

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 indeklimateviden 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 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 strålingstemperatursymmetri
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

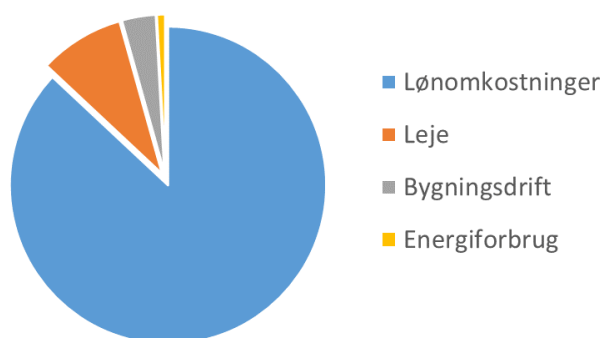
Hvis indeklimaet ikke er i orden, kan det have store konsekvenser for menneskets komfort og helbred. Påvirkningen fra indeklimaet kan medføre akutte symptomer som ubehag, irritation af slimhinderne i øjne, næse, mund og svælg, hudirritation, hovedpine, træthed og utilpashed, og langtids (kronisk) eksponering 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).



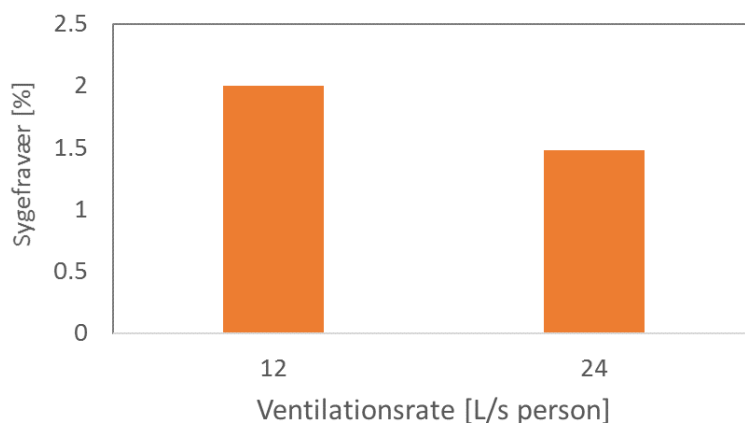
Figur 1-1 En ”syg bygning” betyder faktisk syge mennesker. Kilde: Center for Indeklima og Energi, DTU, www.iciee.byg.dtu.dk

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:

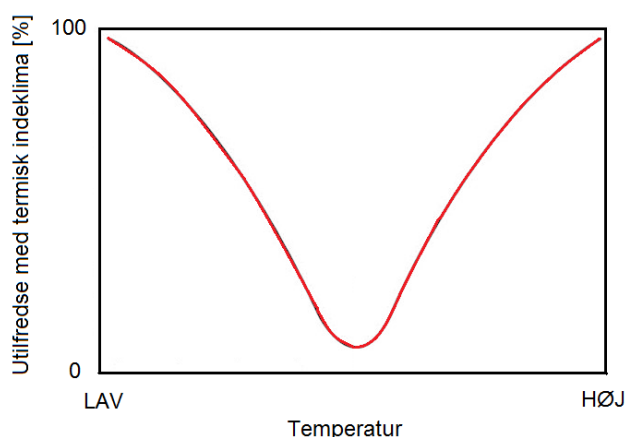
- Kulde og træk
- Overophedning
- Dårlig lugt
- Hovedpine og træthed
- Irritation i øjne, næse og hals
- Kvalme og svimmelhed
- Udslæt, rødme og kløe i huden

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):

$$M - W = H + E + C_{res} + E_{res}$$

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

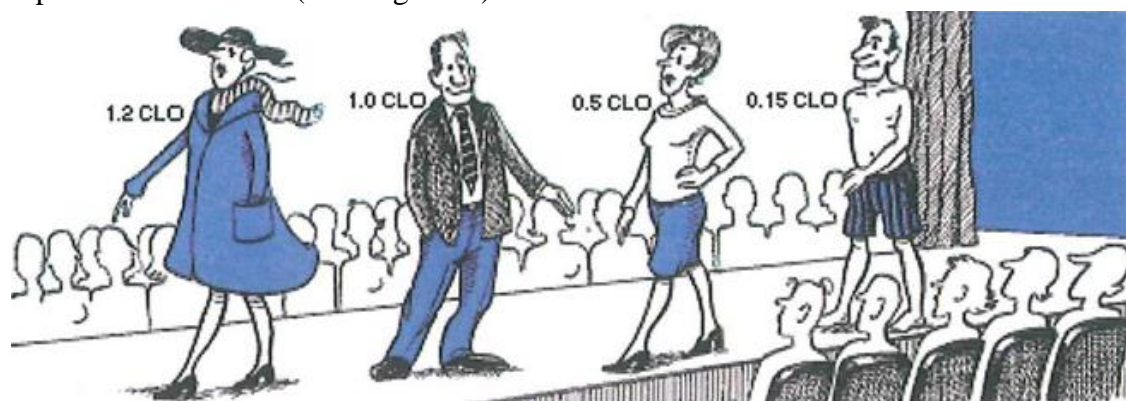
Afhængig af personens muskulære aktivitet produceres metabolismeenergi. Under normale omstændigheder bliver hele den muskulære aktivitet transformeret til varme i kroppen. Energien produceret af metabolisme måles i Met (1 Met = 58,15 W/m² kropsoverflade). En normal voksen har et areal på cirka 1,7 m² (mere præcist kan kropsoverfalde 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.

