

Sehen und Bildschirm

Mensch-Computer Interaktion

Educational Material

Author(s):

Schierz, Christoph

Publication date:

2001

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004361498>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

**Skript für das EduSwiss-
Kursmodul M-MCI.d 2001**

Mensch-Computer Interaktion

Sehen und Bildschirm

Dr. sc. nat. Ch. Schierz

*Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie
ETH-Zentrum, NW
Clausiusstr. 25
8092 Zürich*

Inhalt

EINLEITUNG	3
MESSGRÖSSEN	3
<i>Dioptrie</i>	3
<i>Sehschärfe</i>	3
<i>Leuchtdichte</i>	3
<i>Kontrast und Polarität</i>	4
DAS AUGE	4
OPTIK	4
<i>Sehprozess</i>	4
Abbildung	4
Akkommodation	5
Abhängigkeit der Sehschärfe vom Akkommodationszustand	5
Pupille und Schärfentiefe	5
Natürliche Abbildungsfehler	6
Individuelle Abbildungsfehler	6
Abhängigkeit der Sehschärfe vom Alter	7
<i>Praxisbezug</i>	7
Zeichenschärfe und Sehdistanz	7
Korrekturmöglichkeiten bei Fehlsichtigkeit	8
<i>Empfehlungen</i>	9
NETZHAUT UND SEHSCHÄRFE	9
<i>Sehprozess</i>	9
Aufbau der Netzhaut	9
Zapfen und Stäbchen	9
Informationsübertragung	9
Sehschärfe und Netzhautort	10
<i>Praxisbezug</i>	10
Zeichengrösse	10
<i>Empfehlungen</i>	11
BLICKRICHTUNG	11
<i>Sehprozess</i>	11
Konvergenz	11
<i>Praxisbezug</i>	11
Zeilenabstand	11
Spiegelbilder im Bildschirm	12
<i>Empfehlungen</i>	12
HELLIGKEIT	12
LICHTEMPFFINDLICHKEIT	12
<i>Sehprozess</i>	12
Weber-Fechner-Gesetz	12
Potenzfunktion von Stevens	13
Sehschärfe und Leuchtdichte	13
<i>Praxisbezug</i>	13
Mittlere BS-Leuchtdichte	13
<i>Empfehlungen</i>	13
ADAPTATION	14
<i>Sehprozess</i>	14
Chemische Adaptation	14
Neuronale Adaptation	14
Abhängigkeit der Sehschärfe vom Adaptationszustand	14
<i>Praxisbezug</i>	15
Bildschirm und Fenster	15
Polarität	15
<i>Empfehlungen</i>	15

KONTRAST	15
KONTRASTVERSTÄRKUNG	15
<i>Sehprozess</i>	15
Infeld-Umfeld-Antagonismus rezeptiver Felder	15
Abhängigkeit der Sehschärfe vom Kontrast	16
<i>Praxisbezug</i>	16
Äusserer Kontrast	16
Innerer Kontrast	16
<i>Empfehlungen</i>	17
KONTRASTMINDERUNG	17
<i>Sehprozess</i>	17
Physiologische Blendung	17
<i>Praxisbezug</i>	17
Diffuse Lichtstreuung am Bildschirm	17
<i>Empfehlungen</i>	17
FARBE	18
FARBRAUM	18
<i>Sehprozess</i>	18
Drei Farbrezeptoren (Theorie von Young und Helmholtz)	18
Farbtafel, Farbkoordinaten, Farbdreieck	18
Farbfehlsichtigkeit	19
<i>Praxisbezug</i>	19
Metamerie	19
Farbbildschirme	19
<i>Empfehlungen</i>	19
FARBSEHSCHÄRFE	20
<i>Sehprozess</i>	20
Abhängigkeit der Sehschärfe von der Farbe	20
<i>Praxisbezug</i>	20
Farbkodierung	20
<i>Empfehlungen</i>	20
FARBVERARBEITUNG	20
<i>Sehprozess</i>	20
Gegenfarbentheorie (Hering)	20
<i>Praxisbezug</i>	21
Farbkontraste	21
<i>Empfehlungen</i>	21
ZEITFAKTOREN	21
FLIMMERN	21
<i>Sehprozess</i>	21
Flimmerverschmelzungsfrequenz	21
<i>Praxisbezug</i>	22
Bildschirmflimmern	22
Blinkende Zeichen	22
<i>Empfehlungen</i>	22
BEWEGUNG	22
<i>Sehprozess</i>	22
Netzhautperipherie	22
Sehschärfe und relative Bewegung	23
<i>Praxisbezug</i>	23
Jitter	23
<i>Empfehlungen</i>	23
DAUERLEISTUNG	23
<i>Sehprozess</i>	23
Asthenopische Beschwerden (nach Krueger)	23
<i>Praxisbezug</i>	24
Beanspruchung	24
<i>Empfehlungen</i>	24
LITERATUR	24

Einleitung

Es gibt mindestens zwei Gründe, weshalb sich der oder die Informatik-Interessierte mit dem Sehen beschäftigen möchte:

- Der Sehvorgang ist einer der am höchsten entwickelten biologischen Informationsverarbeitungsprozesse
- für eine adäquate Entwicklung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle muss die menschliche Leistungsfähigkeit, insbesondere des Sehvorgangs bekannt sein.

Dieses Skript ist im Sinne des zweiten Zugangs zusammengestellt worden. Nach einer Beschreibung der relevanten Sehprozesse wird jeweils ein Praxisbezug hergestellt. Als Beispiel dient die Arbeit am Bildschirm (BS). Es folgt eine knappe Zusammenfassung in Form von Empfehlungen. Diese lehnen sich meist an den internationalen Standard ISO 9241 an.

Die Zusammenstellung beinhaltet auch Texte, welche zum Teil abgeändert, aus Skripten von S. Mangold und H. Krueger entnommen sind.

Messgrößen

Dioptrie

Als Mass für die Lichtbrechkraft einer abbildenden Optik wird die *Dioptrie* (dpt) verwendet.

$$\text{Dioptrie} = 1 / [\text{Distanz in m}]$$

So besitzt ein normalsichtiges Auge bei Blick ins Unendliche per Definition eine Brechkraft von 0 dpt. Bei Blick in eine Distanz von 50 cm beträgt sie 2 dpt.

Sehschärfe

Unter der *Sehschärfe* versteht man das Vermögen des Auges, zwei Punkte in einer bestimmten Entfernung noch getrennt wahrnehmen zu können. Dieses Auflösungsvermögen wird aus dem *Sehwinkel* (Abb. 1), bei dem das zu prüfende Auge zwei Punkte gerade noch getrennt wahrnimmt, errechnet und heisst *Visus*:

$$\text{Visus} = 1 / [\text{Sehwinkel in Bogenminuten}]$$

Ein normalsichtiges Auge kann zwei Punkte unter dem Winkel von einer Bogenminute (1') bei guten Sehverhältnissen noch unterscheiden (Visus = 1). Ein Visus von 0.8 gilt gerade noch als gutes Auflösungsvermögen; ein Visus ≤ 0.5 gilt als schwach-sichtig.

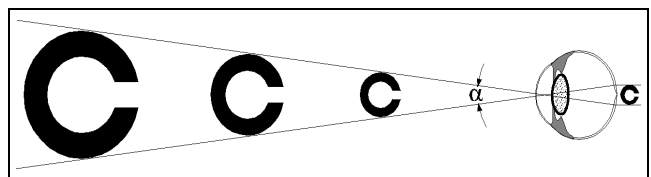


Abb. 1: Zur Definition des Sehwinkels α .

Zur Bestimmung des Visus werden in der Praxis als Testzeichen nicht zwei Punkte vorgegeben, sondern in unterschiedliche Richtungen orientierte, standardisierte Sehobjekte (Optotypen). Beispiele sind der Landolt-Ring (**C**) oder der Snellen-Haken (**E**), bei welchen die Richtung der Öffnungen bestimmt werden muss. Die Sehschärfe wird sowohl von individuellen als auch von Umgebungsfaktoren beeinflusst und kann als operationales Belastungsmass dienen.

Leuchtdichte

Die *Leuchtdichte* L ist ein Mass für die subjektiv gesehene Helligkeit. Zwischen Leuchtdichte und Helligkeit besteht jedoch

keine lineare Beziehung (\rightarrow Lichtempfindlichkeit). Ihre Masseinheit ist Candela/m² (cd/m²). Ein weisses Papier auf einem gut beleuchteten Büroschreibtisch hat etwa eine Leuchtdichte von 100 cd/m²; diejenige einer Leuchtstofflampe beträgt ca. 14'000 cd/m². Die Leuchtdichte, welche nicht mit der Beleuchtungsstärke in Lux verwechselt werden darf, lässt sich mit einem Leuchtdichte-Photometer auf einfache Art messen. Mit diesem Gerät können Blendquellen, Kontraste und durch Spiegelung verursachte Kontrastminderung quantitativ bestimmt werden. Die Leuchtdichte und somit auch die Leuchtdichte-Photometer berücksichtigen, dass das menschliche Auge nicht für alle Wellenlängen des Lichtspektrums gleich empfindlich ist. Die Gewichtung der Wellenlänge wird durch die $V(\lambda)$ -Kurve beschrieben (Abb. 2). Beim Sehen in der Dämmerung verschiebt sich die Empfindlichkeitskurve zu kürzeren Wellenlängen.

