

Leesbaarheid in Onderwijszalen

Dr. ing. A.H.W. (Piet) van der Zanden

*Universiteitsdienst Informatie en Communicatie Technologie
Afdeling Education Technology
Technische Universiteit Delft
a.h.w.vanderzanden@tudelft.nl*

Synopsis

Onderwijszalen worden onder regie van architect en projectontwikkelaar ingericht. Het multidisciplinaire team bestaat doorgaans uit (werktuig)bouwkundigen, installatietechnici en akoestisch specialisten. Wat opvalt is dat voor de doceromgeving bij ver- en nieuwbouw nog vaak wordt uitgegaan van een conventionele projectorinstallatie met projectiescherm. De praktijk leert ons dat de AV-IT inrichting, als onderdeel van een moderne onderwijspraktijk, niet of te laat aansluit in het traject van (her)inrichting. Ook lijkt visuele ergonomie voor een goede leesbaarheid te ontbreken bij het ontwerp van onderwijszalen. Kortom, het multidisciplinaire team verdient uitbreiding bij aanvang.

Uitgangspunt in een onderwijszaal is dat informatie gemakkelijk te produceren, te lezen en te volgen moet zijn. Daarbij mag het niet uitmaken of het op een krijtbord of whiteboard geschreven is of dat het elektronisch geschreven en getoond wordt. De leesbaarheid van geschreven en gepresenteerde tekst in een collegezaal is afhankelijk van meerdere factoren, zoals zichtlijnen, kijkafstand, stokhoogte van karakters, kijkhoek, scherm en licht.

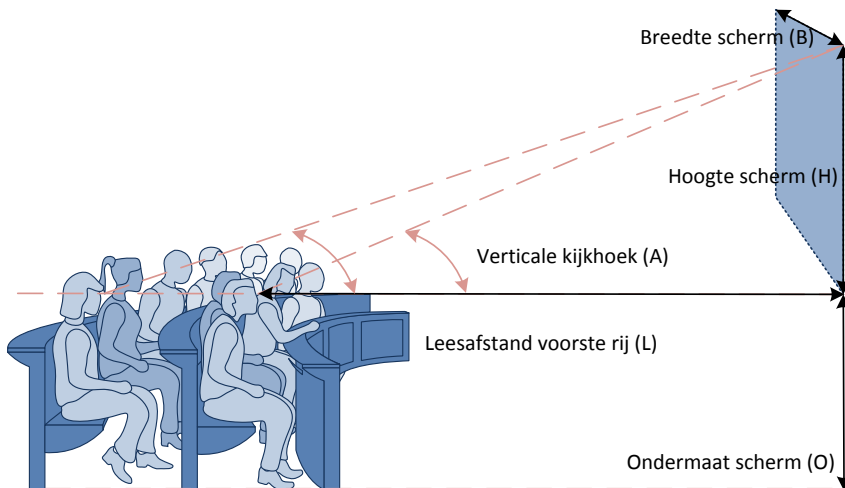
Dit artikel richt zich op leesbaarheid en beschrijft diverse richtlijnen vanuit ergonomische, didactische en audiovisuele benadering. Het beoogt een aanvulling te zijn op de gangbare Programma's van Eisen die worden gehanteerd bij de bestekfase van ver- en nieuwbouw van onderwijszalen. De volgende adviezen worden in dit document beschreven:

1. Ondermaat van een presentatiescherm bij voorkeur op 140 cm hoogte
2. Verticale kijkhoek op de voorste rij bij voorkeur 25 graden
3. Horizontale kijkhoek op de voorste rij bij voorkeur 35 graden
4. Geschreven of gepresenteerde karaktergrootte bij voorkeur 20 boogminuten
5. Geschreven karakters bij voorkeur wit op een zwarte achtergrond
6. Lichtsterkte van projector bij voorkeur 1000 lumen per m² projectiescherm
7. Projector bij voorkeur doorzicht, voorkom hot spot of reflectie bij opzichtprojectie
8. Brightness van LED scherm bij voorkeur groter dan 2000 nits
9. Pixeldichtheid van elektronisch display bij voorkeur groter dan 30 PPI

Het doel van dit document is om bestaande richtlijnen te spiegelen aan de hier gegeven adviezen.

Inleiding

Leesbaarheid in de onderwijszaal is afhankelijk van meerdere factoren. Figuur 1 toont een overzicht van enkele belangrijke afmetingen, zoals ondermaat scherm (O), verticale kijkhoek (A), leesafstand tot de voorste rij (L), hoogte (H) en breedte (B) van het presentatiescherm. Uiteraard spelen naast de positionering en type van het scherm of display ook karaktergrootte en lichtsterkte een dominante rol. In dit document worden de afhankelijkheden elk afzonderlijk behandeld. Bovendien eindigt elke paragraaf met een advies gebaseerd op literatuur of praktijk.



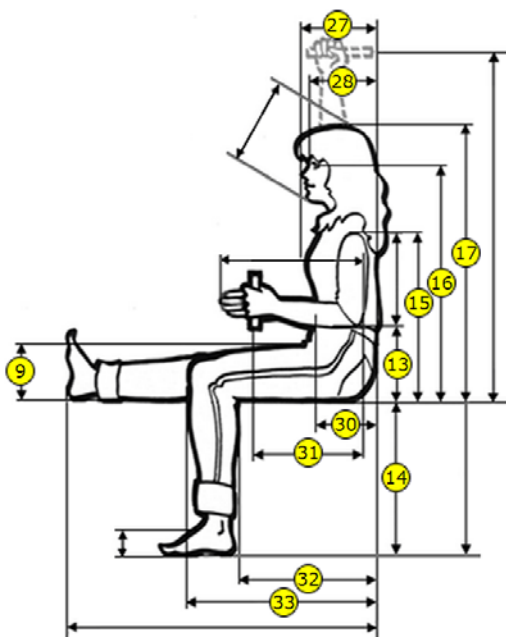
Figuur 1: Positionering van een presentatiescherm in een onderwijszaal. De diverse afmetingen zijn ondermaat scherm (O), verticale kijkhoek (A), leesafstand tot de voorste rij (L), Hoogte van presentatiescherm (H) en breedte van presentatiescherm (B)

