



BOUWFYSICA

gc 45 BOUWFYSICA

DEEL 2

AKOESTIEK/LICHT

Vakgroep Bouwfysica

gc 45

BOUWFYSICA

deel 2

AKOESTIEK/LICHT

Technische Hogeschool Delft
Afdeling der Civiele Techniek

uitgave jan. '83			gc45.K deel 2	353021					f 6,--
---------------------	--	--	------------------	--------	--	--	--	--	--------

L.S.

Bij de samenstelling van elk diktaat wordt er uiteraard naar gestreefd om fouten te voorkomen en de inhoud zo overzichtelijk mogelijk aan te bieden.

Niettegenstaande dat kunnen toch onduidelijkheden voorkomen en kunnen fouten zijn ingeslopen.

Indien U dan ook bij de bestudering van dit diktaat:

- onjuistheden ontdekt
- op onduidelijkheden stuit
- of gedeelten ontmoet, die naar Uw mening nadere uitwerking behoeven, verzoeken de samenstellers U dringend hen daarvan mededeling te doen.

Bij de volgende drukken kunnen dan op- en aanmerkingen worden verwerkt ten gerieve van toekomstige gebruikers.

Zonodig kan ook nog in de lopende cursus voor verduidelijking worden gezorgd.

<u>INHOUDSOPGAVE</u>	<u>blz.</u>
5. <u>GELUIDISOLATIE</u>	5.1
5.1. Overdracht van geluid (trillingen)	5.1
5.2. Luchtgeluidisolatie	5.1
5.3. Samengestelde konstrukties; geluidlekken	5.7
5.4. Massawetten	5.10
5.5. Spouwkonstrukties, resonantie, staande golven	5.15
5.6. Coïncidentie	5.25
5.7. Kontaktgeluid	5.32
5.8. Geluidnorm NEN 1070 (1976)	5.35
5.8.1. Bepaling van de genormeerde luchtgeluidisolatie en het genormeerde kontaktgeluidniveau	5.35
5.8.2. Galm in trappehuizen en installatielawaai	5.41
5.8.3. De praktijkrichtlijnen NPR 5073	5.45
5.8.4. Voorspellen van geluidisolatie	5.51
5.9. Trillingsisolatie	5.56
Appendix 5A. Het verband tussen de amplitudes van invallende en door- gelaten golf bij loodrechte inval voor een monoliet konstruktie	5.58
Appendix 5B. Het verband tussen de amplitudes van invallende en door- gelaten golf bij loodrechte inval voor een spouwconstruc- tie	5.60
Appendix 5C. Bepaling I_{1u} met behulp van nomogram	5.61
6. <u>DAGVERLICHTING</u>	6.1
6.1. Begrippen en definities	6.1
6.2. Hemelkoepe1	6.6
6.3. Verlichtingssterkte in een willekeurig vlak tengevolge van het zichtbare deel van de hemelkoepe1	6.10
6.3.1. Algemene afleiding	6.10
6.3.2. Het "vrije veld"	6.12
6.3.3. De gebouwde omgeving	6.15
6.4. Dagverlichting in de gebouwde omgeving	6.25
6.4.1. Algemeen	6.25
6.4.2. Hemelfaktor	6.25
6.4.3. Daglichtfaktor	6.26

6.4.4. Opmerkingen en konklusies	6.33
Appendix 6A. Afleiding van de uitdrukking voor de lichtstroom vanaf een oppervlakte-elementje dS^* naar een gegeven punt P.	6.39
Appendix 6B. Uitschrijven van de algemene uitdrukking (6.13)	6.40
Appendix 6C. Het oplossen van uitdrukking (B.3) voor horizontale en verticale vlakken in het "vrije veld"	6.41
 7. <u>KUNSTVERLICHTING</u>	 7.2
7.1. Lichtbronnen	7.2
7.1.1. Gloeilampen	7.6
7.1.2. Fluorescentielampen	7.12
7.1.3. Andere gasontladingslampen (straatverlichting, industrieverlichting)	7.17
7.2. Armaturen	7.24
7.2.1. Lichtstroomverdeling	7.25
7.2.2. Lichtsterkte diagram	7.27
7.2.3. Reflektoren en afdekrasters	7.30
7.3. Lichtberekening volgens de lichtstroommethode	7.33
7.3.1. Begrippen en aannamen	7.33
7.3.2. Globale berekeningsmethodiek	7.40

5. GELUIDISOLATIE

5.1. Overdracht van geluid (trillingen)

De omsluitende vlakken van een zendruimte kunnen in trilling worden gebracht door de trillingen in de lucht (luchtgeluid) of rechtstreeks door bijvoorbeeld boren of het lopen van hovenburen. In het tweede geval spreekt men van kontaktgeluid.

Deze trillingen planten zich door de konstruktie voort, waarbij in een ander vertrek (de ontvangruimte) de omsluitende trillende vlakken weer luchttrillingen veroorzaken die als geluid waargenomen worden.

Tussen twee van elkaar gescheiden ruimten zal in het algemeen geluidoverdracht plaatsvinden, waarbij voor het luchtgeluid een aantal wegen zijn te onderscheiden (*fig. 5.1*):

- via de scheidingskonstruktie (kortste weg); dit is het direkte geluid, dat bepaald wordt door de luchtgeluidisolatie van de scheidingskonstruktie.
- via andere konstruktiedelen dan de scheidingskonstruktie; deze andere wanden (inclusief vloer en plafond) lopen meestal door en kunnen ook geluid afstralen in de ontvangruimte. Dit geluid noemt men omloopgeluid of flankerende transmissie.

Men moet met dit effect rekening houden, omdat het niet zelden voorkomt, dat een scheidingswand niet de verwachte isolatie vertoont ten gevolge van flankerende transmissie.

Het zal daarbij volstrekt zinloos zijn om de geluidisolierende funktie van de scheidingskonstruktie te verbeteren als de flankerende transmissie het direkte geluid overtreft.

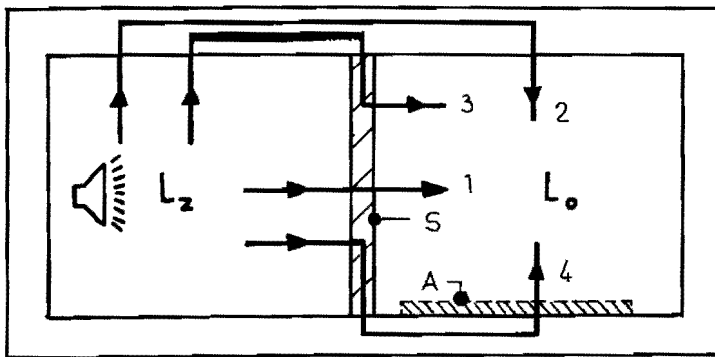
5.2: Luchtgeluidisolatie

Van de op een scheidingskonstruktie invallende akoestische intensiteit I_i zal een deel $I_t = t \cdot I_i$ direkt doorgelaten worden, waarbij t de transmissiecoëfficiënt voorstelt.

Men kan de luchtgeluidisolatie van de scheidingskonstruktie nu formeel invoeren als:

$$R = 10 \log \frac{1}{t} = 10 \log \frac{I_i}{I_t} = 10 \log \frac{I_i}{I_o} - 10 \log \frac{I_t}{I_o} \quad (5.1)$$

Met andere woorden de luchtgeluidisolatie is in feite het verschil tussen het



1 = DIREKT GELUID

2,3,4 = FLANKERENDE TRANSMISSIE

fig. 5.1.

intensiteitsniveau van het invallende geluid en dat van het doorgelaten geluid. Heeft men nu in het zendvertrek te maken met een diffuus geluidveld, dan zal gelden:

$$I_i = \frac{P_{\text{eff.zend}}^2}{4\rho c}$$

Bij afwezigheid van flankerende transmissie geldt voor het door de scheidingskonstruktie (met oppervlak S) binnenkomende akoestisch vermogen:

$$P = I_t \cdot S$$

Voor dit vermogen kan bij een diffuus geluidveld in het ontvangvertrek ook geschreven worden:

$$P = I \cdot A = \frac{P_{\text{eff.tvang}}^2}{4\rho c} \cdot A$$

Substitutie in formule 5.1. geeft:

$$R = 10 \log \frac{I_i}{I_t} = 10 \log \left[\frac{\frac{P_{\text{eff.z}}^2}{4\rho c}}{\frac{P_{\text{eff.o}}^2}{4\rho c} \cdot \frac{A}{S}} \right]$$

Door omwerken van deze formule wordt dan de definitie gevonden van de genormaliseerde luchtgeluidisolatie van een scheidingskonstruktie tussen twee ruimten onder uitsluiting van omloopgeluid (19):

$$R_{\text{def}} = L_z - L_o + 10 \log \frac{S}{A} \quad [\text{dB}] \quad (5.2.a)$$

waarin:

$$L_z = \text{geluidsdrukkniveau in het zendvertrek} \left(10 \log \frac{P_{\text{eff.z}}^2}{P_o} \right) [\text{dB}]$$

$$L_o = \text{geluidsdrukkniveau in het ontvangvertrek} \left(10 \log \frac{P_{\text{eff.o}}^2}{P_o} \right) [\text{dB}]$$

$$A = \text{totale absorptie in het ontvangvertrek} \quad [\text{m}^2 \text{ o.r.}]$$

$$S = \text{oppervlak van de scheidingskonstruktie} \quad [\text{m}^2]$$

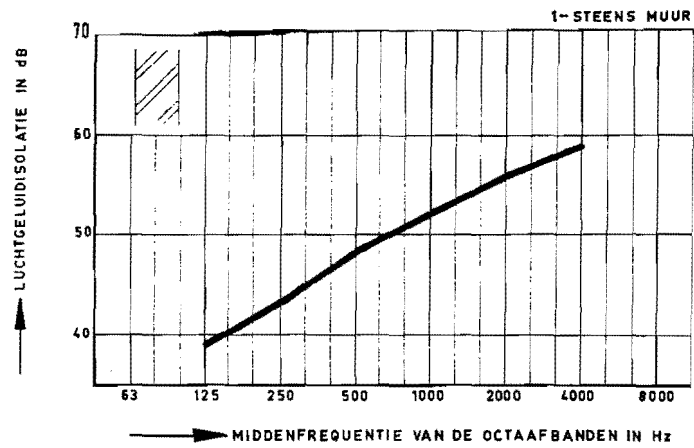


fig. 5.2. Luchtgeluidisolatie als functie van de frequentie

Het grote voordeel van deze definitie is dat L_o en L_z rechtstreeks meetbare grootheden zijn, in tegenstelling tot de transmissiecoëfficiënt of intensiteit in formule 5.1.

Met nadruk zij er op gewezen dat deze definitie geldt voor diffuse geluidvelden en met uitsluiting van flankerende transmissie; dit laatste zal alleen in laboratoriumomstandigheden mogelijk zijn.

Indien het omloopgeluid niet te verwaarlozen is, zoals doorgaans in alle praktijkgevallen, zal bij toepassing van formule 5.2a voor de luchtgeluidisolatie van een scheidingskonstructie een lagere waarde gevonden worden dan uit een laboratoriummeting zal volgen. De oorzaak hiervan ligt in het feit, dat bij het meten van L_o in de praktijk de flankerende transmissie wordt meegemeten.

Om nu een betere overeenstemming met de praktijk te krijgen is in de nieuwe nederlandse geluidnorm NEN 1070 "Geluidwering in woongebouwen" (1976) (20) een andere formule opgenomen, waarin de gemeten geluidniveaus zijn betrokken op de nagalmtijd.

De aldus genormeerde luchtgeluidisolatie D_{nT} wordt gedefinieerd door de formule:

$$D_{nT} = L_z - L_o + 10 \log \frac{T}{T_o} \quad [\text{dB}] \quad (5.2b)$$

waarin T = de nagalmtijd in de ontvangruimte

T_o = een referentie nagalmtijd

Door voor T_o de waarde van 0,5 s te kiezen is een formule verkregen, die beter met de werkelijkheid overeenkomt.

In paragraaf 5.8 zal op de genoemde norm NEN 1070 inhoudelijk nader worden ingegaan.

Zoals in de volgende paragrafen nog zal worden aangetoond is de luchtgeluidisolatie afhankelijk van de frequentie. Het is daarbij gebruikelijk de luchtgeluidisolatie aan te duiden met de frequentie als index, dus R_{500} , R_{1000} enz.

Worden de (gemeten) waarden van de luchtgeluidisolatie uitgezet tegen de frequentie dan verkrijgt men een isolatiekurve als getekend in fig. 5.2.

Het is gebruikelijk de luchtgeluidisolatie te meten in de internationale genormaliseerde oktaafbanden met middenfrequenties van 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 en 8000 Hz, dan wel in tertsbanden over dit frequentiegebied.

Pas aan de hand van deze kurven zijn twee konstrukties goed met elkaar te vergelijken.

Het is dus onmogelijk om te spreken van de luchtgeluidisolatie. Meestal bedoelt men daarmee de gemiddelde isolatie ($R_{100-3200}$), dat is het rekenkundig

gemiddelde van de waarden van de luchtgeluidisolatie in de 6 octaafbanden van 100, 200, 400, 800, 1600 en 3200 Hz:

de gemiddelde isolatie

$$R_{100-3200} = \frac{1}{6} (R_{100} + R_{200} + R_{400} + R_{800} + R_{1600} + R_{3200}) \text{ [dB]} \quad (5.3)$$

Deze grootte is niet genormaliseerd en eigenlijk alleen bruikbaar om constructies met min of meer gelijke opbouw *onderling* te vergelijken.

Opmerkingen

- Bij niet-diffuse geluidvelden kan men voor de berekening van de luchtgeluidisolatie uitgaan van formule 5.1 Als de eigenschappen van het geluidveld bekend zijn, is op analoge wijze een op 5.2. gelijkende formule af te leiden.
- Volgens formule 5.2a lijkt het mogelijk om R te verhogen door A te verkleinen. Dit is echter onjuist, daar dan ook L_0 verandert en wel zodanig dat toch R gelijk blijft (Ga dit na!)

Om dezelfde reden wordt de frequentieafhankelijkheid van R niet veroorzaakt door de frequentieafhankelijkheid van A (eventueel absorptiemateriaal op de ontvangkant van de scheidingsconstructie wordt geacht van geen invloed te zijn op de transmissie).

- Formule 5.3 is strikt genomen alleen geldig als de luchtgeluidisolatie in de octaafbanden lineair afhangt van de logaritmie van de frequentie.

Voor enkelvoudige massieve constructies kan men op grond van de massawetten (paragraaf 5.4) afleiden dat $R_{100-3200} = R_{565}$. In de praktijk gebruikt men vaak

$$R'_{100-3200} \quad R'_{500}$$

Voorbeeld 5.1

Gegeven: Twee ruimten gescheiden door een wand met een oppervlak van 12m^2 . Indien beide ruimten niet zijn gemeubileerd, blijkt door een bepaalde geluidbron in het zendvertrek een geluiddrukkniveau $L_z = 110 \text{ dB}$ te heersen. Ten gevolge van deze bron ontstaat in het ontvangvertrek een geluiddrukkniveau $L_0 = 63 \text{ dB}$. Totale absorptie zendruimte: $A_z = 2,5 \text{ m}^2$ o.r. Totale absorptie ontvangvertrek: $A_0 = 3 \text{ m}^2$ o.r.

Hierna worden de kamers gemeubileerd, zodanig dat de totale absorptie van de zendruimte stijgt tot $A_z = 8 \text{ m}^2$ o.r., en die van het ontvangvertrek tot $A_o = 20 \text{ m}^2$ o.r.

Gevraagd:

- Bereken de isolatie van de wand
- Bereken welke geluidsdrukniveaus in zend- en ontvangvertrek te verwachten zijn, indien dezelfde bron hetzelfde vermogen produceert in het gemeubileerde zendvertrek.

Oplossing:

$$\text{a. } R = L_z - L_o + 10 \log \frac{S}{A} = 110 - 63 + 10 \log \frac{12}{3} = 110 - 63 + 6 = 53 \text{ dB} \\ \text{=====}$$

$$\text{b. Zendvertrek: } \Delta L = 10 \log \frac{A_{\text{na}}}{A_{\text{voor}}} = 10 \log \frac{8}{2,5} = 10 \log 3,2 = 5 \text{ dB} \\ \text{=====}$$

$$\text{Dus } L_z \text{ wordt: } L_z = 110 - 5 = 105 \text{ dB} \\ \text{=====}$$

$$\text{Ontvangvertrek: } R = L_z - L_o + 10 \log \frac{S}{A},$$

$$\text{waaruit: } L_o = 105 - 53 + 10 \log \frac{12}{20} = 52 + 10 \log 0,6 \approx 50 \text{ dB} \\ \text{=====}$$

Conclusie:

Ongemeubileerd was $L_o = 63 \text{ dB}$, na meubilering $L_o = 50 \text{ dB}$. Er treedt dus door het aanbrengen van absorptie een daling op van ongeveer 10 dB, hetgeen een halvering in de luidheid zou betekenen. Het beschreven verschijnsel is waar te nemen bij het betrekken van een nieuw opgeleverde flat, voor en na de verhuizing.

N.B. Het is goed te bedenken dat in het gekozen voorbeeld de totale absorptie in het ontvangvertrek zevenmaal zo groot is geworden. Heeft men in een gemeubileerde ruimte echter last van burenlawaai, dan is het *niet* mogelijk om met absorptie dit lawaai te bestrijden, omdat de hoeveelheid aan te brengen absorptie dan veel en veel te groot zou worden om een daling van circa 10 dB te halen!!

5.3. Samengestelde constructies; geluidlekken

Een scheidingsconstructie zal niet altijd een homogeen oppervlak vormen. Waarmee bedoeld is dat deze constructie bestaat uit twee of meer vlakken, die elk voor

zich een andere luchtgeluidisolatie hebben. Voorbeelden zijn wanden met deuren en glasvlakken, maar ook met gaten en scheuren.

Dat gedeelte van de konstruktie dat slecht isoleert zal hier met de algemene term "geluidlek" worden aangeduid.

Voor de berekening van de resulterende luchtgeluidisolatie van zulke samengestelde konstrukties kan met vrucht gebruik worden gemaakt van de methode waarop formule 5.2a uit 5.1 is afgeleid.

Heeft men een konstruktie met één "geluidlek" dan kan men invoeren:

t_1 = de transmissiecoëfficiënt van het geluidlek met oppervlak S_1 en luchtgeluidisolatie R_1

t_r = de gemiddelde transmissiecoëfficiënt van de samengestelde konstruktie met oppervlak S (inclusief het lek) en resulterende luchtgeluidisolatie R_{res}

t = de transmissiecoëfficiënt met oppervlak $S - S_1$ en luchtgeluidisolatie R

Per definitie geldt:

$$t_r = \frac{t \cdot (S - S_1) + t_1 \cdot S_1}{S}$$

terwijl voor het totaal in het ontvangvertrek binnenkomende akoestische vermogen nog zal gelden:

$$P = (I_i \cdot t_r) \cdot S = (I_i \cdot t) \cdot (S - S_1) + (I_i \cdot t_1) \cdot S_1 \quad [W]$$

(dus geen flankerende transmissie!)

Op grond van formule 5.1 mag men nu schrijven:

$$R_{res} = 10 \log \frac{1}{t_r} = -10 \log t \cdot \left[1 + \frac{S_1}{S} \left(\frac{t_1}{t} - 1 \right) \right] \quad [dB]$$

en eveneens $t = 10^{-R/10}$ en $t_1 = 10^{-R_1/10}$

Door substitutie worden dan gevonden:

de resulterende luchtgeluidisolatie

$$R_{res} = R - 10 \log \left[1 + \frac{S_1}{S} (10^{(R-R_1)/10} - 1) \right] \quad [dB] \quad (5.4a)$$

Hiervoor kan ook geschreven worden:

$$R_{res} = R - 10 \log \left(\frac{S - S_1}{S} + \frac{S_1}{S} \cdot 10^{(R-R_1)/10} \right)$$

Eenvoudig is aan te tonen, dat indien:

$$\frac{S_1}{S} \cdot 10^{(R-R_1)/10} \gg \frac{S-S_1}{S} \quad \text{ofwel:} \quad R-R_1 \gg 10 \log \frac{S-S_1}{S_1} \quad \text{de formule (5.4a)}$$

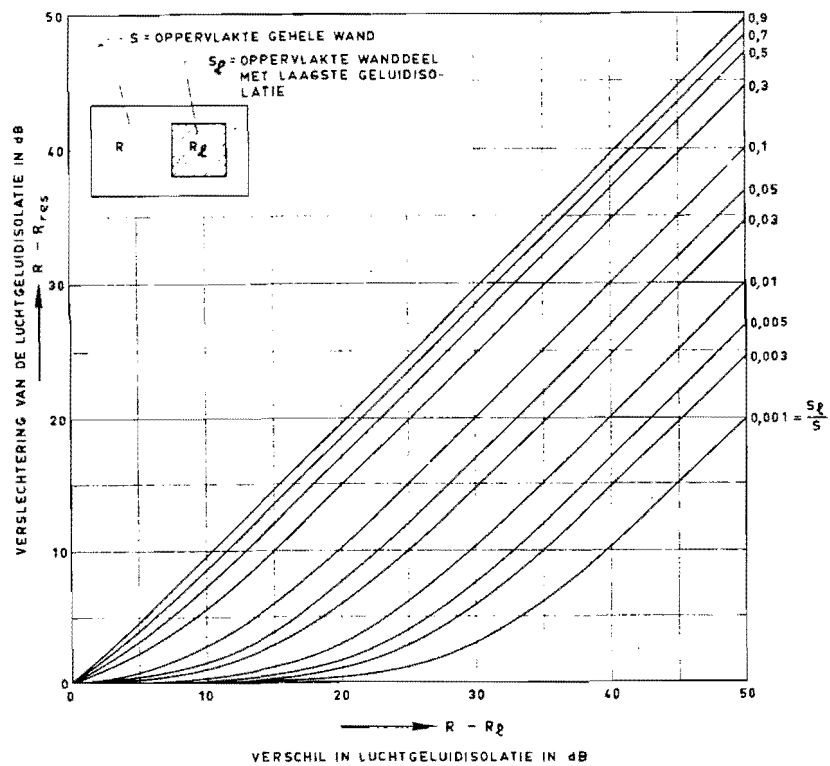


Fig. 5.3. Luchtgeluidisolatie van samengestelde konstrukties.

Bron (28)

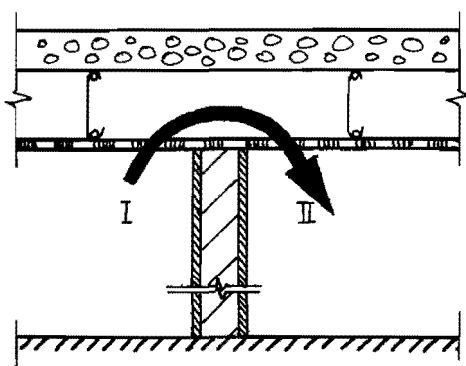


fig. 5.4a.

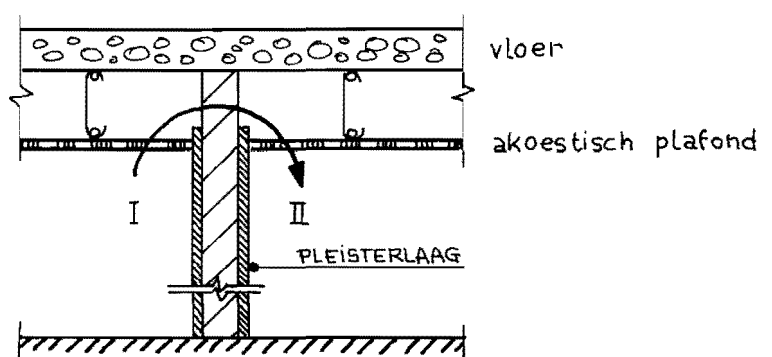


fig. 5.4b.

overgaat in:

$$R_{\text{res}} \approx R_1 + 10 \log \frac{S}{S_1} \quad (5.4b)$$

In fig. 5.3. is de verslechtering van de isolatie ($R - R_{\text{res}}$) uitgezet als functie $R - R_1$ voor verschillende waarden van $\frac{S_1}{S}$.

Heeft men bijvoorbeeld een 5 meter brede muur met een luchtgeluidisolatie $R = 50$ dB, waarin over de hele hoogte een 5 mm brede kier ($R_1 = 0$) aanwezig is, dan zal de resulterende luchtgeluidisolatie nog maar 30 dB bedragen.

Aansluitingen van wanden op vloeren en gevels zijn daarom zwakke punten in de geluidisolatie.

Deuren bezitten in het algemeen een lagere luchtgeluidisolatie dan een wand.

Verbetering van de resulterende luchtgeluidisolatie door een beter isolerende deur kan echter volledig mislukken doordat geen rekening is gehouden met de kieren bij de deurpost.

Vaak ziet men een verlaagd plafond toegepast, waarbij de goed isolerende scheidingswand tussen twee ruimten slechts tot aan het verlaagde plafond is doorgetrokken (fig. 5.4a). Zelfs indien het metselwerk wel is doorgezet, blijkt de

wand vaak alleen onder het verlaagde plafond te zijn afgepleisterd (fig. 5.4b)

Aangezien voegen die niet vol zijn nog geluidlekken kunnen vormen dient ook het pleisterwerk te worden doorgezet. Uit metingen is gebleken dat het verschil in isolatie tussen een gepleisterde en een ongepleisterde wand 5 à 10 dB kan bedragen. Het verschil zit daarbij dus in het "luchtdicht" afsluiten van de konstruktie en niet in de massatoename volgens de massawet die hierna besproken zal worden.

In het algemeen zijn "gaten" dus funest. Denk hierbij ook aan doorvoeren van centrale verwarming, centrale televisie-antennes, waterafvoerpijpen, enz. waaraan extra aandacht moet worden besteed.

5.4. Massawetten

De definitie van de luchtgeluidisolatie in de voorgaande paragraaf heeft geleid tot een meetbare grootheid. In feite echter is formule 5.2 slechts bruikbaar voor een meting van R als L_z , L_o , S , A en de frequentie f bekend zijn of ter voorspelling van L_o als L_z , S , A , f en R gegeven zijn. Het is dus zinvol om een methode te zoeken, waarbij R voorspeld kan worden uit de materiaaleigenschappen van de scheidingskonstruktie en de eigenschappen van het geluidveld.

Voor diverse typen scheidingskonstrukties zal langs theoretische weg de geluidsisolerende werking worden bepaald. Hierbij wordt uitgegaan van loodrecht op het vlak van de scheidingskonstruktie invallende geluidgolven.

Enkele plaat

Om de in appendix 5A gevolgde berekeningswijze toe te mogen passen is het noodzakelijk de volgende aannamen te doen:

- de plaat is oneindig uitgestrekt in beide richtingen (bij starre verplaatsing van de plaat ontstaan dan vlakke lopende golven)
- de dikte van de plaat blijft bij alle op de plaat werkzame belastingen konstant
- in de richting loodrecht op het vlak van de plaat kan de plaat star verplaatsen.

Het model waarmee we nu werken is afgebeeld in figuur 5.5.

Wanneer op de plaat een vlakke lopende golf valt ($p = \rho c v$) dan zal door reflectie ook een vlakke lopende golf terugkeren.

Omdat de op de plaat werkzame belasting op elk tijdstip in elk punt dezelfde waarde heeft zal de plaat nu star verplaatsen, waardoor aan de andere kant van de plaat een vlakke lopende golf ontstaat.

In appendix 5A is afgeleid dat bij een opvallende, sinusvormige geluidgolf de afgegeven geluidgolf eveneens sinusvormig is en dat voor de verhouding tussen hun amplitudes geldt:

$$\left(\frac{\hat{p}_i}{\hat{p}_t} \right)^2 = 1 + \left(\frac{2\pi f m}{2\rho c} \right)^2$$

Hierin is:

f = frequentie van het geluid [Hz]

m = massa van 1 m^2 van de constructie [kg/m^2]

ρc = specifieke akoestische golfweerstand [SI]

Bij een gegeven waarde van m is deze verhouding dus een functie van f zonder absolute maxima of minima.

Zoals bekend is de intensiteit evenredig met p_{eff}^2 , dus ook met $\hat{p}^2$ (volgens $p_{\text{eff}} = 1/2 \sqrt{2} \hat{p}$ voor een sinusvormige toon) zodat:

$$\frac{I_i}{I_t} = \left(\frac{\hat{p}_i}{\hat{p}_t} \right)^2 = 1 + \left(\frac{2\pi f m}{2\rho c} \right)^2$$

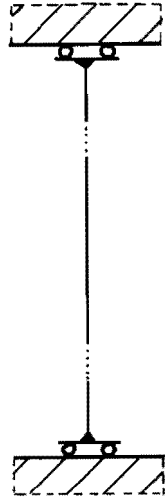


fig. 5.5

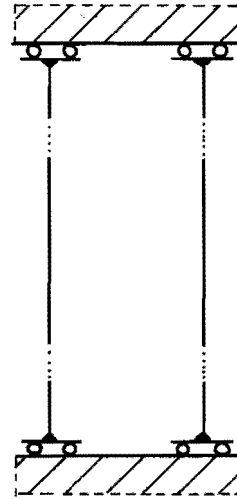


fig. 5.6

Voor de geluidisolatie vinden we dan met formule 5.1

de theoretische massawet voor een enkelvoudige konstruktie bij loodrechte inval:

$$R = 10 \log \left[1 + \left(\frac{2\pi f m}{2\rho c} \right)^2 \right] [\text{dB}] \quad (5.5a)$$

Voor de wat zwaardere konstrukties ($m > 10 \text{ kg/m}^2$) en voor frequenties $f > 50 \text{ Hz}$ kan deze massawet vereenvoudigd worden tot:

$$R = 20 \log m + 20 \log \frac{f}{500} + 12 \quad [\text{dB}] \quad (5.5b)$$

Volgens deze formule zou bij verdubbeling van de massa of van de frequentie de geluidisolatie theoretisch met $20 \log 2 = 6 \text{ dB}$ moeten toenemen.

In de praktijk blijkt dit echter ca 5 dB te zijn.

Bovendien blijkt de werkelijke isolatie van een wand over het hele frequentiegebied een stuk lager te liggen dan uit de theoretische massawet zou volgen.

Uit een groot aantal metingen in de praktijk, dat wil zeggen voor een niet oneindig grote wand en een normale bijdrage van de flankerende transmissie, heeft men dan ook een andere formule samengesteld, die meer met de werkelijkheid overeenkomt. Men noemt deze formule de praktische massawet:

$$R' = 17,5 \log m + 17,5 \log \frac{f}{500} + 3 \quad [\text{dB}] \quad (5.6)$$

Zowel bij de theoretische als de praktische massawet hangt de geluidisolatie dus lineair af van de logaritme van de massa en de logaritme van de frequentie; in algemene vorm : $R = A \log m + A \log \frac{f}{500} + B$. Voor de gemiddelde geluidisolatie geldt dan:

$$\begin{aligned} R_{100-3200} &= \frac{1}{6} \left[6 A \log m + 6B + A \left(\log \frac{100}{500} + \log \frac{200}{500} + \log \frac{400}{500} + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \log \frac{800}{500} + \log \frac{1600}{500} + \log \frac{3200}{500} \right) \right] = \\ &= A \log m + A \log \left(\frac{100}{500} \cdot \frac{200}{500} \cdot \frac{400}{500} \cdot \frac{800}{500} \cdot \frac{1600}{500} \cdot \frac{3200}{500} \right)^{1/6} + B = \\ &\approx A \log m + A \log \frac{565}{500} + B = R_{565} \end{aligned}$$

Voor de praktijk benadert men de gemiddelde geluidisolatie gemakshalve door R_{500} in plaats van R_{565} .

In dat geval krijgt men de volgende eenvoudige formules:

de gemiddelde geluidisolatie volgens "theoretische" massawet:

$$R_{100-3200} \approx R_{500} = 20 \log m + 12 \quad [\text{dB}] \quad (5.7)$$

de gemiddelde geluidisolatie volgens "praktische" massawet:

$$R'_{100-3200} \approx R'_{500} = 17,5 \log m + 3 \quad [\text{dB}] \quad (5.8)$$

Uit deze formule volgt dat de gemiddelde geluidisolatie in de praktijk aanzienlijk lager zal zijn dan volgens de theoretische massawet.

Zo is voor een konstruktie met een gewicht van 100 kg/m^2 het verschil

$$R_{100-3200} - R'_{100-3200} \approx 2,5 \log 100 + 12 - 3 = 14 \quad [\text{dB}]$$

Hoewel de praktische massawet uit praktijkmetingen is afgeleid is het heel goed mogelijk dat men voor een bepaalde konstruktie in de praktijk een nog lagere luchtgeluidisolatie meet dan deze wet voorspelt.

Voert men bijvoorbeeld een konstruktie zeer zwaar uit dan wordt het aandeel van de flankerende transmissie in de geluidoverdracht groter dan het "gemiddelde uit de praktijk", zoals dat in de praktische massawet is verwerkt.

Daarnaast zal men in werkelijkheid veel te maken hebben met alzijdig invallende geluidgolven, waardoor het later te bespreken coïncidentie-effect optreedt.

Opmerkingen:

- Naast de praktische massawet volgens formule 5.6 kent men nog andere praktische massawetten.

Ook deze zijn van de algemene gedaante:

$$R' = A \log m + B \log \frac{f}{500} + C$$

- Het is goed te bedenken dat alle tot nu toe gegeven formules uitsluitend betrekking hebben op de luchtgeluidisolatie en bij kontaklgeluidisolatie niet mogen worden toegepast.

Voorbeeld 5.2

Gegeven: Een aanvaardbare maat voor de geluidisolatie van een woning-scheidende wand bedraagt 48 dB bij 500 Hz.

Gevraagd: Is deze isolatie te realiseren met een wand die is opgebouwd uit éénsteens baksteenmetselwerk ($d = 0,215 \text{ m}$, $\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$), met aan beide zijden 10 mm pleister?

Oplossing:

Massa baksteenmetselwerk ong.	$0,215 \times 1600 =$	344	kg/m^2
Massa 2 x 10 mm pleisterlaag ong.		30	"
		374	kg/m^2
Totale massa			

Substitutie van de totale massa in (5.6) geeft:

$$R'_{500} = 17,5 \log 374 + 3 = 17,5 \times 2,573 + 3 = 48 \text{ dB}$$

=====

Met deze konstruktie is dus net aan de geëiste isolatie voldaan.

5.5. Spouwkonstrukties, resonantie, staande golven

De bij de enkele plaat gedane aannamen gelden ook voor spouwkonstrukties en het model waarmee nu gewerkt wordt ziet er uit zoals in figuur 5.6. is aangegeven.

Het enige verschil met het hiervoor bekeken geval wordt gevormd door het feit dat de luchtlaag tussen de twee platen als veer gaat fungeren met slapheid C . Afgeleid kan worden dat:

$$C \frac{\text{def}}{\text{---}} - \frac{\partial D}{\partial P} = \frac{D}{1,4 P_0} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{N}} \right]$$

waarin : D = dikte luchtlaag $[\text{m}]$

P_0 = barometrische evenwichtsdruk $\approx 10^5 [\text{Pa}]$

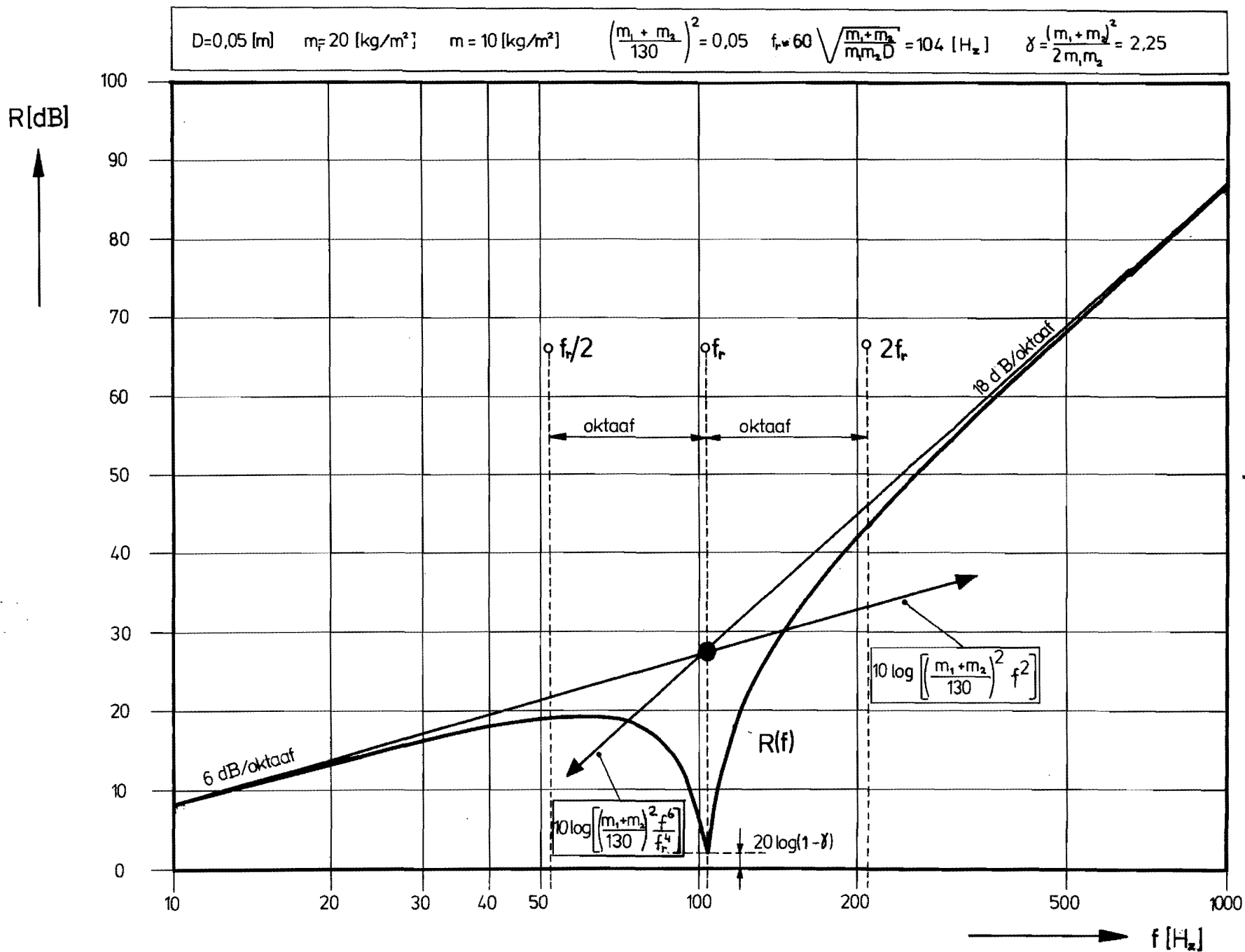
De afleiding berust op de adiabatische gaswet $PV^{1,4} = \text{konstant}$, dus voor 1 m^2 spouwkonstruktie $PD^{1,4} = \text{konstant}$

Adiabatisch wil zeggen: zonder warmte-uitwisseling met de omgeving. Kompressie en expansie van de opgesloten luchtlaag gaat zo snel dat deze veronderstelling hier gerechtvaardigd is.

Wanneer op een van de platen een vlakke lopende golf valt, zal deze plaat eveneens star gaan verplaatsen. Hierdoor stijgt de druk in de luchtlaag tussen de platen waardoor nu ook de tweede plaat star verplaatst en in de ontvangstruimte een vlakke lopende golf veroorzaakt.

Het gekozen model is op te vatten als een massa-veer-massa systeem.

Figuur 5.7a.



Een dergelijk systeem kan een eigentrilling uitvoeren met een frequentie:

$$f^* = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2 C}}$$

In appendix 5B is eveneens voor sinusvormige golven afgeleid dat:

$$\left(\frac{\hat{p}_i}{\hat{p}_t} \right)^2 = \left[1 - \frac{(2\pi f)^2 (m_1 + m_2) C}{2} \right]^2 + \left(\frac{2\pi f}{2\rho c} \right)^2 \left[m_1 + m_2 + (\rho c)^2 C - (2\pi f)^2 m_1 m_2 C \right]^2$$

Hierin is:

f = frequentie van het geluid [Hz]

m_1, m_2 = massa's van 1 m² van de respectievelijke spouwbladen [kg/m²]

ρc = 410 = specifieke akoestische golfweerstand [SI]

$C = \frac{D}{1,4 \cdot 10^5}$ = slapheid van de luchtlaag met dikte D [m³/N]

Bij gegeven massa's m_1 en m_2 is deze verhouding weer een functie van f , die nu echter een minimum blijkt te vertonen voor $f = f^*$.

Dit betekent dat het in de ontvangstruimte afgegeven geluid maximaal van sterkte is.

In dat geval spreken we van resonantie, dus

$$f_r = f^* = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2 C}}$$

Wanneer een van de massa's vele malen groter is dan de andere, bijv. $m_2 \gg m_1$ dan nadert f_r tot $f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{m_1 C}}$ en $\left(\frac{\hat{p}_i}{\hat{p}_t} \right)^2 \rightarrow \infty$, dus $\hat{p}_t \rightarrow 0$. Met andere woorden er wordt dan geen geluid doorgelaten.

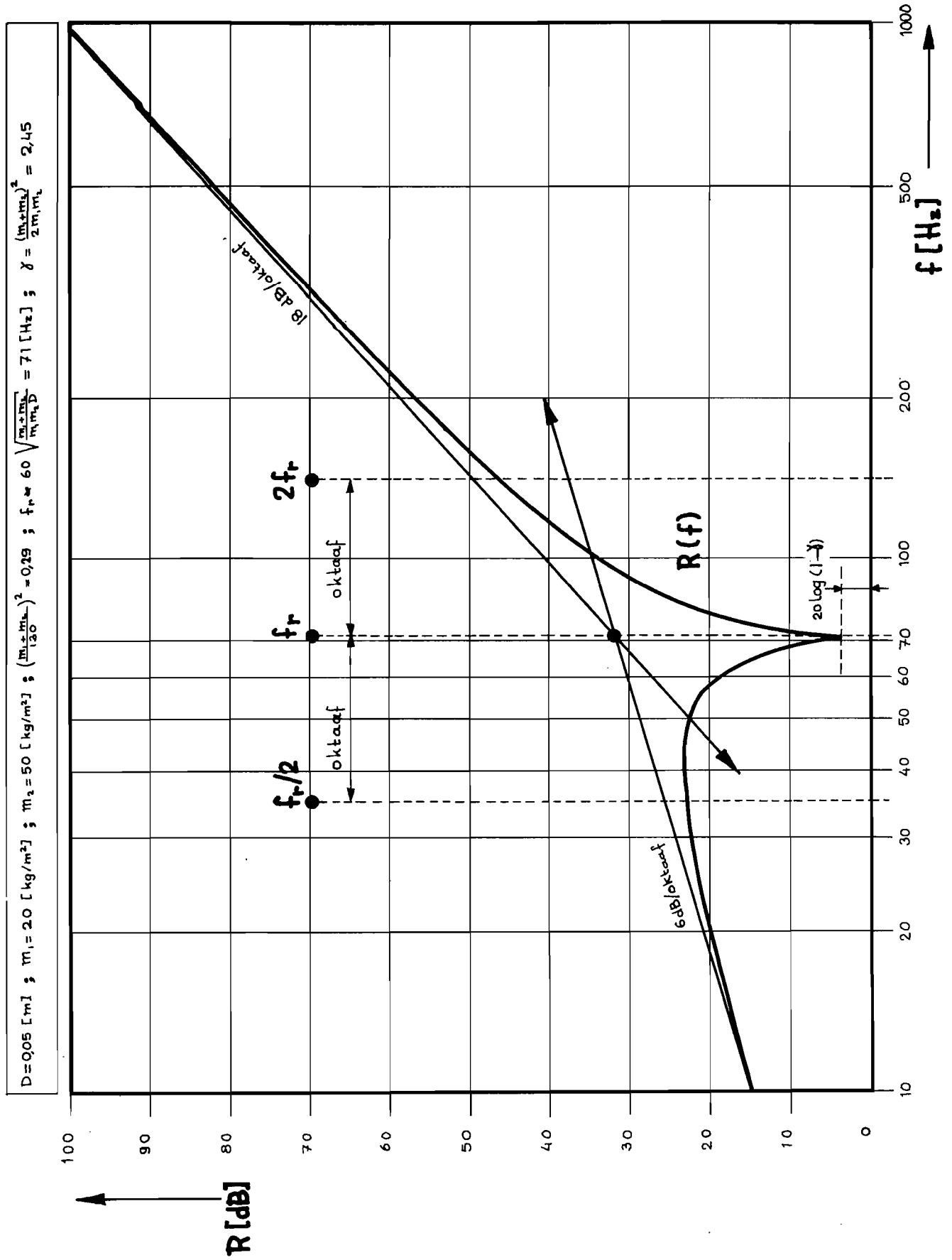
Met behulp van formule 5.1 en de hierboven gegeven uitdrukking voor $\left(\frac{\hat{p}_i}{\hat{p}_t} \right)^2$ wordt nu gevonden:

de theoretische massawet voor een spouwkonstruktie (bij loodrechte inval)

$$R = 10 \log \left[\left\{ 1 - \frac{(2\pi f)^2 (m_1 + m_2) \cdot C}{2} \right\}^2 + \left(\frac{2\pi f}{2\rho c} \right)^2 \left\{ m_1 + m_2 + (\rho c)^2 C - (2\pi f)^2 m_1 m_2 C \right\}^2 \right] \quad [\text{dB}] \quad (5.9a)$$

Om bovenstaande ingewikkelde formule te analyseren voeren we in:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2 C}} \approx 60 \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2 D}} \quad \text{en} \quad \gamma = \frac{(m_1 + m_2)^2}{2m_1 m_2} = 1 + \frac{m_1}{2m_2} + \frac{m_2}{2m_1}$$



Figuur 5.7b.

dus altijd $\gamma \geq 2!!!$

verder is $\frac{2\pi}{2\rho c} \approx \frac{1}{130}$ en zal $(\rho c)^2 \cdot C \ll (m_1 + m_2)$ zijn

Dit laatste kan men eenvoudig nagaan, daar meestal m_1 en m_2 zwaarder zijn dan 1 kg/m^2 en de spouwbreedte hooguit 10 à 20 cm bedraagt.

Formule 5.9a is dan te schrijven als:

$$R = 10 \log \left[\left(1 - \gamma \cdot \frac{f^2}{f_r^2} \right)^2 + \left(\frac{m_1 + m_2}{130} \right)^2 \cdot f^2 \left(1 - \frac{f^2}{f_r^2} \right)^2 \right] \quad (5.9b)$$

Het verloop van de geluidisolatie als functie van de frequentie is voor bepaalde waarden van m_1 , m_2 en D uitgezet in *figuur 5.7a*.

De vorm van deze grafiek is echter karakteristiek voor alle spouwkonstrukties en we kunnen alvast de volgende konklusies trekken:

- Als de frequentie $f = f_r$ treedt een grote daling op van de geluidisolatie. Dit verschijnsel, waarbij de constructie in een zogenaamde "eigentrilling" raakt, wordt resonantie genoemd. Daarbij geldt dus voor:

de resonantiefrequentie:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2 C}} \approx 60 \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2 D}} \quad [\text{Hz}] \quad (5.10)$$

Bij gelijkblijvende massa's m_1 en m_2 wordt de resonantie-frequentie dus hoger bij afnemende spouwbreedte (D) en lager bij toenemende spouwbreedte.

- Beneden de resonantie-frequentie ($f \ll f_r$) gedraagt de spouwconstructie zich bij benadering als een enkelvoudige constructie met massa $m_1 + m_2$.

Boven de resonantie-frequentie ($f \gg f_r$) gaat de stijging van de geluidisolatie echter met circa 18 dB/octaaf.

De geluidisolatie wordt nu bepaald door de term met de hoogste macht van de frequentie in formule 5.9b. dus door f^6 .

- De invloed van de resonantie strekt zich globaal uit over twee octaven rond de resonantie frequentie,

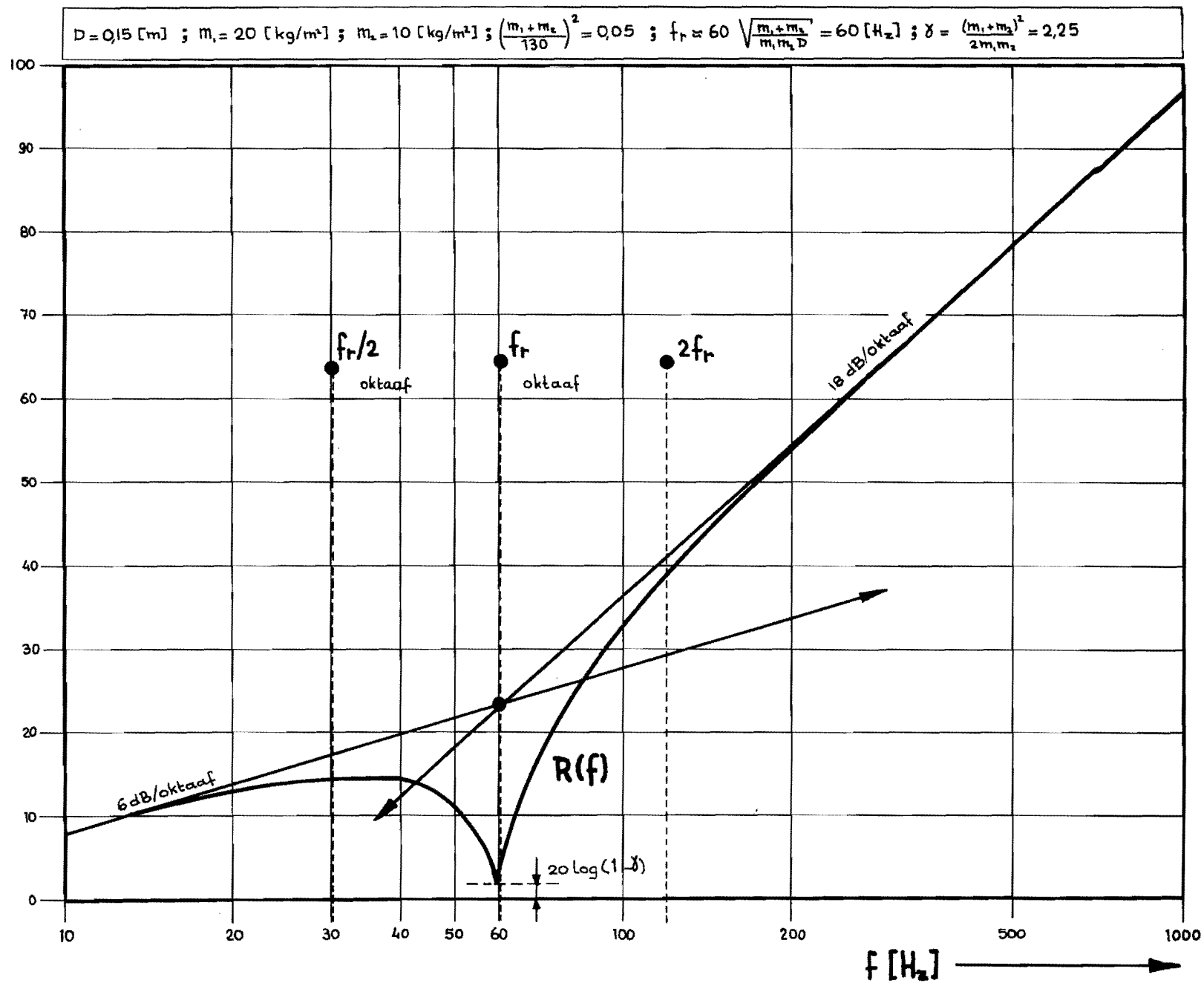
Aan de randen van dit gebied wijkt de isolatiecurve ca. 3 dB af van de massawet (de rechte lijnen).

- Voor de geluidisolatie bij resonantie ($f = f_r$) vindt men uit 5.9.

$$R_r = 10 \log (1 - \gamma)^2 = 20 \log \left(\frac{m_1}{2m_2} + \frac{m_2}{2m_1} \right) \quad (5.11)$$

Figur 5.7c.

$R[\text{dB}]$ ↑



Blijkbaar is de geluidisolatie bij resonantie alleen 0 dB als $m_1 = m_2$. Men moet zich echter hiervan niet te veel voorstellen; immers als $m_1 = 10 m_2$ of $m_2 = 10 m_1$ dan is toch slechts $R_r \approx 20 \log 5 = 14$ dB.

Spouwkonstrukties met zware spouwbladen ($m > 100 \text{ kg/m}^2$) en "normale" spouwbreedte ($D > 0,04 \text{ m}$) zullen in het algemeen geen problemen geven, daar de resonantiefrequentie al gauw kleiner zal zijn dan $60 \sqrt{\frac{200}{100 \cdot 100 \cdot 0,04}} \approx 40 \text{ Hz}$. Resonantie bij lichte konstrukties zoals dubbelglas kan echter zeer hinderlijk zijn, temeer daar de resonantiefrequentie gemakkelijk in het frequentiegebied kan komen waar het verkeerslawaaï maximaal is (100 à 125 Hz).

