

Subjectieve beeldkwaliteit als functie van kijkafstand, beeldgrootte en resolutie

Citation for published version (APA):

Westerink, J. H. D. M. (1987). *Subjectieve beeldkwaliteit als functie van kijkafstand, beeldgrootte en resolutie*. (IPO-Rapport; Vol. 586). Instituut voor Perceptie Onderzoek (IPO).

Document status and date:

Gepubliceerd: 03/08/1987

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

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

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

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

INSTITUUT VOOR PERCEPTIE ONDERZOEK
Postbus 513 5600 MB Eindhoven

JW/jw 87/10
03.08.1987

Rapport no. 586

Subjectieve beeldkwaliteit als functie van
kijkafstand, beeldgrootte en resolutie

J.H.D.M. Westerink

Samenvatting

Dit verslag beschrijft twee experimenten betreffende de subjectieve kwaliteit van complexe scènes. Hierin is gebruikt gemaakt van diaprojecties, en deze zijn gevarieerd in resolutie, kijkafstand en beeldgrootte. De subjectieve kwaliteit is beoordeeld door een twintigtal proefpersonen door middel van categorieschaling.

De experimentele resultaten tonen aan, dat de absolute resolutie uitgedrukt in perioden per graad, en de beeldhoek opgespannen door het display, onafhankelijk hun invloed op de kwaliteit hebben. De subjectieve kwaliteit neemt toe met de resolutie, doch verzadigt bij een resolutie (6 dB-afsnijfrequentie) van ongeveer 25 perioden per graad. Verder bestaat er een lineair verband tussen de subjectieve kwaliteit en de logaritmie van de beeldhoek.

In de discussie worden deze resultaten vergeleken met een aantal in de literatuur bekende experimenten. Ook worden de resultaten vertaald naar enkele praktijksituaties, bijvoorbeeld de consequenties voor het gebruik van HDTV.

Inhoud

1	Inleiding	4
2	De experimenten	6
2.1	Methode	6
2.2	Proefopzet	7
2.3	Implementatie	9
3	Categorieschalen en subjectieve schalen	12
3.1	Thurstone's Law of Categorical Judgment	12
3.2	10-punts versus 100-punts categorieschaal	13
3.3	Spreiding over proefpersonen	15
4	Resultaten	18
4.1	Methode van verwerking	18
4.2	Resultaten EXP1	18
4.2.1	Algemeen	18
4.2.2	Afgeleide beschouwingen	20
4.2.3	Verschillende scènes	21
4.2.4	Verschillende proefpersonen	21
4.3	Resultaten EXP2	23
4.3.1	Vergelijking met EXP1	23
4.3.2	Algemeen	23
4.3.3	Afgeleide beschouwingen	25
5	Conclusies en discussie	26
5.1	Vergelijking van beide experimenten	26
5.2	Size-constancy-effect	27
5.3	Optimale kijkafstand	28
5.4	Relatie met TV en HDTV	29
	Referenties	31
A	Aanwijzingen voor de proefpersoon	33

B	Lensdefocussing	35
B.1	Theorie	35
B.2	Meetprocedure	36
B.3	Gemeten resoluties en bronnen van spreiding	37

1 Inleiding

Dit verslag beschrijft een aantal experimenten betreffende de beeldkwaliteit als functie van enkele fysische parameters. Laten wij daarom als eerste even stilstaan bij het begrip beeldkwaliteit.

Het begrip beeldkwaliteit speelt zich af in een tweetal werelden. Het *beeld* namelijk is te beschrijven aan de hand van zijn fysische parameters, zoals daar zijn: Grootte, luminantie, resolutie, spectrale scène-inhoud en artefacten zoals ruis en flikker. Tesaamen spannen deze parameters een meerdimensionale fysische ruimte op.

De *kwaliteit* van het beeld echter is subjectief, dat wil zeggen afhankelijk van degene die er naar kijkt. Zij moet dus beschreven worden in psychologische termen, die wel percepten of sensaties worden genoemd. Helderheid, scherpste, subjectief contrast en waargenomen grootte zijn hier voorbeelden van. Op hun beurt spannen ook de percepten een meerdimensionale (psychologische) ruimte op. Beeldkwaliteit is nu te zien als een functie met als domein de fysische ruimte, en als bereik de psychologische.

Algemeen doel van het onderzoeksproject 'Beeldkwaliteit' is te komen tot een karakterisatie van de (subjectieve) kwaliteit als functie van verschillende globale fysische parameters. Artefacten, die in het beeld meestal een lokaal karakter hebben, worden vooralsnog buiten beschouwing gelaten. In eerdere experimenten op het IPO is de invloed van luminantie, beeldgrootte en kijkafstand op de kwaliteit onderzocht door van der Zee en Boesten [13], [14]. Zij vonden voor complexe scènes met hoge resolutie een toename van de subjectieve kwaliteit bij toenemende luminantie, en bij toenemende beeldgrootte. De experimenten van het onderhavige verslag zijn een directe voortzetting van hun werk, en betreffen de invloeden van resolutie, beeldformaat en kijkafstand.

Hoewel deze experimenten eenvoudig van proefopzet zijn, worden zij in de literatuur tot nog toe niet gemeld. Reden hiervoor kan zijn, dat de technici voornamelijk geïnteresseerd zijn in de fysische beschrijving van het beeld, terwijl 'kwaliteit' voor psychologen een te vaag begrip is. Experimenten waarin enkele, doch niet alle onderhavige parameters gevarieerd worden, zijn wel bekend.

Van der Zee en Boesten [14] hebben bijvoorbeeld alleen kijkafstand a en beeldbreedte d gevarieerd bij complexe scènes met hoge resolutie. Blijkens hun resultaten neemt de kwaliteit toe met de logaritme van D^2/A , hetgeen

$$Q = \log \frac{D^2}{A}$$

zij verklaren als een gevolg van het bekende 'size-constancy-effect'. Metingen van Hatada [5] wijzen in dezelfde richting.

De invloed van resolutie op beeldkwaliteit is blijkens de literatuur herhaaldelijk onderzocht. Genoemd kunnen worden studies van Snyder [9], Higgins [6], Task [10] en vele anderen (zie hiervoor een literatuurstudie van Westerink [12]). Zij beschrijven, dat de beeldkwaliteit bij toenemende resolutie eerst stijgt, en vervolgens verzadigt ten gevolge van de spatiale gevoeligheid van het visuele systeem. Deze studies hebben echter gemeen, dat zij veelal alleen de resolutie, en niet de kijkafstand of de beeldbreedte variëren, zodat een beschrijving van de interactie van deze parameters niet tot de mogelijkheden behoort.

Een dergelijke beperking kleeft ook aan de data van Jesty [7], die afhankelijk van beeldbreedte en resolutie de optimale kijkafstand bepaald heeft. Hij vindt dat het quotiënt van deze optimale kijkafstand en de beeldbreedte constant is, en afhankelijk van de (relatieve) resolutie van het beeld. Hoe de kwaliteit verloopt buiten deze optimale kijkafstand kan uit deze experimenten echter niet afgeleid worden.

Concluderend kan men stellen, dat de in de literatuur beschreven experimenten verschillende doorsnedes zijn van de experimenten uit dit verslag. Dit onderzoek beschrijft namelijk de kwaliteit in de 'volledige' deelruimte die opgespannen wordt door de drie parameters resolutie, beeldbreedte en kijkafstand. Aan de hand van de resultaten kan derhalve worden nagegaan of, en op welke wijze, de literatuur-gegevens met elkaar in verband te brengen zijn.

$$\frac{a_{opt}}{b} = \text{const}$$

resolutie
beeldbreedte
kijkafstand

2 De experimenten

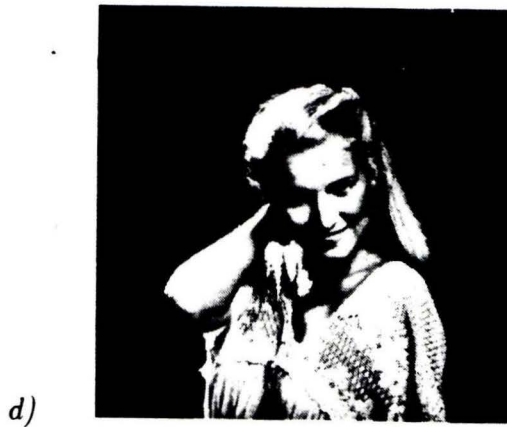
2.1 Methode

Beelden worden in verschillende omgevingen gebruikt, en het begrip beeldkwaliteit kan dan ook afhankelijk zijn van die omgeving. Zo wordt de beeldkwaliteit van militaire luchtfoto's, van medische röntgenopnamen of van tekst-displays voornamelijk gekenmerkt door de mogelijkheid tot, of het gemak van informatie-extractie. Men noemt dit ook wel beeldkwaliteit in een taak-gerichte omgeving. In dergelijke omgevingen kan men proefpersonen een taak laten verrichten, die te maken heeft met de informatie in de beelden. Een prestatie maat, zoals de gemiddelde percentage-correct-score of de reactietijd, kan dan dienen als een maat voor de subjectieve beeldkwaliteit.

Echter, het is juist de beeldkwaliteit in niet-taakgerichte omgevingen, waarin wij geïnteresseerd zijn. Dat heeft tot gevolg, dat het niet mogelijk is proefpersonen een opdracht te laten uitvoeren, zonder het risico te lopen dat de houding van de proefpersoon ten opzichte van het beeld verandert. Derhalve behoort een prestatie-maat niet tot de mogelijkheden om subjectieve kwaliteit in uit te drukken, en moeten wij ons bepalen tot het *oordeel* van de proefpersoon.

In de beschreven experimenten wordt het oordeel van de proefpersoon vastgelegd door middel van de methode van categorieschaling. Een proefpersoon krijgt daarbij een stimulus aangeboden, en hem wordt gevraagd deze op kwaliteit te beoordelen door de stimulus onder te brengen in één van de mogelijke categorieën van de categorieschaal. In deze experimenten is een 100-punts categorieschaal gebruikt, die loopt van 0.1 tot en met 10.0, en dus overeenkomt met het nederlandse systeem van rapportcijfers.

De voor alle proefpersonen en alle stimuli verzamelde categorieschaalwaarden worden de ruwe data genoemd. Zij beschrijven de stimuli (en proefpersonen) op basis van een lineaire objectieve schaal: de afstand tussen de categorieschaalwaardes 7.0 en 8.0 is even groot als die tussen 2.0 en 3.0. Het is echter a priori niet zo, dat ook het kwaliteitsverschil tussen een 7.0 en een 8.0 als even groot wordt ervaren als het kwaliteitsverschil tussen een 2.0 en een 3.0. Anders gezegd: de categorieschaal hoeft psychologisch gezien niet lineair te zijn, terwijl het juist zo'n psychologisch lineaire schaal is, waarin wij geïnteresseerd zijn. Deze kan volgens een model van Thurstone (Law of Categorical Judgment, zie bijvoorbeeld Torgerson [11]) echter geconstrueerd



Figuur 1: Gebruikte scènes

Bovenstaande scènes zijn zwart-wit-reproducties van de in het experiment gebruikte kleurendia's.

- a) Touwen
- b) Terras
- c) Klaagmuur
- d) Thielke
- e) Munttoren.

Alle scènes zijn gebruikt in EXP1; scènes a t/m d zijn gebruikt in EXP2.

worden uit de ruwe data op grond van de spreiding erin. De ruwe data worden daarbij door middel van een niet-lineaire transformatie omgezet naar een psychologisch lineaire schaal. Deze schaaltransformaties worden in meer detail besproken in hoofdstuk 3.

2.2 Proefopzet

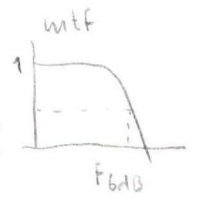
Een tweetal experimenten zijn uitgevoerd: zij verschillen voornamelijk in de parameters waarover de stimuli zijn gevarieerd:

- EXP1 : De variabelen zijn beeldbreedte en resolutie. Met de beeldbreedte varieert ook de beeldhoogte, zodat de scene altijd vierkant is. De resolutie f_{abs} wordt berekend uit de 6 dB-afsnijfrequentie van de modulation transfer function van de afbeeldende apparatuur, en uitgedrukt in perioden per graad (\sim/\circ ; op de gehanteerde resolutiematen wordt nader ingegaan in paragraaf 2.3). Tabel 1 geeft aan welke combinaties van resolutie en beeldbreedte gebruikt zijn. Daarbij is iedere beeldbreedte-resolutie-combinatie vertoond voor een vijftal verschillende scènes (zie figuur 1), hetgeen in totaal 140 verschillende stimuli oplevert. Twintig proefpersonen, met een visus van minimaal 1.0, en allen studenten of medewerkers op het IPO, deden mee aan het experiment.
- EXP2 : De variabelen zijn beeldbreedte, resolutie en kijkafstand. Tabel 2 geeft aan welke combinaties van resolutie, beeldbreedte en kijkafstand gebruikt zijn. Vanwege een verwachte concentratie-afname van de proefpersonen kan de stimulus-reeks niet te lang worden. Derhalve is een keuze gemaakt uit alle mogelijke combinaties van variabelen, en is de experiment-opzet geen volledig gekruist design. Alle combinaties uit tabel 2 zijn vertoond voor vier verschillende scènes (zie figuur 1), hetgeen resulteerde in een totaal van 112 aanbiedingen. Twintig proefpersonen, wederom met een visus van minimaal 1.0, en medewerker of student op het IPO, deden mee aan EXP2. Een viertal van hen participeerde ook in EXP1.

De stimuli zijn voor beide experimenten in een 'quasi'-random volgorde gezet. Daarbij is ervoor gezorgd, dat stimuli met een hoge kwaliteit grofweg egaal gespreid waren in de reeks. Bovendien is nooit tweemaal dezelfde scène

niet logisch!

$x \leftrightarrow f(\sim/\circ)$



? wat is een visus precies

Tabel 1: Stimulusgegevens in EXP1

Vertikaal staan de gebruikte spatiale resoluties f_{abs} , uitgedrukt in \sim/\circ . Horizontaal staan de gebruikte beeldbreedtes b , uitgedrukt in centimeters. In de cellen van de tabel staat aangegeven hoe vaak deze combinatie voor een bepaalde scène is aangeboden aan een proefpersoon. De kijkafstand is in dit experiment 2.9 m.

f_{abs}	b	92	72	48	24	cm
38		1	1	1	1	
26		1	1	1	1	
19		1	1	1	1	
14.0		1	1	1	1	
8.2		1	1	1	1	
3.9		1	1	1	1	
2.7		1	1	1	1	

periode/graad

Tabel 2: Stimulusgegevens in EXP2

In ieder van de deeltabellen staan vertikaal de gebruikte spatiale resoluties f_{abs} , uitgedrukt in \sim/\circ . Horizontaal staan de gebruikte beeldbreedtes b , uitgedrukt in centimeters. In de cellen van de tabel staat aangegeven hoe vaak deze combinatie voor een bepaalde scène is aangeboden aan de proefpersoon. Voor iedere kijkafstand is een apart tabelonderdeel.

a) kijkafstand 2.9 m					b) kijkafstand 3.9 m				c) kijkafstand 5.4 m							
f_{abs}	b	92	72	48	24	f_{abs}	b	92	63	31	f_{abs}	b	92	72	48	24
43		1	1	1	1						59		1	1	1	1
24		1				28		2	2	2	33		1		1	
8.7		1			1						23		1		1	
2.6		1									8.7		1	1	1	1
											2.7		1		1	

na elkaar aangeboden. Ook wordt een bepaalde combinatie van de variabelen beeldbreedte, resolutie, en kijkafstand nooit tweemaal gevolgd door dezelfde andere combinatie. Voor iedere proefpersoon is de volgorde van de stimuli dezelfde, doch het startpunt is deze reeks is willekeurig gekozen. Zo doet de ene proefpersoon ten opzichte van een andere eerst diens laatste gedeelte, en daarna diens begin. Daardoor komen, gemiddeld over de proefpersonen, alle stimuli even vaak aan het begin als aan het einde van de reeks voor.