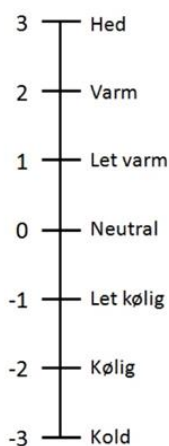
Det er vigtigt at huske, at polstrede sæder, bilsæder og senge også reducerer varmetabet fra kroppen. Derfor skal deres I_{cl} altid indgå i den samlede beregning. En typisk polstret kontorstol har $I_{cl} = 0.15 \text{ clo}$.



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

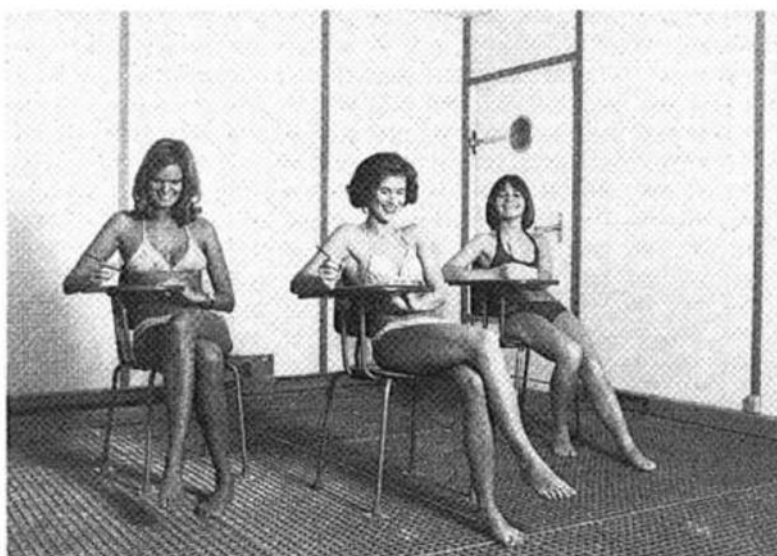
PMV - forventet middelvotering

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.



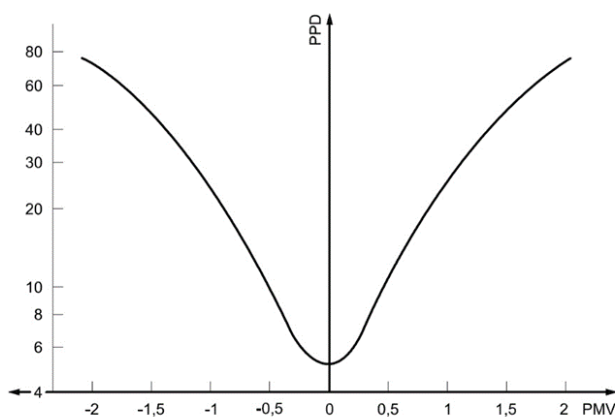
Figur 1-10 Forsøg i et klima kammer ved Center for indeklima og energi på Danmarks Tekniske Universitet. Kilde: Olesen (1982)

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!

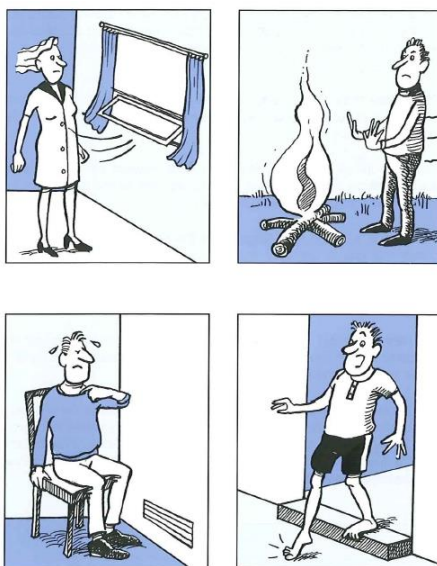
- Dette er en udfordring for driftspersonalet i kontorer og andre rum hvor der sidder flere mennesker, fordi der altid vil være enkelte personer, der finder omgivelserne varme eller kolde, selv om indeklimaparametrene (t_a , t_{mrt} , ϕ_a , v_a , I_{cl} , M) svarer til termisk neutralitet ifølge PMV-indekset.
- 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

