder for at overføre viden fra drift til nybyggeri.

I DTU's Facilities Management organisation har man for længst fået øjnene op for potentialet ved inddragelse af driftsviden og udviklingen inden for området.

Perioden, hvor nye bygninger planlægges, eller programmeres, vurderes af flere som den mest betydningsfulde fase for den færdige bygning drifts- og vedligeholdelsesvenlighed.

Facilities Management i udvikling

I Facilities Management organisationen CAS (Campus Service) er



I DTU's Facilities Management organisation har man for længst fået øjnene op for potentialet ved inddragelse af driftsviden og udviklingen inden for området.

der en stor viden om drift, og ambitionerne om at bruge denne viden i nybyggerierne er høje. Alligevel oplevede man ved overtage af nye bygninger i 2012, at bygningerne ikke var så driftsvenlige som ønsket. Udfordringerne ved at integrere driftsviden i byggeprojekter er blandt andet at inddrage de rigtige personer, træffe beslutninger på det rette ledelsesniveau, at efterspørge den relevante viden, og at levere den efterspurgte viden inden for korte tidsfrister.

En undersøgelse viste, at CAS allerede i 2014 havde en høj grad af inddragelse af driftsviden. Tiltag som detaljeret byggeprogram, plan for inddragelse af driftsviden og krav om reduktion af energi- og ressourceforbrug var fuldt integreret i planlægningen af byggeprojekterne. Andre tiltag var godt nok i brug, men så ikke ud til at have fundet sin rette form. Der blev beskrevet barrierer ved brug af nogle af tiltagene, og det så ud til tiltagene ikke blev brugt konsekvent af alle projektledere for nybyggerier. Det blev derfor tydeligt, at der var potentiale for mere driftsvenligt byggeri ved at ændre på nogle tiltag. Nogle tiltag så også ud til at kræve unødigt mange ressourcer.

Anbefalede fokusområder i 2014

Undersøgelsen udpegede tre tiltag, som CAS blev anbefalet at få på plads. Det var:

1. Facilities Management kommentering og granskning
2. Standarder for DTU byggeri
3. Krav om driftsvenlighed i byggeprogrammerne

Det er tiltag, der allerede var godt på vej, men tilretninger ville kunne give en mærkbar forbedring i at bruge driftsorganisationens viden og erfaringer i nybyggerierne.

Udover forslag til forbedring af tiltag på operationelt niveau, gav undersøgelsen også anledning til overvejelser af ledelsesmæssig karakter. En klar rolle- og ansvarsfordeling og en tydelig prioritering af driftsvenlighed oppefra, er pejlemærker for ændringerne. Det blev anbefalet, at der stiles efter en trinvis udvikling med høj grad af inddragelse, støttet af klare aftaler og retningslinjer.

Opnåede milepæle i 2016

DTU har siden undersøgelsen i 2014 arbejdet videre med de anbefalede tre tiltag, og er kommet godt videre med at bygge

driftsvenligt. Mange tiltag, der i 2014 var nye og ikke blev konsekvent brugt, opleves fuldt integreret i 2016. Driftschefen fortæller, at der nu arbejdes ud fra en opfattelse af, at "driften også er brugere", forstået på den måde, at den fremtidige drift af et byggeri skal have samme opmærksomhed som den fremtidige brug.

Det er blevet tydeligt i CAS, at lederne af driftssektionerne har mandat og beslutningskompetence for egne fag i byggeprojekterne, også selvom de kan uddelegere noget af arbejdet. De har hver især udarbejdet et sæt standarder, der beskriver deres generelle krav og ønsker til nybyggeri. Standarderne udleveres til rådgiverne i de allertidligste faser af et nyt byggeprojekt. Granskings- og kommenteringsarbejdet, der også varetages af lederne af driftssektionerne, er forbedret.

Commissioning er taget i brug på flere projekter, og der er ansat ressourcer i driftsorganisationen til at repræsentere driften, hvilket erstatter et tidligere initiativ med en "brobygger". Der er også introduceret "100 dages evaluering", der hjælper både CAS og brugerne til at rette op på uhensigtsmæssigheder, der måtte vise sig efter ibrugtagning, samt for CAS' vedkommende at opsamle vigtig læring til næste byggeprojekt.

Endelig er samarbejdet mellem bygherreorganisationen og lederne af driftssektionerne blevet styrket og for eksempel benyttes nu IT-løsninger, der dokumenterer valg og beslutninger truffet undervejs i byggeprojekterne, helt ned på rum-niveau. Det har været vigtigt for driften at få fuld klarhed over, hvad der er – eller ikke er – indeholdt i byggeprojekterne, og særligt hvis det ændrer sig undervejs.

Mere viden på vej i samarbejde med maskinmestre

DTU påbegyndte i december 2016 et treårigt forskningsprojekt (Ph.d.) i samarbejde med Maskinmesterskolen København om netop problematikken omkring at få mere viden om drift ind i byggeri. Det er Center for Facilities Management på DTU Management Engineering, der udfører forskningen. Forskningsprojektet skal blandt andet undersøge driftschefers rolle i byggeprojekter. Projektet skal sammenligne byggeprocesser for skibe, boreplatforme og bygninger i forventning om, at erfaringer og knowhow kan udveksles på tværs.

DTU's Facilities Management

- DTU's Facilities Management organisation har til formål at drifte, vedligeholde og udvikle DTU's bygningsmasse, arealer og faciliteter, herunder sørge for, at forskere, andre ansatte og studerende har de bedst mulige fysiske arbejdsforhold.
- Målet er, at DTU's bygninger, omgivelser og faciliteter anses for at være attraktive af de ansatte og studerende, men også at andre borgere, virksomheder og lokalsamfund anser DTU og DTU's faciliteter som et aktiv, man gerne benytter og samarbejder med.

4. COMMISSIONING

Esben Rosleff Bækmark, Maskinmester

Sweco FM - Cx.

Esben.bakmark@sweco.dk

erbaekmark@gmail.com

Afsnittet "Commissioning" giver en beskrivelse og introduktion til Commissioning, herunder i forhold til processen og aktiviteter i byggeprocessen, normgrundlag og danske erfaringer på området.

4.1. Indhold

4. COMISSIONING	1
4.1. Indhold	2
4.2. Nomenklatur.....	3
4.3. Commissioning i dansk byggeri.....	4
Normativ commissioning efter DS 3090	5
Hvorfor udføre commissioning?.....	7
4.4. Byggeriets parter, faser og kvalitetssikring.....	12
Byggeprocessen	14
Kvalitetssikring i byggeriet	16
4.5. Maskinmesterens arbejde med Cx.....	17
4.6. Commissioningprocessens effekt.....	19
4.7. Lovgivning & vejledninger	21
4.8. Litteraturfortegnelse	25
4.9. Bilag 1	27
4.10. Bilag 2.....	28
4.11. Bilag 3.....	29
4.12. Bilag 4.....	30
Udpluk fra Revision af BR15, per 1. juli 2017.....	30
4.13. Bilag 5.....	31
Udpluk af BR18, per 1. jan. 2018.....	31

4.2. Nomenklatur

AT	Arbejdstilsynet
BH	Bygherre
BHR	Bygherrerådgiver
BIPS	Foreningen <i>Byggeri - informationsteknologi - produktivitet - samarbejde</i>
BL	Byggeledelse / Byggeleder
BR15	Bygningsreglementet 2015
BYGST	Bygningsstyrelsen
Cx	Commissioning
DBI	Dansk Brandteknisk Institut
DH	Driftsherre
D&V	Drift og Vedligehold
F.R.I.	Foreningens af Rådgivende Ingeniører
FT	Fagtilsyn
HE	Hovedentreprenør
KLS	Kvalitets Ledelses System
KS	Kvalitetssikring
SBI	Statens Byggeforsknings Institut
TBB-styrelsen	En forkortelse af Trafik-, bolig- og byggestyrelsen
TR	Totalrådgiver
TE	Totalentreprenør
UR	Underrådgiver

4.3. Commissioning i dansk byggeri

Commissioning er:

IAE¹: ” *A quality-oriented process for achieving, verifying and documenting whether the performance of a building’s systems and assemblies meet defined objectives and criteria.* ”

Commissioning-processen til bygninger er en kvalitetsstyringsproces, der udføres for at opnå, verificere og dokumentere, at en bygnings anlæg, installationer og systemer er planlagt, projekteret, installeret og testet, samt at de bliver betjent og vedligeholdt, så de lever op til krav om totaløkonomi, krav i bygningsreglementet og anden lovgivning samt bygherrens klart definerede krav. Dermed vil commissioning-processen fortsætte i hele byggeriets levetid, således at driftspersonalet løbende følger op på opfyldelse af commissioning-krav. Dette skitseres i en plan for fortløbende commissioning.

Figur 4-1 s. 7 DS 3090:2014 Citat fra Indledningen

Af ovenstående ses det at Cx er en kvalitetsstyringsproces med fokus på helhedstækning i byggeprocessen, opfyldelse af krav fra bygherren og lovgivningen, samt bygningens totaløkonomi. Commissioningprocessens formål er at sikre optimal drift af bygningen fra dag ét, efter AB92 afleveringen. Cx skal sikre at bygherrens funktionskrav til bygningen overholdes, og at bygningen drifter som projekteret. Jf. BR15, er bygherren ansvarlig for lovgivning og krav til byggeriet, hvorfor Cx-processen er bygherrens valg og redskab. Da det er bygherren der betaler for Cx arbejdet, bestemmer denne også omfanget af Cx-processen. Derfor kan en Cx-proces variere kraftigt fra byggeri til byggeri.

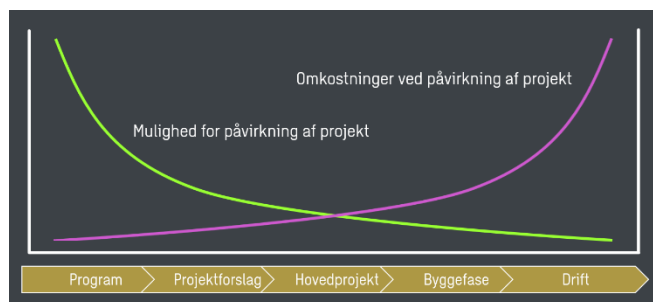
Der er tre varianter af Cx:

- Commissioning af nybyggeri
- Retro-commissioning af eksisterende byggeri, der ikke tidligere har gennemgået en Commissioningproces
- Re-commissioning af et eksisterende byggeri, der tidligere har været gennem en Commissioningproces

Commissioningprocessen til bygninger er defineret af det Internationale Energi Agentur, IEA, og beskrevet i Dansk Standard DS 3090. Standarden er en processtandard, der stiller krav til aktiviteter og dokumenter, mens omfanget defineres af BH.

Commissioningprocessen er obligatorisk og/eller pointgivende i forbindelse med bæredygtighedscertificering af bygninger, fx BREEAM, DGNB eller LEED.

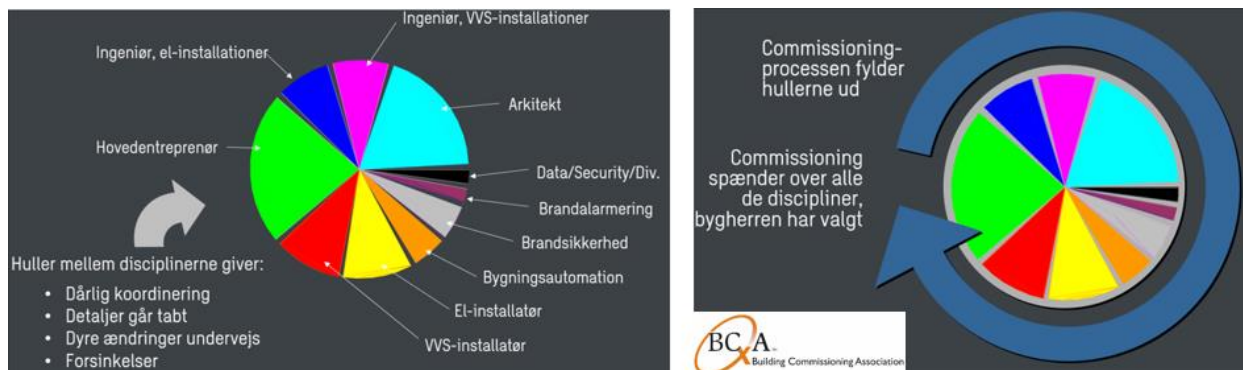
¹ International Energy Agency: IEA Annex 47: *Cost-effective commissioning for existing and low energy buildings.*



Figur 4-2 Effektkurve over tid. Sweco FM - Cx.

Cx. starter før projekteringen, fortsætter gennem projekteringsfaserne og ind i driftsfasen. Ved at være med fra start, forbedres mulighederne for at tænke mål og samspil af installationer ind i byggeriet.

Cx-organisationen skal være uafhængig af projektering og udførelse. Den skal ikke advisere løsninger, men søge gennem dialog med de involverede parter, driftsorienteret granskninger og tværfaglige test, at sikre samspil mellem installationerne. Cx-processen overtager ingen funktioner fra rådgivere eller entreprenører, men kører sideløbende med byggeriets faser. Cx hjælper BH med at stille målbare krav og forfølger dem gennem alle faser. Cx-org. er bygherrens vagthund og BH udstikker Cx-arbejdets omfang. Da FRIs ydelsesbeskrivelse, ABR89 og AB92 ikke stiller konkrete krav til verificering af funktion og samspil på tværs af grænseflader, er dette et vigtigt indsatsområde for Cx.



Figur 4-3 Sweco FM Cx. & Building Commissioning Association

Normativ commissioning efter DS 3090

Bilag 1 viser Anneks A fra DS 3090, en oversigt over aktiviteterne i den 'klassiske' Cx, opdelt i fem faser af byggeprojektet. Hver fase afsluttes med bygherrens accept. Endvidere viser bilag 2 Anneks B, en oversigt over de væsentligste dokumenter i Cx-processen. Af bilagene fremgår det, at DS 3090 er et værktøj, der adviserer en korrekt Cx-proces. Dette er fx modsat ISO 9001, som stiller krav til indsatsområder, uden at specificere metoden.

Idé- og programfasen

Optimalt opstartes Cx aktiviteterne før entreprenører og andre aktører er involveret og har underskrevet aftalte leverancer.

I denne fase udpeges en Cx leder, Cx organisationen opbygges og Cx aktiviteterne defineres og afgrænses. Bygherrens krav til byggeriet opstilles og specificeres i forhold til Cx processen. Metoden her kan være workshops. Det vigtige er, at jo bedre stillede krav, jo mere præcise aftaler kan indgås med entreprenører. Og 'SMART'e krav kan verificeres.

Af de elleve hoveddokumenter oplistet i Bilag 2, er de fire første allerede udformet her. Både krav, plan og log bliver løbende opdateret. Det er en dynamisk proces, der løbende skal tilpasses ændrede vilkår og muligheder. Cx-loggen er logning af observationer, gjort ved granskninger, tilsyn, test m.m. Her beskrives alle relevante observationer, med ansvarlig person for næste aktion i relation til observationen. Loggen følges og refereres til gennem hele byggeriet.

Dispositions- og projektforslagsfase

Her oprettes projektbasis, som er de projekterendes dokumentation af, og stillingstagning til, hvorledes cx krav opfyldes. De projekterende har ansvaret for udarbejdelse og vedligeholdelse af projektbasis. Projektbasis indgår så i Cx-organisationen og bygherrens granskninger af om alle krav og specifikationer opfyldes i forhold til det projekterede, sammen med observationer fra loggen. Granskningerne afrapporteres i en rapport.

Fasen afsluttes med opdatering af alle relevante dokumenter og accept fra bygherren.

Hovedprojektfasen

I hovedprojektfasen færdiggøres byggeprojektet af de projekterende og Cx-organisation. Gransker det samlede og færdige projekt inden byggefasen. Det planlægges hvorledes entreprenører og leverandører involveres i projektet og der opstilles krav til udførelse, kvalitetssikring og test af installationer, samt krav til drift af det færdige byggeri.

Nu oprettes systemmanualen i forbindelse med specificeringer af formater på KS, D&V og dokumentation. Systemmanualen skal indeholde al nødvendig information til D&V af bygningens anlæg, systemer & installationer. Heri også dokumentation fra byggeriet, nødplaner og Cx-processen.

Byggefase

I byggefasen bliver anlæg og systemer installeret, idriftsat, testet og verificeret iht. Cx krav. Bygherrens driftsorganisation deltager i undervisning. KS, D&V og anden materiale granskes af Cx-org. Erfaringsmæssigt er leverandørers entreprenørers KS og egenkontrol i udførelsen af meget svingende kvalitet. Derfor er KS et vigtigt granskningsområde.

Cx-org. opretter i denne fase undervisningsplaner, testparadigmer, testrapporter m.m. Systemmanualen afsluttes og en Cx-rapport udfærdiges for at afrapportere Cx processen fra start til og med byggefasen.

Byggefasen kan være hurtigt beskrevet, men flere af de fejl der er opstået under projektering og planlægning viser sig i denne proces. Forhåbentligt.

Driftsfase

Bygningen testes nu under drift, bla. sæsonbetingede og belastningsbetingede tests hører under her. Derudover hører Cx-org.'s 10-måneders gennemgang, som optakt til 1-årgennemgangen med entreprenører også ind under denne fase. Det giver god mening for bygherren at der laves

en grundig gennemgang af anlæg, systemer og installationer inden entreprenørernes 1-års garanti udløber. Alle dokumenter opdateres, og loggen slutes og afleveres. Ideelt bør bygherre og driftsorganisation også acceptere fortløbende Cx. Hvis en bygning løbende trimmes og granskes i sin performance øges sikkerheden for at '50-års byggeriet' opnås, og at brugerne også har et tilfredsstillende arbejdsmiljø efter 10, 15 og 20 år.

Hvorfor udføre commissioning?

I 2012 blev et byggeri² af et 6000 kvm domicil afleveret. Ifølge www.byggeplads.dk var byggeprocessen god og resultatet var alle parter tilfredse med. Det rådgivende ingeniørfirma var specielt tilfredse med de tekniske løsninger, ”*alt var nøje gennemprøvet inden huset blev taget i brug*”. Huset fik en arkitektonisk pris.

Knap fire år efter blev en Cx-gruppe inviteret til at gennemgå indeklimaet. Konklusion:

Usund luft, dårlig opblanding, vekslende lufthastigheder i opholdszonen, lav udskiftning og alt for høje temperaturer ved direkte sol. Hele ventilationssystemet var CAV, selvom alle mødelokaler på 2. sal var lavet som VAV, hvilket gav vekslende trykforhold i hovedkanalerne. Systemets indregulering pendlede og mere. Udsugningen var opbygget uden kanaler over loft på etagerne, med bare en enkelt hovedåbning per fløj. Det gav træk gennem det åbne kontorlandskab.

Desuden skabte vinduernes opbygning en varmeeffekt. Udstående vindueskasser, beklædt med metal, skabte temperaturer indeni, målt op til 72°C. Den indvendige placering af solafskærmning i kassen, hjalp ikke mod strålingsvarmen. Den kom bare ind som konvektionsvarme i stedet for.

Projekteringsgrundlaget, indeklimatekat. A iht. DS 1752, var ikke opfyldt, og AT-regler blev overtrådt. Den driftsansvarliges bud lød på 50% utilfredse blandt de ansatte.

Anlægssummen var på 85 millioner. I dag er der budgetsat 25 millioner til udbedring og renovering af installationer, samt 8 millioner til nyt køleanlæg, i alt mere end 38% af den oprindelige sum!

August 2015, på et møde i bygherreforeningen, viste projektleder Thomas Rysgaard, bygningsstyrelsen, opgørelsen til højre.

AB92 afleveringens gennemgang opgjorde fejl og mangler til knapt en halv million. BYGSTs egne performance test viste til gengæld fejl og mangler til 14,7 mil.

BYGST påpeger her en vigtig mangel ved de nuværende aftaleformer. AB92 baserer sig på visuel aflevering, hvori funktionaliteten at tekniske installationer ikke indgår.

² Byggesagen er anonymiseret, da sagen sandsynligvis ender i voldgiftsretten.

Et eksempel fra et afleveret byggeri

- AB92 aflevering juni 2015
- Totalrådgiver:
Kapitalisering af mangler i installationer: 434.500 kr.
Alene visuelle registreringer.
- BYGST via performance test:
Kapitalisering af mangler i installationsfag: 14.715.000 kr.
CTS entreprise på ca. 65% fremdrift, væsentlige mangler, aflevering nægtet og dagbod iværksat.
- Entreprenørerne accepterede BYGST opgørelse over mangler og den afledte kapitalisering.

 BYGNINGSSTYRELSEN
 Bygherreforeningen 26. august 2015.

Figur 4-4 Figur 4 Thomas Rysgaard, Bygningsstyrelsen

De ovenstående eksempler er ikke enestående afvigelser i dansk byggeri. Alt for ofte afleveres byggerier, hvor de tekniske installationer ikke lever op til bygningsreglementets og bygherrens krav til indeklima og energiforbrug. På trods af skærpet lovgivning og krav, af grundige standarder, anvisninger og vejledninger er det ikke nødvendigvis normen at en bygning drifter optimalt fra dag ét.

Det er vurderet i 2014 af forskere fra Texas A&M University, Energy Systems Laboratory³, at op til 20% af energiforbruget i et gennemsnitligt kommercielt byggeri, er spild som følge af mangelfuld projektering, idriftsættelse eller vedligehold. Et driftsteam, der overtager en bygnings tekniske installationer, der er forkert projekteret eller mangelfuldt udført og indreguleret forkert, står overfor en svær opgave. Forudsætningen for at kunne drifte og vedligeholde de tekniske installationer på en driftsøkonomisk, sikker og miljømæssig måde skal findes i den forudgående byggeproces.

Cx-gruppen i den fornævnte byggesag, udførte en retro-commissioning af et byggeri, der ikke tidligere havde været igennem en Cx-proces. Kompetenceforudsætningen var anlægsforståelse og driftserfaringer og metoderne var bla. målinger af luftkvalitet og lufthastigheder i opholdszonen, trykmålinger i hovedkanaler og ved kølebafler, udlægning af temperatur- og CO2-loggere, termografering af vindueskasser og nøje iagttagelse og logning af BMS systemets trendkurver, setpunkter og indregulering. Luftens opblanding og transport blev filmet og dokumenteret vha. røg. Dertil kom granskning af anlægstegninger, projekteret såvel som 'as-build'. På den baggrund kunne bygningens drift og indeklima over en periode, dokumenteres. Denne viden blev holdt op imod det oprindelige projekteringsgrundlag, samt gældende lovkrav fra BR10 og AT. Konklusionerne blev afleveret i en rapport, og efterfølgende fremlagt og

³ <http://www.neuralenergy.info/2009/06/continuous-commissioning.html>

gennemgået ved møder og fremvisning i lokalerne. Efter forhandlinger mellem bygherre, driftsherre og totalentreprenør, blev rapporten accepteret og i dag er en ombygning sat i gang.

I det her beskrevne, er der ikke noget, en maskinmester ikke allerede er bekendt med, måske bortset fra udtrykket 'granskning'.

Definition på granskning i byggeriet⁴:

- Granskning er en særlig kontrol af et projektmateriale, kendetegnet ved (BPS, 1988):
'(...) en **dokumenteret, sammenhængende og systematisk gennemgang af et projekt for at vurdere projektets evne til at opfylde specificerede og underforståede krav, samt for at identificere problemer.**'

Dvs. gennem granskning af projektmateriale verificeres de projekterendes og udførendes valg og løsninger ift. bygherrens krav. Cx granskning er driftsorienteret, hvorimod en projekterende rådgiver eller en entreprenør udfører granskning ift. bygbarhed. En faglig relevant granskning kan udpege hvor projektets løsninger ikke giver de ønskede resultater, kan afsløre fejl og mangler i parternes egenkontrol eller påvise huller og grænseflade problematikker mellem forskellige virksomheder og løsninger. Fx at AIA og BMS ikke kan kommunikere sammen, eller at valget af materialer ikke er holdbart ift. de miljømæssige påvirkninger ventilationsanlægget udsættes for grundet placeringen på taget.

Resultatet af en Cx granskning er anbefalinger til afklaring, ikke løsninger. Den granskende parts opgave, er ikke at overtage andres arbejde, men at tilbyde et fagligt blik udefra, efter devisen:

"De ventilationsanlæg der er placeret udendørs, er de egnet til denne placering? Kabinet isoleringen er kun 48 mm., hvilket er meget lidt i forhold hvordan man almindeligvis isolere kabinetter. Vil de konkrete ventilationskabinetter give den fornødne isoleringsgrad til at hindre unødigt varmetab og kondensdannelse ved dimensionerende udetemperatur, samt lever aggregaterne op til danske normer og lovgivning?"

Her beskrives et muligt problem, men bolden gives videre til de projekterende.

SBI og FRI anbefaler ekstern granskning og kvalitetssikring⁵ grundet bla. stadigt større tidspres, priskonkurrence og flere aktører i dagens byggeri, øger risikoen for fejl. I 2004 udgav Foreningen af Rådgivende Ingeniører (FRI) et arbejdspapir, der beskrev problemer og mangler i de rådgivende og projekterendes arbejde. Arbejdspapiret er anbefalelsesværdig læsning, og kan findes ved at følge linket nedenfor.

⁴ <http://www.bsf.dk/media/1496/ekstern-granskning-af-byggeprojekter-1.pdf>

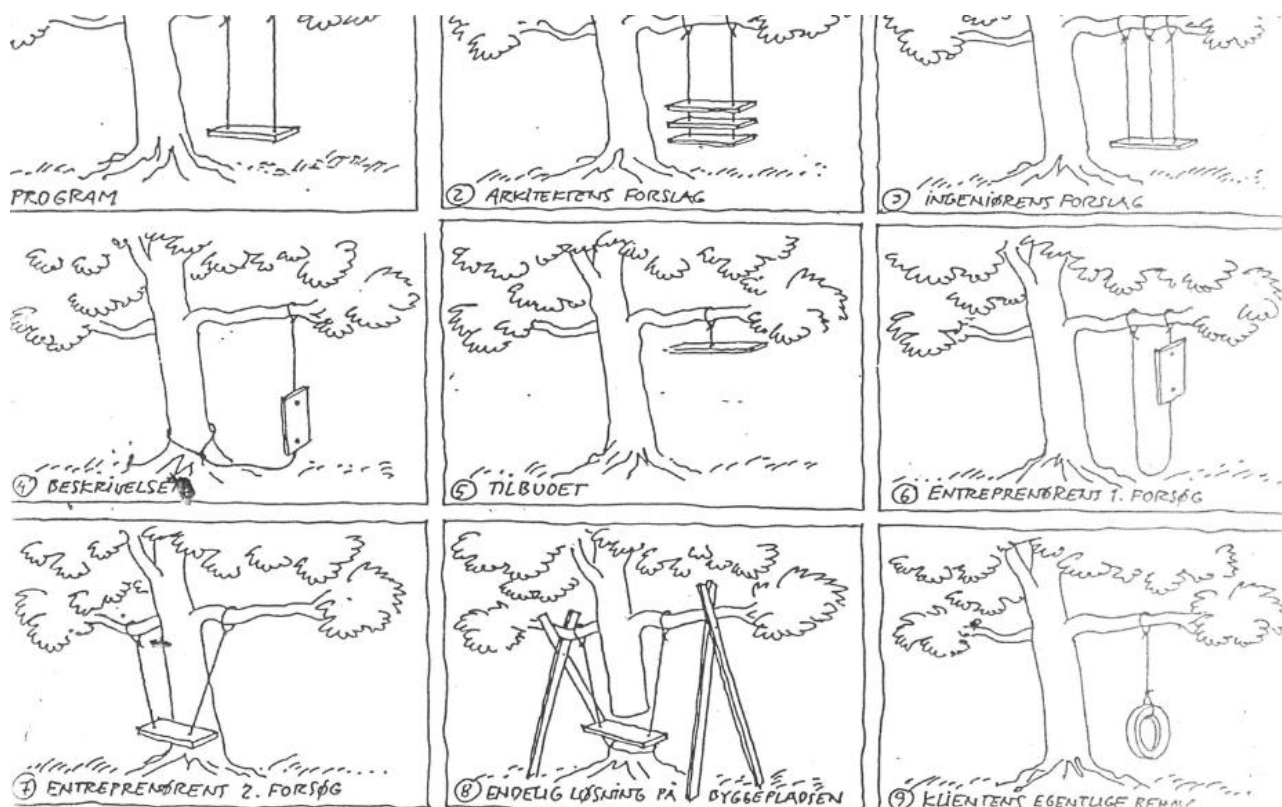
⁵ <http://www.bsf.dk/media/1496/ekstern-granskning-af-byggeprojekter-1.pdf> & <http://www.frinet.dk/byggeri/fri-mener/fris-holdninger/forbedring-af-sikkerhed-og-kvalitet-i-byggeriet,-2004>

I det følgende er identificeret fokusområder, hvor byggeprocessen kan gå galt⁶:

- Bygherre søger, ikke at påtage sig ansvaret for projektets produkt. BH overlader det til TR/TE, uden tilsyneladende at afsætte tid og penge til en veludført proces eller stille krav til KS eller aflevering.
- Rådgivende og projekterende er presset på tid og penge. Ufærdige projekter sendes i udbud. Copy-paste arbejde er almindeligt. Ansvar og detaljer er upræcise, og forventes løst løbende uden at ansvaret er præciseret.
- Kontrolplaner og tilsyn er mangelfulde eller fraværende. Meget overlades til tilfældigheder og tillid.
- Grænseflader mellem parter og arbejde er ikke beskrevet fra start. Tværfaglig og uvildig granskning af KS-arbejdet er ikke en norm.
- De rådgivende mangler praktisk viden og følger ikke op på udførelsen kontra det projekterede. Dvs. der opstår ikke synergi mellem teori og praksis på pladsen.
- De udførende sjusker med arbejdet og egenkontrollen. Det sker at entreprenører byder ind og får opgaver de ikke kan løfte.
- Kulturen og byggetakten på pladserne understøtter ikke tekniske installationer.
- Visuel Aflevering iht. AB92 / ABT93 er ikke velegnet til at eftervise tekniske installationers driftsmæssige tilstand.
- Der er tilsyneladende ingen kontrol med at BR15 bliver opfyldt.

Bla. uafklarede grænseflader mellem de forskellige rådgivere gør, at arbejde ikke bliver gjort, eller at ansvar lander mellem to stole. Dvs. hvem følger kommunikationen mellem BH og entreprenør? Hvem KS'er det samlede projekterede eller udbudte materialer? Hvem laver tilsyn og i hvilket opfang? Hvem sikrer entreprenørernes egenkontrol?

⁶ Dette er underbygget af rapporter fra Rambøll, FRI, DTU og forfatterens eget arbejde, bla. ifm. bachelorrapporten.



Figur 4-5 Ukendt ophavsperson

For at kunne bidrage til en Cx- eller granskningsproces, er visse kompetencer påkrævet. Påkrævet er især bred erfaring med:

- byggeregler, herunder bygningsreglement, normer, standarder, anvisninger og teknisk fælleseje
- byggeteknik, herunder at sammenholde grænseflader
- anlæg og tekniske installationer, herunder vedligeholdelse i driften, levetider, nye produkter mv.
- byggeledelse, kendskab til processer og arbejdet på en byggeplads
- byggeriets jura, herunder udbudsregler, ABR 89 (1989), AB 92 (1992) mv.
- Fejlfinding og 'troubleshooting'.
- risikovurdering

Det følgende er tænkt som en kort intro til byggeriets parter, faser og kvalitetssikring.

4.4. Byggeriets parter, faser og kvalitetssikring.

Et byggeri er et unikt projekt, støttet af lovgivning, vejledninger, standarder, tradition og rutiner. Meget er gentagelser af tidligere udførte processer i en ny kontekst med nye samarbejdspartnerer. Den følgende gennemgang er en kort præsentation af bygherre og rådgivere, og deres indbyrdes samarbejde.

Bygherren er den der bestiller og betaler byggeriet. Til at designe, planlægge og projektere byggeriet bruger BH rådgivere, det vil typisk sige arkitekter og ingeniører. Aftaler mellem BH og de nævnte aktører følger som oftest AB-systemet:

AB-systemet består i dag af tre sæt frivillige standardaftalevilkår ABR 89, AB 92 og ABT 93:

- ABR 89("Almindelige bestemmelser for teknisk rådgivning og bistand") anvendes ved aftaler mellem en bygherre og dennes rådgivere – typisk en arkitekt eller ingeniør - eller en entreprenør og dennes rådgivere.
- AB 92("Almindelige betingelser for arbejder og leverancer i bygge- og anlægsvirksomhed") anvendes ved aftaler mellem en bygherre og dennes entreprenør om udførelse af bygge- og anlægsarbejder, eller en entreprenør og dennes underentreprenører.
- ABT 93("Almindelige betingelser for totalentreprise") anvendes ved aftaler mellem en bygherre og dennes entreprenør om projektering og udførelse af en totalentreprise.

Figur 4-6 Citatklip fra TBB-styrelsens hjemmeside⁷.

Rådgiverrollen inddeles i fire typer rådgivning⁸:

1. **Bygherrerådgivning.** At varetage BHs interesser såvel overfor de projekterende som over for de udførende. Rådgivningen kan pågå under idéoplæg og programmering, og/eller under planlægning og udførelse. Den samme bygherrerådgiver er altså ikke nødvendigvis med under hele projektet.
2. **Totalrådgivning.** TR er ansvarlig for hele projektforsløbet, og BH laver således kun én ABR89, og lader TR tage sig af resten af forløbet. TR står for alle underaftaler, og udpeger projekteringsleder.
3. **Delt rådgivning.** Hver rådgiver har en særskilt aftale med BH. Rådgiverne har pligt til at samarbejde, men er ikke kontraktligt forpligtet indbyrdes. BH har ansvaret for styring og koordinering, men dog udpeges en projekteringsleder til dette.

⁷ <http://www.trafikstyrelsen.dk/DA/Byggeri/Revision-af-byggeriets-aftalevilkar.aspx>

⁸ *Ydelsesbeskrivelser for byggeri og planlægning* FRI & Danske ARK. 2012. s. 5.

4. **Underrådgivning.** UR har kun en aftale med sin klient, oftest TR. Kontakt til projekteringsleder eller BH går gennem TR.

Under udførelsesfasen optræder to specifikke typer rådgivning:

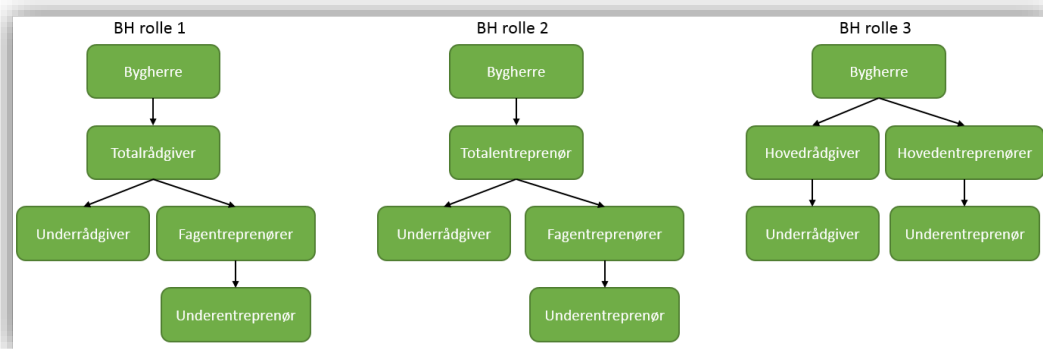
- 1) **Byggeledelse.** Byggelederen styrer byggeriets samlede tid, økonomi og kvalitet, og den medfølgende dokumentation. BL har koordineringen af aktiviteter, inkl. koordineringen af fagtilsyn. BL har også ansvar for indsamling af D&V materiale, samt at tilrettelægge 1-års eftersynet.
- 2) **Fagtilsyn.** FT har ansvaret for udførelse og overvågning af kvaliteten i processen, i form af stikprøvevis tilsyn.

De forskellige rådgiverrolle kan varetages af flere rådgivende virksomheder.

Til at udførelse af byggeriet bruges entreprenører. De tre mest almindelige entreprisformer er er beskrevet i bilag 3.

Andre parter i processen er investorer, driftsherre, den fremtidige driftsorganisation og de fremtidige brugere af bygningen. Alle disse tages med på råd i den idé og programplanlægningen, driften uddannes ideelt op til afleveringen, og brugerne inddrages i ibrugtagningsprocessen.

Bygherren har ansvaret for byggeriet og for opfyldelsen af bygningsreglementet, iht. byggeloven. BH søger dog oftest at købe sig fra ansvaret og styringen gennem en TR eller TE. Bygherren har jo oftest ikke byggeri som kernekompetence. Her skitseres tre scenarier i et byggeri:



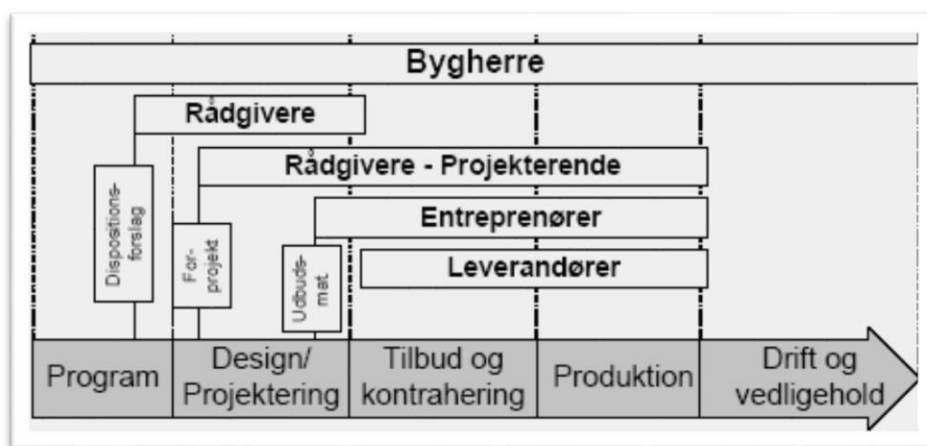
Figur 4-7 Bygherrens rolle

Rolle 1 & 2 er den de fleste bygherrer er mest komfortable med. Ikke altid har BH evnen eller midlerne til at være ansvarshavende eller styrende i en byggeproces. I sit mest ekstreme udtryk, kan BH rolle 1 & 2 være ren sagsbehandling og fakturaskrivning.

I rolle 3 har bygherre aktivt taget ledelsen af byggeprocessen. Rolle 3 kræver mere viden og ageren fra BHs side. En styrende bygherreorganisation kræver at man har den faglige indsigt. Deri ligger en stor vanskelighed, men også en mulighed, da Cx, granskning og performancetest mm. trækker i en retning af mere professionelle BH organisationer. Det kan være svært at forstå

for BH, at man skal påtage sig denne rolle, da man måske føler at den aktive rolle er uddelegeret gennem ABR89 eller ABT93.

Byggeprocessen



Figur 4-8 Byggeriets faser. Fra Miljøstyrelsens hjemmeside.

I de indledende faser modtager BH rådgivning fra bygherrerådgiveren. Gennem brugerinddragelse, workshops m.m. skitseres byggeprogrammet. Byggeprogrammet skal forstås som idégrundlaget for byggeriets udformning. Typisk indeholder byggeprogrammet ikke specielt målbare krav, hvorfor det er nødvendigt at supplere med Cx kravspecifikationer.

Dispositionsforslaget er første beskrivelse af hvorledes byggeprogrammet realiseres. Forprojektet danner ramme for myndighedsgodkendelser, samt de projekterendes arbejde. Forprojektet bliver til et færdigt hovedprojekt, hvorefter udbudsmaterialet skrives og entrepriserne går i udbud.

Et vigtigt punkt i udbudsmaterialet er byggesagsbeskrivelsen, indeholdt bla. kvalitetssikringskravene. Er et krav og eller et emne ikke uddybende behandlet her, kommer det ikke med senere, med mindre BH betaler ekstra.

Kvalitetssikring i byggesagsbeskrivelsen, er udbudskvalitetsplanen. Den skal indeholde krav til bla. komponentliste og modtagekontrol. Det skal være en overordnet hensigtserklæring, med alle de elementer som skal være tilstede i processen. Komponentlisten må fx ikke nævne specifikke produkter i offentligt udbud. Evt. kan specifikke krav til samspil med eksisterende installationer, oplistes under tildelingskriterierne oppe i udbudsbrevet. yderligere KS-krav er mere detaljerede og specificeret i de enkelte faglige arbejdsbeskrivelser. Man kan sige at entreprenører og leverandører læser udbudsmaterialet med et kritisk blik. Der gives tilbud efter udbudsmaterialet, og oftest er det billigste der vinder. Altså vil fejl og smuthuller i udbuddet, kunne danne grundlag for ekstraregninger, og dermed kan et alt for billigt tilbud ende med at være en god forretning for en entreprenør. Krav til samspil med forskellige tekniske løsninger, afklaringer mht. grænseflader ml. tekniske entrepriser, krav til kommunikation, drift og vedligeholdelsesmateriale og krav til uddannelse af det fremtidige driftspersonale. Alt dette SKAL bare være på plads i udbuddet.

Under tilbudsfasen gennemgås de indgående oplæg fra entreprenørerne, helt ned i detaljen. Her er der kvalitetsstyring fra rådgivers side, men altså stadig teoretisk. Men der gives tilbud på

tilbudslisten, så hvis der er mangler eller uoverensstemmelser mellem denne og de oprindelige intentioner, ”er det bare ærgerligt”. Derfor er høj detaljegråd i udbuddet godt. Dog i store sager bliver udbudslisten simplificeret, så skal formalia falde efter kontrakten er igået. Det kan åbne for uafklarede udfordringer og fordringer, hvilket igen kan betyde forsinkelser, grænsefladeproblematikker og / eller ekstraregninger. På en nuværende forsinket byggesag, er der stadig områder der ikke er projekteret færdigt, selv om byggeriet skulle have været afleveret for over et år side. Totalrådgiver og entreprenør er uenige om, hvem der skal detailprojektere.

Efter tilbudsfasen starter samtalen mellem entreprenør og rådgiver. Man laver en projektgennemgang. Hvordan vil du løse dette? Har du nogle forbedringer? Hvordan kan det gøres billigere? Entreprenøren udformer kontrolplanen, med rådgiver som godkender.

Udførelsens 5 vigtige punkter:

1. Projektet **SKAL** være gennemarbejdet – entreprenørerne bør ikke være i tvivl, når de byder eller udfører arbejdet.
2. Før grundigt tilsyn, så evt. fejl hurtigt opdages.
3. Undgå projektændringer – det gør kun byggeriet dyrere.
4. Betal kun regninger for faktisk udført arbejde og aldrig forud.
5. Sæt **ALDRIG** et ekstraarbejde i gang inden skriftlig godkendelse af pris og omfang på det specifikke arbejde.

Figur 4-9 Udførelsens 5 vigtige punkter

Produktion eller udførelsesfasen, er byggeperioden. I udførelsesfasen skal byggeledelsen holde øje med fem ting: kvalitet, omfang, tid, økonomi, samt sikkerhed.

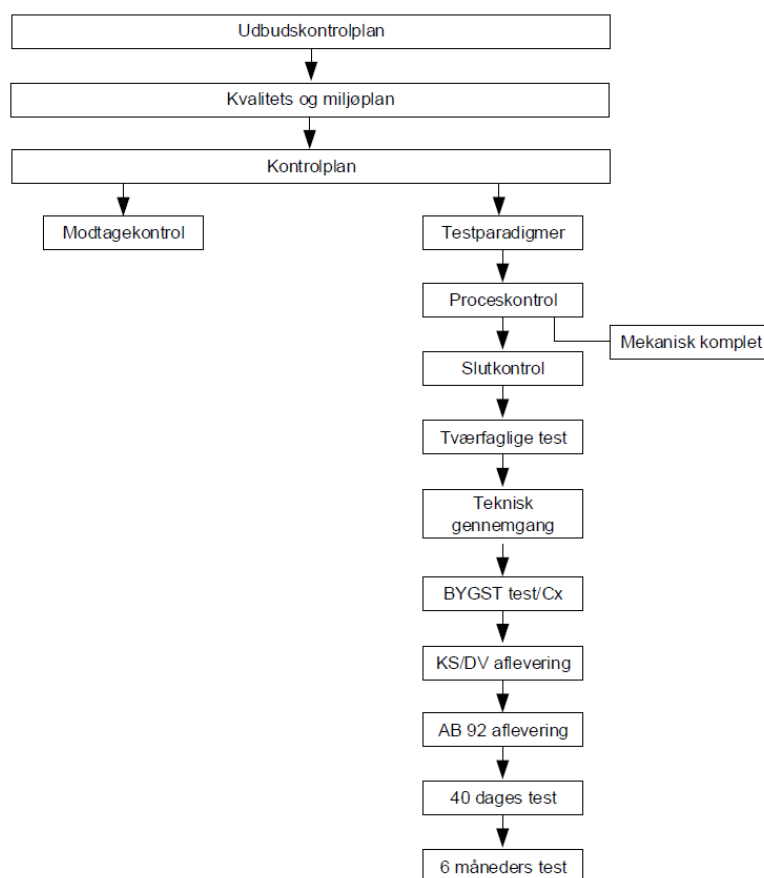
Det er her at projekteringen og planlægningen står sin prøve, og hvad der kan gå galt, vil nok også gå galt. Et byggeri er dels både et unikt projekt, dels for det meste i sin enkeltdele en velafprøvet arbejdsgang. Det unikke er samspillet og kommunikationen mellem nye aktører. Figur 4-9 er en udmærket huskeliste til en bygherre, men da den gode rådgiver har kendskab til både drifts- bygherre- og entreprenørrollen er det taget med her.

Udførelsesfasen stopper ved afleveringen. Iflg. AB92 §28 & §29 melder entreprenøren klar, hvorefter BH har 10 arbejdsdage til at indkalde til afleveringsforretningen. Dermed menes en gennemgang for synlige fejl og mangler. Mindre fejl betyder at der sættes en frist for udbedning af disse, væsentlige fejl

, fx påvist ved en performancetest, kan betyde at en bygherre kan nægte at modtage afleveringen. Definitionen på væsentlige mangler skal være beskrevet allerede i udbudsmaterialet. Tvister mellem entreprenør og bygherre afgøres i yderste tilfælde ved en voldgiftsdomstol. Da det er bygherrens opgave i Danmark at påvise fejl og mangler, vistnok som det eneste land i EU, stiller det høje krav til bygherrens kendskab. Her er Cx eller anden professionel rådgivning til stor nytte for BH, da denne sjældent har byggeri som spidskompetence.

Kvalitetssikring i byggeriet

Nedenstående processkema er en oversigt over kvalitetssikringselementer for tekniske installationer i et byggeri. Det viste er fra et specifikt byggeri, og en kontrolplan skal altid tilpasset den konkrete sag.



Figur 4-10 Proces flow over kvalitetssikring, Karsten Jacobsen V2C

Kontrolplanen beskriver KS på pladsen. Den indeholder:

- Hvad man skal lave KS på.
- Hvornår man skal lave det.
- Hvor tit man skal lave det.
- Omfanget.

Fx røntgenfotografering af rustfri rør: Det skal gøres løbende. Byggeledelsen udpeger 10% til stikprøver. Der skal opstilles klare acceptkriterier. Kontrolplanen og følgende kontrolskema er lavet på baggrund af udbudskontrolplanen. Dvs. jo bedre og mere specifikt rådgiver beskriver opgaven i udbudsmaterialet, jo større krav kan du stille i din KS. For alt hvad der ikke står i udbudsmaterialet og tilbudsliste er ikke med i entreprisen.

Modtagekontrol består af to ting. Modtagekontrol er at kontrollere at det du modtager er det du har bestilt.

Materialekontrol er en sammenstilling med den godkendte komponentliste og din følgeseddel.

Komponentlisten udfærdiges af entreprenøren og godkendes af rådgiveren. Fx nogle materialer mister deres ønskede egenskaber hvis de samles med forkerte komponenter.

Hvis disse tre elementer (komponentliste, modtage- og materialekontrol) er i orden hele vejen igennem, er det kun sjusk som kan kasserer ting. Sjusk forebygges med proceskontrol, kontrol af det løbende arbejde, der foregår på pladsen. Proceskontrol er den ene del af de udførendes KS, den anden er funktionsafprøvning / performancetest og indregulering. Proceskontrol kaldes også udførelseskontrol.

Tværfaglige test er tests der afprøver funktionaliteten af et anlæg på tværs af entreprisegrænser. Tre entreprenører kan have udført deres arbejder korrekt og i overensstemmelse med funktionsbeskrivelserne, uden at det samlede anlæg virker som det var oprindeligt tiltænkt. Det kan være ventilationsanlæg eller brandtekniske installationer, der typisk udføres af flere entrepriser. Ved at indskrive tværfaglige test i udbudsmaterialet, er entreprenørerne tilskyndet til at kommunikere og udarbejde løsninger, der virker i samspil.

4.5. Maskinmesterens arbejde med Cx

Commissioning arbejdet er, som nævnt, BHs eksterne verificering af kvaliteten af projekteringen og udførelse af fortrinsvis de tekniske installationer, deres indbyrdes sammenspil og driftsmæssige egenskaber. Metoden er granskning, registrering, spørgsmål, dialog og verificering.

At granske projekteringsmateriale, KS-dokumentation, tilsynsrapporter m.m. kræver tegnings- og anlægsforståelse, kendskab til byggeriets processer, andres arbejdsroller og - gange, samt adgang til relevant materiale. For jo mere indsigt og overblik, jo mere kan man byde ind med. Maskinmesteren, som generalist, kan her byde ind med en bred vifte. Og husk at man ikke er alene. Synes man at varmecentralen eller generatoranlægget er opbygget mærkeligt, kan man spørge specialisterne i andre afdelinger.

Registrering af observationer samt videre kommunikation af disse samt spørgsmål, kan være svært. Tænk på at alle i processen, udover deres normale opgaver, modtager tonsvis af mail og informationer hele tiden. For at sikre Cx-processen, er det vigtigt at, med bygherrens accept og vægt, der opbygges fora til dialog omkring cx-arbejdet. Cx-loggen er her et vigtigt redskab til registrering af og efterfølgende aktion på observationer, spørgsmål og dokumenterede mangler.

Cx-processen er dialogbaseret. Det kræver gelinde og fingerspidsfornemmelse. *Hvem er de fjolser, der står og kigger mig over skulderen?* Spørg, kritisér ikke. Alle i hele byggeprocessen knokler efter bedste evne, med deres eget afgrænsede emne. Alle producerer mængder af tegninger, notater og dokumentation, som ganske få læser. Med den rigtige indfaldsvinkel fra granskningens side, er responsen ofte positiv. *Tænk sig, her er der faktisk én, der nærlæser hvad jeg skriver, og sætter sig ind i det.* Det handler om samarbejde og empati. Er der først opstået fjendtlighed, er processen med at sikre installationers driftspotentiale besværliggjort.

At verificere en løsning før aflevering, er klassisk maskinmesterarbejde. Er der tvivl om en skitseret løsnings funktionsduelighed, kan man tidligt i byggeprocessen opbygge et mock-up område. Dvs. lave et afgrænset område, hvori den tekniske løsning testes. Det kan være et rum i et byggeri, et stinkskab i et laboratorium eller en generator på producentens faciliteter. Op til AB92-afleveringen af byggeriet laves der performancetest. En performancetest består af dels et testparadigme, hvori formål, ansvar, forudsætninger, indhold, tidspunkt, metode, acceptkriterie

og konsekvens for testens gennemførelse beskrives⁹. Til selve testen er udformet et testskema, hvori iagttagelser og forhold registreres. Udover at verificere anlæggets validitet og samspil med andre installationer, skal performancetesten også verificere at entreprenørens egenkontrol, lovgivningen og bygherrens krav er tilgodeset og opfyldt. Når testen er bestået er installationen klar til aflevering. Behovet for denne test, er dels bevist af det ovenstående eksempel fra Thomas Rysgaard, BYGST, og dels af, at nu er funktionsafprøvning blevet en del af bygningsreglementet.

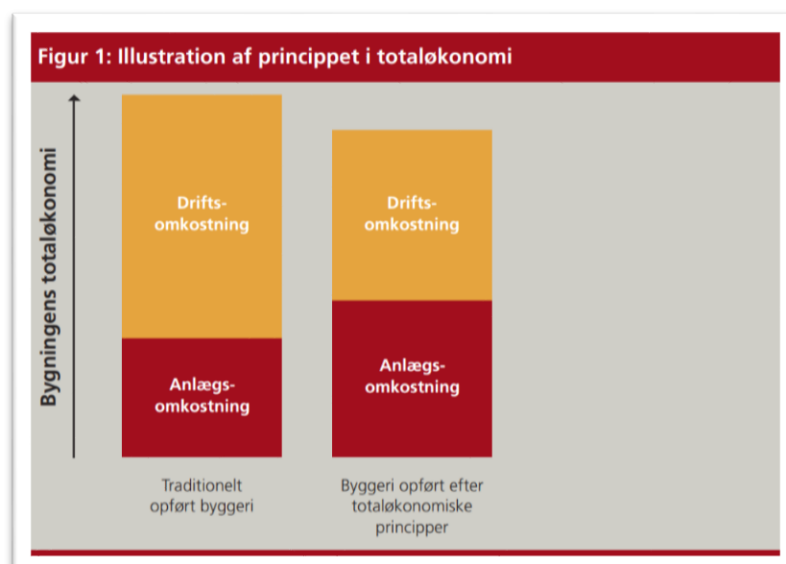
Det er dog vigtigt at understrege at funktionsafprøvning i BR15 forstand ikke er tværfaglig og at en performancetest heller ikke nødvendigvis er det. Det er essentielt at grænseflader er beskrevet klart og tydeligt, fx således at entreprenørerne tester egen leverance og Cx-org. tester på tværs af fag og entrepriser.

Et byggeri kan strække sig over flere år, og Cx-processens omfang og indsats bestemmes af BH. Derfor er det svært, på få sider, at beskrive en hel cx-proces. Men faktisk samtlige fag, der undervises i på maskinmesterskolen kommer i spil. Generalistens arbejdsplads. Kendskab til fysik, anlæg, systemprotokoller, standarder, anvisninger, ledelsessystemer og projektledelse er essentielt. Og økonomi er altid det bedste argument. Sundhed, sikkerhed og miljø har også sin vægt.

Det ovenfor nævnte byggeri, af et domicil i 2012, var en retro-commissioningproces, hvori et team undersøgte de tekniske installationer funktionalitet og samspil i et eksisterende og dermed afleveret nybyggeri. Metoden var, som nævnt, målinger af tryk, temperatur, lufthastigheder og forureninger. Termograferinger, mock-up rum, gennemgang af anlægsopbygninger. Dvs. både varme / køl, ventilation, BMS og IBI. Kontrol af indreguleringer, med step-respons test og sund fornuft. Dette blev holdt op imod projekteringsgrundlaget og afleveret i en rapport og en række afleveringsmøder. Målet var ikke at anvise løsninger, men påvise fejl og mangler i indeklimaet.

Et vigtigt element Cx-teamet kan bibringe bygge processen, er det praktiske driftsorienteret blik udefra. Alle led i byggeriet arbejder med hvert sit arbejdsområde, hvor fokus er på projektering og udførelse. **Ingen** på selve pladsen, har fokus på dagen efter aflevering. Og dog er driften af bygningen trods alt den største udgift på sigt. Cx-teamets bidrag er i høj grad, at kunne sætte sig ud over den gængse 'silo'-tænkning, og bibringe byggeriet fokus på den fremtidige drift.

⁹ BYGSTs hjemmeside tilbyder en bred vifte af performancetests.



Figur 4-11 Totaløkonomi princip, <https://www.bygst.dk/media/22293/Bedste-praksis-manual.pdf>

4.6. Commissioningprocessens effekt

Der findes ikke mange danske undersøgelser af effekt eller økonomisk gevinst af at udføre Cx i dansk byggeri, og de fleste er firmaers egne cost-benefit undersøgelser. Dog findes der Rúnar Örn Ágústsson's speciale fra 2010, *Building Commissioning*. Heri behandler han en sammenligning mellem to indkøbscentre, Bryggen i Vejle og Bruuns Galleri i Aarhus¹⁰.

	Bryggen	Bruuns Galleri
Location:	Vejle, Denmark	Aarhus, Denmark
Size:	56.363 m ²	85.022 m ²
Opening year:	2008	2003
Stores:	80	85
Cafe/restaurants:	2	5
Movie theatre:	0	1 (2.011 seats in 8 auditoriums)
Building regulation used:	BR95	BR95
Main Contractor	NCC	NCC

Figur 4-12 Tabel fra *Building Commissioning*

De to centre er bygget med 5 års mellemrum af samme entreprenør, samme sjak og drevet af samme driftsherre. På trods af en størrelsesforskel, og små forskelle i anvendelse er de sammenlignelige. Bryggen er, modsat Bruuns Galleri, udført med commissioning. Tilmed var den først opførte brugt som reference for den senest opførte. Ágústsson's undersøgelse sammenligner energiforbrug i perioden maj 2008 til april 2010.

¹⁰ S. 57. Ágústsson, Rúnar Örn. *Building Commissioning*. 2010 DTU Management Engineering.

Electricity consumption p. m ²	2008 (kWh/m ²)*	2009 (kWh/m ²)	2010 (kWh/m ²)**
Bruuns Galleri	45,91	39,07	9,11
Bryggen	27,73	23,31	4,19
Difference between electricity consumption	40%	40%	54%

* = Only the time period from May to December of 2008.
** = Only the time period from January to April of 2010.

Figur 4-13 Tabel fra Building Commissioning

I et butikscenter er elektrisk lys en hovedkilde til opvarmning, hvorfor megen belysning kræver megen køling. Ágústsson konkluderer at den store forskel i kWh/kvm skyldes ringe projektering og indregulering i Bruuns Galleri, hvilket førte til et højt elforbrug, mens på Bryggen havde man tænkt problematikken med i udformningen. Det skal nævnes at belysningen var uden for driftsherrens kontrol. Som det ses af ovenstående tabel, er forskellen i forbrug markant.

Energy used for heating and hot water production p. m ²	2008 (kWh/m ²)*	2009 (kWh/m ²)	2010 (kWh/m ²)**
Bruuns Galleri	10,393	30,195	20,201
Bryggen	11,879	19,775	11,743
Difference between energy consumption:	-14%	35%	42%

* = Only the time period from May to December of 2008.
** = Only the time period from January to April of 2010.

Figur 4-14 Tabel fra Building Commissioning

Tabellen over varme- og varmtvandsforbrug viser samme tendens, bortset fra første år. Kigger man nærmere på data, er der ting ved Bruuns Galleri for nov-dec 2008 der ser mærkeligt ud, men det er ikke målet her at diskutere data, eller gennemgå Ágústssons speciale. Han redegør nøje for forskelle i projektering, proces og drift, samtidigt med at han godtgør at Bruuns faktisk ligger i den lave ende i DK når det kommer til energiforbrug i butikcentre. Konklusionen er at grundigt forarbejde, omtanke, viden og samtale har øget Bryggens performance ift. Bruuns.

Er Cx så altid en sikker økonomisk gevinst? Ikke nødvendigvis. Hvis Cx-org. ikke får indflydelse eller autoritet, er arbejdet spildt. Desuden er et team ikke bedre end sin samlede viden, og praktisk kendskab til indregulering, D&V m.m. bør være centralt i en Cx-org.

Ágústssons eksempel er det eneste offentligt tilgængelige data omkring commissionings effekt på byggeriet i DK, og det er dermed ikke dokumenteret at Cx har en mærkbar økonomisk effekt, men selve Cx-processen kan bidrage essentielt til løsning af problematikker og på sigt give besparelser. Ved at opstille målbare kriterier for installationer, ved at skabe dialog mellem

parterne, ved at sikre forståelse for fælles mål, opnå en synergi og forståelse for andres arbejde og bygherrens endemål. Derudover sikrer Cx-processens opbygning at faser afsluttes og ting ikke afleveres før de virker efter hensigten. Ideelt set. Hvis fx en entreprenør opnår forståelse for, at det aftalte ikke er leveret, bliver resultatet risikabelt. Og derudover har en Cx-org. Ikke mere indflydelse eller magt end bygherren uddelegerer.

BH kan opleve Cx som en ekstra udgift til noget, man allerede havde betalt for. Det er ikke helt korrekt. Som aftale systemet er i dag, kan alle leve op til sine forpligtelser, og ting virker stadig ikke. De fleste aftaler tager ikke højde for samspil og delt ansvar. Det er hvad Cx følger op på. At produktet endnu er nyt og virksomheder sælger KS, egenkontrol og indregulering som Cx er forkert. Cx er ikke et alternativ til egenkontrol, KS og normal aflevering. Cx er bygherrens verificering af at det ønskede er opnået.

4.7. Lovgivning & vejledninger

Byggeriet er underlagt byggeloven, BR15, *Bekendtgørelse om kvalitetssikring af byggearbejder i alment byggeri m.v.*¹¹, *Bekendtgørelse om energimærkning af bygninger*¹², maskindirektivet, certificering af statikere & brandinspektører og mere. Dertil skal lægges de standarder og anvisninger som BR15 refererer til. Af myndigheder er der kommunalbestyrelsen, AT, beredskabsstyrelsen, brandmyndigheder, fødevarestyrelsen o.a.

Dog på trods af lovgivningens store dækningsgrad sker det, at ansvar i praksis 'lander mellem to stole'. Et eksempel er maskindirektivet. Maskiner, CE-mærkning og direktivet er i dag hos AT. AT kontrollerer dog alene de sikkerheds- og sundhedsmæssige aspekter ved maskiner på arbejdspladser. De kontrollerer ikke CE-mærkningen for sammenbyggede maskiner fx eller el-tekniske aspekter. En anden myndighed, der ikke håndhæver hele sit myndighedsområde ift. til BR15, er kommunalbestyrelsen. Bygningsreglementet er byggeloven omsat til håndfaste krav. Byggeloven¹³ har flere formål. Bla. at bygninger er sikre og sunde og at ressourceforbruget mindskes. Ansvarsfordelingen er klar:

§ 5. Transport- og bygningsministeren udfærdiger et bygningsreglement med regler om de i §§ 6-13 omhandlede forhold samt om forhold, som loven i øvrigt indeholder hjemmel til.

§ 5 A. En bygherre, der som led i sit erhverv udfører byggeri, er erstatningsansvarlig efter dansk rets almindelige regler for tab som følge af, at byggeriet ikke udføres i overensstemmelse med bygningsreglementet.

§ 16 C. Kommunalbestyrelsen er bygningsmyndighed.

Figur 4-15 Sammenklippede paragraffer fra Byggeloven

¹¹ BEK nr. 773 af 27/06/2011 <https://www.retsinformation.dk/forms/r0710.aspx?id=137901>

¹² BEK nr. 1392 af 22/11/2016 <https://www.retsinformation.dk/Forms/R0710.aspx?id=185076>

¹³ <https://www.retsinformation.dk/forms/R0710.aspx?id=183662>

Kommunalbestyrelsen udsteder byggetilladelse og giver ibrugtagningstilladelsen. Byggetilladelsen indeholder bla. forhold om integration med det eksisterende forsyningsnet, lokalplan og transportforhold. Tilladelsen kan også stille krav til udformning og æstetik ved bygningen. Ibrugtagningstilladelsen gives hvis byggetilladelsens krav er opfyldt, at BBR registret er korrekt opdateret og brandtekniske anlæg har fået foretaget en systemintegrationstest. Konklusionen må her være at tekniske installationers driftsmæssige evne til at overholde kravene i BR15 ikke eftervises af en myndighed. Dog stikprøvetester DBI, mens AT og fødevarestyrelsen rykker ud ved anmeldelser. Fremkomsten af Cx og performancetest har dog startet en debat, som i første omgang har ført til en ændring af BR15, der trådte i kraft d. 1. juli 2017¹⁴.

29. I bilag I, kap. 6.5.3, indsættes efter stk. 6. som nyt stykke:
»Stk. 7. Der skal gennemføres en funktionsafprøvning af belysningsanlægget før ibrugtagning. Funktionsafprøvningen skal påvise om belysningsanlægget overholder bygningsreglementets krav til belysningsniveau, samt at dagslysstyring, bevægelsesmeldere og zoneopdeling fungerer efter hensigten. Dokumentation af funktionsafprøvningen skal indsendes til kommunen senest ved færdigmelding.«

30. Som vejledningstekst til bilag I, kap. 6.5.3, stk. 7, indsættes:
»(6.5.3, stk. 7) Der henvises til Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsens vejledning om funktionsafprøvning.«

Figur 4-16 Bekendtgørelse om ændring af bekendtgørelse om Bygningsreglementet 2015

I ændringen stilles der krav til funktionsafprøvninger af belysningsanlæg, varme-køleanlæg, ventilationsanlæg og elevatorer. Se bilag 4. Dokumentationen skal *'indsendes til kommunen senest ved færdigmelding'*. Det lyder lovende. Det er dog ikke blevet taget vel imod i branchen. Der er ikke lagt vægt på grænseflader og samspil, kommunen skal her påtage sig en ny rolle lyder nogle af kritikpunkterne. Det ændrer ikke meget ved den nuværende byggeproces' arbejdsgange. Det er kontrol og ikke styring. *"Testen dumper. Hvad så? Så skal man udbedre fejlen i et færdigt byggeri. Den slags fejl skal tages før, ikke senere."*¹⁵

Citat¹⁶ om det nye krav til funktionsafprøvninger og indlevering til den kommunale myndighed:

"Den store forskel på nu og tidligere er jo at et installationsarbejde nu ikke længere kan afleveres uden at være indreguleret og testet (idet mindste at der er udarbejdet dokumentation for udført test).

Der ligger bare den lille problemstilling, at målinger er taknemlige og kan manipuleres med. Det vil med andre ord sige at man kan udarbejde måle- og testrapporter der ser velfriseret ud, mens virkeligheden kan se helt anderledes ud.

En anden problemstilling, ved denne vejledning og BR15 kravet, er at der ikke er stillet krav om en samordnet test af hvordan bygningsdele og installationer arbejder sammen. Det enkelte

¹⁴ <https://hoeringsportalen.dk/Hearing/Details/60529>

¹⁵ Ole Teisen, Chefrådgiver Sweco FM - Cx.

¹⁶ Bo Andersen. Maskinmester hos Sweco FM - Cx & censor på MSK.

ventilationsanlæg, eller varmeinstallation, kan jo sagtens være velfungerende, mens der kan være forhold der gør at de ikke fungerer i den store sammenhæng. Denne sammenhæng bliver ikke testet med de nuværende krav.

Endvidere ser jeg en juridisk problemstilling: For det tilfælde at der er foretaget en funktionstest der på papiret ligger inde for gældende tolerancer og som efterfølgende bliver godkendt af myndighederne (Det må formodes at lokale byggemyndigheder ikke har et dybere kendskab til f.eks. vis DS 469 og DS 447) og det senere hen viser sig eksempelvis at indeklimaet ikke lever op gældende krav, hvem hænger på regningen for udbedringen? Entreprenøren har jo afleveret testrapporter til myndighederne og disse er godkendt. Kan entreprenøren og projekterende så fægte sig ud af sit ansvar, efter som det er dokumenteret med godkendte testrapporter at deres installationer lever op til kravene?

Med disse nye krav i BR15, ser jeg fremadrettet et lige så stort behov for en Cx-proces der kan hjælpe bygherre med at tydeliggøre sine krav til sit byggeri, inde projekteringen går i gang, samt udarbejde test-krav og til slut verificere retvisende afleveringstests.

Skal vi kunne levere dette vil der fremadrettet være et behov for Cx-folk der har et indgående kendskab til og praktisk erfaring med, hvordan bygningsreglementet, tilhørende normer og standarder praktiseres i byggerier. Endvidere ser jeg et øget krav til at Cx-folkene klædes fagligt på med viden om og praktisk erfaring i måleteknik, herunder på luft, hydrauliske installationer, samt målinger på bygningsdele. Endvidere skal viden om sammenhængen mellem funktionen af bygningsdele og installationer styrkes, således at dysfunktioner kan afsløres inden aflevering. Cx-processen skal i lige så høj grad verificere om de målinger og tests der foretages også er retvisende. Det er derfor vigtigt at Cx-folkene der er tilknyttet et projekt, får prokura til at gribe ind, når der observeres forhold der ikke lever op til byggekravene. Jeg oplever flere tilfælde, hvor Cx-folk eller tilsynsførende, som påpeger forhold, blive ignoreret af entreprenører og projekterende, hvilket ikke er tilfredsstillende.

Med andre ord, vi skal styrke vores rolle som den verificerende part, i forhold til bygherre, hvilket vi bl.a. kan gøre ved at styrke vores faglighed yderligere, samt udarbejde organisationsoplæg til hvilken rolle Cx-processen skal have en styrket position i det enkelte byggeri”.

Andre i branchen forventer ikke at ændringen får megen effekt. Per 1. jan. 2018 træder et nyt BR18¹⁷ i kraft, kun et halvt år efter. Uddrag er vist i bilag 5. Det nye i BR18 ift. tekniske installationer, er kravet om at der indsendes dokumentation for BR18s overholdelse. Lys, varme/køl og ventilation er igen underlagt et krav om funktionsafprøvning. Den store ændring, at man for at få ibrugtagningstilladelsen fra kommunen, nu skal kunne dokumentere om BR18 er overholdt. Efter afleveringsforretningen iht. AB92 eller ABT93 afleveres al teknisk dokumentation til byggesagsafdelingen i den stedlige kommune. Denne afdeling forholder sig dog ikke til denne dokumentation. Al teknisk dokumentation vil blive opbevaret i et ikke endnu specificeret arkiv-form. Til gengæld skal den kommunale afdeling foretage 10 % stikprøvekontroller, baseret på byggesags-nummer. Dvs. ombygningen af et villahus tæller lige så meget som kommunens største byggesag. Da kommunerne samtidigt forventes at nedbringe

¹⁷ <https://hoeringsportalen.dk/Hearing/Details/60586>

antallet af sagkyndige i afdelingerne, grundet den hurtigere ekspedition, er forventningen i branchen at disse stikprøvekontroller vil blive hyret ind udefra. Men lad os se tiden an.

Standarder, vejledninger og anvisninger er legio i branchen. Udover de DS/EN standarder der refereres til i BR15, findes der standarder for næsten alle områder. Nogle bruges i udbudsmaterialer, andre er endnu ikke en del af byggeprocessen. Derudover har FRI ydelsesbeskrivelser for sine medlemmer, BIPS' vejledninger om fx indreguleringer er indskrevet i performancetest og AT og DBIs anvisninger har lovgyldighed. De er alle meget gode og bliver brugt flittigt til at angive forventninger om niveau og udførelse. Det skaber forståelse, enighed og sparer tid. Det sidste er måske lidt af et problem. En rådgiver, der skal anvise et mål eller en proces, refererer til en standard, uden at anvise metode, kontrol eller forholde sig til det givne projekt. Et eksempel ville være kravet om indregulering iht. DS 447, kap. 5 er indskrevet i udbudsmateriale og byggeprogram, men det bliver ikke gennemarbejdet i arbejdsbeskrivelsen eller tidsplanen. *Alle ved jo, hvad vi snakker om.* Så når tiden kommer til indregulering, er der måske forhold, der gør at processen går i stå. Tidsbesparende initiativer er gode nok, men arbejdet skal udføres i den sidste ende, og derfor skal alle forhold og eventualiteter tages ind under udarbejdelse af tidsplan og arbejds gange.

Lovgivningen og standarder er en stor succes i den forstand at hele branchen bruger disse som projekterings-grundlag. Krav og mål er indskrevet i alle materialer og alle har den samme referenceramme. Men det er netop et projekteringsgrundlag, når bygherren alene står med ansvaret og ingen myndighed følger op. I dag har BH begrænset mulighed for at verificere målenes opfyldelse, og mere eller mindre avancerede afleveringsformer hjælper ikke, når de alene baseres på visuel aflevering, beregninger og formodninger. BR18s nye krav kan måske rette op på meget, men lovgivningen beskæftiger sig ikke med processen, og det er her forandringerne skal komme.

Så konklusionen her må være at lovgivningen ikke kan bidrage med andet end en stopkontrol. Det er op til byggeriets parter at udvikle former der forbedrer driften ved aflevering. Endvidere skal det understreges at lovgivningen og standarder er *minimumskrav*. Man må gerne gøre det bedre.

4.8. Litteraturfortegnelse

Standarder & vejledninger:

DS 3090:2014. *Commissioning-processen til bygninger - Installationer i nybyggeri og større ombygninger*. 1. udgave. Dansk Standard. 2014.

DS/EN ISO 9001:2015. *Kvalitetsledelsessystemer - Krav*. 1. udgave. Dansk Standard. 2015.

Ydelsesbeskrivelser for byggeri og planlægning FRI & Danske ARK. 2012.

Faglitteratur DTU:

Ágústsson, Rúnar Örn: *Building Commissioning*. Master Thesis 2010. DTU Management Engineering.

Jørgensen, Kirsten: *Indikatorer på det fejlfri byggeri - En kvantitativ undersøgelse af evaluerede byggesager*. Rapport 2012. DTU Management Engineering.

Faglitteratur, Branche:

BEC: *Bag om byggeriets nøgletal - mangler* (nr. 1, juni 2007).

Erhvervs- og byggestyrelsen: *Omfanget af svigt, fejl, mangler og skader i dansk byggeri, 2001-2009*. 2011.

FRI: *Handlingsplan for forbedring af sikkerhed og kvalitet i byggeriet*. 2004.

Rambøll A/S: *Måling af svigt, fejl og mangler i dansk byggeri*. 2010.

Lovgivning:

Bekendtgørelse om energimærkning af bygninger: BEK nr. 1392 af 22/11/2016
<https://www.retsinformation.dk/Forms/R0710.aspx?id=185076>

Bekendtgørelse om kvalitetssikring af byggearbejder i alment byggeri m.v.: BEK nr. 773 af 27/06/2011
<https://www.retsinformation.dk/forms/r0710.aspx?id=137901>

Byggeloven: <https://www.retsinformation.dk/forms/R0710.aspx?id=183662>

Håndbog for energikonsulenter: BEK nr. 1759 af 15/12/2015.
<https://www.retsinformation.dk/forms/r0710.aspx?id=176520>

Revision af BR15: <https://hoeringsportalen.dk/Hearing/Details/60529>

BR18: <https://hoeringsportalen.dk/Hearing/Details/60586>

Præsentationer:

Ekstern Granskning. SBI 246: <http://www.bsf.dk/media/1496/ekstern-granskning-af-byggeprojekter-1.pdf>

Hjemmesider:

www.byggeplads.dk

Bygningsstyrelsen: www.bygst.dk

Byggestyrelsen: www.trafikstyrelsen.dk

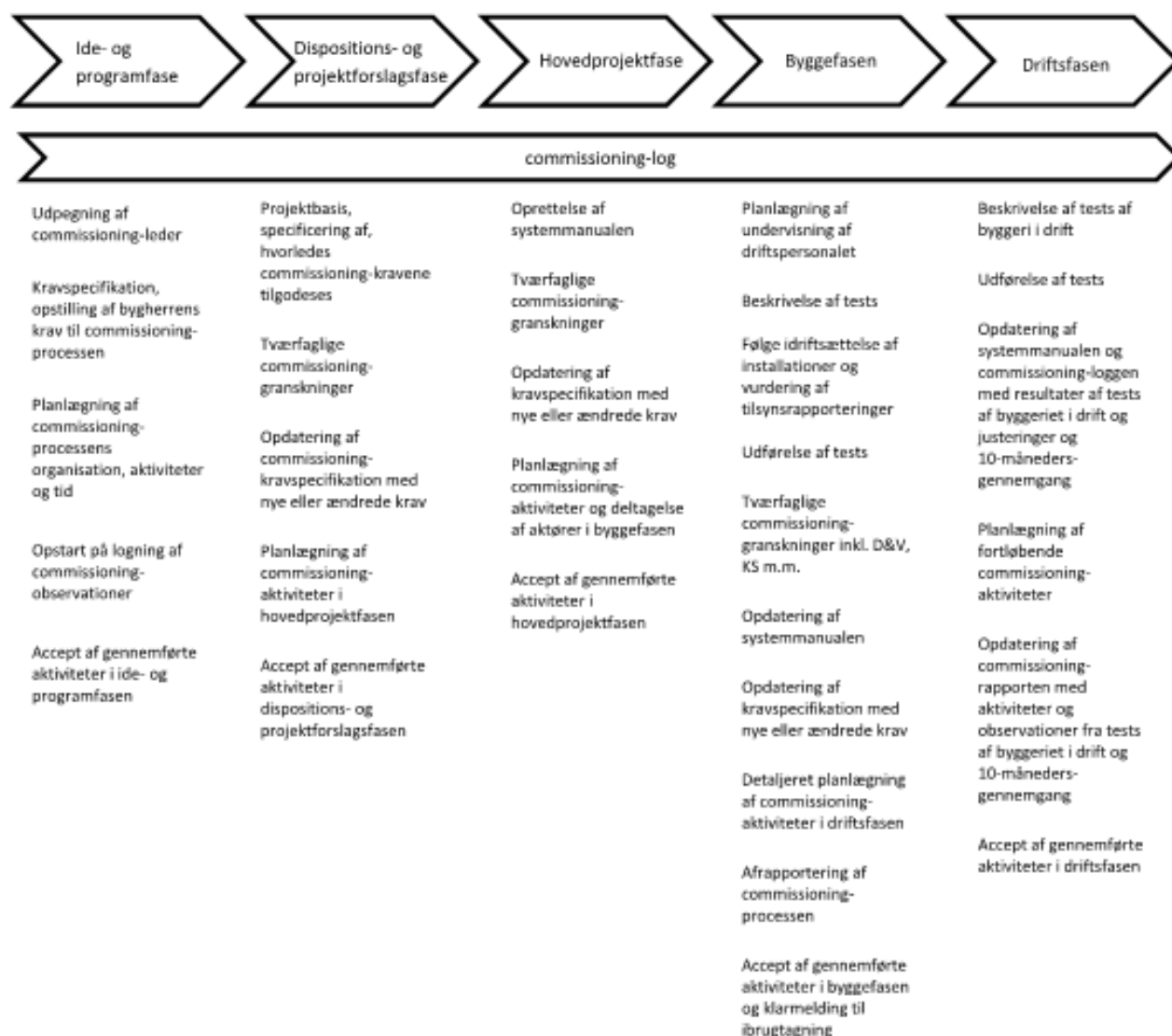
Byggeriets Evaluerings Center: www.byggerating.dk

4.9. Bilag 1

DS 3090:2014

Anneks A (informativt)

Oversigt over commissioning-aktiviteter



Figur A.1 – Faseopdelt visning af commissioning-aktiviteter

4.10. Bilag 2

Anneks B (informativt)

Oversigt over commissioning-dokumenter og -aktiviteter

B.1 Eksempel

I tabel B.1 er vist commissioning-dokumenter, som udfærdiges i forbindelse med specifikke commissioning-aktiviteter. Der kan også være aktiviteter, der afrapporteres på entreprenørens brevpapir, disse er ikke vist nedenfor.

Tabel B.1 – Commissioning-processens dokumenter og aktiviteter

Dokumenter	Aktiviteter
Commissioning-kravspecifikation	Oplisting af bygherrens krav til commissioning-processen, som løbende opdateres
Commissioning-plan	Beskrivelse af commissioning-processens organisation, aktiviteter og tid, som løbende opdateres
Commissioning-log	Kontinuerlig logning af commissioning-observationer
Acceptdokument	Accept af de gennemførte aktiviteter i slutningen af hver fase
Projektbasis	De projekterendes specificering af, hvorledes commissioning-kravene opfyldes
Granskningsrapporter	Afreportering af tværfaglige commissioning-granskninger af byggeprojekt i dispositions- og projektforslagsfasen, i hovedprojektfasen samt af KS, D&V og dokumentation, efterhånden som de fremkommer
Systemmanual	Oprettelse af systemmanualen, som løbende suppleres, efterhånden som ny dokumentation fremkommer
Undervisningsplan	Planlægning af undervisning af driftspersonalet
Testparadigmer	Beskrivelse af commissioning-tests i bygge- og driftsfase af alle anlæg, der er omfattet af commissioning
Testrapporter	Afreportering af commissioning-tests
Commissioning-rapport	Afreportering af commissioning-processen før aflevering opdateres efter udførelsen af de aktiviteter, der er udskudt til driftsfasen

4.11. Bilag 3

Følgende definitioner er inspireret af et notat fra Vejen Kommune *Notat vedr. entreprisformer*¹⁸.

De tre mest almindelige entreprisformer er:

- A. **Fagentreprise.** TR styrer på BHs vegne processen i forhold til forprojekt, hoved- og detailprojektering, myndighedsbehandling, udarbejdelse af udbudsmateriale og byggeprogram, tidsplan, økonomistyring samt byggestyring og koordinering af fagentrepriseres indsats i hele byggeprocessen. BH skriver kontrakt med alle fagentrepriserne. Ved fagentreprise har bygherren stor indflydelse på processen og kvaliteten i projektet. BH har risikoen og ansvaret for, at de forskellige kontraktforhold med fagentrepriserne indbyrdes er koordineret både m.h.t. indhold og udførelse. Denne opgave varetages dog oftest på BHs vegne af den valgte totalrådgiver.
- B. **Hovedentreprise.** Ved hovedentreprise er processen den samme bortset fra, at BH kun skriver kontrakt med hovedentrepriseren. Hovedentrepriseren indgår kontrakter med underentrepriser og styrer sine underentrepriser i byggeprocessen. For BH bliver der tale om en lettelse mht. koordineringen i byggefasen, hvilket også kan medføre lavere honorar til totalrådgiver, da indsatsen bliver mindre. BH må acceptere, at hovedentrepriseren i stedet tager betaling for koordineringen af selve byggeprocessen og styringen af underentrepriserne. BH har stor indflydelse på processen og kvaliteten i projektet.
- C. **Totalentreprise.** TE er en udbudsform, hvor projektet udbydes på baggrund af et byggeprogram, der beskriver bygherrens ønsker og funktionskrav til projektet. TE omfatter således alle ydelser inden for arkitekt- og ingeniørrådgivning samt alle de repræsenterede fagentrepriser (underentrepriser) TE varetager alle planlægnings- og styringsopgaver, herunder projektering, myndighedskontakt, økonomistyring, tidsplan samt projekt- og byggeledelse undervejs i alle faserne. TE indgår selv kontrakter med underentrepriser og styrer projektet og dets udførelse frem til færdig aflevering. BHs indflydelse på processen og kvaliteten skal ligge i udarbejdelsen af byggeprogrammet. Byggeprogrammet kan ikke afspejle de detaljerede krav til kvaliteten og derfor er der en større risiko i denne model. Udover fritagelsen fra koordineringen opnår BH ved anvendelsen af totalentrepriseformen, at TE som ansvarlig for projekteringen kan effektivisere byggeprocessen og udnytte sine kompetencer. Ved totalentreprise har bygherren i mindre grad indflydelse på projektet og må i reglen også acceptere standardiserede løsninger.

En alternativ form for totalentreprise er OPP, *Offentligt Privat Partnerskab*. Fx TE forpligter sig til at opføre og drive en bygning i en årrække. Det kan også kaldes OPS, *Offentligt Privat Samarbejde*.

¹⁸ http://vejen.dk/edagsorden/committee_78216/agenda_221179/documents/d894af1c-5e4c-45ac-a088-d3c6eb9a2bd6.pdf

4.12. Bilag 4

Udpluk fra Revision af BR15, per 1. juli 2017

29. I *bilag I, kap. 6.5.3*, indsættes efter stk. 6. som nyt stykke:

»Stk. 7. Der skal gennemføres en funktionsafprøvning af belysningsanlægget før ibrugtagning. Funktionsafprøvningen skal påvise om belysningsanlægget overholder bygningsreglementets krav til belysningsniveau, samt at dagslysstyring, bevægelsesmeldere og zoneopdeling fungerer efter hensigten. Dokumentation af funktionsafprøvningen skal indsendes til kommunen senest ved færdigmelding.«

30. Som *vejledningstekst* til *bilag I, kap. 6.5.3, stk. 7*, indsættes:

»(6.5.3, stk. 7) Der henvises til Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsens vejledning om funktionsafprøvning.«

34. I *bilag I, kap. 8.2*, indsættes efter stk. 4 som nyt stykke:

»Stk. 5. Der skal gennemføres en funktionsafprøvning af varme- og køleanlæg før ibrugtagning. Funktionsafprøvningen skal påvise om varme- og køleanlæggene overholder bygningsreglementets krav til indregulering og styring. Dokumentation af funktionsafprøvningen skal indsendes til kommunen senest ved færdigmelding.«

35. Som *vejledningstekst* til *bilag I, kap. 8.2, stk. 5*, indsættes:

»(8.2, stk. 5) Der henvises til Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsens vejledning om funktionsafprøvning.«

36. I *bilag, kap. 8.3*, indsættes efter stk. 16 som nyt stykke:

»Stk. 17. Der skal gennemføres en funktionsafprøvning af ventilationsanlægget før ibrugtagning. Funktionsafprøvningen skal påvise om ventilationsanlægget overholder bygningsreglementets krav til specifikt elforbrug til lufttransport, varmevirkningsgrad, luftmængder, samt at evt. behovsstyring fungerer efter hensigten. Dokumentation af funktionsafprøvningen skal indsendes til kommunen senest ved færdigmelding.«

37. Som *vejledningstekst* til *bilag I, kap. 8.3, stk. 5*, indsættes:

»(8.3, stk. 5) Der henvises til Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsens vejledning om funktionsafprøvning.«

4.13. Bilag 5

Udpluk af BR18, per 1. jan. 2018

Kapitel 4

Afslutning af byggesag

§ 41. Byggearbejder, der kræver byggetilladelse, skal færdigmeldes til kommunalbestyrelsen.

Stk. 2. Ved færdigmelding skal bygningsejeren fremsende:

- 1) Dokumentation for, at der er tegnet byggeskedeforsikring og præmien er betalt, jf. byggelovens § 25 C, stk. 2, for byggeri omfattet af byggelovens § 25 A.
- 2) Erklæring om, at det færdige byggeri er i overensstemmelse med byggetilladelsen og bygningsreglementet.
- 3) Dokumentation for overholdelse af bygningsreglementets bestemmelser i den færdige bygning. Dokumentationen skal bestå af al relevant materiale, herunder overordnede beskrivelser, forudsætninger, beregninger, tegningsmateriale, prøvninger mv.
- 4) Bygninger i konstruktionsklasse 2-4 eller brandklasse 2-4, som har tilknyttet en certificeret statiker eller brandrådgiver, er ikke omfattet af nr. 3 for så vidt angår overholdelse af krav til konstruktions- og brandforhold.
- 5) Drift- og vedligeholdelsesmanual for bebyggelsens installationer, jf. emne C1.14, emne K1.33, emne R1.11, emne T1.24 og emne U1.36.

Kontrol

R1.9

Der skal gennemføres en funktionsafprøvning af varme- og køleanlæg før ibrugtagning. Funktionsafprøvningen skal dokumentere at varme- og køleanlæggene overholder bygningsreglementets krav til indregulering og styring.

Kontrol

U1.34

Der skal gennemføres en funktionsafprøvning af ventilationsanlægget før ibrugtagning. Funktionsafprøvningen skal dokumentere at ventilationsanlægget overholder bygningsreglementets krav til specifikt elforbrug til lufttransport, varmeeffektiviteten, luftmængden, samt at evt. behovsstyring fungerer efter hensigten.

5. ØKONOMI

*Tommy Birkebæk, Maskinmester, HD(O), MBA, Lektor
Maskinmesterskolen København
tb@msk.dk*

Dette kapitel om "Økonomi" kan læses som en selvstændig beskrivelse eller i sammenhæng med de øvrige faglige områder, der er beskrevet i ELFORSK projektet: Indeklima, Facility Management, Ventilation, Opvarmning, CTS, lys, bygningsdynamik, nøgletal og energirenovering. Alle afsnit behandler det pågældende emne ud fra relevansen i forhold til "Energirigtig drift af det rette indeklima i bygninger".

Kapitlet omfatter generel information om økonomistyring med særlig fokus på mængde/pris styring af energien og investering i energibesparelser med udgangspunkt i at læseren er en ingeniør eller maskinmester der skal beskæftige sig med disse områder.

Kapitlet fokuserer på de energiøkonomiske data, datastruktur, sammenlignelighed, herunder omregning til normdage/måneder/år, budgettering af energiforbrug, investeringer (i energibesparelser) herunder de økonomiske beregningsmodeller inklusiv totalkonceptet.



ELFORSK

Dette kapitel er udarbejdet som del af projektet **Energirigtigt drift af det rette indeklima i bygninger – ENDRIN** støttet af ELFORSK i periode 2016–2017, projektnummer 348-006 (www.elforsk.dk).

5.1. Indhold

5.1.	Indhold	5-2
5.2.	Læringsmål	5-3
5.3.	Nomenklatur	5-4
5.4.	Indledning	5-6
5.5.	Økonomistyring	5-7
5.6.	Bygningens baseline	5-8
5.7.	Energiresultat-budget og opgørelse	5-11
	Budgettering	5-12
5.8.	Investeringer	5-13
	De økonomiske beregningsmodeller	5-14
5.9.	Litteratur/referencer	5-18
5.10.	Bilag 1	5-19

5.2. Læringsmål

Studerende der læser følgende kapitel skal være i stand til at

- Med baggrund i standarden DS/ISO 50001 fastsætte en energipolitik med tilhørende EnPI'er både for energiforbrug såvel som energiproduktion.
- Ud fra økonomistyringens principper, opbygge et energiregnskab/energibudget baseret på en baseline med korrektion i forhold til et normaltår.
- For investeringer, her energibesparelser, opsætte investeringskalkuler baseret på kapitalværdi, intern rente og simpel tilbagebetalingstid.
- Anvendelse af Total-konceptet med baggrund i den interne rente.

5.3. Nomenklatur

<i>CO₂:</i>	Kuldioxid – eller CO ₂ – er både en naturlig gas, der for eksempel udledes ved nedbrydning af organisk materiale, og en menneskeskabt gas, der udledes ved forbrænding af for eksempel fossile brændsler.
<i>BC:</i>	Balanced Scorecard er et strategisk præstationsværktøj delt op i områderne: Finansiell, Kunderelateret, Interne processer og læring.
<i>EnPi:</i>	Energi Performance Indikator: kvantitativ værdi eller mål for energipræstation som defineret af virksomheden.
<i>Graddage:</i>	En graddag, også kaldet et graddøgn, er et udtryk for en forskel på 1 °C mellem den indendørs og den udendørs døgnmiddeltemperatur. Et døgn's graddagetal udregnes typisk som forskellen mellem 17°C og den udvendige døgnmiddeltemperatur. Anvendes som variable blandt andet for baseline.
<i>Baseline:</i>	Baseline for energi er kvantitative referencer som danner grundlag for at sammenligne energipræstationer og afspejler et vist tidsrum. Baseline kan normaliseres ved hjælp af variable som påvirker energiudnyttelse/forbrug.
<i>Standard kost:</i>	Standard kost af et produkt, ydelse er den forventede (kalkulerede) omkostning. Denne sammenlignes så efterfølgende aktuel omkostning ved en efterkalkulation.
<i>DMI:</i>	Danmarks Meteorologiske Institut. DMI varetager den meteorologiske betjening af det danske Rigsfællesskabet.
<i>STC:</i>	Standard test condition. En standard som foreskriver at performance for et solcellepanel skal specificeres ved en celledetemperatur på 25°C and en solindstråling på 1000 W/m ² med en luft masse på 1.5 (AM1.5).
<i>NOCT:</i>	Normal Operating Cell Temperature (NOCT). En standard som foreskriver at performance for et solcellepanel skal specificeres ved den celledetemperatur som opstår ved en solindstråling på 800W/ m ² , 20°C omgivelsestemperatur og en lufthastighed på 1m/ s med panelet i en hældning på 45° og bagsiden åben for luftcirkulation.
<i>Solinstråling:</i>	Solindstrålingen er den samlede mængde stråling, som jorden modtager fra Solen i et givet tidsrum. Måles som oftes horisontal eller ved 45 grader. Måles i Wh/m ² /periode.
<i>Lysintensitet:</i>	Også benævnt strålingsintensitet er strålingseffekten fra solen målt i w/m ² . Effekten vil afhænge af afstanden til og hældningen i forhold til solen.
<i>Tariffer (El):</i>	Indenfor elforsyning: Tariffer er priser for net-virksomhedens eller Energinets ydelser. Energinet er det offentlige transmissionselskab, som ejer de store kraftkabler i Danmark. Tariffer afregnes pr. kWh og kan variere fra time til time hen over døgnet.
<i>Investering:</i>	En betalingsrække, hvor udbetalingerne kommer før indbetalingerne.

<i>Kalkulationsrentefod:</i>	Den rente og dermed det afkast en investor/virksomhed har som minimum for at foretage en given investering: Denne er sammensat af en realrente (rente i et samfund uden inflation og risiko), inflation og risikotillæg. Kaldes også alternativrenten, altså den rente som kan opnås ved en investering under tilsvarende forhold.
<i>SBi:</i>	Statens Byggeforskningsinstitut (SBI) skaber forskningsbaseret viden der forbedrer byggeriet og det byggede miljø. SBI er en del af Aalborg Universitet.
<i>Nettobetaling:</i>	Indtægter og/eller besparelser fratrukket udgifter/merudgifter for en given periode.
<i>Nutidsværdi:</i>	Værdien af et fremtidig beløb, tilbagediskonteret til nutid.
<i>Scrapværdi:</i>	Værdien af et aktiv når det afhændes til det tidspunkt det afhændes.
<i>Kapitalværdi:</i>	Tilbagediskontering ved kalkulationsrentefoden af samtlige nettobetaling i en investering.
<i>LCC:</i>	Life Cycle Cost: Livscyklusomkostningsanalyse som indbefatter alle omkostninger i et aktivs levetid eller i den tid det ejes.
<i>Intern rente:</i>	Den rente som netop giver en kapitalværdi på kr. 0. Således den rente som investeringen oppebærer.
<i>EPC:</i>	Energi Performance Contracting. En leverandør indgår partnerskab med en virksomhed om energibesparelser.

5.4. Indledning

Energirelaterede CO₂-udledninger udgør ca. 2/3 af de globale emissioner og forventes uden yderligere handling, at vokse med en tredjedel til 2020 ifølge det internationale energiagentur (IEA). Derfor er energibesparelser og effektiv anvendelse af energi en vigtig del af opfyldelsen af målsætningerne om reduktion af drivhusgasudledningerne og øget udnyttelse af energien iht. vores forpligtelser internationalt. Dette søges opnået i forhold til både private og offentlige virksomheder, med lovgivning og støtteordninger.

Støtteordningerne administreres af energistyrelsen og omfatter i dag blandt andet:

- Energistyrelsens energisparesekretariat, som har til formål at fremme realiseringen af energibesparelser i private virksomheder ved at tilvejebringe og formidle viden om mulige energibesparelspotentialer i virksomhederne. Målet er at hjælpe virksomheder til at spare på energien for deres bundlinjes skyld.
- Tilskud til elintensive virksomheder: Elintensive virksomheder kan opnå lempelse af deres PSO-betaling. (PSO (Public Service Obligation) -afgiften opkræves via elregningen og går til at sikre miljøvenlig elproduktion og effektiv anvendelse af el). For at få nedsat PSO afgiften, skal virksomheden indgå en aftale om energieffektivisering med Energistyrelsen.

Tilskud er politisk bestemt og ændres over tid, hvorfor der henvises til energistyrelsens hjemmeside: <https://ens.dk/ansvarsomraader/energibesparelser>

5.5. Økonomistyring

Økonomistyring er et ledelsesværktøj, hvor organisationens aktiviteter, kapaciteter og finanser styres. Det er en værdiskabende forbedringsproces med det formål at planlægge, designe, opbygge (etablere målinger) og drive/vedligeholde finansielle såvel som non-finansielle informationssystemer. Disse systemer guider ledelsehandlinger (beslutninger), styrer adfærd og støtter og skaber de kulturelle handlinger, som er nødvendige for at nå en virksomheds strategiske, taktiske og operationelle mål. Ved non-finansielle informationssystemer anvendes typisk mere sofistikerede systemer så som Balanced scorecard systemet.

Økonomistyring i forbindelse med energirigtig drift af det rette indeklime bør sikre:

- 1) Løbende opfølgning på energiforbruget i forhold til budgetter og i forhold til foregående år
- 2) Årsagsforklaringer til ændringer i forbruget: Bro mellem budget og aktuel.
- 3) Kontrol af foretagne energiinvesteringers afkast, om det har været en god forretning.
- 4) Grundlag og forslag til fremtidige investeringer.

Der vil fokuseres på økonomistyringen i forbindelse med energirigtig drift af det rette indeklime. Denne kan deles op i to økonomiområder:

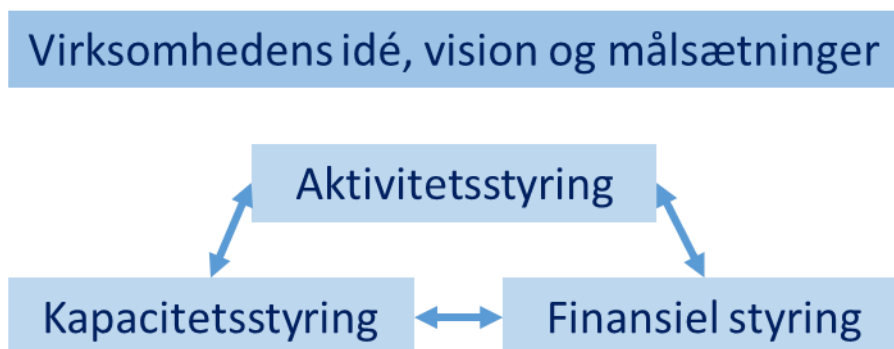
A. Drift: Den daglige drift med opsamling af EnPI'er (Energy Performance Indikatoren) der typisk vil forme et hierarkisk nøgletalssystem, hvis dybde er afhængig af det valgte detaljeringsniveau.

Her vil indgå korrektionsfaktorer, nogle generelle som regulering for graddage, andre mere virksomhedsspecifikke som beregning af energiforbrug per valgt enhed.

B. Investeringer: Her defineret som en bevidst økonomisk ændring af det bestående udstyr og/eller økonomisk udvidelse med et aktiv.

Der vil her typisk være overlap til driftens vedligeholdsbudgetter, idet mindre investeringer straks afskrives på vedligeholdsbudgetterne.

Økonomistyring tager udgangspunkt i virksomhedens idegrundlag, vision og mission med efterfølgende strategisk planlægning, hvis tidsmæssig udstrækning og usikkerhed vil afhænge af branche. Den strategiske økonomistyring er en forudsætning for strategien og dens planlægning og udførelse.



Figur 5-1 Virksomhedens økonomistyring

Den strategiske planlægning vil naturligt indebære et budget med begrundede forventede resultater og målsætninger med udgangspunkt i foregående perioders resultatopgørsler (baseline i henhold til DS/ISO 50001, se kapitel 6 Ledelsessystemer). Disse strategiske forventede resultater og målsætninger overføres til det taktiske og endelig operationelle niveau. Dette gælder således også for energibudgettet med fastlæggelse af udgangspunktet eller Baseline: Dette er typisk energiens aktuelle resultatopgørelse for sidste år, korrigeret for sæsonmæssige udsving, således de er sammenlignelige fra måned til måned, fra år til år. Standardkost princippet anvendes således med sidste års udgangspunkt. Som i ethvert andet budget, opereres med mængdeafvigelse og prisafvigelse. Det anbefales i energisammenhænge at anvende mængdeenheder, som i ISO 50001, og beregne prisen i særskilt kolonne, således mængdeenhederne sammenlignes, vurderes og målsættes fra år til år. I forbindelse med fastlæggelsen af energipolitikken i virksomheden iht. ISO 50001 og den efterfølgende planlægning, fastlægges dybden og gentagelsesperioden for målingerne. Er virksomheden pligtig til energisyn iht. bekendtgørelse om obligatorisk energisyn i store virksomheder (BEK nr 1212 af 19/11/2014) skal målingerne foretages min. hvert 4. år.

5.6. Bygningens baseline

Såfremt det er muligt, bør en bygnings baseline opdeles i to trin:

Trin 1: Det grundlæggende forbrug, nødvendig for bygningens bevarelse/grundforbrug. Dette vil normalt ligge på et lavt niveau og jo nyere bygning, desto lavere niveau.

Trin 2: Forbruget for den kerneforretning som drives i bygningen. Dette kan være kontorphonale, produktion, lager etc.

For at gøre mængdeenhederne sammenlignelige skal der korrigeres for sæsonudsving.

Korrigerings for sæsonudsving foretages for den energiproduktion og det energiforbrug som er sæsonafhængig. 1) Opvarmning, til 2) Køling og 3) Egen energiproduktion.

- 1) Energiforbrug til opvarmning af faciliteter (normalt ikke procesvarme).

Over tid vil der kunne etableres en korrelation over anvendt mængde (typisk kWh) i forhold til udetemperaturen. Denne korrelation vil normalt tilnærmelsesvis være lineær og vil være afhængig af de forhold der opvarmes under: Antal m², type af facilitet, varmeafgivelse fra eksterne kilder, herunder personer, IT udstyr og lyskilder.

Indtil en sådan korrelation er etableret, kan den efterfølgende metode med graddage anvendes såfremt der ikke er natsænkning.

En graddag, også kaldet et graddøgn, er et udtryk for en forskel på 1 °C mellem den indendørs og den udendørs (lavere) døgnmiddeltemperatur. Et døgn graddaget udregnes typisk som forskellen mellem 17°C og den udvendige døgnmiddeltemperatur. De 17°C tager udgangspunkt i et ønske om 20°C indendørs, hvor det antages de 3°C kommer fra ekstern kilder så som lys, it-udstyr, personer etc. Eksempel:

Døgnmiddeltemperatur udendørs: -5°C giver således 22 graddage. Men hvis der ønskes 22°C bliver det 24 graddage. Døgnmiddeltemperatur på 17°C og derover giver 0 graddage.

- 2) Ved korrigerings med graddage, korrigeres lineært og sammenholdes for hele året med et normalt graddage år på 2906 graddage iht. DMI og Teknologisk institut (Key2Green, Partnerskab for miljø og erhverv). Såfremt der ønskes en højere inde-temperatur end 20°C, skal antallet af graddage forhøjes tilsvarende.

Til beregningen kan DMI's gennemsnitstemperaturer anvendes med koordinering for antal dage i måneden med standard 30 dage.

Eksempel på en graddagsberegning:

En bygning har et naturgasforbrug til rumopvarmning i januar 20x1 på 1.200 m³ gas og i januar 20x2 på 1.150 m³ gas. Januar 20x1 har 416 graddage, og januar 20x2 har 457 graddage.

Her vælges 20x1 som basis år og januar 20x2 korrigeres til januar 20x1 forbrug. Det gøres ved forholdsregning at dividere forbruget for januar 20x2 med de 457 graddage. Så får man forbruget pr. graddag. Herefter ganges med 416 graddage for januar 20x1.

1.150 m³ gas: 457 graddage x 416 graddage = 1.047 m³ gas. Der er således tale om en besparelse på 1.200 – 1.047 = 153 m³ gas, svarende til en besparelse på 153 x 100: 1.200 = 12,7 %.

Det anbefales kraftigt, at der anvendes egne graddage som måles min. hver time med udgangspunkt i temperaturen for varmeproduktionens set punkt. Det skal bemærkes, at der for forskellige brugsområder kan anvendes forskellige set punkter. For eksempel kan det være 5 grader for lagerområder, 15 grader for kontorer etc.

Alternativt kan graddage findes online ved BizEE Degree Days, Weather Data for Energy Professionals, Custom Degree Day Data: <http://www.degreedays.net/>. Her indtastes område, baseline for temperatur (set punkt), hvilken periode det ønskes, opdeling, måleenhed samt om det er køling eller opvarmning. Der beregnes her kun graddage i forhold til valgt funktion (køling eller opvarmning).

Energiforbrug som anses for uafhængig af ydre forhold, så som energiforbrug til opvarmning af brugsvand og anden konstant forbrug som f.eks. procesenergi, skal ikke skal korrigeres.

3) Energiforbrug til køling af faciliteter (normalt ikke proceskøling):

Som ved varmekøling vil der over tid kunne etableres en korrelation mellem udetemperaturen og behovet for køling. En omregning for sammenlignelige data kan ske med DMI's udendørs middeltemperaturer, eller alternativt egne middeltemperaturer over køleanlæggets set punkter og for køleperioderne idet anlæg kan være tidsstyrede både på døgnet og på året. Også her anbefales kraftigt gennemsnits temperaturer per time for omregning til sammenlignelige data med forbrug per kølegraddag som en lineær funktion eller alternativt det under punkt 1. nævnte <http://www.degreedays.net/>.

4) Egenproduktion af sæsonafhængige energikilder hvor der her skal nævnes:

a. Solceller:

Produktivitet kontrolleres via fabrikantens data. Hertil kan anvendes programmet fra European Union, JRC: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>

I programmet indtastes location ved længde- og breddegrader samt fabrikantens STC oplysninger (Standard Test Conditions). I programmet er indlagt data for de mest gængse typer solceller og dermed deres NOCT (Normal Operating Cell Temperatur) og tilhørende virkningsgrader ligger i programmet.

Tabet i det tilsluttede net, typisk kabler og inverteren, indtastes separat, hvis det kendes.

Dette til produktivitetskontrol af anlægget i forhold til en sat baseline og kontrol

mod leverandørens data.

Produktionstallene bør dernæst korrigeres forholdsmæssigt til en normal måned/år, alternativt kWh/m². Med få udsving er den globale horisontale solindstrålingen i Danmark på 1.000 kWh/m²/år og for en optimal stik syd vendt 42° hældning på 1.200 kWh/ m²/år.

Produktionen korrigeres således for solens indstråling på nævnte bredde-og længdegrad ved måling med et pyranometer: (H_h : Irradiation on horizontal plane (Wh/m²/day) eller H_{opt} : Irradiation on optimally inclined plane (Wh/m²/day)).Se eksempel i bilag 1

I stedet for at anvende EU's model kan ydelserne beregnes ud fra solcellernes data samt solcellernes hældning og retning (datablade fra leverandøren):

		Orientering [°]												TEKNOLOGISK INSTITUT	
		Øst		SØ			Syd			SV		Vest			
		-90	-75	-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60	75	90	
Hældning [°]	0	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	
	5	85	86	87	88	88	88	89	88	88	87	87	86	84	
	10	84	87	89	90	91	92	92	91	91	90	88	86	84	
	15	84	87	90	92	93	94	94	94	93	91	89	86	83	
	20	83	87	91	93	95	96	97	96	95	93	90	87	82	
	25	82	87	91	94	97	98	98	98	96	94	91	86	81	
	30	81	87	92	95	97	99	99	99	97	94	91	86	80	
	35	80	86	91	95	98	99	100	99	97	94	90	85	79	
	40	79	85	91	95	98	99	100	99	97	94	90	84	77	
	45	77	84	90	94	97	99	99	99	97	93	89	83	76	
	50	76	83	89	93	96	98	99	98	96	92	87	81	74	
	55	74	81	87	91	95	96	97	96	94	90	86	79	72	
	60	72	79	85	89	93	94	95	94	92	88	83	77	70	
	65	69	76	82	87	90	92	92	92	89	86	81	75	67	
	65	69	76	82	87	90	92	92	92	89	86	81	75	67	
	70	67	74	80	84	87	89	89	88	86	83	78	72	65	
75	64	71	76	81	84	85	86	85	83	80	75	69	62		
80	61	68	73	77	80	81	82	81	79	76	72	66	59		
85	58	64	69	72	75	76	77	76	74	72	68	63	56		
90	55	60	65	68	70	71	72	71	69	67	63	59	53		

Figuren viser solcellernes %-vise årlige energiproduktion ved forskellig hældning og orientering, angivet i forhold til den ideelle placering: stik syd og hældning ca. 37°, som er 100%.

Figur 5-2 Eksempel på solcellepanels virkningsgrad afhængig af hældning og retning.
Kilde: Teknologisk Institut: <https://www.teknologisk.dk>

Solfanger:

Solfangere bør ligeledes korrigeres i forhold til lysintensiteten, med et tilnærmelsesvis lineær forhold med modtaget varme og lysintensiteten. Over tid kan et mere nøjagtigt forhold mellem lysintensiteten og varmeproduktionen.

Som ved solceller bør et pyranometer opsættes for måling af enten H_h : Irradiation on horizontal plane (Wh/m²/day) eller H_{opt} : Irradiation on optimally inclined plane (Wh/m²/day).

Der regnes gennemsnitlig med 5-600 kWh/m² i Danmark for et kalenderår.

b. Vindmøller:

Her bør produktionen ligeledes korrigeres, men i forhold til vindintensiteten. Ved anvendelsen af vindindekset¹ for den region vindmøllen er opsat i, beregnes typisk den månedlige vindkorrigerede produktion (VKP): $P_{VKP} = P_{\text{produktion}} * \text{Vindindeks}/100$. Denne beregning kan, såfremt der er medlemskab, foretages online: <http://www.winstat.dk> Udviklet under EUDP suppleret med data fra EMD International A/S. Der kan være temmelig store udsving afhængig af typen af mølle og årstidspunktet.

c. Øvrige anlæg:

Såfremt der er ydre faktorer, såsom sol, vind, udetemperaturer som påvirker i væsentlig grad bør der korrigeres, således der til enhver tid kan sammenlignes med et "normaltår" eller en "normalperiode".

5.7. Energiresultat-budget og opgørelse

Ud fra energipolitikken og dermed målsætningerne planlægges dybden af målingerne i forbindelse med energiplanlægningen. Ud fra disse fastlægges som ovenfor anført baseline. Lovkravet til energisyn for store virksomheder iht. bekendtgørelse om obligatorisk energisyn i store virksomheder (BEK nr 1212 af 19/11/2014):

<https://www.retsinformation.dk/Forms/R0710.aspx?id=165880> er hvert 4. år. Dog bør oftere målinger, inkl. online, løbende målinger overvejes i energipolitikken.

Selve energi-resultatopgørelsen, henholdsvis energiresultatbudgettet stilles typisk op for perioder af en måned, et kvartal, et halv år og et år og opbygges som et standardbudget med den forskel at her opdeles målingerne i følgende kolonner:

1. Aflæst forbrug/produktion i perioden. Alternativt med to foregående kolonner med primo og ultimo aflæsninger.
Det anbefales at lave to afsnit med den ene som repræsenterer forbruget og den anden som repræsenterer en evt. produktion.
2. Korrektionsfaktor for perioden, om muligt med en bagvedliggende beregning eller henvisning til målingerne som ligger til grund for korrektionsfaktorerne.
3. De korrigerede forbrugsdata fortsat i mængder.
4. Førrige periodes korrigerede forbrug.
5. Beregning af afvigelse både i forhold til budget og i forhold til førrige periode.
6. Enhedspris. Såfremt der er tariffer kan det være nødvendigt med adskillige bagvedliggende kolonner til beregningerne både i denne enhedspriskolonne, såvel som i forbrugskolonnen.
For produktioner kan der være to enhedspriser: En omkostning ved produktionen og en afregningspris til nettet.
7. Beregning af totalpriser per forbrugs/produktionsmålingssted. Bemærk at dette er korrigerede tal.
8. Beregning af priserne for de korrigerede forbrug/produktion.

¹ <http://www.vindstat.dk/>

Ved budgetterne bør der altid sammenlignes med foregående perioder. Ved energieresultatopgørelser bør der sammenlignes med budgettet og laves en forklaringsoversigt, som giver forklaringerne på de enkelte afvigelser i forhold til budgettet.

Slutteligt for opfølgningen og visualiseringen kan/bør der laves grafer for hovedgrupperne indenfor forbrug og produktion som viser udviklingen (den korrigerede) over tid.

Dette bør være over forbrug/produktion i både mængder og priser hver for sig. Bemærk at ved tidsbaserede tariffer, kan der opstå nogle anderledes prisafvigelser, som igen kan foranledige anderledes energimæssige optimeringer.

En separat graf bør laves over de aktuelle forbrug/produktioner og de dermed forbundne aktuelle priser således en evt. optimering gennem tidsforskydning kan afklares.

Budgettering

Mængdeafvigelser i forbruget i forhold til baseline. Afvigelserne vil typisk være:

- 1) Udefra kommende påvirkninger, typisk vejret (graddage).
- 2) Ændringer (mængderne) for kerneforretningen. For et kontorområde vil kunne det være antallet af personer som anvender bygningen.
Denne påvirkning er udelukkende belastningsafhængig.
- 3) Ændringer som skyldes gennemførte energireducerende investeringer.
- 4) Ændringer i brugeradfærd/brugsmønstret. Dette må betegnes som restfaktoren når øvrige forhold er kortlagt.

Afvigelser for eventuel egenproduktion. Der regnes med et normalt år, således eventuelle ændringer i korrektionsfaktorerne ikke medregnes:

- 1) Ændring i forbruget som vil påvirke forbruget per produceret enhed. Dette kan være lavere forbrug eller højere forbrug som fører til en ændring i virkningsgraden.
- 2) Ændringer i forbruget per produceret enhed som kan henføres til gennemførte investeringer.

Udover disse afvigelsesforklaringer har vedligeholdts/drift funktionen stor indflydelse på både forbrug og produktion.

Ovenstående vil i stor udstrækning følge DS/ISO 50001, og ligeledes forholdsvis nemt på resultatbudgettet kunne deles op i strategisk, taktisk og operationelt. I linje med DS/ISO 55001 (Asset Management) kan vedligeholdtsomkostninger tilføjes for et forbedret beslutningsgrundlag baseret på netop resultatopgørelsen.

Ligeledes kan der tilføjes en kolonne for investeringer (hvor investeringer opdeles så der foretages en vurdering af hver enkel investering) hvor besparelsen indgår. Denne besparelse kan så holdes op mod budgetteret besparelse som vil svare til den besparelse investeringen blev ansøgt på.

Jo mere detaljeret målingerne foretages, desto mere præcist et billede af forbruget og ikke mindst afvigelserne, kan man opnå. Resultatopgørelsen vil danne grundlag for vurdering af mulige tiltag primært mht. brugeradfærd og investeringer i aktiver som kan reducere energiforbruget.

5.8. Investeringer

En investering defineres som en betalingsrække hvor udbetalingerne kommer før indbetalingerne (Lynggaard 2013) og her som enhver bevidst ændring af aktiverne.

Typisk deles investeringer op i tre forskellige kategorier:

- 1) Mindre investeringer/forbedringer af bestående aktiver i forbindelse med vedligehold og under vedligeholdsbudgettet i forbindelse med vedligeholdsstrategien ”konstruktive ændringer”. Et eksempel kan være i forbindelse med lejeskift, hvor der skiftes til hybridlejer, som er noget dyrere men skal så udskiftes tilsvarende med længere interval.
- 2) Små investeringer under småsaldigrænsen som i 2017, ifølge skatteministeriet, er på DKK 13.200. Disse små investeringer, vil normalt ikke kræve de helt store beregninger for at retfærdiggøre dem. Dette kunne for eksempel være en ny bærbar computer til en medarbejder.
- 3) Investeringer som normalt vil kræve særskilt godkendelse ved topledelsen, afhængig af virksomhedens investeringsstrategi.

Som grundkrav til alle investerings ansøgninger vil skulle forelægges:

- a. Investeringsforslagets årsag (Lynggaard 2013):
 - i. Tvingende grunde såsom lovgivning, miljøhensyn
 - ii. Vitale investeringer for eksempel sikring af markedsposition
 - iii. Erstatningsinvesteringer
 - iv. Omkostningsbesparende og indtægtsforøgende investeringer
 - v. Projekter, udvikling af nye produkter, nye administrative systemer, nye bygninger, større renoveringer.
 - vi. Velfærdsinvesteringer.

Her vil det især være i, iii, iv, v og vi som vil være aktuelle.

Økonomiske beregninger bør følge Bekendtgørelse om obligatorisk energisyn i store virksomheder (BEK nr 1212 af 19/11/2014): ”Bygge på en livscyklusomkostningsanalyse i stedet for simple tilbagebetalingsperioder for at tage hensyn til langsigtede besparelser, langsigtede investeringers restværdier og kalkulationsrenter, når det er muligt”.

Den sidste passus hænger sammen med virksomheders incitamenter til energibesparelser, Energistyrelsen 2015, Barrierer i energieffektiviseringen af erhvervslivet, som viser at 75% anspores af de økonomiske besparelser og 43% også/eller (multipelt spørgsmål) af besparelser i forbindelse med naturlig (teknisk) udskiftning. Dette modsvarer af virksomheders modvilje mod energiinvesteringer hvor 43% fremhæver for lang tilbagebetalingstid og 39% fremhæver (for dårlig) rentabiliteten af investeringerne.

I den efterfølgende oversigt er ovennævnte princip benævnt nutidsværdimetoden også kaldet kapitalværdimetoden. Intern rente metoden anvender samme princip, men forudsætter en fastlagt kalkulationsrentefod.

Denne kalkulationsrente fod består af:

- vii. Realrente (Risikofri rente i et samfund uden inflation)
- viii. Inflation
- ix. Risikotillæg

Kalkulationsrentefoden indenfor den offentlige forvaltning er beregnet til 6% (Finansministeriet 2017).

Alternativt kan kalkulationsrenten udtrykkes som den rente er opnået ved en alternativ investering under samme inflation, skat og risiko.

Udover ovennævnte metoder anvendes også tilbagebetalingstid. Denne kan betragtes enten dynamisk eller simpel. Den simple tilbagebetalingstid, hvor investeringsbeløbet deles med nettobetalingen i faste priser, per periode, bør kun anvendes ved små projekter og eller projekter med meget korte tilbagebetalingstider. Dette pga. at metoden kun giver oplysninger om hvornår et projekt er likviditetsneutral. Der tages således ikke hensyn til eventuelle krav om kalkulationsrente og dermed et vist afkast.

Den dynamiske tilbagebetalingstid anvender kalkulationsrentefoden for en tilbagediskontering af nettobetalingerne og ligger derved som metode meget op af den interne rentes metode.

Den dynamiske tilbagebetalingstid anvendes meget lidt.

Nettobetaling per periode er indtægter/besparelser fratrukket udgifter/merudgifter i en periode.

De økonomiske beregningsmodeller

Beregning af simpel tilbagebetalingstid:

$$\text{Simpel tilbagebetalingstid} = \frac{\text{Anskaffelsespris(Investeringen)}}{\text{Nettobetaling per periode}}$$

Simpel tilbagebetalingstid er en enkelt metode til at bestemme rentabiliteten.

Tilbagebetalingstiden angiver hvor mange år det vil tage at tjene investeringen hjem. Ulempen er, at der ikke tages højde for realrente, inflation, restlevetid og risiko. Til gengæld er den nem at håndtere og giver et hurtigt overblik over hvornår en investering er likviditetsneutral.

BR15 afsnit 7.4.1, stk. 4 foreskriver at: ”Bygningsmæssige foranstaltninger, hvor årlig besparelse gange levetid divideret med investering er større end 1,33, kan anses for rentable”. Her anvendes således den simple tilbagebetalingstid, dog således investeringsens levetid medregnes. Den forudsætter at investeringen er tjent hjem indenfor maksimalt 75 % af levetiden (faktor 1,33). Denne bør kun anvendes til mindre projekter med kortere levetider.

Beregning af nutidsværdi ved kalkulationsrentefoden r og i tiden t med perioderne n :

$$\text{Nutidsværdi} = \sum_{t=0}^n \text{Nettobetaling per periode} * (1+r)^{-t} - \text{Anskaffelsespris år 0} + \text{scrapværdi} * (1+r)^{-n}$$

Kapitalværdimetoden også kaldet nutidsværdimetoden, er den mest investor informative metode: Anskaffelsesprisen inkluderer alle omkostningerne i forbindelse med projektering, indkøb, opstilling, oplæring, test etc. I praksis til anlægget er idriftsat og oppe at køre.

Metoden kræver en livscyklusomkostningsanalyse (LCC: Life Cycle Cost). Ved forholdsvis simple investeringer kan nettobesparelsen sættes konstant hvert år og dermed forventes omkostninger og indtægter at være uændrede fra år til år. Ved mere komplekse investeringer kan omkostninger og udgifter ændres sig fra år til år. I begge tilfælde kan enten regnes i faste priser eller med inflation. I det sidste tilfælde skal inflationen tillægges kalkulationsrentefoden. En kapitalværdi ≥ 0 er fordelagtig. For en kapitalværdi på 0 svarer afkastet netop

kalkulationsrenten.

Metoden tager således hensyn til teknisk versus økonomisk levetid, realrente, inflation og risiko. Statslige bygherrer skal anvende denne metode.

Intern rente:

Intern rente tager udgangspunkt i samme grundformel som for kapitalværdien, hvor denne sættes til 0 kr. Det er således den rente som giver netop en nutidsværdi på 0 kr:

$$\text{Nutidsværdi} = \sum_{t=0}^n \text{Nettobetaling per periode} * (1+r)^{-t} - \text{Anskaffelsespris år 0} + \text{scrapværdi} * (1+r)^{-n}$$

Såfremt den interne rente er større end eller lig med den ønskede kalkulationsrentefod, er investeringen rentabel. Grundformelen for nutidsværdi og dermed den interne rente, indeholder dermed ligesom nutidsværdimetoden implicit en LCC (Life Cycle Cost) beregning og dermed en vurdering af samtlige omkostninger i forbindelse med aktivet fra vugge til grav.

Totalkoncept metoden:

Totalkoncept metoden (AU/SBI, 2017) er ikke en separat metode i forhold til ovenstående, men en udvidelse af intern rente metode. På hjemmesiden forefindes samtlige værktøjer.

Metoden anvendes hvor der indgår flere investeringer, typisk et større renoverings-og/eller energioptimeringsprogram som søges iværksat.

Her bør det bemærkes at iht. erfaringer fra branchen er det ca. 4 gange billigere at foretage energiforbedringer i forbindelse med renoveringsarbejder. (Henrik Poulsen, Force). Dette taler for, at der foretages flere energiforbedringsinvesteringer i forbindelse med større renoveringer.

