



1. Behaaglijkheid

1.1 Inleiding

In het menselijk lichaam bevinden zich allerhande min of meer gevoelige sensibele elementen, die op een of andere manier beïnvloed worden of reageren op een zeer groot aantal signalen die het van de omringende buitenwereld ontvangt en die ervoor zorgen dat het contact met deze buitenwereld gerealiseerd wordt.

De van oudsher gekende contactfuncties van het menselijk lichaam zijn te rubriceren in wat men de 5 zintuigen is gaan noemen (horen, zien, ruiken, proeven en voelen).

Het mag duidelijk zijn dat het menselijk organisme natuurlijk gevoelig is voor een groot aantal prikkels, die niet direct onder één van de 5 zintuigen is onder te brengen, zoals bijvoorbeeld de invloed van allerhande niet-voelbare stralingen, het effect van reukloze elementen in ingeademde lucht naast nog allerlei reacties ten opzichte van bepaalde woon- of leefsituaties, waarin een sterke psychische component aanwezig is (hoogtevrees bij het wonen in hoge gebouwen, claustrofobische effecten in liften en andere kleine afgesloten ruimtes, enz.). Wanneer men over behaaglijkheid praat en daarbij de behaaglijkheid van een bepaalde ruimte zou willen kwantificeren, zou men eigenlijk over behaaglijkheidscriteria moeten kunnen beschikken, waarin met al deze zeer verschillende invloeden rekening wordt gehouden.

Voorlopig zal dit echter nog wel een wensdroom blijven. Wel is men momenteel zo ver dat er voor een aantal deelaspecten van deze totale behaaglijkheid een aantal of meer of minder "harde" criteria zijn te formuleren waardoor men kan spreken van een "thermische" behaaglijkheid, een "akoestisch" comfort, "visueel" comfort, enz.

Ook zijn er criteria te formuleren ten aanzien van de kwaliteit van de lucht, alsmede eisen ten aanzien van de maximale straling waaraan een mens mag worden blootgesteld. In dit hoofdstuk zal voorlopig hoofdzakelijk alleen de thermische behaaglijkheid worden behandeld en dan nog met de beperking dat er zal worden uitgegaan van stationaire comfortsituaties.

1.2 Thermische behaaglijkheid

In ieder gebouw dat ontworpen is voor menselijk gebruik, is een van de hoofddoelen, een zodanig klimaat te scheppen dat ieder individu zich wat de thermische gewaarwording betreft, behaaglijk voelt.

Definitie

In overeenstemming met de American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) standaard 55-56, is de thermische behaaglijkheid voor een mens gedefinieerd als een bepaalde geestestoestand, die tevredenheid met de thermische omstandigheden tot uitdrukking brengt.

De parameters van het comfort

Het thermische klimaat in iedere ruimte wordt gevormd door een interactie tussen het buitenklimaat, de thermische toestand van de ruimte zelf en het verwarmings- (of koel-) systeem.

De belangrijkste factoren die van invloed zijn op de thermische gewaarwording van de mens zijn:

1. de luchttemperatuur
2. de gemiddelde stralingstemperatuur
3. de lichtsnelheid
4. de luchtvochtigheid

Behalve klimaatfactoren, wordt de thermische behaaglijkheid van de mens ook beïnvloed door de volgende twee factoren:

5. de mate waarin hij actief is, met andere woorden de warmteproductie in het lichaam. De energie die per tijdseenheid wordt ontwikkeld wordt "METABOLISME" genoemd.



6. de warmteweerstand van de kleding

De eerstgenoemde vier parameters bepalen tezamen het binnenklimaat.

De grootte van de beide laatste factoren kan met een redelijke nauwkeurigheid worden afgeleid uit de wijze, waarop de betreffende ruimte zal worden gebruikt. De lichamelijke warmteproductie is een functie van de menselijke activiteit bij het werk dat hij verricht. Dikwijls wordt deze op het lichaamsoppervlak betrokken en in de eenheid "met" uitgedrukt; één "met" komt overeen met 58 W/m^2 , de warmteproductie bij zittende arbeid. Waarden voor andere typische menselijke bezigheden worden in *tabel 1.1* aangegeven.

De warmteweerstand van de kleding meet men in "clo" eenheden; één "clo" komt overeen met $0,155 \text{ m}^2 \text{ K/W}$. Waarden voor verschillende soorten kleding vindt men in *tabel 1.2*.

Bezigheid	Waarde in "met"	Type kleding	Waarde in "clo"
Slapen	0,8	Ongekleed	0
Zitten	1,0	Bikini	0,05
Typen	1,2	Korte broek	0,1
Staan	1,4	Normale tropische kleding: korte broek, hemd met schillerkraag, licht ondergoed	0,3
Normaal staand werk in winkel, laboratorium of keuken	1,6 – 2,0	Lichte zomerkleding: Dunne lange broek, hemd met schillerkraag en licht ondergoed licht	0,5
Wandelen met 3 km/h	2,0	Licht tropisch pak	0,8
Wandelen met 5 km/h	2,6	Normaal pak van zakenman	1,0
Wandelen met 7 km/h	4,0	Dik Noord-Europees pak met vest, lang ondergoed	1,5
Normaal timmeren of metselen	3,0	Kleding voor de poolstreken	3,0 – 4,0
Hardlopen 10 km/h	8,0		

Tabel 1.1 De lichamelijke Warmteproductie bij enige typische werkzaamheden (1)

Tabel 1.2 De warmteweerstand van de verschillende soorten kleding (1)

Thermische schaal

Voor de beoordeling van de thermische sensatie zijn een aantal thermische schalen bekend; één van de meest gebruikte, is de thermische schaal volgens ASHRAE zoals hieronder wordt gegeven:

- 3 koud
- 2 koel
- 1 enigszins koel
- 0 neutraal
- +1 enigszins warm
- +2 warm
- +3 heet

Warmteneutraliteit voor een mens is gedefinieerd als die warmtetoestand waarbij een mens geen voorkeur heeft voor een warmer of koeler klimaat.

Fanger heeft van deze schaal gebruik gemaakt bij een experiment dat hij heeft gedaan met in totaal 1296 proefpersonen, om een idee te krijgen van de meest behaaglijke temperatuur.



Tijdens de proeven was ieder proefpersoon gekleed in een standaard uniform van 0,6 clo en gedurende 3 uren onderworpen aan een gegeven omgevingstemperatuur.

De zittende proefpersonen moesten ieder half uur hun stem uitbrengen over hun thermische gewaarwording volgens de ASHRAE thermische schaal; in totaal werden per proefpersoon dus 6 stemmen uitgebracht.

Het gemiddelde van de laatste 3 stemmen voor ieder proefpersoon afgerond naar het dichtstbijzijnde gehele getal werd als maat gehanteerd.

Voorbeeld: 4^e stem: +1

5^e stem: +2

6^e stem: +2

Gemiddelde waarde = $(1 + 2 + 2) / 3 = 1 \frac{2}{3}$

Dichtstbijzijnde geheel getal is 2, zodat voor betreffende persoon +2 voor de Temperatuur sensatie werd genoteerd.

Een gevoel van "echt onbehaaglijk" komt pas tot uitdrukking wanneer men +2 of -2 heeft gestemd.

De ontevreden worden hier dus gedefinieerd als degenen die -2 of -3, +2 of +3 hebben gestemd. Degene die +1 of -1 heeft gestemd wordt niet tot de ontevreden gerekend.

Uit dit experiment heeft Fanger kunnen vaststellen, dat de meest behaaglijke temperatuur voor "zittende" personen met een clo-waarde van 0,6 25,6 °C bedraagt.

1.3 De behaaglijkheidvergelijking van Fanger, PMV en PPD

Fanger heeft met de warmtebalans van het menselijk lichaam als basis een vergelijking opgesteld waarmee de relatie tussen alle 6 parameters wordt beschreven.

Deze vergelijking noemt hij de algemene behaaglijkheidvergelijking.

Deze behaaglijkheidvergelijking is zo ingewikkeld dat deze zich niet leent voor eenvoudige berekening. Fanger heeft daarom uit een computerprogramma verkregen oplossingen neergelegd in 28 behaaglijkheidsdiagrammen. In de praktijk zal men in plaats van de vergelijking deze diagrammen gebruiken.

Wanneer een groep mensen wordt blootgesteld aan hetzelfde binnenklimaat, zal het niet mogelijk zijn, als gevolg van biologische verschillen, iedereen tegelijkertijd tevreden te stellen.

Aangezien het hoofddoel is een optimale thermische behaaglijkheid voor de groep mensen te scheppen, betekent dit dat een zodanige omgeving moet worden gecreëerd dat het hoogst mogelijke percentage van de groep zich thermisch behaaglijk voelt. In verband hiermee zullen de begrippen PMV en PPD worden ingevoerd.

Met de behaaglijkheidvergelijking als uitgangspunt is het mogelijk om de thermische sensatie te voorspellen voor iedere combinatie van activiteitsniveau, clo-waarde en de 4 thermische omgeving parameters.

Aan deze voorspelling kan een behaaglijkheidsindex worden toegekend, die men de PMV-waarde ("Predicted Mean Vote") noemt.