Voorafgaand aan de serie stimuli, wordt de proefpersoon een aantal 'proef'-stimuli aangeboden. Deze proefstimuli bestrijken in kwaliteit de gehele range van de navolgende 'echte' stimuli, en worden ook wel anker-punten genoemd. Zij dienen om de proefpersoon een indruk te geven van de te verwachten stimuli, zodat hij zijn gebruik van de categorieschaal daarop kan inrichten. De oordelen over de proefstimuli worden niet in de verwerking van de resultaten meegenomen.

Een en ander wordt de proefpersoon aan het begin van het experiment medegedeeld door middel van een geschreven tekst (zie appendix A).

2.3 Implementatie

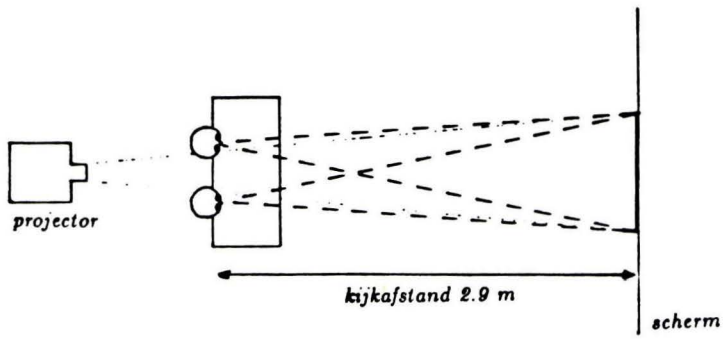
De stimuli werden gevormd door projecties van dia's met complexe scènes op een diffuus projectie-scherm. Voor het bestuderen van (T.V.-)beeldkwaliteit heeft dat als nadeel, dat de beelden niet bewegen. Bij stilstaande beelden is de emotionele betrokkenheid bij de beelden misschien wat minder, en de gevoeligheid voor locale details mogelijk iets groter. Zodoende is het stilstaande beeld te zien als een 'worst-case' benadering van het bewegende beeld.

Een groot voordeel van het werken met dia-projecties is het feit, dat het mogelijk is een stimulus-parameter over een groot bereik te variëren, zonder dat een andere parameter méévarieert. Men kan bijvoorbeeld het beeld vergroten zonder dat de ruis toeneemt.

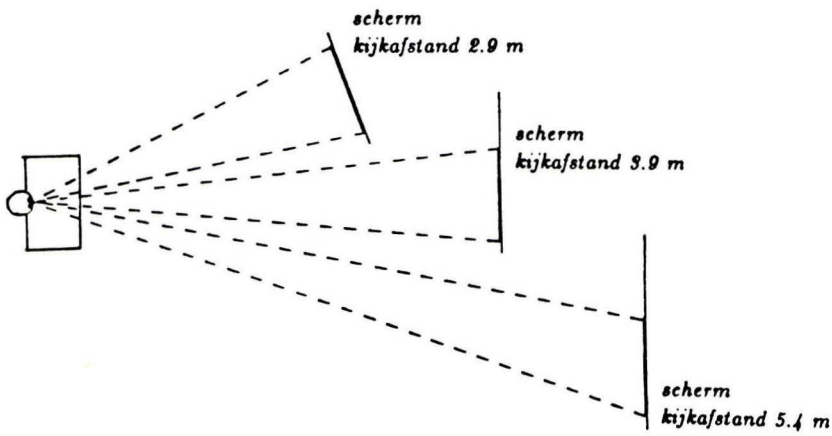
Voor de projectie zijn Kodak Carousel S-RA 2000 projectoren gebruikt, voorzien van een Leitz 150 mm lens. De lichtsterkte van de projectorlampen werd geregeld door aparte power supplies met het oog op stroomstabilisatie. De variaties van de verschillende parameters zijn als volgt teweeg gebracht.

- Kijkafstand: Er is gebruik gemaakt van een aantal projectieschermen, die geplaatst zijn op verschillende kijkafstanden van de proefpersoon.

→ oh
luminantie
by verschillende
b's constant
te houden?



a)



b)

Figuur 2: Proefopstelling

a) Proefopstelling voor EXP1

b) Proefopstelling voor EXP2.

Bij ieder projectiescherm behoort een 'eigen' projector. In EXP2 is voor ieder projectiescherm een stoel van hetzelfde model gezet met het doel de proefpersoon een extra mogelijkheid te geven om de kijkafstand te schatten. Een schets van de opstellingen wordt getoond in figuur 2.

- **Beeldbreedte:** De beeldbreedte is gevarieerd door de originelen van de scènes naar verschillende formaten te kopiëren. Op deze wijze is het mogelijk de beeldbreedte te veranderen zonder de projector te verplaatsen.

De originele scènes zijn opgenomen op $6 \times 6 \text{ cm}^2$ grote moeder-positieven. Deze zijn op high resolution diakopieerfilm verkleind naar de formaten 4×4 , 3×3 , 2×2 en $1 \times 1 \text{ cm}^2$. De uiteindelijke resolutie van de dia-kopieën blijft daarbij groter dan het oplossend vermogen van de projectorlens.

- **Resolutie:** De resolutie is gevarieerd door de lens van de projector te defocuseren. Hiertoe is de lens gemonteerd op een x-y-tafel, die door de combinatie van een stappenmotor, een interface en een Apple IIe gepositioneerd wordt.

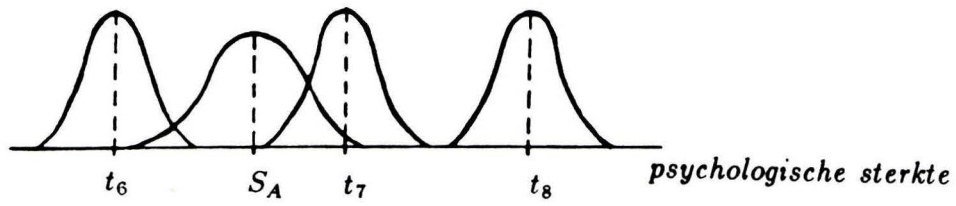
Voor verschillende lensposities is de stapresponsie van van het projectiesysteem gemeten. Hieruit is via Fourier-transformatie de modulatie-overdrachts-functie (modulation transfer function, MTF) van het systeem bepaald. De 6 dB-afsnijfrequentie f_{6dB} van deze MTF is genomen als maat voor de resolutie. Zij wordt uitgedrukt in perioden per meter-op-het-scherm [\sim/m], en kan bij bekende kijkafstand a worden omgerekend naar perioden per graad [$\sim/^\circ$], wat de (absolute) resolutie oplevert: $f_{abs} = \frac{2\pi}{360} \cdot f_{6dB} \cdot a$. Benadrukt moet worden dat deze absolute resolutie onafhankelijk is van de beeldbreedte van de dia.

$$f_{abs} = \frac{2\pi}{360} f_{6dB} \cdot a$$

De aldus aangebrachte variatie van de 6 dB-afsnijfrequentie is reproduceerbaar gebleken, en nagenoeg uniform over het gehele projectievlak (voor meer details zie appendix B).

De stimuli hebben een presentatietijd van 16 s (15 s in EXP2). De interstimulustijd is 19 s (5 s in EXP2), waarin een egaal wit vlak wordt geprojecteerd met een luminantie van 30 cd/m^2 (25 cd/m^2 in EXP2). Dit vlak dient om eventuele nabeelden bij de proefpersoon te laten vervagen, terwijl hij toch geadapteerd blijft aan de stimulus-luminantie. De gemiddelde luminantie van

de scènes is ongeveer 30 tot 40 cd/m^2 ; de open gate luminantie van de projectoren is uiteraard hoger: 320 cd/m^2 (in EXP2 280 cd/m^2). De projectoren leveren de enige verlichting in de kamer, waardoor de omgevingsluminantie een waarde heeft van ongeveer 5 cd/m^2 .



Figuur 3: Het psychologisch continuüm

Aangegeven zijn drie verschillende gemiddelde categoriegrenzen t_6 , t_7 en t_8 en de normale verdelingen waar zij toe behoren. Ook is aangegeven de gemiddelde sterkte van de indruk van een bepaalde stimulus S_A , en de verdeling waartoe deze behoort.

3 Categorieschalen en subjectieve schalen

3.1 Thurstone's Law of Categorical Judgment

Thurstones 'law of categorical judgment' beschrijft de oordelen van een proefpersoon, wanneer deze een bepaalde indruk (bijvoorbeeld de kwaliteitsindruk) op een categorieschaal moet beschrijven. Thurstone gaat er van uit, dat de sterkte van deze indruk kan variëren op een psychologisch continuüm. Hij onderscheidt daarbij de momentane sterkte van de sensatie $S_{X,m}$ ten gevolge van een stimulus X , en de momentane ligging van de verschillende bovengrenzen $t_{i,m}$ van de categorieën i (zie figuur 3). Beide zijn onderhevig aan fluctuaties, en zullen dus een statistische spreiding vertonen. Thurstone neemt hiervan aan, dat het normale verdelingen betreft op het psychologisch continuüm, dus $S_{X,m}$ komt uit de verdeling $N(S_X, \sigma_X)$, en $t_{i,m}$ komt uit de verdeling $N(t_i, \sigma_i)$.

Volgens de 'law of categorical judgment' plaatst de proefpersoon de stimulus X nu in de hoogste categorie i , waarvan de bovengrens nog kleiner is dan de stimuluswaarde, ofwel wanneer $t_{i,m} \leq S_{X,m} < t_{i+1,m}$. Vanwege de fluctuaties in t en S zal een bepaalde stimulus niet steeds in dezelfde categorie beoordeeld worden, dus ook deze categorie-oordelen vertonen een zekere statistische verdeling. Door berekening kan aangetoond worden, dat de categorie-oordelen zelf ook normaal verdeeld zijn, wanneer de categoriegrenzen op het psychologische continuüm allemaal evenver van hun buurgrenzen aflaggen.

In praktijk is dit laatste echter niet altijd het geval, hetgeen weergeeft, dat de categorieschaal psychologisch gezien niet altijd lineair is. Het is nu echter wel mogelijk om de verdeling van de categorie-oordelen (de ruwe data op de categorieschaal dus) zo te transformeren, dat deze wel normaal verdeeld is. De nieuwe schaal wordt geacht meer overeen te komen met het psychologisch continuüm, en wordt de subjectieve kwaliteitsschaal genoemd. De gebruikte transformatie is gebaseerd op de spreiding van de categorie-oordelen op de categorieschaal: wanneer de spreiding gemiddeld groot is voor de stimuli die in een bepaalde categorie vallen, dan heeft de proefpersoon geen grote discriminatie gemaakt met zijn oordelen rond die categorie. In dat geval is de betreffende categorie psychologisch gezien niet zo belangrijk, en moet de breedte van deze categorie op de psychologische schaal verkleind worden. Op analoge wijze wordt een categorie, waarin stimuli vallen met gemiddeld een kleine spreiding

ding, juist vergroot. Deze procedure heeft ook tot gevolg dat, naarmate een proefpersoon een groter vermogen heeft tot reproduceren en discrimineren (en dus voor de meeste stimuli een relatief kleinere spreiding), ook het bereik van zijn subjectieve kwaliteitsschaal groter zal zijn.

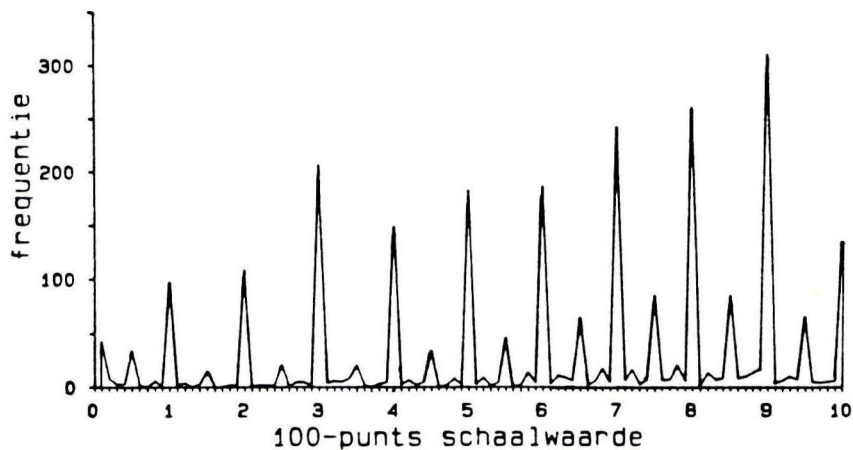
Hoe de transformatie precies in zijn werk gaat, en welke verdere aannames daarbij kunnen worden gehanteerd, wordt onder andere uitgelegd door Torgerson [11]. Hij beschrijft bovendien ook de mogelijkheid om een subjectieve schaal te berekenen uit de spreiding over verschillende proefpersonen. In dat geval is het echter minder duidelijk hoe Thurstones 'law of categorical judgment' nu geïnterpreteerd moet worden, een probleem, waarop wij in paragraaf 3.3 nog uitgebreid ingaan. Tenzij anders vermeld zijn de data in dit verslag verwerkt met het zogenaamde 'klasse II, conditie B'-model, hetgeen inhoudt, dat replicaties plaatsvinden over proefpersonen, en dat van de spreiding van de categoriegrenzen wordt aangenomen, dat deze nul is ($\sigma_i = 0$ voor alle i).

Op grond van deze aannames zijn de subjectieve kwaliteitsschalen berekend, en wel met behulp van het programma SUCINT (beschreven in een IPO-handleiding [2]). In het programma wordt een extra aanname gemaakt: de spreidingen van de stimulus-indrukken σ_X worden gelijk gesteld aan elkaar voor alle X . Verder gaat het programma uit van de berekeningswijze van Edwards [3], waarin zoals verwacht stimuli met een grote spreiding een bijdrage leveren tot het uitrekken van de betreffende intervallen, en stimuli met een kleine spreiding juist tot het verkleinen van de betreffende intervallen. Om rekentechnische redenen kan de bijdrage van een stimulus die in slechts één of twee categorieën voorkomt, echter niet berekend worden. Dit kan met name in het geval dat er weinig replicaties aanwezig zijn, een enigszins verwrongen psychologische schaal opleveren.