1 Ondermaat van presentatiescherm bij voorkeur op 140 cm hoogte

Zichtlijnen in een vlakke zaal worden bepaald door de gebruikers die erin plaatsnemen. De DINED antropometrie database van de TU Delft voorziet in figuren met menselijke maten van Nederlanders voor ergonomische doeleinden, zie <http://dined.io.tudelft.nl/en,dined2004,302>. Er bestaan

overigens diverse databanken wereldwijd met menselijke maten van verschillende bevolkingsgroepen.

Voor het bepalen van de zichtlijn naar de onderzijde van een presentatiescherm is figuur 2 van de genoemde DINED website genomen [1]. Met dank aan Dr. Ir. J.F.M. (Johan) Molenbroek voor het gebruik en validatie van de gegevens.



Het gaat in Figuur 2 om de afmetingen met nummers 14, 16 en 17. Nummer 14 is de knieholtehoogte, nummer 16 is de ooghoogte van een zittend persoon en nummer 17 is de kruinhoogte van een zittend persoon. Uitgegaan wordt van een vlakke collegezaal, waarbij gegevens van de populatie jongeren tussen 20 en 30 jaar worden gebruikt, ofwel de gemiddelde student. De gekozen maten uit de DINED 2004 tabel gelden voor 90 procent van die populatie studenten.

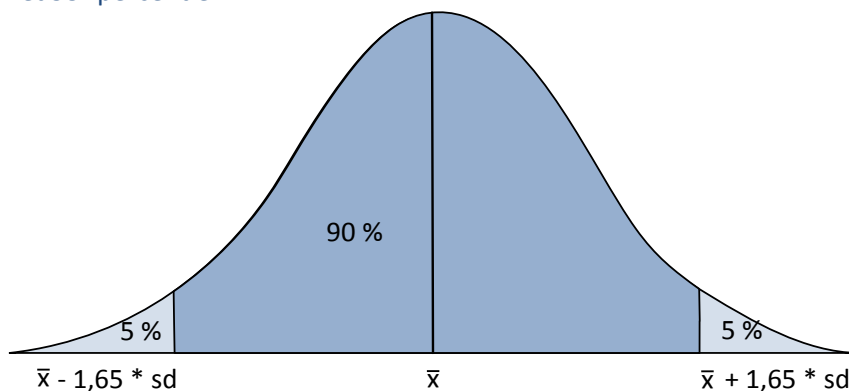
Figuur 2: Menselijke maten van een zittend persoon.
Bron: <http://dined.io.tudelft.nl/en,dined2004,302>.

De gemiddelde maten met bijbehorende standaardafwijking zijn genomen voor zowel mannelijke (m) als vrouwelijke studenten (f) en worden hier gegeven in centimeters (cm).

- 14 wordt geïnterpreteerd als zithoogte met waarden $m = 49,7 \pm 3,1$ cm en $f = 44,1 \pm 2,5$ cm.
- 16 is de ooghoogte tijdens het zitten met de waarden $m = 84,2 \pm 3,9$ cm en $f = 77,9 \pm 3,2$ cm.
- 17 is de kruinhoogte tijdens het zitten met de waarden $m = 95,7 \pm 3,9$ cm en $f = 88,8 \pm 3,2$ cm.

Om de gemiddelde zichtlijn vanaf ooghoogte (nummers 14 en 16) of vanaf kruinhoogte (nummers 14 en 17) te bepalen kunnen de gemiddelde waarden worden opgeteld: $\bar{X}_3 = \bar{X}_1 + \bar{X}_2$. De gerelateerde standaarddeviaties sd_1 en sd_2 dienen dan gekwadeerd en aangevuld te worden met tweemaal de correlatiefactor voor de betreffende lengte. De wortel geeft de gecorrigeerde standaarddeviatie sd_3 voor de opgetelde lengten: $sd_3 = \sqrt{sd_1^2 + sd_2^2 \pm 2 * r * sd_1 * sd_2}$ met correlatie waarde $r = 0,65$. De waarde r is te vinden op de website en geldt voor het optellen van lengtematen.

Voor mannelijke studenten bedraagt de ooghoogte daarmee $133,9 \pm 6,3$ cm. Deze waarde is normaal verdeeld zoals in figuur 3 getoond. Voor 90 % van de populatie geldt dan de waarde tussen het 5^e en het 95^e percentiel.



Figuur 3: Normaalverdeling met P_5 en P_{95} op 1,65 maal de standaarddeviatie.

De afstand van gemiddelde \bar{X} tot de 5^e percentiel (P_5) of de 95^e percentiel (P_{95}) bedraagt 1,65 maal de standaarddeviatie sd , zodat de percentielwaarden voor de mannelijke studenten $P_5 = 133,9 - 1,65 * 6,3 = 123,5$ cm en $P_{95} = 133,9 + 1,65 * 6,3 = 144,3$ cm bedragen.

De kruinhoogte van de mannelijke studenten bedraagt $145,4 \pm 6,3$ cm, zodat geldt $P_5 = 145,4 - 1,65 * 6,3 = 135,0$ cm en $P_{95} = 145,4 + 1,65 * 6,3 = 155,8$ cm.