Uit de behaaglijkheidvergelijking heeft Fanger de volgende formule voor de PMV afgeleid:

$$\begin{aligned}
 \text{PMV} = & (0,3^{e-0,036M/A} D_{Du} + 0,0275) * [(M/A_{Du}) (1-\eta) - 0,003 \{5750 - 7*(M/A_{Du}*(1-\eta) - p_i) - \\
 & 0,42 \{(M/A_{Du}) (1-\eta) - 58\} - 0,0014 (M/A_{Du}) 934-T_a) - 17 * 10^{-6} (M/A_{Du} (5865 - p_i) - \\
 & -3,95 * 10^{-8} f_{cl} \{(T_{cl} + 273)^4 - (T_s + 273)^4\} - f_{cl} \alpha_c (T_{cl} - T_i)] \quad (1.1)
 \end{aligned}$$

Hierin is:

M = metabolisme = de door oxidatieprocessen in het menselijk lichaam per tijdseenheid

vrijgekomen energie [W]

A_{Du} = het oppervlak van het menselijk lichaam volgend Dubois [m²]

W = de uitwendige mechanische arbeid [W]

H = W/M = rendement van uitwendige arbeid [-]



- p_i = dampspanning van de omringende lucht [pa]
 T_i = temperatuur van de omringende lucht [°C]
 f_{cl} = de verhouding tussen het oppervlak van de kleding en het oppervlak van het ongeklede lichaam [-]
 T_{cl} = oppervlaktetemperatuur van de kleding [°C]
 T_s = gemiddelde stralingstemperatuur [°C]
 α_c = warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie [W/m²K]

In tabel 1.3, 1.4 en 1.5 is een aantal PMV-waarden weergegeven voor verschillende activiteitsniveaus, clo-waarden, luchtsnelheden en omringende luchttemperaturen onder aanname dat de luchttemperatuur gelijk is aan de gemiddelde stralingstemperatuur, relatieve luchtvochtigheid = 50 % en variaties in relatieve vochtigheid weinig invloed op behaaglijkheidsensatie in de buurt van PMV = 0. Men gebruikt de PMV dus voor waardering van het klimaat in waarden zoals in de thermische schaal is gegeven.

Activiteitsniveau: 1 met (58 W/m²)

Kleding [clo]	Omringende Luchttemp. [°C]	Luchtsnelheid [m/s]					
		< 0,10	0,10	0,20	0,50	1,00	1,50
0,5	24	-0,72	-0,74	-1,11	-1,70	-2,22	-
	25	-0,34	-0,38	-0,71	-1,25	-1,71	-1,99
	26	0,04	-0,01	-0,31	-0,79	-1,19	-1,44
	27	0,42	0,35	0,09	-0,33	-0,68	-0,90
	28	0,80	0,72	0,49	0,14	-0,17	-0,36
	29	1,17	1,08	0,90	0,34	0,34	0,19
1,0	22	-0,30	-0,33	-0,55	-0,88	-1,13	-1,28
	23	-0,02	-0,07	-0,27	-0,56	-0,79	-0,93
	24	0,26	0,20	0,02	-0,25	-0,46	-0,58
	25	0,53	0,48	0,31	0,07	-0,12	-0,23
	26	0,81	0,75	0,60	0,39	0,22	0,13
	27	1,08	1,02	0,89	0,71	0,56	0,48

Tabel 1.3 Predicted Mean Vote

Activiteitsniveau: 1,8 met (105 W/m²)

Kleding [clo]	Omringende Luchttemp. [°C]	Luchtsnelheid [m/s]					
		< 0,10	0,10	0,20	0,50	1,00	1,50
0,5	18	-0,59	-0,59	-0,83	-1,29	-1,69	-1,94
	20	-0,18	-0,18	-0,41	-0,81	-1,15	-1,36
	22	0,24	0,23	0,02	-0,31	-0,60	-0,78
	24	0,66	0,63	0,46	0,19	-0,04	-0,19
	26	1,07	1,03	0,90	0,69	0,51	0,40
	28	1,48	1,44	1,35	1,20	1,07	1,00
1,0	14	-0,38	-0,38	-0,54	-0,81	-1,02	-1,14
	16	-0,09	-0,09	-0,24	-0,48	-0,67	-0,78
	18	0,21	0,20	0,06	-0,15	-0,31	-0,41
	20	0,50	0,48	0,36	0,18	0,04	-0,04
	22	0,81	0,78	0,68	0,53	0,41	0,35
	24	1,11	1,08	1,00	0,88	0,78	0,73

Tabel 1.4 Predicted Mean Vote



Activiteitsniveau: 3 met (174 W/m²)

Kleding [clo]	Omringende Luchttemp. [°C]	Luchtsnelheid [m/s]					
		< 0,10	0,10	0,20	0,50	1,00	1,50
0,5	14	-	-	-0,09	-0,52	-0,90	-1,13
	16	-	-	0,26	-0,12	-0,45	-0,65
	18	-	-	0,61	0,28	0,00	-0,18
	20	-	-	0,96	0,68	0,45	0,30
	22	-	-	1,33	1,10	0,91	0,79
	24	-	-	1,70	1,53	1,38	1,28
1,0	6	-	-	-0,26	-0,56	-0,80	-0,93
	10	-	-	0,22	-0,02	-0,22	-0,33
	14	-	-	0,73	0,53	0,38	0,29
	18	-	-	1,24	1,09	0,97	0,91
	22	-	-	1,77	1,67	1,59	1,54

Tabel 1.5 Predicted Mean Vote

Indien men nu stelt dat een persoon klachten zal hebben over het thermisch comfort, indien zijn persoonlijke mening [v] > 2 (v afkomstig van "vote"0 dan kan men statistisch en vooraf het waarschijnlijke percentage aan klachten bepalen en dit als functie van de gemiddelde mening PMV.

Dit percentage noemt men de PPD (predicted percentage of dissatisfied).

In *figuur 1.1* is grafisch de PPD uitgezet tegen de PMV.

Hieruit is dan ook te zien dat voor een ideale situatie waarbij PMV = 0 er nog altijd een aantal mensen klachten zullen hebben.

Ongeveer 2,5 % van de mensen zullen de omgeving dan nog als te koud en 2,5 % diezelfde omgeving als te warm ondervinden. Het is dus onmogelijk om met een ideale klimaatinstallatie een klimaat te scheppen waarbij ieder individu tevreden is.

Thermisch niet uniforme ruimten

Bij de relatie tussen PMV en PPD zoals die in *figuur 1.1* werd gegeven is er vanuit gegaan dat alle personen aan precies dezelfde thermische condities zijn blootgesteld.

Wanneer het thermische veld in een ruimte uniform is (de PMV waarden zullen natuurlijk overal gelijk zijn) dan kan men door het regelen van het temperatuurniveau, een gemiddelde waarde voor PMV = 0 verkrijgen. Dit correspondeert met de minimum PPD waarde van 5 %.

Wanneer er van punt tot punt in de ruimte thermische verschillen zijn, dan kan men door het temperatuurniveau te veranderen nog een gemiddelde waarde 0 voor PMV bereiken, maar de PPD zal nu hoger zijn dan de minimum waarde (5%).

Als men in de praktijk, de thermische grootheden in een aantal punten, gelijkmatig verdeeld binnen de ruimte, opmeet, kan men met behulp van soortgelijke tabellen als *tabel 1.3 tot en met 1.5* de PMV waarden voor ieder gemeten punt vaststellen als de gemiddelde van de PPD voor al de gemeten punten. Het verschil tussen dit percentage en de minimum waarde van 5% is dan een "maat" voor de kwaliteit van de werkelijke gemeten thermische omgeving.

Door het temperatuurniveau te veranderen, kan de minimum waarde van de PPD van de ruimte worden vastgesteld. Deze waarde wordt de "lowest Possible Percentage of Dissatisfied" (LPPD) van de ruimte genoemd. Het verschil tussen LPPD en de 5% ontevredenen die minimaal verkregen kunnen worden in een thermische uniforme ruimte, is een kenmerk voor de niet uniformiteit van de kamer en karakteriseert daarmee het verwarmings- of koelsysteem in de desbetreffende ruimte.

Het is de taak van de ingenieur die het klimaatinstallatie systeem ontwerpt, om te zorgen dat het systeem de ruimte thermisch zo goed mogelijk uniform maakt, hetgeen dus



betekent dat de LPPD waarde zo dicht mogelijk bij de ideale minimum waarde van 5% kan komen te liggen.

1.4 Behaaglijkheidsdiagrammen: voorbeelden van praktische toepassingen

In *figuur 1.2 tot en met 1.5* zijn vier van de 28 door Fanger opgestelde behaaglijkheidsdiagrammen weergegeven. In elk van de figuren is voor een aantal waarden van één parameter het verband tussen twee andere variabelen aangegeven, waarbij een behaaglijk klimaat kan worden gegarandeerd. De overige variabelen worden op de aangegeven waarden constant gehouden.