Daar $\rho_{\text{glas}} \approx 2500 \text{ kg/m}^3$ komt figuur 5.7a overeen met een dubbelglaskonstruktie met ruitdiktes van 8 mm respectievelijk 4 mm. Vanwege de ligging van de resonantiefrequentie zal men deze konstruktie beter moeten dimensioneren.

De oplossing van figuur 5.7b, waarbij de tweede ruit 5 x zo dik is gemaakt en die van fig. 5.7c met een 3x zo grote spouw zijn beter (maar wel duur!).

Omdat de (standaard-)kozijnen slechts kleine spouwbreedtes toelaten hebben gangbare dubbelglaskonstrukties welke om thermische redenen worden aangebracht laagfrequent meestal een slechte akoestische isolatie. De konstruktie uit figuur 5.7a, bijvoorbeeld isoleert in de lage frequenties (verkeerslawaaï!) minder dan een enkelglaskonstruktie met dezelfde massa (vergelijk de lijnen van 6 dB/octaaf in de figuren).

In dat geval kan men overwegen de (smalle) spouw weg te laten en met een zware ruit het verkeerslawaaï nog enigszins buiten te houden; uiteraard ten koste van de thermische isolatie. Met het dimensioneren van een dubbelglaskonstruktie is uit akoestisch oogpunt dus grote voorzichtigheid geboden.

Het is gebruikelijk om voor dubbelglaskonstrukties te eisen dat $f_r < 80 \text{ Hz}$.

Met formule 5.10 en $\rho_{\text{glas}} = 2500 \text{ kg/m}^3$ is deze eis te vertalen in:

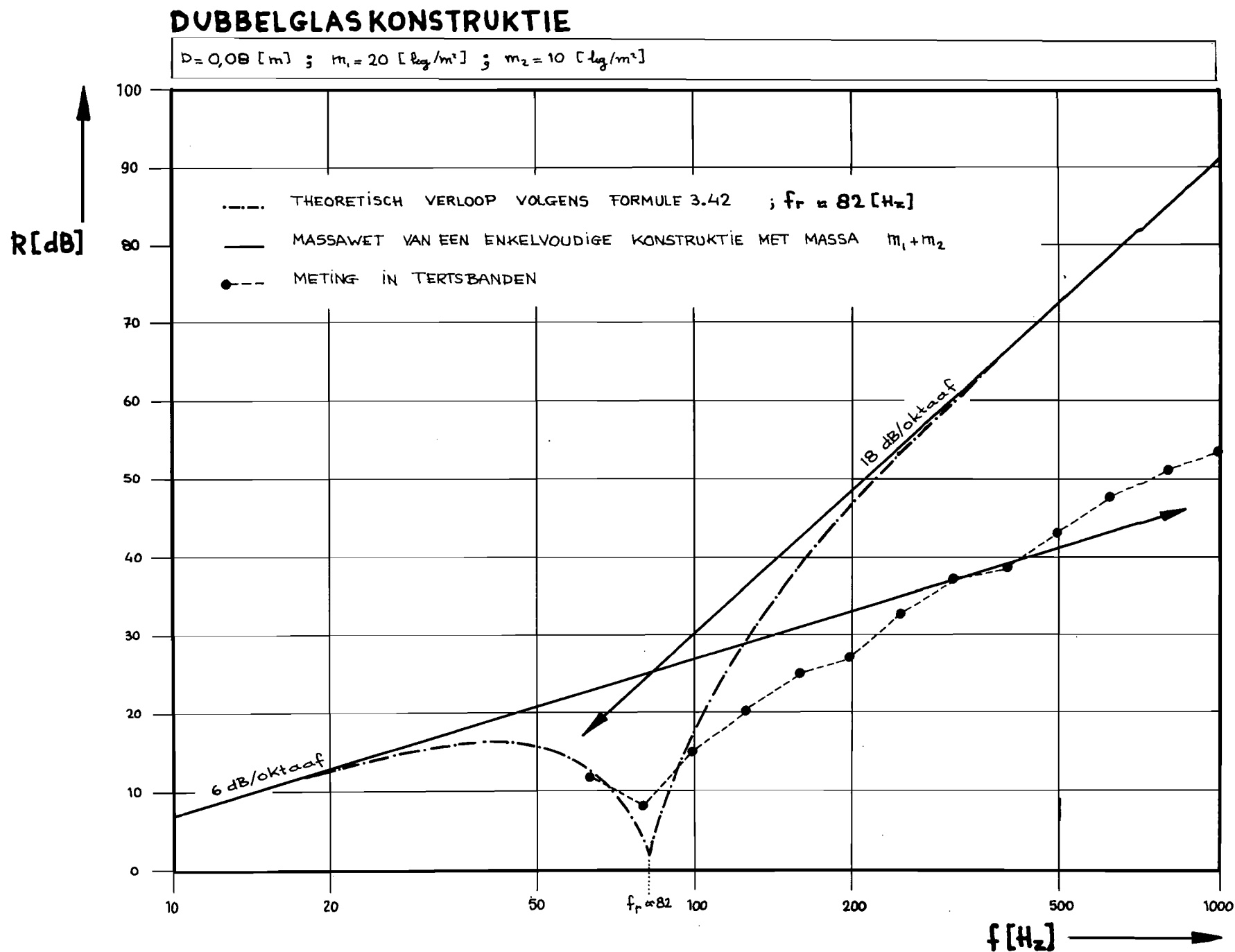
$$\frac{d_1 \cdot d_2 \cdot D}{d_1 + d_2} > 225 \cdot 10^{-6} \quad (5.12)$$

waarin:

- D = spouwbreedte [m]
- d_1 = dikte van de 1e glaslaag [m]
- d_2 = dikte van de 2e glaslaag [m]

De voorspelling van de resonantiefrequentie volgens de hier gegeven theorie blijkt goed met de praktijk overeen te komen. De stijging van de geluidisolatie voor frequenties boven het resonantiegebied gaat in werkelijkheid echter niet met 18 dB/octaaf maar met 10 à 12 dB/octaaf, zie fig. 5.8.

fig. 5.8.



De oorzaak hiervan ligt voornamelijk bij de inklemming van de konstruktie. Door de inklemming kan men de konstruktie bij de randen kwalitatief beschouwen als een enkele plaat.

Als de geluidisolatie in het centrum van de spouwkonstruktie zich volgens het theoretische verloop zou gedragen, dus boven het resonantiegebied zeer groot is, dan gaat de bijdrage van de konstruktierand aan de transmissie overheersen. De stijging van de (resulterende) geluidisolatie van de hele konstruktie zal daardoor tussen de 6 dB/octaaf (enkelvoudige konstruktie) en 18 dB/octaaf uitkomen.

Opmerkingen

- Bij coïncidentie zullen we zien dat deze door een spouwkonstruktie goed bestreden kan worden door de massa's van de spouwbladen verschillend te nemen. Hoewel resonantie een totaal ander verschijnsel is, ligt het voor de hand om resonantie op analoge manier te bestrijden door twee spouwen met verschillende resonantiefrequentie achter elkaar te plaatsen (bijv. 3 lagen glas). Dit is echter een onjuiste voorstelling, daar men niet met twee onafhankelijke massa-veersystemen heeft te maken (*fig.* 5.10a) maar met twee gekoppelde systemen (*fig.* 5.10b)

Het zou te ver voeren hiervoor de overdrachtsfunctie af te leiden (analoog aan het twee lagen systeem) maar het zal duidelijk zijn dat het model van *fig.* 5.10b overgaat in *figuur* 5.9. als $C_1 = 0$ of $C_2 = 0$ of $m_2 = 0$. In het algemeen zullen bij het drielagensysteem twee resonantiefrequenties gevonden worden, welke van dezelfde grootte-orde zijn als bij het tweelagensysteem. Desondanks kan het drielagensysteem in bepaalde gevallen uitkomst bieden.

- De verwaarlozing van de term $(\rho c)^2 C$ in de afleidingen is aannemelijk door de definitie van de voortplantingssnelheid van geluid:

$$c \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{\frac{1,4P_0}{\rho}}$$

waarbij $1,4 P_0$ de kompressiemodulus (of dynamische elasticiteitsmodulus) van lucht is. Daardoor wordt:

$$(\rho c)^2 C = \rho^2 \cdot \frac{1,4P_0}{\rho} \cdot \frac{D}{1,4P_0} = \rho D$$

precies de massa van 1 m^2 luchtlaag met dikte D ; dit is inderdaad te verwaarlozen ten opzichte van het gewicht der spouwbladen.

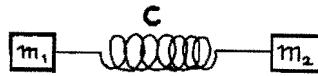


fig. 5.9.

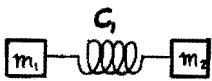


fig. 5.10a

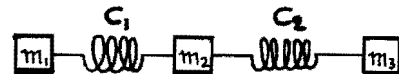
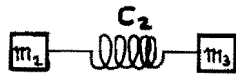
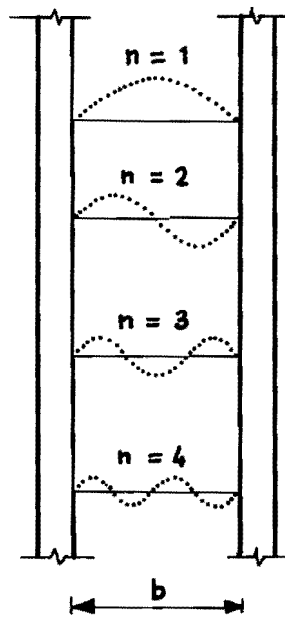


fig. 5.10b



Figuur 5.11.

- Behalve de behandelde resonantie van twee spouwwangen op de tussengelegen luchtveer wordt bij een spouwkonstructie ook nog bij hogere frequenties vermindering van de geluidisolatie gevonden.

Dit zijn de resonanties van de luchtlaag, een verschijnsel dat vergelijkbaar is met het resoneren van de luchtkolommen in orgelpijpen.

In analogie daarmee worden deze resonanties samengevat met de verzamelnaam "staande golven".

De frequentie van de staande golven is afhankelijk van de spouwbreedte. In de spouw passen een aantal halve golflengten (*zie figuur 5.11*), zodat tussen de spouwbreedte b en de golflengte λ het volgende verband bestaat:

$$n \cdot \lambda / 2 = b \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

Via de betrekking: $c = f \cdot \lambda$ wordt voor de frequenties van de staande golven gevonden:

$$f_{st} = \frac{170}{b} \cdot n \quad [\text{Hz}] \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (5.13)$$

b in meter

Bij de behandeling van het coïncidentie-effect wordt vermeld dat 3000 Hz een acceptabele waarde voor de grensfrequentie was. Hanteren we deze waarde eveneens voor de staande golven dan impliceert dat, dat een spouw niet breder mag worden dan 57 mm, hetgeen weer in tegenspraak is met de eisen om hinderlijke resonantie te voorkomen.

Bij bredere spouwen is daarom het aanbrengen van demping in de constructie zeer gewenst; bij dubbele beglazing, waar algehele vulling doorgaans onaanvaardbaar is, dient geluidabsorberend materiaal te worden aangebracht tegen de zijanten in de spouw.

5.6 Coïncidentie

Valt een vlakke lopende golf met een frequentie f schuin in op een plaat, dan zal de plaat een golfpatroon worden opgedrukt volgens *fig. 5.12*.

Men moet zich daarbij voorstellen dat de constructie plaatselijk wordt ingedrukt, evenredig met de momentane geluidsdruk aldaar. Aangezien nu wel vormveranderingen optreden, zal behalve de massa ook de buigstijfheid van de wand van invloed zijn op de geluidisolatie.

Met het voortschrijden van het geluidgolffront zal ook het golfpatroon op het

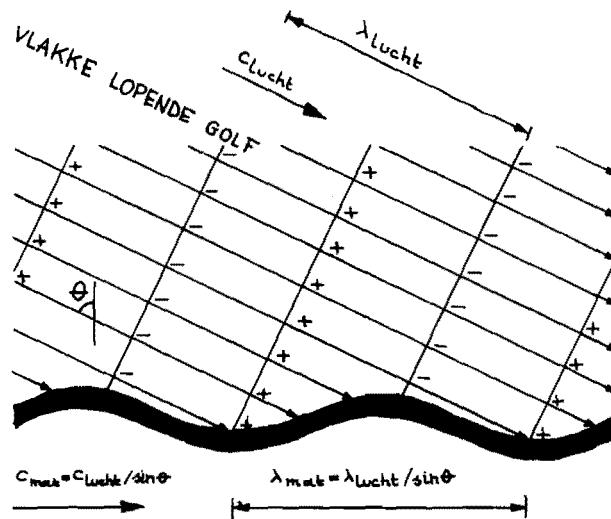


fig. 5.12. opwekking van een gedwongen
buigingsgolf door invallend geluid.

oppervlak zich verplaatsen en ontstaat een zogenaamde *gedwongen buigingsgolf*.
 Uit fig. 5.12 valt voor de golflengte van deze buigingsgolf af te leiden dat:

$$\lambda_{\text{mat}} = \lambda_{\text{lucht}} / \sin\theta$$

Aangezien het verschijnsel zich met de frequentie f van het opvallende geluid zal herhalen, zal de gedwongen buigingsgolf zich in het materiaal voortplanten met een snelheid:

$$c_{\text{mat}} = f \lambda_{\text{mat}} = f \cdot \lambda_{\text{lucht}} / \sin\theta = c_{\text{lucht}} / \sin\theta$$

Ook de snelheid wordt dus aan het materiaal opgedrongen.

Een lopende buigingsgolf met dezelfde frequentie f in de plaat kan men ook krijgen door bijvoorbeeld de rand van de plaat transversaal aan te stoten.

De trillingen zullen zich dan vanaf de rand van de plaat vrij willen voortplanten met de frequentie f , maar met een snelheid die de plaat zelf bepaalt.

Men spreekt dan van vrije rechte buigingsgolven, waarna de snelheid wordt beschreven met:

$$c_{\text{mat}}^* = \sqrt{\frac{Ed^2 4\pi^2 f^2}{12\rho}}$$

waarin:

c_{mat}^*	= voortplantingssnelheid van de vrije buigingsgolf [m/s]
E	= elasticiteitsmodulus van het materiaal [N/m ²]
d	= dikte van de plaat [m]
ρ	= dichtheid van de plaat [kg/m ³]
f	= frequentie [Hz]

Uit bovenstaande uitdrukking blijkt dat de vrije snelheid behalve van de materiaalconstanten ook afhankelijk is van de frequentie.

Wanneer nu de opgedrukte snelheid c_{mat} ten gevolge van de opvallende akoestische vlakke **lopende** golf gelijk is aan de vrije snelheid c_{mat}^* bij dezelfde frequentie, dan spreekt men van coïncidentie.

Coïncidentie leidt tot een sterke isolatievermindering.

Bij aanstoting van de plaat met de frequentie van het luchtgeluid wil zich immers al een vrije buigingsgolf voortplanten met een snelheid c_{mat}^* .

materiaal	dynamische elasticiteitsmodulus E [N/m ²]	dichtheid ρ [kg/m ³]	$\sqrt{E/\rho}$ [m/s]
metselsteen:			
gevelklinker	$25 \cdot 10^9$	2100	3450
kalkzandsteen	$25 \cdot 10^9$	2000	3536
grindbeton:			
waterdicht, gewapend (K300)	$35 \cdot 10^9$	2400	3819
niet waterdicht, ongewapend (K225)	$20 \cdot 10^9$	2200	3015
gipsplaten	$4 \cdot 10^9$	800	2236
drijfsteen	$5 \cdot 10^9$	1000	2236
lichtbeton (hollith)	$28 \cdot 10^9$	1700	4058
staal	$210 \cdot 10^9$	7800	5189
aluminium	$70 \cdot 10^9$	2800	5000
spiegelglas	$70 \cdot 10^9$	2500	5292
lood	$17 \cdot 10^9$	12200	1180
vurehout	$10 \cdot 10^9$	470	4613
grenehout	$11 \cdot 10^9$	520	4599
rode merantie	$10 \cdot 10^9$	600	4082
spaanplaat	$3 \cdot 10^9$	650	2148
hardboard (half hard)	$3 \cdot 10^9$	650	2148
hardboard(norm.hard)	$4 \cdot 10^9$	1000	2000
triplex			
oregonpine	$12 \cdot 10^9$	580	4549
okumé	$6 \cdot 10^9$	520	3397
kurk	$62 \cdot 10^6$	250	498
lucht	$0,14 \cdot 10^6$	1,2	341

tabel 5.1 Bron (21)

De optredende drukverhogingen en drukverlagingen aan het oppervlak van de plaat, veroorzaakt door het opvallende geluid, zullen deze vrije golf versterken als de opgedrukte snelheid gelijk is aan de vrije snelheid.

De sterk golvende plaat zal aan de doorlaat zijde een sterke golf afstralen en wel in een richting in het verlengde van de invalsrichting.

Uit de gelijkstelling van $c_{\text{mat}}^* = c_{\text{mat}} = \frac{c_{\text{lucht}}}{\sin\theta}$ met de waarde van $c_{\text{lucht}} = 340 \text{ m/s}$, volgt voor de coïncidentiefrequentie:

$$f_c = \left(\frac{c_{\text{lucht}}}{\sin\theta} \right)^2 \cdot \frac{\sqrt{12}}{2\pi d} \cdot \frac{1}{\sqrt{E/\rho}} \approx \frac{64 \cdot 10^3}{(\sin\theta)^2 \cdot d \sqrt{E/\rho}} \quad (5.14)$$

Bij loodrechte inval ($\theta = 0^\circ$) zal f_c oneindig worden, met andere woorden geen coïncidentie optreden.

Neemt de hoek van inval toe, dan zal de coïncidentiefrequentie afnemen met als ondergrens bij scherpende inval ($\theta = 90^\circ$), de zogenaamde grensfrequentie.

De grensfrequentie voor coïncidentie kan in formulevorm geschreven worden als:

$$f_{\text{gr}} = \frac{c_{\text{lucht}}^2 \sqrt{12}}{2\pi d \sqrt{E/\rho}} \approx \frac{64 \cdot 10^3}{d \sqrt{E/\rho}} \quad (5.15)$$

beneden de grensfrequentie kan dus geen coïncidentie optreden.

In tabel 5.1 zijn de waarden van ρ , E en $\sqrt{E/\rho}$ gegeven voor een aantal bouwmaterialen.

Men berekent gemakkelijk dat voor een ca. 100 mm dikke steenachtige constructie de grensfrequentie rond 200 Hz ligt en voor 4 mm dik glas rond 3000 Hz. Dit betekent dat de grensfrequentie en dus ook de (hogere) coïncidentiefrequentie wel degelijk binnen het gehoorbereik liggen.

Zoals eerder gezegd planten vrije buigingsgolven zich gemakkelijk voort, waarbij in het geïdealiseerde model zoals hier beschreven in het geval van coïncidentie een "vrije" buigingsgolf wordt opgewekt van zodanige sterkte dat aan de ontvangzijde evenveel geluidenergie wordt afgestraald als aan de andere zijde invalt en wel in een richting die precies in het verlengde ligt van het invallende geluid. Met andere woorden theoretisch zal de geluidisolatie (en de reflectie!) voor een bepaalde combinatie van frequentie en invalshoek tot nul gereduceerd worden.

Dat dit niet helemaal in overeenstemming is met de praktijk is te wijten aan een aantal veronderstellingen, die bij dit geïdealiseerde model zijn gedaan.

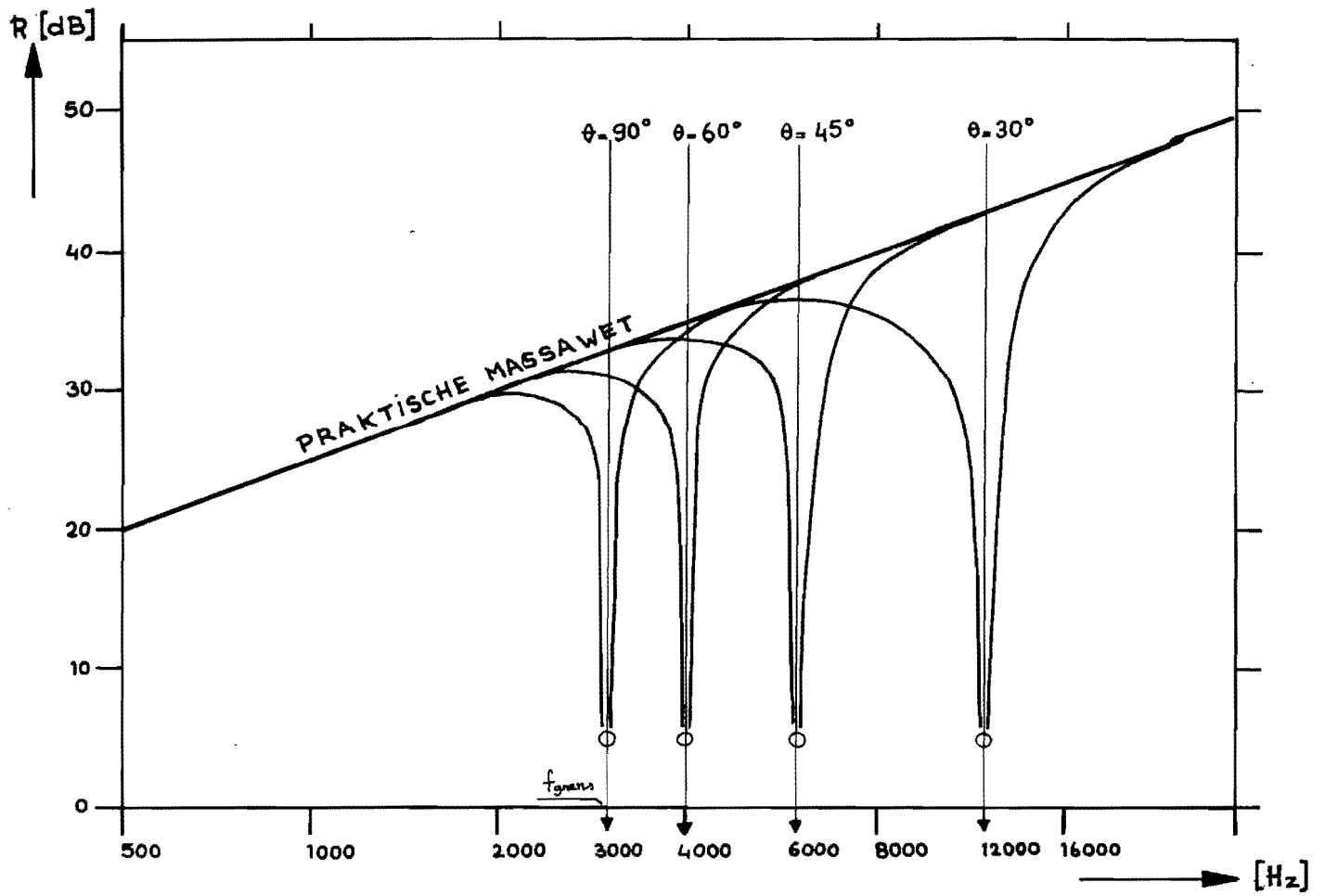
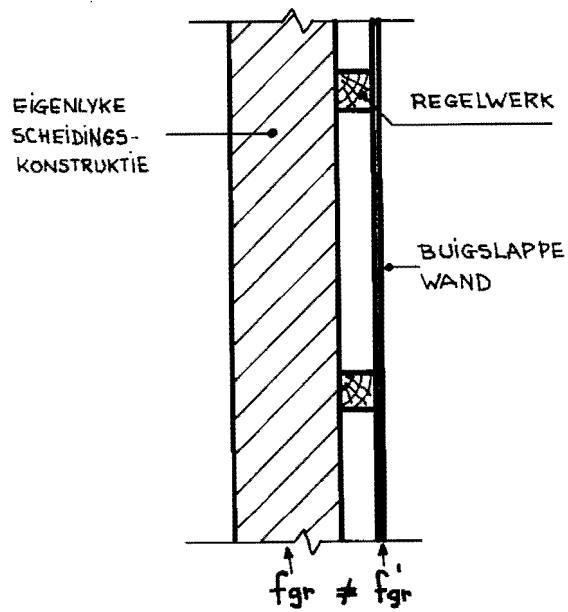


Fig. 5.13 Invloed van het coïncidentie-effect op de geluidisolatie van enkel glas van 4 mm voor verschillende invalshoeken

Figuur 5.14



Zo is te bedenken dat:

- konstrukties niet oneindig uitgestrekt zijn waardoor de invloed van de inklemming aan de randen merkbaar zal zijn.
- zuiver vlakke lopende golven (en daarmee ook de rechte buigingsgolven) in werkelijkheid niet zullen optreden. De invalshoek varieert daardoor enigszins, zodat een deel van het invallende geluid niet coïncideert. Voor dat deel is nog wél geluidisolatie aanwezig. Dit speelt ook een rol bij alzijdige inval.
- Fysische verschijnselen als (vrije) buigingsgolven nooit verliesvrij zijn. Daar dus minder geluidenergie afgestraald zal worden dan er invalt, zal een resterende geluidisolatie gemeten worden.

Ondanks bovengenoemde factoren blijkt de theorie redelijk overeen te komen met de praktijk.

De voorspelde coïncidentiefrequentie valt ongeveer samen met het dal in de gemeten isolatiecurve, zie *fig. 5.13*. Over de waarde van de geluidisolatie bij deze frequentie wordt echter geen voorspelling gedaan. Hooguit kan men stellen dat de geluidisolatie rond de coïncidentiefrequentie al sterk zal dalen.

Het zal verder duidelijk zijn dat de grensfrequentie zo hoog mogelijk gekozen moet worden, en in ieder geval zodanig dat deze niet in het frequentiespectrum van het te weren geluid ligt. Een hoge grensfrequentie verkrijgt men door geringe dikte en kleine elasticiteitsmodulus, met andere woorden een slap materiaal. Dit klinkt enigszins paradoxaal, omdat men eerder zou verwachten dat een slappe constructie juist gemakkelijker het opgedrukte golfpatroon kan volgen en doorgeven.

Onbewust hanteert men dan de begrippen slap en buigzaam als maatstaf voor de frequentie waarmee en mate waarin het materiaal vervormd kan worden.

Bij coïncidentie is echter niet dit aan de orde, maar de snelheid waarmee de vervorming zich kan voortplanten.

Men dient zich trouwens goed te realiseren dat een lichte buigslappe constructie op grond van de massawet slecht isoleert. Zo'n constructie is echter goed bruikbaar als voorzetwand (aangebracht op een regelwerk, *fig. 5.14*).

Indien bij de zware constructie (sec) coïncidentie zou optreden, wordt de isolatie overgenomen door de voorzetwand. Mits natuurlijk de grensfrequenties van beide spouwbladen verschillen. De overdracht ten gevolge van het regelwerk is te verwaarlozen, maar de spouw zelf kan, zoals eerder gezien wel als resonator fungeren.

Opmerkingen

- $\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ is per definitie de voortplantingssnelheid van geluidgolven in een materiaal. (niet van buigingsgolven!). Vandaar dat voor lucht een waarde van $\sqrt{\frac{E}{\rho}} = 340 = c_{\text{lucht}}$ gevonden is.
- De hier gegeven afleiding van coïncidentie zou doen vermoeden dat buigingsgolven transversale golven zijn. Dit is echter onjuist, zoals zou blijken uit de geheel verschillende aard van de differentiaalvergelijkingen voor de buigingsgolf en transversale golf.
- Alzijdig invallend geluid is, wat betreft het isolatieverlies ten gevolge van coïncidentie te vergelijken met de situatie, waarin het geluid onder 45° invalt.
- Een grensfrequentie onder 3000 Hz kan erg hinderlijk zijn, omdat men dan een isolatievermindering krijgt in het frequentiegebied van de menselijke spraak. Dimensioneer een enkelvoudige constructie, indien mogelijk, zodanig dat:
 $f_{\text{gr}} > 3000 \text{ Hz}$
- Voor een constructie die uit meerdere lagen (zonder spouw) bestaat, is enige voorzichtigheid ten aanzien van de formules 5.14 en 5.15 geboden.

Men kan het beste eerst nagaan welke laag het meest bijdraagt aan de geluidisolatie (massawet).

Voor de andere lagen die weinig bijdragen aan de geluidisolatie, zal ook de invloed van de coïncidentie gering zijn. In de formules kan men dan de elasticiteitsmodulus van de best isolerende laag handhaven en de gemiddelde dichtheid ($\bar{\rho}$) over alle lagen en de totale dikte van de constructie gebruiken. Deze berekeningsmethode voldoet in de meeste gevallen (bijvoorbeeld voor gepleisterd metselwerk of plafond) goed.

5.7. Kontaktgeluid

Bij kontaktgeluidisolatie is bepalend hoe de constructie rechtstreeks in trilling gebracht wordt.

In tegenstelling tot luchtgeluidisolatie kan het uitgangspunt nu niet gevormd worden door het verschil in geluiddrukniveau tussen zend en ontvangvertrek.

Om de kontaktgeluidisolatie te beoordelen heeft men daarom ingevoerd (zie ook 20):

het genormeerde kontaktgeluidniveau

$$L_{nT} = L_{co} - 10 \log \frac{T}{T_o} \quad [\text{dB}] \quad (5.16)$$

waarin:

$$\begin{aligned} L_{co} &= \text{het gemeten geluiddrukkniveau in de ontvangruimte} & [\text{dB}] \\ T &= \text{de gemeten nagalmtijd in de ontvangruimte} & [\text{s}] \\ T_o &= \text{de genormeerde nagalmtijd (= 0,5 s)} \end{aligned}$$

Voor het opwekken van L_{co} wordt gebruik gemaakt van een gestandaardiseerde hamermachine. Deze roffelt aan de zendkant op de konstruktie door middel van messing hamertjes, elk van 500 g, die 10 x per seconde de konstruktie aanstoten na een vrije val van 40 mm. Het zal duidelijk zijn dat de hamermachine niet representatief is voor andere kontaktgeluidbronnen zoals lopen, boren enz.. De methode geeft wel de mogelijkheid om de kontaktgeluidisolierende eigenschappen van een konstruktie onderling te vergelijken.

Door echter in de verschillende octaafbanden goede normwaarden te kiezen, die bepalend zijn voor een volgens een bepaald recept te berekenen kontaktgeluidisolatie-index, is toch een redelijke maat verkregen voor de beoordeling van hinder door loopgeluiden.

Ook hierop zal in *paragraaf 5.8.* waarin de nederlandse norm NEN 1070 zal worden behandeld nader worden ingegaan.

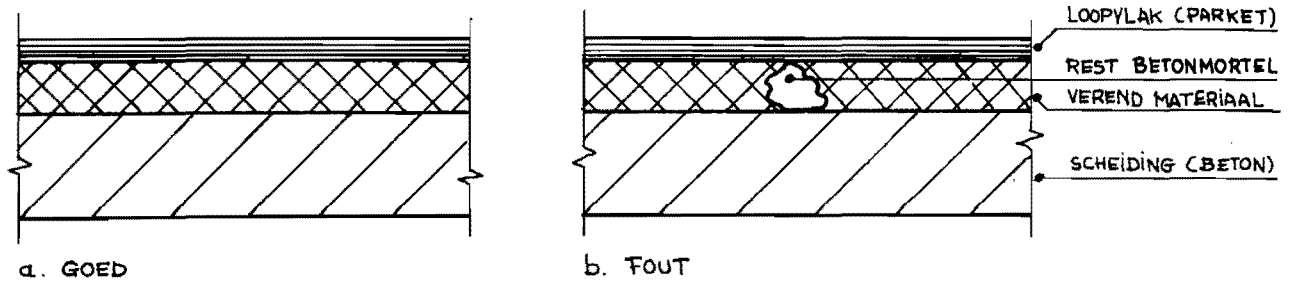
Kontaktgeluid t.g.v. lopen kan goed bestreden worden door een zogenaamde zwevende vloer, waarbij tussen de eigenlijke scheidingskonstruktie en het loopvlak een verende tussenlaag wordt aangebracht. (*fig. 5.15*).

Door onnadenkendheid komt het daarbij nogal eens voor dat resten betonmortel of iets dergelijks achterblijven, en tussen de twee lagen klem komen te zitten. De kontaktgeluidisolatie wordt dan geheel teniet gedaan. Om dezelfde reden kunnen spouwankers moeilijkheden opleveren. Tenslotte mag de zwevende vloer zelf nergens de opgaande wanden raken, aangezien hierdoor flankerend geluid wordt overgedragen.

De zwevende vloer valt of staat dus met de realisatie in de praktijk en vergt grote vakkennis.

Deskundig gelegd is de voorziening echter afdoende voor de bestrijding van kontaktgeluid.

Algemeen kan men stellen dat kontaktgeluid bij de bron bestreden moet worden. Huisbellen en zeker liftmotoren kan men op verende konstrukties plaatsen.



Figuur 5.15

5.8. Geluidnorm NEN 1070 (1976)

Bij de beoordeling van nieuw te bouwen woningen en woningprojecten op akoestische eigenschappen, dient de Norm NEN 1070 (20) als richtlijn te worden gehanteerd. De eisen uit deze norm, zijn grotendeels overgenomen in de Model Bouw Verordening (MBV) en de Voorschriften en Wenken (V & W 1976).

In de NEN 1070 (1976) worden minimum eisen gesteld ten aanzien van:

- a. luchtgeluid
- b. kontaktgeluid
- c. galm, lawaai door slaande deuren en dergelijke
- d. lawaai veroorzaakt door installaties.

Eisen ten aanzien van geluiden afkomstig van buiten het gebouw, zoals verkeerslawaai en industriegeluiden, zijn niet in de norm opgenomen. Hiertoe wordt verwezen naar de Wet Geluidhinder.

De norm NEN 1070 (uitsluitend funktionele eisen) en de hieraan toegevoegde Nederlandse praktijkrichtlijnen NPR 5070 tot en met NPR 5072 (24) kunnen een belangrijke steun zijn bij het oplossen van de ontwerpproblemen.

De in de norm gebruikte begrippen zoals kamer, keuken enz. komen overeen met de terminologie uit de MBV.

5.8.1. Bepaling van de genormeerde luchtgeluidisolatie en het genormeerde kontaktgeluidniveau

De NEN 1070 geeft formules, waarmee de genormeerde luchtgeluidisolatie (D_{nT}) en het genormeerde kontaktgeluidniveau (L_{nT}) in dB tussen twee ruimten, uit gemeten waarden berekend moeten worden (per frequentieband).

Deze formules luiden als volgt:

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \log T/T_0 \quad (5.2b)$$

en

$$L_{nT} = L_{co} - 10 \log T/T_0 \quad (5.16)$$

De gebruikte symbolen zijn bij de genoemde formules (5.2b) en (5.16) reeds omschreven en worden in de figuren 5.16 en 5.17 nogmaals toegelicht.

Zoals reeds eerder is vermeld geeft de berekening van de genormeerde luchtgeluidisolatie D_{nT} volgens formule (5.2b) met behulp van de eenvoudig te bepalen na-

galmtijd in de ontvangruimte, isolatiewaarden, die meer overeenkomen met metingen in de praktijk.

Wordt voor een laboratoriumsituatie, zoals in *figuur 5.16* formule (5.2b) vergeleken met formule (5.2a) dan blijkt dat:

$$R - D_{nT} = 10 \log \frac{0,5S}{A T}$$

met $T = \frac{1}{6} \frac{V}{A}$ wordt $R - D_{nT} = 10 \log \frac{3S}{V}$

Uit *figuur 5.16* volgt $V = Sd$ dus $R - D_{nT} = 10 \log \frac{3}{d}$.

Bij een diepte van het rechthoekige vertrek van 3 meter is $R = D_{nT}$.

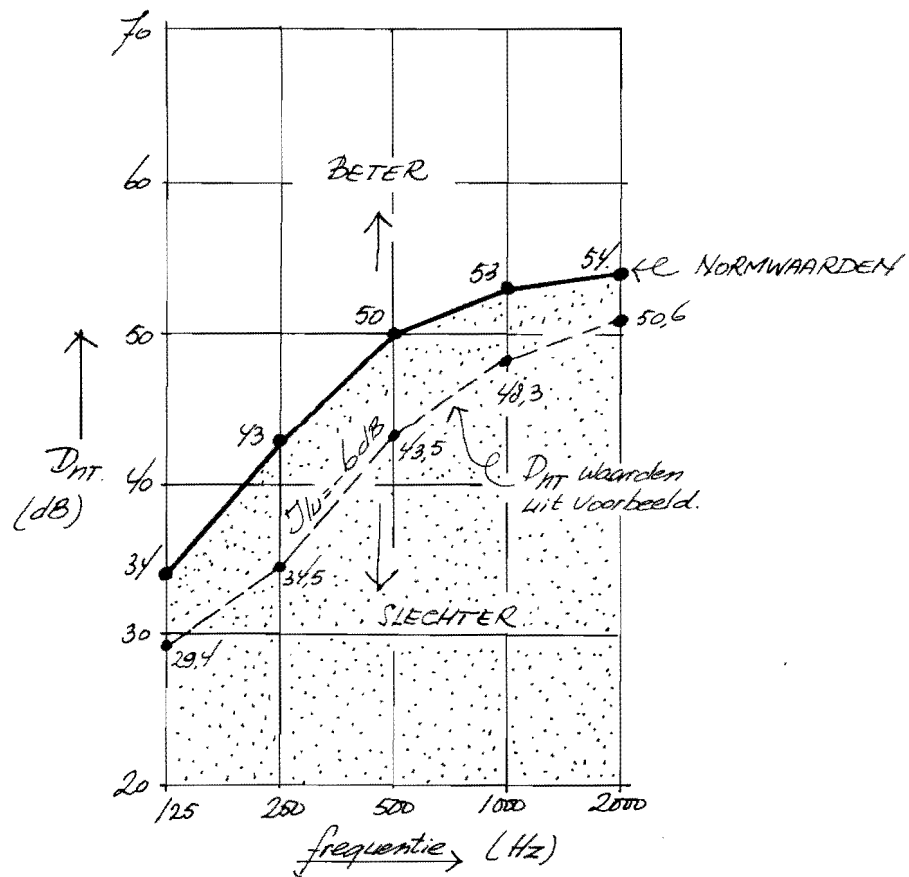
Dit heeft tot gevolg dat bij kamers dieper dan 3 m de genormeerde geluidisoaltie D_{nT} groter wordt als de genormaliseerde geluidisolatie R bij een gelijkblijvende bouwkonstructie. Bij ondiepe kamers ($d < 3$ m) worden de D_{nT} waarden kleiner!

Normwaarden voor lucht- en kontaktgeluid

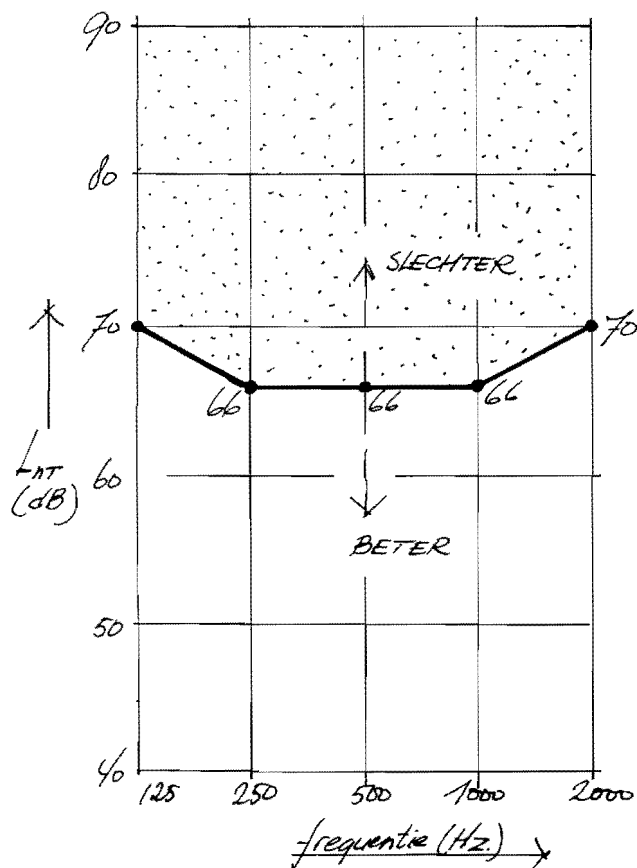
De NEN 1070 geeft normwaarden voor de luchtgeluidisolatie en het kontaktgeluid-niveau (zie *figuur 5.18* en *5.19*). Door de waarden D_{nT} en L_{nT} te vergelijken met de normwaarden uit deze figuren worden per frequentie zowel positieve als negatieve isolatieverschillen verkregen. De isolatie-index voor luchtgeluid c.q. voor kontaktgeluid (te weten I_{lu} en I_{co}) wordt nu gedefinieerd als het kleinste der volgende drie getallen:

- het gemiddelde van de vijf isolatie-/niveauverschillen, afgerond op het dichtstbijzijnde gehele getal
- het gemiddelde van de (algebraïsche) kleinste twee isolatie-/niveauverschillen, vermeerderd met 2, afgerond op het dichtstbijzijnde getal.
- het (algebraïsche) kleinste isolatie-/niveauverschil vermeerderd met 4, afgerond op het dichtstbijzijnde getal.

Wanneer het niet afgeronde getal op een halve eenheid eindigt, dient dit te worden afgerond op het dichtstbijzijnde even getal.



Figuur 5.18. NORMWAARDEN VOOR LICHTGEWUIDISOLATIE



Figuur 5.19. NORMWAARDEN VOOR KONTAKTGEWUIDNIVO.

Voorbeeld 5.3.

Voorbeeld van de uitwerking van een luchtgeluidisolatiemeting:

omschrijving	eenheid	middenfrequenties in Hz				
		125	250	500	1000	2000
1. L_1	dB	98,2	99,0	100,2	99,5	99,2
2. L_2	dB	72,6	68,6	60,1	53,8	50,1
3. T	s	1,2	1,3	1,1	0,9	0,7
4. $10 \log T/0,5$	dB	+ 3,8	+ 4,1	+ 3,4	+ 2,6	+ 1,5
5. $D_{nT} (1 - 2 + 4)$	dB	29,4	34,5	43,5	48,3	50,6
6. Normw. <i>fig. 5.18</i>	dB	34	43	50	53	54
7. isol. verschil (5 - 6)	dB	- 4,6	- 8,5	- 6,5	- 4,7	- 3,4

Uit rij 7 worden volgens a, b en c de volgende uitkomsten gevonden:

$$a. = 1/5 (- 4,6 - 8,5 - 6,5 - 4,7 - 3,4) = - 5,54 \text{ afgerond } - 6$$

$$b. = 1/2 (- 8,5 - 6,5) + 2 = - 5,50 \text{ afgerond } - 6 (!)$$

$$c. = - 8,5 + 4 = - 4,50 \text{ afgerond } - 4 (!)$$

De isolatie-index I_{lu} is de (algebraïsch) kleinste van de drie uitkomsten, dus

$$I_{lu} = - 6 \text{ dB (zie figuur 5.18).}$$

Eisen inzake de isolatie-index voor lucht- en contactgeluid

De in de *tabellen 5.2. en 5.3.* gegeven waarden, zijn de minimale eisen van de isolatie-index voor lucht- en contactgeluid. Deze eisen zijn noodzakelijk voor de volksgezondheid.

Een duidelijke verbetering van de luchtgeluidisolatie en het contactgeluidniveau wordt verkregen door voor iedere frequentie 5 dB extra te eisen boven de in deze norm gestelde waarden.

Als toelichting op de *tabellen 5.2. en 5.3.* is in *figuur 5.20* een woningplattegrond getekend met de vereiste I_{lu} -waarden.

Minimale isolatie-index voor luchtgeluid in dB

beschermden ruimten	geluid afkomstig uit		
	besloten ruimten van andere woningen	besloten ruimten met inbegrip van gemeenschappelijke trappehuizen, gangen, e.d., die geen deel vormen van een woning	kamers in dezelfde woning
kamers	0	0 ¹⁾	-15 ³⁾
keukens	0	0 ²⁾	-
andere besloten ruimten binnen een woning	-5	-	-

- 1) geen eis indien geluid afkomstig is van besloten galerij
- 2) geen eis indien geluid afkomstig is van gemeenschappelijke gang of besloten galerij
- 3) geen eis indien de ene kamer in open verbinding staat met of door een wand met een deur is gescheiden van de andere kamer en bovendien beide kamers op dezelfde bouwlaag zijn gelegen.

Tabel 5.2.

Minimale isolatie-index voor contactgeluid in dB¹⁾

beschermden ruimten	geluid afkomstig uit		
	ruimten van andere woningen	niet tot een woning behorende ruimten	ruimten binnen dezelfde woning
kamers	0	0	-15 ²⁾
keukens	0	-	-

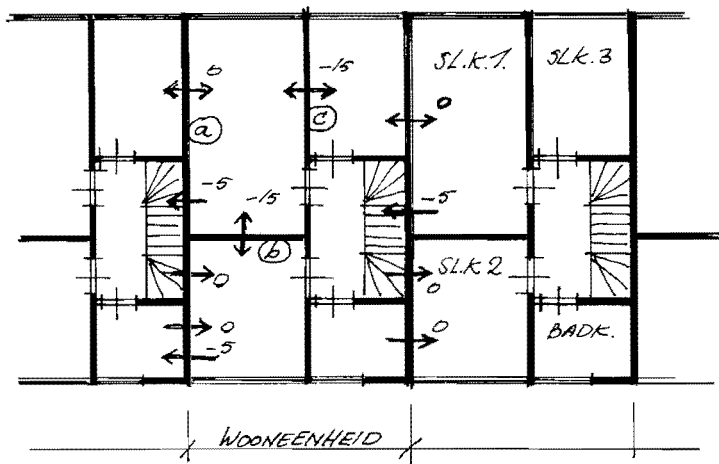
- 1) de isolatie-index voor contactgeluid heeft betrekking op de bescherming van een ruimte tegen contactgeluiden, die op een vloer, trap of ander voor belopen bestemd oppervlak kunnen ontstaan. Dit oppervlak behoeft niet boven de te beschermen ruimte te liggen.
- 2) geen eis indien de ruimte in open verbinding staat met of door een deur is gescheiden van de te beschermen kamer die op dezelfde bouwlaag is gelegen.

Tabel 5.3.

Eisen uit de Model Bouw Verordening en de Voorschriften & Wenken

Ten aanzien van de wanden binnen de woning (kamerscheidende wanden) zijn de MBV en de V & W milder. Hierdoor wordt de toeleveringsindustrie gelegenheid gegeven zich aan de nieuwe situatie aan te passen.

In plaats van $I_{lu} = -15$ dB voor luchtgeluidisolatie eist de MBV een waarde van -20 dB tussen kamers binnen een woning. De V & W eist één stille kamer die aan de in NEN 1070 genoemde geluidweringseis van $I_{lu} = -15$ dB voldoet (zie figuur 5.20). Voor de overige kamers in dezelfde woning wordt ook hier een isolatie-index van -20 dB geëist.



EISEN NEN 1070 : wand (a) $I_{Lu} = 0$ dB.
 (b) $I_{Lu} = -15$ dB.
 (c) $I_{Lu} = -15$ dB.

EIS V&W : één stille kamer bijv. slaapkamer 3, gevolg

(a) $I_{Lu} = 0$ dB.
 (b) $I_{Lu} = -20$ dB.
 (c) $I_{Lu} = -15$ dB.

Figuur 5.20

5.8.2. Galm in trappehuizen en installatielawaai

Om de galm in trappehuizen van flatgebouwen te beperken, dient de totale geluid-absorptie (m^2 o.r.) in gemeenschappelijke besloten trappehuizen, hallen, gangen en dergelijke bij demiddenfrequentie 250 tot en met 2000 Hz tenminste gelijk te zijn aan $1/8$ van de inhoud van de ruimte (m^3). In formule:

$$A_{\text{totaal}} \geq 1/8 V \quad (5.17)$$

$$\text{met } T = 1/6 V/A_{\text{totaal}} \text{ wordt } T \leq 1,33 \text{ s} \quad (5.18)$$

De eis komt dus neer op : $T \leq 1,33$ s voor 250 tot en met 2000 Hz.

Hiertoe kunnen alle plafonds en onderzijden van de bordessen van absorptiematerialen worden voorzien. Om het lawaai bij het dichtslaan van deuren in trappehuizen doeltreffend te beperken, dienen deze van deurdrangers en rubber aanslagdoppen te worden voorzien. Hinderlijk geluid door trilling van metalen trapleuningen kan voorkomen wordendoor deze uit korte, niet met elkaar verbonden delen, samen te stellen.

Installaties voor de aan- en afvoer van water, alsmede overige installaties, mogen geen hoger geluidniveau veroorzaken dan de onderstaande waarden in dB(A):

a. In kamers.

Installaties voor aan-/afvoer van water in dezelfde woning	: 40 dB(A)*
Installaties voor aan-/afvoer van water <u>niet</u> in dezelfde woning	: 35 dB(A)
Overige installaties al of niet in dezelfde woning	: 30 dB(A)

b. In overige ruimten behoudens bergruimten.

Installaties voor aan-/afvoer van water in dezelfde woning	: geen eisen
Installaties voor aan-/afvoer van water <u>niet</u> in dezelfde woning	: 40 dB(A)
Overige installaties	: 40 dB(A)*

c. In bergruimten. : geen eisen

* Deze eis geldt niet voor de kamer, waarin het geluidproducerende toestel is geplaatst.

De eisen gelden voor:

- ongemeubileerde en ongestoffeerde kamers
- overige tot woningen behorende ruimten

Het toelaatbaar geluidniveau wordt uitgedrukt in dB(A), dat wil zeggen één enkele getalwaarde, waarbij zoveel mogelijk rekening is gehouden met de gevoeligheid van het menselijk oor bij verschillende frequenties.

Het totaalniveau in dB(A) kan direkt worden gemeten.

Het contactgeluid veroorzaakt door de installatie zal op de bouwkundige constructies, geluid afstralen. Het ontstaan van dit contactgeluid wordt onder andere veroorzaakt door wervelingen bij oneffenheden aan de binnenzijde van de waterleiding of bij scherpe bochten daarvan en het vormen van kleine dampbelletjes bij zeer snelle vloeistofstroom, die later in elkaar ploffen.

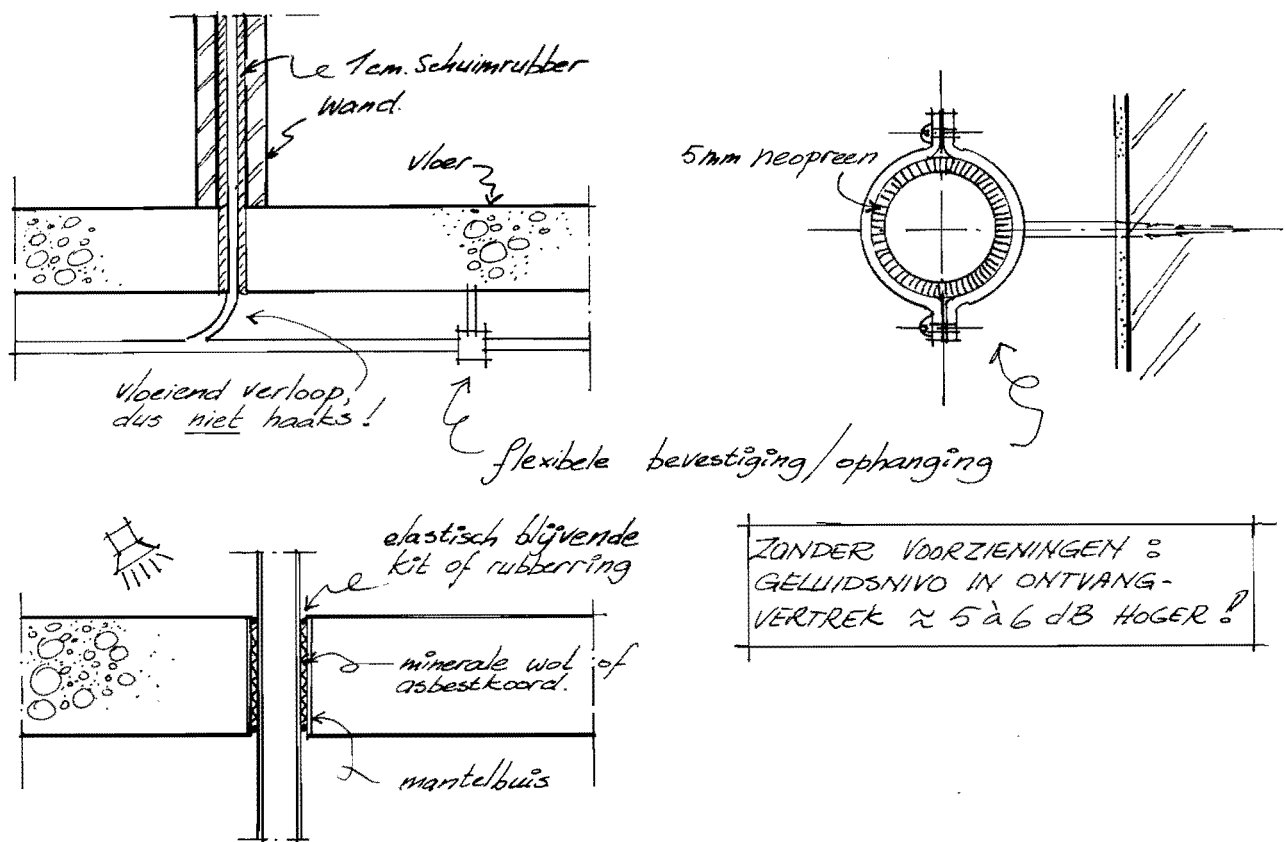
Om de geluidoverlast te beperken, zal op het volgende gelet dienen te worden:

- de leidingen dienen een vloeiend verloop te hebben;
- in de leiding mogen geen soldeerdruppels voorkomen;
- in de leidingen dient de maximale overdruk 2 à 3 atmosfeer te bedragen (druk laag, snelheid water laag);
- er dienen geluidarme appendages (géén drukspoelers!) toegepast te worden;
- de leidingen niet dunner dan 10 mm doorsnede uitvoeren.