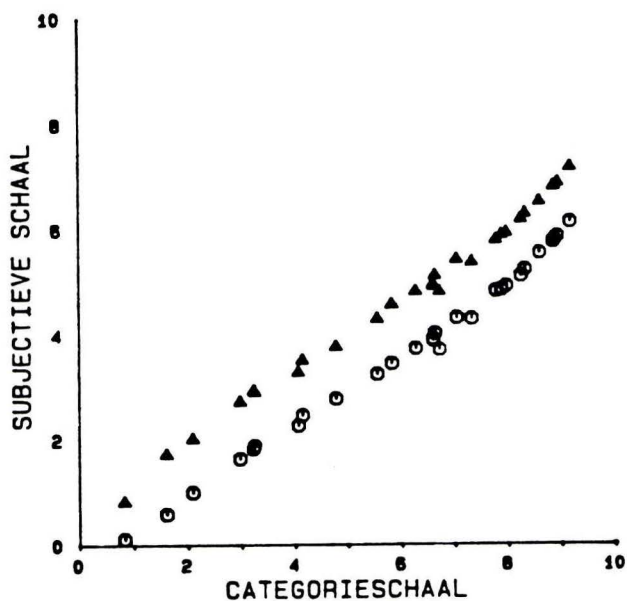
De resulterende subjectieve schalen zijn bepaald op een lineaire transformatie na (een off-set en een vermenigvuldigingsfactor, die gerelateerd is aan de gemiddelde σ_X). Twee subjectieve schalen beschrijven dus hetzelfde psychologisch continuüm, wanneer zij door een lineaire transformatie in elkaar overgebracht kunnen worden.

3.2 10-punts versus 100-punts categorieschaal

De wijze waarop de proefpersonen de 100-puntsschaal (van 0.1 tot en met 10.0) hanteren, wordt beschouwd aan de hand van de oordelen in EXP1. Daar



Figuur 4: Histogram van gegeven rapportcijfers
 Uitgezet zijn het aantal keren dat het betreffende rapportcijfer is genoemd voor alle proefpersonen en alle stimuli tesamen in EXP1.



Figuur 5: Subjectieve versus categorieschaal
 Op de horizontale as zijn uitgezet de gemiddelde categorieschaalwaarden voor de verschillende parametercombinaties. Op de verticale as zijn uitgezet de bijbehorende waarden op de subjectieve kwaliteitsschaal. Er zijn twee kurven; de onderste (○) betreft de subjectieve kwaliteitsschaal gebaseerd op de gesimuleerde 10-puntsschaal; de bovenste (▲) is die gebaseerd op de 100-puntsschaal.

maakte een aantal (5) proefpersonen geen gebruik van de mogelijkheid om een cijfer achter de komma te geven. Het merendeel (12) van de proefpersonen gaf voornamelijk cijfers eindigend op .0 of .5. Slechts enkelen (3) maakten een volledig gebruik van de 100-punts schaal. Een histogram van de gegeven oordelen in EXP1 (figuur 4) geeft deze verdelingen weer.

Ondanks het feit, dat er zelden gebruik gemaakt werd van de volledige 100-puntsschaal, blijkt uit spontaan commentaar van de proefpersonen, dat de mogelijkheid een decimaal op te geven als positief wordt ervaren. Dit is met name zo in geval van twijfel tussen bijvoorbeeld een 7 of een 8, of tussen een 5.5 en een 6. De problemen kunnen dan namelijk simpel opgelost worden door een categorie er tussenin te noemen.

De vraag rijst of een 100-puntsschaal in deze situatie verdere voordelen heeft boven een 10-puntsschaal, en, wat belangrijker is, of zij beide dezelfde resultaten geven. Een echte test hiervoor zou zijn het herhalen van het experiment met gebruikmaking van een 10-puntsschaal. Dit hebben wij niet gedaan. Aangezien echter het histogram van oordelen in EXP1 zo zeer gepiekt is op hele getallen, proberen we deze 10-puntsschaal te simuleren door middel van afrondingen. Daarbij worden dus alle waarnemingen in de categorieën 6.5 tot en met 7.4 dus gestopt in categorie '7' van de gesimuleerde 10-puntsschaal, en mutatis mutandis voor de andere categorieën.

Van beide schalen zijn de bijbehorende subjectieve kwaliteitsschalen geconstrueerd, en deze zijn weergegeven in figuur 5. Het blijkt, dat de subjectieve schaal, afgeleid uit de 100-puntsschaal nauwelijks verschilt met die, afgeleid uit de gesimuleerde 10-puntsschaal. Beide subjectieve schalen verschillen slechts een konstante waarde, hetgeen geen verdere betekenis heeft, aangezien de subjectieve schalen bepaald zijn op een lineaire transformatie na. De spreiding van de stimuli om de gemiddelde curve is verder nagenoeg gelijk voor beide schalen, hetgeen ook niet wijst op een voordeel van het gebruik van een 100-puntsschaal boven een 10-puntsschaal.

Nadelen van het gebruik van de 100-puntsschaal zijn echter ook niet gevonden. Vanwege het gemak, dat proefpersonen van de 100-puntsschaal zeggen te ondervinden, is daarom ook in EXP2 gebruik gemaakt van een 100-puntsschaal.

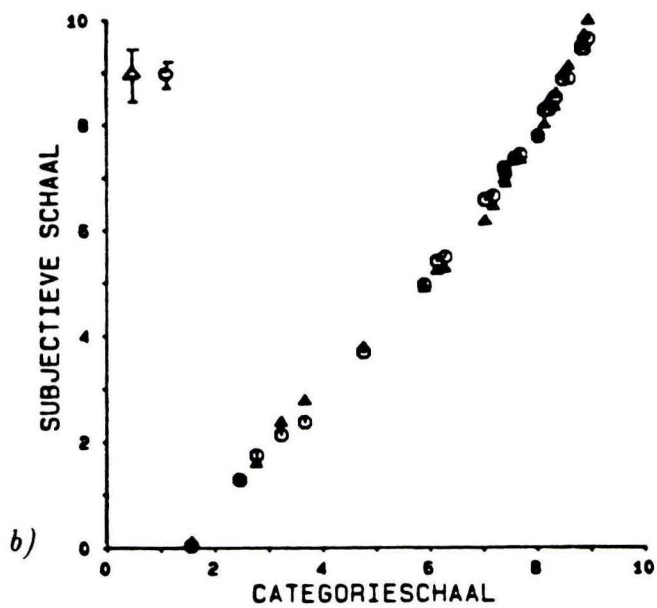
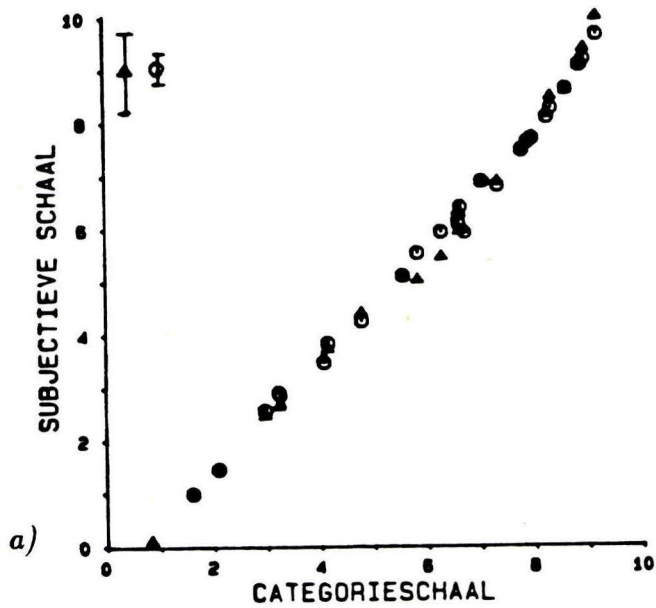
3.3 Spreiding over proefpersonen

De subjectieve kwaliteitsschaal wordt bepaald op grond van de spreiding in de categorie-oordelen (zie paragraaf 3.1). Deze spreiding kan op verschillende manieren tot stand komen:

- Spreiding binnen een proefpersoon. Wanneer een proefpersoon een stimulus meerdere malen aangeboden krijgt, zal er een zekere spreiding over de gegeven categorie-oordelen zijn. Men kan zich voorstellen, dat wanneer deze spreiding groot is, de proefpersoon het gedeelte van de categorieschaal waarin de betreffende oordelen vallen, niet gebruikt om precies te discrimineren. Dit gedeelte is dan psychologisch gezien minder belangrijk, en bij het construeren van de subjectieve schaal moet het verkleind worden. In dit geval bestaat dus een wezenlijk en direct verband tussen de spreiding en de psychologische schaal voor deze proefpersoon.
- Spreiding over verschillende proefpersonen. Wanneer meerdere proefpersonen dezelfde stimulus een of meerdere malen krijgen aangeboden, ontstaat spreiding doordat zij de categorieschaal ieder op een andere manier hanteren. De ene proefpersoon gebruikt bijvoorbeeld alleen schaalwaarden tussen 1.0 en 8.0, en een andere alleen tussen 4.0 en 8.5. Dan is de grootte van de spreiding niet zozeer afhankelijk van een of ander discriminatie-proces bij het geven van een oordeel, alswel van persoonlijke verschillen in het hanteren van de categorieschaal. Het is in dit geval veel minder inzichtelijk of er een psychologische schaal bestaat, die verband houdt met deze spreiding *over* de proefpersonen.

De juiste manier om een subjectieve kwaliteitsschaal voor de 'gemiddelde proefpersoon' te construeren, is dus door het bepalen van de persoonlijke subjectieve kwaliteitsschalen van een groot aantal verschillende proefpersonen, en deze op een of andere manier te middelen. De manier, die wij echter tot nog toe gebruikt hebben (in paragraaf 3.2), is gebaseerd op de oordelen van alle proefpersonen tegelijk, dus op de spreiding *over* de proefpersonen. Eerdere experimenten op het IPO wezen uit, dat beide methoden hetzelfde resultaat leveren. Wij willen nu controleren, of dat ook voor de onderhavige experimenten geldt.

Bij het construeren van de persoonlijke subjectieve kwaliteitsschalen treedt een belangrijke complicatie op: Noch in EXP1, noch in EXP2, zijn er voor alle



Figuur 6: Vergelijking van T- en M-schalen

De grafiek geeft de transformatie van de categorieschaal in de subjectieve kwaliteitsschaal weer. Horizontaal zijn weergegeven de gemiddelden (over alle proefpersonen en scènes) van de categorie-oordelen voor de verschillende parametercombinaties. Vertikaal zijn de subjectieve kwaliteitsschalen uitgezet: ▲ voor de M-schaal en ○ voor de T-schaal.

a) voor EXP1.

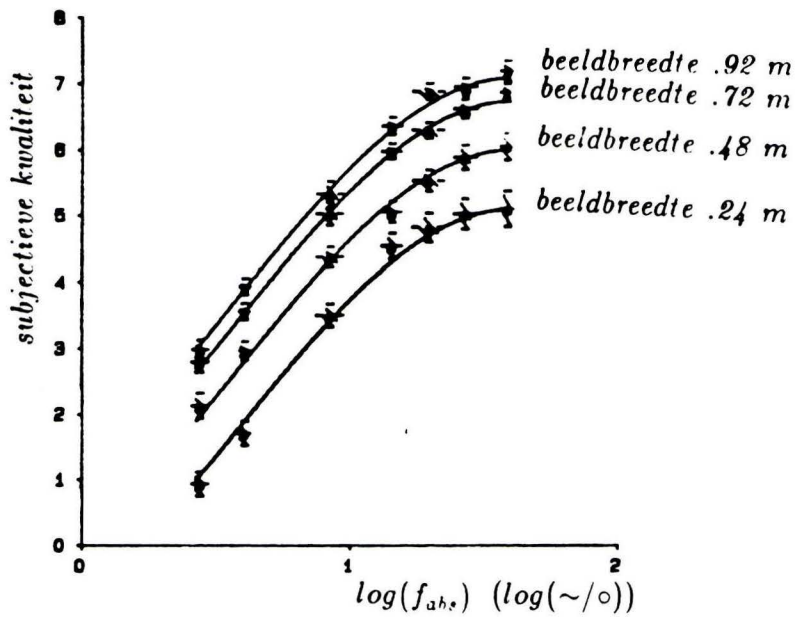
b) voor EXP2.

stimuli verschillende replicaties geweest: De meeste combinaties van kijkafstand, resolutie, beeldbreedte en scène zijn maar een keer aan een proefpersoon aangeboden. Binnen een proefpersoon zijn er dus geen werkelijke replicaties aanwezig. Replicaties zijn echter noodzakelijk voor het construeren van een psychologische schaal: daarom nemen we de verschillende scènes binnen één proefpersoon als replicatie-dimensie. Dit is de beste keuze, omdat wij in eerste instantie niet zozeer geïnteresseerd zijn in de verschillen tussen de scènes, en omdat volgens een variantie-analyse de verschillende scènes een van de kleinste bronnen van variantie blijkt te zijn. De persoonlijke subjectieve kwaliteits-schaal wordt dus geconstrueerd op basis van de spreiding over de verschillende scènes.

Uitgaande van de persoonlijke subjectieve kwaliteitsschalen worden de persoonlijke kwaliteitswaarden voor ieder van de resolutie-beeldbreedte-kijkafstand-combinaties bepaald. De gemiddelden (over de proefpersonen) van deze persoonlijke kwaliteitswaarden kunnen eenvoudig berekend worden, en deze worden de kwaliteitswaarden op M-schaal genoemd. De standaardfouten in deze M-waarden zijn echter moeilijker te bepalen, omdat de persoonlijke subjectieve kwaliteitsschalen niet alle hetzelfde bereik zullen hebben (zie paragraaf 3.1). Dat betekent, dat de standaarddeviatie van de verdeling van de persoonlijke kwaliteitswaarden voor een bepaalde parametercombinatie afhankelijk is van de wijze waarop de bereiken van de verschillende proefpersonen over elkaar vallen. Wij hebben daarom bij de persoonlijke kwaliteitswaarden van alle proefpersonen een persoonlijke off-set opgeteld, zódanig, dat alle persoonlijke zwaartepunten van de kwaliteitswaarden vallen op het algemene zwaartepunt. Deze procedure heeft geen gevolgen voor de M-schaal zelf, maar zij maakt de standaardfout in de M-waarden gemiddeld minimaal.

Uitgaande van de oordelen van alle proefpersonen voor alle scènes tezamen zijn ook subjectieve kwaliteitswaarden berekend, en deze noemen we in het vervolg de T-waarden. Om een vergelijking tussen M- en T-waarden mogelijk te maken, worden beide schalen zodanig genormeerd, dat hun onderlinge afwijking minimaal is. De normering heeft de vorm van een lineaire transformatie, en is dus toegestaan, omdat de subjectieve kwaliteitsschalen toch slechts op zo'n lineaire transformatie bepaald zijn. De resultaten voor de experimenten EXP1 en EXP2 zijn weergegeven in figuur 6. Het blijkt, dat in beide gevallen de M- en T-schalen goed met elkaar overeenkomen, hetgeen de eerder genoemde IPO-ervaringen bevestigt. Het is in het onderhavige experiment dus

toegestaan om voor de bestudering van de resultaten de T-schaal te gebruiken.



Figuur 7: Subjectieve kwaliteit als functie van absolute resolutie

De meetpunten geven de kwaliteit weer voor een bepaalde resolutie-beeldbreedte combinatie. Op de horizontale as is de logarithme van de resolutie uitgezet; de beeldbreedte is een parameter. De getrokken kurven hebben dezelfde vorm, en deze is berekend door een polynoom aanpassing op de gemiddelden over de beeldbreedtes.

4 Resultaten

4.1 Methode van verwerking

Op grond van de resultaten in paragraaf 3.3 is de volgende verwerkingsmethode gehanteerd voor beide experimenten: Als replicatie-dimensie worden beschouwd de verschillende proefpersonen en verschillende scènes tezamen. Als variabelen blijven over: resolutie, kijkafstand, en beeldbreedte, die gedrieën een fysische beschrijving van de stimulus geven.