Figuur 1.2 Behaaglijkheidsdiagram, waarin voor zittende normaal geklede mensen (1 clo), met een activiteitsniveau van 1 met bij een relatieve vochtigheid van 50 %, de invloed van de luchttemperatuur en van de gemiddelde stralingstemperatuur is aangegeven. De voor de luchtsnelheid als parameter getrokken krommen geven de temperatuurcombinaties aan, die een optimaal comfort garanderen.

Voorbeeld 1.1

In een kantoor verricht normaal gekleed (1 clo) personeel zittend werk (1 met); relatieve vochtigheid = 50 %; de luchtsnelheid $\leq 0,1$ m/s. gevraagd wordt de luchttemperatuur voor optimaal comfort als deze gelijk is aan de gemiddelde stralingstemperatuur. Uit *figuur 1.2* wordt hiervoor 23,0 °C afgelezen.

Voorbeeld 1.2

De luchttemperatuur in een magazijn bedraagt 14 °C bij een relatieve vochtigheid = 50 %; de luchtsnelheid = 0,2 m/s. De behaaglijkheid van een normaal gekleed persoon (1 clo), die zittend werk verricht, moet door middel van een gemiddelde stralingstemperatuur van 38 °C worden verkregen.

Voorbeeld 1.3

In een autobus is de gemiddelde stralingstemperatuur 's winters 5 °C lager dan de luchttemperatuur.

Gevraagd wordt de voor behaaglijkheid nodige luchttemperatuur te bepalen als de inzittenden normaal gekleed zijn (1 clo); relatieve vochtigheid = 50 % en de luchtsnelheid = 0,2 m/s.

Uit *figuur 1.2* volgt voor de luchttemperatuur 25,5 °C en voor de gemiddelde stralingstemperatuur 20,5 °C.

Voorbeeld 1.4

Men wil de behaaglijkheid van uitrustende zwemmers in een zwembad verzekeren. Relatieve vochtigheid = 80 %; luchtsnelheid = 0,1 m/s; de lucht- en gemiddelde stralingstemperaturen zijn gelijk.

In *figuur 1.3* leest men hiervoor 28 °C af.

Figuur 1.3 Behaaglijkheidsdiagram, waarin voor ongeklede zittende personen de gecombineerde invloed van de relatieve vochtigheid en de omgevingstemperatuur bij verschillende luchtsnelheden is aangegeven.

Voorbeeld 1.5

Men wil de optimale omgevingstemperatuur vaststellen voor normaal gekleed personeel (1 clo), waarvan de activiteit te vergelijken is met die van een zich met een snelheid van 1,5 km/h voortbewegende wandelaar (1,5 met). De luchttemperatuur en de gemiddelde stralingstemperatuur zijn gelijk; relatieve vochtigheid = 50 %; luchtsnelheid = 0,4 m/s. Uit *figuur 1.4* volgt, dat beide temperaturen van 20,8 °C moeten bedragen.



Figuur 1.4 Behaaglijkheidsdiagram, waarin voor verschillende graden van activiteit de gecombineerde invloed van de omgevingstemperatuur en de luchtsnelheid is aangegeven bij normale kleding (1 clo) en relatieve vochtigheid = 50 %.

Voorbeeld 1.6

In een stofvrije ruimte bedraagt de luchtsnelheid 0,5 m/s. Het in een speciaal uniform gekleed personeel (1 clo) verricht zittend werk. Relatieve vochtigheid = 50 %.

Voorbeeld 1.6

In een stofvrije ruimte bedraagt de luchtsnelheid 0,5 m/s. Het in een speciaal uniform gekleed personeel (1 clo) verricht zittend werk. Relatieve vochtigheid = 50 %. *Figuur 1.4* geeft als ideale omgevingstemperatuur 24,7 °C aan.

Voorbeeld 1.7

Voor personeel in een vleespakruimte moet een speciaal uniform worden ontworpen. De temperatuur bedraagt 12 °C; het activiteitsniveau 1,6 met, relatieve vochtigheid = 50 % en lucht- en stralingstemperaturen zijn gelijk.

Uit *figuur 1.5* blijkt dat de waarde van de kleding 1,8 clo moet bedragen.

Figuur 1.5 Behaaglijkheidsdiagram, waarin voor 6 graden van activiteit de gecombineerde invloed van kleding en omgevingstemperatuur is aangegeven. De relatieve vochtigheid en de luchtsnelheid bedragen respectievelijk 50 % en minder dan 0,1 m/s.

Voorbeeld 1.8

Het activiteitsniveau van een chirurg, die een operatie bedraagt 1,4 met; de weerstand van zijn kleding 0,9 clo.

Behaaglijkheid eist een omgevingstemperatuur (lucht- en stralingstemperaturen zijn gelijk) van 20,5 °C (zie *figuur 1.5*)

Voorbeeld 1.9

Het overige personeel in dezelfde operatiezaal is minder actief (1,2 met).

Uit *figuur 1.5* volgt voor hen een kledingweerstand van 1,15 clo.

1.5 Andere behaaglijkheidscriteria

De door Fanger gevonden relaties tussen de parameters die de thermische behaaglijkheid beïnvloeden verschaffen weliswaar veel informatie maar zijn door het grote aantal diagrammen niet op eenvoudige wijze kort weer te geven of samen te vatten.

In de loop van de tijd zijn er echter een aantal andere criteria geformuleerd die meer toegankelijk zijn voor praktische toepassing zoals bijvoorbeeld:

1. Behaaglijkheidsdiagrammen van Frank (2)
2. Het Mollierdigram voor vochtige lucht (3)
3. Het criterium $T_{\text{lucht}} + T_{\text{straling}} = 42 \text{ °C}$
4. De Duitse norm DIN 1946 (4)

Het overwegende bezwaar dat tegen de meeste van deze criteria bestaat is dat er slechts relaties tussen een beperkt aantal factoren worden gegeven terwijl de warden van de niet beschouwde overige van belang zijnde factoren niet of nauwelijks worden genoemd. In het hierna volgende zullen deze andere criteria worden toegelicht en op hun bruikbaarheid worden getoetst aan Fanger.

1.5.1 Behaaglijkheidsdiagrammen van Frank

Frank heeft de behaaglijkheidscriteria proberen weer te geven aan de hand van 3 grafieken, zoals die in *de figuren 1.6 tot en met 1.8* zijn weergegeven.

Hierbij is geen rekening gehouden met het metabolisme of eventueel de soort arbeid en het type kleding.

Het behaaglijkheidsdiagram in *figuur 1.6* is geldig voor:

- Een relatieve vochtigheid van 30 – 70 %
- Een luchtsnelheid van 0 – 0,2 m/s

Het behaaglijkheidsdiagram in *figuur 1.7* is geldig voor:

- Een gemiddelde stralingstemperatuur van 19,5 – 23 °C
- Een luchtsnelheid van 0 – 0,2 m/s

Het behaaglijkheidsdiagram in *figuur 1.8* is geldig voor:

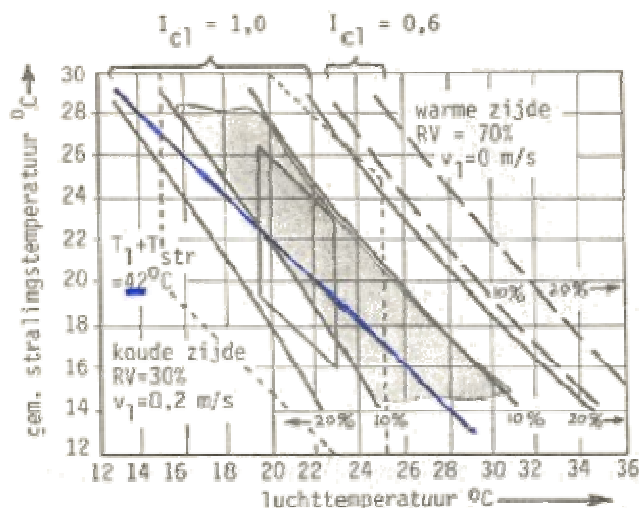
- Een gemiddelde stralingstemperatuur van 19,5 – 23 °C
- Een relatieve vochtigheid van 30 – 70 %

Vergelijking van de behaaglijkheidsdiagrammen van Frank met Fanger

Uitgaande van een gemiddeld metabolisme bij lichte kantoorarbeid van 70 W/m² en een kledingwaarde van 1 clo (normaal kostuum) is voor een aantal combinaties van 2 variabelen de PPD-waarde van 10 % respectievelijk 20 % berekend, waarbij de andere variabelen constant zijn gehouden. De combinaties zijn:

1. T_s las functie van T_l , zodanig dat PPD = 10 % respectievelijk 20 % met voor de overige variabelen de volgende waarden: \varnothing_i tussen 30 % - 70 %
 v_l tussen 0 – 0,2 m/s
2. \varnothing_i als functie van T_l , zodanig dat PPD = 10 % respectievelijk 20 % met voor de overige variabelen: T_s tussen 19,5 – 23 °C
 v_l tussen 0 – 0,2 m/s
3. v_l als functie van T_l , zodanig dat PPD = 10 % respectievelijk 20 % met voor de overige variabelen T_s tussen 19,5 – 23 °C
 \varnothing_i tussen 30 – 70 %

Het resultaat is weergegeven in de *figuren 1.9, 1.10 en 1.11* waar in de diverse behaaglijkheidsdiagrammen de lijnen voor PPD = 10 % en PPD = 20 % zijn ingetekend.