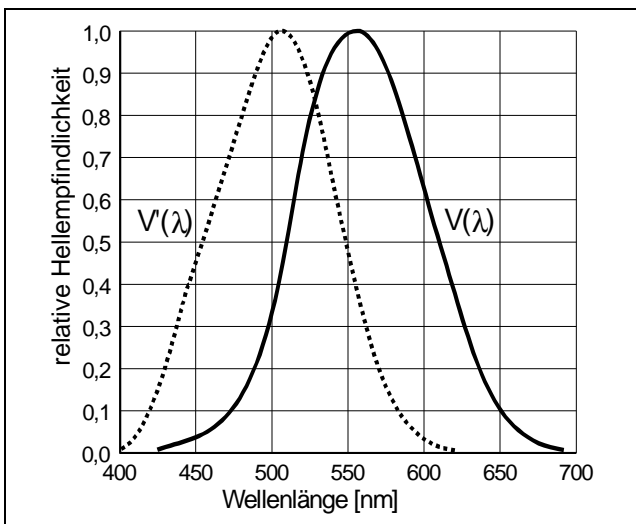


Abb. 2: Spektrale Hellempfindlichkeitskurve des menschlichen Auges $V(\lambda)$ für Tagsehen und $V'(\lambda)$ für Dämmerungssehen.

Kontrast und Polarität

Der *Kontrast* beschreibt den Leuchtdichteunterschied zweier benachbarter Orte. Zum Beispiel die Leuchtdichte eines BS-Zeichens L_Z und die Leuchtdichte des Umfelds L_U . Es gibt mehrere Kontrastdefinitionen:

$$K = L_Z / L_U$$

$$K' = (L_Z - L_U) / L_U$$

$$K'' = (L_Z - L_U) / (L_Z + L_U)$$

Bei BS mit dunklen Zeichen auf hellem Hintergrund spricht man von *positiver Polarität* da sie der üblichen von Text auf Papier entspricht (K' und K'' sind jedoch negativ); bei hellen Zeichen auf dunklem Grund spricht man von *negativer Polarität* (K' und K'' sind positiv).

Das Auge

Optik

Sehprozess

Abbildung

Treffen Lichtstrahlen, die von einem Gegenstand ausgehen, auf das Auge, so werden sie von der *Hornhaut* (Cornea), der *Linse* und dem Glaskörper gebrochen, bevor sie gebündelt auf die lichtempfindliche *Netzhaut* (Retina) fallen (Abb. 3). Die *Fovea* ist eine kleine Stelle der Netzhaut, an der die grösste Rezeptordichte vorhanden ist. Sie ist der Ort des schärfsten Sehens. Wenn man ein Objekt fixiert, fällt sein Bild auf die Fovea.

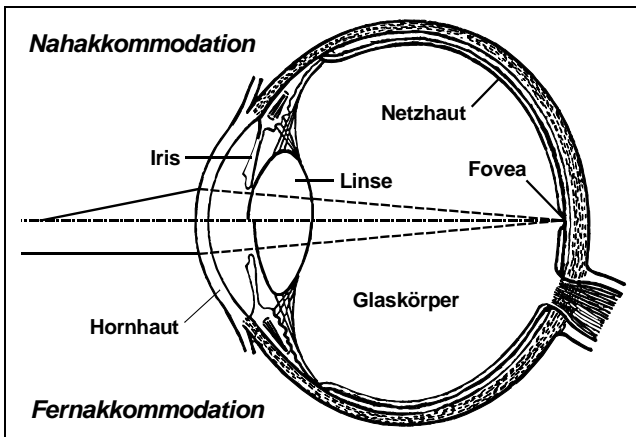


Abb. 3: Aufbau des Auges und Strahlengang für Akkommodation in die Nähe (oben) und in die Ferne (unten).

Akkommodation

Um trotz wechselnder Objektentfernung stets ein scharfes Bild zu erhalten, muss das optische System Auge seine Brechkraft verändern können. Diesen Vorgang nennt man *Akkommodation*. Sie erfolgt durch die Änderung der Linsendicke: Bei flacher Linse ist die Brennweite gross (Fernsicht), bei stark gewölbter Linse ist die Brennweite klein (Nahsicht) vgl. Abb. 3. Den am fernsten zu fokussierenden Punkt nennt man *Fernpunkt*, den nahsten *Nahpunkt*. Idealerweise befindet sich der Fernpunkt in unendlicher Distanz ($=0$ dpt). Ohne Fixationsobjekt wird die *Akkommodationsruhelage* eingenommen. Sie ist die am wenigsten beanspruchende Akkommodationseinstellung und befindet sich – mit starken individuellen Unterschieden – in 50 bis 100 cm Sehdistanz (1 bis 2 dpt). Je unschärfer Sehobjekte sind desto mehr driftet die Akkommodation in ihre Ruhelage.

Abhängigkeit der Sehschärfe vom Akkommodationszustand

Ein der Sehentfernung angepasster Akkommodationszustand ist Voraussetzung für eine scharfe Abbildung des Sehobjekts

auf der Netzhaut. Jede Abweichung führt zur Unschärfe (Abb. 4).

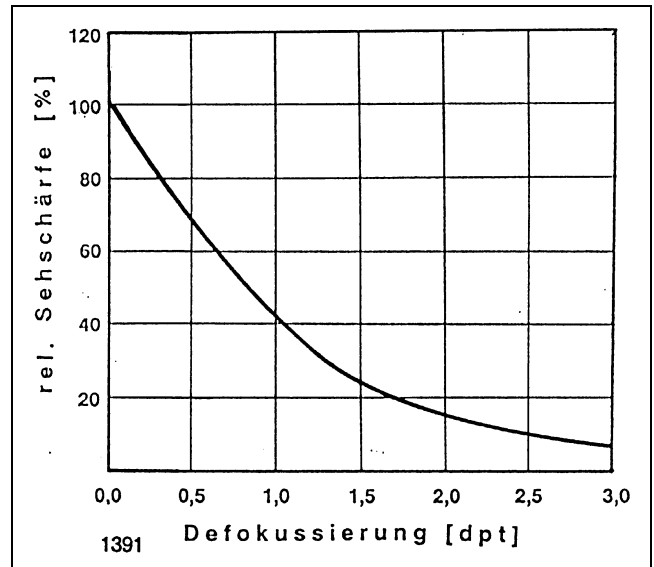


Abb. 4: Sehschärfe und Defokussierung

Pupille und Schärfentiefe

Die Iris dient als Lochblende (Loch = *Pupille*). Sie schirmt das Auge vor zu intensiver Lichteinstrahlung ab, wobei sie sich neuronal dem Lichteinfall anpasst: Bei starker Beleuchtung formt sie eine kleine, bei geringer eine grosse Pupille. Eine kleine Pupille vermindert den Abbildungsfehler, der durch sphärische Aberration zustandekommt (\rightarrow natürliche Abbildungsfehler).

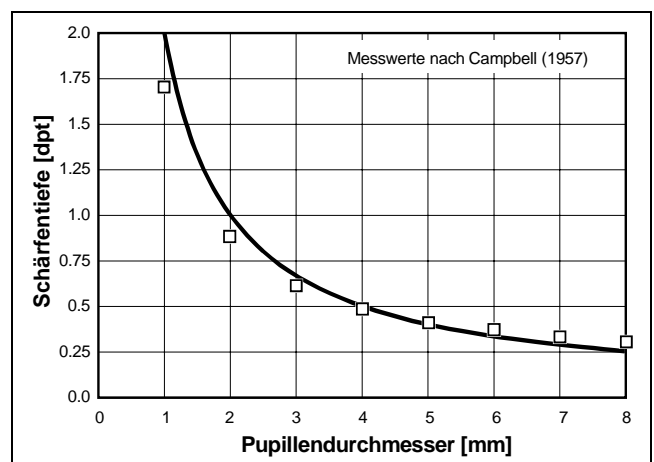


Abb. 5: Schärfentiefe in Abhängigkeit des Pupillendurchmessers.

Gleichzeitig erhöht sie mit abnehmendem Durchmesser die *Schärfentiefe*. Unter Schärfentiefe versteht man die Grösse des Bereichs vor und hinter der Fixationsdistanz in welchem Objekte noch scharf gesehen werden (Abb. 5).