Voor vrouwelijke studenten bedraagt de ooghoogte $122,0 \pm 5,2$ cm. De percentielwaarden bedragen daarmee $P_5 = 122,0 - 1,65 * 5,2 = 113,4$ cm en $P_{95} = 122,0 + 1,65 * 5,2 = 130,6$ cm. En voor de kruinhoogte van vrouwelijke studenten bedraagt de waarde dan $132,9 \pm 5,6$ cm, zodat geldt $P_5 = 132,9 - 1,65 * 5,6 = 123,7$ cm en $P_{95} = 132,9 + 1,65 * 5,6 = 142,1$ cm.

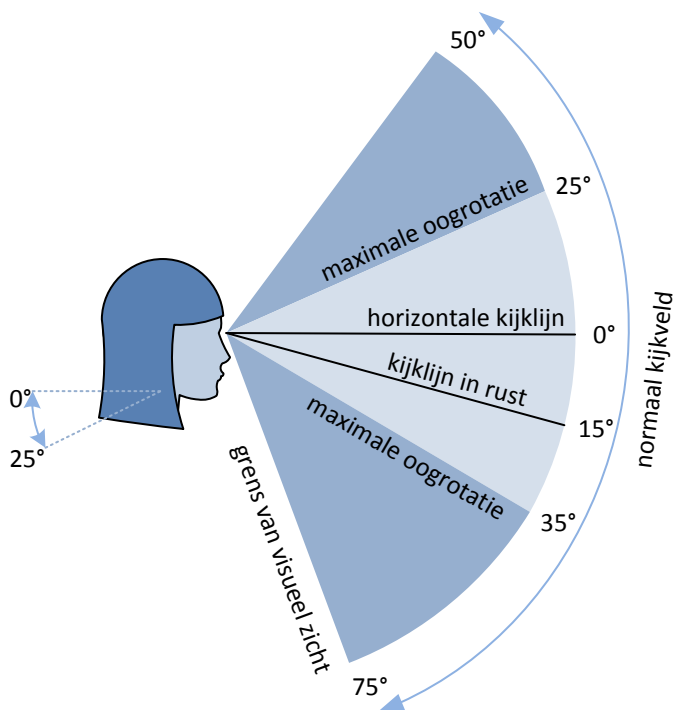
Advies voor de ondermaat van het presentatiescherm of LED display

In een vlakke zaal zitten studenten achter elkaar. Afhankelijk van de plaats van het scherm en de getoonde informatie moeten studenten geregeld iets opzij buigen om het beeld te volgen. Uit genoemde gegevens kan worden afgeleid dat de onderzijde van een presentatiescherm in een vlakke collegezaal zich op een hoogte moet bevinden variërend van minimaal ongeveer 130 cm tot maximaal ongeveer 155 cm. Geadviseerd wordt om een ondermaat (O) van 140 cm aan te houden.

NB: Zichtlijnen worden nog beter als kleinere studenten voorin gaan zitten en de langere studenten wennen om achterin de zaal plaats te nemen.

2 Verticale kijkhoek op voorste rij bij voorkeur 25 graden

Het verticale gezichtsveld kan zonder de nek te bewegen een hoek van 25 graden opwaarts en 35 graden neerwaarts maken, maar om teksten te kunnen lezen wordt de horizontale kijklijn van het oog geconcentreerd op de tekstregel, waarmee het hoofd een op- en neergaande beweging maakt tijdens het lezen van gepresenteerde informatie op het scherm.



Figuur 4: Verticaal gezichtsveld van het oog. Gegevens zijn afgeleid van "The Measure of Man and Woman: Human Factors in Design" (tillay, 2002)

De verticale kijkhoek A, zie figuur 1, is het grootst op de voorste rij van de onderwijszaal. Vooraan zal een nekgewricht de grootste verticale hoek maken om getoonde teksten op het scherm te kunnen volgen. Een nekgewricht kan gemakkelijk tot 25 graden opwaarts bewogen worden. Boven de 30 graden wordt het vermoeiend. Om het niet te overbelasten, zou de kijkhoek bij voorkeur niet groter dan 25 graden zijn. Figuur 4 toont een vereenvoudigd overzicht van het verticale kijkveld. Een ergonomisch completer overzicht kan worden nageslagen in "The Measure of Man and Woman: Human Factors in Design, ISBN 0471099554" [2]. Uit die ergonomische overzichten kan de opwaartse kijkhoek binnen de natuurlijke beweging worden afgeleid. Met 25 graden als uitgangspunt voor kijkhoek A van de voorste rij kan afstand L van scherm tot zitplaats worden bepaald afhankelijk van de toegepaste schermhoogte. De leesafstand L en schermhoogte H zijn afhankelijk van elkaar en kunnen worden bepaald met behulp van $\text{kijkhoek } A = \arctan(H/L)$.

Als schermhoogte H in figuur 1 bekend is, kan ook scherm breedte B worden bepaald. De meeste presentatie-schermen hebben een aspectratio van 16:9 (als video leidend is) of 16:10 (als PowerPoint leidend is). De scherm breedte voor ongeschaalde videobeelden volgt dan uit $B = 16/9 * H$.

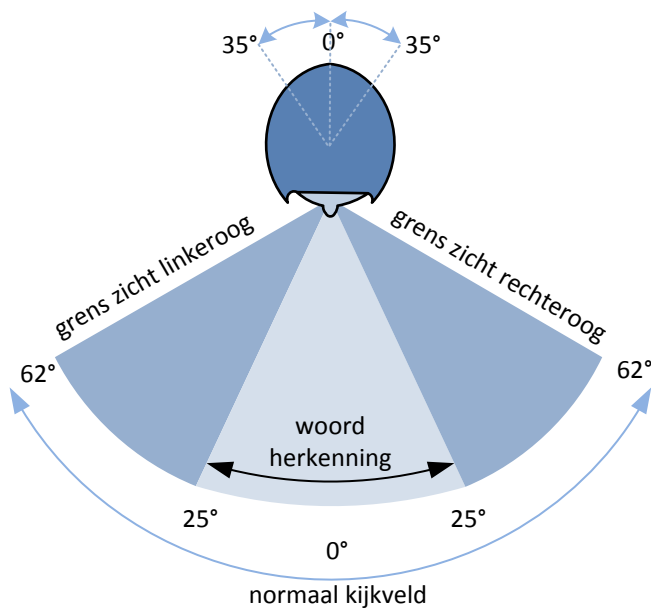
Advies is 25° voor verticale kijkhoek A op de voorste rij

Om het nekgewricht van studenten op de voorste rij van een onderwijszaal niet onnodig te belasten, wordt geadviseerd om de natuurlijke houding te volgen voor het lezen van het scherm. Met een verticale kijkhoek (A) van 25 graden kunnen maximale schermhoogte (H) en bijpassende breedte (B) worden bepaald.