Ved anvendelse af totalkonceptet, beregnes den interne rente for hver investering af en række. Disse rang ordnes efter intern rente, med den største først. Herefter beregnes successivt den samlede interne rente for projekterne startende med den største første. Se eksempel på næste side. Ved den samlede interne rente som ligger tættest på men over kalkulationsrenten, findes således de investeringer som ud fra kravet om et bestemt min. afkast kan gennemføres.

For energibesparelserne forefindes en række værktøjer hvor der her blot skal nævnes nogle få:

- 1) <https://www.innobyg.dk/> På deres hjemmeside forefindes en række værktøjer blandt andet til LCA beregninger. (Life Cycle Assessment).
- 2) DS/EN 16212: Beregning af energieffektivitet og energibesparelser top-down- og bottom-up- metoder.
- 3) <http://sbi.dk/beregningsprogrammet/Pages/Bestilling-og-priser.aspx?s=BE+15> BE15 beregningsprogram fra SBI/AUU til beregning af energiforbrug i bygninger.

Eksempel fra Totalkoncept:

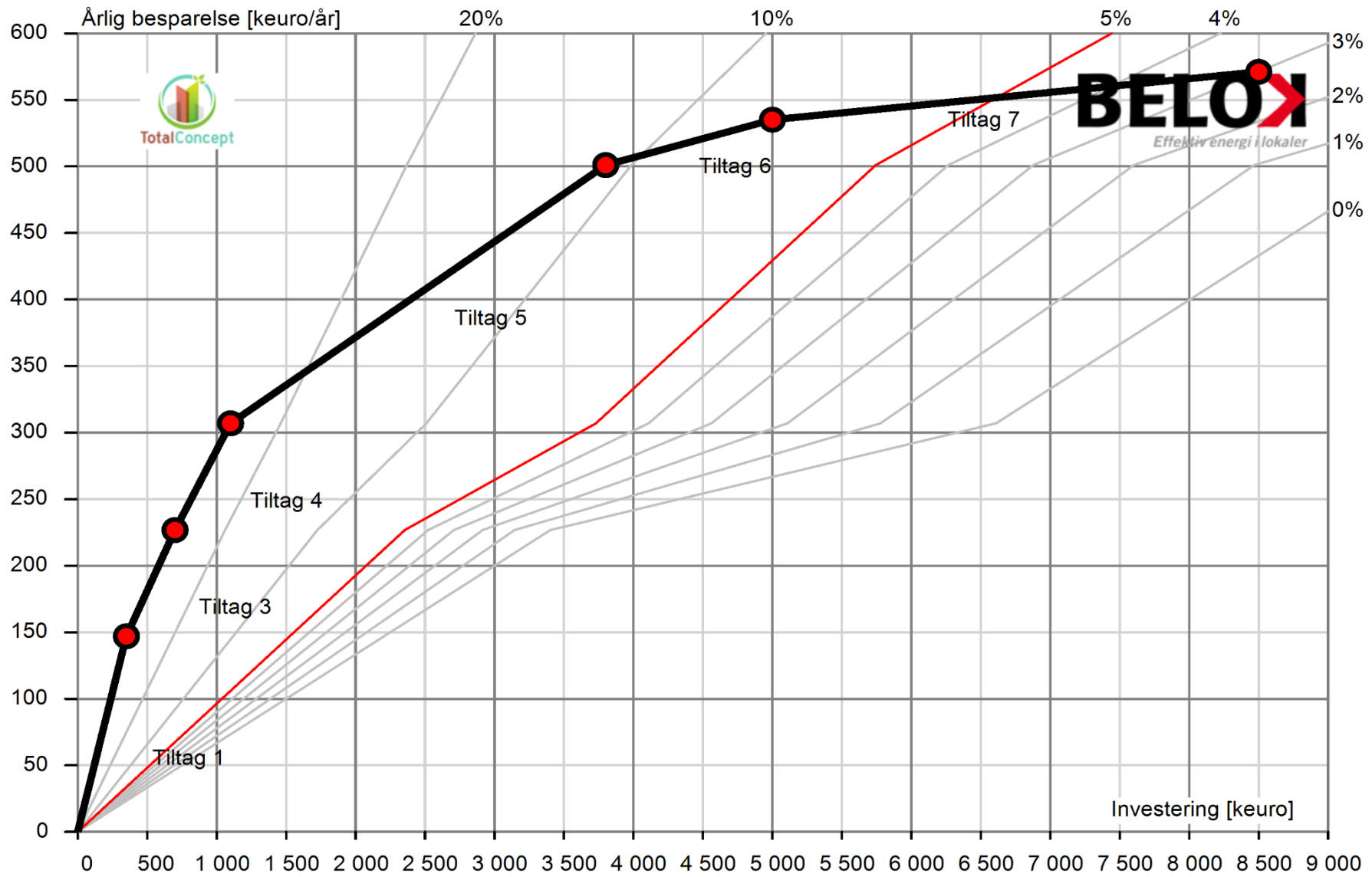
Dette eksempel fra Totalkoncept metoden: <http://totalconcept.info/> er selvforklarende. Via linket forefindes værktøjet til konceptet samt adskillige pilotprojekter fra de nordiske lande.

Energioptimeringsdata

An..	Nr	Navn	Levetid[år]	Investering [keuro]	Intern rente [%]	Varmebes.. [MWh/år]	Varmeudgi.. [keuro/år]	Elbespare.. [MWh/år]	Eludgifter [keuro/år]	Energibes.. i fjernkøling [MWh/år]	Udgiftsbe.. i fjernkøling [keuro/år]	Øvrige omkostnin.. [keuro/år]
True	1	Mål 1	15	350	41,77	0	0	163,33	147	0	0	0
True	2	Mål 3	15	350	21,58	130	78	2	1,8	0	0	0
True	3	Mål 4	40	400	20,04	136,66	82	-2	-1,8	0	0	0
True	4	Mål 5	15	2700	0,95	216,66	130	71,11	64	0	0	0
True	5	Mål 6	40	1200	0,64	58,33	35	-1	-0,9	0	0	0

An..	Nr	Navn	Omkostni.. i alt[keuro/år]	Gevinst[-]	Sum intern rente[%]	LCC[keuro]
True	1	Mål 1	147	4,36	41,80	-856,71
True	2	Mål 3	79,8	2,37	31,88	-337,81
True	3	Mål 4	80,2	3,44	27,37	-403,45
True	4	Mål 5	194	0,75	10,75	649,46
True	5	Mål 6	34,1	0,49	7,91	384,16

Diagram for den interne rente



5.9. Litteratur/referencer

- International Energy Agency (IEA) World Energy Outlook 2017: <https://www.iea.org/weo2017/>
- Energisparesekretariatet (Energistyrelsen): <http://spareenergi.dk/erhverv/om-energisparesekretariatet>
- Energistyrelsen Energibesparelser: <https://ens.dk/ansvarsomraader/energibesparelser>
- DS/ISO 50001 1. udgave 2011-11-09 Energiledelsessystemer - Krav og vejledning
- Bekendtgørelse om obligatorisk energisyn i store virksomheder, BEK nr 1212 af 19/11/2014: <https://www.retsinformation.dk/pdfPrint.aspx?id=165880>
- Key2Green, Graddage fra DMI og Teknologisk Institut: <http://www.key2green.dk/graddage>
- BizEE Degree Days, Weather Data for Energy Professionals, Custom Degree Day Data: <http://www.degreedays.net/>
- European Union, Joint Research Center, Solar, interactive map: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>
- Winstat, beregning af vindindeks: <http://www.winstat.dk> Udviklet under EUDP (Det Energiteknologiske Udviklings- og Demonstrationsprogram) suppleret med data fra EMD International A/S, 2013.
- DS/ISO 55001 1. udgave 2014-01-29 Styring af aktiver (asset management) - Ledelsessystemer - Krav.
- Lynggaard, P., 2013, Investering og Finansiering 9. udgave, Handelshøjskolens forlag
- Skatteministeriet, 1. november 2017: <http://www.skm.dk/skattetal/satser/satser-og-beloebsgraenser/afskrivningsloven>
- Energistyrelsen 2015, Barrierer i energieffektiviseringen af erhvervslivet, <http://spareenergi.dk/sites/forbruger.dk/files/contents/publication/barrierer-i-energieffektiviseringen-af-erhvervslivet/barrierer-i-energieffektiviseringen-af-erhvervslivet.pdf>
- Finansministeriet, August 2017, Vejledning i samfundsøkonomiske konsekvensvurderinger: https://www.fm.dk/~media/publikationer/imported/2017/vejledning-samfundsøkonomiske-konsekvensvurderinger_web.ashx
- Aalborg universitet/Statens Bygnings Institut: Totalkoncept 2017: <http://totalconcept.info/da/>

5.10. Bilag 1

Solar radiation database used: PVGIS-CMSAF

Nominal power of the PV system: 1.0 kW (crystalline silicon)

Estimated losses due to temperature and low irradiance: 7.7% (using local ambient temperature)

Estimated loss due to angular reflectance effects: 3.1%

Other losses (cables, inverter etc.): 14.0%

Combined PV system losses: 23.1%

Fixed system: inclination=35°, orientation=0°				
Month	E_d	E_m	H_d	H_m
Jan	0.79	24.3	0.93	28.7
Feb	1.25	35.1	1.51	42.3
Mar	2.90	89.9	3.62	112
Apr	3.99	120	5.16	155
May	4.14	128	5.51	171
Jun	4.07	122	5.48	164
Jul	3.94	122	5.36	166
Aug	3.45	107	4.65	144
Sep	2.77	83.1	3.63	109
Oct	1.93	59.7	2.43	75.4
Nov	1.00	30.1	1.22	36.6
Dec	0.68	20.9	0.80	24.8
Yearly average	2.58	78.5	3.37	102
Total for year		942		1230

E_d : Average daily electricity production from the given system (kWh)

E_m : Average monthly electricity production from the given system (kWh)

H_d : Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m²)

H_m : Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m²)

PVGIS © European Communities, 2001-2012

Reproduction is authorised, provided the source is acknowledged

Monthly Solar Irradiation

PVGIS Estimates of long-term monthly averages

Location: 55°14'0" North, 9°18'59" East, Elevation: 38 m a.s.l.,
 Solar radiation database used: PVGIS-CMSAF : (Note per day i.e. to obtain annual values multiply with 365)

<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>

Optimal inclination angle is: 40 degrees

Annual irradiation deficit due to shadowing (horizontal): 0.0 %

Month	H_h	H_{opt}	$H(90)$	DNI	I_{opt}	T_{24h}	N_{DD}
Jan	513	991	1070	803	71	0.8	499
Feb	1030	1600	1530	1160	61	0.6	476
Mar	2640	3750	3220	2970	53	3.5	414
Apr	4350	5290	3760	4910	40	7.3	267
May	5310	5530	3290	5090	25	10.9	158
Jun	5520	5400	2990	4660	17	13.9	82
Jul	5300	5310	3070	4390	21	17.2	22
Aug	4200	4680	3080	3890	34	16.5	45
Sep	2870	3670	2900	2710	46	13.5	170
Oct	1600	2530	2380	1980	60	10.2	315
Nov	663	1300	1400	1120	70	6.1	451
Dec	381	839	953	737	74	2.7	545
Year	2870	3420	2470	2880	40	8.6	3444

H_h : Irradiation on horizontal plane (Wh/m²/day)

H_{opt} : Irradiation on optimally inclined plane (Wh/m²/day)

$H(90)$: Irradiation on plane at angle: 90deg. (Wh/m²/day)

DNI : Direct normal irradiation (Wh/m²/day)

I_{opt} : Optimal inclination (deg.)

T_{24h} : 24 hour average of temperature (°C)

N_{DD} : Number of heating degree-days (-)

6. LOVGIVNING OG STANDARDER

- Indenfor energirigtigt drift af faciliteter

*Tommy Birkebæk, Maskinmester, HD(O), MBA, Lektor
Maskinmesterskolen København
tb@msk.dk*

Dette kapitel om ”Lovgivning og standarder indenfor energirigtig drift af faciliteter” kan læses som en selvstændig beskrivelse eller i sammenhæng med de øvrige faglige områder, der er beskrevet i ELFORSK projektet: Indeklima, Facility Management, Ventilation, Opvarmning, CTS, lys, bygningsdynamik, nøgletal og energirenovering. Alle afsnit behandler det pågældende emne ud fra relevansen i forhold til ”Energirigtig drift af det rette indeklima i bygninger”.

Kapitlet omfatter generel information om lovgivning og standarder med særlig fokus på ledelse og management, standarder for ledelsessystemer samt standarder for Facilities Management med udgangspunkt i at læseren er en ingeniør eller maskinmester der skal beskæftige sig med disse områder.

Kapitlet fokuserer sammenhængen mellem direktiver, lovgivning og standarder samt ledelsesstandarder med særlig betydning for energirigtig drift og Facilities Management. Dette indbefatter den grundlæggende opbygning af disse standarder samt deres betydning i ledelsen.



Dette kapitel er udarbejdet som del af projektet **Energirigtigt drift af det rette indeklima i bygninger – ENDRIN** støttet af ELFORSK i periode 2016–2017, projektnummer 348-006 (www.elforsk.dk).

6.1. Indhold

6.1.	Indhold	6-2
6.2.	Læringsmål.....	6-3
6.3.	Nomenklatur.....	6-4
6.4.	Forord til ledelsessystemer.....	6-5
6.5.	Standardernes anvendelse	6-5
6.6.	Ledelsesstandarderne	6-7
	Management and leadership.....	6-7
	Definition på ledelsesstandarder	6-7
	DS/ISO 50000 serien: Energiledelsessystem	6-9
	DS/ISO 9000 serien: Kvalitetssystemer	6-11
	DS/ISO 55000 serien: Asset Management.....	6-12
	DS/ISO 14000 serien: Environmental Management	6-13
	DS/ISO 31000 serien: Risk Management	6-13
	DS/ISO 22301 serien: Business Continuity	6-15
	DS/EN 15221 serien: Facility Management.....	6-16
6.7.	Litteratur/referencer	6-17

6.2. Læringsmål

Studerende der læser følgende kapitel skal være i stand til at

- Gør rede for sammenhængen mellem standarder og direktiver
- Kunne redegøre for PDCA modellen og den anvendelse i standarderne for ledelsessystemer
- Kunne gøre rede for ledelsesstandardserierne DS/ISO 50000, DS/ISO 9000, DS/ISO 55000, DS/ISO 14000, DS/ISO 31000 samt Facilities Management standardserien DS/EN 15221
- Have kendskab til standarden for business continuity DS/ISO 22301 samt standarder inden for energibaseline DS/EN 15900, for beregning af energieffektivitet DS/EN 16212, for benchmark metodik for energieffektivitet DS 16231 samt for energitjenster DS/EN 15900

6.3. Nomenklatur

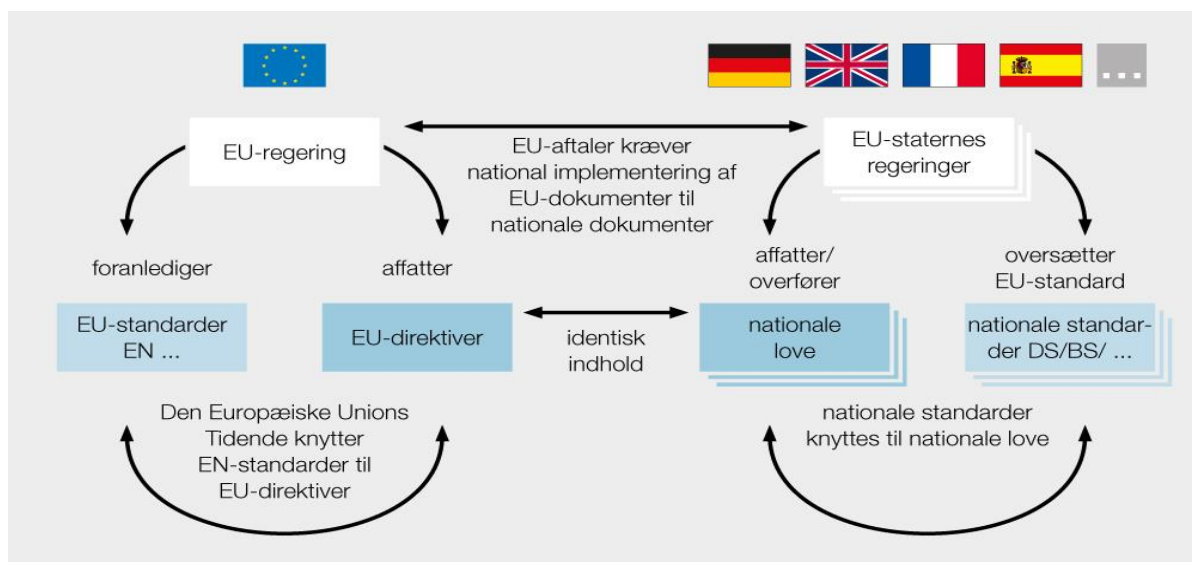
- DS:* Dansk Standard. Danmarks standardiseringsorganisation og varetager såvel national som international standardisering.
- ISO:* International Organization for Standardization, sammenslutning af nationale standardiseringsorganer.
- IEC:* International Electrotechnical Commission, organisation for standardisering på områderne elektroteknik og elektronik.
- CENELEC:* Comité Européen de Normalisation Electrotechnique, organisation, der udarbejder europæiske standarder for bl.a. elektriske apparater og elektronik.
- EN:* Europæisk norm, betegnelse på europæiske standarder udarbejdet af CEN
- CEN:* Comité Européen de Normalisation, Den Europæiske Standardiseringsorganisation
- ETSI:* European Telecommunications Standards Institute, forestår udarbejdelse af bindende tekniske standarder for telekommunikationsudstyr
- Direktiv:* EU-retsregel, der, som oftest inden en frist på to år, skal gennemføres ved national lovgivning i de enkelte EU-lande. Ifølge EU-Domstolens praksis skal eksisterende national lovgivning dog straks fortolkes i bedst mulig overensstemmelse med det vedtagne direktiv.
- Forordning:* EU-retsakt, der regulerer et område generelt, og som uden videre og i den form, den er vedtaget, bliver en del af medlemsstaternes retsorden.
- PDCA:* Plan-Do-Check-Act) is a systematic process for gaining valuable learning and knowledge for the continual improvement of a product, process, or service. Introduced to Dr. Deming by his mentor, Walter Shewhart of the Bell Laboratories in New York.
- EnPi:* Energi Performance Indikator: kvantitativ værdi eller mål for energipræstation som defineret af virksomheden.
- EnB:* Baseline for energi er kvantitative referencer som danner grundlag for at sammenligne energipræstationer og afspejler et vist tidsrum. Baseline kan normaliseres ved hjælp af variable som påvirker
- Energi-Effektivitet:* Forhold eller anden kvantitativ sammenhæng mellem output af præstation, tjenesteydelser, varer eller energi og input af energi.
- Energi-Tjeneste:* ESCO (Energy Service Company): Aftalt opgave eller samling af opgaver, der skal føre til en forbedring af energieffektiviteten samt andre aftalte præstationskriterier.
- Livscyklus-Ledelse:* Life Cycle Management (LCM) taler for at integrere sociale, miljømæssige og økonomiske aspekter i den måde, hvorpå en virksomhed ledes (Weidema, 2000). Informationer om miljøforhold skal være tilgængelige for beslutningstagerne i virksomheden, og disse informationer skal betragtes som endnu en faktor i virksomhedens beslutningsprocesser. Virksomhedens generelle ledelse og miljøledelse er ikke længere to adskilte aktiviteter, de er samlet i LCM konceptet i bestræbelsen på en integreret opnåelse af miljømæssige forbedringer og økonomisk effektivitet (Brady and Paynter, 1997).
- Risiko-Ledelse:* Risikoledeelse er den del af ledelsesopgaven, der beskæftiger sig med at identificere, vurdere og håndtere risici med henblik på at sikre og fremme organisationens mål.

6.4. Forord til ledelsessystemer

Standarder kommer fra forskellige organisationer, hvor der her fokuseres på ISO (International Organisation for Standards), DS (Dansk Standard) og EN (European [standards maintained by CEN \(European Committee for Standardization\)](#)).

Af øvrige organisationer kan nævnes: CENELEC ([European Committee for Electro technical Standardization](#)) and ETSI ([European Telecommunications Standards Institute](#)) standarder.

Standarder opstår typisk enten initieret af lovgivning og/eller af industrien for varens frie bevægelighed, fair konkurrence og/eller standardisering i forbindelse med anvendelse.



Figur 6-1 Fra Direktiv til Standard (Pilz GmbH & Co. KG)

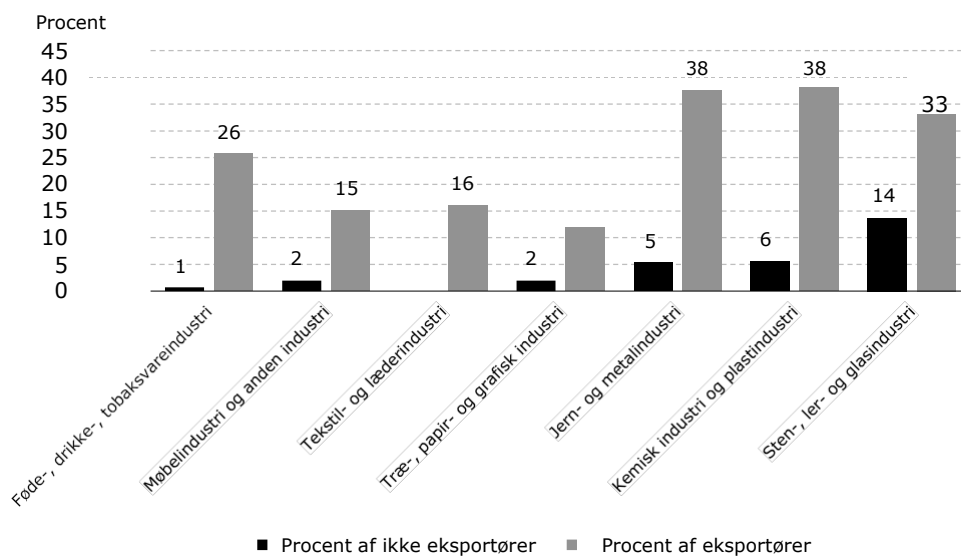
Direktiver og forordninger bliver vedtaget i EU. Forordninger har direkte retsvirkning.

EU-direktiver bliver til EN standarder og implementeret i den danske lovgivning. De indgår herefter som en national standard (DS), som så igen kan uddybes igennem det pågældende ministeriums bekendtgørelser.

Et eksempel er EU's energieffektivitetsdirektiv: EUROPA-PARLAMENTETS OG RÅDETS DIREKTIV 2012/27/EU af 25. oktober 2012 om energieffektivitet som har udmøntet sig i en række love og tilhørende bekendtgørelser i Danmark. Blandt andet loven om fremme af besparelser i energiforbruget og bekendtgørelsen om obligatorisk energisyn i store virksomheder.

6.5. Standardernes anvendelse

Erhvervsstyrelsens undersøgelse fra august 2013 viser at især eksporterende industrivirksomheder er langt fremme i forbindelse med standarder. Således har 12,4% af disse virksomheder standarder, mens det for øvrige forretningsområder ligger fra 0,3% til 3%.



Note: Grundet diskretionsregler er det ikke muligt at udregne andelen af ikke-eksportører med standarder inden for tekstil- og læderindustrien.

Kilde: Copenhagen Economics på baggrund af data leveret af CEBR.

Figur 6-2 Andel af virksomheder med standarder efter eksportør- status og branche (fremstillingsindustrien)

Ligeså interessant er en screening af hovedområderne med hensyn til prioritering af standarderne i fremtiden. Her lægger alle, med få undtagelser så som sundhed og pleje, social service og brændselsceller og brint, vægt på at der vil ske en væsentlig standardisering i fremtiden og denne standardisering generelt anses for at kunne styrke virksomhedens position.

6.6. Ledelsesstandarderne

Management and leadership

Lederskab og management er to sider af ledelse: John P. Kotter, Professor at Harvard Business School (Potter, P., John, 2013):

“Leadership is taking an organization into the future, finding opportunities that are coming at it faster and faster and successfully exploiting those opportunities. Leadership is about vision, about people buying in, about empowerment and, most of all, about producing useful change. Management is a set of well-known processes, like planning, budgeting, structuring jobs, staffing jobs, measuring performance and problem-solving, which help an organization to predictably do what it knows how to do well. Management helps you to produce products and services as you have promised, of consistent quality, on budget, day after day, week after week.”

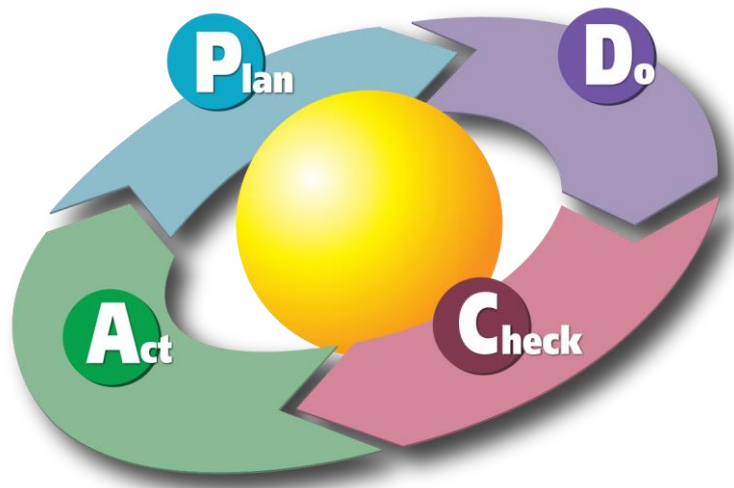
Til både management og lederskab foreligger der standarder fra forskellige organisationer, hvor der fokuseres på ISO (International Organisation for Standards), DS (Dansk Standard) og EN (European [standards](#) maintained by CEN ([European Committee for Standardization](#)), CENELEC ([European Committee for Electro technical Standardization](#)) and ETSI ([European Telecommunications Standards Institute](#)) standarder.

For ledelsesstandarderne indenfor energirigtig drift af bygninger anbefales standarder fra ISO (International Organisation for Standards) som er anerkendte og udvikles løbende med deltagelse af 163 nationale enheder, herunder Danmark.

Definition på ledelsesstandarder

En ledelsesstandard er et system til at etablere politikker, målsætninger samt system til at nå disse opsatte mål. I samme organisation vil der kunne være flere forskellige typer af ledelsessystemer, så som energiledelse, kvalitetsledelse, miljøledelse, ledelsessystem til aktiver etc. (DS/EN ISO 9001, 2015).

Hver enkel standard angiver specificerede krav til etablering, implementering, vedligeholdelse og kontinuerlig forbedring af det enkelte ledelsessystem.



Figur 6-3 Deming/PDCA circle. Diagram by Karn G. Bulsuk (<http://www.bulsuk.com>)

Gennemgående for samtlige ledelsessystemer er det kontinuerlige forbedringsprincip som følger PDCA/Deming cirklen:

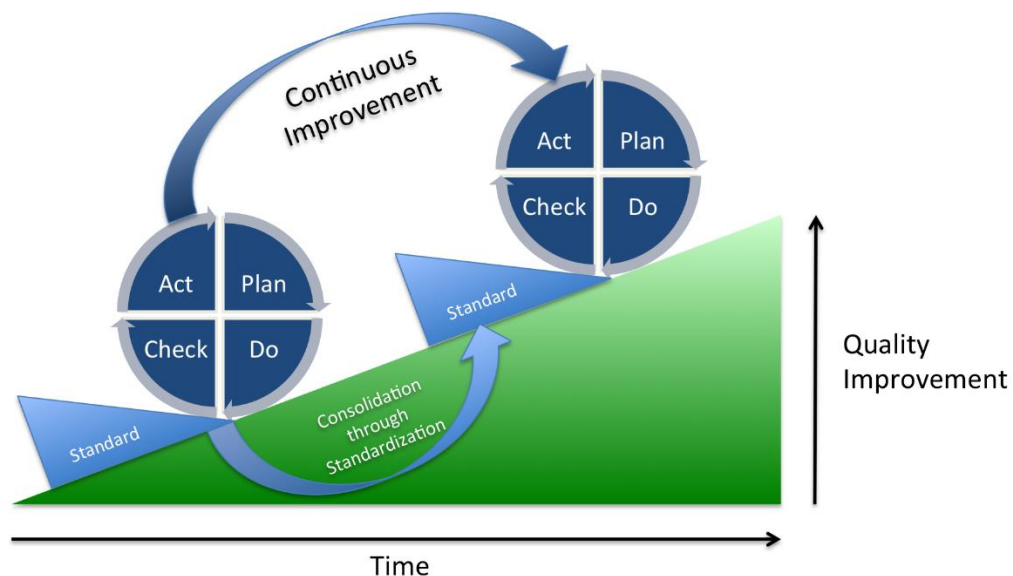
Plan: Udvikling af hypotese, planlægning, ressourceforbrug, målsætninger og politikker

Do: Udfør planen for processer, produkter, aktiver

Check: Kontrollere om det virkede: Validering, verifikation, audits

Act: Agere på kontrollen: Korrigerende handlinger, kontinuerlig forbedring.

Cirklen indgår samtlige ledelsesstandards krav om kontinuerlige forbedringer:



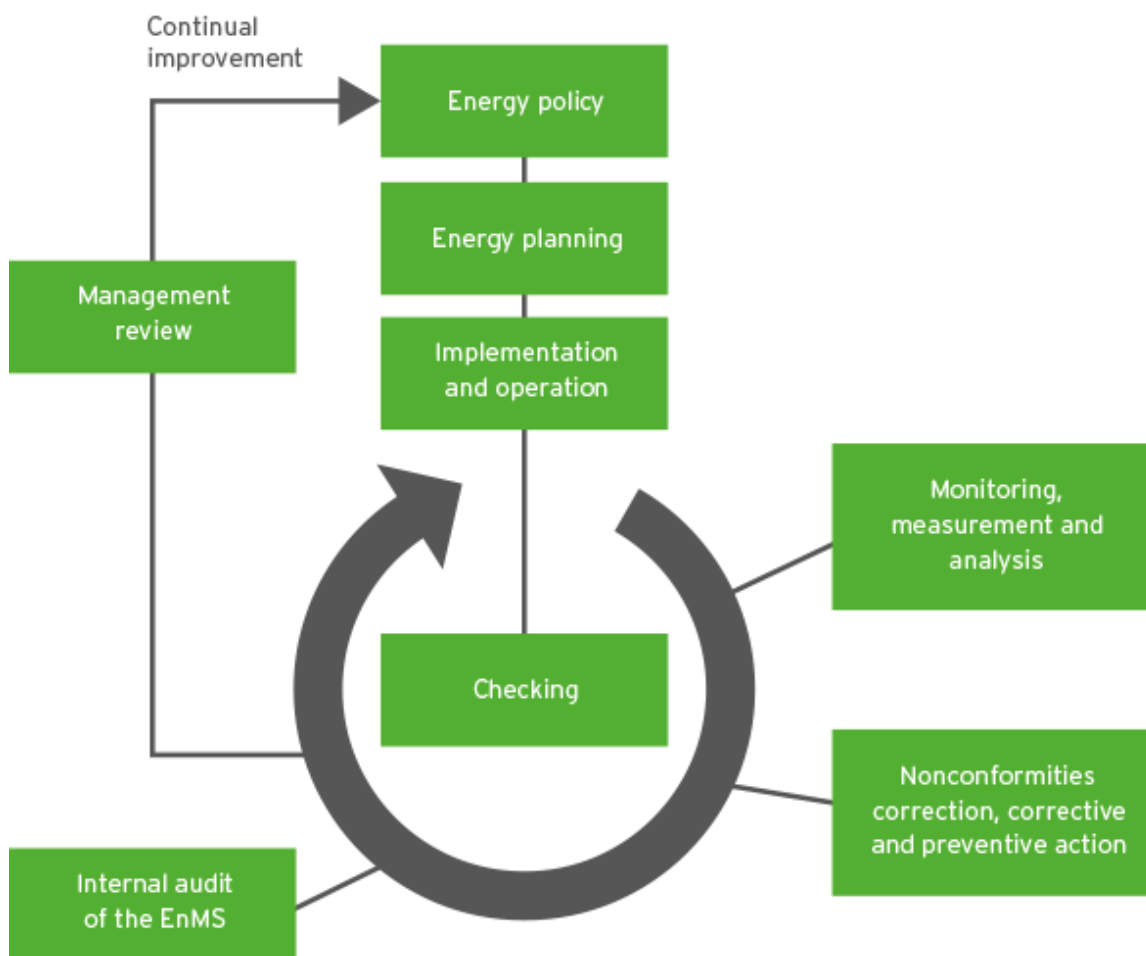
Figur 6-4 Deming Cycle, W. Edwards Deming

It is not enough to do your best, you must also know what to do, and then do your best
W. Edwards Deming

DS/ISO 50000 serien: Energiledelsessystem

Energiledelsessystemet ISO 50001 er et sæt af sammenhængende elementer for opsætning af en energipolitik for en organisation. Energipolitikken indeholder opsætning af målsætninger på alle niveauer i organisationen, startende med topledelsen. I den kontinuerlige forbedringsproces ligger organisationens mulighed for at sikre en systematisk tilgang til opnåelse af forbedringer indenfor energi performance, energi effektivitet, energiforbrug.

Systemet giver mulighed for en certificering og efterfølgende fritagelse for særskilt energisyn.



Figur 6-5 PDCA model ISO 50001

INFO BOKS:

ISO 50001: Energiledelsessystem: Krav til et integreret effektivt energiledelsessystem.

ISO 50002: Energi auditering: Krav

ISO 50003: Energiledelsessystemer: Krav til organer, der foretager audit og certificering.

ISO 50004: Energiledelsessystemer: Vejledning i implementering, vedligehold og forbedring.

ISO 50006: Energiledelsessystemer: Måling af energipræstation ved hjælp af baseline for energi (EnB) og indikatorer for energipræstation (EnPI): Generelle principper og vejledning

ISO 50015: Energiledelsessystemer: Måling og verifikation af organisationers energieffektivitet

Tilhørende underliggende DS/EN standarder som supplement til ISO 50000 serien:

DS/EN 15900: Definitioner og krav: Opsætning af baseline og opsætning af målsætninger

DS/EN 16212: Beregning af energieffektivitet og energibesparelser

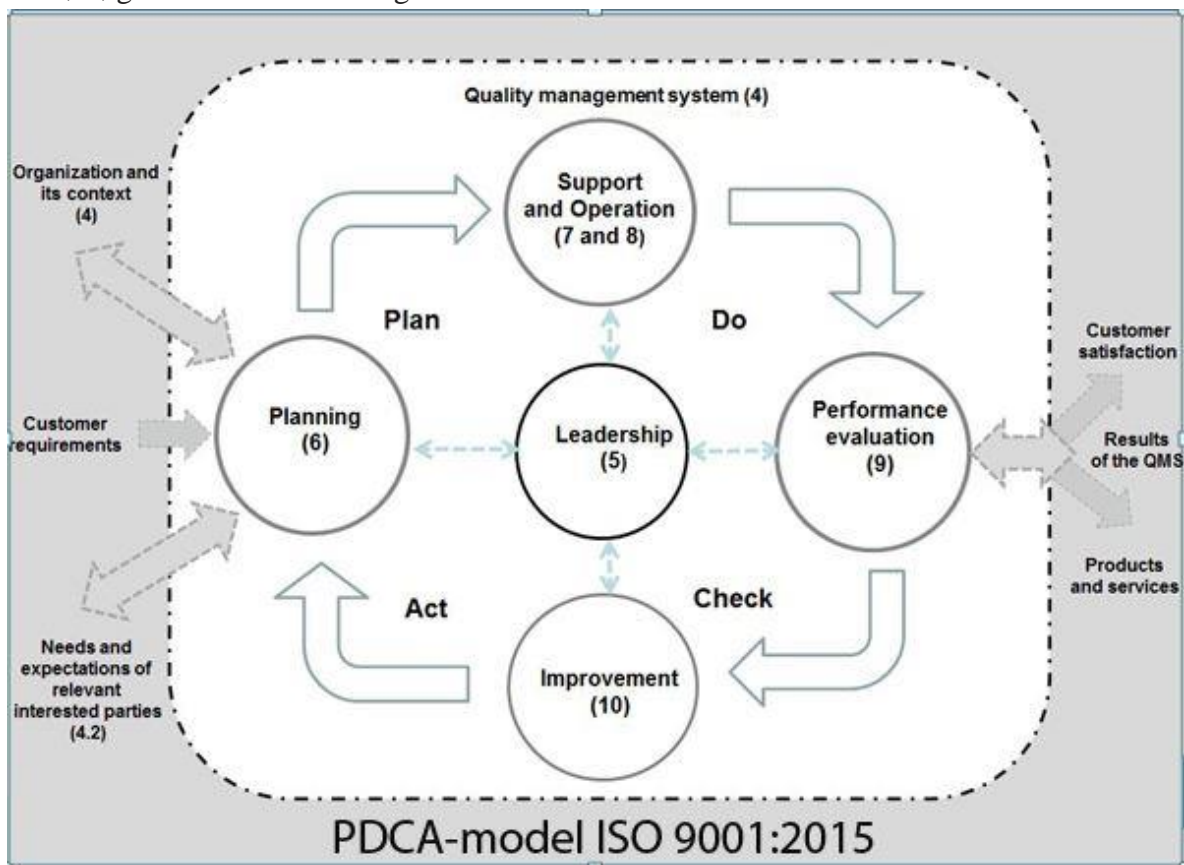
DS/EN 16231: Benchmarking metodik for energieffektivitet

DS/EN 15900: Energitjenester (i daglig tale ESCO aftaler).

DS/ISO 9000 serien: Kvalitetssystemer

Kvalitetsledelsesmodellen ISO 9001 fokuserer på effektiviteten af virksomhedens processer, og derigennem medvirker til at virksomheden kan opnå de ønskede resultater. Standarden fremmer implementeringen af en proces tilgang som lægger vægt på behov, merværdi, proces performance og effektivitet samt en kontinuerlig forbedring gennem objektive målinger og derved forøger virksomhedens konkurrenceevne.

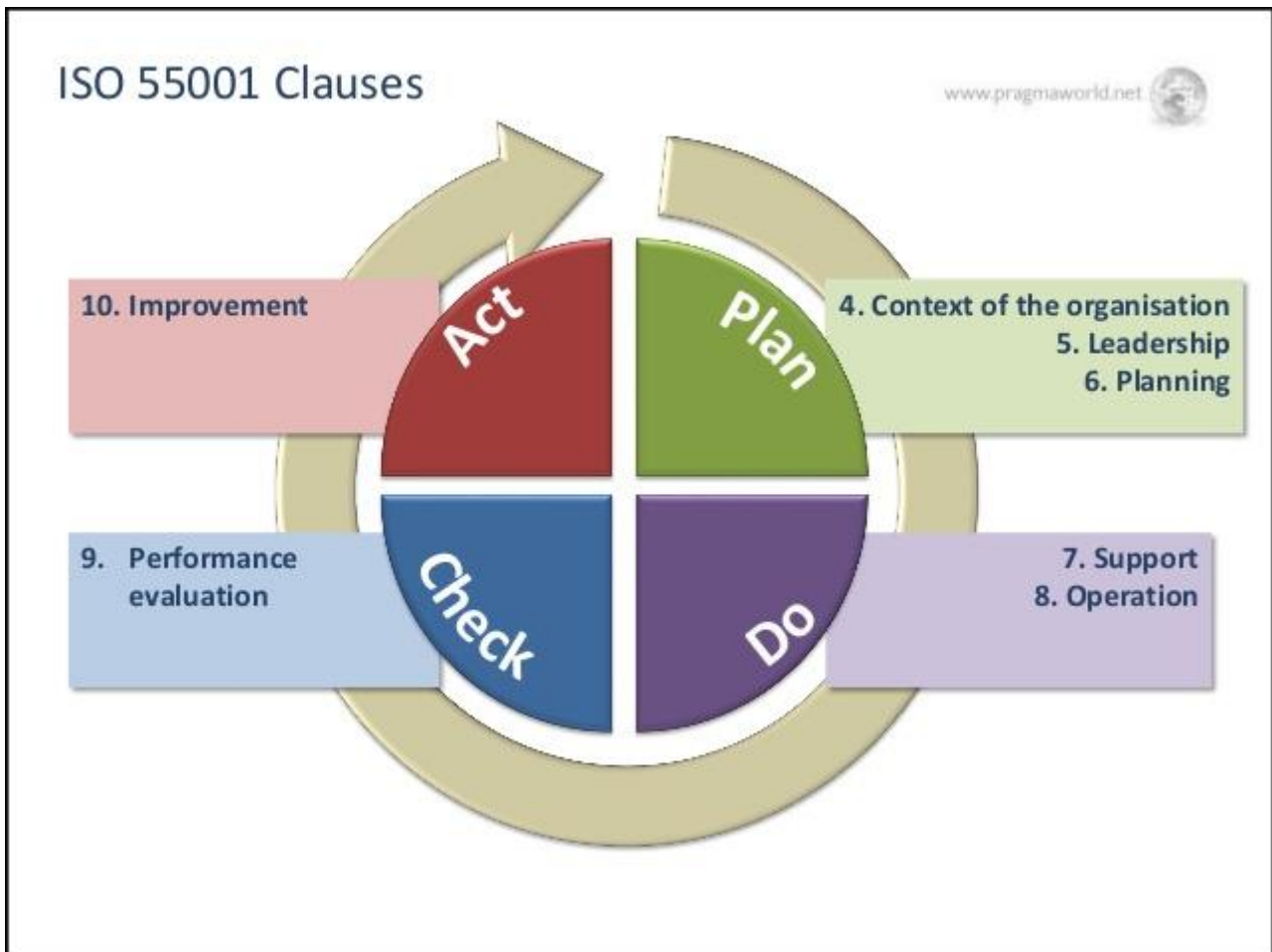
I forhold til kunderne vises organisationens evne til at levere en ensartet kvalitet kontinuerligt, hvilket bør øge kundetilfredshed og tillid.



Figur 6-6 PDCA model ISO 9001: 2015

DS/ISO 55000 serien: Asset Management

Et aktiv, immateriel eller materiel, har en potential eller faktisk værdi for en organisation. Et effektivt asset managementsystem sikrer gennem livcyklusledelse at aktiverne understøtter virksomhedens strategi. Asset management gør det muligt at realisere værdien fra aktiverne med den hensigt at opfylde organisationens mål med samtidig balance til finansielle forhold, miljø, sociale omkostninger, risici, kvaliteten af service samt ydelse relateret til aktiver (West, S. Aa, 2016).



Figur 6-7 PDCA model ISO 55001

DS/ISO 14000 serien: Environmental Management

ISO 14000 familien, miljøledelsestandarden, giver virksomheder og organisationer et værktøj, til at håndtere og lede det miljømæssige ansvar og sætte de miljøjansvarlige målsætninger. Et miljøledelsessystem giver virksomheder og organisationer i alle størrelser og inden for alle brancher og sektorer et ledelsesværktøj til at styre håndtering af miljøpåvirkninger, reducere ressourceforbruget og give ledelsen overblik over virksomhedens miljøperformance. Systemet lægger stor vægt på topledelsens ansvar og målsætninger med løbende forbedringer og giver således mulighed for en maksimal miljøvenlig brug af ressourcer og en minimering af virksomheders og organisationers miljøpåvirkning.

En certificering giver mulighed for at blive fritaget for energisyn, blot punkt 4.4.3 fra ISO 50001, Energiledelsessystemet, implementeres sammen med.

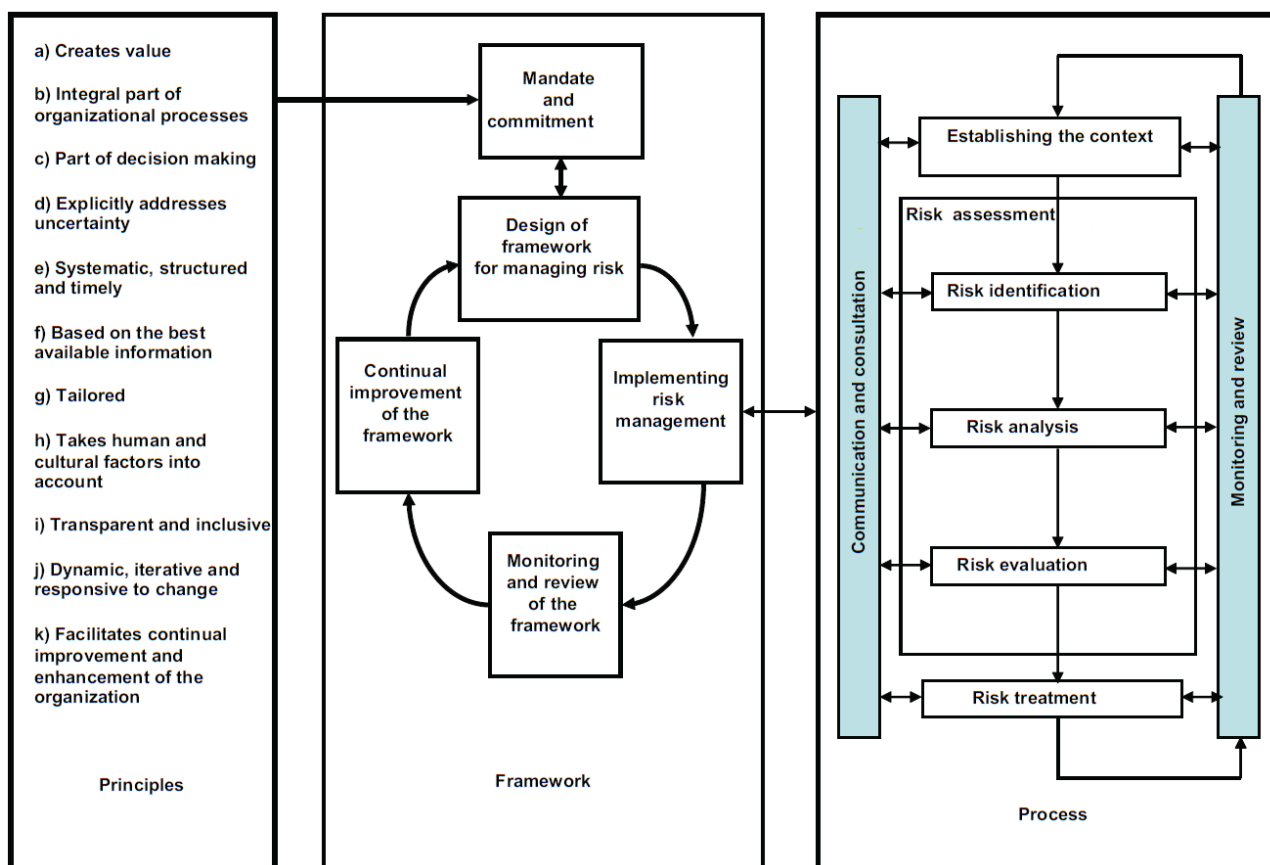


Figur 6-8 PDCA model ISO 14001

DS/ISO 31000 serien: Risk Management

ISO 31000 er en vejledning i hvordan organisationen ved en systematisk tilgang kan opnå oversigt over risici, som virksomheden vurderer er risikopådragende. Faktuelle og potentielle positive og negative risici identificeres, analyseres, evalueres og håndteres med det formål at opnå kontrol over eller at blive beredt på de risici virksomheden prioriterer i en risikohåndteringsplan. Under håndteringen af risici kan virksomheden søge at ændre sandsynlighed for forekomst, reducere konsekvenser ved opdeling af risici eller eliminere kilder til risici ved at fjerne risici faktorer eller mindske deres tilstedeværelse. Risikostyring er en løbende proces med rutiner for kontinuerlig overvågning af identificerede og nyttilkomne risici.

Risikoledelse kan anvendes i alle virksomheder, på alle niveauer og indenfor en lang række specifikke opgaver. Risikoledelse er blandt andet en integreret del af den nye ISO 9001:2015, ISO 14001:2015, ISO 45001 (OHSAS 18001) og anvendes i forbindelse med den nye persondataforordning. Der foretages ikke certificering i ISO 31000.

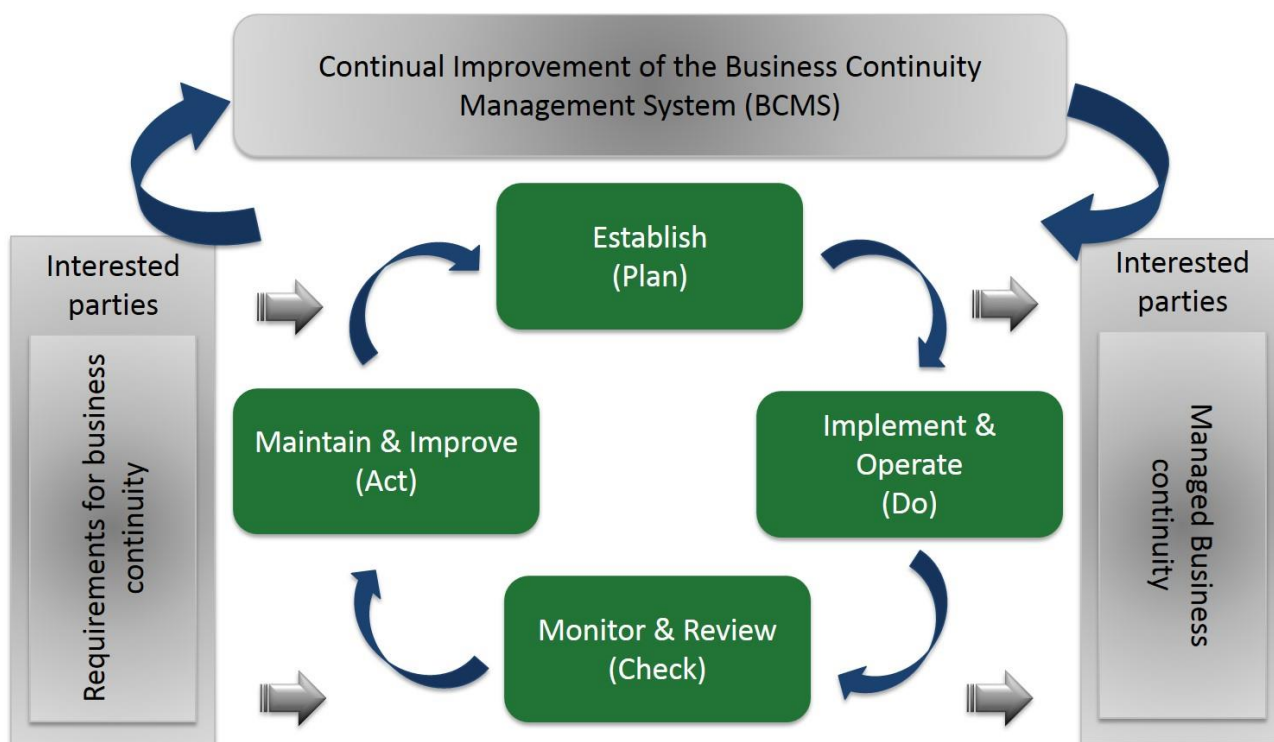


Figur 6-9 - Relationships between the risk management principles, framework and process

ISO 31000 er meget generisk
 ISO/IEC 31010 giver vejledning i risikovurderinger (= DS/EN 31010)

DS/ISO 22301 serien: Business Continuity

ISO 22301 er en international standard for Business kontinuitet management. Der gives en systematisk tilgang for planlægning, etablering, anvendelse, overvågning, revidering, vedligeholdelse og kontinuerlig forbedring af et dokumenteret Business kontinuitet management system. I forhold til disruptive forhold, giver systemet mulighed for at virksomheden beskyttes gennem en reduktion af sandsynligheden for/en forberedelse på disruptionen hvorved virksomheden kan reagere og sikre netop kontinuiteten. Dette vil give en konkurrencemæssig fordel. Standarden er generisk og kan anvendes på alle organisationer uanset størrelse og type. Der foretages certificering i ISO 22301.



Figur 6-10 - PDCA model applied to BCMS processes

DS/ISO 22301: Business Continuity Management system

DS/ISO 22313: Ledelsessystemer - Videreførelse af virksomhedsdrift - Vejledning

DS/EN 15221 serien: Facility Management

På baggrund af ønsker fra EU Kommissionen om at øge konkurrencen på serviceområdet i Europa, og for at medvirke til at skabe en klar struktur og terminologi indenfor Facilities Management, har den europæiske standardiseringsorganisation CEN udarbejdet 7 standarder.

Standardserien DS/EN 15221 anses ikke at være en del af ledelsesstandarderne, men en standardisering af aftaler, kvalitet, taksonomi, klassificering, struktur, processer, opmåling og benchmarking indenfor Facility Management. Standarderne er dermed et stærke værktøjer for ledelsen.

INFO BOKS:

DS/EN standarderne forventes indenfor kort tid, at blive erstattet af DS/ISO standarder.

Europæisk/Dansk FM standard DS/EN 15221 (gælder frem til ISO standarden træder i kraft)

1. Terminologi og definitioner DS/EN 15221-1:2008
2. Vejledning i udarbejdelse af Facility management-aftaler DS/EN 15221-2:2008
3. Vejledning i kvalitet inden for Facility management
DS/EN 15221-3:2011
4. Taksonomi, klassifikation og struktur inden for Facility management DS/EN 15221-4:2011
5. Vejledning i processer inden for Facility management
DS/EN 15221-5:2011
6. Opmåling af arealer og rum i forbindelse med Facility management DS/EN 15221-6:2011
7. Vejledning i benchmarking af præstationer DS/EN 15221-7:2012

ISO/DIS 41011 og 41012

Facility Management Part 1: Vocabulary. ISO/DIS 41011

Facility Management Part 2: Guidance on strategic sourcing and the development of agreements. ISO/DIS 41012.

6.7. Litteratur/referencer

Pilz GmbH & Co. KG: <https://www.pilz.com/da-DK/knowhow/law-standards-norms/standards>

EUROPA-PARLAMENTETS OG RÅDETS DIREKTIV 2012/27/EU af 25. oktober 2012:

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DA/TXT/?uri=celex:32012L0027>

Erhvervsstyrelsen, august 2013, Potentialer for standardisering og vækst,

https://erhvervsstyrelsen.dk/sites/default/files/media/publikation/standardisering_og_vækst_i_danmark.pdf

Potter, P., John, 2013, January 09, Management Is (Still) Not Leadership,

<https://hbr.org/2013/01/management-is-still-not-leadership/#>

DS/EN ISO 9001:2015, 5. Udgave, Kvalitetsledelsessystemer - Krav

DS/ISO 50001 1. udgave 2011-11-09 Energiledelsessystemer - Krav og vejledning

ISO 50002: 2014, Energi auditering: Krav

ISO 50003: 2014, Energiledelsessystemer: Krav til organer, der foretager audit og certificering.

ISO 50004: 2014, Energiledelsessystemer: Vejledning i implementering, vedligehold og forbedring.

ISO 50006: 2014, Energiledelsessystemer: Måling af energipræstation ved hjælp af baseline for energi (EnB) og indikatorer for energipræstation (EnPI): Generelle principper og vejledning

ISO 50015: 2014, Energiledelsessystemer: Måling og verifikation af organisationers energieffektivitet

Tilhørende underliggende DS/EN standarder som supplement til ISO 50000 serien:

DS/EN 15900: 2010, 2. udgave, Energitjenester, Definitioner og krav

DS/EN 16212: 2012, 1. udgave, Beregning af energieffektivitet og energibesparelser

DS/EN 16231: 2012, 1. udgave, Benchmarking metodik for energieffektivitet

West, S. Aa, 2016, 4. Udgave, Vedligehold Asset Maintenance Management

DS/ISO 55001 1. udgave 2014-01-29 Styring af aktiver (asset management) - Ledelsessystemer - Krav.

DS/EN ISO 14001, 2015, 3. udgave, Miljøledelsessystemer - Krav og vejledning

ISO 31000: 2018, Risikoledeelse - vejledning

ISO/IEC 31010: 2010, Risikoledeelse - Teknikker til risikovurdering (= DS/EN 31010)

DS/EN ISO 22301: 2014, Samfundssikkerhed - Ledelsessystemer til forretningskontinuitet - Krav

DS/EN ISO 22313: Ledelsessystemer - Videreførelse af virksomhedsdrift - Vejledning

DS/EN 15221-1:2008, Terminologi og definitioner

DS/EN 15221-2:2008, Vejledning i udarbejdelse af Facility management-aftaler

DS/EN 15221-3:2011, Vejledning i kvalitet inden for Facility management

DS/EN 15221-4:2011, Taksonomi, klassifikation og struktur inden for Facility management

DS/EN 15221-5:2011, Vejledning i processer inden for Facility management

DS/EN 15221-6:2011, Opmåling af arealer og rum i forbindelse med Facility management

DS/EN 15221-7:2012, Vejledning i benchmarking af præstationer

ISO/DIS 41011, Facility Management Part 1: Vocabulary.

ISO/DIS 41012, Facility Management Part 2: Guidance on strategic sourcing and the development of agreements.

7. CTS

Finn Jørgensen, Adjunkt

Maskinmestreskolen København

fj@msk.dk

Afsnittet "CTS" kan læses som en selvstændig beskrivelse eller i sammenhæng med de øvrige faglige områder, der er beskrevet i ELFORSK projektet: Indeklima, Facility Management, Ventilation, Opvarmning, Lys, Bygningsdynamik, Nøgletal og Energirenovering. Alle afsnit søger at behandle det pågældende emne ud fra relevansen i forhold til "Energirigtig drift af det rette indeklima i bygninger". Spørgsmål, kommentarer mv. kan rettes til forfatteren.



ELFORSK

Dette kapitel er udarbejdet som del af projektet **Energirigtigt drift af det rette indeklima i bygninger – ENDRIN** støttet af ELFORSK i periode 2016–2017, projektnummer 348-006 (www.elforsk.dk).

7.1. Indhold

7.1.	Indhold	7-2
7.2.	Læringsmål.....	7-3
7.3.	Nomenklatur.....	7-4
7.4.	Indledning	7-6
	Integration - Et nøgleord	7-7
7.5.	Generelt om CTS	7-10
	Brugere og brugerflade.....	7-10
	Funktionalitet - HVAC-anlæg	7-13
	Funktionsbeskrivelse	7-16
	IT-arkitektur (LON, KNX, BACnet og OPC).....	7-20
7.6.	CTS i relation til indeklima.....	7-26
	Strategier, reguleringsløjfer (EiSE)	7-26
7.7.	Nøgletal, Funktionsafprøvning og Performance test	7-28
	BR15 krav om funktionsafprøvning.....	7-28
	Performance test - Dokumenteret med BMS	7-28
7.8.	BMS som energiledelsesværktøj.....	7-36
	Energiledelse iht. ISO 50001.....	7-36
7.9.	Trends.....	7-37
7.10.	Litteraturliste	7-44
7.11.	APPENDIX A (Funktionsbeskrivelse - eksempel fortsat).....	7-45
7.12.	APPENDIX B (Styrings- og reguleringsformer - Én oversigt).....	7-47
7.13.	APPENDIX C (EiSE strategiskemaer - CTS-justeringer)	7-53
7.14.	APPENDIX D (OSI-modellen og CTS-protokoller).....	7-55

7.2. Læringsmål

Studerende der læser følgende kapitel skal være i stand til at

- Kende til begreberne BMS, CTS og IBI
- Kende til IT-arkitekturer indenfor bygningsautomation
- Kende til funktionsbeskrivelser og PI-diagrammer for HVAC-anlæg
- Kende til begreberne proprietære- og åbne CTS-systemer
- Kende til LON, KNX og anvendte protokoller indenfor bygningsautomation
- Kende til datalogning og tidsseriers betydning for opnåelse af energirigtig drift med det rette indeklima, herunder nøgletal.
- Kende til indeklima strategier- og reguleringsløjfer.
- Kende til funktionsafprøvning og performance test dokumenteret med BMS.
- Kende til problematikken 'åbne systemer, én eller flere leverandører, integration af systemer og behov for klar ansvarsfordeling'

7.3. Nomenklatur

ABA. Automatisk Brand Alarmering. ABA anlæg giver direkte alarm til et redningselskab ved brand. Brandalarmeringssystemet er ofte signalgiver til bygningens CTS- og IBI-anlæg, så ventilationsanlæg kan stoppes og vinduer lukkes i tilfælde af brand

ABV. Automatisk Brand Ventilationsanlæg

ABDL. Automatisk Brand Dørs Lukningsanlæg

AIA. Automatisk Indbruds Alarmanlæg

ARS. Automatisk Rum Slukningsanlæg

AVA. Automatisk Varslingsanlæg

AVS. Automatisk Sprinkleranlæg

BACnet. Building Automation and Control networks. Protokol udviklet for bygningsautomation

BMS. Building Management System. Det bygningskontrollerende anlæg

CTS. Central Tilstandskontrol og Styring (dansk betegnelse)

CTS UC. CTS-undercentral

CTS HC. CTS-hovedcentral

HMI. Human Machine Interface. Brugerflade

IBI. Intelligent Building Installation

SCADA. System Control And Data Acquisition. Software mellem bruger og automatikenheder

SRO. Styring Regulering og Overvågning (dansk betegnelse)

CAV. Constant Air Volume

DCV. Demand Controlled Ventilation

HVAC. Heating, Ventilation and Air Conditioning

VAV. Variable Air Volume

Bus. Betegnelse for systemet der overfører data mellem enheder

Busstandard. Definerer den fysiske forbindelse, signalernes elektriske form og dataprotokol

ETS. Engineering Tool Software. Programmeringsværktøj til konfiguration af KNX-installation

Feltbus. Seriel bus for transmissions af information mellem enheder på feltniveau

Funktionsblok. Applikation lagret i bibliotek. Anvendes ved programmering af funktionalitet

IoT. Internet of Things

IP. Internet Protocol

Gateway. To-vejs oversætter mellem protokoller

Gruppeadresse. Logiske adressering i KNX netværk

Kaskade. Indre reguleringsløjfe som stabiliserer reguleringen ved store belastningsændringer

Regulering i serie. Regulering i serie forhindrer samtidighed

KNX. Busbaseret IBI system. KNX-protokol og KNX-bus indgår i KNX-teknologien

LAN. Local Area Network

LON. Local Operating Network. Busbaseret IBI system

LonMark. International organisation. Specificerer sameksistens ml. LON produkter

LonMarker. Programmeringsværktøj til konfiguration af LON-installation
LonWorks. Netværksplatform for LON
LonTalk. Protokollen i LON-teknologien
M-bus. Meter/Måler-Bus
Modbus. 'De facto' PLC kommunikationsstandard
Node. Betegnelse for alle enheder med en adresse i et LON netværk
OSI. Open System Interconnection reference model. Netværksstandard anbefalet af ISO
PI. Proces- og Instrumenteringsdiagram
PID. Regulator med Proportional-, Integral- og Differentialled
Profibus. Process Field Bus. Standard feltbus indenfor industriautomation
Profinet. Process Field Net. Standard for industrielt Ethernet. Definerer tre protokolniveauer
Protokol. Et specifikt sæt af regler for udveksling af data
Protokolstak. En protokolstak implementerer flere tilstødende lag i OSI-modellen i én funktion
TCP. Transmission Transport Protocol. Den protokol internettet anvender i transportlaget
IP. Internet Protocol. Protokollen internettet anvender i netværkslaget
IP adresse. Numerisk mærkning. Tildeles alle enheder i et netværk, der anvender IP protokollen
TCP/IP. Protokolstak. Kobler TCP og IP. Muliggør afvikling af applikationer
WAN. Wide Area Network
WAP. Wireless Application Protocol

7.4. Indledning

For at kunne styre og overvåge en bygning på en måde som sikrer brugerne af bygningen det rette indeklima på en energirigtig måde, og samtidig giver driftspersonalet det fulde overblik, så der til enhver tid kan handles på uhensigtsmæssig drift og fejl i bygningens tekniske installationer, skal de nødvendige driftsparametre kunne overvåges fra centralt hold. Opstår der fejl i f.eks. ventilationsmotorer, ventilationsspjæld, filter-vagte, ventiler på varme- og kølefladekredse, anlægstryk og følere skal gives alarm centralt. Men at gøre alle driftsparametre tilgængelige garanterer ikke at bygningen fungerer efter hensigten. Det er ikke nok løbende at udskifte defekte komponenter, og justere lidt op og ned, når brugerne af bygningen beder om det. Bygningens dynamik skal kunne overvåges og justeres på en måde, som stemmer overens med den indeklimastrategi, der blev lagt til grund ved dimensionering af varme-, køle- og ventilationsanlæg. Kan dette ikke lade sig gøre, skal det bringes på bane, så indeklimastrategien kan justeres og bygningens tekniske installationer tilpasses, og målet 'energirigtig drift og det rette indeklima' nås.

En bygnings tekniske anlæg håndterer en lang række funktioner. Bl.a.:

- Styring- og regulering af varme-, ventilation og køling
- Styring- og regulering af belysning og solafskærmning
- Adgangsforhold
- Tyveri- og brandsikring
- Alarmering ved tekniske fejl, servicebehov og komfortafvigelser
- Registrering af forbrug af vand, varme, el og gas

Feltet bygningsautomation er stort og komplekst. Formålet med CTS afsnittet er at give den studerende en grundlæggende introduktion med vægten lagt på komfort- og klimastyring. Anvendte begreber, funktionsbeskrivelser, anlægdiagrammer, styringsprincipper, IT arkitektur, relevante tidsserier og krav til performancetest af varme- ventilations- og køleanlæg, indskrevet i byggereglementet i sommeren 2017 søges belyst.

BMS/CTS/BI

Nedenfor beskrives kort betegnelser indenfor bygningsautomation anvendt såvel i Danmark som internationalt.

BMS. Et bygningskontrollerende anlæg, Building Management System, synliggør alle relevante driftsdata, og giver uddannet driftspersonale mulighed for, dels at udføre service og vedligeholdelse, dels at handle når bygningens drift er uhensigtsmæssig.

Et anlæg er først et bygnings kontrollerende anlæg, når en central platform binder alle tekniske funktioner sammen i et netværk, således at de kan tilgås fra én betjeningsenhed. Et BMS-anlæg gør det muligt, at:

- Skabe et samlet billede af bygningens komfortforhold sammenholdt med bygningens klimabelastning registreret af en central vejrstation

- Udøve energiledelse, dvs. registrere forbrug, beregne nøgletal og præsentere både øjebliksbilleder og tidsserier, som grundlag for løbende optimering af forbrug
- Tilgå indeklimastyring, belysningsstyring og solafskærmning på rumniveau
- Betjene sikrings- og adgangskontrolanlæg

CTS

CTS er en dansk betegnelse og en forkortelse af Central Tilstandskontrol og Styring. Der skelnes mellem CTS-hovedcentraler og CTS-undercentraler. Et CTS-anlæg er først synonymt med et Building Management System, når der er installeret én central betjeningsenhed, som kan kommunikere med alle bygningens teknisk anlæg. En sådan central betjeningsenhed vil være en CTS-hovedcentral, men betegnelsen CTS-hovedcentral benyttes også for automatiske anlæg som brandalarmeringsanlæg, branddørslukkeanlæg, adgangskontrolanlæg, sprinkleranlæg, indbrudsalarmanlæg og f.eks. videoovervågningsanlæg, der alle er en del af en bygnings BMS. CTS-undercentraler er programmérbare styringer til styring og regulering af varme, ventilation og køling. I et bygningskontrollerende CTS-/BMS-anlæg er undercentralerne koblet sammen såvel indbyrdes som til den centrale brugerflade, hvorfra al overvågning og betjening kan tilgås. Hjertet i bygningens komfort- og klimastyring er således CTS-undercentraler, der på baggrund af en række følere styrer og regulerer ventilationsmotorer, ventiler for varme- og kølesløjfer, spjæld og cirkulationspumper. De tekniske anlæg vil normalt have egne undercentraler med decentrale reguleringsløjfer, men skulle indgå som en integreret del af hele bygningens drift.

IBI

IBI er en forkortelse af Intelligent Building Installation. IBI-anlæg er overbygninger på bygningens CTS-anlæg, der behovsorienteret styrer og regulerer brugsområder, f.eks. kontorer, møderum og gangarealer. IBI-anlæg kan f.eks. styre og regulere den kunstige belysning, solafskærmning, åbne og lukke vinduer, styre og regulere områdets CO₂-niveau og temperatur gennem regulering af lokale spjæld- og ventiler. IBI-anlæg kan give alarm ved komfortafvigelse og give meddelelse om behov for service. F.eks. vil IBI-anlæg kunne registrere lyskilders brændetid, og give meddelelse om nødvendig udskiftning. IBI-anlæg kan dermed øge komforten og samtidig give et overblik over bygningens komfortmæssige performance.

Integration - Et nøgleord

En optimal udnyttelse af en bygnings automatikinstallationer forudsætter, at systemerne kan kommunikere og arbejde sammen. CTS-undercentraler bør kunne gøre brug af hinandens tilstandsparametre, så forskellige bygningsafsnit kan arbejde sammen om en valgt indeklimastrategi. Registrering af tilstedeværelse og indeklima på rumniveau, skal kommunikeres til de CTS-undercentraler, som styrer og regulerer varme-, køl- og tilførsel af frisk luft i det pågældende område. Det centrale betjeningssystem skal kunne kommunikere med såvel CTS-undercentraler som IBI-anlæg, så ønskede værdier (set-punkter) kan justeres, følere og aktuatorer overvåges, alarmer modtages og afstilles, og logning af indeklima og forbrug udføres automatisk. Det sammen

gælder bygningens adgangskontrolanlæg. F.eks. vil adgangskontrolanlægget kunne integreres med IBI-anlæg, så kun relevant belysning aktiveres ved tilstedeværelse udenfor normal brugstid.

Udfordringen

På papiret synes integration naturlig, men netop integration af forskellige komponenter og centraler er en stor udfordring, som ofte resulterer i mangelfuld komfort og overforbrug af energi. En forudsætning for at kunne integrere komponenter og anlæg, er at de hver især har den fornødne åbenhed både indbyrdes og overfor det bygningskontrollerende anlæg. Men åbenhed er ikke en tilstrækkelig betingelse. CTS-undercentraler og IBI-anlæg leveres ofte af hver sin under-entreprenør. Selvom systemerne leveres som åbne systemer, skal systemerne integreres og brugerfladen tilpasses bygningen. Dette arbejde kræver indsigt og kan sjældent løftes på en hensigtsmæssig måde, når først bygningens tekniske anlæg er leveret. Integration af CTS-undercentraler, IBI-anlæg og den overordnede brugerflade skal have øje i projekteringsfasen, udbudsgranskningen, kontraktskrivningen og den løbende idriftsættelse af anlæg og installationer under udførelsen.

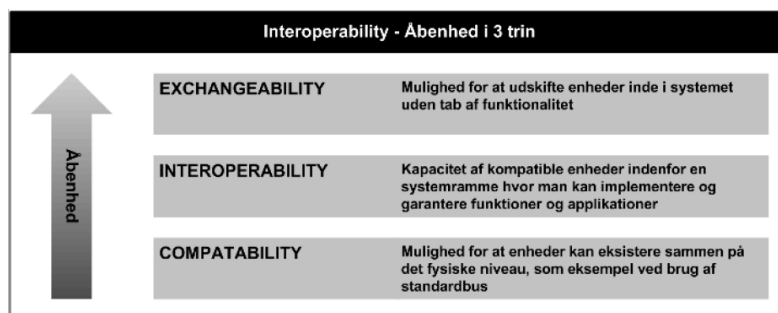
En måde at sikre integration mellem IBI-anlæg, CTS-undercentraler og den bygningskontrollerende brugerflade er at vælge én CTS-entreprenør, der fungerer som bygherrerådgiver i hele processen fra udbudsbeskrivelse til implementering og garanterer samspillet mellem de forskellige automatik-løsninger. Problemet med en sådan løsning kan blive en uønsket CTS-leverandørafhængighed. Benytter bygherren i stedet en CTS-rådgiver, er problemet ofte, at denne har sin viden fra CTS-producenter, og ikke den fornødne indsigt til at sikre integration, når forskellige entreprenører leverer hver sine foretrukne løsninger.

Åbenhed

At foreskrive åbenhed i udbudsmaterialet er ikke en garanti for at forskellige systemer kan integreres i et samlet bygningskontrollerende anlæg med én brugerflade. Plug-and-play sikres ikke ved at foreskrive åbenhed. Åbenhed og åbne protokoller kan forekomme på flere niveauer. Den laveste grad af åbenhed er 'compatibility'. På dette niveau vil flere enheder kunne sameksistere uden at kunne kommunikere indbyrdes. Enhederne anvender samme kommunikationsprotokol, og er koblet på samme kommunikationslinje, men kommunikere ikke indbyrdes.

Den mellemste grad af åbenhed er 'interoperability'. På dette niveau er protokollerne åbne standardiserede og certificerede, og de tilsluttede enheder kan fungere sammen. Et eksempel kunne være en IBI-controller og en tilhørende rumbetjeningsenhed.

Det højeste niveau af åbenhed er 'exchangeability'. På dette niveau kan en komponent udskiftes med en anden komponent uden tab af funktionalitet.



Figur 7-1 Åbenhed i 3 trin;

Kilde: Energiforum Danmark, www.energiforumdanmark.dk

Imidlertid er tendensen, at såvel hardware som applikationssoftware til CTS-undercentraler og IBI-anlæg bliver mere og mere individuelt udviklet, så det ikke er muligt at udskifte enheder uden at skulle foretage et større ombygningsarbejde, hvis der skiftes fra en systemleverandør til en anden.

I dag har BACnet vundet indpas som kommunikationsprotokol mellem BMS-brugerfladen og CTS-undercentraler samt IBI-controllere, hvad enten disse er LON-, KNX- eller DALI-baserede. BACnet understøtter dog ikke en plug-and-play filosofi, som tilfældet er med f.eks. Microsoft produkter, der kan installeres, genkendes og umiddelbart bringes i funktion.

Sammenfattende kan siges, at hvis bygningen ikke har en systemintegrator med den fornødne kompetence ansat, så skal det sikres at bygningens CTS-leverandør har såvel kompetence som en organisation bag sig, der kan supportere sin CTS-leverance over en lang periode. Vælges flere CTS-leverandører, gælder samme betingelse, men i tillæg at ansvarsfordelingen såvel mellem de enkelte CTS-leverandører, som ansvaret for BMS-overbygningen er gjort klar i udbudsfasen.

Formålet med kapitlet CTS er som anført, at give den maskinmesterstuderende et grundlæggende indblik i begreber og anvendte teknologier indenfor bygningsstyring, med vægt på indeklimatestyring, således at den studerende med sin grundlæggende viden indenfor ventilation og indeklimate samt styring og procesregulering kan deltage aktivt fra formulering af indeklimatestrategi til valg af bygningsautomatkløsnings og deres implementering i et bygningskontrollerende anlæg. Endvidere skal den studerende kende til de forskellige brugergrupper, deres individuelle behov, samt hvilke krav, der med rette kan stilles til brugerfladen og dens løbende tilpasning, som skal sikre bygningens indeklimate, drift og vedligeholdelse.

7.5. Generelt om CTS

Brugere og brugerflade

En hensigtsmæssig brugerflade er en afgørende faktor, når målet energirigtig drift og det rette indeklima skal nås. I dette afsnit gennemgås 'brugere og brugerflade' i et overordnet perspektiv for at understrege, at en god hensigtsmæssig brugerflade er noget der kan stilles krav til, og noget der skabes i løbende dialog mellem de forskellige brugere og designerne af brugerfladen.

Overvågning og styring af en bygnings tekniske anlæg, som:

- Varmeanlæg
- Varmt brugsvandsanlæg
- Fjernvarmeanlæg
- Kedelanlæg
- Koldt brugsvandsanlæg
- Ventilationsanlæg
- Køleanlæg
- Køle- og fryserumsanlæg
- Pumpeanlæg (f.eks. pumpebrønde)
- Brandalarmanlæg (ABA)
- Branddørsanlæg (ABDL)
- Adgangskontrolanlæg (ADK)
- Alarmanlæg (AIA)
- Sprinkleranlæg (AVS)
- Belysningsanlæg
- Solafskærmningsanlæg
- Vinduesanlæg

stiller krav til brugerfladen. En god brugerflade giver de driftsansvarlige overblik over de enkelte anlæg driftstilstand, og er samtidig værktøjet til at styre anlæggene på en både komfort- og energieffektiv måde. Brugerflade skal ligeledes understøtte bygningens energiledelse iht. ISO standard 50001, så bygningens energiforbrug sikres, og mulige forbedringer identificeres.

HMI, SCADA, BMS

I procesindustrien benævnes brugerfladen mellem operatører og procesanlæg for HMI 'Human Machine Interface'. Indenfor bygningsautomation benyttes, som anført, betegnelsen BMS 'Building Management System' eller BAS 'Building Automation System' for det øverste lag. Betegnelsen SCADA 'System Control And Data Acquisition' er en ofte anvendt betegnelse for den BMS platform, som opsamler og analyserer real-tids data fra tekniske anlæg og genererer tidsserier på baggrund af historiske data.

Skærbilleder

ISA, International Society of Automation, har udarbejdet standarden ANSI/ISA 101.01-2015, som opstiller retningslinjer for en designcyklus til udarbejdelse af effektive HMI-brugerflader. En tilsvarende standard findes ikke indenfor bygningsautomation, men selvom produktions- og procesindustrien har fokus på optimering af driften og minimering af økonomiske tab gennem løbende procesoptimering og rettidig vedligeholdelse, vil standardens generelle anbefalinger og retningslinjer med fordel kunne implementeres i bygningsdrift.

Udfordringen¹ ligger ofte i at eksisterende brugerflader:

- ikke er designet efter en fælles designguide
- ikke benytter fælles grafiske værktøjer
- er konfigureret af flere systemleverandører
- er designet med PI diagrammer som eneste design kriterie

forhold i strid med et naturligt brugerønske om:

- konsistent brug af farver
- brug af samme objektsymboler
- at 'trends' og 'driftsinformation' er en integreret del af brugerfladen
- at grafiske opdateringer ikke blot er opdateringer af PI-diagrammer

Nedenfor anføres i korte træk ANSI/ISA 101.01-2015's idéer og anbefalinger. Standarden tager udgangspunkt i en livscyklusbetragtning, og fokuserer på at de forskellige **brugere** af systemet:

- operatører, som overvåger drift og processer
- vedligeholdelsespersonale, som fejlfinder og vedligeholder udstyr
- teknisk personale, som modificerer, tilføjer og sletter applikationer
- administrator, som udfører opdateringer og tildeler sikkerhedskoder
- analytører, som overvåger drift og processer for at optimere
- andre, f.eks. kvalitetssikringsafdeling

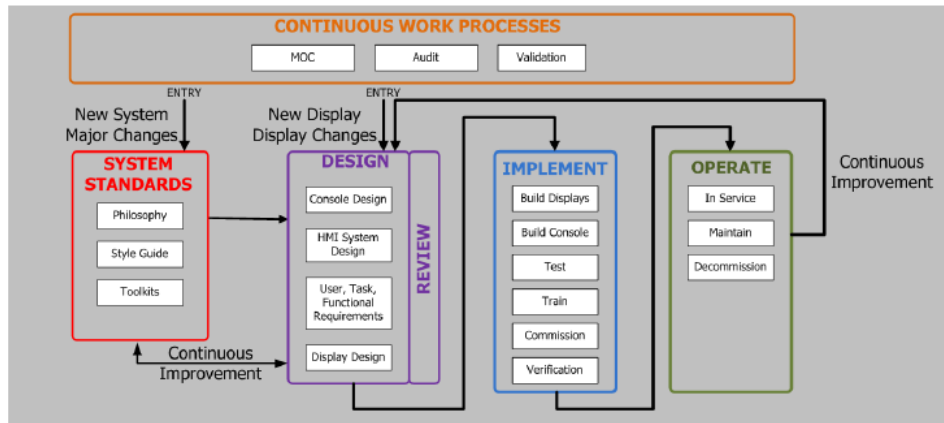
har forskelligt informationsbehov.

Brugerfladens **livscyklus** kan beskrives ved fire tilbagevendende faser:

- design
- implementering
- brug
- forbedring

¹ Mike Hawrylo - ISA101 to existing HMIs - <https://www.scribd.com/document/324641235/ISA>

Standarden anbefaler, at alle forbedringer sker i dialog med brugerne ved periodisk gennemgang af utilsigtede hændelser.



Figur 7-2 Livscyklus Systemstandarder–Design–Implementering–Anvendelse – Forbedringer;
 Kilde: Hawrylo M. Applying ISA101, used with permission of ISA, www.isa.org

Anbefalinger

Opgradering. Sæt ord på en HMI filosofi, en stil og værktøjer. Fokuser på den 'nye' HMI's ønskede måde at arbejde på. Involver ejere, driftsledere og operatører.

Løbende forbedring. Der er to kilder til et forbedret brugerkoncept, dels systemdesignere og programmører, dels systemet og brugerne. Slutbrugerne vil ofte være fokuseret på stilen, mens programmørerne vil fokusere på værktøjerne.

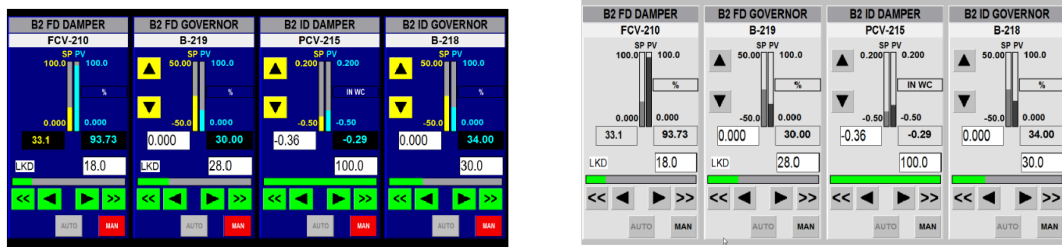
Implementering i eksisterende HMI system. Forbedringer kan udføres trinvist. Ofte vil mindre ændringer, som:

- brug af farver
- navigering
- animering af objekter

medføre store forbedringer.

Brug af farver:

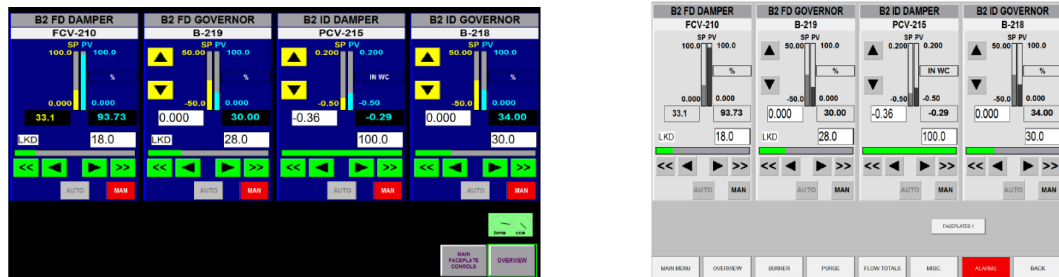
- Grå baggrund for at mindske blænding og høje kontraster
- Klare farver til visning af alarmer og kritiske situationer
- Alarmfarver kun til alarmer



Figur 7-3 Brug af farver; Kilde: Hawrylo M. Applying ISA101, used with permission of ISA, www.isa.org

Navigation:

- Brug af navigationsteknikker, som sikrer hurtig og effektiv navigation både i det aktuelle anlæg og mellem anlæggene
- Brug af konsistent navigationsteknik, dvs. samme navigationsteknik i hele brugerflade



Figur 7-4 Navigation; Kilde: Hawrylo M. Applying ISA101, used with permission of ISA, www.isa.org

Objekt animation:

- High-light kun kritiske situationer, f.eks. ved farveskift
- Undgå roterende motorer, rullende transportbånd, pulserende flammer etc.

Funktionalitet - HVAC-anlæg

En bygnings HVAC-anlæg skal understøtte den valgte indeklima strategi, og anlæggenes funktionsbeskrivelser entydigt redegøre for:

- Anlæggets funktion
- Hvordan anlægget indgår i bygningens klimastyring
- Hvordan opvarmning, køling og ventilation hænger sammen
- Hvordan anlægget styres og reguleres
- PI-diagram
- ID CTS-komponenter

T	Temperaturfølere & Termostat	M	Magnetventiler		Forbrugsregistrering
TA	Temperatur Alarm	MNB	Magnetventil Befugtning	COM	Energimåling (Køling)
TBH	Temperatur Beholder	MND	Magnetventil Damp	EM	Energimåling (Elmåler)
TBI	Termostat Brand-Indblæsning	MNG	Magnetventil Genvinding	EMT	Elmåler (Tarifsignaler)
TBU	Termostat Brand-Udsugning	MNK	Magnetventil Køling	FM	Flowmåling (generelt)
TF	Temperatur Fremløb	MNV	Magnetventil Varme	GM	Flowmåling Gas
TFI	Temperatur Frost-Indblæsning	MV	Motorventiler	KOM	Flowmåling Kondensat
TI	Temperatur Indblæsning	MVB	Motorventil Befugtning	KVM	Flowmåling Koldt vand
TR	Temperatur Retur	MVD	Motorventil Damp	QM	Energimåling Varme
TRC	Temperatur Recirkulation	MVG	Motorventil Genvinding	VVM	Flowmåling Varmt vand
TRU	Temperatur Rum	MVK	Motorventil Køling		Alarmer
TU	Temperatur Udsugning	MVV	Motorventil Varme	AL	Fællesalarm
TUD	Temperatur Ude	P	Pumper	CO	CO-måling
H	Fugtmålere	PB	Pumpe Brugsvand	FA	Flowalarm
HA	Relativ fugtighed - Alarm	PG	Pumpe Genvinding	GAS	Gasmåling
HI	Relativ fugtighed - Indblæsning	PGR	Pumpe Grundvand	ID	Ion-måling
HRU	Relativ fugtighed - Rum	PK	Pumpe Køling	LA	Niveau Alarm
HU	Relativ fugtighed - Udsugning	PKO	Pumpe Kondensat	NH3	Ammoniak-måling
HUD	Relativ fugtighed - Ude	PV	Pumpe Opvarmning	NK	Elevatoralarm
F	Flow	S	Spjæld	SMO	Røgmelder
FC	Flowtransmitter/switch	SBR	Spjæld Brand		
L	Niveau	SMB	Spjældmotor By-pass		
LA	Niveau Føler	SMG	Spjældmotor Genvinding		
LK	Luftkvalitet	SMI	Spjældmotor Indblæsn.		
LKCO2	CO2-måling	SMR	Spjældmotor Recirkul.		
PD	Differens Tryk Transmitter		Veksler		Anlægsbetegnelse
PDA	Differens tryk varme Anlæg	KV	Krydsveksler	EV	Elevator
PDI	Differens tryk Indblæsning	RV	Rotorveksler	FC	Fancoil
PDP	Differens tryk Pumpe		Vejrstation	GE	Generatoranlæg
PDR	Differens tryk Rum	LUX	Belysningsstyrke ude (lx)	KØ	Køleanlæg
PDU	Differens tryk Udsugning	RD	Regn Detektor	TK	Trykluft
PDV	Differens tryk Veksler	SI	Solindfald vandret (w/m ²)	VB	Varmtvandsbeholder
PDFI	Differens tryk Filter Indblæsning	VH	Vindhastighed	VC	Vakuumanlæg
PDFU	Differens tryk Filter Udsugning	V	Ventilatorer	VE	Ventilationsanlæg
P	Tryk Transmitter	VI	Ventilator Indblæsning	VG	Varmegenvinding
PA	Tryk Alarm	VU	Ventilator Udblæsning	HC	Hovedcentral
PT	Tryk (generelt)			UC	Undercentral
PTI	Tryk Indblæsning				
PTU	Tryk Udsugning				
PA	Tryk Alarm				

Figur 7-7 Eks. 'Komponent- og anlægsforkortelser'

Alle CTS- og IBI-komponenter skal tildeles ID-koder. En ID-kode struktur kunne være XX.YY.ZZ.VVVV.UUUU, hvor XX angiver i hvilken bygning, YY på hvilken etage, ZZZ i hvilket rum og VVVV i hvilket anlæg komponenten indgår, mens UUUU komponentens type og nummer.

XX	YY	ZZZ	VVVV	UUUU
Bygnings nr.	Etage nr.	Rum nr.	Anlægs nr.	Komponent nr.
A,B,C,....	02,01,00,1,2,....TG(tag)	1,2,3,.....	VV01,VV02,...	UU01,UU02,...
<i>Eksempel: B.01.007.VE01.T101</i>				
B	01	007	VE01	T101
Bygning B	Kælderetage 01	Rum nr. 7	Ventilationsanlæg 1	Temp.føler indbl. 01

Figur 7-8 Eks. 'ID-kode struktur og ID-kode for temperaturføler i indblæsningskanal'

Funktionsbeskrivelse

Hvad enten et teknisk anlæg skal integreres med andre anlæg, eller køre 'stand alone' skal anlæggets funktion være fyldestgørende beskrevet i en entydig funktionsbeskrivelse. I appendix C gennemgås traditionelle HVAC styrings- og reguleringsformer. Nedenfor anføres et eksempel på en HVAC funktionsbeskrivelse.

Funktionsbeskrivelse - CTS-undercentral for HVAC-anlæg med rotorveksler - Ét eksempel

Funktionsbeskrivelsen beskriver i generelle termer:

- Ventilationsanlæggets Betjening
- Ventilationsanlæggets Regulering
- Drift af cirkulationspumper
- Anlægs Alarmer

Anlæggets CTS-undercentral kan regulere HVAC anlægget efter 4 driftsformer:

1. Regulering af indblæsningstemperatur efter udetemperatur
2. Regulering af fast indblæsningstemperatur
3. Regulering af indblæsningstemperatur ud fra målt rumtemperatur
4. Regulering af indblæsningstemperatur ud fra ønsket udsugningstemperatur, alle med serieregulering af varmeplade, genvinding og køleplade.

Betjening

Anlægget betjenes ved betjeningsomskifter. Omskifteren kan være placeret i anlæggets tavlefront og/eller være en omskifterfunktion i CTS-brugerfladen for anlægget. Placeres en betjeningsomskifter i anlæggets tavlefront har den højeste prioritet.

Anlæggets driftsform vælges med betjeningsomskifteren, som har tre stillinger:

- STOP – Anlægget er stoppet
- KONSTANT – Anlægget kører konstant
- AUTO – Anlægget startes og stoppes af tidsprogram

Tidsprogram, setpunkter, reguleringsparametre, alarmer m.m. indstilles på CTS-anlægsbrugerfladen.

Start – Opstartsprocedure

- Spjældmotorer åbner friskluft- og afkastspjæld
- Reguleringer frigives
- Pumper starter efter behov
- Ventilatorer starter tidsforsinket
- Under opstart undertrykkes relevante alarmer

Stop – Når anlægget er stoppet

- Ventilatorer og pumper er standsede
- Ventilmotorer er standsede
- Spjæld er lukkede (med mindre sikkerhedsfunktioner tilsiger andet)
- Ventiler og pumper motioneres, f.eks. ugentlig

Natkøling

Køling med udeluft, når følgende betingelser er tilstede:

- Udetemperatur 3°C lavere end rumtemperatur
- Rumtemperatur højere end f.eks. 24°C
- Udetemperatur højere end f.eks. 14°C
- Omskifter i AUTO og tidsprogram i natdrift
- Mindre end f.eks. 5 timer til skifte til dagdrift

Natkøling foregår med 100% friskluft og alle varme- og kølereguleringer inaktive.

Natopvarmning

Om natten standses anlægget, iht. stop ovenfor.

Er rumtemperaturen faldet til under den indstillede minimum nattemperatur for rummet, startes anlægget med varmegenvinding tvangskoblet til 100% og varmebladens ventilmotor i normal regulering.

Når rumtemperaturen er steget 1°C, standses anlæg.

Regulering

Temperaturreguleringsform vælges på brugerfladen, blandt 4 reguleringsformer:

1. Indblæsningstemperatur pba. UDE-temperatur
2. FAST indblæsningstemperatur
3. Indblæsningstemperatur pba. RUM-temperatur
4. Indblæsningstemperatur pba. UDSUGNINGS-temperatur

Indblæsningstemperatur pba. UDE-temperatur

- Ønskeværdien for indblæsningstemperaturen beregnes modulerende i afhængighed af udetemperaturen. Forholdet mellem den beregnede ønskeværdi og udetemperaturen er fastlagt ved en indstillelig kurve.
- Indblæsningstemperaturen reguleres i forhold til den beregnede ønskeværdi. Er den målte indblæsningstemperatur lavere end den ønskede indblæsningstemperatur, reguleres der i serie ved først at lukke for køleventilen, derefter øge hastigheden på den roterende veksler og til sidst at åbne for varmeventilen.
- Er afvigelsen mellem målt og ønsket indblæsningstemperatur mere end 5°C afgives alarm med tidsforsinkelse.

Fast indblæsningstemperatur

- Indblæsningstemperaturen reguleres i forhold til den indstillede ønskeværdi, f.eks. 18°C.
- Er den målte indblæsningstemperatur lavere end den ønskede indblæsningstemperatur, reguleres der i serie ved først at lukke for køleventilen, derefter øge hastigheden på den roterende veksler og til sidst at åbne for varmeventilen.
- Er afvigelsen mellem målt og ønsket indblæsningstemperatur er mere end 5°C afgives der alarm med tidsforsinkelse.

Indblæsningstemperatur pba. RUM-temperatur

- Rumtemperaturen reguleres i forhold til den indstillede ønskeværdi, f.eks. 22 °C.
- Er den målte rumtemperatur lavere end den ønskede rumtemperatur, hæves den beregnede ønskeværdi for indblæsningstemperaturen fra minimum, f.eks. 18 °C, mod maksimum, f.eks. 35 °C.
- Hvis afvigelsen mellem målt og ønsket rumtemperatur er mere end 5 °C afgives alarm med tidsforsinkelse.

Indblæsningstemperatur pba. UDSUGNINGS-temperatur

- Ønskeværdien for indblæsningstemperaturen beregnes modulerende i afhængighed af den indstillede ønskeværdi, f.eks. 22 °C, for udsugningstemperaturen.

- Er den målte udsugningstemperatur lavere end den ønskede udsugningstemperatur, hæves den beregnede ønskeværdi for indblæsningstemperaturen fra minimum, f.eks. 18 °C, mod maksimum, f.eks. 35 °C.
- Indblæsningstemperaturen reguleres i forhold til den beregnede ønskeværdi.
- Er den målte indblæsningstemperatur lavere end den ønskede indblæsningstemperatur, reguleres der i serie ved først at lukke for køleventilen, derefter at øge hastigheden på den roterende veksler og til sidst at åbne for varmeventilen.
- Hvis afvigelsen mellem målt og ønsket indblæsningstemperatur er mere end 5 °C, afgives der alarm med tidsforsinkelse.

Tryk – Indblæsning

- Trykket i indblæsningen reguleres i forhold til den indstillede ønskeværdi, f.eks. 250 Pa, og BØR ikke ændres efter indregulering af anlæg.
- Er det målte tryk lavere end det ønskede, øges ventilatorhastigheden mod maksimum.
- Er afvigelsen mellem målt tryk og ønsket tryk mere end, f.eks. 20 Pa, afgives alarm med tidsforsinkelse.
- Minimum og maksimum ventilatorhastighed indstilles på frekvensomformer.

Tryk – Udsugning

- Trykket i udsugningskanalen reguleres i forhold til den indstillede ønskeværdi, f.eks. yyyPa, og BØR ikke ændres efter indregulering af anlæg.
- Er det målte tryk lavere end det ønskede, øges ventilatorhastigheden mod maksimum.
- Er afvigelsen mellem målt tryk og ønsket tryk mere end, f.eks. 20 Pa, afgives alarm med tidsforsinkelse.
- Minimum og maksimum ventilatorhastighed indstilles på frekvensomformer.

Temperatur – Returløb varmeplade

- Returtemperaturen reguleres i forhold til den indstillede minimum ønskeværdi, f.eks. 15 °C.
- Er den målte temperatur lavere end den ønskede returtemperatur, åbnes varmeventilen modulerende.
- Over- eller underskider returtemperaturen henholdsvis maksimum eller minimum returtemperatur, afgives temperaturalarm med forsinkelse.
- Returreguleringen er aktiv, når udetemperaturen er under 3 °C
- (Temperatur for returløb følger setpunkt for cirkulationspumpe)

Kølegenvinding

- Er udsugningstemperaturen mere end 3°C lavere end udetemperaturen, tvangsstyres varmegenvindingen til 100% genvinding, så køleenergien i rummet udnyttes.
- Når udsugningstemperaturen er mindre end 2°C lavere end udetemperaturen, reguleres varmegenvindingen igen normalt.

Temperaturvirkningsgrad på genvinding

- Virkningsgraden på veksleren beregnes kontinuert som forholdet mellem den temperaturstigning, som aktuelt opnås på den indsugede udeluft, og det maksimale temperaturfald, som kan opnås på udsugningsluften: $\eta = \frac{t_{\text{genvinding}} - t_{\text{ude}}}{t_{\text{udsugning}} - t_{\text{ude}}} \cdot 100$ [%]
- Virkningsgraden beregnes alene ud fra temperaturerne, da det forudsættes, at indblæst luftmængde og udsuget luftmængder er ens.
- Ved stoppet ventilationsanlæg sættes $\eta = 0\%$

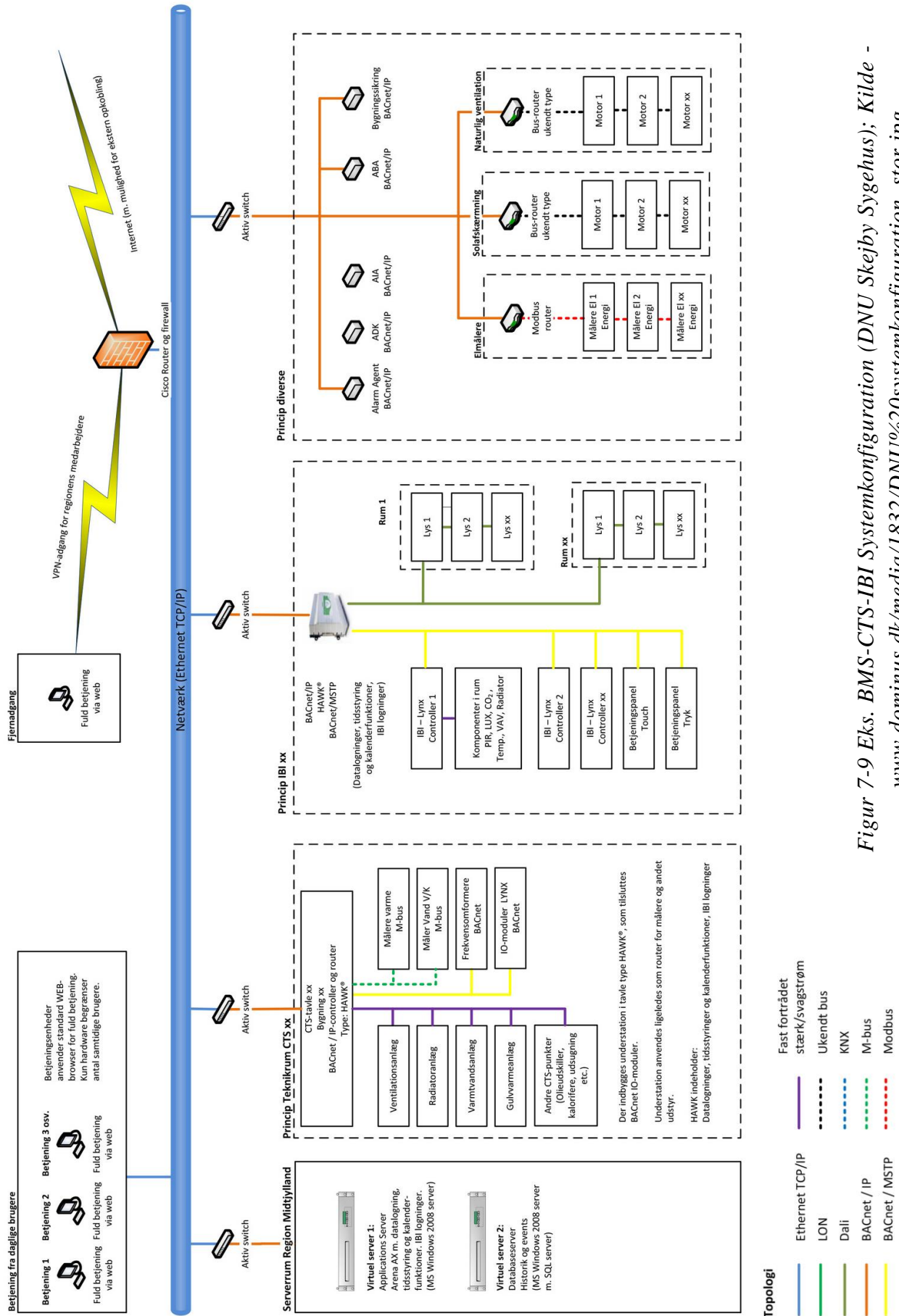
Funktionsbeskrivelse af 'regulering af cirkulationspumper' og 'alarmgivning' er anført i appendix A.

IT-arkitektur (LON, KNX, BACnet og OPC)

I det følgende beskrives forskellige anlægssystemer og komponenter i en BMS-løsning. Først illustreres IT-arkitekturen i en stor kompleks BMS-løsning, dernæst gennemgås i korte træk de to IBI-teknologier LON og KNX samt integrationsprotokollen BACnet. Tilsidst omtales Open Platform Communications OPC. Brug af PLC'ere som alternativ til de traditionelle producenter af CTS-undercentraler for HVAC-anlæg og udvikling af OPC Unified Architecture omtales i afsnittet Trends.

Figur 7-9 viser en BMS-CTS-IBI systemkonfiguration med CTS-undercentraler og IBI-systemer integreret i en BMS løsning med web-baseret betjeningsadgang. Installationen er udført på Skejby sygehus Region Midt-jylland af CTS-systemhuset Dominus A/S.

En lang række CTS-undercentraler og IBI-systemer er forbundet i netværk. Yderst til venstre ses CTS-undercentraler for bygningssikrings, brandalarm, indbrudsalarm og adgangskontrolanlæg, samt udstyr for registrering af elforbrug og aktivering af solafskærmning samt naturlig ventilation. Til styring af brugsområder på rumniveau er installeret IBI-controllere, som regulerer lys og indeklima på baggrund af tilsluttede PIR, lys-, CO₂- og temperaturfølere samt lokale aktuatorer for VAV-spjæld og radiatorventiler. Styring og regulering af tekniske anlæg, som ventilation-, radiatorvarmtvand- og gulvvarme-anlæg samt punkt-udsugningsanlæg udføres af dedikerede CTS-undercentraler. Kommunikation mellem IBI-anlæg og installationens øverste netværkslag faciliteres af BACnet-controllere. Således foregår kommunikationen mellem IBI-anlæg for indeklimastyring og bygningens betjeningsenheder via en kombineret BACnet/MSTP- og BACnet/IP-controller. Lysstyringerne på rumniveau er DALI. Kommunikation mellem bygningens betjeningsterminaler og DALI faciliteres af samme BACnet/IP-controller, som forbinder IBI-anlægene til netværket. De tekniske anlægs CTS-undercentraler kommunikerer med netværket via en lignende BACnet/IP-controller. Vand og varmemålere kommunikerer via M-bus protokollen med samme BACnet/IP-controller, og derved betjeningsterminalerne. Netværket øverste lag er et standard TCP/IP Ethernet. Betjeningsterminalerne anvender standard web-browser for fuld betjening af controllere og enheder.



Figur 7-9 Eks. BMS-CTS-IBI Systemkonfiguration (DNU Skejby Sygehus); Kilde - www.dominus.dk/media/1832/DNU%20systemkonfiguration_stor.jpg

LON, KNX, BACnet og OPC

Først gives en introduktion til IBI-teknologierne LON og KNX. (IBI-teknologien DALI for belysningsstyring beskrives i kompendiets afsnit 11). Dernæst omtales BACnet, der er blevet det foretrukne interface mellem bygningens betjeningsflade og bygningens undercentraler, IBI-controllere og forbrugsmålere. Tilsidst omtales OPC 'Open Platform Communication'.

Såvel LON som KNX er busbaserede IBI-systemer. I et busbaseret system er alle komponenter fysisk forbundet til et to-ledere kobberkabel. Forbindelsen er på samme tid signalforbindelse mellem komponenterne og strømforsyning til komponenterne. Data sendes data i pakker. I LON via protokollen LonTalk, og i KNX via KNX-protokollen. For en uddybning af protokolbegrebet henvises til appendix D.

LON (Local Operating Network). LonWorks blev udviklet af det amerikanske firma Echelon, og benævnes ofte blot LON. LON er en åben teknologi, dvs. tilgængelig for alle interesserede producenter af bygningsautomatikheder. Hjertet i LON er en neuronchip med processor, rom- og ramlager samt en eeprom. En indbygget transceiver skaber forbindelsen mellem neuron og selve LON-netværket. Kommunikation på LON-bussen foregår via protokollen LonTalk. Alle producenter af komponenter til bygningsautomation kan købe og indbygge en neuronchip i deres komponenter. Når en komponent med fysiske ind- og udgange, en neuronchip og en transceiver kobles til et Lon-netværk bliver komponenten en 'node' i netværket, som dels kan udveksle informationer med andre noder, dels udføre handlinger. Betjeningstryk og sensorer giver informationer til LON-netværket, mens aktuatorer sørger for at noget sker.

Programmeringværktøjet i LON er LonMarker. Med LonMarker 'bindes' noderne i logiske sammenhænge til styringer. Input fra noder, f.eks. temperatur, CO₂-niveau og luftfugtighed kan sammenholdes med ønskede værdier, og noder med aktuatorer aktiveres. Nodens adressering sker på baggrund af et unikt 48 bit nummer indlagt i neuronen ved dens produktion. Når komponenten tilsluttes netværket kan noden aktiveres ved et tryk, og udsende sit unikke nummer. Softwaren registrerer nummeret og tildeler noden en logisk adresse, som derefter indgår i kommunikationen mellem netværkets øvrige tilkoblede noder. De logiske adresser i et LON-netværk er inddelt i tre niveauer, øverst et domæne, dernæst et subnet og nederst selve noden. Som udgangspunkt er alle noder ligeværdige, men for at optimere nettrafikken på bussen kan LonTalk prioritere kommunikationen mellem noder, der er blevet tilknyttet bestemte applikationer. LON har en lang række beskedtyper, som i LON kaldes netværksvariable. Med LonMarker defineres variablene i applikationslaget og på den enkelte node. Det er LonMark organisationen, der definerer de netværksvariable, som kan sameksistere i åbne LON-netværk. Netværksvariablene, SNVT (Standard Network Variable Type), kaldes populært for 'snivitter'. LON teknologien anvendes ikke alene i IBI-anlæg til styring af lys, varme, persienser og indeklima i IBI-anlæg, men også i CTS-undercentraler til styring af HVAC- og sikringsanlæg. I CTS-undercentraler er LON løsningerne oftest proprietære. Producenter kan definere egne netværksvariable, og på den måde skabe proprietære løsninger. Formålet med proprietære løsninger på CTS-undercentraler vil være at beskytte de værktøjer, som producenten har udviklet til at binde noder i bestemte applikationer.

I modsætning til KNX er LON en kommerciel standard. Hver gang der laves en binding af et LON punkt skal der betales en afgift.

KNX teknologien er en europæisk udviklet standard til bygningsautomation. Ligesom LON er KNX en åben busbaseret protokol, hvormed KNX-komponenterne kan udveksle information. I en KNX-installation er der ingen central styreenhed. Komponenterne kommunikerer indbyrdes 'direkte' via busforbindelsen. Alle KNX-installationer programmeres med én software. I programmeringen af KNX-netværket tildeles hver komponent en adresse, og funktionalitet skabes ved at oprette såkaldte gruppeadresser. Hver enkelt handling, som skal udføres lægges ind i en gruppeadresse. En gruppeadresse kunne hedde 'lystænding møderum'. Ind i denne gruppeadresse trækkes input fra de KNX-komponenter, som skal initiere en hændelse, f.eks. et tryk eller en PIR. Funktionaliteten skabes når en udgang, f.eks. et kip-relæ for en række lampeudtag i møderummet, trækkes ind i samme gruppeadresse. Når KNX-netværkets funktionalitet er programmeret ved alle komponenter hvilken plads de har, og med hvem de skal udveksle data for at udføre en valgt funktion. Skal en ny funktionalitet oprettes, oprettes blot en ny gruppeadresse hvortil relevant input og ønsket output trækkes ind. Producenter af KNX-produkter har dannet sammenslutningen 'The KNX association', der dels udvikler og administrerer programmeringsværktøjet ETS (Engineering Tool Software), dels angiver de retningslinjer nye produkter skal følge for at få tildelt KNX-mærkning. Den nyeste version af ETS er ETS5, som er bagudkompatibel med tidligere versioner.

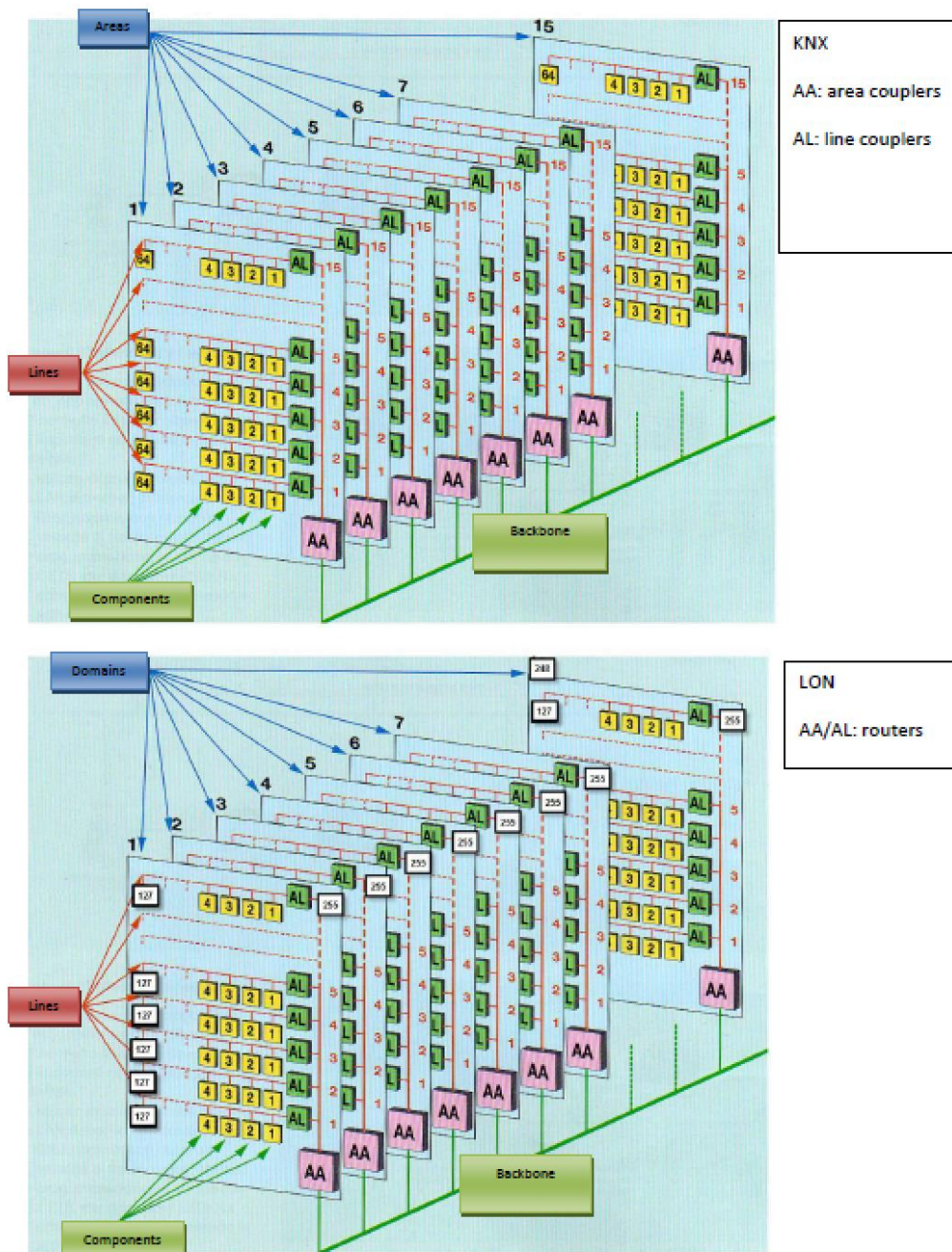
KNX-komponenter kan inddeles i tre kategorier:

- Systemkomponenter
- Sensorer
- Aktuatorer

Systemkomponenterne er strømforsyninger, linjekoblere og IP-routere. Det er systemkomponenterne, som opbygger det kommunikerende netværk. Sensorerne er tryk, PIR, display, rumfølere, vejrstationer, lux-sensorer, CO₂-, temperatur- og trykfølere, som alle sender information ud på KNX-bussen. Aktuatorerne modtager KNX-telegrammer fra bussen, oversætter telegrammerne og udfører den ønskede funktion. Aktuatorerne kan være relæer, lysdæmpere, ventilmotorer, varmestyringsmoduler m.m.. Den mindste KNX-installation som kan konfigureres vil, udover buskablet som forbinder KNX-komponenterne, bestå af en strømforsyning, et tryk og et tænd/sluk relæ. Kablingen kan ligesom kablingen i LON udføres i næsten fri topologi. Buskablet kan føres i linje-, stjerne- eller træstruktur, men ikke i ring eller maskenet. Buskablet er et parsnoet 2x0,8mm² to-lederkabel, som både overfører KNX-telegrammer og forsyner komponenterne med nødvendig spænding. Over store afstande, f.eks. mellem bygninger foregår kommunikationen, som i LON, via IP-routere og TCP/IP Ethernet.

Opbygningen af KNX- og LON-netværk er illustreret nedenfor. KNX-buskoblingen er som LON opdelt i tre niveauer, men med andre betegnelser. De enkelte KNX-komponenter er forbundet i linjer. Hvert linje kan tilsluttes op til 64 KNX-komponenter. Linjerne samles med linjekoblere i områder. Hvert område kan tilsluttes op til 15 linjer. Øverst forbindes områderne med områdekoblere. I alt 15 områder kan samles i én KNX-installation. Adressen som komponenten

tildeles i ETS-softwaren består således af et områdenummer, et linjenummer og komponentens nummer i rækken på den pågældende linje. Adressen '1.7.52' angiver f.eks. adressen på komponenten monteret i område 2, på linje 3 og som komponent nummer 52 på denne linje. Antallet af KNX-komponenter i én KNX-installation bliver dermed $64 \times 15 \times 15$. Imidlertid kan der på hver linje tilsluttes i alt tre linje-forstærkere, der hver kan tilsluttes 64 KNX-komponenter. Antallet af KNX-komponenter, der kan tilsluttes én KNX-installation bliver dermed $64 \times 3 \times 15 \times 15$, eller 43.200.



Figur 7-10 KNX og LON netværk;
Kilde: OmniBUS Engineering SA

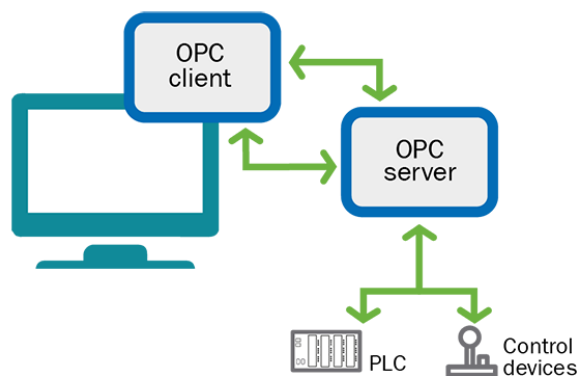
BACnet (Building Automation and Control networks). BACnet er en internationalt standardiseret dataprotokol (ANSI og ISO) udviklet specifikt for bygningsautomation. Udviklingen blev initieret af ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) for at skabe interoperabilitet mellem forskellige producenters bygningsautomatikudstyr.

Ønsket om integration af forskellige producenters komponenter og systemer har ført til at BACnet protokollen i dag understøttes af alle førende udstyrsproducenter. CTS-undercentraler, IBI-systemer og M-bus målere leveres med BACnet interface, der gør det muligt for BMS-software at tilgå udstyret, f.eks. i en web-baseret TCP/IP ethernet opkobling. En BAC-net controller kan tilsluttes direkte til bygningens LAN for intern kommunikation, og bygningens WAN uden yderligere brug af routere.

Dataudveksling med BACnet kaldes for at kommunikere med åbne BACnet protokoller. BACnet protokollen definerer dels services som Who-Is, I-Am, Who-Has, I-Have til udstyrs- og objekt-scanning, dels Read- og Write-Properties til datadeling. I ANSI/ASHRAE standard 135-2016 er defineret i alt 60 objekttyper, som BACnet servicene kan arbejde på, deriblandt Analog Input, Analog Output, Analog Value, Binary Input, Binary Output, Binary Value, Load Control, Pulse Converter, Multi-State Input, Multi-State Output, Calendar, Event-Enrollment, File, Notification-Class, Group, Loop, Timer, Trend Log, Program, Schedule, Command og Device.

Producenter kan få testet deres produkter på et BACnet testlaboratorie og tildeles et BACnet Test Lab certifikat, som garanterer at komponenten eller systemet opfylder BACnet standarden, og kan kommunikere med andre BACnet certificerede produkter.

OPC (Open Platform Communications). OPC er ikke en protokol, men en åben software interface standard for kommunikation mellem klienter og en server. En OPC server opretter forbindelse til en datakilde, f.eks. en database eller brugergrænseflade, og omsætter data til et standard OPC format. OPC blev oprindeligt udviklet af automatikleverandører og Microsoft, som en Open linking and embedding for Proces Control. I dag anvendes OPC som forkortelse for Open Platform Communications, og definerer ikke blot data adgang (OPC DA), men historisk data adgang (OPC HDA) og dataudveksling (OPC DE). **OPC serveren** er softwareprogrammet, der skaber en virksom grænseflade mellem forskellige applikationer (API Application Programming Interface). En OPC server afventer forespørgsler fra sine klienter og henter de efterspurgte data til klienten. OPC softwaren konverterer data fra datakilden til OPC protokollen. Klienten kan være et SCADA-program, med behov for forbindelse til CTS-undercentraler, IBI-anlæg eller blot sensorer og for-brugsmålere. Klienten bestemmer hvornår og hvilke data OPC serveren skal hente, og hvilke kommandoer, der skal sendes til den pågældende datakilde, f.eks. en controller. I OPC kan klienten 'abonnere' på data, som serveren skal sende, hvis de ændrer sig. Applikationer, f.eks. historik-, regneark- og tidsserieapplikationer, som er OPC kompatible kan oprette forbindelse til OPC-serveren og benytte denne til at læse og skrive data på den aktuelle enhed, f.eks. en IBI-controller.



Figur 7-11 'OPC klient, åben software interface standard og OPC server';
Kilde: www.opc.foundation.org

BACnet og OPC er to teknologier. Mens BACnet er designet til integration af bygningsautomatik-udstyr, er OPC designet for dataoverførsel mellem alle typer udstyr og applikationer uden behov for at kende hverken udstyrets- eller applikationens datarepræsentation.

7.6. CTS i relation til indeklima

Strategier, reguleringsløjfer (EiSE)

De traditionelle HVAC styrings- og reguleringsformers brug af kaskade- og seriereguleringsløjfer er beskrevet i appendix C. Her anføres EiSE-styringsstrategiens brug af dynamiske setpunkter.

EiSE - Styringsstrategi med dynamiske setpunkter

Teknologisk Institut har pba. resultaterne fra en række forskningsprojekter under Dansk Energis ELFORSK program udarbejdet en styringsstrategi, markedsført under navnet EiSE 'Energi og indeklimatestrategi uden energifråds'. Strategien tager udgangspunkt i en effektiv udnyttelse af data fra en bygnings BMS-system. Nedenfor anføres de betragtninger som EiSE benytter for at tilvejebringe et godt indeklimatest med lavt energiforbrug. EiSE-strategiskemaer, som danner grundlag for CTS-justeringer er gengivet i appendix D.

EiSE-funktionen $E(x)$ – Driftsoptimering

Et nøglepunkt i EiSE-strategien er at sikre at et anlæg ikke går uhensigtsmæssigt i gang, medmindre et vist antal målepunkter beder om energi. Det er ineffektivt at starte for tidligt. Der vil altid være rørtab og andre driftstab, men i EiSE-strategien søges dette tab fordelt over flest mulige lokaler, så tabet pr. bruger ved at opretholde brugernes tilfredshed med indeklimaet, bliver så lille som muligt.

$E(x)$ funktionen opgør, hvor mange procent af målepunkternes temperaturer, som afviger fra setpunktet x . Funktionen bruges til at starte og stoppe anlægsdriften, samt regulere flow og temperaturer. Der er to $E(x)$ funktioner. En opgør antal målepunkter, som er under det aktuelle varme setpunkt. Den anden opgør antal målepunkter der er over det aktuelle køle setpunkt.

F.eks. betyder E(23), at CTS-anlægget opgør hvor mange procent af målepunkterne, som er over 23 °C (om morgenen er køle setpunktet ofte 23 °C). I kølestrategien er det valgt, at når f.eks. 15 % af lokalerne er over køle setpunktet, så aktiveres køleanlægget. Det pågældende anlæg stoppes, når mindre end 5% af lokalerne er over køle setpunktet.

E(x), varmekurven og cirkulationspumpen

Varmekurven styrer fremløbstemperaturen til radiatorerne. Hvis få målepunkter har et varme-behov parallelforskydes varmekurven, og omvendt. Hvis der ikke er et varmebehov stoppes cirkulationspumpen. Pumpen startes igen når f.eks. 15 % af lokalerne er under varme setpunktet. E(x) sænker således tomgangstabet i cirkulationsrør gennemregulering.

E(x) og køling

Ventilatorerne kører og forceres, hvis mere end 15 % af lokalerne har en temperatur over køle setpunktet. Når tallet er mindre end 5 % slukkes ventilationen. Hvis der ikke er et kølebehov i arbejdstiden kører ventilationen på lav ydelse.

Køleanlæg igangsættes også med E(x) funktionen. Hvis f.eks. 15 % af lokalerne har et kølebehov frigives den indirekte køling, og der cirkuleres køligt vand rundt i rørene. Mekanisk køl aktiveres, når udetemperaturen er over setpunktet, som f.eks. er 16 °C indenfor normal arbejdstid, og f.eks. 20 °C udenfor arbejdstiden.