En bouwkundig:

- sanitaire leidingen mogen niet zonder meer worden ingestort;
- de leidingen dienen niet direkt op de muur te worden bevestigd;
- de geluidbronnen (w.c./badkamer, enz.) dienen doeltreffend ten opzichte van de gevoelige ruimten geplaatst te worden.

In afwachting van de NPR 1073, zijn in *figuur 5.21* enige bouwkundige maatregelen gegeven om geluidoverlast veroorzaakt door installaties, te voorkomen.

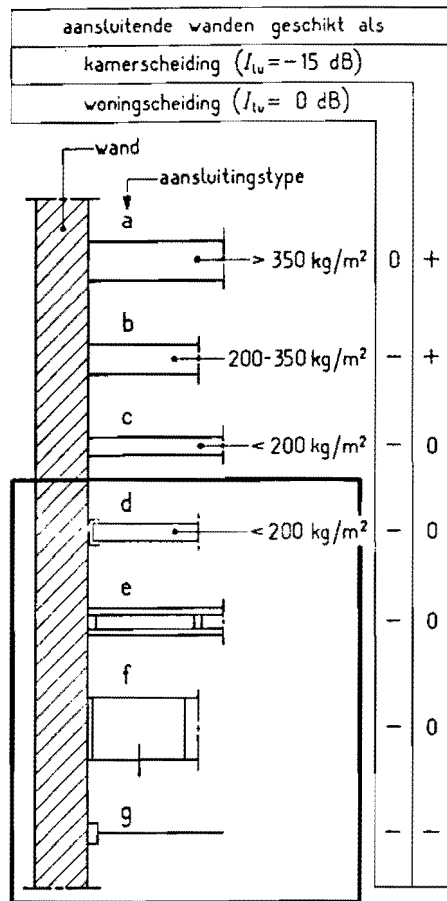


KONTAKT/LUCHTGELUIDISOLERENDE LEIDINGSDOORVOER.

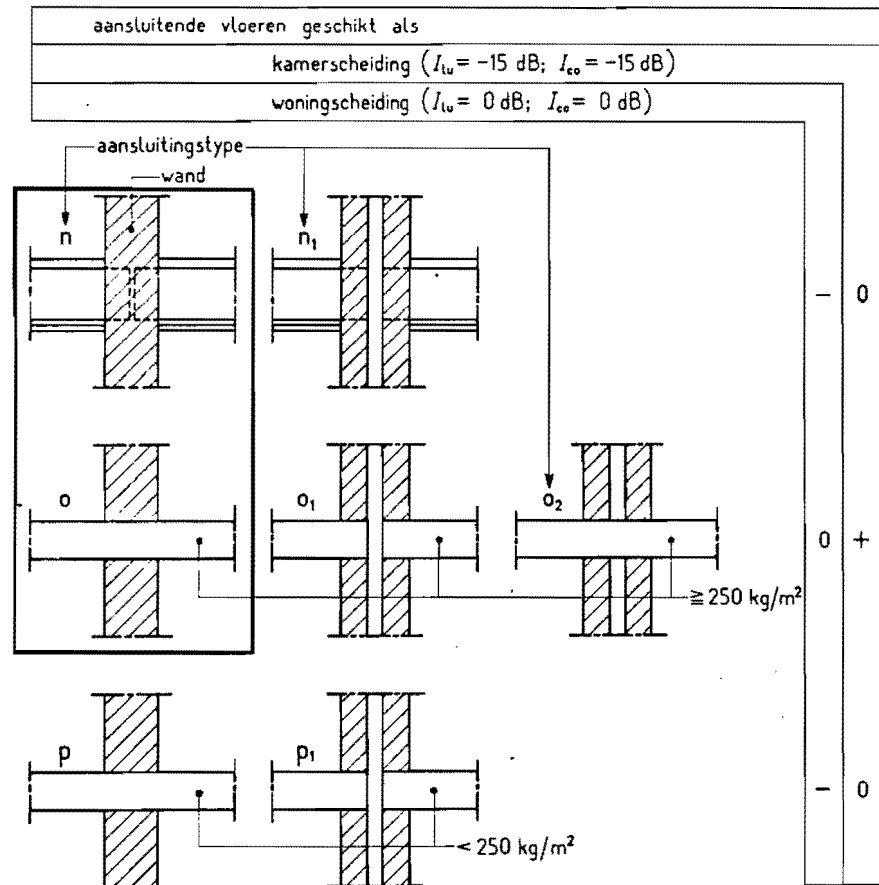
Figuur 5.21.

Aansluitende wanden

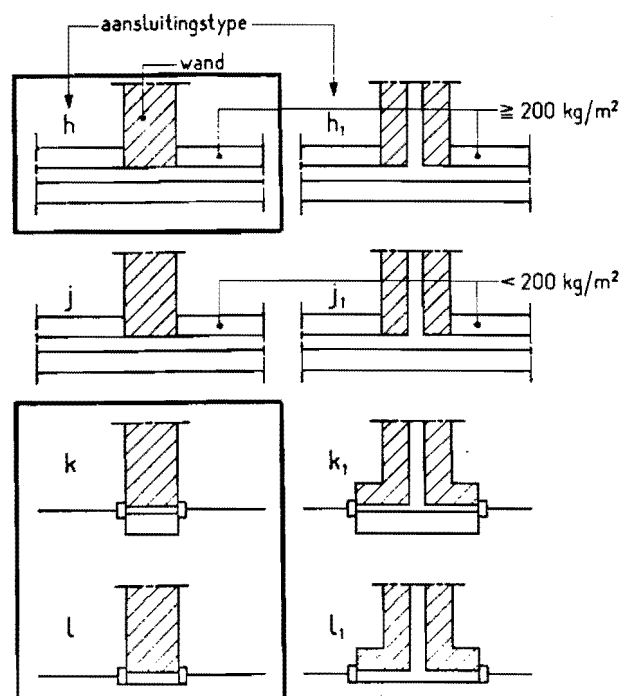
(Horizontale doorsneden)

**Aansluitende vloeren**

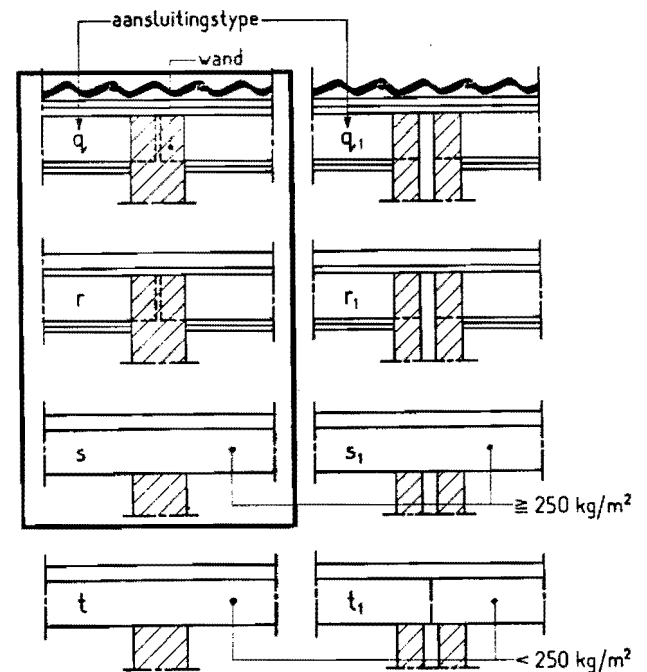
(Verticale doorsneden)

**Aansluitende gevels**

(Horizontale doorsneden)

**Aansluitende daken**

(Verticale doorsneden)



Figuur 6 – Enkelvoudige woningscheidende wand (gearceerd) van beton of steen met een massa per oppervlakte van 400 tot 450 kg/m² met toepasbare aansluitende constructies (omkaderd)

5.8.3. De praktijkrichtlijnen NPR 5073 (24)

Van een aantal gangbare konstrukties worden in deze praktijkrichtlijnen voorbeelden gegeven, waarvan mag worden verwacht dat deze, bij een korrekte uitvoering tot isolatie-indices zullen leiden, die voldoen aan de in de norm gestelde eisen. In de richtlijnen zijn aanwijzingen gegeven ten aanzien van de scheidingskonstruktie, de aansluitende konstruktie en hun onderlinge verbinding.

Omdat de flankerende transmissie mede bepalend is voor de geluidisolatie tussen twee ruimten, worden de scheidingskonstrukties in de NPR 5070 steeds in samenhang met een aansluitend bouwelement gezien.

Met behulp van een omkaderd vak wordt in een steeds terugkerend schema (*zie bijvoorbeeld figuur 5.22*, die gelijk is aan blz. 11 uit (24)) aangegeven welke aansluitende bouwelementen gekombineerd kunnen worden om aan NEN 1070 te voldoen.

Verder worden van deze aansluitingen voorbeelden op grote schaal gegeven (*zie bijvoorbeeld figuur 5.23*, die gelijk is aan blz. 23 uit (24)).

Bij het toepassen van deze praktijkrichtlijnen dient wel in ogenschouw te worden genomen, dat wanneer het aansluitende bouwelement veel lichter is dan de scheidingskonstruktie meer dan normale flankerende transmissie zal optreden (globaal als M aansluitend bouwelement $< 1/2 M$ scheidingskonstruktie).

De in *figuur 5.24* als voorbeeld gegeven woningscheidende wandkonstruktie voldoet aan NEN 1070, omdat de direkte geluidoverdracht via de scheidingskonstruktie gering is (= zwaar), waardoor de meer dan normaal optredende flankerende geluidtransmissie toelaatbaar is.

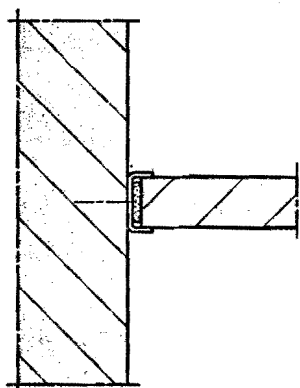
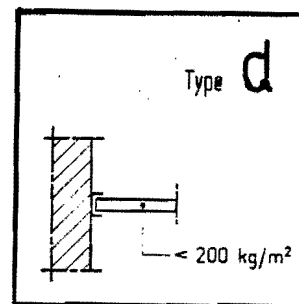
De totale geluidisolatie tussen de twee vertrekken wordt globaal 1 tot 2 dB beter als de aansluitende wandkonstruktie ontkoppeld wordt.

Voorbeeld 5.4.

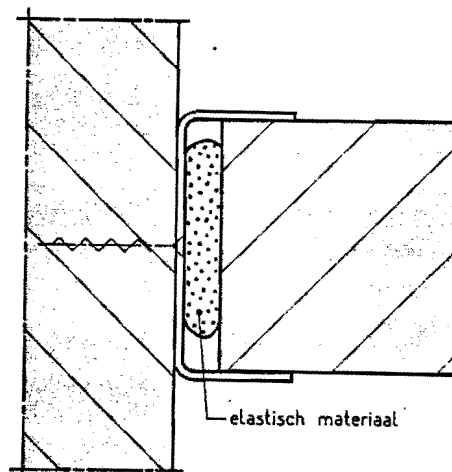
Toetsing van een eengezinswoning met behulp van de praktijkrichtlijn

Aan de hand van het in *figuur 5.25* gegeven voorbeeld van een woningplattegrond zal worden aangegeven in hoeverre:

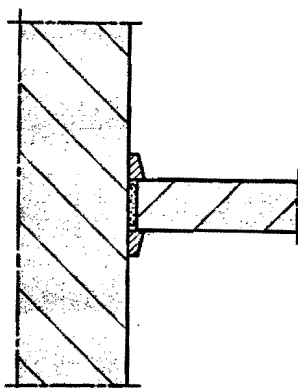
- a. De hierin voorkomende woningscheidende wanden en vloeren, inclusief de hierop aansluitende wanden, vloeren en gevels, overeenkomen met de konstruktiedelen, genoemd in de voorbeelden van de praktijkrichtlijnen, zodat naar verwachting aan de hieraan gestelde eisen in NEN 1070 wordt voldaan.
- b. De hierin voorkomende binnenwanden en vloeren zullen voldoen aan de in NEN 1070



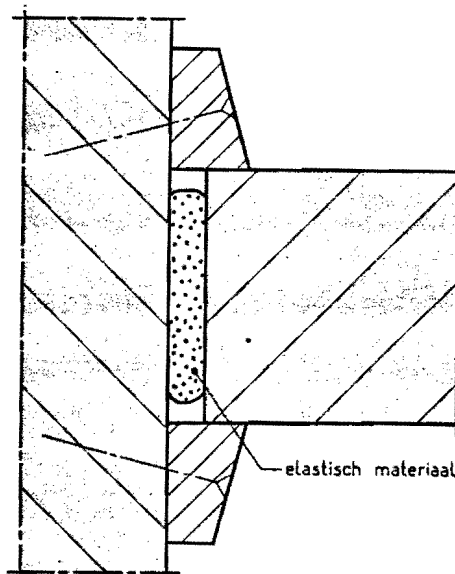
Figuur 33



Figuur 33a



Figuur 34



Figuur 34a

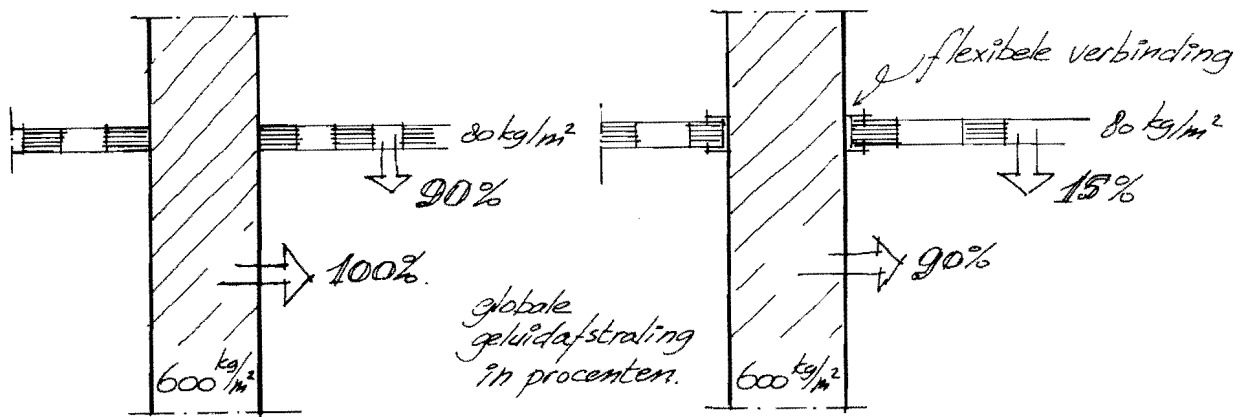
Figuren 33, 33a, 34 en 34a – Voorbeelden van aansluitingen van een ontkoppelde wand van steenachtig materiaal met een massa per oppervlakte kleiner dan 200 kg/m^2 aan een woningscheidende wand

Materialen aansluitende wand: gasbeton, lichtbeton, cellenbeton, gipselementen of dergelijke.

Onderlinge verbinding: ontkoppeld.

Indien de aansluitende wand fungeert als kamerscheiding binnen een woning, zie 8.1.

Figuur 5.23. Ontleend aan (24).

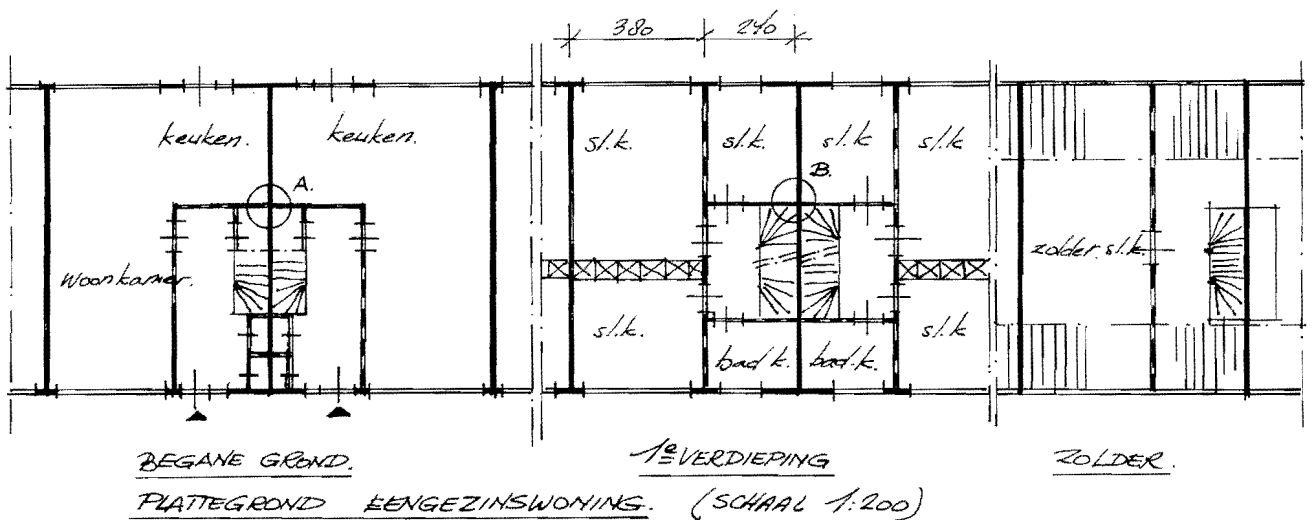


GEKOPPELD: $T_{Lw} \approx +5 \text{ dB}$

ONTKOPPELD: $T_{Lw} \approx +7 \text{ dB}$

Vertrekdiepte 5 m (Bij 3 m diepte is $T_{Lw} \approx 2 \text{ dB}$ lager !)

Figuur 5.24. INDIKATIE V/D GEVOLGEN VAN ONTKOPPELING
OP DE GELUIDAFSTRALING CQ. T_{Lw} -WAARDEN.



BEGANE GROND

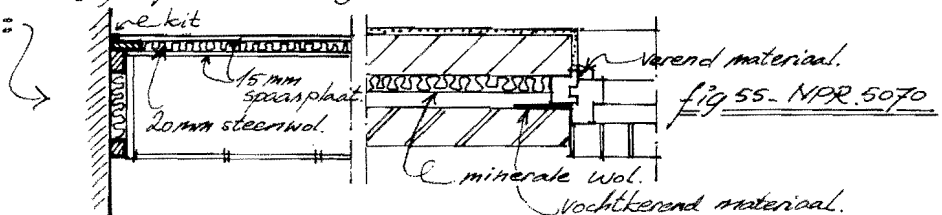
1e VERDIEPING

ZOLDER

PLATEGROND EENGEZINSWONING. (SCHAAL 1:200)

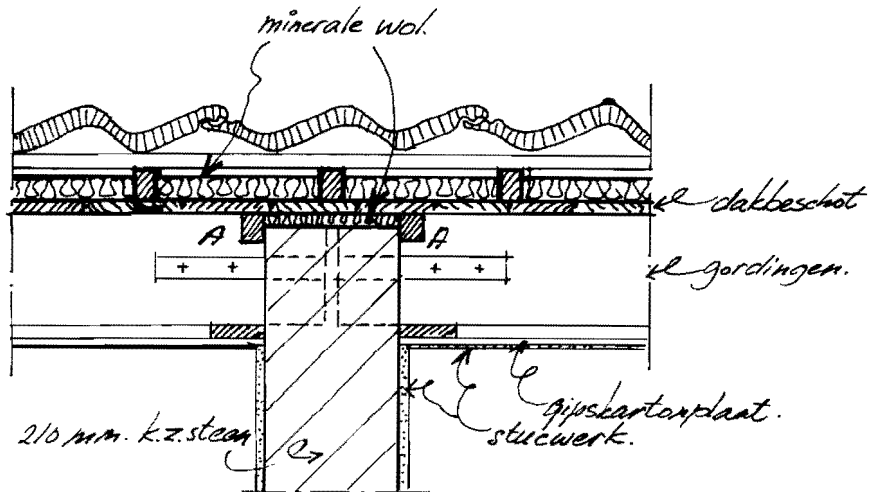
OMSCHRIJVING V/D KONSTRUKTIEDELEN V/D WONING:

- * Woningsscheidende wand: k.z.steen, 210 mm dik, met stuklaag $2 \times 10 \text{ mm}$
massa: $0,210 \times 1900 + 2 \times 15 \approx 430 \text{ kg/m}^2$
- * Begane grondvloer: systeemvloer: 200 kg/m^2
- * Verdiepingsvloer: geprefabriceerd grindbeton, 160 mm dik $= 2400 \times 0,16 = 385 \text{ kg/m}^2$
- * Kastenwand:



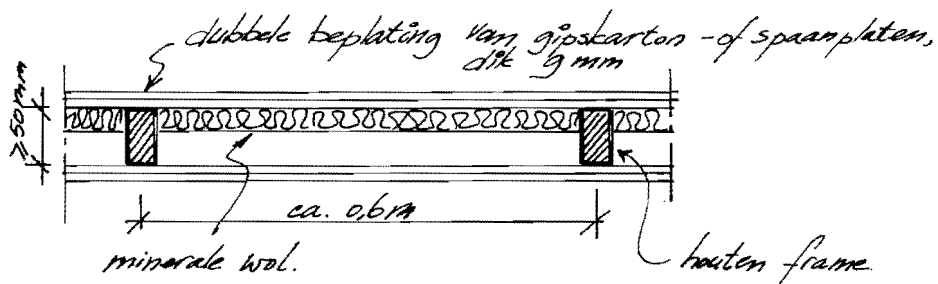
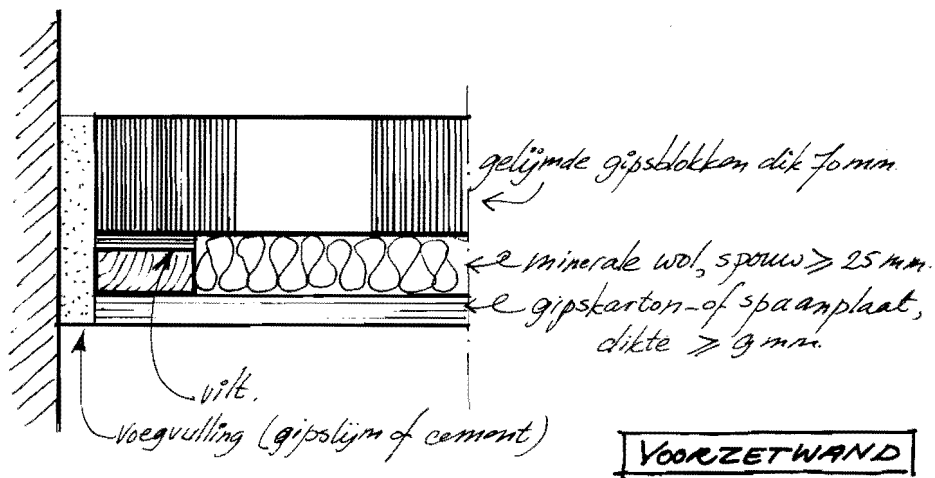
- * Binnenwanden: gelijmde gipsblokken 70 mm dik $\rightarrow 65 \text{ kg/m}^2$
- * Gevels: spouwmuur, binnen k.z.steen, buiten hardgraauw
kozijnansluiting volgens fig 55. NPR 5070 (zie hierboven)
- * dak: traditioneel pannendak met dakbeschot.

Figuur 5.25.



Deze constructie vereist bijzondere zorg om te voorkomen, dat na verloop van tijd geluidlekken ontstaan t.g.v. krimp $\frac{1}{4}$ hout (bijv. aftimmerlat A)

Figuur 5.26



Figuur 5.27 Ontleend aan (24)

gestelde eisen voor de wering van het geluid, afkomstig uit kamers in dezelfde woning.

Woningscheidende konstrukties

Beoordeling

Allereerst worden de woningscheidende konstrukties beoordeeld om vervolgens de toepasbare aansluitende konstrukties (binnenwanden, en dergelijke) te kunnen bepalen. In het voorbeeld zijn géén woningscheidende vloeren aanwezig.

Woningscheidende wand

In NEN 1070 geldt ter bescherming van de kamers en keukens de eis $I_{1u} \geq 0$ dB en voor de andere besloten ruimten de eis $I_{1u} \geq -5$ dB. De massa is 430 kg/m^2 (zie *figuur 5.25*) en behoort dus tot de in *figuur 5.22* genoemde woningscheidende wand. De toepasbare aansluitende konstrukties op deze woningscheidende wand zijn in *figuur 5.22* omkaderd.

Konklusies

De in *figuur 5.25* omschreven woningscheidende wand is toelaatbaar, mits:

- bij detail A en B de binnenwanden volgens *figuur 5.23* ontkoppeld worden;
- de dakkonstruktie van een gesloten plafond voorzien wordt (*figuur 5.26*).

Kamerscheidende vloeren binnen de woning

De massa van de enkelvoudige verdiepingsvloer bedraagt 385 kg/m^2 hetgeen meer is dan de geëiste 200 kg/m^2 (zie NPR 5070, blz. 66) en is derhalve geschikt als kamerscheiding).

Binnenwanden

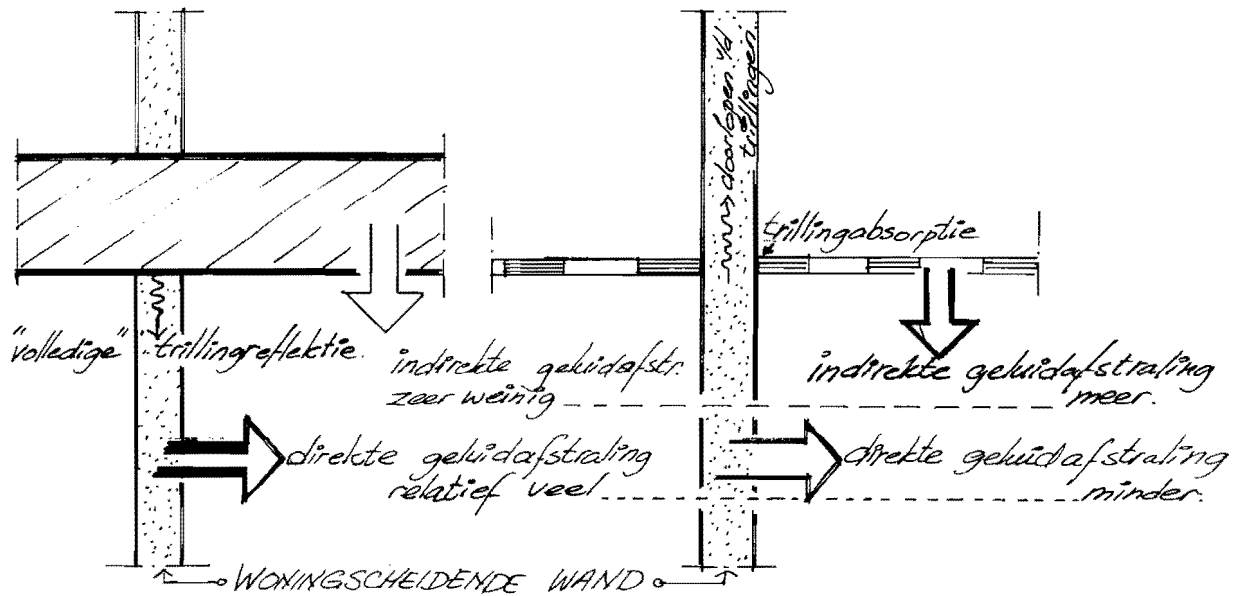
Bezien moet worden of de 70 mm gipswanden voldoen aan de in NEN 1070 gestelde eisen van luchtgeluidisolatie binnen de woning van - 15 dB.

Volgens de NPR moet een enkelvoudige wand van steen een massa per oppervlakte van tenminste 150 kg/m^2 hebben. Een kastenwand uitgevoerd als in *figuur 5.25* voldoet.

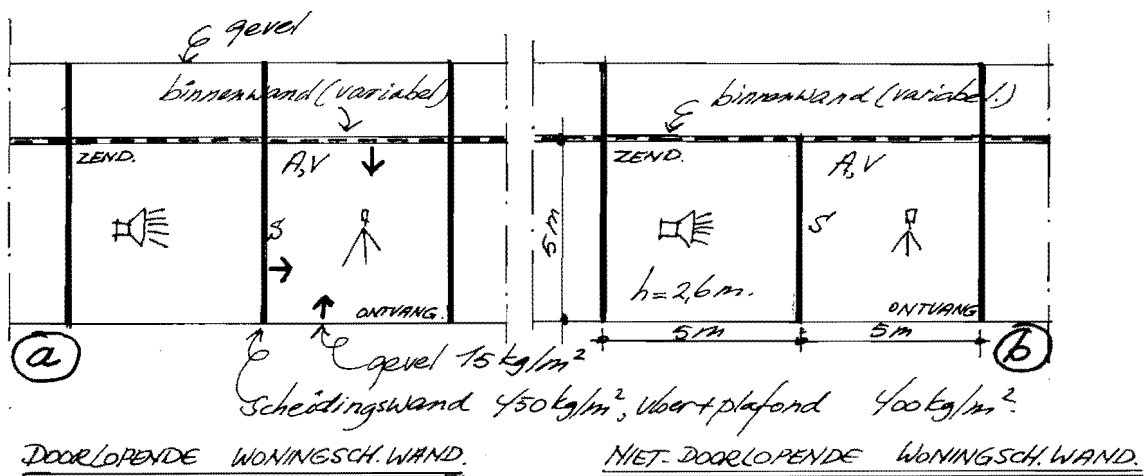
Aangezien de massa per oppervlakte van de wanden van gipselementen minder bedraagt dan 150 kg/m^2 zijn deze niet zonder meer geschikt als kamerscheiding tussen de slaapkamers, aan de achterzijde op de 1e verdieping.

Voor deze kamerscheiding dient een ander wandtype te worden gekozen. Mogelijke oplossingen zijn:

- een zwaardere wand (bijvoorbeeld 10,5 cm dikte, kalkzandsteen muur);



Figuur 5.28



(a)

gewicht ↓ binnenwand	geluidoverdrachtgetal ↓ d.					d. tot.	J _{lu} = -10 log d _e + 23.
	sch. wand.	binn. wand.	vloer	plafond	gevel.		
80 kg/m²	79	46	12	12	11	160	+1 dB.
150 "	91	38	13	13	12	167	+0,8 dB.
300 "	100	10	14	14	13	151	+1,2 dB.
80+flex.aansl.	≈ 60	≈ 10	≈ 12	≈ 12	≈ 11	105	+2,8 dB.

DOORLOPENDE
SCHEIDINGSWAND.

(b)

gew. bi. wand	sch. wand.	binn. wand.	vloer	plafond.	gevel	d. tot.	J _{lu} .
80 kg/m²	100	120	13	13	12	270	-1,3 dB.
150 "	100	79	13,5	13,5	12,5	218	-0,4 dB.
300 "	100	21	14	14	13	162	+0,9 dB.

NIET-DOORLOPENDE
SCHEIDINGSWAND.

Bij een ontvangvertrek van 3 meter diepte, de J_{lu}-waarden met ongeveer 2 dB. verminderen!

Tabel 5.4.

- het aanbrengen van een voorzetwand (*figuur 5.27*) volgens NPR 5070, 8.12;
- een samengestelde konstruktie volgens NPR 5070, 8.3 (*figuur 5.27*).

5.8.4. Voorspellen van geluidisolatie

Ondanks de vele voorbeelden van toe te passen wandkonstrukties in de NPR 5070 blijven verschillende vragen onbeantwoord, zoals:

- a. Welke binnenwanden voldoen aan de eis uit de MBV en de V & W ($I_{1u} \geq -20$ dB)?
- b. Voldoet een bepaalde konstruktie, die afwijkt van de NPR 5070 aan de norm NEN 1070?
- c. Geven de isolatiemetingen in het laboratorium uitgevoerd een goede maat voor de geluidisolatie in de praktijk?
- d. Hoe moeten "betere" konstrukties ($I_{1u} \geq -10$ dB) uitgevoerd worden?

Op deze of soortgelijke vragen wordt ingegaan in diverse publicaties (25), (26). In het kader van dit collegedictaat worden hier alleen enkele richtlijnen gegeven.

Vele factoren beïnvloeden de "geluidisolatie" van een wand. De in trilling gebrachte wandkonstruktie straalt aan de ontvangzijde geluid af. De geluidafstraling kan direkt of indirekt via het in trilling gebrachte aangrenzende wandgedeelte plaatsvinden.

Tezamen bepalen ze "de geluidisolatie" van de wand. De direkte geluidafstraling wordt vooral bepaald door de massa en de randinklemming van de wand. De mate waarin trillingen in een wand door de aangrenzende konstrukties worden geabsorbeerd, hangt sterk af van de eigen massa in vergelijking met de massa van de aangrenzende wand. De direkte geluidafstraling zal daarom van geval tot geval verschillen. Bij zware aangrenzende wanden zal veel geluid bij de randen gereflekteerd worden, waardoor de direkte geluidafstraling groter zal worden. De aangrenzende wand zal zelf weinig in trilling worden gebracht, de indirekte geluidafstraling zal dan klein zijn.

Bij een volledige trillingreflektie aan de randen zal de direkte geluidafstraling groter zijn dan bij een volledige trillingabsorptie. De indirekte geluidafstraling kan bij een grote trillingabsorptie meer dan "normaal" worden (*zie figuur 5.28*).

Scheidingswanden

In de *tabellen 5.4a en 5.4b* zijn de hiervoor genoemde invloeden op de I_{1u} van een scheidingswand kwantitatief weergegeven voor twee aan elkaar grenzende

vertrekken met variabele binnenwanden. Ook is in *tabel 5.4a* een schatting opgenomen van de geluidoverdracht van de binnenwand en scheidingswand bij ontkoppeling van de binnenwand volgens *figuur 5.23*. De I_{lu} waarde blijkt hierbij met 1,8 dB toe te nemen. De overdracht van geluid via de scheidingskonstructie blijkt desondanks belangrijker dan de overdracht via de flankerende wegen. De beste geluidisolatie kan men dan ook bereiken als de geluidoverdracht via de scheidingskonstructie wordt beperkt, door:

- zwaardere scheidingskonstructie
- spouwmuur
- buigslappe voorzetwand (verbetering tot maximaal ± 10 dB mogelijk).

In (26) zijn nomogrammen opgenomen om aan de hand van bestek en tekeningen een indicatie te krijgen van de isolatie-index. Voor de geïntereseerden is in *appendix 5c* een afdruk van dit nomogram met voorbeeld uit *tabel 5.4a* opgenomen.

Lichte enkelvoudige binnenwanden

Voor lichte enkelvoudige binnenwanden blijkt in veel gevallen de direkte geluidafstraling door de verschillende randcondities slechts ± 1 dB van de laboratoriummetingen te verschillen.

Door flankerende geluidoverdracht (indirekte geluidafstraling) wordt de isolatie-index met ± 1 dB verminderd. Hierdoor is voor lichte enkelvoudige binnenwanden veelal een redelijke schatting te maken van de I_{lu} waarden, volgend uit laboratoriummetingen volgens *figuur 5.29*.

$$I_{lu} = I_{lu,lab} - A - B - C \quad (5.19)$$

A = isolatieverlies tengevolge van de randaansluiting ± 1 dB

B = isolatieverlies tengevolge van flankerende overdracht ± 1 dB

C = invloed kamerdiepte volgens $10 \log 3 S/V$.

$I_{lu,lab}$ benaderd uit *figuur 5.29* geeft voor massa's van 60 tot 160 kg/m²:

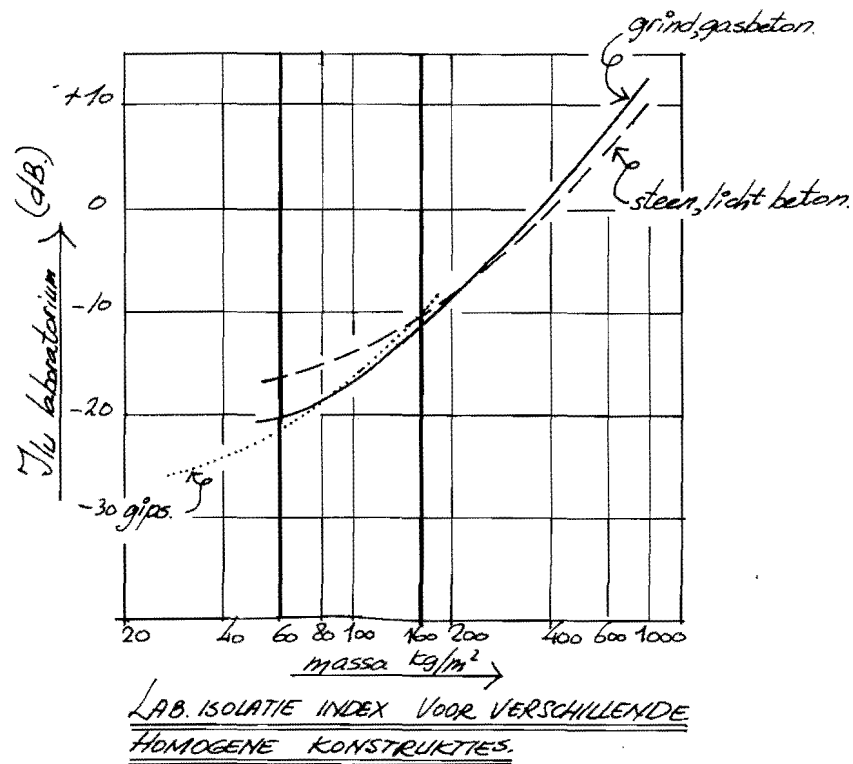
$$I_{lu,lab} = 25,4 \log m - 67 \text{ voor gips- en gasbeton} \quad (5.20)$$

$$I_{lu,lab} = 12,7 \log m - 39 \text{ voor steen en lichtbeton} \quad (5.21)$$

Met deze waarden wordt (5.19):

$$I_{lu} = 25,4 \log m - 69 + 10 \log V/3S \text{ voor gips- en gasbeton} \quad (5.22)$$

$$I_{lu} = 12,7 \log m - 41 + 10 \log V/3S \text{ voor steen en lichtbeton} \quad (5.23)$$



Figuur 5.29

Voorbeeld 5.5.

Gegeven: vertrek van $4,5 \times 3 \text{ m}^2$, met scheidingswand bestaande uit:

80 mm dik gipsblokken

$$m = 100 \text{ kg/m}^2 \quad (\rho = 1250 \text{ kg/m}^3)$$

$$S = 3 \times 2,4 \text{ m}^2 \quad (b \times h)$$

$$V = 4,5 \times 3 \times 2,4 \text{ m}^3 \quad (l \times b \times h)$$

Gevraagd: Bepaal I_{lu}

Oplossing: $I_{lu} = 25,4 \log 100 - 69 + 10 \log \frac{4,5}{3} \approx -16 \text{ dB}$
=====

hetgeen redelijk overeenkomt met (10).

Voorbeeld 5.6Gegeven Vertrek met diepte van 1,8 mEis binnenwand $I_{lu} \geq -15$ dBUitvoering : gips met $\rho = 1250 \text{ kg/m}^3$ Gevraagd a. Hoe dik moet deze wand worden om dit te bereiken?

$$\text{Oplossing } I_{lu} = 25,4 \log m - 69 + 10 \log \frac{S \times 1,8}{3S} = 25,4 \log m - 71,2 \geq -15$$

$$25,4 \log m = + 56,2$$

$$\log m = \frac{56,2}{25,4} = 2,209$$

$$m = 10^{2,209} \approx \underline{160 \text{ kg/m}^2}$$

$$\text{dikte wand} = \frac{160}{1250} = 0,128 \text{ m} \rightarrow \underline{130 \text{ mm gipswand}}$$

Gevraagd b. Hoe dik moet deze wand worden om $I_{lu} \geq -20$ dB te bereiken?

$$\text{Oplossing } I_{lu} = 25,4 \log m - 71,2 \geq -20$$

$$\log m = \frac{51,2}{25,4} = 2,01$$

$$m = 10^{2,01} \approx \underline{102 \text{ kg/m}^2}$$

$$\text{dikte wand} = \frac{102}{1250} = 0,08 \rightarrow \underline{80 \text{ mm gipsblokken}}$$

Uit bovenstaand voorbeeld blijkt, dat de volgende massa's bij geëiste I_{lu} waarden meestal toereikend zijn:

$$I_{lu} \geq -20 \text{ dB} \quad m \geq 100 \text{ kg/m}^2$$

$$I_{lu} \geq -15 \text{ dB} \quad m \geq 150 \text{ kg/m}^2$$

Hierdoor behoren de 70 mm dikke wandjes uit gasbeton of lichte gipsblokken als kamerscheiding tot het verleden.

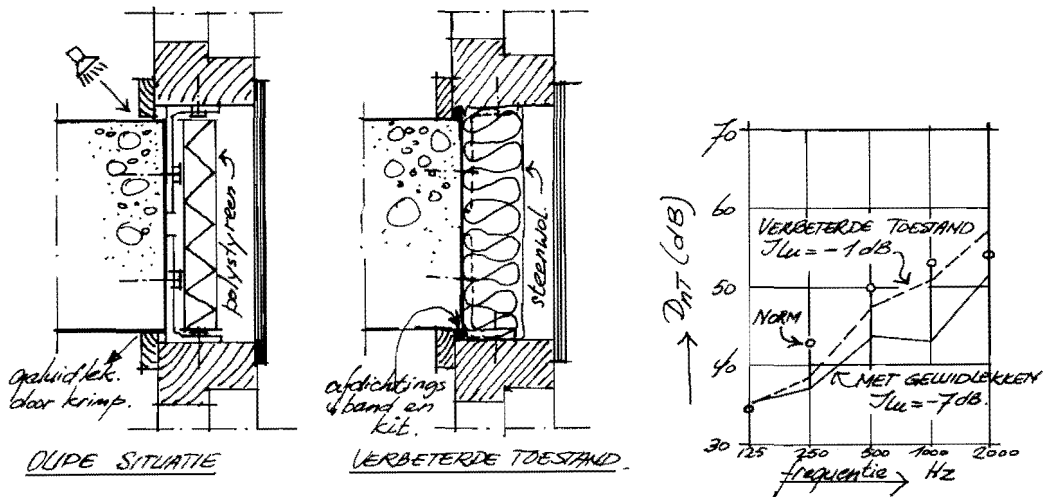
Bij steenachtige materialen (lichtbeton, poriso) blijkt een $I_{lu} \geq -20$ dB volgens formule 5.23 reeds haalbaar te zijn bij een massa $\geq 70 \text{ kg/m}^2$.

Geluidlekken

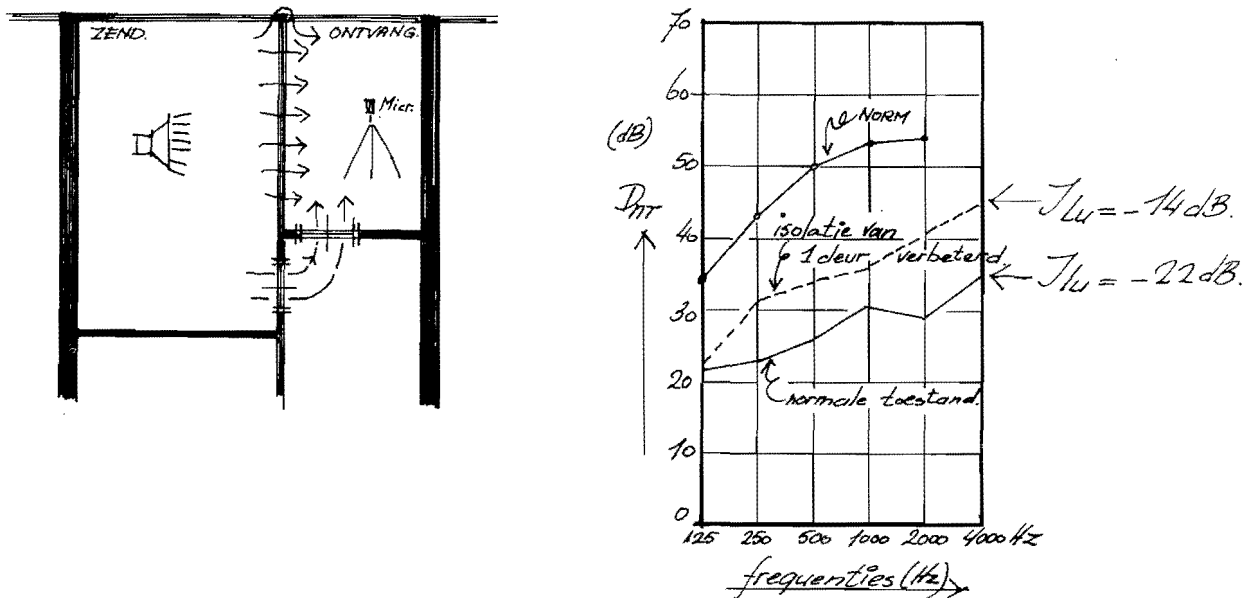
De genoemde oplossingen in de NPR 5070 en de voorspelde geluidisolatiewaarden hiervoor, geven géén garantie, dat deze konstrukties deze waarden ook in de praktijk bereiken. Een goede uitvoeringswijze, met name een goede kierdichting,

bepaalt sterk de uiteindelijke geluidisolatie.

Hoe belangrijk de detaillering van de verschillende aansluitingen is, blijkt uit *figuur 5.30*. Een verlaging van de I_{lu} met 5 à 10 dB bij slechte uitvoering is zeker niet denkbeeldig. In dit verband moet ook genoemd worden de negatieve invloed van twee aan elkaar grenzende deuren op de I_{lu} waarde van kamerscheidende wanden (binnenwanden). Zolang de richtlijnen van toe te passen deuren nog ontbreken, kunnen de meestal lichte binnenhuisdeuren een goede geluidisolatie belemmeren (*figuur 5.31*).



Figuur 5.30.



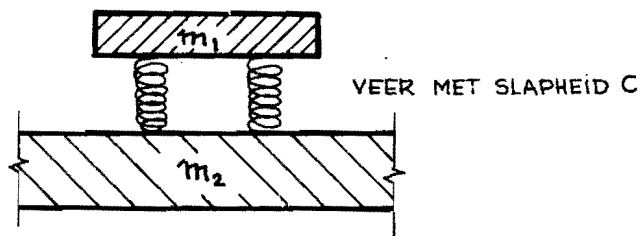
Invloed van transmissie via twee in een hoek aansluitende opdekdeuren op de gemeten I_{lu}

Figuur 5.31

5.9. Trillingsisolatie

Verende opstellingen vormen in principe net zo'n massa-veer-massa systeem als een spouw, *fig. 5.32* echter met deze verschillen:

- de luchtveer is een echte veer met slapheid C
- de massa van de konstruktie zal bij benadering veel groter zijn dan die van de trillende massa $m_2 \gg m_1$



Figuur 5.32.

De formule voor de resonantiefrequentie van een dergelijk systeem werd al in paragraaf 5.5 afgeleid; voor $m_2 \gg m_1$ gaat deze over in:

resonantiefrequentie van een trillende massa:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{m_1 C}} \quad (5.24a)$$

waarin:

$$\begin{aligned} m_1 &= \text{massa van het trillende lichaam} \quad [\text{kg}] \\ C &= \text{slapheid van de veer} \quad [\text{m/N}] \end{aligned}$$

Opmerking:

- in paragraaf 5.5 werden de massa's en de slapheid per vierkante meter beschouwd, hier zijn het de totale massa's en de totale slapheid.

Voor *vertikale* opstellingen is de formule nog om te werken tot:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{m_1 C}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{m_1 g C}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{u}} \quad (5.24b)$$

waarin:

g = versnelling van de zwaartekracht $[m/s^2]$

$u = mgC$ = statische inverting $[m]$. Dat wil zeggen de verkleining van de veerlengte als de massa m op de veer geplaatst wordt.

Formule 5.24b is erg praktisch omdat g een konstante is ($9,8 m/s^2$) en u eenvoudig is te meten bij een opstelling.

Voor draaiende machines, die roteren (en dus trillen) met een bedrijfsfrequentie f_m moet men zorgen dat $\left(\frac{f_m}{f_r}\right)^2 \gg 1$

Voorbeeld 5.7

Gegeven: Een machine heeft een toerental van 1500 omwentelingen per minuut. De machine is verend opgesteld. Er ontstaat een statische inverting van 10 mm.

Gevraagd: Is de machine voldoende trillingvrij opgesteld?

Oplossing:

$$f_m = \frac{1500}{60} = 25 \text{ Hz}$$

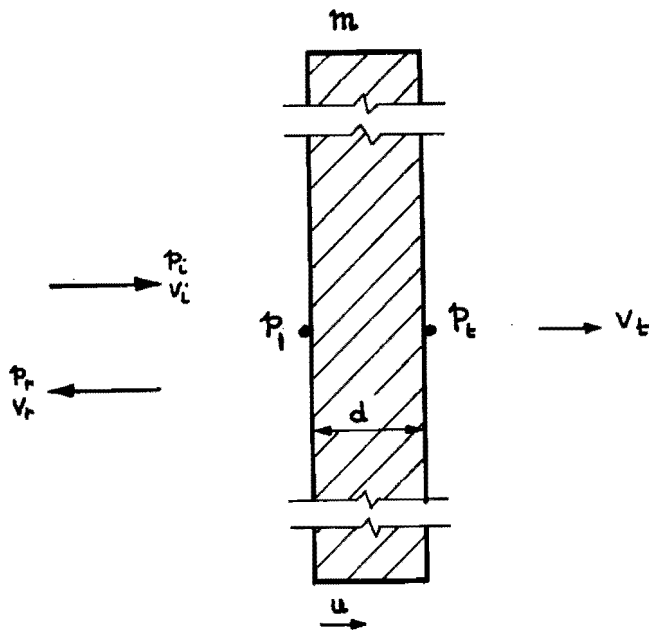
$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10}{0,01}} \approx 5 \text{ Hz}$$

$$\left(\frac{f_m}{f_r}\right)^2 = \left(\frac{25}{5}\right)^2 = 25 \gg 1, \text{ dat wil zeggen de machine is goed opgesteld}$$

Verdere informatie over trillingsisolatie kan gevonden worden in (22) en (23).

APPENDIX 5A.

Het verband tussen de amplitudes van invallende en doorgelaten golf bij loodrechte inval voor een monoliet konstruktie.



Het geluid bestaat uit vlakke lopende golven, zodat:

$$p_i = \rho c v_i, \quad p_r = \rho c v_r \quad \text{en}$$

$$p_t = \rho c v_t,$$

waarin p en v momentane waarden zijn.

Verder is:

m = massa van 1 m^2 konstruktie met dikte d

u = uitwijking van de konstruktie; de konstruktie is zo star dat de uitwijking aan voor en achterzijde gelijk is.

$\frac{\partial u}{\partial t}$ = snelheid van de konstruktie

$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ = versnelling die de konstruktie ondervindt

Aan de oppervlakken zal moeten gelden:

zendkant: de resulterende snelheid van een luchtdeeltje ($v_i - v_r$) is gelijk aan de snelheid van de aangrenzende konstruktie, dus:

$$v_i - v_r = (p_i - p_r) / \rho c = \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$\text{resulterende momentane druk } p_1 = p_i + p_r \left[= 2p_i - (p_i - p_r) \right]$$

ontvangkant: $v_t = p_t / \rho c = \frac{\partial u}{\partial t}$

Voor de bewegingsvergelijking van de konstruktie kan geschreven worden:

$$p_1 - p_t = m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \left[= m \frac{\partial v_t}{\partial t} = \frac{m}{\rho c} \frac{\partial p_t}{\partial t} \right]$$

Door eliminatie van p_i krijgt men hieruit de differentiaalvergelijking:

$$p_i = p_t + \frac{m}{2\rho c} \frac{\partial p_t}{\partial t}$$

De algemene oplossing van dit type differentiaalvergelijking is zodanig dat als p_i sinusvormig is, ook p_t sinusvormig is en omgekeerd.