3 Horizontale kijkhoek op voorste rij bij voorkeur 35 graden

Het horizontale kijkveld wordt in figuur 5 getoond. Een ergonomisch completer overzicht kan worden nagezien in "The Measure of Man and Woman: Human Factors in Design, ISBN 0471099554" [2]. Rond de centrale as van de ogen is de gezichtsscherpte het grootst. Alleen daar kan gedetailleerd worden gekeken, met andere woorden binnen het gebied van plus en min 10 graden rond de centrale as kan tekst herkend worden, zie ook <http://www.oogartsen.nl/>. De horizontale oogrotatie bedraagt plus en min 15 graden, zodat de natuurlijke zichthoek om te lezen maximaal $15 + 10 = 25$

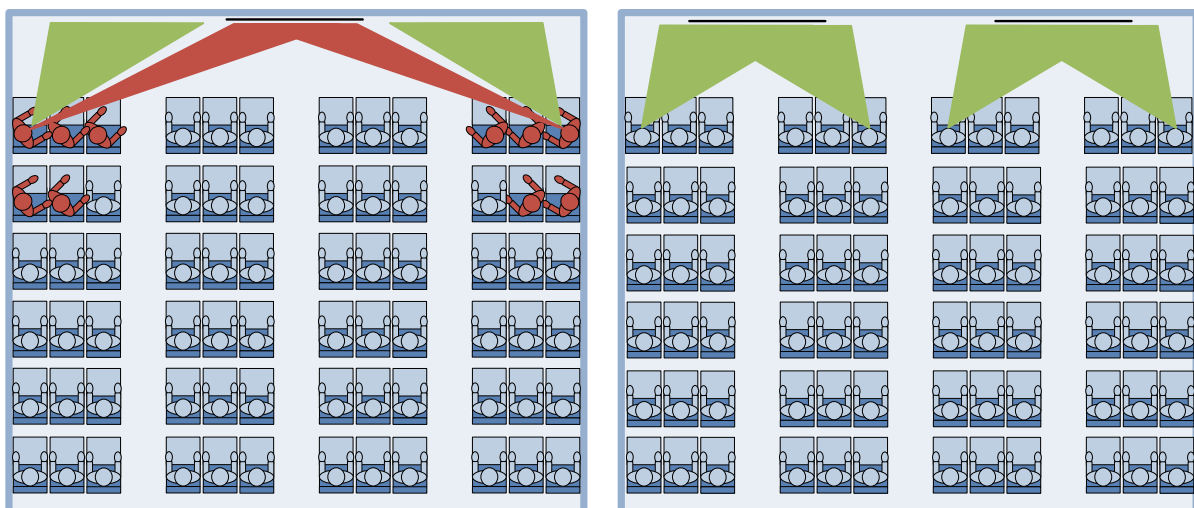
graden bedraagt. Figuur 5 toont een zichthoek van 25 graden naar links en 25 graden naar rechts voor tekstherkenning.



Figuur 5: Horizontaal gezichtsveld van het oog. Gegevens zijn afgeleid van "The Measure of Man and Woman: Human Factors in Design" (Tilly, 2002)

kan worden dan zal het lichaam vervolgens scheef op de stoel plaatsnemen. Dat voortdurend scheef zitten is een ongewenste situatie en kan tot lichamelijke klachten leiden.

Het is dus zaak om zichtlijnen de natuurlijke houding te laten volgen. Dat kan betekenen dat een enkel centraal scherm in de onderwijszaal soms niet voldoet. Als voorbeeld wordt in figuur 6a een vlakke collegezaal getoond met één presentatiescherm, dat middenvoor is gepositioneerd.



Figuur 6: a) Horizontale kijkhoeken met 1 centraal projectiescherm en b) horizontale kijkhoeken met 2 schermen.

De groene driehoeken vertegenwoordigen kijkoppervlakten die voldoen aan de hoek van 35 graden nekdraaiing \pm 25 graden oogrotatie. De rode oppervlakte geeft de situatie weer met kijkhoeken vanaf de buitenste stoelen van de voorste rij naar het centrale presentatiescherm. Op dezelfde wijze kan

voor elke werkplek bekeken worden of een natuurlijke leeshouding mogelijk is. Uit figuur 6a blijkt duidelijk dat meerdere plekken niet voldoen aan de natuurlijke kijkhoek. Slechte zichtlijnen kunnen bij een dergelijke opstelling grotendeels worden opgeheven door het aanbrengen van twee schermen zoals in figuur 6b is ingetekend.

Advies is 35° voor de horizontale kijkhoek

Om het lichaam van studenten niet onnodig te belasten, wordt geadviseerd om de natuurlijke houding van nekdraaiing te respecteren en een horizontale kijkhoek van ongeveer 35 ± 25 graden aan te houden. Afhankelijk van de onderwijszaal kan soms beter voor een meervoudige projectie worden gekozen.