Kølevandets temperatur til indirekte køling reguleres gennem E(x) funktionen, jo færre lokaler med kølebehov, jo højere bliver kølevandets temperatur. Når køle setpunktet stiger om eftermiddagen, vil det yderligere sænke ydelsen på det mekaniske ventilationsanlæg. Kølingen udskydes så vidt muligt til et tidspunkt, hvor frikøl er muligt. I praksis sker dette ved at køle setpunktet sænkes igen om natten.

Kølefladerne i ventilationsanlægget aktiveres, når mange lokaler har et kølebehov, f.eks. mere end 70 % og lukkes, når tallet igen kommer under 50 % (der anvendes kun mekanisk køl til disse køleflader). Der er ofte en styring på aktiveringen af køleventilen, f.eks. ved en udetemperatur over 20 °C. Ventilen lukkes igen, hvis udetemperaturen kommer under f.eks. 19 °C.

Andre indeklime og energitiltag

EiSE-strategien har desuden fokus på:

- Solafskærmning
- Driftsoptimering i hverdagen
- Standby-forbrug
- Termoaktive konstruktioner

7.7. Nøgletal, Funktionsafprøvning og Performance test

BMS-systemer kan logge et utal af sammenhænge. Jo flere følere, jo flere registreringer kan logges og tidsserie genereres. Det termiske og atmosfæriske indeklima kan registreres på rumniveau ved logning af CO₂-niveau og temperatur over dagen, og forløbet sammenholdes med såvel tilstedeværelse registreret af belysningscontroller som udetemperatur og solindfald registreret af vejrstationen på bygningens tag. Skal registreringer sammenholdes med energiforbrug på rumniveau kræves installation af bi-målere på rumniveau. Anlægsomkostningerne ved etablering af et BMS anlæg er nær proportionale med antal følere, antal aktuatorer og antal energimålere. Antal følere, aktuatorer og målere bør derfor reduceres til det nødvendige for at sikre bygningens optimale drift.

Da energirigtig drift med det rette indeklima aldrig vil nås, hvis bygningens ventilationsanlæg ikke er udført som projekteret og indkørt korrekt, vælges i det følgende, at illustrere hvordan bygningens BMS kan udnyttes til funktionsafprøvning og test af performance ved idriftsættelse. Et område som bygningsstyrelsen og byggereglementet har rettet fokus på siden 2015. For uddybning henvises til publikationen²: 'Best Practice, Ventilation, Syddansk Universitet i Odense, Bygning 44'.

BR15 krav om funktionsafprøvning

Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen indførte pr. 1. juli 2017 krav om funktionsafprøvning af tekniske anlæg i byggereglementet³. Om baggrunden for kravet anfører styrelsen 'nybyggeri og større renoveringer ofte bliver afleveret med alvorlige fejl i de tekniske installationer. Dette kan føre til forringet indeklima og et energiforbrug, der ligger væsentlig højere end forventet. Funktionsafprøvningen skal eftervise, om de antagelser, der blev anvendt ved projekteringen af byggeriet og er anvendt i byggeansøgningen som grundlag for byggetilladelsen, er overholdt'. Dokumentation for resultatet af funktionsafprøvningen skal indsendes til kommunen, og opfyldelse af kravene er en forudsætning for, at bygningen må tages i brug. Det anføres, at følges Bygningsstyrelsens performancetest angående tekniske anlæg, vil byggereglementet normalt også være overholdt.

Performance test - Dokumenteret med BMS

Med performance test menes 'en testbaseret eftervisning af at udbudskrav er opfyldt, og hvis vilkår og metoder fremgår af udbudsmaterialet'. En forudsætning for at udføre performance test, dokumenteret med BMS, er at de følere, der logges på stemmer overens med de placeringer der skal benyttes i beregning af virkningsgrader, og om registreringerne har tilstrækkelig præcision. Dette skal verificeres.

² <https://www.bygst.dk/godt-byggeri/performancetest/best-practice/>

³ Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen - Notat 'Vejledning om funktionsafprøvning', 23. juni 2017

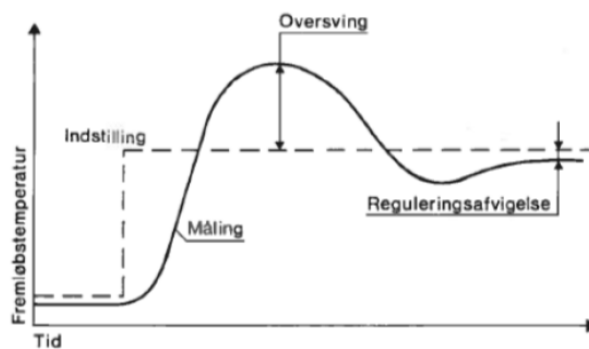
I performance tests eftervises:

- Funktionalitet i styrings- og reguleringsystemer
- Virkningsgrader i installationer

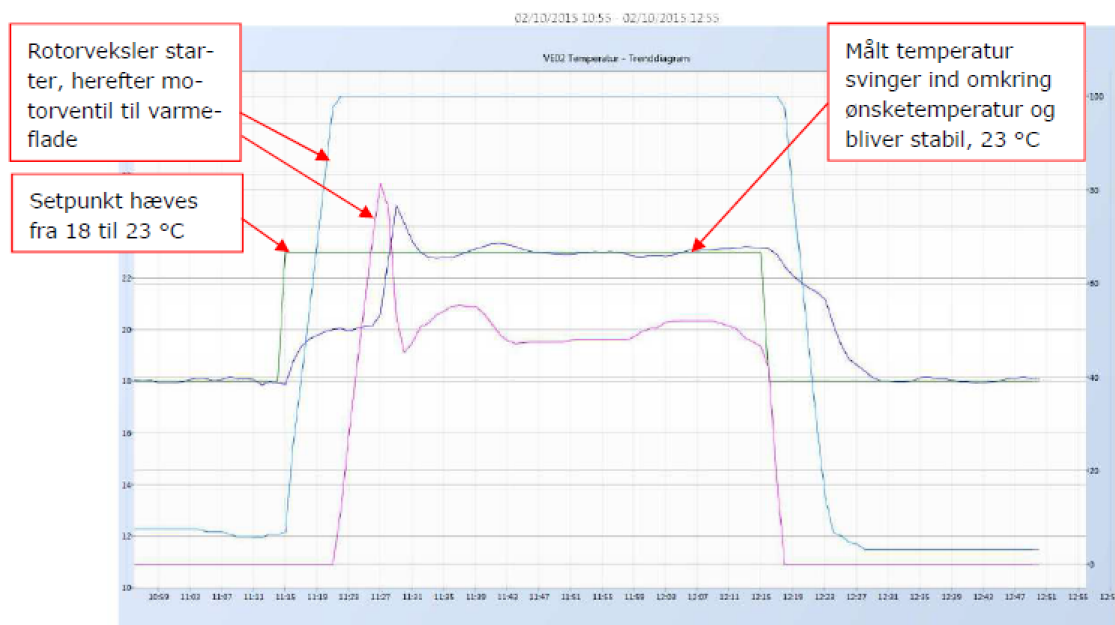
hvor funktionalitet testes uafhængigt af brugeradfærd på tværs af grænseflader, og virkningsgrader testes fagopdelt uafhængigt af brugeradfærd.

Funktionalitet

Acceptkriteriet for en regulerings funktionalitet er en eftervisning af regulerings stabilitet ved setpunktsændringer. Er proportional- og integraled indstillet korrekt? Reguleres opvarmning og køling i serie? Imødegår reguleringen store belastningsændringer ved brug af kaskade?

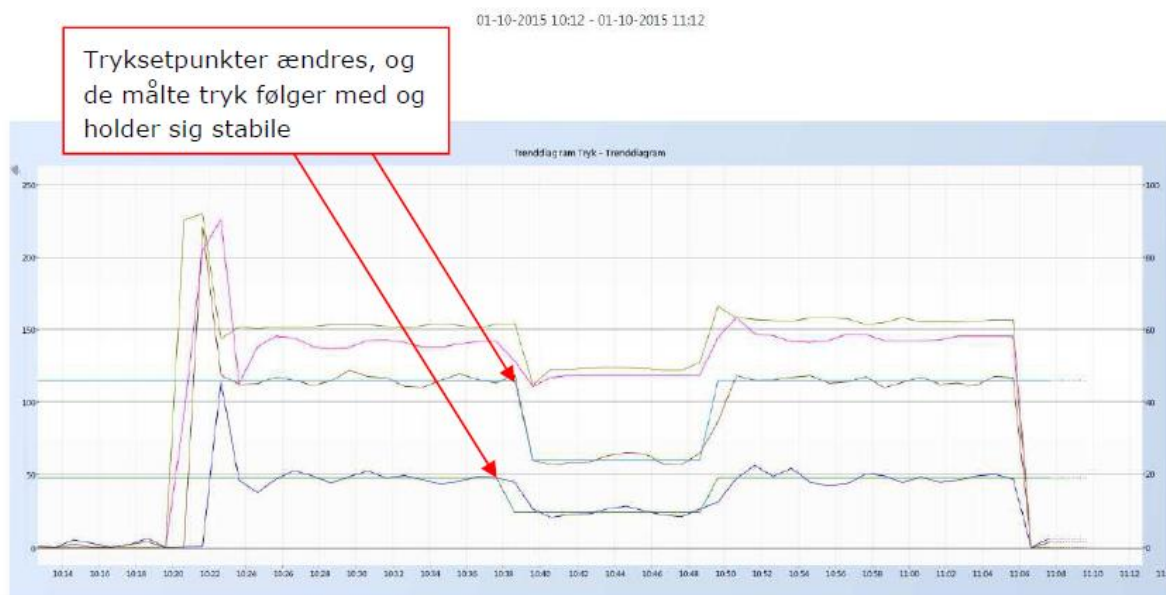


Figur 7-12 Reguleringsevne - 'Setpunkts-ændring - Oversving og reguleringsafvigelse'

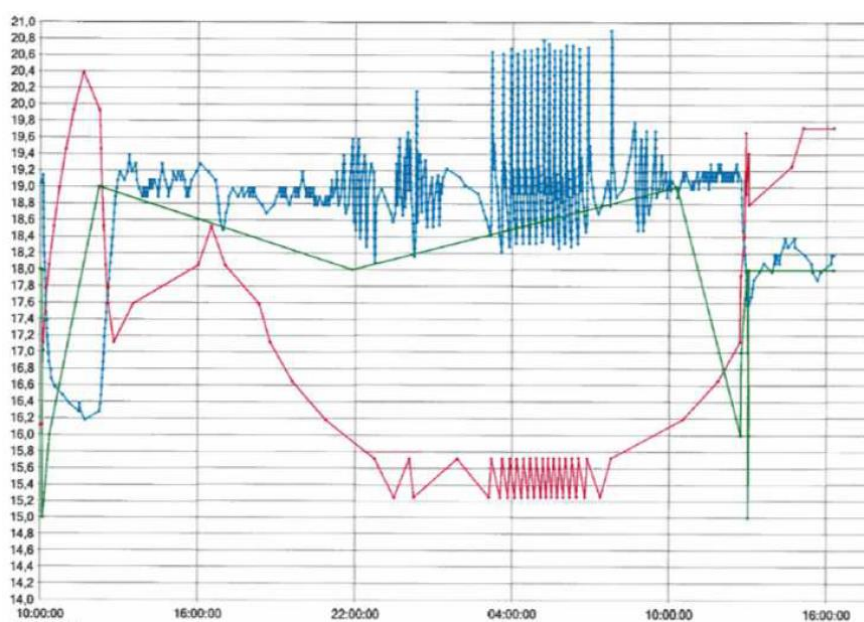


Figur 7-13 Eks. 'Setpunktsændring af temperatur - Reguleringsevne accepteret';

Kilde: Bygningsstyrelsen, <https://www.bygst.dk/godt-byggeri/performance-test/best-practice/>



Figur 7-14 Eks.: 'Setpunktsændring for tryk i hovedkanal - Reguleringsevne accepteret';
 Kilde: Bygningsstyrelsen, <https://www.bygst.dk/godt-byggeri/performancecest/best-practice/>



Figur 7-15 Eks.: 'Setpunktsændring af temperatur - Pendling - Reguleringsevne ikke accepteret';
 Kilde: Bygningsstyrelsen, [https://www.bygst.dk/performance test før aflevering/](https://www.bygst.dk/performance%20test%20f%C3%B8r%20aflevering/)

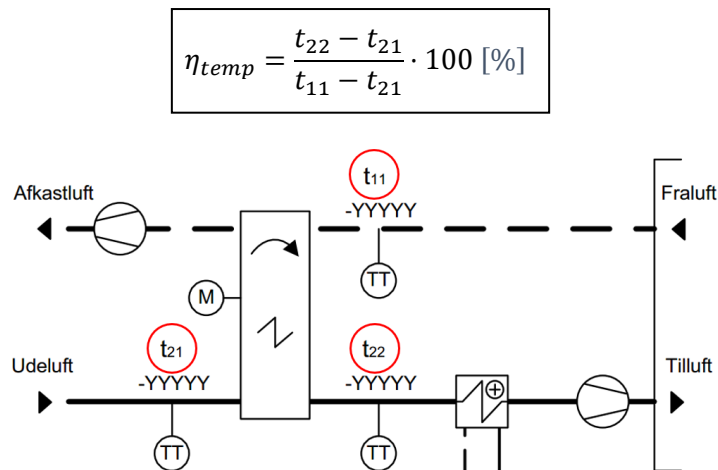
Virkningsgrader

Acceptkriteriet for virkningsgrader er en eftervisning af, at systemet opfylder virkningsgrader angivet i udbudsgrundlaget, ofte anført ved henvisning til byggereglement og gældende standarder:

- Ventilationssystem: Temperaturvirkningsgrad η_t og SEL-værdi
- Kølesystem: System COP
- Varmt brugsvand: System COP
- Klimaskærm: Infiltration (tæthed, linjetab, kuldebroer)

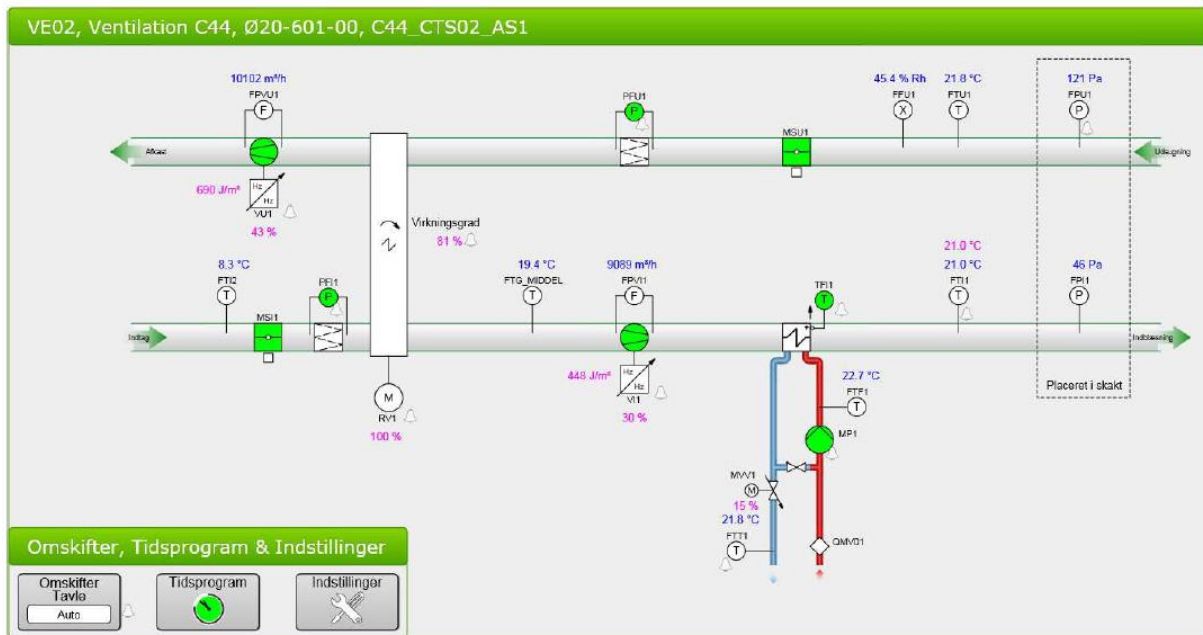
Nedenfor gives eksempler på virkningsgrader beregnet af bygningens BMS iht. bygningsstyrelsens performance testparadigme. Eksemplerne er fra bygningsstyrelsen publikation 'Best practice, Ventilation, Syddansk Universitet i Odense, Bygning 44', hvor performance testparadigmet blev implementeret i byggeprocessen, og indgik i den juridiske aflevering d. 30. oktober 2015.

Bygning 44 er opdelt i 4 kvadranter, hver med næsten samme kanalføring og ventilationsaggregater. Bygningens rum ventileres ved opblandingsventilation. Indblæsning sker gennem armaturer med VAV-spjæld monteret i nedhængte lofter, og udsugning gennem sugeplader i nedhængte lofter. Luftmængderne reguleres trinløst og behovsstyret med IBI-rumcontrollere pba. CO₂- og temperaturfølere. IBI-controllerne er KNX-baseret og regulerer samtidig lys- og jalousier hørende til rummet. Lyset via en KNX-DALI gateway. Bygningens ventilationsanlæg har varmegenvinding med rotorvekslere og hastighedsregulering af ventilatormotorer for konstanttryksregulering.



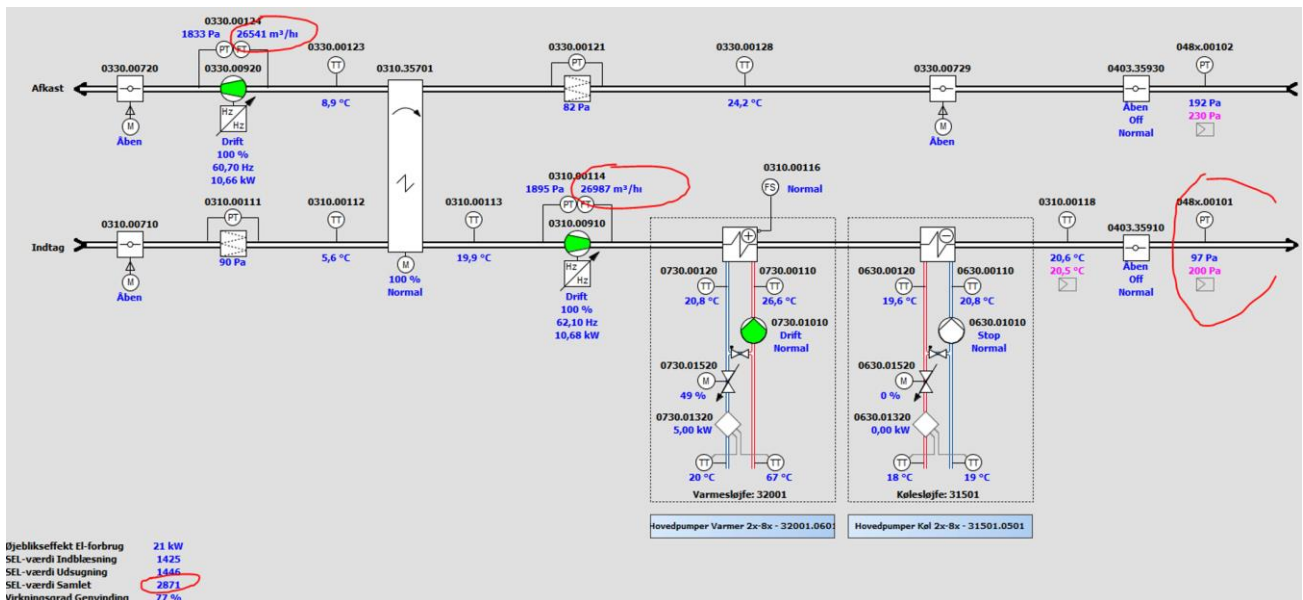
Figur 7-16 'Målepunkter v. bestemmelse af rotorvekslers temperaturvirkningsgrad';
Kilde: Bygningsstyrelsen, <https://www.bygst.dk/godt-byggeri/performancectest/best-practice/>

$$\eta_{temp} = \frac{t_{22} - t_{21}}{t_{11} - t_{21}} \cdot 100 = \frac{19,4 - 8,3}{21,8 - 8,3} = 82\%$$



Figur 7-17 Performance test 'Temperaturvirkningsgrad rotorveksler' - SDU Bygn. 44;
 Kilde: Bygningsstyrelsen, <https://www.bygst.dk/godt-byggeri/performancectest/best-practice/>

$$SEL = \frac{P_{optagen}}{q_v} = \frac{P_{ind} + P_{ud}}{q_v} \left[\frac{kJ}{m^3} \right] \quad q_v = k_v \cdot \sqrt{\Delta p} \left[\frac{m^3}{h} \right]$$



Figur 7-18 Performance test 'SEL-værdi - Installation ikke accepteret SEL-værdi for høj';
 Kilde: Bygningsstyrelsen, Performancetest nr. 4.A. Kontrol af SEL-værdi via BMS brugerflade

$$COP = \frac{P_{køling}}{P_{tilført}} = \frac{Q \cdot \rho \cdot (t_{retur} - t_{frem})}{E_{tilført}}$$

COP_{\emptyset} øjebliksværdi Metode for måling med BMS	COP_{m} iddelværdi Metode for måling med BMS
<p>Køleeffekt målt af energimåler, som registrerer:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Akkumuleret volumenstrøm Q • Kølemidlets returtemperatur • Kølemidlets fremløbstemperatur <p>Tilført elektriske effekt til kompressor og tilhørende pumper registreret af bimåler.</p> <p>Alle måleres øjebliksværdier 'aflæses' samtidigt og logges hvert 5. min. Herefter beregnes og logges System COP faktorens øjebliksværdi af BMS</p>	<p>Køleeffekt målt af energimåler, som registrerer:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Akkumuleret volumenstrøm Q • Kølemidlets returtemperatur • Kølemidlets fremløbstemperatur <p>Tilført elektriske effekt til kompressor og tilhørende pumper registreret af bimåler.</p> <p>Alle øjebliksværdier 'aflæses' samtidigt og logges af BMS hver 2. time. Herefter beregnes og logges System COP faktorens middelværdi for denne periode af BMS</p>

Figur 7-19 Performance test 'System COP for køleanlæg beregnet af BMS'; Kilde: Bygningsstyrelsen, Performancetest nr. 4.A. Kontrol af SEL-værdi via BMS brugerflade

Bygningsstyrelsen, Danmarks største bygherre med en ejendomsportefølge i 2015 på 4,2 mill. m² og 300 igangværende projekter med en samlet værdi af Kr. 14 mia., har for at sikre, at byggeprojekter falder ud som projekteret og eventuelle skjulte fejl- og mangler opdages hurtigst muligt efter AB92/ABT93-aflevering, sammenstillet en række 'Performance Test' det pålægges entreprenører af tekniske installationer at udføre undervejs i byggeprocessen⁴. I alt 5 Milepæle indlægges i byggeperioden. Ved hver milepæl skal entreprenørerne overfor bygherrers fagtilsyn eftervisse og dokumentere, at leverede og monterede anlæg, på rette tidspunkt, dvs. tidspunktet for de respektive milepæle, opfylder nøjere specificerede krav. For ventilationsanlæg standard-erne DS447, DS/EN 12599, DS/EN 14134 og for varme- og køleanlæg DS 469 og DS 447.

Når AB92 aflevering er foretaget, dvs. når mangleregistrering og mangelfhjælpning er gennemført, udføres en sidste performance test 'Prøvedrift'. Under prøvedrift skal de tekniske anlæg arbejde belastet, og det skal konstateres om anlæggene regulerer korrekt, enkeltvis og i samspil.

Prøvedriften skal foregå over 6 uger, hvor bygningens anlæg overvåges og driften dokumenteres ved BMS-CTS-IBI-logninger. Prøvedriften omfatter sekvenser af setpunktsændringer samt nat- og weekenddrift. I hele 6 ugers perioden kontrolleres anlæggenes reguleringsevne ved daglige tjekrutiner, hvor alarmer, setpunkter, målepunktværdier, lograpporter og vejrrapporter skal gennemgås. Alle observationer skal dokumenteres, dels ved logninger, dels ved eventuelle afvigerapporter, og observationerne skal sammenholdes med bygningens aktuelle belastning.

⁴ <https://www.bygst.dk/godt-byggeri/performancetest/>

Inden AB92 aflevering udføres således en række performance tests, som skal sikre:

- at bygningens installationer har de krævede funktioner
- at bygningens installationer har de krævede kapaciteter
- at bygningens installationer kan regulere på tværs af grænseflader
- at bygningens BMS understøtter ønskede logninger

Nedenfor er milepæle, test og metode samt acceptkriterier søgt sammenstillet i oversigtsform.

Tabel 7-1 Oversigt 'Bygningsstyrelsens Performance Test dokumenteret med BMS'

Milepæl		Test & Metode	Acceptkriterium
1.A	Transformer og tavle sat under spænding		
1.B	Fordelingstavler sat under spænding		
1.C	Varme, køl og vandforsyning etableret		Afregningsmålere aktive
2.A	BMS tavler og netværk sat under spænding		
2.B	Netværk aktivt		PING test (forbindelser)
2.C	BMS brugerflade aktiv	Stikprøver: Påvirkn. af følere -> BMS signal Overstyring fra BMS mulig Stikprøver ses på logning	Sammenhæng mellem stikprøver og logninger
2.D	Sammenhæng mellem BMS anlægsbilleder, PI-diagrammer og punkt-afprøvning	BMS entreprenør har udført egenkontrol og PI-diagrammer er 'as build'. Gennemgang af entreprenør SKS	Overensstemmelse ml. stikprøver og entreprenørens dok. for systematiske pkt.afprøvninger
2.E	HVAC installationer trykprøvede, rengjorte, udluftede og tæthedsprøvede	Fagtilsyn skal have godkendt entreprenørens SKS. Entreprenørens dok. af egenkontrol gennemgås og stikprøver udføres	Overensstemmelse ml. stikprøver og entreprenørens dok. for systematiske pkt.afprøvninger
2.F	Installationer mekanisk og elektrisk komplet	Alle komp./anlæg monteret Alle tavler mont. og under spænd. Alle eltilsl. afsl. og spændingssat Alle CTS kabler mont. på komp. Alle netværkskabl. konnekteret Kabelmærkning afsluttet Rørmærkning afsluttet Rørsyst. påfyldt, udluft., trykpr. Føringsveje er lukkede v. vægge Alle huller i facade er lukkede Alle HMI (interfaces) aktive	Der skal være gennemført mangelgennemgang og evt mangler iht definition af mekanisk komplet skal være afhjulpet
3	Brand, proces og stand-alone installationer	CTS-skærmpoint	Iht. kravspecifikationer
4.A	Reguleringsevne Ventilationsanlæg	Stabile reguleringsfunktioner kontrolleret via BMS brugerflade: - Luftmængder - Indblæsningstemperaturer - Trykstyringer	- Hurtig indsvingning efter opstart - Hurtig indsvingning efter setpkt.ændr. (↑↓) - Ingen pendling - Ingen varige afvigelser (udbudsmatr. gældende)
4.B	Reguleringsevne Varme og Køleanlæg	Stabile reguleringsfunktioner (Kontrolleret via BMS brugerflade)	- Rimelig hurtig indsvingning efter opstart - Hurtig indsvingning efter setpkt.ændr. (↑↓) - Ingen pendling - Ingen varige afvigelser (udbudsmatr. gældende)

4.A	Systemvirkningsgrader SEL-værdi Ventilationsanlæg	<p>Usynlig fejl- og mangler i kanalsystemer.</p> <p>Verifikation af energiforbrug.</p> <p>Følgende skal være sikret inden test:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tæthedsprøvning, jf. DS447-6 - Luftmgd. indreguleret til nominel - Kanaler rengjorte - Filtre monteret - Lufthastighedsfølere udført iht DS447-6 - Indstilling af reguleringsspjæld er korrekt, og luftmgd. er svarer til frekvensomformerindstillinger <p>Målepunkter for eftervisning af SEL-faktor:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Luftflow opgjort o. indløbsringe - El-effekt v. bi-måler for anlæg <p>Supplerende målinger:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Luftflow v. trådanemometer -El-effekt v. udlæsn.frekv.omf. <p>Målemetode for luftflow: Diff.tryk ml. trykstuds på indløb og referencetryk før ventilator og k-faktor specifik for ventilatortype</p>	<p>SEL-værdi ved 100% luft-mængde indenfor +5% af udbudskrav.</p> <p>Målinger skal være logget over 15min for hver driftsscenario: 100%, 80% og 60% luftmgd.</p> <p>(Årsager til afvigelser: Fejl i projektering af trykforhold, eller i udførelse af kanalsyst., inkl. komp. Fejl i forudsætninger for dim. af aggregater Fejl i forb. m. indregul. Fejl i målemetode Fejl i produkter)</p>
4.B	Systemvirkningsgrader Temperaturvirkningsgrader Ventilationsanlæg	<p>Følgende, jf. 4.A skal være sikret inden test.</p> <p>Alle dele af anlægget skal være fuldt færdige, inkl. automatik-funktioner for aggregat og eksterne komp., såsom VAV.</p> $\eta_t = \frac{t_{22} - t_{21}}{t_{11} - t_{21}}, \text{ jf. DS447-6}$	
5.	Performancetest. Prøvedrift	<p>AB92/ABT93-aflevering gennemført.</p> <p>Mangelregistrering mht basis-beskrivelse samt afhjælpning gennemført.</p> <p>Prøvekørsler skal have vist, at krævede funktioner, kapaciteter og reguleringer fungerer på tværs af grænseflader, herunder at CTS kan fremvise nødvendige logninger.</p>	<p>Konstateres fejl på installationer, herunder indreguleringer, er entreprenøren forpligtet til afhjælpning indenfor 10 dage.</p> <p>Konstateres kritiske fejl, f.eks. funktionssvigt af ventilations-, varme- og køleanlæg afbrydes testen.</p>

7.8. BMS som energiledelsesværktøj

Energiledelse iht. ISO 50001

Fokuspunkterne i ISO 50001 er:

- Målsætning
- Organisering
- Kortlægning
- Identifikation
- Handlungsplan
- Baseline
- Nøgletalsstyring
- Ledelsens evaluering

Basis i energiledelsesarbejde er indsamling og vurdering af bygningens overordnede energidata. Arbejdet med kortlægning af forbrugere og identifikation af forbrug kan umiddelbart tage udgangspunkt de anlæg, som styres og reguleres af bygningens BMS. Logges hvert anlægs øjeblikke- og akkumulerede forbrug kan specifikke forbrug identificeres, og overordnede nøgletal beregnes.

Eksempel på logning af specifikke forbrug og præsentation af operationelle nøgletal med BMS:

- Belysning
 - Logning af bygningens samlede el-forbrug til belysning
 - Sammenstilling af forbrug til belysning med registreret tilstedeværelse
 - Sammenstilling af forbrug til belysning med årstid
 - Beregning af forbrug til konstant belysning og stand-by forbrug
 - Udvikling i forbrug
- Ventilationsanlæg
 - Logninger af øjebliksværdier for el-forbrug til ventilationsmotorer, cirkulerede luftmængder og tilstedeværelse samt forbrug af varme og køl
 - Logning af døgn-, uge- og månedsforbrug af el-, varme- og køl
 - Logning af akkumuleret forbrug af el- varme- og køl
 - Beregning af SEL-værdier, øjeblikke- døgnmiddel- og akkumuleret, for hvert anlæg
 - Sammenstilling af SEL-værdi med registreret tilstedeværelse
 - Beregning og logning af øjeblikke- og akkumulerede temperaturvirkningsgrader på varmegenvindingsaggregater
 - Sammenstilling med udetemperatur og varmekonsum varmeblæse
 - Sammenstilling med udetemperatur og kølforbrug køleblæse
 - Udvikling i forbrug

- Køleanlæg
 - Logning af energimålere og beregning af system COP-øjeblikks-, døgnmiddel- og akkumuleret værdi
 - Sammenstilling med logget tilstedeværelse og udetemperatur
 - Udvikling i forbrug

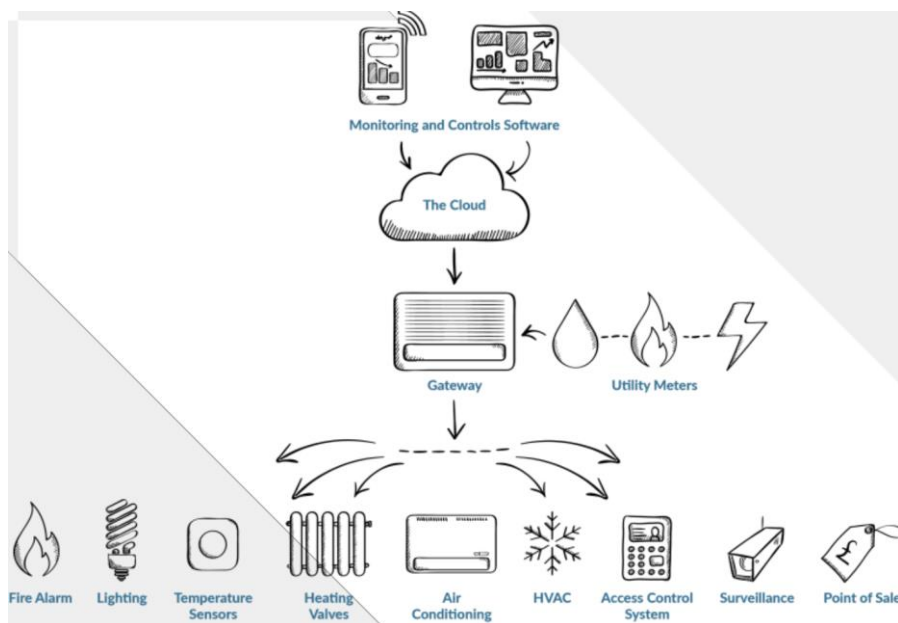
7.9. Trends

Udviklingen indenfor bygningsautomation går i flere retninger. De tre store leverandører af CTS-udstyr Siemens, Schneider og Honeywell, udvikler til stadighed nye produkter, der skal skabe øget funktionalitet, og udvikler SCADA-systemer, der automatisk up-loader energi- og driftsdata til 'skyen', så bygningens drift kan analyseres og optimeres af specialiserede serviceorganisationer. Produkterne understøttes af en række systemhuse, der designer og installerer løsninger og kan trække på systemleverandørernes eksperter. På samme tid ses kommuner og institutioner, der i stigende grad formulerer CTS-strategier, der dels skal sikre at CTS-løsninger fungerer efter hensigten, når de er leveret, dels imødegår uhensigtsmæssig leverandørafhængighed, når CTS-installationer skal vedligeholdes og evt. udbygges senere.

Two trends, som sigter mod øget funktionalitet og øget leverandøruafhængighed, er udviklingen af åben platform kommunikation OPC UA og brug af en standard PLC med applikationssoftware som CTS-undercentral for HVAC. Her er valgt, at give en kort introduktion til åben platform kommunikation OPC UA, som er grundlaget for IoT (Internet of Things) filosofien, samt et eksempel på brug af en standard PLC, som CTS-undercentral for HVAC-anlæg.

OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture)

Ønsker om serviceorienteret åben platform kommunikation, både vertikalt og horisontalt og over 'skyen', mellem alle typer udstyr fra forskellige leverandører, har ført til udvikling af informationsmodellen OPC UA. Modellen er en leverandøruafhængig standard for IoF (Internet of Things), og kan bedst beskrives som en åben 'kommunikationsinfrastruktur', der understøtter kommunikation mellem brugere og alle typer udstyr. Med OPC UC kan leverandører af komponenter og leverandører af protokoller, f.eks. BACnet, definere åbne kommunikationsmodeller, og brugerne definere komplekse relationer og forbindelser til såvel brugerflade som direkte til komponenter. Modellen giver mulighed for at gruppere data efter type, så en gruppe af målepunkter fra forskellige enheder kan aflæses på én forespørgsel.



*Figur 7-20 Illustration: IoT i bygningsautomationskontekst;
Kilde: www.utilitywise.com, ©Copyright Utilitywise 2017 plc*

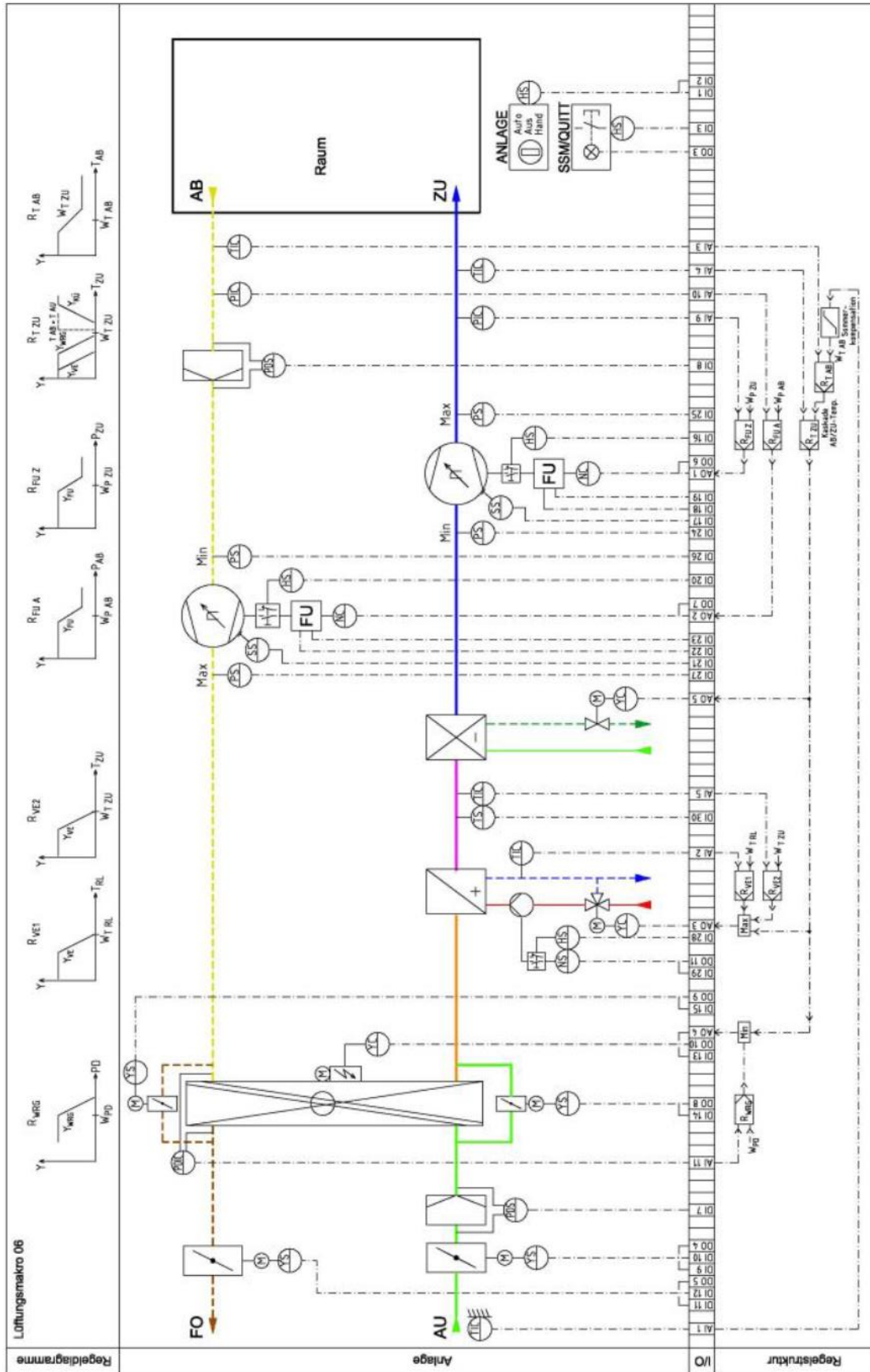
I 2013 nedsatte The OPC foundation og BACnet Interest Group Europe en arbejdsgruppe med formål, at udarbejde en 'ready-to-use mapping', hvor producenter af bygningsudstyr kan gøre data tilgængelig for udviklere af BMS-/SCADA-systemer, uden at data først skal fortolkes og konverteres inden transport fra udstyr til applikation. I 2018 findes 'read-to-use mapping' for dataflow fra BACnet til OPC UA, mens 'ready-to-use mapping' for dataflow fra OPC UA til BACnet stadig er under udvikling. (For uddybning af OPC, OPC server, OPC UA og samarbejdet mellem OPC UA og BACnet Interest Group Europe henvises til: www.opcfoundation.org, www.opcdatahub.com og www.novotek.com)

PLC som CTS-undercentral for HVAC

De tre store leverandører af CTS-undercentraler Honeywell, Schneider og Siemens har fået konkurrence fra PLC leverandører. F.eks. markedfører ABB og WAGO PLC'ere med en række standard applikationer til styring og regulering af forskellige HVAC-anlægstyper. Kommunikationen mellem PLC og anlægssensorer og -aktuatorer foregår via PLC 'de facto standard' protokollen Modbus.

Nedenfor vises et eksempel på hvordan styring og regulering af et HVAC-anlæg med rotorveksler kan konfigureres med brug af en konventionel WAGO PLC. Eksemplet er medtaget for at illustrere hvordan en maskinmester med indsigt i såvel HVAC-anlægsofbygning og drift som regulerings-teori reelt kan konfigurere en HVAC-regulering med en standard PLC og tilhørende applikations-software. Reguleringsmakroen er en ventilationsapplikation 'Cascade control with rotary heat

exchanger and fan with frequency converter' for HVAC-anlæg med rotorveksler, kaskade og serie-reguleringsløjfer for køle- og varmeklader samt frekvensregulering af ind-blæsnings- og udsugningsventilatorer. Dokumentationens omfatter PI-diagram, funktionsbeskrivelse, I/O tabel, funktionsblok beskrivelser og visualiseringssoftware. I den sidste figur vises hvordan én af i alt 6 konfigurationer skal foretages. Konfigurering af første 'temperatur control' foregår ved indlægning af temperaturgrænser, forstærkning, integral- og dødtid i kaskade, sekvensstyring af køling, genvinding og opvarmning samt frostsikring. I anden 'temperatur control' konfigureres temperaturalarmer.



Figur 7-21 PI-diagram - Ventilations macro-06 WAGO PLC

Art.-No.	Channel	Description	Signal	Address
750-430	DI 1	Manual operation	24 VDC	%IX12.0
	DI 2	Automatic operation		%IX12.1
	DI 3	Acknowledgement		%IX12.2
	DI 4	Supply voltage		%IX12.3
	DI 5	Emergency stop switch		%IX12.4
	DI 6	Fire detector		%IX12.5
	DI 7	Differential pressure monitor, outside air filter		%IX12.6
	DI 8	Differential pressure monitor, exhaust filter		%IX12.7
750-430	DI 9	Limit switch, supply air damper open	24 VDC	%IX12.8
	DI 10	Limit switch, supply air damper closed		%IX12.9
	DI 11	Limit switch, exhaust air damper open		%IX12.10
	DI 12	Limit switch, exhaust air damper closed		%IX12.11
	DI 13	Fault rotary heat exchanger		%IX12.12
	DI 14	Limit switch, outside air bypass closed		%IX12.13
	DI 15	Limit switch, exhaust air bypass closed		%IX12.14
	DI 16	Repair switch, supply air fan		%IX12.15
750-430	DI 17	Run monitoring, supply air fan	24 VDC	%IX13.0
	DI 18	Status, supply air fan frequency converter		%IX13.1
	DI 19	Fault, supply air fan frequency converter		%IX13.2
	DI 20	Repair switch, exhaust air fan		%IX13.3
	DI 21	Run monitoring, exhaust air fan		%IX13.4
	DI 22	Status, exhaust air fan frequency converter		%IX13.5
	DI 23	Fault, exhaust air fan frequency converter		%IX13.6
	DI 24	Pressure monitor, minimum supply air pressure		%IX13.7
750-430	DI 25	Pressure monitor, maximum supply air pressure	24 VDC	%IX13.8
	DI 26	Pressure monitor, minimum exhaust air pressure		%IX13.9
	DI 27	Pressure monitor, maximum exhaust air pressure		%IX13.10
	DI 28	Repair switch, heater pump		%IX13.11
	DI 29	Motor protection, heater pump		%IX13.12
	DI 30	Frost protection monitor		%IX13.13
	DI 31	Reserve		%IX13.14
	DI 32	Reserve		%IX13.15
750-530	DO 1	Indicator light, ready	24 VDC	%QX6.0
	DO 2	Buzzer		%QX6.1
	DO 3	Indicator light, accumulated error		%QX6.2
	DO 4	Outside air damper		%QX6.3
	DO 5	Exhaust air damper		%QX6.4
	DO 6	Supply air fan frequency converter		%QX6.5
	DO 7	Exhaust air fan frequency converter		%QX6.6
	DO 8	Outside air bypass, rotary heat exchanger.		%QX6.7
750-504	DO 9	Exhaust air bypass, rotary heat exchanger	24 VDC	%QX6.8
	DO 10	Enables rotary heat exchanger		%QX6.9
	DO 11	Heating pump		%QX6.10
	DO 12	Cooler pump		%QX6.11
750-463	AI 1	Outside temperature	Pt 1000	%IW0
	AI 2	Return flow temperature, heating element		%IW1
	AI 3	Room exhaust air temperature		%IW2
	AI 4	Supply air temperature		%IW3
750-463	AI 5	Frost protection temperature	PT 1000	%IW4
	AI 6	Reserve		%IW5
	AI 7	Reserve		%IW6
	AI 8	Reserve		%IW7
750-459	AI 9	Air pressure in the supply air duct	0 – 10 V	%IW8
	AI 10	Air pressure in the exhaust air duct		%IW9
	AI 11	Differential pressure sensor, rotary heat exchanger		%IW10
	AI 12	Reserve		%IW11
750-539	AO 1	Set value, supply air fan frequency converter	0 – 10 V	%QW0
	AO 2	Set value, exhaust air fan frequency converter		%QW1
	AO 3	Control valve, heating element		%QW2
	AO 4	Set value, rotary heat exchanger		%QW3
750-530	AO 5	Control valve, cooling element	0 – 10 V	%QW4
	AO 6	Reserve		%QW5

Figur 7-22 Hardware I/O - Ventilations macro-06 WAGO PLC

	Supply temperature	Temperature control	Temperature control	Rotary heat exchanger	Damper and fans	Pumps and valves
1)	Summer compensation			Cooling sequence		
2)	Min. outside temperature	22.0 [°C]		Sequence number	1	19)
3)	Max. outside temperature	32.0 [°C]		X1 sequence	0.0 [%]	20)
4)	Reference room temperature	22.0 [°C]		X2 sequence	30.0 [%]	21)
5)	Cascade controller			Energy recovery sequence		
6)	Kp	2.5		Sequence number	2	22)
7)	Tn	300.0 [s]		X1 sequence	35.0 [%]	23)
8)	Dead zone	0.0 [K]		X2 sequence	55.0 [%]	24)
9)	Offset, min. reference value	4.0 [K]		Heating sequence		
10)	Offset, max. reference value	6.0 [K]		Sequence number	3	25)
11)	Sequence controller			X1 sequence	60.0 [%]	26)
12)	Max. number of sequences	3		X2 sequence	100.0 [%]	27)
13)	Hysteresis for Kp2, Tn2 and Td2	1.0 [%]		Antifreeze controller		
14)	Kp1	2.5		Reference value	10.0 [°C]	28)
15)	Tn1	300.0 [s]		Kp	2.5	29)
16)	Td1	0.0 [s]		Tn	80.0 [s]	30)
17)	Kp2	1.5		Dead zone	0.0 [K]	31)
18)	Tn2	500.0 [s]		Hysteresis	2.0 [K]	32)
	Td2	0.0 [s]				
	Dead zone	0.5 [K]				

Summer compensation

Index	Variable	Comment
1)	¹ .rMinOutsideTemperature	Minimum outside temperature
2)	¹ .rMaxOutsideTemperature	Maximum outside temperature
3)	¹ .rMinReferenceValue	Reference value, room temperature
4)	¹ .rMaxReferenceValue	Maximum reference value for room temperature

Cascade controller

Index	Variable	Comment
5)	² .rKp	Proportional gain (P portion)
6)	² .rTn	Reset time (I term)
7)	² .rDeadZone	Range around the reference value in which the set value is not changed (dead zone)
8)	² .rOffsetMinReferenceValue	Offset for the minimum reference value of the supply air controller as a function of the reference value for room temperature
9)	² .rOffsetMaxReferenceValue	Offset for the maximum reference value of the supply air controller as a function of the reference value for room temperature

Sequence controller

Index	Variable	Comment
10)	³ .bMaxSequenceNumber	Number of sequences used
11)	³ .rDeviation	Maximum reference/actual value deviation for the second set of control parameters
12)	³ .rKp1	Proportional gain (P term) during large reference/actual value deviations
13)	³ .rTn1	Reset time (I term) for large reference/actual value deviations
14)	³ .rTd1	Lead time (D term) for large reference/actual value deviations
15)	³ .rKp2	Proportional gain (P term) during small reference/actual value deviations
16)	³ .rTn2	Reset time (I term) for small reference/actual value deviations
17)	³ .rTd2	Lead time (D term) for small reference/actual value deviations
18)	³ .rDeadZone	Range around the reference value in which the set value is not changed (dead zone)

Sequence "Cooling"

Index	Variable	Comment
19)	⁴ .bSequenceNumber	Sequence numbers in a ventilation system are assigned in series from "cooling" to "heating".
20)	⁴ .rX1	Smallest set value from the sequence controller for the "cooling" sequence
21)	⁴ .rX2	Largest set value from the sequence controller for the "cooling" sequence

Sequence "Energy reclamation"

Index	Variable	Comment
22)	⁵ .bSequenceNumber	Sequence numbers in a ventilation system are assigned in series from "cooling" to "heating".
23)	⁵ .rX1	Smallest set value from the sequence controller for the "energy reclamation" sequence
24)	⁵ .rX2	Largest set value from the sequence controller for the "energy reclamation" sequence

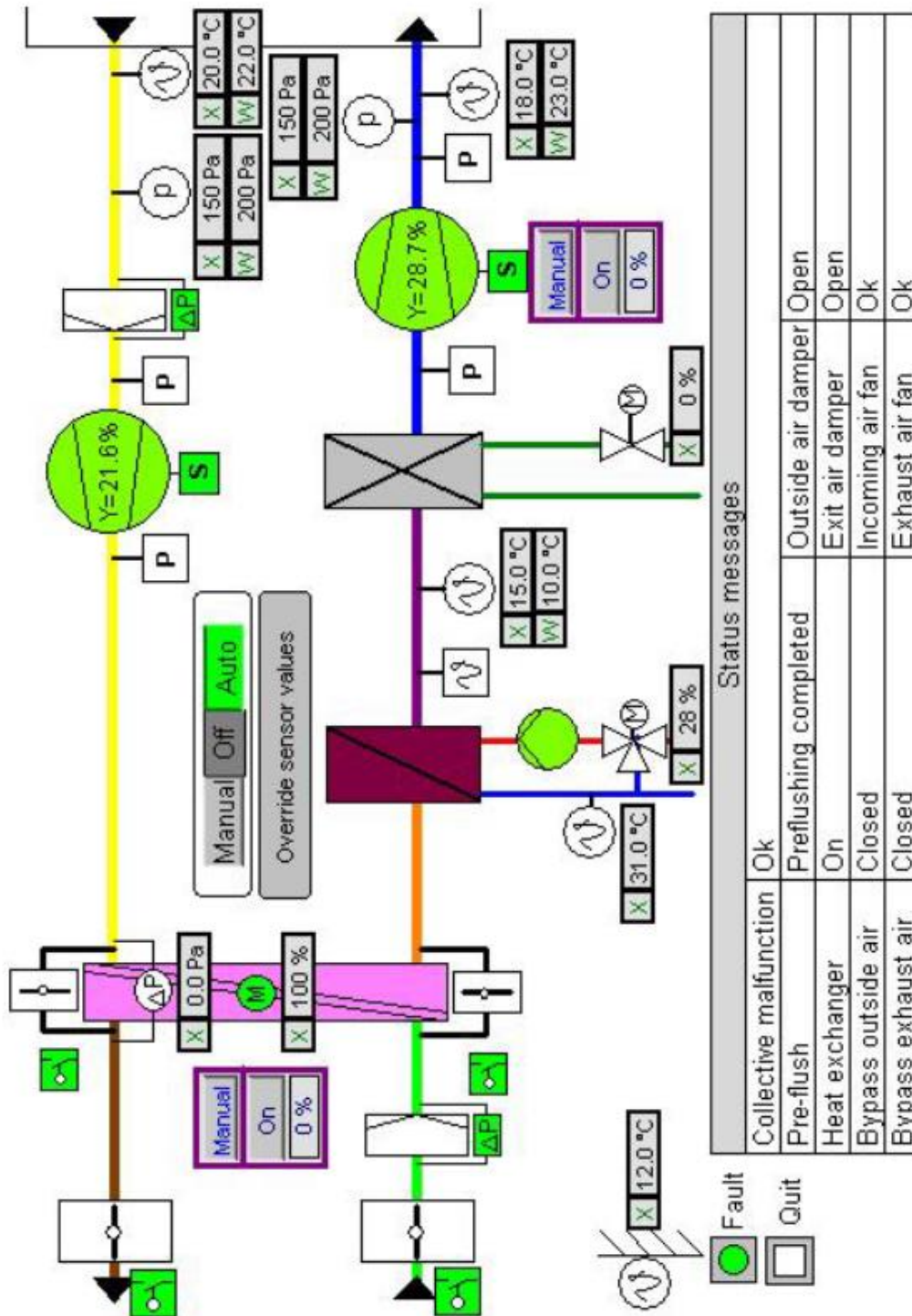
Sequence "Heating"

Index	Variable	Comment
25)	⁶ .bSequenceNumber	Sequence numbers in a ventilation system are assigned in series from "cooling" to "heating".
26)	⁶ .rX1	Smallest set value from the sequence controller for the "heating" sequence
27)	⁶ .rX2	Largest set value from the sequence controller for the "heating" sequence

Antifreeze controller

Index	Variable	Comment
28)	⁷ .rReference.Antifreeze Temperature	Reference value, antifreeze controller
29)	⁸ .rKp	Proportional gain (P portion)
30)	⁸ .rTn	Reset time (I term)
31)	⁸ .rDeadZone	Range around the reference value in which the set value is not changed (dead zone)
32)	⁸ .rHysteresis	Hysteresis for deactivating the controller

Figur 7-23 Konfiguration 'Temperatur kontrol', Ventilations macro-06 WAGO PLC



Figur 7-24 Visualisering, Ventilations macro-06 WAGO PLC

7.10. Litteraturliste

ELFORSK, *EiSE - Energi og indeklima Strategi uden Energifråds*, Dansk Energi

ELFORSK, *Karakterisering og optimeret styring af indeklima og energiforbrug ved hjælp af multiparameter-controllere*, PSO 2007

ELFORSK, *Prædiktiv styring af hybride ventilationsanlæg i kontorbyggeri med glasfacader*, PSO 345-033 Febr. 2016

Foreningen for Energi & Miljø, *Energihåndbogen*, Oktober 2002

Ferreira, A.L. et. Al, *Building automation interoperability - A review*, IWSSIP 2010 - 17th International Conference on Systems, Signals and Image Processing

Heilmann Th., *Praktisk regulering og instrumentering*, Heilmann Forlag, 6. udg. 2009

Hvenegaard Cl. M. & Drivsholm Chr., *Den lille blå om ventilation*, Dansk Energi, 3. udg. 2016

Mike Hawrylo - ISA101, *Human Machine Interfaces, Applying ISA101 Concepts to Existing HMI Applications*; www.scribd.com/document/324641235/ISA

Santos R., Carreira P. - *Service Oriented development of Building Energy Management Systems, An Architecture Blueprint*, Depart. of Computer Science and Eng., Tech. Univ. of Lisbon, Portugal

Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, *Vejledning om funktionsafprøvning*, Notat 23. juni 2017

Supplerende links:

<http://docplayer.dk/16682241-Performance-test-foer-aflevering.html>

<https://new.abb.com/buildings/applications/building-automation-system>

<https://buildingsolutions.honeywell.com/en-US/solutions/hvacbuildingmanagement/>

<https://www.schneider-electric.dk/da/work/products/building-automation-and-control.jsp>

https://www.trendcontrols.com/da-DK/.../TREND%20Lommebog%20A6_2017.pdf

7.11. APPENDIX A (Funktionsbeskrivelse - eksempel fortsat)

Cirkulationspumper

Cirkulationspumpe varmefflade

- Når varmeffladens motorventil er lukket eller når udetemperaturen er over 20°C, stopper cirkulationspumpen med et efterløb, f.eks. 5min.
- Cirkulationspumpen starter ved varmebehov.
- Er udetemperaturen under 3°C, eller detekteres frost, kører cirkulationspumpen konstant.

Alarmer

Frost

- Underskrider temperaturen ved frosttermostat indstillet værdi, afgives alarm med tidsforsinkelse.
- Ved detektering af frost stoppes anlægget, og varmeffladens motorventil åbnes 100%.
- Anlægget genstarter automatisk, når temperaturen ved frosttermostaten igen overskrider den indstillede værdi.

Brand

- Hvis temperaturen ved temperaturføleren placeret i henholdsvis indblæsning- og udsugningskanal overskrider den indstillede værdi, 70°C for indblæsning og 40°C for udsugning, stoppes anlægget og der gives alarm.
- Brandfunktionen SKAL nulstilles manuelt, enten ved nulstilling på CTS-anlægsbrugerfladen, eller ved at dreje betjeningsomskifter i anlægstavle i stilling STOP i 10 sekunder og derefter i AUTO, inden genopstart kan finde sted.
- Inden genstart, SKAL følerens dækningsområde kontrolleres for at afdække årsag til udkobling.

Brand

- Brand detekteres af bygningens ABA-anlæg, som er fortrådet til CTS-anlægget.
- Ved detektering af brand standses ventilationsanlæg.
- Alarm SKAL tilbagestilles ved hjælp af ABA-anlægget, før ventilationsanlæg kan genstartes.
- Inden anlægget genstartes, SKAL følerens dækningsområde kontrolleres for at afdække årsag til udkobling.

Flowvagt

- Tilbage melding om ventilationssvigt sker ved differenstrykstransmitter, som måler differenstryk over ventilator. Der afgives alarm med tidsforsinkelse, hvis der er afvigelse mellem driftskrav og tilbageledning.

Filtervagt

- Hvis differenstrykket over filter i indblæsning- og udsugningskanal overskrider den indstillede værdi i mere end 10 minutter, afgives alarm, som indikerer at det pågældende filter er snavset og skal skiftes.

Alarm cirkulationspumpe

- Tilbage melding om pumpefejl udføres ved fejlsignal fra pumpe. Der afgives alarm med tidsforsinkelse.

Alarm frekvensomformer

- Frekvensomformerens sumalarm overvåges. Detekteres fejl afgives alarm.
- Årsag til fejl aflæses på frekvensomformer.
- Alarm SKAL afstilles lokalt på frekvensomformer.

Alarm roterende veksler

- Rotorvekslerens sumalarm overvåges. Detekteres fejl afgives alarm.
- Årsagen til alarm findes lokalt på vekslerens styreenhed.
- Alarm afstilles lokalt på veksler.

Rumtemperatur

- Rumtemperatur registreres. Der afgives temperaturalarm med tidsforsinkelse, hvis rumtemperaturen over- eller underskrider henholdsvis maksimum eller minimum rumtemperatur.
- Ved stop af anlæg undertrykkes rumtemperaturalarmerne.

Udsugningstemperatur

- Udsugningstemperatur registreres. Der afgives temperaturalarm med tidsforsinkelse, hvis udsugningstemperaturen over- eller underskrider henholdsvis maksimum eller minimum udsugningstemperatur.
- Ved stop af anlæg undertrykkes udsugningstemperaturalarmen.

Indblæsningstemperatur

- Indblæsningstemperatur registreres. Der afgives temperaturalarm med tidsforsinkelse, hvis indblæsningstemperaturen underskrider minimum indblæsningstemperatur.
- Ved stop af anlæg undertrykkes indblæsningstemperaturalarmen.

Fremløbetemperatur

- Fremløbstemperaturen registreres. Der afgives temperaturalarm med tidsforsinkelse, hvis fremløbstemperaturen over- eller underskrider henholdsvis maksimum eller minimum fremløbstemperatur.
- Ved stop af anlæg undertrykkes fremløbstemperaturalarm.

Returtemperatur

- Returtemperaturen registreres. Der afgives temperaturalarm med tidsforsinkelse, hvis returtemperaturen over- eller underskrider henholdsvis maksimum eller minimum returtemperatur.
- Ved stop af anlæg undertrykkes fremløbstemperaturalarm.

7.12. APPENDIX B (Styrings- og reguleringsformer - Én oversigt)

Et komfortventilationsanlæg er projekteret ud fra maksimal personbelastning. Er et lokale ubenyttet, eller ændrer personbelastningen sig, skal anlæggets ydelse kunne tilpasses, hvis driften skal være energirigtig. Regulering af luftmængden kan ske ved On/Off styring eller variabel regulering af volumenstrømmen til rummet.

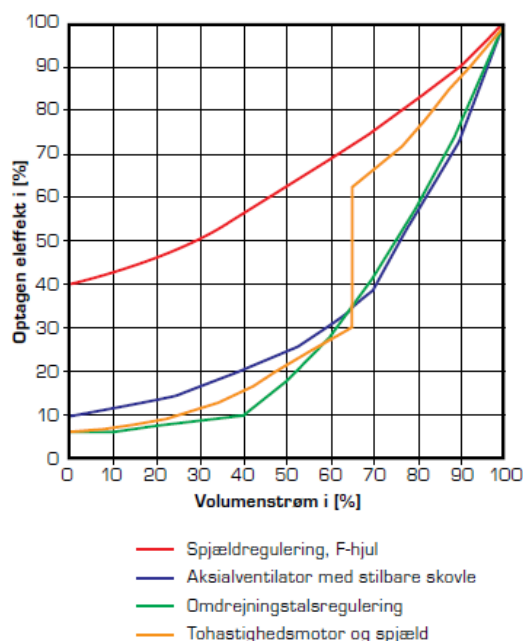
Overordnet kan styrings- og reguleringsformer, der reducerer et komfortanlægs energiforbrug, inddeles i:

- Tidsstyring
- Tilstedeværelsesstyring
- Regulering af rum- eller udsugningstemperatur
- Regulering af CO_2 niveau
- Regulering af luftkvalitet

Den er den simpleste form for luftmængderegulering er On/Off-styring pba. af tilstedeværelsesregistrering. Ved On/Off-styring kan luftmængden reguleres ved start/stop af ventilatorer, eller ved afspærring af luftmængden med spjæld. Afspærres lokaler med spjæld fås størst energibesparelse ved samtidig at nedregulere ventilatorens ydelse.

Variabel regulering af luftmængden (VAV) kan ske ved:

- Spjældregulering
- Brug af flerhastighedsmotorer
- Hastighedsregulering af motorer
- Anvende aksialventilatorer med stilbare skovle



Figur 7-25 Ventilatorforbrug som funktion af volumenstrøm;
Kilde: Den lille blå om ventilation, Dansk Energi, 3. udg. 2016

Spjældregulering

For F-hjul ventilatorer (fremadrettede skovle på cylinderhjul) ændres motorens effektoptag betydeligt, når volumenstrømmen reduceres, idet den totale trykstigning over F-hjuls ventilatoren falder. For B-hjul ventilatorer (bagudrettede vredne skovle på cylinderhjul) er ændres motorens effektoptag mindre. Spjældregulering bør kun anvendes for luftmængder under 10.000m³/h.

Flerhastighedsmotorer

Volumenstrømmen og dermed energiforbruget reduceres ved omkobling af motoren. Velegnet til skift mellem fuld volumensstrøm og 1/2 eller 2/3 volumenstrøm.

Hastighedsregulering

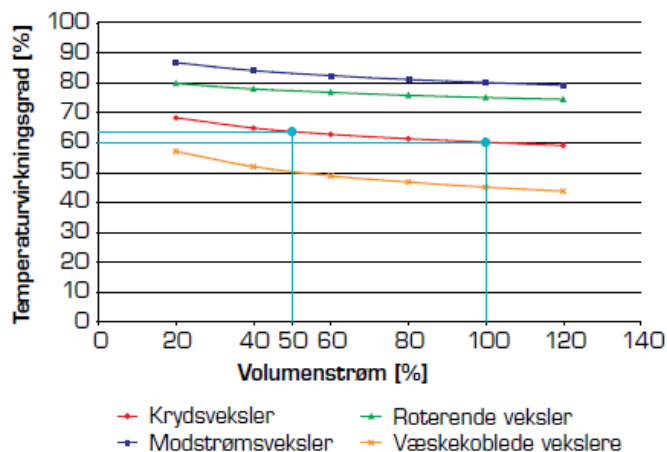
Motorens omdrejningstal reguleres trinløst, og volumenstrømmens tilsvarende trinløst. Den mest energieffektive regulering, hvor varierende volumenstrøm kan anvendes, jf. figur.

Aksialventilatorer med stilbare skovle

Ventilatorens ydelse og effektoptag ændres, når skovvinklen ændres. Ventilatorer med stilbare skovle har høj virkningsgrad over et meget stort reguleringsområde.

Den mest energieffektive regulering opnås ved hastighedsregulering, eller for aksial ventilatorer ved justering af ventilatorens stilbare skovle. To-hastighedsmotorer er velegnede, hvis behovet er to luftmængde niveauer.

Når volumenstrømmene reduceres, så øges temperaturvirkningsgraderne for varmegenvinding.



Figur 7-26 Virkningsgrader for varmegenvindingsaggregater som funktion af volumenstrømmen ($q_{ind} = q_{ud}$);

Kilde: Den lille blå om ventilation, Dansk Energi, 3. udg. 2016

VAV armaturer

Varieres ventilationsanlæggets volumenstrømme skal VAV-armaturerne have variabel indblæsningsspalte for fastholdelse af indblæsningshastigheden. I modsat fald opstår trækgener, som følge af for korte kastelængder ved minimum volumenstrøm.

Regulering af indblæsningstemperatur

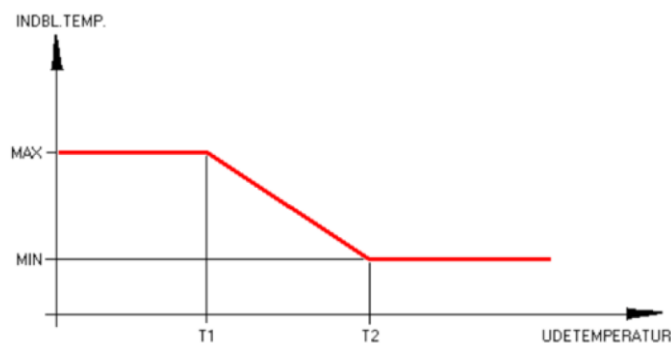
Regulering af indblæsningstemperatur benyttes typisk i ventilationsanlæg, hvor anlæggets funktion udelukkende er at opretholde det atmosfæriske indeklima. Det termiske indeklima opretholdes med radiatoranlæg.

Indblæsningstemperaturen reguleres efter et setpunkt for ønsket indblæsningstemperatur. Temperaturen måles i kanalen efter varmepladen, og varmepladens forsyningsventil lukkes ved stigende indblæsningstemperatur. Setpunktet holdes normalt konstant uanset varmebehovet i rummene. For at reducere energiforbruget bør setpunktet dog varieres efter udetemperaturen, så der indblæses med en lavere temperatur om sommeren, jf. Figur 7-27.

Udekompensering ved regulering af indblæsningstemperatur

Traditionelt søges at holde indblæsningstemperaturen konstant uanset varmebehovet i rummene.

For ventilationsanlæg, hvor en direkte regulering af rumtemperaturen ikke er mulig, kan indblæsnings-temperaturen med fordel kompenseres efter udetemperaturen. Ved lave udetemperaturer indblæses med maksimumtemperatur. Ved stigende udetemperatur indblæses med faldende temperatur indtil en indstillet minimumsværdi.



Figur 7-27 Kompensering af indblæsningstemperatur efter udetemperatur

Regulering af rumtemperaturen

Regulering af rumtemperaturen benyttes typisk i klimaanlæg, hvor anlæggets funktion er at opretholde både det termiske og atmosfæriske indeklima.

Rumtemperaturen reguleres efter et setpunkt for ønsket rumtemperatur.

I CAV anlæg holdes rumtemperaturen som udgangspunkt konstant ved at ændre indblæsningstemperaturen, når rumtemperaturen afviger fra den indstillede værdi. Forholdet mellem ændringen i rumtemperaturen og den tilsvarende indblæsningstemperatur indstilles på regulatoren. For at undgå træk sættes en nedre grænse for indblæsningstemperaturen.

I VAV anlæg holdes rumtemperaturen, som udgangspunkt, konstant ved at ændre volumenstrømmen, når temperaturen afviger fra den indstillede værdi. Indblæsningstemperaturen holdes,

som udgangspunkt konstant. For at reducere energiforbruget til opvarmning og køling kan/bør setpunktet varieres. Højere om sommeren og lavere om vinteren.

Som tommelfingerregel gælder, at for hver 1°C rumtemperaturen sænkes i opvarmningssæsonen, falder energiforbruget 5-8%.

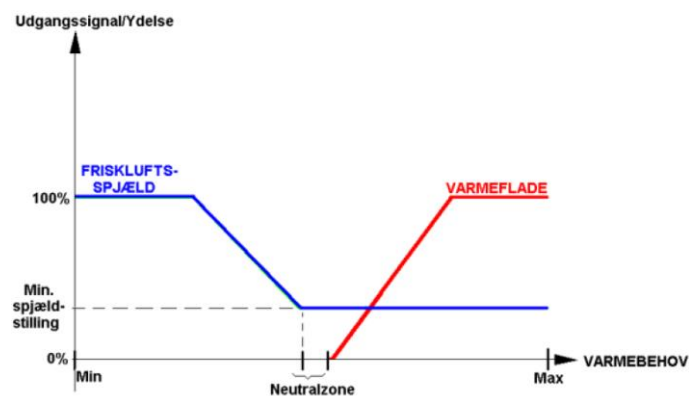
Tilsvarende gælder, at jo højere rumtemperatur der kan accepteres om sommeren, jo mindre bliver energiforbruget til køling.

Udekompensering ved regulering af rumtemperatur

Tilsvarende ventilationsanlæg med regulering af indblæsningstemperaturen, kan ventilationsanlæg med regulering af rumtemperaturen med fordel benytte kompensering efter udetemperaturen, når anlægget er forsynet med køleflade. Ved at hæve setpunktet for ønsket rumtemperatur, når udetemperaturen kommer over en vis grænse, og holde rumtemperaturen konstant, når udetemperaturen er under denne grænse, kan både spares energi og opnås indeklimafordele.

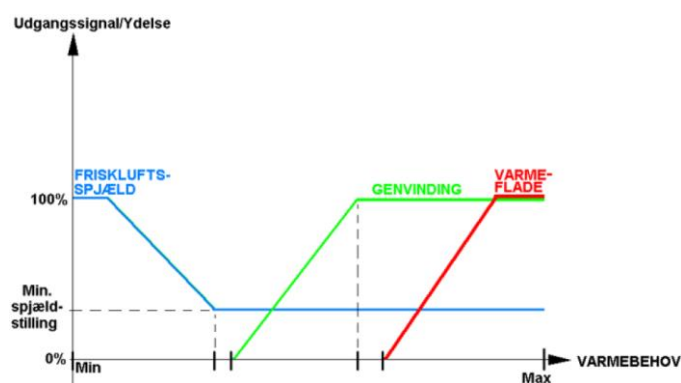
Serieregulering

For at sikre, at varme- og køleflader ikke arbejder samtidig og derved modarbejder hinanden med energispild og dårligt indeklima som resultat, reguleres anlæggets komponenter i serie af samme regulator. I Figur 7-28 er vist et eksempel på regulering i serie. Friskluftspjældet er reguleret til minimum, mens varmetilførslen til varmefladen er aktiv. Først når varmetilførslen er afbrudt kan friskluftspjældene reguleres til en øget udeluftmængde. En neutralzone er indlagt, dels som sikkerhed mod at varmefladen er aktiv, når friskluftspjældet reguleres, dels for imødegå at reguleringen pendler.



Figur 7-28 Regulering i serie med neutralzone 'Varmeblade og friskluftspjæld'

Et faldende varmebehov for anlæg med regulering af indblæsningstemperaturen er udtryk for en stigende varmetilførsel til rummet. Varmetilførslen kan skyldes personer i rummet, solindfald eller varmeafgivende udstyr. For anlæg med anden opvarmningskilde end ventilationsluften, f.eks. radiatorer, vil et faldende varmebehov udtryk for stigende varmetilførsel fra opvarmningskilden eller fra personer, solindfald og varmeafgivende udstyr. På figur er vist et eksempel på anlæg med varmeblænde, varmegenvinding og returluftsaggregat. Ved aftagende varmebehov lukkes for varmeblænden inden ydelsen på varmegenvindingsanlægget reduceres, og først når varmeydelsen fra genvindingen er afbrudt reguleres friskluftspjældet fra sin minimumsindstilling.



Figur 7-29 Regulering i serie med neutralzoner 'Varmeflade, genvinding og friskluftspjæld'

Kaskaderegulering

Ændres rumtemperaturen hurtigt som følge af pludselige forstyrrelser, f.eks. et pludseligt stort solindfald eller pludselige ændringer i varmeproduktionen i rummet, eller forekommer der ændringer i varmebladens ydelse som følge af varierende varme til varmeblænden vil en simpel temperaturreguleringssløjfe ikke kunne følge med. For så tidligt som muligt at imødegå store forstyrrelser, kan ventilationsanlægget temperaturregulering tilføjes indre reguleringssløjfer. Tilføjes en 'indre' reguleringssløjfe, som regulerer varmebladens ydelse efter en temperaturføler i indblæsningskanalen, og en 'indre' reguleringssløjfe som forskyder set-punktet for indblæsningstemperaturen, afhængig af rumtemperaturens variation, kan den 'ydre' reguleringssløjfe følge med større forstyrrelser.

Prædiktiv styring (MPC).

Dynamiske facader ses mere og mere i kontorbyggeri, som opføres efter BR15 og bygningsklasse 2020. Risiko for overophedning, sfa. solindfald og varmeproduktion i bygningen, udfordrer sammen med brugernes krav om 'godt lys og frisk luft' bygningens termiske indeklima-anlæg.

I ELFORSK-projekt 345-033 'Prædiktiv styring af hybride ventilationsanlæg i kontorbyggeri med glasfacader' er der arbejdet med styringsalgoritmer, som optimerer forløb af solafskærmning, vinduesåbning, mekanisk ventilation, opvarmning og køling, som minimerer omkostningerne. Simuleringer viser, at et inde-temperaturforløb, som glider fra minimumsgrænsen ved arbejdstidens

begyndelse til maksimum værdi ved slutningen af arbejdsdagen, ofte er det optimale, hvor der er behov for køling.

ELFORSK-projekt 345-033 opsummerer forventningerne til fremtidens hybridventilation:

- Mekanisk ventilation med varmegenvinding, når varmebehov (varmeanlæg 'on')
- Naturlig ventilation og solafskærmning, når kølebehov (varmeanlæg 'off')
- Avancerede CTS-styringer, som både styrer mekanisk ventilation med varmegenvinding og naturlig ventilation
- Flydende setpunkter fastsat efter MPC-optimering
- Kombination af solariemeter og temperaturfølere i rum
- Generel optimering af CTS-styring ved MPC, f.eks. ved variable el-priser

7.13. APPENDIX C (EiSE strategiskemaer - CTS-justeringer)

EiSE-strategien er behandlet andet steds. I dette appendix anføres de CTS-justeringer, som skal foretages for implementering af EiSE-strategien. Tabellerne gælder lokaler, ventilations-, køle- eller varmeanlæg. Kolonnerne i tabellerne repræsenterer komponenter, som enten har eller forårsager et energiforbrug. Hver enkelt komponent reguleres af CTS-undercentraler og IBI-controllere, men kan overstyres i prioriteret rækkefølge. Sikkerhedsdrift har højest og regulering (auto) lavest prioritet:

1. Sikkerhedsdrift
2. Manuel drift
3. Nulstilling
4. Tvangsdrift
5. Regulering

LOKALER

		a	b	c
		VAV spjæld	Varmeventil	Køleventil til f.eks. køleblæser
1	Regulering	Dynamisk køle setpunkt T_{DK}	Dynamisk varme setpunkt T_{DV}	Dynamiske køle setpunkt, T_{DK}
2	Tvang	100 % åben på arbejdsdage i tidsrummet fra f.eks. 06.30-07 fra oktober til maj		
3	Nulstil			
4	Manuel		Individuel brugerværdi f.eks. 19-21 °C på hver-dage f.eks. fra kl. 7-16	
5	Sikkerhed			

1a VAV ventil reguleres efter temperatur. T_{DK} er dynamisk køle setpunkt. Der er en minimumsåbning, så der tilføres luft selvom kølebehovet er nul.

2a VAV ventiler åbnes 100 % ved morgenudluftning.

1b Varmeventil reguleres efter temperaturen. T_{DV} er dynamisk varme setpunkt.

4b Varme normen DS 469 stiller krav om individuelle varmebehov skal tilgodeses.

1c Køleventilen reguleres efter temperatur. T_{DK} er dynamisk køle setpunkt.

Figur 7-30 EiSE strategi på skemaform som grundlag for CTS-programmering

VENTILATIONSANLÆG, HERUNDER KØLEANLÆG TIL KØLEFLADE I AGGREGAT

		a Ventilator	b Roterende veksler	c Varmeventil	d Køleventil
1	Regulering	Frigives når E(DK) > f.eks. 15 %. Hysterese ned til f.eks. 5 % Setpunkt f.eks. dynamisk ps, som er en funktion E(DK)	Setpunkt Tind f.eks. 18 °C	Setpunkt Tind f.eks. 18 °C	Frigives når E(DK) > f.eks. 70 % og Tude > f.eks. TDK - 5 °C. Hysterese på både E(DK) og Tude Setpunkt Tind = $T_{DK} - 6$ °C
2	Tvang	Frigives i tidsrummet 08-16 på arbejdsdage Setpunkt f.eks. dynamisk ps, som er en funktion E(DK)	Setpunkt f.eks. 14 °C i tidsrummet kl. 18-07 fra juni til september		
3		Frigives i tidsrummet fra f.eks. 06.30-07 på arbejdsdage fra oktober til maj F.eks. ps = 150 Pa	Kører 100 % fra oktober til maj		
4	Nulstil			I tidsrummet fra 18-07 + weekend	I weekend
5				Veksler kører mindre end 100 %	
6			Ventilator stop	Ventilator stop	Ventilator stop
7	Manuel				
8	Sikkerhed	Stop ved frostalarm		100 % åben ved frostalarm	
9		Stop ved brandalarm			

- 1a Ventilatorerne frigives når mere end f.eks. 15 af lokalerne har et kølebehov. Ventilatoromdrejningerne reguleres efter ps. Når der er et kølebehov, som registreres ved at E(DK) > 0, så forceres luftmængden op. Kurven er givet ved to eller flere koordinater (E(DK), ps). Eksempel: (0;100 Pa), (0,2;100 Pa); (1; 200 Pa).
- 2a Ventilatorerne frigives i tidsrummet f.eks. 08-16 på arbejdsdage for at sikre luftkvaliteten i arbejdstiden. Ventilatoromdrejningerne reguleres efter ps, som beskrevet under 1a.
- 3a Ventilatorerne frigives i tidsrummet f.eks. 06.30-07 på arbejdsdage fra oktober til maj (morgenudluftning). F.eks. ps = 150 Pa.
- 8a Stop ved frostalarm.
- 9a Stop ved brandalarm.
- 1b Veksleren reguleres efter ønsket indblæsningstemperatur på f.eks. 18 °C.
- 2b Hvis ventilatorerne kører i dette tidsrum, er der et kølebehov. Der er næsten ingen brugere tilstede og indblæsningstemperaturen sænkes derfor til 14°C.
- 3b Vi vil gerne akkumulere så meget varme som muligt i bygningen, derfor kører den 100 %.
- 6b Veksleren er stoppet hvis ventilatorerne er i stop.
- 1c Varmeventilen regulerer efter f.eks. 18 °C.
- 4c Varmeventilen er nulstillet udenfor arbejdstid.
- 5c Varmeventilen er nulstillet, hvis veksler kører mindre end 100 %.
- 6c Varmeventilen er stoppet, hvis ventilatorerne er i stop.
- 8c Varmeventilen åbnes 100 % ved frostalarm.
- 1d Køleventilen frigives hvis der er et "globalt" kølebehov og udetemperaturen er over indblæsningstemperaturen. Hysterese på Tude < TDK - 6. Hysterese på E(DK) < f.eks. 50 %. Køleventil regulerer efter indblæsningstemperaturen, som er funktion af det dynamiske køle setpunkt. Det sænker køledydelsen og risikoen for træk.
- 4d Køleventil er altid nulstillet i weekenden, der er ingen eller få brugere tilstede.
- 6d Køleventil er nulstillet når ventilationsanlægget er stoppet.

Figur 7-31 EiSE strategi på skemaform som grundlag for CTS-programmering

KØLEANLÆG TIL INDIREKTE KØLING UDE I LOKALERNE

		a Køle cirkulationspumpe	b Fremløbstemperatur	c Signal til køleanlæg	d Signal til frikøl
1	Regulering	Frigives når E(DK) > f.eks. 15 %. Hysterese E(DK) til f.eks. 5 %	Setpunkt f.eks. Tf = (TDK-6-3*E(DK))	Frigives når køle cirkulationspumpe frigives	Frigives når f.eks. Tude < Tf - 3. Hysterese til Tf-2
2	Tvang				
3	Nulstil	Ventilator stop		Ventilator stop	
4	Manuel				
5	Sikkerhed				

- 1a Cirkulationspumpen frigives, når der er et kølebehov i mere end f.eks. 15 % lokalerne.
- 3a Cirkulationspumpen stopper, når ventilationsanlægget er i stop.
- 1b Kølevandets temperatur er en funktion af det dynamiske køle setpunkt og hvor mange lokaler, som har et kølebehov.
- 1c Signal til køleanlæg når cirkulationspumpen frigives (der er et kølebehov i mere end f.eks. 15 % af lokalerne). Det forudsættes, at køleanlægget kun kan køre, når dette signal frigives.
- 3c Køleanlæg stopper, når ventilationsanlæg er i stop.
- 1d Signal til frikøl frigives, når udetemperaturen er f.eks. er 3 °C lavere end fremløbstemperaturen.

VARMEANLÆG

		a Fremløbstemperatur til varmeblader	b Cirkulationspumpe
1	Regulering	Varmekurve + korrektion, som f.eks. er: $-20 \left(\frac{20 - T_{udb}}{32} \right) (0,3 - E(DV))$	Frigives
2	Tvang		
3	Nulstil		Stop hvis E(DV) = 0 og Tude > f.eks. 5 °C. Hysterese på både E(DV) og Tude
4	Manuel		
5	Sikkerhed		

- 1a Fremløbstemperaturen reguleres efter en varmekurve og korrektionsfaktor. Varmekurven er en funktion af udetemperatur og korrektionsfaktoren er en funktion, som sænker fremløbstemperaturen, når varmebehovet er lille.
- 1b Cirkulationspumpen reguleres efter f.eks. en proportional karakteristik.
- 3b Cirkulationspumpen stoppes, når udetemperaturen er over 5 °C og varmebehovet, i bygningen, er nul. Hysterese på Tude, så cirkulationspumpen først igangsættes ved f.eks. 3 °C. Hysterese på E(DV), så cirkulationspumpen først igangsættes, når f.eks. 10 % af lokalerne har et varmebehov.

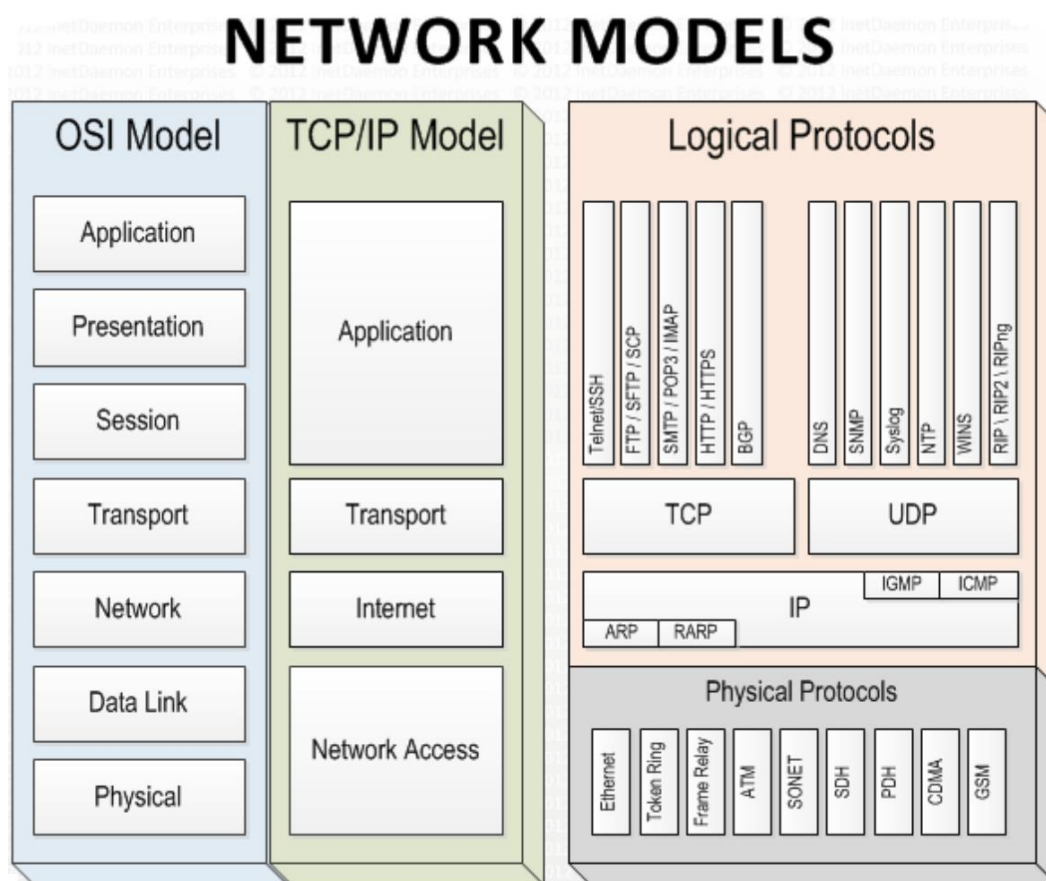
Figur 7-32 EiSE strategi på skemaform som grundlag for CTS-programmering

7.14. APPENDIX D (OSI-modellen og CTS-protokoller)

I dette appendix uddybes protokolbegrebet og protokoller indenfor bygningsautomation med udgangspunkt i OSI-netværksmodellen.

Protokoller. En protokol er et specifikt sæt af regler for udveksling af data.

Protokolstak. En protokolstak implementerer flere tilstødende lag i OSI modellen i en funktion.



Figur 7-33 OSI-modellen

OSI-model (Open System Interconnection reference model). OSI modellen blev defineret af ISO, og i slutningen af 80'erne anbefalet som netværksstandard. Modellen anviste et fælles grundlag at udvikle protokoller til netværksplatforme på. Ideen var, at fulgte producenter modellens logiske adskillelse i lag og kravene til grænsefladerne mellem tilstødende lag, så ville en protokol-funktion udviklet af en producent kunne arbejde sammen med en protokol-funktion hørende til et tilstødende lag, men udviklet af en anden producent. OSI-modellen inddeler protokolfunktionerne i 7 lag, der tilsammen definerer kravene for al kommunikation mellem to computere. Hvert lag benytter det underliggende lags funktioner, og tilbyder funktioner til det overliggende lag. Et system som implementerer flere tilstødende lag kaldes en protokolstak. TCP/IP er et eksempel på en protokolstak. Protokolstakke kan implementeres i hardware, software eller en blanding af hardware

og software. Normalt er kun de laveste lag implementeret som hardware, og de højere lag som software.

Lag 1 – Det fysiske lag

De elektriske og fysiske rammer for netværkselementer, f.eks. stik-, spænding- og kabelspecifikationer. Hubs, repeatere, netværkskort og Host bus adaptere er enheder i det fysiske lag. Modulering af digitale data og signaler sendt over kommunikationskanalen, så de kan sendes til tilsluttet udstyr via kabel, fiber eller radiobølger, ligger i dette lag. I laget findes SCSI-busser. Lokale netværk som Ethernet, Token Ring, Fiber og Wireless LAN indeholder såvel det fysiske lag 1 som data link laget lag 2.

Lag 2 – Data link lag

- Faciliterer dataoverførsel mellem netværksmoduler og finder fejl i det fysiske lag. Adresseringsmetoden er fysisk. MAC-adressen er brændt i netværkskortet. Ethernet er en data link protokol, ligesom HDLC point-to-point og ADCCP packet switched netværk. Netværksswitcher arbejder i data link laget.

Lag 3 – Netværkslaget

- Internet protokollen IP er et eksempel på en protokol i netværkslaget. Laget tilbyder de funktioner, der skal til for at sende datablokke af varierende størrelse fra kilde til endestation. Pakkerne sendes til den angivne modtager, og protokollen kan udføre ind- og udpakning samt rapportere om leveringsfejl. Adresseringssystemet er logisk og hierarkisk med værdier valgt af netværksadministratoren. Routers arbejder i dette lag.

Lag 4 – Transportlaget

- Transportlaget kontrollerer pålideligheden af en forbindelse, dvs. indpakning-, udpakning- og fejlkontrol. Transportlaget holder styr på pakkerne, og gensender pakker som når frem. TCP (Transmission Control Protocol) er et eksempel på en transportkontrol, hvor transportlaget er det lag som omdanner data til TCP pakker.

Lag 5 – Sessionslaget

- Sessionslaget sikrer 'terminated gracefully'.

Lag 6 - Præsentationslaget

- Laget omdanner data til en kendt grænseflade eller datastruktur. Omdannelse til og fra XML er et eksempel. Kryptering sker i dette lag.

Lag 7 – Applikationslaget

- Laget giver adgang til information på netværket via programmer. Laget er brugers grænseflade til netværket. Eksempler på applikationslag protokoller er FTP (File Transport Protocol), SMTP (Simple Mail Transport Protocol) og HTTP (Hyper Text Transport Protocol).

TCP (Transmission Transport Protocol). TCP er den mest anvendte transportprotokol på internettet. I OSI modellen er TCP laget mellem internetprotokollen i netværkslaget og applikationslaget. Gennem TCP kan applikationer på forskellige værtsmaskiner oprette forbindelse til hinanden og udveksle datapakker. Det er TCP som sikrer at datapakker gensesendes, hvis de ikke når frem, og at de ankommer i den rækkefølge de er afsendt. Ved at benytte port-numre gør TCP det muligt at oprette flere datastrømme til og fra en vært. Sammenkoblingen mellem TCP og internetprotokollen, benævnt TCP/IP, sikrer pålidelige datastrømme, som er nødvendige for afvikling af programmer.

IP (Internet protokol). IP er et eksempel på en protokol i netværkslaget. Benyttes af internettet.

IP adresse. En IP adresse er en numerisk mærkning, som tildeles enheder tilknyttet et netværk, der benytter internet protokollen til kommunikation. IP adressen identificerer både værten og den lokale adresse i værtens netværk. I en IP pakke indgår såvel afsenders som modtagers IP adresser. Controllere i bygningsautomation, som alene kommunikerer indbyrdes via TCP/IP, behøver ikke en unik global IP adresse.

Kommunikationsprotokoller - Bygningsautomation

BACnet (Building Automation and Control network). BACnet er en international standardiseret (ASHRAE, ANSI og ISO) kommunikationsprotokol udviklet til bygningsautomation. BACnet understøttes af producenter i Europa og Nordamerika, og betragtes for den 'reelle' åbne standard indenfor bygningskontrol som understøtter integration af CTS-undercentraler, IBI-anlæg samt brand- og tyverisikringssystemer.

LonTalk. LON teknologien er bygget på LonTalk protokollen, som er internationalt standardiseret (ISO/IEC 14908) og åben for alle producenter.

KNX. KNX er en standardiseret international OSI-baseret netværks protokol (EN 50090, ISO/IEC 14543-3), udviklet pba af tre tidligere europæiske IBI-standarder: European Home System (EHS), BatiBUS og European Installation Bus (EIB). KNX er åben og hovedsagelig anvendt på IBI-anlæg.

Modbus. Modbus er en seriel kommunikationsprotokol udviklet af Modicon (Schneider Electric) som PLC kommunikationsprotokol. Modbus er blevet en 'de facto standard' indenfor PLC kommunikation, nem at installere, nem at vedligeholde og royalty fri. Indenfor bygningsautomation benyttes Modbus primært til styring og regulering af køleanlæg, dataopsamling fra målere, kommunikation med ventilationsanlæg med autonom automatik, samt rumstyringer med begrænset fast programmeret funktionalitet. Standarden er bygget op omkring numeriske adresser uden forklarende labels. En netværksscanning giver som udgangspunkt ikke information om hvorvidt et punkt er bundet til den rigtige CTS-label. Benyttes Modbus som kommunikationsprotokol i ventilationsanlægsstyringer, kan det være problematisk at opdatere softwaren, da adressenummereringen kan flytte sig, og styringen skulle om-programmeres.

M-Bus (Meter-bus). M-Bus er en europæisk standard udviklet for fjernaflæsning af forbrugsmålere, f.eks. varme-, vand-, gas- og elektricitetsmålere. M-Bus anvender to-leder bus kommunikation og opfylder kravet om at være fjernforsynet, eller alternativt batteridrevet. En M-bus måler overleverer periodisk registrerede data til en fælles master, f.eks. en PC eller server. Overførslen kan også foregå via modem. (EN 13.757-2 beskriver det fysiske lag og link laget, mens EN 13.757-

3 beskriver applikationslaget i OSI modellen). Wireless M-Bus understøtter forbrugsopsamling via radiosignal.

PROFIBUS. Standard feltbus indenfor industriautomation. Profibus blev udviklet af det tyske undervisnings- og forskningscenter, og er en udbredt realtids kommunikationsbus i industrien. Profibus definerer profiler for f.eks. encodere, laboratorieinstrumenter, intelligente pumper, robotter og NCC maskiner, og skal sikre interoperability og interchangeability, så et produkt fra en producent skal erstattes af et tilsvarende produkt fra en anden. PROFIBUS må ikke forveksles med PROFINET.

PROFINET. Førende industriel ethernet standard for real-tids applikationer i industrien. Profinet definerer tre protokolniveauer. TCP/IP for ikke kritiske applikationer (100ms), RT for real-tids applikationer, og IRT for såkaldte iso-synkroner applikationer med cyklustider mindre end 1ms, f.eks. præcisionsdrev. Profinet protokollerne kan læses og indlæses med et ethernet analyseværktøj, f.eks. PRONETA eller Wireshark.

8. VENTILATION

Jørgen Erik Christensen, Lektor

Institut for Byggeri og Anlæg, Danmarks Tekniske Universitet

jec@byg.dtu.dk

Dette kapitel om ventilation er til supplerende brug for undervisning på ingeniør og maskinmester uddannelsen. Der rettes en stor tak til Børge Howald Petersen, DTU Byg for at stille materiale til rådighed.

Kapitlet om ventilation er tænkt til at være af grundlæggende karakter, således at de studerende kan tilegne sig det basale inden for ventilationsteknik. En mere detaljeret gennemgang af ventilation kan findes i den supplerende litteratur.

ELFORSK projektet: Indeklima, Facility Management, Ventilation, Opvarmning, CTS, bygnings-dynamik, nøgletal og energirenovering. Alle afsnit behandler det pågældende emne ud fra relevansen i forhold til ”Energirigtig drift af det rette indeklima i bygninger”. Spørgsmål, kommentarer mv. kan rettes til forfatteren.



ELFORSK

Dette kapitel er udarbejdet som del af projektet **Energirigtigt drift af det rette indeklima i bygninger** – ENDRIN støttet af ELFORSK i periode 2016–2017, projektnummer 348-006 (www.elforsk.dk).

8.1. Indhold

8.1.	Indhold	8-2
8.2.	Læringsmål	8-4
8.3.	Nomenklatur og sprogbrug	8-5
8.4.	Introduktion og formål med ventilation	8-10
	Ventilationens formål	8-11
8.5.	Ventilationsanlægs opbygning	8-12
	Forsyning	8-12
	Distribution	8-13
	Forbrug	8-13
8.6.	Ventilationens størrelse	8-14
	Forureningskilder	8-14
	Emissioner fra byggematerialer	8-16
8.7.	Ventilationsprincipper	8-17
	Opholdszone	8-18
	Opblandingsventilation	8-19
8.8.	Kanalsystem	8-23
	Generelt	8-23
	Opbygning	8-24
	Runde- og rektangulære kanaler	8-26
	Kanaldimensionering	8-26
8.9.	Tryktabsberegning	8-29
	Trykforhold i kanaler	8-30
	Dimensionering af et kanalsystem – Trykbalance	8-31
	Trykforhold i lige kanal	8-33
	Tryktab i enkeltmodstande	8-34
8.10.	Lydudbredelse	8-35
	Grundbegreber	8-35
	Lydens udbredelse	8-37
	Decibel begrebet	8-38
	Lydintensitet	8-39
	Frekvensanalyse	8-41

Lydangivelser – ørets lydopfattelse.....	8-42
Oplevet lyd fra armatur	8-43
8.11. Litteratur/referencer	8-45

8.2. Læringsmål

Studerende der læser dette kapitel skal være i stand til at:

- Forklare ventilationsbegrebet – hvad er ventilation, hvordan vi definerer vi det, og hvilke ”komponenter” findes der.
- Bestemme behovet for ventilation ud fra lovmæssige krav og krav til det termiske og atmosfæriske indeklima.
- Fastlægge de fysiske og funktionsmæssige krav til et mekanisk ventilationsanlæg og vælge armaturer for indblæsning og udsugning.
- Vælge et passende ventilationsaggregat i mekaniske ventilationssystemer, som opfylder bygningsreglementets krav energiforbrug

8.3. Nomenklatur og sprogbrug

<u>symbol</u>	<u>Enhed</u>	<u>Beskrivelse</u>
a, b	m	Sidelængde
A	m^2	Areal, Indvendigt tværsnitsareal
A_{kanal}	m^2	Kanalsystemets indvendige overfladeareal
A	m^2	Absorptionsareal (LYD)
A	m	Armaturnes afstand, fig. 6.10
A_{af-arm}	m	Armaturnes afstand, fig. 6.10
A_o	m^2	Kontraheret areal (udløbsarealet)
A-filter	dB	A-filter, (6.11)
b	m	Sidelængde
b_v	m	Strålens maksimale (vertikale) højde
b_h	m	Strålens maksimale (horisontale) bredde
c	$kg/m^3, m^3/m^3$	Forureningskoncentration for rumluft, se også "G"
c	m/s	Lydhastighed i luft (LYD, 20 °C 344 m/s)
c_e	kg/m^3 rumluft m^3/m^3 rumluft	Udeluftens koncentration af den forurenende komponent, (e = "exterior")
c_o	kg/m^3 rumluft m^3/m^3 rumluft	Begyndelsesbetingelse $c = c_o$ for $\tau = 0$
c	$J/(kg \cdot K)$	Specifik varmekapacitet (2.9)
c_p	$J/(kg \cdot K)$	Specifik varmekapacitet (konstant tryk)
c_{pd}	$kJ/(kg \text{ damp})$	1,8 kJ/(kg damp) er vanddampens specifikke varmefylde (fugtig luft)
c_{pl}	$kJ/(kg \text{ tør luft})$	1,01 kJ/(kg tør luft), luftens specifikke varmefylde (fugtig luft)
c_v	$J/(kg \cdot K)$	Specifik varmekapacitet, (konstant volumen)
d, D	m	Diameter (Hydraulisk)
d_h	m	Hydraulisk Diameter
D	–	Retningsfaktoren (LYD, spredning)
E_{el}	W	Ventilatorens energiforbrug (Elforbrug)
f	Hz	Frekvensen (LYD)
f_{mag}	–	En del af solvarmen opmagasineres i byggelementerne
f_{lag}	–	Med 3 lag glas eller energiruder i stedet for 2 lag glas
f_{areal}	–	Rudeareal mindre end murhul
f_{snavs}	–	Snavset rude
f_{skygge}	–	Skygger fra fx træer og huse
$f_{skærm}$	–	Afskærmning (ud, inde, mellem)
F	N	Kraft
F	–	Gennemgangsfaktor for komponent (LYD)
g	m/s^2	Tyngdeakseleration
G	m^3/s	Forureningsintensitet, se også "c" kg/s
h	m	Højde (kote)
h	m	Lofthøjden indvendig (LYD)
h_a	m	Højde – anlægskarakteristik
h_{ru}	m, mm	Ruhed for væg, Ruhedstal

h_{ru}/d_h	–	Det relative ruhestal
h_t	m	Taps højde
h	$W/(m^2K)$	Varmeovergangskoeff. ved konveksion
I	W/m^2	Lydens intensitet
K	–	Multiplikationsfaktor på kastelængde
l	m	Længde (kanalstrækning)
l_{gep}	m	Den geometriske længde
$L_{læk}$	$m^3/(s \cdot m^2)$	Lækagekoefficient
l_v	m	Strålens kastelængde svarende til den valgte isovelhastighed v
$l_{0,2}$	m	Strålens kastelængde svarende til den valgte isovelhastighed v på 0,2 m/s
L_p	dB	Lydtrykniveauet i rummet (LYD)
L_{pA}	dB	Oplevede lydtrykniveau i rummet (LYD)
L_{pAn}	dB	Oplevede lydtrykniveau fra n lydkilder
L_w	dB	Lydeffektniveau (LYD)
L_{wa}	dB	Lydeffektniveau med indregnet A-filter
ΔL_D	dB	Lyddæmpning (LYD)
$\Delta L_{Kanalstøj}$	dB	Kanalstøj (LYD)
ΔL_R	dB	Rumdæmpning (LYD)
m	kg	Masse
M	g/mol	Molekylmasse, relativ
n	h^{-1}	Luftskifte
n	–	Antal ens lydkilder (LYD)
n	min^{-1}	Omdrejningstal (pumper)
O	m	Omkreds
p	Pa	Tryk
p_d	Pa	Dynamisk tryk
p_{dm}	Pa	Mættede dampes tryk
p_s	Pa	Statisk tryk
p_t	Pa	Total tryk
Δp	Pa	Trykdifferens
Δp_e	Pa	Tryktab i enkeltmodstand, enkelttab Pa $\Delta p_e = \Delta p_{støt}$ (Ventilationsteknik)
Δp_f	Pa	Tryktab i rør/kanal (friktion)
Δp_r	Pa	Tryktab (samlet)
$\Delta p_{t,ventilator}$ $\Delta p_{ventilator}$	Pa	Tilvæksten i totaltrykket gennem ventilatoren [ved intet indices "t" underforstås totaltryk]
P	W	Effekt (pumper, ventilator)
P	W	Lydeffekt (LYD)
P_{ref}	W	Referenceeffekt (LYD): $P_{ref} = 10^{-12} W$
P_{el}	W	Effekten P_{el} fra el-nettet
P_V	W	Ventilatorens effekt
q_m	kg/s	Massestrøm
$q_{m,vand}$	kg/s	Omdannede vandføring i (2.8)
q_v	$m^3/s, m^3/h, l/s$	Volumenstrøm, strømningens flow
$q_{v,læk}$	m^3/s	Udsivende luftflow (400 Pa)

$q_{V,udeluft}$	m^3/s	Udeluftmængden
r	m	Radius
r	m	Afstand fra armatur til referencepunkt (LYD)
r		Fordampningsvarme for vand, der varierer omtrent lineært mellem 2500 kJ/kg ved 0°C og 2260 kJ/kg ved 100°C
r_o	$kJ/(kg \text{ damp})$	= 2500 kJ/(kg damp) vanddampens specifikke fordampningsvarme ved 0°C
R	$J/(mol \cdot K)$	Universelle Gaskonstant, molar
R	Pa/m	Trykgradient
R	m^2	Rumkonstanten
R_{max}	Pa/m	Trykgradient, anbefalet maksimal
Re		Reynolds tal
S	m^2	Areal af flade (LYD: $A = \alpha \cdot S$)
S_g	m^2	Gulvarealet pr armatur (LYD)
SFP		= Specific Fan Power ⁷
t	$^{\circ}C$	Temperatur
t_{eft}	s	Efterklangstid (LYD)
$t_{afkast,for}$	$^{\circ}C$	Temperatur afkastluft før varmeveksler
t_{efter}	$^{\circ}C$	Temperatur efter varmeplade
t_{flade}	$^{\circ}C$	Temperatur af varmeplade
t_{for}	$^{\circ}C$	Temperatur før varmeplade
t_i	$^{\circ}C$	Kan være rumtemperatur, se Δt_o og t_o
t_{ind}	$^{\circ}C$	Temperatur ved indstrømning
t_{rum}	$^{\circ}C$	Lufttemperatur i rummet
t_o	$^{\circ}C$	Ventilationsluftens temperatur ved indblæsningsstedet $x = 0$
t_{ud}	$^{\circ}C$	Temperatur ved udstrømning
$t_{ude,efter}$	$^{\circ}C$	Temperatur udeluft efter varmeveksler
$t_{ude,for}$	$^{\circ}C$	Temperatur udeluft før varmeveksler
t_x	$^{\circ}C$	Undertemperatur i stråleaksen
Δt	$^{\circ}C, K$	Temperaturdifferens
Δt_o	$^{\circ}C$	= $t_i - t_o$ er ventilationsluftens undertemperatur ved indblæsningsstedet $x = 0$
$\Delta t_{ventilator}$	$^{\circ}C$	Temperaturstigning af luft ved passage af ventilator
$t_{95\%}$		Tiden for at fortyndingsligningens tredje led når op på $0,95 \cdot G/(n \cdot V)$
T	K	Temperatur, absolut
u	m/s	Hastighed (middel), benyttes i formel for Re for at undgå forveksling
v	m/s	Hastighed (middel)
v	m/s	Kanals middelhastighed
v_{max}	m/s	Øvre grænse for hastighedsintervallet (cirkulært)
v_o	m/s	Hastighed gennem kontraktionsareal
V	m^3	Volumen gennem kontraktionsareal
x, y	m	x er afstanden langs midteraksen og y er afstanden vinkelret på midteraksen ud til punktet på den isovel, der har hastigheden v ,
x	$kg/(kg \text{ tør luft})$	Vandindhold i fugtig luft
x_m	$kg/(kg \text{ tør luft})$	Luftens mættede vandindhold
x_1	$kg/(kg \text{ tør luft})$	Ventilationsluft med vandindhold x_1

x_2	kg/(kg tør luft)	Stationær situation et vandindhold i rum
Græske bogstaver		
α	–	Absorptionsfaktor for LYD
$1 - \alpha$	–	LYD der reflekteres
ε	–	= A_0/A = Kontraktionsfaktoren
ε_t	–	Temperatureffektivitet
θ	°C	Temperatur
$\Delta\theta_{Køle}$	°C	Undertemperatur ved ventilation
λ	–	Friktionsfaktor/-koefficient/-tal
η	–	Virkningsgrad
η_{fr}	–	Virkningsgrad for motorens frekvens omformer (omløbstal)
η_{mo}	–	Virkningsgrad for motor
η_{rem}	–	Virkningsgrad for remtræk
η_t	–	Temperaturvirkningsgraden
η_v	–	Virkningsgrad for ventilator alene
ν	m^2/s	Kinematisk viskositet
ν_l	m^2/s	Kinematisk viskositet, luft m^2/s (= $15,1 \cdot 10^{-6} m^2/s$ ved 20°C)
ρ	kg/m^3	Densitet ($\rho_{luft} = 1,2 kg/m^3$, 20°C)
τ	s	Tid
τ	s	Tid, benyttelsen for ventilator
ξ	–	Enkelttabsfaktor
ζ_{90}	–	Tryktabsfaktor for 90°-bøjning
Φ	W	Varmestrøm
$\Phi_{køle}$	W	Køleeffekt
Φ_{varme}	W	Varmeeffekt
$\Phi_{våd}$	W	Rummets tilførte effekt ved omdannelse mellem tilstandsformer (flydende, damp)
Indices		
0		Tallet 0, f.eks. for $x=0$ / $\tau=0$ (For 0 skrives ofte o \Rightarrow Det er forvirrende)
0,2		Isovelhastighed på 0,2 m/s
1, 2		Tværsnit 1 / Tværsnit 2
95%		95% af maksimalværdi
∞		Uendelig, slutværdi
afkast		Afkast
atm		Atmosfære
A		A-filter, [Lydforhold]
d		Dynamisk
d		Vanddamp i fugtig luft (fugt), se "m" (fugt)
dm		Damptryk mættet
e		Enkelt, enkelttab
e		(e = "exterior"), ude [komfortventilation]
efter		Efter
el		Energiforbrug til El, (E_{el})

<i>f</i>		Friktion
<i>fr</i>		Frekvensomformer
<i>før</i>		Før
<i>g</i>		Gravitation
<i>geo</i>		Geometrisk
<i>i</i>		Ind
<i>ind</i>		Tilstand ved indstrømning
<i>komp</i>		Komponent (LYD)
<i>køle</i>		Køle
<i>l</i>		Luft
<i>l</i>		Tør luft (fugtig luft)
<i>læk</i>		Lækage
<i>m</i>		Masse
<i>m</i>		Mættet (fugtig luft)
<i>mo</i>		Motor
<i>n</i>		Antal ens lydkilder, [Lydforhold]
<i>p</i>		Tryk
<i>o</i>		Overflade i kontraheret tværsnit
<i>t_o</i>	°C	Ventilationsluftens temperatur ved indblæsningsstedet $x = 0$
<i>rem</i>		Remtræk
<i>rum</i>		Rum
<i>ru</i>		Ruhed
<i>s</i>		Statisk
<i>t</i>		Total
<i>ud</i>		Tilstand ved udstrømning
<i>udeluft</i>		Udeluft
<i>v</i>		Hastighed
<i>ventilator</i>		Ventilator
<i>våd</i>		Våd
<i>V</i>		Volumen
<i>vand</i>		Vand
<i>w</i>		Effekt [Lydforhold, L_w Lydeffektniveau]
<i>x</i>		Afstand på x-akse
<i>y</i>		Afstand på y-akse

8.4. Introduktion og formål med ventilation

Bag betegnelsen ventilationsanlæg er der et antal forskellige anlægstyper, som tilsammen skal sørge for, at der kommer en luftfornyelse til de lokaler, der bliver forsynet.

- Ventilation sker ved hjælp af en række mekaniske hjælpemidler eller bygningsmæssige hjælpemidler, der bidrager til luftfornyelse på kontrolleret vis.
- Dette modsat infiltration, der forekommer utilsigtet gennem lokalernes begrænsningsflader.

Med den øgede fokus på et lavt energiforbrug er der foretaget store forbedringer for at nedbringe infiltrationen, således at denne ikke på nogen måde kan give tilstrækkeligt med frisk luft i moderne byggeri.

Ordet ventilere kommer fra latin ventilare – svinge noget i luften – og af ventus latin for vind. (Gyldendals Fremmedordbog).

Ventilation er med til at bibringe frisk luft i lokalerne; men det er ikke fyldestgørende at arbejde med frisk luft alene for at skabe et godt atmosfærisk indeklima. Det er også nødvendigt at sørge for, at det termiske indeklima ligger inden for de ønskede rammer, således at personerne i lokalerne oplever en behagelig komfort tilstand. Der må derfor ikke være hverken for varmt eller for koldt. Hvis der i løbet af fyringssæsonen er et varmebehov, kan varme tilføres enten via varmeanlæg eller via en overtemperatur af den indblæste luft eller en kombination af begge.

Hvis der i lokalet er et kølebehov, kan kølende energi tilføres via en underafkølet indblæsningsluft og/eller køleblæser. Det er imidlertid meget vigtigt, at der fokuseres på at nedbringe de interne varmelaster fra el, belysning, personer, etc. samt de eksterne varmelaster i form af solindfald. Hvis dette ikke bringes i orden inden projekteringen af selve ventilationsanlægget, vil det give anledning til et alt for stort energiforbrug, samtidigt med at den tilførte nødvendige køleeffekt kan blive så stor, at der kan opstå komfortmæssige problemer i form af træk gener og lignende. Det er derfor uhyre vigtigt, at ventilationsingeniøren, eller den ansvarlige for beregningen af det termiske indeklima i lokalerne, bliver involveret i den tidligste fase, således at der kan forekomme et integreret designforløb mellem ingeniør og arkitekt. Desværre er dette noget, der ofte bliver forsynet imod, således at arkitekten projekterer et byggeri med meget store glasfacader, i forventning om at ingeniøren kan løse alle de problemer, som opstår som følge af et u hensigtsmæssigt design. Hvis arkitekten i tillæg ikke vil tillade udvendig solafskærmning, kan det let gå helt galt og resultere i et bygningsdesign, som har et meget stort energiforbrug i kombination med et dårligt termisk indeklima. Det er derfor uhyre vigtigt, at den ansvarlige projekterende ingeniør siger tilstrækkeligt klart og tydeligt fra, hvis bygningens design giver anledning til meget store problemer. Den projekterende ingeniør er nødt til at holde sig for øje, at der er mennesker, som skal opholde sig og arbejde i bygningen, og at det er ingeniørens opgave at beskytte dem imod u hensigtsmæssig bygnings design.

Når der projekteres et ventilationsanlæg, vil det ikke kun være af betydning at opnå god komfort, indeklima og arbejdsmiljø. Energiøkonomien og effekten på klimaet har stor betydning, og det er derfor nødvendigt at afsætte de nødvendige ressourcer på at projektere et energirigtigt

ventilationsanlæg for at nedbringe CO₂ – udslippet og energiforbruget. I denne sammenhæng kan der specielt henvises til (Den lille blå om Ventilation, 2016), hvor der er en detaljeret gennemgang af, hvordan energieffektiv ventilation kan opnås ved brug af tips til energirigtig projektering og brug. Dette har stor betydning, eftersom erhvervslivet har et stort forbrug af energi i kroner og kilowatt timer.

Ventilationens formål

Ventilation anvendes for at tilvejebringe behagelige klimatiske forhold for mennesker, også kaldet godt indeklima. Begrebet indeklima indbefatter det termiske indeklima og det atmosfæriske indeklima.

Det termiske indeklima omfatter luftens temperatur og fugtighed:

- Varme, som bliver dannet af personer, elektrisk udstyr og solindfald
- I sjældne tilfælde anvendes ventilationsanlæg til at tilføre varme
- Fugt. Dette af sundhedsmæssige grunde især for at undgå skimmelsvamp og diverse allergener; men kan også være af hensyn til organisk materiale
- Under helt specielle forhold anvendes ventilationsanlæg til at tilføre fugt

Det atmosfæriske indeklima handler om luftens indhold af fremmede stoffer:

- Menneskeskabt kuldioxid
- Lugte, herunder kropslugte
- Tobaksrøg
- Forurenende gasser og dampe fra bygningsdele og inventar
- Radon
- Partikler, der er trængt ind gennem klimaskærmen, fx pollen

Det optimale er, at en ventilation uden for meget støj og træk kan give et godt indeklima.

Der kan også underindeles i andre begreber:

- **ventilation**, som så omfatter, at ubehandlet luft føres gennem lokaler for at fjerne forskellige former for forurening
- **luftkonditionering**, omfatter indblæsning af luft, der forud er behandlet med hensyn til temperatur og/eller fugtighed

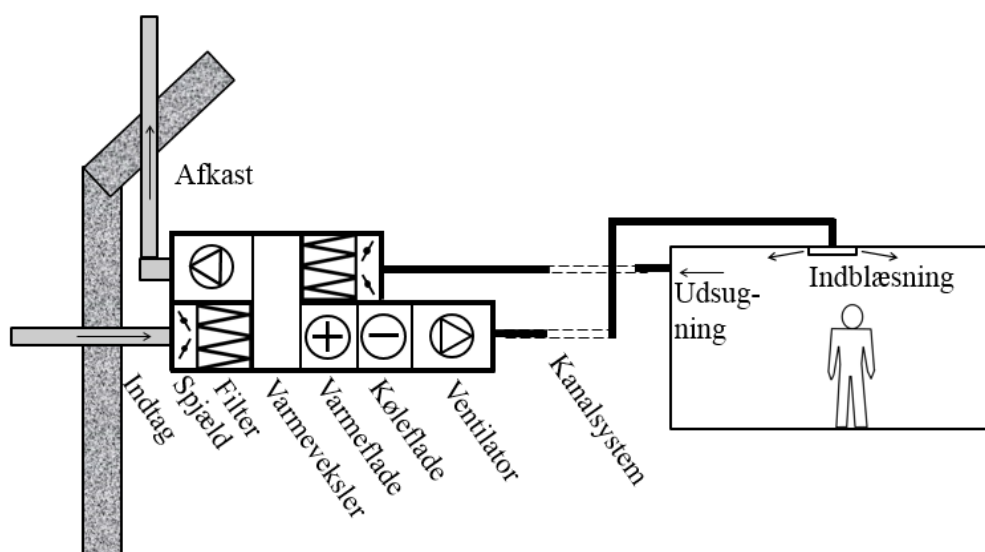
Betegnelsen ventilation vil i dette kapitel blive anvendt om begge begreber. Ligeledes skal anføres at kapitlet vil fokusere på komfortventilation, dvs. kontorer, skoler, sale og boliger; men ikke på industri.

8.5. Ventilationsanlægs opbygning

Et ventilationsanlæg kan udføres på en lang række måder afhængig af hvilke krav, der stilles til det. Et ventilationsanlæg består grundlæggende af tre dele:

- Forsyning
- Distribution
- Forbrug

På Figur 8-1 er illustreret et eksempel på et anlæg til kontorventilation med anvendelse af opblandingsventilation.



Figur 8-1 Skematisk eksempel på et anlæg til kontorventilation

Forsyning

Forsyningsdelen inddeles på følgende måde:

- Aggregat / klimaaggregat, hvor luften behandles
- Kanaler, hvor luften føres mellem udeluften og aggregatet samt mellem aggregat og armaturer

Den friske udeluft suges ind gennem en taghætte eller rist og føres gennem kanaler til aggregatet. I aggregatet går udeluften igennem et filter, og ved behov forvarmes den gennem en varmeveksler, hvor afkast luften afgiver varme til udeluften. Hvis luften ikke er tilstrækkeligt opvarmet, vil den efterfølgende varmeplade øge luftens temperatur til det ønskede før indblæsning i lokalerne. Er der behov for køling på varme dage, vil luften blive ført uden om varmeveksleren videre til kølefladen, hvor den nødvendige undertemperatur opnås. Det er en forudsætning, at kommunen tillader anvendelse af køling. Afsluttende bidrager en ventilator til at give udeluften den nødvendige energi, således at den kan trækkes hele vejen igennem aggregatet samt det forgrenede kanalsystem til de lokaler, som skal forsynes med frisk luft.

Tilsvarende vil en ventilator på afkastsiden suge luften fra lokalet gennem udsugningskanalerne til aggregatet, hvor luften vil gå igennem et spjæld og et filter ind gennem varmeveksleren til forvarmning af udeluft. Derpå til ventilatoren samt videre ud gennem afkastkanalen til afkast hættten. Den luft, der bliver blæst ud gennem afkastkanalen, bør have en så stor hastighed at den spredes godt. Det er også vigtigt, at indtag- og afksthætter er helt adskilt fra hverandre, således at brugt afkast luft ikke suges ind gennem luftindtaget. Under specielle forhold kan aggregatet også indeholde moduler for befugtning eller affugtning af ventilationsluften: men dette er ikke så normalt mere.

Distribution

De kanaler, der transporterer ventilationsluften mellem aggregatet og bygningens lokaler benævnes distributionsdelen.

Efter aggregatet føres udeluften gennem en hovedkanal og lodret videre til de forskellige etager i bygningen. På de enkelte etager forgrener fordelingskanaler luften, og den videreføres via tilslutningskanaler til armaturerne ind i de enkelte lokaler. På analog måde transporteres luften fra udsugningsarmaturerne tilbage via kanalsystemet til aggregatet. I denne del af kanalsystemet er der spjæld for at skabe den nødvendige korrekte luftbalance, lyddæmpere for at dæmpe utilsigtet støj, samt forskellige kanaldele, der anvendes til opbygning af systemet.

Forbrug

Til forbrugsdelen regnes de armaturer, der sidder i lokalerne. Armaturerne sørger for at indblæse og udsuge luften. Det er vigtigt at ventilations mængden er i orden, så personer i lokalerne har det tilpas – hverken for varmt eller koldt, der må heller ikke være træk. Evt. støj vil påvirke ens koncentrationsevne. Størrelsen på hele ventilationssystemet bestemmes af forskellige krav til opholdsrummenes indeklime.

I mange tilfælde ønskes der balanceret ventilation, hvormed menes at indblæsnings- og udsugningsluftmængden er lige stor. Fra køkkener og toiletter foretages ofte kun udsugning for at opretholde et undertryk, der kan sørge for, at der ikke siver luft ud til de omkringliggende rum. Disse afvigelser med hensyn til den forøgede udsugede luftmængde er det nødvendigt at tage hensyn til i det samlede ventilationssystem.

8.6. Ventilationens størrelse

I forbindelse med valg af ventilationssystem er det af stor betydning at kende både ventilationsbehovet og maksimums- og minimumsværdier i løbet af et døgn samt behovene i de enkelte timer for de personer, der skal opholde sig i lokalerne. For at opnå dette er det nødvendigt at sørge for et tilfredsstillende indeklima for såvel det atmosfæriske som det termiske indeklima. I dette kapitel vil forhold omhandlende ventilationsbehovet for det atmosfæriske og det termiske indeklima blive gennemgået, dog henvises til kapitel 14 om Bygningsdynamik vedr. nærmere beregning af det termiske indeklima.