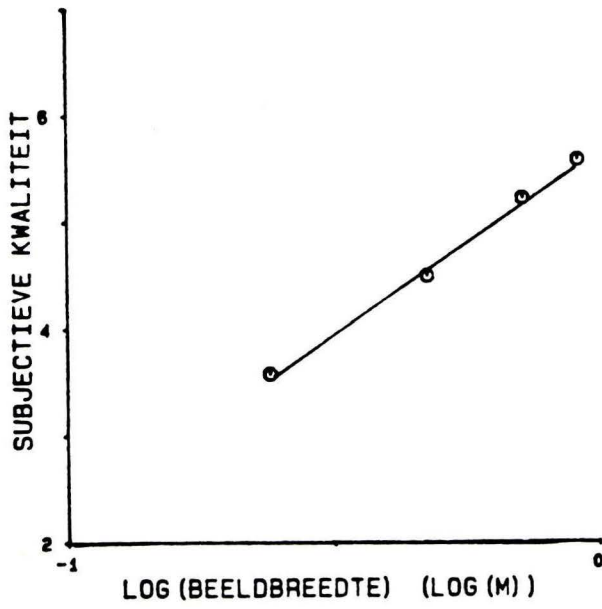
De categorie-oordelen voor deze verschillende parametercombinaties worden getransformeerd naar een subjectieve kwaliteitsschaal zoals beschreven in paragraaf 3.1. Deze subjectieve kwaliteitsschaal wordt dus geconstrueerd op basis van de spreiding over proefpersonen en scènes. Van deze verwerkingsmethode is niet afgeweken, tenzij dit uitdrukkelijk bij de beschrijving van de resultaten wordt vermeld.

4.2 Resultaten EXP1

4.2.1 Algemeen

In figuur 7 staan de subjectieve kwaliteitswaarden voor alle 28 parametercombinaties uitgezet, als functie van de absolute resolutie (uitgedrukt in \sim/\circ , zie paragraaf 2.3), en met als parameter de beeldbreedte. Het blijkt dat de subjectieve kwaliteit voor alle vier de beeldbreedtes op dezelfde wijze met de resolutie verloopt: de vier curves verschillen slechts een constante factor. De vorm van de curve is bepaald door de vier meetpunten bij één resolutie te middelen, en op deze gemiddelde meetpunten een polynoom-aanpassing te maken. Het blijkt, dat een derde orde polynoom aanpassing hiervoor goed voldoet. Het verloop van de subjectieve kwaliteit met de resolutie kan als volgt geïnterpreteerd worden: Voor lage resoluties stijgt de kwaliteit snel bij toenemende resolutie, maar er treedt een verzadiging op bij ongeveer 25 \sim/\circ , hetgeen in de grootteorde ligt van de beperkingen van het menselijk gezichtvermogen. Bij resoluties hoger dan 25 \sim/\circ worden verbeteringen in de resolutie dus nauwelijks meer waargenomen door het oog, en de curve gaat vlakker en uiteindelijk horizontaal lopen.

De verticale verschuiving van de curves ten gevolge van de beeldbreedte-



Figuur 8: Kwaliteitsgemiddelden als functie van de beeldbreedte
De uitgezette waarden zijn de gemiddelden over alle resoluties bij een vaste beeldbreedte. Zij zijn weergegeven als functie van de logaritme van die beeldbreedte.

variatie is te bestuderen aan de hand van de over de resolutie gemiddelde kwaliteitswaarden. Uit figuur 8 blijkt, dat er een lineair verband is tussen de logaritme van de beeldbreedte en deze gemiddeldes.

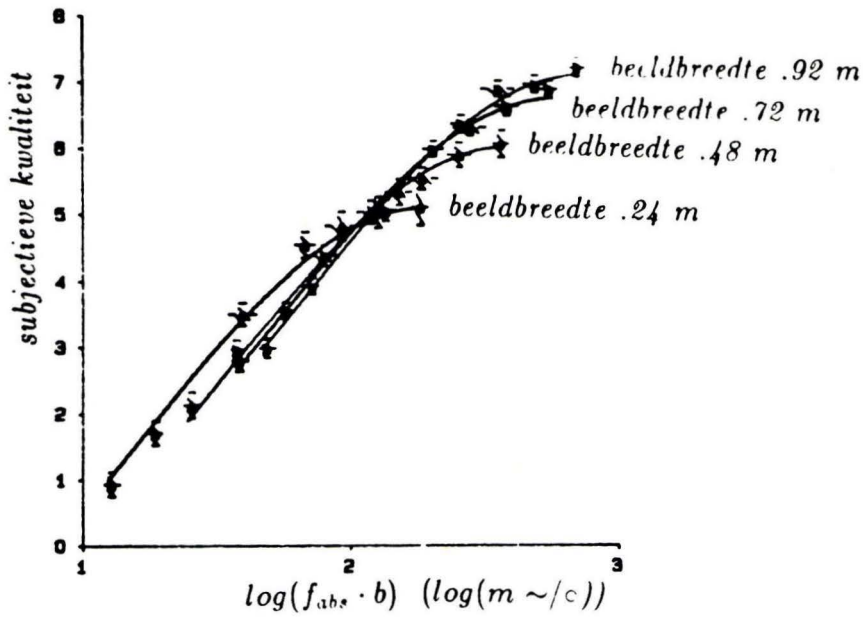
Beide beschrijvingen kunnen samengevat worden in de volgende formule:

$$Q(b, f_{abs}) = 3.460 \log(b) + 1.199 + 3.827 \log(f_{abs}) + 2.217 (\log(f_{abs}))^2 - 1.416 (\log(f_{abs}))^3,$$

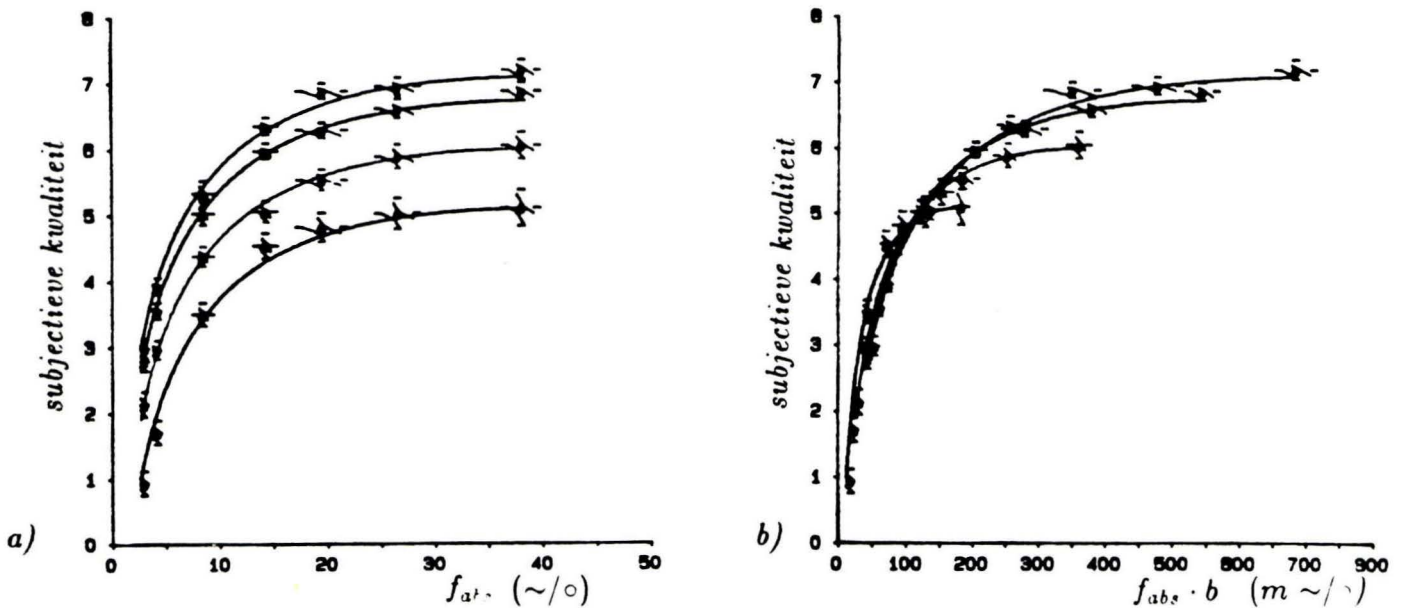
als $f_{abs} \leq 40 \sim/\circ$, en voor hogere resoluties wordt gewoon de verzadigingswaarde berekend. In de formule wordt de resolutie f_{abs} uitgedrukt in \sim/\circ , en de beeldbreedte b in meters ($0.24 \leq b \leq 0.92$). De eerste twee termen beschrijven de invloed van de beeldbreedte op de subjectieve kwaliteit; de volgende termen geven de derde orde polynoomaanpassing voor de kwaliteitsafhankelijkheid van de absolute resolutie weer.

Zowel uit de bovenstaande formule als uit de grafiek is op te maken, dat beeldbreedte en resolutie onafhankelijk hun invloed op de subjectieve kwaliteit hebben. Anders gezegd: resolutie en beeldbreedte vertonen geen interactie. Deze laatste bewering wordt echter niet gestaafd door een variantie-analyse op de ruwe data: daarin vindt men (met proefpersonen en scènes als replicatie-dimensie) een significante interactie ($F(18/1782)=3.63$, $P \leq 0.001$). Ook wanneer alle replicaties als volkomen onafhankelijk worden beschouwd (dus de dimensies resolutie en beeldbreedte zijn 'genest' binnen de replicatie-dimensie), blijft de interactie significant op 5%-nivo: $F(18/2772)=1.61$, $P=0.05$. Een verklaring hiervoor kan liggen in het feit, dat de variantie-analyse wordt toegepast op de ruwe, niet psychologisch geschaalde data, terwijl de grafieken in figuren 7 en 8 zijn gebaseerd op de subjectieve kwaliteitsschalen.

Beter zou zijn de variantie-analyse toe te passen op het totaal van alle oordelen, die dan wel zódanig gecorrigeerd moeten zijn, dat zij de subjectieve kwaliteitsschaal beschrijven. Een manier om dit te benaderen is door een polynoom-aanpassing te maken van de curve die de categorieschaal overbrengt in de subjectieve schaal (dit is in feite de T-schaal in figuur 6), en de ruwe categorie-oordelen vervolgens met behulp van deze polynoom-aanpassing over te zetten in oordelen op de subjectieve kwaliteitsschaal. Inderdaad blijkt, dat wanneer men op deze enigszins gecorrigeerde data een variantie-analyse toepast, de interactie tussen resolutie en beeldbreedte niet significant meer is ($F(18/2772)=1.51$, $P=0.08$).



Figuur 9: Subjectieve kwaliteit als functie van relatieve resolutie
 Meetpunten en kurven zijn dezelfde als in figuur 7, doch op de horizontale as is nu de parameter $f_{abs} \cdot b$ uitgezet. Deze parameter is voor een vaste kijkafstand evenredig met de relatieve resolutie.



Figuur 10: Subjectieve kwaliteit als functie van resolutie
 De twee grafieken zijn dezelfde als die in de figuren 7 en 9, doch de resoluties op de horizontale as zijn nu lineair uitgezet.

- a) Subjectieve kwaliteit als functie van absolute resolutie.
- b) Subjectieve kwaliteit als functie van relatieve resolutie.

4.2.2 Afgeleide beschouwingen

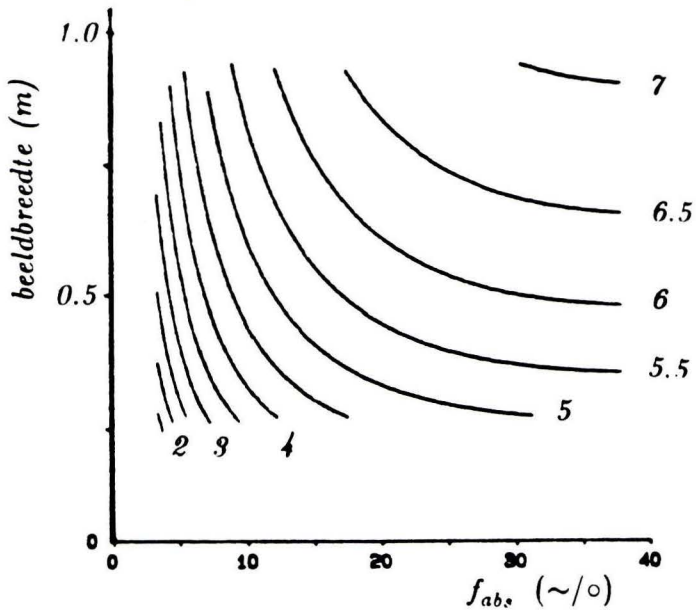
In de vorige paragraaf is een formule gevonden die de meetresultaten goed beschrijft. Met behulp van deze formule is het nu mogelijk de resultaten vanuit verschillende gezichtspunten te beschouwen.

Allereerst wordt gezocht naar één enkele parameter, die een goede beschrijving van de kwaliteit geeft. Als een van de mogelijke kandidaten wordt de relatieve resolutie onderzocht. De relatieve resolutie is gedefinieerd als het maximale aantal perioden dat binnen de beeldbreedte past; de bijbehorende eenheid is dan ook perioden. Voor een vaste kijkafstand a is de relatieve resolutie evenredig met de absolute resolutie maal de beeldbreedte: $f_{rel} = \frac{360}{2\pi} \cdot f_{abs} \cdot b/a$. Het begrip relatieve resolutie is nauw verwant aan de begrippen 'aantal pixels' en 'bandbreedte' in de video-wereld. Uit figuur 9 blijkt, dat de relatieve resolutie inderdaad een betere voorspeller is voor de subjectieve kwaliteit dan absolute resolutie of de beeldbreedte alleen. Dit is te begrijpen, omdat deze relatieve resolutie een maat is voor de hoeveelheid informatie die wordt overgedragen.

Volkomen bevredigend is de beschrijving in termen van relatieve resolutie echter niet, want de vier kurven vallen niet echt over elkaar heen. Berekening leert, dat dit voor het onverzadigde gedeelte zou gebeuren wanneer op de horizontale as de parameter $f_{abs}^{1.4} \cdot b$ zou worden uitgezet. Het is echter moeilijk aan dit product een interpretatie te geven.

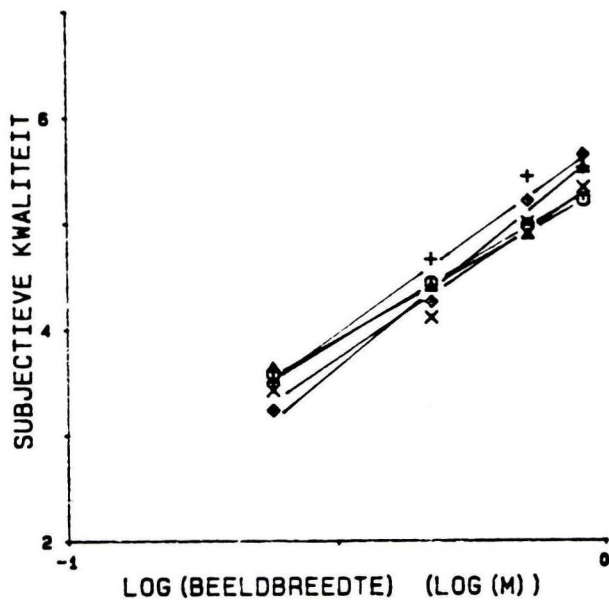
De grafieken in de figuren 7 en 9 worden in een ander licht geplaatst wanneer we in plaats van een logaritmische resolutie-as een lineaire nemen, zoals dat in figuur 10 gebeurd is. De verzadiging wordt nu beter weergegeven, en daardoor komen de effecten ten gevolge van de beeldbreedte ook nadrukkelijker naar voren.