Stel $p_t = \hat{p}_t \sin(2\pi f t)$, waarin f de frequentie is en $\hat{p}_t$ de amplitude, dan geldt:

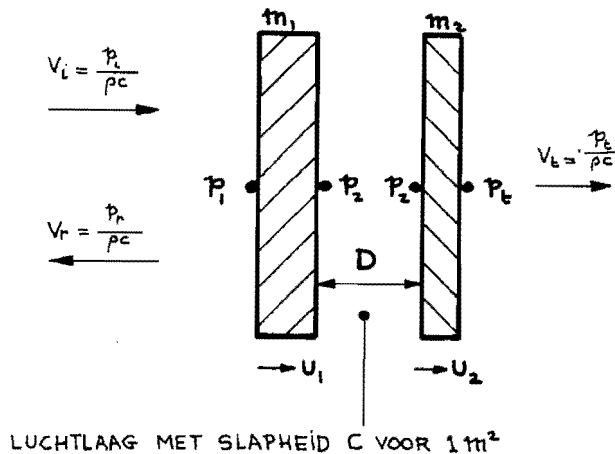
$$p_i = \hat{p}_t \sin(2\pi f t) + \frac{2\pi f \cdot m}{2\rho c} \cdot \hat{p}_t \cos(2\pi f t) = \hat{p}_t \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi f \cdot m}{2\rho c}\right)^2} \cdot \sin\left(2\pi f t + \arctg \frac{2\pi f m}{2\rho c}\right)$$

Inderdaad is p_i sinusvormig, maar met een faseverschil

$$\left(\arctg \frac{2\pi f m}{2\rho c}\right) \text{ ten opzichte van } p_t \text{ en met amplitude } \hat{p}_i = \hat{p}_t \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi f m}{2\rho c}\right)^2}$$

APPENDIX 5B.

Het verband tussen de amplitudes van invallende en doorgelaten golf bij loodrechte inval voor een spouwconstructie



Voor kleine veranderingen geldt:

$$C = - \frac{\Delta D}{\Delta P} = \frac{u_1 - u_2}{p_2}$$

zie verder ook Appendix 5A.

Evenwichts-vergelijkingen:

1. $p_1 = p_i + p_r = 2p_i - (p_i - p_r)$
2. $v_i - v_r = (p_i - p_r) / \rho c = \frac{\partial u_1}{\partial t}$
3. $p_2 = \frac{u_1 - u_2}{C}$ of $u_1 = u_2 + p_2 \cdot C$
4. $p_1 - p_2 = m_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2}$
5. $p_2 - p_t = m_2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2}$
6. $p_t = \rho c v_t = \rho c \frac{\partial u_2}{\partial t}$

Door herhaalde substitutie vindt men:

$$p_i = p_t + \frac{m_1 + m_2 + (\rho c)^2 \cdot C}{2\rho c} \cdot \frac{\partial p_t}{\partial t} + \frac{(m_1 + m_2)C}{2} \cdot \frac{\partial^2 p_t}{\partial t^2} + \frac{m_1 m_2 C}{2\rho c} \cdot \frac{\partial^3 p_t}{\partial t^3}$$

Evenals voor de enkelvoudige konstruktie gaan we uit van $p_t = \hat{p}_t \cdot \sin(2\pi f t)$ zodat:

$$p_i = \hat{p}_t \cdot \left[1 - \frac{(2\pi f)^2 \cdot (m_1 + m_2)C}{2} \right] \cdot \sin(2\pi f t) + \hat{p}_t \cdot \frac{2\pi f}{2\rho c} \left[m_1 + m_2 + (\rho c)^2 \cdot C - (2\pi f)^2 m_1 m_2 C \right] \cdot \cos(2\pi f t)$$

Hieruit volgt het verband tussen de amplitudes $\hat{p}_i$ en $\hat{p}_t$:

$$\left(\frac{\hat{p}_i}{\hat{p}_t} \right)^2 = \left[1 - \frac{(2\pi f)^2 (m_1 + m_2) \cdot C}{2} \right]^2 + \left(\frac{2\pi f}{2\rho c} \right)^2 \left[m_1 + m_2 + (\rho c)^2 C - (2\pi f)^2 m_1 m_2 C \right]^2$$

APPENDIX 5C

Bepaling I_{1u} met behulp van nomogram ontleend aan (26) van S uit tabel 5.4a.

Algemeen

Vlak A: Binnenwand	$m_f = 80 \text{ kg/m}^2$	$S_f = 13 \text{ m}^2$
Vlak B: Glaspui	$m_f = 15 \text{ kg/m}^2$	$S_f = 13 \text{ m}^2$
Vlak C: Plafond	$m_f = 400 \text{ kg/m}^2$	$S_f = 25 \text{ m}^2$
Vlak D: Vloer	$m_f = 400 \text{ kg/m}^2$	$S_f = 25 \text{ m}^2$
Vlak S: Scheidingswand	$m_f = 450 \text{ kg/m}^2$	$S_f = 13 \text{ m}^2$

Bepaling d' uit $d' = d \times C_k \times C_v \times C_s$

Vlak A	fig. 1. $m_f = 80, m_s = 450$	$\rightarrow d = 45$
	fig. 3. kruisverbinding	$\rightarrow C_k = 1$
	fig. 4. $S_f/S_s = 13/13 = 1$	$\rightarrow C_s = 1$
	fig. 5. wand	$\rightarrow C_v = 1$

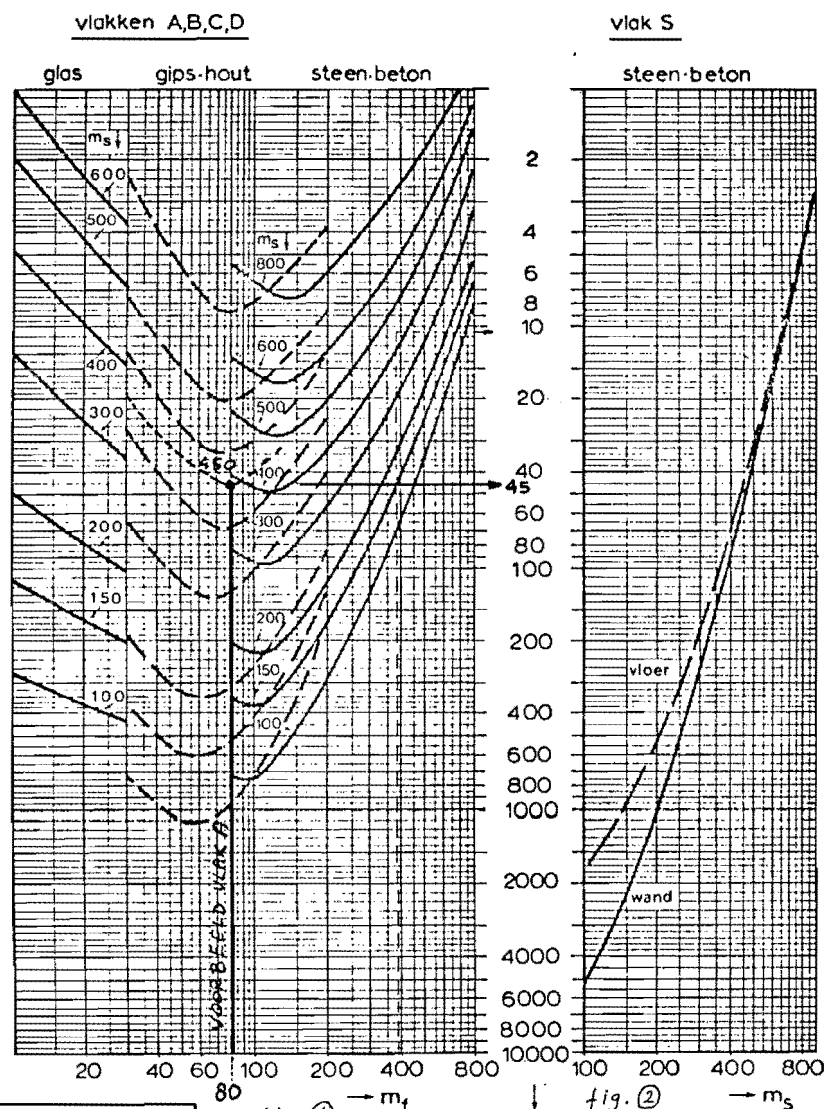
$$d' = 45 \times 1 \times 1 \times 1 = 45$$

Vlak B	fig. 1. $m_f = 15, m_s = 450$	$\rightarrow d = 4,5$
	fig. 3. T - verbinding, glas	
	$m_f/m_s = 15/450 = 0,033$	$\rightarrow C_k = 2$
	fig. 4. $S_f/S_s = 13/13 = 1$	$\rightarrow C_s = 1$
	fig. 5. wand	$\rightarrow C_v = 1$

$$d' = 4,5 \times 2 \times 1 \times 1 = 9,0$$

Vlak C	fig. 1. $m_f = 400, m_s = 450$	$\rightarrow d = 9$
	fig. 3. kruisverbinding	$\rightarrow C_k = 1$
	fig. 4. $S_f/S_s = 25/13 = 1,92$	$\rightarrow C_s = 1,55$
	fig. 5. plafond/vloer $m_f = 400$	$\rightarrow C_v = 0,8$

$$d' = 9 \times 1 \times 1,55 \times 0,8 = 11,2$$

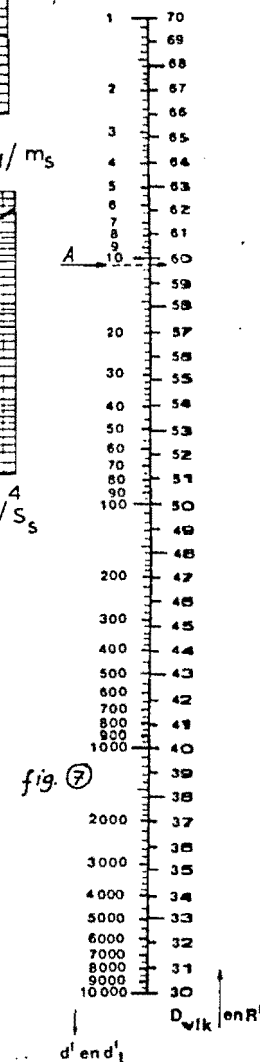
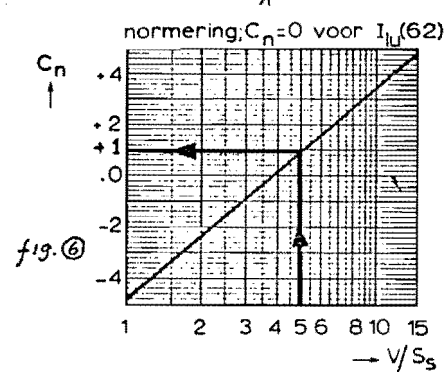
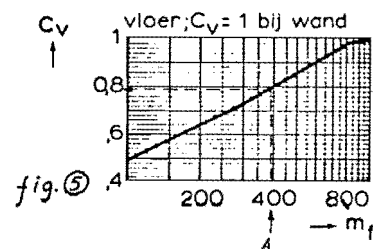
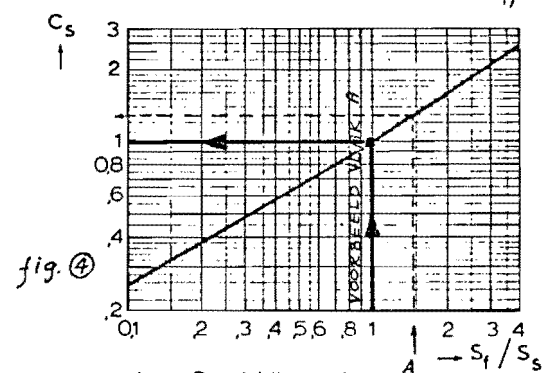
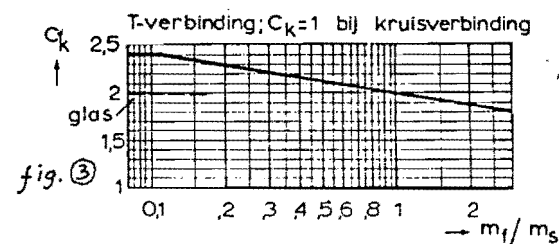


berek:

$$d' = d * C_k * C_v * C_s$$

$$d_t' = \sum d' \rightarrow \therefore R'$$

$$I_{lu} = R' - 48 + C_m$$



Vlak D als vlak C

$$\underline{d' = 9 \times 1 \times 1,55 \times 0,8 = 11,2}$$

Vlak S fig. 2. $m_s = 450$

$$\rightarrow \underline{d' = 55}$$

Bepaling I_{lu}

$$d'_t = \Sigma d' = 45 + 9 + 11,2 + 11,2 + 55 = 131,4$$

fig. 7. $R' = 48,9$ dB

$$I_{lu} = R' - 48 + C_n$$

$$\text{fig. 6. } V/S_s = \frac{5 \times 5 \times 2,6}{5 \times 2,6} = 5 \rightarrow C_n = +1$$

$$I_{lu} = 48,9 - 48 + 1 = +1,9$$

Gemiddeld ligt deze waarde 1 dB te hoog bij ééngezinswoningen (26).

6. DAGVERLICHTING

6.1. Begrippen en definities

In deze paragraaf zal in het kort worden beschreven wat nu precies onder "daglicht" moet worden verstaan. Hierbij komt dan tevens het verschil naar voren tussen de begrippen "daglicht" en "zonlicht".

Bovendien zullen enkele lichttechnische grootheden worden gedefinieerd, die bij daglichtberekeningen veelvuldig worden gehanteerd.

Daglicht en zonlicht

Van de zonnestraling, die de atmosfeer binnendringt, bereikt slechts een deel rechtstreeks het aardoppervlak. Dit gedeelte wordt "direkte zonnestraling" genoemd.

De niet direct doorgelaten zonnestraling wordt gedeeltelijk geabsorbeerd (door in de atmosfeer aanwezige ozon, waterdamp en stofdeeltjes) en het resterende deel wordt in de atmosfeer verstrooid (door luchtmolekulen en stofdeeltjes).

Een gedeelte van deze verstrooide zonnestraling bereikt alsnog het aardoppervlak en wordt aangeduid met "diffuse zonnestraling".

Met behulp van het in (27) geïntroduceerde begrip "lichtstroom" kunnen nu de begrippen daglicht en zonlicht worden gedefinieerd. Zonder opnieuw een volledige definitie te geven van het begrip lichtstroom wordt hier gesteld dat de lichtstroom - uitgezonden door een lichtbron - nagenoeg gelijk is aan 670-maal de grootheid, die ontstaat na weging van het door deze bron (in de vorm van straling) uitgezonden vermogen met de menselijke ooggevoeligheid.

De volgende definities kunnen nu worden gegeven:

Onder "daglicht" wordt de lichtstroom verstaan, die door direkte en diffuse zonnestraling tezamen wordt geleverd.

Onder "zonlicht" wordt de lichtstroom verstaan, die door de direkte zonnestraling wordt geleverd.

Verlichtingssterkte en luminantie

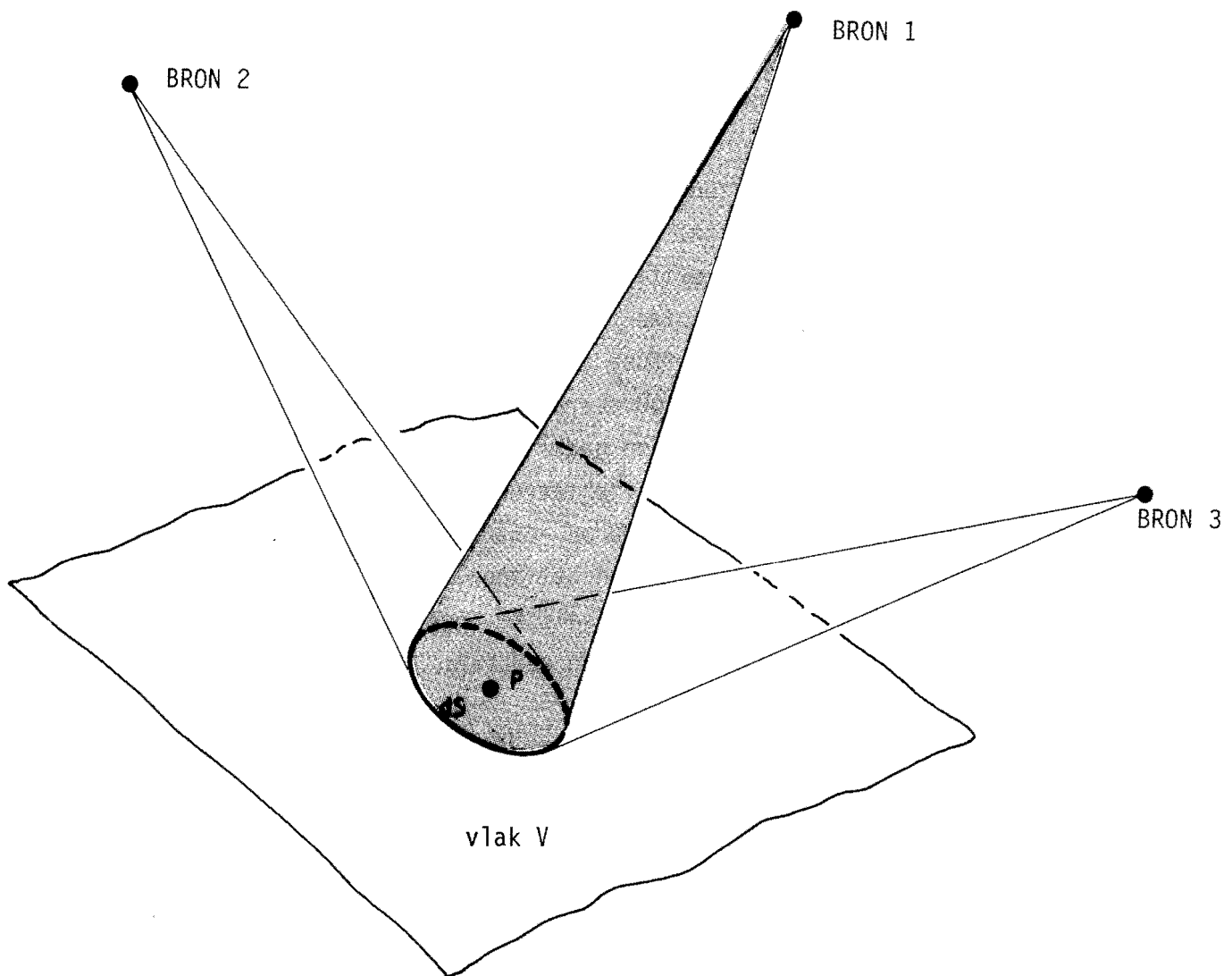
Deze inleidende paragraaf wordt afgesloten met het bespreken van een tweetal lichttechnische grootheden, waarvan tijdens de verdere bespreking van het onder-

werp "dagverlichting" veelvuldig gebruik zal worden gemaakt. Deze grootheden worden ook genoemd in (27).

Als eerste wordt gedefinieerd de grootheid "verlichtingssterkte":

de verlichtingssterkte E in punt P van vlak V is de grootheid, die ontstaat door de totale lichtstroom $d\Phi$ - die vanuit alle mogelijke richtingen wordt ontvangen door een rondom punt P gelegen oppervlakte-elementje - te delen door het oppervlak dS van dit elementje.

Zie figuur 6.1.



Figuur 6.1. De totale lichtstroom, die door een rondom punt P in vlak V gelegen oppervlakte-elementje dS wordt ontvangen.

Voor de duidelijkheid wordt nog eens benadrukt dat de in de definitie genoemde lichtstroom dus geen betrekking heeft op de lichtstroom, die door elke bron afzonderlijk wordt uitgezonden, maar op de totale lichtstroom, die door een oppervlakte-elementje wordt ontvangen.

Uit de zojuist gegeven definitie volgt dat de verlichtingssterkte in formulevorm als volgt kan worden geschreven:

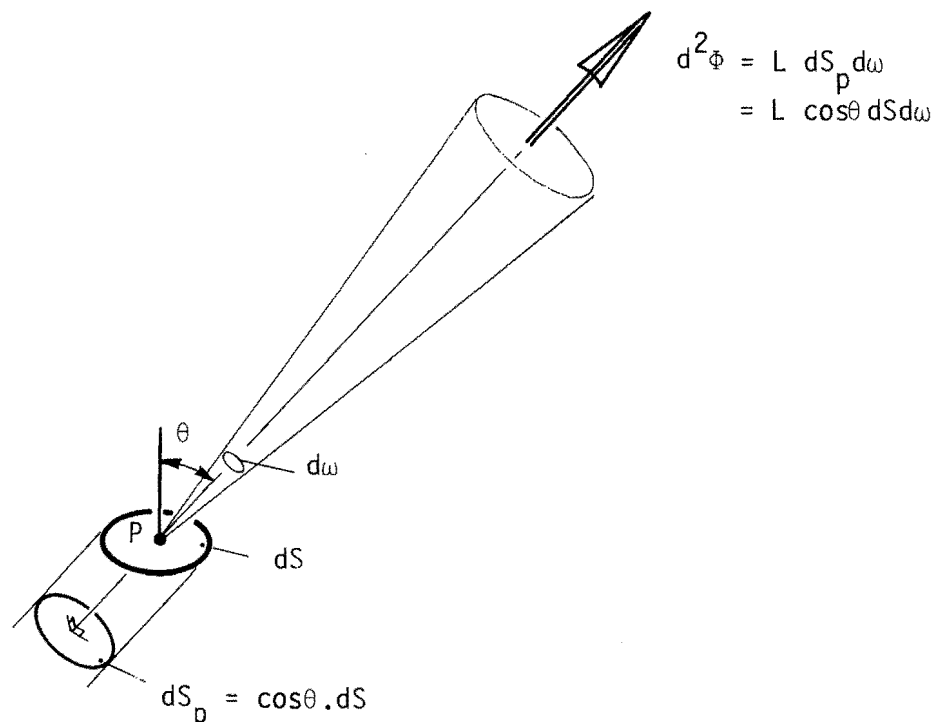
$$E = d\Phi/dS \quad [\text{lux}] \quad (6.1)$$

Opgemerkt wordt nog dat E dus kan worden opgevat als een "lichtstroomdichtheid" in een punt van een vlak. Deze "dichtheid" zal in het algemeen van punt tot punt verschillen.

Vervolgens wordt het begrip "luminantie" gedefinieerd:

de luminantie L in punt P van vlak V is de grootte, die ontstaat door de totale lichtstroom $d^2\Phi$ - door een rondom punt P gelegen oppervlakte-elementje in een gegeven richting binnen een oneindig klein ruimtehoekje uitgezonden - te delen door zowel het zogenaamde "schijnbare" oppervlak dS_p van dit elementje als de grootte $d\omega$ van het ruimtehoekje.

Zie figuur 6.2.



Figuur 6.2. Lichtstroom $d^2\Phi$, die vanuit punt P door een oppervlakte-elementje dS in een gegeven richting wordt uitgezonden.

Uit deze definitie volgt dat "luminantie" in formulevorm als volgt kan worden geschreven:

$$L = \frac{d^2\Phi}{dS_p d\omega} \quad [\text{cd/m}^2] \quad (6.2)$$

Ook de luminantie kan worden opgevat als een lichtstroomdichtheid. Nu echter geldend in een punt en in een gegeven richting.

Met betrekking tot E en L kunnen nog de volgende opmerkingen worden gemaakt:

- een essentieel verschil tussen de grootheden E en L is dat E betrekking heeft op de hoeveelheid lichtstroom, die in een punt wordt ontvangen, en L op de hoeveelheid lichtstroom, die vanuit een punt (in een gegeven richting) wordt uitgezonden

- omdat de luminantie in het algemeen richting-afhankelijk is, wordt deze vaak geschreven als funktie van de hoeken α en β , waarmee elke gewenste richting kan worden beschreven.

Zie figuur 6.3.

- uit (6.2) volgt dat de lichtstroom, die vanuit een punt P wordt uitgezonden door een oppervlakte-elementje dS binnen een ruimtehoekje $d\omega$, gelijk is aan:

$$\begin{aligned} d^2\Phi &= L(\alpha, \beta) dS_p d\omega \\ &= L(\alpha, \beta) \cos \theta dS d\omega \end{aligned} \quad (6.3)$$

- voor "diffuus" stralende vlakken geldt dat:

$$L(\alpha, \beta) = L_0 = \text{konstant} \quad (6.4)$$

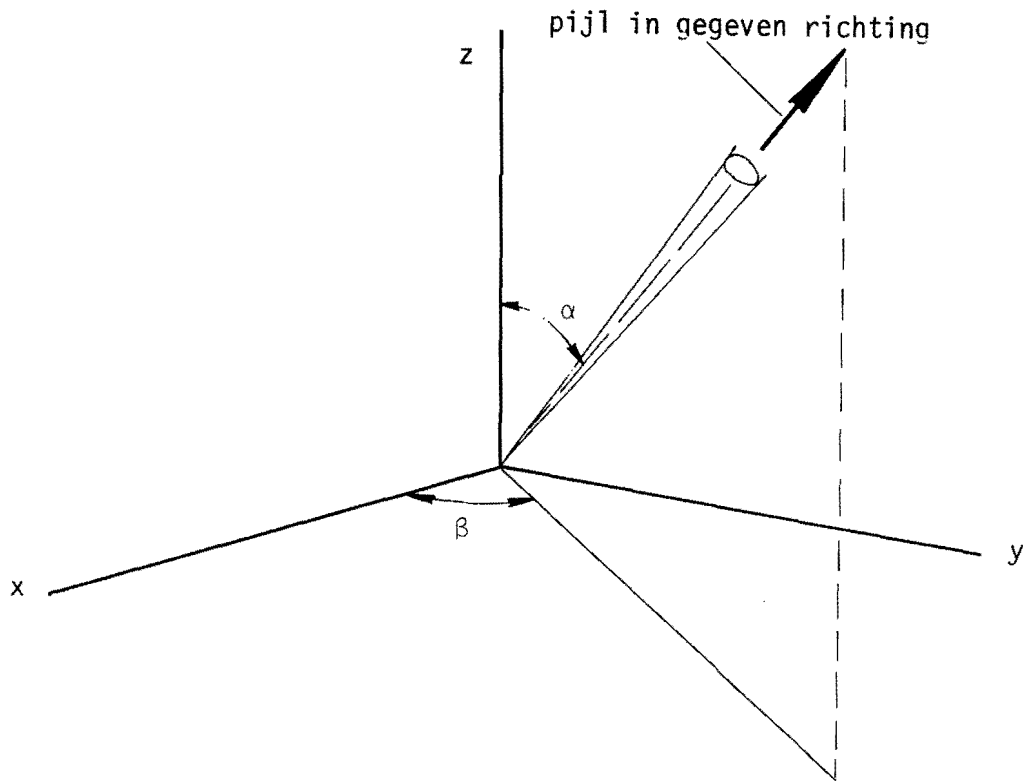
Dit betekent dus dat de luminantie in alle richtingen dezelfde waarde heeft. De uitgezonden lichtstroom verschilt echter wel per richting. *Zie (6.3)*

- voor diffuus stralende vlakken kan worden afgeleid dat er tussen E en L een eenvoudig verband bestaat:

$$E = \pi L_0 / r$$

(6.5)

Hierin is r de zogenaamde "reflektie-koëfficiënt". Zie (27).



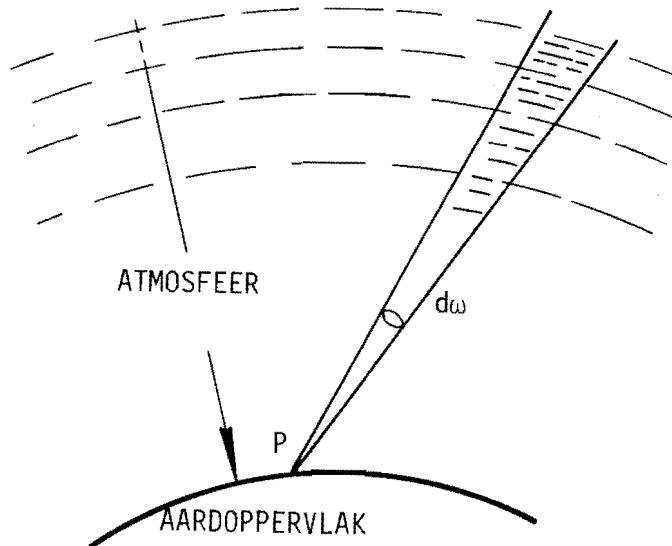
Figuur 6.3. Vastleggen van een richting met behulp van de hoeken α en β .

6.2. Hemelkoepel

In deze paragraaf worden twee van de bestaande typen "hemelkoepels" besproken, waarvan gebruik wordt gemaakt voor de bepaling van de ontvangen hoeveelheid daglicht - uitsluitend tengevolge van de bijdrage van de diffuse zonnestraling - in een punt P van een vlak dat nabij het aardoppervlak is gelegen.

Het begrip hemelkoepel

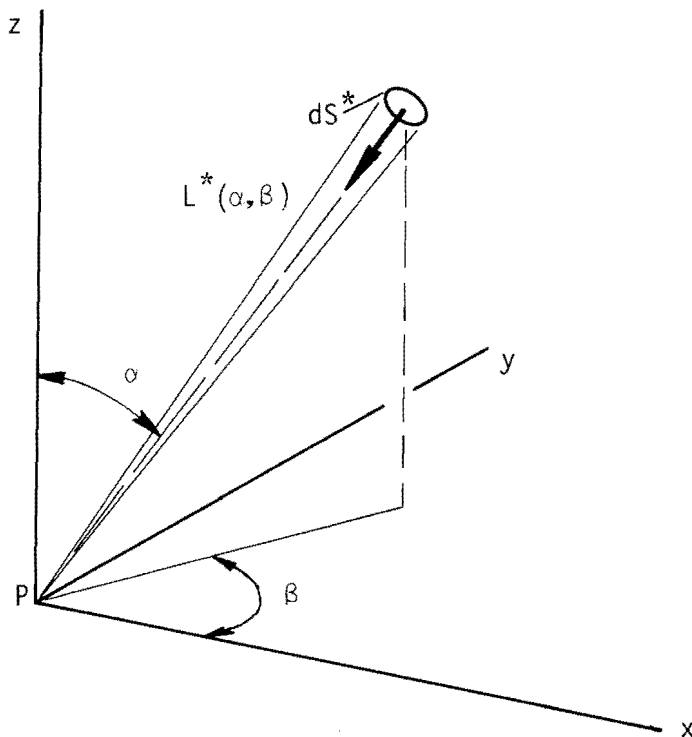
Vanuit punt P nabij het aardoppervlak wordt gekeken naar het gedeelte van de atmosfeer dat - in een gegeven richting - binnen een ruimtehoekje $d\omega$ is gelegen. Zie figuur 6.4.



Figuur 6.4. Gedeelte van de atmosfeer dat - in een gegeven richting - binnen het ruimtehoekje $d\omega$ is gelegen.

Dit stukje "atmosfeer" wordt nu vervangen gedacht door een diffuus stralend oppervlakte-elementje dS^* dat eveneens binnen het ruimtehoekje $d\omega$ is gelegen. De luminantie van dit vlakje in de richting van punt P wordt aangeduid met $L^*(\alpha, \beta)$. Zie figuur 6.5.

Deze luminantie heeft een zodanige waarde dat de in punt P ontvangen lichtstroom, afkomstig van het oppervlakje dS^* , gelijk is aan de lichtstroom, die door het feitelijk aanwezige gedeelte van de atmosfeer - gelegen binnen het bij dS^* behorende ruimtehoekje $d\omega$ - naar punt P wordt uitgezonden.



Figuur 6.5. Vervanging van een "stukje" atmosfeer door een "gelijkwaardig" stralend oppervlakte-elementje dS^*

In *Appendix 6.A.* wordt aangetoond dat de hoeveelheid daglicht, die door dS^* wordt uitgezonden naar een oppervlakte-elementje dS dat rondom punt P is gelegen, gelijk is aan:

$$d^2\Phi = L^*(\alpha, \beta) \cdot \cos\theta \cdot d\omega \cdot dS \quad (6.6)$$

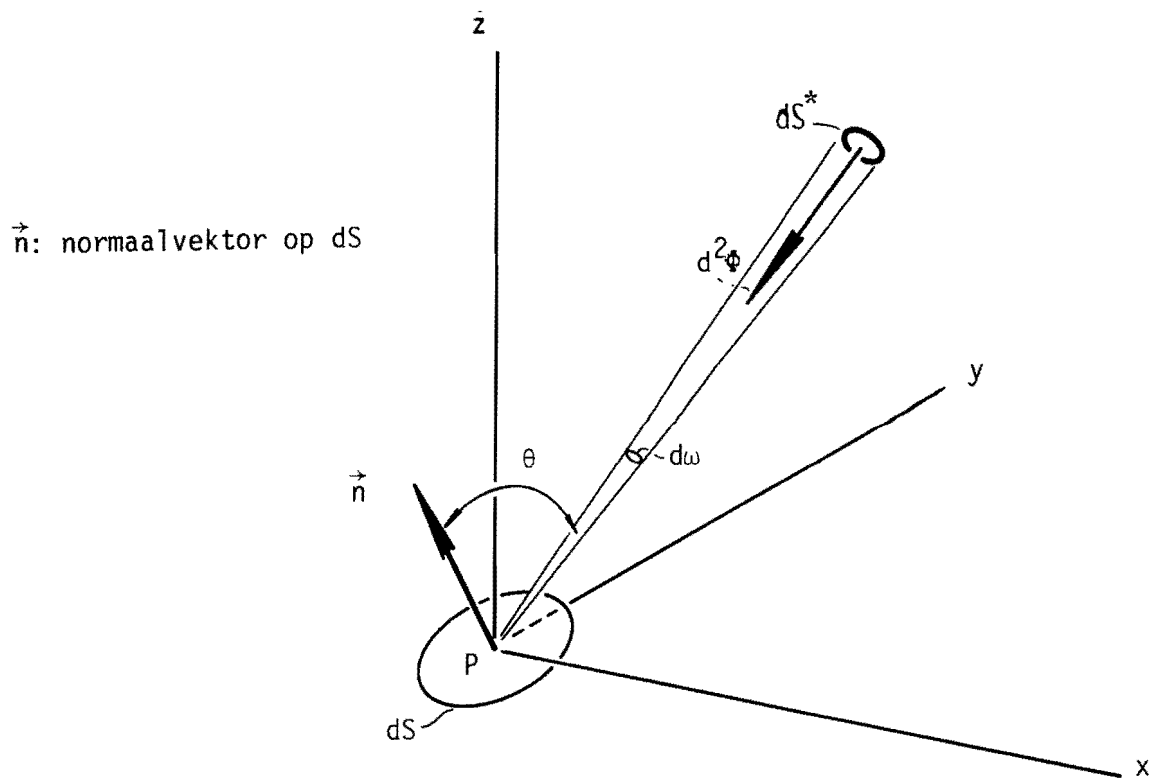
Zie *figuur 6.6.*

Uit (6.6) blijkt dat de door dS ontvangen hoeveelheid daglicht uitsluitend afhangt van de luminantie van het vlakje dS^* in de gegeven richting, van de ruimtehoek waar binnen dS^* vanuit P wordt gezien en van het oppervlak dS .

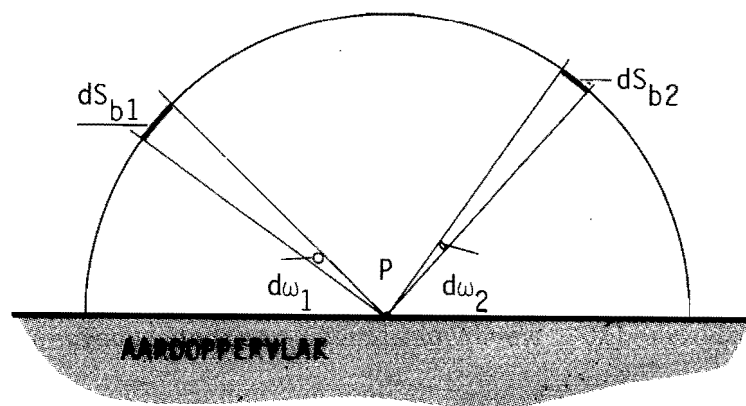
Wanneer nu op de zojuist besproken wijze alle "stukjes" atmosfeer worden vervangen door oppervlakte-elementjes dS_b met luminantie $L_H(\alpha, \beta)$, die op een halve bol zijn gelegen, kan de atmosfeer vervangen worden gedacht door een halve bol, die een gelijkwaardige lichtstroom uitzendt.

Deze halve bol wordt nu de "hemelkoepel" genoemd.

Zie *figuur 6.7.*



Figuur 6.6. De hoeveelheid daglicht, die door dS^* wordt uitgezonden naar het vlakje dS



Figuur 6.7. Vervanging van de atmosfeer door de hemelkoepel.

Zoals in de volgende paragraaf zal blijken, is het nu mogelijk om bij een gegeven luminantie-verdeling van de hemelkoepel de verlichtingssterkte in punten van diverse vlakken te berekenen.

Met betrekking tot deze luminantieverdeling kan echter worden opgemerkt dat:

- op een gegeven tijdstip de luminantie per richting enorm kan verschillen.
- in een gegeven richting de luminantie van moment tot moment zeer sterk kan variëren.

Mede tengevolge hiervan is een exakte nabootsing van dagverlichting met behulp van een hemelkoepel niet mogelijk.

Bij "bewolkte hemel" blijkt het echter mogelijk een luminantieverdeling te kiezen, met behulp waarvan voldoende nauwkeurige daglichtberekeningen mogelijk zijn.

De egale hemel

De meest eenvoudige, maar grofste benadering is die waarbij wordt verondersteld dat de luminantie van de hemelkoepel in alle richtingen dezelfde waarde heeft. Dit betekent dus dat geldt:

$$L_H(\alpha, \beta) = L_0 \quad (6.7.)$$

In paragraaf 6.3. wordt besproken hoe, uitgaande van deze egale hemel, de verlichtingssterkte in punten van willekeurige georiënteerde vlakken op eenvoudige wijze kan worden bepaald.

De CIE-hemel

Bij dit type hemelkoepel neemt de luminantie van erop gelegen punten toe bij toename van de hoek tussen de richting, waarin deze punten worden gezien en het horizontale vlak. De luminantieverdeling ziet er nu als volgt uit:

$$L_H(\alpha, \beta) = L_H(\alpha) = ((1 + 2 \cos \alpha)/3) \cdot L_{\text{zenit}} \quad (6.8)$$

De verhouding tussen de grootste en kleinste waarde voor $L_H(\alpha)$, die wordt gevonden in respektievelijk verticale en horizontale richting, bedraagt dus 3. De verlichtingssterkte in punten van horizontale en verticale vlakken kan voor dit type hemelkoepel met behulp van eenvoudige uitdrukkingen worden bepaald. Zie wederom *paragraaf 6.3.*

6.3. Verlichtingssterkte in een willekeurig vlak tengevolge van het zichtbare deel van de hemelkoepel.

De algemene uitdrukkingen, die nodig zijn voor de bepaling van de verlichtingssterkte in een punt van een vlak tengevolge van het zichtbare gedeelte van de hemelkoepel, worden in deze paragraaf als eerste afgeleid.

Gebruikmakend van deze uitdrukkingen wordt vervolgens besproken, hoe zowel in vrije veldsituatie als in de gebouwde omgeving de verlichtingssterkte in horizontale en verticale vlakken kan worden bepaald.

6.3.1. Algemene afleiding

Uit (6.6) volgt dat de hoeveelheid daglicht, die door de hemelkoepel naar een oppervlakte-elementje dS wordt uitgestraald, gelijk is aan:

$$\begin{aligned} d\Phi &= \int_{\omega} L_H(\alpha, \beta) \cos \theta \, d\omega \, dS \\ &= \left(\int_{\omega} L_H(\alpha, \beta) \cos \theta \, d\omega \right) dS \end{aligned} \quad (6.9)$$

ω : ruimtehoek, horend bij het zichtbare deel van de hemelkoepel.

Met behulp van (6.1) en (6.9) wordt voor de verlichtingssterkte van een punt in dit vlakje gevonden:

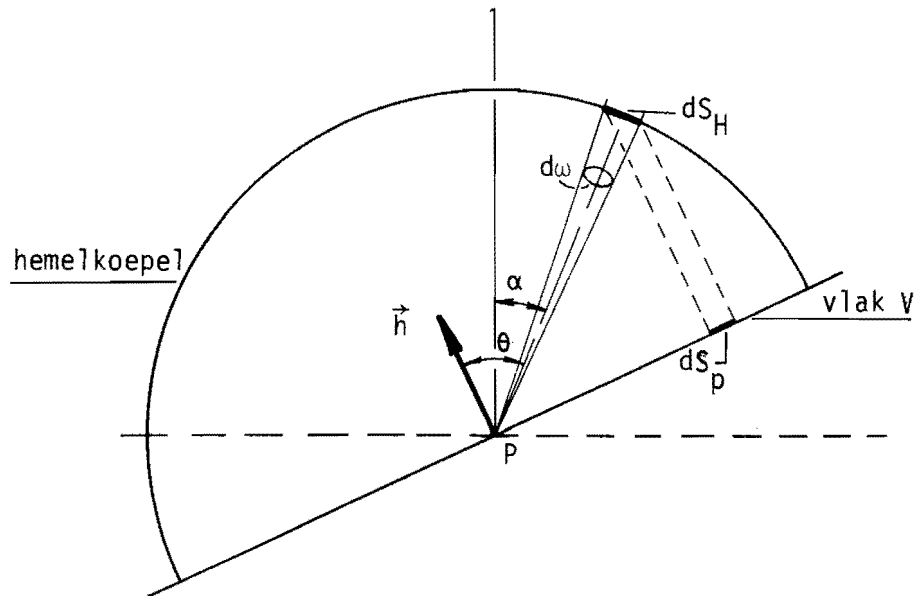
$$E = \int_{\omega} L_H(\alpha, \beta) \cos \theta \, d\omega \quad (6.10)$$

Met behulp van *figuur 6.8* is te zien dat (6.10) kan worden omgevormd tot:

$$\begin{aligned} E &= \int_{S_H} L_H(\alpha, \beta) \frac{\cos \theta}{R^2} \, dS_H \\ &= \frac{1}{R^2} \int_{S_p} L_H(\alpha, \beta) \, dS_p \end{aligned} \quad (6.11)$$

Hierin stelt S_p het oppervlak voor dat ontstaat na projectie van de zichtbare hemelkoepel op het vlak, waarin de verlichtingssterkte moet worden bepaald.

Voor zowel de "egale hemel" als de "CIE-hemel" kan nu de algemene formule worden afgeleid, met behulp waarvan de verlichtingssterkte tengevolge van de zichtbare hemelkoepel kan worden bepaald:



Figuur 6.8. Projectie van het oppervlakte-elementje dS_H op vlak V voor punt P .

1. egale hemel

Uit (6.7) en (6.11) volgt:

$$E = \frac{L_o}{R^2} \int_{S_p} dS_p = \frac{L_o}{R^2} \cdot S_p \quad (6.12)$$

2. CIE-hemel

Uit (6.8) en (6.10) volgt:

$$E = \frac{L_z}{3} \int_{\omega} ((1 + 2 \cos \alpha) \cdot \cos \theta) d\omega \quad (6.13)$$

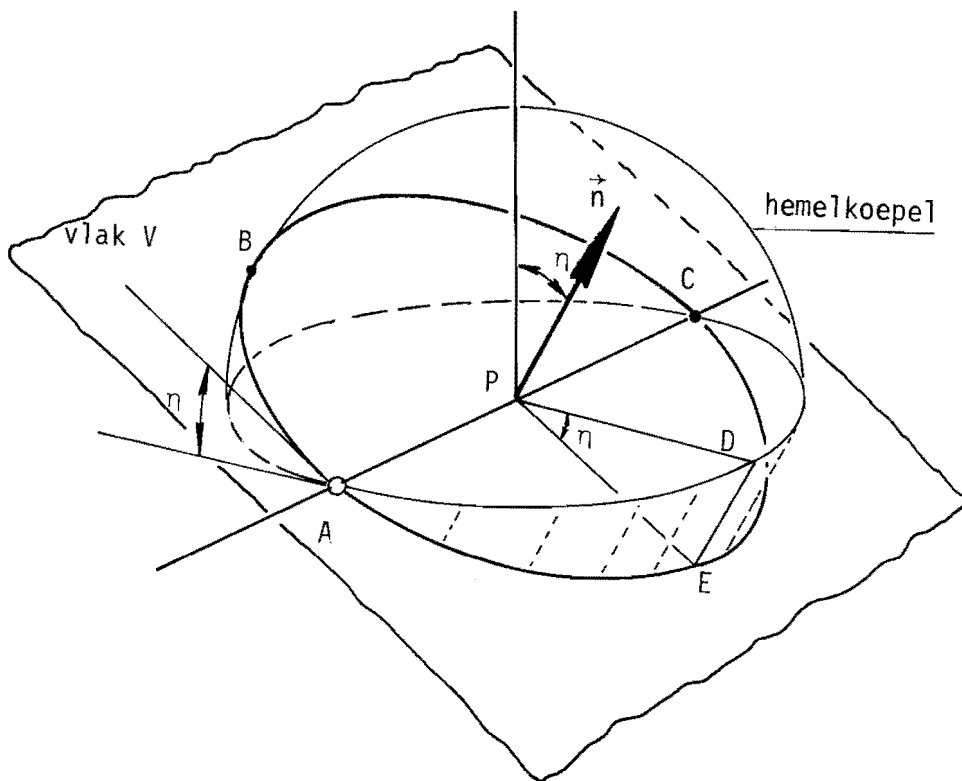
6.3.2. Het "vrije veld"

Voor vrije veld situaties zal nu worden bekeken hoe de zojuist gevonden algemene uitdrukkingen kunnen worden omgezet in voor de praktijk hanteerbare formules.

Egale hemel

Uit (6.12) volgt dat de verlichtingssterkte in een punt van een willekeurig vlak tengevolge van de zichtbare hemelkoepel recht evenredig is met het oppervlak dat ontstaat na projectie hiervan op dit vlak.

In *figuur 6.9* is aangegeven welk gedeelte van de hemelkoepel zichtbaar is vanuit een punt P dat is gelegen in vlak V.



Figuur 6.9. Cirkelbogen ABC en CDA vormen de rand van de zichtbare hemelkoepel.

Uit deze figuur volgt dat het geprojecteerde oppervlak gelijk is aan het oppervlak van een halve cirkel, gevormd door de boog ABC, plus dat van een halve ellips, gevormd door de boog ACE.

Met andere woorden:

$$\begin{aligned}
 S_p &= 1/2 \left(\pi R^2 + \pi R^2 \cos \eta \right) \\
 &= 1/2 \pi R^2 (1 + \cos \eta)
 \end{aligned}
 \tag{6.14}$$

Met behulp van (6.12) en (6.14) wordt nu gevonden:

$$E = (1 + \cos \eta) \pi L_0 / 2 \quad (6.15)$$

In het vrije veld geldt dus dat tengevolge van een egale hemel de verlichtingssterkte in horizontale vlakken ($\eta = 0^\circ$) en verticale vlakken ($\eta = 90^\circ$) gelijk is aan respectievelijk:

$$E_{\text{hor}} = \pi L_0 \quad (6.16)$$

$$E_{\text{vert}} = 1/2 \pi L_0 = 1/2 E_{\text{hor}} \quad (6.17)$$

CIE-hemel

Voor de bepaling van verlichtingssterkte tengevolge van dit type hemelkoepel is het noodzakelijk dat de algemene uitdrukking (6.13) verder wordt uitgewerkt.

Deze puur wiskundige bewerking is te vinden in *Appendix 6B*.

Met behulp van het in deze appendix gevonden resultaat kan worden afgeleid dat de verlichtingssterkte in horizontale en verticale vlakken gelijk is aan respectievelijk:

$$E_{\text{hor}} = L_z \cdot 7\pi/9 \approx 2,44 L_z \quad (6.18)$$

$$E_{\text{vert}} = L_z \cdot (3\pi + 8)/18 \approx 0,97 L_z = 0,396 E_{\text{hor}} \quad (6.19)$$

De uitdrukkingen (6.18) en (6.19) worden afgeleid in *Appendix 6C*.

Met betrekking tot "vrije veld" situaties kunnen nu de volgende opmerkingen worden gemaakt:

- Uit (6.18) en (6.19) blijkt dat - in tegenstelling tot bij de egale hemelkoepel - bij een CIE-hemel nu niet geldt dat $E_{\text{vert}} = 1/2 E_{\text{hor}}$
- wanneer de verlichtingssterkte, zoals die met behulp van beide typen hemelkoepel kan worden gevonden, in een gegeven situatie dezelfde waarde moet opleveren, kan een relatie worden gelegd tussen de luminanties L_0 en L_z .
Zo is voor horizontale vlakken gevonden dat:

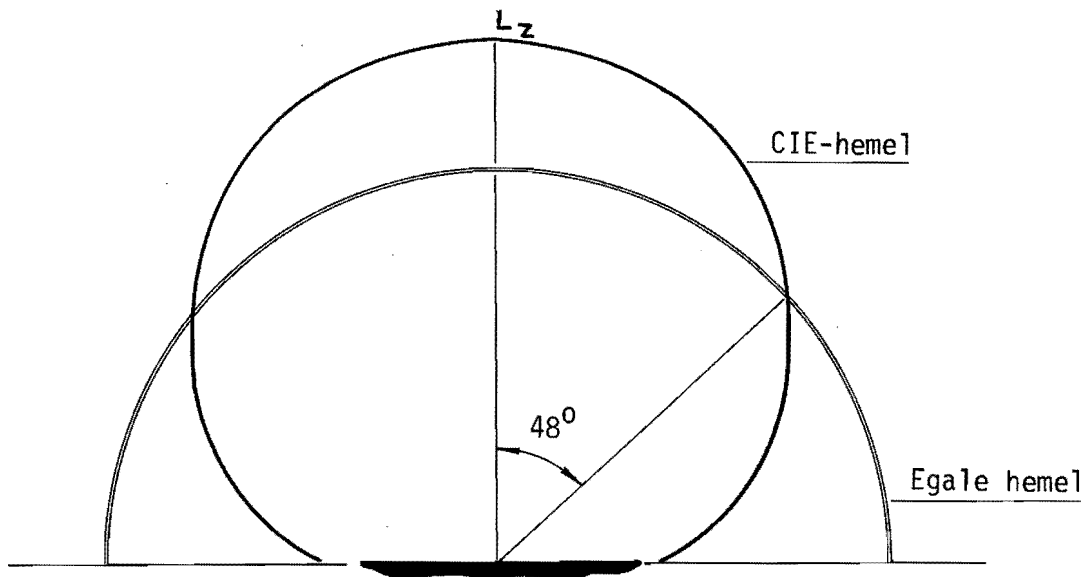
$$E_{\text{hor}} = \pi L_0 = L_z \cdot 7\pi/9 \rightarrow$$

$$L_0 = 7/9 L_z$$

Met behulp van (6.8) kan nu worden gevonden dat bij een CIE-hemel geldt:

$$L_H(\alpha) = 7/9 L_z \text{ als } \alpha = 48^\circ$$

Beide, in *figuur 6.10* getekende, luminantieverdelingen leveren dezelfde verlichtingssterkte op een horizontaal vlak.



Figuur 6.10. Dezelfde waarde van E_{hor} tengevolge van twee verschillende luminantieverdelingen.

Wanneer nu voor verticale vlakken hetzelfde probleem wordt bekeken, dan geldt:

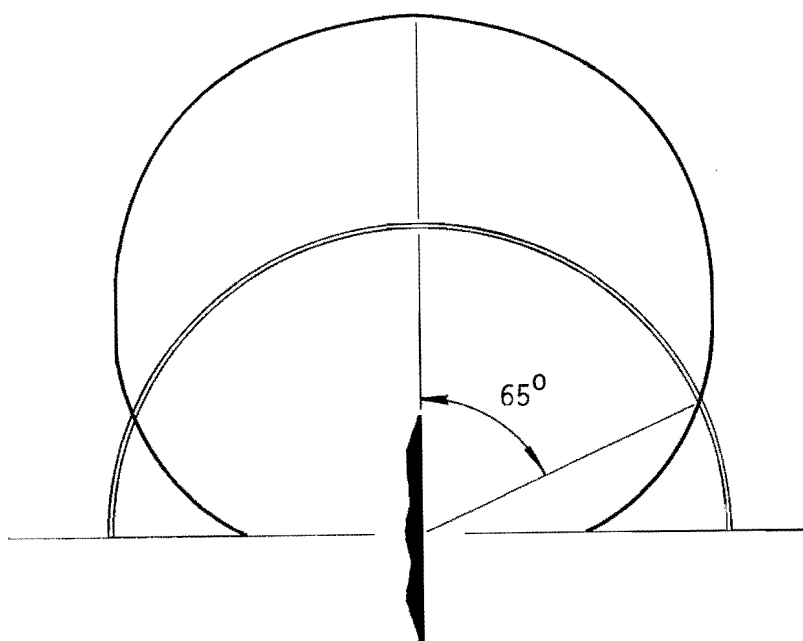
$$E_{\text{vert}} = \pi L_0/2 = L_z \cdot (3\pi + 8)/18 \rightarrow$$

$$L_0 = 0,62 L_z$$

Met behulp van (6.8) wordt weer gevonden dat:

$$L_H(\alpha) = 0,62 L_z \text{ voor } \alpha = 65^\circ$$

Zie *figuur 6.11*.