En samlet undersøgelse af det termiske indeklima i et lokale er et resultat af et kompliceret samspil mellem bygningens udformning, klimaanlægget, de termiske belastninger og udeklima. For at undersøge dette nærmere og dermed beregne ventilationsanlæggets størrelse er det nødvendigt at opstille en varmebalance, hvor en lang række faktorer indgår. Da dette er en kompliceret problemstilling, er der truffet det valg, at dette vil blive mere detaljeret forklaret i kapitel 14 om Bygningsdynamik

Ved undersøgelse af indeklimaet er der mange krav, der skal tages hensyn til, og det er ikke muligt at anvende standardløsninger i alle tilfælde. Det er nødvendigt at tage hensyn til den specifikke problemstilling såsom hvilke aktiviteter og processer, der kommer til at foregå i bygningen. I dette afsnit vil der derfor blive fokuseret på, at kunne opstille en systematisk metodik for at opnå nogle vejledende retningslinjer, der kan anvendes i forbindelse med specifikke projekter.

I forbindelse med indeklima undersøgelser vil de enkelte krav forde forskellig størrelse ventilationsluftmængde, og det vil normalt være de største af disse krav, som vil være gældende. I forbindelse med forureningskoncentrationer er det nødvendigt, at disse kan måles, og at der ud fra disse målinger kan fastsættes en maksimalværdi, som kan indgå i den samlede vurdering. For store lokale forureningskilder gælder, at punkt udsugning bør overvejes; men dette ligger uden for rammerne af dette kapitel, da det kun omfatter komfortventilation.

Forureningskilder

Forureningskilder vil kun i kortere omfang blive omtalt på dette sted. For en nærmere beskrivelse af dette emne henvises til kapitel 4 Indeklima.

Normalt forekommende forureningskilder af forskellig art kan være følgende:

- Lugte
- Tobaksrøg
- Kuldioxid
- Radon
- Partikler
- Fugt

I det følgende vil de enkelte forureningskilder blive omtalt i kort form.

Lugte

Lugte fra mennesker vil sædvanligvis være et komfortproblem, hvorimod det generelt ikke vil være et sundhedsproblem. Menneskeskabte lugte kommer fra sved sekretion gennem huden, fra fordøjelsessystemet og fra snavset og fugtigt tøj.

Ud over dette kan lugte komme fra madlavning, toilet aktiviteter, rygning samt diverse andre lugtkilder. Der er stor forskel på hvordan mennesker oplever disse lugte. Ved en persons ophold i et lokale vil dennes opfattelse af en lugt blive tilpasset og accepteret i løbet af et kort stykke tid. Dette i modsætning til når en person fra et renere miljø træder ind i et lokale, der er fyldt med lugte.

En vurdering af om et lokales lugtniveau er acceptabelt, baseres på at personer, som kommer ind i rummet udefra, oplever et lokale uden lugtgener, som kunne give anledning til at beklage sig.

Tobaksrøg

Tobaksrøg i lokaler har tidligere været et stort problem og givet anledning til store ventilationsluftmængder. Med de forøgede krav til indeklima i de senere år er der kommet et generelt forbud imod rygning de fleste steder, hvilket gør en stor forskel, idet luften i et lokale forurenes seks gange mere af en ryger end af en ikke-ryger. Tobaksrøg kan give anledning til irritation af tilstedeværende personers øjne og næse region; røgen er meget skadelig og kan resultere i lungecancer.

Kuldioxid

Kuldioxid CO₂ forekommer naturligt i atmosfæren i en koncentration på ca. 0,04 vol.pct.; men er stigende, som følge af den globale store CO₂ udledning.

Luftarten indgår som en væsentlig faktor i hele klimaændringsdebatten, hvor den forøgede koncentration resulterer i drivhuseffekten, hvorved jordkloden bliver varmere og får mere ekstremt klima.

Årsagen til at CO₂ har stor interesse i ventilationsteknisk sammenhæng, er at det er en god indikator til at vurdere kvaliteten af et lokales luft. Som før nævnt er der ganske lidt CO₂ i den luft et menneske indånder, mens der i udåndingsluften er en koncentration på 4 vol.pct.

Det er således lettere at måle CO₂ indholdet i luften end menneskets øvrige bioeffluenter (det, der udskilles af menneskekroppen). En stor del af fornemmelsen af at være i et rum med dårlig luft har at gøre med udskillelsen af disse bioeffluenter og deriblandt altså også udskillelsen af kuldioxid fra udåndingsluften. Af denne årsag anvendes mængden af denne luftart til at sætte grænseværdier for indeluft. I komfortanlæg ønskes ikke værdier over til 0,1 vol.pct; men dette afhænger af den ønskede luftkvalitet, hvilket gennemgås andre steder i undervisningsmaterialet.

Det er menneskenes trivsel og velvære i lokalerne, der danner en forudsætning for kravene i forbindelse med komfortventilation. Det er vigtigt, at de tilstedeværendes arbejds- og koncentrationsevne samt velbefindende understøttes.

Kuldioxid i sig selv er ikke sundhedsskadelig; men der er sat nogle grænseværdier på arbejdspladser på 0,5 %, da der ved denne værdi vil kunne opleves f.eks. hovedpine og træthed samt generel utilpashed.

Som allerede nævnt i afsnittet om lugte vil en persons opfattelse af luften i et rum meget hurtigt blive tilpasset og tilvænnet. Dette i modsætning til når en person fra et renere miljø træder ind i et lokale, der er fyldt med dårlig luft. Det er derfor denne første oplevelse af luftkvaliteten, der bør anvendes i ventilationsteknisk sammenhæng.

Et menneskes udskillelse af kuldioxid (CO₂) er proportional med stofskiftet M (met). Et voksent menneskes udskillelse af kuldioxid regnes i l/h (q_{V,CO_2}):

$$q_{V,CO_2} = 17 \cdot M$$

Ligning 8-1

Emissioner fra byggematerialer

Emission – (latin), udsendelse, udstråling

- Kan være faste, flydende eller gasformige produkter
- Disse forekommer normalt ikke i den atmosfæriske luft

Opmærksomheden skal henledes på, at især ved nybyggeri sker der en del luftforurening. Formaldehyd og forskellige organiske opløsningsmidler udskilles af byggematerialer som maling, gulvbelægning, fugemasse og lim. Diverse overfladebehandlinger, som kan være f.eks. lak, olie og maling, kan også afgive skadelige partikler og dermed påvirke indeluften. Udskillelsen aftager dog med tiden. Der kan også være forurening i ventilationsanlæg.

Radon

Radon er en farveløs og lugtfri luftart, der udsender alfastråling. Den forekommer naturligt i undergrunden og siver herfra ind i bygninger. Den kan under uheldige forhold samles i store koncentrationer. Eftersom Radon hæfter sig på støvpartikler indåndes den, og da alfastrålingen forøger risikoen for lungecancer, er radonniveauet vigtigt. Alfastrålingens intensitet måles i Bq/m³ (becquerel pr kubikmeter luft), hvor 1 Bq svarer til 1 radioaktiv omdannelse pr sekund. Der kan ikke fastsættes nogen sundhedsskadelig grænseværdi, men værdier under 200 Bq/m³ anbefales af energistyrelsen, som også anbefaler ved forbedringer af en bygning, at sørge for at radonniveauet kommer under 100 Bq/m³. Grundig ventilation af lokaler er en metode til at reducere radonstrålingen på. Emnet vil ikke blive yderligere beskrevet her; men der henvises til speciallitteratur.

Partikler

Et lokale indeholder altid forskellige fremmedelemerter f.eks. bakterier, vira, hudskæl, pollen, mikroorganismer, papirstøv og fiberstøv fra tekstiler. Et fremmedelement, som er mindre end 50

μm benævnes en partikel, og kan grundet den meget lille størrelse holde sig svævende i lang tid. I denne forbindelse skal især bemærkes, at en partikel kan påvirkes af luftstrømme fra ventilationsanlæg.

Fugt

Mennesket er ikke særligt påvirket af luftfugtighed, så længe den relative luftfugtighed ligger mellem 30 og 70 %. Hvis den relative luftfugtighed kommer under 30 %, kan der ikke påvises skadelige virkninger; men det resulterer i, at næsens slimhinder tørrer ud, hvilket medfører at bakterier og vira ikke bliver opfanget og derfor føres videre i luftvejene, så hals- og lungeinfektioner fremmes. En relativ luftfugtighed på over 70 % bør undgås, da det giver grobund for mug og gode vilkår for husstøvmider. Høj relativ luftfugtighed kan også resultere i at metalgenstande kan ruste, og organisk materiale kan nedbrydes.

Om vinteren kan der være kølige overflader, som f.eks. et koldt vindue, og her vil en relativ høj fugtighed resultere i, at vanddampene mættes og kondenserer til vand. Dette giver en forøget fare for mikrovækst. Derfor bør den relative fugtighed holdes lavere end 50 % om vinteren.

Eftersom den relative luftfugtighed har begrænset indflydelse på menneskets velbefindende, har bygningsreglementet opstillet krav om, at befugtning af lokaler kun må finde sted under helt særlige forhold.

8.7. Ventilationsprincipper

I forbindelse med opbygning af et ventilationsanlæg er det vigtigt at vælge det rette ventilationsprincip for det pågældende rum og brugen af det – samt at sikre sig et tilfredsstillende atmosfærisk- og termisk indeklima.

Inden beregning af et ventilationsanlæg påbegyndes vil det være naturligt først at vurdere om et mekanisk ventilationsanlæg kan undværes. I (Den lille blå om Ventilation, 2016) er skematisk vist beslutningsprocessen i forbindelse med en ventilationsopgave, se Figur 8-2.

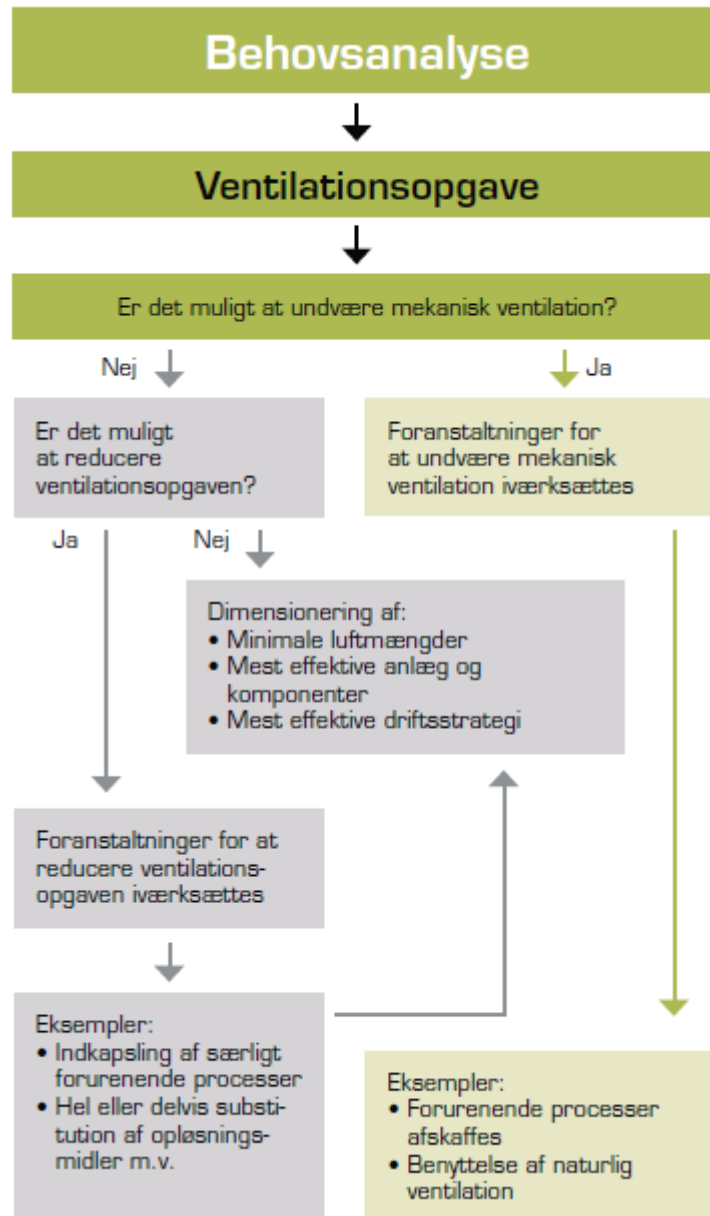
Ventilationsprincipper deles op i to hovedgrupper:

- komfortventilation omfatter ventilation af kontorer, boliger, og større forsamlingslokaler af forskellig art, etc. Komfortventilation har til formål at etablere et godt indeklima.
- procesventilation omfatter lokal ventilation (udsugning) fra forskellige forurenende processer. Procesventilation har til formål at forhindre forurening og varme i at forplante sig til den øvrige del af arbejdslokalet, således at det vil være nødvendigt at øge komfortventilation betragteligt

I dette kapitel vil kun komfortventilation blive behandlet, idet der henvises til speciallitteratur for yderligere information om procesventilation.

I forbindelse med komfortventilation anvendes primært to indblæsningsprincipper:

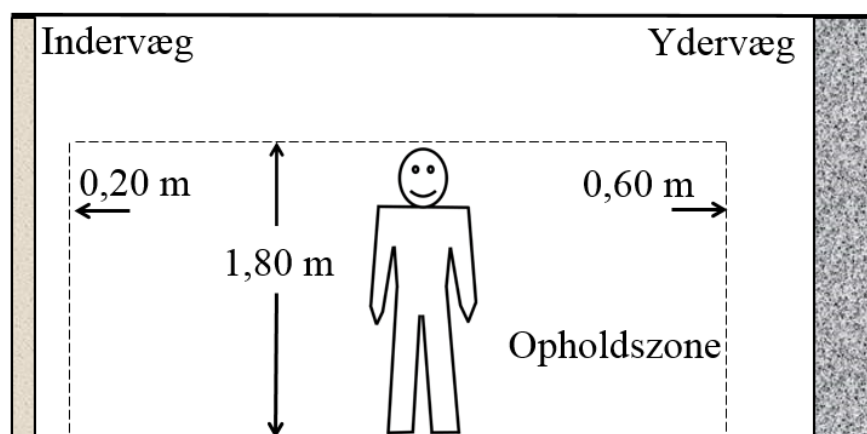
- opblandingsventilation
- fortrængningsventilation



Figur 8-2 Behovsanalyse ved ventilationsopgave. (Den lille blå om Ventilation, 2016) ”*venter for svar mht. tilladelse – Jakub ordner dette generelt*”

Opholdszone

Når et lokale skal ventileres, er det et ønske at fokusere på de områder, hvor mennesker sædvanligvis befinder sig, og derfor defineres en opholdszone, som det område hvor det ønskede indeklima bør være til stede. På Figur 8-3 er illustreret definitionen på en opholdszone, og denne er kendetegnet ved et område fra gulv til en højde på 1,80 m, en afstand fra ydervægge på 0,6 m med vinduer og 0,3 m uden vinduer, og for indervægge en afstand på 0,2 m. I BR18; § 421 henvises til DS447 (2005) for projektering af ventilationsanlæg, og i DS447; 3.3.8 defineres opholdszonen. Det er altid den sidste reference, som er gældende.



Figur 8-3 Opholdszone er det område, hvor mennesker sædvanligvis befinder sig og hvor det ønskede indeklima bør være til stede

Opblandingsventilation

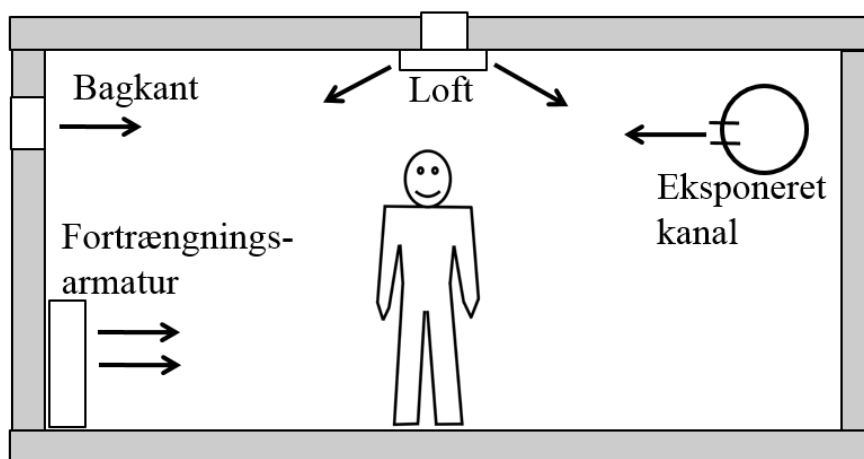
Armaturlacering – Indblæsning

Når der anvendes opblandingsventilation har det stor betydning at placere indblæsningsarmaturerne på en fornuftig måde ud fra rummets geometri. I mange tilfælde vil konstruktionsmæssige dragere og søjler give en naturlig placering for armaturerne, da tilslutningskanalerne skal have den nødvendige plads og derfor i mange tilfælde føres parallelt med dragere af pladmæssige årsager. I tillæg vil det også være hensigtsmæssigt at placere armaturerne i centrum for kvadratiske flader for at opnå tilnærmelsesvis samme geometriske længder i begge retninger i fladens plan, se senere.

Figur 8-4 viser tre mulige indblæsningsmåder for opblandingsventilation

- En placering midt i rummet enten i selve loftet eller i nogen afstand fra loftet. Denne løsning er udmærket ved store, ikke for højloftede lokaler
- En placering ved en væg eller i loft ved en væg. Denne løsning er udmærket ved små rum hvor ventilationens rækkevidde er tilfredsstillende
- En placering ved at en kanal føres gennem rummet og indblæsning foregår herfra. Denne løsning anvendes hvor der ikke er plads til en skjult kanalføring eller der er højloftede lokaler

Ved placering af indblæsningsarmaturer er det vigtigt, at der kommer en god gennemluftning af lokalet samtidig, med at generende træk i opholdszonen undgås, og kravene fra bygningsreglementet overholdes.



Figur 8-4 Viser hvordan der ved opblandingsventilation kan anvendes forskellige indblæsningsmuligheder: 1) Loft / midt i lokale, 2) Bagkant / ved væg, 3) Eksponeret kanal. Vist er også placeringen af et fortrængningsarmatur ved gulv.

Indblæsning – kastelængde

Den anbefalede hastighed for tilslutningskanaler til armaturer er på 2-3 m/s, og dette er hastigheden luften forlader armaturet med. Denne hastighed bliver reduceret i retning af opholdszonen, fordi den kommer i kontakt med den stillestående luft i opholdszonen.

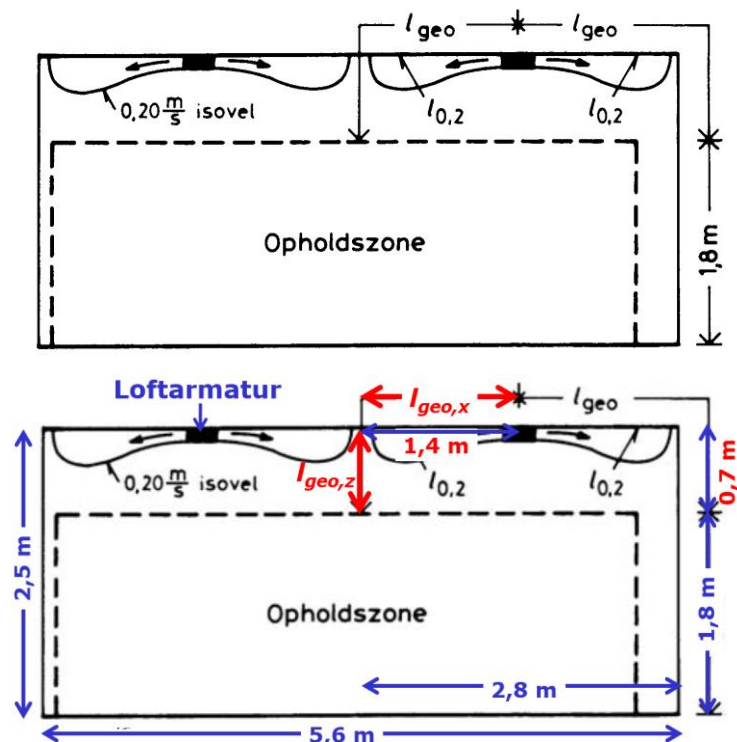
I forbindelse med dimensionering af armaturer anvendes begrebet kastelængde l_v , som er betegnelsen for den største afstand mellem indblæsningsåbningen og den geometriske flade (isovelen), hvor hastigheden hvor som helst sættes til v m/s.

Betegnelsen isoveler bruges om punkter med samme hastighed i en luftbevægelse f.eks. fra en indblæsningsåbning. Begrebet er analogt til begrebet vejrkortets isobarer, hvor trykket er det samme i de pågældende linjer.

Normalt anvendes en hastighed på 0,2 m i forbindelse med kastelængden, og denne betegnes med kastelængden $l_{0,2}$, hvilket svarer til at hastigheden i denne isoveler er på 0,2 m/s, se fig. 6.2. Ved at vælge en hastighed på 0,2 m/s sikres at hastigheden i opholdszonen ikke kommer over denne hastighed. Normalt er der et krav i en opholdszone at lufthastigheden ikke må overstige 0,15 m/s, og således er hastigheden på de 0,2 m/s svarende til kastelængden $l_{0,2}$. I praksis har dette ikke den store betydning, da det kun er i opholdszonens begrænsningsflader at hastigheden kortvarigt er lidt større.

Kastelængden er defineret ved afstanden fra armaturets midte til isovelens fjerneste punkt, se Figur 8-5.

I forbindelse med vurderingen af kvaliteten på indblæsningen indgår begrebet geometrisk længde l_{geo} , der er afstanden fra armaturets midte til en væg eller en modsatgående luftstrøm, som får indblæsningsluften til at dreje nedad mod opholdszonen. Den geometriske længde får således en vandret komponent fra armaturets midte til væggen $l_{geo,x}$, og en lodret komponent fra undersiden af det nedhængte loft til opholdszonen $l_{geo,z}$, se Figur 8-5. Opmærksomheden henledes på at den vandrette komponent for den geometriske længde har to vandrette komponenter i XY-planet $l_{geo,x}$, og $l_{geo,y}$.



Figur 8-5 Definition af kastelængde $l_{0,2}$ og geometrisk længde l_{geo} . Den nederste figur er et eksempel med tal indsat.

Der ønskes en god gennemluftning af rummet, og dette opnås ved en stor kastelængde. Samtidig må kastelængden ikke blive for lang, og for at undgå dette er det nødvendigt, at kastelængden er mindre end eller lig den geometriske længde, hvilket resulterer i at forholdet mellem kastelængden og den geometriske længde skal være mindre end eller lig 1. Samtidig må kastelængden ikke være for kort, da dette kan resultere i en dårlig gennemluftning af rummet. Forholdet mellem kastelængden og den geometriske længde bør derfor opfylde ulighederne i:

$$0,5 \leq (\text{"Skal"}) \frac{l_{0,2}}{l_{geo}} \leq 1 \quad 0,75 \leq (\text{"Bør"}) \frac{l_{0,2}}{l_{geo}} \leq 1 \quad \text{Ligning 8-2}$$

Kriteriet i den højre del af ligning giver den bedste gennemluftning af rummet, og er det, der bør tilstræbes, og at betingelsen med 0,75 er klart at foretrække. Der kan imidlertid i mange tilfælde være problemer med at opfylde dette kriterium, når lydkrav og dermed støjgener skal indgå i den samlede vurdering. Kravet er specielt et problem i forbindelse med boligventilation, hvor luftmængderne er relativt lave. Derfor kan det være nødvendigt at slække på kriterierne eftersom krav til støj og træk er væsentligere end krav til god gennemluftning, og derfor kan den venstre ligning blive aktuel med en mindste værdi på 0,5 og en maksimalværdi på 1,0. Det er imidlertid ubetinget nødvendigt, at værdien ikke kommer ned under 0,5, da der derved vil være stor fare for, at der ikke forekommer opblanding i lokalet, og ventilationen ikke har den tilsigtede effekt.

Dette betyder, at luften ikke bliver udskiftet så effektivt i rummet. Desuden skal der gøres opmærksom på, at en værdi nede omkring 0,5 ikke er ønskelig.

Selve strømningsbilledet i et lokale er et kompliceret samspil, idet træk fra åbne døre og vinduer, fra utætte bygningsdele og fra radiatorer i kombination med indblæsning fra armaturerne giver et meget komplekst strømningsbillede. Samlet set kan der derfor godt komme lufthastigheder, der overstiger den maksimale lufthastighed i opholdszonen.

I det foregående er der ikke blevet omtalt ventilationsluftens temperatur i forhold til rumluftens temperatur. Der er tre muligheder for sammenhængen mellem de to temperaturer:

- Ventilationsluftens temperatur er den samme som rumluftens temperatur – Isoterme forhold
- Opvarmning: Ventilationsluftens temperatur er højere end rumluftens temperatur – Ikke-isoterme forhold
- Køling: Ventilationsluftens temperatur er lavere end rumluftens temperatur – Ikke-isoterme forhold

Isoterme forhold

Hvis ventilationsluften har samme temperatur som rumluften er der isoterme forhold, og Ligning 8-2 kan umiddelbart anvendes.

Ikke-isoterme forhold – Opvarmning

Det er ikke så ofte, at ventilationsluften benyttes til opvarmning; men hvis den anvendes, er det vigtigt, at stråleretningen rettes nedad, eftersom den varme luft har en højere temperatur og dermed en lavere densitet.

Ikke-isoterme forhold – Køling

Hvis ventilationsluften benyttes til at køle med vil indblæsningstemperaturen fra armaturet have en lavere temperatur end rumluften og der er tale om ikke-isoterme forhold. Der kan indblæses med undertemperaturer op til 12 K; men det er meget vigtigt, at armaturet er udviklet til at kunne håndtere så stor en temperaturforskel ellers risikeres, at der kommer utilsigtet kuldenedfald og dermed uacceptable forhold. Når der indblæses med en undertemperatur, vil de ikke-isoterme forhold bevirke at luften drejer nedad, da den kolde luft har en højere densitet end rumluften. Dette influerer på størrelsen af kastelængden, som bliver reduceret med 1,5 % pr. grads underafkøling. På denne måde bliver kriterierne for om kastelængderne opfylder kriterierne i forhold til de geometriske længder mere komplicerede, og kravene bliver derfor følgende:

$$0,5 \cdot \frac{1}{1 - (\Delta\theta_{Køle} \cdot 0,015)} \leq ("Skal") \frac{l_{0,2}}{l_{geo}} \leq 1$$

$$0,75 \cdot \frac{1}{1 - (\Delta\theta_{Køle} \cdot 0,015)} \leq ("Bør") \frac{l_{0,2}}{l_{geo}} \leq 1$$

Ligning 8-3

Armaturlacering – Udsugning

Placering af udsugningsarmaturer er langt mindre kompliceret end for indblæsningsarmaturer. Dette hænger sammen med at udsugning kun giver større hastigheder i et lokalt område meget tæt på udsugningsåbningen. Det kan illustreres med, at det er let at puste et lys ud svarende til indblæsningsarmatur, hvorimod at det er næsten umuligt at suge et lys ud svarende til et udsugningsarmatur. Af denne årsag er der relativ stor frihed med hensyn til placering af udsugningsarmatur, eftersom luften fra indblæsning kun i mindre grad påvirker udsugningen. Der er nogle enkle kriterier, som der bør overholdes for udsugningsarmatur:

- Udsugningsåbningen bør placeres så indblæsningen af den isoterme luft ikke kommer direkte ind i udsugningen
- For at den varme luft bliver opsamlet, er det en fordel, at udsugningsåbningen anbringes højt oppe
- Hvis der er klimaskærm bør udsugningsåbningen ikke anbringes i nærheden, fordi det dannede undertryk i området kan trække kold luft ind.
- Hvis der er forureningskilder bør udsugningsåbningen placeres herved så nær som muligt

Det er således muligt at anvende enkle armaturer til udsugning. Af arkitektoniske årsager for at opnå et harmonisk udseende i rummet anvendes dog ofte samme armaturtype.

8.8. Kanalsystem

Generelt

Efter det er blevet bestemt, hvorledes kanaler for luftindtag samt kanaler for afkast skal placeres, skal selve kanalsystemet udformes. Det er her vigtigt at være opmærksom på, at kanalsystemet optager meget plads, og det derfor skal ind i projekteringen i en tidlig fase. Af denne årsag skal et forslag til kanalføringer med den nødvendige plads til kanalerne, drøftes med arkitekten allerede ved første fremlæggelse af skitser for bygningen.

Ligeledes er det vigtigt at fremlægge et detailprojekt for ventilationsanlægget, når totalprojektet præsenteres. Dette detailprojekt skal udformes med bygningstegninger for ventilationskanalerne, som er indtegnet i målestoksforhold 1:20 eller 1:50, for at der allerede på dette tidspunkt afsættes den fornødne plads til kanalsystemets gennemføringer, ligesom der skal gøres overvejelser vedr. bærende konstruktioner og andre installationer. Det er også vigtigt at tage hensyn til evt. isolering af kanalerne, ligesom der skal afsættes plads til lydæmpere i anlægget.

Et kanalsystem kan inddeles i følgende, se Figur 8-1:

- Indblæsning: Forsyningsdel mellem udeluft og aggregat
- Indblæsning: Fra aggregat via forgrenet kanalsystem til armatur i de enkelte rum
- Udsugning: Fra armatur i de enkelte rum via forgrenet kanalsystem til aggregat
- Udsugning: Afkastningsdel mellem aggregat og udeluft

Det er et krav fra Bygningsreglementet, at alle bygninger med undtagelse af enfamiliehuse skal have mekanisk ventilation.

Sædvanligvis anvendes balanceret mekanisk ventilation, hvilket vil sige, at den luftmængde, der føres ind gennem kanal for indtag, er den samme eller næsten den samme, som den luftmængde, der føres ud gennem kanal for afkast.

Prisen for selve kanalsystemet i et ventilationsanlæg udgør mellem 15 og 40% af den totale anlægspris. Den mest optimale værdi opnås, hvis der tages hensyn til at:

- brug af trykregulerende komponenter begrænses. Dette sker når anlægget opbygges symmetrisk, hvorved luftmassen gøres til genstand for næsten ens tryktab
- der i forbindelse med dimensioneringen arbejdes med fordeling af volumenstrømmene i anlægget, så der opnås en balance.
- tryktabet i kanalsystemet er rigtigt dimensioneret i tryktabsberegningen og udformet så strømlinet som muligt, f.eks. med bøjninger i stedet for knæk.
- kanalsystemets lækage minimeres ved valg af optimal tæthedsklasse, samt en begrænsning af kanalsystemets indvendige overflade, fastsættelse af driftstryk og valg af tæthedsklasse minimerer kanalsystemets lækage.
- der etableres en samlet kanalstrækning, som er så kort som mulig ved opbygning af kanalsystemets konstruktion og placering af aggregatet.

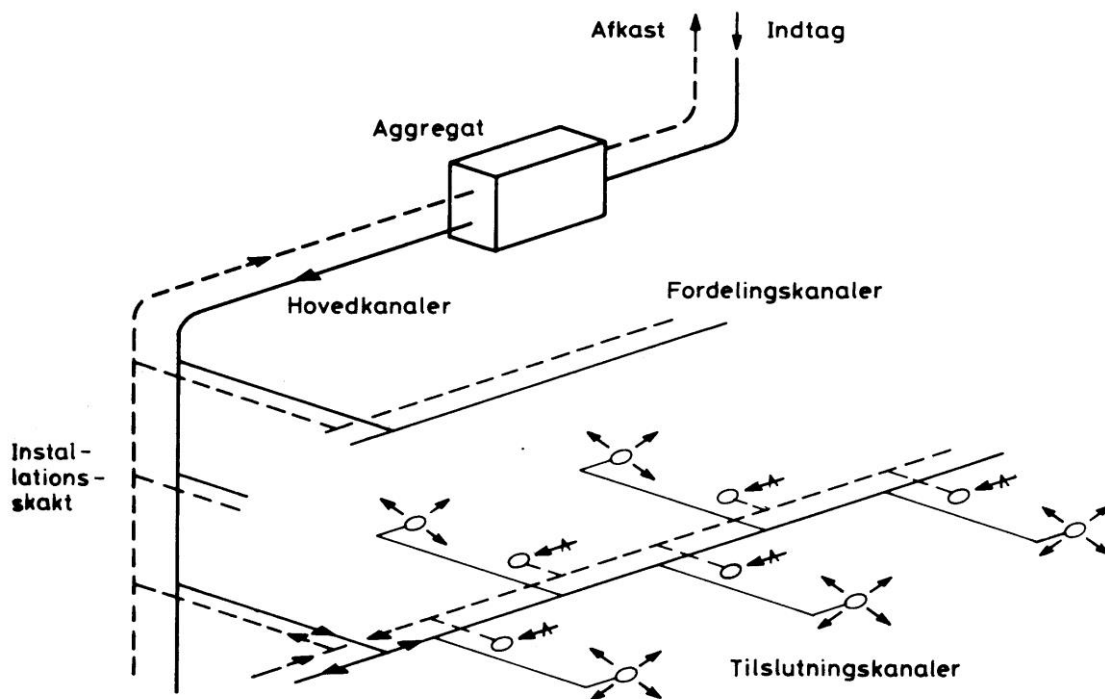
En asymmetrisk opbygning af anlægget vil resultere i at der skal optages store trykdifferencer over den nærmeste ventil og dette kan skabe risiko for ubehagelig lyd. Af denne årsag vil det være en fordel at opbygge anlægget symmetrisk. For at opnå den bedste udformning af anlægget kan det også være en fordel at opdele ventilationsanlægget i flere mindre enheder.

Opbygning

Opbygningen af et kanalsystem i et ventilationsanlæg er vist i skematisk form på Figur 8-6.

Kanalsystemet består af to dele:

- Kanaler for luftindtag
- Kanaler for afkast



Figur 8-6 I skematisk form er vist opbygning af kanalsystem i et ventilationsanlæg med kanaler til indtag og afkast. Desuden er vist aggregat og tilslutningskanaler til armaturer

Fra indtaget via taghætten føres luften til aggregatet. Fra aggregatet videreføres luften gennem hovedkanaler, som går til installationsskakten, hvor luften viderebringes opad eller nedad til de enkelte etager i bygningen. På de enkelte etager fører fordelingskanaler luften frem til tilslutningskanalerne, hvor de enkelte armaturer forsynes. På tilsvarende måde foregår udsugningen den modsatte vej gennem udsugningskanalerne.

Støj

For at undgå problemer med støj er det en fordel, at hovedkanaler og fordelingskanaler bliver placeret i bygningens mindst støjfølsomme områder. Hovedkanaler føres i installationsskakte, og fordelingskanaler føres i korridorer over nedhængte lofter. I tillæg bør kanaler kun føres til og fra rum og ikke imellem dem for på denne måde at reducere støjoverførsel mellem rum.

Isolering

Hvis der er behov for køling i ventilationsanlægget, og der derfor er behov for, at indblæsningssystemet fører luft med stor undertemperatur i en større del af driftstiden, vil det være nødvendigt at isolere kanalerne med en 30-40 mm tyk kappe af mineraluld. Isoleringen er for at modvirke, at energi tabes ved passage af lokaler uden kølebehov, således at luften med undertemperaturer bliver ført frem til, hvor selve behovet er. Ligeledes skal isoleringen modvirke kondensdannelse.

Runde- og rektangulære kanaler

Det er muligt at udforme kanaltværsnit på to hovedformer:

- Runde kanaler
- Rektangulære kanaler

Runde kanaler vil for et givet areal have den mindste omkreds og dermed også det mindste materialeforbrug. For rektangulære kanaler gælder, at omkredsen tiltager med øgende sideforhold, og et kvadratisk tværsnit vil derfor være det bedste valg for en rektangulær kanal. Det er anerkendt viden, at runde kanaler giver det mindste tryktab for et givet tværsnitsareal, og herudover vil det gælde for rektangulære kanaler, at tryktabet stiger når sideforholdet øges.

Runde kanaler

Runde kanaler bliver anvendt i langt de fleste tilfælde og kun under særlige forhold anvendes rektangulære kanaler. Årsagen til dette er, at runde kanaler i forhold til rektangulære kanaler har følgende fordele:

- lavere pris i produktion og montering
- mindre lækage og dermed bedre tæthed
- lettere at isolere
- mere overskuelig lagerføring

Runde lige kanaler er primært spiralfalsede tyndpladerør, i daglig tale betegnet Spirorør. Disse fremstilles som forholdsvis lette rør med vægtykkelser fra 0,4 mm til 1,5 mm og en længde på normalt 6 m. I tillæg passer de til mange normalt lagerførte standardiserede faconstykker.

Rektangulære kanaler

Som det fremgår af det forrige afsnit, er runde kanaler mere optimale end rektangulære, og derfor skal brug af rektangulære kanaler begrænses til områder i kanalsystemet, hvor der er begrænset plads, som ved passage af bærende konstruktioner, andre installationer eller over nedhængt loft hvor der ikke er plads til runde kanaler. Herudover anvendes de i forbindelse med aggregatet som overgangstykker til kanalsystemet med runde kanaler.

Kanal- og faconstykker kan udarbejdes i mange varianter, idet det dog anbefales at benytte dimensioner på højde og bredde, der er delelige med 50 mm.

Som tidligere beskrevet har kvadratiske kanaler den bedste ydeevne for rektangulære kanaler. Dog vil der netop ved en begrænset plads være behov for at reducere højden af kanalen for at få den fornødne plads. Fordelen ved anvendelse af rektangulære kanaler er, at de kan benyttes til at løse problematiske forhold, hvor der kun er begrænset plads til rådighed.

Kanaldimensionering

Ved dimensionering af kanalsystemet kan der teoretisk set vælges kanaldimensioner helt vilkårligt, blot der sørges for, at der i projektet er et tilstrækkeligt antal spjæld. Dette for at anlægget kan reguleres således, at der kommer den korrekte luftmængde til de enkelt rum i

kombination med, at der er et aggregat, som kan give det nødvendige tryk. Dette vil imidlertid give anledning til, at der over et stort antal ventiler skal optages unødvendigt store trykforskelle, hvilket vil resultere i et højt energiforbrug. Ligeledes vil det give lydgener fra de enkelte ventiler, som optager trykkene. Det er derfor nødvendigt at foretage en kanaldimensionering, der kan give det bedst mulige forhold for energiforbrug, luftmængde og lydforhold.

Et ventilationsanlæg vil altid indstille sig i en trykbalance, hvor tryktabet fra f.eks. aggregatet til de enkelte ventiler vil være lige stort, eftersom trykket ude i rummet vil være 0. At ventilationsanlægget er i trykbalance, er imidlertid ikke det samme som, at der kommer de ønskede luftmængder til de enkelte rum. Det er derfor nødvendigt at anvende en dimensioneringsmetode, hvor anlægget via spjæld kan indreguleres således, at der kommer den projekterede luftmængde til de enkelte rum.

I forbindelse med kanaldimensioneringen bestemmes kanalernes tværsnitsdimensioner, som er et kompromis mellem behovet for lave hastigheder (store dimensioner) og små dimensioner af pladshensyn. Små dimensioner kan imidlertid resultere i kanalstøj, og derfor er det en balancegang, samtidig med at små dimensioner vil give et større tryktab og dermed et større energitab.

Konstant hastighed for kanaltyper

Størrelsen på kanalerne afhænger af kanaltypen:

- Tilslutningskanaler: 2 – 3 m/s
- Fordelingskanaler:
 - Til rum 2 – 4 m/s
 - Mellem rum 4 – 6 m/s
- Hovedkanaler: 6 – 8 m/s

I forbindelse med VAV-anlæg skal man være opmærksom på, at spjældene afgiver en del støj, så af denne årsag dimensioneres der i fordelingskanalerne med en maksimal hastighed på 4 m/s.

Det nødvendige kanaltværsnit kan beregnes på baggrund af kontinuitetsligningen:

$$q_V = v \cdot A$$

Ligning 8-4

På baggrund af ventilationsdiagrammet kendes de enkelte luftmængder for de enkelte strækninger, i kombination med at typen af kanalen kendes med den tilhørende ønskede hastighed, hvorfra arealet A kan findes. I de fleste tilfælde anvendes runde kanaler, og her kan den ønskede mindste diameter findes ved indsættelse af den øvre grænsehastighed for hastighedsintervallet, v_{\max} :

$$d > \sqrt{\frac{4 \cdot q_V}{\pi \cdot v_{\max}}}$$

Ligning 8-5

Ud fra funden mindste diameter kan størrelsen på standarddimension for runde kanaler vurderes, og den nærmeste større dimension vælges.

Konstant tryktab

Ved konstant tryktabsmetode benyttes en maksimal trykgradient for de tre kanaltyper. Denne trykgradient kan f eks være $R_{\max} = 1 \text{ Pa/m}$. Trykgradienten R beregnes ved brug af Colebrooks formel, se Ligning 8-11 og Ligning 8-13:

$$\frac{v}{\sqrt{dR/\rho}} = -1,23 \cdot \ln \left[\frac{1,8 \cdot \nu_1}{\sqrt{dR/\rho} \cdot d} + \frac{h_{ru}}{3,7 \cdot d} \right]$$

Ligning 8-6

hvor

ρ er luftens densitet (= $1,2 \text{ kg/m}^3$ ved 20°C)

ν_1 er luftens kinematiske viskositet
(= $15,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ved 20°C)

h_{ru} er vægruheden (= $0,15 \text{ mm}$ for tyndpladekanaler)

Colebrooks formel er gældende for fuldt udviklet turbulent strømning, som er opfyldt når R er på 1 Pa/m .

Med en trykgradient R på 1 Pascal/m kan der for en given diameter beregnes den maksimale hastighed og volumenstrøm, hvilket er vist på **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.** og disse værdier kan benyttes som vejledende værdier ved dimensionering ved denne trykgradient.

Tabel 8-1 Maksimal hastighed og volumenstrøm i kanaler med trykgradient 1 Pa/m

Diameter (mm)	Maksimal hastighed (m/s)	Maksimal Volumenstrøm (m ³ /s)	Trykgradient (Pa/m)
100	2,3	0,018	1
125	2,7	0,034	1
160	3,3	0,065	1
200	3,8	0,119	1
250	4,4	0,216	1
315	5,1	0,400	1
400	6,0	0,750	1
500	6,9	1,360	1
630	8,0	2,500	1

8.9. Tryktabsberegning

For at opnå den korrekte luftfordeling i de enkelte rum er det nødvendigt at beregne tryktabet i kanalsystemet. Hvis denne beregning udføres omhyggeligt, vil det også kunne give anledning til at reducere energiforbruget. Beregningen af tryktabet i kanalsystemet vil være forbundet med en vis usikkerhed; men dette skal ses i forhold til, at når anlægget udføres i praksis, vil de forskellige bygningsmæssige forhold give anledning til afvigelser i forhold til det beregnede kanalsystem. Disse afvigelser må derefter klares ved hjælp af en korrekt indregulering. Beregningen af kanalsystemet er med til at dimensionere ventilatorerne, som skal drive luften ind og ud af bygningen.

Tryktabsberegningen kan også hjælpe med at bestemme de aktuelle tryktab, der skal indgå i kanalsystemet med reguleringsspjæld for at opnå de ønskede luftstrømme i de enkelte rum. Spjældmodstandene har betydning for lydforholdene, og for store tryktab i spjældene kan give anledning til lydgener.

Trykforhold i kanaler

Ved beregning af trykforhold i kanaler anvendes tre slags tryk:

$$\begin{array}{rcl} p_t & = & p_s + p_d \\ \text{totalt} & & \text{statisk} \quad \text{dynamisk} \\ \text{tryk} & & \text{tryk} \quad \text{tryk} \end{array} \qquad \text{Ligning 8-7}$$

- P_t (Pa) det totale tryk, som kan være positivt, 0 eller negativt. Det totale tryk vil aftage i strømretningen, med mindre strømmingen modtager energi fra f. eks. en ventilator.
- P_s (Pa) det statiske tryk i luftstrømmen, som kan være positivt, 0 eller negativt, og repræsenterer et overtryk i forhold til atmosfæretrykket. Det virker ens i alle retninger.
- P_d (Pa) det dynamiske tryk/hastighedstrykket er betegnelsen for den kinetiske energi af en volumenenhed af den strømmende luft. Det virker i luftens bevægelsesretning og er altid positivt

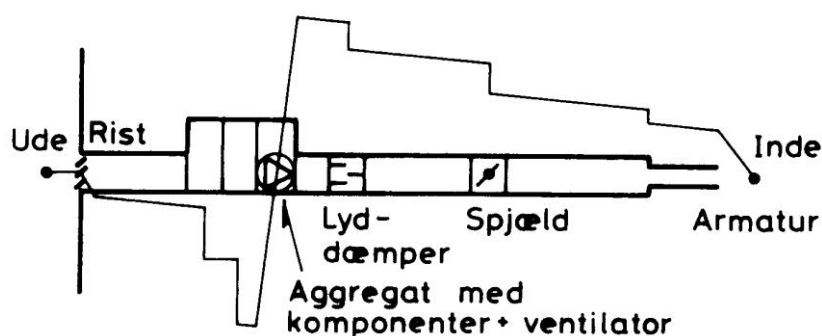
Det dynamiske tryk p_d er betegnelsen for den kinetiske energi og beregnes af denne ligning:

$$P_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \qquad \text{Ligning 8-8}$$

Hvis luften har en temperatur på 20 °C kan ovenstående ligning tilnærmes som følger:

$$P_d \approx 0,6 \cdot v^2 \qquad \text{Ligning 8-9}$$

På nedenstående figur ses illustreret hvorledes det totale tryk og det dynamiske tryk varierer gennem en enkeltkanal. Som det kan bemærkes varierer trykkene i hele kanalsystemet. Det totale tryk indeholder luftens totale energi, der forårsaget af enkeltmodstande og friktion omsættes til varme. Det dynamiske tryk repræsenterer hastighedsenergien. På figuren fremgår det, at forløbet fra luftindtaget til ventilatoren er negativt, og efter energitilførsel fra ventilatoren får et positivt forløb, indtil trykket vender tilbage til nul i forbindelse med indblæsningen af luften gennem armaturet til rummet. Opmærksomheden skal henledes på, at det tryk, som ventilatoren skal frembringe, er den numeriske sum af minimumstrykket før ventilatoren plus maksimumstrykket efter ventilatoren.



Figur 8-7 Det totale tryk er negativt fra luftindtag til ventilator i aggregat og positivt videre herfra til indblæsningsarmatur. Det totale tryk består af statisk og dynamisk tryk

Uden for taghætten er det statiske tryk nul, hvorpå luften bliver accelereret i indløbet til taghætten, hvorved der opstår et negativt statisk tryk, der numerisk er lig med det dynamiske tryk.

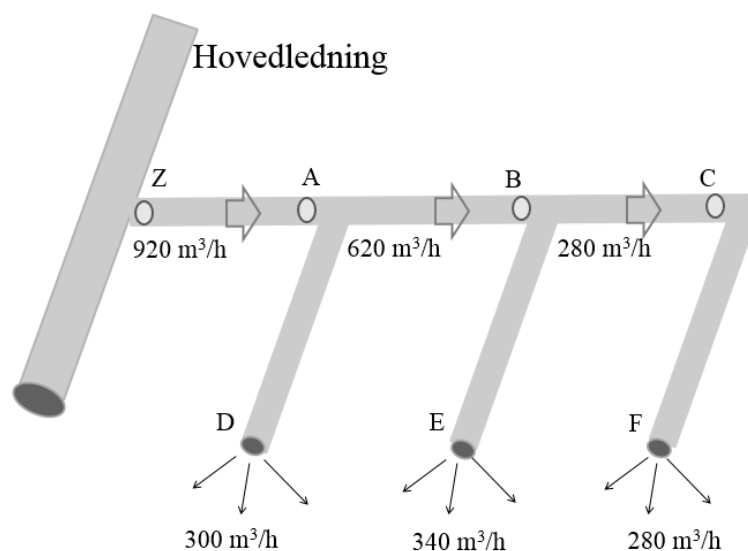
Generelt foretages beregningerne af tryktabet i kanalsystemet ved brug af edb-programmer, der i sin enkleste form består af regneark, hvor alle de nødvendige formler er indlagt. Et enkelt eksempel på et sådant program er (KAT programmet, 2018), der kan håndtere beregningen af tryktab i hele kanalsystemet for både indblæsning og udsugning. (KAT programmet, 2018) anvendes både af de studerende på DTU BYG og Maskinmesterskolen i København. Generelt set er det vigtigt, at ingeniører og maskinmestre kan vurdere beregningsprogrammernes korrekthed. Derfor skal de have de grundlæggende faglige kompetencer til selv at kunne beregne opbygning af et kanalsystem for at være i stand til at kunne foretage de nødvendige kontroller.

I nærværende publikation vil hele gennemgangen af beregningsark for opbygning af et kanalsystem ikke blive gennemgået, idet der henvises til KOMFORTVENTILATION og beskrivelsen af (KAT programmet, 2016). Der vil i stedet blive fokuseret på gennemgangen af de grundlæggende elementer for en tryktabsberegning i et kanalsystem, således at delelementerne i EDB programmerne kan vurderes og forstås.

Dimensionering af et kanalsystem – Trykbalance

I forbindelse med dimensionering af et kanalsystem er målet, at der kommer de korrekte luftmængder til de enkelte rum. For at illustrere denne problemstilling og hvordan det løses, gennemgås begrebet trykbalance i et mindre del kanalnet.

På Figur 8-8 er vist et mindre udsnit af et kanalnet, der skal levere de viste volumenstrømme. Dette sker imidlertid ikke automatisk, da luften altid vil forsøge at finde den letteste/korteste vej. I dette tilfælde vil det være fra Z via A til D, hvis denne strækning har det laveste tryk i forhold til de længere strækninger via B-E og C-F. På denne måde vil den største luftmængde komme til armaturet D på bekostning af E og F.



Figur 8-8 For at opnå at der kommer de korrekte luftmængder til de enkelte rum, er det nødvendigt med trykbalance i kanalnettet.

Fra det givne tryk i punktet Z til punkterne D, E og F er der den samme trykforskel, da det totale tryk efter udløbet fra armaturerne vil blive lig med nul. Det er derfor nødvendigt at tilpasse tryktabet på hver enkelt strækning samt skabe en trykbalance svarende til de ønskede volumenstrømme, således at luften overalt møder en ensartet strømningsmodstand.

For at foretage beregningen til at skabe trykbalance i det mindre kanaludsnit startes ved det fjerneste armatur F, der har den største afstand til Z og derfor også forventeligt det største tryktab. Dette kan selvfølgelig også afstemmes ved brug af forskellige kanaldiametre, således at en meget lav diameter i strækningen A-D teoretisk set kan give et større tryktab end strækningen A-B-C-F, hvis der på denne strækning anvendes en stor dimension (i hvert fald på strækningen A-B-C). I armatur F vil der, når luften er blæst gennem armaturet ud i rummet, forekomme et tryk på nul (regnet i overtryk over atmosfæretryk). Fra armaturet F arbejdes op mod hovedledningen (punkt Z) idet tryk i punkterne C, B og A beregnes for at der kan skabes en trykbalance svarende til de ønskede volumenstrømme. I det følgende forklares principper for beregning.

Efter dette fortsættes med armatur E med tryk nul fra rumluften, og der regnes baglæns til punkt B. Tryktabet på strækningen fra F-C-B og tryktabet fra E-B vil med al sandsynlighed være forskelligt, og tryktabet på strækningen E-B vil forventeligt være det mindste. På denne måde er der opstået en ubalance, som det er nødvendigt at genetablere, og dette kan ske ved at placere et spjæld med en passende åbningsgrad, således at tryktabet på strækningen B-E bliver forøget lige netop tilstrækkeligt til at udligne tryktabet fra B-C-F.

På analog måde behandles strækningen A-D til bestemmelse af den nødvendige spjældmodstand i armatur D. På denne måde er det muligt at få skabt en trykbalance i det udvalgte kanaludsnit.

Denne beregning kan udvides på tilsvarende måde til andre kanaludsnit, og der kan beregnes de nødvendige zonespjæld svarende til Figur 8-8 punkt Z.

I dette eksempel forekommer tre armaturer D, E, F for CAV med indbyggede spjæld, der kan anvendes i forbindelse med at skabe den nødvendige trykbalance. Opmærksomheden henledes dog på, at grundet evt. støjgener vil de indbyggede spjæld ikke være i stand til at klare de helt store tryktab, da det ikke vil være muligt at foretage den nødvendige støj dæmpning. Dette i modsætning til pladespjæld i kanalerne, hvor der efterfølgende kan placeres en lyddæmper til at optage støjen.

Når det projekterede ventilationsanlæg er opført, vil der altid optræde afvigelser i forhold til det projekterede, og der vil derfor være behov for at indstille spjældene i forbindelse med indreguleringen for at levere de ønskede ventilationsmængder. Disse indstillinger kan afvige noget i forhold til de beregnede.

Trykforhold i lige kanal

Friktionstabet Δp_f i lange lige kanaler er proportionalt med kanalstrækningens længde l

$$\Delta p_f = R \cdot l \quad \text{Ligning 8-10}$$

I denne formel indgår trykgradienten R [Pa/m], og denne størrelse angiver det totale tryktab pr længdeenhed kanalstrækning. Det er muligt at beregne trykgradienten R ved brug af Colebrooks Ligning 8-11, der er angivet på implicit form med tilhørende stor nøjagtighed:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -0,87 \cdot \ln \left(\frac{2,5}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{h_{ru}}{3,7 \cdot D} \right) \quad \text{Ligning 8-11}$$

med forkortelsen λ i Ligning 8-11, der kan skrives på følgende form:

$$\lambda = \frac{g \cdot D \cdot S}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2} = \frac{D \cdot R}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2} \theta_u \quad \text{hvor: } R = g \cdot S \quad \text{Ligning 8-12}$$

I Ligning 8-11 afhænger λ kun af den relative ruhed h_{ru}/D og Reynolds tal Re .

For praktiske forhold er det ofte lettere at anvende Colebrooks formel på eksplicit form med tilhørende større unøjagtighed. Denne unøjagtighed er dog uden praktisk betydning i forhold til de mange andre usikkerhedsmomenter, der er forbundet med projektering og bygning af et ventilationsanlæg. Af denne årsag anvendes den eksplicite form af Colebrooks formel for trykgradienten R :

$$R = \frac{0,66 \cdot \rho \cdot v^2}{d \left[\ln \left[\frac{5,8}{Re^{0,9}} + \frac{h_{ru}}{3,7 \cdot d} \right] \right]^2} \quad \text{Ligning 8-13}$$

Ligning 8-13 anvendes hvis strømning er fuldt udviklet turbulent, hvilket sker når Reynolds tal Re er større end 3000 á 4000:

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu_l} \quad \text{Ligning 8-14}$$

hvor

ρ er luftens densitet (= 1,2 kg/m³ ved 20°C)

u er luftens hastighed – benyttet her i stedet for "v" for at undgå forveksling med symbol for ν_l

ν_l er luftens kinematiske viskositet (= 15,1·10⁻⁶ m²/s ved 20°C)

h_{ru} er vægruheden (= 0,15 mm for tyndpladekanaler)

Formelen kræver, at der er en fuldt udviklet turbulent strømning, hvilket normalt vil være opfyldt, idet der dog for tilslutningskanaler er gældende, at middelhastigheden skal være over 0,4 m/sek.

Da Ligning 8-13 for trykgradienten, beregnet ved brug af Colebrooks formel på eksplicit form, er lidt vanskelig at anvende umiddelbart, kan det være hensigtsmæssigt at anvende enkle regnearksprogrammer, som f.eks. KAT-programmet.

Tryktab i enkeltmodstande

Enkeltmodstande forekommer lokalt i kanalsystemet pga. tværsnitsændringer, bøjninger, afgreninger samt indsatte komponenter, og dette giver anledning til ændringer i strømningsforløbet.

Tryktabet for en enkeltmodstand i kanalsystemet er givet på formelen:

$$\Delta p_e = \zeta \cdot p_d \quad \text{Ligning 8-15}$$

Der gælder at tryktabsfaktoren ζ for en enkeltmodstand er en funktion af Reynolds tal, der dog i det turbulente område er så lille, at tryktabsfaktoren kan betragtes som en konstant for den pågældende geometriske form af enkeltmodstanden. I praksis forekommer tryktabet fra en enkeltmodstand over en vis kanallængde og indbefatter derfor også et friktionstab; men normalt ses der bort fra dette, og enkeltmodstanden tilknyttes blot den pågældende geometriske form.

Det er vigtigt ved angivelse af tryktabsfaktoren, at angive om den er koblet til det dynamiske tryk før eller efter enkeltmodstanden.

Enkeltmodstande kan normalt ikke beregnes, men findes ved brug af praktiske forsøg, og resultaterne fra disse fremgår af fabrikanternes kataloger.

ζ -værdierne måles i laboratorieforsøg under gunstige forhold og forudsætter, at der er en lige strækning på mindst seks gange den hydrauliske diameter før enkeltmodstanden.

I en del tilfælde vil en afstand på seks gange den hydrauliske diameter ikke kunne opnås, og ved montage af enkeltmodstande tæt efter hverandre vil der for den sidste enkeltmodstand opstå et meget turbulent forløb, og ζ -værdien kan blive mangedoblet.

8.10. Lydudbredelse

I bygninger kommer en stor del af støjgenerne fra installationer, og det er derfor vigtigt allerede på projekteringsstadiet at inkorporere problemløsninger i bestræbelserne på at reducere støjgener. Ved en fornuftig projektering er det relativt let at undgå støjgener fra installationer.

Dette afsnit omhandler teori og baggrund for at kunne foretage de nødvendige indgreb, således at lydudbredelse kan reduceres til et acceptabelt niveau.

Grundbegreber

Lyd er betegnelsen for hørbare tryksvingninger, og disse svingninger kan finde sted i luft, væsker eller faste stoffer. Når tryksvingninger rammer øret, bliver de bearbejdet af hjernen, og lyden kan således føles behagelig som f.eks. ved fuglesang eller irriterende, som f.eks. lyden fra en motor. Den måde, som vi oplever lyden på, er afgørende, og når den føles irriterende betegnes den som støj.

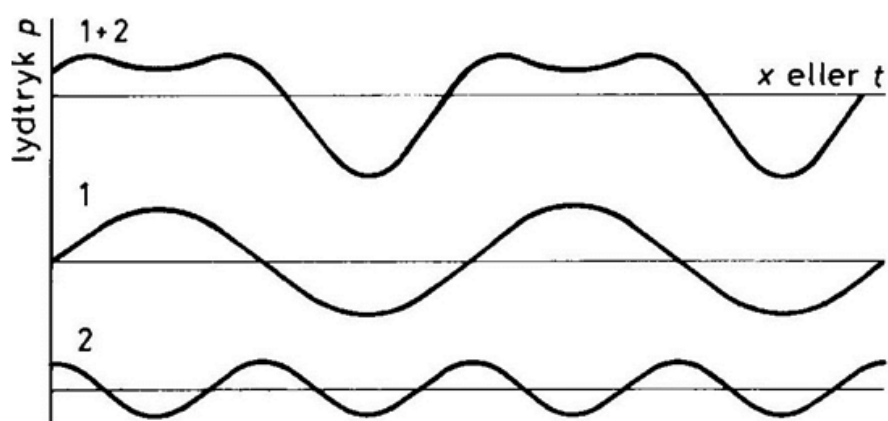
Lydudbredelse sker i form af en bølgebevægelse, og denne kan f.eks. opstå, når en højtalers membran svinger omkring en ligevægtstilstand. Når højtalerens membran svinger frem fra ligevægtstilstanden, vil luften blive presset sammen, og dette resulterer i, at der sker en trykstigning. Når membranen svinger tilbage, bliver der større afstand mellem luftmolekylerne, og der sker en reduktion af lufttrykket. Disse tryksvingninger vil forplante sig i lydudbredelsens retning, således at de tilstødende områder luft vil få en bølgebevægelse, hvor trykket svinger omkring atmosfærens tryk. Disse trykvariationer er kun ca. 1/1000 af atmosfære trykket selv ved meget høj lyd. Tryksvingningernes frekvens betegnes med Hz. Eftersom ørets måde at opfatte lyden på er frekvensafhængig, er det derfor nødvendigt at have standardiserede frekvensafhængige støjkriterier. Dette kan f.eks. være en NR-kurve (Noise Rating Curves), der er udført af ISO.

For at en lyd kan opfattes som lyd, skal hjernen være i stand til at opfatte den. For det menneskelige øre er den nedre frekvensgrænse omkring 20 Hz (20 svingninger pr. sekund) og den øvre frekvensgrænse omkring 20.000 Hz. Med alderen forsvinder evnen til at høre højere frekvenser, hvorfor ældre mennesker kun kan høre op til 10.000 Hz. En anden faktor, der har betydning, er lydtrykket, der beskriver lydets fysiske styrke, hvorvidt den er kraftig eller svag. Lydtrykket betegnes med måleenheden Pascal, og denne forkortes Pa. Den svageste lyd, et menneske kan opfatte som hørbar lyd, ligger på ca. 0,00002 Pa. I den anden ende af skalaen vil en lyd på 20 Pa opleves som en meget høj lyd, der giver anledning til smerte.

Ved lyd, der er så kraftig, at det er nødvendigt at benytte høreværn, vil trykket kun svinge 1/100.000 del af atmosfæretrykket svarende til atmosfæretrykket mellem 0,99999 og 1,00001.

Lyden fra et ventilationsanlæg har en kompliceret sammenhæng, som hvis den er periodisk, vil være i stand til at blive opløst i rene sinussvingninger.

På Figur 8-9 er illustreret to harmoniske svingninger, hvor lydbølge 1 har den dobbelte bølgelængde i forhold til lydbølge 2. Hvis de to lydbølger lægges sammen forekommer den sammensatte lydbølge 1+2 og formen på lydbølgen vil blive mere kompleks. I praksis består lyd af mange forskellige harmoniske bølger, der har hver deres amplitude og frekvens.



Figur 8-9 To harmoniske lydbølger adderet til en sammensat lydbølge (1+2)

Lydens hastighed

Bølgelængden er afstanden mellem bølgetoppene i en bølgebevægelse målt i en periode og angivet som λ .

Svingningstiden T er varigheden af en periode til at udføre en komplet svingning, se Figur 8-9 To harmoniske lydbølger adderet til en sammensat lydbølge

Frekvensen f er det antal svingninger, der foretages i løbet af et sekund.

Sammenhængen mellem frekvensen f og svingningstidens længde T er givet ved ligningen:

$$f = 1 / T = \omega / 2 \cdot \pi$$

Ligning 8-16

For lydens hastighed i den sinusformede bølgebevægelse gælder sammenhængen:

Frekvensen f er ved en harmonisk lydbølge forbundet med bølgelængden λ som vist på følgende ligning:

$$c = f \cdot \lambda \qquad \text{Ligning 8-17}$$

Her er c lydens hastighed i luft, som er beregnet til 344 m/s ved stuetemperatur. Heraf følger at bølgelængder vil være fra 17m til 17mm ved frekvensintervallerne fra 20 Hz til 20kHz.

For luft med en temperatur på θ grader celsius kan lydens hastighed skrives som ligningen:

$$c = 332 + 0,6 \cdot t [m / s] \qquad \text{Ligning 8-18}$$

Lydens hastighed er uafhængig af frekvensen. Normalt vil hastigheden i forbindelse med beregninger i ventilationsanlæg blive sat til 340 m/sek.

Lydens udbredelse

Lydens udbredelse afhænger af lydkildens fysiske form. En punktformig lydkilde vil således udbrede sig som sfæriske lydbølger, hvilket betyder at luftpartiklerne, som svinger i fase, danner kugleformede lydbølger. Jo større afstanden fra den punktformige kilde bliver, jo mindre bliver krumningen på kuglen og i en vis afstand vil lydbølgerne opfattes som plane.

Hvis lyden befinder sig i et rum, vil lydudbredelsen fra en punktformig kilde efter kort tid ramme begrænsningsfladerne fra de seks omgivende flader, og efter kort tid vil der opstå så mange forskellige lydbølger og indfaldsvinkler fra alle sider, at lydfeltet vil have samme energi i en vis afstand fra den punktformige kilde. Dette lydfelt betegnes som et diffust lydfelt.

I realiteten vil plane eller diffuse lydfelter kun forekomme meget sjældent; men af hensyn til ventilationstekniske beregninger tages der udgangspunkt i disse forhold, hvilket er tilladeligt under hensyntagen til den unøjagtighed, der er forbundet med beregning af lydudbredelse fra ventilationstekniske genstande.

Der kan for en sinusformet harmonisk lydbølge angives et lydtryks størrelse på baggrund af trykamplituden. I praksis består lydbølger af en sammensætning af en lang række sinusformede harmonisk lydbølger, og dette resulterer i, at de ikke har nogen amplitude, og de beskrives derfor af deres effektive tryk p_{eff} . Beregning af det effektive tryk p_{eff} foretages ved at tage kvadratet på det effektive tryk og sætte det lig med kvadratet på det aktuelle tryk målt over et passende langt tidsrum T :

$$p_{eff}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt$$

Ligning 8-19

Trykamplituden divideret med $\sqrt{2}$ giver det effektive tryk for en harmonisk bølge.

Som tidligere nævnt er de effektive tryk, der arbejdes med, ret små. De effektive tryk varierer fra det netop hørbare på ca. 20 μPa til ørets smertegrænse på omkring 20 Pa. Da dette dækker et meget stort interval, er det en fordel at angive lydtrykket ved brug af 10-tals logaritmen i form af et lydtrykniveau L_p :

$$L_p = 10 \log \frac{p_{eff}^2}{p_{ref}^2} = 20 \log \frac{p_{eff}}{p_{ref}}$$

Ligning 8-20

Det er defineret, at p_{ref} sættes lig med den netop hørbare værdi på 20 μPa .

Årsagen til at formlen indeholder kvadratet på lydtrykket er, at denne værdi er proportional med lydkildens lydeffekt.

Ligningens logaritmiske del angiver lydtrykniveauet i enheden bel og hele højre siden af Ligning 8-20 får derfor enheden decibel (dB).

Decibel begrebet

Der er meget stor forskel på den lydintensitet, der netop er hørbar (tærskelværdien) på 20 μPa og den lydintensitet, der frembringer smerte i øret på 20 Pa. Forholdet mellem disse to lydintensiteter er på ca. 10^{12} . Det er derfor uhensigtsmæssigt at anvende en lineær måleskala. Da den måde, som øret opfatter lyden på, samtidig er stort set logaritmisk, virker det logisk at anvende den logaritmiske decibel skala.

Det menneskelige øre kan lige akkurat skelne en forskel mellem to lydtrykniveauer på 1 dB, så derfor angives decibel værdier normalt ikke med decimaler. Ved en fordobling af p_{eff}^2 vokser lydtrykniveauet med $10 \cdot \log 2 = 3$ dB.

Regneregler for dB-værdier

I forbindelse med vurdering af lyd niveauer er det nødvendigt at udføre forskellige beregninger med decibel-værdier. Det er derfor en fordel at indføre en række regneregler:

Addition af dB-værdier L_1, L_2, \dots, L_n :

$$L = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_n}{10}} \right) \quad [dB]$$

Ligning 8-21

Subtraktion af dB-værdien L_2 fra dB-værdien L_1 :

$$L_1 - L_2 = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{L_1}{10}} - 10^{\frac{L_2}{10}} \right) [dB] \quad \text{Ligning 8-22}$$

Samlet værdi af n lige store dB-værdier L_1 :

$$L = L_1 + 10 \cdot \log n \quad [dB] \quad \text{Ligning 8-23}$$

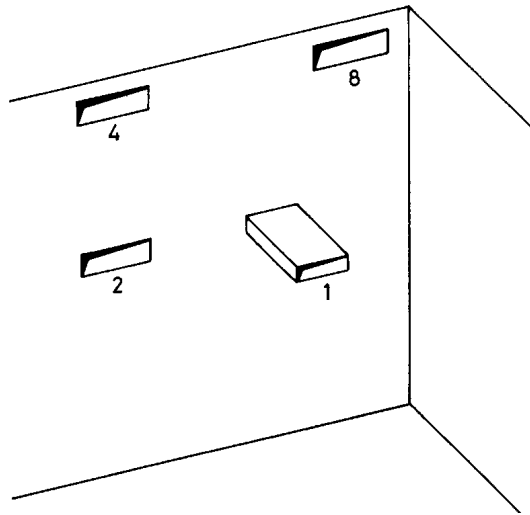
Lydintensitet

Når en punktførmig lydkilde afgiver ens energiudstråling i alle retninger vil energien udbrede sig som en kugleskal med arealet $4 \cdot \pi \cdot r^2$.

Lydintensiteten angiver, at mål for lydstyrken kan beregnes i et frit felt uden refleksioner:

$$I = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad \text{Ligning 8-24}$$

I praksis vil en lydkilde i et ventilationsanlæg ikke udbrede sig i et frit felt i alle retninger; men være begrænset i et rum af sideflader og gulv/lofts flader. Af denne årsag indføres retningsfaktoren D , der kan kompensere for, at spredningen er begrænset. Retningsfaktoren D er influeret af lydkildens placering i forhold til vægge og gulv/loft, Figur 8-10.



Figur 8-10 Lydkildens placering i forhold til vægge og gulv/loft påvirker retningsfaktoren D .

Lydintensiteten kan således beregnes i et rum ved brug af Figur 8-10 og Ligning 8-25:

$$I = D \cdot \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad \text{Ligning 8-25}$$

Hvis et armatur placeres midt på væggen oppe under loftet, bliver spredningen kun i et kvart rum, og D bliver derfor lig med 4. Er armaturet i stedet placeret midt på væggen, sker spredningen i et halvt rum, og D får værdien 2.

I et rum er intensiteten det samlede bidrag for alle lydkilder inkl. al reflekteret lyd fra genstande og begrænsende flader og vægge.

I en ventilationskanal hvor der er en plan lydbølge og ved en punktformig lydkilde hvor der er kugleformede lydbølger er intensiteten og det effektive tryk forbundet, dette findes ved:

$$I = \frac{P_{eff}^2}{\rho c} \quad \text{Ligning 8-26}$$

Vigtige formål ved udførelse af lydberegninger er:

- på en given lokalitet at omsætte lydkildernes effekt til lydtryk
- justere dette lydtryk, så det svarer til ørets lydopfattelse

Ved at sammenkoble Ligning 8-25 og Ligning 8-26 og benytte 10-tals logaritmen kan sammenhængen skrives på følgende ligning:

$$L_p = L_w + 10 \cdot \log \frac{D}{4\pi r^2}$$

Ligning 8-27

Frekvensanalyse

For at udføre en lydberegning er det nødvendigt at kende frekvensfordelingen. Lydens påvirkning på det menneskelige øre er meget afhængig af frekvensen, eftersom ørets evne til at opfatte lyd er frekvensafhængig. For at tage hensyn til dette bliver den totale lyd opdelt i frekvensintervaller, og de enkelte intervaller bliver opfattet som separate lydgivere. Til praktisk brug er de derfor inddelt i otte oktaver som vist i **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet..**

Tabel 8-2 Frekvensintervaller for oktavbånd

Centerfrekvens f_c [Hz]	Frekvensinterval $f_{\text{nedre}} - f_{\text{øvre}}$ [Hz]
63	45 – 90
125	90 – 180
250	180 – 350
500	350 – 700
1000	700 – 1400
2000	1400 – 2800
4000	2800 – 5600
8000	5600 – 11300

I forbindelse med beregningerne benyttes der for hvert frekvensinterval en centerfrekvens (f_c). De otte oktaver får således en centerfrekvens på 63 Hz, 125 Hz..... til 8000 HZ, **Fejl!** **Henvisningskilde ikke fundet.** I ventilationsanlæg er det frekvensintervallerne med centerfrekvensen 125, 250 og 500 Hz, der har den største interesse. For hvert oktavbånd (frekvensinterval) måles det samlede lydeffekt niveau i det pågældende oktavbånd, og af dette fremkommer lydeffekt niveauets oktavværdi $L_{w,ok}$. På denne baggrund kan der foretages en logaritmisk addition, og derved fremkommer en sum på det totale lydeffekt niveau L_w , se afsnittet "Regneregler for dB værdier". Hvis der er behov for en større nøjagtighed, kan oktavbåndene inddeles i terts bånd, hvorved de enkelte oktavbånd inddeles i tre dele.

Lydangivelser – ørets lydopfattelse

Ørets lydopfattelse er i høj grad afhængig af frekvenser, hvor nogle høres meget tydeligt, f.eks. 1000 Hz, hvorimod oktavbåndet 63 Hz er langt vanskeligere for øret at opfatte. For at tage hensyn til dette udføres måleinstrumenter med standardiserede filtre, der kan indsættes i måleinstrumenterne, således at resultatet tager hensyn til ørets evne til at opfatte lyden. Der forefindes følgende standardiserede filtre: A, B og C. Når disse filtre indsættes i måleinstrumenter, vil de primært reducere de lavere frekvenser, og de målte værdier betegnes L_A -, L_B -, og L_C - værdier. I praksis anvendes normalt kun L_A - værdierne.

7For et givet lydspektrum kan L_A - værdien beregnes ved først at fratække A-filterets værdier og derpå sammenlægge de korrigerede værdier logaritmisk.

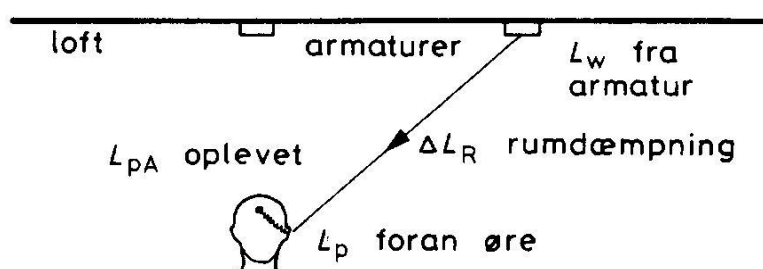
L_A - værdien i sig selv er ikke særlig anvendelig til støjbekæmpelse, da den ikke indeholder nogen information om frekvensfordelingen af støj. I forbindelse med kontrolmålinger er L_A - værdien velegnet, da det er en enkel måde at lave kontrolmålinger, og de kan udføres med måleinstrumenter, der ikke er så dyre.

Vurdering af støjs skadelige virkning influeres af støjniveauet og den periode, som støjen virker i. I forbindelse med dimensionering af et anlæg er det vigtigt på forhånd at være klar over hvilke resultater, der kan antages.

Oplevet lyd fra armatur

For at kunne vurdere det oplevede lydtryk niveau foran øret er det nødvendigt at opstille de nødvendige opstillingsudtryk.

På Figur 8-11. Oplevelse af lydets udbredelser illustreret hvordan lydtryk niveauet foran øret er afhængig af lydkildens lydeffekt niveau, lydkildens placering og afstanden fra lydkilden til målestedet. På figuren er lydkilden et armatur, og afstanden er fra armaturet til øret. I et lukket rum bliver lydtryk niveauet foran øret i tillæg påvirket af rumgeometrien, overflade beklædningen og rummets dimensioner, hvilket kan sammensættes til lokalets rumdæmpning ΔL_R .



Figur 8-11. Oplevelse af lydets udbredelse fra armatur til hjerne.

Ved beregning af installationer til ventilation udregnes det statistisk mest sandsynlige gennemsnits lydfelt i rummet.

I de fleste tilfælde vil en person være mere end ca. 1 m fra lydkilden, hvor det frie felt fra den direkte lyd fra armaturet vil være dominerende. I en afstand af mindre end ca. 1 m fra lydkilden er det frie felt fra den direkte lyd fra armaturet dominerende. Når øret er længere væk end 1 m, vil dominans af den reflekterede lyd være til stede, og denne lyd er uafhængig af stedets placering i forhold til lydkilden.

I tillæg til dette skal der tages hensyn til ørets lydoplevelse i hjernen, og dette gøres ved at introducere A-filteret, der dæmper de enkelte frekvenser, så det svarer til ørets opfattelse af frekvenserne i forhold til hinanden. Det oplevede lydtryk niveau L_{pA} beregnes ved, at der fra lydeffekt niveauet L_w fratrækkes rumdæmpningen ΔL_R og adderes A-filteret:

$$L_{pA} = L_w - \Delta L_R + A\text{-filter}$$

Ligning 8-28

I de fleste tilfælde har leverandørerne allerede indregnet A-filteret i de opgivne lydeffekt niveauer, der betegnes L_{wA} :

$$L_{pA} = L_{wA} - \Delta L_R$$

Ligning 8-29

I bygningsreglementet er det lydtryk niveauet L_{pA} , der stilles krav til:

- dB (decibel) måleenhed for svingninger her relative lydstyrke
- dB (A), betegnelse, der nogle gange anvendes, når A-filteret er indregnet

Opmærksomheden henledes på, at der i nogle leverandørers kataloger bliver angivet lydtryk niveauet L_{pA} , hvor de som standard går ud fra en rumdæmpning for kontorer på 4 dB. For at finde de tilsvarende lydeffekt niveauer L_{wA} lægges dernæst 4 dB til katalogernes L_{pA} .

Eksempler på rumdæmpning hentet fra *Ventilation STÅBI er vist på **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.**

Tabel 8-3 Frekvensintervaller for oktavnåbånd

Rumtype	ΔL_R	Beskrivelse
Enkeltkontor	4 dB	Tæppe på gulvet
Kontorlandskab	12 dB	Tæppe og lydabsorberende loft
Konferencerum	10 dB	Tæppe og lydabsorberende loft
Skolelokale	7 dB	Absorberende loft og 2 opslagstavler
Soverum	4 dB	

Hvis der er mere end en lydkilde i rummet, er det nødvendigt at addere lydtryk niveauerne logaritmisk, og dette er beskrevet i afsnittet "Regneregler for dB-værdier"

I de foregående beregninger er der ikke taget hensyn til den støj, der kommer via kanalsystemet. En del af denne støj udspringer fra aggregatet og sammen med andre mindre støjkluder i kanalsystemet og dæmpning i kanalsystemet, er det muligt at beregne den ekstra lyd, der fremkommer fra kanalsystemet. Dette er imidlertid en lidt krævende beregning, og derfor forenkles denne i stedet ved at forhøje armaturets lydeffekt niveau L_{wA} med 3 dB ($\Delta L_{Kanalstøj}$).

$$L_{pA} = L_{wA} - \Delta L_R + \Delta L_{Kanalstøj}$$

Ligning 8-30

8.11. Litteratur/referencer

BR18 – Bygningsreglementet 2018. (2018). <http://bygningsreglementet.dk/>

DS447, Dansk Standard. (2005), Norm for mekaniske ventilationsanlæg, 2. udgave, 2005, DS 447:2005, ICS: 91.140.30. Danmark.

Dansk Standard. (2007). DS/EN 15251 – Input-parametre til indeklimaet ved design og bestemmelse af bygningers energimæssige ydeevne vedrørende indendørs luftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustik. DS/EN 15251:2007. ICS: 91.040.01. Danmark.

Den lille blå om Ventilation, 2016, Claus M. Hvenegaard & Christian Drivsholm, Dansk Energi, 3. udgave 2016, ISBN 87-988903-0-1

Hansen, H.E. (ed.), Kjerulf-Jensen, P. (ed.) & Stampe, O.B. (ed.), 1988, *DANVAK – Varme- og klimateknik grundbog*, 1. udgave, ISBN: 87-982652-1-0, DANVAK ApS, Danmark.

Hansen, H.E. (ed.), Kjerulf-Jensen, P. (ed.) & Stampe, O.B. (ed.), 2006, *DANVAK – Varme- og klimateknik grundbog*, 3. udgave, ISBN: 87-982652-8-8, DANVAK ApS, Danmark.

9. OPVARMNING

*Henrik Poulsen
Force Technology
hrp@force.dk*

*Arne Jakobsen, Docent
Maskinmesterskolen København
aj@msk.dk*

Afsnittet "Opvarmning" kan læses selvstændigt, men er skrevet som et kapitel til en samlede lærebog indenfor Technical Facility Management, hvor omdrejningspunktet er indeklimate og energiforbrug.



Dette kapitel er udarbejdet som del af projektet **Energirigtigt drift af det rette indeklimate i bygninger – ENDRIN** støttet af ELFORSK i periode 2016–2017, projektnummer 348-006 (www.elforsk.dk).

9.1. Indhold

9. OPVARMNING	9-1
9.1. Indhold.....	9-2
9.2. Læringsmål.....	9-3
9.3. Nomenklatur.....	9-4
9.4. Indledning.....	9-5
9.5. Typer af varmeanlæg.....	9-5
9.6. Regulering af varmeanlæg.....	9-6
Central regulering efter udetemperaturen	9-6
Decentral regulering af varmeafgivere	9-8
Pumper i varmeanlæg	9-8
9.7. Varmeanlæg og indeklime.....	9-9
9.8. Energoptimering af varmeanlæg	9-9
Graddage /graddøgn.....	9-10
Graddagekorrigeret forbrug	9-11
Energiforbrug og nøgletal.....	9-11
9.9. Litteratur/referencer.....	9-16

9.2. Læringsmål

Studerende der læser følgende kapitel skal være i stand til at

- Beskrive mulige varmekilder
- Beskrive typiske varmeafgivere
- Vurdere opvarmningsbehov
- Inddrage faktorer der påvirker energi-effektivitet
- Redegøre for samspil mellem opvarmning og indeklima
- Anvende relevante nøgletal

9.3. Nomenklatur

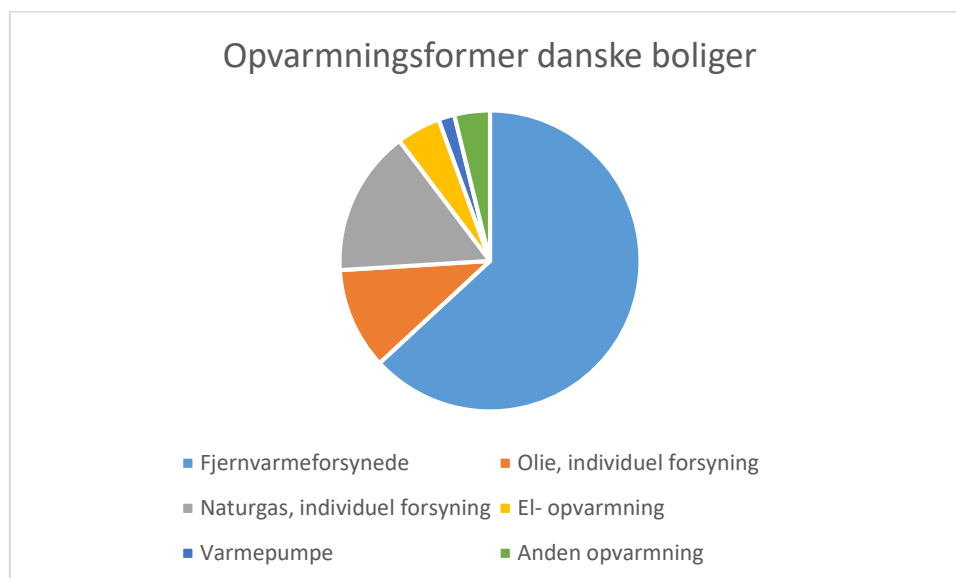
Benævnelse og symbol	Enhed	Beskrivelse
GD	Dag·K	Graddøgn eller graddag. Produkt af tid og forskel mellem udetemperatur og en reference udetemperatur (typisk 17 °C). Varmebehovet i perioden vil være proportionalt med dette tal. Benyttes som korrektion af faktisk varmeforbrug, sådan at dette kan gøres sammenligneligt med forbrug, hvor udetemperaturforløbet har været anderledes. Normalåret er 2906 graddage i Danmark.
GAF	kWh	Graddage afhængigt forbrug (typisk årsforbrug, men kan også være for en måned ect)
GUF	kWh	Graddage uafhængigt forbrug (eks forbrug til varmtvand)

9.4. Indledning

Mennesker opholder sig mere end 80% af deres levetid indendørs. Med en gennemsnitlig udetemperatur over året i Danmark på 8 °C, er det derfor nødvendigt med en eller anden form for opvarmning. Gennem tiderne har der været benyttet forskellige former for opvarmning.

I gamle dage havde man bål midt i huset og et hul i taget, så røgen kunne slippe ud. I middelalderen begyndte man at bruge kakkelovne, hvor røgen blev ført væk via en skorsten. Senere blev brændeovnene introduceret. Først i 1930'erne fik mange huse deres egen produktion af varme ved en centralt placeret kedel (olie, gas eller petroleum) som var forbundet til varmeafgiverne i et centralvarmeanlæg.

Et traditionelt centralvarmeanlæg består således af en enhed til varmeproduktion, varmedistribution via vandrette eller lodrette fordelingsledninger og stigstreng samt selve varmeafgiverne i form af radiatorer, konvektorer etc. Fordelingen på opvarmningsformen af danske boliger fremgår af figuren (ref. Varmeståbi ver. 7)



Figur 9-1 Opvarmningsformer i danske boliger

9.5. Typer af varmeanlæg

Det mest udbredte varmeanlæg i Danmark er opvarmning ved hjælp af radiatorer. De senere år har gulvvarmeanlæg specielt til boliger vundet indpas typisk grundet arkitektoniske hensyn. Men også fordi at det kan give bedre komfort, og den forholdsvis lave fremløbstemperatur er gunstig når opvarmningen sker via en varmepumpe. Derudover findes der strålevarme og luftvarmeanlæg, som er knap så typiske. De traditionelle varmeanlæg afgiver varme fra varmeplader, hvor varmen afgives ved varmeledning, konvektion og stråling.

Radiatoranlæg kan opbygges i tre typer og kombinationer mellem disse: én-strengt anlæg, to-strengt anlæg og vendt retur. Af afkølingsmæssige årsager opbygges anlæg ikke længere som én-strengede. Selve radiatorerne skal placeres ved rummets afkølingsflader, hvor det lokale

varmebehov er størst – typisk under vinduerne. I dag er vinduers indvendige varmeoverfladetemperatur så lav, at det ikke er så vigtigt som tidligere, men det sikrer, at der ikke sker et u hensigtsmæssigt kuldenedfald, der medfører træk.

Varmeafgivelsen fra radiatorer foregår ved konvektion og stråling. Fordelingen mellem disse afhænger af radiator typen. For almindelige panelradiatorer er fordelingen ligelig, mens det for søjleradiatorer er 25% stråling og 75% konvektion.

Konvektorer er radiatorer, hvor 90-100% af varmen afgives ved konvektion. Konvektorer placeres typisk i forsænkninger i gulvet ved vinduer, i nicher og som skjulte installationer. Placeringen af konvektorer fordrer, at der opnås en skorstensvirkning, så kuldenedfald undgås og kræver jævnlig rengøring for at undgå støv m.m.

Gulvvarmeanlæg blev traditionelt benyttet ved badeværelsesgulve, men har vundet indpas specielt i nyere parcelhuse. Forudsætningen for et velfungerende gulvvarmeanlæg er opfyldelse af Bygningsreglementets krav til isolering under gulvvarmeslangerne, samt en gulvkonstruktion der sikrer en hurtig regulering. For at undgå overtemperaturer indendørs skal anlægget være hurtigt regulerende så eksempelvis øget solindfald nedregulerer varmeafgivelsen.

Luftvarmeanlæg er meget lidt udbredt i Danmark men med de faldende energibehov i boliger, kan luftvarme vinde mere frem. Luftvarmeanlæg fordeler opvarmet luft typisk i kanaler i gulvet, så kold luft fortrænges.

Strålevarmeanlæg opvarmer luften indirekte via gulve, vægge og inventar og benyttes typisk, hvis kun enkelte dele (eksempelvis i en produktionshal) har behov for opvarmning.

9.6. Regulering af varmeanlæg

I henhold til Bygningsreglementet skal ”Varme- og køleanlæg skal dimensioneres, udformes, styres, udføres og driftes som anvist i DS 469 Varme- og køleanlæg i bygninger.” Det fremgår således ikke direkte af Bygningsreglementet, hvordan varmeanlæg skal reguleres, men da DS469 nævnes som krav, skal varmeanlæg reguleres i henhold til denne. Reguleringen af varmeanlæg i DS469 er opdelt i en central regulering efter varmebehovet (udetemperaturen) og en decentral regulering på rumniveau. Derudover indeholder DS469 krav til pumpens regulering af vandmængde i varmeanlæg.

Central regulering efter udetemperaturen

Varmeanlæg skal forsynes med kontinuert, automatisk styring af fremløbstemperaturen efter varmebehovet. Dette skal opnås enten ved at styre fremløbstemperaturen efter udetemperaturen eller alternativt ved styring af fremløbstemperaturen efter det rum, som aktuelt har behov for højest fremløbstemperatur. Styringen kan eventuelt være med kompensering i forhold til returtemperaturen eller afkølingen over anlægget.

Derudover gælder, at fremløbstemperaturstyringen skal:

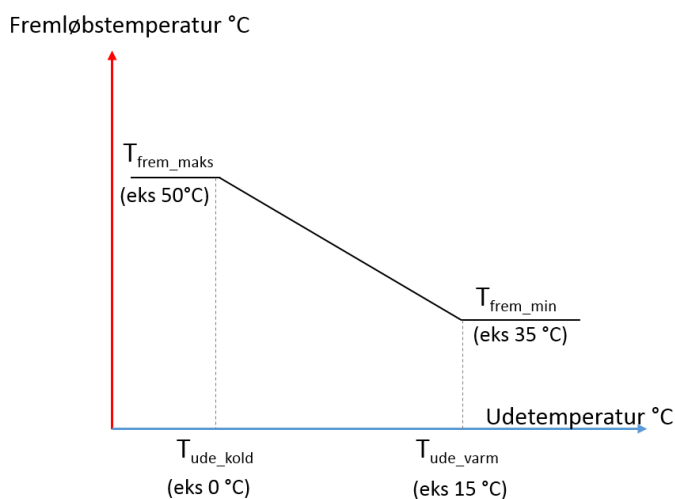
- Sikre, at varmetabet fra fordelings systemet begrænses mest muligt.
- Kompenseres for solindfald på facaden i større bygningen, det vil sige styringen og anlægget skal opdeles efter orienteringen af facaderne.
- Udformes således, at der lukkes for varmforsyningen og cirkulationspumpen stoppes, når der ikke er opvarmningsbehov i rummene eller ved høj udetemperatur.

Endelig skal varmeanlæg i bygninger med veldefineret brugstid, eksempelvis kontorer, butikker, skoler og daginstitutioner forsynes med en tidsstyring, der automatisk standser eller reducerer opvarmningen. Dog skal man være opmærksom på genopvarmningstiden.

Fremløbstemperaturstyringen efter udetemperaturen foregår efter en varmekurve (relation mellem ude- og fremløbstemperatur), hvor kurvehældningen kan vælges og indtastes direkte i regulatoren. Ved en stejl kurvehældning bliver fremløbstemperaturen meget høj, når udetemperaturen falder. Derudover kan varmekurven parallelforskydes, så hældningen er den samme, men fodpunktet og fremløbstemperaturen ændres.

Varmekurven skal tilpasses bygningens varmebehov, dvs. at fremløbstemperaturen skal være så høj, at varmeanlægget kan levere varme nok i de koldeste perioder. Gamle bygninger kræver typisk en høj fremløbstemperatur ved lave udetemperaturer, mens nyere bygninger skal opfylde kravene i Bygningsreglementerne og DS469 om lavtemperaturdrift. Som tommelfingerregel skal fremløbstemperaturen ligge mellem 45-55°C ved en udetemperatur på 0°C – dog lidt lavere, hvis opvarmningen er baseret på varmepumpe.

Valg af varmekurve har indflydelse på energibesparelsen, da energibesparelsen er størst, når kurven stilles så flad som mulig. Herved bliver varmetab fra varmerør og komponenter mindre. Dog er der naturligvis en grænse, hvis fremløbstemperaturen bliver for lav, vil der blive cirkuleret store mængder vand rundt i anlægget, som kan medføre støj og varmemangel. Det er derfor vigtigt at driftspersonalet aktivt arbejder med kurvevalg, hvor det er muligt, så varmekurven tilpasses den aktuelle bygning.



Figur 9-2, eksempel på varmekurve

Endelig er der mulighed for temperaturbegrænsninger på fremløb og returtemperaturen. Eksempelvis kan der indstilles, så den maksimale returtemperatur overholder eventuelt krav fra fjernvarmeværket eller en kondenserende kedel. Dette skal dog ske med hensyntagen til komforten i bygningen, så tilstrækkelig komforttemperatur kan opretholdes, hvis varmgiverne er for små. Man kan ikke tvinge varmeanlægget til en god afkøling, hvis varmgiverne er underdimensioneret eller hvis der er en dårlig vandfordeling.

Decentral regulering af varmeafgivere

For varmeafgiverne gælder, at de skal være forsynet med udstyr for automatisk regulering af varmeafgivelse efter rumtemperaturen i det enkelte rum, således at det forudsatte termiske indeklima opnås, og unødvendigt energiforbrug undgås, samtidig med at betjeningen er enkel for brugeren. Der skal være automatisk regulering med individuel styring af varmetilførslen efter behovet i det enkelte rum. Reguleringen skal sikre, at rummene opnår den ønskede rumtemperatur, samt at der lukkes helt ned for varmetilførslen til rummet, når rummet kan opretholde den ønskede rumtemperatur uden varmetilførsel fra varmeanlægget.

Kravet indebærer, at automatikkens føler skal registrere rumtemperatur, og at automatikken skal justere varmetilførslen i overensstemmelse med den målte rumtemperatur. Det betyder i praksis, at der skal være mulighed for individuel indstilling af ønsket rumtemperatur i det enkelte rum. Det kan ske ved selve varmeafgiveren eller ved en ekstern regulator.

Derudover gælder for reguleringen og rumtemperaturføleren, at

- Rumtemperaturfølere skal placeres så det sikres, at den målte temperatur er repræsentativ for den operative temperatur i opholdszonen. Hvis varmeafgivere har til formål at modvirke nedfald af kold luft, eksempelvis store vinduespartier, skal temperaturføleren placere med henblik på dette.
- Reguleringen indrettes således, at de ønskede tolerancer opnås med en rimelig kort indsvingningstid. Ændring af udeklima eller varmetilskud må ikke nødvendiggøre ændring af reguleringens indstillingsværdier
- Ved gulvvarmeanlæg, hvor der er risiko for høj gulvtemperatur, skal der indbygges en sikring, som begrænser gulvtemperaturen
- Rumtemperaturstyringen i varmeanlægget må ikke påvirke ventilationen i rummet

Rumtemperaturreguleringen er oftest simple selvvirkende proportionalregulatorer med et proportionalbånd på maksimalt 2°C. De fleste producenter har i de senere år lanceret mere intelligente proportionalregulatorer med mulighed for tidsindstilling m.m.

Pumper i varmeanlæg

Varme­anlæg skal udformes med lavest mulige tryk­tab, når der tages hensyn til varme­anlæggets funktion og økonomi. Derudover skal der ved valg af pumper og ved styring af pumper sikres lavest muligt elforbrug til pumpedrift. Pumper skal derfor styres automatisk efter vandstrøms- og tryk­behov i varme­anlægget ved aktuel driftstilstand. Styringen af pumpen må naturligvis ikke begrænse muligheden for at opnå det ønskede indeklima eller for at opfylde eventuelle krav til mindste vandstrøm.

Cirkulationspumpen i varme­anlægget var ofte en overset energisluger, specielt hvis pumpen var 15-20 år gammel uden indstillingsmuligheder, så pumpen altid kørte med høj omdrejningshastighed og dermed for højt energiforbrug. De fleste cirkulationspumper i varme­anlæg er efterhånden erstattet af pumper med elektronisk selvregulering, der regulerer efter hvor meget varme/vand, der er brug

for. Falder varmebehovet, falder pumpens omdrejninger (dermed også effekten) automatisk. Stiger varmebehovet, går den ligeledes op i omdrejninger.

Metoden som pumpen reguleres efter, kan indstilles på pumpen. Det er vigtigt at få valgt den rigtige metode, ellers vil pumpen bruge unødvendigt mere energi. Proportionaltrykregulering vælges til anlæg med relativt store tab i løftehøjde i rørinstallationer, ventiler m.m.. Konstantrykregulering vælges til anlæg med relativt små tab i løftehøjde.

9.7. Varmeanlæg og indeklima

Dårligt indeklima kan skyldes mange forhold, men mangler ved bygninger, deres drift eller vedligeholdelse spiller ofte ind. Derfor har varmeanlægget en naturlig indvirkning på indeklimaet, uanset hvilken type varmeanlæg, man vælger. De typiske årsager til dårligt indeklima, som kan henføres til varmeanlæg, er temperatur og træk.

Vi har alle en komforttemperatur, som varierer lidt fra person til person, men typisk er en temperatur på 20-22 °C passende ved let fysisk aktivitet. Ved temperaturer over 23°C stiger antallet af indeklimasymptomer ofte, og temperaturen ved stillesiddende arbejde og normale klima- og arbejdsforhold må ikke overstige 25 °C. Det er derfor vigtigt at bygning, automatik og varmeanlæg spiller sammen, så risikoen for overtemperatur minimeres.

Træk opleves typisk om vinteren, hvis dårligt isolerede vægge, gulve og vinduer giver kuldeneffald eller kuldestråling, der føles som træk. Utætte døre og vinduer giver ofte trækgener, især i forbindelse med udsugningsanlæg. Lufthastigheden i rum, hvor der er personer, bør holdes under 0,15 m/sek.

9.8. Energioptimering af varmeanlæg

For at energioptimere et varmeanlæg er det en forudsætning, at man besidder et indgående kendskab til det samlede energisystem, det vil sige kendskab til bygningen, de tekniske installationer og forbrugernes adfærd.

For at sikre en besparelse er det altså vigtigt at have kendskab til:

- Teknisk betingede forhold såsom bygningens varmetab, mulighed for etablering af lavtemperaturdrift, er der ført rørledninger uden for isoleringen, de tekniske installationers opbygning, tarifstruktur, sammenspil mellem produktionsenhed og varmeafgivere m.m.
- Aktivitetsbetingede forhold, herunder forhold som ændrede varighedsbelastning af bygning og anlæg, eksempelvis i form af tidsstyring, brug af lokaler m.m
- Adfærdsbetingede forhold såsom i form af ”åbne/lukke” vinduer, åbne/lukke døre, justering af sætpunkter etc.

Selv om et varmeanlæg umiddelbart er en simpel konstruktion, så er det en vigtig forudsætning for en optimering af et givent anlæg, at man har viden om de enkelte komponenter, komponenternes indvirkning på hinanden og hele systemet. Komponenternes funktion og driftsbetingelser skal være kendt, for et optimalt samspil kan etableres. Eksempelvis kan enkelte forbrugeres uhensigtsmæssige

adfærd ødelægge det samlede resultat, eller en dårlig fordeling af centralvarmevand i en etageejendom kan resultere i en manglende afkøling af vandet.

Energioptimering af varmeanlæg bør indeholde en gennemgang og optimering af:

- Varmeproducerende enhed
 - Korrekt dimensionerede komponenter såsom kedel, veksler, ventiler m.m.
 - Korrekt indstilling af automatik, herunder varmekurve, eventuel natsænkning m.m.
 - Korrekt isolering af rør og komponenter
- Varmedistribuerende anlæg
 - Korrekt isolering af fordelingsledninger, stigstreng mm i uopvarmede rum
 - Korrekt vandmængde og fordeling.
- Varmeafgivende enhed
 - Korrekt afkøling på radiatorer og indstilling af termostater.

Som en vigtig del af energioptimeringen af varmeanlægget er brugen af nøgletal, kendskabet til forventet energiforbrug samt energiforbrug i lignende bygninger.

Som en vigtig del af energioptimeringen af varmeanlægget er brugen af graddagekorrigeret varmekonsum og nøgletal, kendskabet til forventet energiforbrug samt energiforbrug i lignende bygninger.

Graddage /graddøgn

Graddage/graddøgn anvendes ved

- Beregning af en projekteret bygnings rumvarmekonsum
- Vurdering af ændret rumvarmekonsum som følge af ændringer i bygningens isoleringstilstand (Aktuelle graddøgn).
- Vurdering af eventuelle ændringer i varmeanlæggets energiokonomiske tilstand (Aktuelle graddøgn).
- Vurdering af fremtidigt brændselsforbrug og tidspunkt for næste brændselsleverance (Referenceårets graddøgn, aktuelle graddøgn, graddøgnsprognoser).

Et graddøgn [K · døgn] er et udtryk for en forskel på 1K mellem døgnmiddelværdierne af en korrigeret indetemperatur $t_{i,korr}$ (basistemperatur) og middeludetemperaturen $t_{u,mid}$. $t_{i,korr}$ ansættes almindeligvis til 17°C og er altså ikke den faktiske indetemperatur, idet det er antaget, at de udnyttede varmetilskud giver bygningen en opvarmning svarende til 20 - 17 = 3K. Svarende hertil udgør de udnyttede varmetilskud ca. 19 % af rumvarmebehovet. I bygninger, hvor de udnyttede varmetilskud fra intern belastning og solindfald udgør en større del af varmekonsumet kan $t_{i,korr} = 17^\circ\text{C}$ ikke umiddelbart anvendes.

Antallet af skyggegraddøgn beregnes på døgnbasis af (1K døgn = 24K timer):

$$GD = (t_{i,korr} - t_{u,mid}) \cdot (1 \text{ døgn}) \quad [\text{K} \cdot \text{døgn}]$$

dog efter forskellige kriterier afhængigt af formålet med beregningen:

- kun i fyringssæsonen (Dansk Teknologisk Institut)
 - Start om efteråret: når tu, mid når under 12°C i 3 døgn i træk.
 - Stop igen om efteråret: når tu, mid når over 12°C i 3 døgn i træk
 - Stop om foråret: når tu, mid når over 10°C i 3 døgn i træk
 - Start igen om foråret: når tu, mid når under 10°C i 3 døgn i træk
- hele opvarmningssæsonen
- med forskellige værdier af indetemperaturen ti uden korrektion for udnyttede varmetilskud.

I visse tilfælde kan det være formålstjenligt at korrigere for sol og vind.

Graddagekorrigeret forbrug

Ved sammenligning af energiforbrug fra to forskellige perioder skal korrigeres for varierende udeklima. Det forbrug, der skal korrigeres, er det forbrug der afhænger af udetemperaturen (graddage), dvs det graddage afhængige forbrug, GAF, som er det energiforbrug, der går til opvarmning af en bygning. Det øvrige forbrug, det graddage uafhængige forbrug, GUF, er basisforbruget inklusiv varmt vand. Det skal bemærkes, at en del af basisforbruget kommer bygningens varmetab til gode i fyringssæsonen.

GUF vil kunne opstilles som en række nøgletal for de graddage uafhængige forbrug som:

- Tomgangstab fra kedler og varmtvandsbeholdere
- Varmetab fra rørinstallation
- Tomgangstab fra tilslutningsanlæg til fjernvarme
- Opvarmet ekspansionsbeholder på loft
- Cirkulation på varmt brugsvand
- Komfortgulvvarme i badeværelser
- Varmtvandsforbrug

Det graddage korrigerede forbrug udregnes som

$$GD_{kor}F = GAF \cdot \frac{GD_{aktuel}}{GD_{normal}} + GUF$$

Energiforbrug og nøgletal

Varmeanlæg skal dimensioneres, så der ved dimensionerende udetemperatur (-12°C) opnås det ønskede termiske indeklima. Det dimensionerende varmetab, som lægges til grund for varmeanlæggets udformning, er summen af bygningens transmissionstab og ventilationstab. Det dimensionerende varmetab beregnes som beskrevet i DS 418: Beregning af bygningers varmetab, idet der ikke tages hensyn til varmetilførsel fra solindfald, personer, elektrisk udstyr og lignende. Ved vurdering af varmeanlæg kan overslagsmæssige betragtninger naturligvis benyttes i form af oplysninger og forbrug eller ved skøn af det forventede varmetab afhængig af bygningens alder.

Tabel 9-1 Typiske varmetab ifølge bygningens byggeår

Byggeår	Varmetab (W/m²)
1920	100-160
1940	90-150
1960	60-80
1980	40-55
2000	20-40

Hvis energiforbruget er højere end nøgletallene i nedenstående figur, er der et besparelspotentiale i ejendommen. Det højere forbrug kan skyldes ringe isolering af klimaskærmen, uhensigtsmæssige brugervaner og/eller at driften af varme- og brugsvandssystem kan forbedres.

Tabel 9-2 Nøgletal for varmeforbrug (bruttoforbrug) og fælles elforbrug i etageboliger

Energiforbrug til opvarmning (kWh/m²)				Elforbrug (kWh/m²)
Fraktil	Fjernvarme	Naturgas	Olie	Fælles forbrug
10%	87	105	109	1,8
25%	99	121	125	3,0
50%	113	136	144	5,0
75%	129	157	163	8,0
90%	145	180	188	11,8
Middel:	115	140	147	6,5

Nedenfor er angivet en række nøgletal for energiproducerende varmeanheder samt for varmetab for rør i uopvarmede rum. For yderligere nøgletal henvises til afsnittet om nøgletal.

Tabel 9-3 Virkningsgrader for kedler og fjernvarmeanlæg

Kedel	Virk. grad
Ældre, middel <ul style="list-style-type: none"> • 50 mm isolering på de væsentligste overflader • Ingen eksplosionsklapper • Indvendigt isolerede rensklapper i begrænset mængde • Tætning mellem elementer udført med asbestsnor eller tilsvarende helt tæt metode • Effektiv pakning ved forplade og tæt brændermontering 	88
Ældre, god <ul style="list-style-type: none"> • 75-100 mm isolering på alle vandkølede dele • minimum 100 mm indvendig isolering af vendekasser • helt tætte på røggassiden 	90
Nyere God Alle nyere kedler, som er ca. 10-15 år gamle	92
Kondenserende	103
Fjernvarmeanlæg	95

Dertil kommer – særligt i privat boligere brug af varmepumper. Det kan være luft/luft, luft/vand eller jordvarme. Der er også anlæg, hvor en varmepumpe tager optager varme fra ventilationsanlæggets afkastluft. COP (forhold mellem afgivet varme og forbrugt el) for sådanne anlæg er stærkt afhængige af temperaturniveau – jo højere temperatur varmekilden har og jo lavere varm temperatur der skal produceres jo højere COP.

Følgende sammenhæng kan bruges som ”tommelfingerregel”:

$$COP \approx 0,4 \cdot \frac{(T_{fremlob,vand}+273)}{(T_{fremlob,vand}-T_{kilde})}$$

Hvis eksempelvis der benyttes en fremløbstemperatur på 40 °C og kildetemperaturen er 8 °C, så kan der forventes en COP på ca. $\approx 0,4 \cdot \frac{(40+273)}{(40-8)} = 3,9$

Tabel 9-4 Varmetab fra centralvarmerør i kældre

Eksisterende forhold Rørdimension og isolering	Energibesparelse for ny samlet isoleringstykkelse (kWh/m pr. år)	
	Op til 45 mm isolering	Op til 55 mm isolering
35 mm rør med 0 mm isolering	217	220
35 mm rør med 20 mm isolering	18	21
35 mm rør med 30 mm isolering	8	11
48 mm rør med 0 mm isolering	290	293
48 mm rør med 20 mm isolering	23	27
48 mm rør med 30 mm isolering	10	14
60 mm rør med 0 mm isolering	355	360
60 mm rør med 20 mm isolering	29	34
60 mm rør med 30 mm isolering	13	17
89 mm rør med 0 mm isolering	509	515
89 mm rør med 20 mm isolering	42	49
89 mm rør med 30 mm isolering	18	25

Tabel 9-5 Varmetab fra centralvarmerør på loft

Eksisterende forhold Rørdimension og isolering	Energibesparelse for ny samlet isoleringstykkelse (kWh/m pr. år)	
	Op til 45 mm isolering	Op til 55 mm isolering
35 mm rør med 0 mm isolering	307	311
35 mm rør med 20 mm isolering	23	28
35 mm rør med 30 mm isolering	10	14
48 mm rør med 0 mm isolering	409	415
48 mm rør med 20 mm isolering	32	38
48 mm rør med 30 mm isolering	13	19
60 mm rør med 0 mm isolering	501	508
60 mm rør med 20 mm isolering	39	46
60 mm rør med 30 mm isolering	17	23
89 mm rør med 0 mm isolering	715	725
89 mm rør med 20 mm isolering	57	67
89 mm rør med 30 mm isolering	25	34

9.9. Litteratur/referencer

- Bygningsreglementet
- DS469, Dansk Standard
- DS418, Dansk Standard
- Den lille blå om varmeanlæg
- Varmeståbi
- ”Renovering af varmecentraler”, Videncenter for energibesparelser i bygninger

10. KØLING

*Arne Jakobsen, Docent
Maskinmesterskolen København
aj@msk.dk*

Kapitlet kan læses selvstændigt, men er skrevet som et kapitel til en samlede lærebog indenfor Technical Facility Management, hvor omdrejningspunktet er indeklima og energiforbrug.



ELFORSK

Dette kapitel er udarbejdet som del af projektet **Energirigtigt drift af det rette indeklima i bygninger – ENDRIN** støttet af ELFORSK i periode 2016–2017, projektnummer 348-006 (www.elforsk.dk).

10.1. Indhold

10.1.	Indhold.....	10-2
10.2.	Læringsmål.....	10-3
10.3.	Nomenklatur.....	10-4
10.4.	Køling, indeklima og energiforbrug.....	10-5
	Køling og indeklima.....	10-5
	Køling og energiforbrug.....	10-6
10.5.	Hvornår er der behov for køling og hvor meget?.....	10-6
10.6.	Samspil med øvrige tekniske områder.....	10-7
10.7.	Køling, køleanlæg og energi.....	10-8
	Procesintuition.....	10-12
10.8.	Energiforbrug til ventilationskøling vs mekanisk lokal køling.....	10-13
10.9.	Energi nøgletal.....	10-15
10.10.	Opsummering faktorer til lavt energiforbrug til køling.....	10-16
10.11.	Opgaver.....	10-17
10.12.	Litteratur.....	10-18
10.13.	Appendix A: Kredsproces i h, log(p) diagram.....	10-19
10.14.	Appendix B: Udledning af gennemsnits og marginal COP for Ventilationskøling.....	10-20
10.15.	Appendix C: Virkemåde kølebaffel.....	10-21
10.16.	Appendix D: Eksempel på frikøler.....	10-22

10.2. Læringsmål

Studerende der læser følgende kapitel skal være i stand til at

- vurdere energi-godhed og valg af aktuelle teknologier
- vurdere driftsstrategier for komfortkøling i bygninger

10.3. Nomenklatur

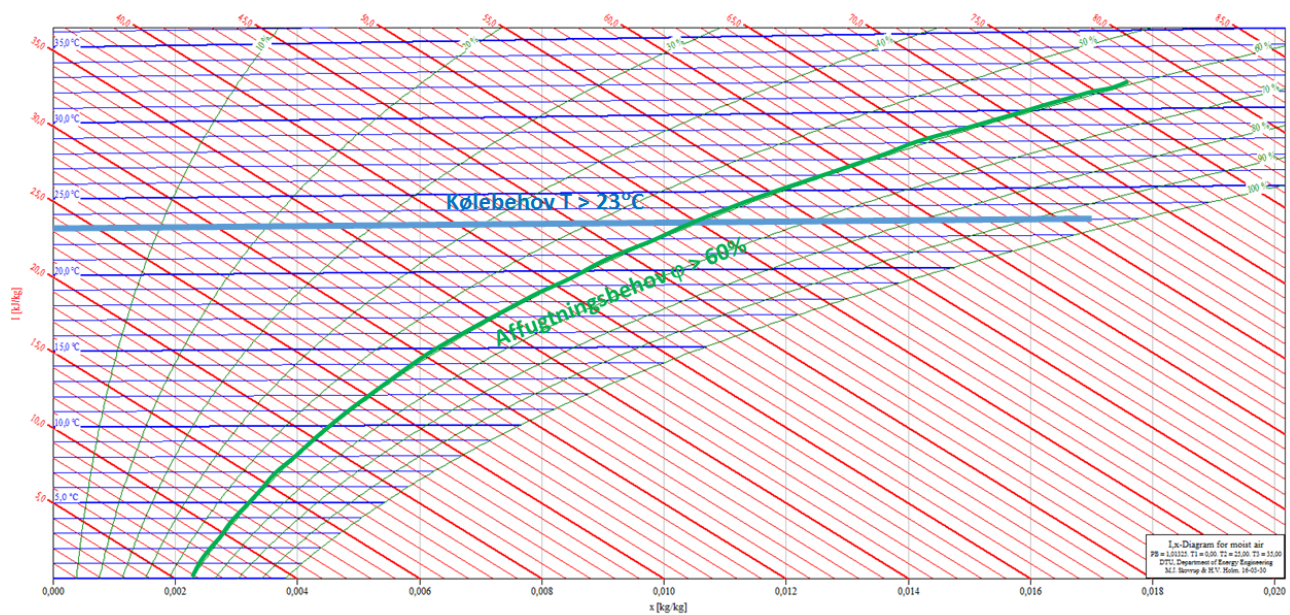
Benævnelse og symbol	Enhed	Beskrivelse
C_{pv}	J/(kg·°C)	Varmefylde konstant tryk proces
C_v	J/(kg·°C)	Varmefylde konstant volumen proces
COP	-	Effektfaktor for køleanlæg. Forhold mellem leveret køling og optagen effekt til kompressor og evt hjælpeudstyr Bemærk at der også introduceres ”marginal COP” som er forholdet mellem ”ekstra køleydelse” i forhold til ”ekstra effektforbrug” ud fra et givent udgangspunkt Bemærk yderligere at der indenfor køleteknik i dag ofte opereres med betegnelsen COP, når der er tale om varmepumper og EER (Energy Efficiency ratio), når der er tale om køleanlæg. Sluttelig opereres med en slags gennemsnits-COP for et typisk år, som SCOP og SEER (S: season). I dette kapitel benyttes blot betegnelsen COP
h	J/kg	Entalpi
\dot{m}	kg/s	Massestrøm
q_v	m ³ /s	Volumenstrøm
P	W, kW	Effekt, typisk el-effekt (Power)
p	Pa, bar	Tryk (absolut)
\dot{Q}	W, kW	Varmeforbrug eller køleforbrug
s	J/(kg·°C)	Entropi
SEL,SFP	J/m ³ ; W/(m ³ /s)	Specifikt effektforbrug af ventilator. Der er krav i bygningsreglementet for hvor stort dette må være. Når dette udregnes er det oftest ved 100 % kapacitet
T	K, °C	Temperatur
u	J/kg	Indre energi
\dot{V}	m ³ /s	Volumenstrøm
\dot{W}	W, kW	Effektforbrug af kompressor, ventilator, pumpe mv.
η	-	Virkningsgrad
ρ	kg/m ³	Densitet (luft typisk, 1,2 kg/m ³)
φ	%	Relativ luftfugtighed
		<i>Brine/glykol</i> Frostsikret vand benyttet i kreds mellem kondensator og ”tørkøler”
		<i>Chiller</i> Køleanlæg der producerer koldt vand frem til diverse kølesteder
		<i>Kølebaffle</i> Loftsaggregat til lokal køling af luft. Benytter koldt vand fra Chiller og friskluft fra ventilationsanlæg.

10.4. Køling, indeklima og energiforbrug

Køling og indeklima

Der køles hvis en ønsket temperatur ellers ville blive for høj. Hvis her er tale om personkomfort, så vil det typisk være at lufttemperaturen ville blive højere end ca. 23 °C.

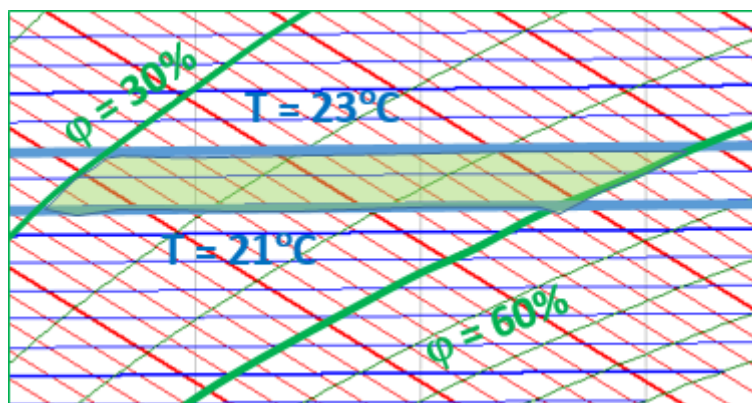
Et andet tema kan være at køling – hvis den flade der køler kører luften er under dugpunktet – kan reducere luftens fugtighed. Det kan være eksempelvis være ønskeligt, hvis luftens relativ fugtighed er over 60%.



Figur 10-1 I-x diagram for luft, 1 atm. Illustration af område for behov for køling og/eller affugtning

I figuren nedenfor er komfortområdet for det termiske indeklima antydet.

Det typiske komfortområde for temperatur er mellem 21 og 23 °C med en relativ fugtighed større end 30% og mindre end 60%. Bemærk dog at andre intervaller kan være gældende afhængige af specifikke forhold. Om sommeren accepteres typisk lidt højere temperaturer.



Figur 10-2 Indikation af komfortområde for det termiske indeklima

Køling og energiforbrug

Nedenfor er kølemetoder nævnt i rækkefølge af ”energigodhed”.

- Energimæssigt er den eneste ”gratis-køling” at åbne vinduet.
- Det kan også opfattes som ”næsten gratis”, hvis udeluft temperaturen er passende lav sådan at der er køling i den nødvendige friskluft, som kommer via den mekaniske ventilation.
- Hvis udeluften er kold nok kan den ved lave luftmængder (mindre end 50%) øges. Ved allerede høje luftmængder kan det sjældent betale sig energimæssigt at øge luftmængden yderligere.
- I nogle tilfælde vil Nord-vendte lokale/bygningsdele være så kolde at der faktisk her er et opvarmningsbehov, medens der i de sydvendte er et kølebehov. Her det oplagt at overveje at sikre ”intern fri gennemstrømning” af luft mellem de to bygningsområder.
- Hvis friskluften i sig selv ikke har kølekapacitet nok, så køles luften via en koldtvandskreds. Dette involverer energiforbrug til pumper og ventilatorer.
 - Det kolde vand kan være tilvejebragt via såkaldt frikøling ved varmeveksling med koldt grundvand, søvand, udeluft etc.
 - Det kolde vand bliver tilvejebragt af et mekanisk køleanlæg. Her er det kompressorernes energiforbrug, der er det dominerende.

10.5. Hvornår er der behov for køling og hvor meget?

Hvis udetemperaturen er større end 23 °C vil der oplagt være behov for køling. Derudover vil diverse varmebelastninger fra mennesker, elektrisk udstyr, solindfald mv. bevirke at der vil være behov for køling ved lavere udeluft temperaturer.

Som udgangspunkt skal kølingen fjerne varmebelastningerne:

$$\dot{Q}_{køl,behov} = \dot{Q}_{personer} + \dot{Q}_{udstyr} + \dot{Q}_{sol} + \dot{Q}_{trans} + \dot{Q}_{luft}$$

Den sidste faktor er knyttet til udskiftningen af luften. Hvis udeluft temperaturen er lav vil denne faktor være negativ (reducere kølebehovet) og hvis udeluft temperaturen er høj vil den faktor være øge kølebehovet. Endvidere vil der kunne være noget ”kuldegenvinding” i hovedventilationssystemet, hvor den koldere indeluft ”forkøler” friskluften.

Transmissionsbidraget – fra ydre vægge – vil også kunne enten reducere eller øge kølebehovet.

10.6. Samspil med øvrige tekniske områder

Køleanlæggene er typisk koblet op på et centralt CTS anlæg. Herfra kan der oftest angives et sætpunkt på det kolde vand og hvilket ”mode” systemet skal køre i. Det er ønskeligt, at der vises diverse effektforbrug (energimålere) og eventuel en løbende beregning af COP.

CTS anlægget bør have den overordnede funktionalitet, der sikrer at samspillet mellem opvarmning (radiatorer), ventilation og køling er rationel. Hvis ventilationsluftmængden er relativ lav og udetemperaturen lav, så kan det i nogle tilfælde bedst betale sig at øge ventilationsluftmængden fremfor at benytte ”mekanisk køling”. Dette er separat behandlet i delafsnit 6. Derudover vil en ”nat-kølingsstrategi” oftest være implementeret i CTS. Den såkaldte ”EiSE” strategi, hvor der accepteres at der få steder er lidt for varmt er i givent tilfælde implementeret i CTS. EiSE vil tilpasse sætpunktet til den kolde fremløbstemperatur, så denne er så høj som mulig (bedre COP for køleanlægget). Derudover til EiSE optimere ventilationsmængden ved at sætte hovedkanaltrykket ”passende lavt”.

Det er også i CTS ser er kriterier for hvornår der kan benyttes frikøling, hvis dette er en mulighed. Dette vil eksempelvis kunne være tilfældet, hvis udetemperaturen er lavere end 10 °C.

Det er vigtigt at der er personale – interne og/eller eksterne – som har kendskab til anlæggets virkemåde, samt de driftsstrategier, der er lagt ind i systemet. Kendskabsgraden kan testes ved at gennemgå skærbillederne på CTS anlægget, samt diverse betjeningspaneler på de lokale anlægsdele.

Organisationsmæssigt hører køleanlæggene oftest under en ”teknisk afdeling” og der benyttes oftest eksterne servicefirmaer. Udover de lovpligtige eftersyn, så vil der det eksterne firma kunne rykke ud med kort varsel. I nogle tilfælde vil det eksterne firma fjernovervåge køleanlægget.

Det kan være relevant at få en ”energi-aftale” med kølefirmaet. Dette kan være at COP skal være over en vis størrelse. For at kunne beregne COP skal følgende målinger foreligge:

El-forbrug:

Kompressorer

Blæsere (tørkøler, der fjerner varmen fra kondensator)

Pumper (på koldt vandsside og på glykolside mellem kondensator og

tørkøler)

Flow:

Hovedmassestrøm på koldt vandsside

Temperaturer:

Frem og retur på koldt vand

Gerne også udetemperatur, fordampnings- og kondenseringstemperatur af kølemiddel (ikke direkte nødvendige for at beregne COP, men er relevante størrelser som baggrund for at vurdere COP)

10.7. Køling, køleanlæg og energi

Vi taler oftest om køling fra et mekanisk køleanlæg, der producerer koldt vand til køleflader. Derudover benyttes såkaldt "frikøling" hvor enten kold udeluft, grundvand, søvand eller havvand benyttes. I denne sammenhæng vil disse kilder via en varmeveksler køle det vand, som benyttes af de respektive køleflader.