Een derde alternatieve manier om de resultaten te interpreteren is aan de hand van isokwaliteitskurven, zoals weergegeven in figuur 11. Deze zijn berekend door in de formule de kwaliteit op een vaste waarde te stellen, en te kijken hoe resolutie en beeldbreedte hun positieve invloeden moeten uitwisselen, opdat deze kwaliteitswaarde konstant blijft. Uit deze grafiek is af te lezen, op welke manier men het beste aan een kwaliteitsverbetering kan werken: dat is namelijk in de richting loodrecht op de isokwaliteitskurven. Of dat neerkomt op een verhoging van het formaat of van de resolutie, is afhankelijk van de uitgangssituatie.



Figuur 11: Isokwaliteitskurven

De lijnen in de grafiek verbinden de combinaties van beeldbreedte en resolutie, die dezelfde kwaliteit opleveren. De getallen naast de kurven geven aan hoe hoog die kwaliteit is.



Figuur 12: Scène-afhankelijkheid van de subjectieve kwaliteit

Weergegeven zijn de gemiddelden over de resolutie als functie van de logaritme van de beeldbreedte, analoog aan de grafiek in figuur 8. In dit geval zijn echter de verschillende scènes gescheiden gehouden:

-) scène 'touwen',
- △) scène 'munttoren',
- +) scène 'kлагmuur',
- ×) scène 'terras',
- ◇) scène 'Thielke'.

4.2.3 Verschillende scènes

Tot nu toe is de dimensie scènes steeds gebruikt als replicatie-dimensie. Daarbij is uitgegaan van de veronderstelling, dat de scène-inhoud geen invloed heeft op de waarderingen van de proefpersonen. In deze paragraaf wordt nagegaan in hoeverre deze veronderstelling terecht is.

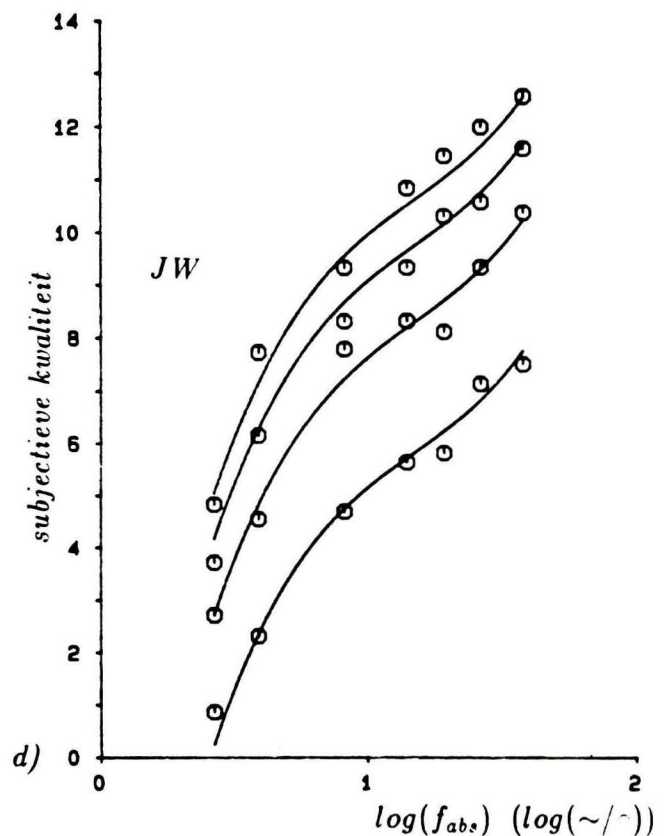
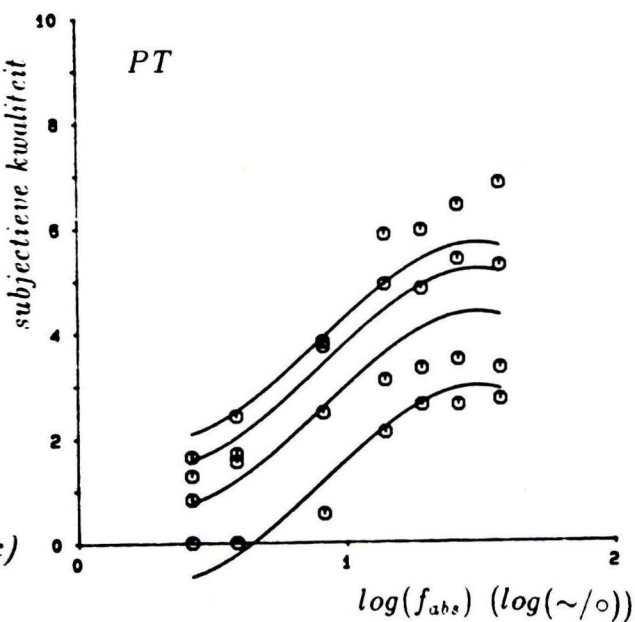
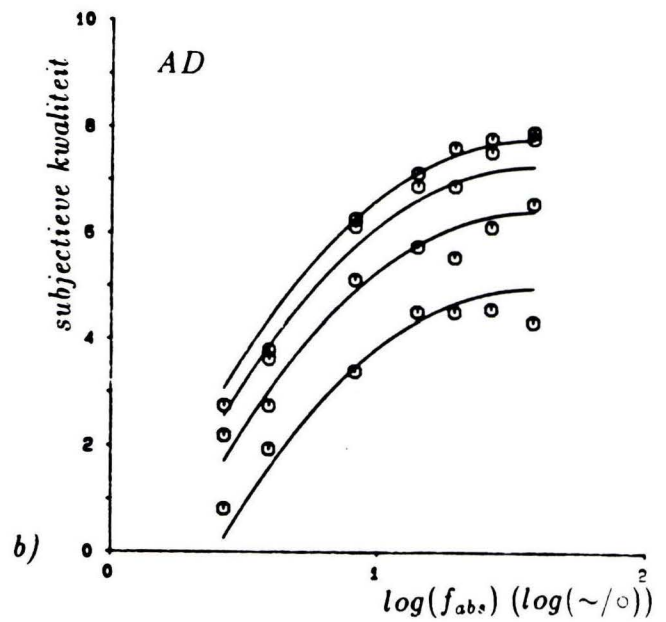
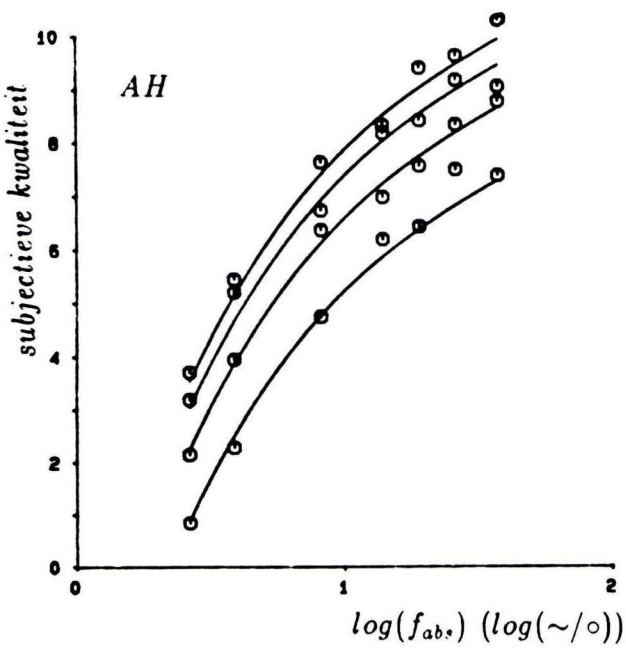
Uit een variantie-analyse op enigszins gecorrigeerde categorie-oordelen (zij zijn met behulp van een polynoom-aanpassing overgezet van categorie- naar kwaliteitsschaal, zie ook paragraaf 4.2.1) blijkt, dat er geen interactie bestaat tussen de resolutie en de scènes ($F(24/2660)=0.83$, $P=0.7$). De interactie tussen scènes en beeldbreedte is echter wel belangrijk ($F(12/2660)=3.9$, $P \leq 0.001$), en ook is het scène-hoofdeffect significant ($F(4/2660)=9.21$, $P \leq 0.001$).

Om na te gaan welke op welke manier deze effecten tot uiting komen, worden de ruwe data wederom geschaald met behulp van het programma SUCINT, nu echter met slechts de proefpersonen als replicatie-dimensie, en dus met 140 verschillende stimuli. Vervolgens zijn per scène en per beeldbreedte de gemiddeldes genomen over de resolutie. Deze middeling is toegestaan, omdat uit de variantie-analyse is gebleken, dat er toch geen interactie is tussen scènes en resolutie. Deze gemiddelde kwaliteitswaarden brengen de interactie- en hoofdeffecten echter wel beter tot uiting.

Uit figuur 12 is af te lezen, dat voor iedere scène het verband tussen deze gemiddelden en de logaritme van de beeldbreedte beschreven kan worden door een lineair verband. Dit wordt ook bevestigd door de bijbehorende correlatiecoëfficiënten, die alle vijf hoger zijn dan 0.984. Wel treedt er een verschil in richtingscoëfficiënten aan het licht: deze zijn iets kleiner dan gemiddeld voor de scènes 'touwen' en 'munttoren', en juist weer tamelijk hoog voor de scène 'Thielke'. Algemeen zijn deze verschillen echter niet dramatisch, en kan men stellen, dat het in paragraaf 4.2.1 gevonden lineaire verband tussen kwaliteit en de logaritme van de beeldbreedte de algemene trend goed beschrijft.

4.2.4 Verschillende proefpersonen

In paragraaf 3.3 is reeds aangetoond, dat de subjectieve kwaliteitsschaal voor het totaal van alle ruwe data dezelfde is als de schaal die ontstaat uit het middelen van alle persoonlijke subjectieve kwaliteitsschalen. In deze paragraaf



Figuur 13: Persoonlijke subjectieve kwaliteit

Deze grafieken geven de subjectieve kwaliteitswaarden als functie van de resolutie weer, met als parameter de beeldbreedte, analoog aan figuur 7. Ook de vorm van de getrokken kurven is berekend als een polynoom aanpassing aan de gemiddeldes over de beeldbreedte. Iedere grafiek is gebaseerd op de oordelen van slechts één proefpersoon:

- a) proefpersoon AH, visus 2.00,
- b) proefpersoon AD, visus 2.50,
- c) proefpersoon PT, visus 2.00,
- d) proefpersoon JW, visus 2.00.

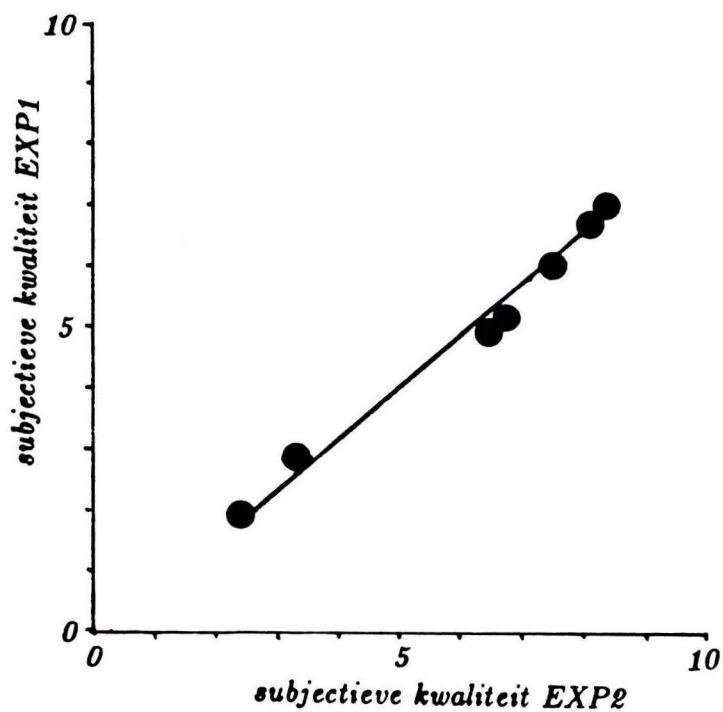
wordt in groter detail ingegaan op deze persoonlijke subjectieve kwaliteitsschalen. Doel daarbij is om inzicht te krijgen in de mogelijke verschillen tussen proefpersonen.

Voor iedere proefpersoon is een persoonlijke psychologische schaal berekend op basis van de spreiding over de verschillende scènes. De gevonden subjectieve kwaliteitswaardes staan weergegeven in figuur 13 als functie van de resolutie voor een viertal proefpersonen. Voor iedere proefpersoon is een polynoom-aanpassing gemaakt van het gemiddelde over de beeldbreedte als functie van de resolutie, analoog aan wat in paragraaf 4.2.1 voor de gemeenschappelijke kwaliteitsdata is gedaan.

Uit de grafieken kan men afleiden, dat voor drie van de vier proefpersonen (AH, AD en JW) geldt dat de vorm van deze kurve inderdaad niet afhankelijk is van de beeldbreedte. Voor proefpersoon PT zijn de afwijkingen echter groter. Reden hiervoor kan zijn, dat de spreiding in de kwaliteitsoordelen voor de verschillende scènes bij PT dermate klein is, dat het moeilijk is een persoonlijke subjectieve kwaliteitsschaal voor deze proefpersoon te construeren (zie paragraaf 3.1). Dit zou dan ook verklaren, waarom de subjectieve kwaliteitsschaal van PT beduidend kleiner van omvang is dan die van de andere proefpersonen.

De globale vorm van de getekende kurven komt kwalitatief overeen met die voor alle proefpersonen tesamen (figuur 7): een stijgend gedeelte voor lage resoluties en een geleidelijke verzadiging voor hogere resoluties. Proefpersoon JW (visus 2.0) voldoet echter niet aan dit beeld, want ook bij de allerhoogste resoluties neemt de subjectieve kwaliteit nog toe. De hoge gevoeligheid kan verklaard worden uit het feit dat proefpersoon JW degene is geweest die het experiment heeft opgezet, en daardoor getraind is geraakt in het onderscheiden van verschillende resoluties. Desalniettemin werpt de betreffende grafiek de vraag op, in welke mate het verzadigen van de kurve bij andere proefpersonen een gevolg is van de beperkingen van het visuele systeem, aangezien proefpersoon JW duidelijk toont, dat het wel *mogelijk* is bij deze resoluties een onderscheid te maken.