Natürliche Abbildungsfehler

Das optische System Auge vermittelt eine äusserst schlechte Abbildung der Umwelt auf die Netzhaut. Dies gilt vor allem für den Netzhautbereich ausserhalb der Fovea. Die wichtigsten Ursachen für die natürlichen Abbildungsfehler sind:

- *Sphärische Aberration*: Wie bei allen einfachen optischen Linsen werden Strahlen am Rand der Linse vergleichsweise zu stark gebrochen.
- *Chromatische Aberration*: Kurzwelliges Licht (z.B. Blau) wird stärker gebrochen als langwelliges (z.B. Rot). Akkommodiert man daher z.B. auf rote Linien eines mehrfarbigen Sehobjekts, so erscheinen dessen blaue Linien unscharf und umgekehrt. Der maximale chromatische Fehler beträgt 1,0-1,5 dpt (Abb. 6).
- Trübungen der Augenoptik (→ physiologische Blendung)

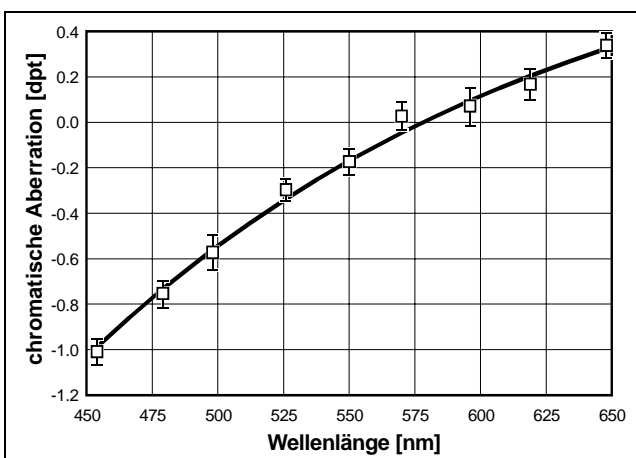


Abb. 6: Chromatische Aberration: Änderung der Brennweite mit der Wellenlänge.

Das Gehirn gleicht die meisten dieser Abbildungsmängel durch die zentrale Informationsverarbeitung aus. Diese Eigenschaft nennt man "Konstanz der Wahrnehmung".

Individuelle Abbildungsfehler

Kann ein Gegenstand vom dioptrischen Apparat nur unscharf auf der Retina abgebildet werden, so liegt Fehlsichtigkeit vor. Zusätzlich können noch krankhafte Beeinträchtigungen des Sehapparates auftreten wie z.B. die Trübung der Linse (Katarakt, grauer Star). Man unterscheidet:

- *Kurzsichtigkeit* (Myopie): Sie kommt durch einen zu langen Augapfel zustande, d.h. die Netzhaut liegt hinter dem Brennpunkt (Abb. 7 oben). Der Fernpunkt ist nicht im Unendlichen; die Sicht in die Ferne ist unscharf.
- *Weitsichtigkeit* (Hyperopie) entsteht durch einen zu kurzen Augapfel (Abb. 7 unten). Weitsichtige Personen können den Fernpunkt ins Unendliche bringen auch wenn sie mit einer Brille kurzsichtiger gemacht werden. Die Sicht in die Nähe ist mit früherem Alter beeinträchtigt, als bei Normalsichtigen.
- *Astigmatismus* (zylindrische Fehlsichtigkeit, Stabsichtigkeit): Die Hornhaut des Auges ist radialsymmetrisch nicht gleichmässig gekrümmt. Dadurch werden z.B. waagerechte Striche scharf, gleichzeitig aber senkrechte unscharf auf der Netzhaut abgebildet. Punkte erscheinen je nach Hauptachse der asymmetrischen Krümmung als waagerechte, senkrechte oder schräge Striche.
- *Alterssichtigkeit* (Presbyopie): Sie wird durch die Alterung der Augenlinse verursacht: Die Linse wird mit zunehmendem Alter unelastischer, wodurch sie sich bei

kurzen Sehdistanzen (z.B. beim Lesen) nicht mehr genügend wölben kann, so dass das scharfe Bild hinter die Netzhaut projiziert wird (Abb. 8). Auch die Akkommodationsgeschwindigkeit nimmt mit dem Alter ab.

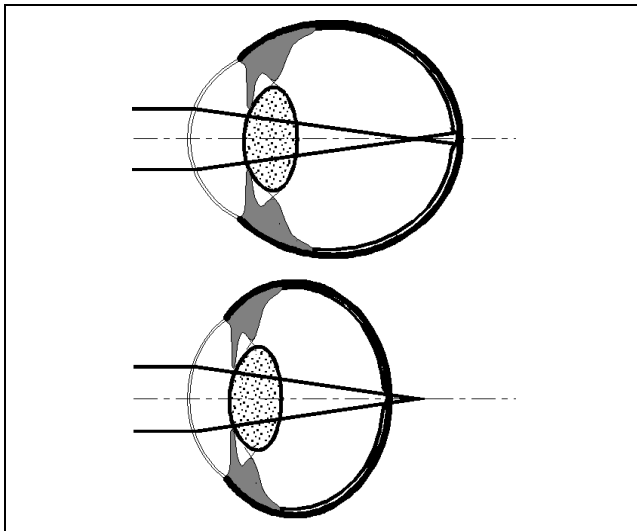


Abb. 7: Oben: Kurzsichtigkeit; Unten: Weitsichtigkeit (stark übertrieben).

kommodationsbreite durch die Alterssichtigkeit geringer. Zum anderen fallen im Laufe des Lebens Rezeptoren der Netzhaut aus, wodurch die Rezeptorendichte und mit ihr die Sehschärfe abnimmt. Ausserdem nehmen die Trübungen des dioptrischen Apparates im Alter zu.

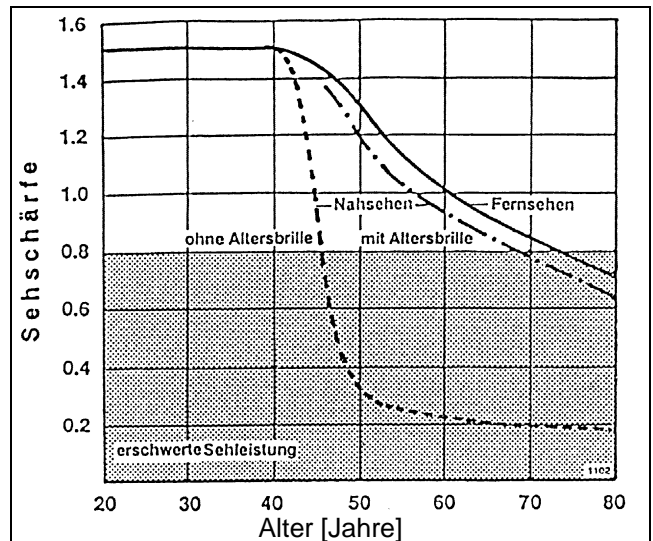


Abb. 9: Abnahme der Sehschärfe mit dem Alter mit und ohne Brillenkorrekturen. Das Nahsehen wird ohne Altersbrille nach dem 45. Lebensjahr zunehmend schlechter. Mit einer Sehschärfe unter 0,8 (punktierter Bereich) ist das Sehen erschwert.

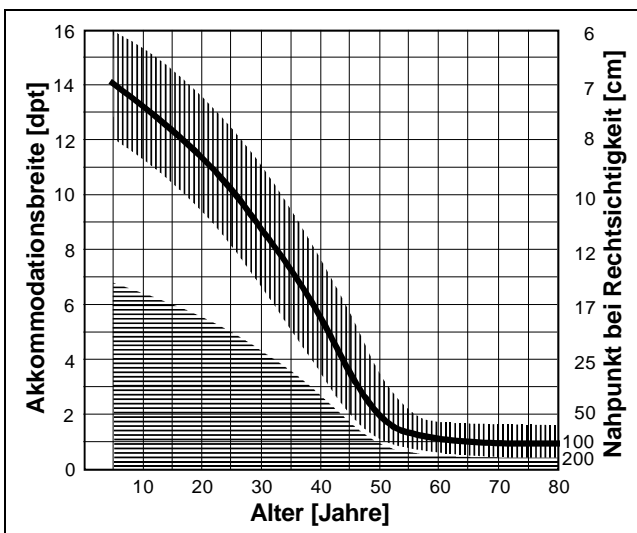


Abb. 8: Einfluss des Alters auf die Akkommodationsbreite. Die Kurve repräsentiert Mittelwerte. Individuelle Streuung: Senkrecht strichlierter Bereich; ohne Überanstrengung einsetzbar: Waagrecht strichliert.

Abhängigkeit der Sehschärfe vom Alter

Die Sehschärfe nimmt mit zunehmendem Alter ab (Abb. 9): Zum einen wird die Ak-

Die Wirkung dieser nachteiligen Faktoren, wird durch die Abnahme des durchschnittlichen Pupillendurchmessers mit zunehmendem Alter und der damit zunehmenden Schärfentiefe etwas abgeschwächt.

Praxisbezug

Zeichenschärfe und Sehdistanz

Zeichen auf BS weisen in der Regel eine erkennbare Unschärfe auf; für Farb-BS mehr als für monochrome. Bei Zeichendetails von 3-5' ist Unschärfe zusätzlich mit einer Abnahme des Zeichenkontrasts verbunden (→ Innerer Kontrast). Unscharfe Zeichen geben der Akkommodation einen

geringeren Anreiz, wodurch eine zusätzliche Unschärfe durch Defokussierung entsteht. Dies ist nur dann nicht der Fall, wenn sich der BS in der Distanz der Akkommodationsruhelage befindet. Diese Distanz ist daher und wegen der reduzierten akkommodativen Beanspruchung anzustreben.

Korrekturmöglichkeiten bei Fehlsichtigkeit

Man korrigiert Kurzsichtigkeit mit Zerstreuungslinsen, Weitsichtigkeit mit Sammellinsen und Astigmatismus mit Zylindergläsern (Brechkraft des Glases nicht rotationssymmetrisch). Treten Kurz- oder Weitsichtigkeit gemeinsam mit Astigmatismus auf, so werden kombinierte Gläser benötigt (z.B. Sammellinse mit eingeschlifftenem Zylinderglas).