En anden – evt. supplerende mulighed – er at befugte friskluften (hvis denne er tør) med vand på væskeform. Luften vil da falde i temperatur (begrænset af den "våde" temperatur). I nogle tilfælde vil man befugte udsugningsluften, sådan at den falder i temperatur før den varmeveksler med indsugningsluften (balanceret ventilation).

Elforbruget til køleudstyr (kompressor, blæsere og pumper) kan udregnes ud fra:

$$\dot{W} = \frac{\dot{Q}_{køl}}{COP}$$

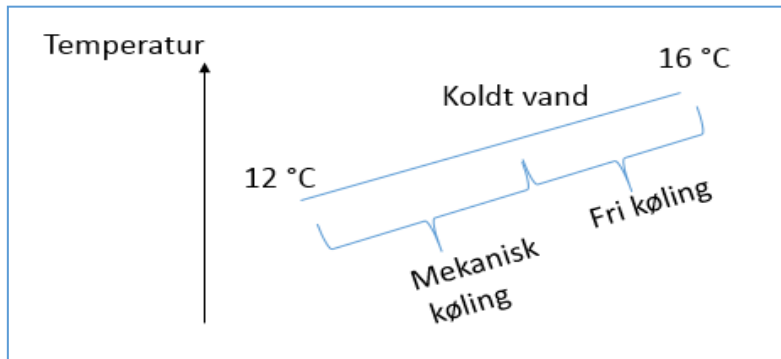
så lavt energiforbrug til køling handler om lavt kølebehov og høj COP (Coefficient of Performance).

Ved brug af frikøling kan COP blive meget høj – typisk mellem 25 og 50. Man kan næsten synes at man "snyder" termodynamikken, men her skal man huske at man benytter en "kølekilde" som i sig selv er kold og man kun skal bruge energi på transport og varmeveksling. Se Appendix C for uddybning af data for et frikølingseksempel.

Ved brug af kompressionsanlæg er COP betydelig mindre – meget afhængig af udetemperaturen (hvor kondensatoren skal af med varmen) og koldt vandstemperaturen, hvorfra fordamperen optager varmen (kølebehovet). Jo lavere udeluft temperatur og jo højere koldt vandstemperatur jo højere COP. Derudover vil COP også påvirkes af virkningsgraderne for kompressorer, pumper og blæser og driftsstrategien. Bemærk at COP oftest kun henfører til kompressor anlægget, og man derefter skal evaluere energiforbrug til pumper og blæsere separat. Disse vil typisk være 5%-20% af kompressorens energiforbrug (her tænkes på blæserne knyttet til kondensatoren og ikke blæsere/ventilatorer til ventilation).

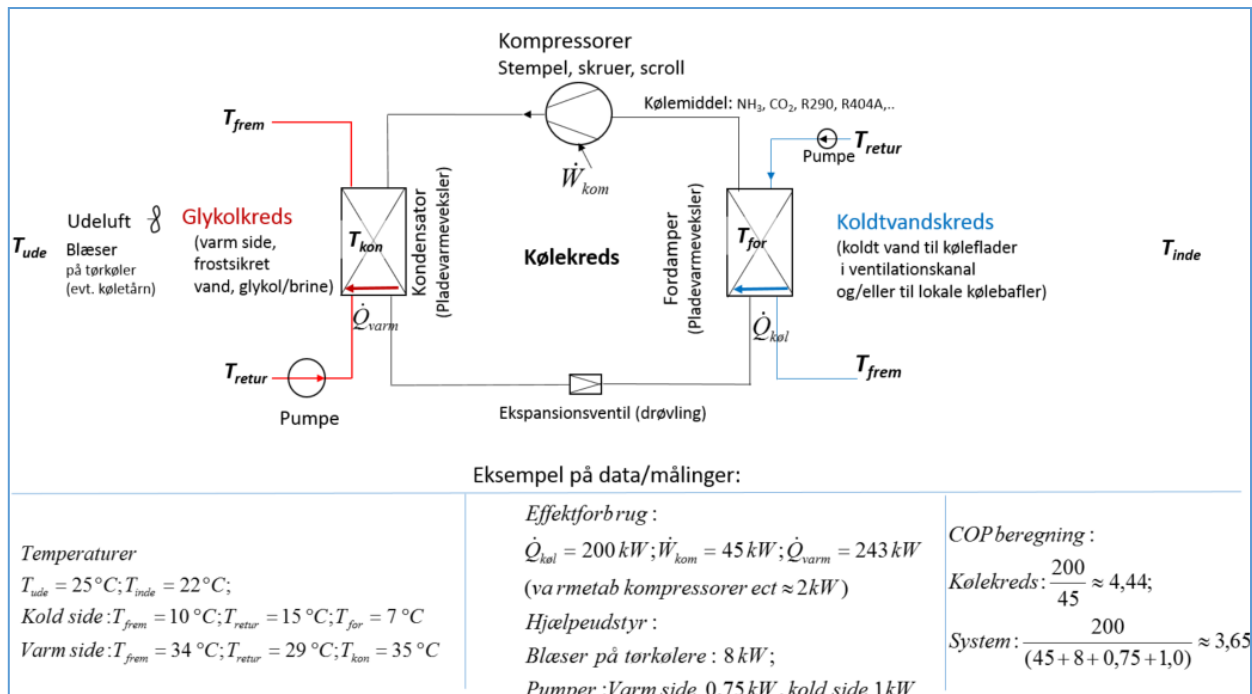
Bemærk at frikøling og kompressorkøling kan benyttes samtidigt – sådan at frikølingen køler vandet "det første stykke" og kompressor anlægget det "sidste stykke". Lad os antage at udeluften er 10 °C, og man i det givne tilfælde har at gøre med såkaldt 12/16 kølevand. Da kan udeluften køle retur vandet på 16 °C ned til eksempelvis 14 °C og kompressor anlægget (fordamperen) køler fra 14

°C til 12 °C. I princippet kunne den kolde udeluft køle lidt længere ned, men varmevekslingen skal have en temperaturdifference at arbejde med.



Figur 10-3 Frikøling og mekanisk køling kan kombineres

På Figur 10-4 Layout af et typisk Chilleranlæg (koldt vands anlæg) – med eksempel på temperaturer og effektforbrug ses en skitse af et typisk ”Chilleranlæg” med benævnelse af de vigtigste temperaturer, som direkte eller indirekte påvirker COP. Situationen er fra en sommerdag, hvor det er kompressor anlægget, der dækker hele kølebehovet. Som det nok er læseren bekendt så anvendes oftest et såkaldt log p, h diagram til beskrivelse af den termodynamiske proces for det valgte kølemiddel. Til erindring er dette vist og kort gennemgået i Appendix A: Kredsproces i h, log(p) diagram.



Figur 10-4 Layout af et typisk Chilleranlæg (koldt vands anlæg) – med eksempel på temperaturer og effektforbrug

Ved brug af termodynamikkens lovmæssigheder kan den højeste COP udregnes, som vil opnås i den ideelle kredsproces – Carnot. Den faktiske COP vil være en del lavere. Man indfører da ”Carnot-virkningsgraden” som forholdet mellem faktisk COP og Carnot COP.

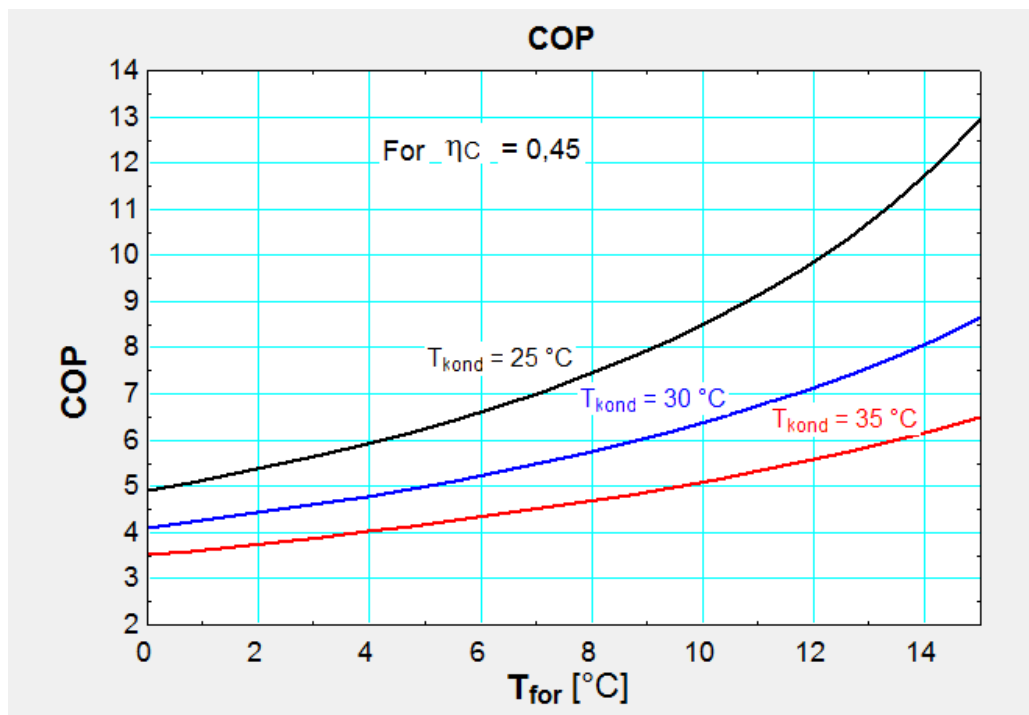
$$COP = \eta_c \cdot COP_C = \eta_c \cdot \frac{(T_{for} + 273,15)}{(T_{kon} - T_{for})};$$

Det ses at jo højere fordampningstemperatur og jo lavere

kondenserings temperatur jo højere COP. Den høje fordampningstemperatur kræver en høj koldtvandstemperatur og den lave kondenseringstemperatur fås ved en lav brine temperatur tilbage fra tørkøleren. Sidstnævnte følger udetemperaturen.

Effektive pladevarmevekslere (lave temperatur differencer) vil påvirke temperaturerne i gunstig retning.

Carnot virkningsgraden afhænger primært af kompressorens isentropvirkningsgrad. Som tommelfingerregel kan en Carnot virkningsgrad på ca. 0,45 forventes af dagens anlæg. Lidt højere hvis anlægget er ”fuldt energioptimeret” lidt lavere, hvis anlægget er af ældre dato.



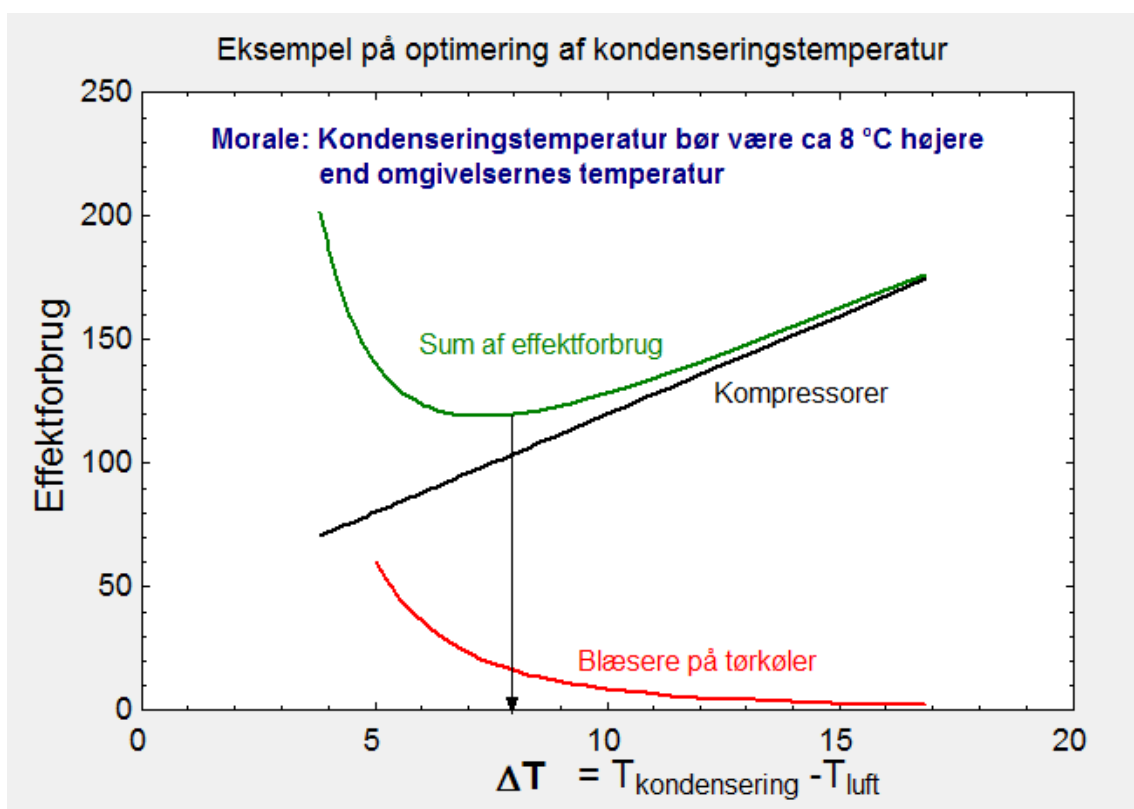
Figur 10-5 COP som funktion af fordampningstemperatur ved forskellige kondenseringstemperaturer

Ved de høje COP'er begynder energiforbrug til pumper og blæsere at betyde relativt meget, hvorfor der er grænser for hvor meget den samlede COP (inklusive energiforbrug til pumper og blæsere) kan komme op på.

COP's relative forbedring ved at sænke kondenseringstemperaturen 1 °C eller øge fordampningstemperaturen tilsvarende kan udregnes til at være størrelsesorden 5% pr grad. Moralen

er, at det er et meget betydende område at have fokus på, når energiforbruget at et køleanlæg evalueres.

På fordampersiden så gælder det om at benytte så høje temperaturer som muligt. På kondensatorsiden er der en optimering. Hvis man sænker kondenseringstemperaturen, så falder effektforbruget til kompressorerne, men man har samtidig øget effektforbruget til blæserne på den ”tørkøler”, der afgiver varmen fra kondensatoren til omgivelserne. Det viser sig, at det samlede set giver den mest energirigtige løsning at operere med en kondenseringstemperatur som er ca. 8 °C større end omgivelsernes temperatur. Altså, hvis omgivelserne er 12 °C bør kondenseringstemperaturen være ca. 20 °C.



Figur 10-6 Den energioptimale kondenseringstemperatur er ca. 6 °C højere end omgivelsernes temperatur.

Hvis der er tale om brug af køletårn, så skal kondenseringstemperaturen være ca. 8 °C højere end luftens våde temperatur.

Se eventuelt (Jakobsen, 2003) som er et EFP-finansieret projekt, hvor Energoptimal Styring og Regulering af Køleanlæg blev adresseret.

Når delast opnås ved reduktion af omdrejningstal (VLT) og det er nyere kompressorer, så vil COP stige, da de mekaniske tab reduceres relativt mere end kapacitets reduktionen. Det er lidt i modsætning til ”gamle dage”, hvor 100% kapacitet som oftest også gav højest virkningsgrad (COP).

Det sidste begreb som bør introduceres er SEER (Seasonal Energi Efficiency Ratio), som er en beregnet års gennemsnits COP. Her vil driftsprofilen (fuld last / del last etc.) for et år være afspejlet.

Procesintuition

Bestræbelserne i dette afsnit er at give en slags ”fornemmelse” for de indgående Bestræbelserne i dette afsnit er at give en slags ”fornemmelse” for de indgående energiforbrugende komponenter og deres ”rolle” i forhold til at sikre den rette – kølige – indetemperatur.

Lad os antage at lufttemperaturen i et rum er på 23,5 °C, så vil den lokale regulator ”bede om mere” koldt vand. Det kan være at der enten pumpes mere koldt vand frem til det centrale ventilationssystem eller at den lokale kølebaffel modtager mere koldt vand (evt. via at en trevejsventil åbner mere for flow til baffel fremfor til bypass). Resultatet er, at der kommer mere ”varmt” vand retur til køleanlægget og kompressorerne skal øge kapaciteten for at fastholde den ønskede koldt vandstemperatur (frem-temperatur).

Hvis der leveres maksimal vandmængde frem til kølestederne og der stadig ikke er koldt nok, så må sætpunktet til den kolde fremløbstemperatur sættes ned (man kan sige at reguleringen har mistet ”autoriteten” idet fuldt åben ventil ikke leverer køling nok). Resultatet vil være at kompressorerne skal arbejde lidt hårdere dels fordi der skal ydes mere køling, men også fordi fordampningstemperaturen bliver lavere (lidt mindre COP).

Koldt-vands-pumpen er oftest reguleret efter en trykkurve. Denne vil indirekte påvirke flowmængden og dernæst afkølingen af vandet gennem fordamperen. Mere vand betyder mindre afkøling højere energiforbrug til pumperne. En god balance mellem energiforbrug til pumper og god udnyttelse af fordamper er at have en afkøling af vandet på mellem 4 til 6 °C.

På køleanlægssiden bliver fordampningstemperaturen passende lav til at opnå den ønskede koldvands temperatur. Der vil oftest være en overvågning på at denne ikke bliver mindre en nul grader, da vandkredsen oftest ikke er frostsikret. Men et almindeligt fungerende anlæg bør heller ikke operere med lavere fordampningstemperatur end ca. 8 °C – men i princippet så høj som mulig. Selve køleanlægget vil sikre en passende lav kondenseringstemperatur ved at regulere pumper og blæsere ”på den varme side”. Som beskrevet tidligere så bør kondenseringstemperaturen ikke være meget højere end godt 8 °C i forhold til omgivelsernes temperatur. Køleanlægget kan have en minimal kondenseringstemperatur (tryk) som skal overholdes for at ekspansionsventilerne til fordamperen fungerer. Denne minimumsværdi er ofte konservativt sat og kan/bør udfordres.

10.8. Energiforbrug til ventilationskøling vs mekanisk lokal køling

I nogle tilfælde benyttes ekstra friskluft som kølekilde (hvis udetemperaturen er under rumtemperaturen) og i andre tilfælde benyttes (også) lokale kølebafler (se appendix C for beskrivelse af virkemåde).

Udover at de lokale kølebafler har deres klare fordel ved høje omgiversers temperaturer, så kan der evt. spares energi i forhold til mer-ventilatoreffektforbruger ved at skulle øge ventilationsmængden for at kunne tilvejebringe kølemængden i luften.

Vi forestiller os således en situation, hvor der er brug for mere køling ($\Delta\dot{Q}$), og spørgsmålet er om "ekstra" energiforbruget ($\Delta\dot{W}$) er mindst ved (øget) brug af mekanisk køling eller ved at øge ventilationsluftmængden (kan selvfølgelig også være en kombination af begge muligheder).

En måde at anskue det på er at indføre "marginal COP" for de to tilfælde: $COP_{mar} = \frac{\Delta\dot{Q}}{\Delta\dot{W}}$ eller differentielt i et givent driftspunkt: $COP_{mar} = \frac{d\dot{Q}}{d\dot{W}}$

Grunden til at vi indfører marginal COP og ikke blot (gennemsnits)COP ($COP = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}}$) er at anvendelse af disse vil give et for optimistisk billede, da COP falder med stigende kapacitet. Man kan sige at kølingen via basis-luftmængden opnås "gratis", da denne skal være over et vist niveau for at sikre det atmosfæriske indeklime. Men øges luftmængden derudover og der er et alternativ i form af mekanisk køling, så vil det ofte vise sig at være "for dyrt" at øge luftmængden.

Det viser sig, at man med de lovmæssigheder der er for sammenhæng mellem luftmængde og luftens "køleindhold" kan udledes en gennemsnits- og marginal COP for ventilations køling. Se Appendix B for en formeludledning. Hovedresultaterne er som følger.

Gennemsnits COP: (f er den relative luftmængde i forhold til max og ΔT er temperaturforskellen mellem "rum-luften" og indblæsningen fra ventilationen (primærluft)).

$$COP = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}} = \frac{\rho \cdot \dot{V} \cdot c_p \cdot \Delta T}{\left(\frac{SEL_{100\%}}{\dot{V}_{100\%}^2} \cdot \dot{V}^3\right)} = \frac{\rho \cdot c_p \cdot \Delta T}{SEL_{100\%} \cdot f^2}$$

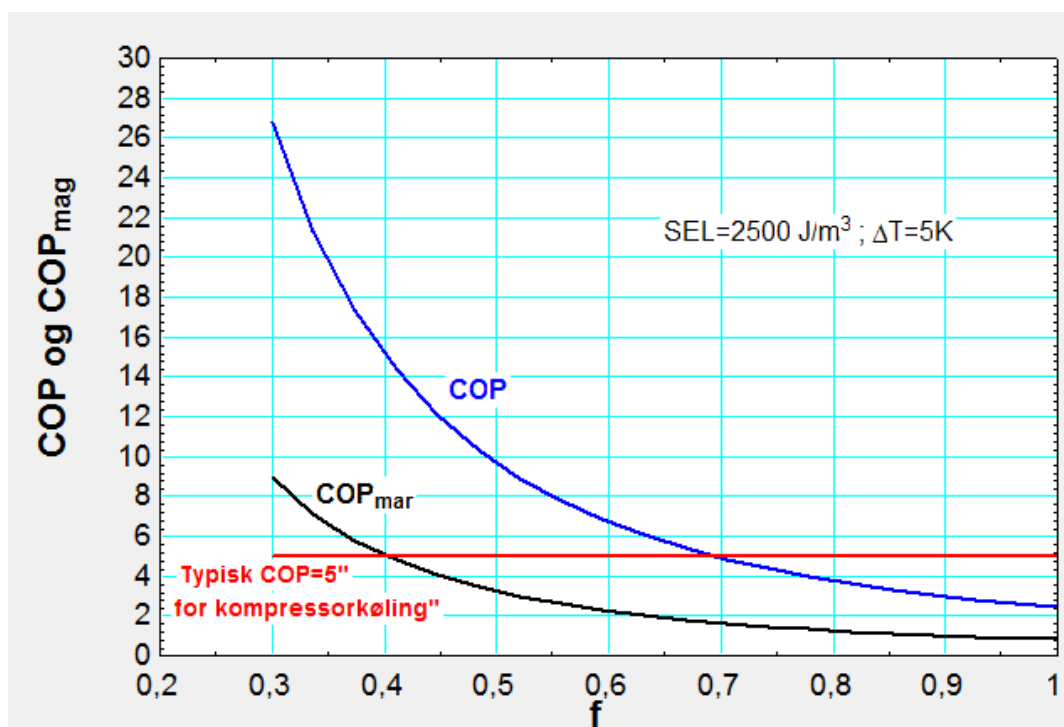
Marginal COP:

$$COP_{mar} = \frac{d\dot{Q}}{d\dot{W}} = \frac{\rho \cdot c_p \cdot \Delta T}{3 \cdot SEL_{100\%} \cdot f^2}^1$$

Det bemærkes at marginal COP er en faktor 3 mindre end gennemsnits-COP. Dette er en konsekvens af at effektforbruget til ventilatoren stiger med kuldeydelsen i 3^{ie} potens.

¹ Hvis der indføres en minimums SEL-værdi for at medtage "tomgangs-effekter" vil sammenhængen $SEL = SEL_{min} + f^2 \cdot (SEL_{100\%} - SEL_{min})$ lede til følgende udtryk for den marginale COP:

$$COP_{mar} = \frac{\rho \cdot c_p \cdot \Delta T}{SEL_{min} + 3 \cdot f^2 \cdot (SEL_{100\%} - SEL_{min})}$$



Figur 10-7 :COP og COP_{mar} som fkt af relativ luftmængde

Ventilatorer opererer typisk fra 50% til 100%. Et eksempel på forløb er vist i figuren ovenfor. Det der er tydeligt er at COP i bedste fald er gunstig ved de lave luftmængder. Bemærk at, det er den marginale COP, som skal sammenlignes med COP for ”kompressorkøling”. I eksemplet skal luftmængden være under 40% før ventilationskøling energimæssigt kan betale sig i forhold til kompressorkøling.

Ovenstående illustrerer principper og størrelsesorden. I et konkret tilfælde skal der tages højde for aktuelle forhold. Men den overordnede konklusion er at køling via øget friskluft kræver lille SEL-værdi, relativ lille luftmængde og stor temperaturdifference (lav indblæsningstemperatur) for at kunne være den mest energivenlige teknik.

Når der sammenlignes med mekanisk køling skal man også her operere med marginal COP for at opnå en fair sammenligning. Men COP for et køleanlæg er ikke så følsom overfor øget kapacitet, som tilfældet er ved brug af øget ventilationsluftmængde. Dog kan øget kapacitet i nogle tilfælde betyde lavere fordampningstemperatur og dermed lidt lavere COP.

COP for mekanisk køling vil i udgangspunktet være større end 5,0, så man kan som første tommefingerregel beregne den marginale COP for ventilationskøling og sammenligne med dette niveau. Det er selvfølgelig mere korrekt, hvis man har data for den aktuelle situation. Men følgende første ”regel” kan benyttes:

Øget brug af ventilation til køling med friskluft er energimæssigt forsvarligt, hvis

$$COP_{mar} = \frac{\rho \cdot c_p \cdot \Delta T}{3 \cdot SEL_{100\%} \cdot f^2} > 5$$

Et tal eksempel:

$$\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3; c_p = 1006 \text{ J/(kg} \cdot \text{°C)}$$

$$\Delta T = 5 \text{ °C}; SEL_{100\%} = 2000 \text{ J/m}^3; f = 0,8$$

$$\Rightarrow COP_{mar} = \frac{1,2 \cdot 1006 \cdot 5}{3 \cdot 2000 \cdot 0,8^2} = 1,57 < 5$$

I dette tilfælde, vil det således **ikke** være en energimæssig fordel at øge friskluftmængden, men bedre at benytte øget brug af mekanisk køling. Den generelle konklusion (tendens) er at ventilationskøling kan betale sig ved lave luftmængder og lav indblæsningstemperatur. Den lave indblæsningstemperatur kan dog give træk, så i nogle tilfælde vil det være en praktisk løsning at benytte lidt varmere og øget luftmængde – selvom det energimæssigt ikke er det bedste.

10.9. Energi nøgletal

COP er et vigtigt nøgletal at registrere. Det kræver effektmålere på kompressorer, pumper og blæsere, samt energimåler på det kolde vand.

Derudover kan det være relevant at opgøre kølebehov og energi til drift af køleanlæg pr. person og/eller pr. m². Disse tal kan eventuelt bruges i en Benchmarking i forhold til bygninger med lignende anvendelse. Disse tal ses nogle gange angivet som kWh/(år·person), kWh/(år·m²) eller W/(person), W/(m²) i sidstnævnte tilfælde skal man være opmærksom på om det er gennemsnit over et år, i kølesæsonen mv.

I en løbende registrering vil det være naturligt at se energiforbruget som en funktion af en gennemsnits udetemperatur i given periode. Der tales om bekendt om ”graddage” i forbindelse med opvarmning, det kan også være relevant i forhold til køling. Hvis dette gøres (eventuelt også med medtagelse af solskinstimer mv.) kan der beregnes et ”korrigeret energibudget”, hvor målt afvigelse i forhold til dette kan være tegn på fejl i anlæg mv.

Et typisk tal for energiforbruget (el-forbruget) til køling i nyere kontorbygninger er ≈ 30 kWh/(år·m²)

Dette tal kan måske være svært at forholde sig til, men antag at en person ca. ”fylder” 10 m² og en kWh koster ca. 2 kr. så vil udgiften pr år pr person til køling være ca. 600 kr.

10.10. Opsummering faktorer til lavt energiforbrug til køling

- Reducer kølebehovet mest muligt – åben vinduer, skab passage mellem evt. koldere (nordvendte) og varmere (syd-vest vendte) bygningsområder. Let påklædning.
- Høj COP
 - Vælg anlæg som har effektive kompressorer – også ved delast (leverandører oplyser typisk ikke isentrop virkningsgrader for kompressorer ect..men COP ved given kuldeydelse, kondenserings- og fordampningstemperaturer)
 - Høj fordampningstemperatur
 - Høj vand frem-temperatur
 - Effektiv fordamper/pladeveksler – fordampningstemperaturen bør være 3-5 K lavere end vandtemperaturen frem til luftkølerne
 - Lav kondenseringstemperatur
 - Lav brine-retur temperatur fra tørkølere til kondensator
 - Effektiv tørkøler (kondenseringstemperatur bør være ca. 8 K højere end udeluft temperatur. Dette giver tæt på minimum effektforbrug af kompressor+blæsere og pumper betjenende tørkøleren på den varme side)
 - Driftsstrategi
 - Brug mest muligt frikøling hvis denne mulighed er tilstede. Ellers overvej ny-etablering. I ”overgangssæsoner” kan frikøling og mekanisk køling kombineres.
 - Overvej natkøling – dvs. lagring af ”kold temperatur” i bygningsmassen. Om natten vil udeluft temperaturen være lavere (end om dagen) med højere COP til følge. Derudover kan der være en yderlig økonomisk gevinst, hvis el-tariffen er lavere om natten
 - Benyt evt en EiSE strategi, hvor det accepteres at det nogle få steder er lidt for varmt i forhold til lokalt sætpunkt (dvs operer med så høj koldt-vands temperatur som muligt)
 - Lad luftens temperatur i bygningen stige lidt i løbet af dagen. Eksempelvis fra 22 °C til 26 °C om sommeren. Her skal man selvfølgelig være opmærksom på eventuelle (berettigede) klager.

10.11. Opgaver

- a) Forklar betydningen af COP og SEL herunder enheder og typiske værdier
- b) Hvad betyder frikøling
- c) Hvis der på en sommerdag på 25 °C skal produceres koldt vand på 12 °C, hvilke ca. fordampnings- og kondenseringstemperatur vil være fornuftige?
- d) Hvilke energiforbrugende komponenter er der i køleanlægget

10.12. Litteratur

Bøger og rapporter:

- 1) Nielsen, Eigil, 2006, forlag Teknidata. *Noget om køleteknik*, 4. udgave, bind 1 og bind 2, ,
- 2) Gundtoft, Søren, 1998, Nyt Teknisk Forlag, *Køleteknik*, 2. udgave
- 3) Granryd, Eric, 2009, Royal Institute of Technology, KTH, *Refrigerating engineering*
- 4) Jakobsen, Arne, 2003, EFP 1273/00-023, Projekt rapport: ”Energioptimal styring og regulering af køleanlæg”

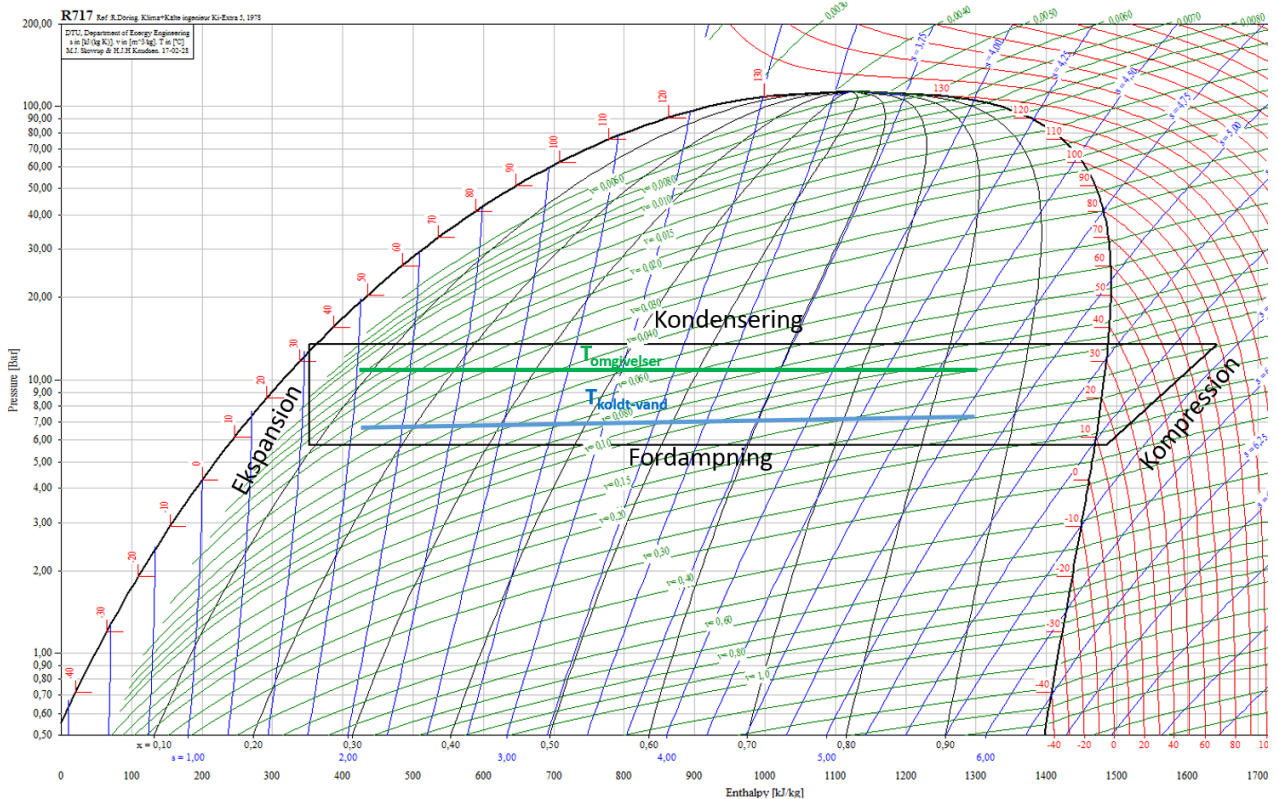
Den først nævnte bog er forholdsvis praktisk i sin tilgang, medens den sidste har stor dybde på principper, teori og beregninger. Bog 2 er forholdsvis balanceret mellem anvendt køleteknik og den termodynamiske beskrivelse. Bog 3 er grund-termodynamisk i sit udgangspunkt og har fokus på teori og principper.

Links:

- a) CoolPack: <http://www.ipu.dk/Indhold/koele-og-energiteknik/CoolPack.aspx>
(Kølemiddeldiagrammer og kredsprocesberegninger)
- b) SecCool: <http://www.ipu.dk/Indhold/koele-og-energiteknik/Seccool.aspx>
(Beregninger på og data for vand, briner, glycol)
- c) <http://learning.danfoss.com/English/Site+Tour/Collect/>
Læring om køleteknik og (Danfoss) komponenter

Hvis du selv vil opstille ligninger og regne på kredsprocesser, så anbefales brug af EES (Engineering Equation Solver), fChart (bruges bl. a. i kurser på Maskinmesterskolen København og på DTU)

10.13. Appendix A: Kredsproces i h, log(p) diagram



Ovenstående diagram er for kølemidlet (R717, NH₃). "Den vandrette akse er entalpi (h, energiindhold) og den lodrette akse er trykket (p) vist i logaritmisk skala.

I det vidste eksempel er fordampningstemperaturen 8 °C, koldvands temperaturen er gå fra 12 °C til 8 °C, kondenseringstemperatur på 35 °C og endelig er en omgivelser temperatur på 25 °C indtegnet.

Den optagne køleydelse foregår under fordampningen. Effektoptaget sker under kompression og den samlede optagne energi afgives fra kondensatoren til omgivelserne.

10.14. Appendix B: Udedning af gennemsnits og marginal COP for Ventilationskøling

I dette appendix udledes COP ($COP = \frac{\dot{Q}_{køli\ luft}}{\dot{W}_{ventilator}}$) og marginal COP ($COP_{mar} = \frac{d\dot{Q}}{d\dot{W}} \approx \frac{\Delta\dot{Q}}{\Delta\dot{W}}$) for Ventilationskøling.

$$\dot{Q} = \rho \cdot \dot{V} \cdot c_p \cdot \Delta T: \text{køling i indblæsningsluften}$$

$$\dot{W} = f^3 \cdot \dot{W}_{100\%}; \text{Effektforbrug ventilator}; f = \frac{\dot{V}}{\dot{V}_{100\%}} \text{ relativ ventilator kapacitet}$$

Vi kender som udgangspunkt SEL-værdien ved 100 % ventilator kapacitet. Vi får:

$$\dot{W}_{100\%} = SEL_{100\%} \cdot \dot{V}_{100\%}$$

$$\text{Vi får da: } \dot{W} = \left(\frac{\dot{V}}{\dot{V}_{100\%}}\right)^3 \cdot SEL_{100\%} \cdot \dot{V}_{100\%} = \frac{SEL_{100\%}}{\dot{V}_{100\%}^2} \cdot \dot{V}^3 = SEL_{100\%} \cdot \dot{V}_{100\%} \cdot f^3$$

Gennemsnits-COP bliver:

$$COP = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}} = \frac{\rho \cdot \dot{V} \cdot c_p \cdot \Delta T}{\left(\frac{SEL_{100\%}}{\dot{V}_{100\%}^2} \cdot \dot{V}^3\right)} = \frac{\dot{V}_{100\%}^2 \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T}{SEL_{100\%} \cdot \dot{V}^2} = \frac{\rho \cdot c_p \cdot \Delta T}{SEL_{100\%} \cdot f^2}$$

Marginal COP bliver:

$COP_{mar} = \frac{d\dot{Q}}{d\dot{W}}$ Her kan vi finde udtryk for køleydelsen \dot{Q} som funktion af \dot{W} eller benytte kædereglen ved differentiation.

$$COP_{mar} = \frac{d\dot{Q}}{d\dot{W}} = \frac{d\dot{Q}}{d\dot{V}} \cdot \frac{d\dot{V}}{df} \cdot \frac{df}{d\dot{W}} = \frac{\frac{d\dot{Q}}{d\dot{V}} \cdot \frac{d\dot{V}}{df}}{\frac{d\dot{W}}{df}}$$

Ved indsættelse af de tre differentier fås:

$$COP_{mar} = \frac{(\rho \cdot c_p \cdot \Delta T) \cdot \dot{V}_{100\%}}{3 \cdot SEL_{100\%} \cdot \dot{V}_{100\%} \cdot f^2} = \frac{(\rho \cdot c_p \cdot \Delta T)}{3 \cdot SEL_{100\%} \cdot f^2}$$

Hvis der indføres en minimums SEL-værdi for at medtage ”tomgangs-effekter” vil sammenhængen $SEL = SEL_{min} + f^2 \cdot (SEL_{100\%} - SEL_{min})$ lede til følgende udtryk for den marginale COP:

$$COP_{mar} = \frac{\rho \cdot c_p \cdot \Delta T}{SEL_{min} + 3 \cdot f^2 \cdot (SEL_{100\%} - SEL_{min})}$$

og

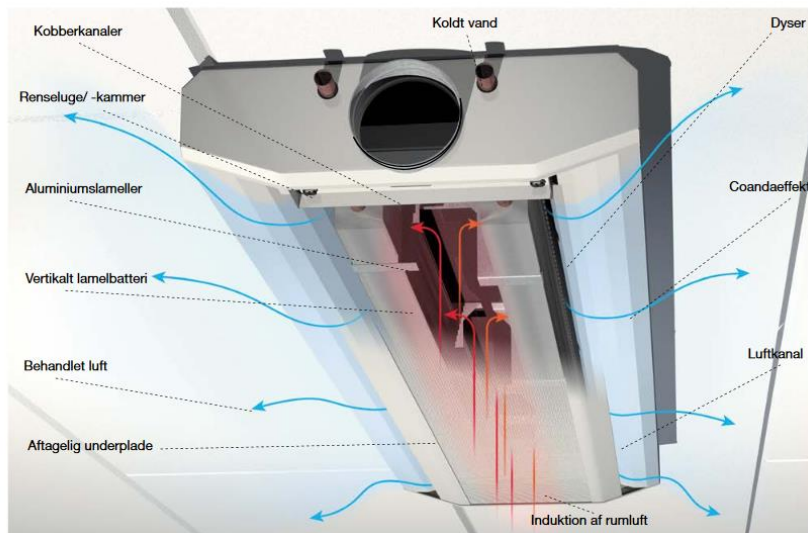
$$COP = \frac{\rho \cdot c_p \cdot \Delta T}{SEL_{min} + f^2 \cdot (SEL_{100\%} - SEL_{min})}$$

10.15. Appendix C: Virkemåde kølebaffel

Kølebafler er placeret lokalt ude i ”zonerne”. Ventilationsluften opblandes med rumluften og passerer en ”koldvands varmeveksler” og falder dermed i temperatur. Skitsen nedenfor er fra LinDab’s hjemmeside:

Kølebaffel

Professor



Der er følgende ledsagende beskrivelse:

Funktion

Kraftfuld funktion i lille format

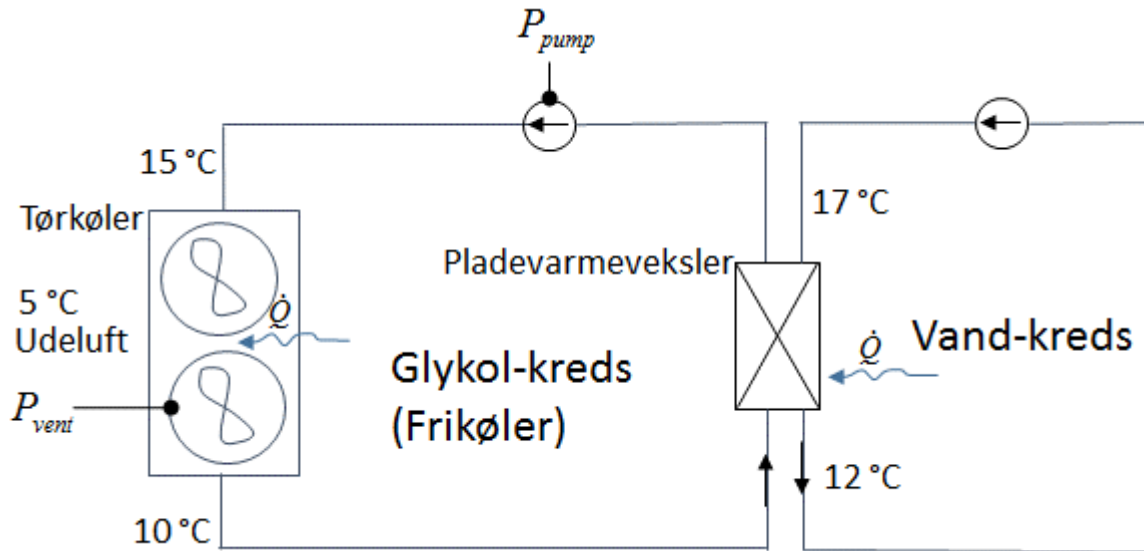
Lindabs kølebaffel, Professor, bygger på induktionsprincippet. Ved at ventilationsluft med et vist dynamisk tryk indblæses gennem specialformede dyser i en zone, skabes et lavt statisk tryk. Dette lave tryk bevirker, at varm rumluft suges mod ventilationsluften gennem batteriet. Den varme rumluftsmængde er 4 til 5 gange så stor som ventilationsluften. Luften køles, når den passerer igennem lamelbatteriet som består af aluminiumsribber med kobberretet og videre til en central kølemaskine (se billede 1). Konstruktionen muliggør en høj køleydelse trods produktets lave byggehøjde. Dyserne, som indblæser ventilationsluften, er konstrueret således, at coandaeffekten, dvs. luftens vedhæftning, allerede sker i dysen, og luften følger derefter kanalsiden ud mod loftet, hvor bafflens ledeplader er udformet således, at coandaeffekten også bevares under rummets loft.

Note1: Bemærk at det kun er rumluften som passerer kølefladen. Efter denne er ”sugget” op gennem kølefladen blandes den afkølede rumluft med den primære ventilations friskluft.

Note2: Der opereres også med såkaldte passive kølebafler, der ikke har nogen (primær) ventilationsluft, men kun benytter rumluften. Endvidere bør ”kølelofter” nævnes som udnytter hele loftsfladen til ”stille” indblæsning af kold luft

10.16. Appendix D: Eksempel på frikøler

Ved frikøling benyttes typisk kold udeluft til at frembringe det kolde vand som distribueres ud på kølestederne (lokalt i zonerne og/eller i det centrale ventilationsanlæg). Eksemplet nedenfor er baseret på data som ttCoil venligt har stillet til rådighed.

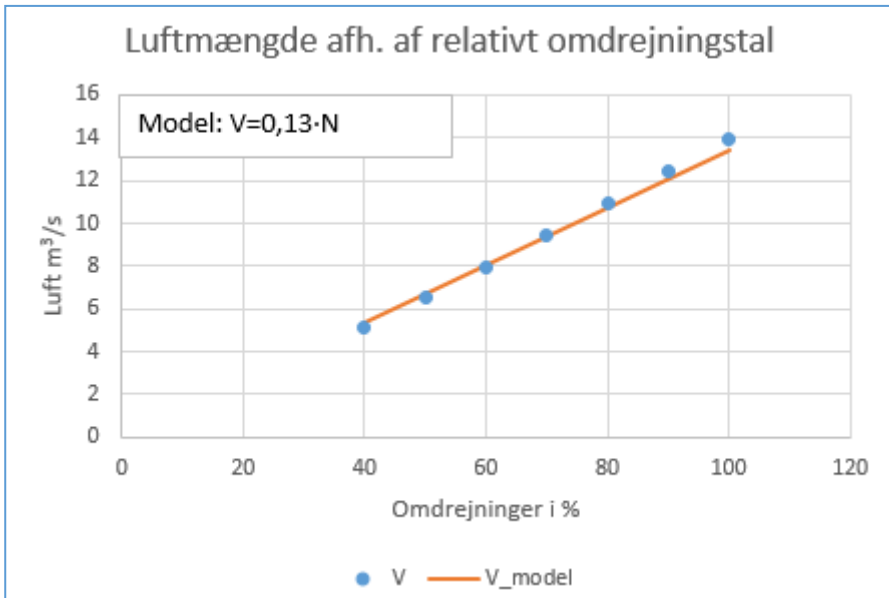


Flg data findes, hvor omdrejningstal for pumper og blæsere er varieret fra 100% til 40%. Pumperne reguleres proportionalt med ventilatorernes omdrejningstal.

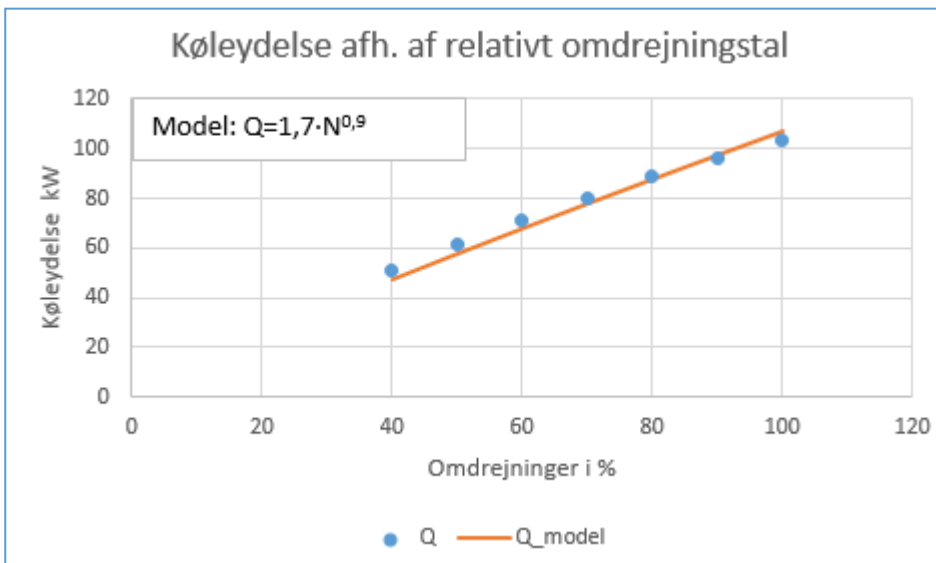
N – rpm vent	N %	\dot{V}_{luft} (m ³ /s)	T _{luft_ud} (°C)	P _{tot} = P _{pump_glykol} +P _{vent}	\dot{Q} (kW)	COP = $\frac{\dot{Q}}{P_{tot}}$
750	100	13,92	10,7	3,588	103,2	28,8
675	90	12,41	10,9	2,616	96,1	36,7
600	80	10,91	11,2	1,860	88,6	47,6
525	70	9,42	11,5	1,272	80,3	63,1
450	60	7,95	11,9	0,852	71,4	83,8
275	50	6,51	12,3	0,552	61,7	111,8
300	40	5,09	12,7	0,336	50,9	151,5

Det ses at COP er markant højere end det der opnås ved kompressor-køling.

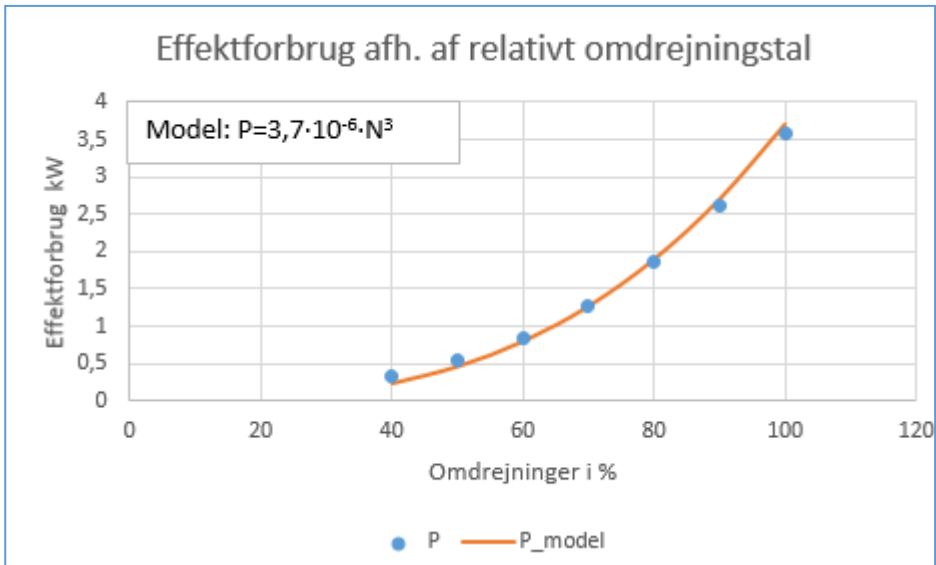
På næste side er plot for diverse størrelser's afhængighed af relativt omdrejningstal vist. Den "umiddelbare model-lov" er ligeledes vist.



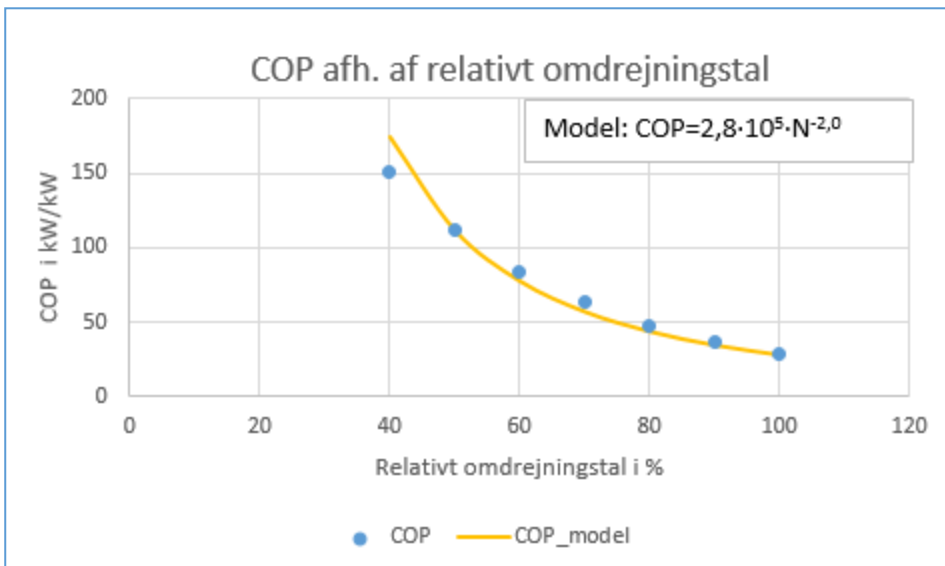
Af ovenstående figur ses at luftmængden er proportional med omdrejningstallet



Af ovenstående figur ses at køleydelsen stiger med omdrejningstallet. Det kan diskuteres, hvilken modellov der skal anvendes idet der er forskellige fænomener der spiller ind. Men afhængigheden er lidt "svagere" end rent lineær. Der kan argumenteres for at anvende 0,9 som potens-afhængighed (både varmeovergangstal og temperaturdifferencer er svagt stigende med stigende omdrejningstal).



Som bekendt stiger effektforbruget til pumper og blæsere med omdrejningstallet i tredje potens. Denne model passer også rigtig fint med de foreliggende data.



COP stiger med faldende omdrejningstal da effektforbruget ”falder hurtigere” med reduceret omdrejningstal end kuldeydelsen. Det ses at COP kan blive særdeles høj ved lave omdrejningstal (lave ydelser) og i praksis vil en rimeligt fungerende frikøler altid have markant bedre COP end COP for tilsvarende kompressorkøling.

11. LYS OG BELYSNING

*Finn Jørgensen, Adjunkt
Maskinmestreskolen København
fj@msk.dk*

Afsnittet "Lys" kan læses som en selvstændig beskrivelse eller i sammenhæng med de øvrige faglige områder, der er beskrevet i ELFORSK projektet: Indeklima, Facility Management, Ventilation, Opvarmning, CTS, bygnings-dynamik, nøgletal og energirenovering. Alle afsnit behandler det pågældende emne ud fra relevansen i forhold til "Energirigtig drift af det rette indeklima i bygninger". Spørgsmål, kommentarer mv. kan rettes til forfatteren.



ELFORSK

Dette kapitel er udarbejdet som del af projektet **Energirigtig drift af det rette indeklima i bygninger – ENDRIN** støttet af ELFORSK i periode 2016–2017, projektnummer 348-006 (www.elforsk.dk).

11.1. Indhold

11.1.	Indhold.....	11-2
11.2.	Læringsmål.....	11-3
11.3.	Nomenklatur og sprogbrug.....	11-4
11.4.	Indledning.....	11-7
	Begreber og Definitioner.....	11-7
	Fotometriske love.....	11-15
	Praktiske målinger.....	11-19
11.5.	Lovkrav.....	11-20
	BR15.....	11-20
	DS/EN12464-1:2015 og DK NA.....	11-21
	Lysberegning – Indendørs belysningsanlæg.....	11-24
11.6.	Dagslys og indeklime, Udnyttelse af dagslys, Energieffektivitet og Lysstyring.....	11-25
	Hvad forstås ved dagslys?.....	11-25
	Udnyttelse af dagslys.....	11-25
	Dagslysets betydning for det rette indeklime – Dynamisk lys.....	11-33
	Lysstyring – herunder samspil med dagslys.....	11-34
11.7.	Udvikling af lyskilder, valg af lysarmaturer, dynamisk lys og sundhed.....	11-42
	Hvad er en LED.....	11-43
	LED-armatur.....	11-44
	LED- eller lysrørsarmaturer – Levetider, lysnedgang, investering og driftsomkostninger.....	11-45
11.8.	Energirigtig drift- og vedligeholdelse af belysningsanlæg.....	11-47
	Driftsomkostninger.....	11-48
	Funktionsafprøvning.....	11-49
11.9.	Litteraturliste.....	11-49
11.10.	APPENDIX A.....	11-51
	Den fælles europæiske standard DS/EN12464-1:2015 og nationalt annekst.....	11-51
	DS/EN12464-1.....	11-51
11.11.	APPENDIX B.....	11-66
	Funktionsafprøvning – BR15 (2017).....	11-66

11.2. Læringsmål

Studerende der læser følgende kapitel skal være i stand til at

- Kende til lystekniske begreber, fotometriske love og lyskilder.
- Kende til lovkrav for belysningsanlæg, herunder krav til dagslysstyring.
- Kende til lysets betydning for arbejdsmiljøet.
- Kende til dagslysbegrebet.
- Lysstyring – herunder closed- og open loop dagslysstyring.
- Lyskilder og belysningsarmaturer, herunder kunne beregne og evaluere relevante nøgletal
- Kende til væsentlige faktorer ifm. drift- og vedligeholdelse af belysningsanlæg.

11.3. Nomenklatur og sprogbrug

Benævnelse og symbol	Enhed	Beskrivelse
Lysstyrke I	cd (candela)	Grundlæggende SI-enhed. Angiver lysstrøm (lumen) pr. rumvinkel (steradian)
Lysstrøm Φ (flux)	lm (lumen)	Én lumen er den lysstrøm en lyskilde med lysstyrken én candela i alle retninger udsender indenfor rumvinklen én steradian
Belysningsstyrke E	lx (lm/m^2)	Lysstrøm (lumen) pr. fladeareal (m^2). Belysningsstyrken E er et mål for, hvor kraftigt en flade er belyst. Belysningsstyrken benævnes også belysningen eller illuminansen
Luminans L	cd/m^2	Luminansen angiver, hvor lys en flade er. Fladen kan være belyst, eller selv være en lyskilde. Fladens luminans L er flades lysstyrke i en given retning divideret med fladens tilsyneladende areal set fra den givne retning
Rumvinkel ω	sr (steradian)	Rumvinkelmål. Én steradian afskærer én m^2 på enhedskuglen. Én sr er således $1/4\pi$ af kuglens samlede rumvinkel
R_a ($R8$)	0-100%	Farvegengivelsesindeks baseret på 8 standardiserede prøvefarver. R_a angiver i hvor høj grad farvegengivelsen ligner farvegengivelsen ved den valgte reference lyskilde
CRI	0-100%	CRI (Colour Rendering Index) Generel term for farvegengivelses indeks
CRV	0-100%	CRV (Colour Rendering Vector). Farvegengivelsesindex baseret på 215 farver udviklet af Philips
c, f, λ	$m/s, 1/s, m$	Lysets udbredelseshastighed, lysets frekvens og lysets bølgelængde. Mellem c, f og λ gælder relationen: $c = f \cdot \lambda$. Jo højere frekvens, jo kortere bølgelængde. c afhænger af udbredelsesmediet: $c = 1/\sqrt{\epsilon \cdot \mu}$ $c_{atm.luft} \cong 1/\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0} = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
$E_{mid}, E_{min}, E_{max}$	lx (lm/m^2)	Middelbelysningsstyrken E_{mid} beregnes som den lysstrøm der rammer en flade divideret med fladens areal. E_{min} og E_{max} angiver henholdsvis mindste og største belysningsstyrke på arbejdsplanet
Regelmæssighed U_0	0-100%	$U_0 = \frac{E_{min}}{E_{mid}}$
Blænding		Ubehagelige synsforhold. Blænding opdeles normalt i synsnedsættende blænding og ubehagsblænding. Synsnedsættende blænding nedsætter evnen til at se detaljer. Ubehagsblænding kan virke irriterende og stressende
Blændingstal B (UGR -metoden)	$B = 8 \cdot \log_{LB}^{0,25} \sum_{i=1}^n \frac{L_s^2 \cdot \omega_s}{p_s^2}$ L_s : bl.kildens luminans ω_s : bl.kildens rumvinkel L_B : baggrundsluminans p_s : bl.kildens pos. indeks. n : antal blændingskilder	Blændingstallet B er en beregnet værdi for ubehagsblændingen i et givent punkt i et lokale. UGR -metoden 'Unified Glare Rating' vægter hver enkelt lysgivers bidrag med et positionsindeks, bestemt af lysgiverens placering i synsfeltet

Reflektans ρ	$\rho = \frac{\Phi_{refl}}{\Phi_{flade}} \quad (0-1)$	En flades reflektans ρ angiver andelen af en indkommen lysstrøm som fladen kaster tilbage
Transmittans τ	$\tau = \frac{\Phi_{trans}}{\Phi_{flade}} \quad (0-1)$	Den del af en indkommen lysstrøm som passerer gennem fladen
Absorption		Den del af en indkommen lysstrøm som hverken reflekteres eller transmitteres, men absorberes af fladen og omsættes til varme
Lysfordelingskurve	$cd \text{ (pr. } lm)$	Armaturets lysstyrke I som funktion af den retning armaturet udsender lys. Angives som graf i polært koordinatsystem, med enhed cd pr. lm
LED		Light Emitting Diode. En PN-overgang i et halvleder materiale. LED lyskilder er elektroluminescenslamper. Fluorescens udnyttes til at skabe acceptable lysspektre. LED udmærker sig ved højt lysudbyttet og levetider op til 100.000h afhængig af driftstemperatur
Temperaturstråler		Lyskilde hvor lysudsendelsen sker ved opvarmning af et materiale (f.eks. standard gløde- og halogenlamper)
Luminescensstråler		Generel betegnelse for lyskilder der ikke udsender lys ved temperaturstråling. Lysrør, metaldamplamper og LED er luminescensstrålere. I metaldamplamper frembringes en elektrisk udladning i en gasfyldt kolbe, hvor udladningen sker i metallerne kviksølv eller natrium på gasform. I lysrør sker udladningen i kviksølvdampe. Udsendes stråling ved luminescens i det ultraviolette område kan strålingen efterfølgende omdannes til synligt lys ved fluorescens
Flourescens		Udsendelse af lys ved flourescens. Når et materiale belyses med én frekvens og indenfor $10^{-8}s$ genudsender energien som lys ved en anden frekvens. (I lysrør og LED udnyttes flourescens)
Fosforescens		Udsendelse af lys ved fosforescens. (Når et materiale udsender lys et stykke tid efter det er belyst. En selvlysende urskive udsender lys ved fosforescens)
Lysudbytte eller Lyseffekt	lm/w	Lyskildens effektivitet målt i lumen pr. watt
Lysspektre		En lyskildes spektrum eller spektrale effektfordeling viser den udstrålede effekt ved diskrete bølgelængder
Adaptation		Øjets tilpasning til synsfeltets luminanser. Adaptation foregår automatisk ved skiftende belysningsniveau og når synslinjen flyttes mellem lysere og mørkere rumafsnit. For hver adaptationstilstand (adaptationsluminans) eksisterer to karakteristiske grænser, en nedre mørkegrænse og et øvre blændingsgrænsområde. Luminanstrinene i området fra mørke til blænding er afgørende for indtrykket af lyset i rummet
Afskærmningsvinkel		Vinkel mellem et armatures horisontale akse og synslinjen, over hvilken lyskilden bliver synlig
Armaturvirkningsgrad η_A	$0-100\%$	Den andel af et armatures monterede lyskildelysstrøm (lm) som forlader armaturet
Rumvirkningsgrad η_R	$0-100\%$	Den andel af lysstrømmen, som forlader armaturerne og rammer arbejdsplanet

Belysn.virkn.grad η_B	0-100%	Den andel af den installerede lyskildelysstrøm som rammer arbejdsplanet. $\eta_B = \eta_A \cdot \eta_R$
Gennemsnitslevetid	h	Det tidspunkt hvor 50% af et antal komponenter stadig fungerer
Serviceinterval	h	Interval mellem: <ul style="list-style-type: none"> - udskiftning af lyskilder - rengøring af armaturer - rengøring af rummets flader Valg af serviceintervaller indgår i vedligeholdelsesfaktoren, og dermed dimensioneringsgrundlag, energieffektivitet og økonomi
Vedligeholdelsesfaktor MF (<i>maintenance factor</i>)	0-1	Vedligeholdelsesfaktoren (MF). Bestemmende for den begyndelsseværdi belysningsstyrken skal have for at sikre kravet til belysningsstyrken i hele driftsperioden. Beregnet vedligeholdelsesfaktor skal dokumenteres. $MF = LLMF \cdot LSF \cdot LMF \cdot RSMF$
Lyskilde lumen vedligeholdelsesfaktor $LLMF$ (<i>lamp lumen maintenance factor</i>)	0-1	Lyskildens lysnedgang. Lyskildens lumenværdi efter en given driftstid. Lægges til grund for valg af lyskilder og valg af driftstid mellem lyskildeudskiftning. Afgørende faktor når alternative løsninger skal sammenholdes driftsøkonomisk. $LLMF$ skal dokumenteres af armatur/lyskilde-fabrikantene.
Lyskilde overlevelsesfaktor LSF (<i>lamp survival factor</i>)	0-1	Angiver andel af lyskilder der, statistisk set, overlever det valgte interval for lyskildeudskiftning. LSF sættes til 1, hvis udbrændte lyskilder udskiftes umiddelbart efter udfald. LFS sættes ligeledes til 1, hvis lyskilden er en LED. LSF er for LED armaturets levetid
Armaturtilsmudsning LMF (<i>luminaire maintenance factor</i>)	0-1	Lysnedgang sfa armaturtilsmudsning. Afhænger af valgt rengøringsinterval. Sættes normalt til 0,93-0,97 ved rene omgivelser og 0,9 ved mere udfordrende
Rumvedligeholdelsesfaktor $RSMF$ (<i>room surface maintenance factor</i>)	0-1	Lysnedgang sfa rumfladernes tilsmudsning. Afhænger af valgt rengøringsinterval. Sættes normalt til 0,95-0,97 ved rene omgivelser og 0,9 ved mere udfordrende
L -værdi / LED -armaturlevetid	h	Et LED armatures levetid og ydelse over tid skal oplyses, jf. IEC62171 og IEC62722. L -værdien angiver forventet lysstrøm i % af nyværdi efter en given driftstid. L -værdien: L_{80} 60.000h angiver at armaturets lysstrøm efter 60.000h er 80% af nyværdien. L -værdien er bestemmende for lysudbyttets (lm/W) variation i driftsperioden, og kan reducere/forøge nødvendigt antal armaturer i et belysningsanlæg
Dagslysfaktor DF	0-1	$DF = \frac{E_{indvendig}}{E_{udvendig}}$ Forholdet mellem belysningsstyrken i et punkt i planet indenfor og den samtidige belysningsstyrke på et vandret plan udenfor fra det diffuse himmellys uden skyggeeffekter fra omgivelserne

11.4. Indledning

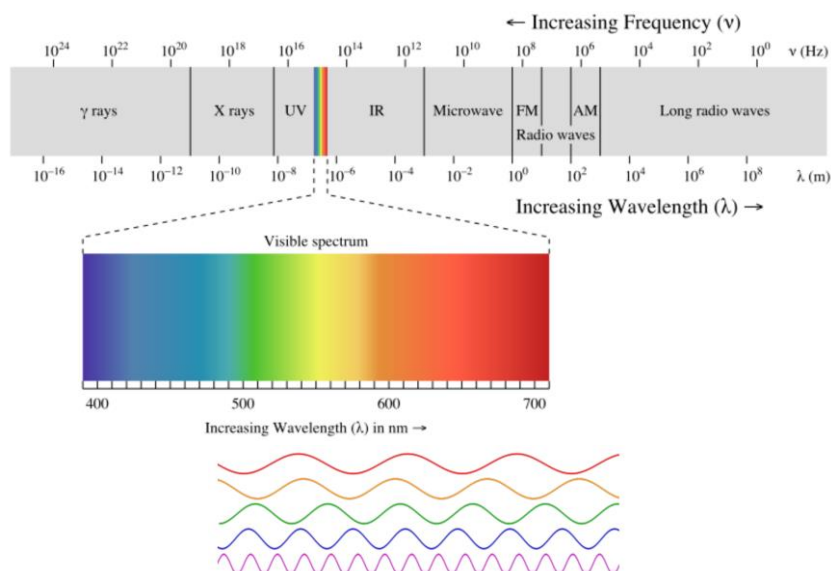
En bygnings belysningsanlæg og udnyttelse af dagslys har direkte indvirkning på energirigtig drift og det rette indeklima. At dimensionere og vælge belysningsanlæg kræver ikke blot viden om energieffektive belysningsarmaturer og mulige lysstyringsprincipper, men indsigt i lysets natur og betydning for menneskelig velvære og aktivitetsniveau.

Et fyldestgørende grundlag at vurdere og udvælge belysningsløsninger på kræver kendskab til lysets egenskaber, lovkrav, lyskilder, lysarmaturer, dagslystilskud og lysstyringsprincipper samt drift- og vedligeholdelse af belysningsanlæg.

I kapitlet LYS gives først en introduktion til lysets natur og egenskaber. Dernæst hvilke lovkrav der gælder for kunstig belysning og udnyttelse af dagslys. Begrebet dagslysfaktor introduceres og styringsprincipper for opfyldelse af lovkrav om dagslysstyring gennemgås. Energieffektivitet opnås ved det rette valg af energieffektive lyskilder, armaturer og lysstyring, mens en investeringsmæssig fordelagtig løsning ud over energieffektivitet og investeringsudgift på investeringstidspunktet forudsætter valg af investeringsperiode og kendskab til drift- og vedligeholdelsesomkostninger i perioden. Kendskab til forskellige lyskilders lysudbytte, lyskildelevetid og lysnedgang i investeringsperioden, samt drift- og vedligeholdelsesomkostninger indgår i en sådan beregning og gennemgås sidst i kapitlet.

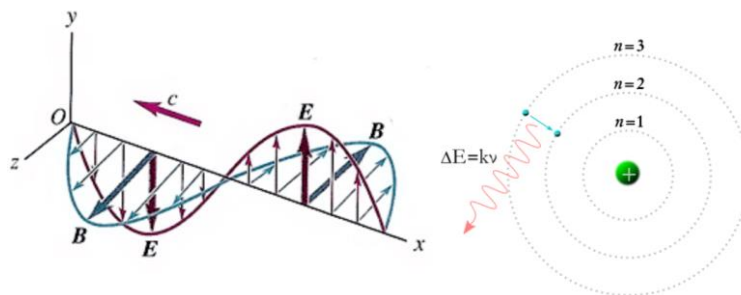
Begreber og Definitioner

Lys er elektromagnetisk stråling. Kun et meget lille område af det elektromagnetiske spektrum, fra infrarødt til ultraviolet lys, er synligt for det menneskelige øje. Synligt lys ligger i bølglængdeområdet $380nm \leq \lambda \leq 740nm$.



Figur 11-1 Elektromagnetisk stråling; Illustrationer: en.wikipedia.org

Lys er ikke blot kendetegnet ved dets styrke, udbredelsesretning og frekvens. Lys har såvel bølge- som partikelnatur. Når lys afbøjes i optiske gitre udviser det bølgenatur, når lys vekselvirker med atomer eller faste stoffer og reflekteres eller absorberes udviser det partikelnatur.



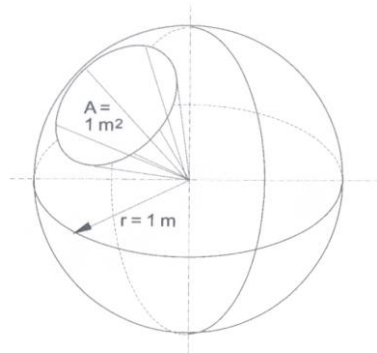
Figur 11-2 Lysets bølge- og partikelnatur; Illustrationer: Young & Freedman, University Physics - en.wikipedia.org

Som partikler, kaldet fotoner eller lyskvanter, kan lys beskrives ved partiklernes energi ΔE , der er proportional med lysets frekvens, $\Delta E = h \cdot \nu$, hvor h er Planks konstant. 'Jo højere frekvens ν lys har, jo højere energi har det'. Uanset lysets bølgelængde λ , udbreder det sig med samme hastighed $c = \nu \cdot \lambda$. 'Jo højere frekvens lys har, jo kortere bølgelængde har det'.

I lysgennemtrængelige (transparente) materialer som vand, glas og plastik, reduceres lysets udbredelseshastighed. I glas reduceres hastigheden med ca. 30% i forhold til atmosfærisk luft. Rammer en lysstråle, der er sammensat af flere bølgelængder, et transparent materiale brydes de enkelte bølgelængder forskelligt. Fænomenet kaldes dispersion og udnyttes til at analysere hvilke bølgelængder lyskilder udsender og med hvilke intensiteter.

I belysningsmæssige sammenhænge benyttes de lystekniske begreber: lysstyrke, lysstrøm og belysningsstyrke til at beskrive lyset, mens begrebet luminans benyttes til at beskriver hvordan en flade, eller en lysgiver, opleves af øjet som iagttaget. Derudover karakteriseres lyset ved dets farvetemperatur, og dets evne til at gengive farver. Lysets farvetemperatur angiver hvor 'hvidt' det opfattes, mens lysets evne til at gengive farver beskrives ved et farvegengivelsesindeks.

Rumvinkel. I definitionen af lysstyrke I og lysstrøm Φ indgår rumvinkelmålet steradian. **1 steradian [sr]** er den rumvinkel som afskærer arealet 1 m^2 på enhedskuglen. Da kuglens overfladeareal er $4\pi \cdot r^2$, svarer rumvinklen 1 steradian til $1/4\pi$ af kuglens samlede rumvinkel.



$$A_{\text{kugle}} = 4\pi \cdot r^2$$

$$A_{\text{enhedskugle}} = 12,57\text{m}^2$$

**Rumvinklen $\omega = 1$ sr
afskærer arealet 1m^2 på
enhedskuglen**

Figur 11-3 Rumvinkelbegrebet; Illustration: Poul E. Petersen, Lys og varme

INFO BOKS:

Begreb	Enhed	Definition
Lysstyrke I	candela [cd]	Lysstrøm pr. rumvinkel
Lysstrøm Φ	lumen [lm]	Effekt i form af lysstrøm
Belysningsstyrke E	lux [lx]	Lysstrøm pr. fladeenhed
Luminans L	candela pr. m ² [cd/m ²]	Lysstyrke pr. lysende fladeenhed
Rumvinkel ω	steradian [sr]	1/4π af kuglens samlede rumvinkel
Lysstyrken 1cd	1 candela er defineret som lysstyrken i en given retning af en lyskilde, der udsender monokromatisk lys med en frekvens på 540 · 10 ¹² Hz og hvis strålingsstyrke i denne retning er 1/683 watt pr. steradian	
Lysstrømmen 1lm	1 lumen er den effekt, som en lyskilde med lysstyrken 1 candela udsender indenfor en rumvinkel på 1 steradian. (En lyskilde med lysstyrken 1 candela i alle retninger udsender en samlet lysstrøm på 4π lumen)	

Lysstyrke *I* måles i candela [cd] og angiver hvor stor en lysstrøm [lm] der udsendes i en given retning. Enheden er lumen pr. steradian og én candela defineres som lysstyrken i en given retning af en lyskilde der udsender monokromatisk lys (lys med én frekvens) ved frekvensen 540 · 10¹² Hz og strålingsstyrken 1/683 watt pr. steradian i retningen.

$$I = \frac{\Phi}{\omega}$$

[lm/sr]

Lysstrøm **Φ** (flux) måles i lumen [lm] og angiver den effekt i form af lysstrøm, som en lyskilde med lysstyrken én candela udsender indenfor en rumvinkel på én steradian. En lyskilde der i alle retninger har lysstyrken én candela udsender lysstrømmen 4π lumen, idet kuglens samlede rumvinkel er 4π sr.

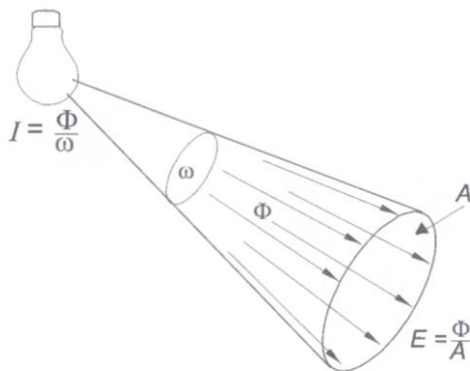
$$\Phi = I \cdot \omega$$

[lm]

Belysningsstyrke E måles i lux [lx]. Belysningsstyrken én lx er belysningsstyrken på en flade der rammes af lysstrømmen én lumen pr. m^2 .

$$E = \frac{\Phi}{A}$$

[lm/m^2]



Figur 11-4 Lysstyrke I , Lysstrøm Φ og Belysningsstyrke E ; Illustration: Poul E. Petersen, *Lys og varme*

Luminans L måles i candela pr. m^2 og angiver en flades lysstyrke pr. fladeenhed.

$$L = \frac{I}{A}$$

[cd/m^2]

En flades luminans angiver, hvor lys fladen er. Fladen kan være belyst, eller selv være en lysgiver. Fladers luminanser, og variationen af luminanser mellem tilstødende flader er af afgørende betydning for det oplevede lysmiljø. Det kan vises, at en fuldstændig reflekterende mathvid flade, med belysningsstyrken 1 lx har luminansen $1/\pi$ cd/m^2 .

Luminans og blænding. Blanke overflader, dårligt afskærmede lyskilder og lysindfald fra vinduer kan blænde. Der skelnes mellem synsnedsættende blænding og ubehagsblænding. Synsnedsættende blænding nedsætter øjets følsomhed (adaptation), mens ubehagsblænding er det ubehag lyskilder, eller flader, med høj luminans kan medføre. I hvor høj grad en lyskilde, eller flade, medfører ubehag i en arbejdssituation har været genstand for megen forskning. En metode til at beskrive graden af ubehagsblænding, er at beregne et blændingstal, der medtager alle lyskilder indenfor iagttagerens synsfelt, vægter disse ved et positionsindeks i forhold til iagttagerens synslinje og sætter værdien i forhold til baggrundsluminansen.

Den fælles europæiske belysningsstandard DS/EN12464 stiller krav til ubehagsblænding i form af maksimale blændingstal beregnet efter *UGR*-metoden for at sikre et godt arbejdsmiljø uden skadelige langtidseffekter fra ubehagsblænding.

Blændingstallet B beregnet ved *URG* metoden (unified glare rating) beregnes som:

$$B = 8 \cdot \log \frac{0,25}{L_B} \sum_{i=1}^n \frac{L_s^2 \cdot \omega_s}{p_s^2}$$

hvor

L_s : Blændingskildens luminans (cd/m^2)

ω_s : Blændingskildens rumvinkel, set fra iagttager (sr)

L_B : Baggrundsluminansen (sr)

p_s : Guth's positionsindeks, beregnet ud fra vinklerne mellem blændingskilde og synslinje

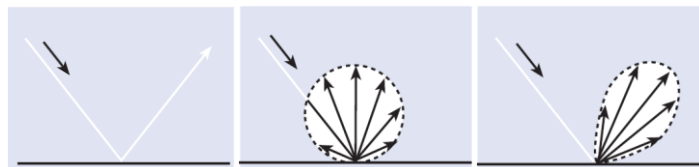
n : antal blændingskilder

Refleksion, transmission og absorption. Når lys rammer et lokales flader vil en del af lyset absorberes og omsættes til varme, mens resten vil reflekteres. Er fladen transparent, f.eks. et vinduesglas, vil en del af lysstrømmen transmitteres gennem fladen. Den andel af lysstrømmen som rammer fladen og reflekteres er fladens reflektans. Den andel af lysstrømmen som rammer fladen og transmitteres gennem fladen er fladens transmittans.

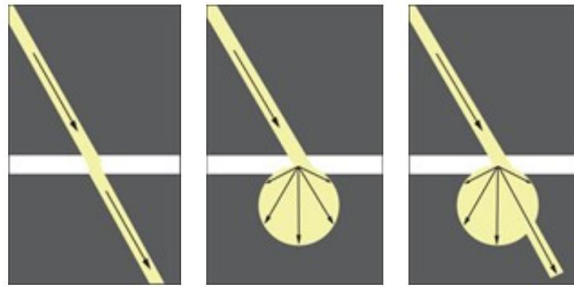
Tabel 11-1 Reflektans og Transmittans

Reflektans	$\rho_{flade} = \frac{\Phi_{reflekeret}}{\Phi_{indkommen}}$
Transmittans	$\tau_{flade} = \frac{\Phi_{transmitteret}}{\Phi_{indkommen}}$

Fladeres måde at reflekterer lysstråler på er afgørende for blændings- og luminansforhold. Reflekteres lysstråler i en lysstråle med samme ud- som indfaldsvinkel er fladen spejlende. Spejlende flader kan medføre ubehagsblænding og luminansspring, som nedsætter øjets følsomhed. Flader som reflekterer lysstråler i flere retninger er diffust reflekterende. Diffust reflekterende flader med høj reflektans er ideelle for lokalers miljø og udnyttelsen af lyskilder og dagslys. Diffuse refleksioner reducerer luminansspring, mens høje reflektanser øger lysudbyttet.

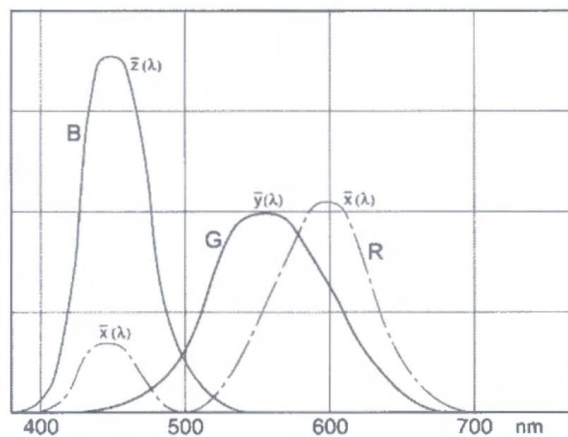


Figur 11-5 Spejlende-, ideel- og blandet diffus refleksion; Illustration: Illumination fundamentals, Lighting Research Center, Rensselaer, www.lrc.epi.edu



Figur 11-6 Ren-, ideel- og blandet diffus transmission; Illustration: Dansk Center for Lys, www.lysviden.dk

Øjets farveopfattelse. Øjet kan ikke skelne lysets forskellige bølgelængder. Farveopfattelsen skabes i hjernen, når øjets sanseceller stimuleres af lyset. Øjets nethinde har to forskellige sanseceller, tappe og stave. Stavene er de mest lysfølsomme, men kan ikke skelne farver. Stavene giver os 'natsyn', mens tappene giver os farvesyn. Øjet har tre forskellige typer tappe med hver sin følsomhed. En type er mest følsom overfor langbølget lys, en anden overfor mellembølget og en tredje overfor kortbølget lys. Populært sagt, stimuleres hver af de tre typer tappe af lys i henholdsvis det røde, det grønne og det blå bølgeområde, Figur 11-7. Ud fra tappenes stimulering fortolker hjernen lysets farve. F.eks. påvirker lys med bølgelængde 570nm de røde og grønne tappe ligeligt, og fortolkes af hjernen som gult lys.



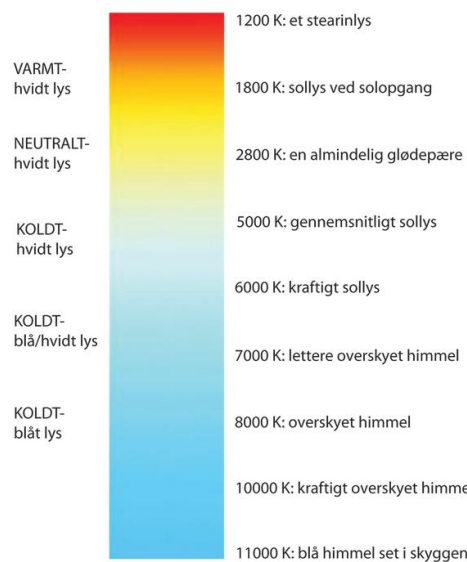
Figur 11-7 Øjetappenes spektrale følsomhed; Kilde: P. E. Petersen – Lys og varme

Lys sammensat af alle frekvenser i det synlige område med omtrent samme intensitet opfattes som 'hvidt lys'. Består lyset af bølgelængder i det røde-, grønne- og blå område med nogenlunde samme intensitet, fortolker hjernen lyset som hvidt. Figur 11-8 illustrerer hvordan hjernen fortolker kombinationen af forskellige spektralfarver. F.eks. fortolkes summen af spektralfarverne blå og gul som hvidt lys. Det samme gælder for summen af grøn og magenta samt summen af rød og cyan.



Figur 11-8 Hjernes farvemæssige fortolkning af tappens signaler - Addition af farver; Kilde: P. E. Petersen – Lys og varme

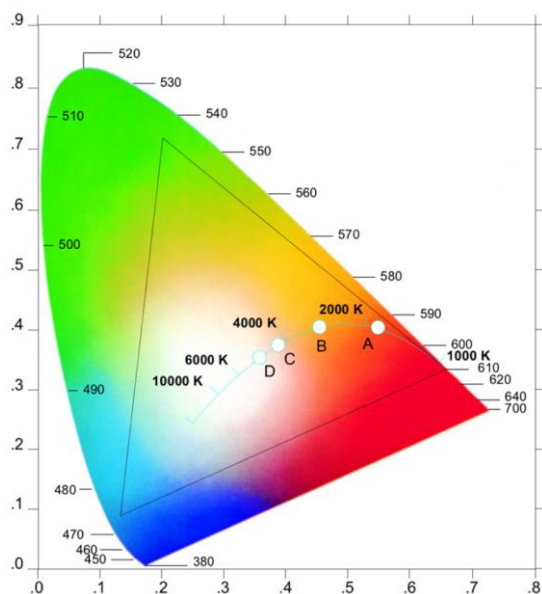
Farvetemperatur. Udover at fortolke summen af lysets bølgelængder og intensitet som en farve, opfatter vi lys som 'koldt' eller 'varmt'. Hvorvidt lys opfattes 'koldt' eller 'varmt' afhænger af dets farve-temperatur, og angives i grader Kelvin [K]. Opvarmes et matsort legeme vil det udsende alle bølgelængder indenfor det synlige spektrum, men med forskellig intensitet afhængig af legemets temperatur. Ved lave temperaturer udsendes overvejende langbølget stråling, svarende til lys i den røde del af det synlige spektrum. 'Jo højere temperatur, jo mere dominerer intensiteten af kortbølget stråling, og jo mere forskydes lyset mod den blå-violette ende af det synlige spektrum', Figur 11-9.



Figur 11-9 Farvetemperaturer i dagligdagen - 'Fra varmt hvidt til koldt blåt lys', Illustration: www.fischer-lighting.com

Den Internationale Belysningskommission CIE har defineret en farvetrykant, hvori alle farver kan angives ved to koordinater. Farvetrykanten er baseret på, at alle farver kan dannes ved en blanding af

grundfarverne rød, grøn og blå. Linjen indtegnet i Figur 11-10 viser det matsorte legemes farve ved forskellige temperaturer gående fra rødtligt ved 1000K over hvidt til blåligt ved 10.000K.



Den internationale Belysningskommission CIE har defineret en farvetrekant, hvori alle farver kan angives ved to koordinater.

Farvetrekanten er baseret på at alle farver kan dannes ved blanding af rødt, grønt og blått lys.

De mættede farver (monokromatisk lys) ligger på trekantens kant gående fra rød over grøn til violet. På figuren til venstre angives beliggenheden af en række bølgelængder.

Alle punkter inde i trekanten repræsenterer umættede farver.

Den indtegnede hvide linje viser farveforløbet af det lys et matsort legeme udsender ved opvarmning.

Punkterne A, B, C og D på linjen viser farven af hhv. et stearinlys, en glødepære, en fotografisk blitz og sollys.

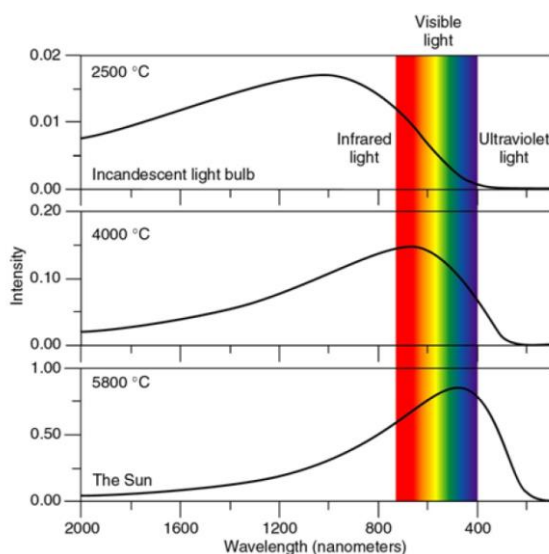
Figur 11-10 CIE farvetrekanten; Illustration: Jes Ole Henningsen – www.denstoredanske.dk

INFO BOKS:

Er belysningsstyrken i et lokale lav foretrækkes normalt 'varmt' lys.
 Er belysningsstyrken høj foretrækkes normalt 'koldt' lys.

Kombinationen lav belysning og 'koldt' lys føles ubehagelig, mens 'koldt' lys i lokaler med høj belysningsstyrke forekommer naturlig.

Farvegengivelse. En lyskildes evne til at gengive farver afhænger af lysets indhold af bølgelængder, og bølgelængdernes relative styrke. To lysgivere med forskelligt spektrum kan godt have samme farvetemperatur, men forskellige egenskaber til at gengive farver. Belyses en rød tomat med hvidt lys vil den 'forblive' mørk, hvis det hvide lys ikke indeholder bølgelængder i det røde område, som tomatens overflade kan reflektere. Lysets bølgelængder vil absorberes. En matsort overflade absorberer alle bølgelængder, mens en hvid flade reflekterer alle.



*Glødetråd - Driftstemperatur 2500°C
 Intensiteten af rødt lys størst*

*Sort legeme opvarmet til 4000°C
 Intensiteten af rødt lys størst men
 andelen af blå lys steget*

*Sollys - Farvetemperatur 5800°C
 Intensiteten af blå lys størst*

Når et sort legeme opvarmes vil alle bølgelængder i det synlige område være repræsenteret. En lyskildes evne til at gengive farver afhænger af hvilke bølgelængder den udsender og med hvilken intensitet.

*Figur 11-11 Spektralfordeling af udsendt lys fra glødetråd, sort legeme v. 4000°C og sollys;
 Illustrationer: www.glamox.com*

Farvegengivelse. R_a og R_i . En lyskildes evne til at gengive farver kan beskrives ved et farvegengivelsesindeks, som opgør farvegengivelsen i forhold til en ideel referencelyskilde. Er lyskildens farvetemperatur mindre end 5000K benyttes det matsorte legemes stråling som reference. For farvetemperaturer over 5000K benyttes en standardiseret reference med spektralfordeling som dagslys.

R_a indekset opgør en lyskildes evne til at gengive 8 standardiserede farver. Farverne er 8 pastelfarver som ofte ses i indendørs opholds- og arbejdslokaler. Systemet betegnes CRI (Colour Rendering Index) og R_a værdien beregnes som et vægtet gennemsnit af lyskildens gengivelse af de 8 pastelfarver. Gengiver lyskilden de 8 pastelfarver som referencelyskilden tildeles lyskilden R_a værdien 100.

Suppleres de 8 pastelfarver med de klare mættede farver rød, gul, grøn og blå, samt farven af menneskelig hud og den løvgrønne farve betegnes farvegengivelsesindekset R_i .

Begrænsningen ved R_a og R_i er de få farver indekserne baseres på, og at de opgør gennemsnitsværdier. På trods heraf indgår farvegengivelsesindekset R_a i de krav den europæiske belysningsstandard DS/EN12464 krav stiller, dog med tilføjelsen, at sikkerhedsfarver skal gengives korrekt uanset krav til mindste R_a værdi.

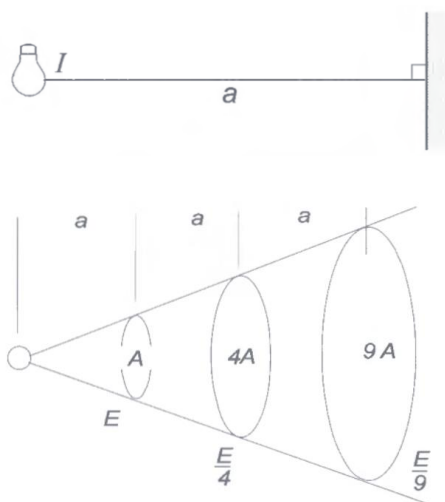
Fotometriske love

Når et lysberegningssystem beregner belysningsstyrkens fordeling på en arbejdsflade og et lokales vægge eller lofter, udføres beregningen på baggrund af de tre afstandslove, cosinusloven og superpositionsprincippet, samt producenternes dokumentation af armaturets afgivne lysstyrke i alle retninger. Nedenfor anføres afstandslovene, cosinusloven og superpositionsprincippet.

Afstandslovene. For en **punktformet lyskilde** med lysstyrken I er belysningsstyrken i afstanden a fra lyskilden:

$$E = \frac{I}{a^2}$$

'Belysningsstyrken E i afstanden a fra en punktformet lysgiver er omvendt proportional med kvadratet på afstanden til lysgiveren'.



Figur 11-12 Afstandsloven for en punktformet lyskilde; illustrationer: Poul E. Petersen, Lys og varme

For en **uendelig lang linjeformet lysgiver** med lysstyrken I er belysningsstyrken i afstanden a fra lyskilden:

$$E = k_1 \cdot \frac{I}{a}$$

'Belysningsstyrken E i afstanden a fra en linjeformet lysgiver er omvendt proportional med afstanden til lysgiveren'.

(For en ideel linjeformet lyskilde er $k_1 = \pi/2$)

At belysningsstyrken er omvendt proportional med kvadratet på afstanden til en punktformet lysgiver, og omvendt proportional med afstanden til en uendelig lang linjeformet lysgiver, ses umiddelbart ved at betragte hhv. en kugleskal som omgiver en punktformet lyskilde, og en cylinder, som omgiver en uendelig lang linjeformet lyskilde. Kugleskallens overflade øges med kugleradius i 2. potens, mens cylinderens overflade øges med cylinderradius i 1. potens.

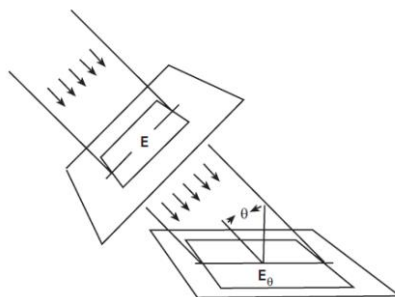
For en **stor fladeformet lysgiver** med lysstyrken I er belysningsstyrken i afstanden a :

$$E = k_2 \cdot I$$

'Belysningstyrken E fra en stor lysende flade er uafhængig af afstanden til fladen'.

Cosinusloven. Belyses en flade med arealet A af en lysstrøm Φ vinkelret på fladen bliver fladens belysningsstyrke $E = \Phi/A$. Rammer lysstrømmen flade under indfaldsvinklen $\theta > 0^\circ$ reduceres fladens belysningsstyrke med $\cos\theta$:

$$E_\theta = E \cdot \cos\theta$$



Figur 11-13 Cosinusloven; Illustration: Illumination Fundamentals, Lighting Research Center, Lensselaer, www.lrc.rpi.edu

Eksempel – Brug af afstands- og cosinuslov

Et downlight-armatur er placeret midt i loftet i et gangareal. Gangen er 2m bred, 3m lang og har loftshøjden 2,5m. Belysningsstyrkerne på gulvet midt i gangen og ved væggen midt på henholdsvis gangens korte og lange side skal beregnes.

Først bestemmes lysets indfaldsvinkler:

$$\theta_{\text{midt,gang}} = 0^\circ \quad \theta_{\text{midt,langside}} = \tan^{-1} \frac{2,0}{2,5} = 21,8^\circ \quad \theta_{\text{kant2}} = \tan^{-1} \frac{3,0}{2,5} = 31,0^\circ$$

Af afstandsloven for en punktformet lysgiver og cosinusloven fås:

$$E_\theta = \frac{I}{a^2} \cdot \cos\theta$$

Udnyttes at $h = a \cdot \cos\theta$ kan belysningsstyrken udtrykkes ved monteringshøjden h og indfaldsvinklen θ :

$$E_\theta = \frac{I}{h^2} \cdot \cos^3 \theta$$

Af armaturets lysfordelingskurve (cd pr. 1000lm lyskilde) aflæses lysstyrkerne i de tre aktuelle retninger:

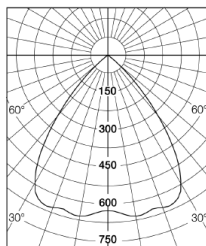
$$I_0^\circ = 630\text{cd}/1000\text{lm} \quad I_{21,8^\circ} = 660\text{cd}/1000\text{lm} \quad I_{31,0^\circ} = 580\text{cd}/1000\text{lm}$$

Dermed bliver de søgte belysningsstyrker:

$$E_0 = \frac{630 \cdot 1,201}{2,5^2} = 121\text{lx} \quad E_{21,8^\circ} = \frac{660 \cdot 1,201}{1,8^2} \cdot \cos^3 21,8^\circ = 101\text{lx} \quad E_{31,0^\circ} = \frac{580 \cdot 1,201}{2,5^2} \cdot \cos^3 31,0^\circ = 70\text{lx}$$

Armatur, Lysfordelingskurve og Armaturdata

(Fagerhult produktkatalog 2017 - Pleiad Evo mat)



EL TEKNISKE DATA

W 13

LYSDATA

lm 1201	SDCM 3
lm/W 90	CRI 80
Levetid LED modul L90 B50, h 50 000	CCT, K 3000
Levetid driver, h/max udfald 100 000/10 %	Lyskilde LED

Superposition. Afstandslovene og cosinusloven udgør grundlaget for beregning af belysningsstyrken i et vilkårligt punkt i et lokale. Er der flere lysgivere, f.eks. rækker af lysarmaturer, skal belysningsbidragene fra hver enkelt armatur lægges sammen. Belysningsstyrken på arbejdsplanet er dog ikke alene bestemt af den direkte belysning fra hvert lysarmatur. Lys som reflekteres af lokalets flader bidrager og skal tillægges. Derfor er valg af overflader afgørende for såvel et lokales lysmiljø, som for energiforbrug til kunstig belysning.

Praktiske målinger

Belysningsstyrken på en arbejdsflades E [lm/m^2] måles med et luxmeter, en lysende flades luminans L [cd/m^2] måles med et luminansmeter og materialers reflektionsevne ρ ved hjælp af en fotometerkugle.

I praksis kan luxmeteret anvendes til at bestemme tilnærmede værdier for punktformede lyskildes lysstyrke, fladers reflektanser og vægge/lofters luminanser.



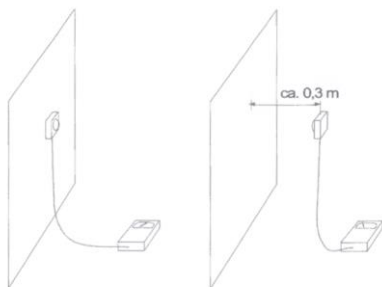
En tilnærmet værdi af en punktformet lyskildes lysstyrke I i en given retning kan bestemmes ved at måle belysningsstyrken E vinkelret på lysgiveren.

$$\text{Lyskildens tilnærmede lysstyrke er: } I = E_{\text{målt}} \cdot a^2 \text{ [cd]}$$



En tilnærmet værdi af en flades luminans L kan bestemmes ved at måle belysningsstyrken E fra fladen i afstanden 0,3m.

$$\text{Fladens tilnærmede luminans er: } L = E_{\text{målt}} / \pi \text{ [cd/m}^2\text{]}$$



En tilnærmet værdi af en flades reflektionsfaktor ρ kan bestemmes ved at måle belysningsstyrken E_1 på fladen samt belysningsstyrken E_2 fra fladen i afstanden 0,3m. Fladens tilnærmede reflektionsfaktor er: $\rho = E_2 / E_1$

Figur 11-14 Praktiske målinger; illustrationer: P.E.P. Lys og varme

11.5. Lovkrav

BR15

Bygningsreglement BR15, som er gældende for alle former for erhvervs- og institutionsbyggeri, angiver lovkrav til arbejdspladsbelysning:

6.5.3 Elektrisk belysning

01.07.2017 -

Regler og vejledningstekst	
Bestemmelse	Vejledning
Stk. 1 Arbejdsrum mv. og fælles adgangsveje skal have kunstig belysning i fornødent omfang. Arbejdspladsbelysning skal udføres i overensstemmelse med DS/EN 12464-1 Lys og belysning – Belysning ved arbejdspladser – Del 1: Indendørs arbejdspladser, med DS/EN 12464-1 DK NA.	(6.5.3, stk. 1) Desuden henvises til DS/EN 12464-2 Lys og belysning - Lys ved arbejdspladser - Del 2: Udendørs arbejdspladser, DS/EN 12665 Lys og belysning - Grundlæggende begreber og kriterier til beskrivelse af krav til belysning, DS/EN 1838 Belysning – Nødbelysning, DS/EN 50172 Belysningssystemer til nødudgange og DS/EN 12193 Lys og belysning – Sportsbelysning.
Stk. 2 Arbejdsrum mv. og fælles adgangsveje skal forsynes med energieffektiv belysning. Hvis der er tilstrækkeligt dagslys skal arbejdsrum mv. og fælles adgangsveje forsynes med automatisk dagslysstyring.	(6.5.3, stk. 2 og 3) Energieffektiv belysning indebærer bl.a. anvendelse af lyskilder med en virkningsgrad for almenbelysningen på over 50 lm/W og effektbelysning samt arbejdslamper på over 15 lm/W. I rum med begrænset dagslysadgang kan dagslysstyring udelades.
Stk. 3 Arbejdsrum mv. med lejlighedsvis benyttelse og fælles adgangsveje skal forsynes med bevægelsesmeldere. Anvendelse af bevægelsesmeldere kan udelades, hvor slukning af lyset kan give risiko for ulykker, eller hvor lyskilderne ikke er egnede hertil.	(6.5.3, stk. 3) Bestemmelsen gælder også baderum og toiletter i tilknytning til arbejdsrum mv. Ved f.eks. lagerhaller med truckkørsel kan bevægelsesmeldere give risiko for ulykker. Energieffektive lyskilder som f.eks. damplamper er ikke egnede til dagslysstyring eller anvendelse af bevægelsesmeldere.

Belysningsanlæg skal udføres i overensstemmelse med DS/EN12464-1 og DS/EN12464-1 DK NA

Krav om automatisk dagslysstyring når dagslys kan udnyttes
Energieffektive lyskilder skal for almen belysning have et lysudbytte på minimum 50lm/W

Krav om bevægelsesmeldere når rum benyttes lejlighedsvis

Stk. 4	(6.5.3, stk. 4)
Belysningsanlæg i arbejdsrum mv. skal udføres opdelt i zoner med mulighed for benyttelse efter dagslysforhold og aktiviteter.	Zoneopdeling sikrer, at der er mulighed for at begrænse brugstiden mest muligt. Bestemmelsen indebærer f.eks., at belysningsarmaturer nær vinduer kan udgøre én zone, mens armaturer placeret inde i rummet kan udgøre én eller flere selvstændige zoner. Bestemmelsen opfyldes ved at montere manuel og/eller automatisk afbryder for hver zone.

Krav om zoneopdeling af belysning for at sikre udnyttelse af dagslys

Stk. 5	Stk. 6
Bestemmelserne i stk. 1-4 kan fraviges, når opfyldelsen vil betyde en afgørende ulempe for virksomhedens drift.	Bestemmelserne i stk. 1-5 finder også anvendelse ved udskiftning af armaturer mv. i eksisterende arbejdsrum.

Bestemmelserne gælder også ved udskiftning af eksisterende armaturer i arbejdsrum

Stk. 7	(6.5.3, stk. 7)
Der skal gennemføres en funktionsafprøvning af belysningsanlægget før ibrugtagning. Funktionsafprøvningen skal påvise, at belysningsanlægget overholder bygningsreglementets krav til belysningsniveau, samt at dagslysstyring, bevægelsesmeldere og zoneopdeling fungerer efter hensigten. Dokumentation af funktionsafprøvningen skal indsendes til kommunen senest ved færdigmelding.	Der henvises til Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsens vejledning om funktionsafprøvning.

Krav om funktionsafprøvning før ibrugtagning. Dokumentation skal fremsendes til kommunen senest ved færdigmelding

Udover byggereglementets henvisning til DS/EN12464-1 og Dansk Nationalt Anneks, stiller Arbejdstilsynet i en række bekendtgørelser krav til arbejdspladsbelysning, bl.a.:

Arbejdstilsynets bekendtg. nr. 96 af febr. 2001 - Krav til belysning ved faste arbejdspladser

Arbejdstilsynets bekendtg. nr. 1108 af dec. 1992 - Krav til belysning ved skærmterminalarbejde

DS/EN12464-1:2015 og DK NA

Den europæiske standard DS/EN12464-1 afløste d. 1.1.2016 dansk belysningsstandard DS700. Standarden skal sikre tilstrækkelig belysning, et godt belysningsmiljø, udnyttelse af dagslys og energieffektive løsninger. Sammenholdt med DS700 øger DS/EN12464 kravet til belysningsstyrke i visse områder, og indfører krav om belysning af vægge og lofter.

I Danmark haves tradition for at benytte supplerende arbejdspladslamper, dels for at sikre tilstrækkelig belysning til synsopgaven, dels en varieret luminansfordeling. For at fastholde denne tradition og samtidig imødegå BR15' skærpede krav til bygningers energiramme, har Danmark udarbejdet et dansk nationalt anneks, som lempet kravene i visse områder.

Nedenfor er anført DS/EN12464 krav til belysningsstyrke, regelmæssighed, ubehagsblending, farvegengivelse og blændingstal i nogle områder. Lempelser, jf. dansk national anneks, er fremhævet med blå.

Endvidere er anført anbefalede reflektanser og krav til belysning af vægge og lofter samt krav til cylindrisk middelbelysningsstyrke, som skal sikre energieffektiv belysning og god visuel kommunikation.

(DS/EN12464' samlede krav og anbefalinger er anført i appendix A).

Tabel 11-2 Krav og anbefalinger DS/EN12464

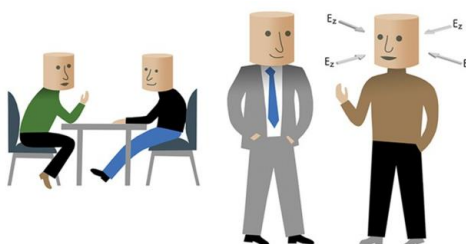
Ref.nr.	Type område, opgaver eller aktiviteter	$\bar{E}_m [lx]$	UGR_L	U_0	R_a	Specifikke krav
DS/EN 5.1.1	Gange	100	28	0,40	40	Belysningsstyrke ved gulvniveau
DS/EN 5.1.2	Trapper	100	25	0,40	40	Kræver forbedret kontrast på trinene
DS/EN 5.2.1	Kantiner	200	22	0,40	80	
DS/EN 5.2.4	Garderobes, toiletter	200	25	0,40	80	På hvert toilet hvis helt lukkede
NA 5.3.2	Telex, postrum, omstilling	200	19	0,60	80	
DS/EN 5.3.2	Telex, postrum, omstilling	500	19	0,60	80	
NA 5.26.1	Arkivering, kopiering mv.	200	19	0,40	80	
DS/EN 5.26.1	Arkivering, kopiering mv.	300	19	0,40	80	
DS/EN 5.26.2	Skrivning, tastning, læsning databehandling	500	19	0,60	80	Skærmarbejde, se 4.9
DS/EN 5.26.3	Teknisk tegning	750	19	0,70	80	
DS/EN 5.26.4	CAD-arbejdspladser	500	19	0,60	80	Skærmarbejde, se 4.9
NA 5.26.5	Konference- og mødelokaler	200	19	0,60	80	Belysningen bør kunne reguleres
DS/EN 5.26.5	Konference- og mødelokaler	500	19	0,60	80	Belysningen bør kunne reguleres
DS/EN 5.26.6	Receptionsområde	300	22	0,60	80	
DS/EN 5.26.7	Arkiver	200	25	0,40	80	
NA 5.33.2	Læseområde	200	19	0,70	80	
DS/EN 5.33.2	Læseområde	500	19	0,60	80	
NA 5.36.2	Klasselokaler til aften- eller voksenundervisning	300	19	0,60	80	Belysningen bør kunne reguleres op til 500lx
DS/EN 5.36.2	Klasselokaler til aften- eller voksenundervisning	500	19	0,60	80	Belysningen bør kunne reguleres
NA 5.36.3	Auditorier, foredrags- og forelæsningsale	200	19	0,70	80	Belysningen bør kunne reguleres for at imødekomme forskellige A/V-behov. Foredragsholderen skal belyses med tilstrækkelig vertikal belysningsstyrke
DS/EN 5.36.3	Auditorier, foredrags- og forelæsningsale	500	19	0,60	80	Belysningen bør kunne reguleres for at imødekomme forskellige A/V-behov.
NA 5.36.22	Biblioteker: læseområder	200	19	0,70	80	
DS/EN 5.36.22	Biblioteker: læseområder	500	19	0,60	80	

Tabel 11-3 Anbefalede reflektanser for større, diffust reflekterende, indvendige overflader

Lofter	0,7 – 0,9
Vægge	0,5 – 0,8
Gulve	0,2 – 0,4

Tabel 11-4 Anbefalede reflektanser for større, diffust reflekterende, indvendige overflader

Vægge	$E_{mid} > 50lx$ med $U_0 \geq 0,10$
Lofter	$E_{mid} > 30lx$ med $U_0 \geq 0,10$
I lukkede rum som kontorer, undervisningslokaler, hospitaler og almene indgangsrum, gange trapper mv. skal vægge og lofter være lysere. DS/EN12464 anbefalede driftsbelysningsstyrker, er:	<p>Vægge: $E_{mid} > 75lx$ med $U_0 \geq 0,10$</p> <p>Lofter: $E_{mid} > 50lx$ med $U_0 \geq 0,10$</p>



Figur 11-15 Definition af krav til cylindrisk middelbelysningsstyrke

Tabel 11-5 Krav til cylindrisk middelbelysningsstyrke

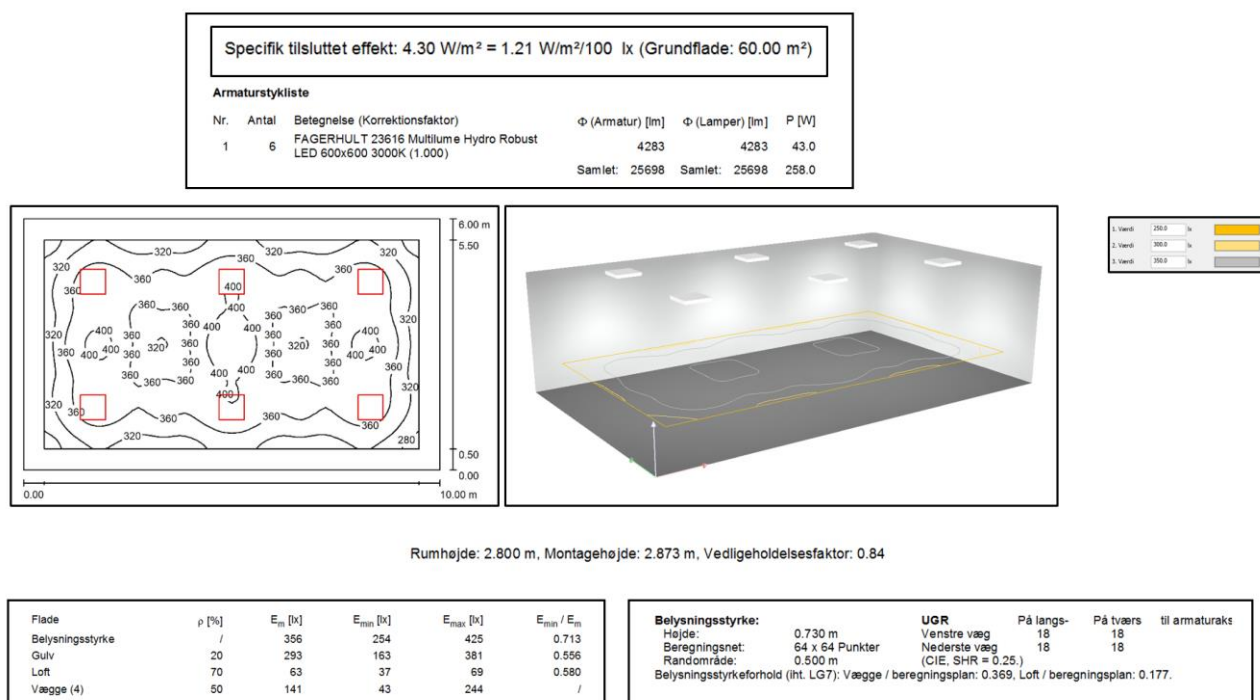
Cylindrisk middelbelysningsstyrke $E_{Z,vertikal}$ (gennemsnitlig belysningsstyrke på vertikalt plan)	$E_{Zmid,vertikal} \geq 50lx$ med $U_0 \geq 0,10$ ved en højde på 1,2m for siddende personer ved en højde for 1,6m for stående personer (regelmæssigheden U_0 af E_Z gælder det horisontal plan)
'I områder, hvor god visuel kommunikation er vigtig, især på kontorer, i mødelokaler og undervisningslokaler bør $E_{Z,vertikal}$ ')	$E_{Zmid,vertikal} \geq 150lx$ med $U_0 \geq 0,10$ ved en højde på 1,2m for siddende personer ved en højde for 1,6m for stående personer (regelmæssigheden U_0 af E_Z gælder det horisontal plan)

Lysberegning – Indendørs belyningsanlæg

Tidligere anvendtes punktmetoden, lysstrømmetoden og NB-metoden til beregning af indendørs belyningsanlæg. I dag dimensioneres belyningsanlæg med lysberegningsprogrammer. DIALux er eksempel på frit tilgængeligt program, som finansieres af armaturfabrikanter i fællesskab, og benyttes af bl.a. lysdesignere, arkitekter og ingeniører til projektering af belyningsanlæg. Kendes et lokales geometri, overfladereflektanser og vedligeholdelsesfaktor kan en lysberegning udføres på ganske kort tid. Skillevægge, søjler og møblering kan uden videre tilføjes. Nedenfor, Figur 11-16, er vist et eksempel på en lysberegning udført med DIALux.

Lokalet er et undervisningslokale. Kravet til middelbelysningsstyrken er, jf. DS/EN12464 DK NA, 300lx . Lokalet er 10m langt, 6m bredt og 2,8m højt. Lokalets overfladereflektanser er valgt som $\rho_{vægge}$: 50%, ρ_{loft} : 70% og ρ_{gulv} : 20%, men kunne være bestemt ved måling med luxmeter-metoden, hvis lokalets overflader var tilgængelige. Vedligeholdelsesfaktoren MF er sat til 0,84. (Beregning af vedligeholdelsesfaktoren MF uddybes i afsnittet drift- og vedligeholdelse nedenfor). Når lokalets geometri, reflektanser og vedligeholdelsesfaktor er defineret, kan beregninger for forskellige belysningsarmaturer udføres. I eksemplet er valgt et 60cmx60cm LED-indbygningsarmatur med lysstrøm 4283lm og tilført effekt 43W.

Det ses, at middelbelysningsstyrken er beregnet til 356lx , belysningens regelmæssighed 0,71, det maksimale blændingstal 18 og specifik tilsluttet effekt $4,30\text{W}/\text{m}^2$. Den beregnede middelbelysningsstyrke 356lx er middelbelysningsstyrken efter den driftstid og tilsmudsning af lokale og armaturer, som er indeholdt i den angivne vedligeholdelsesfaktor. Ved installation vil middelbelysningsstyrken i lokalet E_m være $356\text{lx}/0,84 = 424\text{lx}$.



Figur 11-16 Eksempel på lysberegning med DIALux

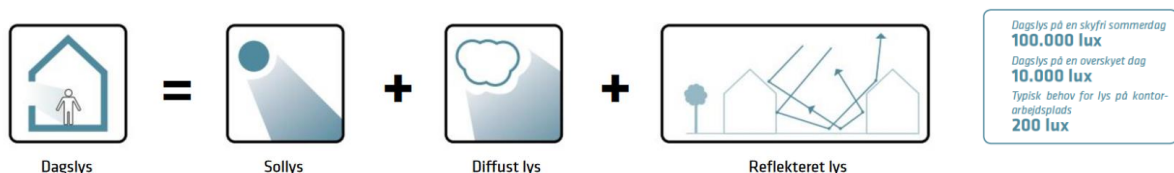
11.6. Dagslys og indeklima, Udnyttelse af dagslys, Energieffektivitet og Lysstyring.

Adgang til dagslys er af stor betydning for vor trivsel, og har derfor stor opmærksomhed. Såvel arbejdet med at afdække dagslysets betydning for indeklimaet, som hvordan dagslyset bedst kan beregnes og opgøres over året har været genstand for forskning.

Nedenfor gives en grundlæggende indføring i dagslys og styring af kunstige belysningsanlæg. Først omtales begrebet dagslys og de faktorer som er bestemmende for mængden af dagslys, der når ind i et lokale. Dernæst anføres byggereglementskrav til udnyttelse af dagslys, og de tre måder vejledningsteksten til BR15 anfører, at dagslystilskuddet til et lokale kan anses for tilstrækkeligt. Hvorvidt de tre opgørelsesmetoder sikrer et godt belysningsmiljø med god luminansfordeling er undersøgt af statens byggeforskningsinstitut, og anføres kort. Dernæst omtales solafskærmning mod direkte sollys, beregning af dagslystilskud og hvordan dagslysberegninger kan udnyttes til at vælge reguleringszoner for den kunstige belysning. Endelig omtales lysstyringsprincipper og løsninger, og den i dag ofte anvendte DALI-standard for styring af belysningsanlæg for kontorer og undervisningslokaler samt sengeafsnit og behandlingsrum på hospitaler uddybes.

Hvad forstås ved dagslys?

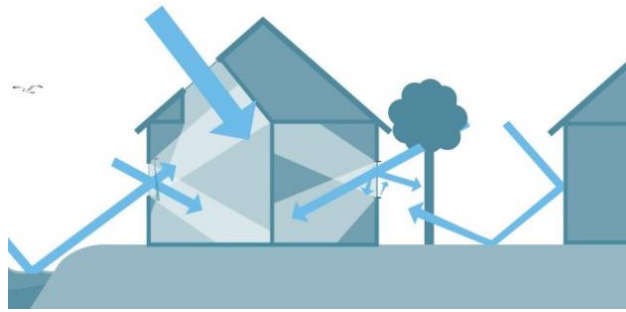
Solens stråling, i det synlige område, som rammer jordens overflade kan opdeles i **direkte sollys** fra solen og **diffust himmellys**. Det diffuse himmellys er lyset der registreres, når himlen er overskyet. Det diffuse himmellys består dels af lys fra himmelhvælvingen, dels af himmellys som reflekteres af overflader i det fri. **Det reflekterede lys** kan stamme fra både det direkte sollys og det diffuse himmellys. Det reflekterede lys er afhængig af de reflekterende fladers vinkler i forhold til lysindfaldet samt hvor blanke og lyse fladerne er.



Figur 11-17 Dagslys; Kilde: Kongebro m.fl. – Hvad med dagslys?

Udnyttelse af dagslys

Dagslyset vej til bygningens lokaler er igennem bygningens vinduer. Antallet af vinduer i facaden, typen af vinduesglas, vindueshullernes størrelse og placering samt dybde afgør mængden af dagslys som finder vej. Afhængig af dagslysets fordeling vil dagslyset kunne reducere den nødvendige kunstige belysning til belysning af arbejdsplanet. Ved at opdele lysanlægget i zoner afhængig af dagslysets fordeling vil den kunstige belysning kunne nedreguleres, så arbejdspladserne indenfor de enkelte zoner får den nødvendige belysningsstyrke, og energiforbruget reduceres.

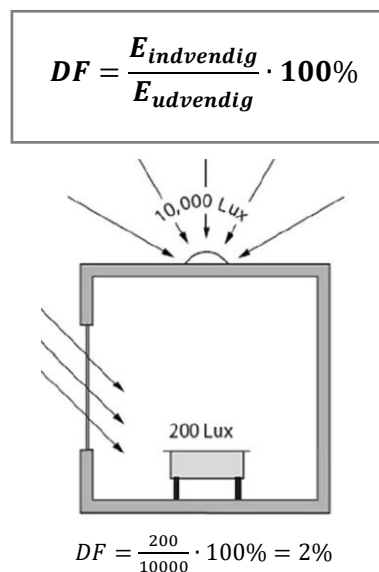


Figur 11-18 Dagslys; Kilde: Kongebro m.fl. – Hvad med dagslys?

Hvor stor en del af dagslyset som passerer gennem glasset bestemmes af glasset transmittans. En almindelig to lags energirude, anno 2017, transmitterer 75-80% af dagslysstrømmen vinkelret på vinduet gennem ruden.

Dagslysfaktor DF

Dagslysfaktoren DF defineres som forholdet mellem belysningsstyrken i et punkt i planet indenfor og den samtidige belysningsstyrke på et vandret plan udenfor fra det diffuse himmellys uden skygevirksomheder fra omgivelserne.



Figur 11-19 Dagsfaktor; Kilde: Kongebro m.fl. – Hvad med dagslys? DTU 2012

For at vurdere den situation, hvor dagslystilskuddet er mindst, tager dagslysberegninger udgangspunkt i en overskyet himmel med diffust himmellys. Da luminansfordelingen fra en overskyet himmel er uafhængig af orienteringen, er sådanne dagslysberegninger uafhængige af lokalets orientering i forhold til de fire verdenshjørner.

Krav til dagslys

BR15, og vejledninger fra arbejdstilsynet, stiller krav om at arbejdsrum skal være velbelyste med dagslys.

'Vinduer skal udføres, placeres og eventuelt afskærmes, så solindfald ikke medfører overophedning i rummene, og så gener ved direkte sollys undgås'.

I vejledningsteksten anføres tre måder at dokumentere dette:

1. Hvis forholdet mellem sideglasareal og gulvareal svarer til mindst 10 procent af det indvendige gulvareal, forudsat at vinduerne har en lystransmittans på mindst 0,75.
2. Hvis det ved beregning eftervises, at der er en dagslysfaktor på mindst 2 procent i arbejdszonen. Dette kan beregnes med et net, der dækker rummet eller arbejdszonen. Nettet starter 0,5 m fra væggene og indeholder beregningpunkter med ens afstand på højst 0,5 m.
3. Dagslyset kan anses for tilstrækkeligt, når det ved måling kan eftervises, at der er en dagslysfaktor på 2 procent ved arbejdspladserne.