Een antwoord op deze vraag kan misschien gegeven worden door de proefpersonen in te delen naar hun visus (≤ 1.50 , 2.00 of ≥ 2.25). Voor alle drie de groepen zijn de subjectieve schalen bepaald, en met behulp daarvan de vorm van de kurven door middel van polynoom-aanpassingen aan de gemiddeldes over de beeldbreedte. Voor deze kurves is een kritieke resolutie gedefinieerd als die resolutie waarbij de schuine asymptoot (voor lage resoluties) snijdt



Figuur 14: Vergelijking van de psychologische schalen van EXP1 en EXP2

Op de horizontale as zijn uitgezet de subjectieve kwaliteitswaarden in EXP1 van een aantal parametercombinaties, dat in beide experimenten is aangeboden. Op de verticale as zijn voor diezelfde parametercombinaties de subjectieve kwaliteitswaarden in EXP2 aangegeven. De getrokken lijn geeft de beste lineaire aanpassing door deze waarden weer (correlatie 0.993).

met de horizontale (voor verzadigde kwaliteit). Men zou verwachten dat deze kritieke resolutie zal toenemen met de visuele vermogens van de proefpersonen. Dit wordt echter niet gevonden, terwijl een niet-significante trend in de kritieke resoluties juist in tegengestelde richting wijst. Het blijkt dat de kritieke resolutie, vanwege een tamelijk grote onnauwkeurigheid in combinatie met de kleine verschillen in visus, niet in staat is een afhankelijkheid van het gezichtsvermogen aan te tonen.

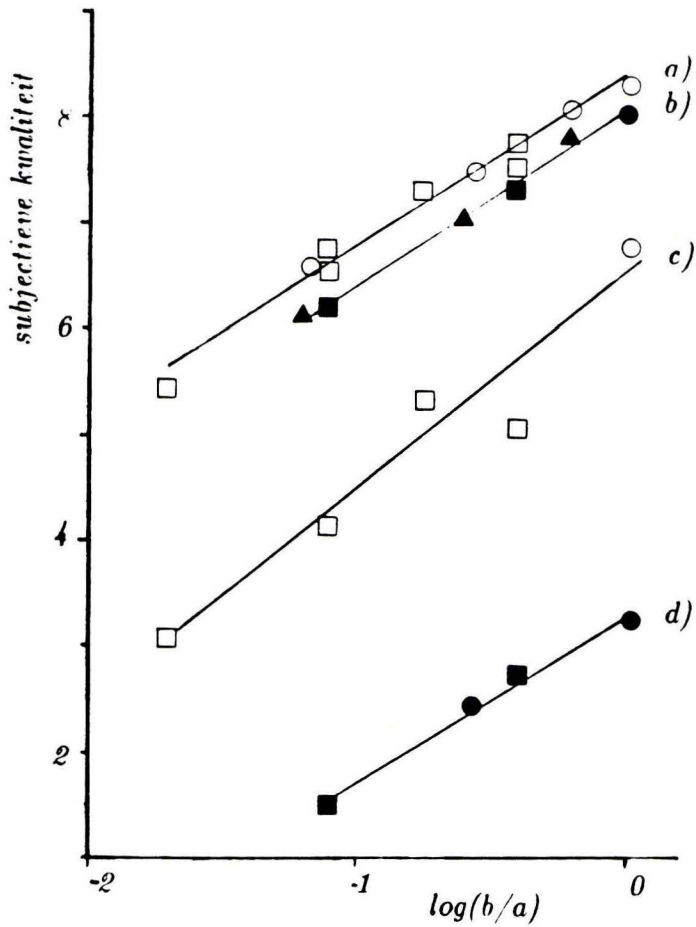
4.3 Resultaten EXP2

4.3.1 Vergelijking met EXP1

In paragraaf 3.1 is reeds uitgelegd, dat twee psychologische schalen hetzelfde psychologische continuüm beschrijven, wanneer zij door een lineaire transformatie in elkaar kunnen worden overgebracht. In hoeverre de subjectieve kwaliteitsschalen van EXP1 en EXP2 hieraan voldoen kan worden nagegaan aan de hand van een achttal parametercombinaties, dat in beide experimenten is gepresenteerd. In figuur 14 zijn de kwaliteitswaarden van deze parametercombinaties in EXP2 uitgezet tegen die in EXP1. De grafiek toont, dat tussen beide data-sets in zeer goede benadering een lineair verband bestaat (correlatie 0.993). Hieruit kan geconcludeerd worden, dat beide subjectieve schalen met elkaar in overeenstemming zijn, en hetzelfde psychologische continuüm beschrijven. Bovendien biedt de gevonden lineaire aanpassing de mogelijkheid om de kwaliteitswaarden uit EXP1 zodanig te transformeren, dat zij direct vergeleken kunnen worden met de resultaten in EXP2.

4.3.2 Algemeen

Omdat de experimentopzet van EXP2 niet volledig gekruist is (zie paragraaf 2.2), is het niet mogelijk een variantie-analyse op het totaal van alle data toe te passen. Om toch een idee te krijgen van de te verwachten interacties, is daarom een selectie gemaakt: alleen stimuli met een beeldbreedte van 0.92 m of 0.48 m, een kijkafstand van 2.9 m of 5.4 m, en resolutie die maximaal is of ongeveer 2.6 \sim /o, worden in beschouwing genomen. De ruwe categorie-oordelen voor deze acht parametercombinaties werden getransformeerd naar een subjectieve schaal met behulp van een polynoom-aanpassing aan het verband tussen categorie- en T-schaal van EXP2 uit figuur 6 (de hierbij gevolgde



Figuur 15: Subjectieve beeldkwaliteit als functie van de beeldhoek

De subjectieve kwaliteitswaarden op de verticale as zijn uitgezet als functie van $\log(b/a)$ op de horizontale as. Het quotiënt van beeldbreedte b en kijkafstand a is in goede benadering evenredig met de beeldhoek ϕ . Er zijn vier verschillende datasets, behorende bij vier verschillende resoluties:

a) resoluties groter dan $33 \sim/\circ$.

b) resoluties tussen 23 en $28 \sim/\circ$.

c) resoluties tussen 8.6 en $8.7 \sim/\circ$.

d) resoluties tussen 2.6 en $2.7 \sim/\circ$.

Bovendien zijn verschillende symbolen gebruikt om een onderscheid te kunnen maken tussen resultaten voor verschillende kijkafstanden:

○, ○) kijkafstand 2.9 m.

△, △) kijkafstand 3.9 m.

□, □) kijkafstand 5.4 m.

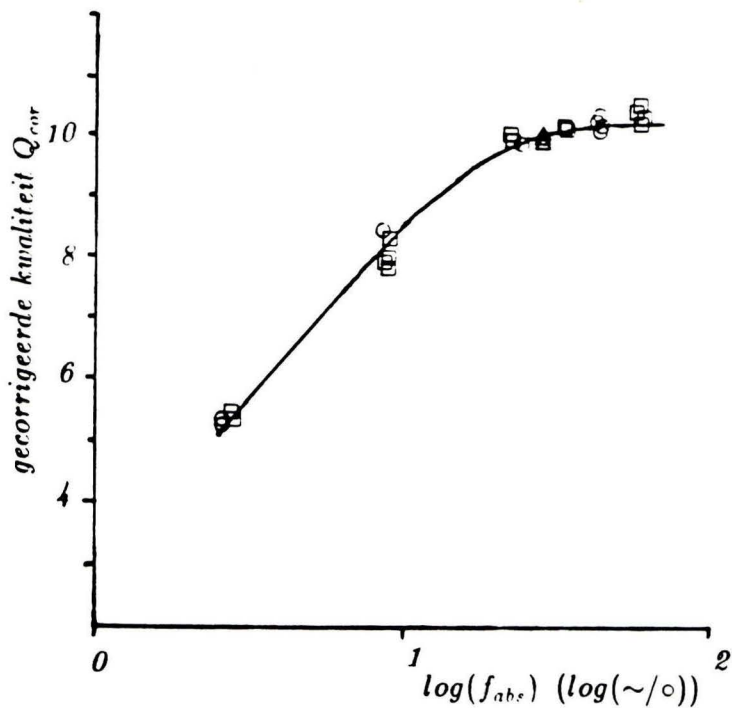
procedure is analoog aan die voor EXP1, beschreven in paragraaf 4.2.1). Een variantie-analyse op deze acht enigszins gecorrigeerde parametercombinaties leverde significante hoofdtermen op, doch geen significante interacties: voor alle vier mogelijke interacties geldt: $F(1/632) \leq 0.99$, $P \geq 0.32$.

Uitgaande van deze voorspelling dat er geen interacties te verwachten zijn, en van de uit EXP1 bekende resultaten betreffende beeldbreedte en resolutie, is nu vooral interessant de manier waarop het hoofdtermeffect ten gevolge van de kijkafstand zich manifesteert. Uit figuur 15 blijkt, dat voor alle resoluties de invloeden van de kijkafstand en beeldbreedte kunnen worden samengevat in een effect van beeldhoek. Deze beeldhoek ϕ wordt berekend als $\arctan\left(\frac{360}{2\pi} \cdot b/a\right)$, en is evenredig met de grootte van het beeld op het netvlies. Voor iedere resolutie blijkt de subjectieve kwaliteit op lineaire wijze af te hangen van de logaritme van deze beeldhoek: elk van de vier rechte lijnen in de grafiek heeft een correlatie hoger dan 0.984. Bovendien lopen de aanpassingen vrijwel parallel (richtingscoëfficiënten tussen 3.3 en 4.3, met een gemiddelde van 3.593), hetgeen de afwezigheid van enige interactie tussen resolutie en kijkafstand of beeldbreedte reflecteert. Verder komen in de grafiek nergens duidelijke systematische effecten tengevolge van de kijkafstand tot uitdrukking, wat overeenkomt met de voorspelling, dat er geen interactie tussen kijkafstand en beeldbreedte te verwachten is.

Met behulp van de beeldhoek zijn de hoofdeffecten ten gevolge van kijkafstand en beeldbreedte dus afdoende beschreven; wat nog ontbreekt is een adequate beschrijving van de invloed van de resolutie op de subjectieve kwaliteit. Een manier om deze invloeden goed tot uitdrukking te brengen, is door de kwaliteitsdata te corrigeren voor het reeds bekende beeldhoek-effect:

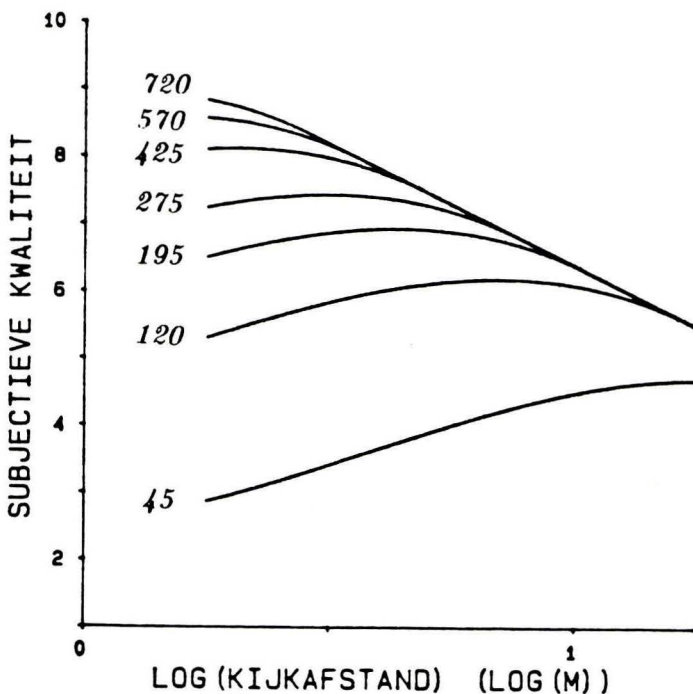
$$Q_{cor} = Q - 3.593 \cdot \log(b/a).$$

Deze gecorrigeerde kwaliteitswaarden zijn uitgezet als functie van de resolutie in figuur 16. Zij blijken met goede nauwkeurigheid alle te liggen op een enkele kromme, waarvan de vorm overeenkomt met de resultaten van EXP1. De in de grafiek getekende kromme is namelijk berekend uitgaande van het polynoomgedeelte van de kwaliteitsformule voor EXP1 in paragraaf 4.2.1. Dit is vervolgens overgezet naar de subjectieve schaal van EXP2 aan de hand van het lineaire verband tussen EXP2 en EXP1, zoals beschreven in paragraaf 4.3.1. Figuur 16 toont niet alleen wederom, dat de resultaten van EXP1 en EXP2



Figuur 16: Gecorrigeerde kwaliteit als functie van resolutie

De op de verticale as uitgezette kwaliteitswaarden zijn berekend uit de originele kwaliteitswaarden door te corrigeren voor de reeds bekende invloed van de beeldhoek: $Q_{cor} = Q - 3.593 \times \log(b/a)$. Om een onderscheid te kunnen maken tussen de kijkafstanden zijn verschillende symbolen gebruikt: \circ) kijkafstand 2.9 m, \triangle) kijkafstand 3.9 m, \square) kijkafstand 5.4 m. De getekende kromme is géén aanpassing aan de data, maar gebaseerd op de kurvevorm zoals die in EXP1 is gevonden (zie tekst).



Figuur 17: Subjectieve kwaliteit als functie van kijkafstand

De getekende kurven zijn extrapolaties op grond van de kwaliteitsformule van paragraaf 4.3.2. Zij zijn berekend bij verschillende relatieve resoluties variërend tussen 720 en 45 perioden, zoals naast de kurven staat aangegeven, en voor een beeldbreedte van 0.92 m. Voor kleinere beeldbreedtes verschuift de gehele grafiek naar beneden.

met elkaar overeenkomen, doch ook, dat voor verschillende kijkafstanden de subjectieve kwaliteit op dezelfde wijze afhangt van de resolutie.

De resultaten van EXP2 kunnen worden samengevat in de volgende formule:

$$Q = 3.593 \log(b/a) + 2.886 + 4.608 \log(f_{abs}) + 2.669 (\log(f_{abs}))^2 - 1.705 (\log(f_{abs}))^3$$

Subjectieve kwaliteit blijkt bepaald te zijn door twee parameters: effecten ten gevolge van de beeldhoek worden weergegeven door de eerste term, en de invloed van de resolutie wordt uitgedrukt door de laatste drie termen.

4.3.3 Afgeleide beschouwingen

Met behulp van de formule aan het eind van de vorige paragraaf is het mogelijk de resultaten van EXP2 op alternatieve wijze te beschouwen, zoals dat ook in paragraaf 4.2.2 voor EXP1 is gedaan. Zo is het ook voor EXP2 mogelijk de data weer te geven als functie van de relatieve resolutie $f_{rel} = \frac{360}{2\pi} \cdot f_{abs} \cdot b/a$, en evenals in EXP1 blijken de kurven niet geheel over elkaar te vallen. Berekening leert, dat dit wel het geval is, wanneer de resultaten als functie van de parameter $f_{abs}^{1.6} \cdot b/a$ worden uitgezet.

De resultaten van EXP2 geven vooral nieuwe inzichten waar het de kijkafstandsafhankelijkheid van de subjectieve kwaliteit betreft. Voor een beeld met een gegeven beeldbreedte en relatieve resolutie blijkt de kijkafstand op twee manieren invloed te hebben op de kwaliteit: Ten eerste heeft een toenemende kijkafstand een negatieve invloed op de kwaliteit, omdat de beeldhoek in dat geval kleiner wordt. Ten tweede speelt hij ook een rol in de bepaling van de absolute resolutie (zie paragraaf 2.3), en wel zodanig, dat bij toenemende kijkafstand de kwaliteit juist verbetert. De twee effecten samen zorgen ervoor, dat er een optimale kijkafstand bestaat, hetgeen ook af te lezen is uit figuur 17. Uit de kwaliteitsformule kan men afleiden, dat de optimale kijkafstand altijd zodanig wordt gekozen, dat de absolute resolutie $16 \sim/\circ$ bedraagt. Dit heeft tot gevolg, dat de optimale kijkafstand wordt bepaald door de 6 dB-afsnijfrequentie op het scherm (uitgedrukt in \sim/m), en onafhankelijk is van de beeldbreedte. De beeldbreedte bepaalt echter wel mede hoe groot de subjectieve kwaliteit bij deze optimale kijkafstand dan is.