Bei Kurzsichtigkeit gibt man für die Korrektur (in dpt) den Fernpunkt an. Hat eine kurzsichtige Person z.B. eine Korrektur von -3 dpt (Minus für Zerstreuungslinse), so sieht sie ohne Sehhilfe nur noch bis zu 0.33 m Sehdistanz scharf. Bei Weitsichtigkeit holt man der Fernpunkt durch eine Linse näher heran. Dabei wird gleichzeitig der Nahpunkt näher zum Auge verschoben.

Harte und weiche Kontaktlinsen können eine Brille ersetzen, allerdings mit einer Ausnahme: Da sich weiche Kontaktlinsen der Hornhautwölbung anpassen, können diese (im Gegensatz zu harten Kontaktlinsen) nicht zur Korrektur des Astigmatismus verwendet werden. Kontaktlinsen haben im Vergleich zu Brillen den Vorteil, keine Änderungen der Bildgrösse zu bewirken.

Alterssichtigkeit korrigiert man mit Sammellinsen. Das Problem liegt darin, dass vor allem bei fortgeschrittenerer Alterssichtigkeit für jede Sehdistanz eine andere Brillen-

lenstärke benötigt wird. Aus diesem Grund wurden mehrere Arten von Brillengläsern entwickelt (Abb 10):

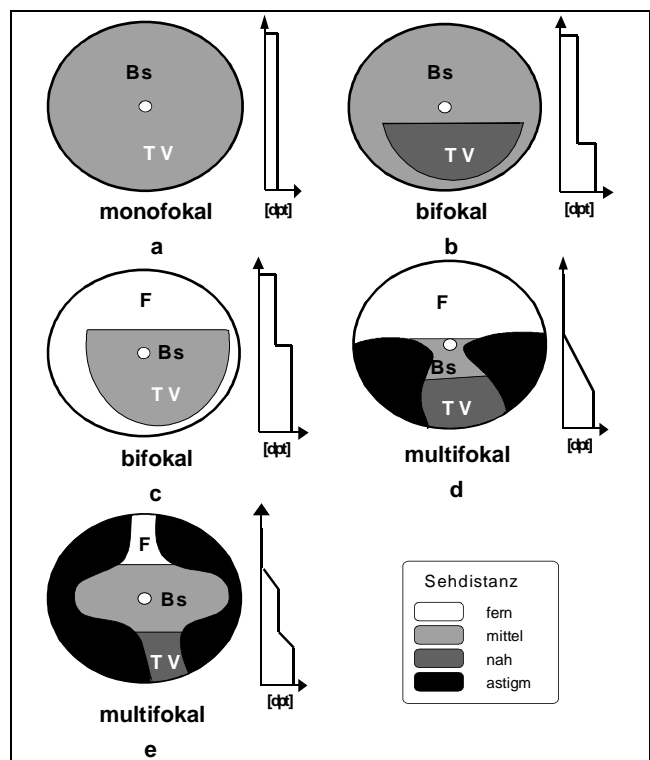


Abb. 10: Brillenkonzepte für den BS-Arbeitsplatz mit Blick auf Tastatur (T), Vorlage (V), Bildschirm (Bs) und in die Ferne (F). Schwarz: nicht nutzbar. Bifokalglas c und Multifokalglas e speziell für BS-Arbeit geeignet.

- Das monofokale Glas ist eine Sammellinse mit einheitlicher Brechkraft. Dieses Glas ist bei kleiner Dioptrienzahl sinnvoll.
- Das bifokale Glas hat zwei Bereiche unterschiedlicher Brechkraft: einen für die Nahsicht (unterer Bereich des Glases) und einen für die Fernsicht. Während der Bereich für die Nahsicht die Alterssichtigkeit mit einer Sammellinse korrigiert, ermöglicht der obere Teil des Glases eine gute Fernsicht (Glasteil mit Korrektur bei Kurz- oder Weitsichtigkeit oder ohne Korrektur bei Normalsichtigkeit).
- Multifokale Gläser (*Gleitsichtgläser*) umgehen das Problem, dass bei Bifokalgläsern ein störender Sprung der Bildgrösse

in der Mitte des Gesichtsfeldes stattfindet, indem ein gleitender Übergang vom Fern- zum Nahteil stattfindet. Die Nachteile dieser Gläser sind eine bewegte Umwelt bei Kopfbewegungen und ein reduzierter nutzbarer Bereich. Wenn der Bereich für Nahsehen (z.B. Lesen) schmal ist, werden belastende Kopfbewegungen statt Augenbewegungen durchgeführt.

Empfehlungen

- Um Tiefeneffekte durch chromatische Aberration zu vermeiden sind keine spektral extremen Farben als Zeichen und Hintergrund zu verwenden (z.B. blaue Zeichen auf rotem Grund).
- Auf eine gute Zeichenschärfe und damit gute Akkommodationsreize ist zu achten. Als Referenz dienen gedruckte Texte auf Papier.
- Für geringen Akkommodationsaufwand ist eine BS-Distanz von optimal 50 cm oder mehr (minimal 40 cm) einzuhalten.
- Ausreichende, aber nicht blendende oder spiegelnde Raumbelichtung verkleinert die Pupille, vergrössert somit die Schärfentiefe und beansprucht daher die Akkommodation weniger.
- Sehfehler wie Fehlsichtigkeit oder Astigmatismus sind mit Brillen oder Kontaktlinsen zu korrigieren.
- Für ältere Personen ist für die Arbeitsmittel (BS, Tastatur, Vorlage etc.) gleiche Sehentfernung erforderlich. Sie sollen eine dem BS-Arbeitsplatz angepasste Brille tragen. Insbesondere soll die Sehentfernung weiterhin 50 cm oder noch besser 60-70 cm betragen.

Netzhaut und Sehschärfe

Sehprozess

Aufbau der Netzhaut

Die Netzhaut (Retina) wird aus mehreren Zellschichten aufgebaut: Ausser den lichtempfindlichen Rezeptoren sind noch lichtunempfindliche Schichten aus Horizontalzellen, Bipolarzellen, Amakrinzellen und *Ganglienzellen* vorhanden.

Zapfen und Stäbchen

Es gibt zwei Arten von Rezeptorzellen: die *Zapfen* und die *Stäbchen*. Die Stäbchen können keine Farbe übermitteln, sind aber sehr lichtempfindlich. Sie sind für das Dämmerungssehen (skotopisches Sehen) verantwortlich. Bei grösserer Lichtintensität (Tagsehen, photopisches Sehen) werden sie übersättigt und tragen nicht mehr zum Sehvorgang bei. Die Stäbchen sind beim Menschen nur ausserhalb der Fovea zu finden. Die Zapfen können Farbe übermitteln und sind für das Tagsehen geeignet, da sie erst auf grössere Lichtintensitäten ansprechen.

Informationsübertragung

Die Rezeptorzellen geben die optischen Signale in Form von elektrischen Impulsen über die synaptischen Endigungen an die Bipolar- und Horizontalzellen weiter, welche die eintreffenden Signale verarbeiten und an benachbarte und weiterführende Zellen weiterleiten. Die Signale der Bipolarzellen werden direkt oder über die Amkrinen an die Ganglienzellen weitergegeben. Dabei geschieht eine Umwandlung von einer Amplitudenmodulation (Depolarisierung) in eine Impulsmodulation (neuronale Entladungsrate). Die Fortsätze der Ganglienzel-

len (Nervenfasern) lagern sich zum Sehnerv (Nervus Opticus) zusammen. Dieser Strang aus Nervenfasern überträgt schliesslich die Information an das Gehirn. Der blinde Fleck ist die Stelle, an der die Netzhaut unterbrochen wird, da hier der Sehnerv seine Durchtrittsstelle hat.

Eine Rezeptorzelle gibt ihre Information somit nicht nur an eine Zelle, sondern an mehrere Horizontal- und Bipolarzelle und somit an mehrere Ganglienzellen weiter (Divergenz). Eine Ganglienzelle erhält die verarbeitete Information von mehreren Horizontal-, Bipolar- und Amakrinzellen und somit von mehreren Rezeptoren (Konvergenz). Die Fläche der Netzhaut von der die Ganglienzelle Information erhält heisst ihr *rezeptives Feld*.

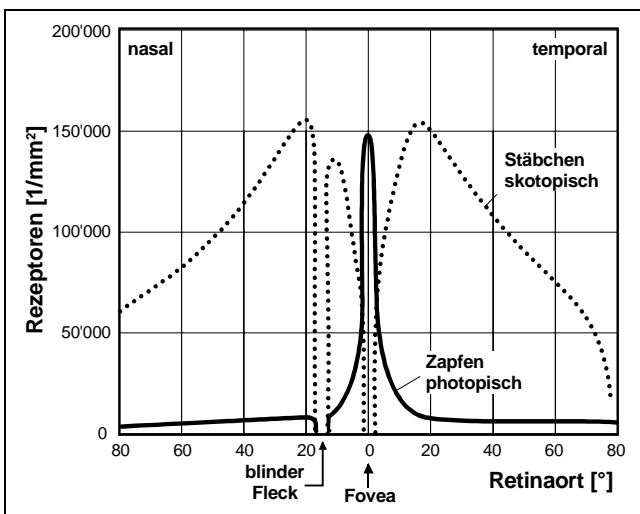


Abb. 11: Rezeptordichte in der Netzhaut.