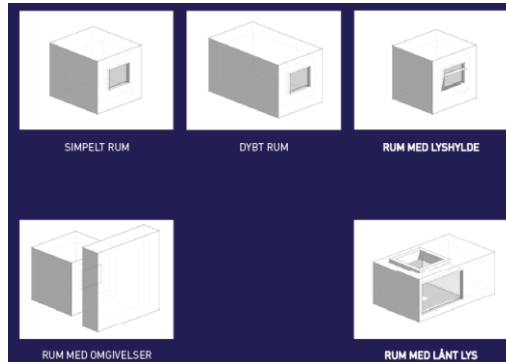
'Vurdering af dagslysforhold' – $DF_{min} \geq 0,7 \%$

Afdelingen for Energi, Miljø og Indeklima, Statens Byggeforskningsinstitut, har gennemgået dagslys-bestemmelserne i BR15, og kommer i rapporten 'Vurdering af dagslysforhold' med kommentarer til forhold af særlig betydning for belysningsmiljøet. Det anføres, at '*ved at beregne den gennemsnitlige dagslysfaktor DF_{mid} tages højde for lysintensiteten af både de lyseste og mørkeste områder i lokalet, men den gennemsnitlige dagslysfaktor giver ingen information om fordelingen af dagslyset i lokalet. Et dybt lokale med høje dagslysfaktorer ved vinduesfacaden vil opleves mørkt, hvis der i den anden ende modsat facaden er en meget lav dagslysfaktor. En skæv luminansfordeling påvirker øjets adaptation negativt, og kan medføre risiko for blænding. Oplevelsen af lyset i et lokale er afhængig af de mørkeste områder af lokalet*'. Rapporten påpeger, at en vurdering af dagslyset ud fra dagslysfaktoren altid skal omfatte en beregning af den laveste dagslysfaktor DF_{min} . Rapporten anfører, at den mindste dagslysfaktor i et rum DF_{min} skal være af størrelsesorden 0,7 % for at et lokale vil opleves velbelyst.

Dagslysberegninger

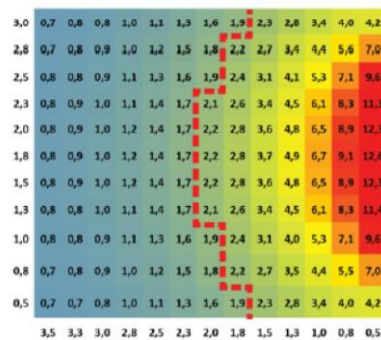
Der findes flere metoder og en række beregningsprogrammer til beregning af et lokales dagslysfordeling. Statens byggeforskningsinstitut har i SBI publikation 2013:20 gennemgået ni beregningsprogrammer med udgangspunkt i fem typiske rum. De undersøgte programmer Radiance, Daysim, VELUX Daylight Visualizer, DIALux, Ecotect, IESve, LightCalc og Relux anvendes alle af forskere, ingeniør- og arkitektbranchen, og findes alle i større eller mindre grad egnede til dagslysberegninger. To af de undersøgte programmer Ecotect og IESve har brugerlicens, mens de øvrige er frit tilgængelige. For en samlet vurdering af de ni beregningsprogrammer med hensyn til beregningsmetode, evne til at beregne de fem typer rum, programmernes output og brugervenlighed henvises til rapporten. I Figur 11-20 vises et eksempel fra SBI2013:20. Dagslysberegningen er udført med VELUX Daylight Visualizer. Det simple rum har dybde 4 m, bredde 3,5 m og højde 2,8 m. Vindueshullet er 2 m bredt og 1,5 m højt, svarende til et sidevinduesareal på

21 % af rummets gulvflade. Facadetykkelsen 0,4 m, brystningen 0,9 m og vinduesrammen 0,06 m. Vinduesglasset har lystransmittans 0,76 og reflektanserne af vindueshul, gulv, vægge og loft er henholdsvis 0,7, 0,1, 0,4 og 0,7.



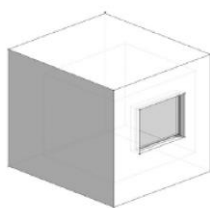
Figur 11-20 De fem referencerum; Kilde SBI 2013:20

VELUX Daylight Visualizer

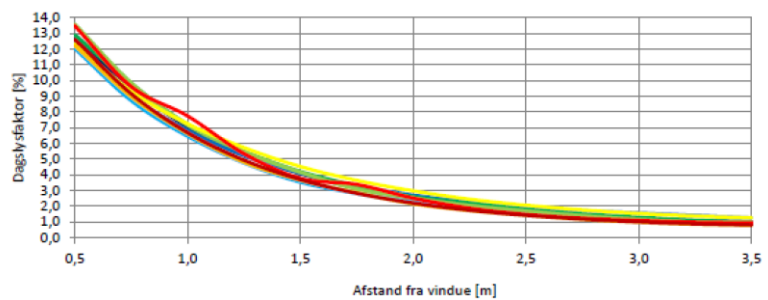


Figur 11-21 Dagslysfaktorfordeling i SIMPELT RUM; Kilde SBI 2013:20

RUM 1 – SIMPELT RUM – Beregningsark



- Radiance
- Desktop Radiance
- Ecotect
- DIALux
- Daysim
- Relux Radiosity
- Relux Raytracing
- IESve
- LightCalc
- VELUX Daylight Visualizer



Figur 11-22 Dagslysfaktorens afhængighed af afstand til vindue i SIMPELT RUM; Kilde: SBI 2013:20

Dagslysets indtrængningsdybde – defineret som den afstand fra vinduesvæggen, hvor dagslysfaktoren er faldet til 2,0 – var en af de parametre, som undersøgelsen sammenholdte. De ni

programmer beregnede indtrængningsdybder fra 2,1 m til 2,5 m med en variation på 18 % variation fra laveste til højeste og en standardafvigelse 0,15 m.

Energibesparelser ved udnyttelse af dagslys

I SBI-anvisning 184, Bygningers energiforbrug, beregnes 'driftstidsbesparelser' og 'lux-time-besparelser' ved udnyttelse af dagslystilskud. I tabellen nedenfor er anført de procentvise besparelser, som anvisningen anfører kan opnås for et kontor med en benyttelsestid på 2.500h årligt ved tre forskellige belysningskrav og tre forskellige dagslysfaktorer. Tabelværdierne tager ikke hensyn til direkte sollys på klare dage.

Med driftstidsbesparelse menes den procentvise besparelse, som kan opnås ved manuelt eller automatisk at slukke belysningen, når dagslyset giver tilstrækkelig belysning.

Med lux-time-besparelse menes den procentvise besparelse som kan opnås ved at ned- og opregulere den kunstige belysning i takt med at dagslystilskuddet og stadig overholde kravet til belysningsstyrken.

*Tabel 11-6 Driftsbesparelse i kontorer med benyttelsestid 2.500h årligt.
On/off styring: Kunstig belysning slukkes når dagslystilskuddet er tilstrækkeligt.
Kontinuert styring: Kunstig belysning ned- og opreguleres efter dagslystilskud;
Kilde: SBI-anvisning nr. 184 Bygningers energiforbrug, 1995*

Dagslys- faktor %	Ønsket belysningsstyrke, E lux	Driftstidsbesparelse ved on/off styring %	Lux-time-besparelse ved kontinuert styring %
0,5	50	60	80
	200	5	40
1,0	50	80	90
	200	35	65
	500	0	35
2,0	50	90	95
	200	60	80
	500	25	55

For at beregne energiforbrug og mulig energibesparelse skal lokalets brugsmønster kendes. I Tabel 11-7 er årligt antal brugstimer for forskellige brugsmønstre anført.

*Tabel 11-7 Brugstid ved forskellig anvendelse;
Kilde: SBi-anvisning nr. 184 Bygningers energiforbrug, 1995*

Brugsmønster		Timer pr. år
Døgndrift	24 timer, 365 dage pr. år	8760
Toholdsskift	16 timer, 6 dage/uge, 50 uger/år	4800
Etholdsskift	10 timer, 5 dage/uge, 50 uger pr. år	2500
Alm. kontortid	9 timer, 5 dage/uge, 52 uger/år	2340

SBi-anvisningens tabeller kan give et overslag på mulig besparelse ved udnyttelse af dagslys. Nedenfor gives to eksempler på overslagberegning af energibesparelse. Grundlaget er målte gennemsnitlige dagslysfaktorer i hhv to og tre zoner samt kontinuerlig regulering af belysningsstyrken efter dagslystilskud.

Eksempel 1

I et kontorlokale på 10mx5m er belysningen opdelt i 2 ens, individuelt og kontinuert regulerede belysningszoner, hver 10mx2,5m. I zonen nærmest vinduesfacaden er den gennemsnitlige dagslysfaktor målt til 2.0 og i zonen modsat vinduesfacaden til 1.0. Kravet til belysningsstyrken, jf. DS/EN12464, er 500lx.

I zonen med dagslysfaktor 2,0 aflæses den procentvise lux-time-besparelse til 55% ved 500lx.

I zonen med dagslysfaktoren 1.0 aflæses den procentvise lux-time-besparelse til 35% ved 500lx.

Et overslag på den samlede lux-time-besparelsen bliver dermed: $(55\%+35\%)/2 = 40\%$.

Belysningsanlæggets effektforbrug ved 500lx er 8W/m² hvorved et overslag på den årlige kWh besparelse bliver: $10\text{m} \times 5\text{m} \times 8\text{W}/\text{m}^2 \times 0,40 \times 2500\text{h} = 400\text{kWh}$.

Eksempel 2

I et undervisningslokale på 10mx7,5m er belysningen opdelt i 3 ens, individuelt og kontinuert regulerede belysningszoner, hver 10mx2,5m. I zonen nærmest vinduesfacaden er den gennemsnitlige dagslysfaktor 2.0, i den mellemste zone 1.0 og i zonen længst fra vinduesfacaden 0.5. Kravet til belysningsstyrken, jf. Dansk Nationalt Annex, er 300lx.

Lux-time-besparelse i zonen nærmest vinduesfacaden aflæses til 80% ved 200lx og 55% ved 500lx.

Interpoleres fås en tilnærmet besparelse ved 300lx på: $80 - (80-55)/(500-200) \cdot (300-200) = 72\%$

I zonen med dagslysfaktoren 1.0 aflæses lux-time-besparelse til 65% ved 200lx og 35% ved 500lx.

Interpoleres fås en tilnærmet besparelse ved 300lx på: $65 - (65-35)/(500-200) \cdot (300-200) = 55\%$

I zonen længst fra vinduet er dagslysfaktoren 0.5. Lux-time-besparelser er opgivet for 50 og 200lx.

Interpoleres, på trods heraf, fås en besparelse ved 300lx på: $40 - (80-40)/(200-50) \cdot (300-200) = 13\%$

Et overslag på den samlede lux-time-besparelse bliver dermed: $(72\%+55\%+13\%)/3 = 47\%$.

Belysningsanlæggets effektforbrug ved 300lx er 5W/m². Den årlige energibesparelse i kWh vil afhænge af undervisningslokalets brugstid.

Det understreges, at den årlige besparelse ved en kontinuerlig dagslysstyring ikke alene afhænger af lokalets dagslysfaktorfordeling, men i lige så høj grad af lokalets brugstid. Jo mindre brugstid, jo lavere energiforbrug, men dermed også længere tilbagebetalingstid for en investering i dagslysstyring.

Zoneopdeling

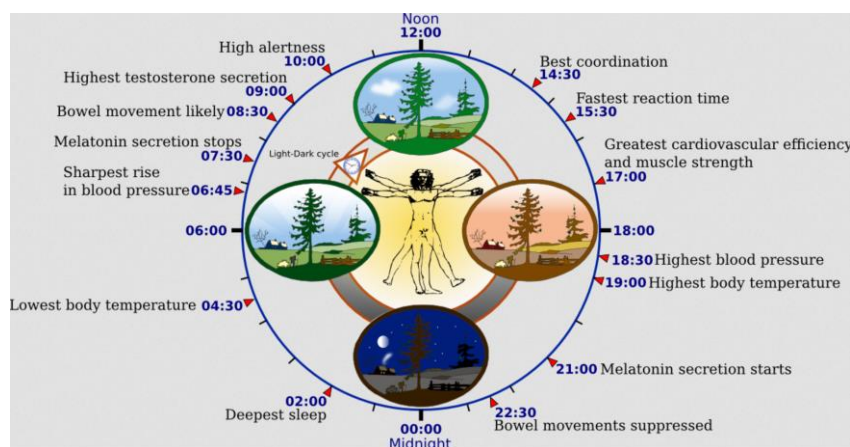
Dagslysfaktorfordelingen i et rum danner grundlag for en hensigtsmæssig zoneopdeling af belysningen. Fordelingen kan enten beregnes ved en dagslyssimulering, eller opmåles. En opmåling vil give den præcise dagslysfordeling, hvis møbleringen er på plads, mens en simulering vil kunne estimere dagslysfordelingen med en påtænkt møblering. Med en lysstyring, hvor armaturerne kan adresseres individuel, vil en måling af den faktiske dagslysfordeling altid dannes grundlag for zoneopdelingen.

Solafskærmning

Jo større vindueshuller i facaden jo mere dagslysindfald, men også større risiko for overophedning af en bygnings lokaler samt blænding fra direkte og reflekteret sollys. Solafskærmninger skal eliminere direkte sollys fra syd- og vestvendte facader når behov, og samtidig reducere blænding fra vinduerne. En effektiv solafskærmning kan reguleres, så den beskytter mod direkte sollys og samtidig tillader mest mulig lys at passere, når himlen er overskyet. Solafskærmninger kan placeres udvendig eller indvendig. En udvendig solafskærmning er langt mere effektiv med hensyn til risiko for overophedning, da en indvendig afskærmning ikke forhindrer strålingsvarme i at komme ind i bygningen.

Dagslysets betydning for det rette indeklima – Dynamisk lys

Forskning har vist, at dagslyset har direkte indvirkning på udskillelsen af de hormoner (melatonin, kortisol og serotonin), som styrer vores naturlige 24h døgnrytme. En amerikansk forsker, David M. Berson, opdagede i 2002 en tredje lysfølsom celle, ganglia-cellen, i det lag i nethinden, hvor det lysfølsomme stof melanosin findes. Ved lyspåvirkning sender ganglia-celler besked til hjernens 'døgnur' om at stoppe udskillelsen af søvnhormonet melatonin og begynde udskillelsen af kortisol og serotonin. Mindskes lyspåvirkningen af ganglia-cellerne reduceres udskillelsen af kortisol og serotonin, og melatonin, som gør kroppen søvrig, dannes.



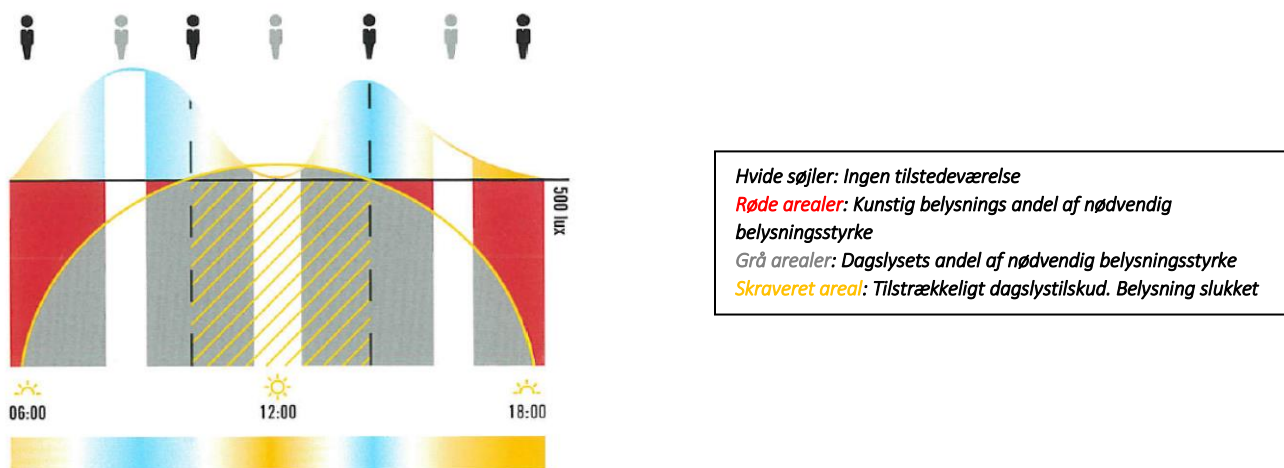
Figur 11-23 Menneskets biologiske ur og nogle fysiologiske parametre; Kilde: www.wikipedia.org

Men kroppens reaktion afhænger af lysets farvespektrum og intensitet. Forskere fra Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, New York, udførte i 2005 og 2006 en række forsøg med forskellige lyskilders påvirkning af den naturlige døgnrytme. Effekten af en glødelampes spektrale sammensætning og farvetemperatur blev anvendt som reference, og dens påvirkning af døgnrytmen sat til 100. En lysgiver med spektralsammensætning som dagslys, og samme belysningsstyrke som glødelampen påvirkede døgnrytmen med en effekt 190. Da belysningsstyrken udendørs ved en overskyet himmel og solskin er henholdsvis 10.000 og 100.000 lx, mens den indendørs belysningsstyrke varierer fra 200 til 500 lx, vil en kunstig belysning med samme spektrale sammensætning som dagslys, ikke kunne holde kroppen vågen som dagslys. Ved at ændre farvesammensætningen af kunstlyset, og fremhæve de blå toner, kunne forskerne øge påvirkningen af døgnrytmen til en effekt på 2790. En dagslysstyring kan sikrer at belysningskravet til synsopgaven overholdes, og et lokales dagslystilskud udnyttes til at reducere energiforbruget, men belysningens farvetemperatur vil være konstant i de perioder, hvor der er begrænset dagslystilskud. Skal variationen i dagslysets farvetemperatur fra morgen til aften bringes ind i et lokale, skal den kunstig belysning simulere dagslys. Fra det rødlige lys ved solopgang over blå lys midt på dagen til rødt lys ved solnedgang. Med LED lyskilder er det blevet muligt, at efterligne variationen i dagslysets farvetemperatur. Bestykses et LED-armatur med to forskellige LED, hver med sin farvetemperatur, f.eks. 2700K og

6500K, vil belysningens farvetemperatur kunne varieres kontinuerligt imellem 2700 og 6500K. Reguleringen kaldes dynamisk lys, eller 'tunable white' idet det udsendte lys er hvidt lys.

En tilpasning af et kontors belysning til dagslyset udenfor kan således påvirke oplagthed, humør og motivation, mens en tilpasning af belysningen i undervisningslokaler kan påvirke elevernes koncentration og indlæring. Dagslystilskud har i en årrække været anvendt til behandling mod vinterdepressioner, og i dag har flere danske hospitaler rettet fokus mod dagslysets betydning for patienternes restituering og investeret i belysningsanlæg med dagslyssimulering.

Udover dagslysets betydning for indeklimaet kan en udnyttelse af dagslyset reducere energiforbruget til kunstig belysning. Hvor store besparelser, som kan opnås, afhænger af dagslysfordelingen, valg af sol-afskærmning og den valgte regulering af belysningen. Figur 11-24 illustrerer dagslysstyring med dynamisk lys.



Figur 11-24 Dagslysstyring og Dynamisk lys; Kilde: ESYLUX produktkatalog 2017

Lysstyring – herunder samspil med dagslys

Det overordnede mål med en lysstyring er, dels at undgå, at der bruges mere energi end højst nødvendigt, dels at sikre et godt belysningsmiljø og et brugervenligt belysningsanlæg.

En energimæssig optimal udnyttelse af et belysningsanlæg kræver en lysstyring, der registrerer tilstedeværelse og samtidig udnytter lokalets dagslystilskud i størst muligt omfang. En række leverandører leverer komponenter til komplette lysstyringsløsninger. Kontakter, lysdæmpere, tilstedeværelsessensorer og lysmålere, enten til registrering af indkommen dagslys eller til registrering af belysningsniveauet i en eller flere zoner. Kommunikationen kan ske til centralt placerede relæer og lysdæmpere, hvortil grupper af armaturer er fast opkoblet, eller kommunikationen kan ske over en fælles installationsbus koblet til adresserbare armaturforkoblinger, hver med sin relæ- og dæmpningselektronik.

I dette afsnit gives først et overblik over styrings- og reguleringsprincipper, dernæst omtales styring af lysarmaturer i fri topologi og til sidst gives løsningseksempler for kontor-, undervisningslokaler og gangarealer.

Lysstyringsprincipper

Valg af styrings- og reguleringsstrategi afhænger af lokalets brug. Anvendes lokalet kun til en aktivitet med et lysbehov, eller anvendes lokalet til flere aktiviteter med forskellige behov. Tabel 11-8 giver et overblik over betjenings-, styring- og regulering former. Manuelt betjente kontakter og lysdæmpere indgår i praksis altid i et belysningsanlæg.

Tabel 11-8 Styrings- og reguleringsmuligheder

Tænd og sluk	Styring eller Regulering	Brugeroverstyring	Særlige funktioner
<ul style="list-style-type: none"> • Kontakter • Urstyring • Kontakter med automatisk sluk • Bevægelses- og tilstedeværelses sensorer 	<ul style="list-style-type: none"> • Styring efter dagslys udenfor • Styring efter dagslys gennem vindue • Aut. regulering af lysniveau 	<ul style="list-style-type: none"> • Overstyring med manuel kontakt • Overstyring med manuel lysdæmper • Overstyring med aut. tilbagesstilling 	<ul style="list-style-type: none"> • Betj. v. rengøring • Betj. v. service

Tænd og sluk. Indenfor belysningsstyring skelnes mellem bevægelses- og tilstedeværelsessensor. Med bevægelsessensorer menes passive infrarøde sensorer (PIR), der registrerer bevægelse ved at detektere temperaturforskelle, med tilstedeværelsessensorer menes akustiske- eller ultralydssensorer. Akustiske sensorer registrerer lyde, og kan benyttes i områder der vanskeligt lader sig overvåge af PIR-sensorer. Ultralydssensorer udsender ultralyd og registrerer ændringer i den lyd som reflekteres fra lokalet. En ultralydssensor kan registrere bevægelser ned til få centimeter, og kan benyttes i kontorlandskaber med overvejende PC-arbejde, mens PIR-sensorer anvendes i lokaler, som ikke benyttes konstant, og hvor brugerne ofte glemmer at slukke lyset, f.eks. klasselokaler, små kontorer, kopirum, toiletrum og garderober. Aktiveres en sensor tændes belysningen, og slukkes efter en indstillet forsinkelse efter sidst registrerede tilstedeværelse.

Styring efter lysniveau udenfor bygningen (vejrstation). Her måles lysniveauet udenfor bygningen med en lyssensor placeret frit uden skygge i løbet af dagen, typisk på taget. I lokaler med stor dybde zoneinddeles belysningen. Lyset dæmpes i zonerne afhængig zonerne dagslysfaktorer. Løsningen kombineres med bevægelses- eller tilstedeværelsessensorer, som slukker for lyset, når lokalet ikke benyttes. Styringsprincippet anvendes mest i større bygninger med central vejrstation, og et centralt bygningsautomationssystem. Løsningen er uafhængig af tilfældige hændelser, lokalets indretning og brugeradfærd. Fordelen er, at styringen er stabil og enkel at sætte i drift, så den virker efter hensigten. Justering af set-punkter for den kunstige belysning i forskellige zoner kan indstilles

for repræsentative lokaler, og overføres til lignende lokaler. Ulemperne er, at alle skal tilpasse sig én belysning. Gives brugere mulighed for at overstyre styringen med manuelle tryk i større lokaler, kan resultatet blive, at hele lokalet belyses efter dette behov. Systemet skal integreres med solafskærmning, for at sikre tilstrækkelig belysning, når solafskærmningen går for. Gives solafskærmningen fri for individuel manuel overstyring vil belysningen ikke reduceres i takt hermed, men skulle sænkes manuelt.

Styring efter lysindfaldet gennem vinduer. Dagslysmængden som kommer ind i lokalet måles med en lyssensor rettet mod et vindue, og belysningen dæmpes eller slukkes efter dagslysfaldet. Belysningen kan zoneopdeles, så lyset dæmpes mest i zoner med nær vinduer og mindre i zoner længere inde i lokalet. Løsningen har samme fordele og ulemper som styring efter en central vejstation, men kræver ikke manuel regulering, hvis lokalets solafskærmning gives fri for manuelt overstyring.

Automatisk regulering af lysniveauet. Belysningsstyrken på arbejdsplanet registreres af en eller flere lysmålere, monteret i loftet i lokalet, og belysningsstyrken holdes konstant i en lukket sløjfe regulering. Ofte monteres en enkelt lyssensor, som registrerer belysningsstyrken i en central zone. Denne zone reguleres i lukket sløjfe, mens tilstødende justeres efter deres respektive dagslysfaktorer ift. den regulerede centrale zone. Reguleringen har både fordel og ulemper. Fordelen er, at belysningen kan reguleres mere præcist, når der sker ændringer i både kunstlyset og dagslyset. Er der monteret lyssensorer i hver zone, vil systemet følge med, når der sker ændringer i møbleringen, eller når vægge tilsmudsnes med tiden. Ulempen er, at reguleringen kan være ustabil, når der indtræder pludselige ændringer, f.eks. hvis fladen, hvor lysstyrken registreres, ændrer reflektans fordi den dækkes af noget anderledes reflekterende.

For alle tre styrings- og reguleringsprincipper gælder, at styrings- og reguleringsparametrene skal indreguleres efter de aktuelle forhold. Det er ikke tilstrækkeligt, at benytte fabrikanternes grundindstillinger. En ustabil regulering vil genere, ligesom en ikke afstemt styring zonerne imellem vil genere. I værste fald kan det føre til at brugerne overstyrer systemet, og såvel energibesparelsen som belysningskomforten udebliver.

Lysstyring – Lovkrav

BR15 stiller krav om automatisk dagslysstyring. Kravet gælder såvel en zoneopdeling af belysningen, som automatisk ind- og udkobling af zonerne, når daglyset er tilstrækkeligt til at dække lysbehovet i hele eller dele af lokalet. Dagslysfaktoren angiver, hvor stor en andel af dagslyset som når ind i et lokale, og er mål for besparelespotentialer ved udnyttelse af dagslys. Dagslysfaktoren kan måles på en overskyet dag eller beregnes som anført. Videnscentret for energibesparelser i bygninger og Statens Byggeforskningsinstitut (SBI) har gennemført beregninger for besparelespotentialer ved dagslysstyring. I SBI anvisning 220 beskrives i hvor høj grad dagslystilskud kan reducere energiforbrug til belysning. Lysstyringer der inddeler lokalet i zoner og udnytter dagslysfald til at holde konstant lysniveau i hele rummet, og kun ved tilstedeværelse

tænder lys er undersøgt. SBI anvisning 220 beskriver også hvordan lokalers dagslysfaktor øges ved at indtænke f.eks. højere vindueshuller og mindre rumdybder i nybyggeri.

DALI

Lysstyring med DALI – Adressering og styring af armaturer i fri topologi

DALI er en forkortelse af Digital Addressable Lighting Interface. DALI standarden blev udviklet af belysningsbranchen i samarbejde med formål, at gøre regulering af belysningsanlæg enkel og uafhængig af anlæggets opbygning (topologi). Er armaturerne i et lysanlæg forsynet med adresserbare DALI-forkoblinger, kan anlæggets armaturer styres individuelt over en to-leder busforbindelse. Busforbindelsen kan fremføres i fri topologi med en samlet buslængde op til 300m pr. buslinje. Busforbindelsen kan alternativt, for at reducere installationsomkostningerne, fremføres i samme kabel som armaturernes strømforsyning, f.eks. et 5-leder installationskabel fremført til første armatur på strengen, og videre mellem armaturerne. To ledere plus jord til 230V forsyning, og to ledere til DALI-bussen. Bevægelses- og tilstedeværelsessensorer, belysningsmålere og betjeningsstryk for manuel betjening, hver med egne unikke adresser, kobles til DALI-buslinjen. Én buslinje kan håndtere 64 adresser og belastes med 250mA. På hver buslinje kan armaturerne styres enkeltvis eller i op til 16 grupper.

I større bygninger med mange armaturer på hver etage og flere etager installeres DALI-routere, der som udgangspunkt, hver især, håndterer en buslinje med 64 adresser. Kommunikationen imellem DALI-routere på etageniveau og imellem etagerne foregår over en standard ethernet UTP-dataforbindelse og det nødvendige antal switche for at forbinde alle DALI-routere.

DALI-standardens stiller krav om et maksimalt DALI-forkoblings strømforbrug på 2mA, men ingen krav til betjeningsstryks, bevægelses- og lyssensorers forbrug. Betjeningsstryk bruger op til 10mA og en kombineret bevægelses- og lyssensor op til 25mA. Buslinjens maksimale strømforbrug på 250mA og maksimale længde 300m sætter ofte grænsen for antal armaturer og enheder, som kan kobles til én buslinje.

I projekteringsfasen er det vigtigt at sammenholde de to begrænsninger med eventuelle ønsker om udvidelsesmuligheder, når antal buslinjer (DALI-routere) i installationen besluttet.

Lysstyring med DALI – Dynamisk lys (Tunable White)

Til belysningsløsninger med dynamisk lys er udviklet DALI type 8 LED-forkoblinger, som understøtter glidende skift i LED-armaturets farvetemperatur og lysstrøm. For at simulere en døgnrytme korrekt skal såvel bygningens geografiske beliggenhed som årstiden kendes.

Leverandører af belysningsstyringer for simulering af dagslystyrmer tilbyder forprogrammerede lysstyringer, som passer til den breddegrad bygningen er beliggende.

Lysstyring – Indregulering og integration med BMS

Indregulering af en belysningsstyring er afgørende for anlæggets korrekte funktion, og udføres over flere gange, hvis styringen omfatter regulering af zoner efter dagslystilskud og eventuelt dynamisk lys. Første indregulering foretages, når det er mørkt udenfor. Her indstilles belysningsstyrken i den zone luxmåleren er placeret. Afhængig af lokalets geometri og vinduer i facaden indlægges

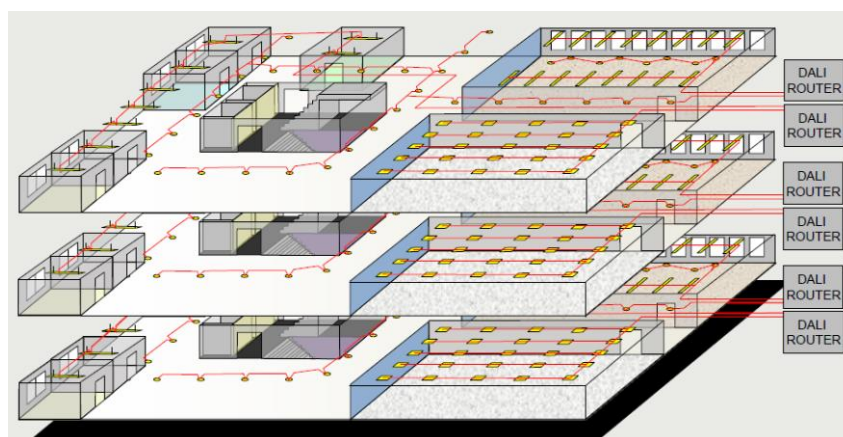
erfaringsmæssige kurveforløb, som armaturerne i zonerne omkring zonen med luxmåler skal følge, og alle zoners belyningsstyrke justeres til korrekt niveau. Efterfølgende justeres kurveforløbene for hver af de tilstødende zoner ved dagslys. Programmeringen foretages normalt i lokalet med en PC tilkoblet en vilkårlig DALI-router eller switch i installationen.

DALI-lysstyringen kan kobles til bygningens BMS. Enten direkte til BMS kommunikationsprotokol, f.eks. BACnet/IP, eller via en gateway til lokale IBI-undercentraler, som registrerer tilstedeværelse og indeklima-parametre, som temperatur og CO2 niveau, og f.eks. styrer lokale VAV-spjæld, ventiler for lokale varme- og kølekredse og jalousier.

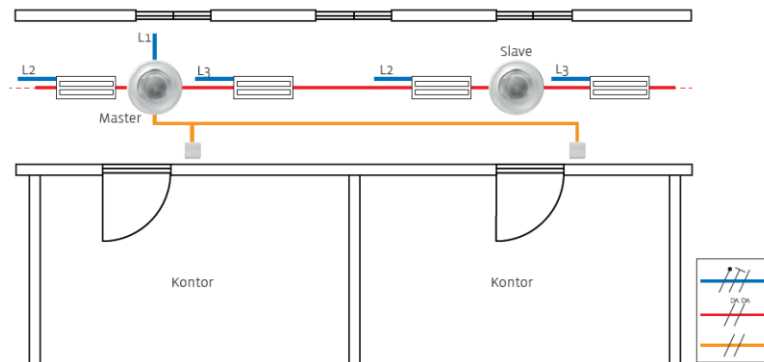
En fordel ved at koble DALI-lysstyringen til IBI-undercentraler, og gøre brug af IBI-undercentralernes bevægelsesmeldere, lysmålere og tryk, er færre komponenter og lavere installationsomkostninger.

En væsentlig ulempe kan blive tvivl om ansvarsfordelingen, når lysinstallationen svigter, og det ikke er samme entreprenør, som har udført begge installationer.

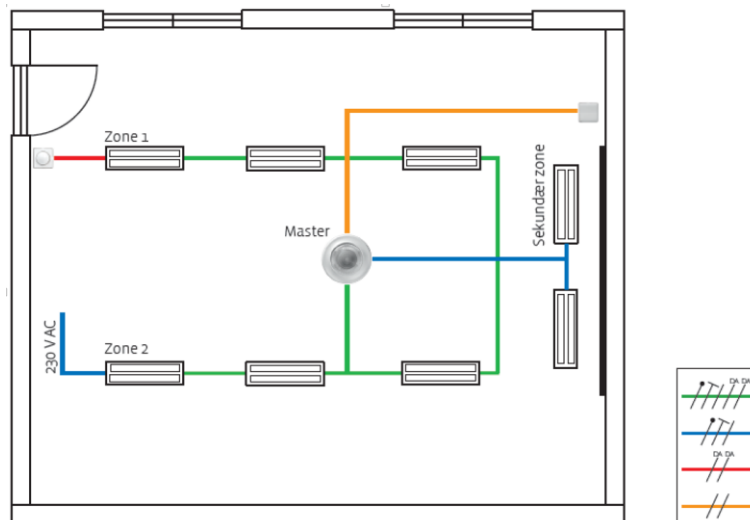
DALI-bussen sikrer to-vejskommunikation til tilsluttede armaturer, tryk og sensorer. En udbrændt lyskilde registreres i forkoblingen, og står til rådighed for bygningens BMS. I Figur 11-25 er vist hvordan DALI-løsninger ved opkobling til DALI-routere på etageniveau kan integreres på bygningsniveau. I Figur 11-26 - Figur 11-30 er vist eksempler lysstyring af gangareal, undervisningslokale, kontor og mødelokale foreslået af Niko-Servodan A/S.



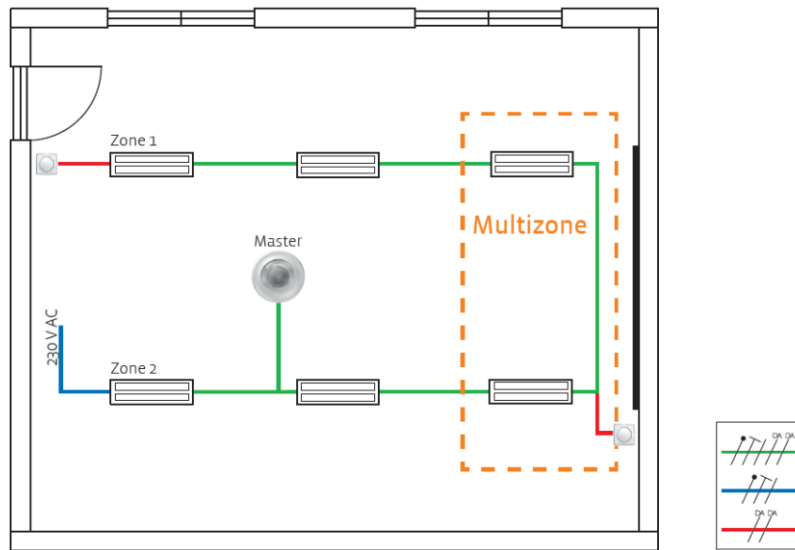
Figur 11-25 DALI-installation i bygning med flere etager



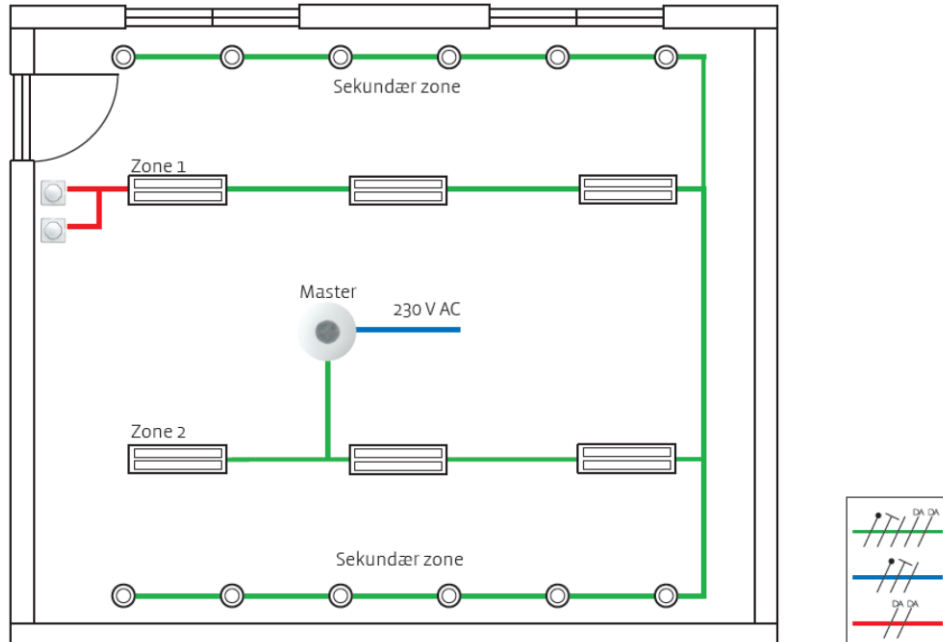
Figur 11-26 DALI-styring af gang med dagslys. Gangbelysning med on/off dagslysstyring og fordeling på to grupper iht. SBi-krav; Kilde: Niko-Servodan A/S



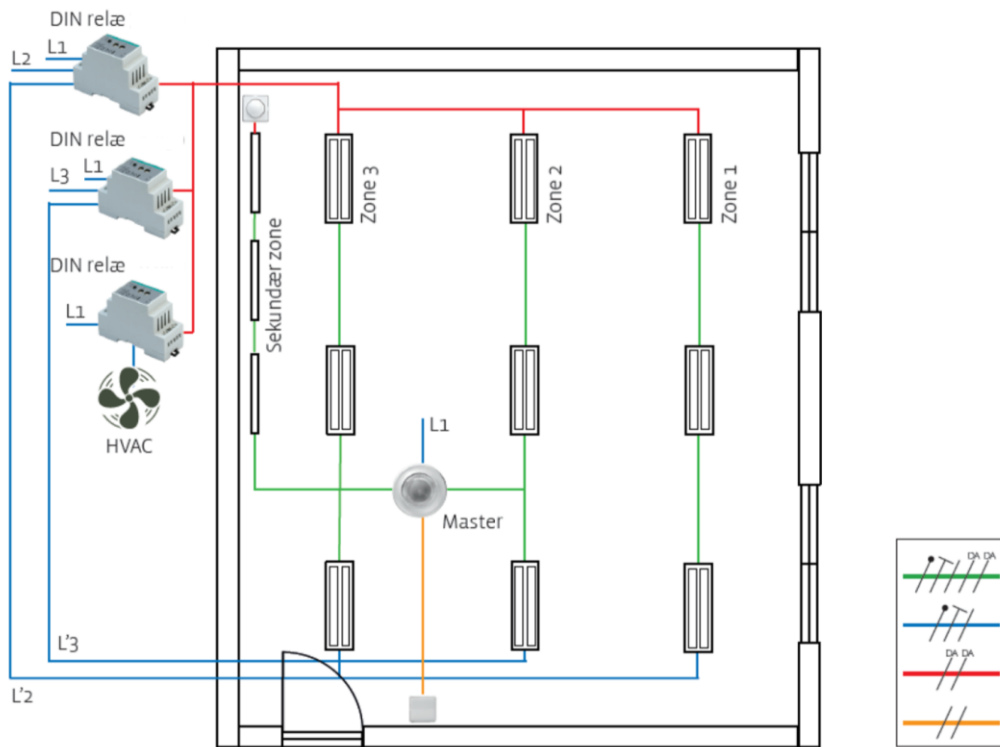
Figur 11-27 DALI-styring af undervisningslokale med tavlelys: Dæmpbar dagslysstyring i to zoner. On/off styring af tavlebelysning. Overstyring af dagslysstyring med potentiometer; Kilde: Niko-Servodan A/S



Figur 11-28 DALI-styring af undervisningslokale med multizone: Dæmpbar dagslysstyring i to zoner og multizone til smartboard. Armaturerne i multizonen indgår i dagslysstyringen, men kan reguleres manuelt uafhængigt af armaturerne i dagslyszonerne. Lyset kan tændes ved tilstedeværelse, eller sættes til manuelt tænding. Lyset slukker, når lokalet forlades. Overstyring af dagslysstyring og multizone med potentiometer; Kilde: Niko-Servodan A/S



Figur 11-29 DALI-styring af kontor med to zoner og randbelysning: Dæmpbar dagslysstyring i to zoner og dæmpbar randbelysning. Standby minimering og overstyring med potentiometer; Kilde: Niko-Servodan A/S



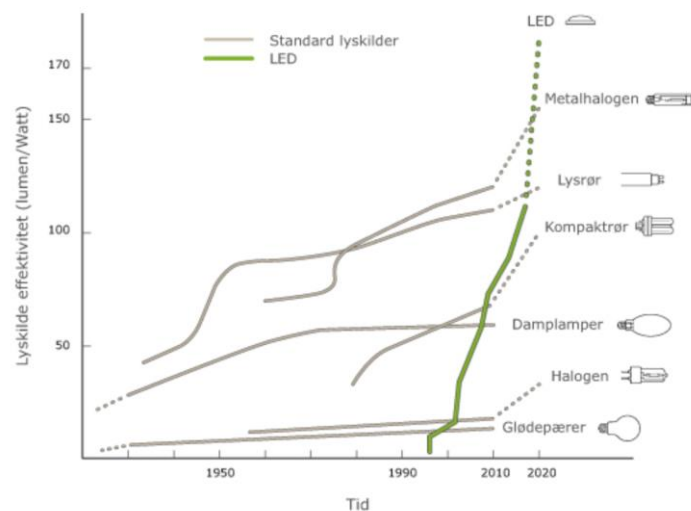
*Figur 11-30 DALI-styring af kontor med to zoner og randbelysning: Dæmpbar dagslysstyring i to zoner og dæmpbar randbelysning. Standby minimering og overstyring med potentiometer;
Kilde: Niko-Servodan A/S*

11.7. Udvikling af lyskilder, valg af lysarmaturer, dynamisk lys og sundhed

Indenfor de seneste år er lysemitterende dioder, Light Emitting Diodes, blevet den foretrukne lysgiver. Diodernes høje lysudsendelse pr. tilført effekt (lm/W) og lange levetid og har medført, at flere armaturfabrikanter alene koncentrerer sig om videreudvikling af LED-armaturer til såvel rumbelysning som vej- og effektbelysning.

Markedsundersøgelser (McKinsey 2011) forudsiger, at tæt ved 50% af alle nye og udskiftede lyskilder i 2020 vil være LED. Effektiviteten for hvide LED ligger i 2017 på omkring $160 lm/W$. Lysstofrør, der i 2017 fås med lysudbytte på $100 lm/W$, forventes at nå et maksimum på $120 lm/W$ i 2020, mens LED forventes nå $200 lm/W$ i 2020.

I et LED armatur indgår LED-kredse som en integreret del af armaturet, hvilket betyder at LED-kredsens levetid er armaturets levetid. Lysrørsarmaturer tilbydes i dag for såvel effektive T5 lysrør som lysrør med indbyggede lysdioder. Når der til en belysningsopgave skal vælges mellem LED- og lysrørsarmaturer er det nødvendigt at sammenholde de mulige løsnings levetider, lysnedgang og lyskvalitet med forventet driftstid og serviceintervaller for at beregne den på investerings-tidspunktet økonomisk fordelagtige løsning.

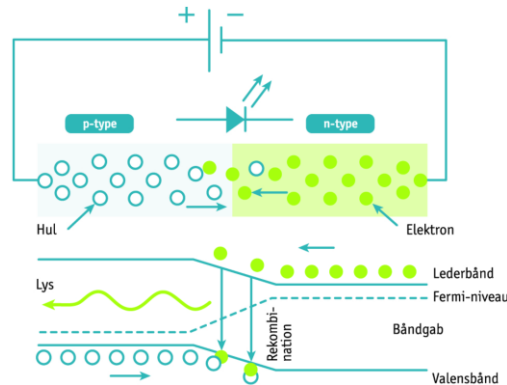


Figur 11-31 Udvikling i lyskilders effektivitet; Kilde: Glaxo (Osram)

Nedenfor beskrives LED-opbygning, -drift og -regulering. Dernæst sammenholdes LED og lysrør med hensyn til lysudbytte, farvegengivelse, farvetemperatur og levetider.

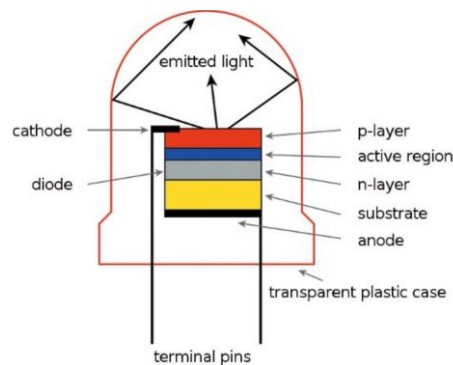
Hvad er en LED

En lysdiode er – i elektrisk forstand – en normal faststof diode, dvs. en pn-overgang i et halvleder materiale.



Figur 11-32 LED-princip; Illustration: en.wikipedia.org

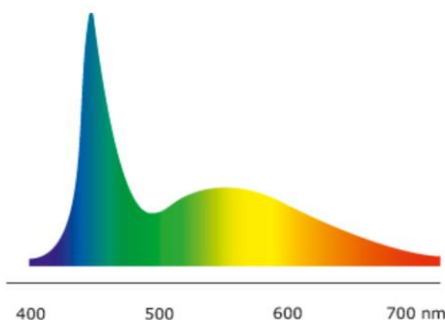
De frie elektroner i halvledermaterialet har højere energiniveau end elektroner fanget i halvledermaterialets krystalgitter. Når en fri elektron falder i et hul i krystalgitteret, afgiver elektronen stråling, svarende til energiforskellen mellem frie og bundne elektroner. Jo stærkere valenselektronerne er bundet i halvledermaterialet, jo højere er energien, og dermed frekvensen af det emitterede lys.



Figur 11-33 LED-chip; Illustration: en.wikipedia.org

Lys emitterende dioder er ligesom lysrør luminescensstrålere. I lysrør afgiver kviksølvdampe, når de exciteres af elektroner, stråling i det ultra-violette område, der ved flourescens omdannes til lys i det synlige område. Afhængig af antallet af flourescerende lag og lagenes sammensætning skabes forskellige farvespektre og farvetemperaturer. Lysdioder udsender stråling, hvis bølgelængde og intensitet afhænger af halvledermaterialet. F.eks. udsender halvledermaterialerne $GaAsP$ rødt lys, GaP gult- og grønt lys og $InGaN$ blå-, hvidt- og ultra-violet lys. Ved at pådampe den transparente kapsling om LED-chippen flourescerende fosfor-pulvere opnås forskellige lysspektre og farve-

temperaturer. I Figur 11-34 ses et eksempel på hvordan en hvid LED af halvleder materialet *Indium Gallium Nitride* har fået en bred spektralfordeling. Halvleder materialet udsender lys med høj intensitet i det blå og ultra-violette område, som ved flourescens udnyttes til at give den brede spektralfordeling.



Figur 11-34 Spektralfordeling af hvid LED; Kilde: www.glamox.com

For at udsende lys skal lysdioden påtrykkes en jævnspænding, der får elektronerne til at passere dioden. Driftsspændingen for en enkelt LED i lederretningen ligger fra knap 2V til knap 4V afhængig af halvleder materialet. Drift af lysdioder kræver tilpassede forkoblinger (drivere), som omformer 230V AC til den nødvendige gennemgangsspænding. Lysdioderne kan kobles både i serie og parallel. Seriekobles dioderne påtrykkes en jævnspænding, som sikrer strømgennemgang. (De enkelte dioders gennemgangsspænding adderes). Driftsformen kaldes konstantstrømsdrift, og typiske strømværdier er 350, 500, 700 og 1050mA.

Parallelkobles dioder, eller parallelkobles et antal ens seriekoblede dioder, skal parallelkoblingen forsynes med en spænding som sikrer strømgennemgang i parallelgrenene. Driftsformen kaldes konstant spænding, og typiske spændingsværdier er 8, 10, 12, 24 eller 48V. (Antallet af dioder koblet i serie i et IP20-armatur er i praksis begrænset af spændingsgrænsen på 60V DC for SELV strømkredse, der yder beskyttelse mod elektrisk chok ved både direkte og indirekte berøring, jf. SB411.1.4.3). Driveren skal således tilpasses typen af LED-armatur, og polariteten stemme overens med gennemgangretningen for ikke at beskadige dioderne. Lysregulering af LED-armaturer udføres typisk ved pulsbreddemodulering PWM, men også ved mere avanceret pulsamplitudemodulering PAM, der kan forøge diodernes effektivitet og levetid¹. LED-drivere fås med forskellige kontrolgrænseflader. DALI, DSI, DMX512 og SwitchDim er eksempler.

LED-armatur

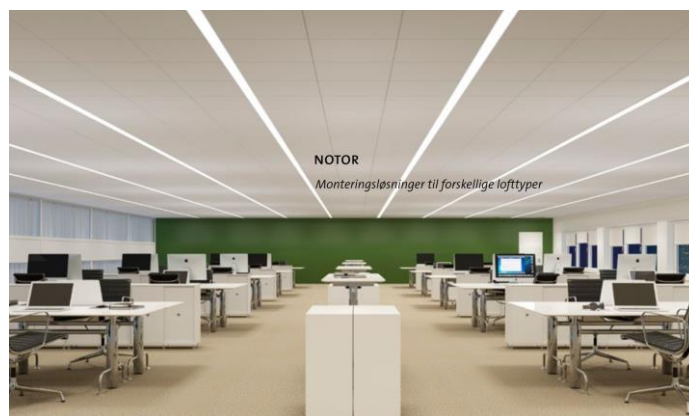
På grund af LED'ens kraftige lysudsendelse (høje luminans), er LED-armaturernes afskærmning af afgørende betydning for lysmiljøet og opfyldelse af DS/EN12464 krav til blanding. I Figur 11-35,

¹ <http://www.ledsmagazine.com/articles/2006/01/closed-loop-electronic-controllers-drive-led-systems.html>

er vist eksempler på tre forskellige afskærmninger til et LED-armatur for kontorbelysning fra belysningsproducenten Fagerhult A/S (se www.fagerhult.dk for opdateringer). Armaturet til venstre har en dobbelt parabolisk side- og tværreflektor af halvblank aluminium. En tynd film over LED-kredsene gør lyset diffust. Afskærmningen tillader alt lys at passere. Armaturet i midten har en afskærmning af akryl. Mikroprismer i akrylpladen giver et retningsbestemt lys. Afskærmningen er udviklet til fleksible kontormiljøer med skærmarbejde. Afskærmningen til højre er en opal akrylskærm, der spreder diffust lys i rummet. Afskærmningen er nedsænket 10mm under loft for at tilføre lys til loft og vægge.



*Figur 11-35 LED-armaturafskærmninger (dobbelt parabolisk reflektor / mikroprisme / opal);
Kilde: Fagerhult produktkatalog 2017*



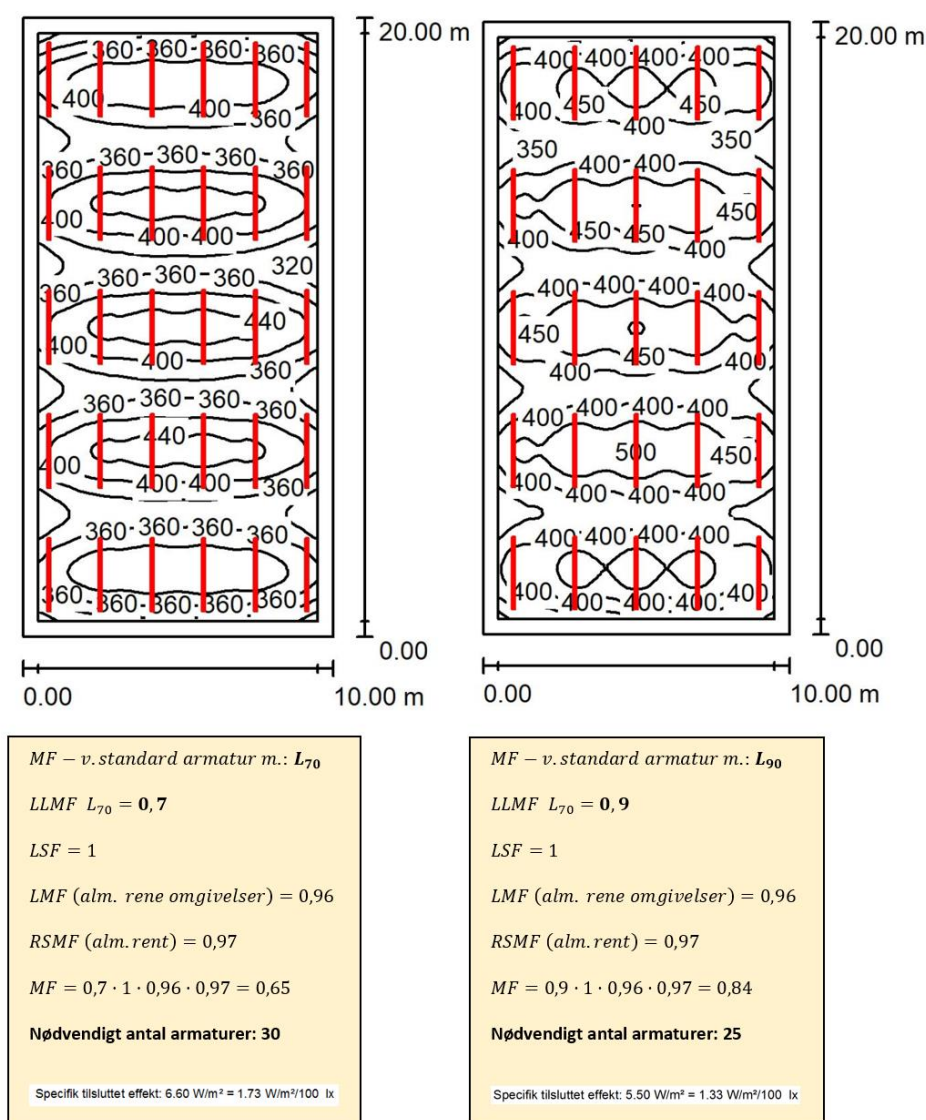
*Figur 11-36 Eksempel på LED-armaturløsning for fleksibelt kontormiljø;
Kilde: Fagerhult produktkatalog 2017*

LED- eller lysrørsarmaturer – Levetider, lysnedgang, investering og driftsomkostninger

Et LED-armaturs levetid og lysnedgang over tid skal dokumenteres iht DS/EN62717:2017 og DS/EN62722-2-1:2016.

Armaturets *L*-værdi (*LLMF* Luminare Lamp Maintenance Factor), som angiver forventet lysstrøm i procent af nyværdi efter en given driftstid, skal oplyses. *L*₇₀100.000h angiver f.eks. at armaturets lysstrøm efter 100.000h er 70% af nyværdien. For at kunne sammenholde forskellige løsninger skal

L -værdierne for hver enkelt løsning kendes. L -værdierne indgår både i beregning af nødvendigt antal armaturer og i beregning af drifts- og vedligeholdelsesudgifter i investeringsperioden. Nedenfor, Figur 11-37, er vist et eksempel på dimensionering af et belysningsanlæg med to armaturer med hver sin LED-kvalitet. I den betragtede periode er lysnedgangen 30% for armaturet til venstre og 10% for armaturet til højre. Den dimensionerende vedligeholdelsesfaktor MF er derfor forskellig. MF er 0,65 for armaturløsningen til venstre og 0,84 for løsningen til højre, og det nødvendige antal armaturer beregnes til henholdsvis 30 og 25. Valg af armaturkvalitet er således afgørende for såvel investeringsomkostning som driftsudgifter i investeringsperioden.



Figur 11-37 LED-kvalitet 'Investerings- og driftsudgift'

Det bemærkes, at DS/EN12464-1 stiller krav om, at vedligeholdelsesfaktoren skal oplyses, og der skal redegøres for hvordan den er fremkommet.

Som anført koncentrerer flere armaturproducenter sig alene om udvikling af LED-armaturer. Hvorvidt en eksisterende lysrørsarmaturløsning bør udskiftes med en energimæssig fordelagtig LED-løsning er en investeringsbeslutning. I Tabel 11-9 er anført levetider og lysnedgang for to typer lysrør og to typer LED-armaturer. Et TL5 High Output lysrør og et TL5 High Output Deluxe lysrør med høj R_a værdi, begge fra Philips, samt et LED-armatur med dobbelt parabolisk reflektor og et LED-armatur med opal akryl afskærmning fra Fagerhult A/S. De angivne lysudbytter pr. watt er for LED-armaturerne for lyskilde og armatur, der er én integreret enhed. For at sammenligne lysudbytte for lysrør med lysudbytte for LED-armaturer skal lysrørets lysudbytte reduceres med armaturvirkningsgraden af det armatur lysrøret monteres i. Virkningsgraden for et lysrørsarmatur af høj kvalitet ligger i intervallet 75-80%. For de anførte højeffekt lysrør og armaturvirkningsgrad 0,80, opnås et lysudbytte på 68-79 lm/W , svarende til 50-66% af lysudbyttet fra de to LED-armaturer.

Tabel 11-9 Eksempler på levetider, lysnedgang og lyseffekter - High Output Lysrør og LED-armaturer. Kilde: Produktkataloger 2017 (Philips og Fagerhult)

	TL5 High Output	T5 High Output Deluxe	LED-BetaOpti Reflektor	LED-Opal flush
Driftseffekt [W]	49.2	49.2	37	46
Lysstrøm Φ [lm]	4900	4200	4720	5546
Lyseffekt [lm/W]	99	85	128	121
Lyseffekt [lm/W] (nytteeffekt)	79	68	128	121
L_{90} [h]	20.000	20.000	50.000	50.000
T_{CP} [Kelvin]	4000	4000	4000	4000
R_a	82	90	80	80

LED-armaturerne har begge højere lysudbytte og længere levetid end lysrørsarmaturerne. For at afgøre hvorvidt en lysrørløsning bør udskiftes med en LED-løsning skal armaturpriser og investeringsperiode inddrages. Jo længere investeringshorisont, jo mere rentabel kan en udskiftning til LED-armaturer være.

11.8. Energirigtig drift- og vedligeholdelse af belysningsanlæg

Vedligeholdelsefaktoren, Maintenance Factor, MF, indgår som dimensionerende parameter i lysberegninger. MF beregnes som produktet af lyskildenedgang, lyskilde udfald, armatur- og rumtilsmudsning:

$$MF = LLMF \cdot LSF \cdot LMF \cdot RSMF$$

Lyskildenedgang, Lamp Lumen Maintenance Factor, LLMF, afhænger af lyskildens driftstid. Faktoren der skal dokumenteres af lyskildefabrikantene, angiver lyskildens lysstrøm efter et givent

antal driftstimer. F.eks. angiver L_{80} 10.000h, at lyskildens efter 10.000h har en lysstrøm på 80% af nyværdien.

Lyskilde bortfald, Luminaire Survival Factor, LSF, angiver andelen af lyskilder, som efter en given driftstid stadig er i funktion.

Armaturets tilsmudsningfaktor, Luminaire Maintenance Factor, LMF, angiver nedgangen i lysstrøm som følge af armaturets tilsmudsning. Faktoren afhænger af omgivelsernes renhed efter et valgt rengøringsinterval.

Rummets tilsmudsningfaktor, Room Surface Maintenance Factor, RSMF, angiver nedgang i belysningsstyrke på arbejdsplanet som følge af rummets tilsmudsning. Faktoren afhænger af rumfladernes renhed efter et valgt rengøringsinterval.

Tabel 11-10 Armaturtilsmudsningfaktor (LMF); R (rene omgivelser): kontorer, skoler, sygehuse, hoteller o. lign. N (normale omgivelser): industri, lager, butikker, sportshaller, restauranter, tekniske områder o. lign. S (snavsede omgivelser): støberi-, jern- og stålværker, savværker o. lign.; Kilde: www.fagerhult.dk

LMF	2 år			3 år			4 år			5 år		
	Omg.			Omg.			Omg.			Omg.		
Armaturtype	R	N	S	R	N	S	R	N	S	R	N	S
Åbnet (LMF)	0.96	0.93	0.85	0.94	0.90	0.77	0.92	0.88	0.72	0.90	0.85	0.66
Lukket (LMF)	0.98	0.94	0.87	0.94	0.92	0.84	0.94	0.90	0.78	0.92	0.88	0.71
Oplys (LMF)	0.91	0.80	0.68	0.84	0.75	0.54	0.77	0.70	0.40	0.71	0.60	0.29

Tabel 11-11 Rumtilsmudsningfaktor (RSMF), R (rene omgivelser): kontorer, skoler, sygehuse, hoteller o.lign. N (normale omgivelser): industri, lager, butikker, sportshaller, restauranter, tekniske områder o.lign. S (snavsede omgivelser): støberi-, jern- og stålværker, savværker o.lign.; Kilde: www.fagerhult.dk

RSMF	2 år			3 år			4 år			5 år		
	Omg.			Omg.			Omg.			Omg.		
Armaturtype	R	N	S	R	N	S	R	N	S	R	N	S
Dir. (RSMF)	0.97	0.96	0.95	0.97	0.96	0.95	0.97	0.96	0.95	0.97	0.96	0.95
50/50 (LMF)	0.95	0.93	0.90	0.95	0.93	0.90	0.95	0.93	0.90	0.95	0.93	0.90
Indir. (LMF)	0.92	0.86	0.77	0.92	0.86	0.77	0.92	0.86	0.77	0.92	0.86	0.77

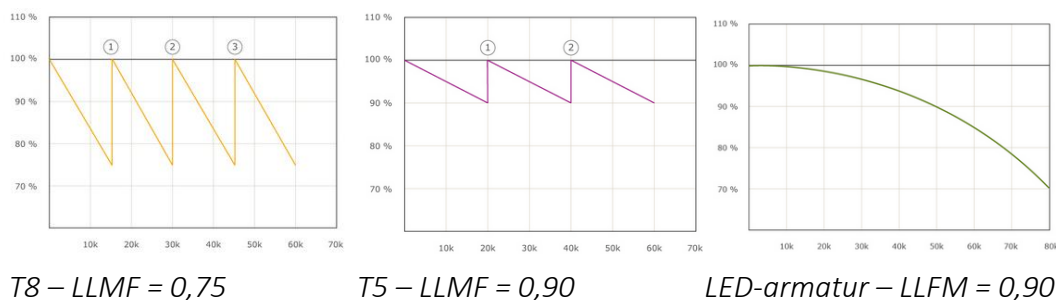
Driftsomkostninger

Et lysanlægs driftsomkostninger kan for at være retvisende opgøres, som en gennemsnitsbetragtning over anlægets levetid, eller den periode investeringsbelutningen blev truffet på. Udgifter til lyskildeudskiftning, rengøring af armaturer og rengøring af rummets flader i perioden skal beregnes.

I MF indgår intervallerne for rengøring af armaturer og rummet, uafhængigt af antal driftstimer, mens lyskildens levetid (eller lyskildens lysnedgang), og dermed driftsomkostningerne til lyskildeudskiftning, ligesom el-udgift afhænger af driftstiden. I Tabel 11-12 er vist eksempler på

antal lyskildeudskiftninger for to forskellige lysrørsløsninger, en med L_{75} 15.000h og en med L_{90} 20.000h, samt en LED-armaturløsning med LLMF L_{90} 50.000h.

Tabel 11-12 Lyskildenedgang og lyskildeudskiftning – Driftsomkostninger i investeringsperiode, Kilde: www.glamox.com/dk/led-og-levetid



Funktionsafprøvning

Krav om funktionsafprøvning – BR15 (2017)

D. 1. juli 2017 indførtes krav om, at der skal foretages funktionsafprøvning inden ibrugtagning af en række bygningsinstallationer, herunder krav om funktionsafprøvning af belysningsanlæg.

Dokumentation af resultatet af funktionsafprøvningen skal indsendes til kommunen, og opfyldelse af kravene er en forudsætning for at bygningen må tages i brug.

Kravet om funktionsafprøvning gælder ikke kun nybyggeri. Udføres ændringer, der er omfattet af byggereglementets bestemmelser, stilles krav om funktionsafprøvning. I 'Vejledning om funktionsafprøvning' udsendt af Trafik, Bygge- og Boligstyrelsen d. 22. juni 2017, anført i appendix B, gives en detaljeret gennemgang af hvordan det dokumenteres, at et belysningsanlæg overholder bygningsreglementets krav til belysningsstyrke og dagslysstyring, samt at bevægelsesmeldere og zoneopdeling fungerer efter hensigten.

11.9. Litteraturliste

SBi-anvisning 220, Lysstyring, Statens Byggeforskningsinstitut, 2008

SBi-anvisning 219, Dagslys i rum og bygninger, Statens Byggeforskningsinstitut, 2008

SBi-anvisning 218, Lysforhold i undervisnings og daginstitutionsbbygninger, Statens Byggeforskningsinst., 2008

SBi-anvisning 213, Bygningers energibehov, Statens Byggeforskningsinstitut, 2016

SBi-anvisning 184, Bygningers energiforbrug, Statens Byggeforskningsinstitut, 1995

SBI 2013:20, Dagslysberegninger i praksis 'En undersøgelse af ni beregningsprogrammer', 2013

SBI 2016:10, Dagslysbestemmelser i BR 'Vurdering af dagslysforhold', Statens byggeforskningsinstitut, 2016

Lighting Research Center, *Illumination fundamentals*, Rensselaer Polytechnic Institute, 2000
Kongebro, S., & m.f., *Hvad med dagslys? – Designmanual med forslag til helhedsvurdering*, 2014
Petersen, P. E., *Lys og varme*, 5. udg. Bogfondens Forlag, 2010

DS700 Kunstig belysning i arbejdslokaler, Dansk Standard, 2005

DS/EN12464-1 Lys og belysning – Belysning ved arbejdspladser – Del 1: Indendørs arbejdspladser, 2015

DS/EN12464-1 DK NA:2015 – Nationalt annekst til Lys og belysning, 2015

Arbejdstilsynets Bekendtgørelse nr. 96 – Krav til belysning ved faste arbejdspladser.
Arbejdstilsynet, 2001

Arbejdstilsynets Bekendtgørelse nr. 1108 – Krav til belysning ved skærmterminaler.
Arbejdstilsynet, 1996

At-vejledning A.1.5-1 – Vejledning om kunstig belysning på faste arbejdspladser.
Arbejdstilsynet, 2016

At-vejledning D.2.3 – Vejledning om arbejde ved skærmterminaler.
Arbejdstilsynet, 2009

Supplerende links:

<https://centerforlys.dk/viden-om-lys/lysviden-dk/>

<https://www.fagerhult.com/da/videnscenter/>

<http://www.fischer-lighting.com/laer-om-led/>

<http://www.lighting.philips.com/main/education/lighting-university/>

11.10. APPENDIX A

Den fælles europæiske standard DS/EN12464-1:2015 og nationalt annek

Lovkrav til belysningsanlæg for arbejdspladsbelysning anføres dels i bygningsreglement BR15 dels i bekendtgørelser fra Arbejdstilsynet.

I BR15 stilles krav om, at arbejdspladsbelysning pr. 1. juli 2016 skal udføres i overensstemmelse med:

DS/EN12464-1 Lys og belysning – Belysning ved arbejdspladser – Del 1: Indendørs arbejdspladser, med DS/EN12464 DK NA.

Arbejdstilsynet, der har til opgave at sikre, at danske virksomheder varetager deres ansvar for et sikkerheds- og sundhedsmæssigt forsvarligt arbejdsmiljø, stiller i to bekendtgørelser krav til belysning ved faste arbejdspladser og skærmterminalarbejde:

Arbejdstilsynets bekendtg. nr. 96 af febr. 2001 - Krav til belysning ved faste arbejdspladser

Arbejdstilsynets bekendtg. nr. 1108 af dec. 1992 - Krav til belysning ved skærmterminalarbejde

DS/EN12464-1

Nedenfor anføres krav og anbefalinger til kunstige belysningsanlæg i DS/EN12464-1:2015. Sidst i appendixet sammenholdes lempelser i dansk nationalt (DK-NA) med DS/EN12464.

1. Anvendelsesområde

Standarden dækker behovene for synskomfort og synspræstation for personer med normal synsevne. Alle de almindelige synsopgaver er taget i betragtning, herunder arbejde ved skærme.

Standarden fastlægger krav til belysningsløsninger for de fleste indendørs arbejdspladser og de dermed forbundne områder, hvad angår belysningsmængden og –kvaliteten. Standarden indeholder tillige anbefalinger om god belysningspraksis.

Standarden fastlægger ikke belysningskrav med hensyn til de ansattes sikkerhed og sundhed på arbejdspladsen og er ikke udarbejdet indenfor EF-traktatens artikel 153, selvom belysningskravene angivet i denne europæiske standard normalt opfylder sikkerhedskravene. Belysningskrav med hensyn til de ansattes sikkerhed og sundhed på arbejdspladsen kan være indeholdt i direktiver der er baseret på EF-traktatens artikel 153, i medlemslandenes nationale lovgivninger, som har implementeret disse direktiver eller i medlemslandenes øvrige nationale lovgivning.

4. Kriterier for belysningsprojektering

4.1 Lysmiljø

DS/EN12464 tager udgangspunkt i at tre grundlæggende menneskelige behov skal være opfyldt:

- *Synskomfort, hvor de ansatte har en følelse af trivsel; dette bidrager også indirekte til højere produktivitet og arbejdskvalitet*
- *Synspræstation, hvor de ansatte er i stand til at udføre deres synsopgaver selv under vanskelige forhold og i længerevarende perioder*

- Sikkerhed

Som vigtigste parametre anføres:

- Luminansfordeling
- Belysningsstyrke
- Lysretning, rumbelysning
- Lysets variation (lysniveau- og farve)
- Farvegengivelse og lysfarve
- Blænding
- Flimmer

4.2 Luminansfordeling

4.2.1 Generelt

Luminansfordelingen i synsfeltet styrer øjnenes adaptationsniveau, som påvirker synsforholdene. Der er behov for en afbalanceret adaptationsluminans for at øge:

- Synsstyrken (evnen til at se skarpt)
- Kontrastfølsomheden (evnen til at skelne små, relative luminansforskelle)
- Effektiviteten af øjets funktioner (som f.eks. akkommodation, konvergens, pupilsammentrækning, øjenbevægelser osv.)
- Luminansfordelingen i synsfeltet påvirker også synskomforten. Af de anførte grund bør følgende undgås:
 - For høje luminanser, som kan forårsage blænding
 - For store luminansspring, som vil medføre træthed som følge af øjnenes gentagne adaptation
 - For lave luminanser og for små luminansspring, som resulterer i et kedeligt og ustimulerende arbejdsmiljø
 - For at skabe en balanceret luminansfordeling skal der tages hensyn til alle overfladers luminanser, som bestemmes af overfladens reflektanser og den belysningsstyrke, der rammer overfladerne. For at undgå, at omgivelserne fremstår triste, og for at hæve adaptationsniveauet og komforten for personer i bygningerne er det i høj grad ønskværdigt at have lyse indvendige overflader, især vægge og lofter.

Den projekterende skal vurdere og vælge passende værdier for reflektanser og belysningsstyrke for de indvendige overflader baseret på nedenstående vejledning

4.2.2 Reflektans af overflader

Lofter	0,7 – 0,9
Vægge	0,5 – 0,8
Gulve	0,2 – 0,4

DS/EN12464-1 – Anbefalede reflektanser for større, diffust reflekterende, indvendige overflader

4.2.2 Belysningsstyrker på overflader

Vægge	$E_{mid} > 50lx$ med $U_0 \geq 0,10$
Lofter	$E_{mid} > 30lx$ med $U_0 \geq 0,10$
I lukkede rum som kontorer, undervisningslokaler, hospitaler og almene indgangs-områder, gange trapper mv. skal vægge og lofter være lysere. DS/EN12464 anbefalede driftsbelysningsstyrker, er:	Vægge: $E_{mid} > 75lx$ med $U_0 \geq 0,10$ Lofter: $E_{mid} > 50lx$ med $U_0 \geq 0,10$

DS/EN12464-1 – Krav til belysningsstyrke på vægge og lofter

4.3 Belysningsstyrke

4.3.1 Generelt

Belysningsstyrken og dens fordeling på arbejdsfeltet og det omgivende felt har stor for, hvor hurtigt, sikkert og ubesværet en person opfatter og udfører synsopgaven

Alle værdier for belysningsstyrke, der er angivet i denne europæiske standard, er værdier for driftsbelysningsstyrker og opfylder kravene til synskomfort- og præstation.

4.3.2 skala for belysningsstyrke

For sansemæssigt at kunne skelne de anbefalede luminanstrin (i lx) i henhold til EN12665):

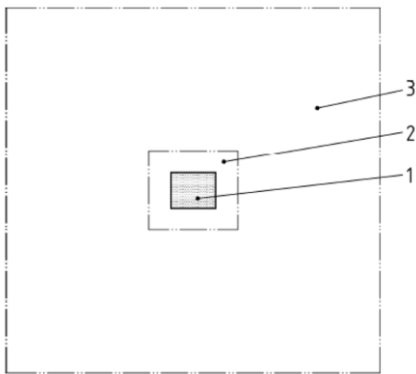
20-30-50-75-100-150-200-300-500-1000-1500-2000-3000-5000

4.3.3 Belysningsstyrke på arbejdsfeltet

De i DS/EN12464 angivne krav til belysningsstyrker er driftsbelysningsstyrker på arbejdsfeltet på referenceoverfladen. Arbejdsfladen kan være horisontal, vertikal eller skrå.

Middelbelysningsstyrken for hver opgave må ikke være lavere end de angivne værdi, uanset anlæggets alder og stand. Værdierne gælder normale synsforhold og tager hensyn til følgende faktorer:

- Psykofysiologiske aspekter så som synskomfort og trivsel
- Krav til synsopgaver
- Synsergonomi
- Praktisk erfaring
- Bidrag til funktionel sikkerhed



Minimumsdimensioner for omgivende felt og baggrundsområde i forhold til arbejdsfeltet

1. **Arbejdsfelt**
2. **Omgivende felt**
(bånd med en bredde på mindst **0,5 m** omkring arbejdsfeltet indenfor synsfeltet)
3. **Baggrundsområde**
(mindst **3 m** bredt omkring det omgivende felt indenfor rummets afgrænsning)

4.3.4 Belysningsstyrke på det omgivende felt

Belysningsstyrken på det omgivende felt skal stå i forhold til belysningsstyrken på arbejdsfeltet og bør skabe en afbalanceret luminansfordeling i synsfeltet. Belysningsstyrken på det omgivende felt kan være lavere end belysningsstyrken på arbejdsfeltet, men må ikke være mindre end:

Belysningsstyrke på arbejdsfeltet $E_{\text{synsopgave}}$ lx	Belysningsstyrke på det omgivende felt lx
≥ 750	500
500	300
300	200
200	150
150	$E_{\text{synsopgave}}$
100	$E_{\text{synsopgave}}$
≤ 50	$E_{\text{synsopgave}}$

DS/EN12464-1 – Krav til belysningsstyrker i det omgivende felt

4.3.5 Belysningsstyrke på baggrundsområdet

På indendørs arbejdssteder, især arbejdssteder uden dagslys, skal en stor del af området, der omgiver et aktivt og bemandedt arbejdsfelt, belyses. Dette område 'baggrundsområdet', bør være et bånd mindst 3m bredt, der støder op til det omgivende felt indenfor rummets afgrænsning.

Baggrundsområdet skal belyses med en driftsbelysningsstyrke på 1/3 af værdien for det omgivende felt.

4.3.6 Belysningsstyrkens regelmæssighed

I arbejdsfeltet må belysningsstyrkens regelmæssighed U_0 ikke være under de mindsteværdier, der er angivet i tabellerne Appendiks A.

For lys fra kunstig belysning eller ovenlys skal belysningsstyrkernes regelmæssighed i det omgivende felt og baggrundsområdet opfylde kravene:

Omgivende felt	$U_0 \geq 0,40$
Baggrundsområde	$U_0 \geq 0,10$

Krav til belysningsstyrkernes regelmæssighed i omgivende felt og baggrundsområdet

For lys fra vinduer anfører DS/EN12464: *I større områder, aktivitetsområder og baggrundsområder aftager dagslyset hurtigt med afstanden til fra vinduet; de supplerende fordele ved dagslyset kan kompensere for manglende regelmæssighed*.

De supplerende fordele ved dagslys beskriver DS/EN12464 som: *'Dagslys kan levere hele eller en del af den nødvendige belysning og åbner derfor mulighed for energibesparelser. Hertil kommer, at dagslyset over tid varierer i styrke, retning og spektral sammensætning og skaber forskellige formtegnings- og luminansmønstre, som opfattes gavnlige for personer i indendørs arbejdsmiljøer. Vinduer er klart at foretrække på arbejdspladser på grund af dagslysindfaldet og den visuelle kontakt med omverdenen. Dog er det vigtigt, at vinduerne ikke giver anledning til visuelle gener, dårlig varmekomfort eller virker forstyrrende på medarbejdernes privatsfære.*

4.4 Beregningsnet for belysningsstyrke

DS/EN12464 stiller krav til beregningsnet ved beregning af belysningsstyrke: *Der skal udarbejdes et beregningsnet for at angive de punkter, hvor værdierne for belysningsstyrke beregnes og verificeres for arbejdsfelt(er), omgivende felt(er) og baggrundsfelt(r). En maskeform i beregningsnettet, som kommer tæt på et kvadrat, foretrækkes, forholdet mellem længde og bredde skal ligge mellem 0,5 og 2. DS/EN12464 tillader, at: Et bånd på 0,5m fra væggene er undtaget beregningsområdet, bortset fra når et arbejdsfelt ligger indenfor eller breder sig ind i dette område. Et tilsvarende bånd på 0,5m på vægge og lofter er undtaget beregningsområdet.*

4.5 Blænding

4.5.1 Generelt

- *Blænding er den følelse, der skabes som følge af lyse områder i synsfeltet, som f.eks. belyste flader, dele af armaturer, vinduer og/eller ovenlys. Blænding skal begrænses for at undgå fejl, træthed og ulykker. Blænding kan opleves enten som ubehagsblænding eller som synsnedsættende blænding. På indendørs arbejdspladser er synsnedsættende blænding normalt ikke et stort problem, hvis grænserne for blændingstallet overholdes.*
- *Blænding forårsaget af blanke flader betegnes normalt som refleksblænding.*
- *Der skal tages særligt hensyn til blænding, når synslinjen er over det horisontale plan.*
- *Der findes p.t. ikke nogen standardiseret metode til evaluering af ubehagsblænding fra vinduer.*

4.5.1 Ubegagsblænding

Der findes ikke nogen standardiseret metode til evaluering af ubehagsblænding fra vinduer.

Ubegagsblænding, som er direkte forårsaget af armaturer i et indendørs belysningsanlæg skal bestemmes ved UGR-metoden (CIE Unified Glare Rating) på grundlag af formlen:

$$UGR = 8 \log_{10} \left(\frac{0,25}{L_B} \sum \frac{L^2 \omega}{p^2} \right)$$

hvor L_B er baggrundsluminansen, L armaturluminanser i retning mod iagttagerens øje, ω rumvinklen af lysende armaturdele og p Guthpositionsindekset for hvert armatur.

De anbefaldede grænseværdier for UGR udgør en serie, hvor trinene indikerer detekterbare ændringer i blænding.

UGR-serien er: 10,13,16,19,22,25,28

- note1: UGR-variationerne i rummet kan bestemmes vha. omfattende tabeller vedr. forsk. iagttager positioner
- note2: Hvis den maksimale UGR-værdi i rummet er højere end grænsen, bør korrekte arbejdspladsposition oplyses
- note3: Hvis tabelmetoden ikke kan anvendes, og hvis iagttagerens position er kendt, kan formlen benyttes

4.5.3 Afskærmning mod blænding

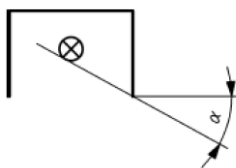
Kraftige lyskilder kan forårsage blænding og forringe synsevnen. Det skal undgås, f.eks. ved passende afskærmning af lyskilder og ovenlys eller passende afskærmning af kraftigt dagslys gennem vinduer.

For armaturer skal man anvende de mindste afskærmningsvinkler i synsfeltet, jf. tabel og figur:

Mindste afskærmningsvinkel ved specifikke lyskildeluminanser

Lyskildeluminans [kcd/m^2]	Mindste afskærmningsvinkel α [°]
20 - 50	15
50 - 500	20
≥ 500	30

Afskærmningsvinkel α



4.5.4 Refleksblænding

DS/EN12464 anfører: Høje luminanser fra lys reflekteret i synsobjektet kan ændre synsforholdene, normalt i negativ retning. Refleksblænding kan forebygges eller minimeres ved følgende foranstaltninger:

- Placering af arbejdspladser under hensyntagen til placering af armaturer, vinduer og ovenlys
- Passende overflader (matte flader)
- Begrænsning af luminanser fra armaturer, vinduer og ovenlys
- Lyse lofter og vægge

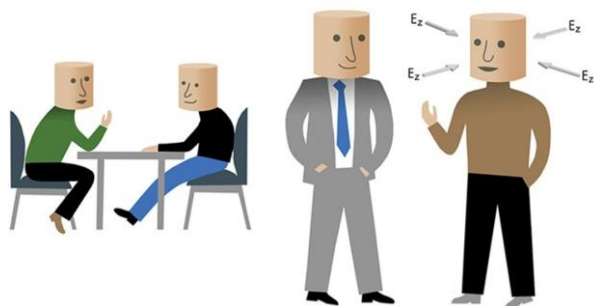
4.6 Indendørs belysning

4.6.1 Generelt

Udover belysning af synsobjekter bør arbejdsrummet også belyses. Dette lys er nødvendigt for at fremhæve objekter, afsløre teksturer og for at forbedre gengivelsen af personer.

4.6.2 Krav om Cylindrisk middelbelysningsstyrke i aktivitetsområdet

DS/EN12464 stiller krav til om tilstrækkelig cylindrisk middelbelysningsstyrke for at sikre god visuel kommunikation og genkendelse af objekter.



God visuel kommunikation og genkendelse af objekter i rum kræver, at arbejdsrummet, i hvilke personer bevæger sig eller arbejder, er belyst. Dette opnås ved tilstrækkelig cylindrisk middelbelysningsstyrke på vertikalt plan E_z i rummet.

<p>Cylindrisk middelbelysningsstyrke $E_{z,vertikal}$ (gennemsnitlig belysningsstyrke på vertikalt plan)</p>	<p>$E_{zmid,vertikal} \geq 50lx$ med $U_0 \geq 0,10$ ved en højde på 1,2m for siddende personer ved en højde for 1,6m for stående personer (regelmæssigheden U_0 af E_z gælder det horisontal plan)</p>
<p>'I områder, hvor god visuel kommunikation er vigtig, især på kontorer, i mødelokaler og undervisnings-lokaler bør $E_{z,vertikal}$ '</p>	<p>$E_{zmid,vertikal} \geq 150lx$ med $U_0 \geq 0,10$ ved en højde på 1,2m for siddende personer ved en højde for 1,6m for stående personer (regelmæssigheden U_0 af E_z gælder det horisontal plan)</p>

DS/EN12464-1 Krav til cylindrisk middelbelysningsstyrke

4.6.3 Formtegnende egenskaber

Belysningen bør ikke være for rettet, da det vil frembringe hårde skygger, den bør heller ikke være for diffus, så lysets formtegnende egenskaber går tabt, hvilket vil resultere i et meget kedeligt lysmiljø. Flerdobbelte skygger som følge af rettet belysning fra mere end en position bør undgås, da det kan virke visuelt forvirrende.

Lysets formtegnende egenskaber afhænger af balancen mellem diffust og rettet lys og bør tages i betragtning.

4.7 Farveaspekter

4.7.1 Generelt

Farvekvaliteterne af en næsten hvid lyskilde eller dagslys er karakteriseret ved to egenskaber:

- lysets farveudsendelse

- farvegengivelsesevnen, som påvirker objekters og personers farvemæssige egenskaber

De to farve egenskaber skal behandles hver for sig

4.7.2 Lysfarve

En lyskildes lysfarve refererer til den opfattede farve af det udsendte lys. Lysfarven karakteriseres ved lysets korrelerede farvetemperatur T_{CP} .

Lysfarve	Korreleret farvetemperatur
Varm	$T_{CP} \leq 3300K$
Neutral	$3300K \leq T_{CP} \leq 5300K$
Kold	$T_{CP} \geq 5300K$

DS/EN12464-1:2015 – Lysfarve

Valget af lysfarve er et spørgsmål om psykologi, æstetik, og hvad der vurderes som værende naturligt. Valget afhænger af belysningsniveau, farver i rummet og på møbler, klimaet og anvendelsen. I varme klimaer foretrækkes generelt en koldere lysfarve, mens der i koldere klimaer foretrækkes en varmere lysfarve.

4.7.3 Farvegengivelse

Af hensyn til synspræstationen, komforten og trivslen skal farver i omgivelserne, på genstande og på den menneskelige hud gengives naturligt og præcist og på en måde, som får mennesker til at se attraktive og sunde ud.

For at give en objektiv indikation af en lyskildes farvegengivende egenskaber anvendes farvegengivelsesindekset R_a . Den maksimale værdi af R_a er 100.

Mindste værdien for farvegengivelsesindekset er angivet i tabel 5.1 til 5.53. Sikkerhedsfarver iht. ISO3864-1 skal altid være genkendelige.

Note: For at sikre korrekt farvegengivelse af genstande og den menneskelige hud bør det behørigt individuelle og specielle farvegengivelsesindeks R_i (CRI – Colour Rendering Index) anvendes

4.8 Flimmet og stroboskopeffekt

Flimmet er distraherende og kan fremkalde fysiologiske virkninger som for eksempel hovedpine.

Stroboskopeffekter kan medføre farlige situationer, idet de kan ændre opfattelsen af maskindeles roterende eller frem- og tilbagegående bevægelse.

Belysningsanlæg bør planlægges således, at man undgår flimmet og stroboskopeffekter.

4.9 Belysning af arbejdspladser ved skærme

4.9.1 Generelt.

Belysningen ved skærmarbejdspladser skal være egnet til alle de opgaver, der udføres på arbejdspladsen, f.eks. læsning på skærmen, læsning af trykt tekst, skrivning på papir, tastaturarbejde.

I disse områder skal belysningskriterier og belysningsanlæg vælges i forhold til type af område, opgave eller aktivitet, jf. tabel 5.26.

Reflekser i skærmen, og i nogle tilfælde også reflekser i tastaturet, kan forårsage synsnedsættende blænding og ubehagsblænding. Det er derfor nødvendigt at udvælge, placere og montere armaturerne, så man undgår kraftige lysreflekser.

Designeren skal fastlægge den kritiske monteringszone og vælge udstyr og planlægge monteringssteder, så der ikke opstår forstyrrende reflekser.

4.9.2 Luminansbegrænsninger for nedadlysende armaturer.

Lys kan mindske kontrasten på en skærm ved:

- Refleksblænding, som skyldes belysningen på skærmen og
- Luminanser fra armaturer og lyse flader, der spejles i skærmen

EN ISO9241-307 indeholder krav til skærmens visuelle kvalitet i relation til uønskede reflekser.

Følgende luminansbegrænsninger for middelluminansen ved udstrålingsvinkler på 65° fra lodret og derover og radiale rundt om armaturet for arbejdspladser, hvor der anvendes skærme, som er lodrette eller hælder op til 15 skal overholdes:

Skærmluminans	Høj luminans skærm $L > 3000 \text{ cd/m}^2$	Medium luminans skærm $L \leq 200 \text{ cd/m}^2$
Eksempel A (positiv polaritet og almindelige krav til farve og detaljer ved den viste information, der anvendes på kontoret, uddannelsen, mv.)	$\leq 3000 \text{ cd/m}^2$	$\leq 1500 \text{ cd/m}^2$
Eksempel B (negativ polaritet og/eller højere krav til farve og detaljer ved den viste information, der anvendes til CAD, farvekontrol, mv.)	$\leq 1500 \text{ cd/m}^2$	$\leq 1000 \text{ cd/m}^2$

Hvis en skærm med høj luminans tilsigtes anvendt ved luminanser under 200 cd/m^2 , skal kravene til en skærm med middel luminans tages i betragtning. Nogle opgaver, aktiviteter eller skærmterminologier, især højglansskærme. Nogle opgaver, aktiviteter eller skærmterminologier, især højglansskærme kræver anderledes belysningsforhold (f.eks. lavere luminansgrænser, særlig afskærmning, individuel lysdæmpning mv.). I industri- og håndværksområder er skærme nogle gange beskyttet af ekstra glasflade. De ønskede reflekser på disse beskyttelsesglas skal reduceres på passende måde (som f.eks. ved antirefleksbehandling, ved at vippe beskyttelsesglasset eller ved afskærmning).

4.10 Vedligeholdelsesfaktor

Belysningen bør planlægges med en overordnet vedligeholdelsesfaktor, som beregnes for det valgte belysningsudstyr, omgivelserne og den faste vedligeholdelsesplan.

Den anbefalede belysningsstyrke for den enkelte opgave er angivet som driftsbelysningsstyrke.

Vedligeholdelsesfaktoren afhænger af de vedligeholdelsesmæssige egenskaber, der knytter sig til lyskilde og forsynings- og styringsudstyr, armaturet, omgivelserne og vedligeholdelsesplanen.

Belysningen bør projekteres ved brug af den overordnede vedligeholdelsesfaktor for de valgte lyskilder, armaturer, overfladereflektanser, omgivelser og den fastlagte vedligeholdelsesplan. For dagslysberegninger bør lysstrømsnedgangen som følge af tilsmudsning af vinduer tages i betragtning.

Designeren skal:

- Angive vedligeholdelsesfaktoren og opliste alle forudsætninger, der er anvendt til bestemmelse af værdien
- Specificere belysningsudstyr, der er egnet til omgivelserne og
- Udarbejde en omfattende vedligeholdelsesplan, der skal indeholde hyppigheden af lyskildeudskiftning, rengøringsinterval for armaturer, rum og glas samt rengøringsmetode.

Vedligeholdelsesfaktoren har stor betydning for energieffektiviteten. Forudsætningerne, der anvendes til bestemmelse af vedligeholdelsesfaktoren, skal optimeres på en måde, som medfører en høj værdi. CIE97-2005 indeholder en vejledning vedrørende bestemmelse af vedligeholdelsesfaktoren for kunstig belysning.

4.11 Krav til energieffektivitet

DS/EN12464 anfører følgende forhold omkring energieffektivitet:

- Belysning bør projekteres, således at belysningskravene til en bestemt opgave eller et bestemt område overholdes på en energieffektiv måde. Det er vigtigt ikke at gå på kompromi med de visuelle aspekter ved et belysningsanlæg blot ved at reducere energiforbruget. De belysningsniveauer, der er fastlagt i denne europæiske standard, er mindsteværdier for middelbelysningsstyrker, som skal fastholdes i hele driftsperioden.
- Der kan opnås energibesparelser ved at udnytte dagslyset, tage rummets brug i betragtning, forbedre vedligeholdelsesegenskaberne ved anlægget og gøre brug af lysstyring.
- Mængden af dagslys varierer i løbet af dagen afhængig af vejrforholdene. Desuden aftager dagslysindfaldet hurtigt i rum med sidevinduer, jo større afstanden fra vinduet er. Det kan være nødvendigt med supplerende belysning for at sikre, at de påkrævede belysningsniveauer ved arbejdspladsen opnås, og for at skabe en jævn luminansfordeling i rummet. Automatisk eller manuel tænding og/eller lysdæmpning kan anvendes for at sikre en passende kombination af kunstig belysning og dagslys.
- EN15193 indeholder en procedure til at estimere et belysningsanlægs energiforbrug. Den angiver en metodik til beregning af belysningsenergiindeks (LENI-tallet), der er udtryk for energiforbruget til belysning i bygninger. For enkeltrum kan dette indeks kun anvendes til sammenligninger, da benchmarkværdierne i EN15193 gælder for hele bygninger

4.12 Yderligere fordele ved dagslys

Dagslys kan levere hele eller en del af den nødvendige belysning og åbner derfor mulighed for energibesparelser. Hertil kommer, at dagslyset over tid varierer i styrke, retning og spektral sammensætning og skaber forskellige formtegnings- og luminansmønstre, som opfattes gavnlige for personer i indendørs arbejdsmiljøer. Vinduer er klart at foretrække på arbejdspladser på grund af dagslysindfaldet og den visuelle kontakt med omverdenen. Dog er det vigtigt at sikre, at vinduerne ikke giver anledning til visuelle gener, dårlig varmekomfort eller virker forstyrrende på medarbejdernes privatsfære.

4.13 Lysets foranderlighed

Lys er vigtigt for menneskers helbred og velbefindende. Lys påvirker menneskers humør, følelser, og den mentale oplagthed. Lys kan også understøtte og justere døgnrytmen og påvirke menneskers fysiologiske og psykologiske tilstand. Ny forskning indikerer, at disse fænomener – i tillæg til de designkriterier, der er defineret i 12464-1 – kan tilvejebringes gennem såkaldt ikke-billeddannende belysning og lysfarve. En tidsmæssig variation af lysforholdene i form af højere belysningsstyrker, luminansfordelinger og større variation i farvetemperatur, end det er defineret i denne europæiske standard, og ved hjælp af dagslys og/eller specialiseret kunstlys kan stimulere mennesker og deres velbefindende. Anbefalingsværdierne for variationsbåndene er under overvejelse.

5. Oversigt over belysningskrav

5.1 Tabellernes opbygning

Kolonne 1: referencenummer for hvert indendørsområde, opgave eller aktivitet

Kolonne2: områder, opgaver eller aktiviteter med særlige krav

Kolonne3: driftsbelysningsstyrke \bar{E}_m

Kolonne4: maksimale UGR-værdier

Kolonne5: mindsteværdi for belysningsstyrkens regelmæssighed U_0

Kolonne6: mindsteværdi for farvegengivelsesindekset R_a for de situationer der er anført i kolonne2

Kolonne7: særlige krav til de situationer, der er oplyst i kolonne2

5.2 Oversigt over indendørsområder, opgaver og aktiviteter

Tabel 5.1: Færdselsområder i bygninger

Tabel 5.2 - 5.5: Almenområder i bygninger

Tabel 5.6 - 5.25: Industri- og håndværksområder

Tabel 5.26: Butikker

Tabel 5.27: Kontorer

Tabel 5.28 - 5.34: Offentlige områder

Tabel 5.35 - 5.36: Uddannelseslokaler

Tabel 5.37 - 5.51: Sundhedssektoren

Tabel 5.52: Transportområder – Lufthavne

Tabel 5.53: Transportområder – Jernbaneanlæg

5.3 Belysningskrav til indendørsområder, opgaver og aktiviteter

EN12464 skærper i en række indendørsområder de krav belysningsstyrke og blændingstal dansk belysningsstandard DS700 stillede.

Dels for at imødegå dansk belysningstradition, hvor supplerende arbejdspladsbelysning har været måden at sikre tilstrækkelig belysning til synsopgaven, og samtidig give en inspirerende luminansfordeling mellem arbejdsfelt, omgivende felt og baggrundsområde, dels for at imødegå BR15' skærpede krav til bygningers energiramme, har Danmark udarbejdet et dansk Nationalt Anneks (DS/EN12464-1 DK NA).

Oversigt over nationale valg

Nedenstående oversigt viser de steder, hvor der er truffet nationale valg, der afviger fra DS/EN 12464-1.

Punkt	Emne	Nationalt valg
4.3.3	Belysningsstyrker på arbejdsfeltet	Nationalt valg
5.3	Belysningskrav til indendørs områder, opgaver og aktiviteter	
5.3 tabel 5.3	Tabel 5.3 – Almenområder i bygninger – Kontrolrum	Nationalt valg
5.3 tabel 5.26	Tabel 5.26 – Kontorer	Nationalt valg
5.3 tabel 5.27	Tabel 5.27 – Butikker	Nationalt valg
5.3 tabel 5.29	Tabel 5.29 – Offentlige områder – Restauranter og hoteller	Nationalt valg
5.3 tabel 5.31	Tabel 5.31 – Offentlige områder – Messer, udstillingssteder	Nationalt valg
5.3 tabel 5.33	Tabel 5.33 – Offentlige områder – Biblioteker	Nationalt valg
5.3 tabel 5.36	Tabel 5.36 – Uddannelseslokaler – Uddannelsesbygninger	Nationalt valg

Nedenfor sammenholdes DK NA med DS/EN12464-1:2015

4.3.3 Arbejdsfeltets belysning

DK NA erstatter teksten i DS/EN12464:

”For arbejdspladser, hvor arbejdsfeltets størrelse og/eller placering er ukendt:

- Opfattes enten hele feltet som arbejdsfelt eller
- Hele feltet er regelmæssigt ($U_0 \geq 0,40$) belyst på et belysningsniveau angivet af designeren; hvis arbejdsfeltet bliver kendt, skal belysningsprojekteringen ændres for at sikre de påkrævede belysningsstyrker.

Hvis arbejdsopgavens art ikke er kendt, må designeren opstille nogle forudsætninger om de sandsynlige opgaver og angive opgavekravene”

med teksten:

”For arbejdspladser, hvor arbejdsfeltets størrelse og/eller placering er ukendt gælder en af følgende muligheder:

- *Alternativ A: Belysningen projekteres under forudsætning af, at hele feltet kan betragtes som arbejdsfelt, og der etableres lysstyring, der sikrer, at det efterfølgende er muligt at dæmpe belysningen til det krævede niveau for det omgivende felt.*
- *Alternativ B: Området projekteres med en belysning i overensstemmelse med krav til arbejdspladsens omgivende felt i kapitel 5 og 4.3.4. tabel 1, og bygherre gøres bekendt med, at der skal etableres supplerende arbejdspladsbelysning ved de enkelte arbejdspladser.*
- *Alternativ C: Hele feltet belyses er regelmæssigt ($U_0 \geq 0,40$) med et belysningsniveau angivet af designeren. Hvis arbejdsfeltet bliver kendt, skal belysningsprojekteringen ændres for at sikre de pågældende belysningsstyrker.*
- *Alternativ D: Hvis arbejdsopgavens art ikke er kendt, må lysdesigneren opstille nogle forudsætninger om de sandsynlige opgaver og angive opgavekravene ud fra anvisningerne i kapitel 4 og 5.”*

5.3 Belysningskrav til indendørsområder, opgaver og aktiviteter

De områder, opgaver eller aktiviteter hvor dansk nationalt annekts DK NA anfører andre krav end DS/EN12464 anføres nedenfor. For øvrige områder, opgaver og aktiviteter henvises til DS/EN12464-1:2015, dog angives samlede krav vedr. kontorområder, opgaver og aktiviteter.

Værdier og tekst med ***blå kursiv*** og ***fed*** skrift angiver krav iht. DK NA

Områder, opgaver eller aktiviteter hvor DK NA anfører andre krav end DS/EN12464

Ref.nr.	Type område, opgaver eller aktiviteter	$\bar{E}_m [Lx]$	UGR_L	U_0	R_a	Specifikke krav
NA 5.3.2	Telex, postrum, omstilling	200	19	0,60	80	
DS/EN 5.3.2	Telex, postrum, omstilling	500	19	0,60	80	
NA 5.26.1	Arkivering, kopiering mv.	200	19	0,60	80	
DS/EN 5.26.1	Arkivering, kopiering mv.	300	19	0,40	80	
NA 5.26.5	Konference- og mødelokaler	200	19	0,60	80	Belysningen bør kunne reguleres
DS/EN 5.26.5	Konference- og mødelokaler	500	19	0,60	80	Belysningen bør kunne reguleres
NA 5.27.1	Salgsområde	Valgfrit	Valgfrit	Valgfrit	80	Belysningsstyrken og jævnhed afhænger af vareart og butikens størrelse. Vejledende kan være de belysningsstyrker, der er anført under kontrolfunktionen ved fremstilling af den pågældende vare
DS/EN 5.27.1	Salgsområde	300	22	0,40	80	
NA 5.29.6	Konferencerum	200	19	0,60	80	Belysningen bør kunne reguleres
DS/EN 5.29.6	Konferencerum	500	19	0,60	80	Belysningen bør kunne reguleres
NA 5.31.1	Almen belysning	200	22	0,40	80	
DS/EN 5.31.1	Almen belysning	300	22	0,40	80	
NA 5.33.2	Læseområde	200	19	0,70	80	
DS/EN 5.33.2	Læseområde	500	19	0,60	80	
NA 5.36.2	Klasselokaler til aften- eller voksenundervisning	300	19	0,60	80	Belysningen bør kunne reguleres op til 500lx
DS/EN 5.36.2	Klasselokaler til aften- eller voksenundervisning	500	19	0,60	80	Belysningen bør kunne reguleres
NA 5.36.3	Auditorier, foredrags- og forelæsningsale	200	19	0,70	80	Belysningen bør kunne reguleres for at imødekomme forskellige A/V-behov. Foredragsholderen skal belyses med tilstrækkelig vertikal belysningsstyrke
DS/EN 5.36.3	Auditorier, foredrags- og forelæsningsale	500	19	0,60	80	Belysningen bør kunne reguleres for at imødekomme forskellige A/V-behov.
NA 5.36.22	Biblioteker: læseområder	200	19	0,70	80	
DS/EN 5.36.22	Biblioteker: læseområder	500	19	0,60	80	

Belysningskrav for kontorer

DS/EN12464 Tabel 5.26 med tilføjelse af DK NA krav

Ref.nr.	Type område, opgaver eller aktiviteter	$\bar{E}_m [lx]$	UGR_L	U_0	R_a	Specifikke krav
NA 5.26.1	Arkivering, kopiering mv.	200	19	0,40	80	
DS/EN 5.26.1	Arkivering, kopiering mv.	300	19	0,40	80	
DS/EN 5.26.2	Skrivning, tastning, læsning databehandling	500	19	0,60	80	Skærmarbejde, se 4.9
DS/EN 5.26.3	Teknisk tegning	750	19	0,70	80	
DS/EN 5.26.4	CAD-arbejdspladser	500	19	0,60	80	Skærmarbejde, se 4.9
NA 5.26.5	Konference- og mødelokaler	200	19	0,60	80	Belysningen bør kunne reguleres
DS/EN 5.26.5	Konference- og mødelokaler	500	19	0,60	80	Belysningen bør kunne reguleres
DS/EN 5.26.6	Receptionsområde	300	22	0,60	80	
DS/EN 5.26.7	Arkiver	200	25	0,40	80	

11.11. APPENDIX B

Funktionsafprøvning – BR15 (2017)

Trafik-, Bygnings- og Boligstyrelsen indførte d. 1. juli 2017 krav i bygningsreglementet (BR15) om funktions-afprøvning af bygningsinstallationer, herunder krav om funktionsafprøvning af belysningsanlæg.

Baggrunden for kravet er, 'at nybyggerier og større renoveringer ofte bliver afleveret med alvorlige fejl i de tekniske installationer. Dette kan føre til forringet indeklima og et energiforbrug der ligger væsentlige højere end forventet. Funktionsafprøvningen skal eftervise, om de antagelser, der blev anvendt ved pro-jekteringen af byggeriet og er anvendt i byggeansøgningen som grundlag for byggetilladelsen, er overholdt'. Dokumentation af resultatet af funktionsafprøvningen skal indsendes til kommunen, og opfyldelse af krav-ene er en forudsætning for at bygningen må tages i brug.

Kravet om funktionsafprøvning gælder ikke kun nybyggeri. Udføres ændringer, der er omfattet af bygge-reglementets bestemmelser, stilles krav om funktionsafprøvning. I 'Vejledning om funktionsafprøvning' udsendt af Trafik-, Bygnings- og Boligstyrelsen d. 23. juni 2017, gives en detaljeret gennemgang af hvordan det dokumenteres, at et belysningsanlæg overholder bygningsreglementets krav til:

- Belysningstyrke samt at
- Dagslysstyring, bevægelsesmeldere og zoneopdeling fungerer efter hensigten.

Relevante standarder og anvisninger i forbindelse med funktionsafprøvningen omfatter:

- DS/EN12464-1:2015
- DS/EN12464-1 DK NA:2015
- DS/EN12665 Lys og belysning – Grundlæggende begreber og kriterier til beskrivelse af krav til belysning
- SBI-anvisning 220, Lysstyring
- At-vejledning A.1.5-1, Vejledning om kunstig belysning på faste arbejdssteder (opdateret december 2016)

Vejledning om funktionsafprøvning

Belysningsstyrke

Formål med funktionsafprøvning af belysningsstyrke

Det skal eftervises, at det elektriske belysningsanlæg opfylder byggereglementets krav for belysningsstyrke, jf. DS/EN12464-1, *Lys og Belysning – Belysning ved arbejdspladser – Del 1: Indendørs arbejdspladser*.

For nogle arbejdspladser er kravene til belysningsstyrke yderligere specificeret i det nationale anneks DS/EN12464-1 DK NA.

De tekniske krav til belysningen skal kunne opfyldes i hele anlæggets levetid.

Forudsætninger for udførelse af funktionsafprøvning

Inden funktionsafprøvningen udføres skal følgende være opfyldt:

- Belysningsinstallationen er afsluttet og installeret med de projekterede lyskilder, armaturer og lysstyring. Nye lyskilder skal have overstået indbrændingstid (mindst 100timer).
- Midlertidig arbejdspladsbelysning anvendt under byggeriet skal være nedtaget eller slukket.
- Alle indvendige bygningsdele, f.eks. skillevægge, nedsænkede lofter, indvendige døre, er færdige og overfladerne færdigbehandlede. Der er ikke dagslysindfald under måleperioden fra vinduer, yderdøre med glas, ovenlys eller ovenlyskupler m.m. Målingen kan derfor med fordel udføres om natten.
- Evt. opsatte PC-skærme er slukkede under måling på kontorarbejdspladser og lign.
- For at sikre konstant lysudsendelse fra lyskilderne, bør belysningen være tændt mindst 1 time, før belysningsstyrkemålingerne påbegyndes.

Målepunkter

Som målepunkter udvælges et grid, der dækker mindst 25% repræsentative arbejdspladser (dog mindst svarende til en arbejdsplads) og enkelte typiske målepunkter i områder med normal færdsel, f.eks. gange og trapper. Antallet af målepunkter i et grid kan bestemmes ved brug af tabel A.1 i DS/EN12464-1. Hvis afprøvningen påviser fejl, øges omfanget af repræsentative arbejdspladser til 100%.

Hvis arbejdspladserne endnu ikke er indrettet inden funktionsafprøvningen må der antages arbejdspladszoner m.m. Antagelserne skal beskrives i dokumentationen for funktionsafprøvningen. Måling af belysningsstyrken kan f.eks. foretages med et kalibreret luxmeter og udføres, jf. DS/EN12464-1, kap.6.

Acceptkriterium

Funktionsafprøvningens resultater kan accepteres, hvis det konstateres, at alle målte middelbelysningsstyrker mindst opfylder kravet til belysningsstyrker i DS/EN12464-1 eller DS/EN DK NA.

Der kan accepteres en afvigelse på 10% grundet usikkerhed ved måling af belysningsstyrken.

Dokumentation

Der udarbejdes en funktionsafprøvningsrapport, der beskriver.

- Hvilke forudsætninger og forhold målingen er udført under
- Målepunkter
- Måleapparat der er anvendt samt hvor og hvornår dette sidst blev kalibreret
- De opnåede måleresultater
- Det samlede resultat
- Oplysninger om, hvem der har udført funktionsafprøvning

Styring af elektriske belysningsanlæg

Det er et krav i bygningsreglementet, at arbejdsrum m.v. og fælles adgangsveje skal forsynes med energieffektiv belysning, hvilket blandt andet opnås ved effektiv lysterling. Hvis der ertilstrækkeligt

dagslys skal arbejdsrum m.v. og fælles adgangsveje forsynes med automatisk dagslysstyring. Ligeledes er det et krav, at arbejdsrum og fælles adgangsveje, der kun benyttes lejlighedsvis skal forsynes med bevægelsesmeldere. Endeligt er der krav til, at arbejdsrum m.v. skal opdeles i zoner med højt dagslysniveau eller zoner, der ikke er i brug.

Formålet med afprøvninger er at eftervise, at lysstyringen i praksis mindst svarer til den forudsætning, der blev anvendt i energibehovsberegningen, der dokumenterer bygningens overholdelse af bygningsreglementets krav, jf. kap. 7, energiforbrug.

Definition af lysstyring

Lysstyring omfatter i denne sammenhæng automatisk dagslysstyring, bevægelsesmeldere og zoneopdeling af belyningsanlægget.

Forudsætninger for udførelsen af funktionsafprøvning

Inden funktionsafprøvningen udføres skal følgende være opfyldt:

- Bygningsinstallationen er afsluttet og installeret med de projekterede lyskilder, armaturer og lysstyring.
- Automatiske lysstyringer, f.eks. dagslysstyring og bevægelsesmeldere, er indreguleret og i drift.
- Der er indhentet dokumentation for indregulering af belyningsanlæggets setpunkter, zoneopdeling og evt. beskrivelse af kontinuerlig regulering.
- Hvis der anvendes bevægelsesmeldere, dagslyssensorer eller kombimeldere, er der indhentet dokumentation i form af beskrivelser eller tegninger, der forklarer, hvor disse er placeret og hvilke arealer, de dækker.
- Hvis der anvendes automatisk styret solafskærmning, er der indhentet dokumentation for setpunkter og indreguleringsparametre, f.eks. solintensitet og eventuelt vindfølsomhed.

Målepunkter

Som målepunkter udvælges mindst 25% repræsentative zoner (dog mindst svarende til en arbejdsplads) og enkelte typiske målesteder i områder med normal færdsel, f.eks. gange og trapper. Hvis afprøvningen påviser fejl, øges omfanget af repræsentative zoner til 100%.

Dagslysstyring

Kontrol af dagslysstyringen foregår af flere omgange for at dække perioder med lavt og højt dagslysniveau. Afprøvning ved 'tusmørke' kan eventuelt ske med helt lukkede solafskærmning, gardiner trukket for eller lignende.

Kontrol af lysføler/sensor ved måling af belyningsstyrke, E, i de tilfælde hvor det er relevant:

- Målt E_{min} for lokale/zone svarer til en given indstillingsværdi
- Målt E_{max} for lokale/zone svarer til en given indstillingsværdi

- Almenbelysning tænder automatisk, når belysningsstyrken er under E_{min} for lokale/zone, og der er konstateret persontilstedeværelse, hvis der anvendes bevægelsesmelder
- Reguleringen fungerer, jf. dokumentationen – konstateres f.eks. ved at trække gardiner for eller lukke solafskærmning
- Solafskærmning aktiveres, når belysningsstyrken er over E_{max} for lokale/zone
- Almenbelysning slukker automatisk ved konstateret personfravær efter t_{sluk} minutter for kontorlokale.

Hvis der anvendes styring med kontinuerlig regulering af belysningen, skal det eftervises at styringen fungerer efter hensigten og som beskrevet i dokumentationen.

Hvis der anvendes styring af belysningen efter et målt udendørs lysniveau, skal der foretages parallelle målinger af indendørs og udendørs lysniveau, der efterviser, at styringen fungerer efter hensigten, og som beskrevet i dokumentationen for lysstyringen.

Det afprøves, at belysningen ikke tændes, hvis det udendørs lysniveau er over en indstillet grænseværdi, som er indstillet for zonen i lysstyringssystem. Hvis det udendørs lysniveau er under denne grænseværdi, skal styringen justere belysningsniveauet indenfor.

Bevægelsesmeldere

For bevægelsesmeldere udføres der en manuel afprøvning, der efterviser, at bevægelsesmelderen reagerer effektivt med hensyn til at reducere driftstiden for belysningsanlægget og er i overensstemmelse med forudsætningerne i byggeansøgningen. Følgende afprøves og registreres:

- Lyset tænder umiddelbart, når personen går ind i rummet
- Lyset slukkes efter t_{sluk} minutter
- Målt tidsforsinkelse (holdetid) t_{sluk} svarer til indstillingsværdi
- Sensorplacering og følsomhed er tilstrækkelig til ikke at slukke almenbelysning ved stillesiddende/ arbejdende person.

Zoneopdeling

Der udføres en manuel afprøvning af om zoneopdelingen for belysningsanlægget er udført iht. Byggeandragende. Følgende afprøves og registreres:

- Belysningen dæmpes mest i zoner med meget dagslys og mindre i zoner med mindre dagslys
- Ved maksimal dæmpning opfyldes kravene til belysningsstyrke.

Acceptkriterium

Funktionsafprøvningens resultat for lysstyringen kan accepteres, hvis det konstateres, at den anvendte lysstyring reagerer i fuld overensstemmelse med dokumentationen anvendte til byggeandragende. Afvigelser i forhold til byggeandragender, som ikke medfører et øget elforbrug

til belysningsanlægget, kan dog accepteres så længe minimumsværdier ifølge EN12464 er overholdt.

Dokumentation

Der udarbejdes en funktionsafprøvningsrapport, der beskriver:

- Hvilke forudsætninger og forhold målingen er udført under
- Målepunkter
- Måleapparatur der er anvendt samt hvor og hvornår dette sidst blev kalibreret
- De opnåede måleresultater
- Konklusion af funktionsafprøvning
- Oplysninger om hvem, der har udført funktionsafprøvning.

12. BYGNINGSDYNAMIK

Jørgen Erik Christensen, Lektor

DTU Byg

jec@byg.dtu.dk

Dette kapitel om bygningsdynamik er en generel introduktion for at give en overordnet forståelse af emnet og henvender sig primært til brug for undervisning på ingeniør- og maskinmesteruddannelsen. Færdiguddannede ingeniører eller maskinmestre kan også få inspiration fra materialet.

Ved skrivning af dette kapitel er der lagt vægt på at inkludere relevante figurer og tabeller fra aktuel litteratur. Dette er for at gøre det lettere ved læsning af kapitlet. Kapitlet er primært skrevet som lærebogsmateriale for studerende, som på kort tid skal finde den relevante information.

ELFORSK projektet: Indeklima, Facility Management, Ventilation, Opvarmning, CTS, bygnings-dynamik, nøgletal og energirenovering. Alle afsnit behandler det pågældende emne ud fra relevansen i forhold til ”Energirigtig drift af det rette indeklima i bygninger”. Spørgsmål, kommentarer mv. kan rettes til forfatteren.



ELFORSK

Dette kapitel er udarbejdet som del af projektet **Energirigtigt drift af det rette indeklima i bygninger – ENDRIN** støttet af ELFORSK i periode 2016–2017, projektnummer 348-006 (www.elforsk.dk).

12.1. Indhold

12.1.	Indhold	12-2
12.2.	Læringsmål.....	12-4
12.3.	Nomenklatur og sprogbrug.....	12-5
12.4.	Indledning.....	12-9
	Baggrund for kapitlet	12-9
12.5.	Varmeakkumulering og tidskonstant	12-10
	Varmeakkumulering i Beton	12-10
	Tidskonstant	12-11
12.6.	Analyse af termisk indeklima og energiforbrug.....	12-14
	Lovmæssige krav.....	12-15
	Erhverv ifølge bygningsreglementets bestemmelser.....	12-16
	Krav til indeklima – Indeklimaklasser	12-16
	Beregningsmetoder for termisk indeklima.....	12-17
12.7.	Ventilationens størrelse	12-19
	Myndighedskrav – Arbejdstilsynets anbefalinger.....	12-19
	Atmosfærisk indeklima	12-19
	Termisk indeklima – Grundlæggende beregningsmetoder	12-20
12.8.	Varmebelastninger	12-21
12.9.	Interne varmebelastninger – Udstyr, personer	12-22
	Personer.....	12-22
	Udstyr og Belysning.....	12-22
	Indeklima- og energiberegninger	12-23
12.10.	Eksterne varmebelastninger – Solindfald.....	12-29
	Solstråling.....	12-29
	Ruder	12-32
	Rudetyper	12-34
	Solafskærmning.....	12-41
	Beregning af transmitterede solstråling gennem rude.....	12-54
12.11.	Udetemperatur, Vejrdata, Reference år	12-56
	Udetemperatur	12-56
	Vejrdata, Reference år, DRY Danmark 2013	12-57
12.12.	Varmebalance – Termisk indeklima	12-60

Kravspecifikationer til indeklimaklasser.....	12-63
Temperaturforhold	12-63
12.13. Maksimal timemiddelindetemperatur	12-66
Anvendelse af Maksimal timemiddelindetemperatur	12-67
12.14. Døgnmiddelindetemperatur.....	12-68
Løsning af varmebalanceligningen	12-68
Anvendelse af metode 2 ”Døgnmiddelindetemperatur”	12-74
12.15. Dynamiske simuleringsprogrammer	12-76
Største varme- /kølebelastninger.....	12-76
Perioder for det termiske indeklima	12-77
12.16. Litteratur/referencer	12-79
12.17. Appendiks A – Solstråling	12-81
Solindfald på flader	12-81
Solindfald	12-84
12.18. Appendiks B – Solindfald gennem rude	12-85
Illustration af lineær interpolation.....	12-86
12.19. Appendiks C – Tabeller solstråling, reference dobbeltrude.....	12-87

12.2. Læringsmål

Studerende der læser følgende kapitel skal være i stand til at

- forstå begrebet tidskonstant
- forstå de vigtige parametre for intern varmebelastning
- forstå den eksterne varmebelastning fra solstråling
- forstå varmebalancen for en bygning og hvilke niveauer den kan løses på
- forstå forskellige metoder til at beregne ventilationsluftmængden
- forstå anvendelse af kravspecifikationer til indeklimaklasser
- forstå vejrdata og reference år
- have en overordnet forståelse for dynamiske simuleringsprogrammer

12.3. Nomenklatur og sprogbrug

<u>SYMBOL</u>	<u>ENHED</u>	<u>BESKRIVELSE</u>
A	m^2	Areal af flade
A	m^2	Rummets gulv areal (Dansk Standard, 2007a)
A_{rude}	m^2	Areal af rude
A_{vin}	m^2	Areal af vindue
F_c	–	Afskærmningsfaktor
F_{rude}	–	Korrektionsfaktor for rudeareal i forhold til vinduesareal: $F_{rude} = A_{rude}/A_{vin}$
F_s	–	Skyggefaktoren, den resulterende værdi for skygger for vinduer med indbygning, udhæng, sidefinner
G	W/m^2K	Varmeoverføringskoefficient, varmeovergangstal. (anvendt i Dansk Standard, 2007b). Anvendes i forbindelse med beregning af g-værdi for afskærmning
g	–	g-værdi for rude. Total transmittans af solenergi for ruden. Denne værdi er summen af den direkte transmitterede solstråling og den absorberede stråling i ruden, der tilføres til rummet på den indvendige side af ruden
g_{ref}	–	g-værdi for reference dobbeltrude med en g-værdi på 0,76
g_{rude}	–	g-værdi for aktuel rude der anvendes (SBI-anvisning 264, 2016b)
g_{sys}	–	g-værdi for systemets solenergitransmittans (SBI-anvisning 264, 2016b)
H	W/K	Rummets termiske konduktans
H_L	W/K	Varmekonduktans ved ledning mellem indvendig og til det fri
$H_{L,nabo}$	W/K	Varmekonduktans ved ledning mellem indvendig og til naborum
H_{inf}	W/K	Infiltrationsluftens kapacitetsstrøm
H_{luft}	W/K	Lufts kapacitetsstrøm (generel beskrivelse)
$H_{luft,nabo}$	W/K	Luftudvekling med naborum, naborummets kapacitetsstrøm
$H_{natkøl}$	W/K	Nattekølingens kapacitetsstrøm (benyttes til køling med natteudeluft)
H_{vent}	W/K	Ventilationsluftens kapacitetsstrøm
h	W/m^2K	Varmeoverføringskoefficient, varmeovergangstal
h_{inf}	h	Antal timer i døgnet med infiltration (normalt 24 timer, døgnet)
$h_{natkøl}$	h	Antal timer i døgnet med køling med natteudeluft
h_{vent}	h	Antal timer i døgnet, hvor ventilation kører
$I_{t,dif}$	W/m^2	Transmitteret diffus himmelstråling fra sol gennem rude
$I_{t,dir}$	W/m^2	Transmitteret direkte solstråling gennem rude
I_{tot}	W/m^2	Total solstråling per m^2
$I_{tot,t}$	W/m^2	Total transmitterede solstråling per m^2

LT	–	Lys transmittans, Dagslys transmittans (gennem rude)
n	h^{-1}	Luftskifte per time
n_p	<i>personer</i>	Planlagt værdi for antal personer i rummet (Dansk Standard, 2007a)
Q	J, Wh	Energi
Q_{int}	J, Wh	Energitilskud fra internt varmetilskud
Q_{sol}	J, Wh	Energitilskud fra solindfald
q_B	$l/(s, m^2)$	Ventilationsluftmængde for emissioner fra bygning (Dansk Standard, 2007a)
q_p	$l/(s, person)$	Ventilationsluftmængde til forbrug pr. person (Dansk Standard, 2007a)
q_{tot}	l/s	Rummets samlede ventilationsluftmængde (Dansk Standard, 2007a)
q_v	$l/s, (m^3/s)$	Volumenstrøm, strømningens flow
$q_{v(h)}$	m^3/h	Volumenstrøm, strømningens flow
S	J/K	Rummets varmekapacitet
U	W/m^2K	Varmetransmissionskoefficient, U-værdi
U_g	W/m^2K	Termisk transmissionskoefficient (U-værdi) af ruden
V	m^3	Volumen
Græske bogstaver		
α	–	Absorptans (gennem rude)
$\alpha_{e,B}$	–	Absorptans for direkte sol for afskærmning. Anvendes i forbindelse med beregning af g-værdi for afskærmning
γ_{OH}	<i>grader (vinkel)</i>	Vandret udhæng: Vinkel i grader fra midten af vinduet til forkanten af udhænget
γ_{SF}	<i>grader (vinkel)</i>	Sidefremspring: Vinkel i grader fra midten af vinduet til forkanten af fremspringet
θ	$^{\circ}C$	Temperatur
$\bar{\theta}$	$^{\circ}C$	Døgnmiddeltemperatur (streg over betyder det er middelværdien)
θ_e	$^{\circ}C$	Udetemperatur
θ_i	$^{\circ}C$	Indetemperatur
θ_{ind}	$^{\circ}C$	Temperatur indstrømning/indblæsning
θ_{nabo}	$^{\circ}C$	Temperatur i naborum
$\theta_{natkøl}$	$^{\circ}C$	Temperatur af natteudeluft ved køling med natteudeluft
θ_{rum}	$^{\circ}C$	Rumtemperatur
θ_{ud}	$^{\circ}C$	Temperatur udstrømning/udsugning
θ_{vent}	$^{\circ}C$	Ventilationsluftens indblæsningstemperatur

$\Delta\theta_u$	$^{\circ}\text{C}$	Amplitude for udelufttemperatur
ρ	–	Reflektans, Reflektans (gennem rude)
$\rho_{e,B}$	–	Reflektans af direkte sol for afskærmning. Anvendes i forbindelse med beregning af g-værdi for afskærmning
τ	–	Lys transmittans, Dagslys transmittans (gennem rude)
$\tau_{e,B}$	–	Transmittans af direkte sol for afskærmning. Anvendes i forbindelse med beregning af g-værdi for afskærmning
τ	s	Tid i sekunder
τ_h	s	Tid i timer
τ_h	–	Klokkeslæt (klokken 1 til 24), ved beregning af temperatursvingning
$\tau_{h,max}$	–	Klokkeslæt hvor maksimum indtræder (klokken 1 til 24)
τ_0	s	Tidskonstant
$\Delta\tau$	s	Længde af tidsperiode i sekunder
$\Delta_h\tau$	s	Længde af tidsperiode i timer
Φ	W	Effekt
Φ_{sol}	W	Solindfald gennem vinduets glasareal
$\bar{\Phi}$	W	Gennemsnitlig effekt over døgnet (streg over = middelværdien)
Indices		
"0" 0		Refererer til starttidspunktet "0", f.eks. effekten Φ_0 til tiden 0
1, 2		Nummer på flade
B		Indeks for afskærmning (b for blind). Anvendes i forbindelse med beregning af g-værdi for afskærmning
<i>bortledt</i>		Bortledt effekt/energi
e		Ude (exterior), ydre
e		Energi. Anvendes i forbindelse med beregning af g-værdi for afskærmning
g		Glas, benyttes ved U-værdi for rude (se også indices "rude")
h		Time (engelsk: hour)
i		Inde
<i>inf</i>		Infiltration
<i>int</i>		Intern (varmelast)
L		Ledning ved transmission til udvendig
L_{nabo}		Ledning ved transmission til naborum
<i>luft</i>		Luft
<i>nabo</i>		Naborum

<i>natkøl</i>		Nattekøling ved at benytte kølig natteudeluft
<i>OH</i>		Vandret udhæng (engelsk: overhang)
<i>p</i>		Personer
<i>ref</i>		Reference, reference dobbeltrude med en g-værdi på 0,76
<i>rude</i>		Rude, aktuel rude der benyttes (SBI-anvisning 264, 2016b)
<i>SF</i>		Sidefremspring
<i>sol</i>		Sol
<i>sys</i>		System, rude/system (rude + afskærmning)
<i>t</i>		Transmitteret solstråling
<i>tilført</i>		Tilført effekt/energi
<i>tot</i>		Total
<i>vent</i>		Ventilation
<i>vin</i>		Vindue

12.4. Indledning

Baggrund for kapitlet

En central komponent i bygningsdynamikken er bygningens varmebalance og de indgående parametre. En vigtig faktor er solfaldet, der er den mest komplekse størrelse og har en afgørende betydning for at opnå et tilfredsstillende termisk indeklima. Solindfald gennem ruder med tilhørende solafskærmning er derfor beskrevet detaljeret.