Figuur 1.9 Lijnen van gelijke PPD met de lucht- en gemiddelde stralingstemperatuur als variabelen.

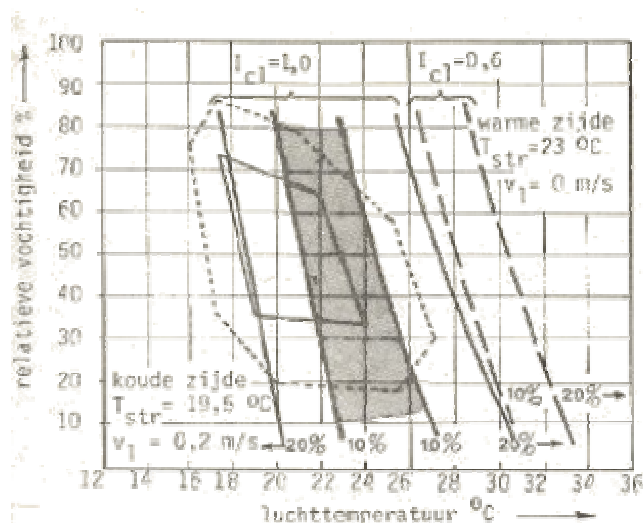
De berekening voor de koude zijde van het bovenstaande diagram zijn uitgevoerd met de lage waarde van de relatieve vochtigheid (30 %) en de hoge waarde van de luchtsnelheid (0,2 m/s).

Voor de warme zijde is gerekend met de hoge waarde van de relatieve vochtigheid (70 %) en de lage waarde van de luchtsnelheid (0 m/s).

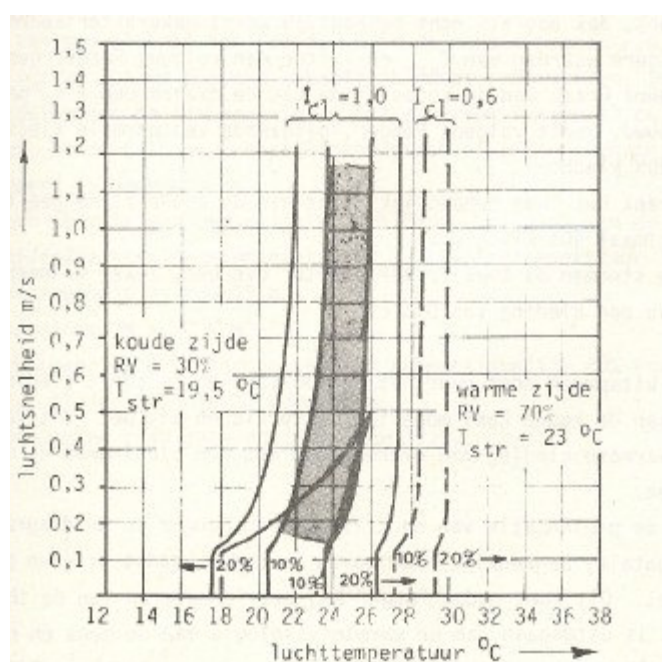
In de figuur zijn tevens nog de PPD lijnen van 10 % respectievelijk 20 % gegeven, berekend voor de warme zijde maar dan met een kledingwaarde van 0,6 clo.

E berekeningen voor de koude zijde van het diagram van *figuur 1.10* zijn uitgevoerd met de lage waarde van de gemiddelde stralingstemperatuur ($19,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) en de hoge waarde van de luchtsnelheid ($0,2\text{ m/s}$).

Voor de warme zijde is gerekend met de hoge waarde van de gemiddelde stralingstemperatuur ($23\text{ }^{\circ}\text{C}$) en de lage waarde van de luchtsnelheid (0 m/s). Ook hier weer de PPD-lijnen van 10% en 20% voor de warme zijde met $I_{cl} = 0,6$.



Figuur 1.10 Lijnen van gelijke PPD met de luchttemperatuur en relatieve vochtigheid als variabelen.



Figuur 1.11 Lijnen van gelijke PPD met de luchttemperatuur en luchtsnelheid als variabelen.

De berekeningen voor de koude zijde van het diagram uit *figuur 1.11* zijn uitgevoerd met de lage waarde van de gemiddelde stralingstemperatuur ($19,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) en de lage waarde van de relatieve vochtigheid (30%).

Voor de warme zijde is gerekend met de hoge waarde van de gemiddelde stralingstemperatuur ($23\text{ }^{\circ}\text{C}$) en de hoge waarde van de relatieve vochtigheid (70%).



Ook hier weer voor de warme zijde de PPD-lijnen van 10 % en 20 % voor $I_{cl} = 0,6$. Het is niet goed mogelijk in de diagrammen de lijn voor optimale behaaglijkheid (PPD = 5%) te geven, omdat de constant gehouden variabelen toch nog binnen zekere grenzen kunnen variëren (bijvoorbeeld $19,5\text{ °C} \leq T_{str} \leq 23\text{ °C}$), waardoor deze lijn van PPD = 5 % een zeker gebied bestrijkt afhankelijk van de "constant" gehouden variabelen.

Daarom is het alleen mogelijk een gebied aan te geven waardoor geldt $PPD < x\%$. Het geschaduwde gedeelte in de diagrammen markeert een gebied $PPD < 10\%$. Dit gebied zal bij de vergelijking met Frank als maatstaf dienen.

Om een indruk te krijgen van de behaaglijkheid aan de warme zijde van het diagram zijn de berekeningen gedeeltelijk herhaald met een kledingwaarde van 0,6 clo (zomerkleding: lange broek + overhemd). De bijbehorende PPD-lijnen zijn gestreept getrokken.

Uit de *figuren 1.9 tot en met 1.11* zijn de volgende conclusies te trekken:

- Het gebied bij Frank, dat nog als echt behaaglijk wordt gekarakteriseerd laat combinaties van lagere waarden van T_{str} en T_l toe dan volgens Fanger geoorloofd is. Wat volgens Frank aan de koude zijde van de diagrammen als "behaaglijk" wordt beschouwd, geeft volgens Fanger, uitgaande van normale kleding (1 clo) maximaal 20 klachten.
Het gebied waar Frank het "nog behaaglijk" acht aan de koude zijde geeft volgens Fanger maximaal 40 % klachten.
- Aan de warme zijde stemmen de twee criteria beter overeen, zeker wanneer wordt uitgegaan van een kleding van 0,6 clo.

Aangezien Frank geen uitspraak doet over het metabolisme en de soort kleding, zijn de verschillen aan de koude kant mogelijk te verklaren uit het feit dat Frank impliciet een warmere kleding dan overeenkomt met een kledingwaarde van 1 clo heeft aangenomen. Verder ontbreekt bij de presentatie van de criteria van Fanger in de diagrammen van Frank, een (horizontale) begrenzing naar boven en onder, zodat er geen gesloten gebied ontstaat. Dit komt omdat Fanger bij het formuleren van de thermische behaaglijkheid is uitgegaan van de warmtefysiologie van de mens en niet heeft gekeken of bepaalde combinaties van variabelen in de praktijk mogelijk zijn.

1.5.2 Het behaaglijkheidsgebied ingetekend in het Mollierdiagram voor vochtige lucht

Het Mollier-diagram is een toestandsdiagram voor een systeem van vochtige lucht, dat de samenhang vertoont tussen een aantal toestandsgrootheden zoals druk, temperatuur, volume, enthalpie, relatieve vochtigheid, vochtgehalte van de lucht, enz. (3).

Wanneer van een dergelijk systeem 3 toestandsgrootheden worden vastgelegd, dan zijn hierdoor alle overige toestandsgrootheden bepaald.

Door één van de 3 toestandsgrootheden (meestal de druk) constant te houden is iedere denkbare en mogelijke toestand voor zo'n systeem als een punt in een tweedimensionaal toestandsdiagram weer te geven.

Zo is in *figuur 1.12* een Mollier-diagram gegeven, waarbij op de y-as de luchttemperatuur is uitgezet en op de x-as, het vochtgehalte van de lucht in g/kg droge lucht. Verder zijn in het diagram lijnen weergegeven van constante relatieve vochtigheid. Omdat in dit diagram geen rekening kan worden gehouden met de invloed van T_{str} , v_l , I_{cl} en de mate van activiteit, zal de behaaglijkheid ook niet kunnen worden aangegeven door een enkel punt noch door een scherp begrensd behaaglijkheidsgebied.

Toch kan men globaal stellen dat door de meeste mensen een relatieve vochtigheid tussen 30% en 65% als behaaglijk wordt ondervonden, terwijl voor normale omstandigheden de temperatuur in het algemeen tussen 20 en 24°C zal moeten liggen. Hieruit is een behaaglijkheidsgebied af te grenzen, dat in *figuur 1.12* gearceerd is weergegeven.