Sehschärfe und Netzhautort

Die Sehschärfe hängt vom Netzhautort aus folgenden Gründen ab:

- Die Rezeptordichte ist unterschiedlich: In der Fovea sind die Rezeptoren am dichtesten gepackt (gute Sehschärfe), zur Peripherie der Netzhaut hin nimmt die

Anzahl Rezeptoren pro Fläche und damit die Sehschärfe ab (Abb. 11).

- Die rezeptiven Felder sind unterschiedlich gross: In der Fovea sind die Felder klein (gute Sehschärfe), zur Peripherie hin werden sie grösser (schlechtere Sehschärfe).

Beide Effekte führen dazu, dass ein fixierter Gegenstand zu sehen ist, da er auf der Fovea abgebildet wird. Je entfernter das Bild von der Fovea ist, desto unschärfer erscheint ein Gegenstand (Abb. 12).

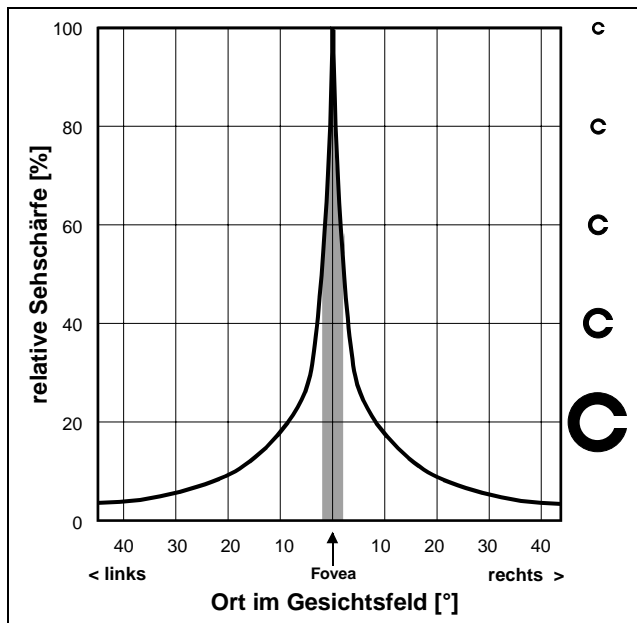


Abb. 12: Sehschärfe in Abhängigkeit von der Lage im Gesichtsfeld.

Praxisbezug

Zeichengrösse

Die Sehschärfe und ihre Verteilung im Gesichtsfeld ist für die Festlegung der Zeichengrösse ausschlaggebend. Sie muss ein flüssiges Lesen gewährleisten. Dies ist dann der Fall, wenn die Zeichen in einem weiteren Bereich von etwa 2° Sehwinkel (ca. 4-6 Buchstaben) trotz ev. reduzierter Sehschärfe sicher erkannt werden. In einem Umfeld von etwa 15 bis 20 Buchsta-

ben sollen einfache Formen gesehen werden können (Umriss eines Wortes). Die Zeichen dürfen für flüssiges Lesen weder zu klein noch zu gross sein, wie auch Experimente bestätigten (Abb. 13). Sind sie zu gross, kann ein Wort nicht mehr als ganzes erfasst werden (Buchstabieren).

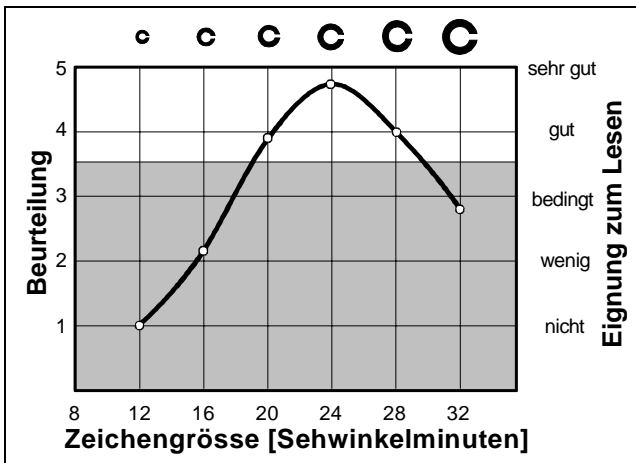


Abb. 13: Einfluss der Zeichengröße auf die Beurteilung der Lesbarkeit eines Textes. Grau: für Dauerleistung ungeeigneter Bereich.

Empfehlungen

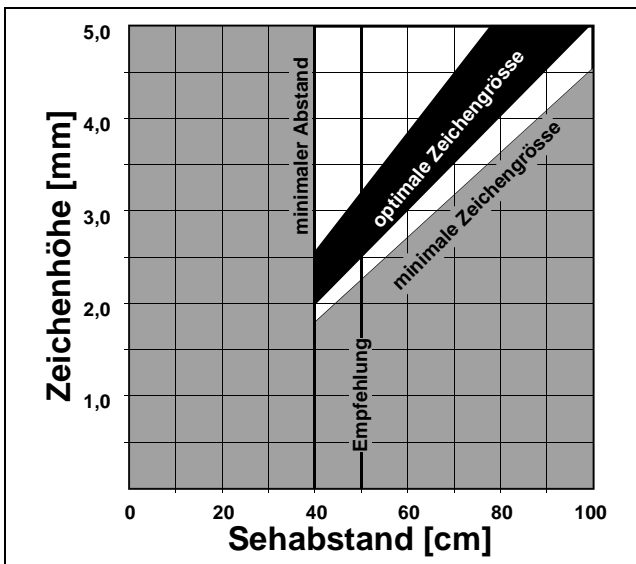


Abb. 13a: Empfohlene Zeichenhöhen in Abhängigkeit des Sehabstands.

Das differenzierte Auflösungsvermögen der Netzhaut und die Wahrnehmungsprozesse

beim Lesen erfordern Abmessungen auf dem BS gemäss Tab. 1 und Abb. 13a.

Tab. 1: Abmessungen für gute Lesbarkeit.

	Sehwinkel	Grösse (50 cm Distanz)
Zeichenhöhe	20- 22'	2,9-3,2 mm
Zeichenbreite	14- 20'	2,0-2,9 mm
Strichdicke	1,75-3,5'	0,25-0,5 mm
Zeichenzwischenraum	1,75-3,5'	0,25-0,5 mm
Wortzwischenraum	14- 20'	2,0-2,9 mm

Blickrichtung

Sehprozess

Konvergenz

Der Mensch besitzt zwei Augen, welche je ein eigens Bild auf der Netzhaut abbilden. Die Aufgabe der *Konvergenz* ist, durch Gegeneinanderbewegung der beiden Augen, die beiden Bilder in Übereinstimmung zu bringen, d.h., sie zu fusionieren. Konvergenz und Akkommodation sind neuronal miteinander gekoppelt: ein Sehobjekt in einer bestimmten Distanz kann sowohl als Akkommodationsreiz als auch als *Fusionsreiz* wirksam sein. Ist die Kopplung nicht übereinstimmend, liegt (unsichtbares) *latentes Schielen* vor. Der von der Akkommodation unkorrekt geforderte Konvergenzwert muss mit ständigen Fusionsanstrengungen korrigiert werden.

Praxisbezug

Zeilenabstand

Augenbewegungen erfordern ein exaktes Zusammenspiel der Achsen beider Augen. Dafür müssen dem Auge eindeutige Anhaltspunkte, d.h. grosse Objekte, angeboten werden. Bei unstrukturierten Texten mit einzeiligem oder noch geringerem Abstand, fehlen mehrheitlich solche Anhaltspunkte. Es fällt vielen Lesern schwer, vom Ende ei-

ner Zeile ausgehend, den Anfang der nächsten Zeile zu finden. Besonders schwierig wird die Blickführung, wenn ständig zwischen der BS-Oberfläche und einem Beleg gewechselt werden muss. Insbesondere Benutzer mit latentem Schielen haben mit Schwierigkeiten zu kämpfen.

Spiegelbilder im Bildschirm

Alle BS haben eine Oberfläche aus optisch durchsichtigem Material, welche einen Teil des auftreffenden Lichtes reflektiert. Reflexe erschweren die Arbeit mit dem BS und werden deshalb von den Benutzern durch geeignete und ungeeignete Massnahmen (Körperhaltung) beseitigt. Der Reflexschutz muss bereits bei der BS-Beschaffung berücksichtigt werden.

Störend an Spiegelbildern ist nicht nur das Verdecken des BS-Inhalts (→ Kontrastminderung), sondern dass sie auch Fusionsreize bilden welche sich hinter der Bildschirmenebene befinden. Da das Auge auf die Bildschirmoberfläche akkommodiert, entstehen neben dem störenden Fusionsreiz für die Konvergenz auch unterschiedliche Bilder auf den beiden Netzhäuten. Es resultiert ein *binokularer Wettstreit*.

Empfehlungen

- Der Zeilenabstand soll 3,5 bis 5% der Zeilenlänge betragen.
- Eine Blickrichtung zur Bildschirmmitte 15° unter die Horizontale wird als natürlich empfunden. Bildschirme sollen möglichst tief gestellt werden: der Blick zur Oberkante darf nicht über die Horizontale hinaus gehen.
- Um Spiegelungen durch Tages- oder Kunstlicht zu vermeiden, soll der BS zwi-

schen den Leuchtenreihen mit Blick parallel zum Fenster und zu den Leuchtenreihen angeordnet werden (→ Bildschirm und Fenster).