Bygningens varmebalance kan foregå på mange niveauer fra de meget detaljerede beregningsmodeller i form af dynamiske simuleringsprogrammer med et eller mange tidsskridt pr. time til de enkle metoder med beregning af time- eller døgnmiddeltemperatur. Anvendelse af dynamiske simuleringsprogrammer er beskrevet andre steder, og vil ikke blive beskrevet i detaljer. Der er imidlertid inden for de sidste par år kommet to vigtige nye publikationer, som læseren kan have glæde af: (Branchevejledning for indeklimategninger, 2017) og (Branchevejledning for energiberegninger, 2014).

I dette kapitel vil varmebalancen for beregning af time- eller døgnmiddeltemperatur blive behandlet indgående, da de benyttes i mange mere forenklede byggerier til beregning af det dimensionerende kølebehov med tilhørende nødvendig luftmængde. Her kan anføres, at (Branchevejledning for indeklimategninger, 2017) har beskrevet mange væsentlige parametre, som bidrager til vigtige indgangsdata til beregning af døgnmiddelindetemperaturen. Herudover skal opmærksomheden henledes på, at beregning af det dimensionerende kølebehov ved brug af døgnmiddelindetemperatur metoden, kan være en god kontrol til at vurdere resultaterne fra de langt mere komplekse dynamiske simuleringsprogrammer.

Dette kapitel om bygningsdynamik fokuserer primært på det termiske indeklima med fokus på temperatur. Normalt vil omtale af termisk indeklima inkludere indflydelse på en persons varmebalance, og i denne indgår både temperatur og luftfugtighed. I denne beskrivelse vil der ikke blive set på lufthastigheder og trækgener, idet der henvises til KAPITEL 1, Indeklima, og dette gælder også en nærmere beskrivelse af parametrene for lufttemperatur, operativ temperatur, strålingstemperatur, strålingstemperatursymmetri og tilknyttede parametre. Det samme gælder for atmosfærisk indeklima, visuelt indeklima og akustisk indeklima, der ikke vil blive behandlet i dette kapitel.

De krav, der bliver stillet op henfører primært til den operative temperatur.

12.5. Varmeakkumulering og tidskonstant

Varmeakkumulering i Beton

Generelt er det en fordel at undgå for store temperaturudsving, da det giver anledning til meget høje eller lave temperaturer. Rent komfortmæssigt er det en fordel, at temperaturudsvingene i løbet af en dag begrænses så meget som muligt. Et vigtigt element i denne sammenhæng er den termiske masse, der er i tunge konstruktioner i byggeriet, da de er med til at reducere variationerne i rumtemperaturer. På denne måde skabes et termisk indeklima med mindre temperaturvariationer, og det er med til at reducere spidsværdierne for specielt køling og opvarmning.

For at vurdere varmekapaciteten er det muligt at beregne den varmemængde, som i løbet af et halvt døgn bevæger sig ind i den varmeregerede konstruktion og lagres i materialet, og denne varmemængde betegnes **varmeakkumuleringsevnen**.

Et af de vigtigste materialer i dansk byggeri er anvendelsen af beton, der samtidig er et materiale med en høj densitet og en god varmeakkumuleringsevne. Der kan generelt siges, at varmeakkumuleringsevnen forøges ved stigende densitet. Ifølge (Olsen et al., 2007) er varmeakkumuleringsevnen stigende de første 5 cm ind i konstruktionen og er tilnærmet proportionalt med tykkelsen. Ved en yderligere forøgelse fra 5 til 10 cm af tykkelsen reduceres effekten til en mindre stigning, og derfor har det ikke så stor en akkumuleringsevne. I praksis vil der på grund af varmemodstand ved materialets overflade og varmemodstand i selve materialet kun være en del af varmekapaciteten, der udnyttes i en konstruktion. Den del af materialets varmekapacitet, der er i stand til at fungere som varmeakkumulering, betegnes **den aktive varmekapacitet**.

I forbindelse med evnen til at udnytte varmekapacitet er adgangen til bygningens varmeakkumulerende lag af stor betydning, og kommer til udtryk i form af størrelse af overfladeareal af det varmeakkumulerende lag – jo større overfladeareal jo bedre varmeakkumulering.

En anden faktor for udnyttelse af varmekapacitet er en let adgang ind til det varmeregerende lag i form af lave overgangsisolanser og isolanser indtil laget. Det er derfor et vigtigt punkt at reducere omfanget af isolerende lag foran de akkumulerende overflader. Dette kan f.eks. være nedhængte lofter, der er næsten helt lufttætte, og dermed ikke giver mulighed for luftcirkulation mellem rummet og over det nedhængte loft. Anvendelse af gulvbelægning har også stor betydning, og en belægning med en mindre varmemodstand giver den bedste udnyttelse af varmeakkumuleringen.

Ifølge (Olsen et al., 2007) kan påvirkningen fra den eksterne varmebelastning fra solindfald med fordel reduceres ved, at solpåvirkningen rammer de akkumulerende overflader direkte, da dette giver en mindre varmeovergangsmodstand ved transmission af energi til det varmeakkumulerende materiale. Dermed opnås en bedre varmeakkumulering.

Der kan opnås en god besparelse på energibehovet ved benyttelse af bygninger med stor termisk masse. Der kan opnås en reduktion i energibehovet ifølge (Olsen et al., 2007) på mellem 4 % og 13 % ved anvendelse af den mindste og største varmekapacitet for en kontorbygning.

En stor varmeakkumulerende masse i en bygning er med til at reducere overskudsvarmen i løbet af en dag, da denne akkumuleres i konstruktionerne, og dermed reducerer ulemperne med overtemperaturer. For en given bygning har den akkumulerende masse således stor betydning for, hvor stor temperaturudsvinget vil være i løbet af en dag. For tunge bygninger med en stor anvendelse af beton vil der være en stor akkumulerende masse, der vil bidrage til at dæmpe temperatursvingningerne. Dette er et nøglepunkt, eftersom et behageligt termisk indeklima opnås ved at reducere temperatursvingene, som er et af klagepunkterne. Dynamiske simuleringer er velegnede til at foretage vurderinger af temperaturudsvingene.

Dette er faktorer, som er vanskelige at vurdere ved anvendelse af Døgnmiddelindetemperatur metoden, og ikke kan vurderes ved brug af Maksimal timemiddelindetemperatur metoden.

Lette bygninger giver anledning til store temperatursvingninger, da der ikke er nogen nævneværdig akkumulerende masse, og det er derfor af stor betydning at undgå stort solindfald ind i lokalerne samt at undgå stor intern varmeudvikling.

En stor udnyttelse af den termiske masse i et byggeri resulterer i mindre anlæg og et lavere dimensionerende luftskifte for ventilation. Jo større temperaturvariation, der kan accepteres, jo mindre anlæg og lavere energiforbrug kan der opnås. Specielt kan opmærksomheden henledes på udnyttelse af ventilationsanlægget til nattekøling, hvor den lave udetemperatur kan benyttes til at blæse ind i bygningen og dermed fjerne den akkumulerede varme fra bygningen. Den største virkning opnås ved at køle bygningen ned så lavt som det kan accepteres, f. eks. 22 °C. Morgen minimums temperatur, som kan accepteres, afhænger i høj grad af brugerne af bygningen og deres forståelse for, hvordan bygningen fungerer og deres holdning til begrænsning af det globale energiforbrug og udledning af CO₂.

Tidskonstant

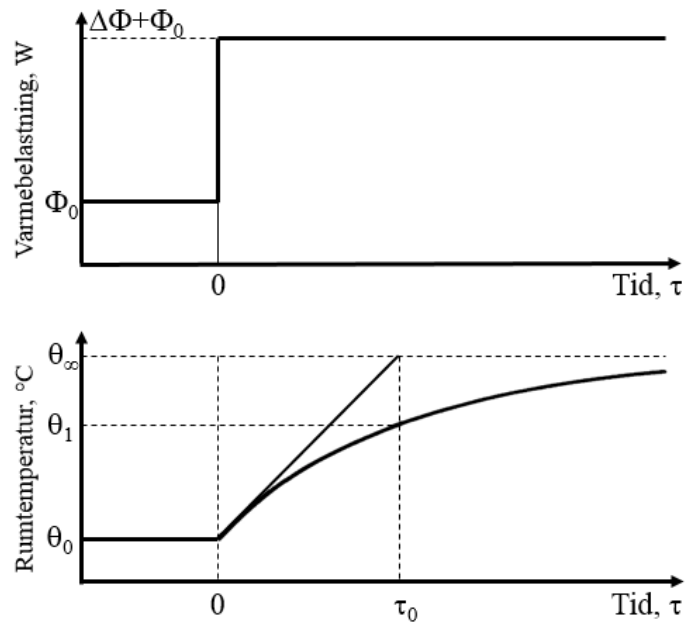
Et af de begreber, der ofte bliver benyttet i forbindelse med varmebalanceberegninger, er ”tidskonstanten”, τ_0 . For at forklare begrebet lidt nærmere i relation til rums bygningsdynamik betragtes et rum med rumtemperaturen θ_0 hvor varmebelastningerne efter at have været konstant Φ_0 i lang tid, pludselig ændres med $\Delta\Phi$ jf. Figur 12-1.

Det første stykke tid vil temperaturændringen pr. tidsenhed være forholdsvis stor, og overfladetemperaturen stiger sammen med lufttemperaturen. Efterhånden som temperaturen stiger, vil varmetabet stige, og temperaturstigningen bliver langsommere. Den endelige temperatur nås først efter meget lang tid, men det væsentlige er, at størrelsen af den endelige ændring kun er afhængig af belastningsændringen og den termiske konduktans.

Inden belastningsændringen giver varmebalancen under stationære forhold:

$$\Phi_0 = H \cdot (\theta_{i,0} - \theta_e)$$

Ligning 12-1



Figur 12-1 Temperaturforløbet i et rum

Til tiden $\tau = 0$ forøges belastningen øjeblikkeligt med $\Delta\Phi$, hvorved rumtemperaturen begynder at ændre sig $d\theta/d\tau$:

$$\Phi_0 + \Delta\Phi = H \cdot (\theta - \theta_e) + S \cdot \frac{d\theta}{d\tau} \quad \text{Ligning 12-2}$$

hvor S er rummets varmekapacitet.

Indsættes (Ligning 12-1) i (Ligning 12-2) fås

$$\Delta\Phi = H \cdot (\theta - \theta_{i,0}) + S \cdot \frac{d\theta}{d\tau} \quad \text{Ligning 12-3}$$

Løses ligningen ved indsættelse af begyndelsesbetingelserne $\theta = \theta_{i,0}$ for $\tau = 0$ fås:

$$\theta = \theta_{i,0} + \frac{\Delta\Phi}{H} \cdot (1 - e^{-\frac{H}{S}\tau}) \quad \text{Ligning 12-4}$$

Efter uendelig lang tid $\tau = \infty$ vil parentesens i (Ligning 12-4) blive 1, og den nye stationære værdi for rumtemperaturen blive:

$$\theta_{\infty} = \theta_{i,0} + \frac{\Delta\Phi}{H} \quad \text{Ligning 12-5}$$

Tangenten i begyndelsestidspunktet $\tau = 0$ for temperaturkurven skærer sluttemperaturen θ_{∞} efter forløbet af tiden:

$$\tau_0 = \frac{S}{H} \quad \text{Ligning 12-6}$$

Denne størrelse betegnes tidskonstanten. Indsættes τ_0 i (Ligning 12-4) fås:

$$\theta_1 = \theta_{i,0} + \frac{\Delta\Phi}{H} \cdot (1 - e^{-1}) = \theta_{i,0} + 0,63 \cdot \frac{\Delta\Phi}{H} \quad \text{Ligning 12-7}$$

Tidskonstanten kan følgelig defineres som den tid, der går før 63 % af den endelige temperaturændring er opnået.

Afhængigt af bygningskonstruktionen varierer tidskonstanten fra nogle få timer til flere døgn. De termiske belastninger er sjældent konstante i så lang tid, hvorfor der må tages nærmere hensyn til varmetabet og -akkumuleringen, hvis rumtemperaturen skal bestemmes nærmere.

12.6. Analyse af termisk indeklima og energiforbrug

Når en bygning skal analyseres, fokuseres der på to hovedkrav:

- indeklima
- energiforbrug

Der er en tæt kobling mellem energiforbruget og indeklimaet. Et godt indeklima kan kombineres med et lavt energiforbrug, hvis der foretages en indgående kvalificeret analyse med dynamiske simuleringssystemer. Dette kan f.eks. ske ved en simulering af det termiske indeklima for temperaturforholdene, og igennem en optimeringsproces at kunne reducere på anlæggene i bygningen og dermed skabe en reduktion i energiforbruget. Det er derfor i de fleste tilfælde en forudsætning for et lavt energiforbrug i en bygning, at der foretages en grundig analyse af det termiske indeklima.

Inden denne analyse igangsættes bør der imidlertid først fokuseres på en reduktion af de interne varmebelastninger og de eksterne varmebelastninger fra solindfald, da denne energitilførsel i mange tilfælde skal køles eller ventileres væk med dermed øget energiforbrug. Specielt skal opmærksomheden henledes på tidspunkter, hvor de maksimale termiske belastninger forekommer. Hvilke muligheder vil der være for at reducere maksimal belastningen, og hvilke omkostninger vil det eventuelt medføre.

Det er vigtigt at være opmærksom på, at indeklimaet har stor indflydelse på menneskets velvære, og derfor er det vigtigt at fokusere på indeklimaet i højere grad end minimering af energiforbrug, når der skal foretages en samlet optimering af energiforbrug og indeklima. Som tidligere nævnt behøver der ikke være nogen modstrid mellem et godt indeklima og et lavt energiforbrug. Ved valg af indeklima klasse, hvor der stilles krav om et højere luftskifte pr. person, vil det imidlertid være med til at forøge energiforbruget. En indeklima klasse med kategori I med en luftmængde på 10 l/(s·person) i forhold til en kategori II med en luftmængde på 7 l/(s·person) vil give anledning til et større energiforbrug.

For at opnå de bedste forhold er det en fordel, at alle byggeriets interessenter bliver inddraget så tidligt som muligt for at få afklaret alle ønsker, da ændringer i en sen fase normalt vil føre til en fordyrelse af byggeriet. De vigtigste interessenter er følgende:

- bygherre
- brugere
- arkitekt
- rådgivende ingeniør
- udførende part af byggeriet
- evt. fremtidigt driftspersonale

I (Branchevejledning for indeklimatekninger, 2017) er der en grundig gennemgang af optimeringsprocessen, og for nærmere detaljer henvises til denne. I dette kapitel om bygningens dynamik er kun medtaget de vigtigste faktorer for, at læseren af kapitlet får en

introduktion til denne del af emnet. For den professionelle part i byggeriet anbefales det at anvende den ovenstående primære kilde.

Lovmæssige krav

I forbindelse med beregning af det termiske indeklima i bygninger findes en række lovmæssige krav, der skal overholdes og i den forbindelse er følgende love relevante:

- Bygningsreglementet
- Byggelovgivningen
- Arbejdsmiljøloven

Byggeloven og bygningsreglementet har til formål at sikre minimumskvalitet i byggeriet.

Bygningsreglementet

Bygningsreglementet omhandler bestemmelser vedr. nybyggeri, renovering og/eller vedligehold af eksisterende bygninger og stiller krav om indeklima. I bygningsreglementet er der detailkrav til parametre, som kan opfattes som funktionskrav til indeklimaet.

Byggelovgivningen

Ved anvendelse af byggelovgivningen refereres til normer og standarder for projektering, der skal følges, idet der i mange tilfælde kan sondres mellem forskellige indeklima niveauer. Dette giver bygherren mulighed for at vælge hvilket niveau, der foretrækkes for indeklimaet. Til at hjælpe bygherren med det rette valg er der udarbejdet nogle vejledninger, der inden for et givent område for byggeriet anviser god praksis. I denne forbindelse kan som eksempler gives: SBI-anvisninger, BYG-ERFA og InnoBYG branchevejledninger.

Arbejdsmiljøloven

Arbejdstilsynets krav med tilhørende bekendtgørelser og vejledninger gælder eksisterende bygninger. Dette lovkompleks består af arbejds miljølovgivningen suppleret med bekendtgørelser og vejledninger fra arbejdstilsynet. Materialet fra arbejdstilsynet er baseret på det store erfaringsmateriale, som tilsynet har fået igennem mange år, og disse forskellige krav og værdier er ikke altid i overensstemmelse med bygningsreglementets krav med tilhørende referencer til normer og standarder.

Bygningsreglementets forlangender med hensyn til indeklima går altid foran krav fra arbejdstilsynet.

Erhverv ifølge bygningsreglementets bestemmelser

Generelt skelnes der i bygningsreglementet mellem:

- boliger (behandles ikke i dette kapitel)
- erhverv

For at gøre fremstillingen i dette kapitel enklere og give en klarere introduktion til bygningsdynamik er det valgt kun at fokusere på erhverv. Bygningstyper inddelt i bolig og erhverv er vist i Tabel 12-1.

Tabel 12-1 Anvendte bygningstyper inddelt efter bolig og erhverv ifølge bygningsreglementets bestemmelser baseret på (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017) og (SBI-anvisning 264, 2016a)

Bolig	Erhverv (andet)
Fritliggende enfamiliehuse (parcelhuse)	Kontor- og administrationsbygninger
Stuehuse ved landbrugsejendomme	Skoler, undervisnings- og forskningsinstitutioner
Dobbelthuse	Daginstitutioner og skolefritidsordninger
Rækkehuse	Sygehuse
Kædehuse	Idrætsanlæg og klubhuse
Gruppeshuse	Detailhandel, service, butikker, og butikcentre
Tofamiliehuse	Engroshandel og opvarmet lager
Pleje- og døgninstitutioner	Fængsler
Kollegier	Institutioner med tvangsanbringelser
Hotelværelser	Psykiatri
Feriekolonier	Restauranter, biografer, forlystelser, museer, biblioteker, kirker etc.
Vandrehjem	Opvarmede værksteder og laboratorier samt let produktion og montage

Krav til indeklima – Indeklimaklasser

Der stilles større krav til indeklimaet i erhvervsbygninger end i boliger, fordi brugerne ikke har så stor indflydelse på deres aktivitetsniveau, og hvilke lokaler de kan opholde sig samt hvor længe. Herudover kan der være krav til beklædning / dresscode.

Som vist på Tabel 12-1 dækker ordet erhverv over en bred vifte af bygninger, der har forskelligartede krav til indeklimaet, da de har store variationer i arbejdsforholdene.

På denne baggrund er der i (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017) introduceret tre indeklimaklasser for erhvervsbygninger:

- Minimum – større grad af frihed til at tilpasse sig indeklimaet
- Standard
- Ambitiøs – mindre grad af frihed til at tilpasse sig indeklimaet.

De tre indeklimaklasser er udarbejdet med henblik på, i hvor høj grad brugerne er i stand til at tilpasse sig indeklimaet. Relevansen for forskellige indeklimaklasser gælder for rumtyper snarere end for bygningstyper, og anvendelsen af rummene vil være afgørende for, hvilken indeklimaklasse, der skal anvendes. Disse klasser kan for forskellige rum godt variere i en bygning.

Den valgte indeklimaklasse har indflydelse på energiforbruget og prisen på det samlede anlæg, idet en bedre klasse vil give en forøgelse af energiforbruget samt prisen på anlægget.

For hver indeklimaklasse er der opstillet krav for det termiske og atmosfæriske indeklima, samt et krav om maksimalt antal timer for anvendelse af udvendig solafskærmning.

Der godt kan sondres mellem kravene til atmosfærisk indeklima og termisk indeklima, således at de placeres i hver sin indeklimaklasse.

Indeklimaklasse – Minimum

Denne klasse er aktuel for lokaler, hvor en person har stor mulighed for at flytte sig til et andet rum eller kun opholder sig i rummet i kortere perioder. Eksempler på disse kan være gangarealer og tekøkken.

Indeklimaklasse – Standard

Denne klasse anvendes i standard tilfældene og er relevant for kontorer, møderum, klasselokaler, sengestuer, etc.

Indeklimaklasse – Ambitiøs

Det er nødvendigt at anvende en Ambitiøs indeklimaklasse, hvis brugerne har mindre mulighed for at flytte sig til et andet rum eller mindre mulighed for at tilpasse deres tøj til det aktuelle indeklima på grund af dresscode. Ligeledes kan det være aktuelt på hospitaler for intensivstuer/ambulatorier og andre steder, hvor der opholder sig specielt sårbare og sensitive personer. Denne klasse kan også blive aktuel for et firma, som ønsker at lægge stor vægt på et godt indeklima.

Beregningsmetoder for termisk indeklima

Metoder til beregning af det termiske indeklima og energiforbrug kan deles op i to hovedkategorier:

- Stationære forhold
- Ikke-stationære forhold

Stationære forhold

Forholdene kan betragtes som stationære, hvis påvirkningerne på bygningen kun ændrer sig lidt med tiden. Hvor der antages stationære forhold er der ingen ændringer i varmeindholdet i de akkumulerende bygningsdele, og varmebalancen bliver følgelig simpel, svarende til almindelige varmetabsberegninger. I mange tilfælde kan energiforbruget, f.eks. for et hus, beregnes ved brug af en stationær metode.

Der kan som tilnærmelse anvendes stationære metoder til at få en vurdering af de nødvendige ventilationsluftmængder til lokalet og dermed en identifikation af temperaturforholdene.

Følgende to metoder omtales i den sidste del af kapitlet:

- 1) Maksimal timemiddelindetemperatur (Øjebliksværdi) – Afsnit 0
- 2) Døgnmiddelindetemperatur – Afsnit 12.14

Der ses bort fra varmeakkumulering i bygningen, idet varmetab og varmtilskud antages identiske i sluttilstanden.

Ikke-stationære forhold

For ikke-stationære forhold er det nødvendigt at medtage varmeakkumuleringen i bygningskonstruktionerne, og dette medfører at varmebalancen bliver langt mere kompliceret at beregne. Da det ikke er muligt at regne eksakt på disse forhold, gøres der en række tilnærmelser med hensyn til den in-stationære varmeledning gennem bygningskonstruktionerne.

Ved beregning af varmebalancen i et rum under ikke-stationære forhold medtages varmeakkumuleringen i bygningskonstruktionerne. Dette gøres normalt ved at benytte diskrete beregningsmetoder, hvilket betyder at tiden deles op i tidsstep $\Delta\tau$ på maksimalt 1 time. Denne beregning kræver løsning af et ligningssystem, der repræsenterer al varmeudveksling i rummet. Dette betyder én ligning for rumluften og én ligning for hver overflade.

Beregningen af den in-stationære varmeledning deles i følgende to hovedkategorier:

- Differensmetoder
- Responsfaktormetoden

De to metoder til beregning af den in-stationære varmeledning vil ikke blive beskrevet nærmere her. Beregninger på timebasis foretages med brug af dynamiske simuleringsprogrammer – Afsnit 12.15.

12.7. Ventilationens størrelse

Ved analyse af indeklimaet vil der være mange faktorer, der skal tages hensyn til. Det er derfor ikke muligt at anvende standardløsninger i alle tilfælde. Der vil være behov for at tage med i betragtning, hvilke aktiviteter og processer som vil optræde i lokalerne.

I KAPITEL 8 om Ventilation vil der være en mere detaljeret beskrivelse af bestemmelsen af ventilationens størrelse, idet der dog i dette kapitel er fokuseret på størrelsen af ventilation for at opfylde det termiske indeklima.

Når der skal foretages en analyse af et lokale, er det ofte i forbindelse med dimensionering af et ventilationssystem, hvor der er behov for at vurdere ventilationsbehovet i løbet af et døgn. For at opnå en tilfredsstillende ventilation er det nødvendigt at sørge for et acceptabelt indeklima for såvel det atmosfæriske som det termiske indeklima. Ventilationens størrelse er baseret på tre krav:

- Myndighedskrav (minimumskrav)
 - Afhængig af bygningsbrug
- Atmosfærisk indeklima
 - Koncentrationer af fx CO₂, partikler, (fugt) osv.
 - f. eks. DS/EN 15251, kategori II
- Termisk indeklima
 - Ikke for varmt – f. eks max. temp. 26°C

Der dimensioneres efter den største værdi, hvilket i de fleste tilfælde vil være værdien for dimensionering af det termiske indeklima. Der bør altid foretages en kontrolregning for at sikre, at det atmosfæriske indeklima er opfyldt.

I dette kapitel om Bygningdynamik er det punktet ”Termisk indeklima”, der fokuseres på. De to første punkter er beskrevet i KAPITEL 1 om Indeklima og KAPITEL 8 om Ventilation.

Myndighedskrav – Arbejdstilsynets anbefalinger

Byggelovens regler og principper er beskrevet i detaljer i Bygningsreglementet (BR15; <http://bygningreglementet.dk/>). Bygningsreglementet skal bruges i forbindelse med projektering og opførelse af bygninger, se KAPITEL 1 om Indeklima for nærmere omtale.

Arbejdstilsynet anbefaler som en acceptabel komfortværdi for CO₂-koncentrationen en øvre grænse på 1000 ppm (ppm – parts per million, 1000 ppm = 1 promille = 0,1 %) – Der tillades korte perioder med op til 2000 ppm.

Myndighedskrav vil ikke blive omtalt nærmere her.

Atmosfærisk indeklima

Beregning af det atmosfæriske indeklima er beskrevet i KAPITEL 8, Ventilation. Da størrelsen på luftmængden for det atmosfæriske indeklima er meget relevant i forbindelse størrelsen på luftmængden for det termiske indeklima gengives beregningen her.

Samlet ventilationsmængde for et rum beregnes med ifølge (Dansk Standard, 2007 - side 33):

$$q_{tot} = n_p \cdot q_p + A \cdot q_B$$

Ligning 12-8

Den beregnede ventilationsluftmængde består af to dele: (a) ventilation for forurening fra forbrugeren og (b) for forureningen (emission) fra bygningen selv. De relevante parametre er vist i Tabel 12-2.

Tabel 12-2 Grundlæggende krav til ventilation for atmosfærisk indeklime fra forurening fra personer og fra bygnings emissioner. (Dansk Standard, 2007a)

	Anbefalede ventilationsrater			
	For person q_p l/(s·person)	For bygning q_B l/(s·m ²)		
		Meget lavt forurenende	Lavt forurenende	Ikke-lavt forurenende
Kategori I	10	0,5	1	2
Kategori II	7	0,35	0,7	1,4
Kategori III	4	0,3	0,4	0,8

Termisk indeklime – Grundlæggende beregningsmetoder

I de fleste tilfælde bliver det termiske indeklime dimensionsgivende med den største værdi. Der kan anvendes forskellige metoder til at beregne den nødvendige ventilationsluftmængde:

- 1) Maksimal timemiddelindetemperatur (Øjebliksværdi)
- 2) Døgnmiddelindetemperatur
- 3) Beregninger på timebasis med dynamiske simuleringsprogrammer

De tre metoder vil blive gennemgået i dette kapitel, idet der ikke vil blive lagt så meget vægt på metode 3) Beregninger på timebasis med dynamiske simuleringsprogrammer.

De tre metoder beskrives mere i detaljer i:

- Afsnit 12.13 – Maksimal timemiddelindetemperatur – Metode 1
- Afsnit 12.14 – Døgnmiddelindetemperatur – Metode 2
- Afsnit 12.15 – Dynamiske simuleringsprogrammer – Metode 3

12.8. Varmebelastninger

Vurdering af de termiske belastninger har stor betydning for resultatet af varmebalancen, og det er derfor vigtigt at bestemme den så præcist som muligt. Da varmebalance beregningen ofte foregår i en tidlig fase af byggeriet, hvor der kun er begrænset viden om bygningen til rådighed, er den forbundet med en del usikkerhed.

Derfor er det nødvendigt at vurdere belastningerne ud fra et kvalificeret skøn. Dette skøn kan baseres på min/max-værdier for varmebelastningerne, hvorved usikkerhedens indflydelse på beregningen kan vurderes. Hvis varmebelastningerne forøges væsentligt senere i projektet, bør varmebalancen kontrolleres igen.

Energien til rummet fra de termiske varmebelastninger afsættes ved konvektion til luften og ved stråling til overfladerne. Det har betydning at skelne mellem disse to former for varmeoverføring, fordi varmeoverføring til rumluften tidsmæssigt vil give et andet temperaturforløb end varmeoverføring til overfladerne.

Rumluftstemperaturen bliver hurtigt påvirket, når energien transmitteres direkte til rumluften eller ved at ramme lette overflader som f.eks. kontorinventar og derved hurtigt overføres til rumluften. Der vil blive en større temperaturstigning, hvis det meste af energien transmitteres direkte til rumluften i stedet for til de omsluttende overflader. Yderpunkterne er solindfald, som ved stråling kun tilføres overfladerne, og indblæsning af ventilationsluft, der direkte blandes med rumluften.

Hvis energien fra den termiske varmebelastning i stedet rammer varmeakkumulerende overflader vil en del af energien transmitteres ind i bygningskonstruktionen og blive varmeakkumuleret der, og kun en mindre del bliver overført til rumluften. Dette vil have en temperaturstabiliserende virkning, og derfor reducere temperaturudsvingene.

I forhold til de øvrige usikre forudsætninger er det nøjagtigt nok at fordele varmeoverførslen ved konvektion og stråling efter skøn. For de fleste lavtemperatur varmekilder, som f.eks. personer, er det et godt skøn at fordele halvdelen afgivet som konvektionsvarme og den anden halvdel som strålevarme.

I det følgende vil de termiske belastninger blive beskrevet nærmere, idet der skelnes mellem interne og eksterne varmebelastninger.

Interne varmebelastninger:

- Personer
- Belysning
- Elektriske apparater

Eksterne varmebelastninger:

- Solindfald

12.9. Interne varmebelastninger – Udstyr, personer

I forbindelse med beregninger af det termiske indeklima er det af stor betydning at have nogle fornuftige input data. I en tidlig designfase kan det være forbundet med problemer at kende de eksakte forhold for det pågældende byggeri. Det kan derfor være en udfordring at finde passende værdier til anvendelse. Dette har den nye (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017) bidraget til at forenkle. I denne vejledning er der kommet forslag til en række generelle data, der kan anvendes i beregningerne. Dette har den fordel, at de anvendte data til de enkelte beregninger bliver mere standardiserede.

Personer

Varmebelastning fra personer til rummet består af den fri varmeafgivelse, der består af varmetabet ved konvektion og stråling. For lave lufthastigheder er de konvektive og strålingsmæssige varmetab nogenlunde lige store. Den bundne varmeafgivelse i form af fugt vil ikke indgå i varmebalancen, med mindre der forekommer kondens på kolde overflader. Som håndregel benyttes ved varmebalanceberegninger en varmebelastning på 100 W per person og børn sættes til 60 W per person. Tallene i det følgende er primært baseret på (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017).

For at forenkle beregningerne, antages det at personerne har almindeligt kontorarbejde svarende til et aktivitetsniveau svarende til 1,2 met. Denne værdi kan dog også anvendes på skoler. Et aktivitetsniveau på 1,2 met vil for en gennemsnitlig dansk mand resultere i:

- Fri varmeafgivelse: 100 W (denne værdi indgår i varmebalancen)
- Bunden varmeafgivelse (fugt): 43 W (denne værdi indgår ikke i den normale varmebalance; men skal vurderes i forhold til en evt. fugtbalance eller varmegenvinder med fugtgenvinding)

I beregninger sættes alle personer i skoler til at være voksne.

I vuggestuer og børnehaver regnes der med et højere aktivitetsniveau og dette sættes til 1,6 met med en varmeafgivelse på 60 W per barn.

For det atmosfæriske indeklima regnes der med en CO₂ produktion på:

- 1 met svarende til 17 l/h pr. person
- 1,2 met svarende til 20,4 l/h pr. person
- Børn i børnehaver og vuggestuer svarende til 12,2 l/h pr. person

Udstyr og Belysning

Den interne varmebelastning fra belysning afhænger meget af hvilken type belysning, der benyttes. Tidligere blev glødelamper anvendt i stor stil og gav anledning til en stor varmebelastning i relation til det belysningsniveau, der blev opnået. Ved fremkomsten af LED belysning er der fremkommet meget store besparelser på den interne varmebelastning fra belysning.

Belysning bliver normalt dimensioneret til at dække behovet i de mørke timer; men ofte vil lyset også være tændt i de lyse timer, selvom der ikke er behov for det. Når lyset først er blevet tændt, vil det ofte forblive tændt resten af dagen. Det er derfor vigtigt, at der for belysningen er censorer, der registrerer belysningsniveauet i rummet og/eller bevægelsessensorer, således at belysning kan blive slukket, hvis der ikke er behov for det. I mange tilfælde er det tilladeligt ved undersøgelse af det termiske indeklima at regne med en reduktion i belysningseffekten i de lyse timer i forhold til den dimensionerende effekt. Ved anvendelse af dynamiske simuleringsprogrammer vil der være mulighed for at indlægge styringsparametre i beregningerne, således at lyset automatisk bliver slukket. Ved anvendelse af forenkede time- eller døgnmiddel temperatur metoder (metode 1 og 2) må antallet af timer almen belysningen er tændt bero på et skøn. I mange tilfælde udgør belysning en usikkerhedsfaktor i de forenkede metoder, eftersom det er et skøn, hvorvidt belysning er tændt eller slukket.

I Tabel 12-3 er varmeafgivelsen fra udstyr og belysning vist. Denne tabel kan anvendes som inspiration. Et mere detaljeret kendskab til de fremtidige lokaler med deres mere eksakte valg af produkter vil kunne give en mere nøjagtig værdi. I tillæg skal opmærksomheden henledes på, at der vedvarende foregår en videreudvikling af produkter med henblik på en lavere varmeafgivelse. Der kan derfor findes mere præcise værdier ved at søge på nettet eller tage kontakt til aktuelle leverandører.

Effektafgivelsen pr. arbejdsstation bør for den samlede effektafgivelse ikke sættes lavere end 80 W.

*Tabel 12-3 Intern varmebelastning fra udstyr og belysning.
(Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017)*

Apparat	Effekt
Almen belysning, LED	4-6 W/m ²
Almen belysning, lysstofrør	6-8 W/m ²
Arbejdslampe	5-15 W
Beregnings-PC	60-100 W
Bordprinter	20 W
Kopimaskine	250 W
PC-fladskærm, ny	25 W
Printer	100 W
Projektor	250 W
Smartboard	175 W (stand by 10 W)
Standard PC, bærbar/stationær	30 W
Tablet PC/ iPad	10 W

Indeklima- og energiberegninger

Det er vigtigt at være opmærksom på, at der er stor forskel på at lave beregninger af det termiske indeklima og energiforbruget på årsbasis. Ved beregning af det termiske indeklima er det de dimensionerende forudsætninger for det termiske indeklima, der optræder i forbindelse med maksimal belastning. Ved beregning af energiforbrug på årsbasis er det vigtigt at anvende en intern varmebelastning, der kan forventes at afspejle det gennemsnitlige forbrug i løbet af et år. Der er med andre ord tale om to væsentlige forskellige indgangsdata til beregningerne:

- Indeklimaberegninger: anvendelse af dimensionerende maksimale forudsætninger for den maksimale interne varmebelastning
- Energiberegninger: anvendelse af gennemsnitlig forventet belastning på årsbasis

Indeklimaberegninger

I dette kapitel om bygningsdynamik er det de temperaturmæssige forhold for det termiske indeklima, der er i fokus, og det er derfor punkt 1, der fokuseres på i denne beskrivelse. Præcise antagelser om de interne varmebelastninger har betydning i forbindelse med dimensioneringen af bygningens systemer. Det er et ønske at få den bedste beregning af anlæggene, da et overdimensioneret anlæg vil være dyrt i indkøb, og et underdimensioneret anlæg ikke vil være i stand til at opfylde det termiske indeklima. Anlægget skal dimensioneres til at kunne klare den typiske belastning og i tillæg være i stand til at give et godt indeklima i de termiske spidsbelastninger. Anlæg skal ikke kunne klare de ekstreme spidsbelastninger, som kun optræder meget få gange om året.

Energiberegninger

Ved energiberegninger anvendes den gennemsnitlige forventede belastning på årsbasis. Det er vigtigt ikke at benytte belastninger til indeklimaberegninger, da resultatet meget let kan blive et helt urealistisk lavt energiforbrug, som ikke kan opfyldes i praksis. Det er i tillæg nødvendigt at sætte den forventede inde temperatur korrekt, og ikke indsætte en referenceværdi på 20 °C uden en konkret vurdering.

Samtidighed og brugsprofiler

Dette afsnit om ”*Samtidighed og brugsprofiler*” er baseret på (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017) og er relevant, når der foretages beregninger af det termiske indeklima. Her har størrelse, samtidighed og brugerprofil for de interne termiske belastninger stor betydning.

Samtidigheden angives med tre niveauer:

- Høj samtidighed
- Almindelig samtidighed
- Lav samtidighed

I den tidlige fase af projekteringen, hvor detaljerede data ikke er til rådighed, kan disse samtidighedsfaktorer anvendes. I de følgende tabeller gælder, at der er forslag til belastningsprofiler og samtidigheder (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017). For at få en ide om hvor påvirkelig bygningen er over for de forskellige samtidigheder, kan der laves analyser, hvor der anvendes alle tre grader af samtidighed, hvormed der opnås en ide om bygningens robusthed under forskellige forhold.

Der er medtaget fire kombinationer af lokaler:

- Tabel 12-4 – Flerpersonerskontor
- Tabel 12-5 – Enkeltmandskontor
- Tabel 12-6 – Mødelokaler
- Tabel 12-7 – Klasselokaler

Bemærk, at forslagene til belastningsprofiler og samtidigheder ikke inkluderer almen belysning.

Tabellerne i det følgende med Samtidighedsprofiler er vist med både time og klokkeslæt. Hvordan time og klokkeslæt skal sættes i forhold til hverandre er illustreret på Figur 12-2. På tabellerne Tabel 12-4 til Tabel 12-7 er benyttet time 1 gående fra kl. 0 til kl. 1. En anden måde at beskrive sammenhængen kan være at time 0 gående fra kl. 23.30 til 00.30 og time 1 gående fra kl. 00.30 til kl. 1.30. Denne forskel kan være relevant, når der sammenlignes med solindfald, hvor metoden for registrering af solindfald afhænger af den valgte metode.

Flerpersonerskontor

Når flere personer anvender et kontor, vil der ofte være nogle af personerne, der ikke er tilstede i kontoret, og flerpersonerskontor er derfor ikke fuldt belastet. Når det termiske indeklima skal dimensioneres, er det ikke tilstrækkeligt at benytte den gennemsnitlige belastning, som benyttes til energiberegninger. Det er nødvendigt at dimensionere for en større værdi.

for flerpersonerskontor er der lavet følgende forudsætninger:

- Antal arbejdspladser
 - Det antages, at der er 6-10 m² pr. arbejdsplads inkl. gangarealer i lokalet
 - (Dansk Standard, 2007a) benytter 15 m² pr. arbejdsplads for storrumskontorer
 - Indretningsplaner kan også danne grundlag for vurdering af antal arbejdspladser
- Intern varmebelastning per arbejdsplads
 - 1 Person
 - 1-2 skærme
 - 1 PC
 - Evt. 1 arbejdslampe

*Tabel 12-4 Samtidighedsprofil for flerpersonerskontor.
Modificeret fra (Branchevejledning for indeklimategninger, 2017)*

	TIME	1-7	8	9	10-11	12	13-15	16	17	18-24	SUM
	Kl.	0-7	7-8	8-9	9-11	11-12	12-15	15-16	16-17	17-24	
Høj	person	0	0,5	1	1	0,5	1	1	0,5	0	8,5
	udstyr	0	0,5	1	1	1	1	1	0,5	0	9
Almindelig	person	0	0,4	0,8	0,8	0,4	0,8	0,8	0,4	0	6,8
	udstyr	0	0,4	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,4	0	7,2
Lav	person	0	0,35	0,7	0,7	0,35	0,7	0,7	0,35	0	5,95
	udstyr	0	0,35	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,35	0	6,3

Enkeltmandskontor

Der gøres den antagelse, at når der opholder sig en person i et enkeltmandskontor, er dette 100 % belastet i de angivne perioder.

Det antages, at den interne varmebelastning pr. arbejdsplads er følgende:

- Intern varmebelastning pr. arbejdsplads
 - 1 Person
 - 1-2 skærme
 - 1 PC
 - Evt. 1 arbejdslampe

I Tabel 12-5 er der forslag til belastningsprofiler og samtidigheder.

*Tabel 12-5 Samtidighedsprofil for enkeltmandskontor.
Modificeret fra (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017)*

	TIME	1-7	8	9	10-11	12	13-15	16	17	18-24
	Kl.	0-7	7-8	8-9	9-11	11-12	12-15	15-16	16-17	17-24
Høj	Person	0	1	1	1	0,5	1	1	1	0
	Udstyr	0	1	1	1	1	1	1	1	0
Almindelig	Person	0	0	1	1	0,5	1	1	0	0
	Udstyr	0	0	1	1	1	1	1	0	0
Lav	person	0	0	0	1	0,5	1	0	0	0
	udstyr	0	0	1	1	1	1	0	0	0

Mødelokaler

Et mødelokale vil normalt ikke være fuldt optaget hele arbejdsdagen. Mindre mødelokaler vil i mange tilfælde være mere optaget og dermed have en større belastningsprocent.

I Tabel 12-6 for mødelokaler er der lavet følgende forudsætninger:

- Antal arbejdspladser
 - Det antages at der er 2-3 m² pr. mødedeltager
 - (Dansk Standard, 2007a) benytter 2 m² pr. mødedeltager (conference room)
 - Indretningsplaner kan også danne grundlag for vurdering af antal personer
- Intern varmebelastning i mødelokaler
 - 1 bærbar PC til minimum halvdelen af mødedeltagerne
 - 1 projektor eller storskærm (TV)

I Tabel 12-6 er der forslag til belastningsprofiler og samtidigheder.

*Tabel 12-6 Samtidighedsprofil for mødelokaler for personer og udstyr.
 Modificeret fra (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017)*

	TIME	1-8	9-10	11	12-13	14	15-16	17-24
	Kl.	0-8	8-10	10-11	11-13	13-14	14-16	16-24
Høj	person	0	1	0,5	1	0,5	1	0
	udstyr	0	1	0,5	1	0,5	1	0
Almindelig	person	0	0,75	0,375	0,75	0,375	0,75	0
	udstyr	0	0,75	0,375	0,75	0,375	0,75	0
Lav	person	0	0,6	0,3	0,6	0,3	0,6	0
	udstyr	0	0,6	0,3	0,6	0,3	0,6	0

Klasselokaler

Folkeskoleloven stiller krav om, at der i en skoleklasse maksimalt må være 28 elever. Denne regel gælder fra børnehaveklasse til 9. klasse. Det vurderes, at der er to undervisere pr. klasse. I tillæg kræver bygningsreglementet, at der skal være et rumindhold på minimum 6 m³ per person.

I Tabel 12-7 for klasselokaler er der lavet følgende forudsætninger:

- Antal arbejdspladser
 - 28 elever og 2 lærere = 30 personer
 - (Dansk Standard, 2007a) benytter 2 m² per person for klasselokaler
 - Indretningsplaner kan også danne grundlag for vurdering af antal personer
- Intern varmebelastning fra udstyr i klasselokale
 - 1 bærbar PC eller tablet pr. elev
 - 1 stationær PC
 - 1 smartboard med projektor

I Tabel 12-7 er der forslag til belastningsprofiler og samtidigheder. I den originale tabel 27 fra (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017) er der forudsat tre pauser hver på en halv time i løbet af en undervisningsdag. Almindelige programmer benytter inddata på timebasis. I tabellen er den time med indlagt halvtimes pause derfor blevet omsat til en gennemsnitsværdi for hele timen, hvilket er medvirkende til de tre decimaler fremkommer (Bruger kan selv runde 0,675 op til 0,68).

*Tabel 12-7 Samtidighedsprofil for klasselokaler for personer og udstyr. Modificeret fra
(Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017)*

	TIME	1-8	9	10	11	12	13	14	15	16-24
	Kl.	0-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-24
Almindelig	person	0	1	0,75	1	0,75	1	0,75	1	0
	udstyr	0	1	0,75	1	0,75	1	0,75	1	0
Lav	person	0	0,9	0,675	1	0,675	1	0,675	1	0
	udstyr	0	0,9	0,675	1	0,675	1	0,675	1	0

12.10. Eksterne varmebelastninger – Solindfald

Den eksterne varmebelastning fra solindfald kan blive meget stor, og det er afgørende for det termiske indeklima, at der udføres en korrekt beregning af solindfaldet, samt hvorledes uhensigtsmæssigt højt solindfald bliver håndteret. En udvendig solafskærmning har ingen effekt, hvis den ikke bliver brugt. Det kan ikke forventes, at fremtidige brugere af en bygning har den nødvendige forståelse for brugen af den udvendige solafskærmning i forhold til det termiske indeklima. Hvis en solafskærmning kører op og ned til gene for brugerne, kan de træffe foranstaltninger til at bringe den til ophør med at virke. Meget få personer bryder sig om et se ind i en solafskærmning, der helt afskærmer udsynet til omgivelserne – specielt hvis det er mange timer hver dag.

Solstråling på en bygning overføres til lokalerne via ikke-transparente og transparente bygningsdele. De ikke-transparente bygningsdele som vægge, tage, etc. har almindeligvis en lav U-værdi, og derved vil solindfald på disse flader have begrænset effekt. De transparente bygningsdele i form af ruder har en meget effektiv overførsel af solstråling til de bagvedliggende lokaler. Der vil derfor i dette afsnit blive fokuseret på transparente bygningsdele i form af ruder.

Overførsel af solenergi via ikke-transparente bygningsdele har normalt kun betydning for store flader med en høj U-værdi. Dette kan f.eks. være aktuelt for dårligt isolerede lagerhaller med sort asfalt pap på taget, fordi det sorte tagpap absorberer solstrålingen, hvilket resulterer i en høj overfladetemperatur, der resulterer i en stor varmeoverførsel ind i lagerhallen.

Emnet solindfald er stort og komplekst. Målgruppen for dette kapitel er primært ingeniør- og maskinmesterstuderende med forskellig baggrundsviden om solindfald. Der er derfor valgt at medtage det essentielle i dette kapitel og placere noget af den generelle teori i Afsnit Appendiks 12.17 til 12.19.

Solstråling

Solstråling deles op i tre hovedområder:

- Ultraviolet
- Synligt
- Infrarødt

Når først solstrålingen er kommet ind i lokalet (med hele spektret af ultraviolet, synlig og infrarød solstråling) bidrager den til lokalets varmebalance. Hvorimod kun det synlige lys bidrager til dagslyset i lokalet. Det synlige lys udgør ca. halvdelen (48%) af energien i solstrålingen. For kontorbygninger (og tilsvarende) med overskudsvarme vil der normalt være behov for at begrænse varmetilførslen fra solstråling så meget som muligt, samtidig med at der ønskes så meget dagslys som muligt. Dette er to modstridende krav, som er vanskelige at forene.

Rude producenterne har forsket meget i dette, og er nu i stand til at producere ruder, som afskærmer mere for den ultraviolette og infrarøde solstråling end for den synlige solstråling. Resultatet af dette er, at der i dag kan anskaffes ruder med langt højere sollystransmittans (ultraviolet og infrarød

stråling afskærmes mere en synligt lys) end total solenergi transmittans, se Appendiks 12.17 Tabel 12-21.

Solstrålingen betegnes også som kortbølget stråling og ligger i bølgelængde område fra 0,3 μm til 3 μm . Når solstrålingen går direkte igennem en rude, kommer ind i rummet og rammer en overflade, vil en del af strålingen blive reflekteret videre i rummet som kortbølge stråling. En anden del af strålingen vil blive absorberet af konstruktionen og en del af denne energi vil blive akkumuleret i bygningskonstruktionen. For den absorberede del af energien gælder, at noget vil blive afgivet fra overfladen dels ved konvektion og dels ved emitteret stråling til andre flader. Den emitterede stråling fra overfladen vil nu være omdannet til langbølge stråling, der har nogle andre karakteregenskaber end den kortbølgede stråling. På denne måde opstår den såkaldte drivhuseffekt, hvor solenergien (nu langbølge stråling) bliver fanget inde i rummet.

Solindfald på flader

Der findes i litteraturen et meget stort antal beregningsmetoder og formler til beregning af solindfald, og solindfald på flader og gennem ruder.

I dynamiske simuleringsprogrammer er der i mange tilfælde en valgmulighed mellem forskellige metoder, som vil give forskellige resultater. I BSim er der fire modeller at vælge mellem for beregning af solindfald: 1) Petersens solar model, 2) Muniens solar model, 3) Lunds solar model, 4) Perezs solar model. Det beregnede solindfald vil således ikke være en eksakt størrelse; men afhænge af den valgte størrelse. Herudover vil de valgte vejrdata på årsbasis også være af afgørende betydning. Disse vejrdata er blevet ændret med tiden på baggrund af de forandrede klimaforhold, der er et resultat af den globale opvarmning.

I dette kapitel gennemgås varmebalancen ved brug af døgnmiddelindetemperaturen og i denne sammenhæng er valgt at anvende sol data baseret på (DANVAK, 2006). Disse soldata er symmetriske om time 12 (kl. 11.30 til kl. 12.30 sand soltid), hvorved solindfaldet har samme størrelsesorden for øst og vest, se Afsnit Appendiks C 12.19 Tabellerne

Tabel 12-22 til Tabel 12-30. Der kan imidlertid godt anvendes andre soldata, der ikke nødvendigvis er symmetriske omkring time 12.

Dette i modsætning til anvendelse af reference år, der er baseret på målte værdier, se Afsnit 12.11 om referenceår. Dette kan resultere i, at der kan være markant forskel for en given skyfri dag på solindfaldet på en vest og østvendt facade. Dette er en faktor, der kan resultere i, at for en bygning med identiske rum mod øst og vest kan de nødvendige luftmængder blive forskellige på baggrund af denne forskel i solindfaldet. En forskel som ikke nødvendigvis er reel.

Solens position på himmelhvælvingen angives med solhøjden og solazimut. Solens placering på himmelhvælvingen har indflydelse på, hvorledes solens stråler rammer en flade. Orienteringen af en flade angives ved dens hældning med vandret og facadeazimut, der er vinklen mellem den lodrette normal plan for fladen og den lodrette plan gennem syd retningen. Solens position og hvorledes dens stråler rammer en flade er beskrevet i Afsnit Appendiks 12.17.

Forskellige typer solstråling

Ved solindfald på en flade skelnes mellem direkte og diffus stråling. Den direkte stråling kan betragtes som kommende fra solen, som udgør en punktformig kilde, der bevæger sig henover himmelhvælvingen. Den diffuse stråling består dels af diffus himmelstråling og dels af reflekteret diffus stråling fra omgivelserne.

Den direkte solindstråling mod en overflade er først og fremmest afhængig af solens højde på himlen og strålernes indfaldsvinkel. På en skyfri dag udgør den direkte stråling fra solen op til ca. 90 % af totalstrålingen.

Følgende fire begreber er vigtige i forbindelse med beregning af solindfald:

- **Indfaldsvinkel** Indfaldsvinklen er vinklen mellem den direkte solstrålingsretning og fladens normal, dvs. det er en linje, der står vinkelret på fladen.
- **Direkte solstråling** Den direkte solstråling er den del af solstrålingen, der kommer direkte fra solen uden at være blevet spredt i atmosfæren.
- **Diffus solstråling** Den diffuse solstråling er den del af solstrålingen, der spredes i atmosfæren og derfor ikke kommer direkte fra solskiven, men fra andre steder på himmelhvælvingen.
- **Reflekteret solstråling** Den reflekterede solstråling er den del af solstrålingen, der rammer jordoverfladen og andre objekter og kastes tilbage herfra.

Sand soltid – Klokkeslæt, time numre

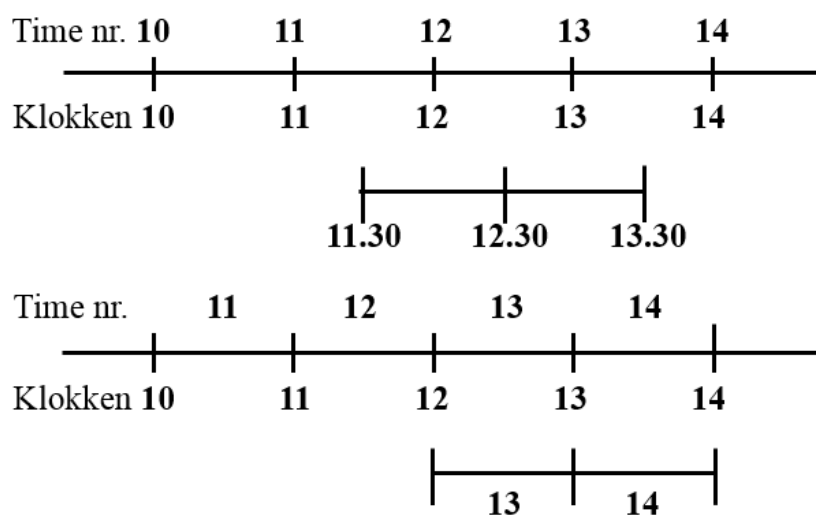
Inden soltransmission gennem vinduer gennemgås vil begrebet *sand soltid* blive omtalt.

Det er vigtigt at have en forståelse for at skelne mellem sand soltid og klokkeslæt. Om vinteren er klokkeslættet identisk med sand soltid, således at kl. 8 sand soltid er det samme som klokkeslættet kl. 8. Når sommertiden er indført svarer kl. 8 sand soltid til klokkeslættet kl. 9. I figurer for

solindfald gennem referencerude (DANVAK, 2006), Tabeller i Afsnit Appendiks 12.19 og i TCD programmet (Christensen, 2018) anvendes sand soltid.

Strengt taget gælder figurerne for solindfald for længdegrad 15°Ø , svarende til Bornholm. Hvis solen således står i syd kl. 12 på Bornholm ((15°Ø)) vil den først stå i syd kl. 12.11 i København og kl. 12.25 i Esbjerg.

Desuden er det vigtigt at skelne mellem time nummer og klokkeslæt, og hvorledes tidsintervaller er inddelt i forhold til klokkeslæt, se Figur 12-2.



Figur 12-2 Øverst – Tidsintervaller gående fra det ene klokkeslæt til det andet.
Nederst – Tidsintervaller centreret omkring hele klokkeslæt

I (DANVAK, 2006) og dermed TCD programmet angives reelt timer, f.eks. time 8 er fra kl. 7.30 til 8.30 sand soltid. Når der for eksempel i TCD programmet indsættes, at der er en solafskærmning aktiveret fra time 8 til time 11, skal det i virkeligheden forstås på den måde, at den er aktiveret fra kl. 7.30 sand soltid til kl. 11.30 sand soltid.

For det nye Design Reference Year for Danmark, "DRY Danmark 2013" (perioden 2001-2010) (Wang et al., 2012) gælder det, at time 1 er i tidsrummet fra kl. 0 til kl. 1. Programmet BSim benytter breddegrad $55,793^\circ\text{N}$ og længdegrad $12,16^\circ\text{Ø}$, se afsnit 12.11. Dette svarer til en tidsforskel i forhold til længdegrad 15°Ø på 11 minutter.

Ruder

En vigtig del af en bygnings klimaskærm er vinduer, som har til formål at beskytte mod udeklimaet i kombination med at skabe udsyn og få dagslys ind i lokalet. Vinduer vil ikke blive beskrevet nærmere i dette kapitel, idet der henvises til relevant litteratur. Fokus vil i stedet for være på ruder med deres tilhørende solindfald og bidrag til rummets varmebalance.

Soltransmission gennem glasrude

Når solstråling rammer en glasrude, bliver en del reflekteret (ρ), en del absorberet (α) og en del transmitteret (τ). Størrelsen af ρ , α og τ er afhængig af glastype, vindueskonstruktion, indfaldsvinkel og strålingens spektralfordeling. For vinkler mellem 0° og 40° er transmittansen næsten konstant, hvorimod transmittansen aftager meget ved større indfaldsvinkler, Afsnit Appendiks 12.18 Figur 12-15 og **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.**

En del af den stråling, der rammer ruden, vil blive reflekteret bort og ikke indgå i varmebalancen for det bagvedliggende rum. En del af strålingen vil blive absorberet i glaslagene, hvoraf en del af denne energi vil blive tilført rummet, og en anden del vil blive afgivet til det fri og ikke indgå i rudens varmebalance.

Soltransmission gennem standard dobbeltrude

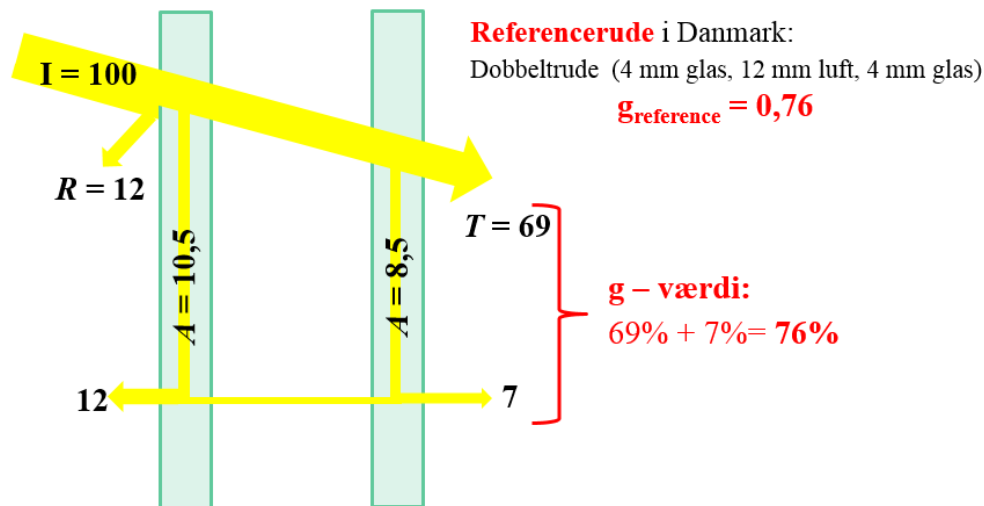
For et vindue med en standard dobbeltrude transmitteres 76 % af solenergien, hvilket svarer til en g -værdi på 0,76. Figur 12-3 illustrerer, hvordan denne solstråling bliver transmitteret, hvordan g -værdien fremkommer som en sum af den direkte transmitterede solstråling på 69 % og den absorberede solstråling, som afgives indad til rummet på 7 %.

Denne standard dobbeltrude bliver brugt som **reference rude** og er kendetegnet med følgende egenskaber:

- 4 mm floatglas – 12 mm luftmelletrum – 4 mm floatglas
Transmissionsfaktor for solenergi på 0,76 (g -værdi, solfaktor) : $g_{reference} = 0,76$

Ved maksimal indstråling lader ruden op til 600 W/m^2 passere, og der er således tale om meget store effekter. Den maksimale indstråling optræder på forskellige tidspunkter af året og dagen i afhængighed af rudens orientering. For øst- og vestvendte ruder optræder det største solindfald om sommeren, hvorimod det for sydvendte sker i marts og september.

Solindfaldet gennem en standard dobbeltrude med forskellige orienteringer er vist i Afsnit Appendiks 12.19 for den direkte stråling og den diffuse himmelstråling med data fra (DANVAK, 2006). Det er denne standard dobbeltrude, som er benyttet som reference rude i (DANVAK, 2006) og i TCD programmet (Christensen, 2018).



Figur 12-3 Transmitteret solstråling gennem en uafskærmet reference dobbeltrude (2 lag 4 mm glas med 12 mm luftmelletrum) med en g-værdi på 0,76

Tabellerne er beregnet for skyfri dage med deraf følgende maksimal solbelastning. Tabellerne er baseret på (DANVAK, 2006), og der er regnet med den 21. i hver måned for at gøre det muligt at have to orienteringer på hver kurve. Dette medfører at f.eks. forårsjævndøgn 21. marts og efterårsjævndøgn 21. september er på identiske kurver. Tilsvarende gælder for de øvrige parrede måneder: december, januar/november, februar/oktober, september/marts, april/august, maj/juli, juni.

Tabellerne for transmitteret direkte sol stråling i Afsnit Appendiks 12.19 er opgivet for orienteringer i spring på 45 grader – i alt 8 retninger: syd, sydvest, vest, nordvest, nord, nordøst, øst, sydøst.

Der regnes med sommertid, hvilket betyder for eksempel at klokken 13 svarer til kl. 12 sand soltid (der trækkes en time fra klokkeslettet). Normalt regnes der med, at værdien er gældende i en hel time rundt om klokkeslettet, f.eks. kl. 12 sand soltid gælder fra kl. 11.30 til kl. 12.30 sand soltid.

Beregning af solindfald på timebasis gennem et givet vinduesareal gennemgås i afslutningen af dette afsnit efter gennemgang af de øvrige emner herunder solafskærmning.

Rudetyper

Rudens egenskaber kan ændres efter behov afhængigt af om det er en reduktion af solindfaldet, der ønskes eller en forbedring af isoleringsevnen. Hvis lys- eller solindfald ønskes ændret, kan det ske med absorberende glas eller belægninger.

Det glas, der sædvanligvis anvendes i forbindelse med ruder, er floatglas. Dette indeholder normalt jernoxid i meget små mængder, hvilket er med til at give glasset et grønligt skær, når der ses på kanten af glasset. Ved at sænke indholdet af jernoxid bliver glasset klarere. Glassets egenskaber kan ændres ved at iblande diverse metaloxider, og dette kan bruges til at reducere lystransmittansen samt ændre farven på glasset.

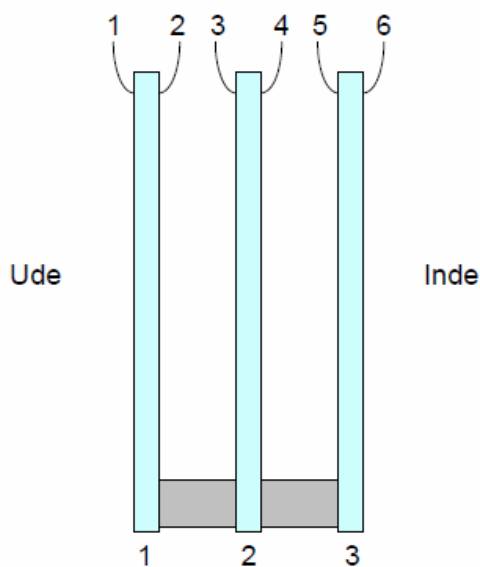
Der har været en rivende udvikling af glassets egenskaber, hvilket har medført at vinduer kan anvendes på en bedre måde. Der er blevet udviklet funktionsglas, som kan løse en lang række krav:

- Kontrol med energi
- Kontrol med dagslys
- Støjdæmpning
- Brandbeskyttelse
- Selvrengøring

Specielt har udviklingen af ruder med en højere transmittans for dagslys end solenergi bidraget til nye muligheder. Det er muligt at vælge en glaskombination med et stort antal valgmuligheder, der er med til at karakterisere den enkelte rudetype:

- 1, 2, 3, 4 lag glas
- Tykkelse af det enkelte lag glas
- Glasafstand
- Gasart i luftmelletrum: luft, argon, krypton
- Belægning, placering af lavemissions- eller solafskærmende belægning
- Laminering
- Hærdning

I forbindelse med karakteristik af ruders opbygning anvendes en nummerering af de enkelte glasoverflader og glaslag, angivet udefra og indefter, se Figur 12-4.



Figur 12-4 Glaslag og glasoverflader nummereres udefra og indefter

I Tabel 12-8 og Tabel 12-9 er der en oversigt over de mest almindelige ikke-solafskærmende rudetyper samt de mest almindelige solafskærmende rudetyper. For nærmere information henvises de respektive producenteres materiale.

Gasser

Normalt er der luft mellem glassene. Ved anvendelse af forseglede ruder er det muligt at benytte andre ædelgas typer som argon, krypton eller xenon. De sidstnævnte tre gasarter er alle tungere end luft, og dette medfører en øget træghed i gassens bevægelighed i forhold til luft. Dette er med til at reducere den konvektive varmetransmission igennem mellemrummet mellem glassene, og dermed varmetabet gennem ruden. Ved fremstilling af ruder er ædelgasser dyrere end anvendelse af luft. Til gengæld opnås et lavere varmetab og dermed en lavere U-værdi.

Belægninger

Ruder anvendes til mange formål og i nogle tilfælde er det ønskeligt at have en rude med et meget lavt varmetab. I andre tilfælde ønskes en solafskærmende virkning for at undgå overtemperaturer i lokalet. Af denne årsag påføres glassene belægninger for således at ændre rudens termiske egenskaber. Anvendelse af belægninger kan inddeles i følgende kategorier:

- Lavemissions belægning – formål at reducere varmetab
- Solafskærmende belægning – formål at reducere solindfald
- Lavemissions belægning og solafskærmende belægning – formål at reducere varmetab og solindfald

En ulempe ved anvendelse af belægninger er at de reducerer transmittans af solstråling og dagslys gennem ruden til rummet.

Lavemissions belægninger

Formålet med lavemissions belægninger er at reducere varmetabet ved varmestråling (langbølget stråling). Varmetabet ved stråling udgør ca. 2/3 af varmetabet gennem en termorude. Ved at påføre lavemissions belægninger i et tyndt lag på overfladerne af glassene kan varmestrålingen reduceres betragteligt. Lavemissions belægninger kan være af to typer:

- Blød belægning – sårbar, kan kun anvendes i forseglede ruder på indre overflader, position 2-5 på *Figur 12-4*.
- Hård belægning – kan tåle vejrmæssig påvirkning, emissionsforhold er lidt højere end blød belægning, hvilket giver lidt mindre effektivitet.

Solafskærmende belægninger og glas

I mange bygninger med stor intern varmebelastning vil der være behov for at reducere solindfaldet for at undgå for høje temperaturer. Her kan med fordel anvendes solafskærmende belægninger eventuelt i kombination med en afskærmning. Der forefindes følgende slags:

- Variant som reflekterer og absorberer solstrålingen, hvilket reducerer transmission af solstråling og sænker dagslysendfaldet – virker generelt spejlende

- Variant, som primært reflekterer det infrarøde og ultraviolette spektrum. På denne måde reduceres varmeindstrålingen fra solstrålingen uden at dagslyset reduceres særligt meget. Denne variant har dermed en højere sollystransmittans end solenergitransmittans. Glasset kan være klart.
- Gennemfarvet glas

Valg af solafskærmende glas afhænger af hvilke ønsker der prioriteres. Er der æstetiske krav, hvor glassets farve har betydning, kan de ønskede gennemfarvede glas vælges.

Herudover er det af betydning, hvor lav en soltransmittans i form af lav g-værdi som ønskes. Denne værdi skal ses i forhold til ønsket om en høj dagslysindstråling, og i de fleste tilfælde er det ønskeligt med en højere lys transmittans end solenergi transmittans. Det er i dag muligt at få ruder med f.eks. en dagslys transmittans på 72% og en solenergi transmittans på 43%, hvilket giver helt nye muligheder for anvendelse af ruder i byggeriet – find aktuelle leverandører på markedet for at få information om de sidste nye rudetyper på markedet., se Tabel 12-8 og Tabel 12-9. Ved design af kontorbyggeri vil der være et overskud af intern og ekstern varmebelastning, og det vil derfor være ønskeligt at reducere solenergi transmittansen så meget som muligt, uden at dagslys transmittansen bliver reduceret nævneværdigt. Dette giver også nogle nye muligheder i forbindelse med vurdering af udvendig solafskærmning i forhold til solafskærmende glas.

Tabel 12-8 Oversigt over de mest almindelige ikke-solafskærmende rudetyper på markedet med angivelse af varmetransmissionskoefficient, sollystransmittans og total solenergitransmittans.

Varmetransmissionskoefficienten er angivet for tre luftarter. Argon90 og krypton90 er en blanding af 90% argon hhv. krypton og 10% luft. Den totale solenergitransmittans er angivet i tilfældet med luftfyldning, men er næsten uafhængig af gasfyldningens type

Rudetype	Antal Glas	Belægning	Termiske data			Optiske data	
			U-værdi			Dagslys	Solenergi
Glastykkelse og afstand		Belagt overfalde talt udefra	U _g (W/m ² K)			LT, τ _t	g
			Type 1,2,3	Luft	Argon90	Krypton90	%
Almindeligt floatglas							
4	1		5,8			0,90	0,86
4-12-4	2		2,9	2,7		0,82	0,76
4-12-4-12-4	3		1,9	1,8		0,74	0,68
Almindeligt floatglas + *Energiglas (type 1, 2, 3)							
4-koblet-*4(1)	2	3	1,8			0,75	0,71
4-12-4-koblet-*4(1)	3	5	1,3			0,69	0,63
4-12-*4(1)	2	3	1,9	1,6	1,5	0,75	0,71
4-15-*4(1)	2	3	1,7	1,5	1,5	0,75	0,71
4-24-*4(1)	2	3	1,7	1,5	1,5	0,75	0,71
4-12-*4(2)	2	3	1,8	1,5	1,3	0,77	0,66
4-15-*4(2)	2	3	1,6	1,3	1,3	0,77	0,66
4-24-*4(2)	2	3	1,6	1,4	1,4	0,77	0,66
4-15-*4(3)	2	3	1,4	1,1	1,1	0,75	0,63
6-15-*6(2)	2	3	1,6	1,3		0,75	0,63
*4-15-4(2)	2	2	1,6	1,3		0,77	0,61
4-12-4-12*4(2)	3	5	1,4	1,1		0,70	0,59
4-15-4-15*4(3)	3	5	1,1	0,9	0,8	0,68	0,53
*4-12-4-12*4(3)	3	2 + 5	0,8	0,6	0,5	0,62	0,40

Energiglas er betegnelsen for glas med en emissivitet $\varepsilon < 0,2$
 Energiglas type 2: Blød lavemissionsbelægning $\varepsilon = 0,1$

Energiglas type 1: Hård lavemissionsbelægning
 Energiglas type 3: Blød lavemissionsbelægning $\varepsilon = 0,04$

Tabel 12-9 Oversigt over de mest almindelige solafskærmende rudetyper på markedet med angivelse af varmetransmissionskoefficient, sollystransmittans og total solenergitransmittans.

Varmetransmissionskoefficienten er angivet for tre luftarter. Argon90 og krypton90 er en blanding af 90% argon hhv. krypton og 10% luft. Den totale solenergitransmittans er angivet i tilfældet med luftfyldning, men er næsten uafhængig af gasfyldningens type

Rudetype	Antal Glas	Belægning	Termiske data			Optiske data	
			U-værdi			Dagslys	Solenergi
Glastykkelse og afstand		Belagt overfalde talt udefra	U _g (W/m ² K)			LT, τ _t	g
			Luft	Argon90	Krypton90	%	%
Type 1,2,3		Position					
Solafskærmende glas (gennemfarvet) + *Energiglas (type 2)							
6 grå-15- [*] 6(2)	3	3	1,6	1,3		0,36	0,37
6 grøn-15- [*] 6(2)	3	3	1,6	1,3		0,63	0,39
Solafskærmende glas (belagt) + *Energiglas (type 2)							
6 silver-15- [*] 6(2)	3	3	1,5	1,3		0,17	0,17
6 blå-15- [*] 6(2)	3	3	1,5	1,3		0,26	0,22
6 grå-15- [*] 6(2)	3	3	1,5	1,3		0,27	0,27
Solafskærmende glas (belagt inkl. energibelægning) + Almindeligt floatglas							
4 klar-15-4	3	2	1,4	1,1		0,65	0,44
6 klar-15-6	3	2	1,4	1,1		0,65	0,44
6 neutral-15-6	3	2	1,6	1,3		0,54	0,44
6 silver-15-6	3	2	1,4	1,1		0,41	0,27
Solafskærmende glas (belagt inkl. energibelægning) + Energiglas (type 2)							
6 klar-15- [*] 6(2)	3	2 + 3		1,1	1,1	0,61	0,39
6 klar-12-4-12- [*] 6(2)	4	2 + 5		0,8	0,6	0,55	0,36
Solafskærmende glas (gennemfarvet) + Solafskærmende glas (belagt inkl. energibelægning)							
6 grå-15-klar 4	3	3	1,4	1,1		0,31	0,30
6 grå-15-silver 6	3	3	1,4	1,1		3,20	0,22
6 grøn-15-klar 4	3	3	1,4	1,1		0,54	0,32
6 grøn-15-silver 6	3	3	1,4	1,1		0,35	0,23

Energiglas er betegnelsen for glas med en emissivitet $\epsilon < 0,2$
 Energiglas type 2: Blød lavemissionsbelægning $\epsilon = 0,1$

Energiglas type 1: Hård lavemissionsbelægning
 Energiglas type 3: Blød lavemissionsbelægning $\epsilon = 0,04$

Rudens egenskaber

Energiglas opnås ved at påføre glasset et selektivt lag, hvor kortbølget solstråling bliver transmitteret, og en større del af den langbølgede varmestråling fra rummet bliver reflekteret, således at rumvarmen bliver i lokalet.

Hvis lys- eller solindfald ønskes ændret, kan det ske med absorberende glas eller belægninger. Ruderne inddeles i tre grupper efter hvilke egenskaber de har:

- Solafskærmende ruder
- Lys- og varmeregulerende ruder
- Energiruder

Hvorledes belægningen placeres, er afhængigt af hvilke egenskaber, der ønskes fremhævet. For 2- og 3- lags ruder skelnes der mellem 6 belægningspositioner regnet udefra, med 1 og 2 for belægning udvendigt og indvendigt på det yderste glas etc.

Solafskærmende ruder

For solafskærmende ruder skal belægningen eller filmen være i position 1 eller 2, hvorved hovedparten af den absorberede varme afgives til det fri. Solafskærmende ruder nedsætter ofte lysindfaldet mere end solindfaldet, da halvdelen af energien befinder sig i det synlige område.

En anden form for solafskærmende ruder fremstilles ved at benytte absorberende glas. Dette placeres yderst i termoruden for at hindre så meget som muligt at den absorberende varme i at gå ind i rummet. Effektiviteten af ruden afhænger af dels af mængden af metal oxider (hvor kraftigt ruden er farvet), og dels af glastykkelsen. Det absorberende glas fremstilles ved at tilsætte forskellige oxyder af jern, nikkel, kobber og kobolt til glasmassen.

I de tilfælde, hvor der er installeret ventilations- eller køleanlæg til at fjerne det overskydende solindfald, kan solafskærmende ruder reducere energiforbruget i klimaanlægget.

Lys- og varmeregulerende ruder

Lys- og varmeregulerende ruder har selektive belægninger som muliggør passage af en stor del af dagslyset, hvorimod den usynlige del af solstrålingen reflekteres delvist af belægningen. Dette resulterer i, at ruderne kun bliver svagt tonede. Belægningerne placeres i position 1 eller 2 og medfører ofte, at varmestrålingen mellem glassene bliver reduceret, og derved at termoruden bliver bedre isolerende (lavere U-værdi).

Energiruder

Energiruder benyttes hvor der er behov for at udnytte den passive solvarme bedst muligt, samtidigt med at varmetabet til det fri ønskes reduceret mest muligt.

De varmeisolerende egenskaber opnås ved gasfyldning af mellemrum, og ved at placere belægninger, der reducerer varmestrålingen mellem glassene. Belægningen vil altid absorbere en del af solstrålingen, hvorfor den placeres i position 3 (dobbeltruder), således at hovedparten af den absorberede varme tilføres rummet.

Valg af ruder med specialglas og belægning

Når valg af ruder med specialglas og belægning overvejes, bør følgende iagttages:

- Påvirkning af dagslysets farve og udsynet
- Den permanente reduktion af dagslyset og dermed øget brug af kunstig belysning
- Spejlinger og farver udvendigt på facaden
- Spejlinger i rudens inderside, når det er mørkt ude
- Store temperatur gradienter i glasset med fare for brud ved slagskygger
- Farveændringer ved delvis udskiftning til nye ruder i tilfælde af brud
- Rudernes merpris

Og fordelene ved:

- Bedre termisk indeklima
- Besparelser i energiforbrug på grund af forbedret effektiv U-værdi
- Besparelser i anlægsomkostninger og drift af klimaanlæg

Solafskærmning

Siden 2. verdenskrig er ”glasarkitekturen” blevet benyttet verden over og har til tider givet anledning til alvorlige indeklima problemer. Disse problemer er blevet forsøgt løst med mere eller mindre hensigtsmæssige solafskærmninger. Imidlertid er der mange bygninger fra denne periode, som er så arkitektonisk raffinerede, at der ikke er plads til solafskærmninger. Dette har medført, at indeklimaet har været så ubehageligt i disse bygninger, at de helst kun skulle betragtes udefra. Blandt de mest berygtede kan nævnes FN-bygningen i New York, UNESCO-Huset i Paris og Sundhedsministeriets bygning i Rio de Janeiro. For at undgå tilsvarende problemer er det en fordel at integrere solafskærmningen i bygningen, hvis der er behov for det.

Det er vigtigt at afskærme for solstråling for at reducere solindfaldet gennem vinduerne, og dette gøres ved at benytte forskellige typer solafskærmninger. En solafskærmning giver bedre termisk indeklima samt formindsker den eksterne varmebelastning, hvilket reducerer energibehovet for køling og ventilation. Ligeledes vil blanding blive elimineret, og således skabes en bedre optisk komfort.

I nyere kontorbygninger har automatiske afskærmninger, der styres efter solindfaldet og ude-/indetemperaturen i højere grad vundet indpas. Disse afskærmninger har den store fordel at de automatisk bliver koblet til, når der er behov for det. Dette har stor betydning, idet det alt for ofte sker at solafskærmningen tages i funktion for sent, efter at solvarmen er kommet ind i lokalet og er blevet akkumuleret af bygningskonstruktionerne. For de fleste automatiske solafskærmninger vil der være mulighed for en manuel overstyring af automatikken, således at solafskærmningen kan kobles ud af funktion i et vist tidsrum.

For at opnå den største afskærmning over for solindfald er det bedst at anvende en udvendig solafskærmning, da solen afskærmes fra lokalet allerede inden energien kommer ind i lokalet. Med de forbedrede ruder med tilhørende lav U-værdi har indvendige solafskærmninger fået stadig dårligere afskærmningsfaktor, og i mange tilfælde vil denne ligge på ca. 0,9, svarende til at 90 % af solindfaldet forbliver inde i lokalet.

Der forekommer desværre projekter, hvor der i sidste øjeblik ønskes foretaget besparelser og en udvendig solafskærmning bliver erstattet med en indvendig. Denne handling kan have meget uheldige virkninger for det fremtidige termiske indeklima, hvis der ikke bliver foretaget en ny analyse af konsekvenserne af at fjerne den udvendige solafskærmning. Hvis disse analyser foretages, vil det hurtigt blive klart, at det vil være nødvendigt med større anlæg og dermed forøgede omkostninger. Omkostninger der let kan vise sig at være større end besparelsen ved at gå fra udvendig til indvendig solafskærmning.

En udvendig solafskærmning er kun effektiv, når den benyttes. Hvis brugeren overstyrer den udvendige solafskærmning og fjerner den helt i større dele af dagen, vil det få uheldige konsekvenser for det termiske indeklima. Det er derfor vigtigt at gøre en klar afvejning af hvilken solafskærmning, der skal benyttes, og i hvor høj grad den vil blive benyttet i praksis. Det er derfor vigtigt at være bevidst om, at der ved valg af afskærmning er forskellige ønsker, der kan være modsætningsfyldte. Den valgte løsning vil derfor være et kompromis, hvor brugerens ønsker må vurderes for at få den optimale løsning.

En solafskærmning er en vægtning mellem temperaturforhold/energiforbrug og dagslys/udsyn. Hvis en solafskærmning i den varme sommerperiode ikke anvendes, giver det meget dagslys og et frit udsyn. Dette kan imidlertid evt. give blændingsproblemer fra den direkte solstråling. Hvis tilsvarende solafskærmningen på varme skyfri sommerdage benyttes, vil det give et bedre termisk indeklima i form af lavere temperaturer og energiforbrug til køling, og ventilation vil blive lavere.

I projekteringsforløbet er det vigtigt at tage et valg af afskærmning så tidligt som muligt. Da dette valg får afgørende indflydelse på beregning af det termiske indeklima, er det vigtigt at holde fast i den valgte løsning. Hvis f.eks. byggeriets omkostninger stiger, og der på et senere tidspunkt ønskes besparelser ved at ændre en udvendig afskærmning til en indvendig, vil dette betyde en markant forringelse. Resultatet vil blive et langt højere tilskud af solstråling og dermed et forøget kølebehov. Det vil derfor være nødvendigt at foretage en ny beregning af det termiske indeklima.

Ifølge (SBI-anvisning 264, 2016b) kan solafskærmning opdeles i følgende typer:

- Vandret udhæng over vindue
- Sidefremspring ved lodret vindue
- Lyshylder
- Markiser
- Lamelafskærmninger
- Screens
- Skodder og bevægelige rammesystemer

- Gardiner, foldegardiner, plissé gardiner
- Solafskærmende ruder og sol film (omtalt tidligere)
- Afskærmninger med mikro strukturer
- Dagslys systemer

Herudover kan solindfaldet reduceres på grund af andre bygninger og beplantning.

Solafskærmende glas er omtalt i afsnittet belægninger, solafskærmende belægninger og omtales ikke her.

Det fremgår af listen ovenfor, at der er mange former for solafskærmning, og alle disse vil ikke blive omtalt i dette kapitel, idet der henvises til håndbøger og kataloger. Herudover er der i (SBI-anvisning 264, 2016b) en grundig gennemgang af emnet. Det er planen, at der skal inkluderes flere vigtige punkter fra (SBI-anvisning 264, 2016b); men dette har ikke været muligt i denne udgave af tidsmæssige årsager.

Der findes mange former for afskærmninger, og det vil føre for vidt at omtale dem alle, hvorfor der henvises til håndbøger og kataloger. Der kan også henvises til SBI-anvisning 264 Solafskærmninger (SBI-anvisning 264, 2016b).

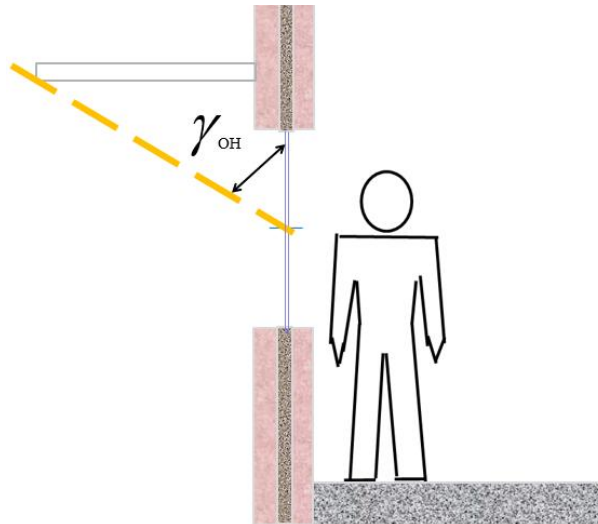
Der har i de senere år været en rivende udvikling inden for solafskærmninger. Der er kommet mange nye typer på markedet med mange forskellige kvaliteter. Det er f. eks. muligt at få udvendige solafskærmninger, hvor det er muligt at se igennem selvom udsynet er reduceret noget; men det er stadig en stor forbedring i forhold til solafskærmninger, hvor udsynet er helt blokeret. Der findes også faste solafskærmninger, der slet ikke kan bevæges og er for uanset om det er en mørk skyet vinterdag eller en solrig skyfri sommerdag.

Faste elementer

I tilknytning til en bygning vil der forekomme forskellige skyggegivende elementer. Dette kan være nabobygninger, overhæng eller sidefiner, fastmonterede ikke-variable solafskærmninger, træer og buske. Ved beregningen af solstrålingen er det nødvendigt at medtage disse skygger. I forbindelse med forenkede beregningsmetoder, f.eks. ved beregning af døgnmiddel indetemperaturen, kan der benyttes en forenklet metode, hvor der anvendes en skyggefaktor.

Permanent afskærmning – Vandret udhæng over vindue

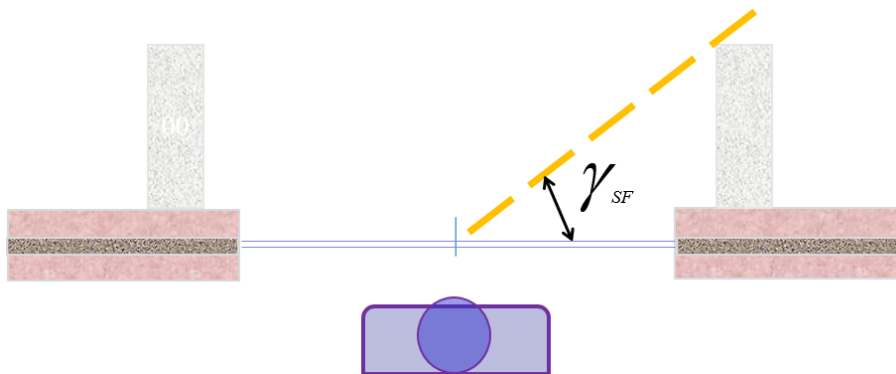
For at skærme for den direkte stråling kan et vandret udhæng benyttes. Hvor effektivt det virker er meget afhængigt af orienteringen og årstiden. For sydvendte facader vil der være en god afskærmning i sommermånederne, hvor solindfaldet ønskes reduceret og næsten ingen afskærmning i vintermånederne med den lave vintersol. For øst- og vestvendte facader har et udhæng generelt næsten ingen effekt. For at kunne vurdere udhængets størrelse i forhold til vinduet benyttes vinklen γ_{OH} , og denne måles i grader fra midten af vinduet til forkanten af udhænget, Figur 12-5 – Se også Tabel 12-11.



Figur 12-5 Størrelsen af det vandrette udhæng over vindue vurderes ud fra vinklen γ_{OH} , og denne måles i grader fra midten af vinduet til forkanten af udhænget

Permanent afskærmning – Sidefrespring ved lodret vindue

Som beskrevet ovenfor har et vandret udhæng over et vindue næsten ingen effekt for øst- og vestvendte facader. Her kan en mulighed være et sidefrespring ved vinduet for at reducere solindfaldet midt på dagen fra syd. I tilfælde af, at der ikke er noget vandret udhæng over vinduet, vil der være behov for at afskærme for sol om sommeren ved at forlænge sidespringet et stykke over vindueskanten. For at kunne vurdere sidefrespringets størrelse i forhold til vinduet benyttes vinklen γ_{SF} , og denne måles i grader fra midten af vinduet til forkanten af frespringet, Figur 12-6 – Se også Tabel 12-11.



Figur 12-6 Størrelsen af det sidefrespring ved lodret vindue vurderes ud fra vinklen γ_{SF} , og denne måles i grader fra midten af vinduet til forkanten af frespringet

Skyggefaktor (F_s)

Vist i Tabel 12-10 er skyggefaktoren (F_s) for vinduer, afhængigt af højdevinklen til det omkringliggende terræn. Er vinduet indbygget, eller er der et overhæng eller en sidefinne i tilknytning til vinduet, er det nødvendigt med en supplerende korrektionsfaktor (vist i Tabel 12-11) til skyggefaktorerne i Tabel 12-10.

For ikke at få for mange faktorer er det hensigtsmæssigt at benytte den resulterende værdi for skygger for vinduer med indbygning, udhæng, sidefinner, etc. fra Tabel 12 10 og Tabel 12 11. Den resulterede værdi opnås ved gange tallene sammen i Tabel 12 10 og Tabel 12 11, og denne værdi kan benyttes i **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet..**

Tabel 12-10 Skyggefaktorer, F_s , for vinduer og yderdøre, indbygget normalt i ydervæg og uden udhæng eller andre skyggende konstruktioner (SBI-anvisning 184, 1995)

Omgivelser	NV – NØ	Ø, S, V
Fri horisont	0,9	0,9
10° Højdevinkel	0,9	0,8
30° Højdevinkel	0,8	0,5

Tabel 12-11 Korrektion til skyggefaktorer pga. indbygning, udhæng og konstruktioner på siden af vinduer og yderdøre (SBI-anvisning 184, 1995)

	Korrektion til skyggefaktor
1) Indbygning	
Uafskærmet	+0,1
Dybt murhul	-0,1
2) Udhæng	
Lille udhæng	-0,1
Stort udhæng	-0,2
3) Konstruktion på siderne	
Lille skygge	-0,1
Stor skygge	-0,2

1) Ved normal indbygning, uafskærmet, forstås at ydervæggen springer ca. 10° frem foran rudens plan målt fra midten af ruden. For dybt murhul er denne værdi 20°.

2) Ved et lille udhæng over vindue eller yderdør forstås at udhænget springer ca. 30° frem foran vinduets plan målt midt på vinduet. Et stort udhæng springer 50° frem.

3) Ved lille skygge fra en konstruktion på siderne forstås at konstruktionen springer 30° frem foran vinduets plan målt midt på vinduet. For stor skygge springer konstruktionen 50° frem.

Selvstændige elementer

Alt efter deres placering i forhold til vinduet opdeles de selvstændige solafskærmninger på følgende måde:

- Indvendig solafskærmning
- Mellem glassene i ruden, integreret solafskærmning
- Udvendig solafskærmning

En udvendig solafskærmning er den mest effektive, da solstrålingen afskærmes inden den når ind til selve ruden. En indvendig solafskærmning giver kun begrænset afskærmning for de nye typer ruder med en lav U-værdi. Tidligere har indvendig afskærmning i form af f.eks. et indvendigt gardin foran en traditionel almindelig standard dobbelt rude (U-værdi ca. 2,9 W/m²K) haft en afskærmningsfaktor på ca. 0,5. Ved anvendelse af de nye energiruder reduceres effekten fra det indvendige gardin meget markant og får kun en størrelse på ca. 0,9. Efter solstrålingen har passeret en energirude og rammer den indvendige afskærmning vil hovedparten af solenergien afgives til lokalet som varme, og dermed være med til at forøge den operative temperatur/kølebehovet.

Udsynsklasse og Vægtningfaktor af en afskærmningstime

For at kunne vægte solafskærmninger med varierende udsynskvaliteter er disse blevet klassificerede i forskellige udsynsklasser. Dette er beskrevet i (SBI-anvisning 264, 2016b) og denne er baseret på DS/EN 14 501 (Dansk standard, 2005).

I Tabel 12-12 er vist sammenhængen mellem udsynsklasser i henhold til SBI-anvisning 264. Tabellen anvendes på følgende måde:

- Solafskærmning trukket 1/3 for i en time – timen vægtes kun 1/3
- Vægtningfaktoren ganges på antallet af timer med solafskærmning

Tabel 12-12 Kombination af Udsynsklasse og Vægtningfaktor af en afskærmningstime, som anført i (SBI-anvisning 264, 2016b) og (Dansk standard, 2005)

	Udsynsklasse for solafskærmning	Vægtningfaktor af en afskærmningstime
Afskærmning med blokeret udsyn	0	1,00
	1	0,95
	2	0,80
	3	0,60
Afskærmning med bedst udsyn	4	0,15

I mange tilfælde vil udsynsklassen ikke være kendt for en aktuel solafskærmning, og derfor er der Tabel 12-13 givet en vejledning til at vurdere udsynsklassen.

Tabel 12-13 Karakteregenskaber for afskærmningstyper, (som anført i SBI-anvisning 264 tabel 19, med enkelte justeringer efter samråd med forfatteren). (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017)

Placering	Afskærmningstype	Variant	Udsyns-klasse	Vægtning
Udvendig	Persienne, vandrette lameller, grå	Lukket	0	1,00
	Persienne, vandrette lameller, grå	45°	3	0,60
	Persienne, vandrette lameller, grå	0°	4	0,15
	Lamelskodde, flytbar	Faste	1	0,95
	Lamelskodde, flytbar	Drejelige	2	0,80
	Screen, hvid	Åbningsfaktor = 10 %	1	0,95
	Screen, lys	Åbningsfaktor = 5 %	0	1,00
	Screen, mørk	Åbningsfaktor = 3 %	0	1,00
	Screen, grå	Åbningsfaktor = 10 %	3	0,60
	Screen, grå-sort	Åbningsfaktor = 10 %	3	0,60
	Screen, grå-sort	Åbningsfaktor = 3 %	0	1,00
	Markise, mørk	Åbningsfaktor = 3 %	3	0,60
	Markise, lys	Åbningsfaktor = 3 %	3	0,60
	Markisolette, mørk	Åbningsfaktor = 3 %	2	0,80
	Markisolette, lys	Åbningsfaktor = 3 %	2	0,80
	Integreret	Integreret persienne, hvid	Lukket	0
Integreret persienne, hvid		45°	2	0,80
Integreret persienne, hvid		0°	3	0,60
Indvendig	Persienne, vandrette lameller, hvid	Lukket	0	1,00
	Persienne, vandrette lameller, hvid	45°	3	0,60
	Persienne, vandrette lameller, hvid	0°	4	0,15
	Screen, hvid	Åbningsfaktor = 3 %	0	1,00
	Screen, mørk	Åbningsfaktor = 3 %	1	0,95
	Gardiner, lyse	(Åbningsfaktor = 0 %)	1	0,95
	Gardiner, mellem	(Åbningsfaktor = 0 %)	1	0,95
	Gardiner, mørke	(Åbningsfaktor = 0 %)	0	1,00
Glas	Solafskærmende glas	LT < 0,7 og LT/g > 1,8	4	0,15
	Kraftigt solafskærmende glas	LT < 0,4 og LT/g > 1,8	3	0,60

I Tabel 12-19 er vist kravspecifikationer til indeklimaklasserne for erhverv og andet ved dimensionerende forhold, og heraf fremgår hvor mange procent af brugstiden afskærmningen er aktiv. I tabellen fremgår det at for Standard indeklimaklasse anvendes en værdi på 30%. Der benyttes en brugstid mellem kl. 7 og kl. 18. Hvis afskærmningen har delvist udsyn benyttes de angivne vægtningsfaktorer fra Tabel 12-13.

Afskærmningsfaktor F_c

I forbindelse med analyse af de termiske forhold i en bygning opstår der i mange tilfælde overtemperaturer, og for at reducere disse anvendes forskellige former for solafskærmning. Ved valg af solafskærmning er det vigtigt at kombinere hensynet til effektiv afskærmning for at reducere overtemperatur med hensynet til maksimal udnyttelse af passiv solvarme i opvarmningssæsonen, hvis denne ønskes udnyttet. I kontorbyggeri er der normalt en stor varmebelastning og dermed overskudsvarme, hvilket medfører at direkte solindfald ønskes begrænset i mange tilfælde.

Af Tabel 12-14 fremgår det, at de udvendige afskærmninger er de mest effektive, hvilket hænger sammen med, at de standser solenergien allerede før den rammer vinduet. Dette sker dels ved at strålingen bliver reflekteret fra afskærmningen, og dels ved at dens absorberede stråling afgives ved konvektion til det fri. Hvis energien først får lov til at passere ind i rummet, bliver den absorberet i bygningskonstruktionerne og afgives derefter som varme til rummet. Det er derfor en fordel ved anvendelse af indvendige afskærmninger, at de har en høj reflektans, således at de kan reflektere solindfaldet ud igen.

De fleste af de målinger, der ligger til grund for tabeller som Tabel 12-14 har været udført for to-lags ruder, hvorfor resultaterne ikke umiddelbart kan anvendes ved andre rudetyper.

For at kunne vurdere de forskellige solafskærmende foranstaltninger, er der behov for at have et tal til vurdering af afskærmningens effektivitet. Til dette anvendes afskærmningsfaktor F_c , der udtrykker andelen af solstrålingen, som går igennem rude/system (rude + afskærmning), sammenlignet med en referencerude. Denne størrelse kan enten udtrykkes ved brug af forholdet mellem g-værdier eller forholdet mellem den totale transmitterede solstråling:

$$F_c = \frac{g_{sys}}{g_{rude}} \Leftrightarrow g_{sys} = F_c \cdot g_{rude} \quad \text{Ligning 12-9}$$

Afskærmningsfaktoren udtrykker således forholdet mellem g-værdien for systemet (rude + afskærmning) og g-værdien for ruden. Af formelen ses det, at jo mindre afskærmningsfaktor des bedre afskærmning, og benævnelsen er derfor noget vildledende. Hvis der f.eks. er en rude med en afskærmning med en afskærmningsfaktor på 0,3, beskriver denne værdi at solafskærmningen lader 30 % af den totale transmitterede solstråling passere set i relation det solindfald, som den uafskærmede rude lader passere (100%). Anvendelsen af denne afskærmningsfaktor reducerer således den totale transmitterede solstråling med 70%.

I det ovenstående er kun beskrevet afskærmningsfaktor for solvarme. Dette er et væsentligt forhold ved beregning af termisk indeklima og ventilations- og kølebehov, hvilket er det relevante område for dette kapitel. Der forefindes på tilsvarende vis en afskærmningsfaktor for dagslys; men denne vil ikke blive behandlet i dette kapitel.

Det er vigtigt at være opmærksom på at g-værdien står for total transmittans af solenergi for ruden. Denne værdi rummer således summen af den direkte transmitterede solstråling og den absorberede stråling i ruden, der tilføres til rummet på den indvendige side af ruden, se Figur 12-3.

En afskærmningsfaktor skal altid angives i forhold til en referencerude. Oprindeligt blev der normalt i Danmark anvendt en reference rude bestående af en almindelig standard dobbeltrude (2 lag 4 mm glas med 12 mm luftmelletrum) med en g-værdi på 0,76. I Tabel 12-14 er vist afskærmningsfaktorer med reference til en almindelig standard dobbeltrude.

Tabel 12-14 Afskærmningsfaktorer for forskellige solafskærmninger med reference til en traditionel standard dobbeltrude. (SBI-anvisning 196, 2000)

Afskærmning	Afskærmningsfaktor	
	for solvarme	for dagslys
Ingen solafskærmning	1,0	1,0
Solafskærmning udvendig foran to lag glas		
Persienner, lyse lameller, 45°	0,22	0,18
Persienner, mørke lameller, 45°	0,12	0,01
Netrullegardiner	0,20	0,15
Markise	0,25-0,50	Afhænger af farve og udformning
Solafskærmning mellem to lag glas		
Gardiner, lyse og delvis gennemskinnelige	0,30	0,40
Gardiner, mørke og uigennemskinnelige	0,45	–
Persienner, lyse, 45°	0,35	0,25
Solafskærmning indvendig bag to lag glas		
Gardiner, lyse og delvis gennemskinnelige 0,50 0,40	0,50	0,40
Gardiner, mørke og uigennemskinnelige	0,80	–
Persienner, lyse lameller, 45°	0,55	0,25
Persienner, mørke lameller	0,80	0,03
Behandlede ruder		
Absorberende glas yderst, almindeligt glas inderst	0,65-0,75	0,50-0,70
Reflekterende glas yderst, almindeligt glas inderst	0,18-0,40	0,10-0,35

Anvendelsen af referencerude er ikke den samme i alle lande. I f.eks. England og USA benyttes en referencerude med ét lag glas med en soltransmittans på 0,87 og i Norge 0,86 (et 3 mm tykt lag

glas). Hvis der foretages sammenligninger af forskellige solafskærmninger landene imellem, er det vigtigt at være opmærksom på dette, idet der skal anvendes samme referencerude.

På tilsvarende vis er der i Tabel 12-15 vist forskellige indvendige solafskærmninger med reference til tre lags rude med energiglas. Tabellen er medtaget for at illustrere den store forskel, som opstår for indvendige solafskærmninger. Hvis en indvendig persiener med lyse lameller (lamel vinkel 45°) sammenlignes, fås en afskærmningsfaktor med en traditionel standard dobbeltrude på 0,55 og for tre-lags rude med energiglas en værdi på 0,87. Det ses således, at for indvendige afskærmninger har det kolosal stor betydning at have den korrekte reference rude ellers fås fuldstændig misvisende værdier. Anvendelsen af den indvendig persiener med lyse lameller giver således en reduktion af den totale transmitterede solstråling for en traditionel standard dobbeltrude på 45% og for en tre-lags rude energirude på 13%, svarende til en forholdsmæssig forskel på 3,5. Da der ved alle nye bygninger og renovering af bestående altid vil blive anvendt ruder med lav U-værdi vil indvendige afskærmninger ikke have særlig stor effekt. Indvendige afskærmninger anvendes derfor i dag primært for at undgå blænding fra solen og ikke for at reducere energi fra solvarme.

Tabel 12-15 Afskærmningsfaktorer for forskellige indvendige solafskærmninger med reference til tre lag energiglas

Afskærmning	Afskærmningsfaktor	
	for solvarme	for dagslys
Solafskærmning indvendig bag tre lag glas		
Rullegardin, lyse og delvis gennemsiknelige	0,89	0,57
Gardiner, mørke og uigennemsiknelige	0,80	0,06
Persiener, lyse lameller, 45°	0,87	0,34

Eksemplet viser således med al tydelighed, at det er af afgørende betydning ved vurdering af solafskærmninger, at den vurderes foran den aktuelle rude og afskærmningsfaktoren ændre sig alt efter, hvilken rude som anvendes. I Danmark anvendes der i dag energiruder med mindst én lavemissionsbelægning, hvilket resulterer i at det er nødvendigt specifikt at beregne afskærmningsfaktoren for den aktuelle rude. Dette vil i princippet give et meget stort antal variationer. For at forenkle det har den europæiske standard DS/EN 14501 (Dansk standard, 2005) defineret fire referenceruder, som fabrikanter af solafskærmninger kan beregne deres værdier i forhold til. I Tabel 12-16 er vist uddrag af tabellen for de fire referenceruder A, B, C og D. Den fulde tabel er også gengivet i (SBI-anvisning 264, 2016).

Tabel 12-16 Anvendte referenceruder i DS/EN 14501 (Dansk standard, 2005). Glas angives udefra og indefter. I standarden er rude D betegnet "solar reflective (sr)". Baseret på (SBI-anvisning 264, 2016b)

Rudenavn	Rudetype	Antal Glas	Belægning	Termiske data	Energi data			
					U-værdi	G-værdi	Transmittans	Reflektans udv
DS/EN 14501:2005 Annex A-D	Glastykkelse og afstand	u	lavemissions-belægning overflade talt udefra	U-værdi	G-værdi	Transmittans	Reflektans udv	Reflektans ind
	mm			U_g (W/m ² K)	g (%)	τ_e (%)	ρ_e (%)	ρ'_e (%)
A	4 klar	1	-	5.8	0.85	0.83	0.08	0.08
B	4klar /12luft/4 klar	2	-	2.9	0.76	0.69	0.14	0.14
C	4 klar/16Ar/4lowE	2	3	1.2	0.59	0.49	0.29	0.27
D	4sr,lowE/16Ar/4 klar	2	2	1.1	0.32	0.27	0.29	0.38

Beregning af g-værdi for systemets solenergitransmittans, g_{sys}

Beregning af systemets solenergitransmittans, g_{sys} er kompliceret at beregne, hvis det skal gøres helt korrekt. I stedet er der i (SBI-anvisning 264, 2016b) beskrevet en forenklet metode baseret på (Dansk Standard, 2007b). Denne standard er nu trukket tilbage og erstattet med (Dansk Standard, 2017). Metoden er baseret på stråling vinkelret på solafskærmningen, som antages parallel med ruden. Denne forenkling giver anledning til en mindre fejl på mellem -0,02 og +0,10. Da værdien i de fleste tilfælde resulterer i en større værdi (op til 0,10) er det på den sikre side med hensyn til at beregne ventilationsluftmængder / kølelast i sommerperioden. Da metoden er baseret på stråling vinkelret på solafskærmningen, tager metoden ikke hensyn til, hvis indfaldsvinklen har betydning for størrelsen på afskærmningsfaktoren.

Systemets solenergitransmittans g_{sys} beregnes ifølge (SBI-anvisning 264, 2016b) for tre typer afskærmninger:

- g-værdi for udvendige afskærmninger
- g-værdi for indvendige afskærmninger
- g-værdi for integrerede afskærmninger (mellem glassene)

I formlerne benyttes varmeoverføringskoefficient (varmeovergangstal), og da dette i standarden er benævnt G anvendes dette symbol i de følgende formler. Dette er ikke i overensstemmelse med den danske notation hvor h benyttes.

Symboler for beregning af g-værdier i Ligning 12-10 til Ligning 12-12

For at gøre det mere overskueligt er symboler for Ligning 12-10 til Ligning 12-12 medtaget i selve teksten, symboler hentet fra (SBI-anvisning 264, 2016b):

$\tau_{e,B}$	Transmittans af direkte sol for afskærmningen [-]
$\rho_{e,B}$	Reflektans for direkte sol for afskærmningen [-]
$\alpha_{e,B}$	Absorbtans for direkte sol for afskærmningen [-]
g	g-værdi for rude. Total transmittans af solenergi for ruden. Denne værdi er summen af den direkte transmitterede solstråling og den absorberede stråling i ruden, der tilføres til rummet på den indvendige side af ruden [-]
g_{sys}	g-værdi for systemets solenergitransmittans [-]
U_g	Termisk transmissionskoefficient (U-værdi) af ruden [W/m ² K]
e	Indeks for energi [-]
B	Indeks for afskærmning (b for blind) [-]
G	Varmeoverførselskoefficient (anvendt i Dansk Standard, 2007b) [W/m ² K]

g-værdi for udvendige afskærmninger

Systemets solenergitransmittans g_{sys} for udvendige afskærmninger beregnes ifølge Ligning 12-10 – Bemærk, denne formel er rettet i forhold til (SBI-anvisning 264, 2016b), hvor der er en mindre fejl:

$$g_{\text{sys}} = \tau_{e,B} \cdot g + \alpha_{e,B} \cdot \frac{G_{\text{udv}}}{G_2} + \tau_{e,B} \cdot (1 - g) \cdot \frac{G_{\text{udv}}}{G_1}$$

$$\text{hvor: } \alpha_{e,B} = 1 - \tau_{e,B} - \rho_{e,B} \quad G_1 = 5 \text{ W / m}^2 \text{ K} \quad G_2 = 10 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Ligning 12-10

$$G_{\text{udv}} = \left(\frac{1}{U_g} + \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \right)^{-1}$$

g-værdi for indvendige afskærmninger

Systemets solenergitransmittans g_{sys} for indvendige afskærmninger beregnes ifølge Ligning 12-11 – Bemærk, denne formel er rettet i forhold til (SBI-anvisning 264, 2016b), hvor der er en mindre fejl:

$$g_{\text{sys}} = g \cdot (1 - g \cdot \rho_{e,B} - \alpha_{e,B} \cdot \frac{G_{\text{indv}}}{G_2})$$

$$\text{hvor: } \alpha_{e,B} = 1 - \tau_{e,B} - \rho_{e,B} \quad G_2 = 30 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Ligning 12-11

$$G_{\text{indv}} = \left(\frac{1}{U_g} + \frac{1}{G_2} \right)^{-1}$$

g-værdi for integrerede afskærmninger (mellem glassene)

Systemets solenergitransmittans g_{sys} for integrerede afskærmninger beregnes ifølge Ligning 12-12:

$$g_{\text{sys}} = g \cdot \tau_{e,B} + g \cdot (\alpha_{e,B} + (1-g) \cdot \rho_{e,B}) \cdot \frac{G_{\text{int}}}{G_3}$$

$$\text{hvor: } \alpha_{e,B} = 1 - \tau_{e,B} - \rho_{e,B} \quad G_3 = 3W / m^2 K$$

Ligning 12-12

$$G_{\text{int}} = \left(\frac{1}{U_g} + \frac{1}{G_3} \right)^{-1}$$

Termisk komfort

Solafskærmning ved store vinduesarealer har anselig betydning for den termiske komfort. Ifølge (SBI-anvisning 264, 2016b) kan det forventes, hvis glasset udgør mere end 30-35 % af facaden (målt indvendigt), at der kan være behov for en udvendig solafskærmning foran vinduerne.

Med fremkomsten af nye rudetyper med f.eks. en g -værdi på 37 % med en tilhørende høj lys transmittans på 68 % er det blevet muligt f.eks. at reducere solindfaldet markant uden at lys transmittansen reduceres særligt meget.

Anvendes ruder med en g -værdi på 28 % med en lys transmittans på 52 % eller lavere værdier for disse to værdier, åbner det op for alternative muligheder, hvor den udvendige solafskærmning eventuelt kan erstattes af solafskærmende ruder kombineret med indvendige gardiner mod blænding. Ved moderne byggeri bør denne løsning vurderes fremfor kun at undersøge anvendelse af udvendig solafskærmning. Det bør imidlertid præciseres, at anvendelse af denne løsning kun bør ske efter en analyse med et dynamisk simuleringsprogram.

Solafskærmninger skal altid anvendes med varsomhed, da de begrænser udsynet i forhold til anvendelsen af solafskærmende ruder, hvor udsynet ikke reduceres. Herudover fungerer en udvendig solafskærmning kun, hvis den er i brug. Hvis brugeren føler sig generet af den udvendige solafskærmning, fordi den bevæger sig for meget op og ned eller er for alt for mange timer, kan det resultere i at brugerne forlanger anvendelsen af den udvendige solafskærmning reduceret.

Opmærksomheden henledes til, at hvis afskærmningerne ikke bliver udnyttet fuldt ud, vil de realistiske afskærmningsfaktorer blive højere (f.eks. afskærmningen kun for i tre af fire vinduer i et kontor, eller den ikke er rullet helt ned). Desuden er de ikke i permanent brug, hvorfor solindfaldet kun skal multipliceres med afskærmningsfaktoren i de timer, hvor den anvendes.

En afskærmning for solen har den fordel, at den reducerer sol indstrålingen, og dette bevirker at kølebelastningen bliver mindre eller stigningen i den operative temperatur reduceres.

I området nær vinduet vil den lokale strålingstemperatur være meget påvirket af solafskærmningen. Indvendig solafskærmning vil i de fleste tilfælde øge afskærmningens indvendige

overfladetemperatur, hvilket vil resultere i en højere værdi for den lokale operative temperatur. I modsætning til dette vil en udvendig solafskærmning sænke rudens indvendige overfladetemperatur og dermed reducere den lokale operative temperatur.

Screens

Screens består af udspændte solafskærmningsgardiner og benyttes i stor udstrækning til moderne byggeri. De udformes ofte som rullegardiner, der kan placeres udvendigt, indvendigt eller integreret i ruden og kan trækkes ned i den ønskede position. Der findes et meget stort antal forskellige screenduge med en anelig variation af egenskaber. I mange tilfælde giver en screendug mulighed for udsyn igennem den, og dermed har brugeren stadig en form for kontakt med omgivelserne selvom den er i brug. Ved beslutning af hvilken screendug, som ønskes benyttet, er det nødvendigt at vurdere screendugens solafskærmende og blændingsbeskyttende egenskaber i relation til i hvilken grad screendugen giver udsyn. En mere detaljeret beskrivelse af dette kan findes i (SBI-anvisning 264, 2016b). Opmærksomheden henledes på at brugere af et lokale med hensyn til udsyn hellere vil foretrække, at der ikke er nogen afskærmning overhovedet. Det er derfor vigtigt at en screendug ikke er trukket for mere end maksimalt fem timer pr. dag, selvom det rent energimæssigt kan være en fordel, at den er trukket for i flere timer. Det er altid vigtigt at sætte sig i brugerens sted og sørge for en rimelig balance imellem afskærmning og det frie udsyn.

Beregning af transmitterede solstråling gennem rude

I tabellerne i Afsnit Appendiks 12.19 er vist værdierne for en skyfri dag for den direkte transmitterede solstråling gennem en uafskærmet reference dobbeltrude med en g-værdi på 0,76. Tabellerne er baseret på (DANVAK, 2006) og beregnet for den 21. i hver måned for de 8 orienteringer: syd, sydvest, vest, nordvest, nord, nordøst, øst og sydøst, se Tabel 12-22 til Tabel 12-29. Herudover er der i Tabel 12-30 vist den transmitterede diffuse himmelstråling gennem en uafskærmet reference dobbeltrude. Alle tabeller er vist i enheden W/m^2 .

På denne baggrund kan følgende grundlæggende værdier findes for en skyfri dag for den transmitterede stråling gennem en uafskærmet reference dobbeltrude. Da der indgår mange symboler er disse medtaget i det følgende for at give en bedre oversigt.

Symboler for beregning af transmitterede solstråling gennem rude

- A_{rude} [m^2], Areal af rude
- A_{vin} [m^2], Areal af vindue
- F_c [-], Afskærmningsfaktor, findes ved brug af Ligning 12-9
- F_{rude} [-], Korrektionsfaktor for rudeareal i forhold til vinduesareal: $F_{rude} = A_{rude}/A_{vin}$
- F_s [-], Skyggefaktor, Korrektion for skygger på vindue (ingen skygge: $F_s = 1,0$). Faktoren er den resulterende værdi for skygger for vinduer med indbygning, udhæng, sidefiner, etc. – se f.eks. Tabel 12 10 og Tabel 12 11 resulterende værdi (tallene ganget sammen)
- g_{ref} [-], g-værdi for reference dobbeltrude med en g-værdi på 0,76
- g_{rude} [-], g-værdi for aktuel rude der anvendes
- $I_{t,dir}$ [W/m^2], Transmitteret direkte solstråling gennem rude: Tabel 12-22 til Tabel 12-29

- $I_{t,dif}$ [W/m^2], Transmitteret diffus himmelstråling gennem: Tabel 12-30
- Q_{sol} [Wh], Energitilskud fra solindfald, hvis tiden regnes i timer
- Δt_h [h], Længde af tidsperiode i timer
- Φ_{sol} [W], Solindfald gennem vinduets rudeareal

Transmitteret solstråling gennem rude på basis af data fra transmitteret stråling gennem standard reference rude

På denne baggrund kan det aktuelle solindfald beregnes på timebasis for et aktuelt vindue, idet der korrigeres for parametre beskrevet ovenfor. Ligning 12-13 er baseret på, at det transmitterede solindfald ($I_{t,dir}$ og $I_{t,dif}$) gennem en referencerude kendes, og denne referencerude har en g-værdi på g_{ref} .

Effekttilskud fra transmitteret solstråling gennem rude, effekt:

$$\Phi_{sol} = A_{vin} \cdot F_{rude} \cdot F_s \cdot F_c \cdot \frac{g_{rude}}{g_{ref}} \cdot (I_{t,dir} + I_{t,dif}) \quad (W)$$

Ligning 12-13

$$\Phi_{sol} = A_{rude} \cdot F_s \cdot F_c \cdot \frac{g_{rude}}{g_{ref}} \cdot (I_{t,dir} + I_{t,dif}) \quad (W)$$

I Danmark anvendes en reference dobbeltrude med en g-værdi på 0,76, hvorved fås:

$$\Phi_{sol} = 1,316 \cdot A_{vin} \cdot F_{rude} \cdot F_s \cdot F_c \cdot g_{rude} \cdot (I_{t,dir} + I_{t,dif}) \quad (W)$$

Ligning 12-14

$$\Phi_{sol} = 1,316 \cdot A_{rude} \cdot F_s \cdot F_c \cdot g_{rude} \cdot (I_{t,dir} + I_{t,dif}) \quad (W)$$

For at beregne energitilskud fra transmitteret solstråling gennem rude er det nødvendigt at gange med tiden. Hvis tiden har enheden timer fås enheden Wh:

$$Q_{sol} = A_{vin} \cdot F_{rude} \cdot F_s \cdot F_c \cdot \frac{g_{rude}}{g_{ref}} \cdot (I_{t,dir} + I_{t,dif}) \cdot \Delta \tau_h \quad (Wh)$$

Ligning 12-15

$$Q_{sol} = A_{rude} \cdot F_s \cdot F_c \cdot \frac{g_{rude}}{g_{ref}} \cdot (I_{t,dir} + I_{t,dif}) \cdot \Delta \tau_h \quad (Wh)$$

Hvis tiden er 1 time bliver den numeriske størrelse på effekten i W og energitilskuddet i Wh den samme.

12.11. Udetemperatur, Vejrdata, Reference år

Dette afsnit omhandler:

- Udetemperatur
 - Maksimal timemiddeludetemperatur
 - Døgnmiddeludetemperatur
- Vejrdata, Reference år
 - Dynamiske simuleringsprogrammer

Afsnittet er delt op i to dele, da afsnittene henvender sig til to forskellige hovedkategorier / løsningsmetoder:

- Stationære forhold – Maksimal timemiddelindetemperatur, Døgnmiddelindetemperatur
- Ikke-stationære forhold – Dynamiske simuleringsprogrammer

Udetemperatur

Differensen mellem rumtemperaturen og udetemperaturen er bestemmende for rummets transmissions- og fugetab. Udetemperaturen kan f.eks. hentes fra det danske referenceår, der på timebasis angiver de vigtigste klimaparametre, se næste afsnit.

Ved beregninger af overslagsmæssig karakter af indetemperaturen kan udetemperaturen hentes fra relevante referenceår, hvor en relevant dag findes på baggrund af opstillede kriterier, f.eks. en varm skyfri dag med store temperaturudsving i løbet af et døgn.

Hvis der ikke findes klimadata for den pågældende lokalitet, eller der ikke er ønske om at anvende referenceåret, kan udetemperaturen angives ved en cosinusfunktion med maksimum f.eks. klokken 14.00:

$$\theta_u = \bar{\theta}_u + \Delta\theta_u \cdot \cos \frac{2 \cdot \pi (\tau_h - 14)}{24} \quad \text{Ligning 12-16}$$

I mange tilfælde er det udetemperaturen på klare solskinsdage, der ønskes beregnet. For at kunne gøre dette, er der i Tabel 12-17 angivet maksimal døgnmiddel og typiske døgnvariationer af udetemperatur på klare dage i de enkelte måneder baseret på (SBI-anvisning 196, 2000).