5 Conclusies en discussie

5.1 Vergelijking van beide experimenten

De resultaten van de experimenten EXP1 en EXP2 blijken elkaar meestal met een zeer goede nauwkeurigheid te bevestigen. Een van de belangrijkste punten van overeenstemming is, dat beide experimenten hetzelfde psychologische continuüm beschrijven (paragraaf 4.3.1), ondanks het feit, dat voor het merendeel verschillende proefpersonen aan de experimenten deelnamen. Dit lijkt de vooronderstelling, dat er zoiets bestaat als een universeel gemiddeld psychologisch continuüm, geheel te bevestigen.

Niet geheel los daarvan staat de goede kwalitatieve overeenkomst tussen de gevonden kwaliteitswaarden. Wat betreft de kurvecvorm (kwaliteit als functie van resolutie) vinden wij in beide experimenten zelfs kwantitatief dezelfde resultaten (paragraaf 4.3.2). De vorm van de curve bestaat uit een stijgende kwaliteit bij toenemende resoluties, die geleidelijk verzadigt bij resoluties boven de 25 \sim/\circ . Vermoedelijk heeft deze verzadiging te maken met de beperkingen van het menselijk gezichtsvermogen (60 \sim/\circ), maar dit kan met behulp van de bestaande data niet aangetoond worden.

Kwalitatief is ook de manier waarop de kwaliteit van de beeldbreedte b afhangt in beide experimenten dezelfde: er is geen interactie met de resolutie, en er bestaat een lineair verband tussen de kwaliteit en de logaritme van de beeldbreedte. De richtingscoëfficiënt van dit verband staat in de beide experimenten echter *niet* in dezelfde verhouding tot de vorm van de kwaliteits-curve als functie van de resolutie. Dit komt tot uiting in de verschillende parameters, die nodig zijn om de onverzadigde gedeeltes van de kwaliteitskurven over elkaar te laten vallen: $f_{abs}^{1.4} \cdot b$ in EXP1 en $f_{abs}^{1.6} \cdot b$ in EXP2 (paragrafen 4.2.2 en 4.3.3). Een verklaring hiervoor is niet gevonden, ook het gebruik van de scène 'munttoren' in EXP1 (en niet in EXP2) komt als zodanig niet in aanmerking. Het feit, dat deze scène in het lineaire verband tussen kwaliteit en beeldbreedte een kleinere richtingscoëfficiënt heeft dan gemiddeld (paragraaf 4.2.3), zou namelijk juist aanleiding geven tot een tegenovergesteld effect.

Ondanks deze kleine discrepantie blijft de algemene conclusie, dat beeldhoek $\phi = \frac{360}{2\pi} \cdot b/a$ en resolutie $f_{abs} = \frac{2\pi}{360} \cdot f_{rel} \cdot a/b$ zonder interactie hun invloed hebben op de subjectieve kwaliteit. Dit wordt uitgedrukt in de vol-

gende formule:

$$Q(f_{abs}, b, a) = 1/K \cdot \log(b/a) + 0.80 \cdot \log(f_{abs}) + 0.46 \cdot (\log(f_{abs}))^2 - .29 \cdot (\log(f_{abs}))^3$$

Deze formule is zoveel mogelijk ontdaan van niet-essentiële constanten, hetgeen mogelijk is, omdat de subjectieve schaal toch slechts op een lineaire transformatie na bepaald is (paragraaf 3.1). De constante K heeft hier een waarde van ongeveer 1.5 (tussen 1.4 en 1.6).

5.2 Size-constancy-effect

Van der Zee en Boesten [14] maken melding van een size-constancy-effect bij de beoordeling van de subjectieve kwaliteit. In de betreffende experimenten werden voor dia's met zeer hoge resolutie de beeldbreedte b , kijkafstand a en luminantie gevarieerd. Het bleek, dat bij een vaste luminantie de subjectieve kwaliteit afhankelijk is van $\log(b^2/a)$, en door deze parameter *alleen* beschreven kan worden. Blijkbaar spelen de grootte van de afbeelding op het netvlies, evenredig met b/a , en de grootte van de afbeelding in werkelijkheid, hierin een even belangrijke rol. Dat ook de beeldbreedte zelf van directe invloed is relateren Van der Zee en Boesten aan het wel bekende size-constancy-effect (zie bijvoorbeeld Gregory [4]). Ook Hatada [5] vindt een dergelijk verband in een experiment, waarin alleen beeldbreedte en kijkafstand gevarieerd zijn.

In de resultaten van EXP2 is echter in het geheel geen sprake van een size-constancy-effect: alleen de beeldhoek ϕ , evenredig met de grootte van de afbeelding op het netvlies, heeft invloed op de beeldkwaliteit van beelden met zeer hoge resolutie. De reden voor dit gebrek aan overeenkomst moet waarschijnlijk niet gezocht worden in verschillen in de experimenteeropstellingen: Voor zover is na te gaan, zijn EXP2 en de metingen van Van der Zee en Boesten onder identieke omstandigheden uitgevoerd. Het enige verschil, namelijk dat in EXP2 extra informatie over de afstand aanwezig was in de vorm van stoelen, zou juist alleen maar kunnen bijdragen tot het optreden van een size-constancy-effect.

Waarschijnlijker is het dat de ontstane verschillen terug te voeren zijn op de perceptieve dimensies waarbinnen de variatie van de stimuli zich afspeelt. In EXP2 wordt de resolutie over een brede range gevarieerd, waardoor voornamelijk het percept 'scherpte' wordt aangesproken. De scherpte-indruk zal

dan ook een belangrijk aandeel leveren in de bepaling van het kwaliteitsoordeel. In de experimenten van Hatada en van Van der Zee en Boesten wordt de resolutie echter maximaal gehouden, zodat de proefpersonen ook minder geneigd zullen zijn de scherpste-indruk als onderdeel van het kwaliteitscriterium te gebruiken.

Deze verklaring leidt echter tot de conclusie, dat het door de proefpersonen gebruikte kwaliteitscriterium beïnvloed wordt door de stimuluskeuze. Dit zou de mogelijkheid tot het onderling vergelijken en het toepassen van de resultaten van dit soort experimenten echter sterk beperken. Onderzoek naar de stabiliteit van het kwaliteitscriterium lijkt daarom zeer gewenst.

5.3 Optimale kijkafstand

Jesty [7] beschrijft een experiment, waarin de proefpersoon geconfronteerd wordt met een geprojecteerde scène, en hem gevraagd wordt zijn stoel op die plaats te zetten, van waaruit hij het liefst naar de scène kijkt. Dit is herhaald voor verschillende beeldbreedtes en voor verschillende mates van defocussing. Het blijkt, dat het quotiënt van de gevonden optimale kijkafstand a_{opt} en de beeldbreedte constant is voor verschillende beeldbreedtes, en afhankelijk van de relatieve resolutie: $b/a_{opt} = C(f_{rel})$. Hoewel Jesty nergens een expliciete definitie geeft, blijkt uit het artikel, dat hij dit quotiënt beschouwt als een maat voor de kwaliteit, welke hij overigens consequent 'sharpness' noemt.

In paragraaf 4.3.3 berekenen wij op grond van de resultaten van EXP2, dat de optimale kijkafstand gevonden wordt voor een vaste resolutie van $16 \sim /\circ$, onafhankelijk van de beeldbreedte. Hieruit kan afgeleid worden, dat voor de optimale kijkafstand bij verschillende beeldbreedtes en relatieve resoluties geldt: $a_{opt} = 16 \cdot \frac{360}{2\pi} \cdot b/f_{rel}$. Dit komt volkomen overeen met de bevindingen van Jesty.

Het is nu ook mogelijk de subjectieve kwaliteit voor deze optimale kijkafstand te berekenen: het blijkt dat deze maximaal haalbare kwaliteit niet afhankelijk is van de beeldbreedte, en op lineaire wijze afhangt van de logaritme van f_{rel} . Hieruit blijkt, dat Jesty ten onrechte suggereert dat de (maximaal haalbare) kwaliteit van een display evenredig is met b/a_{opt} , hoewel hij terecht concludeert dat zij onafhankelijk is van de beeldbreedte.

In een tweede soortgelijk experiment varieert Jesty bij een aantal resoluties-op-het-scherm (f_{6dB}) de beeldbreedte door het projectiescherm te verkleinen.

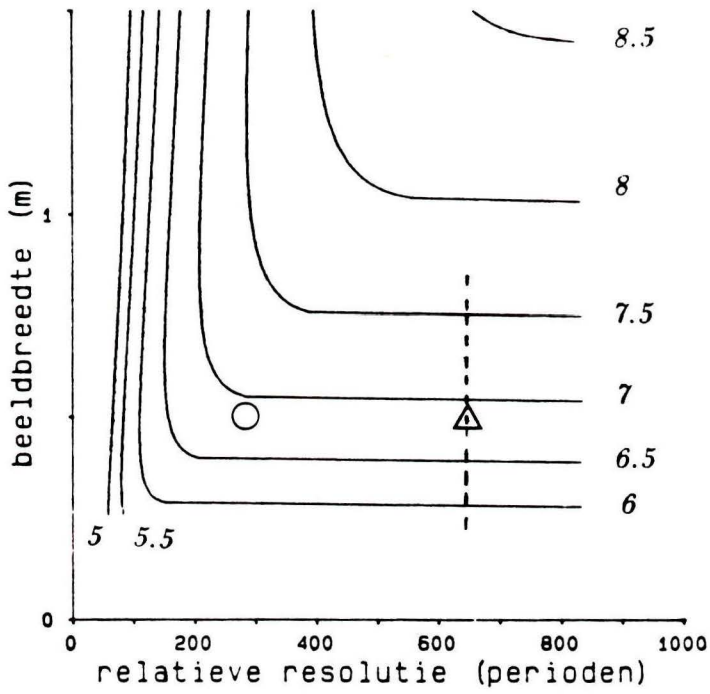
Daarbij vallen voor kleine beeldbreedtes dus gedeeltes van het beeld weg. Jesty vindt hierbij, dat voor een vaste waarde van f_{6dB} de optimale kijkafstand enigszins varieert met de beeldbreedte: $b^{0.19}/a_{opt} = C(f_{6dB})$. De invloed van de beeldbreedte blijkt dus erg klein, doch de resultaten van EXP2 voorspellen een totale onafhankelijkheid.

Ook met Jesty's eerste experiment komen de resultaten van zijn tweede experiment niet overeen. De aanwezige discrepantie kan misschien verklaard worden door de verschillende wijzen waarop de beeldbreedte gevarieerd wordt. In EXP2 en in Jesty's eerste experiment is de totale hoeveelheid origineel aanwezige informatie constant gehouden (dus de gehele scène is geprojecteerd), terwijl Jesty in zijn tweede experiment deze hoeveelheid tezamen met de beeldbreedte verandert. Het lijkt daarom nuttig te onderzoeken, of het verkleinen van de totale hoeveelheid aanwezige informatie er inderdaad toe leidt, dat de optimale kijkafstand niet meer alleen afhankelijk is van de relatieve resolutie, en zo ja, welke psychologische afweging daaraan ten grondslag ligt.

5.4 Relatie met TV en HDTV

Men kan zich afvragen in hoeverre de beschreven resultaten direct vertaald kunnen worden naar conclusies voor televisie. Er zijn namelijk een tweetal belangrijke verschillen tussen de aangeboden stimuli en de TV in de huiskamer. Ten eerste is het zó, dat in het experiment slechts stilstaande dia's zijn gebruikt, terwijl televisiebeelden geacht worden te bewegen. Tot zover is in de literatuur onbekend hoe het percept scherpte zich gedraagt bij bewegende beelden. Op grond van het feit, dat bij stilstaande beelden de emotionele betrokkenheid minder is, en er meer tijd is om de scène gedetailleerd op te nemen, zou men verwachten dat de gevoeligheid voor resolutieveranderingen bij bewegende beelden minder is. In dat geval zijn de beschreven experimenten te beschouwen als een soort 'worst-case' benadering, en direct van toepassing op het - toch ook nog altijd niet verwaarloosbare - gedeelte statische televisiebeelden.

Een tweede verschil zit in de manier waarop een zekere resolutie tot stand komt. In de beschreven experimenten is de resolutie in horizontale en in verticale richting even groot, en in beide richtingen kent het beeld een analoge informatie-opbouw. Dit geldt ook voor de horizontale richting van televisiebeelden, doch in verticale richting is de beeldinformatie gediscretiseerd in de



Figuur 18: Isokwaliteitkurven

De getekende kurven verbinden combinaties van beeldbreedte en relatieve resolutie, die eenzelfde kwaliteit opleveren. Een aantal punten is in de grafiek getekend: ○ geeft ongeveer de huidige TV aan, en △ en de stippellijn erdoorheen geven de mogelijkheden van HDTV weer.

verschillende scan-lijnen. Hoewel het ook voor TV-beelden mogelijk is om in beide richtingen eenzelfde resolutie in te stellen, is de aard van de weergegeven informatie anders (horizontaal analoog, vertikaal digitaal). Het is waarschijnlijk dat de manier van informatie-opbouw ook zijn invloed heeft op het scherpte-percept. Voortgaand onderzoek is nodig om aan te tonen in hoeverre dit belangrijk kan zijn.

Het direct vertalen van de resultaten van dit onderzoek in termen van televisie-signalen is dus gebonden aan een aantal voorbehouden. Desondanks zijn enige effecten zo groot en uitgesproken, dat daaraan zonder meer een voorspellende waarde kan worden gehecht. Een voorbeeld hiervan is de veelbesproken overgang van TV naar HDTV, die gedefinieerd is als een verdubbeling van de relatieve resolutie. In figuur 18 worden de posities van TV en HDTV globaal aangegeven. Uit de grafiek valt op te maken, dat deze verbetering in veel huiskamers geen enkel nut zal hebben, indien zij niet gepaard gaat met een vergroting van de beeldbreedte.

Referenties

- [1] M. Born, E. Wolf, Principles of Optics, Pergamon Press, London, 1959.
- [2] R. Boesten, Categorie schaling: the method of successive interval scaling, programma SUCINT, IPO-handleiding nr.55.
- [3] A.L. Edwards, Techniques of Attitude Scale Construction, Appleton-Century-Crofts, New York, 1957.
- [4] R.L. Gregory, Eye and Brain; the Psychology of Seeing, Weidenfeld and Nicolson, London, 1966.
- [5] T. Hatada, H. Sakata, H. Kusaka, Psychophysical analysis of the 'sensation of reality' induced by a visual wide-field display, SMPTE J. 89(1980)560-569.
- [6] G.C. Higgins, Image quality criteria, Journal of Applied Photographic Engineering 3(1977)53-60.
- [7] L.C. Jesty, The relation between picture size, viewing distance and picture quality, Proc. IEE 105B(1958)425-439.
- [8] R. Röhler, Informationstheorie in der Optik, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft MBH, Stuttgart, 1967.
- [9] H.L. Snyder, Image quality and observer performance, in: Perception of Displayed Information, L. Biberman, editor, Plenum Press, New York, 1973.
- [10] H.L. Task, A comparison of several display image quality measures, Proc. SID 19(1978)113-119.
- [11] W.S. Torgerson, Theory and Methods of Scaling, John Wiley and Sons, New York, 1958.
- [12] J.H.D.M. Westerink, Perceptief gewogen spatiale resolutie, IPO-rapport nr. 587, 1987.