4 Gepresenteerde karaktergrootte bij voorkeur 20 boogminuten

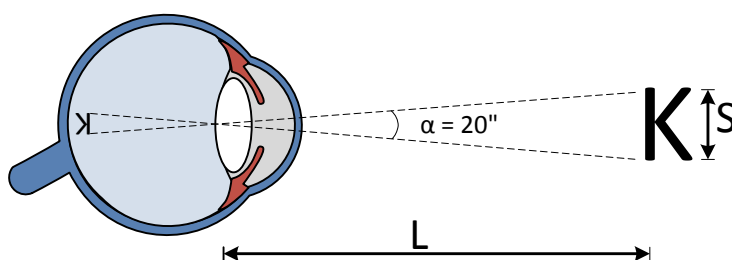
E	1	20/200
F P	2	20/100
T O Z	3	20/70
L P E D	4	20/50
P E C F D	5	20/40
E D F C Z P	6	20/30
F E L O P Z D	7	20/25
D E F F O T E C	8	20/20
L E F O D P C T	9	
P P P L T C E O	10	
P P P L L C F T D	11	

Om de leesbaarheid van geschreven en gepresenteerde tekst in een onderwijszaal vast te stellen wordt de richtlijn van oogartsen en opticiens aangehouden. De bij hen toegepaste Snellen oogleeskaart, zie figuur 7, stelt het zicht van de regel 20/20 gelijk aan 100 procent [4]. Deze zichtkaarten zijn oorspronkelijk opgesteld door de Utrechtse hoogleraar Oogheelkunde H. Snellen (1834-1908).

Zicht van 100 procent betekent een gezichtsscherpte (visus) van 1, hetgeen overkomt met 1 boogminuut. Die boogminuut wordt weer gelijkgesteld aan het minimaal te onderscheiden vermogen van het oog. Een boogminuut is $1/360$ ste deel van een cirkel (1 graad) gedeeld door 60 minuten, ofwel 0,0167 graden.

Figuur 7: Oogleeskaart door H. Snellen, zie [4].
Bron; <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Snellen06.png>

De lettergrootte voor presentaties en geschreven teksten met een goede leesbaarheid wordt door de Human Factor Research & Engineering Group van de Federal Aviation Administration (FAA) geadviseerd op tenminste 20 boogminuten [5]. Ondertiteling op televisie lijkt deze regel ook te volgen.



Figuur 8 verduidelijkt hoe de hoogte van een gepresenteerd karakter K is te berekenen ten opzichte van de afstand L.

Met 20 boogminuten (hoek α) als uitgangspunt en een leesafstand (L in centimeter) is de stokhoogte (S in

Figuur 8: Hoek $\alpha = 60 \text{ minuten} * \arctan (S/L)$

centimeter) van het karakter gemakkelijk uit te rekenen met de volgende formule:

$$\alpha = 60 \text{ minuten} * \arctan(\tan^{-1}) * S/L.$$

Voorbeeld: bij een leesafstand van $L = 12$ meter moet voor een goede leesbaarheid de stokhoogte van karakters zijn: 20 boogminuten = $60 * \arctan * H / (1200) \rightarrow H = \tan(20/60) * 1200 \approx 7$ cm.

Advies is 20 boogminuten voor geschreven of gepresenteerde tekst

Afhankelijk van de diepte van een onderwijszaal dient de grootte van geschreven of gepresenteerde karakters te worden aangepast. Een variërende zaaldiepte van 10 tot 20 meter betekent, volgens het FAA advies van 20 boogminuten voor de achterste rij, een karakterhoogte van respectievelijk 6 tot 11 cm. De vaak gehanteerde vuistregel 1:200 voor karakterhoogte versus afstand resulteert in een kijkhoek van ruim 17 boogminuten. Observaties in diverse collegezalen van de TU Delft leverden stokhoogten tussen 7 en 10 cm [6], variërend van 17 tot 23 boogminuten.

5 Geschreven karakters bij voorkeur wit op een zwarte achtergrond

Geschreven karakters variëren in hoogte, breedte en lijndikte. Afhankelijk van de diepte van de onderwijszaal dient een minimale stokhoogte te worden aangehouden. De breedte van zo een geschreven karakter heeft idealiter een verhouding tussen 0,6 en 1. Hoe vierkanter geschreven hoe beter leesbaar het karakter.



Figuur 9: Bij minder licht zijn witte karakters op een donkere achtergrond beter te lezen.

Bron: <http://www.hf.faa.gov/Webtraining/VisualDisplays>

De minimaal geadviseerde lijndikte kan eveneens worden afgeleid van de karakterhoogte. De FAA adviseert een streepdikte aan te houden tussen 1:6 en 1:8 [7]. Daarbij dient rekening gehouden te worden met het contrast. Bij een toenemende afstand zullen witte letters met een zwarte achtergrond 'uitstralen' op het donkere oppervlak terwijl zwarte letters op een witte achtergrond bij een toenemende afstand juist smaller lijken. Figuur 9 toont een impressie, echter is het uitstralen en smaller lijken op papier niet goed aan te tonen. In de praktijk daarentegen is het direct te beleven. Daarom is het conventionele krijt op alle plekken in een onderwijszaal zo goed te lezen terwijl karakters en schetsen op een whiteboard met toenemende afstand juist minder goed te onderscheiden zijn.

Een grote schrijfoppervlakte van elektronische displays, zoals interactive whiteboards en SMARTboards, geven een rustiger beeld voor de docent als witte karakters op een zwarte achtergrond worden geschreven en getoond. Een hoge luminantie van het display veroorzaakt

namelijk vrij snel irritatie en vermoeidheid. Tegelijkertijd is de leesbaarheid van witte karakters op een donkere achtergrond beter bij een zwakkere omgevingsverlichting. Whiteboards hebben een hogere omgevingsverlichting nodig voor een goede leesbaarheid, dat op zich weer een negatieve invloed heeft op de lichtsterkte van projectoren.