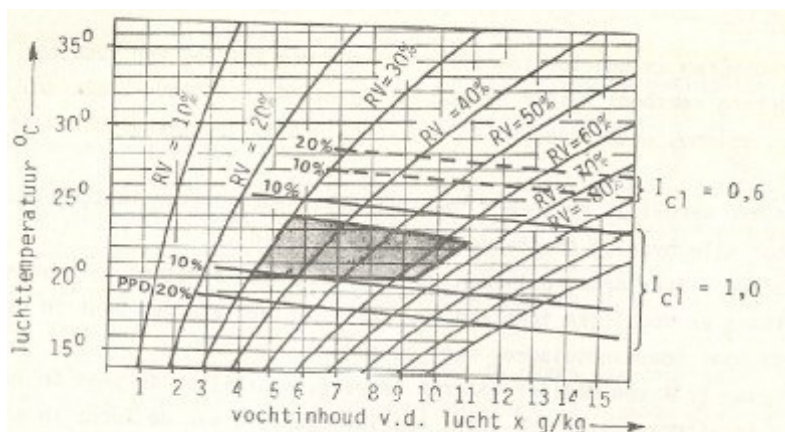
Wanneer we voor een vergelijking met Fanger uitgaan van de volgende aannames:

- Gemiddelde stralingstemperatuur $T_{str} =$ luchttemperatuur T_l
- Luchtsnelheid $v_l = 0,15$ m/s

- Metabolisme $M = 70 \text{ W/m}^2$

Dan zijn weer de PPD-waarden van 10% respectievelijk 20% voor kledingwaarden van 1,0 en 0,6 clo te berekenen.

De resultaten zijn gegeven in *figuur 1.12*.



Figuur 1.12 Behaaglijkheidsgebied in het Mollierdiagram. PPD-lijnen volgens Fanger geldend bij

$T_s = T_l$ $M = 70 \text{ W/m}^2$ en $v_l = 0,15$

Vergelijking van het Mollierdiagram met Fanger

Het behaaglijkheidsgebied zoals dat in het Mollierdiagram is gegeven is kennelijk een typisch "winter"-criterium want geeft dit criterium volgens Fanger aan de koude zijde nauwelijks meer dan 10% klachten. Aan de warme zijde echter komen volgens Fanger nog zeer acceptabele condities, niet meer in aanmerking, zelfs voor een situatie waarin normale kleding (1 clo) gedragen wordt.

1.5.3 Het criterium $T_{\text{lucht}} + T_{\text{straling}} = 42^\circ\text{C}$

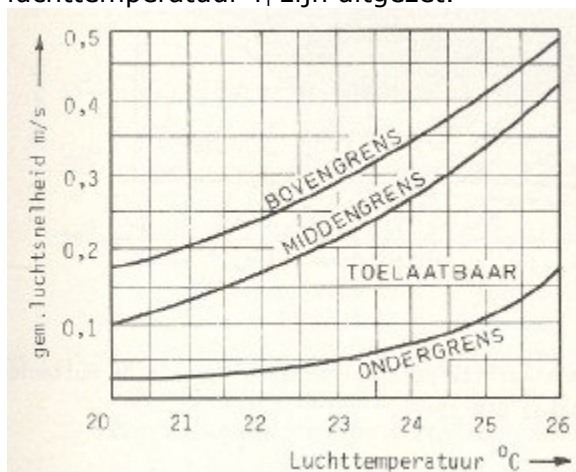
Uitgaande van:

- Metabolisme = 70 W/m^2
- Kledingweerstand = 1 clo
- Luchtsnelheid = $0,2 \text{ m/s}$

Is dit criterium volgens Fanger enigszins aan de koude kant (*zie figuur 1.9*)

1.5.4 Duitse norm DIN1946

In *figuur 1.13* ziet men het behaaglijkheidsgebied volgens de Duitse norm in een grafiek weergegeven, waarbij op de assen de gemiddelde luchtsnelheid v_l en de luchttemperatuur T_l zijn uitgezet.



Figuur 1.13 Toelaatbare gemiddelde luchtsnelheid afhankelijk van de luchttemperatuur volgens DIN 1946.

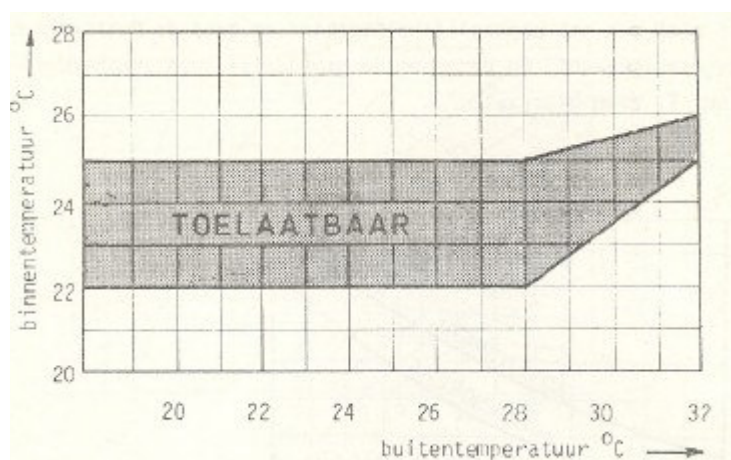
In de bovenstaande grafiek zijn een drietal lijnen te onderscheiden.

De onderste lijn noemt men de "ondergrens" waarvan wordt gezegd dat men hierboven moet blijven omdat anders de konvektieve warmteafgifte wordt bemoeilijkt.

De middelste lijn noemt men de middengrens en mag slechts 10% van de tijd worden overschreden.

De bovenste lijn mag beslist niet worden overschreden.

Voorts formuleert de DIN 1946 ook eisen ten aanzien van de toelaatbare binnenluchttemperaturen in afhankelijkheid van de buitentemperatuur (*zie figuur 1.14*) Hierbij wordt aangetekend dat in het leefgebied normaal niet meer dan 1,5°C van deze waarden mag worden afgeweken.



Figuur 1.14 Toelaatbare binnenluchttemperatuur afhankelijk van de buitenluchttemperatuur volgens DIN 1946.

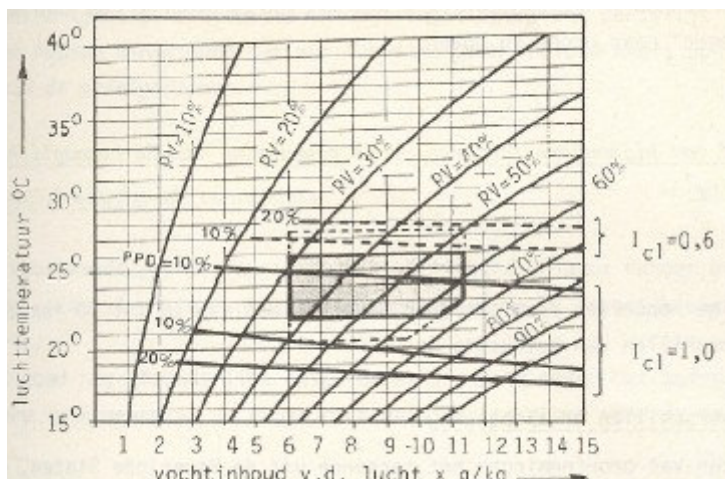
Ten aanzien van de vochtigheid geeft de DIN 1946 aan, dat de vochtinhoud van de lucht minimaal 6 gram/kg en maximaal 11,5 gram/kg mag bedragen, terwijl de relatieve vochtigheid beneden de 65% moet blijven. De genoemde luchttemperaturen en vochtigheden zijn samengebracht in *figuur 1.15*.

In *figuur 1.15* zijn tevens weer de 10% en 20% PPD-lijnen getekend.

Deze aangegeven PPD-lijnen gelden voor:

- Metabolisme $M = 70 \text{ W/m}^2$
- Luchttemperatuur $T_l =$ gemiddelde stralingstemperatuur T_s
- Luchtsnelheid $v_l = 0,2 \text{ m/s}$

Aan de warme zijde is de lijn van de PPD = 20% niet ingetekend omdat dit de duidelijkheid van de figuur niet ten goede zou zijn gekomen. De afstand tussen de lijnen PPD = 10% en PPD = 20% is ongeveer gelijk aan die voor de koude zijde.



Figuur 1.15 Behaaglijkheidsgebied volgens DIN 1946 aangegeven in het Mollierdiagram. PPD-lijnen volgens Fanger geldend bij $T_s = T_l$ $M = 70 \text{ W/m}^2$ en $v_l = 0,2 \text{ m/s}$.

De Duitse norm DIN 1946 getoetst aan Fanger

Het aan te houden klimaat volgens DIN 1946 is volgens Fanger aan de koude zijde nagenoeg optimaal. De genoemde toelaatbare afwijking in het leefgebied van + of $-1,5^\circ\text{C}$ geeft aan deze zijde volgens Fanger niet meer dan 10% klachten.

Aan de warme zijde is de DIN 1946 zonder aanpassing van de kleding nogal warm en leidt tot maximaal 20% klachten. Met aangepaste kleding van 0,6 clo geeft de DIN 1946 aan deze zijde minder dan 10% klachten en geeft de toelaatbare afwijking maximaal 18% klachten.