Figuur 6.11. Dezelfde waarde van E_{vert} tengevolge van twee verschillende luminantieverdelingen.

6.3.3. De gebouwde omgeving

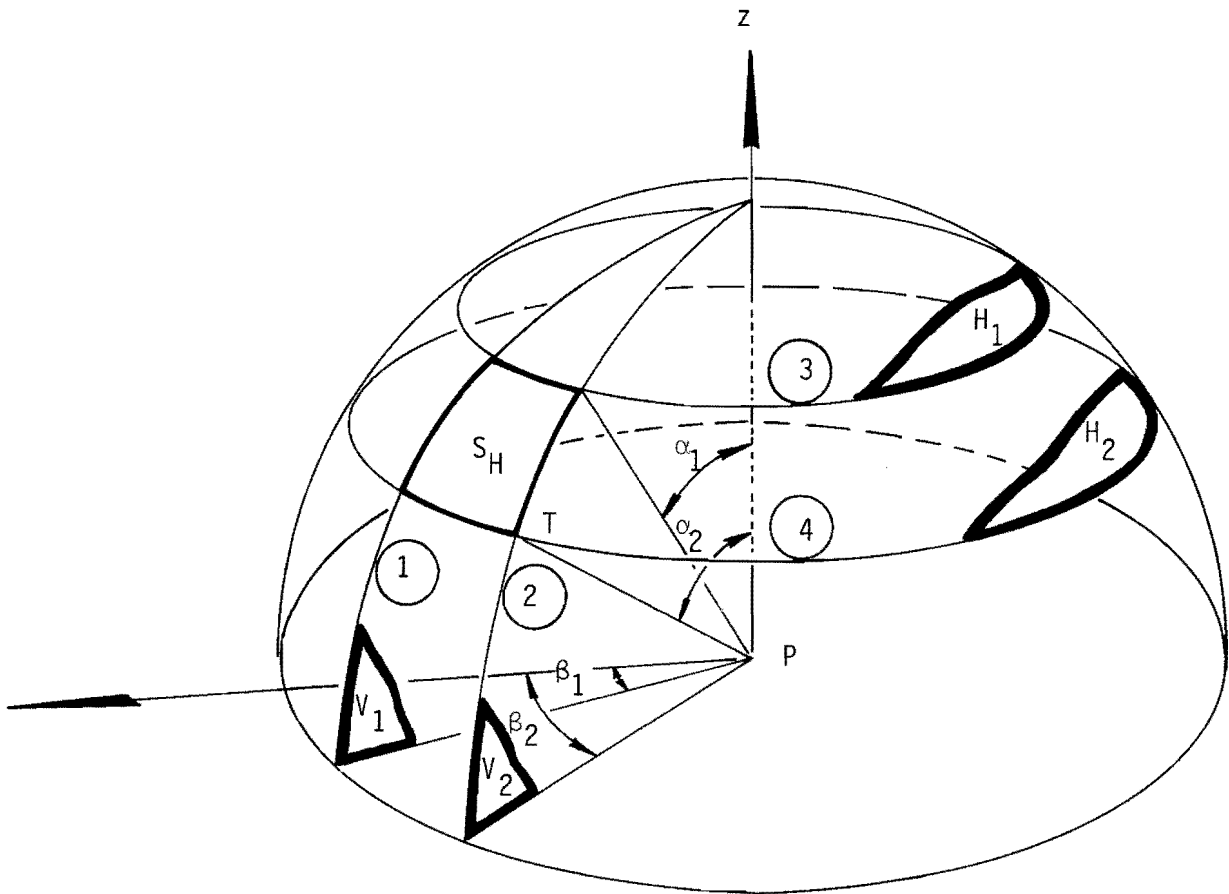
Uit hetgeen tot nu toe is behandeld, is duidelijk gebleken dat voor de bepaling van verlichtingssterkten het gedeelte van de hemelkoepel, dat vanuit een gegeven punt zichtbaar is, bekend moet zijn.

Wanneer nu in de gebouwde omgeving de verlichtingssterkte op horizontale en verticale vlakken met behulp van respectievelijk (6.12) en (6.13) moet worden bepaald, ontstaat de noodzaak dit gedeelte van de hemelkoepel wiskundig te beschrijven.

Duidelijk zal zijn dat een dergelijke aanpak - ook al is die in een aantal gevallen mogelijk - nu niet bepaald kan worden gezien als een handzaam "instrument" waarmee ontwerpers snel een goede indruk kunnen verkrijgen van de in een vertrek optredende verlichtingssterkten.

Dit is dan ook de reden dat in het resterende deel van deze paragraaf aandacht zal worden besteed aan zogenaamde "daglichtdiagrammen". Met behulp deze diagrammen kan - zoals zal blijken - op eenvoudige en niet tijdrovende wijze de verlichtingssterkte worden bepaald in punten van horizontale en verticale vlakken. Voor een goed begrip van de toepassingsmogelijkheden van de daglichtdiagrammen is het noodzakelijk dat in grote lijnen aandacht wordt besteed aan de wijze, waarop deze diagrammen tot stand komen.

De eerste stap, die moet leiden tot de konstruktie van daglichtdiagrammen, is het opdelen van de hemelkoepel in een aantal oppervlakjes S_H . De begrenzing van elk van deze oppervlakjes wordt gevormd door enerzijds de doorsnijding van de halve bol met twee verticale vlakken V_1 en V_2 - die elkaar volgens de vertikaal PZ snijden en een hoek $\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1$ met elkaar maken - en anderzijds de doorsnijding van de halve bol met twee horizontale vlakken H_1 en H_2 , waarvan de onderlinge afstand wordt bepaald door de hoeken α_1 en α_2 . Zie figuur 6.12.

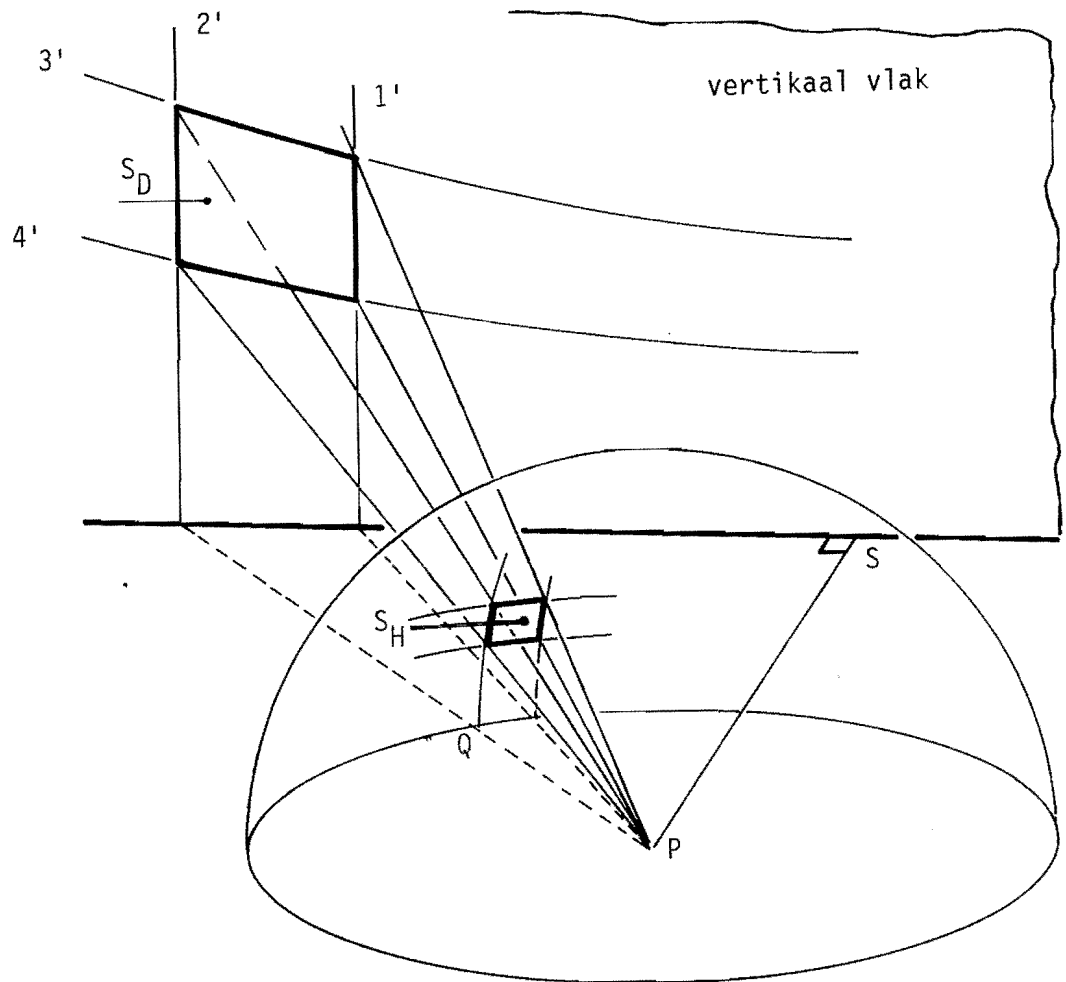


Figuur 6.12. Begrenzungen van het oppervlakje S_H .

Gezocht wordt nu naar een zodanige opdeling van de hemelkoepel, dat elk van de oppervlakjes S_H dezelfde bijdrage levert aan de verlichtingssterkte in punt P. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de in *appendix 6C* uitgewerkte integralen. Op de bepaling van de waarden van α en β , die tot een opdeling van de hemelkoepel in bijvoorbeeld 1600 van deze oppervlakjes S_H moet leiden, wordt verder niet ingegaan. Wel is het essentieel te weten dat per oriëntatie van het vlak, waarin de verlichtingssterkte moet worden bepaald, de opdeling van de hemelkoepel zal verschillen. Uit (6.9) is dit direkt te zien door te bedenken dat twee iden-

tieke vlakjes, die binnen dezelfde ruimtehoek $d\omega$ worden gezien, een verschillende lichtstroom $d\Phi$ uitzenden naar het oppervlakte-elementje dS wanneer de richting (vastgelegd met hoek Θ), waar het hoekje $d\omega$ omheen is gelegen, verschilt.

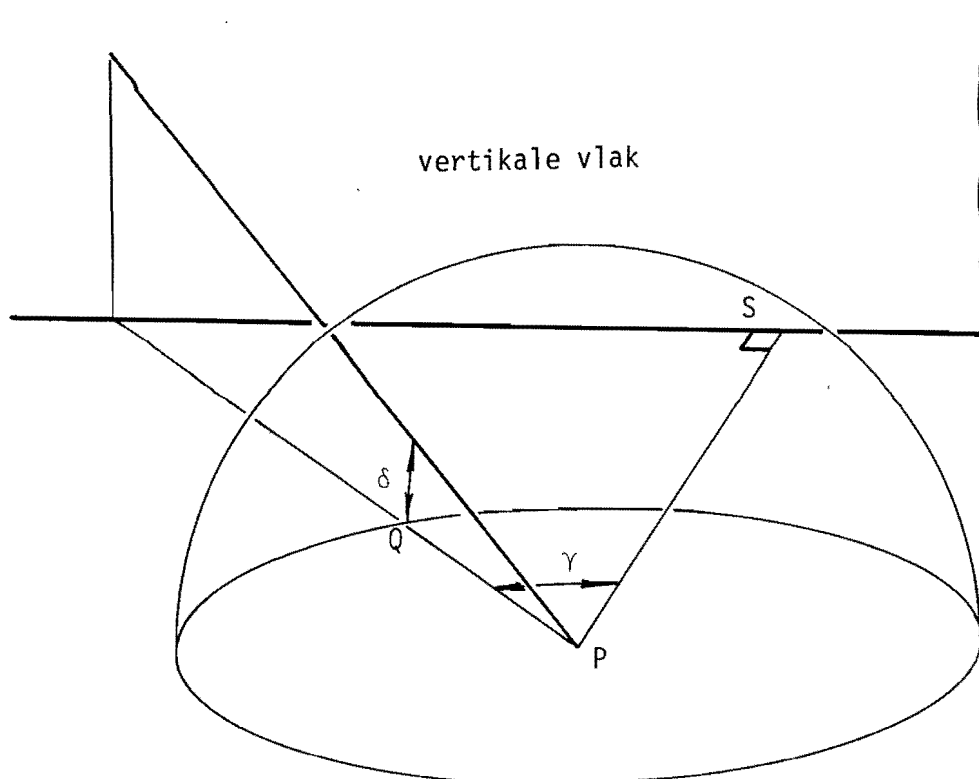
De volgende stap, die wordt genomen, is weergegeven in *figuur 6.13*. Hierin is te zien hoe de oppervlakjes S_H op een vertikaal vlak kunnen worden geprojecteerd.



Figuur 6.13. Projectie van oppervlakje S_H op een vertikaal vlak.

Met betrekking tot de projectie van de oppervlakjes S_H kan worden opgemerkt dat de in *figuur 6.12* getekende cirkelbogen 1 en 2 op het vertikale vlak worden afgebeeld als rechte, verticale lijnen 1' en 2'. De in het horizontale vlak liggende cirkelbogen 3 en 4 worden afgebeeld als gekromde lijnen 3' en 4'.

Op deze plaats wordt opgemerkt dat de richting, waarin vanuit punt P wordt gekeken, in het hierna volgende zal worden vastgelegd met behulp van de hoeken γ en δ in plaats van de tot nu toe gebruikte hoeken α en β . Zie *figuur 6.14*.

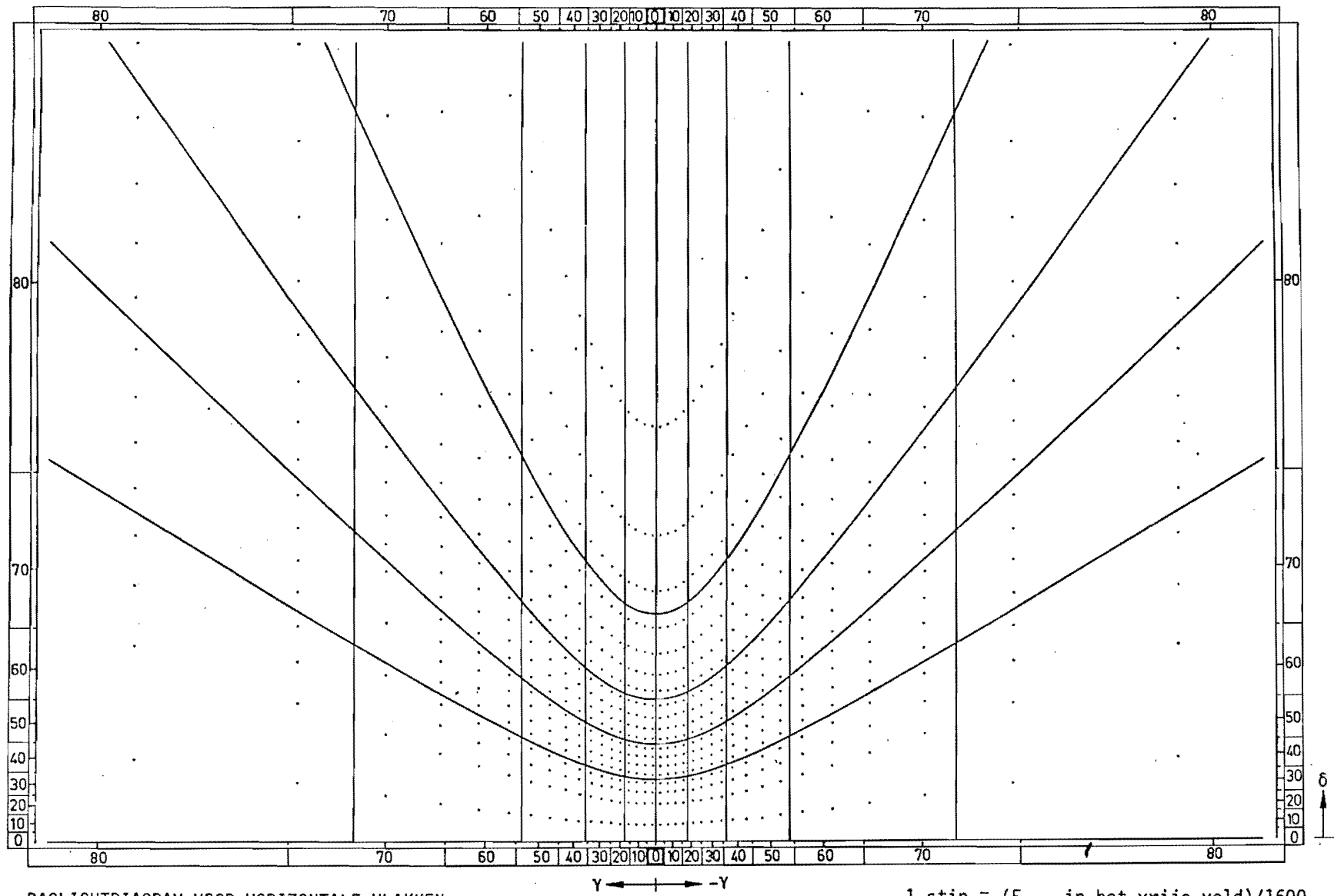


Figuur 6.14. Definiëring van de hoeken γ en δ

Het zogenaamde "daglichtdiagram" ontstaat nu door voor alle waarden van α en β (dus voor γ en δ), die horen bij de hiervoor besproken verdeling van de hemelkoepel in oppervlakjes S_H , de bijbehorende rechte en gekromde lijnen te tekenen, die na projectie vanuit punt P op een vertikaal vlak ontstaan op de zojuist aangegeven wijze. In *figuur 6.15* is het langs deze weg verkregen daglichtdiagram te zien dat kan worden gebruikt voor de bepaling van de verlichtingssterkte in horizontale vlakken, wanneer wordt uitgegaan van een CIE-hemel.

Bij het afgebeelde diagram is uitgegaan van een hemelkoepel, die is opgedeeld in 1600 oppervlakjes S_H .

In verband met zowel de leesbaarheid van het daglichtdiagram als de eindige afmetingen van het papier waarop deze diagrammen worden afgebeeld, zijn niet alle 800 oppervlakjes die in theorie op het verticale vlak kunnen worden geprojecteerd, in het diagram afgebeeld. In plaats hiervan is van alle vlakjes S_H , waarvan het zwaartepunt na projectie binnen een van te voren gekozen rechthoekig gebied (de contouren van het daglichtdiagram) vallen, het geprojecteerde zwaartepunt afgebeeld. Het geprojecteerde oppervlak dat hoort bij een aantal van 4×4 van deze stippen, is met getrokken lijnen aangegeven. Samenvattend kan nu met betrekking tot dit daglichtdiagram het volgende worden gesteld:



DAGLICHTDIAGRAM VOOR HORIZONTALE VLAKKEN
EN CIE-HEMELKOEPEL

1 stip $\equiv (E_{\text{hor}} \text{ in het vrije veld})/1600$

TH-Delft, vakgroep Bouwfysica Afd. Bouwkunde en Civiele Techniek

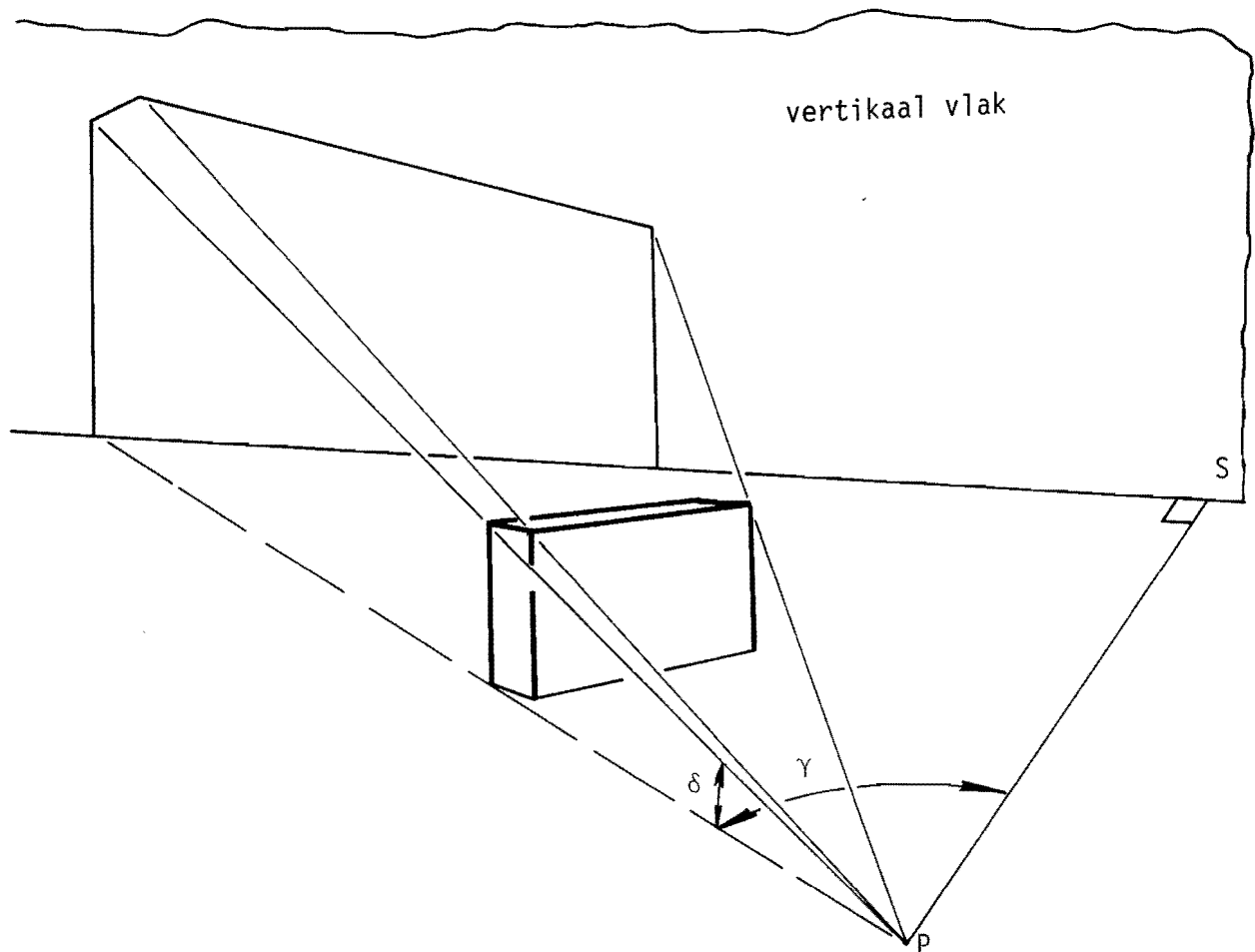
γ en δ in graden

Figuur 6.15. Daglichtdiagram voor de bepaling van verlichtingssterkten in horizontale vlakken ten gevolge van de CIE-hemel.

- elk van de in het daglichtdiagram afgebeelde stippen representeert een van de 1600 oppervlakjes S_H waarin de hemelkoepel is opgedeeld.
- voor elk van deze stukjes geprojecteerde hemelkoepel (lees stippen) geldt dat de bijdrage, die hierdoor aan de verlichtingssterkte in een punt van een horizontaal vlak wordt geleverd, gelijk is aan $1/1600 \equiv 1/16 \%$ van de verlichtingssterkte E_{hor} , die in een vrije veld situatie in dit punt wordt gevonden. Het eerder genoemde oppervlak, dat is begrensd door getrokken lijnen en waarbinnen 4×4 stippen zijn gelegen, levert dus precies een bijdrage van $0,01 E_{hor}$ tot de horizontale verlichtingssterkte.

De derde stap is de projectie van de "gebouwde omgeving" op hetzelfde verticale vlak als waarop zojuist de oppervlakjes S_H zijn geprojecteerd. Anders gezegd: de gebouwde omgeving wordt nu in het daglichtdiagram geprojecteerd.

Omdat de begrenzing van de gebouwmassa's nagenoeg altijd wordt gevormd door platte vlakken, bestaat de begrenzing van geprojecteerde gebouwmassa's in die gevallen dan ook altijd uit rechte lijnen. Deze lijnen kunnen op eenvoudige wijze worden bepaald. Zie figuur 6.16.



Figuur 6.16. Projectie van een gebouwmassa op het verticale vlak.

Nadat de zojuist genoemde stappen zijn genomen, kan in de gebouwde omgeving de verlichtingssterkte tengevolge van de zichtbare hemelkoepel in het gevraagde punt eenvoudig worden bepaald door het aantal stippen - of eigenlijk het aantal geprojecteerde oppervlakken S_H - in het daglichtdiagram te tellen, dat niet samenvalt met de geprojecteerde gebouwde omgeving. Vermenigvuldiging van dit aantal met de bekende bijdrage tot de verlichtingssterkte, die door elke stip wordt geleverd, geeft de gewenste uitkomst.

Voordat aan de hand van enkele voorbeelden het gebruik van daglichtdiagrammen wordt geïllustreerd, wordt tot slot van deze paragraaf nog een opmerking gemaakt met betrekking tot de nauwkeurigheid van deze diagrammen.

Als maat voor de zichtbare hemelkoepel in de gebouwde omgeving wordt het aantal stippen geteld dat na projectie van de gebouwde omgeving nog "zichtbaar" is in het daglichtdiagram.

Omdat in het algemeen een aantal van de geprojecteerde oppervlakjes S_H gedeeltelijk met de geprojecteerde gebouwde omgeving zal samenvallen, betekent dit dat de daarbij behorende stippen feitelijk niet volledig mogen worden meegerekend. Gezien de geringe bijdrage per stip tot de uiteindelijke verlichtingssterkte is de fout, die wordt gemaakt wanneer deze stippen wel geheel worden meegerekend, gering wanneer als doel wordt gesteld een nauwkeurige indruk te verkrijgen van de verlichtingssterkte.

Verder kan, wanneer daartoe de behoefte of noodzaak bestaat, een nauwkeurige schatting worden gedaan ten aanzien van de mate waarin deze stippen moeten worden meegerekend.

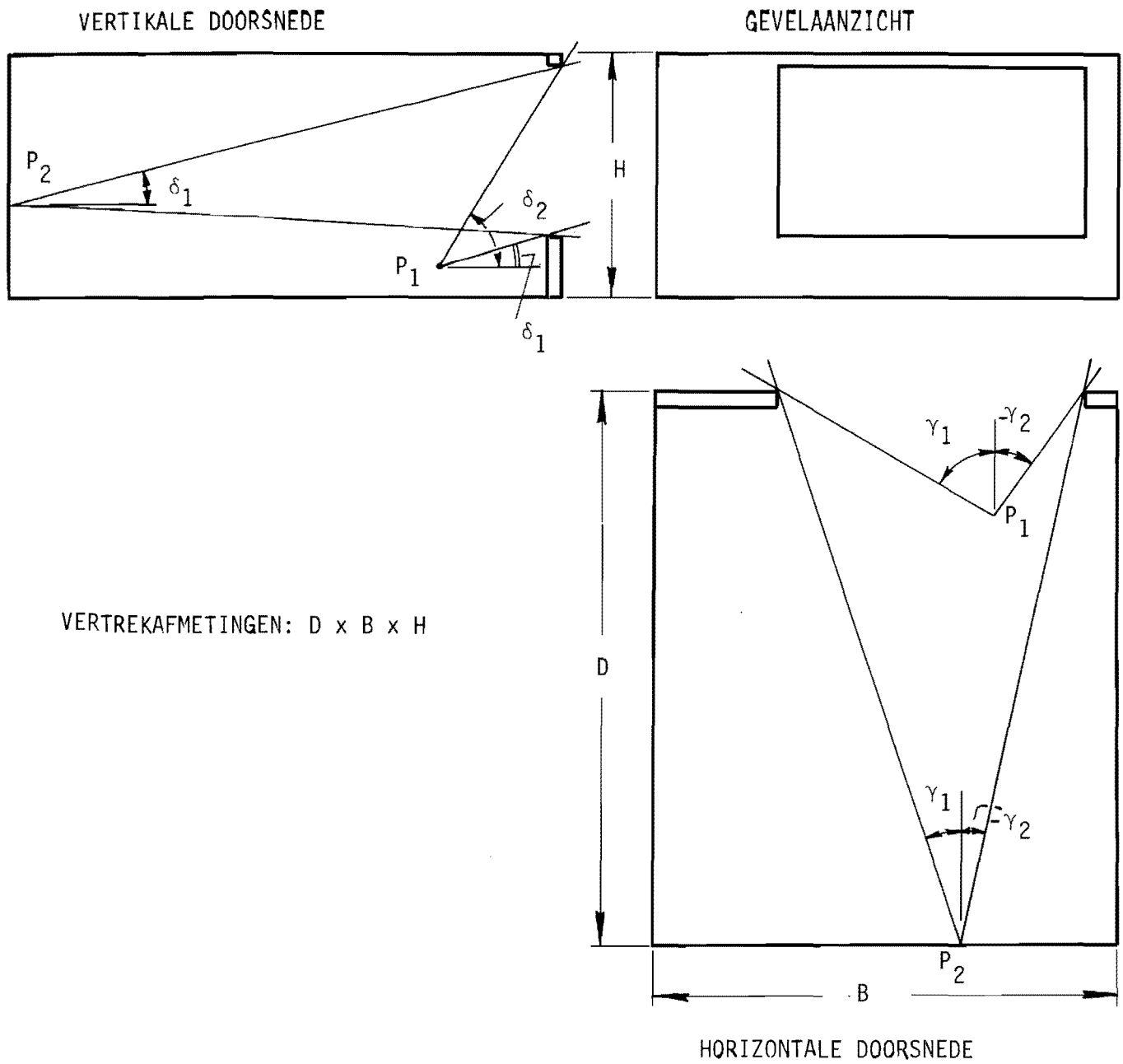
Voorbeeld 6.1

Gevraagd wordt de verlichtingssterkte te bepalen in punt P_1 dat in het horizontale vlak is gelegen.

Uitgegaan moet worden van de CIE-hemel. *Zie figuur 6.17.*

Gegeven is nog dat er geen belemmerende gebouwmassa's aanwezig zijn en dat in het vrije veld geldt:

$$E_{\text{hor}} = 5000 \text{ lux}$$



Figuur 6.17. Positie van de punten P_1 en P_2 in een gegeven vertrek.

Om de gestelde vraag te kunnen beantwoorden, moet allereerst de waarde worden bepaald van de hoeken γ_1 , γ_2 , δ_1 en δ_2 , die gelden voor punt P_1 .

In het daglichtdiagram dat is afgebeeld in *figuur 6.18* worden deze waarden uitgezet en wordt de projectie van het raamvlak getekend.

Binnen de projectie van het raamvlak blijken nu 225 stippen te liggen. Dit betekent dus dat de horizontale verlichtingssterkte in punt P_1 gelijk is aan:

$$E_{\text{hor}} = 225 \cdot (1/1600) \cdot (E_{\text{hor}})_{\text{vrije veld}}$$

$$= 225 \cdot (1/1600) \cdot 5000 = 703 \text{ lux}$$

Voorbeeld 6.2.

Gevraagd wordt nu de verlichtingssterkte in het punt P_2 dat is gelegen in het verticale vlak, wanneer moet worden uitgegaan van de egale hemel.

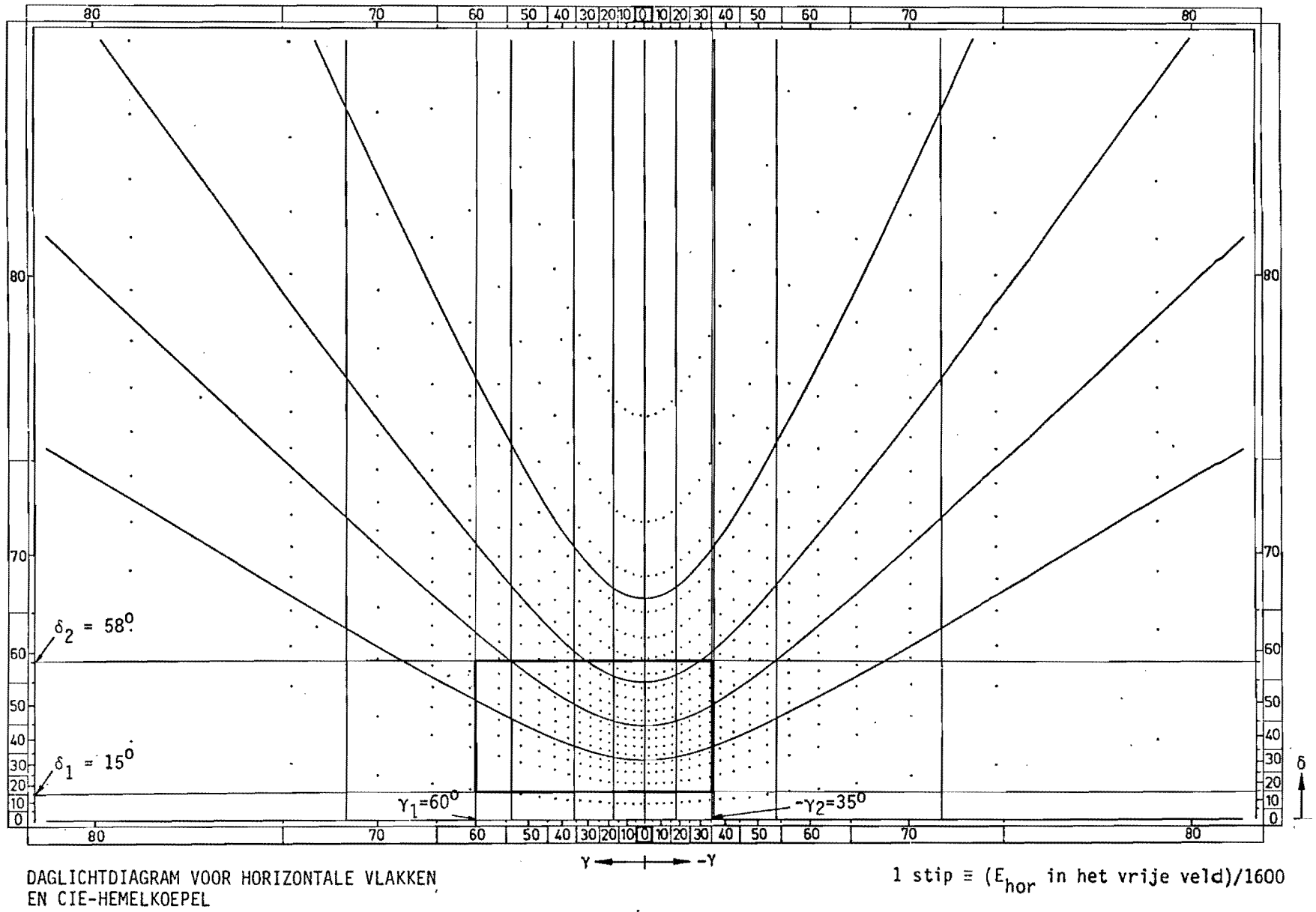
Ook nu geldt dat in het vrije veld $E_{\text{hor}} = 5000 \text{ lux}$

De te volgen werkwijze is geheel gelijk aan die in *voorbeeld 6.1*. Het enige verschil is dat nu moet worden uitgegaan van het daglichtdiagram voor verticale verlichtingssterkten tengevolge van de egale hemel. *Zie figuur 6.19*.

Voor de gevraagde verlichtingssterkte wordt nu gevonden (60 stippen):

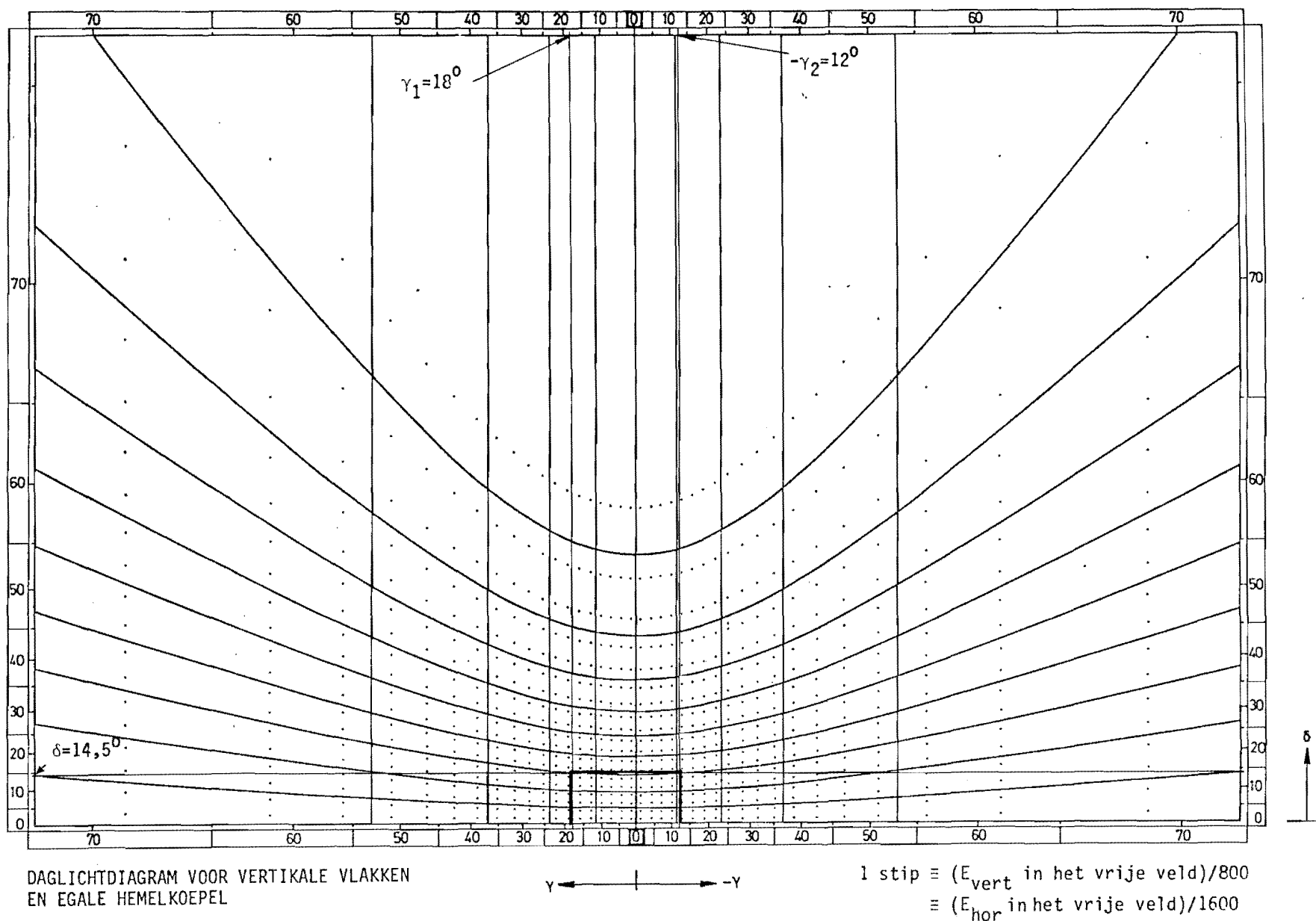
$$E_{\text{vert}} = 60 \cdot (1/800) \cdot (E_{\text{vert}})_{\text{vrije veld}}$$

$$= 60 \times (1/1600) \cdot (E_{\text{hor}})_{\text{vrije veld}} = 187,5 \text{ lux}$$



Figuur 6.18. Projectie van het raamvlak - zoals dat vanuit punt P_1 wordt gezien - op het daglichtdiagram voor horizontale verlichtingssterkten t.g.v. een CIE-hemel

Figuur 6.19. Projectie van het raamvlak - zoals dat vanuit punt P₂ wordt gezien - op het daglichtdiagram voor verticale verlichtingssterkten t.g.v. een egale hemel.



6.4. Dagverlichting in de gebouwde omgeving

Allereerst wordt ingegaan op het feit dat de hoeveelheid daglicht, die in de gebouwde omgeving in een gegeven punt wordt ontvangen, niet uitsluitend afkomstig is van de zichtbare hemelkoepel.

Hierop aansluitend wordt ingegaan op de grootheden "hemelfactor" en "daglicht-faktor", die worden gehanteerd als maat voor de ontvangen hoeveelheid daglicht.

6.4.1. Algemeen

In de gebouwde omgeving zal de verlichtingssterkte in een punt in het algemeen niet gelijk zijn aan de verlichtingssterkte, die uitsluitend het gevolg is van de zichtbare hemelkoepel. Dit gegeven wordt allereerst veroorzaakt door het feit dat de obstakels, die een gedeelte van de hemelkoepel aan het oog onttrekken, door de hemelkoepel worden "verlicht" en een gedeelte van deze hoeveelheid invallend daglicht reflektieren.

Een deel van deze gereflekteerde lichtstroom bereikt het punt waarin de verlichtingssterkte moet worden bepaald en levert dus een "extra" bijdrage tot de verlichtingssterkte. Om misverstanden te voorkomen wordt nog opgemerkt dat in veel gevallen de genoemde obstakels zullen bestaan uit omringende gebouwmassa's. Wanneer echter vanuit een vertrek wordt gekeken, moeten ook de het vertrek omhullende vlakken (wanden, vloer en plafond) als belemmerende - in principe daglicht reflektierende - obstakels worden opgevat.

Bij de bepaling van verlichtingssterkten in een vertrek kan als tweede oorzaak worden genoemd de reductie van de op het raamvlak vallende lichtstroom tengevolge van reflectie en absorptie ter plaatse van het aanwezige glas.

6.4.2. Hemelfaktor

De hemelfaktor is als volgt gedefinieerd:

"onder de hemelfaktor wordt verstaan het verhoudingsgetal dat ontstaat door de waarde die in de gebouwde omgeving wordt gevonden voor de verlichtingssterkte in een punt van een willekeurig plat vlak - uitsluitend tengevolge van de zichtbare, egale hemelkoepel en zonder rekening te houden met reducties ter plaatse van raamopeningen en reflectiebijdragen - te delen door de waarde van de verlichtingssterkte in het vrije veld op een horizontaal vlak tengevolge van dezelfde egale hemel".

Wanneer de genoemde verlichtingssterkte in de gebouwde omgeving wordt aangeduid met $E_{z.h.}$ (z.h. = zichtbare hemelkoepel) dan kan met behulp van (6.16) deze definitie in formulevorm worden geschreven als:

$$h.f. = E_{z.h.}/E_{hor(vrije\ veld)} = E_{z.h.}/\pi L_o \quad (6.20)$$

Met behulp van daglichtdiagrammen kan voor de in *figuur 6.17* gegeven punten P_1 en P_2 de hemelfaktor worden bepaald. Gebruikmakend van *figuur 6.18* wordt nu gevonden voor punt P_1 :

$$\begin{aligned} h.f. &= E_{hor(P_1)}/E_{hor(v.v)} \\ &= 253 \cdot (1/1600) \equiv 15,8\% \end{aligned}$$

Voor punt P_2 wordt met behulp van *figuur 6.19* en (6.17) gevonden:

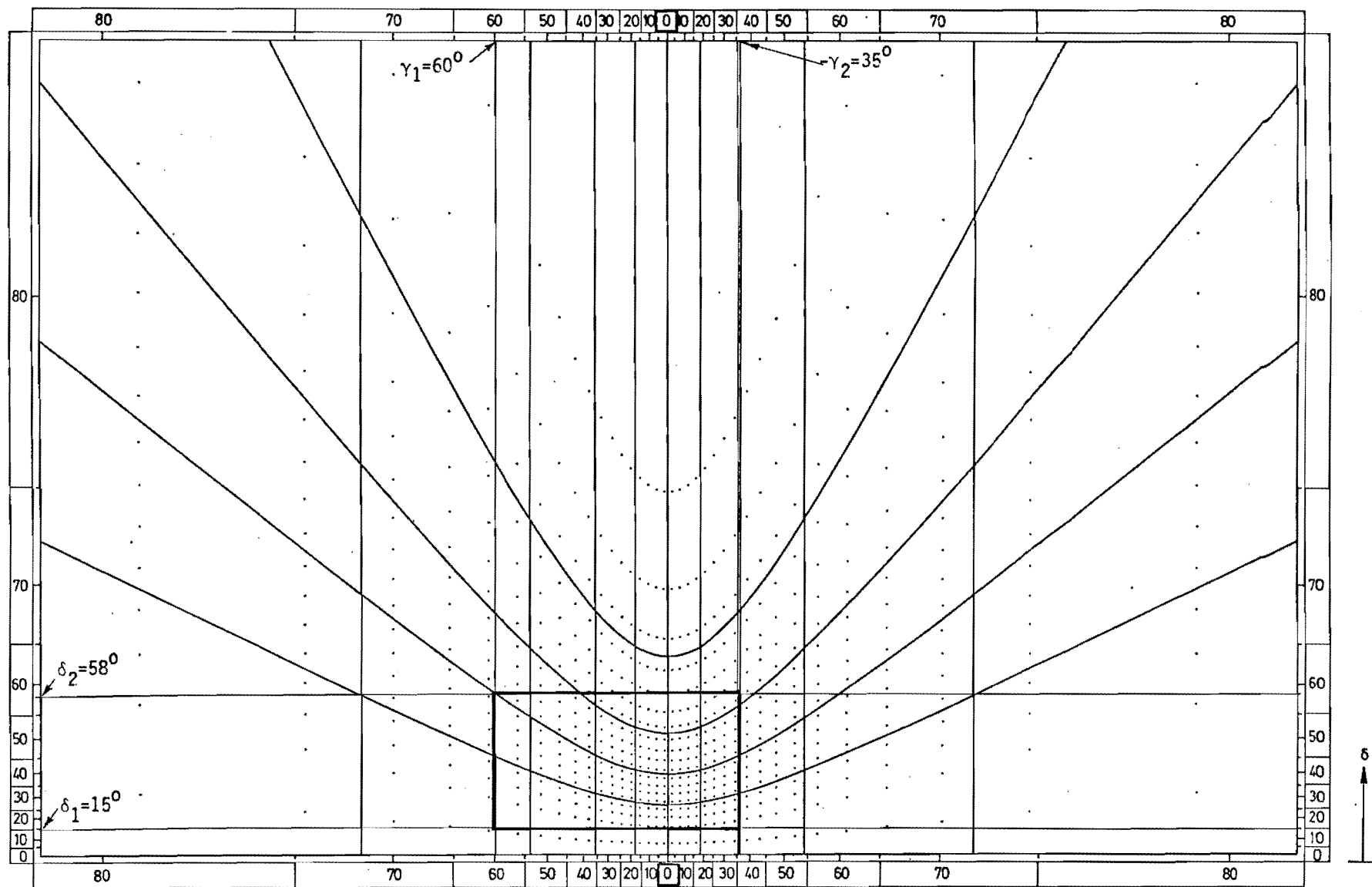
$$\begin{aligned} h.f. &= E_{vert(P_2)}/E_{hor(v.v)} \\ &= 60 \cdot (1/800) \cdot E_{vert(v.v)}/E_{hor(v.v)} \\ &= 60 \cdot (1/1600) \equiv 3,75\% \end{aligned}$$

6.4.3. Daglichtfaktor

Bij de hierna te definiëren daglichtfaktor wordt eveneens de verlichtingssterkte in de gebouwde omgeving vergeleken met de horizontale verlichtingssterkte in het vrije veld. De definitie luidt als volgt:

"onder de daglichtfaktor wordt verstaan het verhoudingsgetal dat ontstaat door de waarde, die in de gebouwde omgeving wordt gevonden voor de verlichtingssterkte in een punt van een willekeurig vlak - zowel tengevolge van de zichtbare CIE-hemel als tengevolge van de door obstakels gereflecteerde hoeveelheid daglicht en rekening houdend met reducties ter plaatse van de raamopeningen - te delen door de waarde van de verlichtingssterkte in het vrije veld op een horizontaal vlak tengevolge van dezelfde CIE-hemel".

Om de definitie in formulevorm te kunnen weergeven, moet eerst de lichtstroom naar het bekeken punt, dat ontstaat tengevolge van daglicht dag door de gebouwde



DAGLICHTDIAGRAM VOOR HORIZONTALE VLAKKEN
EN EGALE HEMELKOEPEL

$\gamma \leftarrow \rightarrow -\gamma$

1 stip $\equiv (E_{\text{hor}} \text{ in het vrije veld})/1600$

γ en δ in graden

Figuur 6.20. Projectie van gegeven raamopening in daglicht-
diagram voor horizontale verlichtingssterkten
t.g.v. egale hemel

omgeving wordt gereflekteerd, nader worden bekeken. Deze gereflekteerde lichtstroom wordt opgesplitst in twee delen.

Als eerste kan worden genoemd de bijdrage tengevolge van zogenaamde "externe reflecties". Hieronder wordt de bijdrage verstaan, die door buiten een vertrek gelegen obstakels tengevolge van reflecties wordt geleverd. Deze bijdrage tot de verlichtingssterkte wordt aangeduid met $E_{e.r.}$.

De tweede bijdrage komt tot stand doordat de totale hoeveelheid daglicht, die op punten in wanden, vloer en plafond valt, een gedeelte wordt gereflekteerd in de richting van het bekeken punt.

Deze bijdrage tengevolge van zogenaamde "interne reflecties" wordt aangeduid met $E_{i.r.}$.

Voor de uiteindelijke verlichtingssterkte in een punt P kan nu worden geschreven:

$$E_p = (E_{z.h.} + E_{e.r.}) \cdot c_r + E_{i.r.} \quad (6.21)$$

met:

$E_{z.h.}$: verlichtingssterkte tengevolge van de zichtbare hemelkoepel

$E_{e.r.}$: verlichtingssterkte tengevolge van reflecties van buiten een vertrek gelegen obstakels.

$E_{i.r.}$: verlichtingssterkte tengevolge van reflecties van binnen een vertrek gelegen obstakels (in het algemeen wanden, vloer en plafond).

c_r : reductiefactor tengevolge van belemmeringen ter plaatse van raamopening (glas, vuil, e.d.).

Reële c_r -waarden zijn:

- voor enkel glas : 0,85 à 0,90
- voor dubbel glas : 0,70 à 0,80
- vuil op glasvlakken : 0,50 à 0,90

Met behulp van (6.21) kan nu de daglichtfactor in formulevorm worden geschreven als:

$$d.f. = \frac{E_p}{E_{hor(v.v)}} = (d_h + d_{e.r.}) \cdot c_r + d_{i.r.} \quad (6.22)$$

met:

$$d_h = E_{z.h.} / E_{hor(v.v)} \quad (6.23)$$

$$d_{e.r.} = E_{e.r.}/E_{hor(v.v)} \quad (6.24)$$

$$d_{i.r.} = E_{i.r.}/E_{hor(v.v)} \quad (6.25)$$

De grootheid d_h wordt "hemelkomponent" genoemd en geeft dus aan welke bijdrage door de zichtbare CIE-hemelkoepel aan de daglichtfaktor wordt geleverd wanneer ter plaatse van de raamopening geen reductie zou plaatsvinden. De grootheden $d_{e.r.}$ en $d_{i.r.}$ stellen de bijdragen voor aan de daglichtfaktor, die het gevolg zijn van respectievelijk externe- en interne reflecties.