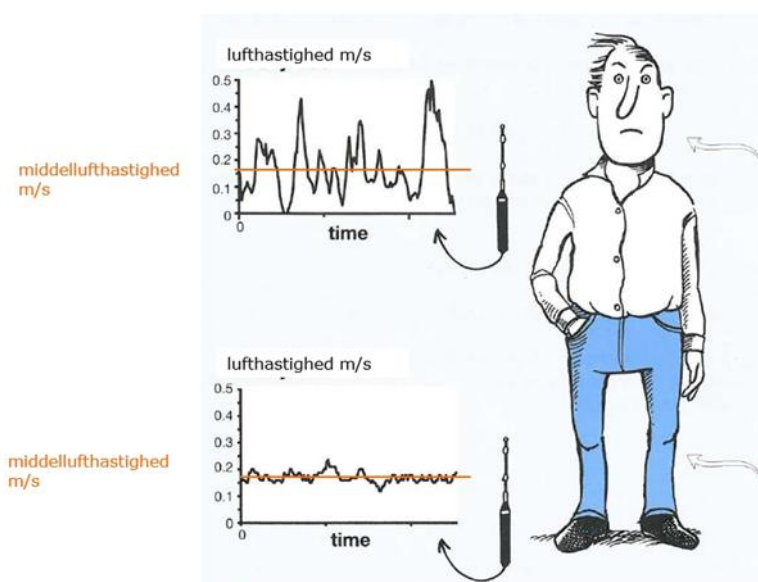
medføre ændringer i hudens overfladetemperatur, som føles ubehageligt. Mennesker er mest følsomme over for træk i de afklædte dele af kroppen som ansigt, nakke, ankler, arme og ben. Forskning har også vist, at træk kan mærkes også ved ret lave lufthastigheder, når lufttemperaturen er under 23 °C. Risikoen 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

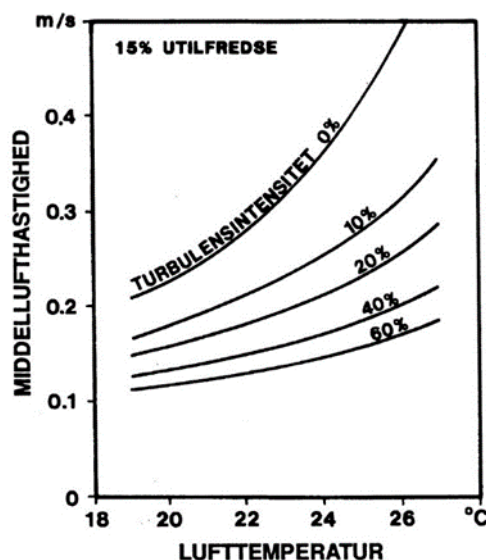
En model for vurdering af procentdelen af personer, der forventes at være utilfredse på grund af træk (DR – Draught Rating), er, lige som PMV-PPD-modellen udarbejdet på baggrund af forsøg i klimakamre. DR-indekset kan beregnes ved hjælp af Ligning 1-7:

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

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)

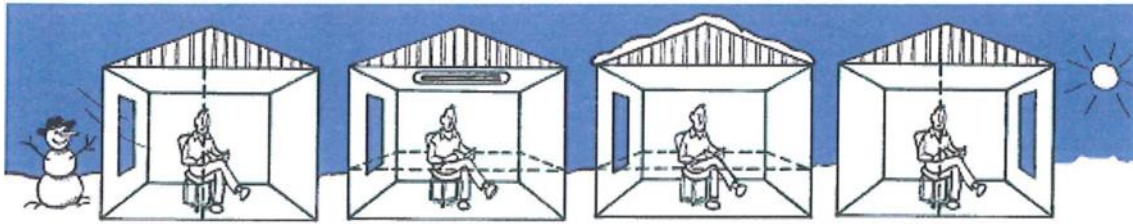
Strålingsasymmetri

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).