- Grundsätzlich sollte ein BS mit optischer Vergütung gewählt werden. Alle anderen Reflexschutzmassnahmen bedürfen einer speziellen Begründung. Moderne Flachbildschirme weisen zum Teil einen hervorragenden Reflexionsschutz auf.
- Spiegelungen im BS führen nicht zu binokularem Wettstreit, wenn ihre Leuchtdichte $L_S \leq 0,25(L_H + L_D)$ (positive Polarität) bzw. $L_S \leq 0,2L_H + 0,267L_D + 0,067L_V$ (negative Polarität) ist. Sie sind bei positiver Polarität weniger sichtbar. Es bedeuten: L_H = Leuchtdichte Hintergrund, L_V = Leuchtdichte Vordergrund, L_D = Leuchtdichte diffuse Reflexion (→ Diffuse Lichtstreuung am BS) und L_S = Leuchtdichte Spiegelbild.

Helligkeit

Lichtempfindlichkeit

Sehprozess

Weber-Fechner-Gesetz

Viele Sinnes- und Nervenzellen können Reizintensitäten von mehreren Zehnerpotenzen Intensitätsunterschied verarbeiten. Wie gross muss ein Reizunterschied sein, damit ihn das menschliche Auge gerade noch erkennt? Er hängt vor allem vom Absolutwert ab: Je höher die Lichtintensität ist, desto grösser muss der Helligkeitsunterschied sein, damit man zwei verschieden stark beleuchtete Flächen voneinander unterscheiden kann. Dieser Zusammenhang

heisst Gesetz von Weber. Unterstellt man, dass das Webersche Gesetz nicht nur für Unterschiedsschwellen, sondern generell anwendbar ist, kann es in das Gesetz von Fechner übergeführt werden: Die Wahrnehmungsintensität S ist dem Logarithmus der Leuchtdichte L proportional.

$$S = \text{konst}_1 \log(L) + \text{konst}_2$$

Dieses Gesetz ist allerdings nur im Bereich mittlerer Intensitäten gültig.

Potenzfunktion von Stevens

Eine ähnliche Beziehung gibt die Stevensche Potenzfunktion wieder. Hier hängt die Wahrnehmungsintensität (Lightness L^*) mit der 3. Wurzel der Leuchtdichte L zusammen (\rightarrow Farbraum):

$$L^* = 116(L/L_A)^{1/3} - 16$$

L_A ist die Leuchtdichte, auf welche das Auge adaptiert ist (\rightarrow Adaptation). Diese Funktion wird heute öfter verwendet als diejenige nach Fechner.

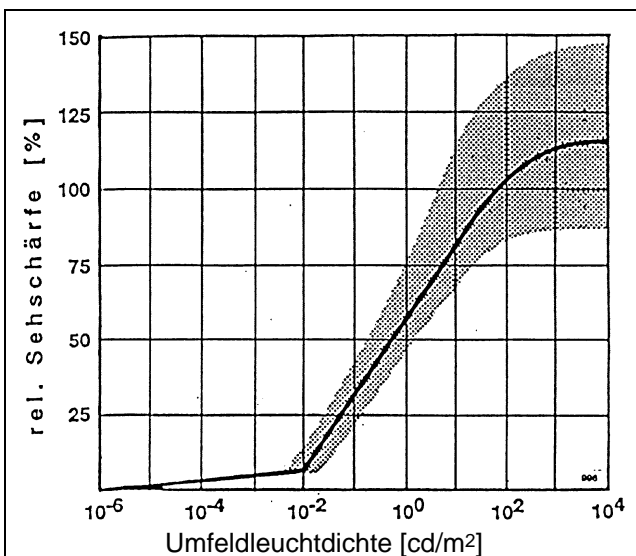


Abb. 14: Einfluss der Leuchtdichte auf die Sehschärfe für einen Kontrast $K''=0,95$ und Beobachter im Alter zwischen 25 und 50 Jahren. Gepunktet: Streubereich.

Sehschärfe und Leuchtdichte

Die Sehschärfe nimmt mit der Leuchtdichte zu (Abb. 14). Viel grössere, nicht dargestellte Intensitäten verursachen aber eine Blendung des Auges, womit die Sehschärfe wieder abnimmt. Erklärung: Mit abnehmender Helligkeit nimmt die Grösse der rezeptiven Felder zu, was zu geringeren Sehschärfen führt (\rightarrow Neuronale Adaptation).

Praxisbezug

Mittlere BS-Leuchtdichte

Die Leuchtdichte auf dem BS (Helligkeit des Zeichens bzw. des Hintergrunds) soll den Bedürfnissen des Benutzers und den Erfordernissen der allgemeinen Raumhelligkeit angepasst werden können. Dabei muss die Lichtreduktion eventuell vorgeschalteter Blendschutzfilter berücksichtigt werden. Die Anforderungen an die mittlere Leuchtdichte werden mit zunehmendem Alter unterschiedlich. Auch Sehbehinderte Personen haben unterschiedliche Bedürfnisse an die mittlere Leuchtdichte. Ist die Leuchtdichte zu gering, reduziert sich die Sehschärfe; ist sie zu gross entsteht Blendung. Es muss daher ein individuelles Optimum gefunden werden.

Empfehlungen

- Die BS-Leuchtdichte soll mindestens 35 cd/m^2 betragen. Optimale Sehschärfe wird mit $100\text{-}160 \text{ cd/m}^2$ erreicht.
- Ungleichmässigkeiten der Helligkeit wirken nicht störend, wenn sie über den BS $< 1,7 : 1$ und innerhalb eines Zeichens $< 1,5 : 1$ betragen.
- Sollen Helligkeitspaare unterschieden werden, müssen die Leuchtdichten sich um mehr als 50% unterscheiden.

- Mit positiver Polarität ist die Gleichmässigkeit leichter zu erreichen und Kanten sind deutlicher erkennbar.

Adaptation

Sehprozess

Chemische Adaptation

Das Auge muss sehr flexibel sein, will es sowohl die visuellen Informationen bei hellem Tageslicht als auch in der Dunkelheit aufnehmen und verarbeiten. Die Pupille kann die Menge des einfallenden Lichtes nur um den Faktor 16 verändern. Es reicht auch nicht aus, zwei verschiedene Rezeptorsysteme (Stäbchen- und Zapfensehen) zu haben, sondern die Rezeptoren müssen sich an die jeweilige Leuchtdichte anpassen d.h. adaptieren können. Dies erfolgt durch die Einstellung der Reizschwelle, indem sich in den Rezeptoren die Konzentration des Sehfärbstoffes (Sehpigmente) mit der Beleuchtungsstärke ändert.

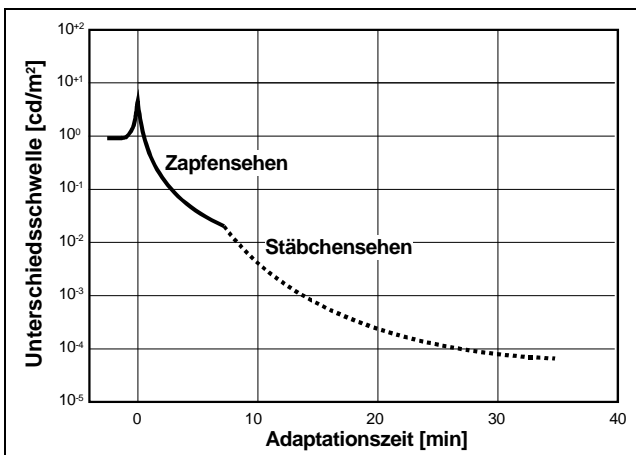


Abb. 15: Änderung der Schwellenreizstärke bei Dunkeladaptation. Auf der Ordinate ist die Leuchtdichte eines gerade wahrgenommenen Lichtreizes eingetragen.

Die chemische Adaptation dauert sehr lange, da die Sehpigmente nur sehr langsam regenerieren: Es dauert bei der Dun-

keladaptation (=Adaptation von hell nach dunkel) eine bis mehrere Minuten, bis man Gegenstände überhaupt erkennt und ca. 40 Minuten, bis die vollständige Adaptation eintritt (Abb. 15). Die Helladaptation hingegen braucht nur ca. 5 Sekunden.

Neuronale Adaptation

Die neuronale Verarbeitung des Bildes in der Netzhaut ermöglicht einen weiteren schnellen Adaptationsmechanismus: Der erregende Teil der Netzhautfläche, bzw. des rezeptiven Feldes einer Ganglienzelle, vergrössert sich mit zunehmender Dunkelheit. Der Nachteil dabei ist die geringere resultierende Sehschärfe (Abb. 14). Bei grosser Helligkeit ist der erregende Teil der rezeptiven Felder klein. Neben der besseren Sehschärfe wird so eine übermässige Reizung der Ganglienzellen verhindert.

Abhängigkeit der Sehschärfe vom Adaptationszustand

Im adaptierten Zustand sieht man schärfer als im nicht adaptierten. Wechselt man von einem hellen Raum in einen dunklen, so sieht man nichts mehr mit den Zapfen, und die Stäbchen befinden sich noch im Sättigungszustand. Die Stäbchen erholen sich nacheinander, und je mehr Stäbchen in den "Arbeitszustand" übergegangen sind, desto deutlicher und schärfer wird das Objekt gesehen.