De hemelkomponent wordt bepaald met behulp van daglichtdiagrammen. Voor het in *figuur 6.17* getekende punt P_1 wordt voor een horizontaal vlak gevonden:

$$\begin{aligned} d_h &= E_{z.h}/E_{hor(v.v)} \\ &= 225 \cdot (1/1600) \equiv 14,06 \% \end{aligned}$$

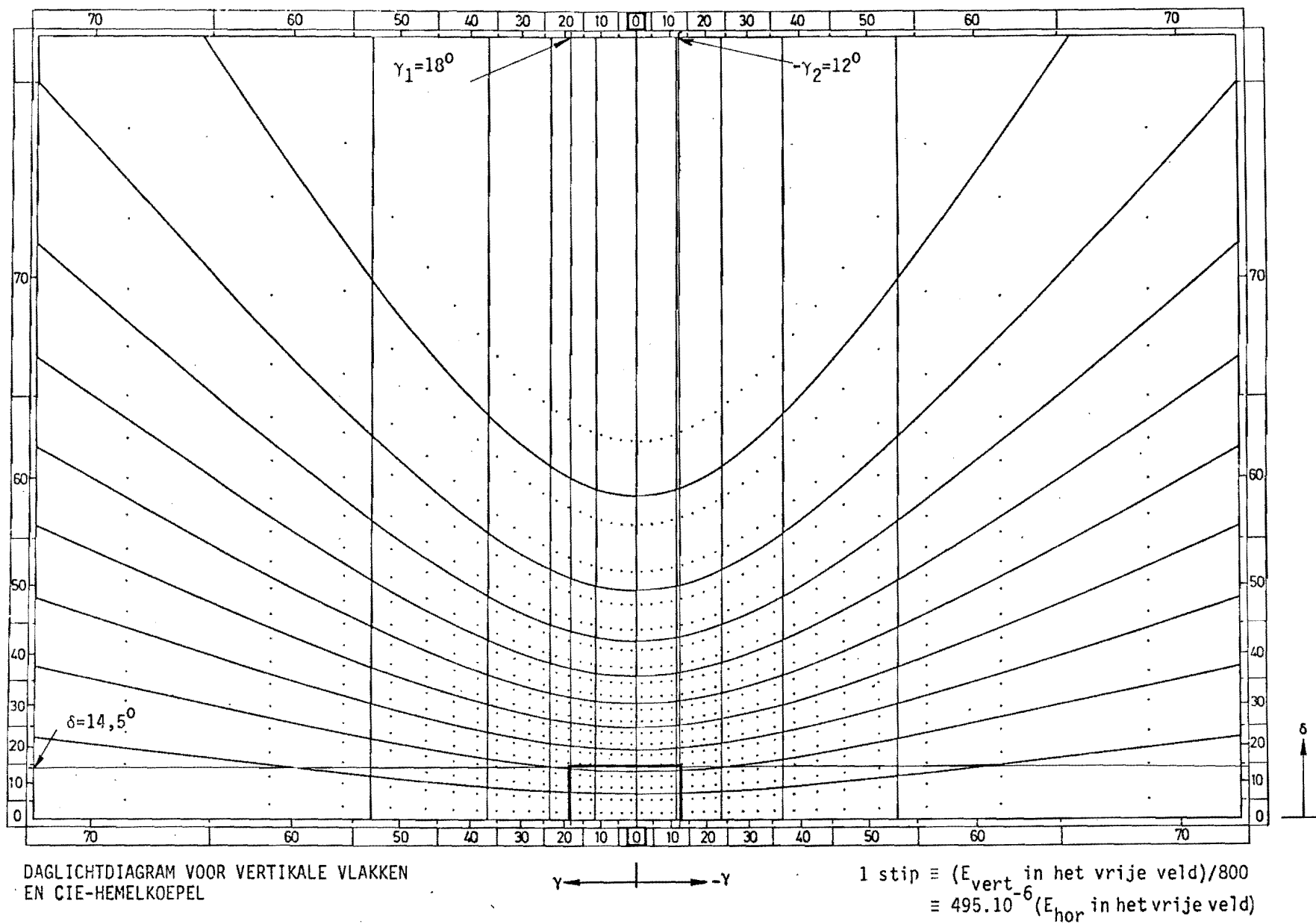
Zie figuur 6.18

Voor de hemelkomponent van het in het verticale vlak gelegen punt P_2 (*zie eveneens figuur 6.17*) wordt met behulp van het daglichtdiagram en met behulp van (6.19) gevonden:

$$\begin{aligned} d_h &= E_{z.h}/E_{hor(v.v)} \\ &= 40 \cdot (1/800) \cdot E_{vert(v.v)}/E_{hor.(v.v)} \\ &= 40 \cdot (1/800) \cdot 0,396 \equiv 1,98 \% \end{aligned}$$

Zie figuur 6.21

Voor de bepaling van de "externe reflectiecomponent" $d_{e.r.}$ moet strikt genomen allereerst in elk punt van de belemmerende obstakels de luminantie worden bepaald. Daarna moet dan de bijdrage van deze obstakels - waarvan dus de luminantie van punt tot punt varieert - tot de verlichtingssterkte worden berekend. Om in de ontwerppraktijk op eenvoudige en niet-tijdrovende wijze een goede indruk te krijgen van $d_{e.r.}$ wordt eenvoudig gesteld dat de luminantie van deze obstakels 0,1 à 0,2 bedraagt van de hemelkoepel, die achter deze obstakels is gelegen.



Figuur 6.21. Projectie van gegeven raamopening in daglichtdiagram voor verticale verlichtingssterkte t.g.v. een CIE-hemel.

Dit betekent dus dat $d_{e.r.}$ wordt gevonden door met behulp van een daglichtdiagram de hemelkomponent te bepalen van het gedeelte van de hemelkoepel, dat door obstakels aan het oog wordt onttrokken, en de uitkomst te vermenigvuldigen met 0,1 à 0,2.

Aan het eind van deze paragraaf zal in een voorbeeld een en ander worden geïllustreerd.

De bijdrage van de "interne reflektiecomponent" $d_{i.r.}$ kan alleen met behulp van bestaande komputerprogramma's met grote nauwkeurigheid worden bepaald. Zie bijvoorbeeld (28) en (29). Omdat ontwerpers nagenoeg nooit in het bezit zijn van deze programma's kan - wanneer dit noodzakelijk is - gebruik worden gemaakt van tabellen voor het verkrijgen van een voldoende nauwkeurige indruk. *Zie bijvoorbeeld tabel 6.1.*

70% plafondreflektie

Verhouding glasopp. tot vloeropp.	Reflektiefactor vloer											
	10%				20%				40%			
	Reflektiefactor wanden											
	20%	40%	60%	80%	20%	40%	60%	80%	20%	40%	60%	80%
1 : 50	-	-	0,1	0,2	-	0,1	0,1	0,2	-	0,1	0,2	0,2
1 : 20	0,1	0,1	0,2	0,4	0,1	0,2	0,3	0,5	0,1	0,2	0,4	0,6
1 : 14	0,1	0,2	0,3	0,5	0,1	0,2	0,4	0,6	0,2	0,3	0,6	0,8
1 : 10	0,1	0,2	0,4	0,7	0,2	0,3	0,6	0,9	0,3	0,5	0,8	1,2
1 : 6,7	0,2	0,4	0,6	1,0	0,2	0,5	0,8	1,3	0,4	0,7	1,1	1,7
1 : 5	0,2	0,5	0,8	1,4	0,3	0,6	1,1	1,7	0,5	0,9	1,5	2,3
1 : 4	0,3	0,6	1,0	1,7	0,4	0,8	1,3	2,0	0,6	1,1	1,8	2,8
1 : 3,3	0,3	0,7	1,2	2,0	0,5	0,9	1,5	2,4	0,8	1,3	2,1	3,3
1 : 2,9	0,4	0,8	1,4	2,3	0,5	1,0	1,8	2,8	0,9	1,5	2,4	3,8
1 : 2,5	0,5	0,9	1,6	2,6	0,6	1,2	2,0	3,1	1,0	1,7	2,7	4,2
1 : 2,2	0,5	1,0	1,8	2,9	0,7	1,3	2,2	3,4	1,2	1,9	3,0	4,6
1 : 2	0,6	1,1	1,9	3,1	0,8	1,4	2,3	3,7	1,3	2,1	3,2	4,9

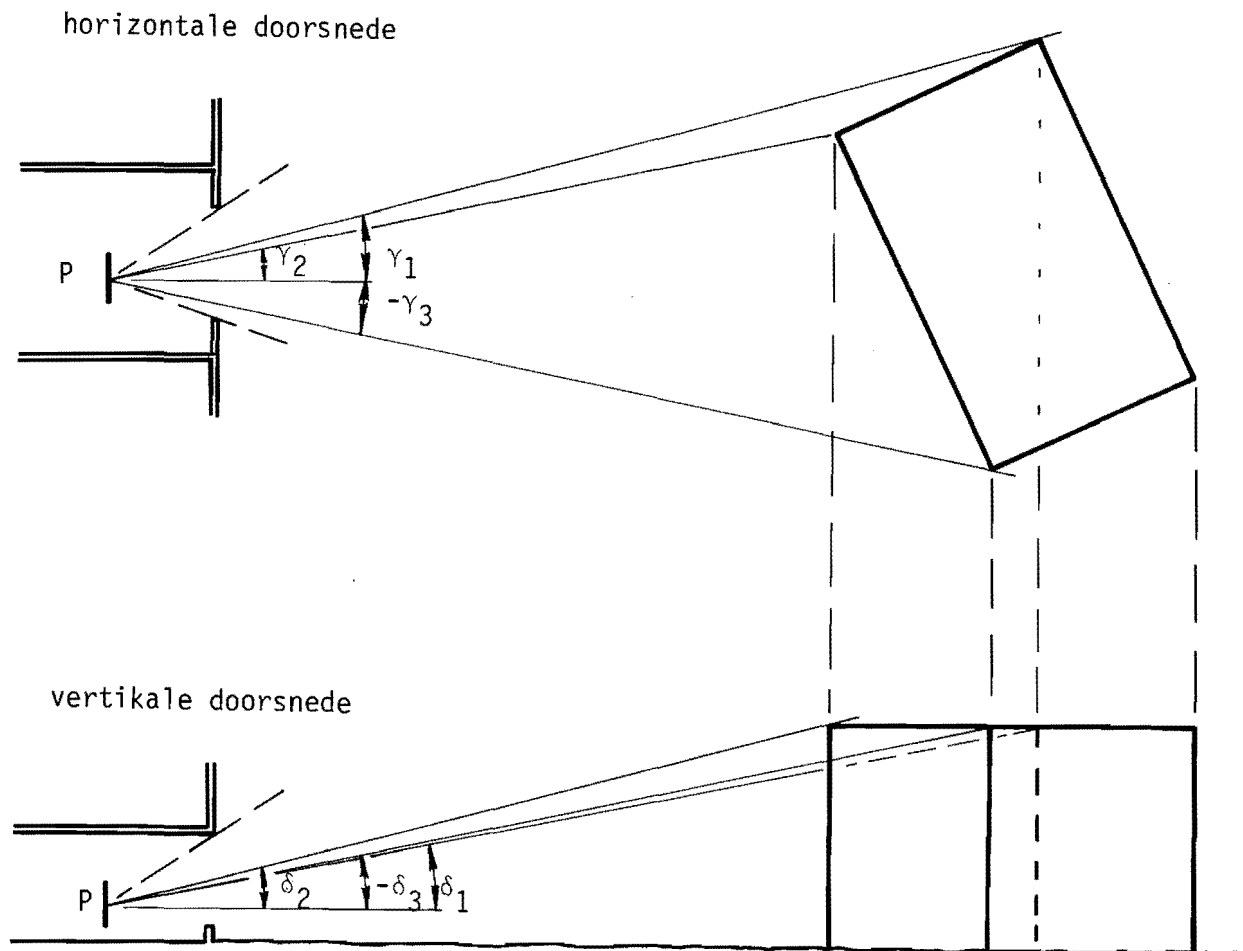
Tabel 6.1. Globale waarden voor de interne reflektiecomponent, uitgedrukt in procenten.

Voorbeeld 6.3

Gevraagd wordt om in de in *figuur 6.22* getekende situatie de daglichtfaktor te bepalen voor een punt P, dat in een vertikaal vlak evenwijdig aan de raamopening is gelegen. Van het daglicht dat op de raamopening valt wordt 80% doorgelaten.

De bijdrage $d_{i,r}$ kan worden verwaarloosd.

De luminantie van het gebouw bedraagt 10% van de luminantie van de daarachter liggende hemelkoepel.



Figuur 6.22. Positie van punt P in een gegeven situatie.

In *figuur 6.23* is te zien hoe raamopening en het belemmerende gebouw in het daglichtdiagram zijn geprojecteerd.

Voor de hemelkomponent wordt nu gevonden:

$$\begin{aligned} d_h &= 160 \cdot (1/800) \cdot E_{\text{vert}(v.v)}/E_{\text{hor}(v.v)} \\ &= 160 \cdot (1/800) \cdot 0,396 \equiv 7,92 \% \end{aligned}$$

De extreme reflektiekomponent bedraagt:

$$d_{e.r} = 34 \cdot (1/800) \cdot 0,396 \cdot 0,1 \equiv 0,16 \%$$

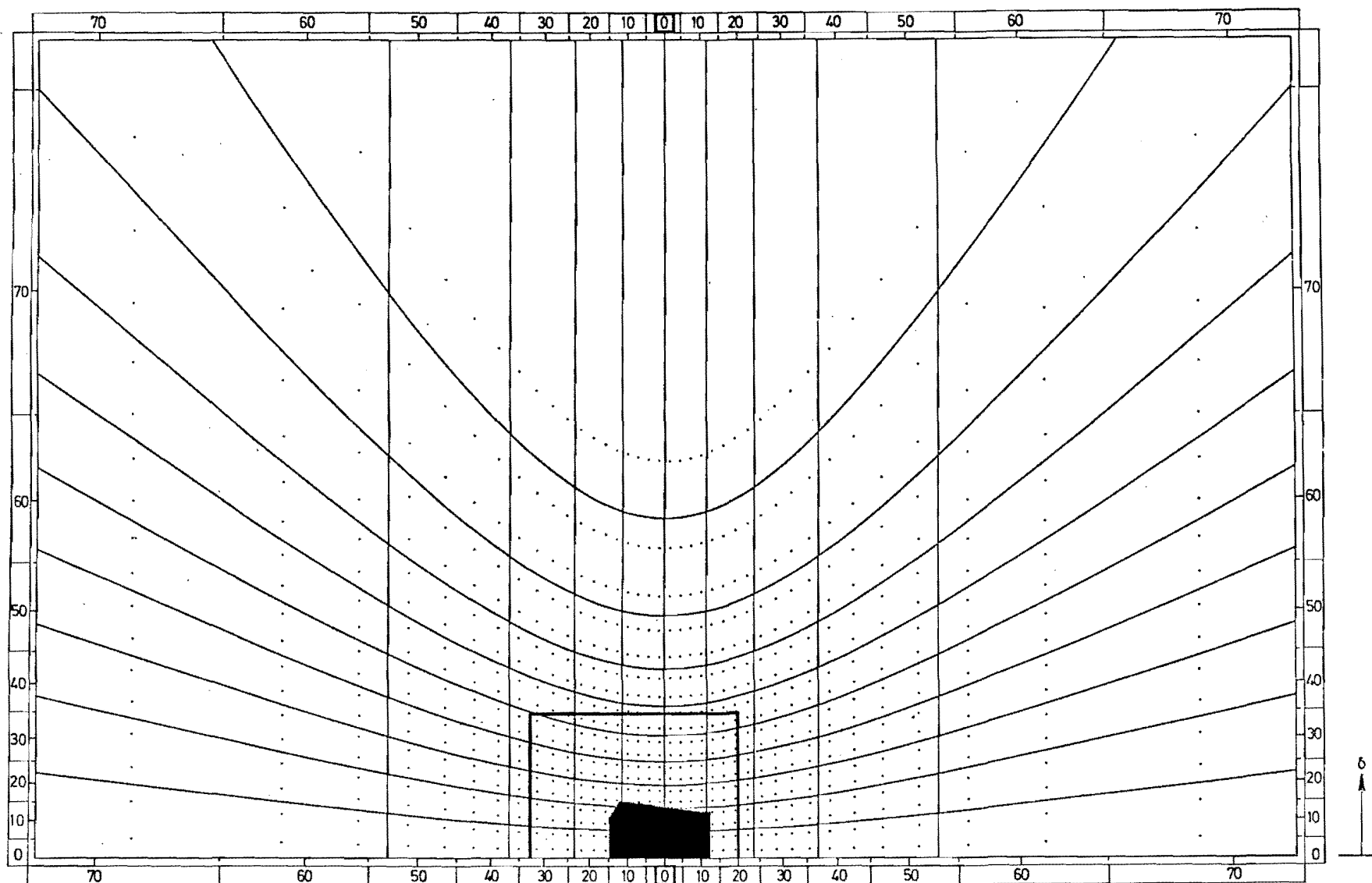
De daglichtfaktor is nu gelijk aan:

$$\begin{aligned} d.f &= (d_h + d_{e.r}) \cdot c_r + d_{i.r} \\ &= (7,92 + 0,16) \cdot 0,8 = 6,46 \% \end{aligned}$$

6.4.4. Opmerkingen en konklusies

Met betrekking tot de invloed van ontwerpbeslissingen op hemelfaktor en daglichtfaktor

1. Met behulp van de besproken daglichtdiagrammen kan tijdens het ontwerpproces de invloed van vorm, afmetingen, oriëntatie en plaatsing van gebouwmassa's op de daglichttoetreding worden nagegaan.
Omdat beslissingen ten aanzien van deze factoren in de meeste gevallen door stedenbouwkundig ontwerpers wordt genomen, zijn zij degenen - die al dan niet bewust - de mate van daglichttoetreding bepalen.
2. Eveneens kan de invloed van vorm, afmetingen en plaatsing van de raamopening(en) en de invloed van het gekozen type glaskonstruktie op de daglichttoetreding worden bepaald.
Deze door de architect gekozen oplossingen zijn niet alleen van belang voor de daglichttoetreding maar zijn bovendien van invloed op zaken als opwarming van vertrekken onder invloed van binnenkomende zonnestraling en op de energiebehoefte van het gebouw.



DAGLICHTDIAGRAM VOOR VERTIKALE VLAKKEN
EN CIE-HEMELKOEPEL

$\gamma \leftarrow \rightarrow -\gamma$

1 stip $\equiv (E_{\text{vert}} \text{ in het vrije veld})/800$
 $\equiv 495 \cdot 10^{-6} (E_{\text{hor}} \text{ in het vrije veld})$

γ en δ in graden

Figuur 6.23. Projectie van rammopening en gebouw in het daglichtdiagram voor verticale verlichtingssterkte t.g.v. een CIE-hemel.

Opgemerkt wordt nog dat ook de keuze ten aanzien van vorm en afmetingen van de vertrekken en tengevolge van de afwerking van wanden, vloer en plafond van invloed is op de "interne reflektiecomponent" en dus op de daglichtfaktor. Deze bijdrage is moeilijk met grote nauwkeurigheid te bepalen en hangt bovendien sterk af van de "aankleding" van het vertrek. Een nauwkeurige bepaling ervan is in het ontwerpstadium dan ook meestal niet noodzakelijk.

Met betrekking tot de noodzaak van hemelfaktor en daglichtfactorbepalingen

1. In Nederlandse, en ook Duitse dagverlichtingsnormen (respektievelijk V1069 en DIN5034) worden eisen gesteld aan respektievelijk hemel- en daglichtfaktor. Gezien de hiervoor genoemde invloed van een groot aantal ontwerpbeslissingen op hemel- en daglichtfaktor is het voor de ontwerper van belang dat hij in een vroeg stadium van zijn ontwerp kan bepalen of aan deze eisen is voldaan. In enkele gevallen (bijvoorbeeld bij de keuring van vleeswaren) zullen aan de daglichttoetreding hoge eisen worden gesteld. Bepaling van genoemde factoren is dan een noodzaak.
2. Voor enkele gebieden op aarde is het mogelijk een goede schatting te maken van het gemiddeld aantal uren waarin gedurende een (normale) werkdag gebruik moet worden gemaakt van kunstverlichting om aan een gegeven verlichtingseis te voldoen. Omdat dit aantal uren afhangt van de hemel- of daglichtfaktor is het zaak deze factoren te kunnen bepalen. Aan de hand van een voorbeeld zal een en ander worden geïllustreerd.

Voorbeeld 6.4.

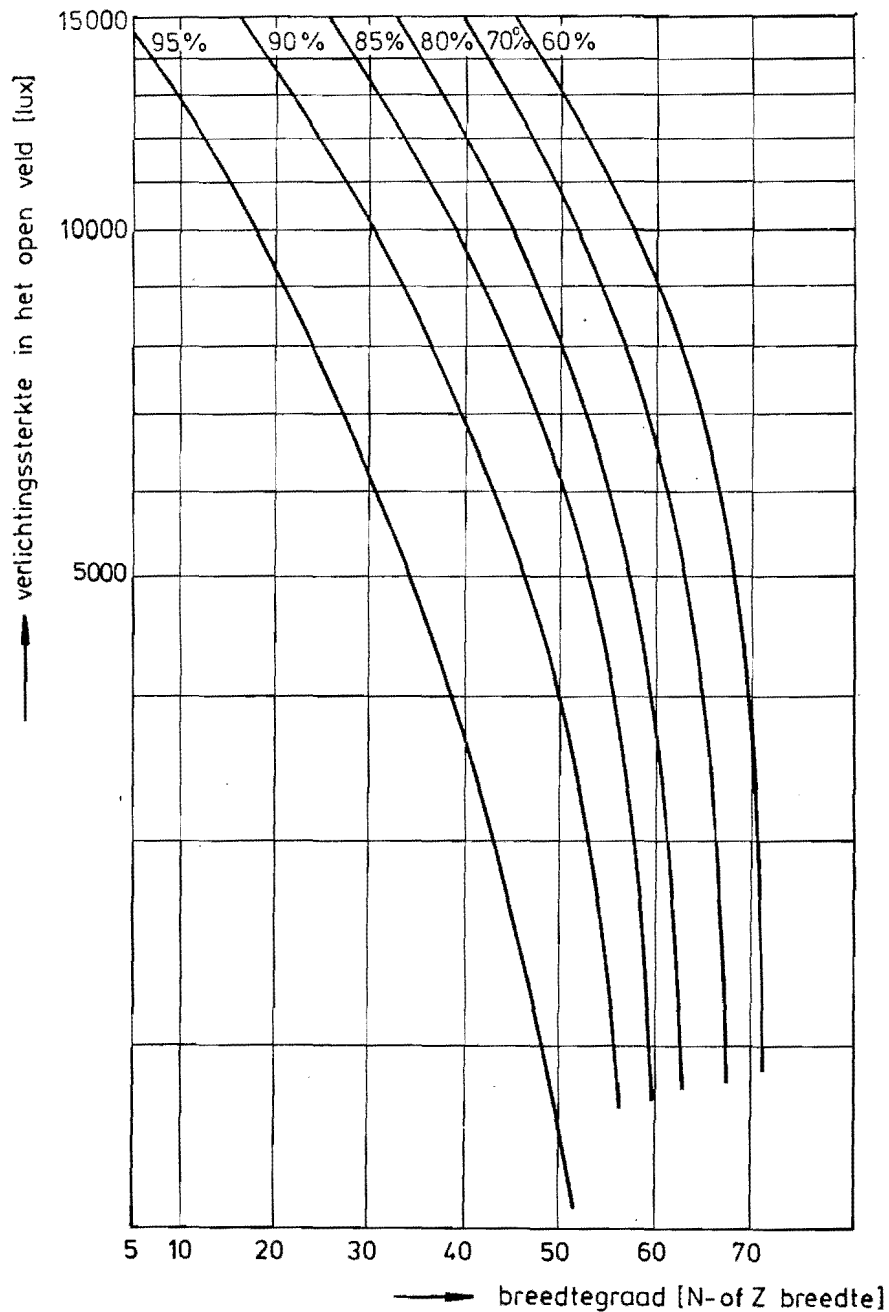
Gegeven is dat de daglichtfaktor in een punt P gelijk is aan $df = 0,05$. Geëist wordt dat in dit punt een verlichtingssterkte wordt gehaald gelijk aan $E_p = 500 \text{ lux}$.

Uit het gegeven volgt dat in het vrije veld op een horizontaal vlak een verlichtingssterkte moet worden gehaald van tenminste:

$$E_{\text{hor(v.v)}} = E_p / (d.f) = 500 / 0,05 = 10.000 \text{ lux}.$$

Uit *figuur 6.24* is af te lezen dat voor onze breedtegraad (52° N.B.) deze waarde ongeveer 70% van de arbeidstijd wordt overschreden.

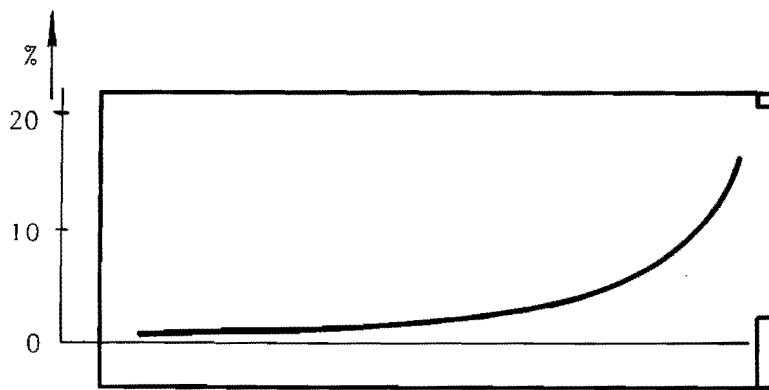
Dit betekent dus dat 30% van de arbeidstijd aanvullende kunstverlichting is vereist.



Figuur 6.24. Overschrijdingskans van gegeven verlichtingssterkten als functie van de breedtegraad.

Wanneer nu bijvoorbeeld door andere keuze van werkplek en raamopening de daglichtfaktor toeneemt tot $d.f = 0,07$, wordt op dezelfde manier gevonden dat nu in plaats van 30% slechts 20% van de arbeidstijd kunstverlichting is vereist.

3. In zeer veel situaties geldt dat het glaspercentage in gevels zo laag mogelijk moet worden gehouden om de energiebehoefte van gebouwen te beperken. Met behulp van daglichtdiagrammen kan nu eenvoudig worden bepaald hoever met het verkleinen van glasvlakken kan worden gegaan zodanig dat er nog voldoende daglichting in de vertrekken zal optreden.
4. Ook voor het verkrijgen van een nauwkeurige indruk van de vertrekdiepte, die uit oogpunt van dagverlichting maximaal mogelijk is, is de bepaling van hemel- en daglichtfaktor een noodzaak. Het verloop van de hemelfaktor en hemelkomponent is schetsmatig weergegeven in *figuur 6.26*.



Figuur 6.25. Schetsmatig verloop van hemelfaktor of hemelkomponent op gegeven hoogte met de vertrekdiepte.

Met betrekking tot "dagverlichting" in het algemeen

1. In een zogenaamde "daglichtkamer" kan een zeer goede indruk worden verkregen van de mate waarin - en de wijze waarop - dagverlichting bijdraagt tot de verlichting in vertrekken.
Door de vakgroep Bouwfysica wordt in een dergelijke daglichtkamer, die op de Afdeling Bouwkunde is geplaatst, dagverlichtingsonderzoek verricht.
Zie bijvoorbeeld (30).
2. Voor daglichtberekeningen in de tropen wordt gebruik gemaakt van een andere werkwijze. *Zie hiervoor (31).*
3. In diverse landen wordt gebruik gemaakt van diagrammen, die er anders uitzien dan de hier besproken daglichtdiagrammen, maar min of meer op hetzelfde principe berusten.

4. Omdat ontwerpers in de praktijk veelvuldig worden gekonfronteerd met bestaande normen, zou het niet onlogisch zijn wanneer in een aparte paragraaf de nodige aandacht aan de eerder genoemde voornorm V1069 werd besteed.

De reden dat dit (nog) niet is gedaan, is gelegen in het feit dat door een ingestelde normkommissie wordt gewerkt aan de opzet van een totaal nieuwe norm met betrekking tot dagverlichting omdat de V1069, die ruim 25 jaar geleden tot stand is gekomen, niet meer voldeed.

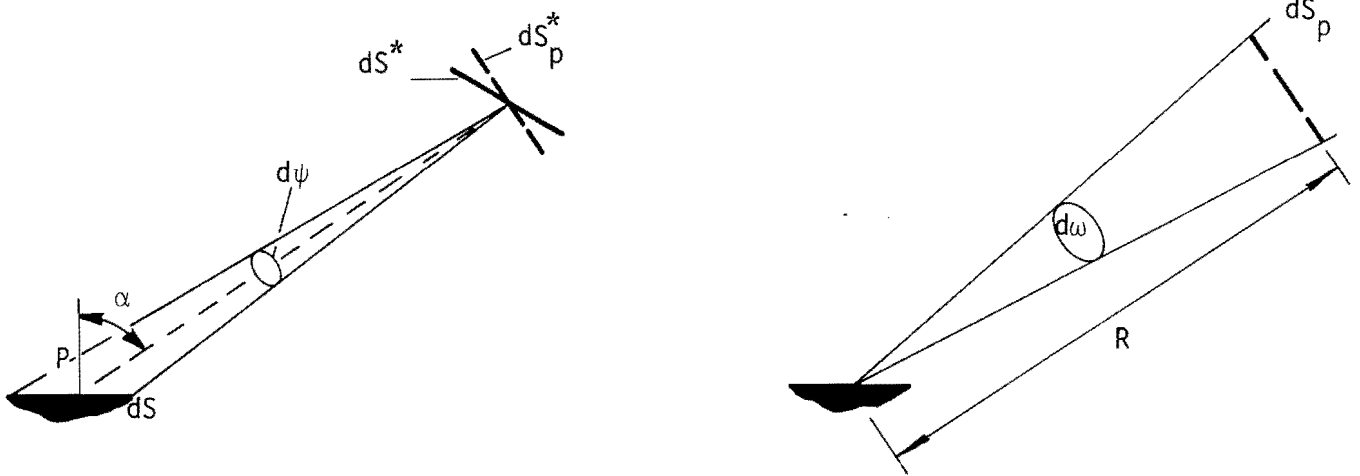
Zodra de nieuwe norm gestalte heeft gekregen, zal hieraan binnen de hier besproken stof de nodige aandacht worden besteed.

APPENDIX 6.A AFLEIDING VAN DE UITDRUKKING VOOR DE LICHTSTROOM VANAF EEN OPPERVLAKTE-ELEMENTJE dS^* NAAR EEN GEGEVEN PUNT P.

De lichtstroom vanaf het oppervlakte-elementje dS^* in de richting van punt P is volgens (6.3) gelijk aan:

$$d^2\Phi = L(\alpha, \beta) dS_p^* d\psi \quad (A.1)$$

Zie ook *figuur 6.A.1*.



Figuur 6.A.1 De oppervlakte-elementjes dS^* en dS , die respectievelijk een lichtstroom uitzenden en ontvangen.

Voor dS_p^* kan worden geschreven:

$$dS_p^* = R^2 d\omega \quad (A.2)$$

Evenzo geldt:

$$d\psi = \cos \alpha dS / R^2 \quad (A.3)$$

Substitutie van (A.2) en (A.3) in (A.1) levert uiteindelijk de gezochte uitdrukking:

$$d^2\Phi = L(\alpha, \beta) \cos \alpha dS d\omega$$

APPENDIX 6.B UITSCHRIJVEN VAN DE ALGEMENE UITDRUKKING (6.13)

Een eerste vereiste voor het oplossen van genoemde uitdrukking is dat de parameters θ en ω worden geschreven als functies van α en β .

Afgeleid kan worden dat geldt:

$$\cos\theta = \sin\eta \sin\alpha \cos(\xi - \beta) + \cos\eta \cos\alpha \quad (\text{B.1})$$

Hierin zijn η en ξ de hoeken waarmee in een oxyz-assenstelsel de richting van de normaalvektor op een vlakje kan worden vastgelegd.

Dit gebeurt op dezelfde wijze als het vastleggen van een gegeven richting met behulp van hoeken α en β in *figuur 6.3* (η en ξ corresponderen met respectievelijk α en β).

Voor $d\omega$ kan worden geschreven:

$$d\omega = dS/R^2 = (R d\beta \cdot R \sin\alpha d\alpha)/R^2 = \sin\alpha d\alpha d\beta \quad (\text{B.2})$$

Substitutie van (B.1) en (B.2) in (6.13) levert de gezochte uitdrukking:

$$E = \frac{Lz}{3} \int \int \left\{ (\sin\eta \sin\alpha \cos(\xi - \beta) + \cos\eta \cos\alpha) d\beta \right\} \cdot (1 + 2 \cos\alpha) \sin\alpha d\alpha \quad (\text{B.3})$$

Deze integraal is slechts in enkele gevallen op te lossen. *Zie Appendix 6C.*

APPENDIX 6C HET OPLOSSEN VAN UITDRUKKING (B.3) VOOR HORIZONTALE EN VERTIKALE
VLAKKEN IN HET "VRIJE VELD".

Horizontale vlakken

Hiervoor geldt dat $\eta = 0^0$. De hoek α loopt van 0 tot 2π en de hoek β varieert, onafhankelijk van α , van $\beta = \beta_1$ tot $\beta = \beta_1 + 2\pi$.

Voor (B.3) kan nu dus worden geschreven:

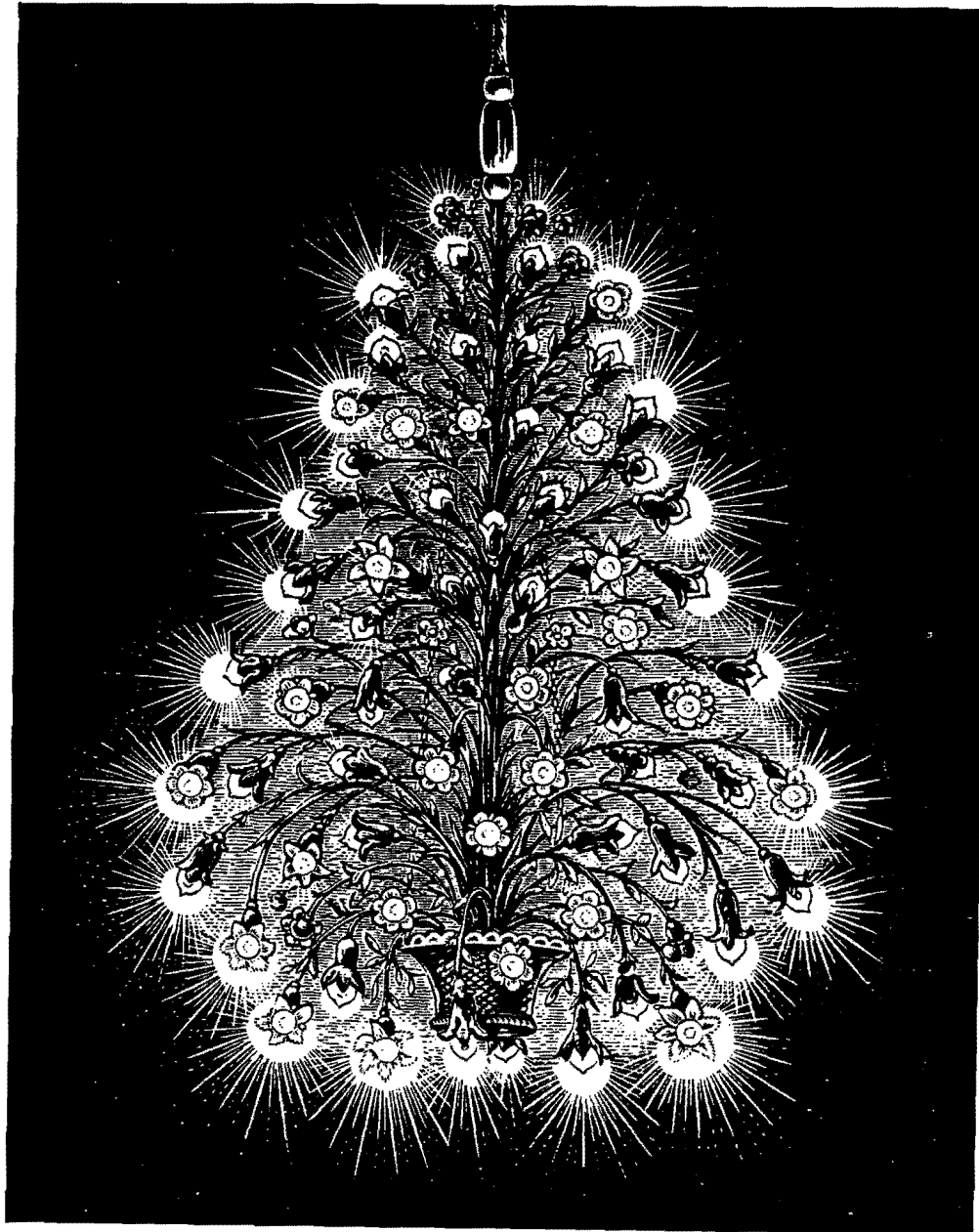
$$\begin{aligned}
 E &= \frac{L_z}{3} \int_0^{\pi/2} \left\{ \int_{\beta_1}^{\beta_1+2\pi} \cos \alpha \, d\beta \right\} \cdot (1 + 2 \cos \alpha) \sin \alpha \, d\alpha \\
 &= \frac{L_z}{3} \cdot 2\pi \int_0^{\pi/2} (1 + 2 \cos \alpha) \sin \alpha \cos \alpha \, d\alpha \\
 &= \frac{L_z}{3} \cdot 2\pi \int_1^0 (1 + 2x)x \, dx = \frac{7}{9} \pi L_z
 \end{aligned}$$

Vertikale vlakken

Hiervoor geldt dat $\eta = \pi/2$. De hoek α loopt van 0 tot $\pi/2$ en de hoek β varieert, onafhankelijk van α , van $\beta_1 = \xi - \pi/2$ tot $\beta_2 = \xi + \pi/2$.

Voor (B.3) kan nu worden geschreven:

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{L_z}{3} \int_0^{\pi/2} \left\{ \int_{\xi - \pi/2}^{\xi + \pi/2} \sin \alpha \cos(\xi - \beta) d\beta \right\} (1 + 2 \cos \alpha) \sin \alpha \, d\alpha \\
 &= \frac{L_z}{3} \cdot 2 \int_0^{\pi/2} \sin^2 \alpha (1 + 2 \cos \alpha) \, d\alpha \\
 &= \frac{L_z}{3} \cdot 2 \left\{ \int_0^{\pi/2} \frac{1 - \cos 2\alpha}{2} \, d\alpha + \int_0^{\pi/2} 2 \sin^2 \alpha \cos \alpha \, d\alpha \right\} \\
 &= \frac{L_z}{18} (3\pi + 8)
 \end{aligned}$$



Kroonluchter met honderd gloeilampen van Edison

Ontleend aan (36).

7. KUNSTVERLICHTING

7.1. Lichtbronnen

Duizenden jaren lang was alleen het vuur in de vorm van kampvuur of fakkel als kunstlichtbron bekend.

Eeuwenlang heeft men zich moeten behelpen met olielamp en vetkaars. Het lampenglas om de olienvlam, het gaskousje en de gloeilamp zijn uitvindingen van de laatste honderd jaar.

De kale vlam zendt zijn licht uit door de gloeiende roetdeeltjes met een vrij lage temperatuur. Een groot gedeelte van de stralingsenergie komt vrij in het infrarood gebied.

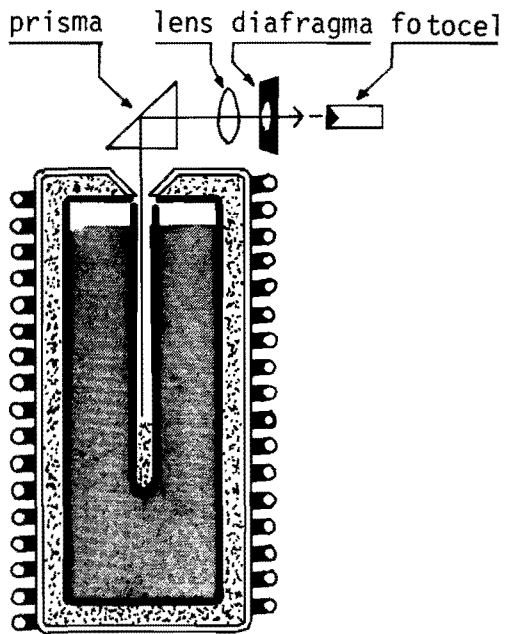
Het lampenglas om de vlam zorgt voor een betere zuurstoftoevoer, een hogere temperatuur en daardoor wat witter licht. Verdere temperatuurverhoging zou betekenen dat de roetdeeltjes volledig verbranden en niet meer in staat zijn licht uit te stralen.

Omstreeks 1880 kwam men op het idee de warmtebron en het lichtuitstralende element van elkaar te scheiden. Dit is het beginsel van het gloeikousje (Leopold Auer). Het gas brandt met een nagenoeg onzichtbare vlam, deze verhit het kousje waardoor dit met een hoge temperatuur gaat gloeien en een wit licht uitzendt. De omstreeks dezelfde tijd uitgevonden gloeilamp berust op hetzelfde principe. Een elektrische stroom wordt gevoerd door een geleidend element, een band of een draad, waardoor deze gaat gloeien.

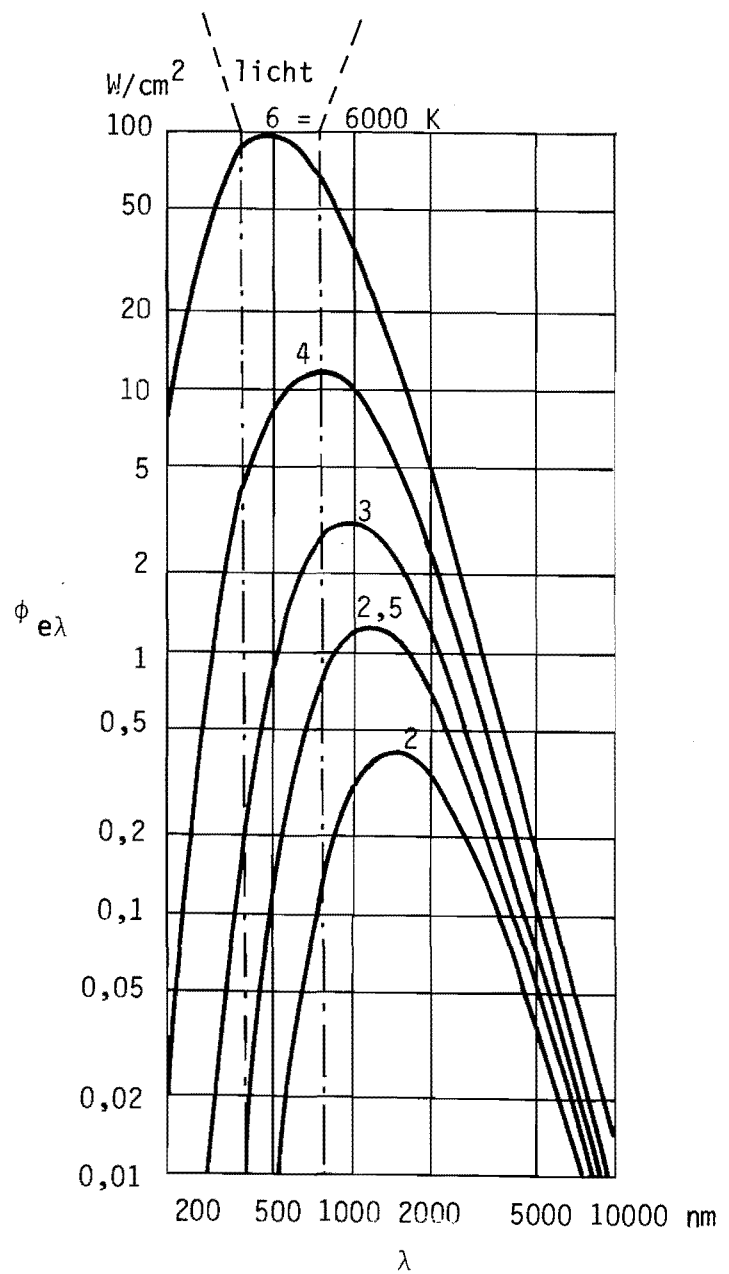
In al deze gevallen is sprake van temperatuurstraling en we kunnen de lichtbronnen zoals de gloeilamp, het Auerkousje maar ook een kaarsvlam of de zon beschouwen als temperatuurstraler.

In de natuurkunde wordt gebruik gemaakt van de "zwarte straler". Deze wordt gekarakteriseerd door een kleine opening waarachter zich een holle ruimte bevindt. Deze ruimte kan in temperatuur worden verhoogd, waardoor op een gegeven moment licht wordt uitgezonden door het gloeien van de wand van de holte. Bij elke temperatuur kan worden vastgesteld hoe de uitgezonden straling is verdeeld over het spectrum, *zie figuur 7.1. en 7.2.*

Naarmate de temperatuur stijgt, komt een groter gedeelte van de uitgezonden straling te liggen in het zichtbare gebied. Het maximum van de krommen blijkt te verschuiven van het gebied met relatief grote golflengten (infrarood) naar het gebied met de kleinere golflengten (verschuiving Wet van Wien). Bij verhoging van de temperatuur wordt verhoudingsgewijs meer blauw in het spectrum vertegenwoordigd, het uitgezonden licht verandert van rood via geel naar wit.

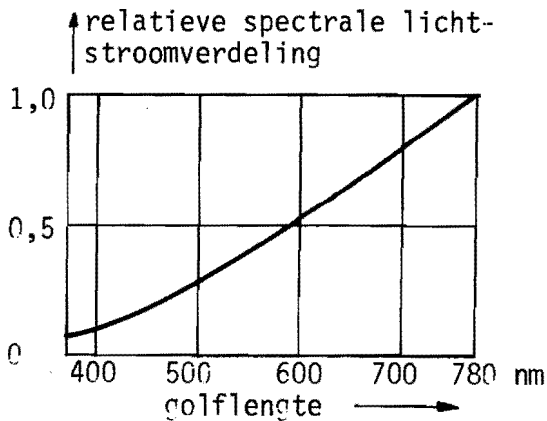


Figuur 7.1. Zwarte straler

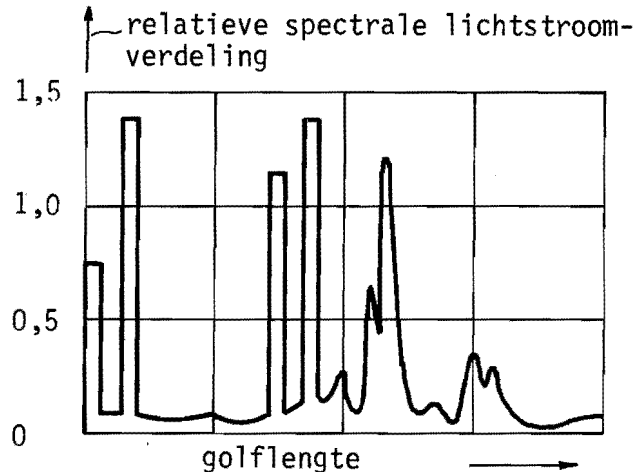


Figuur 7.2. Energie-uitstraling van een zwarte-straler
($T = 2000 \text{ K} - T = 6000 \text{ K}$)
Ontleend aan (38)

Temperatuurstralers bezitten een continu spectrum. Wij kennen ook lichtbronnen met een discontinu spectrum of lijnenspectrum waarbij de stralingsenergie is geconcentreerd op bepaalde golflengten (gasontladingslampen), zie *figuur 7.3a en 7.3b*.



figuur 7.3a. Continu spectrum
(gloeilamp)
Ontleend aan (38)



figuur 7.3b. Lijnen spectrum
(hagedruk-kwiklamp)
Ontleend aan (38)

Het stralingsspectrum van de zwarte straler wordt gekarakteriseerd door de temperatuur van het stralend oppervlak. De kleurtemperatuur is een indicatie voor de kleurindruk van een temperatuurstraler. Zo is de kleurtemperatuur van een moderne gloeilamp 2800 K; de halogeenlamp bereikt 3200 K en de zon 5000 à 6000 K. Op lichtbronnen die geen kontinu spectrum, maar een lijnenspectrum bezitten is het begrip kleurtemperatuur niet zondermeer van toepassing. Men spreekt dan van gekorrelleerde of toegevoegde kleurtemperatuur. Deze wordt bepaald door visuele vergelijking. Wijzig men de kleur van een temperatuurstraler tot deze overeenkomt met die van de te onderzoeken lamp, dan kent men aan deze laatste de bijbehorende kleurtemperatuur toe.

Hoewel beide bronnen in dat geval dezelfde lichtkleur hebben, kunnen tengevolge van de geheel verschillende spectra de kleuren van de omgeving geheel anders worden weergegeven!

Soms komt de ene kleur beter tot zijn recht dan de andere. Veel gasontladingslampen geven de kleuren slecht weer of doen elke kleurschakering verdwijnen. Daartegenover staan fluorescentielampen die zulke goede kleurweergave eigenschappen bezitten, dat deze worden toegepast in de industrie op plaatsen waar kleurbeoordeling kritisch is.

Afhankelijk van de kleurtemperatuur kunnen wij stellen dat hoog gekwalificeerde

lampen de kleuren (bijna) evengoed laten uitkomen als daglicht of het licht van gloeilampen. Daglicht staat in hoog aanzien, is van nature onze referentie lichtbron voor het beoordelen van kledingstukken en dergelijke.

Om de kleurweergave eigenschappen te karakteriseren en te kwantificeren is het begrip kleurweergave-index R_a ingevoerd.

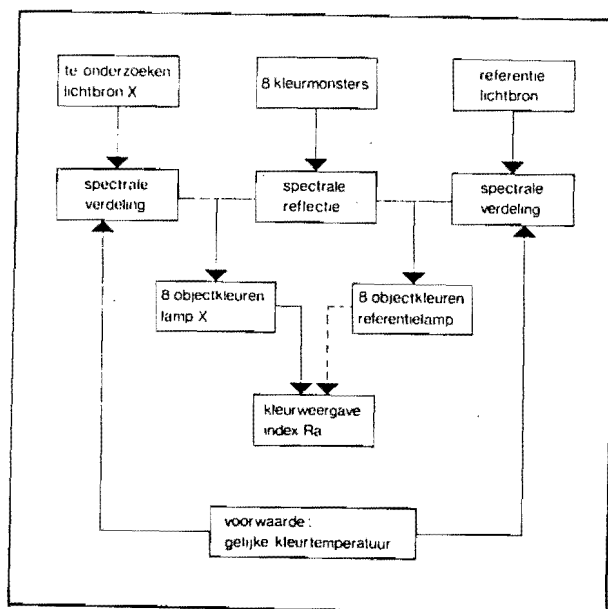
De kleurweergave-index van een gloeilamp en elke andere temperatuurstraler is gesteld op $R_a = 100$.

Toch is er een groot verschil in de weergave van de verschillende kleuren onder het licht van een gloeilamp of onder daglicht. Blauw komt beter tot zijn recht onder daglicht, terwijl rood onder een gloeilamp feller overkomt. Hoe meer een bepaalde kleur in het spectrum van de lichtbron is vertegenwoordigd, hoe duidelijker de betreffende kleur in de verlichte omgeving tot zijn recht komt.

Tussen de verschillende lampen bestaat dus een onderscheid in lichtkleur, maar ook in kleurweergave eigenschappen.

Om nu de kleurweergave-index van bijvoorbeeld een fluorescentielamp te bepalen wordt deze vergeleken met een referentie lichtbron met gelijke kleurtemperatuur. De referentie lichtbron is in principe een temperatuurstraler. Onder het licht van beide lampen wordt een achttal gestandaardiseerde kleurmonsters kleur voor kleur vergeleken.

De mate van afwijking is bepalend voor het waarderingscijfer van de betreffende kleur. Uit het gemiddelde van de cijfers wordt de kleurweergave-index afgeleid. Deze ligt tussen de waarden $25 < R_a \leq 100$. In feite is de vaststelling van de kleurweergave-index veel gekompliceerder, hierop wordt niet verder ingegaan, zie figuur 7.4.



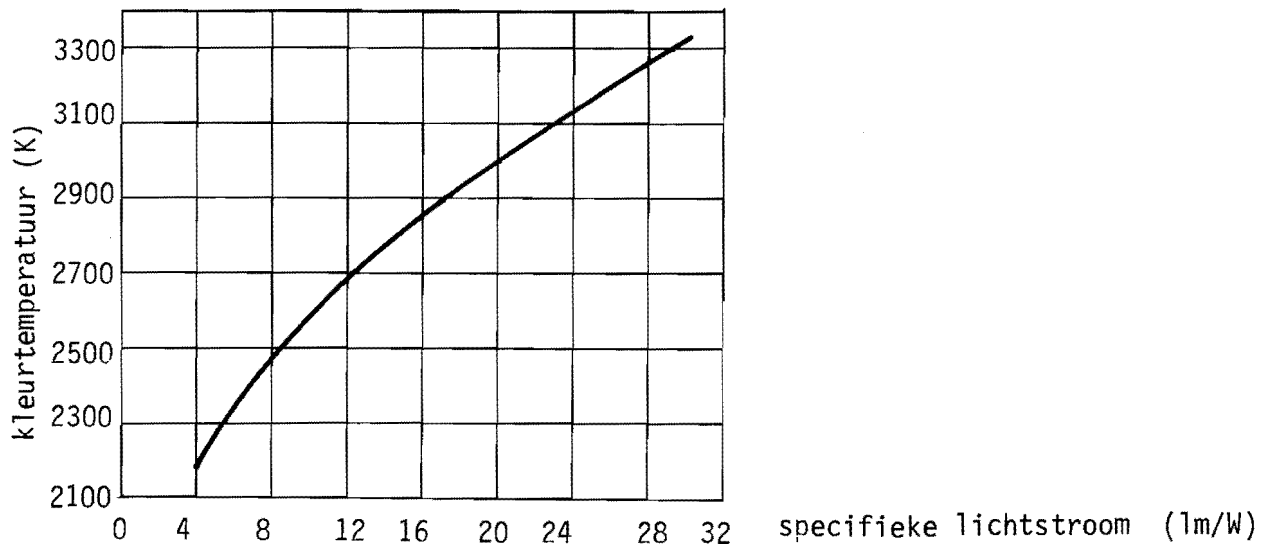
Figuur 7.4. Schema vaststelling R_a = kleurweergave-index

Men kan niet zonder meer stellen, dat twee lampen met gelijke (toegevoegde) kleurtemperatuur en dezelfde kleurweergave-index elke willekeurige kleur gelijk weergeven.