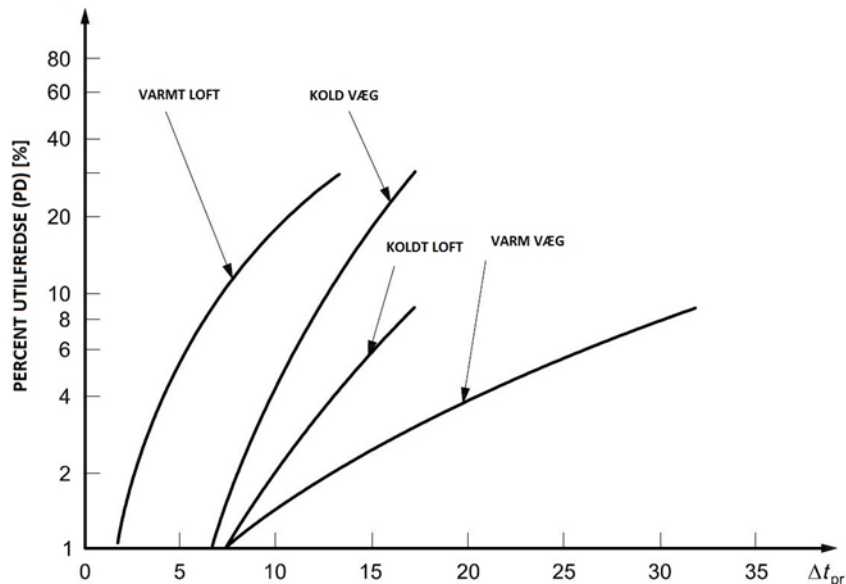
Strålingsasymmetri kan også stamme fra en varm flade, for eksempel et opvarmet loft eller en radiator. Ligesom træk, resulterer også strålingsasymmetri i lokal afkøling eller opvarmning af huden, som de fleste oplever som ubehag. Strålingsasymmetri er defineret som forskellen mellem overfladetemperatur (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 stråletemperaturasymmetri $\Delta t_{pr} < 10$ °C ved vinduer og andre kolde vertikale overflader samt $\Delta t_{pr} < 5$ °C ved varmt loft.

Lodret lufttemperaturdifferens

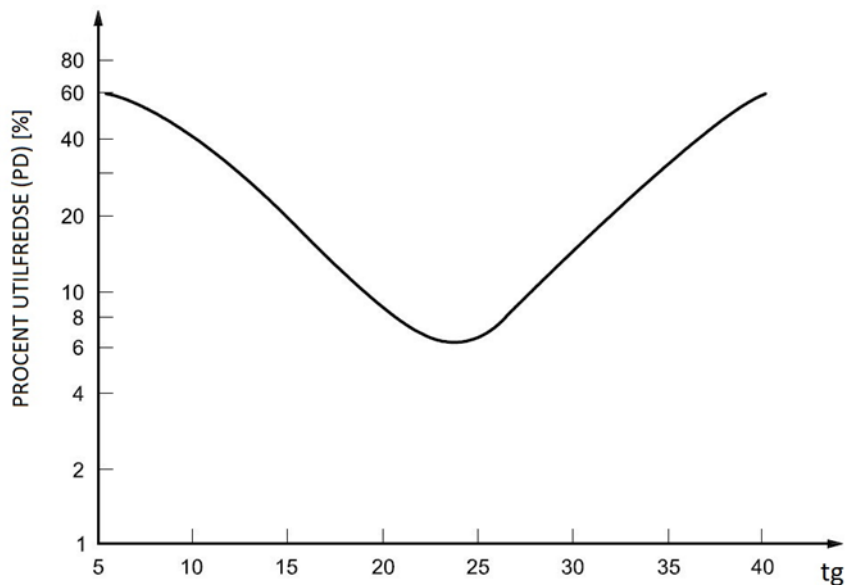
Generelt kan mennesker ikke lide at have det varmt ved hovedet og koldt ved fødderne, uanset om det skyldes stråling eller konvektion. Derfor er det vigtigt, at den vertikale lufttemperaturforskel – forskellen mellem lufttemperaturen på ankelniveauet og lufttemperaturen på halsniveau ($\Delta t_{a,v}$) – 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: <ul style="list-style-type: none"> • 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: <p>Klasse I (bygninger til særlig følsomme personer)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vinterforhold: 21 – 23 °C • Sommerforhold: 23,5 - 25,5 °C <p>Klasse II (bygninger med normale forventninger til indeklima)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vinterforhold: 20 - 24 °C • Sommerforhold: 23 - 26 °C <p>Klasse III (lave forventninger, acceptabelt i eksisterende bygninger)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vinterforhold: 19 – 25 °C • Sommerforhold: 22 - 27 °C <p>Klasse VI (uacceptabelt)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vinterforhold: < 19 °C • Sommerforhold: > 27 °C 	Det maksimale vandindhold i fugtig luft $x = 12 \text{ g/kg}$ Anbefalende værdier for relativt luftfugtighed: <p>Klasse I (bygninger til særlig følsomme personer)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 30 % – 50 % <p>Klasse II (bygninger med normale forventninger til indeklima)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 25 % – 60 % <p>Klasse III (lave forventninger, acceptabelt i eksisterende bygninger)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 20 % – 70 % <p>Klasse VI (uacceptabelt)</p> <ul style="list-style-type: none"> • < 20 % og > 70 % 	Den anbefalende koncentration af kuldioxid (CO ₂): <p>Klasse I (bygninger til særlig følsomme personer)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 750 ppm <p>Klasse II (bygninger med normale forventninger til indeklima)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 900 ppm <p>Klasse III (lave forventninger, acceptabelt i eksisterende bygninger)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1200 ppm <p>Klasse VI (uacceptabelt)</p> <ul style="list-style-type: none"> • > 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.