Samenvattende conclusies:

- Van de beschouwde criteria geeft het behaaglijkheidsgebied in het Mollier-diagram volgens Fanger gemiddeld de minste klachten, zeker voor de koude zijde. Het grootste bezwaar lijkt echter dat een groot gebied van acceptabele condities aan de warme zijde buiten beschouwing blijft.
- De DIN 1946 is aan de koude kant eveneens voorzichtig, aan de warme zijde worden echter meer condities toegelaten dan volgens Fanger toegelaten mogen worden.
- De diagrammen van Frank uit *de figuren 1.9, 1.10 en 1.11* kunnen worden aangehouden voor kantoorwerkzaamheden, zij het met enige reserve ten aanzien van de "begrenzungen" naar onder en boven.

1.6 De invloed van bijzondere factoren op de toepassing van de behaaglijkheidsvergelijking

Leeftijd

Proeven met enige honderden proefpersonen, jong en oud van 18 tot 90 jaar, leverden geen verschillen van betekenis op.

Nationaliteitsverschillen en aanpassing

Uit de resultaten van proefnemingen met personen uit de Verenigde Staten, uit Denemarken, en van tropische gebieden blijkt dat er geen significante verschillen bestaan tussen de drie groepen die van invloed op de behaaglijkheid zijn.

De proefpersonen uit de tropische gebieden werden onmiddellijk getest na aankomst uit hun geboorteland op het vliegveld te Kopenhagen.

Eventuele verschillen in de omgevingstemperatuur, waaraan mensen de voorkeur plegen te geven, zijn waarschijnlijk uitsluitend een functie van kledgewoonten.

Wanneer de clo-waarde in overeenstemming wordt gekozen, dan behoudt de behaaglijkheidsformule overal ter wereld zijn geldigheid.



Het dag- en jaarritme

De veel geuite mening, dat behaaglijkheideisen 's zomers een andere omgevingstemperatuur zouden voorschrijven dan 's winters blijken volgens Fanger niet waar te zijn. De behaaglijkheidsformule is onafhankelijk van het jaargetijde van toepassing.

In verband met het dagelijkse ritme dat de lichaamstemperatuur ondergaat, zou verwacht kunnen worden, dat het maximum 's middags en het minimum 's ochtends een overeenkomstige fluctuatie in omgevingstemperatuur wenselijk zou maken.

Proeven hebben aangetoond dat het dagritme geen invloed heeft op de behaaglijkheid van de proefpersonen.

1.7 Luchtbeweging en ventilatie

In de voorgaande paragrafen is de behaaglijkheid volgens Fanger behandeld en zijn de uitkomsten hiervan getoetst aan andere in de praktijk vaak gehanteerde criteria.

Het is goed nog afzonderlijk enige opmerkingen te maken met betrekking tot toelaatbare luchtbeweging en enige richtgetallen te geven voor de ventilatie.

Luchtbeweging

Een sterke plaatselijke luchtbeweging veroorzaakt een grote afkoeling van het menselijk lichaam en wordt als zodanig omschreven met het begrip "tocht". De tochtklachten nemen toe naarmate de luchttemperatuur lager is.

In *figuur 1.11* is al weergegeven binnen welke grenzen het nog behaaglijk is bij een bepaalde luchtsnelheid en luchttemperatuur.

Voor een PPD $\leq 10\%$ mag de luchtsnelheid variëren van $v_l = 0,11$ m/s bij $\pm 20^\circ\text{C}$ tot $v_l = 0,5$ m/s bij $25,5^\circ\text{C}$.

Hogere snelheden dan 0,5 m/s moeten hoe dan ook worden vermeden om hinder van opwaaiend dan wel wapperend papier te vermijden.

Ventilatie

De door de mens in te ademen lucht dient vrij te zijn van voor de gezondheid hinderlijke of schadelijke concentraties van gassen, dampen of stofdeeltjes. Bij het ademhalingsproces wordt uit de lucht O_2 opgenomen en CO_2 en H_2O -damp geproduceerd. Het zuurstofgehalte in de longen van een mens daalt tijdens het ademen van 21% (=gehalte aan O_2 in de lucht) tot 16,5%.

Gemiddeld wordt er $100 \text{ m}^3/\text{h}$ O_2 verbruikt.

De kans dat het O_2 -gehalte in een ruimte te laag is, is in het algemeen niet zo groot, zodat het zuurstofverbruik meestal niet bepalend is voor het benodigde ventilatievoud. Toch moet men in woningen wel oppassen in het kader van de energiebesparing met al te fanatiek op "kierenjacht" te gaan, wanneer er in huis ook nog zuurstof wordt verbruikt door spaarbranders.

Afgezien van een mogelijke productie van milieuvreemde gassen of dampen is dan de CO_2 -productie de enige bron van verontreiniging van de lucht in kantoorvertrek of woning, enz. De door de mens uitgedemde lucht bevat circa 4 vol% CO_2 (productie: 20-30 l/h).

De atmosferische lucht bevat 0,03 – 0,04 vol % CO_2 .

De schadelijke grens ligt voor de in te ademen lucht bij circa 3 vol % CO_2 , maar bij 8-urig verblijf is uit gezondheidsoverwegingen slechts 0,5 vol % toelaatbaar.

Uit behaaglijkheidsoogpunt is de grenswaarde nog veel lager namelijk 0,1 – 0,15 vol %. Dit is aannemelijk te maken omdat naast en met CO_2 eveneens reukstoffen worden geproduceerd, die geen directe lichamelijke schade met zich meebrengen, maar wel hinderlijk zijn.

De grens van 0,1 vol % CO_2 wordt bij langdurig verblijf bereikt met een ventilatie van circa $30 \text{ m}^3/\text{h}$ per persoon. Bij een ventilatie van $17 \text{ m}^3/\text{p.p}$ loopt het CO_2 -gehalte tot 0,15 vol% op.



Hierbij is het goed te bedenken dat het CO₂-gehalte mede afhankelijk is van het quotiënt van volume en aantal personen, dus niet alleen van de productie. Wanneer een vertrek wordt geventileerd, zal na verloop van tijd een stationaire toestand ontstaan, waarin geproduceerde hoeveelheid CO₂ gelijk is aan door ventilatie afgevoerde hoeveelheid. Bij kantoorwerk wordt door de mens ongeveer per uur 0,024 – 0,03 m³ O₂ volledig in CO₂ omgezet.

Om aan eerder genoemde hygiënische grens van luchtreinheid te voldoen en met het uitgangspunt dat in de buitenlucht 0,03 – 0,04 vol % CO₂ aanwezig is, wordt in de NEN 1087 als minimale ventilatie-eis gesteld 0,0047 m³/s per persoon (= 17 m³/h per persoon).

Door roken wordt een extra CO₂-bron geïntroduceerd, naast nog een productie van CO en nog een aantal aan de aard van de rookwaren gebonden reukstoffen. Als minimale norm dient voor ruimten waar roken is toegestaan (vergaderzalen, enz.) 40 m³/h per persoon verse lucht te worden aangehouden.

1.8 Eisen van de Arbeidsinspectie

Het Directoraat-Generaal van de Arbeid is belast met het toezicht op de naleving van de bepalingen van het veiligheidsbesluit voor fabrieken en werkplaatsen en geeft door middel van publicatiebladen een samenvatting en/of interpretaties van deze wetten.

Deze publicatiebladen staan bekend als de eisen van de Arbeidsinspectie.

Zo zijn er ook eisen geformuleerd ten aanzien van het klimaat waaronder moet worden gewerkt in bedrijfsruimten.

Hieronder zullen in het kort de belangrijkste aspecten van deze eisen en criteria worden behandeld.

Temperatuur-index

De Arbeidsinspectie werkt met een temperatuurindex L die gedefinieerd is als:

$$L = (42T_i - 8 T_n) / (34 + T_i - T_n) , \text{ waarin}$$

T_i = luchttemperatuur in °C (= droge-boltemperatuur)

T_n = natte-boltemperatuur in °C

Afhankelijk van de plaats spreekt men dan van:

L_i = temperatuurindex op de werkplek

L_a = temperatuurindex buiten

De natte-boltemperatuur stelt zich in bij een thermometer waarvan het kwikreservoir is omgeven door een goed nat gemaakt katoenen kousje en waarbij door een ventilator een geforceerde luchtstroom in stand wordt gehouden.

Het verschil tussen droge- en natte-boltemperatuur is een maat voor de relatieve vochtigheid.