Beide lichtbronnen kunnen immers een andere spectrale samenstelling bezitten.

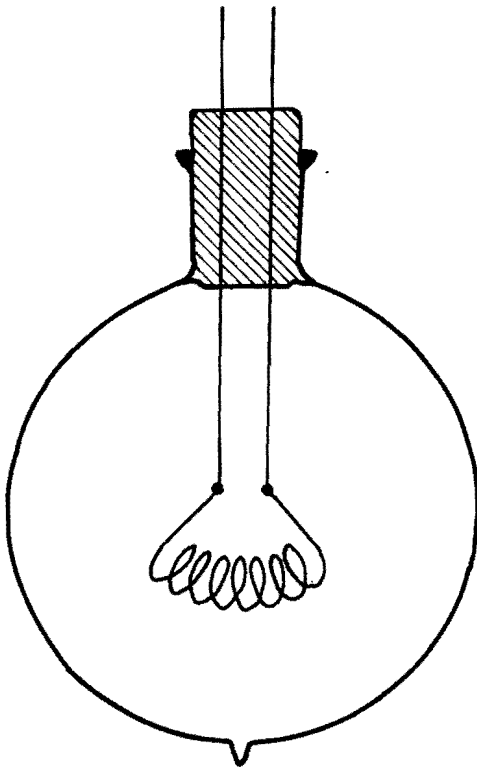
7.1.1. Gloeilampen

Naarmate de elektrische stroom die door de gloeidraad van een gloeilamp wordt gevoerd toeneemt, verandert de kleur van roodachtig naar geel en wit. Verder ontstaat een toename van de hoeveelheid licht in verhouding tot het stroomverbruik: het lichtrendement of de specifieke lichtstroom wordt groter naarmate de temperatuur van de draad stijgt, *zie figuur 7.5*. Dit gaat echter ten koste van de levensduur van de lamp.

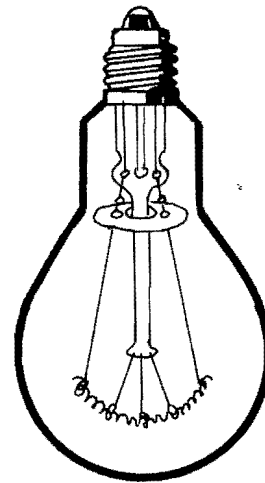


Figuur 7.5. Verband tussen kleurtemperatuur en specifieke lichtstroom bij gloeilampen

Een van de problemen in de ontwikkeling van de kooldraadlamp was het scheppen van een vacuum om het doorbranden van het filament (= gloeidraad) te vertragen. Geplaatst in een vacuum glasbol kon de kooldraad een temperatuur bereiken van omstreeks 1300 °C. Boven die temperatuur verstuijt de kooldraad snel, de glasbol wordt zwart en de kooldraad begeeft het. Verbetering trad op toen men voor het filament het metaal wolfram kon toepassen. Later bleek dat het verdampingsproces nog kon worden vertraagd door de bol te vullen met een inert gas. Men gebruikt hiervoor een gas met een slechte warmtegeleiding zoals krypton, argon, stikstof of een mengsel van de twee laatste, *zie figuur 7.6a en 7.6b*.



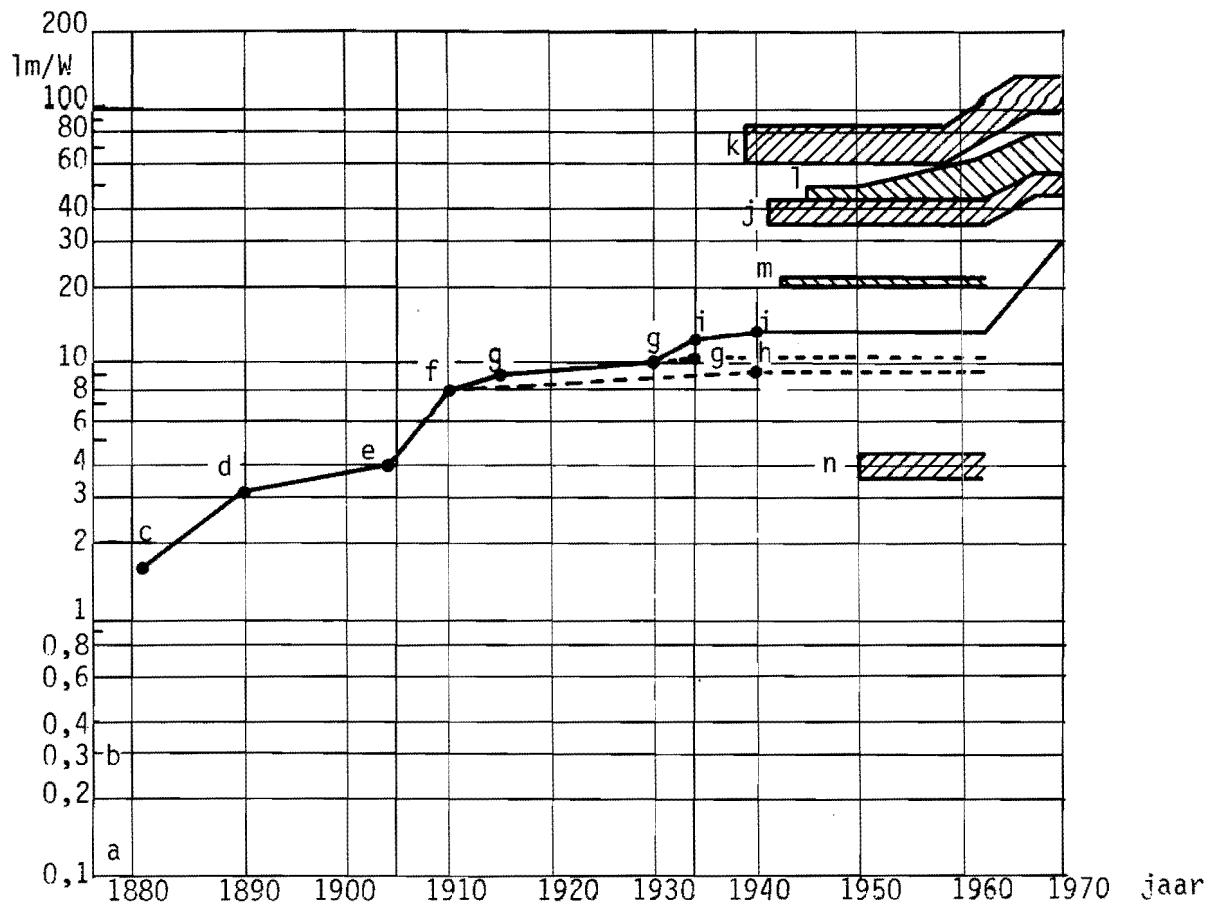
Figuur 7.6a. Platina gloeilamp van Chauvvin 1878



Figuur 7.6b. Moderne gloeilamp

Lampen tot 25W worden nog steeds vacuüm gemaakt. De grotere zijn alle gasgevuld. De normale gloeilamp bereikt bij een draadtemperatuur van 2700 - 2900 K een specifieke lichtstroom van 14 lm/watt. Dit geldt voor een levensduur van ca 1000 brand-uren. Ten opzichte van de eerste kooldraadlampen uit 1880 met 1 à 2 lm/watt is dus wel vooruitgang geboekt, zoals ook blijkt uit *figuur 7.7. en tabel 7.1.* Ondanks alle verbeteringen is de gloeilamp gedurende de brandperiode onderhevig aan verandering, de zogenaamde veroudering, merkbaar aan de afname van de lichtstroom. Hieronder wordt verstaan de verhouding tussen de lichtstroom na een zekere gebruiksperiode en de lichtstroom in nieuwe toestand. Veroudering ontstaat door verdampen van de gloeidraad en zwarting van de ballon. Als de grens van de levensduur is bereikt heeft de gloeilamp een lichtstroom van ca 85% van de nieuwwaarde. Onder de levensduur wordt verstaan de brandtijd waarna nog 50% van de lampen in functie is.

Voor de gemiddelde gloeilamp geldt, dat ongeveer 95% van de opgenomen elektrische energie direkt in warmte wordt omgezet en slechts 5% uittreedt als zichtbare straling.



Figuur 7.7. De specifieke lichtstroom van kunstlichtbronnen.

- a. waskaars
 - b. petroleumlamp
 - c. Edisonlamp
 - d. kooldraadlamp
 - e. gemetalliseerde kooldraad
 - f. Wolframgloeidraad (niet gespiraliseerd, vacuum)
 - g. idem (enkelvoudig gespiraliseerd, gasgevuld)
 - h. idem (enkelvoudig gespiraliseerd, vacuum)
 - i. idem (dubbel gespiraliseerd, gasgevuld)
 - j. hogedrukkwiklamp
 - k. Natriumlamp
 - l. fluorescentielamp
 - m. menglichtlamp
 - n. electroluminescentie
- Ontleend aan (35).

Enkele voorbeelden van specifieke lichtstroom

bron	lm/W	jaar
waskaars	0,1	vóór 1880
pertroleumlamp	0,25	vóór 1880
auerkousje	3	vanaf 1886
edisonlamp	1,7	1880
kooldraadlamp	3	1890
gemetalliseerde kooldraad	4	1904
wolframgloeidraad (niet gespiraliseerd, vacuum)	8	1910
wolframgloeidraad (enkelvoudig gespiraliseerd, gasgevuld)	9 à 10	1915 - 1930 en later
wolframgloeidraad (dubbel gespiraliseerd, gasgevuld)	12 - 14	1934 - 1963
hogedrukkwiklamp	30	1970 en later
natriumlamp	ca 40	1942
	ca 50	1970 en later
	ca 70	1938
fluorescentielamp	> 100	1970 en later
	40 à 50	1946
	50 à 80	1970 en later
menglichtlamp	ca 20	1943 en later

Tabel 7.1.

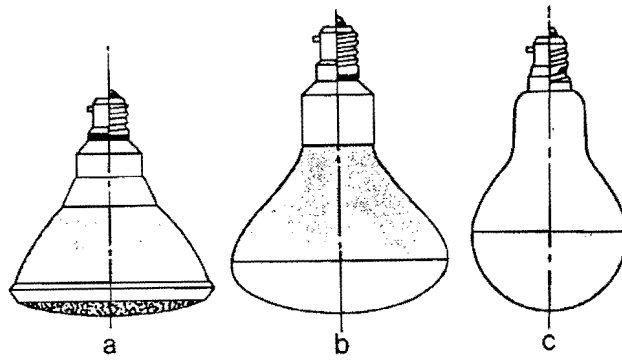
Lamptypen

De gloeilamp is een thema met variaties. In konstruktie berusten alle gloeilampen op hetzelfde principe (met uitzondering van de halogeenlamp).

Verschillen in vorm en lichtuittreding zijn terug te voeren tot enkele basistypen, zie figuur 7.8a t/m 7.8d.

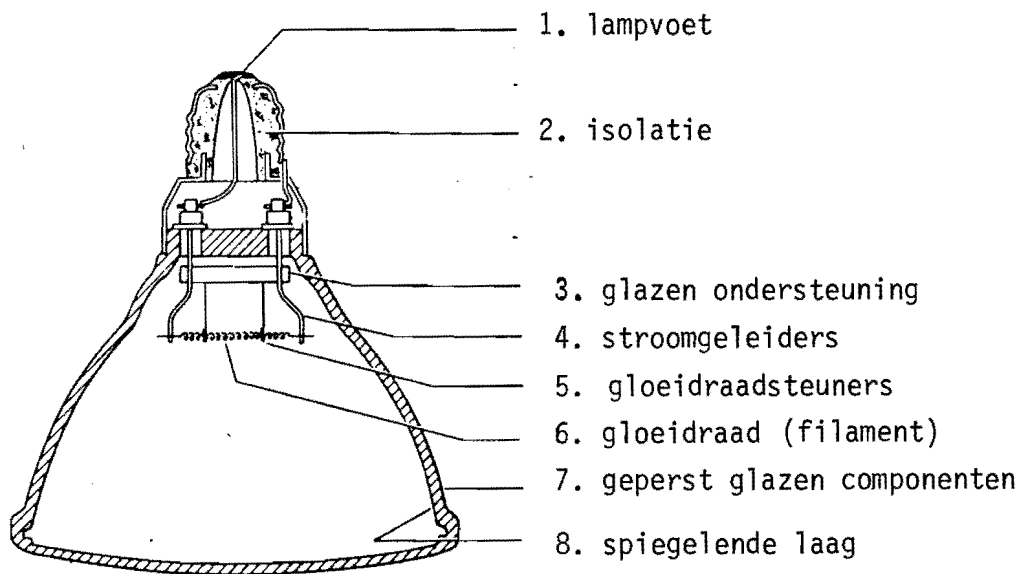
Lampen die het licht naar alle kanten uitzenden

Dit zijn meestal lampen van een gematteerde of van een melkglazen bol voorzien. Soms is de bol om optische doeleinden of om nostalgische redenen (gelijkenis kooldraadlamp) van helder glas gemaakt.



- a. persglas spiegellamp
b. halsspiegellamp (comptalux)
c. kopspiegellamp

Figuur 7.8.



Figuur 7.8d. Doorsnede persglas spiegellamp

Lampen met inwendige verspiegeling.

In de moderne verlichting speelt gericht licht een belangrijke rol. Voor de bundeling is een reflektor nodig, hetzij ingebouwd in het armatuur of direkt in de lamp. In het laatste geval zijn de vorm van de ballon, de plaats van de verspiegeling en de plaats van de gloeidraad zodanig op elkaar afgestemd, dat de gewenste vorm van de lichtbundel ontstaat.

Men maakt onderscheid tussen kopspiegellampen die soms worden gebruikt in combinatie met een uitwendige reflektor en halsspiegellampen die een divergerende stralenbundel uitzenden.

Een robuuste variant op de geblazen ballon is de persglaslamp, vaak toegepast in etalages, op sportvelden en bouwwerken.

De bundelbreedte van halsspiegellampen wordt aangegeven op de lamp. Zo kent men de "flood" met een brede bundel van bijvoorbeeld $2 \times 20^\circ$ en de "spot" met een bundelbreedte van bijvoorbeeld $2 \times 10^\circ$. Soms wordt een selektieve spiegel-laag aangebracht, die een groot gedeelte van de niet zichtbare straling naar achter doorlaat zodat nog maar een kwart van de direkte warmtestraling met de lichtbundel naar buiten treedt. Het armatuur moet dan wel berekend zijn op de extra warmtebelasting!

Halogeenlampen.

Deze temperatuurstraler vormt door zijn bouw een aparte groep. Het principe stamt uit het begin van deze eeuw, maar pas omstreeks 1960 is men erin geslaagd een bruikbare lamp te fabriceren.

Aan de gasvulling van de lamp is wat jodium toegevoegd, met als gevolg dat in de lamp een evenwichtsreactie plaatsvindt tussen wolfraam en jodium. Tussen 250° en 500°C gaat de jodium een vluchtige verbinding aan met wolfraam, welke weer ontbindt bij hogere temperatuur. Voor het goed funktioneren moet de ballonwand een hoge temperatuur hebben. Neergeslagen wolfraam zal dan met de jodium reageren. Daarom wordt de ballon dicht bij de gloeidraad geplaatst en wordt hij gemaakt van kwarts. De gevormde vluchtige verbinding diffundeert naar de gloeidraad en valt daar weer uiteen in wolfraam en jodium. De ballonwand blijft helder, de kleine buisdiameter is gunstig voor optische systemen, de levensduur bedraagt ca 2000 uur bij een $T_{\text{filament}} = 2870\text{ K}$. Sommige halogeenlampen hebben een hogere temperatuur, geven witter licht maar hebben een veel kortere levensduur. De gangbare halogeenlampen hebben een specifieke lichtstroom van 22 lm/watt.

7.1.2. Fluorescentielampen

Er wordt in de praktijk onderscheid gemaakt tussen gasontladingslampen (straatverlichting) en fluorescentielampen (TL). In feite is de TL-lamp of liever de fluorescentielamp een lagedruk kwikontladingslamp waarvan de mantel is voorzien van een fluorescerende laag. De FL-lamp (afkorting van fluorescentie-) is tot ontwikkeling gekomen tijdens en na de tweede wereldoorlog.

Enkele voordelen hiervan zijn:

- de hoge specifieke lichtstroom in vergelijking met gloeilampen
- de lage oppervlaktetemperatuur en oppervlakteluminantie
- de mogelijkheid door keus van de fluorescerende lagen de lichtkleur en de kleurweergave eigenschappen van de lamp te beïnvloeden.

De slechte kleurweergave en de koele lichtkleur van de eerste typen hebben de lamp in discrediet gebracht. Ten onrechte, want er zijn nu FL-lampen die qua kleurweergave kunnen wedijveren met gloeilamp of daglicht.

Werking van de lamp.

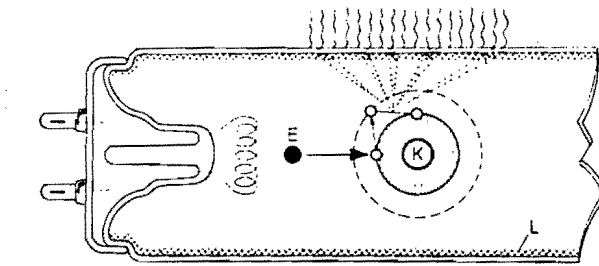
De ontleding in het gasmengsel, bestaande uit verzadigde kwikdamp en een vulgas van argon of neon produceert een aantal lijnen in het spectrum: in het ultra-violette gebied en in het zichtbare gebied violet-blauw-groen. Op de buiswand bevindt zich een samenstelling van fluorescerende poeders. Deze laag gaat oplichten onder invloed van de erop vallende straling.

De ultra-violette en blauwe stralen worden omgezet in zichtbare straling. De verdeling over het spectrum is afhankelijk van de samenstelling van de gebruikte poeders. Gestreefd wordt door menging van grondstoffen een gelijkmatige verdeling over het gehele zichtbare gebied van het spectrum te bereiken.

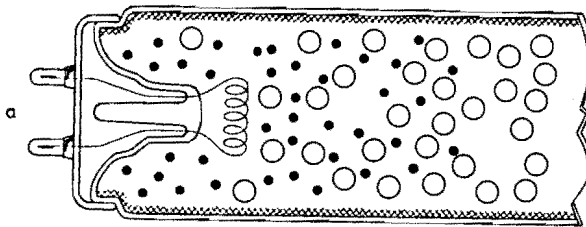
Aan de buiseinden van de FL-lamp bevinden zich sokkels met elk twee contactstiften. In het inwendige van de lamp is tussen deze kontakten een gloei-elektrode aangebracht. In de buis ontstaat een elektronenstroom tussen de ene elektrode en de andere, *zie figuur 7.9*.

Voor het op gang brengen van het proces wordt meestal gebruik gemaakt van een starter. Deze bestaat uit een gasontladingsbuisje met twee bimetaal elektrodes. Om de spanning van 100 V te bereiken wordt in het wisselstroomcircuit een inductief of een capacitief element toegepast (voorschakelapparaat) dat minder vermogen opslokt dan een zuivere weerstand, namelijk 15 à 20% van het vermogen van de lamp. In grote installaties is het nodig ter voorkoming van blindstromen in het net, inductieve en capaciteive schakelingen af te wisselen.

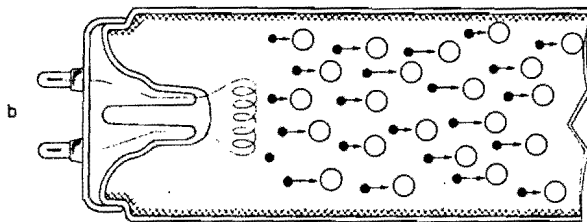
Brandt de lamp eenmaal, dan worden de elektrodes in de lamp door de ontleding zelf op temperatuur gehouden. De starter gebruikt dan dus geen stroom meer.



L = fluorescentielag
 K = atoomkern
 E = elektron
 wavy = UV-straling
 wavy = lichtstraling



a. Voorverwarming: elektronen treden uit ter plaatse van de elektroden vóór de ontleding



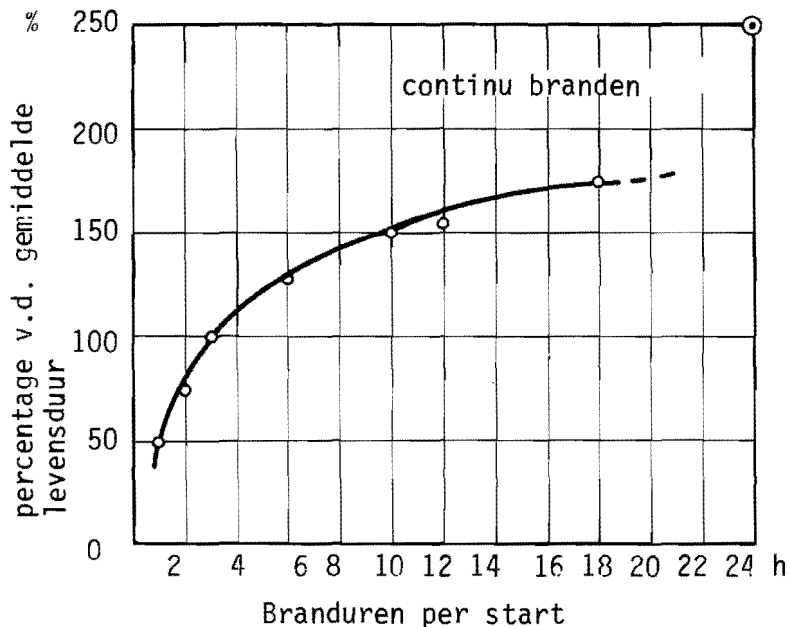
b. Elektronenstroom ter plaatse van de kathode, na ontbranding van de lamp

Figuur 7.9. Het principe van de gasontladingslamp.

Wel zijn er fluorescentiebuizen die onmiddellijk gaan branden na het inschakelen van de stroom. Hier wordt gebruik gemaakt van een speciale schakeling waarbij de gloeidraad van de elektrodes door een aparte transformator wordt gevoed.

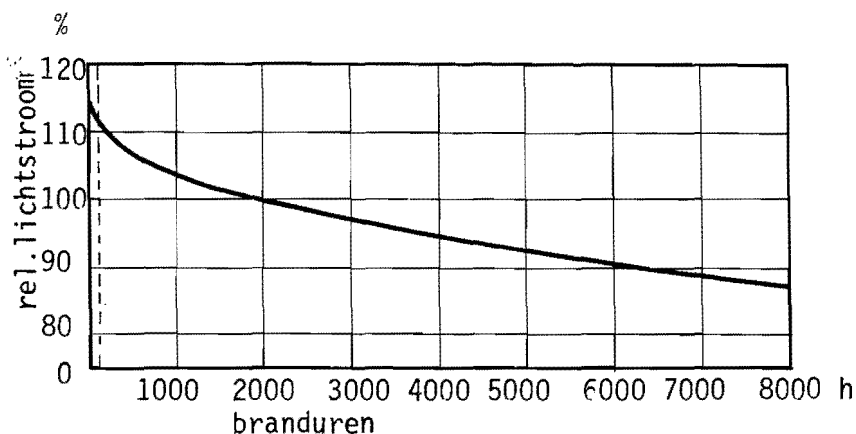
Levensduur en veroudering.

De levensduur van een fluorescentielamp is ten einde als een van de elektrodes of beide geen elektronen meer kunnen emitteren. De levensduur is onder andere afhankelijk van het aantal schakelingen, *zie figuur 7.10.*, netspanningsvariaties, temperatuur en vochtigheid van de omgeving, systeem van starten, enz.



Figuur 7.10. Invloed schakelfrequentie op de levensduur van fluorescentielampen.

Uitgaande van de eis dat 50% van de lampen nog in leven is bij gemiddeld 3 branduren per start kan deze worden gesteld op 7500 uur. Men rekent in de praktijk op een lichttechnische levensduur van 5000 uur. De lichtstroom is dan gedaald tot 80% à 85% van de initiële lichtstroom. dat is de lichtstroom na 100 branduren, *zie figuur 7.11.*



Figuur 7.11. Teruggang van de lichtstroom door veroudering van fluorescentielampen.

Specifieke lichtstroom.

De specifieke lichtstroom van de meeste fluorescentielampen ligt tussen 40 lm/W en 90 lm/W, dat wil zeggen tenminste driemaal zo hoog als die van de gloeilamp. De uiteenlopende waarden zijn een gevolg van de vele variaties in de chemische samenstelling van de fluorescentielagen.

Tot vóór enkele jaren was men niet in staat, een relatief hoog lichtrendement te koppelen aan een goede kleurweergave. Dit had tot gevolg, dat industriëen, maar ook kantoorgebouwen en dergelijke om financiële redenen een omgeving accepteerden waarin de kleuren matig of slecht overkomen. De komst van de lamp met het driebandspektrum bracht hierin verandering. Deze lampen, waarvan het lichtspectrum drie pieken vertoont werken volgens het principe, dat met drie kleuren, bijvoorbeeld rood, blauw en groen door additieve menging wit licht kan ontstaan.

De redelijke goede kleurweergave ($R_a = 85$) gaat hier gepaard met een hoog lichtrendement (80 lm/W). De lampen zijn echter driemaal zo duur als de "normale" serie. Bovengenoemd probleem is daarom nog niet volledig van de baan!

Met de winkels is het anders gesteld: koopwaar moet er aantrekkelijk uitzien, de hogere kosten aan lampen betalen zichzelf wel terug!

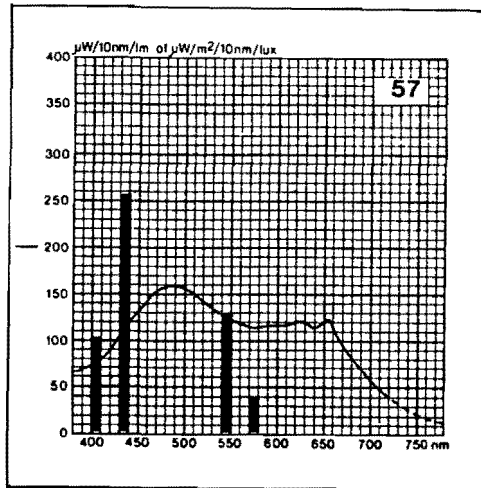
Spectrale samenstelling.

Het verschil in spectrale samenstelling tussen de oude reeks en het driebanden-type is te zien in *figuur 7.12*.

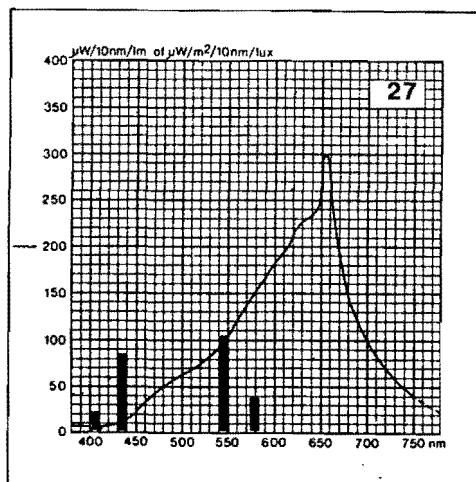
Tabel 7.2. geeft een gangbare verdeling in groepen.

Type	kleurnummer + temp. (K)		kleurweergave index	specifieke lichtstr. lm/W
warmwitte lichtkleuren, in overeenstemming met gloeilampen	82	2650	85	80
	27	2700	94	43
	32	2950	85	49
	29	2950	53	76
	83	3000	85	80
witte kleuren, in combinatie met gloeilamp of daglicht	34	3850	85	50,5
	25	4000	76	62
	33	4200	66	79
	84	4000	85	80
koelwitte kleuren, in combinatie met daglicht (kleurbeoordeling)	47	5000	98	44
	55	6000	93	50,5
	57	7000	93	47

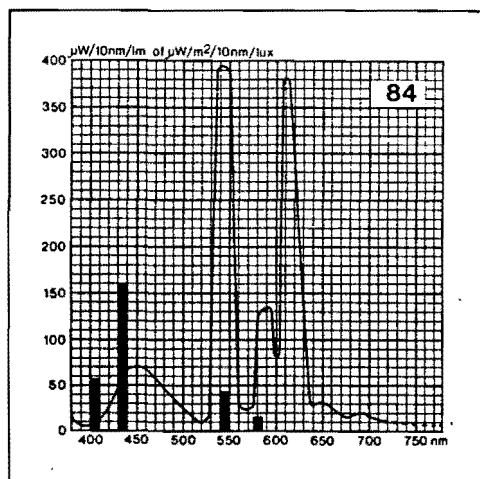
Tabel 7.2. Indeling fluorescentielampen. Onleend aan (33).



- a. "koelwit"
7000 K
 $R_a = 93$
voor kleurbeoordeling



- b. "warmwit"
2700 K
 $R_a = 94$
in combinatie met gloeilampen



- c. "wit"
4000 K
 $R_a = 85$
3-bandenspektrum

Figuur 7.12. Spektrale energieverdeling van fluorescentielampen
Ontleend aan (33).

De typen 82, 83 en 84 (de coderingen hebben betrekking op Philips lampen) vormen de nieuwe reeks, (driebanden spectrum).

De lage kleurtemperaturen, tot 3000 K zijn goed te combineren met gloeilampen. De koele kleuren boven de 5000 K kunnen alleen maar worden toegepast in de industrie, waar kleurbeoordeling onder kwasi daglicht-kondities aan de orde is. Voor "huishoudelijk" gebruik zijn de kleuren te koel, bovendien is het lichtrendement laag. De kleurweergave-index is extreem hoog, deze typen zijn ook geschikt voor ateliers van schilders of beeldhouwers en voor musea.

De kleurtemperatuur omstreeks 4000 K is vooral op zijn plaats waar het licht veelvuldig een combinatie is van daglicht en kunstlicht. Werkvertrekken, kantoorruimten, scholen, enz..

Opvallend hierbij is dat de steeds vaker toegepaste werkplek-verlichting (bureaulampen en laaghangende armaturen) gepaard gaat met een voorliefde voor wat warmere kleuren.

Slagerijen, waar vlees met een rode kleur wordt verlangd, zijn gebaat bij een warmwitte lichtkleur, groente daarentegen komt het best tot zijn recht onder een koele lichtkleur.

Basistypen.

De dikke FL-lamp met een diameter van 38 mm wordt steeds meer vervangen door de dunnere lamp - in dezelfde lengten verkrijgbaar - met een diameter van 26 mm. Voor een overeenkomstig lampnummer geldt, dat met minder stroomverbruik meer licht wordt uitgezonden. Een ander voordeel van de dunne buis is, dat deze beter kan worden verwerkt in een optisch systeem. Een nadeel kan zijn, dat de oppervlakteluminantie bijna tweemaal zo hoog is. Immers meer licht wordt uitgezonden door een veel kleiner oppervlak. Armaturen kunnen hierbij worden aangepast, maar vervanging van de dikke lamp door de dunnere bij de montage van "kale" FL-balken kan aanleiding geven tot (onaanvaardbare) verblindingshinder. Er zijn verschillende uitvoeringen van de FL-lamp, zoals: de cirkelvormige of de U-vormige lamp; lampen met een lichtvenster, waardoor het licht hoofdzakelijk naar één helft wordt uitgezonden; de lamp voor hoge omgevingstemperaturen ($20 - 70^{\circ}\text{C}$); starterloze lampen; lampen die gedimd kunnen worden; lampen voor gelijkspanning.

7.1.3. Andere gasontladingslampen (straatverlichting, industrieverlichting).

Basistypen.

In de gasontladingslampen (afgezien van de FL-lamp) kent men 2 hoofdgroepen die

opmerkelijk van elkaar verschillen in de kleur van het uitgestraalde licht. Afhankelijk van het toegepaste gas kan de kleur in het gele gebied liggen: natrium, of in het blauwe gebied: kwik. *Zie figuur 7.13.*

Lagedruk natriumlamp (SOX).

Het natrium bevindt zich in een U-vormige buis binnenin een veel grotere buitenballon. De buis is gevuld met een mengsel van stikstof en argon. Dit is nodig omdat natrium vast is tot 98°C en een lage dampspanning bezit.

De benodigde werkt temperatuur bedraagt 270°C . Deze hoge temperatuur vereist een goede afscherming tegen warmteverlies door geleiding en konvektie; de ontladingsbuis wordt daarom in een vacuum buitenballon geplaatst. De kleurweergave van de lamp is nihil, het spectrum bestaat slechts uit een gele band. Konstrasten worden echter uitstekend weergegeven.

De lamp wordt praktisch alleen toegepast op autosnelwegen en verkeersknooppunten. Niet op parkeerplaatsen omdat men dan de kleur van de auto niet meer herkent. Kleine uitvoeringen worden wel toegepast voor veiligheidsverlichting van terreinen, enz.

Het lichtrendement is hoog tot 180 lm/W . Uitvoeringen in $18 - 180\text{ W}$.

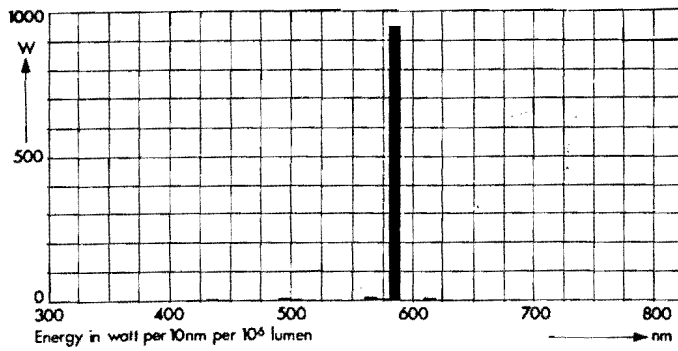
Zie figuur 7.14.

Hogedruk natriumlamp (SON)

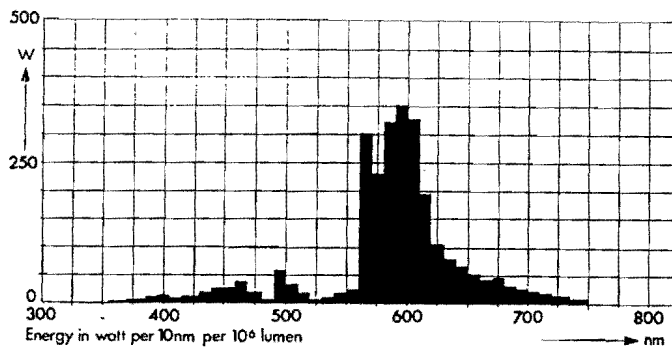
Bij de hogedruk natriumlamp is sprake van een gekompliceerd proces dat resulteert in een iets andere lichtkleur. Het licht is wat warmer van kleur, maar bovendien heeft het spectrum een bredere spreiding waardoor de kleuren, afhankelijk van het gebruiksdoel, acceptabel worden weergegeven.

De SON-lamp is verkrijgbaar in verschillende uitvoeringen, aangepast aan de gebruikseisen. Sommige typen hebben een buitenballon met diffuserende laag om de luminantie te reduceren. Andere hebben een heldere buitenballon, deze lenen zich goed voor het gebruik in optische systemen, zoals schijnwerpers.

De levensduur van de SON-lamp bedraagt 4000 uur , ze zijn verkrijgbaar van $50 - 1000\text{ W}$ en het lichtrendement is omstreeks 100 lm/W , *zie figuur 7.15 en tabel 7.3.*

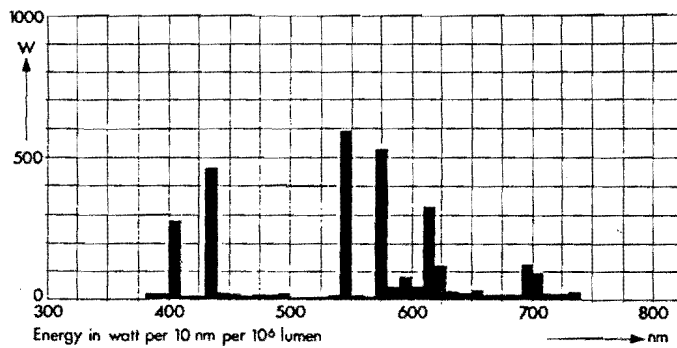


a. lagedruk natriumlamp (SOX)



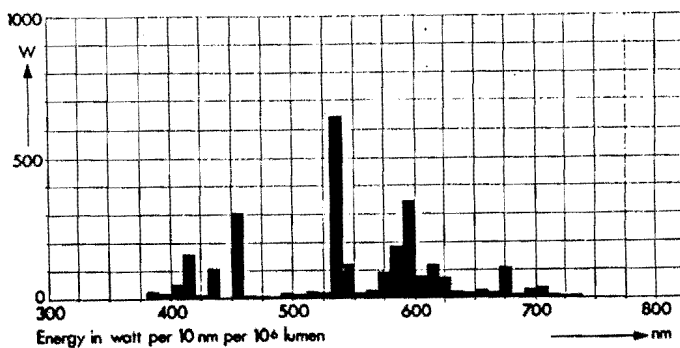
b. hogedruk natriumlamp (SON/T)

SON/T 150 W and 250 W



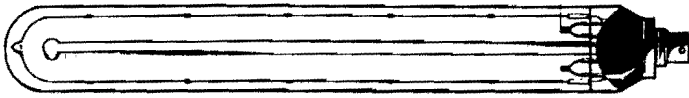
c. hogedruk kwiklamp (HPL-N)

HPL-N 50 W, 80 W and 125 W

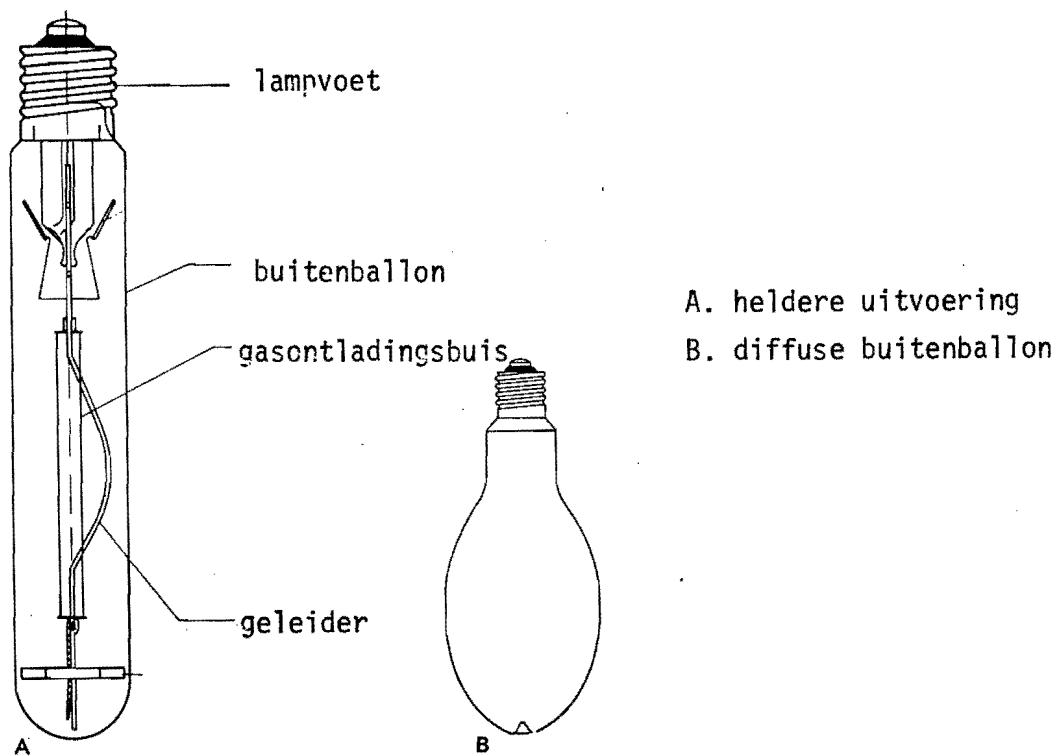


d. metaal-halide lamp (HPI 400W)

Figuur 7.13. Spektrale energieverdeling gasontladingslampen. Ontleend aan (33).



Figuur 7.14. Lagedruk-natriumlamp



Figuur 7.15. Hogedruk-natriumlampen

lamptype	specifieke licht- stroom (lm/W)	kleurtemperatuur (K)	kleurweergave- index (R_a)
lagedruk natrium SOX	100 - 183	1700	niet van toepass.
hogedruk natrium SON	60 - 120	2000	26
SON/T	97 - 130	2000	26
SON/H	86	2000	26
hogedruk kwik HPLN	40 - 60	3750 - 4300	39 - 47
HPL deluxe	40 - 60	3200 - 3500	39 - 47
HPLR	44 - 57	4000 - 4500	36 - 41
hogedruk kwikjodide HPI	70	4100	68
HPI/T	81 - 95	4000 - 4700	68 - 70
menglicht ML	10 - 28	3500	61
MLR	18	3600	60

De codering is niet geheel willekeurig.

"S" duidt op natrium (ong. Sodium)

"O" geeft aan dat de damp in de lampen verzadigd is.

"X" is afkomstig van de oxydelaag die op de ballon is aangebracht.

"N" heeft betrekking op de benaming voor de toegepaste diffuserende poederlaag.

Tabel 7.3. Gasontladingslampen.

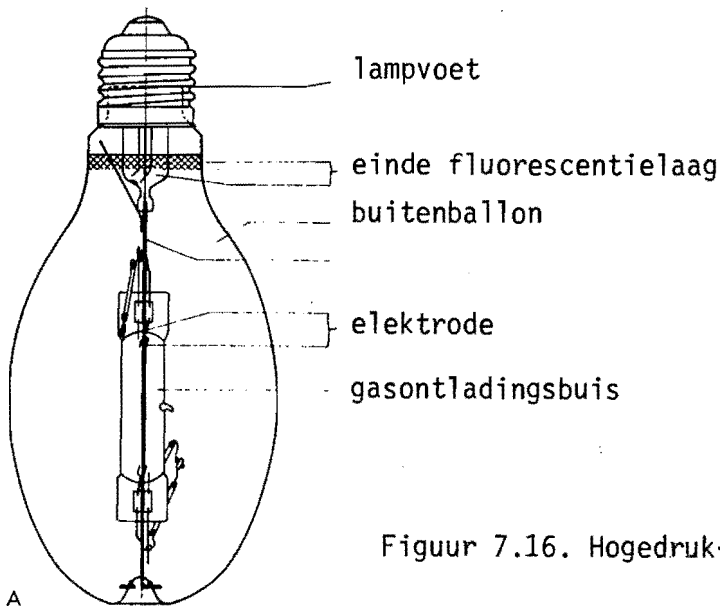
Hogedruk kwiklamp (HPL) en Metaalhalide lamp (HPI).

Ook hierin komen uiteenlopende typen voor. Een onderscheid wordt gemaakt tussen de "gewone" uitvoering en die waarbij aan jodium gebonden metalen gaan meespelen in het proces; de kwikjodide- of metaalhalide-lamp.

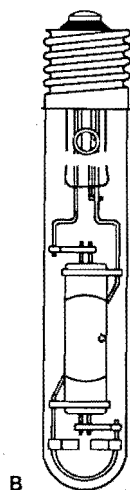
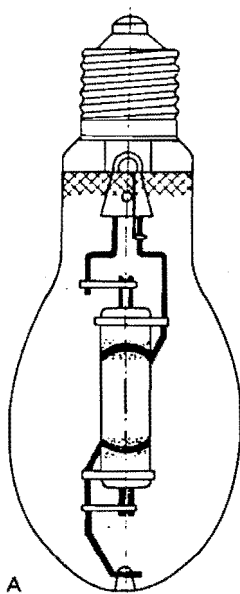
Deze hebben ten opzichte van de normale uitvoering een hogere specifieke lichtopbrengst en een betere kleurweergave. Het toepassingsgebied van de hogedruk kwiklamp komt overeen met dat van de hogedruk natriumlampen. Met name in de wegverlichting en de industrie. Varianten zijn leverbaar met een heldere buitenballon, geschikt voor optische systemen en met een eivormige ballon die aan de binnenzijde is bedekt met een diffuserend poeder.

De metaalhalide lamp leent zich bijzonder goed voor toepassing in schijnwerpers bij floodlighting (aanlichten van gebouwen) en verlichting van sportterreinen, vooral voor televisie-reportages, dankzij de goede kleurweergave.

HPL verkrijgbaar van 50 - 1000 W, de HPI van 400 - 2000 W. Zie figuur 7.16 en 7.17.



Figuur 7.16. Hogedruk-kwiklamp



A. Ellipsoïde-vorm met fluorescentie-laag

B. Buisvorm met heldere buitenballon

Figuur 7.17. Metaalhalide of kwikjodide-lamp.

Menglichtlamp.

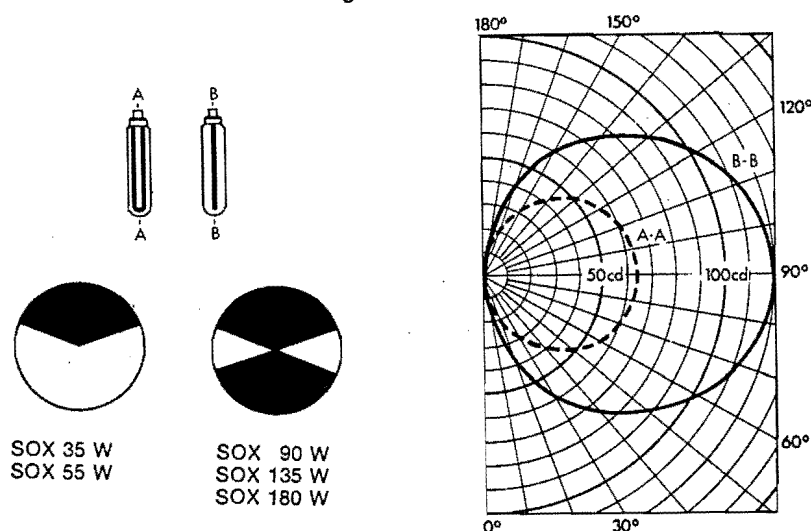
Bij alle gasontladingslampen is hulpapparatuur nodig die apart moet worden ingebouwd. Een uitzondering vormt de menglichtlamp die in een gangbare lamphouder kan worden geschroefd. Deze lamp bestaat uit een combinatie van een gasontladingslamp en een gloeilamp. De gloeidraad die in serie is opgenomen met de kwartsglazen ontladingsbuis doet dienst als stroombegrenzer en zendt ook nog licht uit. De buitenballon is voorzien van een fluorescerende laag die het spectrum wat verbreedt.

Voordelen ten opzichte van de gloeilamp zijn de langere levensduur (circa 6000 uur) en de hogere specifieke lichtstroom, tot 28 lm/W. De kleurweergave is echter beduidend minder.

Enkele algemeen geldende opmerkingen:

- . de natrium- en kwiklampen hebben een zekere aanlooptijd nodig. Deze bedraagt voor de hogedruk kwiklamp ca 5 minuten, voor de lagedruk natriumlampen circa 10 minuten en voor de lagedruk kwiklampen (FL) enkele seconden.
- . met uitzondering van de menglichtlamp is aparte voorschakelapparatuur vereist.
- . de lampen zijn, met uitzondering van de menglichtlamp beperkt in hun brandstand. Deze wordt als volgt aangegeven. In een vertikaal vlak wordt de lamp met de lampvoet als draaipunt en de lengte-as van de lamp als "wijzer" over 360° gedraaid. De niet toegelaten brandstanden kunnen nu worden aangegeven, *zie figuur 7.18*. Het type SOX 90W bijvoorbeeld kan alleen gebruikt worden als de lengte-as van de lamp nagenoeg horizontaal is.

Polair lichtsterktediagram



Figuur 7.18. Lichtsterktediagram en brandstanden van de SOX-lamp (lagedruk-natrium). Zwart is verboden.
Ontleend aan (33).

. tabel 7.3. geeft een overzicht van de lamp met de belangrijkste gegevens.

7.2. Armaturen

De kale lichtbron wordt meestal toegepast in een gedeeltelijk transparante of van een rooster voorziene omhulling.

Dit verlichtingsarmatuur krijgt zijn vorm door een combinatie van funktionele eisen, afhankelijk van lamp en doel van de verlichting.

Verskillende aspecten die een rol spelen bij de vormgeving van het armatuur zijn:

- Lichttechnische aspecten.

Verdeling van de lichtstroom van de lamp (het geven van richting aan het licht).

Afscherming, het wegnemen van de verblinding door reductie van de helderheid in kritieke richtingen.

Verandering van de kleur van het licht (sfeer-effekt-verlichting, signaal-verlichting).

Verhoging van de nuttige lichtstroom, het licht op de juiste plaats brengen.

- Veiligheidsaspecten.

Bescherming tegen elektrische stroom.

Bescherming tegen te grote hitte.

Beveiliging tegen explosie (hitte, vonken).

- Installatietechnische aspecten.

Eenvoudige montage en vervanging van lampen.

Overzichtelijke konstruktie.

Snelle en veilige elektrische aansluiting.

- Bedrijfszekerheid.

Bescherming van de lamp tegen korrosie, damp, vocht, mechanische beschadiging.

- Vormaspecten.

Vorm moet aannemelijk zijn, onopvallend of juist met een eigen plaats in de omgeving (kristallen kroonluchter).

Armaturen zijn op verschillende manieren in te delen:

- Lichttechnische eigenschappen.

De wijze van lichtuitstraling wordt gesymboliseerd door de lichtstroomverdeling en het lichtsterktediagram.

- Soort lampen.

Het meest voor de hand liggende onderscheid kan worden gemaakt tussen armaturen voor fluorescentielampen, gloeilampen en gasontladingslampen.

- Aantal lampen.

Armaturen zijn bestemd voor één lamp, voor meerdere lampen of voor een combinatie van twee lampsoorten.

- Het gebruiksdoel.

Doelmatig, functioneel, afgestemd op visuele taak.

Representatief.

Het bereiken van bepaalde effecten.

- De plaats van het gebruik.

Armaturen voor binnenverlichting (algemeen, werkplek, industrie).

Armaturen voor buitenverlichting (verkeerswegen, straten, pleinen, tuinen).

- Toegepaste materialen.

Glas, kunststof, kunst-glas, gegoten of geperst metaal, papier, enz. of combinaties hiervan.

- De konstruktie.

Open vorm of gesloten vorm.

Roosters, lamellen, spiegeloptiek, diffuserend materiaal, refraktorkappen, reflektoren (schijnwerpers).

- Montage.

Plaatsvast of verplaatsbaar.

Inbouwarmatuur of opbouwarmatuur.

Pendels, tegen de wand, aan masten, enz.

Lichtrails.

7.2.1. Lichtstroomverdeling.

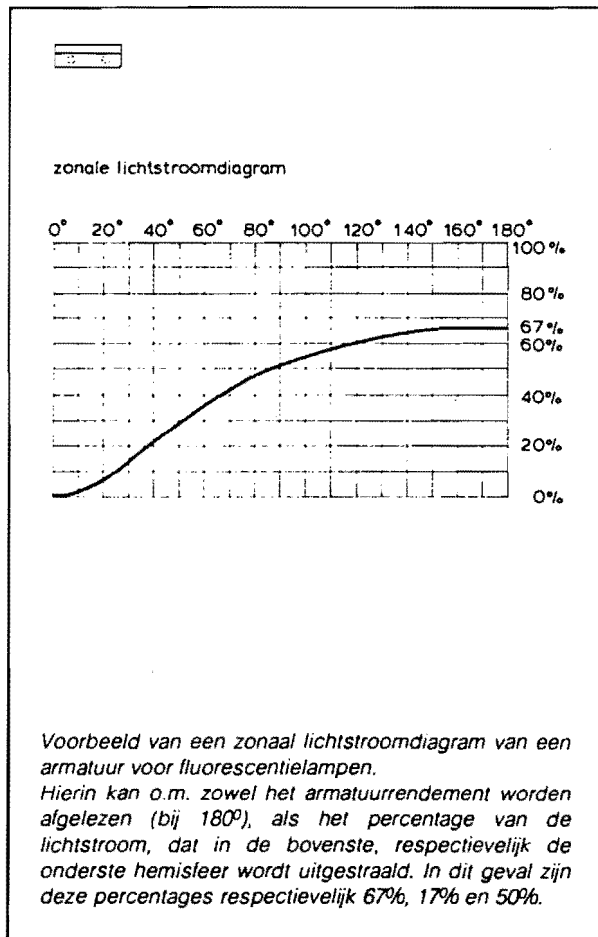
Deze wordt gewoonlijk weergegeven in een zonaal lichtstroombiagram, zie *figuur 7.19*.

Hier kan het armatuurrendement worden afgelezen, dat is per definitie de verhouding van de uitgestraalde lichtstroom van het armatuur en de totaal door de lampen uitgezonden lichtstroom (gewoonlijk tussen 0,5 en 0,9).

In het voorbeeld bedraagt het armatuurrendement 67%.

In het gebied van 0° tot 90° , dat wil zeggen in de onderste hemisfeer, wordt 50% van de totale lichtstroom uitgestraald, in de bovenste hemisfeer 17%.