Wechselt man umgekehrt von einem dunklen in einen hellen Raum, so werden sowohl die Stäbchen als auch die Zapfen zunächst übersteuert (wenn alle Rezeptoren reagieren, wird kein differenziertes Bild gesehen). Haben sich die Zapfen an die Grundhelligkeit angepasst, so reagieren sie

je nach individueller Reizintensität, so dass ein differenziertes Bild erscheint.

Praxisbezug

Bildschirm und Fenster

BS können nicht in beliebiger Anordnung im Raum aufgestellt werden. So sollen im Gesichtsfeld keine grossen Leuchtdichteunterschiede bestehen. Steht beispielsweise der BS mit Blick zum Fenster, adaptiert das Auge auf die helle Fläche des Himmels. Dadurch wird die Sehfähigkeit auf dem dunkleren BS eingeschränkt. Besser ist eine Blickrichtung parallel zum Fenster.

Polarität

Vergleichende Untersuchungen mit positiver und negativer Polarität haben gezeigt, dass die Sehschärfe für Zeichen positiver Polarität besser ist (Abb. 17). Leistungstests (Lesen) ergaben jedoch keine eindeutigen Unterschiede. Für positive Polarität sprechen:

- Das Auge ist helladaptiert
- Reflexe auf dem BS sind weniger auffällig
- Beim Wechsel zwischen Papier und BS bleibt die Polarität erhalten
- Die Akzeptanz ist grösser

Dagegen sprechen die höhere Flimmeranfälligkeit (→ Flimmern) und geometrische Instabilitäten bei qualitativ schlechten BS.

Empfehlungen

- Zwischen BS und Umgebung (z.B. Papiervorlage, Fenster) soll das Leuchtdichteverhältnis $< 10 : 1$ betragen.
- Der BS soll nicht mit Blick zum Fenster aufgestellt werden.

- Positive Polarität ist zu bevorzugen; die Verwendung negativer Polarität bedarf einer besonderen Begründung.

Kontrast

Kontrastverstärkung

Sehprozess

Infeld-Umfeld-Antagonismus rezeptiver Felder

Die vielfältigen Verknüpfungen in der Netzhaut bilden die Voraussetzung für die rezeptiven Felder retinaler Ganglienzellen. Die rezeptiven Felder mehrerer Ganglienzellen können sich gegenseitig überlappen und sind verschieden gross: In der Fovea sind die Felder sehr klein, zur Peripherie hin werden sie immer grösser.

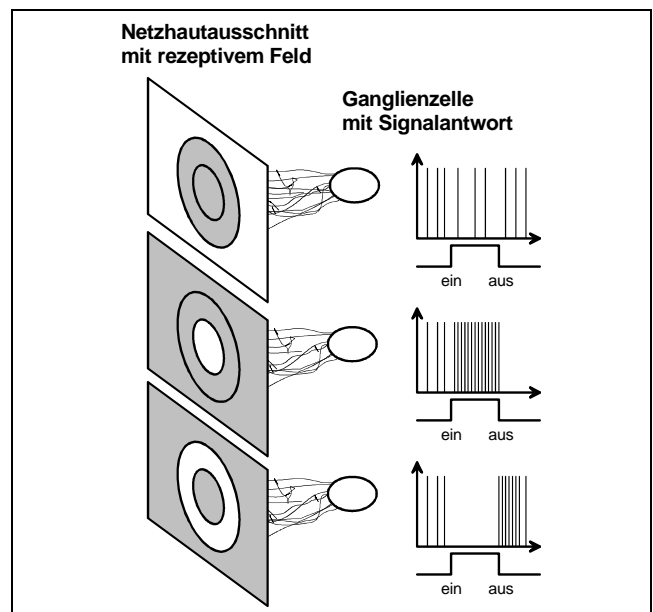


Abb. 16: Zellantwort einer On-Off-Ganglienzelle auf unterschiedliche Beleuchtungen ihres rezeptiven Feldes.

Die Wirkung der Rezeptoren im rezeptiven Feld einer Ganglienzelle ist unterschiedlich: So kann Licht im Zentrum des Feldes erre-

gend, im Umfeld jedoch hemmend auf die neuronale Entladungsrate der Ganglienzelle wirken (Abb. 16). Bei anderen Ganglienzellen kann es gerade umgekehrt sein.

Diese Struktur der rezeptiven Felder ist die Voraussetzung für die simultane Kontrastverstärkung. Darunter versteht man folgendes Phänomen: Betrachtet man eine Figur, so wird keine absolute Helligkeit, sondern Helligkeit in Abhängigkeit von Kanten gesehen. Die Intensität der Kanten von kontrastierenden Flächen wird dabei verstärkt (die hellere Fläche wird an der Kante noch heller gesehen, die dunkle Fläche an der Kante noch dunkler).

Abhängigkeit der Sehschärfe vom Kontrast

Wie die Wirkungsweise der rezeptiven Felder zeigt, ist das Sehsystem darauf spezialisiert, Kontraste und nicht einfache Helligkeiten wahrzunehmen. Gute Kontraste steigern die Sehfähigkeit und mithin auch die Sehschärfe (Abb. 17).

Praxisbezug

Äusserer Kontrast

Die Erkennbarkeit hängt vom Kontrast zwischen Zeichen und Hintergrund ab. Bei sehr kleinen Kontrasten ($< 3 : 1$) ist die Wahrnehmung nicht nur bezüglich der Fehlerrate gestört, sondern es sinkt auch die Arbeitsgeschwindigkeit. Sehr helle Zeichen auf dunklem Grund blenden und sind daher störend.

Innere Kontrast

Neben dem äusseren Kontrast ist auch der sogenannte innere Kontrast für die Zeichenerkennung wichtig. Er beschreibt den Unterschied der Leuchtdichte im Zwischen-

raum zweier benachbarter Zeichen und deren maximaler Leuchtdichte (Abb 18). Ist er zu gering, verschwimmen die beiden Zeichen ineinander und sind schwer erkennbar. Der innere Kontrast erreicht bei einer für den jeweiligen BS charakteristischen mittleren Leuchtdichte ein Maximum. Häufig ist das Optimum erreicht, wenn der äussere Kontrast zwischen $6 : 1$ und $10 : 1$ liegt.

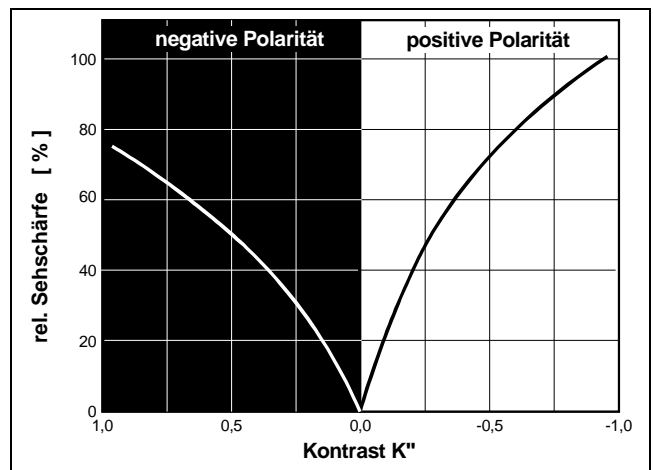


Abb. 17: Abhängigkeit der Sehschärfe vom Kontrast bei positiver und negativer Polarität.

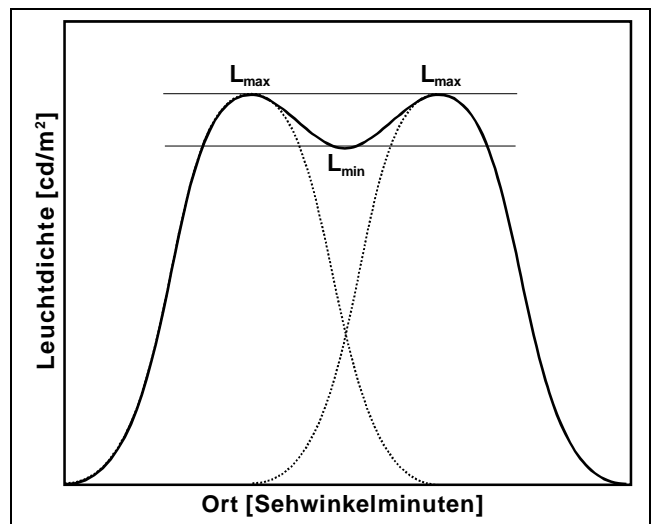


Abb. 18: Horizontaler Verlauf der Leuchtdichte zweier benachbarter II. Der innere Kontrast beträgt $K = L_{\min} / L_{\max}$.

Empfehlungen

- Optimal ist ein Zeichenkontrast zwischen 6 : 1 und 10 : 1. Er sollte nicht kleiner als 3 : 1 und nicht grösser als 20 : 1 sein.
- Die Leuchtdichte zwischen zwei Pixeln soll mindestens $\frac{2}{3}$ der Pixelleuchtdichte betragen, damit ein Zeichen als Einheit erscheint. Dies hängt auch von den Monitoreinstellungen ab.