Als de relatieve vochtigheid gelijk is aan 100% is $T_i = T_n$ zodat de temperatuurindex overgaat in

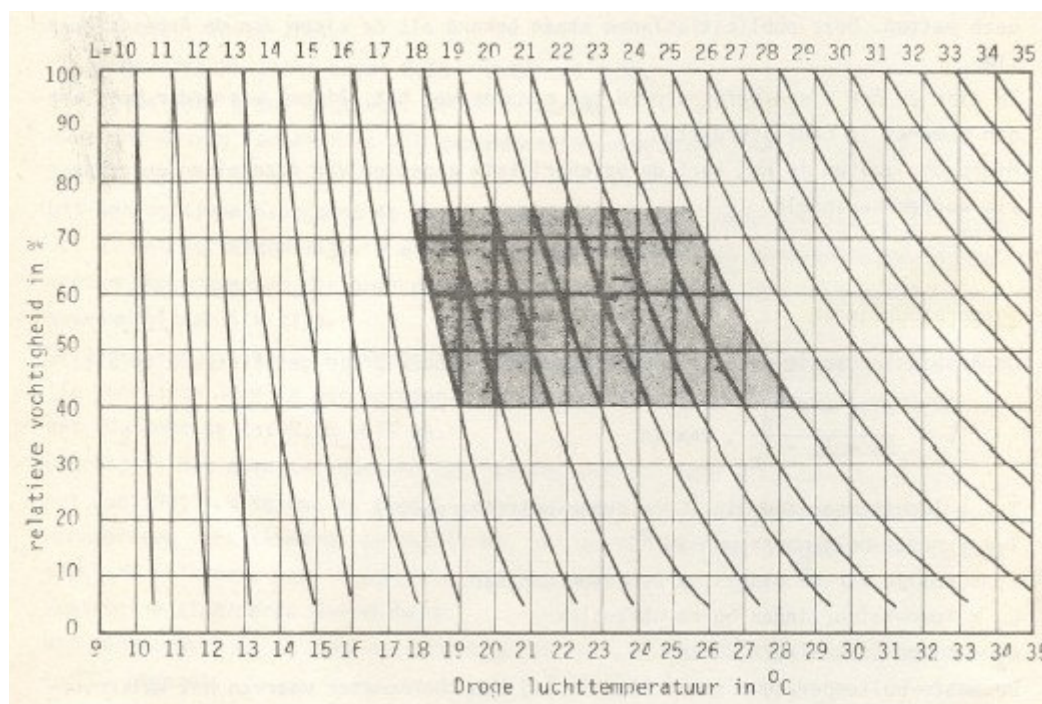
$$L = [(42 - 8) / 34] T_i = T_i$$

Voor *koude arbeidssituaties* wordt als uiterste ondergrens genomen een luchttemperatuur $T_i = 12^\circ\text{C}$.

Voor $\varnothing_i = 100\%$ volgt dan ook $L_i = 12$.

Wanneer de relatieve vochtigheid $\varnothing_i < 100\%$ luidt de eis dan ook: $L_i \geq 12$.

Voor *warme arbeidssituaties* wordt de uiterste bovengrens bepaald door $T_i \leq 29^\circ\text{C}$ (bij $\varnothing_i = 100\%$), hetgeen resulteert in de algemene eis van $L_i \leq 29$.



Figuur 1.17 Bepaling van de temperatuurindex

Dit wil niet zeggen, dat niet TI groter mag worden dan 29°C. Als een dergelijke situatie optreedt moet $\phi_i < 100\%$ zijn en wel des te lager naarmate T_i hoger wordt.

Indien $L_i > 29$, dan zal men tot werktijdverkorting moeten overgaan.

Hierboven zijn dus de uiterste grenzen voor het thermisch klimaat aangegeven, waarbinnen (8 uur) mag worden gewerkt.

Vanzelfsprekend zijn er aanbevelingen geformuleerd, die nagestreefd dienen te worden om een behaaglijker werkklimaat te garanderen.

Voor *warme arbeidssituaties* luiden deze:

	Buiten	Binnen
Indien	$L_a \leq 18$	$L_i \leq 23$ (liefst $L_i \leq 20$)
Indien	$L_a > 19$	$L_i = L_a + 5$

Voor *koude arbeidssituaties* en bij lichte arbeid moet men streven naar:

$$L_i \geq 17$$

Samengevat komt men dan tot het in *figuur 1.16* gegeven beeld

Het is goed hierbij te bedenken, dat bij de eisen zoals die door de Arbeidsinspectie zijn geformuleerd ten aanzien van L , geen rekening is gehouden met de zwaarte van de arbeid, terwijl dit toch een grote invloed heeft op het gewenste klimaat.

Bij zwaardere arbeid neemt de warmteproductie van de mens toe en de mogelijkheid moet dan bestaan om deze grotere warmtehoeveelheid af te voeren. Het klimaat dient hieraan dan te zijn aangepast.

Het in *figuur 1.16* gegeven behaaglijkheidsgebied geldt goed voor lichte arbeid. Voor matige- en zware arbeid in fabrieken kan men beter naar wat lagere waarden voor L_i streven en de volgende globale waarden aanhouden voor koude situaties:

$$\text{Matige arbeid } L_i = 15 - 17$$

$$\text{Zware arbeid } L_i = 12 - 15$$

Omdat men in de praktijk niet gewend is met het werken met T_n is in *figuur 1.17* een grafiek weergegeven om de temperatuurindex te bepalen aan de hand van de luchttemperatuur en de relatieve vochtigheid.

Verder zijn er nog de volgende algemene eisen geformuleerd waaraan moet worden voldaan, zoals:



$$T_i - 5 < T_{gl} < T_i + 5$$

Hierin is T_{gl} de globetemperatuur in °C, die bij benadering gelijk is aan $(T_s + T_i) / 2$

Opmerking: De arbeidsinspectie spreekt over stralingstemperatuur, waar globetemperatuur wordt bedoeld. Oppassen!!

Omgerekend naar de stralingstemperatuur kan bij benadering dus gesteld worden dat

$$T_i - 10 < T_s < T_i + 10$$

Met betrekking tot de luchtsnelheid wordt er vanuit gegaan dat $v_l \leq 1$ m/s.

Wanneer niet aan deze algemene eisen kan worden voldaan zijn speciale voorzieningen noodzakelijk.

Tenslotte zijn er met betrekking tot de luchtverversing nog enige zeer algemene richtlijnen geformuleerd, bijvoorbeeld minimum luchtverversing 10 m³/h per persoon. Voor enige "schadelijke" werkruimten moeten de minimale waarden worden gehanteerd zoals die zijn vermeld in tabel 1.6.

Schadelijke werklokalen	Vereiste hoogte (wat lager is wordt niet gerekend)	Vrije luchtruimte per persoon	Vrije luchtruimte per persoon boven 1,80 m
Werklokalen met hoge temperaturen (bijv. bakkerijen en keukens) werkplaatsen voor machinale houtbewerking, drukkerijen en zetterijen	2,50 m	7 m ³	2,8 m ³
Tabaksverwerkende industrieën	2,50 m	8 m ³	3,2 m ³
Lokalen waar accu's worden vervaardigd of gerepareerd of giftige stoffen worden verwerkt, spinnerijen en weverijen	2,50 m	10 m ³	4 m ³
Onder andere lokalen waar zich giftige gassen kunnen verspreiden, autogarages, galvaniseerinrichtingen En chemische wasserijen	3,00 m	20 m ³	10 m ³

Tabel 1.6

Voorbeeld 1.10.

Gegeven: Een drukkerij waarbij 19 personen werken op een vloeroppervlak van 70 m². De hoogte van het lokaal bedraagt 2,50 m.

Gevraagd: Voldoet dit lokaal aan de eisen van de arbeidsinspectie met betrekking tot de luchtverversing?

Oplossing: Het volume bedraagt $V = 70 * 2,5 = 175$ m³.

Volgens tabel 1.6, kolom 2, luid de eis: 7 m³/per persoon, dus er mogen maximaal $175 / 7 = 25$ personen werken, > 19 dus toegestaan. In kolom 3 staat echter ook nog de eis dat de vrije luchtruimte per persoon boven de 1,80 m³ moet bedragen.

Boven de 1,80 m ligt nog 0,70 m vrij beschikbaar, dat wil zeggen $0,7 * 70 = 49$ m³.



Op grond hiervan dus $48 / 2,8 = 17,5$, dus maximaal 17 personen toegestaan. Het lokaal voldoet dus niet aan de eisen van de arbeidsinspectie.

1.9 Akoestische behaaglijkheid

De akoestische behaaglijkheid in een gebouw is te definiëren als een toestand, waarin binnen een ruimte (of gebouw) een zodanig geluidveld (of combinatie van geluidvelden) heerst dat in die ruimte (of dat gebouw) aanwezige personen geen aanleiding hebben om wijzigingen te verlangen – al dan niet bewust.

De eisen die aan het aanwezige geluidveld zijn te stellen, hangen af van het gebruiksdoel van het gebouw en kunnen sterk uiteenlopen.

Twee typen criteria worden veel gebruikt:

- Criteria die de akoestische situatie in de ruimte beschrijven en aangeven waaraan het geluidveld in de ruimte moet voldoen. Hierbij moet nog onderscheid worden gemaakt tussen geluid dat doelbewust wordt gecreëerd en waarvoor de ruimte optimaal geschikt moet zijn (concertzalen, theaters, kerken, aula's, collegezalen, enz.) en geluid dat als niet gewenst in de ruimte wordt geproduceerd (installatielawaai) dan wel van buiten tot de ruimte doordringt (burenlawaai, verkeerslawaai, vliegtuiglawaai, industrielawaai, enz.)

Om dit niet gewenste geluid van buiten te weren hanteert men:

- Criteria die een zeker gedrag van een scheidingsconstructie voorschrijven (muur, vloer, dak, enz.)