Tabel 12-17 Maksimal døgnmiddel og typiske døgnvariationer af udetemperatur på klare dage i de enkelte måneder ud fra 15 års vejrdata. Bemærk dette er ikke data fra ” DRY Danmark 2013”. (SBI-anvisning 196, 2000)

Måned	Udetemperatur, °C Maks. døgnmiddel	Udetemperatur, °C Typisk variation
Januar	3,9	5,0
Februar	4,2	6,0
Marts	6,3	7,5
April	11,2	9,0
Maj	15,9	11,5
Juni	20,0	12,0
Juli	21,0	12,0
August	20,5	11,0
September	16,9	9,0
Oktober	13,7	7,0
November	10,0	5,0
December	6,0	5,0

Vejrdata, Reference år, DRY Danmark 2013

Indledning

Dette afsnit om vejrdata og referenceårer taget med, da der undertiden opstår misforståelser med hensyn til baggrunden for referenceår. Referenceår har data på timebasis og anvendes i forbindelse med beregning af bygningers varmebalance med anvendelse af dynamiske simuleringssystemer. Dette kapitel har ikke sit fokus på årssimuleringer, og derfor er vejrdata for Danmark kun omtalt ganske kort, idet afsnittet er baseret på (Wang et al., 2012) (Wang et al., 2013), og mere detaljeret information kan findes i denne publikation. Referenceår er timebaserede vejrdata, der beskriver klimaets naturlige sammensætning. De parametre, der indgår, afhænger af formatet (DRY, TRY, TMY, etc.) på de indgående vejrdata; men nogle af de vigtigste er følgende:

- Global solstråling
- Direkte solstråling
- Diffus solstråling
- Lufttemperatur
- Dugpunkts temperatur
- Vindhastighed
- Vindretning
- Barometertryk
- Skydække

Nogle af disse data er målte; mens andre er beregnede værdier ud fra de målte. For mange lokaliteter verden over er der blevet udarbejdet referenceår. Det er imidlertid Europa og USA, der er bedst dækket ind, hvorimod det er mere sparsomt i den øvrige del af verden.

En af de misforståelser, der ofte opstår i forbindelse med beregning af døgnmiddelindetemperaturen for varme skyfrie solrige dage, er at en bruger anvender data fra referenceåret, hvilket **IKKE** er korrekt. Hvis der for eksempel ønskes beregnet døgnmiddelindetemperaturen for den 15. august for en varm skyfri solrig dag, skal data således ikke hentes fra referenceåret, se i stedet afsnittet om udetemperatur og solindfald.

Det nye Design Reference Year – DRY Danmark 2013

Det nye Design Reference Year for Danmark dækker perioden 2001-2010. Ved henvisning til referenceåret benyttes året 2013: "*DRY Danmark 2013*". Programmet BSim benytter følgende placering for disse vejrdata: breddegrad 55,793°N og længdegrad 12,16°Ø.

Der er i denne nye version en zone-inddeling af landet, hvorved data for et bestemt område kan vælges for at give den bedste repræsentation af den aktuelle beliggenhed.

I det nye datasæt er der inkluderet fire målte værdier og disse datasæt består primært af time-midler:

- Global stråling
- Temperatur
- Relativ fugtighed
- Vindhastighed

I tillæg er der to beregnede parametre baseret på den målte globale stråling:

- Diffus stråling
- Illuminans

Danmark er blevet opdelt i et antal zoner for hver parameter. Zonerne er udvalgt med henblik på at have nogenlunde samme klimatologiske variationer hen over året og døgnet. For den enkelte zone er der for hver parameter udvalgt en DMI station, således at den repræsenterer zonen bedst muligt.

Ved opbygning af datasættet er der anvendt time-midler for de indgående data. Opbygningen af referenceåret er baseret på 12 typiske måneder fra 2001 til 2010. De enkelte måneder er håndplukket til at repræsentere den karakteristiske klimatologi i Danmark hen over året. De måneder, som er anvendt i referenceåret er vist i Tabel 12-18.

Tabel 12-18 DRY året består af DMI data fra de angivne år. (Wang et al., 2012).

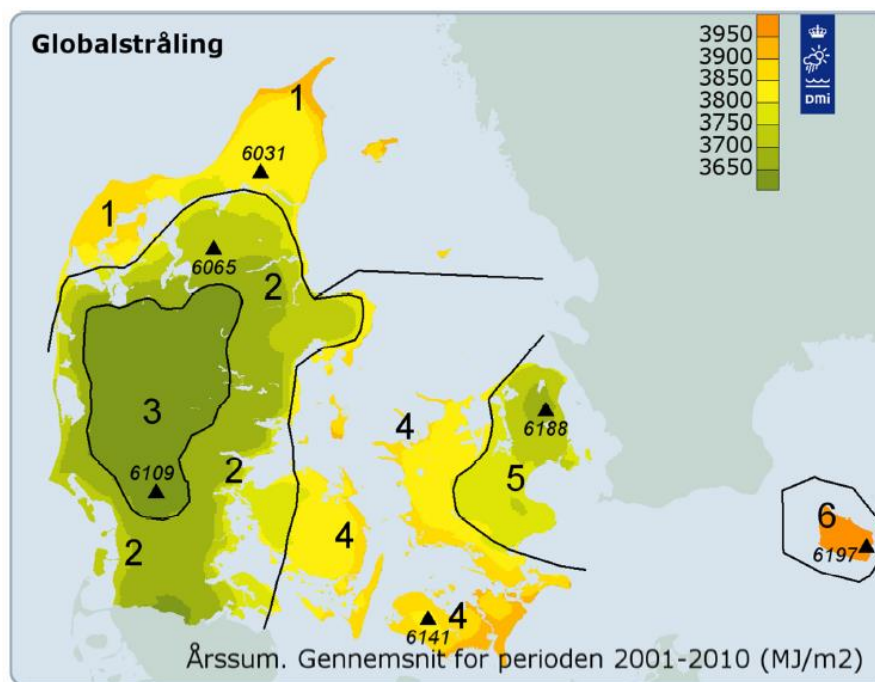
Måned	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Maj	Juni	Juli	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dec.
År	2009	2009	2006	2010	2006	2005	2009	2009	2009	2008	2010	2009

Zoner

Der er fortaget en zoneopdeling for de fire målte datasæt:

- Global stråling
- Temperatur
- Relativ fugtighed
- Vindhastighed

Et eksempel på en zoneopdeling for global stråling er vist på Figur 12-7. Alle de fire kort med zoneinddeling er vist i (Wang et al., 2012) med tilhørende detaljeret beskrivelse.



Figur 12-7 Zoneinddeling af Danmark til brug i DRY for global stråling. Kilde: (Wang et al., 2012) *venter for svar mht. tilladelse*

12.12. Varmebalance – Termisk indeklima

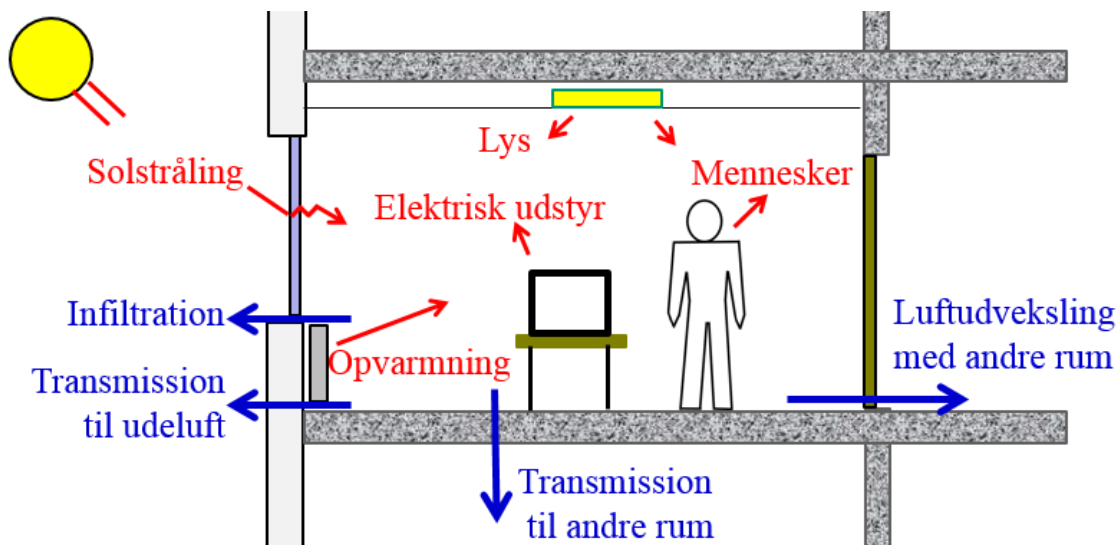
Det termiske indeklima og energiforbruget i et rum er resultatet af et kompliceret samspil mellem bygningens udformning, de termiske belastninger, klimaanlægget og udeklimaet. For at få et tilfredsstillende termisk indeklima skal de nødvendige luftmængder til de enkelte rum beregnes. Beregningen af den nødvendige luftmængde er for et givet rum afhængig af interne belastninger, eksterne belastninger fra solindfald (herunder anvendelse og brug af solafskærmning), skyggeforhold, anvendelse af køling af ventilationsluft inklusive acceptabel indblæsning af undertemperatur, antal timer med anvendelse af ventilation, antal timer med anvendelse af natteventilation, den akkumulerende masse af lokalet, etc. Alle disse faktorer giver et kompleks samspil, der stiller krav om en grundig forståelse af hele optimeringsprocessen. Det primære krav er, at det i løbet af døgnet er muligt at bortlede så meget varme som muligt – baseret på så korrekte baggrundsdata som muligt. Disse baggrundsdata må baseres på en ingeniørmæssig vurdering. F.eks. vil almenbelysningen være tændt på en skyfri dag i de timer, hvor solafskærmningen ikke er for? Der er ikke noget entydigt svar på dette. En eventuel automatisering kan være med til at styre brugen; men denne kan blive overstyret af personerne, som opholder sig i bygningen.

For at gøre rede for dette er det nødvendigt at opstille en varmebalance for rummet. De effekter, der indgår i varmebalancen, er illustreret på Figur 12-8. For et rums varmebalance skal der til ethvert tidspunkt gælde, at den tilførte varmestrøm er lig med den bortledte varmestrøm, idet der medregnes den varmeeffekt, der tilføres eller afgives fra varmeakkumulerende bygningsdele.

Varmebalancen kan benyttes til at beregne det termiske indeklima, og dermed bestemme de nødvendige luftmængder, som ventilationsanlægget skal levere for at skabe tilfredsstillende temperaturforhold. Til løsning af denne opgave kan benyttes tre metoder:

- 1) Maksimal timemiddelindetemperatur (Øjebliksværdi)
- 2) Døgnmiddelindetemperatur
- 3) Beregninger på timebasis med dynamiske simuleringssystemer

Ønskes en detaljeret beregning af termisk indeklima ved projektering af bygninger, bliver metode 3 anvendt med brug af et dynamisk simuleringssystem, hvor temperaturforhold og energiforbrug beregnes på timebasis. Et dynamisk program vil således kunne beregne et af kravene om, at der højst må være en temperatur på over henholdsvis 26 °C 100 timer og 27 °C 25 timer i arbejdstiden i løbet af året. Det viser sig imidlertid, at dette kan give høje resultater for temperaturen i sommermånederne, og det kan derfor anbefales, også at se på antallet af timer over 25 °C, for at få en bedre vurdering af problemer med eventuelle overtemperaturer. En anden fordel ved en dynamisk beregning er, at temperaturen om morgenen kan beregnes relativt præcist således, at anvendelse af nattekøling kan tilpasses så morgentemperaturen ikke bliver for lav. Dette vil ikke være muligt med de to andre metoder, som er mere forenklede.



Figur 12-8 Den samlede varmebalance for et rum

Der kan også anvendes metode 2 "Døgnmiddelindetemperatur" i den indledende fase og således dimensionere efter en døgnmiddelindetemperatur på 23 °C.

En detaljeret analyse ved brug af metode 3 med dynamiske programmer BSim, IDA ICE, etc. kræver imidlertid en del specialkompetence. For at få mulighed for at udføre en enkel tilnærmet beregning af det termiske indeklima foreslås brugen af metode 1 "Maksimal timemiddelindetemperatur" og metode 2 "Døgnmiddelindetemperatur" til at anslå strategien for ventilationen af bygningen, som beskrevet ovenfor.

De tre metoder, der fokuseres på i dette kapitel, bliver gennemgået i de følgende tre afsnit:

- Afsnit 0 – Maksimal timemiddelindetemperatur – Metode 1
- Afsnit 12.14 – Døgnmiddelindetemperatur – Metode 2
- Afsnit 12.15 – Dynamiske simuleringssystemer – Metode 3

Hvis der anvendes metode 1 med "Maksimal timemiddelindetemperatur" (Øjebliksværdi) med den dertil hørende dimensionsgivende varmeeffekt, fås i de fleste tilfælde alt for store værdier.

For at få mere præcise resultater og dermed bedre energiøkonomiske løsninger, anvender rådgivere i forbindelse med projektering metode 3, "Dynamiske simuleringssystemer" til beregning af temperaturforhold og energiforbrug på timebasis, f.eks. BSim, IDA ICE, Energy+, Archsim. Denne metode vil imidlertid for mere traditionelle bygninger være relativt tidskrævende og vil derfor ikke altid blive benyttet.

Hvilken metode der anvendes afhænger i høj grad af den stillede opgave, og hvilke krav der stilles til resultaterne. Problemstillingen kan sammenlignes med en bueskytte, der skyder til måls efter en skive med forskellige cirkler, der bliver større og større. Den inderste cirkel kræver en meget detaljeret præcis analyse med metode 3 med et dynamisk simuleringssystem, hvor resultaterne vurderes meget nøje. Er kravene mere løse, og der kun kræves, at der rammes inden for skiven, kan metode 2 "Døgnmiddelindetemperatur" med fordel benyttes.

Uanset hjælper det ikke noget at benytte metode 3 med et dynamisk simuleringsprogram, hvis personen, som udfører beregningerne, ikke har de nødvendige kvalifikationer. Dette kan resultere i, at udfaldet rammer helt ved siden af skiven, uden at nogen opdager det, fordi der er anvendt et fint dynamisk simuleringsprogram, og dokumentationen er mangelfuld. En kort rapport baseret på et dynamisk simuleringsprogram, der viser antallet af timer over 26 °C, er ikke nogen dokumentation på, at de udførte beregninger er korrekte! En hurtig supplerende beregning med metode 2 "Døgnmiddelindetemperatur" kan være en god kontrolregning.

Hvis der fra bygherrens side stilles meget specifikke krav om f.eks. antal timer over 26 °C / 27 °C i arbejdstiden, minimumstemperatur om morgenen, etc. kan metode 1 og 2 ikke benyttes.

Hvis projektet er i en indledende fase, hvor der kun ønskes et overslag for ventilationsanlæggets størrelse kan de enklere metoder anvendes:

- Metode 1 – Maksimal timemiddelindetemperatur
- Metode 2 – Døgnmiddelindetemperatur

Hvis der fokuseres på den værste time med brug af metode 1 "Maksimal timemiddelindetemperatur" vil det resultere i overdimensionerede anlæg og dermed fordyrelse af det samlede projekt, og et anlæg der ikke kører optimalt i den normale driftstilstand. Anvendelse af metode 2 "Døgnmiddelindetemperatur" for en varm skyfri dag vil resultere i lavere ventilationsluftmængder afhængig af den valgte strategi.

Ved analyse af et lokale med en meget stor konstant intern varmebelastning over en koncentreret periode på nogle timer i kombination med en lille ekstern varmebelastning fra solindfald vil den interne varmebelastning blive den dominerende faktor. Her vil den akkumulerende masse have begrænset indvirkning på resultatet. Dette kan være aktuelt ved analyse af et auditorium, hvor den store interne varmebelastning fra personer over nogle timer vil være dominerende, og i dette tilfælde kan metode 1 "Maksimal timemiddelindetemperatur" være velegnet, hvorimod metode 2 "Døgnmiddelindetemperatur" skal benyttes med stor forsigtighed, og muligvis vil give for lave resultater. Det bedste resultat vil blive opnået ved anvendelse af metode 3 med en dynamisk simulering; men dette vil også være langt mere tidskrævende, og muligvis ikke give så meget lavere ventilationsluftmængder.

Ved anvendelse af de mere detaljerede dynamiske indeklimate simuleringer opnås den største præcision og de mest optimale størrelser på ventilationsanlægget og de mindste ventilationsluftmængder. Det giver således en god gevinst at bruge ekstra tid på anvendelse af dynamiske indeklimate simuleringer. Det er dog vigtigt at gøre opmærksom på, at der er en række faldgrupper ved anvendelse af dynamiske indeklimate simuleringer, hvor der kun fokuseres på at beregne alle årets timer med tilhørende antal timer over 26 °C/27 °C.

En anden problemstilling er de opstillede krav fra bygherren. Er disse krav overhovedet rimelige eller vil de give anledning til meget overdimensionerede ventilationsanlæg. Et eksempel kan være en bygherre, der ønsker sin bygning dimensioneret til 500 personer og alle de 500 personer er på arbejde 100% i 11 timer pr. dag mandag til fredag hele året rundt. Dette vil give en helt urealistisk belastning på bygningen samt resultere i overdimensionerede ventilationsanlæg, der ikke vil køre

optimalt og være dyre i indkøb og i drift. Her vil det fra rådgiverens side være tilrådeligt at gå ind i en dialog med bygherren angående disse urealistiske krav og finde baggrunden for kravene. Hvad er baggrunde for kravene? Måske er kravene blot en afskrift af krav fra andre byggerier, uden at der i det pågældende tilfælde er foretaget en konkret vurdering. Alternativt kan rådgiveren komme med to forslag: 1) Baseret på de urealistiske krav, 2) Egne opstillede rimelige krav.

Baggrund for anvendelse af beregninger i byggeprocessen

Sædvanligvis vil en bygherre ansætte en rådgiver til at udarbejde udbudsmaterialet for en given bygning, og denne rådgiver vil i mange tilfælde anvende dynamiske indeklimate simuleringer for at beregne det termiske indeklimate i bygningen. Resultatet af disse beregninger bliver efterfølgende dokumenteret i en mindre rapport, hvoraf det i en tabel fremgår, hvor mange antal timer temperaturen er over 26 °C/27 °C. På denne baggrund ser det ud til, at det termiske indeklimate er opfyldt. Efterfølgende bliver bygningen sendt i udbudsrunde, hvor en række konsortier byder ind sammen med deres rådgivere.

Når et konsortium efterfølgende har vundet udbudsrunderen vil de bede deres rådgivere om at detailprojektere bygningen. Da den nye rådgiver ofte kun har adgang til den korte rapport med en tabel over antal timer over 26 °C/27 °C, og dermed ikke har adgang til basis materialet for de udførte dynamiske indeklimate simuleringer; vil det være umuligt at vide om beregninger er i orden. I almindelighed vil det være en tillidssag om den nye rådgiver har tiltro til de oprindelige simuleringer eller vil gå i gang forfra med sine egne simuleringer. Dette resulterer i et dobbeltarbejde.

Kravspecifikationer til indeklimateklasser

Dette og det følgende afsnit hører egentlig hjemme under metode 3 ”Dynamiske simuleringer”; men da dele af informationerne er relevante for metode 2 ”Døgnmiddelindetemperatur” er det valgt at inkludere afsnittene her.

Der er i (Branchevejledning for indeklimateberegninger, 2017) udarbejdet kravspecifikationer til indeklimateklasserne ved de dimensionerende forhold (Tabel 12-19) og disse inkluderer toleranceoverskridelser med hensyn til antal timer over specifikke temperaturer for den operative temperatur (Tabel 12-20, denne tabel vedrører kun metode 3).

Temperaturforhold

For en given bygning har den akkumulerende masse stor betydning for hvor stor temperaturudsvinget vil være i løbet af en dag. For tunge bygninger med en høj anvendelse af beton vil der være en stor akkumulerende masse, der vil bidrage til at dæmpe temperatursvingningerne. Dette vil være med til at give et mere behageligt termisk indeklimate, eftersom temperatursvingninger i høj grad er noget, der klages over, hvorfor det bør underkastes et nøje eftersyn ved vurderingen af resultater. Lette bygninger giver anledning til store temperatursvingninger, da der ikke er nogen nævneværdig akkumulerende masse. Det er derfor af stor betydning for lette rum at undgå et stort solindfald og stor intern varmeudvikling.

Tabel 12-19. Kravspecifikationer til indeklimaklasserne for erhverv og andet ved dimensionerende forhold. (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017).

Indeklimaklasse	Minimum	Standard	Ambitiøs
<i>Operativ temperatur i °C</i>			
-sommer (maj – september)	22,0-27,0	22,0-26,0	22,5-25,5
-overgang (april og oktober)	21,0-27,0	21,0-26,0	21,0-25,5
-vinter (november – marts)	21,0-25,0	21,0-24,5	21,0-24,0
<i>Træk og lufthastigheder</i>			
Trækrisiko (draught rate), maks. ¹	25 %	20 %	15 %
<i>Solafskærmningstid i procent af brugstiden</i>			
Andel af brugstid, hvor afskærmningen er aktiv ²	30 %	20 %	12 %
<i>Atmosfærisk indeklimate i ppm</i>			
CO ₂ -koncentration (udeniveau på 400 ppm)	1200 ³	1000	900

¹ For rum med stillesiddende aktivitet stiller bygningsreglementet krav om en maksimal trækrisiko på 20 %. Trækrisiko vurderes for udvalgte situationer og ikke som en del af indeklimasimuleringen.

² Der evalueres kun på den del af brugstiden, der ligger mellem kl. 7 og kl. 18. For afskærmninger med delvis udsyn kan benyttes vægtningsfaktorer angivet i Tabel 12-12 og Tabel 12-13.

³ I dagsinstitutioner og undervisningsrum i skoler og lignende stiller Bygningsreglementet krav til maksimalt 1000 ppm for dimensionerende forhold.

Tabel 12-20. Toleranceoverskridelser, som er ens for indeklimaklasser Minimum, Standard og Ambitiøs i forhold til de opstillede krav til den operative temperatur. (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017).

Toleranceoverskridelser for operativ temperatur	ved 5 arbejdsdage pr uge	ved 7 arbejdsdage pr uge
<i>Sommer og overgangsperiode (april – oktober)</i>		
-timer med overskridelse af øvre temperaturgrænse	Maks. 100 timer	Maks. 140 timer
-timer m. overskridelse af øvre temperaturgrænse + 1 °C	Maks. 25 timer	Maks. 35 timer
<i>Vinterperiode (november – marts)</i>		
-timer med overskridelse af øvre temperaturgrænse	Maks. 50 timer	Maks. 70 timer
-timer m. overskridelse af øvre temperaturgrænse + 1 °C	Maks. 10 timer	Maks. 14 timer

En stor udnyttelse af den termiske masse i et byggeri resulterer i mindre anlæg og et lavere dimensionerende luftskifte for ventilation. Jo større temperaturvariation, der kan accepteres, jo lavere energiforbrug og mindre anlæg kan opnås. Specielt kan opmærksomheden henledes på udnyttelse af ventilationsanlægget til nattekøling, hvor den lave udetemperatur kan benyttes til at blæse ind i bygningen og dermed fjerne den akkumulerede varme i løbet af dagen fra bygningen. Den største virkning opnås ved at køle bygningen ned så lavt som det kan accepteres, f. eks. 22°C, der er den laveste temperatur ifølge Tabel 12-19 kravspecifikationer til indeklimaklasserne for henholdsvis for minimum og standard.

Set i lyset med de globale udfordringer med CO₂ udslip og klodens generelle opvarmning er det spørgsmålet, om ikke det bør vurderes for de varmeste skyfri sommerdage at mindske den laveste temperatur til f.eks. 21°C. Dette vil resultere i, at der er 1°C mere at kunne give en temperaturglidning op imod de 26°C (Tabel 12-19, indeklimaklasse standard). En udnyttelse af den termiske masse med 5°C (26°C – 21°C) i forhold til 4°C (26°C – 22°C) vil give en lavere dimensionerende ventilationsluftmængde, et mindre ventilationsanlæg og spare energi.

Ulempen vil være, at der på meget varme sommerdage nogle enkelte dage om året vil være behov for at køle bygningen ned til 21°C. Det er spørgsmålet om ikke det kan være rimeligt for virksomheder, der gerne vil have en grøn profil og tænke energiøkonomisk, at de inkluderer deres personale i disse bestræbelser. Ifølge Tabel 12-19 er kravspecifikationerne for indeklimaklasse Ambitiøs for sommeren på 22,5 – 25,5°C, og dette skal ses i forhold til, at der er virksomheder, hvor personalet klager hvis temperaturen kommer under 23°C. Spørgsmålet er, om det er rimeligt, at dimensionere anlæggene så de kan afhjælpe, at temperaturen aldrig kommer under 23°C om sommeren. Det er afgørende for opnåelse af et lavt energiforbrug, at brugeradfærden i højere grad bliver inkluderet, og personalet i bygninger bliver vejledt i, hvorledes de skal agere i en given bygning. F.eks. findes der mange automatiske udvendige solafskærmninger, der kan overstyres af brugerne, og hvis de prioriterer udsynet højere og overstyrer solafskærmningen det meste af dagen, kan dette i værste fald give en markant større solbelastning ind i bygningen.

Hvis kravspecifikationerne skal overholdes hele året, vil det give anledning til meget overdimensionerede anlæg, og dette vil være uhensigtsmæssigt. Der er derfor tilladt toleranceoverskridelser, der svarer til ca. 5 % af brugstiden. Dette krav gælder for den øvre temperaturgrænse og timerne summeres for følgende to perioder:

- April – oktober
- November – marts

Ved beregninger af det termiske indeklima benyttes for hele året den samme belastning og brugstid.

12.13. Maksimal timemiddelindetemperatur

Ved beregning af de nødvendige luftmængder vil ”3. Termisk indeklima” i de fleste tilfælde give den største værdi.

Den enkleste metode til at beregne den nødvendige volumenstrøm q_V for termisk indeklima er at gøre brug af Metode 1 – Maksimal timemiddelindetemperatur (Øjebliksværdi). Metodens navn er valgt ud fra, at der opstilles en varmebalance for den varmeste time med en maksimal udsugningstemperatur θ_{ud} fra ventilationsanlægget. Denne temperatur kan være den samme som rumtemperaturen θ_{rum} , hvis der er en god opblanding i rummet.

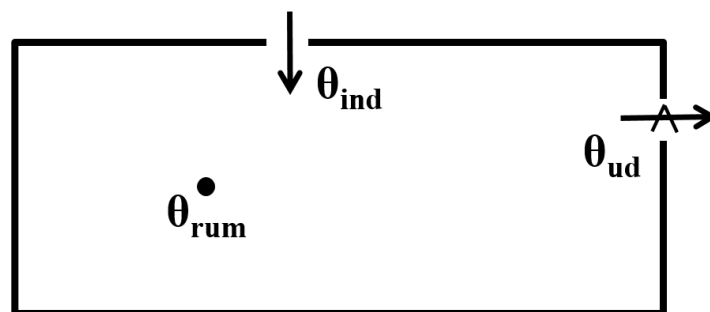
I den enkle varmebalance ses det aktuelle kølebehov $\Phi_{køle}$ i forhold til ventilationsanlæggets evne til at fjerne den varme indeluft baseret på udtrykket: $\rho \cdot c \cdot (\theta_{ud} - \theta_{ind})$, hvilket giver:

$$\Phi_{køle} = \rho \cdot c \cdot q_V \cdot (\theta_{ud} - \theta_{ind})$$

$$\Leftrightarrow q_V = \frac{\Phi_{køle}}{\rho \cdot c \cdot (\theta_{ud} - \theta_{ind})}$$

Ligning 12-17

Her er luftens specifikke varmekapacitet lig: $c = 1,01 \text{ kJ}/(\text{kg luft} \cdot \text{K})$ og $(\rho \cdot c) \approx 1207 \text{ J}/(\text{m}^3\text{K})$. Temperaturforskellen i parenteser udtrykker ventilationsluftens temperaturændring gennem rummet, hvilket er illustreret på Figur 12-9.



Figur 12-9 Temperaturer, der indgår i varmebalancen, og benyttes til definition af temperatureffektivitet

I et lokale med en god opblanding regnes med en konstant temperatur i lokalet, og dette medfører at udsugningstemperaturen θ_{ud} har samme værdi som rumtemperaturen θ_{rum} . Dette resulterer i en temperatureffektivitet $\varepsilon_\theta = 1$, se definition i Ligning 12-18.

Hvis der derimod ikke er så god en opblanding, indføres en temperatureffektivitet ε_θ defineret på følgende måde:

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{\theta_{ud} - \theta_{ind}}{(\theta_{rum} - \theta_{ind})}$$

Ligning 12-18

Ligningen udtrykker temperaturændringen fra indblæsning til udsugning i forhold til temperaturændringen fra indblæsning til et nærmere defineret sted i rummet.

Ved indsættelse af temperatureffektivitet ε_{θ} i Ligning 12-17 fås:

$$\Phi_{køle} = \varepsilon_{\theta} \cdot \rho \cdot c \cdot q_V \cdot (\theta_{ud} - \theta_{ind})$$

$$\Leftrightarrow q_V = \frac{\Phi_{køle}}{\varepsilon_{\theta} \cdot \rho \cdot c \cdot (\theta_{ud} - \theta_{ind})}$$

Ligning 12-19

Ligningen er aktuel ved f.eks. fortrængningsventilation, hvor der forekommer en rumtemperatur, som er lavere end udsugningstemperaturen, og dette resulterer i at $\varepsilon_{\theta} > 1$, hvorved den nødvendige volumenstrøm til at bortventilere den aktuelle varmebelastning bliver reduceret.

En udsugningstemperatur θ_{ud} på 26°C anvendes i en del tilfælde og en indblæsningstemperatur på θ_{ind} på 16°C, hvilket giver en temperaturforskel på 10°C. Det er en vurderingssag om så høj en underafkøling er i orden, hvilket afhænger af opblandingen i lokalet og armaturet. Fabrikanten af armaturet kan oplyse den maksimale underafkølede temperatur for indblæsning som det aktuelle armatur kan håndtere – Denne kan f.eks. være 8°C.

Anvendelse af Maksimal timemiddelindetemperatur

Anvendelse af Ligning 12-17, Metode 1 – Maksimal timemiddelindetemperatur (Øjebliksværdi) skal ske med stor varsomhed, da den har en tendens til at give alt for store værdier, og dermed overdimensionere ventilationsanlægget med helt op til 30-60 %. En måde at kompensere for dette er ved at reducere solindfaldet med en faktor 0,7 for at tage hensyn til, at en del af solvarmen bliver akkumuleret i bygningskonstruktionerne. Den reelle faktor vil afhænge af, om det er en let eller en tung bygning. I de tilfælde, hvor det er en tung bygning, kan det være fornuftigt at benytte den foreslåede faktor på 0,7 ganget på sol belastningen. Dette hænger sammen med, at solindfaldet på de varmeste timer vil give en alt for overdimensioneret tilstand, da døgnmiddelværdien for solindfaldet vil være langt lavere. Der bør imidlertid udvises forsigtighed, hvis der anvendes en udvendig solafskærmning med lav afskærmningsfaktor (det meste af solindfaldet lukkes ud), og denne yderligere ganges med en faktor på 0,7. Dermed kan belastningen fra solindfaldet i den aktuelle time blive meget lavere end for en time lige før eller efter den udvendige solafskærmning anvendes. I tilfælde med en meget konstant varmebelastning i løbet af dagen, hvor varierende solindfald ikke har så stor betydning, kan det være fornuftigt at anvende formelen.

I langt de fleste tilfælde vil det give mere præcise værdier, at anvende Metode 2 – Døgnmiddelindetemperatur eller Metode 3 – Dynamiske simuleringssystemer.

12.14. Døgnmiddelindetemperatur

Det kan være en god ide at anvende metode 2 ”Døgnmiddelindetemperatur”, som et indledende overslagsmæssigt bud på de ønskede ventilationsluftmængder. De beregnede luftmængder kan derpå eventuelt sammenlignes med de luftmængder, som fremkommer ved brug af metode 1 med ”Maksimal timemiddelindetemperatur”.

På tilsvarende vis kan det være en god ide at benytte metode 2 ”Døgnmiddelindetemperatur” til en vurdering af beregnede resultater ved brug simuleringsprogrammer til beregning af termisk indeklima og energiforbrug på timebasis (BSim, IDA ICE, IES-VE eller andre).

Simuleringsprogrammer til beregning af termisk indeklima og energiforbrug har mange faciliteter og muligheder; men der er også mange faldgrupper, da det kan være vanskeligt at overskue alle de mange input-data. Der kan let forekomme fejl.

Metode 2 ”Døgnmiddelindetemperatur” skal dog benyttes med varsomhed, da det kun er en døgnmiddelindetemperatur, som beregnes. Det giver fornuftige resultater for et lokale med en normal varmebelastning, og hvis det er en tung bygning med en stor termisk masse til at akkumulere den overskydende varme. En let bygning vil have større temperaturudsving, og dette resulterer i en større usikkerhed, og metode 2 ”Døgnmiddelindetemperatur” giver et mere usikkert resultat, da det kan være vanskeligt at vurdere temperaturudsvingene.

I det følgende gennemgås teori for beregning af døgnmiddelindetemperatur.

I 12.11 blev udetemperaturens døgnvariation angivet som en cosinusfunktion med f.eks. maksimum klokken 14.

I Tabel 12-17 er der en oversigt over maksimal døgnmiddeludetemperatur og typisk variation over døgnet. For juni måned haves følgende værdier:

- Maksimal døgnmiddeludetemperatur = 20°C
- Typisk variation over døgnet = 6°C

Ved omskrivning til ligning bliver dette: $\theta_u = 20^\circ\text{C} \pm 6^\circ\text{C}$

Denne formel kan anvendes for den udvendige døgnvariation på en meget varm skyfri sommerdag i Danmark. Ved vurdering under danske forhold kan foreslås at benytte en døgnmiddeludetemperatur på 20°C for hele sommerperioden for at gøre det enklere, fremfor at benytte 21°C i juli og 20,5°C i august.

Løsning af varmebalanceligningen

I den enkleste form, hvor der ikke tages hensyn til varmeakkumulering i bygningskonstruktioner, gælder, at den tilførte varmestrøm er lig med den bortledte varmestrøm. Denne tilnærmelse kan benyttes ved beregning af døgnmiddelindetemperaturen i sluttilstanden, som optræder efter mange døgn med de samme forhold – hvilket teoretisk først vil ske efter uendelig mange døgn. I praksis afhænger antallet af døgn for sluttilstanden af mange faktorer. Hvis der f.eks. er installeret et

ventilationsanlæg med tilstrækkelig kølekapacitet til at holde en maksimal temperatur på f.eks. 26°C, vil sluttstanden indtræde efter få døgn. Se også afsnittet om *Tidskonstanten*.

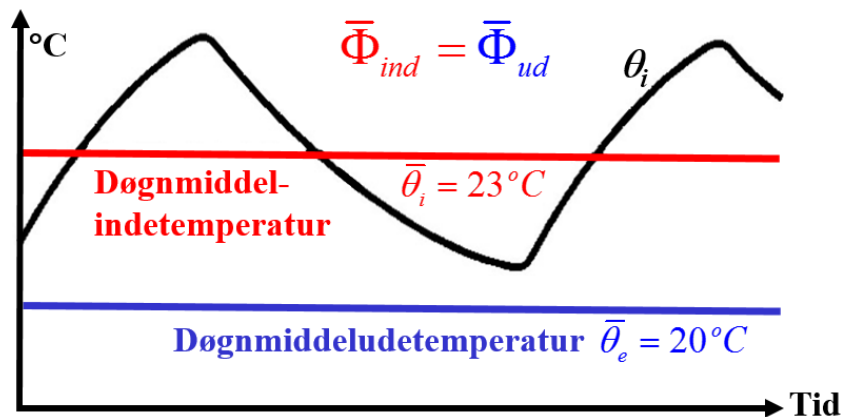
I den døgnstationære tilstand er den varmemængde, der tilføres i løbet af et døgn, lig den varmemængde, der bortledes i løbet af et døgn:

$$\bar{\Phi}_{\text{tilført}} = \bar{\Phi}_{\text{bortledt}} \Leftrightarrow \bar{\Phi}_{\text{int}} + \bar{\Phi}_{\text{sol}}$$

Ligning 12-20

På Figur 12-10 er illustreret døgnmiddelindetemperatur og døgnmiddeludetemperatur for et rum.

I sommersituationen på en skyfri sommerdag vil der være en stor ekstern varmebelastning fra solstråling, som normalt ikke kan bortledes ved transmission eller ventilation. En del af den tilførte varme vil derfor blive i form af en forøgelse af rummets lufttemperatur og akkumulering i bygningskonstruktionerne.



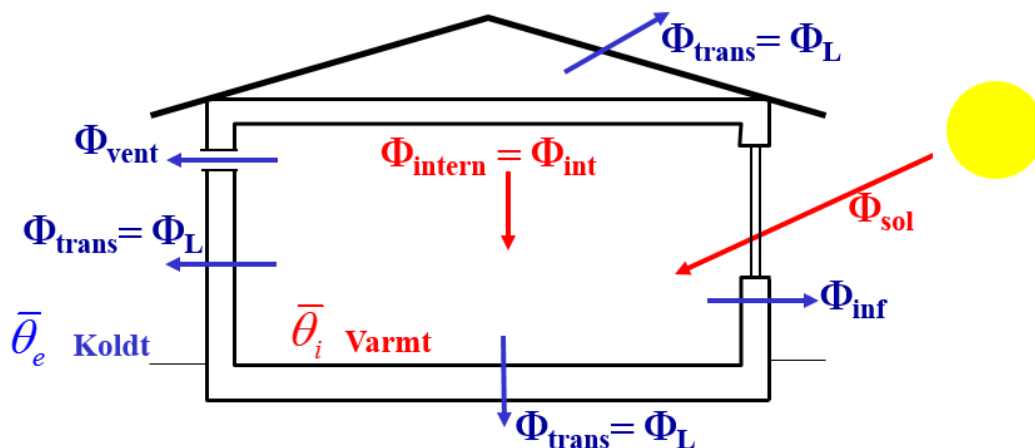
Figur 12-10 Illustration af døgnmiddelindetemperatur og døgnmiddeludetemperatur for et rum

Bestemmelse af døgnmiddelindetemperatur, giver på en enkel måde en idé om temperatur niveauet i et rum og om hvilke tiltag, der kan gøres for at forbedre det termiske indeklima. Størrelserne for de enkelte tiltag er lette at vurdere, og dermed hvilke der har stor betydning, og hvilke som har mindre betydning. Dette er et overblik, som let kan mistes ved kun at anvende dynamiske simuleringer.

Ved at indlægge formlerne i et regneark forbedres overblikket. Dette kan gøres i forbindelse med forberedelserne til beregninger med dynamiske simuleringer, hvor interne belastninger skal vurderes.

Til døgnmiddelindetemperatur skal lægges døgnamplitude – afhængig af rummets varmekapacitet, belastningernes størrelse og ventilationsanlæggets kapacitet.

For et tungt rum med stor varmeakkumulerende masse og lille belastning vil der komme en indetemperatur amplitude på nogle få grader.



Figur 12-11 Den samlede varmebalance for et rum med nogle af de indgående parametre

For et let rum med lille varmeakkumulerende masse og stor belastning vil der komme en stor indetemperatur amplitude på mange grader.

På Figur 12-11 er vist den samlede varmebalance for et rum med nogle udvalgte elementer i varmebalancen. Den blå og den røde farve illustrerer, hvorledes de indregnes i Ligning 12-20:

$$\bar{\Phi}_{\text{tilført}} = \bar{\Phi}_{\text{bortledt}} \Leftrightarrow \bar{\Phi}_{\text{int}} + \bar{\Phi}_{\text{sol}} = \bar{\Phi}_L + \bar{\Phi}_{L,\text{nabo}} + \bar{\Phi}_{\text{inf}} + \bar{\Phi}_{\text{vent}} + \bar{\Phi}_{\text{natkøl}} + \bar{\Phi}_{\text{luft,nabo}} \quad \text{Ligning 12-21}$$

De enkelte bidrag i Ligning 12-21 kan udspecificeres i tilført og bortledt effekt.

Tilført effekt

Intern varmebelastning

Tilført effekt fra intern varmebelastning fra person, udstyr og belysning, Φ_{int} (W), Q_{int} (Wh):

$$\bar{\Phi}_{\text{int}} = \frac{Q_{\text{int}} \text{ pr døgnet}}{24h / \text{døgnet}} = \frac{Q_{\text{int}}}{24h} \quad \text{Ligning 12-22}$$

Ekstern varmebelastning

Tilført effekt fra ekstern varmebelastning fra sol, Φ_{sol} (W), Q_{sol} (Wh):

$$\bar{\Phi}_{\text{sol}} = \frac{Q_{\text{sol}} \text{ pr døgnet}}{24h / \text{døgnet}} = \frac{Q_{\text{sol}}}{24h} \quad \text{Ligning 12-23}$$

Bortledt effekt

Ledning mellem indvendig og til det fri

Bortledt effekt ved ledning mellem indvendig og til det fri, Φ_L (W), H_L (W/K):

$$\bar{\Phi}_L = (\sum U \cdot A) \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_e) = H_L \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_e)$$

$$H_L = \sum_n^{i=1} (U_1 \cdot A_1 + U_2 \cdot A_2 + \dots + U_n \cdot A_n)$$

Ligning 12-24

Ledning mellem indvendig og til naborum

Bortledt effekt ved ledning mellem indvendig og til naborum, $\Phi_{L,nabo}$ (W), $H_{L,nabo}$ (W/K):

$$\bar{\Phi}_{L,nabo} = \sum_n^{i=1} \left[(U_{L,nabo,1} \cdot A_{L,nabo,1} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{nabo,1})) + \dots + (U_{L,nabo,n} \cdot A_{L,nabo,n} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{nabo,n})) \right]$$

$$H_{L,nabo} = \sum_n^{i=1} (U_{L,nabo,1} \cdot A_{L,nabo,1} + U_{L,nabo,2} \cdot A_{L,nabo,2} + \dots + U_{L,nabo,n} \cdot A_{L,nabo,n})$$

Ligning 12-25

Luftudveksling af forskellige slags

Bortledt effekt ved luftudveksling af forskellige slags. Princippet gennemgås generelt for alle luftstrømme. Bemærk formlen ændres afhængig om der anvendes en volumenstrøm i (m^3/h) eller i (l/s). I det følgende vil formlen blive vist i enhederne – q_V (l/s), $q_{V(h)}$ (m^3/h), Φ_{luft} (W), H_{luft} (W/K):

$$\bar{\Phi}_{luft} = 0,34 \cdot n_{luft} \cdot V \cdot \frac{h_{luft}}{24 h} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{luft}) = 0,34 \cdot q_{V(h)} \cdot \frac{h_{luft}}{24 h} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{luft})$$

$$\bar{\Phi}_{luft} = 0,34 \cdot n_{luft} \cdot V \cdot \frac{h_{luft}}{24 h} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{luft}) = 1,224 \cdot q_V \cdot \frac{h_{luft}}{24 h} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{luft})$$

$$H_{luft} = 0,34 \cdot n_{luft} \cdot V \cdot \frac{h_{luft}}{24 h} = 0,34 \cdot q_{V(h)} \cdot \frac{h_{luft}}{24 h} \quad q_{V(h)} [m^3 / h]$$

$$H_{luft} = 0,34 \cdot n_{luft} \cdot V \cdot \frac{h_{luft}}{24 h} = 0,34 \cdot (3,6 \cdot q_V) \cdot \frac{h_{luft}}{24 h} = 1,224 \cdot q_V \cdot \frac{h_{luft}}{24 h} \quad q_V [l / s]$$

Ligning 12-26

Infiltration

Bortledt effekt ved infiltration, Φ_{inf} (W), H_{inf} (W/K):

$$\begin{aligned}\bar{\Phi}_{inf} &= 0,34 \cdot n_{inf} \cdot V \cdot \frac{h_{inf}}{24h} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_e) = 1,224 \cdot q_V \cdot \frac{h_{inf}}{24h} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_e) \\ H_{inf} &= 0,34 \cdot n_{inf} \cdot V \cdot \frac{h_{inf}}{24h} = 0,34 \cdot q_{V(h)} \cdot \frac{h_{inf}}{24h} = 1,224 \cdot q_V \cdot \frac{h_{inf}}{24h}\end{aligned}$$

Ligning 12-27

$q_{V(h)} [m^3 / h] \quad q_V [l / s] \quad \text{Temperatur: } \bar{\theta}_e$

Ventilation

Bortledt effekt ved ventilation, Φ_{vent} (W), H_{vent} (W/K):

$$\begin{aligned}\bar{\Phi}_{vent} &= 0,34 \cdot n_{vent} \cdot V \cdot \frac{h_{vent}}{24h} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{vent}) = 1,224 \cdot q_V \cdot \frac{h_{vent}}{24h} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{vent}) \\ H_{vent} &= 0,34 \cdot n_{vent} \cdot V \cdot \frac{h_{vent}}{24h} = 0,34 \cdot q_{V(h)} \cdot \frac{h_{vent}}{24h} = 1,224 \cdot q_V \cdot \frac{h_{vent}}{24h}\end{aligned}$$

Ligning 12-28

$q_{V(h)} [m^3 / h] \quad q_V [l / s] \quad \text{Temperatur: } \bar{\theta}_{vent}$

Nattekøling

Bortledt effekt med nattekøling, $\Phi_{natkøl}$ (W), $H_{natkøl}$ (W/K):

(Nattekøling foregår ved at benytte den kølige natteluft og blæse den ind i bygningen om natten for at få en gratis frikøling)

$$\begin{aligned}\bar{\Phi}_{natkøl} &= 0,34 \cdot n_{natkøl} \cdot V \cdot \frac{h_{natkøl}}{24h} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{natkøl}) = 1,224 \cdot q_V \cdot \frac{h_{natkøl}}{24h} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{natkøl}) \\ H_{natkøl} &= 0,34 \cdot n_{natkøl} \cdot V \cdot \frac{h_{natkøl}}{24h} = 0,34 \cdot q_{V(h)} \cdot \frac{h_{natkøl}}{24h} = 1,224 \cdot q_V \cdot \frac{h_{natkøl}}{24h}\end{aligned}$$

Ligning 12-29

$q_{V(h)} [m^3 / h] \quad q_V [l / s] \quad \text{Temperatur: } \bar{\theta}_{natkøl}$

Luftudveksling med naborum

Bortledt effekt ved luftudveksling med naborum. Princippet gennemgås generelt kun for ét rum fremfor for n naborum. Princippet for formlen for n naborum er gennemgået tidligere for *Ligning 12-25 Bortledt effekt ved ledning mellem indvendig og til naborum.*, og dette kan overføres på luftudveksling til en række naborum. I det følgende opstilles formlerne kun for ét enkelt rum for at forenkle formlerne, $\Phi_{\text{luft,nabo}}$ (W), $H_{\text{luft,nabo}}$ (W/K):

$$\begin{aligned}\bar{\Phi}_{\text{luft,nabo}} &= 0,34 \cdot n_{\text{luft,nabo}} \cdot V \cdot \frac{h_{\text{luft,nabo}}}{24h} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{\text{nabo}}) = 1,224 \cdot q_V \cdot \frac{h_{\text{luft,nabo}}}{24h} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{\text{nabo}}) \\ H_{\text{luft,nabo}} &= 0,34 \cdot n_{\text{luft,nabo}} \cdot V \cdot \frac{h_{\text{luft,nabo}}}{24h} = 0,34 \cdot q_{V(h)} \cdot \frac{h_{\text{luft,nabo}}}{24h} = 1,224 \cdot q_V \cdot \frac{h_{\text{luft,nabo}}}{24h} \quad \text{Ligning 12-30} \\ & q_{V(h)} [m^3 / h] \quad q_V [l / s] \quad \text{Temperatur: } \bar{\theta}_{\text{nabo}}\end{aligned}$$

Udetemperatur angivet ved en cosinusfunktion

Hvis der ikke findes klimadata for den pågældende lokalitet, eller det ikke er praktisk at anvende referenceåret, kan udetemperaturen angives ved en cosinusfunktion med maksimum f.eks. klokken 14 ($\tau_{h,\max} = 14$):

$$\theta_u = \bar{\theta}_u + \Delta\theta_u \cdot \cos \frac{2 \cdot \pi (\tau_h - 14)}{24} \quad \text{Ligning 12-31}$$

Løsning af varmebalanceligningen

På baggrund af specificering af de enkelte parametre kan varmebalanceligningen løses:

$$\begin{aligned}\bar{\Phi}_{\text{tilført}} &= \bar{\Phi}_{\text{bortledt}} \Leftrightarrow \bar{\Phi}_{\text{int}} + \bar{\Phi}_{\text{sol}} = \bar{\Phi}_L + \bar{\Phi}_{L,\text{nabo}} + \bar{\Phi}_{\text{inf}} + \bar{\Phi}_{\text{vent}} + \bar{\Phi}_{\text{natkøl}} + \bar{\Phi}_{\text{luft,nabo}} \\ \Leftrightarrow \bar{\Phi}_{\text{int}} + \bar{\Phi}_{\text{sol}} &= H_L \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_e) + H_{\text{inf}} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_e) + H_{L,\text{nabo}} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{\text{nabo}}) \\ &\quad H_{\text{vent}} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{\text{vent}}) + H_{\text{natkøl}} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{\text{natkøl}}) + H_{\text{luft,nabo}} \cdot (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_{\text{nabo}}) \\ \Leftrightarrow \bar{\Phi}_{\text{int}} + \bar{\Phi}_{\text{sol}} &= (H_L + H_{\text{inf}} + H_{L,\text{nabo}} + H_{\text{vent}} + H_{\text{natkøl}} + H_{\text{luft,nabo}}) \cdot \bar{\theta}_i \\ &\quad - (H_L + H_{\text{inf}}) \cdot \bar{\theta}_e - H_{\text{vent}} \cdot \bar{\theta}_{\text{vent}} - H_{\text{natkøl}} \cdot \bar{\theta}_{\text{natkøl}} - (H_{L,\text{nabo}} + H_{\text{luft,nabo}}) \cdot \bar{\theta}_{\text{nabo}} \\ \Leftrightarrow \bar{\theta}_i &= \frac{(H_L + H_{\text{inf}}) \cdot \bar{\theta}_e + H_{\text{vent}} \cdot \bar{\theta}_{\text{vent}} + H_{\text{natkøl}} \cdot \bar{\theta}_{\text{natkøl}} + (H_{L,\text{nabo}} + H_{\text{luft,nabo}}) \cdot \bar{\theta}_{\text{nabo}} + \bar{\Phi}_{\text{int}} + \bar{\Phi}_{\text{sol}}}{(H_L + H_{\text{inf}} + H_{L,\text{nabo}} + H_{\text{vent}} + H_{\text{natkøl}} + H_{\text{luft,nabo}})}\end{aligned}$$

Hvorved ligning for døgnmiddelindetemperaturen fås:

$$\bar{\theta}_i = \frac{(H_L + H_{inf}) \cdot \bar{\theta}_e + H_{vent} \cdot \bar{\theta}_{vent} + H_{natkøl} \cdot \bar{\theta}_{natkøl} + (H_{L,nabo} + H_{luft,nabo}) \cdot \bar{\theta}_{nabo} + \bar{\Phi}_{int} + \bar{\Phi}_{sol}}{(H_L + H_{inf} + H_{L,nabo} + H_{vent} + H_{natkøl} + H_{luft,nabo})}$$

Ligning 12-32

I denne ligning er der medtaget en lang række parametre for at gøre den bredere anvendelig. Formlen ville selvfølgelig komme på enklere form, hvis disse parametre ikke var medtaget.

Hvis kun varmebelastningerne og varmeudvekslingen med udeluften medtages, forenkles formelen til:

$$\bar{\theta}_i = \bar{\theta}_e + \frac{\bar{\Phi}_{int} + \bar{\Phi}_{sol}}{H_L + H_{inf}}$$

Ligning 12-33

Anvendelse af metode 2 "Døgnmiddelindetemperatur"

Formlerne Ligning 12-21 til Ligning 12-30 og Ligning 12-32 er velegnede til at få et overblik over de enkelte størrelser, der indgår i varmebalancen. De største bidrag til den interne eller eksterne belastning er relevante at vurdere, hvorimod de mindre bidrag ikke bør have så stor fokus. Dette er en af fordelene ved metode 2 "Døgnmiddelindetemperatur", at det er enkelt at overskue de indgående parametre og deres betydning. Det kan derfor ved anvendelse af metode 3 "Dynamiske simuleringssystemer" være en god ide i tillæg at benytte metode 2 "Døgnmiddelindetemperatur" for at få et bedre forståelse af bygningen og dens dynamik. På denne måde kan mange faldgrupper ved metode 3 undgås.

Anvendelse af metode 2 er under forudsætning af, at der ikke fra bygherres side er stillet krav om en detaljeret beregning af det termiske indeklima med specifikke krav om f.eks. antal timer over 26 °C og 27 °C, en minimumstemperatur om morgene, etc.

Styrken ved metode 2 er, at der på kort tid kan beregnes et kvalificeret skøn over de nødvendige luftmængder til de enkelte lokale. Dette vil i mange tilfælde være tilstrækkeligt i et forprojekt stadiet, hvor der kun ønskes et skøn over dimensionerne for kanalerne og ventilationsanlæggets størrelse.

Metode 2 kan ikke anvendes til at vurdere de energimæssige løsninger, da dette kræver årssimuleringer, og dette kan f.eks. ske ved brug af metode 3, "Dynamiske simuleringssystemer".

Vurdering af resultat

Hvis der i et projekt for en **tung bygning** anvendes en **udvendig solafskærmning**, og der er **moderate interne varmebelastninger**, vil det være muligt med metode 2

”Døgnmiddelindetemperatur”, at få nogle resultater tilnærmede resultater. Dette kan opnås ved, at der tilstræbes en døgnmiddelindetemperatur på **23 °C** eller lidt mindre. Under disse forhold kan det forventes, at temperaturen er over henholdsvis 26 °C max 100 timer per år og 27 °C max 25 timer per år.

Anvendelse af solafskærmende ruder med en lav g-værdi, i stedet for en udvendig solafskærmning, kan tillige forventes at give rimelige resultater; men dette er ikke grundigt dokumenteret. Det kan imidlertid resultere i et forøget kølebehov, da der ikke vil være nogen effektiv solafskærmning i de solrigeste timer med det største kølebehov. Et større kølebehov vil resultere i større ventilationsanlæg. Hvis denne løsning ønskes anvendt bør det kun ske efter en grundig undersøgelse med et dynamisk simuleringsprogram på timebasis.

Det fremgår af Tabel 12-19, at den operative temperatur ikke bør komme under 22 °C om sommeren. Dette krav kan ikke umiddelbart dokumenteres ved brug af metode 2. Det kan imidlertid forventes ved beregning med en døgnmiddelindetemperatur på 23 °C, ventilation i maksimalt 10 timer og nattekøling i maksimalt 5 timer, at kravet om 22 °C er tæt at være opfyldt. Dette hænger blandt andet sammen med, at der ved ophør af nattekøling umiddelbart efter sker en temperaturstigning på 1-2 °C. Årsagen til dette er den store interne varmemængde, der er akkumuleret i bygningskonstruktionerne, hvilket resulterer i, at bygningskonstruktionerne kommer til at fungere som en stor kæmpevarmeplade. Det er imidlertid nødvendigt at udføre en dynamisk simulering på timebasis for helt at sikre sig, at temperaturen ikke kommer under 22 °C om sommeren.

12.15. Dynamiske simuleringsprogrammer

Afsnittet om Dynamiske simuleringsprogrammer er medtaget i dette kapitel om Bygningsdynamik for helhedens skyld. I forbindelse med årssimuleringer af temperaturforhold og energiforbrug vil det være en stor fordel at benytte følgende to publikationer:

- Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017
- Branchevejledning for energiberegninger, 2014

Her er relevant information.

I dette afsnit benyttes materiale fra (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017).

Afsnittet er relativt kort, da en del af den relevante information er medtaget i afsnit 9 om ”Varmebalance – Termisk indeklima”, eftersom en del information er relevant for metode 2 ”Døgnmiddelindetemperatur”. Desuden vil afsnittet blive meget omfattende, hvis al relevant information skulle medtages.

Største varme- /kølebelastninger

Hvornår de største varme- /kølebelastninger vil optræde afhænger af bygningens udformning:

Vinduesstørrelser/rudestørrelser

- Rudetyper
- Orientering
- Skyggeforhold
- Tung/let bygning
- Etc.

Det kan derfor ikke lade sig gøre at give generelle retningslinjer for, hvilke perioder der er dimensionerende. Dette kan imidlertid findes ved at lave en årssimulering med bygningen/lokalet og herud fra bestemme de perioder, der er vigtigst og benytte disse i den nærmere analyse af bygningen. En nærmere analyse bør altid inkludere en parameter undersøgelse af dimensionerende datoer for at sikre sig, at beregningsmodellen af lokalet optræder som ønsket. Hvis ikke dette gøres kan det i værste fald resultere i helt fejlagtige resultater og dermed fejlagtig dimensionering.

Et par eksempler kan være følgende:

- Et kontorlokale med personer undersøges med IDA ICE for temperaturforhold, hvor varmen i vinterperioden er slået fra for at vurdere lokalets indetemperatur under disse forhold.
 - Resultat: Personerne i kontorlokalet løber en dobbelt maraton i løbet af den 8 timers arbejdsdag for at kunne holde varmen! Et sjovt resultat; men det er spørgsmålet, hvor realistisk det er og hvor meget medarbejderne får arbejdet på computeren.

- Et kontorlokale med personer undersøges med BSim, hvor en solafskærmning aktiveres ved direkte stråling på vinduerne (værdi i W/m^2) og en temperatur på over $24^{\circ}C$.
 - Resultat: I visse tilfælde kan resultatet af beregningen af temperaturen i kontorlokalet resultere i, at denne ligger mellem $24^{\circ}C$ og $26^{\circ}C$. Hvis der kun ses på antallet af timer over $26^{\circ}C$ i løbet af et år og det giver 0 timer – tilsyneladende flot resultat. Det som ikke ses, er at solafskærmninger er slået til 24/7 – Igen et urealistisk resultat, som ikke opdages.
- Et lokale har en række vinduer, hvor ruderne er placeret yderst og flugter med den udvendige væg. Lokalet undersøges med BSim. Hvis Recess funktionen ikke aktiveres sammen med XSun sol fordeling vil det resultere i en forkert beregning af solindfaldet. Denne fejl kan resultere i at solindfald kun beregnes til f.eks. 50% af det korrekte. Derfor skal Recess funktionen og XSun sol fordeling altid aktiveres. En bygherre eller andre, som skal vurdere beregninger foretaget med BSim skal altid sikre sig at disse parametre er håndteret korrekt.
- Et kontorlokale med personer ønskes undersøgt, hvor minimum indblæsnings-temperaturen er på $16^{\circ}C$, og der kun tillades indblæsning med en undertemperatur på $6^{\circ}C$ i forhold til indetemperaturen.
 - Resultat: Hvis temperaturen i rummet kommer op på $26^{\circ}C$, og der i simuleringen indblæses med en temperatur på $16^{\circ}C$ overvurderes kølekapaciteten i den pågældende time med ca. 67% ($10^{\circ}C/6^{\circ}C - 1$). I praksis vil udsugningen ske i toppen af lokalet, hvor temperaturen er højere, og derved vil kølekapaciteten blive forøget, og dermed bliver fejlen mindre eller helt elimineret. Dette er et problem en del dynamiske simuleringer ikke desto mindre har vanskelighed med at håndtere.

Udførelse af dynamiske simuleringer kræver en stor kompetence, og det er nødvendigt med en meget omhyggelig kontrol af den opstillede model af lokalet. Der indgår mange parametre, som skal spille korrekt sammen i overensstemmelse med de opstillede forudsætninger. Det er derfor en meget alvorlig fejl, hvis den opstillede model ikke analyseres nøje for udvalgte dage, for at se om modellen er korrekt.

Perioder for det termiske indeklima

Ved dynamiske indeklimasimuleringer for det termiske indeklima deles simuleringsåret op i tre perioder:

- **Sommerperiode:** maj – september
- **Overgangsperiode:** april og oktober
- **Vinterperiode:** november – marts

For de enkelte perioder opstilles forskellige kravspecifikationer til temperaturer. Om sommeren vil personalet på varme sommerdage være let påklædt og en temperatur på $21^{\circ}C$ kan derfor opleves

som lidt kølig, hvorimod personalet om vinteren har mere tøj på og denne temperatur vil derfor sædvanligvis opleves som behagelig. Forår og efterår kan der være dage med ret så varmt vejr, men også med en anelse frost, og der er derfor indkalkuleret en overgangsperiode i henholdsvis april og oktober.

Datoer og årstal for analyser

For danske forhold ved anvendelse af det danske Design-Reference-år DRY2013 (Wang et al., 2012) kan for eksempel anvendes følgende datoer for skyfri varme sommerdage:

- 1. juli og 6. august

Det anbefales ifølge (Branchevejledning for indeklimaberegninger, 2017), at der benyttes kalenderåret 2010 ved dynamiske simuleringer. Det er ikke vejrdata for det specifikke år 2010, som anvendes. Året vælges til 2010 for at alle, der foretager dynamiske simuleringer, vælger samme ugedag for den 1. januar, da dette kan have indflydelse på resultatet. Det anvendte år 2010 er uden skudår, hvilket er en anden fejlkilde, da der ved anvendelse af år med skudår kommer én ekstra dag med ved simuleringen. Forskellige dynamiske simuleringsprogrammer benytter også forskellige metoder for at kompensere for den ekstra indsatte dag.

For en given bygning udvælges et antal rum, der betragtes som repræsentative for undersøgelse af det termiske indeklima og dimensionering af de indgående systemer. De udvalgte rum baseres på, at det er typiske rum og/eller kritiske rum for bygningen.

De dynamiske indeklima simuleringer baseres på ønskede brugsprofiler for bygningen med tilhørende beskrivelse af opbygning af hele rummet inkl. vinduer og konstruktioner.

12.16. Litteratur/referencer

- Branchevejledning for energiberegninger. (2014). Mortensen, Lone (SBI, projektleder) og 17 andre, InnoBYG / Innovationsnetværket for bæredygtigt byggeri.
- Branchevejledning for indeklimaberegninger. (2017). Vorre, Mette Havgaard & Wagner, Mads Hulmose & Maagaard, Steffen E. & Noyé, Peter & Lyng, Nadja Lyng & Mortensen, Lone. InnoBYG / Statens Byggeforskningsinstitut, ISBN 978-87-563-1850-1.
- BR18 – Bygningsreglementet 2018. (2018). <http://bygningsreglementet.dk/>
- Christensen, J.E. (2018). *Brugervejledning til TCD programmet*. DTU Byg. Danmark.
- Dansk standard. (2005). *Jalousier og skodder – Termisk og visuel komfort – Bestemmelse af ydeevne og klassifikation*. (DS/EN 14501:2005). Charlottenlund. Lokaliseret 20170316 på: <https://webshop.ds.dk/da-dk/standard/ds-en-145012005>
- Dansk Standard. (2007a). *DS/EN 15251 – Input-parametre til indeklimaet ved design og bestemmelse af bygningers energimæssige ydeevne vedrørende indendørs luftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustik*. DS/EN 15251:2007. ICS: 91.040.01. Charlottenlund. Danmark.
- Dansk Standard. (2007b). *Solafskærmningsudstyr kombineret med ruder – Beregning af sol- og lystransmission – Del 1: Forenklet metode*. (DS/EN 13363-1 + A1:2007) med (DS/EN 13363-1 + A1/AC:2009). Charlottenlund. Lokaliseret 20170319 på: <https://webshop.ds.dk/da-dk/s%20c3%b8gning?q=Solafsk%C3%A6rmningsudstyr+kombineret+med+ruder+%E2%80%93+Beregning+af+sol-+og+lystrans> Status tilbagetrukket
- Dansk Standard. (2017). *Bygningers energieffektivitet – Byggekomponenters og -elementers varmetekniske samt sol- og dagslysrelaterede egenskaber – Del 1: Forenklet metode til beregning af sol- og dagslysrelaterede egenskaber ved solafskærmning kombineret med vinduespartier*. (DS/EN ISO 52022-1:2017). Lokaliseret 20170319 på: <https://webshop.ds.dk/da-dk/s%20C3%B8gning/ds-en-iso-52022-12017>
- Den lille blå om Ventilation.(2016). Hvenegaard, Claus M. & Drivsholm, Christian, Dansk Energi, 3. udgave 2016, ISBN 87-988903-0-1
- DANVAK. (2006). Hansen, H.E. (ed.), Kjerulf-Jensen, P. (ed.) & Stampe, O.B. (ed.). *DANVAK – Varme- og klimateknik grundbog*, 3. Udgave. ISBN: 87-982652-8-8, Danmark.
- DRY Danmark 2013, Det nye Design Reference Year for Danmark dækker perioden 2001-2010. Ved henvisning til referenceåret benyttes året 2013. Se (Wang et al., 2013).
- Olsen, Lars & Hansen, Magne. (2007). *Varmeakkumulering i beton – Vurdering af betons termiske masse i relation til bygningsreglementet og energiberegninger*. Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen nr. 19 2007.
- SBI-anvisning 184. (1995). Aggerholm, S., Zacchariassen, H., Christensen, G., Olufsen, P., Clausen, V. og Pedersen, P. E. *Bygningers energibehov*. SBI-anvisning 184, Statens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm.

SBi-anvisning 196. (2000). Valbjørn, Ole & Høwisch, John & Nielsen, Ove & Nielsen, Peter A. & Laustsen, Susse. *Indeklimahåndbogen*, 2. udgave, SBi-anvisning 196. Statens Byggeforskningsinstitut. Aalborg Universitet. ISBN 978-87-563-1041-2.

SBi-anvisning 213. (2016a). Aggerholm, Søren & Sørensen, Karl Grau. (2016). *Bygningers energibehov*. SBi-anvisning 213, 4. udgave. Statens Byggeforskningsinstitut. Aalborg Universitet. ISBN 978-87-563-1763-4.

SBi-anvisning 264. (2016b). Johnsen, Kjeld. *Solafskærmninger*. SBi-anvisning 264. Statens Byggeforskningsinstitut. Aalborg Universitet. ISBN 978-87-563-1790-0.

Wang, Peter Riddersholm & Scharling, Mikael & Nielsen, Kristian Pagh. (2012). *2001 – 2010 Design Reference Year for Denmark*. DMI Teknisk Rapport 12-17. Danmarks Meteorologiske Institut. Rapport på dansk.

Wang, Peter Riddersholm & Scharling, Mikael & Nielsen, Kristian Pagh & Wittchen, Kim Bjarne & Kern-Hansen, Claus. (2013). *2001 – 2010 Danish Design Reference Year*. DMI Teknisk Rapport 13-19. Danmarks Meteorologiske Institut. Rapport på engelsk.

12.17. Appendiks A – Solstråling

Den modtagne solintensitet vinkelret på stråleretningen betegnes normalstrålingen. Lige uden for atmosfæren er den på mellem 1300 og 1400 W/m² med størst intensitet omkring vintersolhverv, hvor afstanden til solen er mindst. Ved middelfstanden mellem jorden og solen modtager jorden 1353 W/m², og denne størrelse betegnes solkonstanten.

Solstråling deles op i tre hovedområder:

- Ultraviolet
- Synligt
- Infrarødt

I Tabel 12-21 er for de tre hovedområder vist fordelingen af solstrålingen uden for jordens atmosfære og ved jordens overflade. Det ses af tabellen, at det synlige lys kun udgør ca. halvdelen af hele solstrålingen (48 %).

Tabel 12-21 Fordeling af solstrålingen uden for atmosfæren og ved jordens overflade

Hovedområde	Ultraviolet	Synligt	Infrarødt
Bølgelængde (µm)	0-0,38	0,38-0,78	0,78-8
Fordeling uden for atmosfæren	6%	48%	46%
Fordeling ved jordoverfladen	2%	48%	48%

Solstrålingen betegnes også som kortbølget stråling og ligger i bølgelængde område fra 0,3 µm til 3 µm. Når solstrålingen går direkte igennem en rude, kommer ind i rummet og rammer en overflade, vil en del af strålingen blive reflekteret videre i rummet som kortbølge stråling. En anden del af strålingen vil blive absorberet af konstruktionen, og en del af denne energi vil blive akkumuleret i bygningskonstruktionen. For den absorberede del af energien gælder at noget vil blive afgivet fra overfladen dels ved konvektion og dels ved emitteret stråling til andre flader. Den emitterede stråling fra overfladen vil nu være omdannet til langbølget stråling, der har nogle andre karakteregenskaber end den kortbølgede stråling.

Solindfald på flader

I litteraturen findes et meget stort antal beregningsmetoder og formler til beregning af solindfald, og solindfald på flader og gennem ruder. Det dynamiske simuleringssystem BSIm

I dynamiske simuleringssystemer er i mange tilfælde en valgmulighed mellem forskellige metoder, der vil give forskellige resultater. I BSIm er der fire modeller at vælge mellem for beregning af solindfald:

- 1) Petersens solar model

- 2) Muniere solar model
- 3) Lunds solar model
- 4) Perez solar model

Afhængig af den valgte metode vil det beregnede solindfald give forskellige resultater. Ud over dette vil de valgte vejrdata på årsbasis have stor indflydelse. Vejrdata til anvendelse i simuleringer har på grund af klimaforandringerne ændret sig, og der er kommet nye opdaterede vejrdata, se afsnit 12.11.

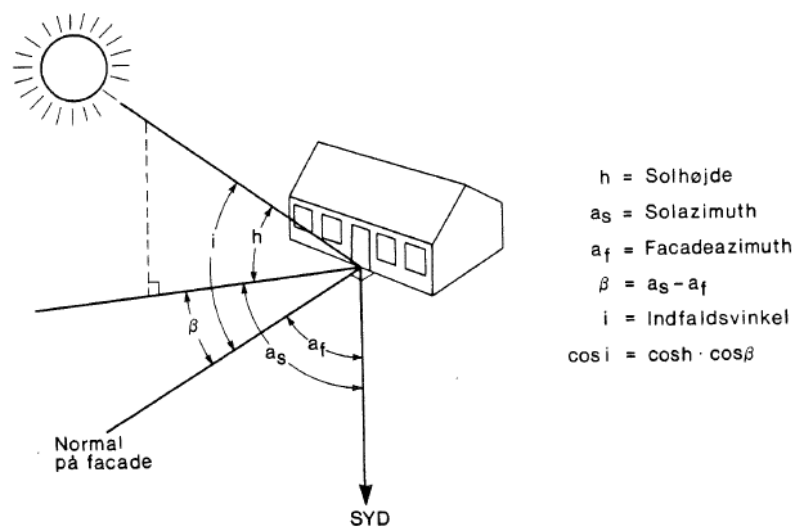
I dette kapitel gennemgås varmebalancen ved brug af døgnmiddelindetemperaturen, og i denne sammenhæng er valgt at anvende sol data baseret på (DANVAK, 2006). Disse soldata er symmetriske om time 12 (kl. 11.30 til kl. 12.30 sand soltid), hvorved solindfaldet har samme størrelsesorden for øst og vest. Herudover er på figurer i (DANVAK, 2006) benyttet den 21. i hver måned for at få sammenfald med kurver for: november/januar, oktober/februar, september/marts, august/april, juli/maj.

Dette i modsætning til anvendelse af reference år, der er baseret på målte værdier. Dette kan resultere i, at der kan være markant forskel for en given skyfri dag på solindfaldet på en vest og østvendt facade. Dette er en faktor, brugeren bør være opmærksom på, eftersom det kan resultere i, at for en bygning med identiske rum mod øst og vest kan de nødvendige luftmængder blive forskellige på baggrund af denne forskel i solindfaldet. En forskel som ikke nødvendigvis er reel.

Flade vinkler og solens position

Flade vinkler

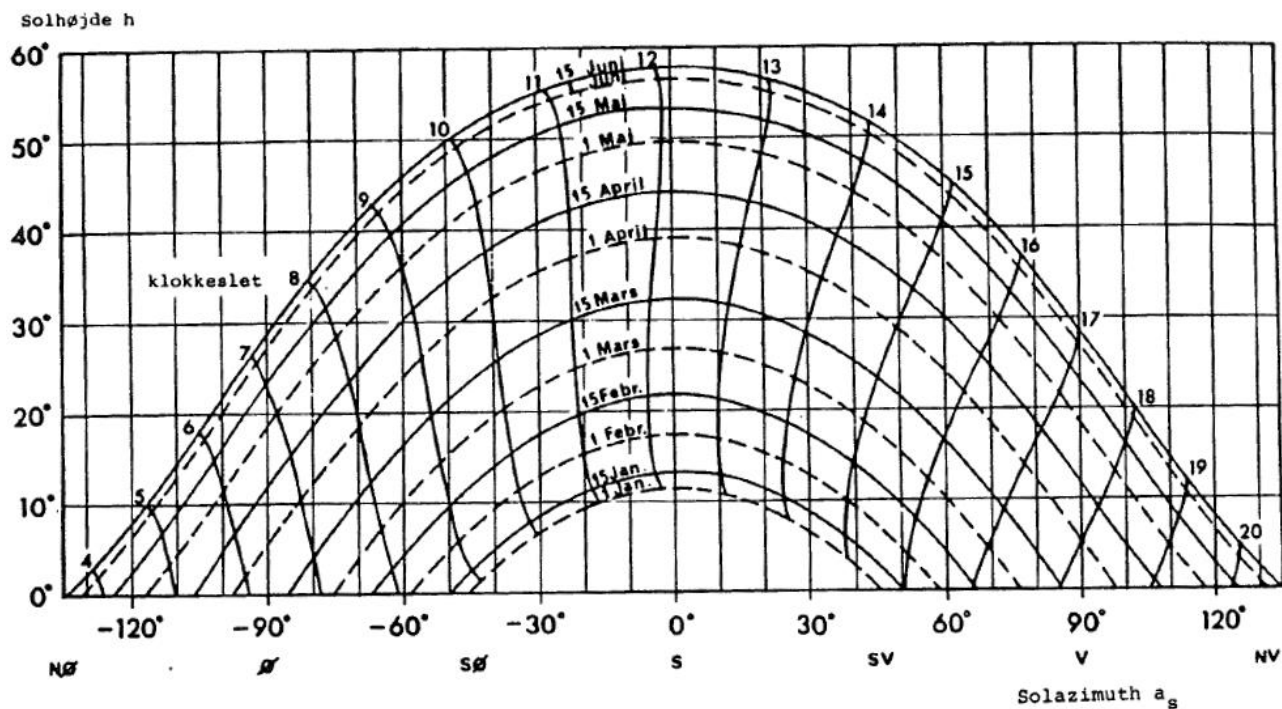
Orienteringen af en flade angives ved dens hældning med vandret, t , og facadeazimut, a_f , der er vinklen mellem den lodrette normal plan for fladen og den lodrette plan gennem syd retningen. a_f er nul mod syd og regnes negativ mod øst og positiv mod vest, Figur 12-12.



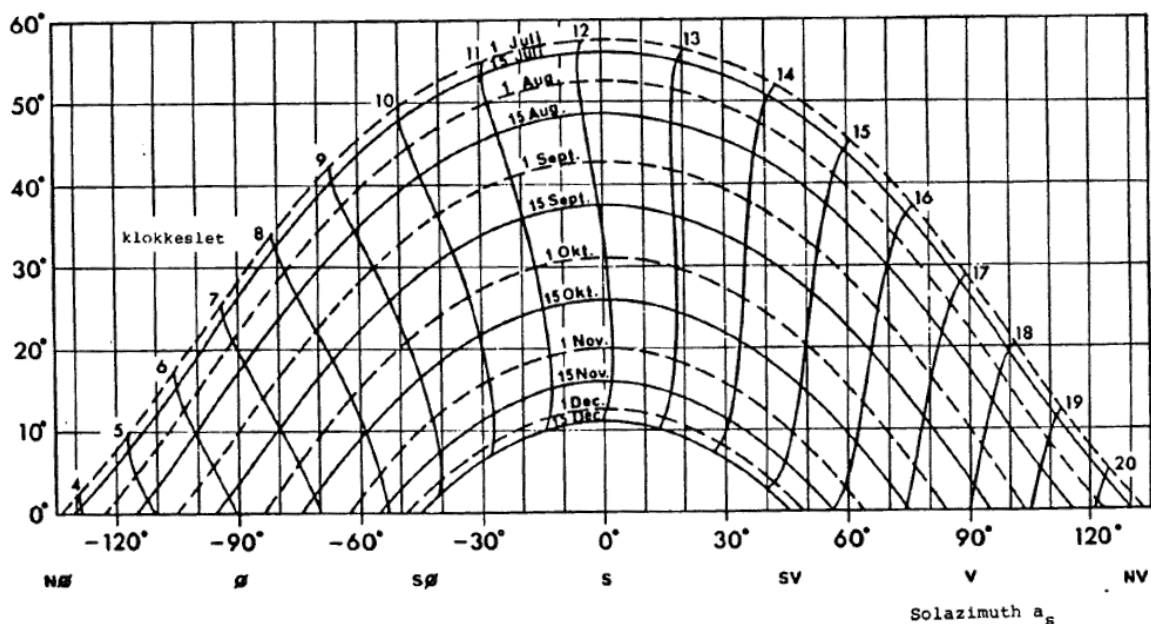
Figur 12-12 Beskrivelse af forskellige begreber ved solindfald

Solens position

Solens position på himmelhvælvingen angives med solhøjden, h , og solazimut, a_s , der regnes med fortegn på samme måde som a_f , Figur 12-12. Solens højde afhænger af stedets geografiske beliggenhed, dato og klokkeslæt. I Figur 12-13 og Figur 12-14 er solhøjden og solazimut afbilledet som funktion af dato og klokkeslæt, gældende for København.



Figur 12-13 Solens position i København 1. januar – 15. juni



Figur 12-14 Solens position i København 1. juli – 15. december

Solindfald

Ved solindfald på en flade skelnes mellem direkte og diffus stråling. Den direkte stråling kan betragtes som kommende fra solen, som udgør en punktførmig kilde, der bevæger sig henover himmelhvælvingen. Den diffuse stråling består dels af diffus himmelstråling dels af reflekteret diffus stråling fra omgivelserne.

Den direkte solindstråling mod en overflade er først og fremmest afhængig af solens højde på himlen og strålernes indfaldsvinkel. På en skyfri dag udgør den direkte stråling fra solen op til ca. 90 % af totalstrålingen.

Følgende fire begreber er vigtige i forbindelse med beregning af solindfald:

- **Indfaldsvinkel** Indfaldsvinklen er vinklen mellem den direkte solstrålings retning og fladens normal, dvs. det er en linje der står vinkelret på fladen.
- **Direkte solstråling** Den direkte solstråling er den del af solstrålingen, der kommer direkte fra solen uden at være blevet spredt i atmosfæren.
- **Diffus solstråling** Den diffuse solstråling er den del af solstrålingen, der spredes i atmosfæren og derfor ikke kommer direkte fra solskiven, men fra andre steder på himmelhvælvingen.
- **Reflekteret solstråling** Den reflekterede solstråling er den del af solstrålingen, der rammer jordoverfladen og andre objekter og kastes tilbage herfra.

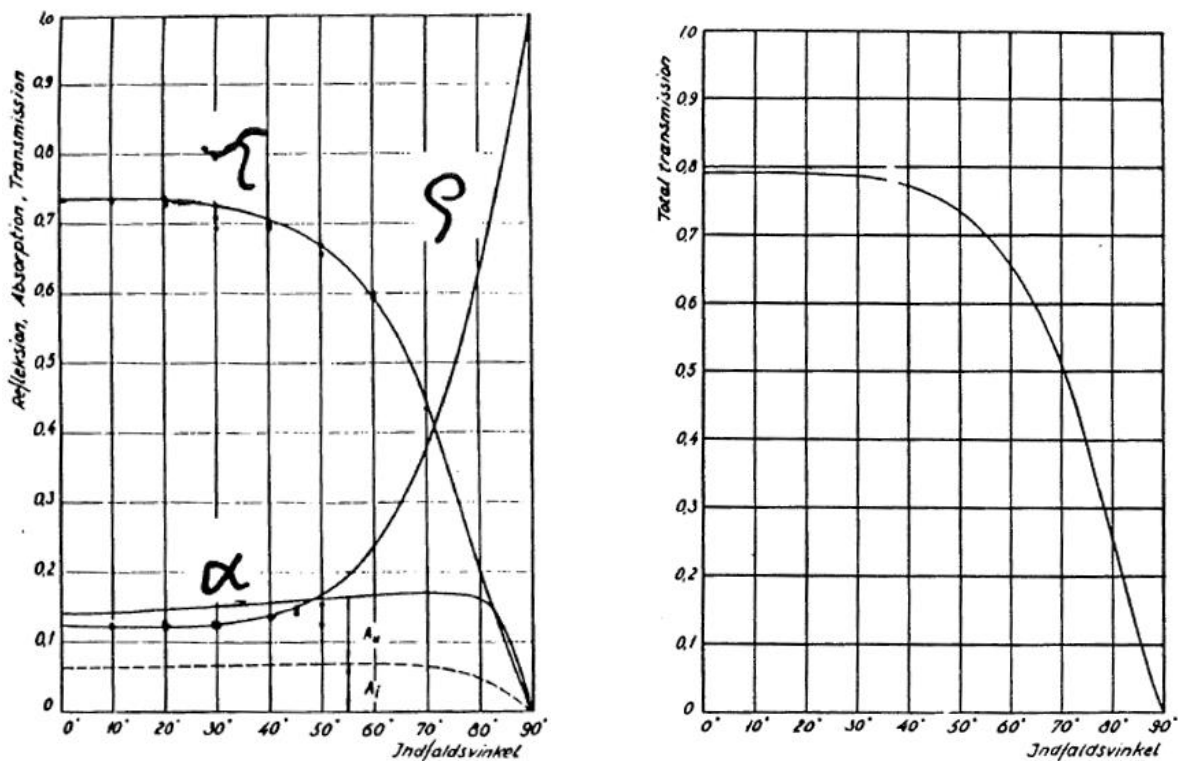
12.18. Appendiks B – Solindfald gennem rude

En vigtig del af en bygnings klimaskærm er vinduer, som har til formål at beskytte mod udeklimaet i kombination med at skabe udsyn og få dagslys ind i lokalet. Vinduer vil ikke blive beskrevet nærmere i dette kapitel, idet der henvises til relevant litteratur. Fokus vil i stedet for være på ruder med deres tilhørende solindfald og bidrag til rummets varmebalance.

Soltransmission gennem glasrude

Når solstråling rammer en glasrude, bliver en del reflekteret (ρ), en del absorberet (α) og en del transmitteret (τ). Størrelsen af ρ , α og τ er afhængig af glastypen, vindueskonstruktionen, indfaldsvinklen og strålingens spektralfordeling.

Den del af strålingen, der bliver absorberet, vil bevirke, at glassets temperatur stiger, indtil der opstår en ligevægtstilstand mellem den absorberende varme og den varme, der afgives ved konvektion og langbølget stråling til omgivelserne. Absorptans varierer meget lidt med indfaldsvinklen i modsætning til transmittans og reflektans, der er meget vinkelafhængig. For vinkler mellem 0 og 40 grader er transmissionen og refleksionen næsten konstant, hvorimod transmissionen aftager meget ved større indfaldsvinkler, og refleksionen tilsvarende stiger, Figur 12-15.



Figur 12-15 VENSTRE: Reflektans (ρ), absorptans (α) og transmittans (τ) af direkte solstråling for en almindelig dobbeltrude som funktion af indfaldsvinklen i . HØJRE: Totaltransmissionen for den direkte solstråling gennem en almindelig dobbeltrude som funktion af indfaldsvinklen

Illustration af lineær interpolation

Tabellerne for transmitteret direkte solstråling i Afsnit 12.19 Appendiks C er opgivet for orienteringer i spring på 45 grader, f.eks.: syd, sydvest, vest, nordvest, etc. Herudover er resultaterne vist for den 21. i hver måned.

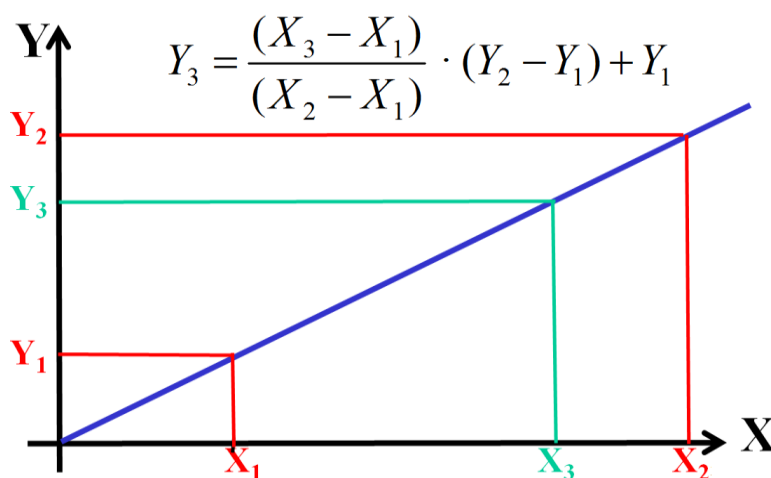
Hvis den givne orientering ikke stemmer overens med de opgivne orienteringer eller det er en anden dato end den 21 i måneden, kan det blive nødvendigt at udføre en lineær interpolation. Da lineær interpolation ikke indgår i skolens pensum længere, er der i det følgende givet ligningen for udførelse af lineær interpolation.

Lineær interpolation kan udføres ved brug af formlen:

$$Y_3 = \frac{(X_3 - X_1)}{(X_2 - X_1)} \cdot (Y_2 - Y_1) + Y_1$$

Ligning 12-34

På Figur 12-16 er formlen med tilhørende illustration vist.



Figur 12-16 Illustration af lineær interpolation med tilhørende formel

12.19. Appendiks C – Tabeller solstråling, reference dobbeltrude

I dette afsnit vises tabeller for transmitteret solstråling gennem en uafskærmet reference dobbeltrude kendetegnet ved følgende egenskaber:

- 4 mm floatglas – 12 mm luft – 4 mm floatglas. U-værdi
Transmissionsfaktor for solenergi på 0,76 (g-værdi, solfaktor) : $g_{reference} = 0,76$

Tabellerne er baseret på (DANVAK, 2006) og er beregnet for skyfri dage med maksimal solbelastning. Der er regnet med den 21. i hver måned, hvilket gør det muligt i (DANVAK, 2006) at have to orienteringer på hver kurve, og dermed få parrede kurver for: november/januar, oktober/februar, september/marts, august/april, juli/maj.

Soldata er i sand soltid med beliggenhed længdegrad 15 grader øst. Data er symmetriske om time 12 (kl. 11.30 til kl. 12.30 sand soltid), og på denne måde opnås, at solindfaldet har samme størrelsesorden for øst og vest. Tidsforskellen for solens vandring mellem længdegrad 15 grader øst (Bornholm) til København og Esbjerg er henholdsvis 11 og 25 minutter.

Det står ikke beskrevet nogen steder, hvor soldata i (DANVAK, 2006) stammer fra, og hvordan de er beregnet. Ved DTU Byg er der blevet foretaget nogen sammenligninger, der indikerer, at den største overensstemmelse fås ved benyttelse af BSim på følgende måde:

- Munier's sol model anvendes
- Skydække sættes til 0 og direkte stråling korrigeres i forhold til denne ændring. Disse ændringer implementeres i vejrdatabasen og der simuleres med den nye tilpassede vejrdatabase
- Den direkte stråling i (DANVAK, 2006) er inklusiv reflekteret stråling med refleksion fra jordoverfladen på 25% – Reflektans $\rho = 0,25$.
- Længdegraden sættes til 15 grader øst
- Recess funktionen skal benyttes og sættes til 0,0001 m og XSun sol fordeling skal være sat til. Recess funktionen benyttes til at placere ruden i forhold til den udvendige vægsoverflade.

Generelt i BSim er det altid vigtigt at benytte Recess funktionen, da der ellers kan forekomme meget store fejl ved beregningen af solindfaldet. En rude placeret helt yderst i en væg kan således få beregnet et solindfald på kun f.eks. 50% af det korrekte, hvis recess funktionen ikke er benyttet.

I det følgende vises i alt 8 tabeller for transmitteret direkte solstråling gennem en uafskærmet reference dobbeltrude i enheden: W/m^2 . Tabel 12-22 til Tabel 12-29 er i spring på 45°: Syd, Sydvest, Vest, etc. Den transmitteret direkte solstråling antages at være inklusiv reflekteret stråling med refleksion fra jordoverfladen på 25% (reflektans $\rho = 0,25$). Herudover vises en tabel for den transmitterede diffuse himmelstråling for samme rude, Tabel 12-30.

Det er standard dobbeltruden, som er benyttet som reference rude i (DANVAK, 2006) og i TCD programmet (Christensen, 2018).

Tabel 12-22 Syd: Transmitteret direkte solstråling for uafskærmet reference dobbeltrude i W/m^2 . Værdierne antages at være inklusiv reflekteret stråling fra omgivelser ($\rho = 0,25$)

Syd																	SUM	
					8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	W/m ²
Januar						212	372	466	494	466	372	212						2594
Februar					160	324	456	538	562	538	456	324	160					3518
Marts					178	336	454	524	552	524	454	336	178					3536
April					114	266	382	450	476	450	382	266	114					2900
Maj					54	180	294	366	392	366	294	180	54					2180
Juni					22	146	254	332	350	332	254	146	22					1858
Juli					54	180	294	366	392	366	294	180	54					2180
August					114	266	382	450	476	450	382	266	114					2900
September					178	336	454	524	552	524	454	336	178					3536
Oktober					160	324	456	538	562	538	456	324	160					3518
November						212	372	466	494	466	372	212						2594
December						110	310	408	442	408	310	110						2098

Tabel 12-23 Sydvest: Transmitteret direkte sol stråling for uafskærmet reference dobbeltrude i W/m^2 . Værdierne antages at være inklusiv reflekteret stråling fra omgivelser ($\rho = 0,25$)

Sydvest																	SUM	
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	W/m ²
Januar								216	336	408	406	292						1658
Februar								232	394	482	524	448	328					2408
Marts								202	370	484	558	560	492	324	0			2990
April								128	306	438	518	538	506	408	244	36		3122
Maj								76	244	372	456	482	462	388	262	106		2848
Juni								56	222	346	426	454	434	370	262	106		2676
Juli								76	244	372	456	482	462	388	262	106		2848
August								128	306	438	518	538	506	408	244	36		3122
September								202	370	484	558	560	492	324	0			2990
Oktober								232	394	482	524	448	328					2408
November								216	336	408	406	292						1658
December								196	302	362	330	146						1336

Tabel 12-24 Vest: Transmitteret direkte sol stråling for uafskærmet reference dobbeltrude i W/m². Værdierne antages at være inklusiv reflekteret stråling fra omgivelser ($\rho = 0,25$)

Vest																	SUM			
										12	13	14	15	16	17	18	19	20	W/m2	
Januar										0	62	172	188							422
Februar										0	88	244	294	298						924
Marts										0	88	280	422	508	394	0				1692
April										0	88	280	442	536	536	414	90			2386
Maj										0	88	280	442	536	566	512	360	92		2876
Juni										0	88	280	442	536	566	534	402	210		3058
Juli										0	88	280	442	536	566	512	360	92		2876
August										0	88	280	442	536	536	414	90	0		2386
September										0	88	280	422	508	394	0				1692
Oktober										0	88	244	294	298	0					924
November										0	62	172	188	0						422
December										0	52	136	90							278

Tabel 12-25 Nordvest: Transmitteret direkte sol stråling for uafskærmet reference dobbeltrude i W/m². Værdierne antages at være inklusiv reflekteret stråling fra omgivelser ($\rho = 0,25$)

Nordvest																	SUM		
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	W/m2	
Januar																			0
Februar																			0
Marts													12	122	190	0			324
April													36	192	314	312	100		954
Maj													74	240	380	434	370	100	1598
Juni											0	94	296	400	464	424	264		1942
Juli												74	240	380	434	370	100		1598
August													36	192	314	312	100		954
September													12	122	190	0			324
Oktober																			0
November																			0
December																			0

Tabel 12-26 Nord: Transmitteret direkte sol stråling for uafskærmet reference dobbeltrude i W/m^2 . Værdierne antages at være inklusiv reflekteret stråling fra omgivelser ($\rho = 0,25$)

Nord																	SUM	
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	W/m ²
Januar																		0
Februar																		0
Marts																		0
April		22	10												10	22		64
Maj	54	124	42	0									0	42	124	54		440
Juni	152	156	62	0									0	62	156	152		740
Juli	54	124	42	0									0	42	124	54		440
August		22	10												10	22		64
September																		0
Oktober																		0
November																		0
December																		0

Tabel 12-27 Nordøst: Transmitteret direkte sol stråling for uafskærmet reference dobbeltrude i W/m^2 . Værdierne antages at være inklusiv reflekteret stråling fra omgivelser ($\rho = 0,25$)

Nordøst																	SUM	
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	W/m ²
Januar																		0
Februar																		0
Marts			0	190	122	12												324
April		100	312	314	192	36												954
Maj	100	370	434	380	240	74												1598
Juni	264	424	464	400	296	94	0											1942
Juli	100	370	434	380	240	74												1598
August		100	312	314	192	36												954
September			0	190	122	12												324
Oktober																		0
November																		0
December																		0

Tabel 12-28 Øst: Transmitteret direkte sol stråling for uafskærmet reference dobbeltrude i W/m^2 . Værdierne antages at være inklusiv reflekteret stråling fra omgivelser ($\rho = 0,25$)

Øst																	SUM	
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	W/m ²
Januar						188	172	62	0									422
Februar					298	294	244	88	0									924
Marts			0	394	508	422	280	88	0									1692
April		90	414	536	536	442	280	88	0									2386
Maj	92	360	512	566	536	442	280	88	0									2876
Juni	210	402	534	566	536	442	280	88	0									3058
Juli	92	360	512	566	536	442	280	88	0									2876
August		90	414	536	536	442	280	88	0									2386
September			0	394	508	422	280	88	0									1692
Oktober					298	294	244	88	0									924
November						188	172	62	0									422
December						90	136	52	0									278

Tabel 12-29 Sydøst: Transmitteret direkte sol stråling for uafskærmet reference dobbeltrude i W/m^2 . Værdierne antages at være inklusiv reflekteret stråling fra omgivelser ($\rho = 0,25$)

Sydøst																	SUM	
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	W/m ²
Januar						292	406	408	336	216								1658
Februar					328	448	524	482	394	232								2408
Marts			0	324	492	560	558	484	370	202								2990
April		36	244	408	506	538	518	438	306	128								3122
Maj		106	262	388	462	482	456	372	244	76								2848
Juni		106	262	370	434	454	426	346	222	56								2676
Juli		106	262	388	462	482	456	372	244	76								2848
August		36	244	408	506	538	518	438	306	128								3122
September			0	324	492	560	558	484	370	202								2990
Oktober					328	448	524	482	394	232								2408
November						292	406	408	336	216								1658
December						146	330	362	302	196								1336

På den næste tabel vises Transmitteret diffus himmelstråling gennem en uafskærmet ref. dobbeltrude i W/m².

Tabel 12-30 Transmitteret diffus himmelstråling gennem en uafskærmet ref. dobbeltrude i W/m²

Diffus stråling																	SUM	
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	W/m ²
Januar					0	8	13	15	16	15	13	8	0					88
Februar				0	10	15	18	19	20	19	18	15	10	0				144
Marts			0	12	17	20	22	24	24	24	22	20	17	12	0			214
April		3	13	18	21	24	26	28	29	28	26	24	21	18	13	3		295
Maj	3	12	17	20	24	27	29	31	32	31	29	27	24	20	17	12	3	358
Juni	7	14	18	22	25	28	30	32	33	32	30	28	25	22	18	14	7	385
Juli	3	12	17	20	24	27	29	31	32	31	29	27	24	20	17	12	3	358
August		3	13	18	21	24	26	28	29	28	26	24	21	18	13	3		295
September			0	12	17	20	22	24	24	24	22	20	17	12	0			214
Oktober				0	10	15	18	19	20	19	18	15	10	0				144
November					0	8	13	15	16	15	13	8	0					88
December						4	10	13	14	13	10	4						68

13. ENERGIRENOVERING

*Peter Oldendow-Jantzen, Maskinmester. & Aut. el-installatør
Maskinmesterskolen København
poj@oldendow-jantzen.dk*

*Med editering af Arne Jakobsen, Docent
Maskinmesterskolen København
aj@msk.dk*

*Kapitlet kan læses selvstændigt, men er skrevet som et kapitel til en samlet lærebog indenfor
Technical Facility Management, hvor omdrejningspunktet er indeklime og energiforbrug.*



ELFORSK

Dette kapitel er blev udarbejdet som del af projektet **Energirigtigt drift af det rette indeklime i bygninger – ENDRIN** støttet af ELFORSK i periode 2016–2017, projektnummer 348-006 (www.elforsk.dk).

13.1. Indhold

13.1.	Indhold.....	2
13.2.	Læringsmål.....	3
13.3.	Indledning.....	4
13.4.	Energirenovering.....	4
13.5.	Behovsanalyse.....	6
13.6.	Ledelsen.....	7
	Forandringsledelse.....	7
	Ekspert- og deltagelsesstrategi.....	7
13.7.	Litteraturliste.....	9
13.8.	Bilag 1.....	11
13.9.	Bilag 2.....	12

13.2. Læringsmål

Studerende der læser følgende kapitel skal være i stand til at

- Forstå og identificere incitamenter til at foretage energirenovering
- Kunne tage udgangspunkt i relevante standarder og anvisninger
- Bevidst vælge projektstrategi, som sikrer at driftspersonalets viden og ønsker inddrages løbende
- Identificere hovedfaktorer som er bestemmende for en bygnings energiforbrug

13.3. Indledning

Med fokus på at give maskinmester- og ingeniørstuderende et indblik i, hvordan man både kan styre bygningsdrift mod et mindre energiforbrug og et bedre indeklima, vil der i de følgende afsnit blive inddraget korte emner, fra teknik til ledelse, som bidrager med en væsentlig betydning for at opnå disse mål. I flere energioptimeringsprojekter som Oldendow-Jantzen ApS på den ene eller anden måde har været aktør i, er der gjort erfaringer som videreformidles i dette opslag. Derudover har der været samtaler og præsentationer fra større aktører som DEAS A/S med Hans Andersen i spidsen for Energiafdelingen. Som udgangspunkt bør de studerende gøre sig bekendt med litteraturen angivet bagerst i rapporten. Hvad enten det drejer sig om energioptimering, indeklimastrategier eller begge dele på enkelte bygninger eller større ejendomsporteføljer så vil de oplyste standarder altid være gode udgangspunkter for valg af fremgangsmåde og de er nødvendige at kende for at man ”fremstår som professionel”. Det ønskede indeklima i en bygning er en vigtig parameter når de tekniske systemer skal forbedres, dimensioneres og vælges, da det har en direkte indflydelse på energiforbruget i bygningen. Iht. DS/EN 15251 (Input-parametre til indeklimaet ved design og bestemmelse af bygningers energimæssige ydeevne vedrørende indendørs luftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustik) bliver bygninger klassificeret i fire forskellige kategorier: kategori 1, 2, 3 og 4. De forskellige kategorier angiver indeklimakriterierne til bygningen. Dette hænger stærkt sammen med forudsætningerne for energiforbruget til opvarmning, køling og ventilation af bygningen.

13.4. Energirenovering

Efter en energirenovering er den økonomiske besparelse på sparet energi ofte kun en lille del af den samlede økonomiske gevinst, især ved udlejningsejendomme:

1. Bygherre kan, ved reducerede forbrugsomkostninger for lejer, hæve huslejen således at lejers samlede udgifter er konstante.
2. I takt med at huslejen stiger og at bygningskvaliteten øges, vil bygningens værdi forøges.
3. Flere virksomheder efterspørger og kræver et godt indeklima, hvilket en energirenovering kan medføre. En energirenovering kan derfor være ensbetydende med at der kommer nye lejere til, samtidig med at de eksisterende lejere er interesseret i at forlænge lejekontrakten. Det medfører yderligere minimering af tomgang i bygningen.
4. Bygherre kan fastholde eller hæve sit gode omdømme ved at skabe sig en grøn profil.

I forbindelse med en energirenovering er det vigtigt at finde potentialerne til reducere af energiforbruget og forbedring af indeklimaet. Overordnet set, kan det kategoriseres i følgende; klimaskærm, brugeradfærd, energieffektivt udstyr og installationer samt energivenligt brug af udstyr og installationer (Tabel 13-1). I bilag 1 ses en illustrativ form af tabellen.

Tabel 13-1 Oversigt over potentielle forbedringer til gavn for energiforbrug og indeklima

Klimaskærm	Brugeradfærd
Isolering af mure Energivinduer Solafskærmning	Valg af påklædning Ingen overstyring af temperaturer osv. af ansatte som ikke er fra driftspersonalet
Energieffektivt udstyr og installationer	Energivenligt brug af udstyr og installationer
Ventilation Opvarmning Køling CTS Lys Pumper Diverse	Indeklimastrategier Utility Management Energiledelse

I en energirenovering skal de eksisterende forhold og anlæg kortlægges. Ligeledes skal det undersøges om de eksisterende anlæg kan udskiftes til en nyere teknologi med eksempelvis bedre virkningsgrader og med mulighed for at styre indeklimaparametre efter særlige sætpunkter for temperatur og belysning, som er i overensstemmelse med den pågældende bygnings indeklimastrategi og gældende lovgivning. De økonomiske besparelser skal beregnes på baggrund af forventningerne til energipriser og energibesparelserne skal beregnes ud fra de forudsætninger der indsamles fra bygningen omkring driftstider, brugsmønstre, nedetider, sætpunkter etc. Disse data kan indsamles via BMS-systemer med datalogning, opsætning af kalibreret udstyr til måling af data over en periode eller det kan foregå ved at indsamle værdifuld viden fra de driftsansvarlige, der dagligt begår sig i bygningen og de daglige brugere, fx personale. Ved inddragelse af driftspersonalet skal man forholde sig til, at der gøres brug af god forandringsledelse som et værktøj (jf- afsnittet om ledelse). Der skal vurderes en usikkerhed for de beregnede energibesparelser, særlig kritisk kan det blive på BMS-anlæg der har været driftet i en lang periode og hvortil der ikke findes data på hvordan det er blevet driftet. For at kunne komme i mål med et resultat der indfrier bygherrens forventninger til energirenoveringen skal det aftales hvordan forbedringerne kan kontrolleres og verificeres. Her kan der henvises til bygningsstyrelsens performancetest på tekniske installationer, <https://www.bygst.dk/viden-om/performancetest/>.

I år 2017 er SBi-anvisning 269 blevet udgivet og den omhandler metode og proces for gennemførelse af energirenoveringsprojekter for større bygninger fra idefase til driftsfase. Større bygninger omfatter etageboliger, bygninger til privat handel- og service samt offentlige institutioner.

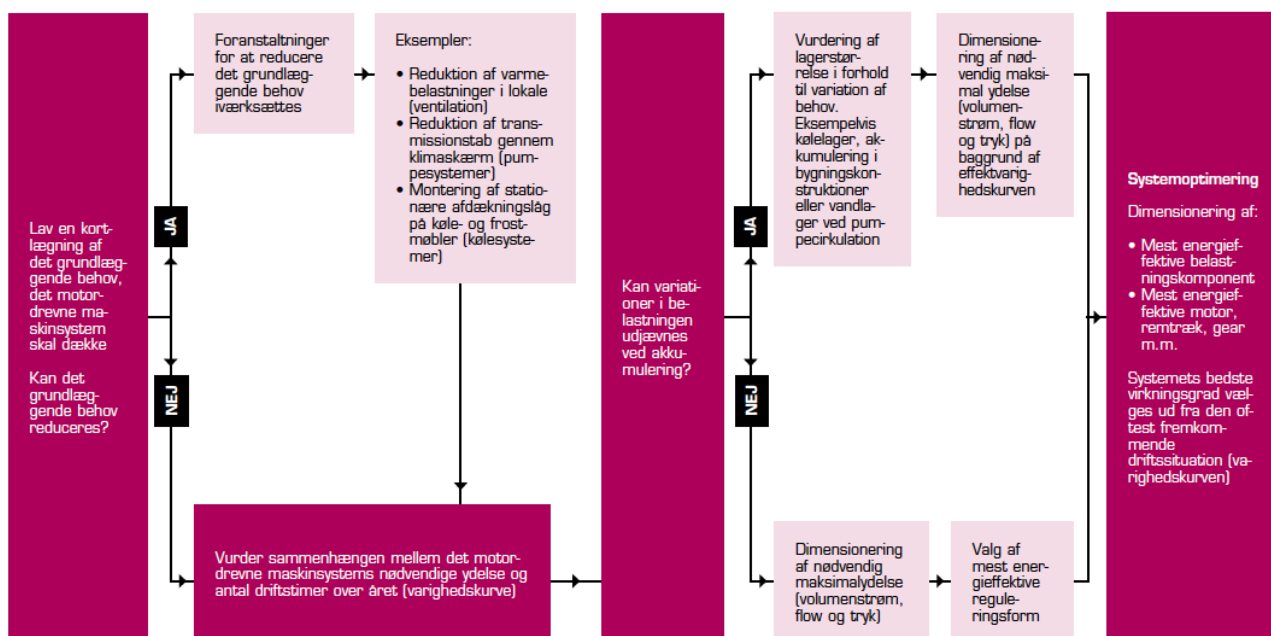
Faserne i energirenoeringen illustreres i bilag 2, som er udarbejdet af Statens Byggeforskningsinstitut selv.

13.5. Behovsanalyse

Det grundlæggende behov bør vurderes for de elektriske og termiske systemer som opretholder bygningens indeklima. Man bør starte med at sammenholde målte og aflæste værdier med de standarder der er relevante. Eksempelvis lysmålinger sammenholdt med værdier fra DS/EN 12464-1 eller indeklima-målinger sammenholdt med værdier fra DS/EN 15251. Man skal huske, at belysnings-, ventilations-, køle- og varmeanlæg ofte er overdimensioneret i forhold til det faktiske behov, og at en eventuel manglende strategi eller plan for, hvordan bygningen skal driftes, med tiden kan og oftest vil resultere i et øget energiforbrug og/eller et dårligere indeklima end oprindeligt tiltænkt.

”Den dimensionerende ydelse vil i mange tilfælde være bestemt af det maksimale behov. Eksempelvis ventilationssystemer, hvor der skal kunne leveres en maksimal volumenstrøm, når de termiske og atmosfæriske belastninger i lokalet er maksimale” – Den store blå om systemoptimering, s. 129.

Til maskindrevne systemer kan der blandt andet ses på analyseværktøjet beskrevet i den store blå om systemoptimering.



Figur 13-1 Analyseværktøj, Den store blå om Systemoptimering, s. 131

13.6. Ledelsen

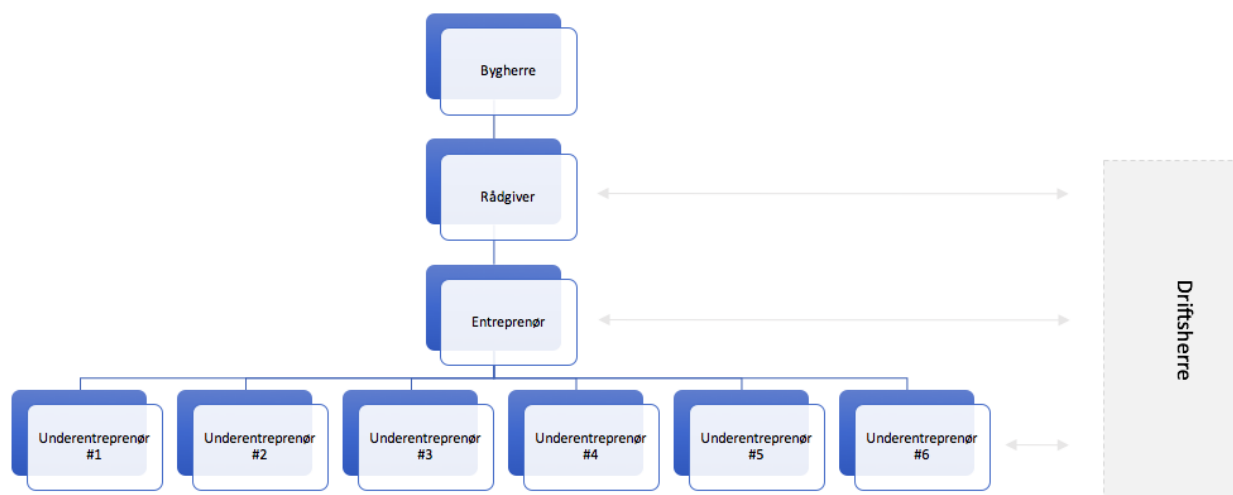
En uvurderlig del af at foretage en analyse af det aktuelle energiforbrug og deraf et forslag til, hvorledes energiforbruget i bygningen kan reduceres, er ”den tavse viden”. Den tavse viden er den viden som driftspersonale har omkring de tekniske anlæg, brugsmønstrene i bygningen og de erfaringer som driftspersonalet har gjort sig, ofte igennem mange år på samme arbejdsplads. Her kan maskinmesteren eller ingeniøren få forståelse for bygningens anvendelse og behov, se behovsanalysen. Derfor er det vigtigt, at man forstår at begå sig med gode kommunikationsevner iblandt virksomhedens driftspersonale. Det vil ligeledes give anledning til at der allerede i et tidligt stadium opbygges tillid mellem de personer, der ønsker at implementere den nye teknologi og de der efterfølgende skal drifte og vedligeholde anlæggene. Erfaring fra samtaler med forskellige personer som drifter både større og mindre ejendomme siger uafhængigt af hinanden, at der ønskes en større inddragelse i de energioptimeringsprojekter der gennemføres. Dette gælder allerede fra projektets spæde opstart.

Forandringsledelse

I et fulgt energioptimeringsprojekt var der udfordringer med, at der på et ret sent tidspunkt blev forsøgt at ændre driftspersonalets faldende interesse for projektet. Det er derfor vigtigt, at man inddrager en type af forandringsledelse. Der bør derfor forventningsafstemmes ifht. om der er brug for at følge en ekspertstrategi eller deltagelsesstrategi (eller kombination heraf) i projektet for at undgå en dalende eller modarbejdende interesse for projektet.

Ekspert- og deltagelsesstrategi

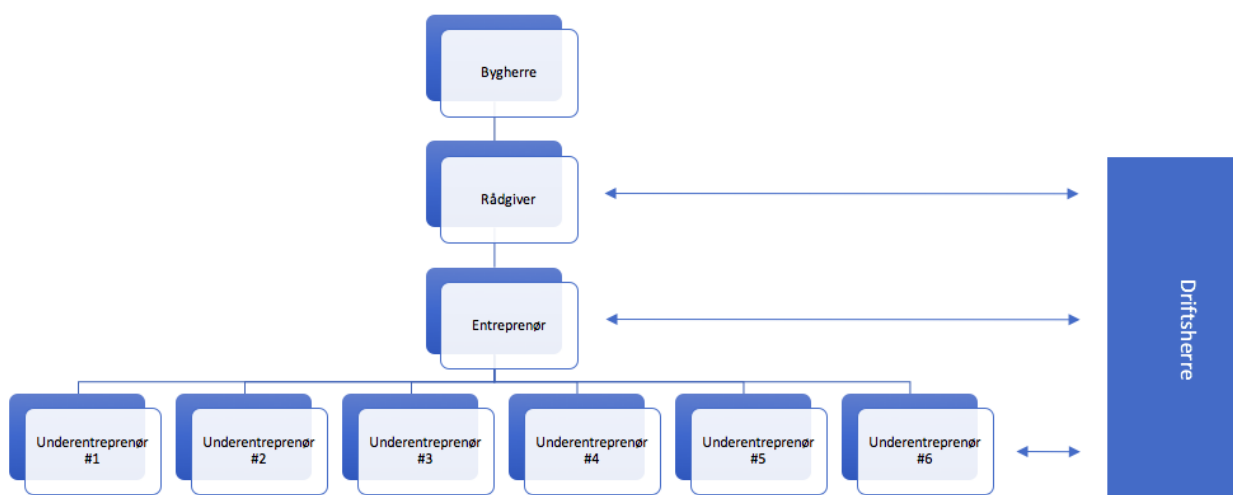
”Anvendelse af ekspertstrategi er karakteriseret ved, at en eller flere eksperter gennemfører en analyse og diagnose, der fører frem til en problemformulering og design af det nye system. Denne strategi vil under implementeringen risikere at medføre modstand mod forandring hos brugerne af det nye system, idet de ikke har fået reelt ejerskab til og forståelse for indretningen af det nye. Ligeledes kan der blive truffet mange detailbeslutninger, som bærer præg af, at brugernes oparbejdede viden ikke er blevet anvendt. Det er typisk for en ekspertstrategi, at ledelsen gennem information og uddannelse på et relativt sent (og ofte for sent) tidspunkt i projektforløbet søger at indhente det forsømte ved at søge at skabe positive holdninger til det nye” – Organisationsteori, ekspertstrategi, s. 397.



Figur 13-2 Kommunikation under et ekspertstrategiforløb, lidt eller ingen kommunikation i mellem de driftsansvarlige og byggeansvarlige

En anden strategi, deltagelsesstrategi, sætter fokus på at udnytte den viden som driftspersonalet har om deres arbejde.

”dette kan tale for, at vælge deltagelsesstrategi, som har til formål at udnytte den viden, de menige medarbejdere har om deres arbejde, og samtidig give dem mulighed for at varetage deres egne interesser”. – Organisationsteori, deltagelsesstrategi, s. 398.



Figur 13-3 Kommunikation under et deltagelsesstrategiforløb, nødvendig kommunikation i mellem de ansatte driftsfolk, de driftsansvarlige og byggeansvarlige

En god og succesfuld energirenovering med alle dens facetter handler i korte træk om:

- Teknisk know-how
- Projektledelse
- Anvendelse af eksisterende tværfaglig litteratur (teknik, lovgivning, standarder, forandringsledelse, Elforsks blå bøger, SBI-anvisninger og lign.)
- Inddragelse af brugere og driftspersonale

13.7. Litteraturliste

- DS/EN 12464-1 Belysning ved arbejdspladser.
Giver læseren mulighed for at sætte krav der er hensigtsmæssige for energi, indeklime og arbejdsmiljø.
- DS/EN 12464-1 NA:2015 National annekst til DS/EN 12464-1.
På en række punkter er der angivet nationale krav der er mere lempelige end Europa normen.
- DS/EN 15251 Input-parametre til indeklimeet ved design og bestemmelse af bygningers energimæssige ydeevne vedrørende indendørs luftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustik.
Værdier for anbefalede temperaturspænd samt CO₂-niveau.
- ELFORSK Den store blå om systemoptimering.
Find virkningsgrader og best practice for analyser på maskintekniske anlæg.
- ELFORSK Den lille blå om ventilation.
*Find virkningsgrader for ventilatorer, rem-typer, el-motorer.
Find målemetoder for måling på ventilationsanlæg.*
- ELFORSK Den lille blå om varme.
Find nøgletal for varmetabskoefficienter på rør, pumper og varmtvandsbeholdere, energiforbrug og fordele/ulempes ved forskellige typer af varmeanlæg samt årsvirkningsgrader for kedler.
- HB2016 Håndbog for energikonsulenter.
Find nøgletal til anvendelse for estimering af energiforbrug.

Bygningsstyrelsen

Performancetest

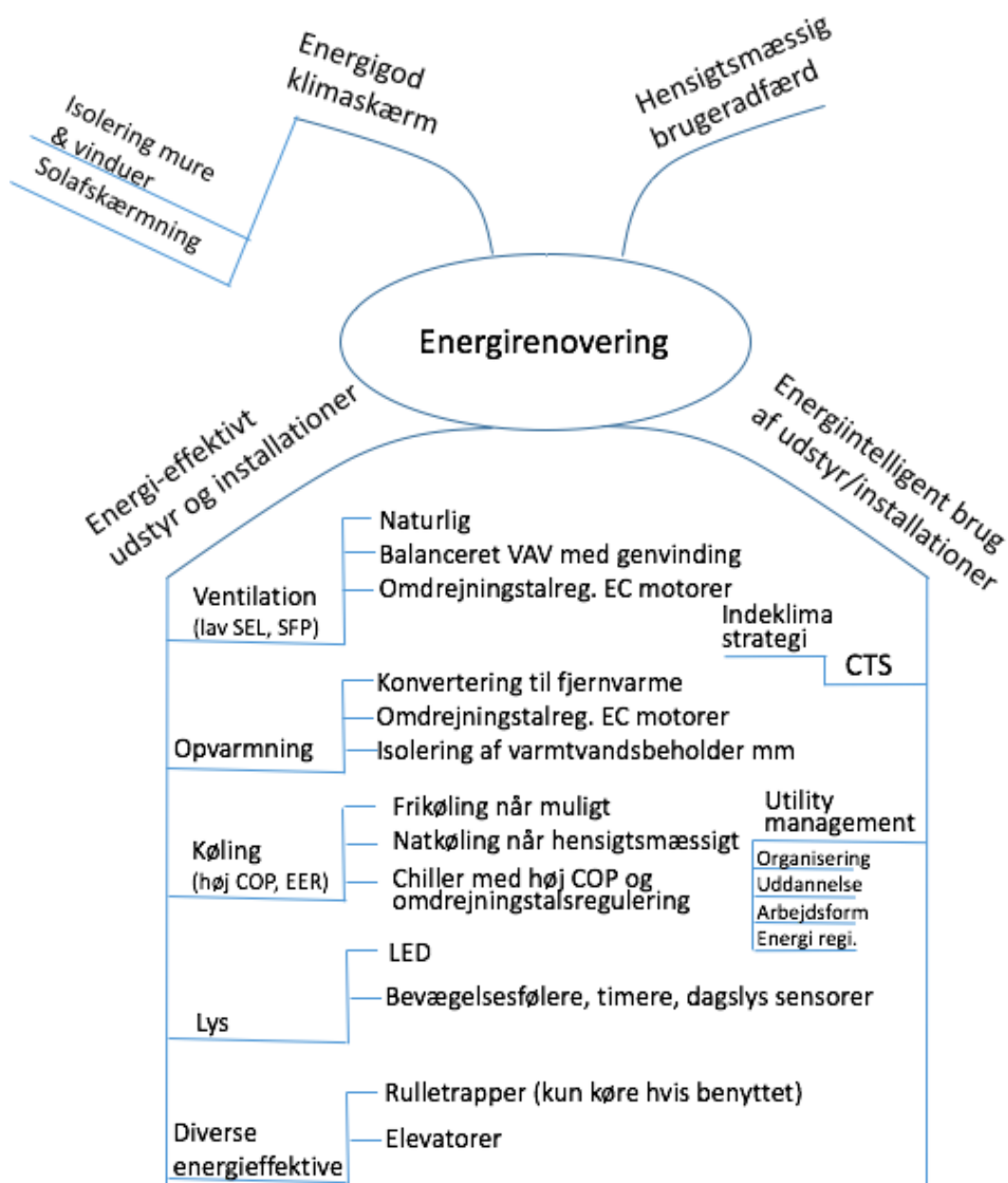
Ved aflevering af tekniske anlæg anbefaler bygningsstyrelsen, at man udfører en funktionsafprøvning der påviser, at anlæggene kører optimalt og med et hensigtsmæssigt energiforbrug.

SBi-anvisninger

Energiforbrug i bygninger

Flere udgivelser omkring energirenoeringsprocesser og energiforbrug i ejendomme.

13.8. Bilag 1



Figur 13-4 Illustration af Tabel 13 - 1, udarbejdet af Arne Jakobsen

13.9. Bilag 2

	Fokusområder					Aktører
Faser	Eksisterende forhold	Fremtidige forhold	Økonomi og energibesparelse	Usikkerhed og robusthed	Verifikation og kontrol	
Ide og vision	Funktion og brug Analyse af nuværende energiforbrug Opsætning af målere	Beskrive tanker, ideer og behov til den fremtidige bygning Energivision	Budget til rådighed Overslag over mulige besparelser Overordnede krav til pris, tid og kvalitet	Vurdering af usikkerhed på tiltag og besparelser	Behov og ønsker til senere verifikation	<ul style="list-style-type: none"> Bygherre Brugere Bygherrerådgiver Driftspersonale
Programmering	Definering af baseline Kortlægning af fysiske forhold og energiforbrug	Specifisering og prioritering af ønsker og krav Fremtidig driftsorganisation	Overblik over økonomimodel Estimat af forventet energibesparelse	Forventningsafstemning om robusthed og usikkerheder Udpegnning af kritiske forhold	Fastsættelse af krav til verifikation og performancetest Udarbejdelse af beslutningsgrundlag til bygherren (dokument) Måleprogram	<ul style="list-style-type: none"> Bygherre Brugere Bygherrerådgiver Rådgiver Driftspersonale
Design og projektering	Detailinformation omkring klimaskærm, installationer, brug og drift	Forslag til bygge- og installationstekniske principper og løsninger inkl. kontrolmuligheder (måleprogram)	Beregning af energibesparelse ud fra valgt økonomisk model	Løbende revision af energiberegning ift. projekjusteringer	Plan for: - Optimal drift af anlæg - Opfølgning på drift og energiforbrug - Udarbejdelse af kontrolplan	<ul style="list-style-type: none"> Bygherre Rådgiver Entreprenør Driftspersonale
Udførelse og ibrugtagning	Opfølgning og opdatering af baseline med ny viden	Sikring af fastholdelse af projektforsætninger og beslutningsgrundlag	Løbende revision af energiberegninger	Tilsyn på byggepladsen Kontrol af arbejdstegninger, Indregulering Performancetest (I)	Indbygning af målere og sikring af, at de kan aflæses Opsætning af system til dataopfølgning Performancetest (II)	<ul style="list-style-type: none"> Bygherre Rådgiver Entreprenør Driftspersonale
Drift	Funktion og brug af den færdige bygning Opdatering af grundlag for forventet energiforbrug	Justering af mål og visioner for fremtidig drift Energiledelse	Endelig beregning af opnået besparelse ud fra valgt kontrolplan	Instruktion af driftsfolk Løbende driftsoptimering	Løbende kontrol af drift og energiforbrug Sammenholde energiforbrug med kontrolplan	<ul style="list-style-type: none"> Bygherre Brugere Rådgiver Entreprenør Driftspersonale

Figur 13-5 Oversigt over faserne i et energioptimeringsprojekt, SBI-anvisning 269, Statens byggeforskningsinstitut