Advies voor de leesbaarheid van geschreven karakters

Bij het elektronisch schrijven op een interactieve whiteboard of SMARTboard is het aan te raden om witte karakters op een donkere achtergrond te gebruiken, ondanks dat computerbeelden gewoonlijk zwarte karakters op een witte achtergrond tonen. Enerzijds leveren witte karakters op een zwarte achtergrond een uitstekende leesbaarheid, anderzijds levert het een rustig beeld.

Als in een onderwijszaal met een diepte van meer dan 8 meter gebruik wordt gemaakt van whiteboards, dan wordt aangeraden om dikke (tot 1 cm) whiteboardmarkers te gebruiken voor een betere leesbaarheid.

6 Lichtsterkte van projector bij voorkeur 1000 lumen per m² scherm

Lichtomstandigheden in een onderwijszaal hebben een enorme invloed op de leesbaarheid van door projectoren getoonde teksten. Dit in tegenstelling tot elektronische schermen.

Licht wordt onder andere uitgedrukt in Lichtsterkte (luminantie) en Verlichtingssterkte (illuminantie). Luminantie is de eenheid voor een uitstralende lichtstroom. Het is de som van al het licht dat een bron uitstraalt ongeacht de richting en wordt uitgedrukt in lumen (lm). Illuminantie is de hoeveelheid invallend licht dat op een bepaalde oppervlakte schijnt. Het wordt uitgedrukt in Lumen per m², ofwel Lux (lx). Als bijvoorbeeld het achteruit stralende licht van een lichtbron met behulp van spiegels wordt gericht de oppervlakte aan de voorzijde dan blijft het aantal Lumen van die bron gelijk terwijl de hoeveelheid Lux op die oppervlakte toeneemt.

Om enig gevoel te krijgen voor de sterkte van licht volgen hierbij enkele richtwaarden in Lumen per m² (lx): direct zonlicht \approx 100.000 lx, daglicht \approx 10.000 lx, bewolkt \approx 1.000 lx, donkere dag \approx 100 lx, schemering \approx 10 lx, kantoorverblijven \approx 500 – 1.600 lx en onderwijsruimten \approx 750 – 1.600 lx.

De lichtsterkte van projectoren wordt uitgedrukt in ANSI-lumen. De American National Standards Institute (ANSI) heeft in 1992 de gestandaardiseerde testmethode ANSI IT7.215 opgesteld om lichtsterkten van verschillende projectoren met elkaar te kunnen vergelijken [8], maar wat is nu een goede lichtsterkte voor een bepaalde onderwijszaal?

Om de lichtintensiteit, leesbaarheid en zichtlijnen in een lichtrijke onderwijszaal te testen werd een kleinschalig experiment opgezet. Er was sprake van (in)direct zonlicht en andere sterke lichtbronnen. Twee projectoren werden ingezet om de lichtsterkte empirisch te bepalen: 1) een lamp projector ASK Proxima C445 met een lichtsterkte van 4000 ANSI lumen en 2) een LED projector CASIO XJ-M250 met een lichtsterkte van 3000 ANSI. Een projectiescherm van 160 bij 240 cm is gebruikt waarop diverse lichtsterkten, lettergrootten, testschermen en applicaties zijn geprojecteerd. De verkregen waarden zijn vergeleken met bestaande collegezalen.

Uit het experiment bleek dat een goede leesbaarheid met redelijke kleurechtheid werd behaald bij een luminantie van 1000 lumen per m² scherm ondanks invallende licht in de ruimte. De gewenste projectiesterkte kan berekend worden door het aantal ANSI-lumen van een projector te delen met het aantal vierkante meter schermoppervlak. Zo zijn de volgende richtwaarden tot stand gekomen voor een goede leesbaarheid bij niet verduisterde onderwijszalen:

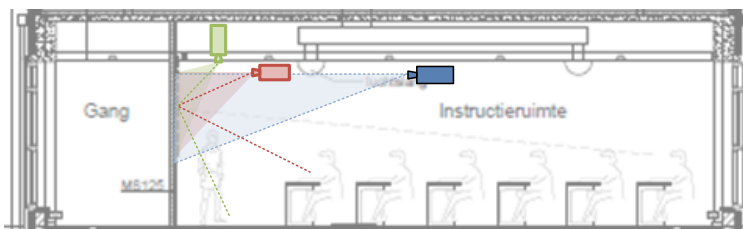
- schermafmetingen 170 * 272 (± 130") ≈ 4500 ANSI lumen
- schermafmetingen 160 * 256 (± 120") ≈ 4000 ANSI lumen
- schermafmetingen 150 * 240 (± 110") ≈ 3500 ANSI lumen
- schermafmetingen 140 * 224 (± 100") ≈ 3000 ANSI lumen

Advies is 1000 ANSI lumen per m² voor een goede leesbaarheid

Om met een projector goed leesbare resultaten te behalen in een door omgevingslicht beïnvloede onderwijsruimte wordt een lichtsterkte van ongeveer 1000 lumen per vierkante meter scherm geadviseerd. In zeer lichtrijke omgevingen is het beter om LED displays toe te passen. De leesbaarheid van elektronische schermen worden nauwelijks beïnvloed door het omgevingslicht vanwege de prima contrast- en helderheidsinstellingen.

7 Voorkom hot spot of reflectie van geprojecteerd beeld

Als een opzichtprojector wordt toegepast in een onderwijszaal dan kunnen hinderlijke hot spots of reflecties op het scherm ontstaan. De intensiteit van hinder is afhankelijk van het toegepaste

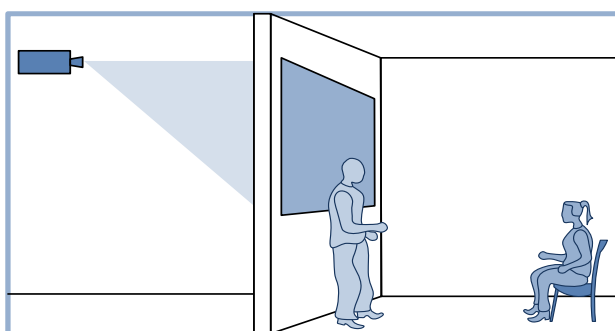


projectieschermmateriaal. Soms wordt gekozen voor whiteboardmateriaal zodat het zowel voor instructie van whiteboard markers als voor projectie kan worden ingezet.