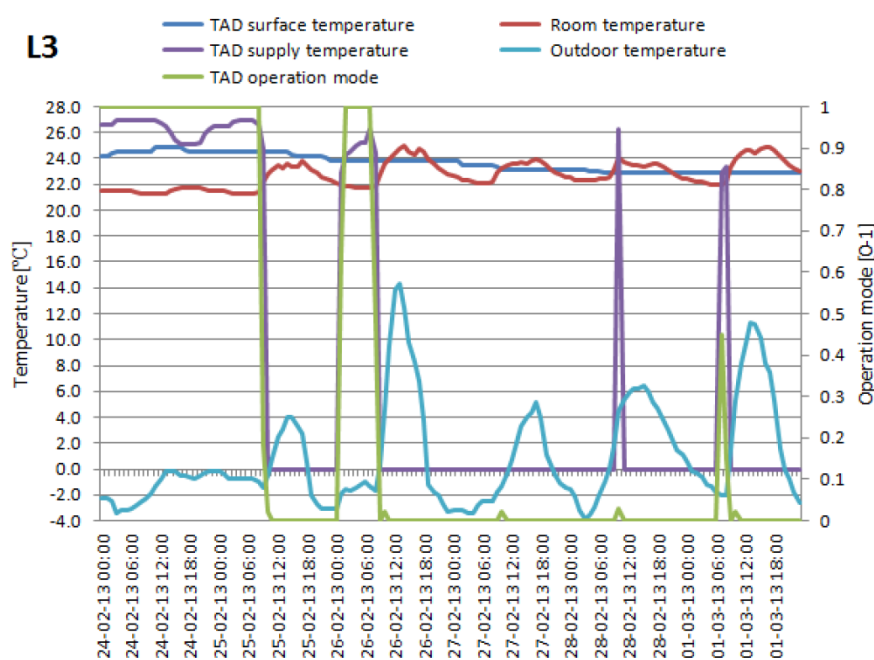


Figure 52: Illustration of a weekly operation control used in location L3, 24th of February 2013 – 3rd of Marts 2013.

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

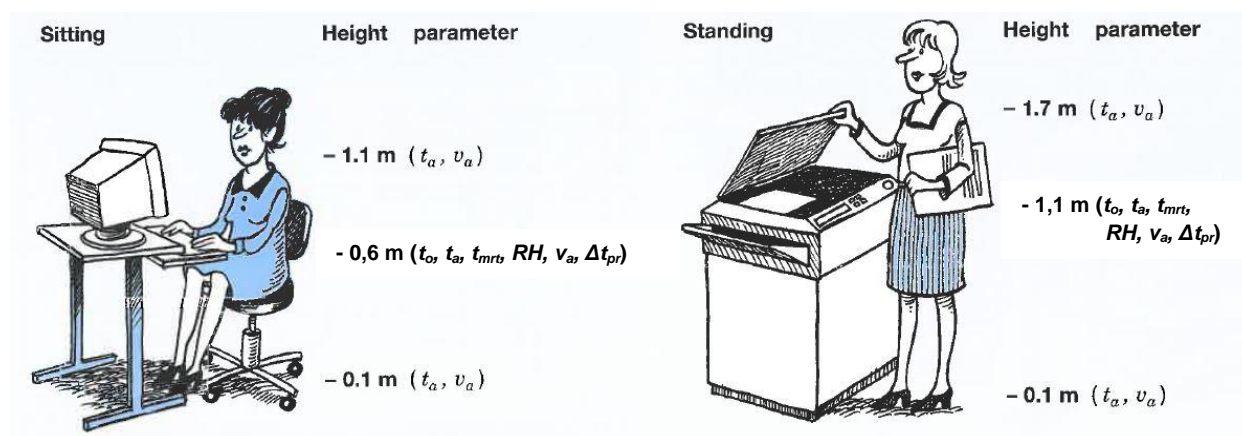
I de næste afsnit beskrives forskellige metoder til opsamling og visualisering af indeklimadata.