- [13] E. van der Zee, M.H.W.A. Boesten, The influence of luminance and size on the image quality of complex scenes, IPO Annual Progress Report 15(1980)69-75.
- [14] E. van der Zee, M.H.W.A. Boesten, A.L. Duwaer, The influence of 'size constancy' on the subjective evaluation of image quality, IPO Annual Progress Report 18(1983)61-66.

Appendices

A Aanwijzingen voor de proefpersoon

Voor EXP1:

Geachte proefpersoon,

U werkt mee aan een experiment betreffende beeldkwaliteit. Doel van het experiment is, vast te stellen, hoe de door mensen ervaren kwaliteit afhangt van een aantal factoren, zoals scherpste en grootte van het beeld.

In dit experiment worden een aantal dia's vertoond. Zij verschillen in scherpste, grootte en voorstelling.

Het is de bedoeling, dat U elke dia op zijn kwaliteit beoordeelt, door een rapportcijfer voor die kwaliteit te geven. Hierbij moet U uiteraard zo min mogelijk op de voorstelling zelf letten.

Dus:

10.0 = uitstekend (maximaal)
0.1 = erbarmelijk (minimaal)

N.B.:

U mag dus een cijfer achter de komma geven.

In totaal krijgt U 147 dia's te zien, gedurende 15 seconden elk.

De eerste zeven dia's zijn proefdia's, en zij geven een goed beeld van de kwaliteits-variantie van de resterende 140 dia's.

Als U nog vragen hebt, stel die dan gerust aan de proefleider. Anders, veel succes!

Voor EXP2:

Geachte proefpersoon,

U werkt mee aan een experiment betreffende beeldkwaliteit. Doel van het experiment is, vast te stellen, hoe de door mensen ervaren kwaliteit afhangt van een aantal factoren, zoals scherpste en grootte van het beeld.

In dit experiment worden een aantal dia's vertoond. Zij verschillen in scherpste, grootte en voorstelling.

Het is de bedoeling, dat U elke dia op zijn kwaliteit beoordeelt, door een rapportcijfer voor die kwaliteit te geven. Hierbij moet U uiteraard zo min mogelijk op de voorstelling zelf letten.

Dus:

10.0 = uitstekend (maximaal)

0.1 = erbarmelijk (minimaal)

N.B.:

U mag dus een cijfer achter de komma geven.

In totaal krijgt U 118 dia's te zien, gedurende 15 seconden elk.

De eerste zes dia's zijn proefdia's, en zij geven een goed beeld van de kwaliteits-variantie van de resterende 112 dia's.

Als U nog vragen hebt, stel die dan gerust aan de proefleider. Anders, veel succes!

B Lensdefocussing

B.1 Theorie

De geometrische optiek geeft voor een lens een beschrijving van de verschillende soorten afwijkingen van een ideale afbeelding: de Seidel-abberaties (zie bijvoorbeeld Born en Wolf [1]). Deze zijn afhankelijk van twee variabelen: de positie \vec{r} van het afgebeelde punt op het scherm, en de plaats waar de lichtstraal het lensoppervlak doorkruist \vec{s} (zowel \vec{r} als \vec{s} zijn vectoren). Röhler [8] beschrijft bovendien de gevolgen van defocussing van de lens. Hij geeft voor de totale abberatiefunctie $\Delta(\vec{s}, \vec{r})$ een reeksontwikkeling:

$$\Delta(\vec{s}, \vec{r}) = a_0 + b_0 r^2 + b_1 s^2 + b_2 (\vec{s} \cdot \vec{r}) + c_0 r^4 + c_1 s^4 + c_2 (\vec{s} \cdot \vec{r})^2 + c_3 s^2 r^2 + c_4 r^2 (\vec{s} \cdot \vec{r}) + c_5 s^2 (\vec{s} \cdot \vec{r}) + d_0 r^6 + d_1 s^6 + \dots$$

Verder berekent hij hiermee de MTF van het systeem volgens:

$$MTF(\omega) = \int_{\text{lensoppervlak}} e^{-2\pi i \frac{\omega}{\lambda} \frac{\partial \Delta(x, y, \vec{r})}{\partial x}} ds_x ds_y.$$

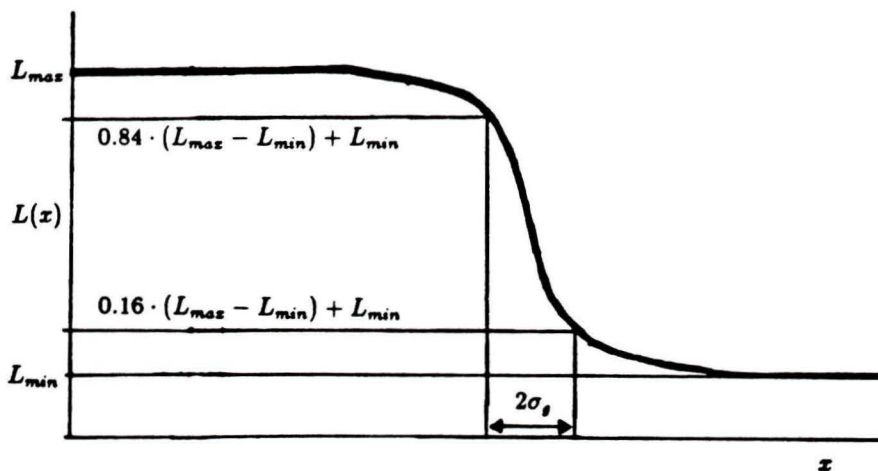
Hierin is ω de spatiale frequentie op de afbeelding, en λ de golflengte van het licht. Uit deze beide formules volgt dat in eerste orde alleen de coëfficiënten b_1, c_1, c_2, c_3 en c_5 van invloed zijn op de MTF. Zij stellen respectievelijk voor het effect ten gevolge van defocussing, en de Seidel-coëfficiënten voor sferische abberatie, voor astigmatisme, voor buiging van het veld en voor coma. Röhler berekent verder, dat de defocusseringscoëfficiënt b_1 evenredig is met de verschuiving van het voorwerpsvlak uit de ideale positie Δx :

$$b_1 = B \cdot \Delta x.$$

Hierin is B een constante.

Door Fourier-transformatie van de MTF is de puntspreidfunctie van het systeem te berekenen. Op grond van bovenstaande formule voor de MTF verwachten we voor de breedte σ van de puntspreidfunctie invloeden van de volgende effecten:

- Defocussing geeft een σ die evenredig is met de verschuiving van het voorwerpsvlak Δx .



Figuur 19: Cumulatieve Gauss-verdeling

De cumulatieve Gauss-verdeling voor de luminantie wordt beschreven door $\int_{-\infty}^x P(x')dx'$, waarin $P(x)$ de Gaussische puntspreidfunctie voorstelt (zie tekst). Ook is aangegeven tussen welke fracties van het luminantieverschil een breedte van σ_g wordt berekend.

- Sferische abberatie geeft eenzelfde waarde voor σ over het gehele afbeeldingsvlak.
- Astigmatisme enzovoort geven aanleiding tot de afhankelijkheid van σ van de plaats in het afbeeldingsvlak.

B.2 Meetprocedure

Voor het bepalen van de MTF van het lensstelsel is de volgende methode gehanteerd.

Een dia met een scheermesjes erin (zwart-wit overgang) is geprojecteerd op het scherm, waardoor een stapresponsie wordt gecreëerd. Loodrecht op de overgang neemt een Pritchard 1980 A-PL luminantiemeter, voorzien van een bijbehorende SL-10A voorzetlens de luminantie op. Daartoe wordt de luminantiemeter op een x-y-tafel geplaatst, die computergestuurd via een stappenmotor kleine discrete verplaatsingen uitvoert in de grootte-orde van 0.01 mm, en evenwijdig aan het scherm (x -richting).

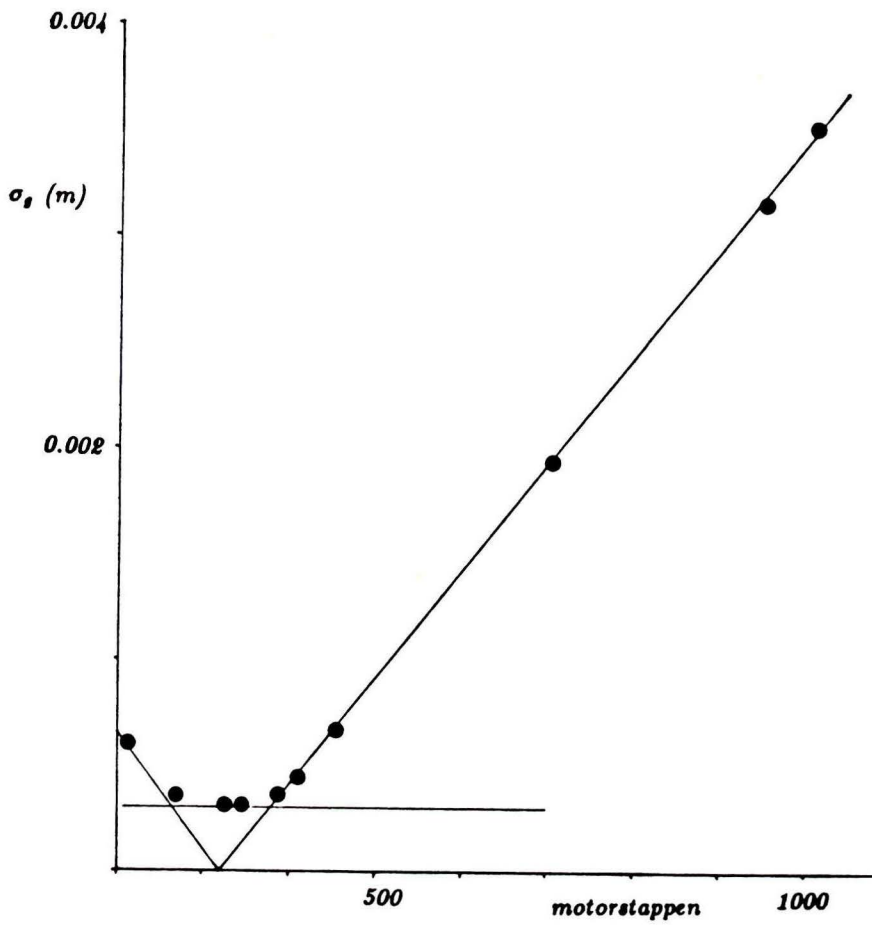
Op deze wijze wordt de stapresponsie $S(x)$ van het projectiesysteem gemeten. Hieruit wordt op twee manieren de 6 dB-afsnijfrequentie f_{6dB} [\sim/m] van de bijbehorende MTF bepaald:

- Wanneer we aannemen, dat de puntspreidfunctie van het systeem een Gaussische verdeling is met spreiding σ_g :

$$P(x) = e^{-x^2/\sigma_g^2},$$

dan wordt de stapresponsie beschreven door een cumulatieve Gaussverdeling (zie figuur 19). Hiervoor geldt, dat de afstand tussen de punten waar de luminantie 16% en 84% van het maximale luminantieverschil gestegen is, gelijk is aan wortel twee keer de breedte van de Gaussisch veronderstelde puntspreidfunctie: $\sqrt{2}\sigma_g$. Nog steeds onder de aanname van een Gaussische puntspreidfunctie kan uit deze waarde voor σ_g de 6 dB-afsnijfrequentie worden berekend via:

$$f_{6dB,g} = \frac{\sqrt{\ln 2}}{\pi\sigma_g}$$



Figuur 20: σ_g als functie van defocussing

De defocussing is uitgedrukt in het aantal motorstappen, waarbij 256 motorstappen overeenkomen met 1 mm. De betreffende lens is dus gefocuseerd bij motorstap 320. De horizontale en schuine asymptoten geven respectievelijk het oplossend vermogen van de lens en de afnemende resolutie ten gevolge van defocussing aan.

- Uit de gemeten stapresponsie kan ook via differentiatie en Fourier-transformatie de MTF van het systeem worden berekend. Hieruit kan eenvoudig de 6 dB-afsnijfrequentie $f_{6dB,m}$ worden afgelezen.

B.3 Gemeten resoluties en bronnen van spreiding

Het bepalen van de 6 dB-afsnijfrequenties is gebeurd voor verschillende defocuseringen, en voor verschillende plaatsen op het scherm.

Figuur 20 toont het verloop van σ_g met de defocusering. De data worden als verwacht beschreven door twee asymptoten, respectievelijk bepaald door het oplossend vermogen van de lens (horizontaal, zie paragraaf B.1) en door de defocusering (schuin). In het overgangsgebied tussen beide asymptoten geldt dat $f_{6dB,g}$ en $f_{6dB,m}$ niet altijd aan elkaar gelijk zijn, hetgeen te verklaren is uit het feit, dat de gemeten MTF niet Gauss-vormig is. In de overige gevallen komen $f_{6dB,g}$ en $f_{6dB,m}$ zeer goed met elkaar overeen, wat duidt op een Gauss-vormige MTF.

Over het algemeen wordt ook gevonden, dat σ_g nauwelijks afhangt van de plaats in het projectievlak. Gemeten in radiële richting (van het centrum naar buiten) aan de rand van de dia treden bij gefocuseerde lens enige effecten op (coma). Deze verhogen de waarde van σ_g echter slechts met maximaal 20% (hetgeen zelfs voor een goede lens normaal schijnt te zijn), en verdwijnen bij defocusering.

De gevonden spreiding in σ_g bij replicaties kan beschreven worden door de volgende bronnen:

- De spreiding ten gevolge van de meetprocedure is ongeveer 1%. Deze waarde wordt veroorzaakt door trillingen van de luminantiemeter, onefenheden in het projectiescherm en dergelijke.
- De spreiding ten gevolge van het steeds maar weer positioneren van de lens is afhankelijk van de positie van de lens: zij varieert van 5% in gefocuseerde positie tot 1 % bij sterke defocusering. Deze spreiding is niet een gevolg van de positionering van de x-y-tafel, waarop de lens gemonteerd is, hetgeen namelijk zeer nauwkeurig gebeurt. Veeleer moet de oorzaak gezocht worden in het trillen van de lens tijdens de positionering, waardoor kleine verschillen in de uiteindelijke positie ten opzichte van de dia het gevolg zijn.

- Het wisselen van de dia's geeft een spreiding in de positie waar de schuine asymptoot uit figuur 20 de x-as snijdt (optimale focussering). Dit resulteert in een defocuserings-afhankelijke spreiding in σ_g , die percentueel gezien maximaal is in het overgangs gebied tussen beide asymptoten (ongeveer 7%).
- Kleine, en niet te voorkomen stootjes tegen de projector of het projectiescherm resulteren eveneens in een onzekerheid in σ_g . Daarom worden alle lensstanden zowel voor als na het experiment geijkt. Het verschil tussen beide ijkingen kan vaak echter niet op systematische wijze verklaard worden. In de praktijk blijkt de aldus gemeten spreiding het belangrijkste.