Figuur 10: Hot spots en reflecties voorkomen met short throw projector

Door het zorgvuldig uitmeten van de projectorpositie kan reflectie voorkomen worden. Soms is het handig om een zogenoemde short throw projector toe te passen, zoals de rode of groene projector in figuur 10. De docent staat dan niet in de lichtbundel.

Als achter de projectiewand ruimte beschikbaar is, dan heeft het voorkeur om de projector van



achterten op een doorzichtig scherm te laten schijnen, de zogenoemde doorzichtprojectie. Met doorzichtprojectie wordt voorkomen dat de docent in de lichtbundel staat, zodat de projectie niet wordt onderbroken. Het hinderlijke ventilatorgeluid van de lampkoeling is in een dergelijke opstelling eveneens verdwenen.

Figuur 11: Doorzichtprojectie voorkomt dat de docent de lichtbundel onderbreekt

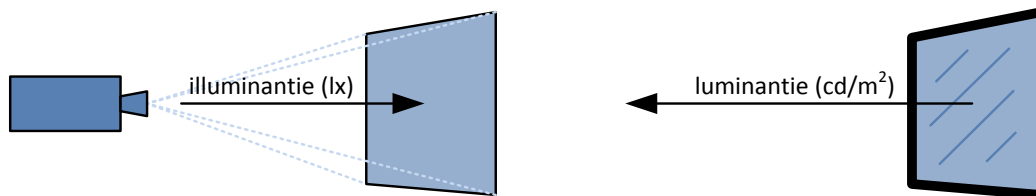
Advies om hot spot of reflectie te voorkomen

Om hinderlijke reflectie van projectoren te voorkomen wordt idealiter gekozen voor doorzichtprojectie. Soms kan worden gekozen voor het toepassen van een short throw projector zodat de reflectie wordt afgebogen naar de vloer.

Elektronische schermen hebben soms een erg reflecterend oppervlak, maar als deze apparaten aan staan, blijkt men er in de praktijk weinig hinder van te ondervinden.

8 Brightness van LED scherm bij voorkeur groter dan 2000 nits

Elektronische schermen hebben nagenoeg altijd een goed beeld ondanks veranderende lichtomstandigheden. Bij elektronische schermen wordt de lichtsterkte aangegeven door de brightness (helderheid). Deze wordt uitgedrukt in nits ofwel candela per vierkante meter (cd/m^2). In tegenstelling tot een projector met opvallend licht op een scherm (illuminantie) straalt een elektronisch scherm licht uit (luminantie). Daarbij wordt $1 \text{ cd}/\text{m}^2$ gelijk gesteld aan 1 lux in de richting loodrecht op het scherm, zie figuur 12.



Figuur 12: Projector met opvallend licht in lx en LED scherm met uitstralend licht in cd/m^2

Moderne LED displays hebben een helderheid variërend van 1000 tot 14000 nits en worden nauwelijks beïnvloed door omgevingslicht. Het zijn de wat oudere plasma en LCD schermen die lichtzwak zijn, met name de grotere maten. Deze hebben gemiddeld een helderheid van 300 tot 1000 nits. Ter indicatie: Laptops hebben gemiddeld 150 tot 300 nits. LED verlichting voor buiten heeft voor een goede zichtbaarheid 5000 nits nodig, voor binnen is 3000 nits meer dan voldoende.

Elektronische displays hebben naast helderheid ook een mogelijkheid om het contrast in te stellen. Contrast helpt om de gepresenteerde tekst beter te kunnen onderscheiden.

Advies om een LED scherm toe te passen met helderheid groter dan 2000 nits

Als de grootte van het te presenteren scherm het toelaat, dan is er een sterke voorkeur voor een LED scherm. Deze heeft dusdanig goede instelmogelijkheden dat de leesbaarheid nagenoeg onafhankelijk wordt van het omgevingslicht. Een tweede groot voordeel is het aantal branduren van een LED scherm, dat varieert van 20.000 tot 50.000 branduren, terwijl het aantal lampuren van een projector varieert van 1.500 tot 2.500 branduren. De opkomende LED en laser projectoren hebben wel een hoog aantal branduren, echter zijn nog niet alle resoluties met gewenste lichtsterkte beschikbaar.

9 Pixeldichtheid elektronisch scherm bij voorkeur groter dan 30 PPI

Naast helderheid en contrast is pixel density (pixeldichtheid) van elektronische schermen belangrijk voor de leesbaarheid. Pixeldichtheid is het aantal pixels per lengte-eenheid uitgedrukt in PPI (pixels per inch); hoe hoger de PPI hoe hoger de resolutie. Een hoge resolutie met een klein scherm levert

een scherp, gedetailleerd beeld voor leesbaarheid van gepresenteerde teksten. Apparaten met een hoge PPI zijn bijvoorbeeld smartphones en tablet computers.

Afhankelijk van resolutie en schermgrootte zullen pixels wel of niet te onderscheiden zijn. Als beelden op elektronische displays vloeiend over moeten komen, dan dient de pixelgrootte kleiner te zijn dan 1 boogminuut voor de betreffende toeschouwer, ofwel kleiner dan het onderscheidend vermogen van het oog. Een pixelvrij beeld is zodoende afhankelijk van de leesafstand.