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

<p>Middellufthastighed</p>	<p>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).</p>
<p>Turbulensintensitet</p>	<p>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.</p>
<p>Fugtforhold</p>	<p>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.</p>



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

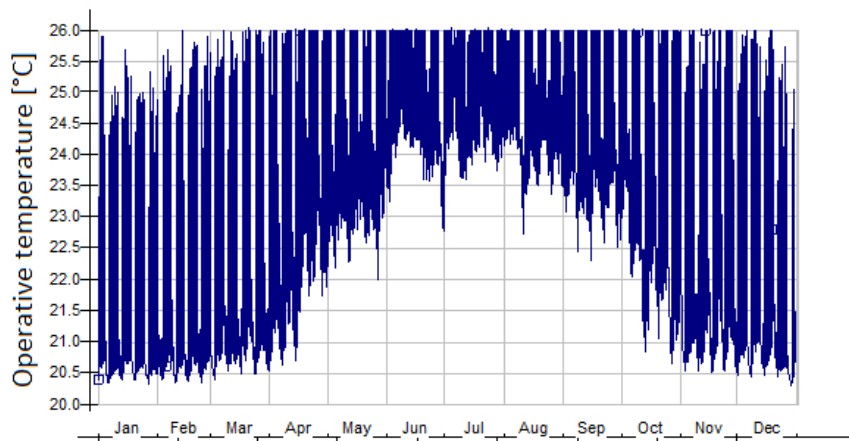
Indeklimamålinger kan visualiseres på forskellige måder. I hver tilfælde er formålet at undersøge, om indeklimaet i bygningen opfylder de tidligere definerede krav/målsætninger. Følgende tre metoder er nemme at bruge i praksis og giver driftspersonalet et klart overblik:

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

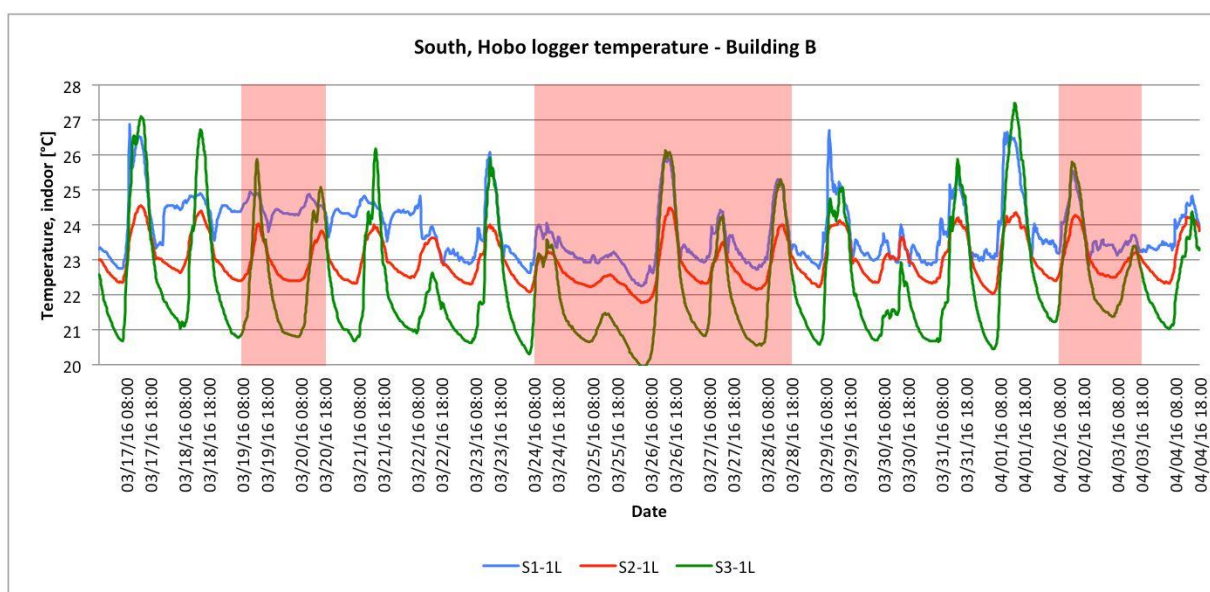
Tidsserie

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



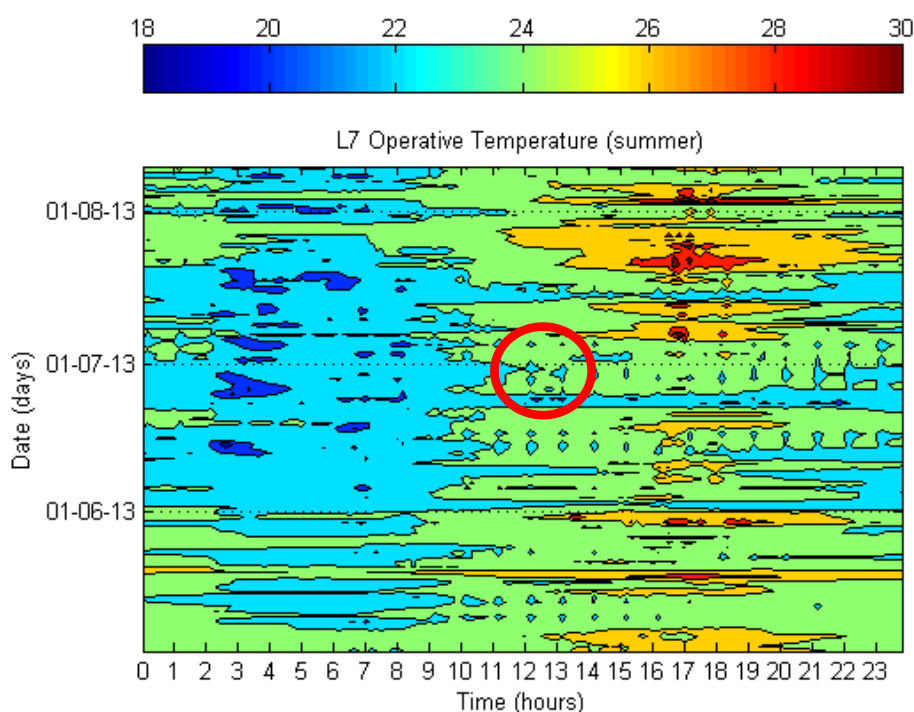
Figur 1-25 Passende anvendelse af tidsserie: Målinger af operativ temperatur fra sydvendte zoner i en kontorbygning, farvede områder indikerer weekender og helligdage; for placering af målepunkter i bygningen se Figur 1-23. Kilde: Døi (2016)

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).



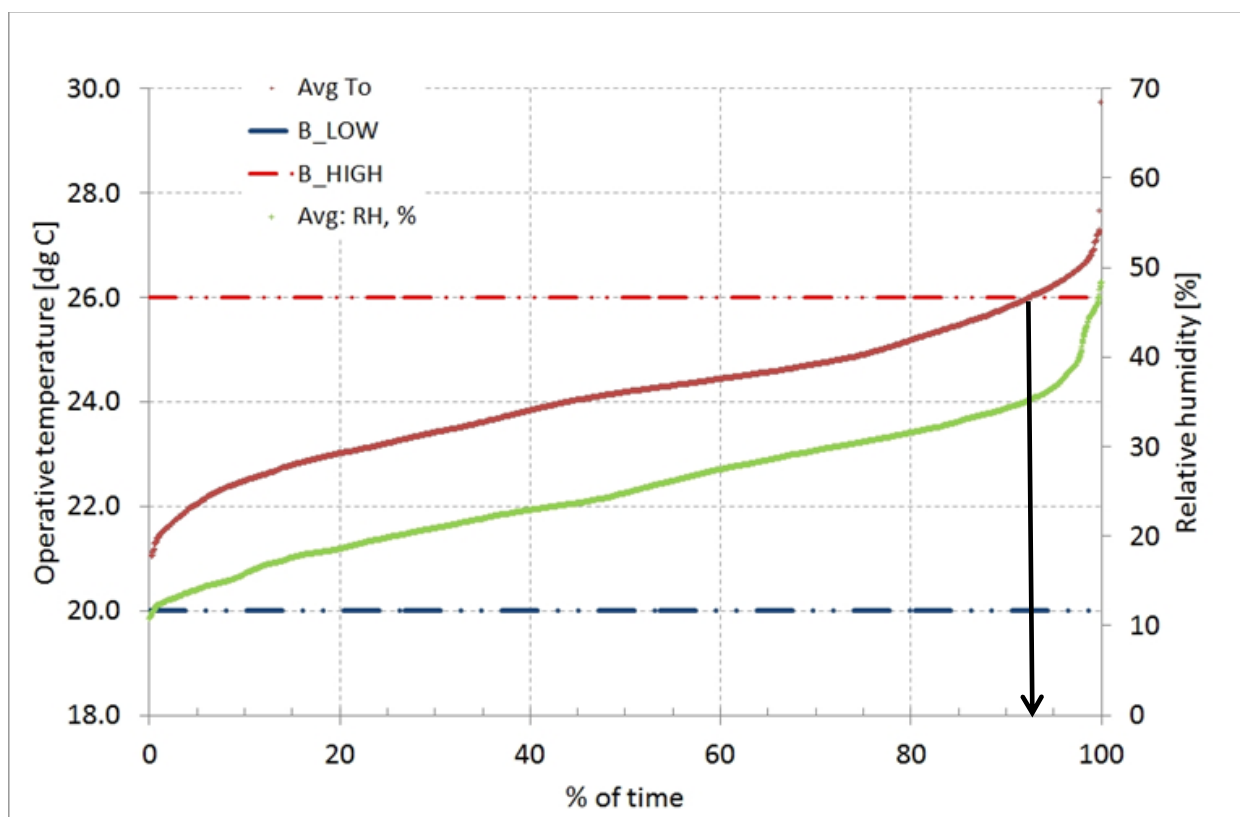
Figur 1-26 Et eksempel på ”carpet plot” – operativ temperatur i et storrums kontor. Kilde: Hansen (2013)