Uitgaand van de lichtstroom ontstaat de indeling volgens *tabel 7.4*.



Figuur 7.19. Zonaal lichtstroomdiagram. Ontleend aan (32).

type armatuur	% van de door het armatuur uitgestraalde lichtstroom	
	onderste hemisfeer	bovenste hemisfeer
direkt	100 - 90	0 - 10
overwegend direkt	90 - 60	10 - 40
gemengd	60 - 40	40 - 60
overwegend indirekt	40 - 10	60 - 90
indirekt	10 - 0	90 - 100

Tabel 7.4. Ontleend aan (32).

Het armatuur uit ons voorbeeld:

Het armatuurrendement bedraagt 67%. Hiervan gaat 50% naar de onderste hemisfeer. Dit is van de (door het armatuur uitgezonden) nuttige lichtstroom $50/67 \cdot 100\% \approx 75\%$.

Het is dus een "overwegend direkt" armatuur.

7.2.2. Lichtsterkte diagram.

Het polaire lichtsterktediagram geeft de verdeling van de lichtsterkte weer, in afhankelijkheid van de uistralingsrichting van de lamp of het armatuur.

Het lichtsterktediagram van een diffuus reflekerend of doorschijnend oppervlakje wordt gekenmerkt door een bol (zie theorie luminantie).

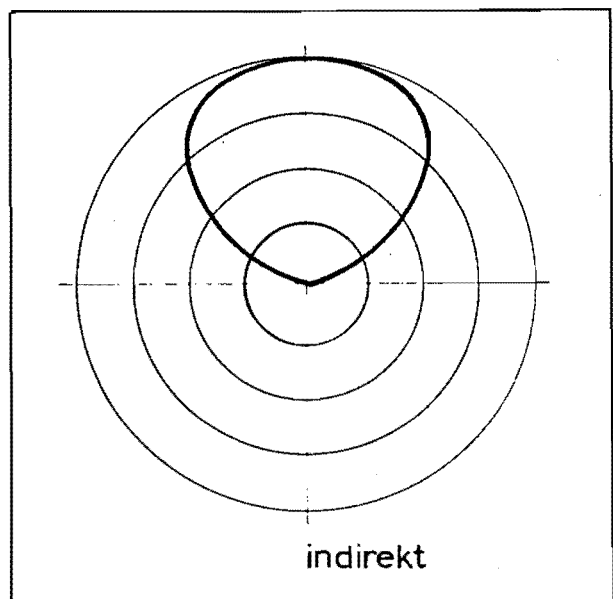
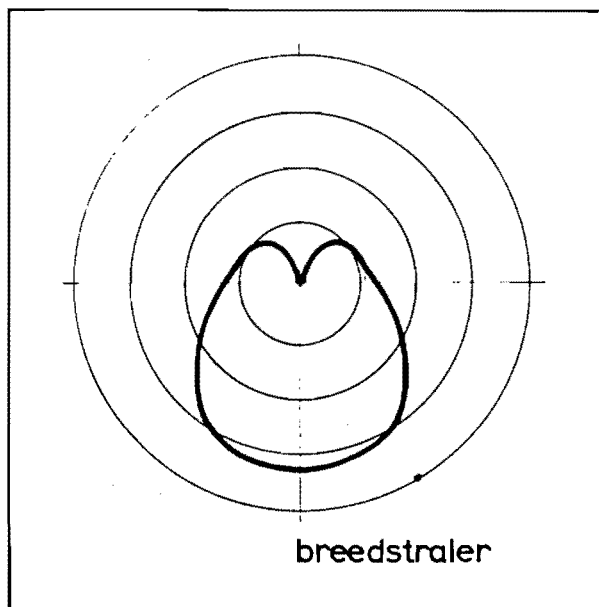
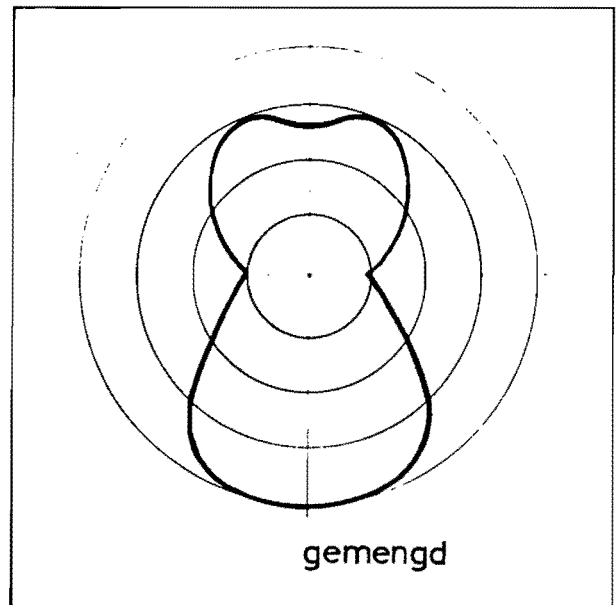
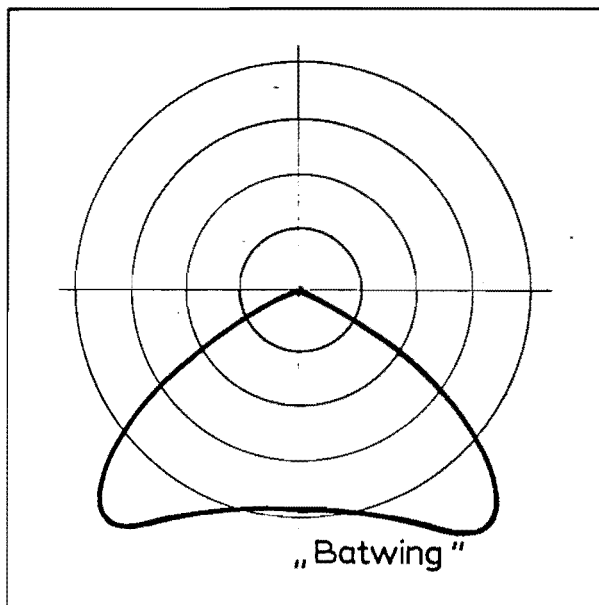
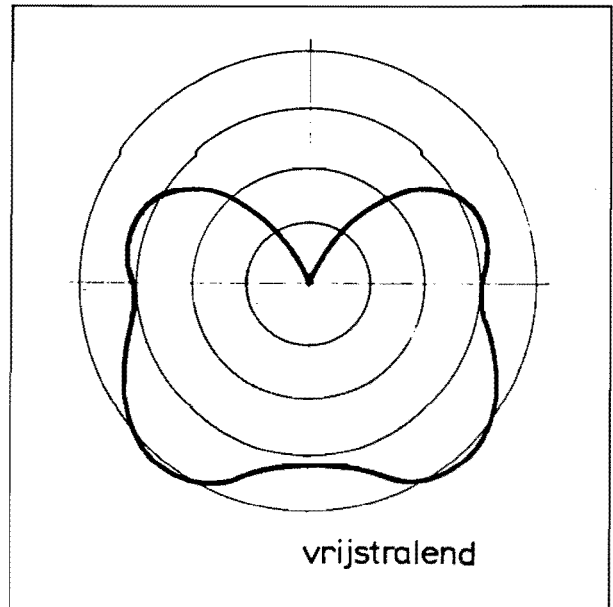
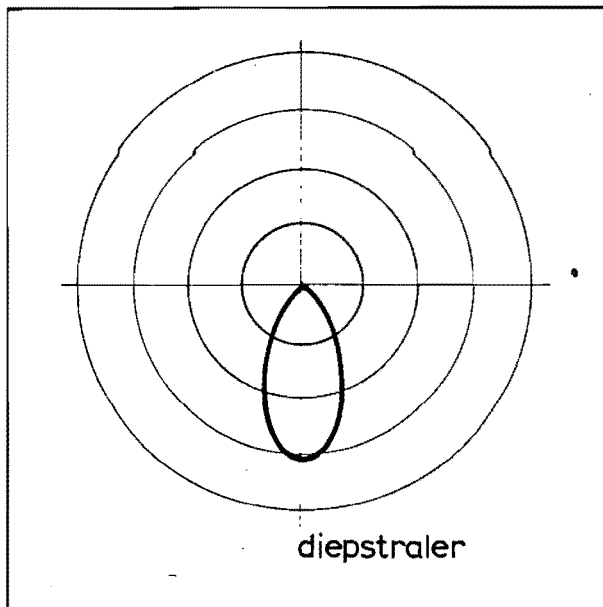
Het lichtsterktediagram van een lichtuitstralend elementje in de ruimte wordt ook voorgesteld door een bol, maar nu met het stralende elementje als middelpunt.

Hoewel het lichtsterktediagram een ruimtefiguur is, wordt in het algemeen volstaan met één (vertikale) doorsnede voor rotatie-symmetrische armaturen of lampen en twee (vertikale) doorsneden loodrecht op elkaar voor niet-rotatie symmetrische armaturen. Meestal is in dat geval sprake van twee hoofdrichtingen, denk bijvoorbeeld aan een fluorescentie-buis.

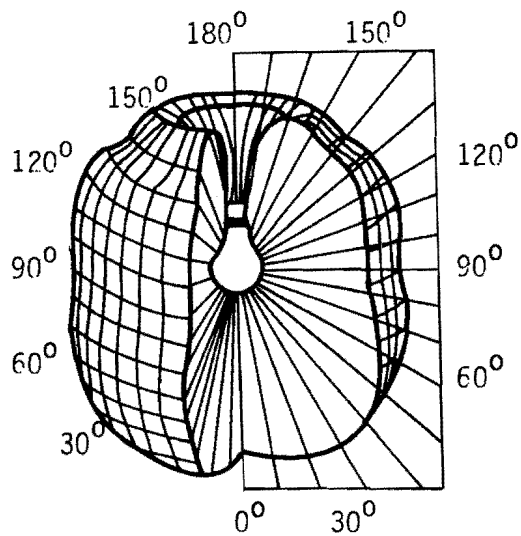
Op grond van het lichtsterktediagram kan men armaturen indelen in een aantal groepen met hun specifieke eigenschappen:

kategorie	voorbeeld
diepstralend	armatuur met spiegelreflektor met nauwe bundel, of een halsspiegellamp "spot"
"batwing"	FL-armatuur voorzien van spiegeloptiek
breedstralend	inwendig witte industrie reflektor, of armatuur met wit rooster
vrijstralend	FL-armatuur met opalen kap
gemengd	pendelarmatuur met uitstraling naar boven en naar beneden, schemerlamp met cilindervormige kap
indirekt	armatuur met afscherming van zijdelingse en benedenwaartse uitstraling.

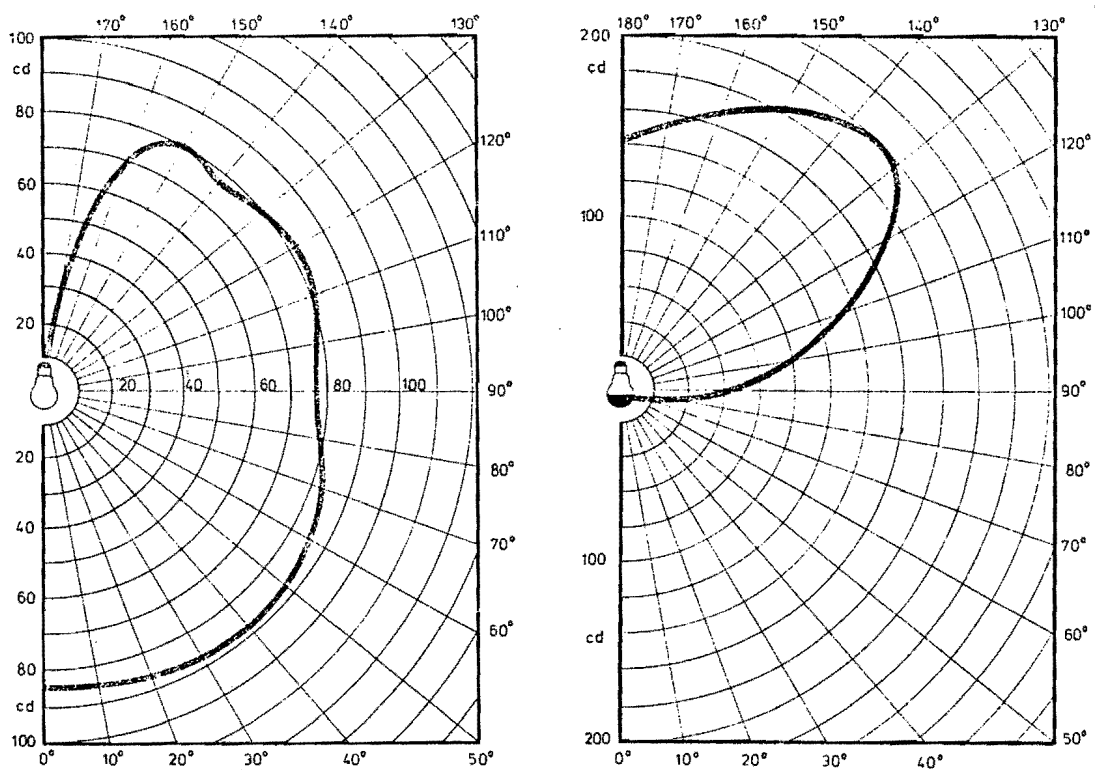
Tabel 7.5. Zie figuur 7.20, 7.21 en 7.22.



Figuur 7.20. Rangschikking armaturen volgens de lichtuitstraling.
 Ontleend aan (32).



Figuur 7.21 Ruimtelijk lichtsterkte-diagram



Figuur 7.22. Lichtsterkte-diagrammen voor een gloeilamp met diffuse ballon en een kopspiegellamp.
Geldend voor een lichtstroom van 1000 lumen (Let op! beide op andere schaal uitgebeeld).
Ontleend aan (37).

7.2.3. Reflektoren en afdekrasters

Reflektoren zijn konstruktie-elementen van het armatuur die er toe dienen het door de lamp uitgestraalde licht de gewenste richtingen te geven.

Omdat de golflengte van het licht klein is - circa 0,6 micron ofwel kleiner dan 1/1000 mm treedt verstrooiing van het licht reeds op bij een uitermate fijne oppervlaktestructuur.

Alleen hoog gepolijste oppervlakken gedragen zich als (bijna) zuiver reflektierend. Men spreekt van verstrooiende en spiegelende reflektoren. In feite hebben de meeste oppervlakte-structuren in onze omgeving een combinatie van beide eigenschappen.

Verstrooiende reflektoren.

Deze zijn meestal wit gelakt of indien hoge temperaturen kunnen optreden geëmailleerd. Voor de lichtverdeling zijn in hoofdzaak de grootte van de reflektor en de inbouwdiepte van de lamp maatgevend. De vorm heeft slechts geringe invloed. De mate van witheid en het behoud ervan zijn van groot belang voor het armatuur-rendement! *Zie figuur 7.23.*



Figuur 7.23. Witte verstrooiende reflektoren met dezelfde lichtverdeling, mits a en b gelijk zijn.

Spiegel-reflektoren

Deze worden gemaakt van glas of van gepolijst aluminium.

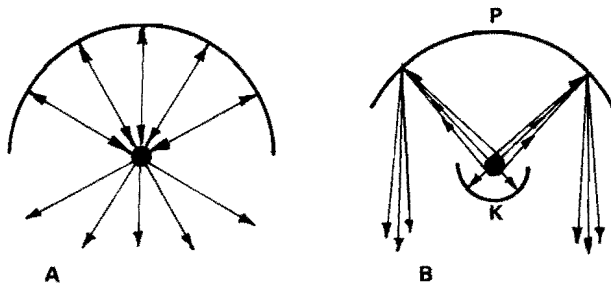
Glas-zilver spiegels komen echter niet zo veel meer voor.

De lichtverdeling wordt hier geheel bepaald door de vorm van de reflektor: enkele voorbeelden zijn de kogel-spiegel, de parabool-spiegel en de ellipsoïde-spiegel.

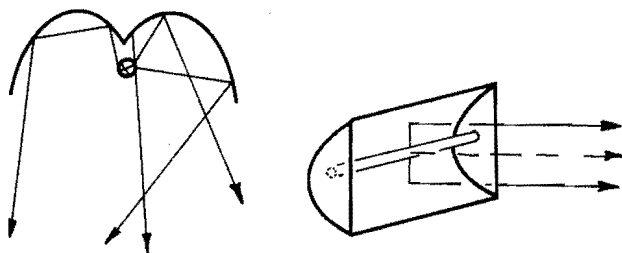
De kogelvorm reflekteert het licht weer in de richting van de lamp, indien deze zich in het middelpunt bevindt.

Bevindt de lamp zich in het brandpunt van een parabolische reflektor, dan wordt een evenwijdige bundel uitgestraald.

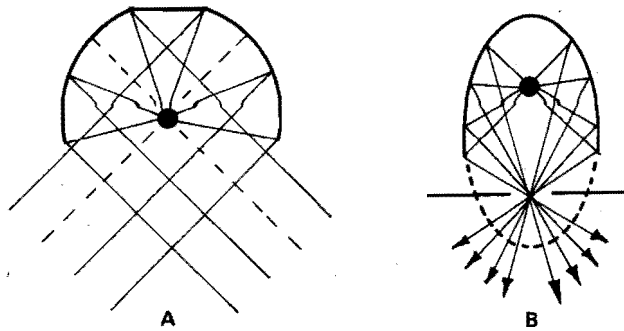
Bij de ellipsoïde reflektor bevindt de reflektor zich in het ene brandpunt, terwijl de gereflekteerde stralen samenkomen in het andere brandpunt en van daaruit divergeren. Op deze manier kan veel licht door een kleine opening worden gevoerd. Wel rekening houden met zeer hoge temperaturen in het tweede brandpunt. Zie *figuur 7.24, 7.25 en 7.26.*



Figuur 7.24. a. kogel- of sferische reflektor
b. combinatie van kogel (K) en parabolische reflektor (P)



Figuur 7.25. Eenzijdig gekroonde reflektoren voor FL-lampen
(parabolische vormen)



Figuur 7.26. a. Parabolische reflektor
b. Ellipsoïde reflektor

Lange lijnvormige lampen, zoals de FL-lamp kunnen worden gekombineerd met gootvormige reflectoren. Bij de paraboolvorm treedt in één richting - loodrecht op de as van de lamp - een evenwijdige bundel uit (bandvormige lichtverdeling).

Afdekrasters en afdekkappen

Deze hebben één of meer van de volgende functies:

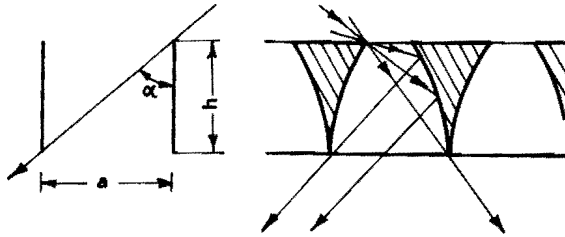
- de binnenkant te beschermen tegen stof of vocht.
- het reduceren of geheel ondervangen van de verblinding.
- het richten van het licht.

Opaalglas en dergelijke verstrooiende afdekkingen reduceren de reflectie-verblinding en hinderlijke glans in het werkstuk.

Zij verhinderen echter niet de verblindende werking rechtstreeks naar het oog. Refraktiekappen met prismavormige structuren reduceren de rechtstreekse verblinding van het armatuur maar kunnen weer hinderlijke spiegeling veroorzaken in de oogtaak.

Lamellen en roosters geven afscherming tegen directe verblinding door het armatuur. De afschermhoek ligt gewoonlijk tussen 45° en 60° ten opzichte van de normaal. Ten aanzien van verblinding door reflectie geven deze voorzieningen nauwelijks verbetering.

Spiegelende rasters zijn vooral geschikt voor laaghangende armaturen. Door de parabolische vorm wordt de uitstraling zodanig geleid dat nagenoeg elke directe verblinding wordt uitgesloten. Dit gaat wel ten koste van het armatuur rendement, zie figuur 7.27.



Figuur 7.27. Parabolisch gevormd spiegelraster.

7.3. Lichtberekening volgens de lichtstroommethode

Brengt men in een rechthoekig doosvorming vertrek op onderling regelmatige - niet te grote - afstanden armaturen aan in het plafond, dan kan over het oppervlak van het vertrek een gelijkmatige verlichtingssterkte worden verwacht. Als meetvlak wordt gedacht aan het werkvlak, dat is een denkbeeldig horizontaal vlak op meestal 0,85 m boven de vloer, uitgestrekt over de gehele ruimte. Men kan hier spreken van een gemiddelde verlichtingssterkte die wordt gedefinieerd als de door het werkvlak ontvangen lichtstroom gedeeld door het oppervlak van het werkvlak.

Slechts een gedeelte van de geïnstalleerde lichtstroom, dat is de totaal uitgezonden lichtstroom van alle lampen, bereikt het werkvlak.

Wij zullen nagaan welke factoren hierop invloed hebben.

7.3.1. Begrippen en aannamen.

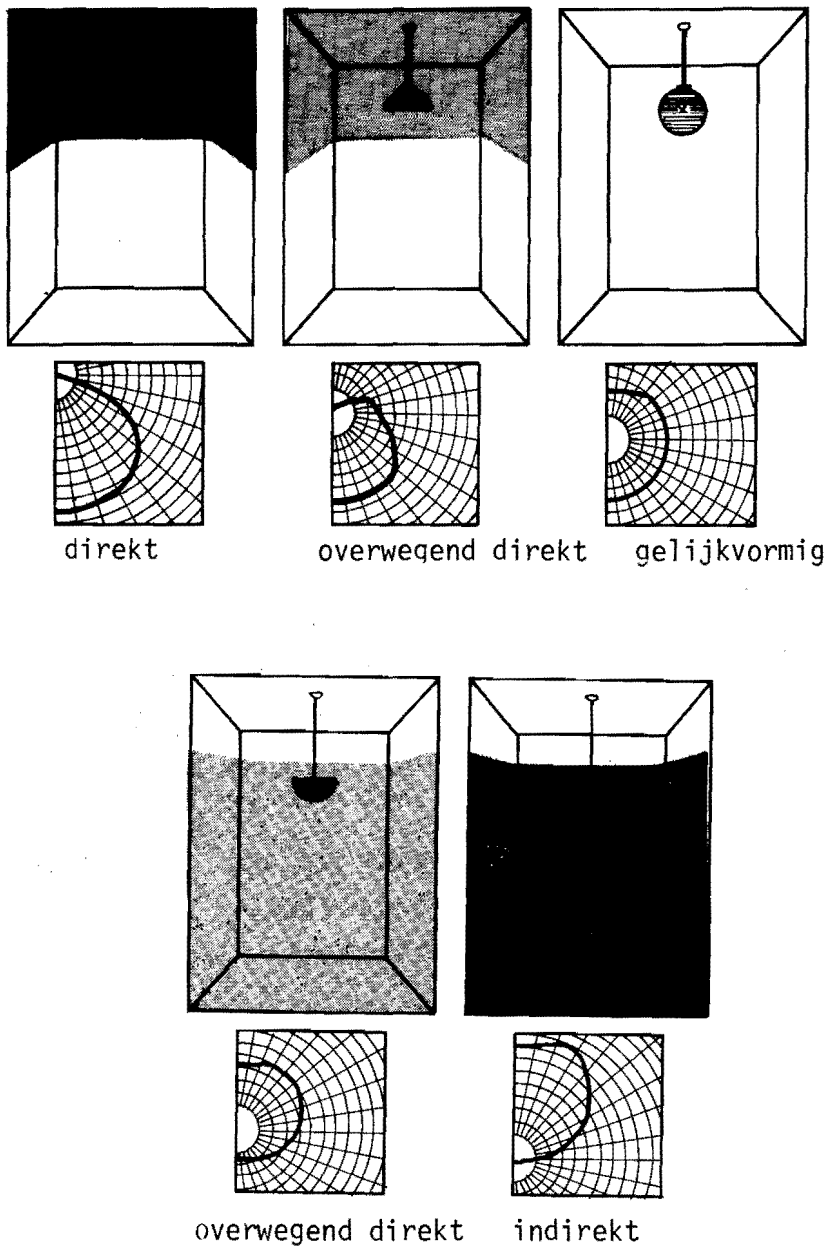
Armatuurrendement.

Een gedeelte van de lichtstroom die door de lampen wordt uitgezonden wordt geabsorbeerd in het armatuur. Onder het armatuurrendement wordt verstaan de verhouding van de door het armatuur uitgestraalde lichtstroom en de lichtstroom geleverd door de lampen in het armatuur.

$$\eta_{\text{arm}} = \frac{\Phi_{\text{arm}}}{\Phi_{\text{lampen}}}$$

Op zichzelf genomen zegt dit gegeven nog weinig over het aandeel van de geïn-

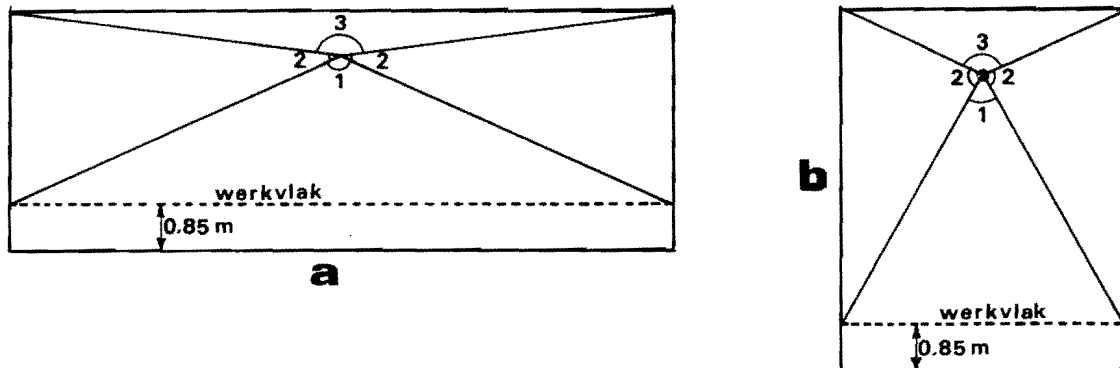
stalleerde lichtstroom die het werkvlak bereikt. De categorie waartoe het armatuur behoort (direkt, indirekt, smalle of brede bundel, enz) in samenhang met de vorm en de afwerking van het vertrek vormen factoren waarvan de nuttige lichtstroom in belangrijke mate afhankelijk is, zie *figuur 7.28*.



Figuur 7.28. Voorbeelden van lichtsterkte-verdelingen en de invloed daarvan op het vertrek.
Ontleend aan (34).

Vorm van het vertrek, vorm-index.

De lichtstroom die wordt uitgezonden door een reeks in het vertrek aangebrachte armaturen kan men opdelen in verschillende ruimtehoeken, zie *figuur 7.29*.



Figuur 7.29. Verdeling van de lichtstroom over de ruimte

Afhankelijk van het armatuur-type en de verhoudingen van lengte, breedte en hoogte van het vertrek bereikt een groter of kleiner aandeel van het uitgestraalde licht direct het werkvlak.

Deze vertrek-verhoudingen komen tot uiting in de vorm-index, ook wel vertrek-index genoemd.

$$\text{vorm-index} = (k) = \frac{L \cdot B}{h (L + B)}$$

waarin L = lengte van het vertrek [m]

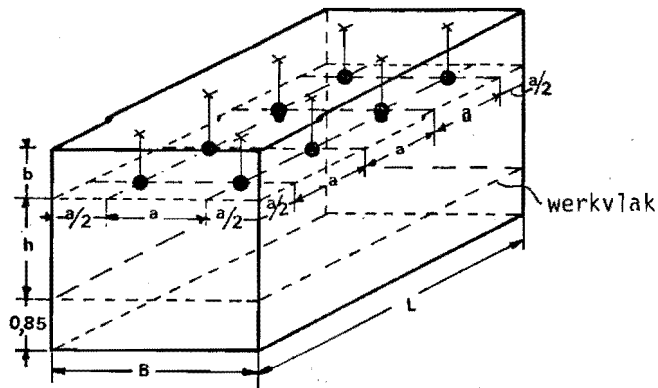
B = breedte van het vertrek [m]

h = onderlinge afstand tussen het vlak waarin de armaturen zich bevinden en het werkvlak [m] (*zie figuur 7.30a+b*).

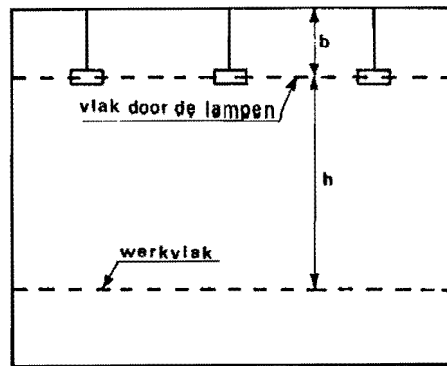
De vorm-index geeft de verhouding aan tussen de totale oppervlakte van de horizontale begrenzingsvlakken en de totale oppervlakte van de verticale begrenzingsvlakken van werkvlak tot hart armaturen.

Een bureau-landschap - brede platte koek - heeft een hoge waarde ($k = 5$), een kubusvormig vertrek leidt tot een lage waarde voor de vorm-index.

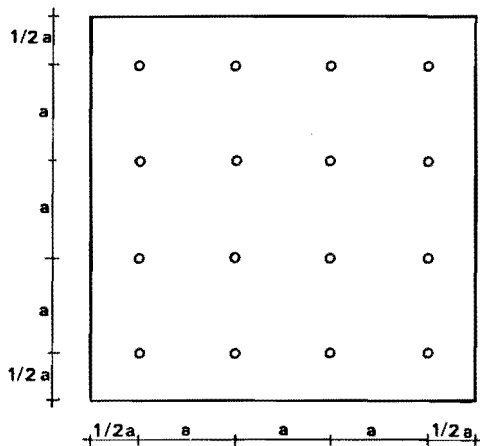
De mate waarin gereflekteerd licht meedoet aan de verlichting van het werkvlak hangt behalve van de vorm van de ruimte ook af van de reflectie-eigenschappen van wanden, vloer en plafond.



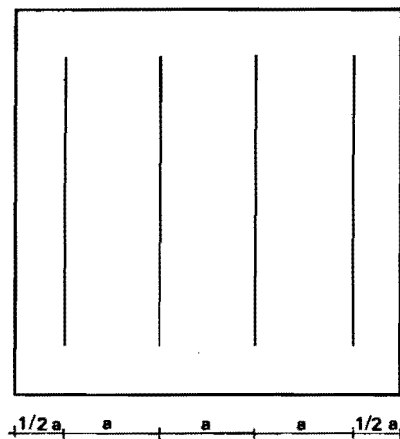
figuur 7.30a



figuur 7.30b



open patroon

figuur
7.30c

gesloten lichtlijnen

Figuur 7.30a, b, c. Rangschikking van de armaturen.

Verlichtingsrendement.

Onder het verlichtingsrendement wordt verstaan de verhouding van de hoeveelheid licht die het werkvlak bereikt en de door de lampen uitgestraalde lichtstroom:

$$n_{\text{verl}} = \frac{\Phi_{\text{werkvlak}}}{\Phi_{\text{lampen}}}$$

In het verlichtingsrendement zit dus verdisconteerd het lichtverlies door de armaturen en het lichtverlies dat optreedt door absorptie in de begrenzingsvlakken.

Depreciatie (D)

Na in gebruikname van een nieuwe verlichtingsinstallatie treedt in de loop van de tijd veroudering op van de lampen en vervuiling van lampen en armaturen. Dit leidt tot een afname van de uitgestraalde lichtstroom.

Afhankelijk van de omgeving en de onderhoudsperioden kan de lichtstroom op het moment van onderhoud of vernieuwing zijn gereduceerd tot 90% - 60% of nog minder van de nieuwe toestand. Met deze depreciatie moet rekening worden gehouden bij de berekening van een verlichtingsinstallatie. Voor normaal kantoorwerk en redelijke onderhoudstermijnen kan worden aangenomen $D = 0,8$.

Verlichtingsformule.

Aan de hand van deze gegevens ontstaat de verlichtingsformule:

$$E_{\text{gem}} = \frac{\Phi_{\text{lampen}} \cdot \eta_{\text{verl.}} \cdot D}{L \cdot B} \quad [\text{lux}]$$

Hierin is :

η_{verl} = verlichtingsrendement = $\frac{\text{werkvlak}}{\text{lampen}}$

Φ_{lampen} = de door de lampen uitgestraalde lichtstroom [lm]

D = depreciatiefactor

L = lengte van het vertrek [m]

B = breedte van het vertrek [m]

E_{gem} = gemiddelde horizontale verlichtingssterkte op het werkvlak [lux]

Meestal wordt aan de verlichtingssterkte een eis gesteld, de formule kan worden geschreven:

$$\Phi_{\text{lampen}} = \frac{E_{\text{gem}} \cdot L \cdot B}{\eta_{\text{verl}} \cdot D} \quad [\text{lm}]$$

Gelijkmatigheid.

Om aan de wens van een zekere gelijkmatigheid in de lichtverdeling te voldoen dienen voorwaarden te worden gesteld aan de toelaatbare onderlinge afstand en de rangschikking over het plafondoppervlak van de armaturen. (zie ook figuur 7.30c).

Tabel 7.6. geeft grenswaarden die gebaseerd zijn op een verhouding

$$E_{\text{min}}/E_{\text{max}} \geq 0,70.$$

Is het aantal lampen per armatuur bekend en de door de lampen van één armatuur uitgezonden lichtstroom $\Phi_{\text{arm.}}$, dan wordt het benodigde aantal armaturen N gevonden uit:

$$N = \frac{E_{\text{gem}} \cdot B \cdot L}{\Phi_{\text{arm.}} \cdot \eta_{\text{verl.}} \cdot D}$$

	maximaal toelaatbare onderlinge afstanden	
	open patroon	gesloten lichtlijnen
spiegeloptiek	$a = 1 \quad h$	
black body	$= 0,6$	
lichtrooster	$= 0,6$	
lichtrooster op montagebalk	$= 1,4$	$a = 1,7 \quad h$
reflektor	$= 1,6$	$= 1,9$
dwarslamellen	$= 1,4$	$= 2,1$
lamellenrooster	$= 1,4$	$= 1,7$
kunststofrooster	$= 1,5$	$= 1,7$
prisma kap	$= 1,3$	$= 1,6$
opalen kap	$= 1,5$	$= 1,8$
breedstralend spiegeloptiek	$= 1,1$	$= 2,0$
low brightness spiegeloptiek	$= 1,4$	$= 1,7$
persglas "spot"	$= 0,4$	
persglas "flood"	$= 0,7$	
diffusoren en indirecte verl.	$= 1,7$	
FL zonder omhulling tegen het plafond	$= 1,5$	
overwegend indirecte verlichting	$= 3 \cdot b$	(b = afstand tussen armatuur of lichtkoof en plafond)
armaturen voor indirecte verlichting	$= 5 \cdot b$	
gloeilamp of FL in koven aan 2 zijden	$= 3 \cdot b$	

Tabel 7.6.

Vertrek rendement.

Het verlichtingsrendement is afhankelijk van het armatuur-rendement en de "samenwerking" tussen de armaturen en het vertrek.

In handboeken die door licht-firma's worden uitgegeven komen tabellen voor die elk betrekking hebben op een bepaald te leveren armatuur. In deze tabellen wordt verband gelegd tussen vorm-index, reflektiefactoren en verlichtingsrendement.

Om de invloed van de vertrek-eigenschappen te verzelfstandigen werkt men in meer algemeen geldende tabellen met het begrip vertrek-index. Onderlinge relatie:

$$\eta_{\text{verl.}} = \eta_{\text{arm.}} \cdot \eta_{\text{vertrek}}$$

Aangezien de invloed van vorm en reflektiefactoren van het vertrek niet is los te koppelen van de eigenschappen van het toegepaste armatuur (direkt, indirekt, enz.) kan men dit begrip alleen hanteren indien de beschikbare armaturen worden ingedeeld in groepen met ongeveer dezelfde lichttechnische eigenschappen.

De aldus samengestelde tabellen zijn minder nauwkeurig dan de eerder genoemde maar hebben het voordeel van algemene bruikbaarheid door loskoppeling van een bepaald merk. Zie figuur 7.31a tot en met 7.31f.

Voorbeeld 7.1.

Gegeven

bureau-landschap $L = 28 \text{ m}$ $B = 20 \text{ m}$
 hoogte vloer-plafond $= H = 3,20 \text{ m}$
 hoogte werkvlak $= 0,80 \text{ m}$
 hieruit volgt $h = 2,40 \text{ m}$
 de armaturen worden ingebouwd in het plafond

Reflektiefactoren

$\rho_{\text{plafond}} = 0,5$
 $\rho_{\text{wand}} = 0,3$
 $\rho_{\text{werkvl.}} = 0,3 \text{ (vloer)}$

Gekozen armatuur

armatuur met breedstralend spiegelraster voor 3 FL-lampen van 1,20 m.
 Type TL84 met 80 lm/W, 36 watt en $R_a = 85$

Eisen

gelijkmatige lichtverdeling over het gehele werkvlak met
 $E_{\text{gem}} = 600 \text{ lx}$

Uitwerking

Lichtstroom per lamp $36 \cdot 80 = 2880 \text{ (lm)}$

Lichtstroom per armatuur $3 \cdot 2880 = 8640 \text{ (lm)}$

Tabel 7.2 is van toepassing voor het gekozen armatuur type.

$\eta_{\text{armatuur}} = 60\% \text{ of } 0,6$

$$\text{Vorm-index } k = \frac{28 \cdot 20}{2,40 \cdot (28 + 20)} \approx 5$$

Vertrek rendement voor $k = 5$ en de gegeven reflectiefactoren
 $\eta_{\text{vertrek}} = 102\% \text{ of } 1,02$

$$\text{Verlichtingsrendement } \eta_{\text{verl}} = 0,6 \cdot 1,02 = 0,61$$

$$N = \frac{600 \cdot 20 \cdot 28}{8640 \cdot 0,61 \cdot 0,8} = 79,6 = 80 \text{ armaturen}$$

Wij kiezen voor 8 . 10 rijen. De hart op hart afstand wordt: in de breedterichting $20/8 = 2,0 \text{ m}$ en in de lengterichting $28/10 = 2,80 \text{ m}$.

De toelaatbare onderlinge afstand voor het gekozen armatuur type bedraagt volgens tabel 7.6: $1,1 \text{ h} = 1,1 \cdot 2,4 = 2,66 \text{ m}$

De overschrijding is toelaatbaar.

Energieverbruik $80 \times 3 \times 36 = 8640 \text{ W}$

Toeslag (voorschakelapp.) $15\% = 1296 \text{ W}$

Totaal	9936 W
--------	--------

$$\text{per m}^2 \frac{9936}{560} = \sim 18 \text{ W/m}^2$$

7.3.2. Globale berekeningsmethodiek

Het is mogelijk, door het stellen van enkele algemene uitgangspunten op een eenvoudige manier het energieverbruik te bepalen in W/m^2 vloeroppervlak.

- vorm van de ruimte A) $L \text{ en } B \gg H$ (kantoortuin)

$$k = 5$$

B) $L = 5 \text{ m}$ en $B = 5 \text{ m}$ $h = 2,40 \text{ m}$ (werkkamer)

$$k = 1$$

- reflectiefactoren (gemiddelde gangbare waarden)

plafond $\rho = 0,5$

wanden $\rho = 0,3$

vloer $\rho = 0,3$

- depreciatie (goed onderhouden kantoorgebouw)

$$D = 0,8$$

- lamptype (3-banden fluorescentielampen)
 $R_a = 0,85$
 verlichtingsrendement 80 lm/W
 extra stroomverbruik voorschakelapparatuur = 15%; dit
 resulteert in:
 stroom geïnstalleerd = $80/1,15 = 70$ lm/W

Deze gegevens kunnen van toepassing zijn op elk armatuur type in de tabellen.

$$\Phi_{\text{geïnst.}} = \frac{E_{\text{gem}} \cdot B \cdot L}{\eta_{\text{verl.}} \cdot D}$$

$$\Phi_{\text{geïnst. (per m}^2\text{)}} = \frac{E_{\text{gem}}}{\eta_{\text{verl.}} \cdot D}$$

$$W_{\text{geïnst. (per m}^2\text{)}} = \frac{E_{\text{gem}}}{\eta_{\text{verl.}} \cdot D \cdot 70} \quad (70 \text{ lm/W})$$

$$W_{\text{geïnst. (per m}^2\text{)}} = \frac{E_{\text{gem}}}{\eta_{\text{verl.}} \cdot 0,8 \cdot 70} \quad (D = 0,8)$$

$$W_{\text{geïnst. (per m}^2\text{)}} = \frac{E_{\text{gem}}}{\eta_{\text{verl.}} \cdot 56}$$

$$W_{\text{geïnst. (per m}^2\text{)}} = \frac{E_{\text{gem}} \cdot 18}{\eta_{\text{verl.}} \cdot 1000}$$

of, indien $E_{\text{gem.}}$ in kilolux:

$$W_{\text{geïnst.}} = \frac{18 \cdot E_{\text{gem}}}{\eta_{\text{verl}}} \text{ (per m}^2\text{)}, \quad \text{met } E_{\text{gem}} \text{ in [klux]}$$

Voorbeeld 7.2.

A. Kantoortuin met spiegelraster engstralend (zie figuur 7.31a)

$$\text{eis: } 600 \text{ lx} = E_{\text{gem}}$$

$$\eta_{\text{verl.}} = 1,06 \cdot 0,60 = 0,64$$

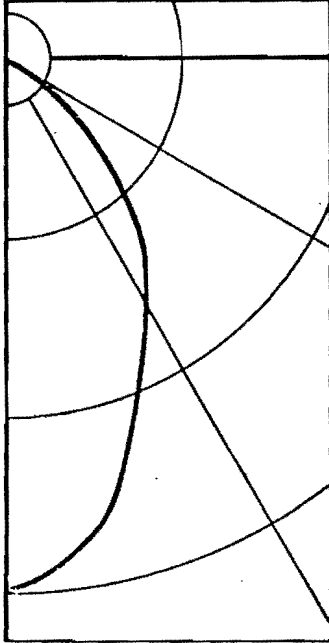
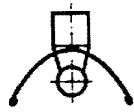
$$W_{\text{geïnst.}} = 18 \cdot 0,6/0,64 = \underline{\underline{17 \text{ W/m}^2}}$$

B. Vertrek van 5,5 m² met spiegelraster engstralend (*zie figuur 7.31a*)

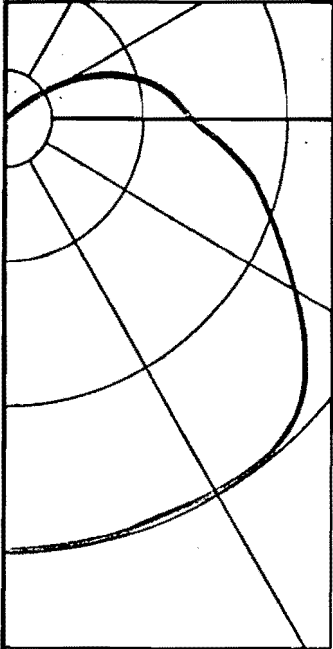
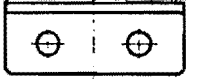
$$\text{eis : } 600 \text{ lx} = E_{\text{gem.}}$$

$$\eta_{\text{verl.}} = 0,70 \cdot 0,60 = 0,42$$

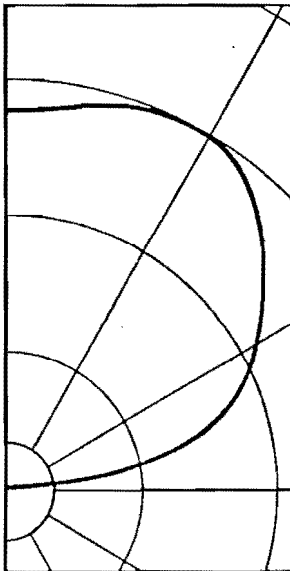
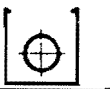
$$W_{\text{geïnst.}} = 18 \cdot 0,6 / 0,42 = \underline{\underline{26 \text{ W/m}^2}}$$

											
armatuur										armatuur- rendement	inwendige temp.verh. (ΔT)
 spiegelraster met nauwe bundel										60	10
 spiegelreflector met één lamp										80	5
 reflector met nauwe bundel (hagedruk lamp)										75	
plafond	ρ_1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0
wanden	ρ_2	0,5	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0
vloer	ρ_3	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,1	0
vertrekindex		vertrek-rendement (%)									
	0,6	61	58	54	52	59	57	53	51	51	46
	1,0	80	75	73	69	76	73	70	68	67	62
	1,5	95	86	88	82	90	84	84	80	79	75
	2,0	102	91	96	87	95	89	91	86	84	80
	3,0	111	97	106	95	103	95	99	92	91	87
	5,0	119	102	115	100	109	98	106	97	96	92

Figuur 7.31a. Ontleend aan (34).

											
armatuur								armatuur- rendement (%)	inwendige temp.verh. (ΔT)		
 opalen kap								50	20°		
 refraktor-kap								65	20°		
 gloeilamp met heldere kap								70			
plafond (ρ_1)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0	
wanden (ρ_2)	0,5	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0	
vloer (ρ_3)	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,1	0	
vertrek-index	(k)	vertrek-rendement (%)									
0,6	41	39	31	30	37	35	29	28	27	20	
1,0	59	55	49	46	52	50	44	43	41	32	
1,5	74	67	64	60	66	61	58	55	52	43	
2,0	83	74	73	67	73	68	66	62	59	50	
3,0	95	83	87	77	83	76	77	71	68	59	
5,0	106	91	99	86	91	83	87	80	76	67	

Figuur 7.31d. Ontleend aan (34).

	armatuur							armatuur- rendement (%)	inwendige temp.verh. (ΔT)		
								brede witte goot	~70	~ 5	
								smalle witte goot	~50	~10	
Plafond (f ₁)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0	
Wanden (f ₂)	0,5	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0	
Vloer (f ₃)	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,1	0	
Vertrekeindex (k _i [*])		vertrek-rendement (%) ^{**}									
	0,6	15	15	9	10	11	12	6	8	5	0
	1,0	28	27	20	19	18	19	13	13	8	0
	1,5	41	39	31	30	26	25	20	19	13	0
	2,0	51	48	41	40	32	30	26	25	16	0
	3,0	65	58	55	52	39	37	34	32	20	0
	5,0	77	68	70	63	45	43	42	39	24	0

* voor indirecte verlichting geldt: $k_i = \frac{3 \cdot a \cdot b}{2h'(a+b)}$; waarbij h' = afstand plafond tot werkvlak

** voor lichtgoten tegen de wand moet het vertrek-rendement met 0,6 worden vermenigvuldigd.

Figuur 7.31f Ontleend aan (34).

LITERATUUR

1. Hoen, P.J.J. en R.V.L.M. Thijs: Verbeterde graaddagenmethode, vakgroep FAGO, TH Eindhoven, juni 1981.
2. Stuurgroep Energie en gebouwen: Samenvatting "Design-Aids" voor energiebewust ontwerpen, 's-Gravenhage, oktober 1981.
3. Lühr, H.P.: Werkzeug für Architekten: Eine einfache Berechnungsmethode für passiv-Sonnenbeheizte Wohngebäude, Bauphysik 3, Juni 1981.
4. Esdorn, H. en G. Wentzlaff: Zur Berücksichtigung der Sonnenstrahlung bei der Berechnung des Jahreswärme verbrauchs, HLH 32(1981)9.
5. Bruggen, R.J.A. van der: Energy consumption for heating and cooling in relation to building design, dissertatie TH Eindhoven, 1978.
6. Commissie van de Europese Gemeenschappen Directoraat-Generaal XII. Onderzoek, Wetenschappen en Onderwijs: Berekeningen en gegevensboekje bij de Tweede Europese Wedstrijd voor passief gebruik van Zonne-energie, 1982.
7. Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk Aktiengesellschaft: RWE Bau-Handbuch Ausbau 1981/1982, 1-3 Bauphysikalische und bautechnische Grundlagen, 14 Bivalente Wärmepumpen - Heizung, 17 Sonnenenergie.
8. Gids, de W.F. en P.J. Schippers Luchtdichtheid en onnodig energieverlies van woningen, IMG-TNO / Bouwfonds Nederlandse Gemeenten.
9. Voorden, van der M: Collegedictaat Stedebouwfysica (gc49) deel: Bezonning. Vakgroep Bouwfysica, afdeling Civiele Techniek en Afdeling Bouwkunde (1980)
10. NEN 1068: Thermische isolatie van gebouwen, Delft, Nederlands Normalisatie Instituut, 1981.
11. Vos, B.H: Criteria voor de warmte-isolatie van gebouwen, PT Bouwkunde 34(1979)pag. 194-199.
12. Tammes, E: De thermische isolatie-index voor gebouwen in de norm NEN 1068, PT Bouwkunde 35(1980)7, pag. 413-416.
13. NEN 1087: Ventilatie van woongebouwen, Rijswijk, Nederlands Normalisatie Instituut, 1975.
14. NPR 1088: Ventilatie van woongebouwen, aanwijzingen voor en voorbeelden van de constructie uitvoering van ventilatievoorzieningen, Rijswijk, Nederlands Normalisatie Instituut, 1975.
15. TPD-TNO-TH en Tebodin Advies- en Constructiebureau: Onderzoek naar de

relatie tussen k-gebouw, energiebruik en globale bouwkosten, alsmede de samenhang met de behaaglijkheid. Rapport samengesteld in opdracht van de Stuurgroep Energie en Gebouwen, Delft (1978), TPD-rapport no. 700-207.

16. Perquin, G.M.A. en K. Hoogendoorn Vochthuishouding in gebouwen. Polytechnisch Tijdschrift-Bouwkunde, 33(1978)11 pag. 663-668.
17. S.B.R. publicatie 42: Zonwering bij gebouwen, Samson Uitgeverij, Alphen aan de Rijn, 1974.
18. Seiffert, K: Wasserdampdiffusion im Bauwesen. Wiesbaden, Bauverlag, 1967.
19. NORM ISO/R140: Field and laboratory measurements of airborne and impact sound transmission, 1960.
20. NEN 1070: Geluidwering in woongebouwen, Rijswijk, Nederlands Normalisatie Instituut, 1976.
21. Feitsma, B: Geluid, Bouwcentrum, Documentatie Bouwwezen, 1972.
22. Steenbrugge, B. van: Geluidbeheersing-lawaaibestrijding, Den Haag/Rotterdam, Nijgh en van Ditmar, 1975.
23. Kosten, C.W.: Collegedictaat Bouwfysica, b.o., Technische Hogeschool Delft, 1972.
24. Praktijkrichtlijnen NPR 5070: Geluidwering in woongebouwen - Voorbeelden van wand- en vloerconstructies, Rijswijk. Nederlands Normalisatie Instituut, 1977.
25. SBR-publicatie 45: Flankerende geluidoverdracht, berekening van de isolatie-index tussen vertrekken, Samson uitgeverij, Alphen aan de Rijn, 1974.
26. Gerretsen, E.: Voorspellen van geluidisolatie, Bouwwereld 75(1979)4, 5 en 7.
27. Kollegediktaat gc40 (september 1981) of kollegediktaat g9, deel Bouwfysica (september 1981): vakgroep Bouwfysica, afdelingen Bouwkunde en Civiele Techniek, Technische Hogeschool Delft.
28. Terwindt, F.T.R.M: De invloed van de interne reflektiekomponent op de daglichtfaktor, afstudeerverslag van de vakgroep Bouwfysica, Afdelingen Bouwkunde en Civiele Techniek, Technische Hogeschool Delft, 1979.
29. Gan, J.B.S.: De invloed van de interne reflektiekomponent op de daglichtfaktor, afstudeerverslag van de vakgroep Bouwfysica, afdelingen Bouwkunde en Civiele Techniek, Technische Hogeschool Delft, 1981.
30. Hansen, A.J.: Onderzoek naar bezonning en daglichttoetreding voor het project "Stadhuis Lelystad", intern rapport vakgroep Bouwfysica, afdelingen

Bouwkunde en Civiele Techniek, Technische Hogeschool Delft, 1981.

31. Lynes, J.A.: Principles of natural lighting, Elsevier publishing company Ltd, Amsterdam - Londen - New York, 1968.
32. Nederlandse Stichting voor Verlichtingskunde: Aanbevelingen voor binnenverlichting, Arnhem 1981.
33. Philips brochure no. 3: "TL" Fluorescentielampen, Eindhoven.
34. R.W.E.-Bau-Handbuch, Technischer Ausbau 1981/1982. Heidelberg, Energie-Verlag GmbH, 1981.
35. Boer, J.B. de en A.J.F. Rutten: Algemene verlichtingskunde, collegedictaat TH Eindhoven, Afdeling der Bouwkunde, 1974.
36. Vries, L. de: De bliksem getemd, Bussum, Unieboek/de Gooise Uitgeverij, 1979.
37. Handbuch für Beleuchtung: Essen, Verlag W. Girardet, 1975.
38. Hentschel, H.J.: Licht und Beleuchtung, Berlin/München, Siemens Aktiengesellschaft, 1972.