De grootte van een pixel met kijkhoek α van 1 boogminuut en een leesafstand L van 3 meter kan worden berekend met $\alpha = 60 \text{ minuten} * \arctan * (\text{pixel grootte } P) / (\text{leesafstand } L) = 1 \text{ boogminuut}$. Pixelgrootte $P = \tan (1/60) * \text{leesafstand } L = \tan (0,0167) * 300 \text{ cm} = 0,000291 * 300 \text{ cm} = 0,087 \text{ cm}$ of 0,0344 inch. Pixeldichtheid is de inverse van pixelgrootte ofwel gelijk aan $1 / 0,0344 = 29 \text{ PPI}$.

Het berekenen van de pixeldichtheid kan door het aantal diagonaal pixels van een elektronisch display te delen door de schermdiagonaal. Het aantal diagonaal pixels is de wortel van de gekwadeerde horizontale en verticale resolutie. Bijvoorbeeld is de pixeldichtheid van een 55 inch (140 cm) 1080p LED display:

Pixeldichtheid is $\sqrt{1920^2+1080^2} / 55 \text{ inch} = \sqrt{4852800} / 55 \text{ in} = 2203 / 55 \text{ in} = 40 \text{ PPI}$.

De ideale leesafstand van dat 55 inch display met Full HD resolutie (1920 * 1080) begint dan vanaf: $L > 1 / 40 (\text{pixelgrootte in inch}) / \tan (0,0167) * 2,54 (\text{pixelgrootte in cm}) \approx 218 \text{ cm}$. Enkele leesafstanden met pixeldichtheid voor een kijkhoek van ongeveer 1 boogminuut staan in onderstaande tabel:

Leesafstand in cm	Pixeldichtheid in PPI
100	> 87
200	> 43
300	> 29
400	> 22
500	> 17

Let wel dat de grootte van een karakter op een hoger resolutie display kleiner wordt geprojecteerd dan op een lager resolutie display. Bijvoorbeeld wordt een karakter van 100 pixels op een 1920*1080 display van 55 inch en pixeldichtheid van 40 PPI met een stokhoogte van 6,35 cm getoond. Datzelfde karakter van 100 pixels wordt op een 1366*768 display en pixeldichtheid van $1567 / 55 = 28,5 \text{ PPI}$ met een afmeting van 8,91 cm getoond.

Tenslotte nog de relatie tussen de fontgrootte van een lettertype en de pixelgrootte op een elektronisch display. Deze zijn niet gelijk, maar hebben een verhouding van ongeveer 1 staat tot 1,35. Bijvoorbeeld heeft een 12-punts font een hoogte van 16 pixels, een 18-punts font een hoogte van 24 pixels en een 30-punts een hoogte van 40 pixels.

Advies voor pixeldichtheid groter dan 30 PPI

De pixeldichtheid van elektronische displays bepaalt de resolutie en leesbaarheid. De toeschouwer wil een vloeiend beeld zien waarmee de pixelgrootte kleiner moet zijn dan 1 boogminuut. Met als

uitgangspunt een leesafstand van 3 meter zou de pixeldichtheid bij voorkeur groter dan 30 PPI moeten bedragen.

Om karakters scherp af te beelden is het verstandig om originele beeldsignalen te tonen en scaling te voorkomen. Bijvoorbeeld kunnen bij het omzetten van gewoon beeld naar breedbeeld de letters wazig en vervormd worden weergegeven.

Nawoord over leesbaarheid in onderwijszalen

In de praktijk gaat de architect over het algemeen uit van maximale zaalcapaciteit. De afmetingen van het gewenste meubilair zijn daarbij richtinggevend. Zichtlijnen worden wel behandeld, maar er wordt niet ingezoomd op zitplekken afzonderlijk. Leesbaarheid wordt aangenomen en voor de doceeromgeving wordt standaard uitgegaan van projectoren met projectieschermen.

In een onderwijszaal moet informatie gemakkelijk te produceren, te lezen en te volgen zijn. Daarbij mag het niet uitmaken of het op een krijtbord of whiteboard geschreven is of dat het elektronisch geschreven en getoond wordt. De leesbaarheid van geschreven en gepresenteerde tekst in een collegezaal is afhankelijk van meerdere factoren, zoals zichtlijnen, kijkafstand, stokhoogte van karakters, kijkhoek, scherm en licht.

Dit document richt zich op leesbaarheid in de onderwijsruimte. Het is uitgewerkt in richtlijnen om multidisciplinaire ontwerpteam van onderwijszalen bij te staan. Het beoogt een aanvulling te zijn op het bestaande Programma van Eisen gebruikt bij de bestekfase van ver- en nieuwbouw van onderwijszalen.

Referenties

- [1] Menselijke maten van zittend persoon. Verkregen via <http://dined.io.tudelft.nl/dined/full>
- [2] Tilley, A. R. (2002). *The Measure of Man and Woman: Human Factors in Design*. New York: John Wiley & Sons inc.
- [3] Snijders, C. J., Hoek van Dijke, G. A., & Roosch, E. R. (1991). A Biomechanical Model for Analysis of the Cervical Spine in Static Postures. *Journal of Biomechanics*, 24, 783-792.
- [4] Keunen, J. E. E. (1986). De Letterkaart volgens Snellen. *Nederlands Tijdschrift voor Geneeskunde*, 130, 173-176.
- [5] Bereken de grootte van gepresenteerde karakters. Verkregen via <http://www.hf.faa.gov/Webtraining/VisualDisplays>
- [6] Zanden, A.H.W. van der (2013). *Doceren met interactief SMARTboard en vier kwadranten*. Delft.
- [7] Width-to-Height Ratio of Written Chalkboard Characters. Verkregen via <http://www.hf.faa.gov/Webtraining/VisualDisplays/text/size1a.htm>
- [8] ANSI IT7.215 (1992). *Audiovisual Systems - Data Projection Equipment and Large Screen Data Displays - Test Methods and Performance Characteristics*. Revised and Redesignated with Variable Resolution Electronic Projection by ANSI IT7.227 (1998)