Als voorbeeld van een criterium dat dient om de akoestiek in een ruimte te optimaliseren kan genoemd worden een voor te schrijven waarde waaraan de nagalmtijd moet voldoen. Behalve dat de nagalmtijd van het volume afhangt, zal de optimale nagalmtijd in een bepaalde zaal voor muziek anders zijn dan in een theaterzaal met dezelfde afmetingen.

Bij de behandeling van de zaalakoestiek zal hier nog uitgebreid op worden ingegaan. Voorbeelden van criteria, die worden gehanteerd bij het minimaliseren van niet gewenst geluid in de ruimte, zodanig dat het voor het gebruiksdoel nog niet als "onbehaaglijk" (in dit geval spreekt men dan van "hinderlijk") wordt ervaren zijn:

- Een voorgeschreven NR-kromme (zie het Bouwfysisch Tabellarium), die frequentieafhankelijk als lijn van gelijke hinder kan worden opgevat
- Een voorgeschreven waarde door L_{pres} in dB(A) indien men een één-getal-criterium wenst.

Zo stelt de arbeidsinspectie bijvoorbeeld dat er naar gestreefd moet worden, dat de in *tabel 1.7* gegeven waarden voor het resulterend achtergrondniveau niet worden overschreden.

privé kantoren/kleine kantooruimten	35 – 45 dB(A)
kleine conferentiekamers	35 – 45 dB(A)
grote conferentiekamers	30 – 40 dB(A)
grote kantoorlokalen	40 – 50 dB(A)
laboratoria	40 – 50 dB(A)
kantine	40 – 45 dB(A)
tekenkamers	40 – 50 dB(A)
ruimte voor computerapparatuur	55 – 65 dB(A)
werkplaatsen voor licht onderhoud	50 – 60 dB(A)
meet- en regelkamers in de procesindustrie, elektriciteitscentrales, enz.	55 – 65 dB(A)
andere werkplaatsen, fabriekshallen en dergelijke	≤ 80 dB(A)

Tabel 1.7

In verband met het schadelijke karakter van hoge geluidsniveaus dient er naar te worden gestreefd, dat een waarde van 80 dB(A) in fabrieken niet wordt overschreden. 80 dB(A) zal echter niet op alle plaatsen binnen een fabriek te realiseren zijn. Men dient dan echter



wel de uiterste zorg te besteden aan het zo laag mogelijk houden van het niveau. Er kunnen dan maatregelen worden genomen zoals beperking werktijd, gebruik van oordoppen enz.

Ten aanzien van de nagalmtijd in utilitaire ruimten worden door de arbeidsinspectie de in *tabel 1.8* gegeven waarden aanbevolen.

Ruimte	T
grote fabriekshallen	2 – 3 s
kleine werkplaatsen	1,5 – 2 s
grote kantoorlokalen	± 1,0 s
kleine kantoorlokalen	± 0,8 s
kantines	± 1,2 s

Tabel 1.8

Om een bepaalde nagalmtijd te verkrijgen worden doorgaans geluidsabsorberende materialen toegepast.

Ter voorkoming van brand zijn in verschillende wetten, zoals in de Veiligheidswet, het veiligheidsbesluit voor fabrieken en werkplaatsen, en ook in diverse gemeentelijke verordeningen echter regelingen en bepalingen opgenomen met betrekking tot het toepassen van "brandwerende" materialen.

Voorbeelden van criteria die een bepaald akoestisch gedrag als minimum voorschrijven vindt men in de Nederlandse norm NEN 1070 "Geluidwering in woningen" (1976). Verder is in 1975 het wetsontwerp geluidhinder bij de Tweede Kamer ingediend, waarin regels zijn gesteld om geluidhinder te voorkomen of te beperken met name om de lawaai-belasting op gevels en daken afkomstig van verkeerslawaai en industriellawaai te reduceren.

De NEN 1070 is reeds behandeld in eerdere collegestof, terwijl aan de consequenties van de Wet Geluidhinder ruim aandacht zal worden besteed in het college Stedenbouwfysica (gc49).

Criteria die in NEN 1070 zijn geformuleerd betreffen hoofdzakelijk voorgeschreven normen waaraan de luchtgeluidsisolatie-index zal I_{lu} respectievelijk de contactgeluidsisolatie-index I_{co} van scheidingsconstructies moeten voldoen opdat een voldoende geluidswering tussen 2 ruimten (kamers of woningen) zal zijn gewaarborgd. Hierbij is het goed nogmaals te bedenken dat bij de geluidsoverdracht van de ene ruimte naar een andere, alle omwandingen zijn betrokken en niet slechts de rechtstreekse scheidingen (flankerende transmissie!) en de uiteindelijke geluidsreductie vaak ook sterk wordt bepaald door geluidstekken bij de aansluiting van vloeren en wanden op gevels. Tot slot nog enige opmerkingen over de actuele problematiek van de akoestiek in "kantoorruimten" en zogenaamde "open-scholen".

Het zal duidelijk zijn dat de akoestische condities in dit soort ruimten vrijwel volledig de bruikbaarheid ervan bepalen.

De akoestisch te stellen eisen klinken gezien het voorgaande vaak enigszins paradoxaal. Zo zal voor een kantoorruimte het achtergrondniveau juist hoog moeten zijn (globaal gesteld 50 – 60 dB(A)) om klachten te voorkomen en een goede werksituatie te creëren in tegenstelling tot traditionele kleine kantoorruimten, waar men het achtergrondniveau liefst zo laag mogelijk zal willen houden (35 dB(A)).

1.10 Behaaglijke verlichting in gebouwen

De kwaliteit van de verlichting is een minimum lichtniveau gewenst om de visuele taken die moeten worden verricht goed en gemakkelijk uit te voeren.



Voor een kantoorgebouw zijn dit lees-, schrijf- en archiefwerkzaamheden, voor een fabriek ook het zien van details van te bewerken objecten respectievelijk het aflezen van schalen op gereedschapsmachines, enz.

Het benodigde lichtniveau is afhankelijk van de leeftijd; oudere personen hebben een hoger lichtniveau nodig om details (ook letters, enz.) te kunnen waarnemen. Globaal gesproken kan worden gesteld dat het verlies aan visuele prestatie per 10 levensjaren door een verhoging van 50% van het lichtniveau kan worden gecompenseerd.

Hoe hoger het lichtniveau, des te sneller zijn kleinere details en geringe contrasten zichtbaar.

In *tabel 1.9* zijn enkele waarden voor de luminantie en de horizontale verlichtingssterkte gegeven die nodig zijn voor een aantal verschillende visuele waarnemingscondities.

	luminantie	horizontale verlichtingssterkte
juist waarneembare gelaatstrekken	1 cd/m ²	20 lux
gemakkelijk waarneembare gelaatstrekken	15 – 20 cd/m ²	200 lux
optimale visuele waarnemingscondities in normale werkruimten	100 – 400 cd/m ²	2000 lux
luminantie van de visuele taak tenminste 1000 cd/m ² voor reflectiefactoren boven 0,15	1000 cd/m ²	20000 lux

Tabel 1.9

Voor meer gedetailleerde informatie over aanbevolen verlichtingssterkten met betrekking tot de indeling van ruimten wordt verwezen naar het Bouwfysisch Tabellarium waarin een tabel hierover is opgenomen ontleend aan de Aanbevelingen voor Binnenverlichting van de Nederlandse Stichting voor Verlichtingskunde, tevens aanvaard door het Nederlands Normalisatie Instituut als norm NEN 3006. Hierin wordt onder meer voor magazijnen een verlichtingssterkte van tenminste 250 lux aanbevolen, terwijl dit voor een bankwerkerij tenminste 500 lux dient te zijn.

Voor zeer nauwkeurig werk kan een verlichtingssterkte van 1000 lux of meer noodzakelijk zijn.

Luminantieverhoudingen in het gezichtsveld

De luminantie van voorwerpen in onze omgeving kan slechts dan zonder inspanning als helderheidsgewaarwording worden ervaren, indien de grootte ervan binnen bepaalde grenzen ligt.

Deze grenzen zijn onder meer afhankelijk van de omgevingsluminantie L_0 en van de schijnbare grootte van de voorwerpen.

Voor het grensgeval van een klein voorwerp, gezien tegen een uitgestrekte homogene achtergrond, correspondeert de ondergrens met de indruk "zwart", terwijl de bovengrens overeenkomt met een zekere graad van verblinding.

Bij de verlichting van werkruimten dient te worden gestreefd naar luminantieverhoudingen, die de visuele waarneming en het gemakkelijk zien bevorderen. Voor meer informatie wordt verwezen naar de colleges met betrekking tot verlichting (dag- en kunstverlichting) waar ook aan het laatste kwaliteitsaspect van de kleur en kleurweergave de nodige aandacht wordt besteed.

Hier zijn nog slechts genoemd dat voor normale kantoor- en fabrieksruimten een algemene kleurweergave-index R_A volgens de C.I.E. van tenminste 80 wordt nagestreefd. Om een dergelijke R_A te bereiken zal het aantal lm/W niet hoger dan circa 50 zijn.