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*

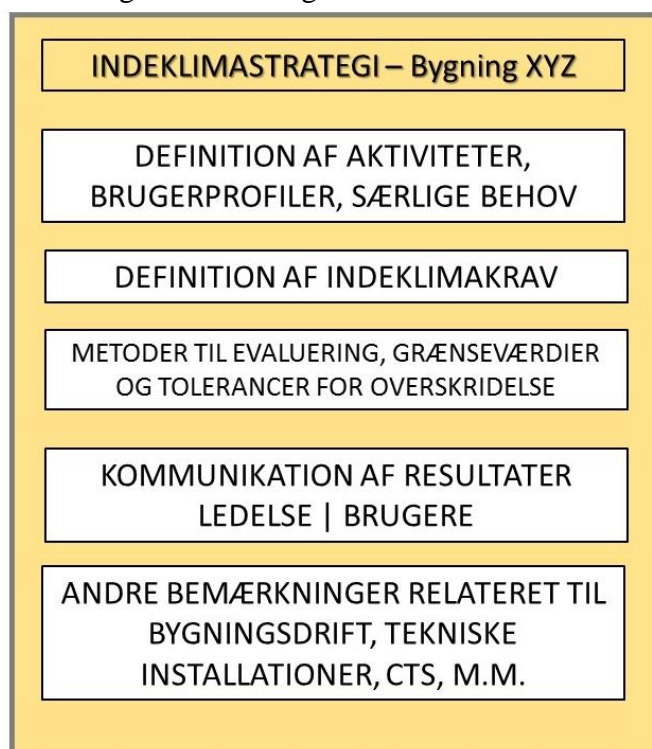
$$\tau_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^{i=k} n_i} \cdot 100 [\%] \quad \text{Ligning 1-8}$$

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.

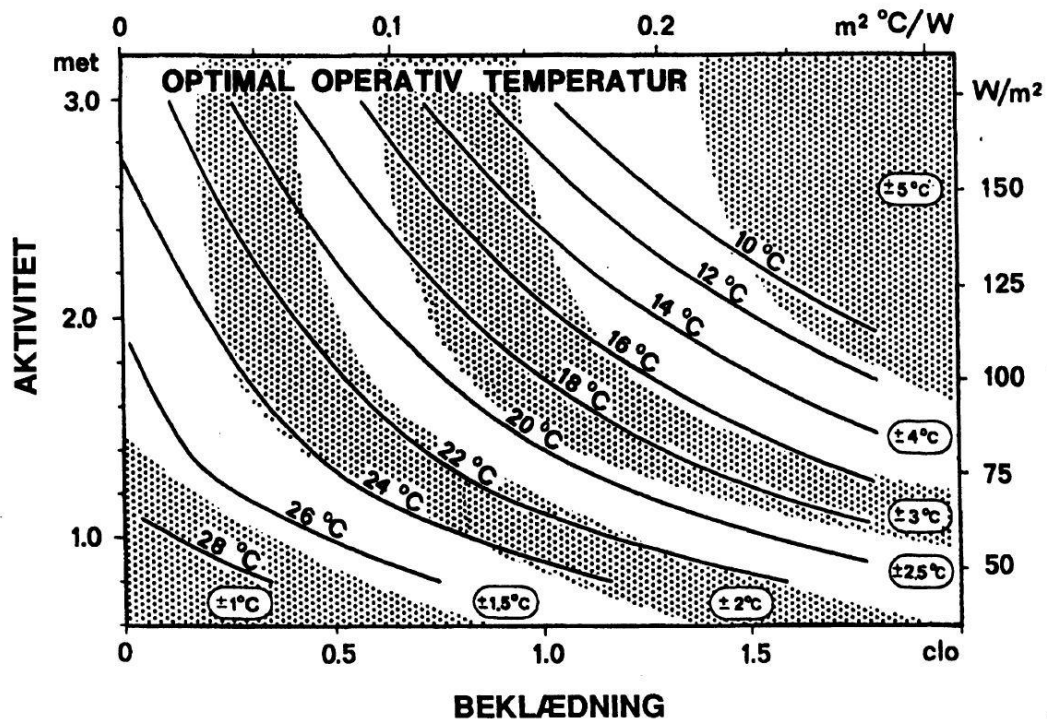
Det fornævnte demonstrerer, at indeklimastrategien skal tage hensyn til bygningens faktiske forhold. Det modsatte har konsekvenser enten for brugeres komfort eller for bygningens energiforbrug, fordi bygningen skal varmes op til højere temperatur end forudset i projekteringen.

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 standardpersonen. 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