Kontrastminderung

Sehprozess

Physiologische Blendung

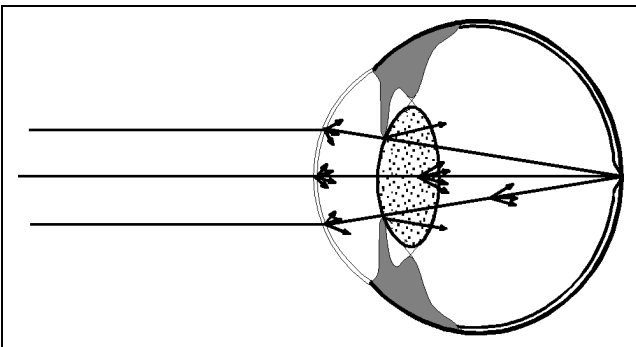


Abb. 19: Streuzentren in der Augenoptik

Die Augenlinse ist aus Proteinlamellen aufgebaut. Kleine Unregelmässigkeiten im Aufbau bewirken eine Streuung des Lichtes, die sich bei starkem Lichteinfall bemerkbar macht (Abb. 19). Denselben Effekt bewirken kolloidal gelöste Makromoleküle, die sich im Glaskörper befinden. Das Streulicht überlagert sich dem Netzhautbild, man spricht von physiologischer Blendung. Die Trübungen des dioptrischen Apparates nehmen durch Einwanderung von roten Blutkörperchen (=Erythrozyten) und die Anzahl der Streuzentren im Alter zu.

Praxisbezug

Diffuse Lichtstreuung am Bildschirm

Neben den bereits erwähnten Spiegelungen im BS findet hinter der Glasfront in der Pixelebene eine diffuse Lichtstreuung statt. Bei aufgerauhter Glasoberfläche kommt dort eine weitere diffuse Lichtstreuung hinzu. Dieses Licht vergrössert sowohl die Zeichen- als auch die Hintergrundleuchtdichte. Bei negativer Polarität wird daher aus einem Kontrast $[L_Z / L_U]$ ein kleinerer Kontrast $[(L_Z + L_S) / (L_U + L_S)]$. Man spricht von Kontrastminderung; das Streulicht mit Leuchtdichte L_S heisst auch Schleierleuchtdichte. Analoges gilt für positive Polarität. Spiegelung im BS bewirkt ebenfalls Kontrastminderung, ist aber nicht über den ganzen BS verteilt, wie die diffuse Lichtstreuung. Beide Reflexionsarten können mit Hilfe einer Taschenlampe grob beurteilt werden.

Empfehlungen

- Mit negativer Polarität scheinen Zeichen grösser; sie ist für Sehbehinderte oft von Vorteil, da im Auge weniger Streulicht und damit weniger physiologische Blendung entsteht. Dies könnte fallweise auch für ältere Personen zutreffen.
- Grundsätzlich sollte ein BS mit optischer Vergütung gewählt werden. Alle anderen Reflexschutzmassnahmen bedürfen einer speziellen Begründung. Moderne Flachbildschirme weisen zum Teil einen hervorragenden Reflexionsschutz auf.
- Nach Möglichkeit soll ein BS so aufgestellt werden, dass kein direktes Licht, insbesondere kein Tageslicht auf ihn fällt.

Farbe

Farbraum

Sehprozess

Drei Farbrezeptoren (Theorie von Young und Helmholtz)

Der Mensch kann (v.a. bei direktem Farbvergleich) viele Farben unterscheiden. Es stellt sich die Frage, mit wievielen verschiedenen Rezeptorarten der Mensch auskommt, um diese Anzahl von Farbabstufungen unterscheiden zu können.

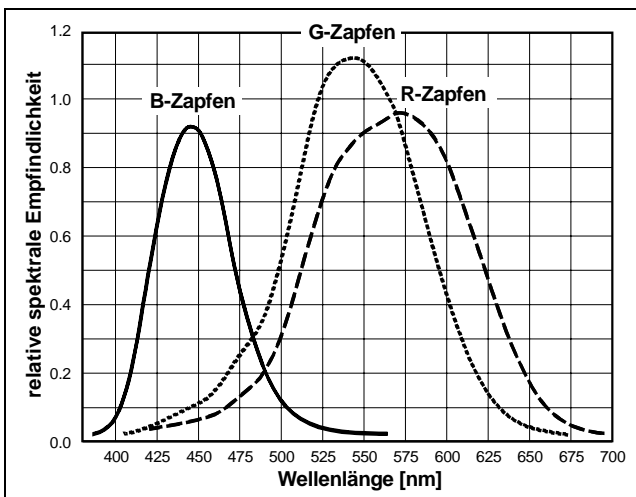


Abb. 20: Lichtabsorption der drei Zapfentypen.

Wie T. Young 1802 vermutete und H. v. Helmholtz 1866 aufgrund psychophysischer Experimente voraussagte, findet man in der Netzhaut drei Farbrezeptoren, die Licht über einen begrenzten Wellenlängenbereich absorbieren (Abb. 20):

- Rot-empfindliche Zapfen (Absorptionsmaximum: 570 nm, Absorptionsbereich: ca. 430-720 nm),
- Grün-empfindliche Zapfen (Max.: 535 nm, Bereich: ca. 400-630 nm),
- Blau-empfindliche Zapfen (Max.: 445 nm, Bereich: ca. 380-530 nm).

Im Vergleich dazu absorbieren die Stäbchen im gesamten Wellenlängenbereich des sichtbaren Spektrums (Absorptionsmaximum: 505 nm, Absorptionsbereich: ca. 380-650 nm, siehe $V'(\lambda)$ in Abb. 2):

Farbtafel, Farbkoordinaten, Farbdreieck

Durch die Tatsache, dass drei Rezeptortypen für die Farbwahrnehmung zuständig sind, wird die Vielfalt der Lichtspektren reduziert: Jede Farbe lässt sich in einem 3-dimensionalen Raum darstellen, dem sogenannten *Farbraum*. Es gibt verschiedene mathematische Systeme, die diesen Farbraum mit *Farbkoordinaten* beschreiben. Oft wird eine der drei Koordinaten als die Helligkeit (Leuchtdichte) definiert und die anderen beiden beschreiben eine 2-dimensionale *Farbtafel* mit Farbton (z.B. Grün, Rot) und Sättigung (z.B. Rot, Rosa). Sichtbare Farben sind in der Farbtafel im sogenannten „Farbdreieck“ angeordnet (Abb. 21).

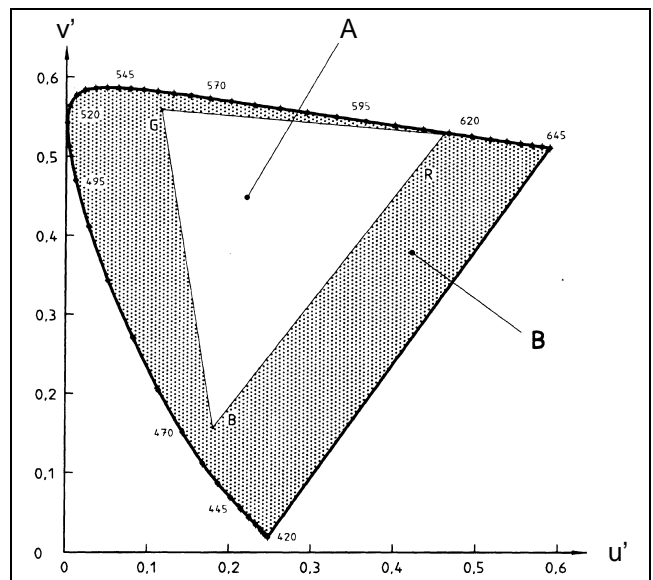


Abb. 21: CIE 1976 $u'v'$ -Normfarbtafel mit Dreieck der am BS darstellbaren Farben (A) und Farbdreieck der sichtbaren Farben (B).

Aus dem Farbdreieck kann man ablesen, welcher Farbton entsteht, wenn man zwei

oder mehr Wellenlängen mischt. Die Werte am Kurvenzug entsprechen den Wellenlängen von Farben, welche nur aus dieser einen Wellenlänge bestehen (= monochromatische Farben). Ist ein Gemisch von zwei Wellenlängen vorhanden, so verbindet man die beiden durch eine Gerade. Der Farbeindruck liegt auf dieser Geraden. Der genaue Wert hängt von den Intensitäten der beiden Wellenlängen ab (Gewichtung).

Farbfehlsichtigkeit

Ist im Auge ein Rezeptortyp spektral abnormal empfindlich oder fehlt er, so spricht man von Farbsehschwäche (Farbanomalie) bzw. von Farbenblindheit (Farbanopie). Bei der Farbfehlsichtigkeit unterscheidet man zwischen dem Mangel an:

- rot-empfindlichen Rezeptor (protanomal, protanop),
- grün-empfindlichen Rezeptor (deutanomal, deutanop),
- blau-empfindlichen Rezeptor (tritanomal, tritanop) sehr selten.

Von den ersten beiden Typen sind ca. 8% der männlichen Bevölkerung betroffen. Sie können zwischen rot, gelb und grün schlecht oder gar nicht unterscheiden. Die zentrale Fovea ist auch bei farbtüchtigen Personen ohne Blaurezeptoren.

Praxisbezug

Metamerie

Verschiedene Spektren von Lichtquellen oder reflektierenden Gegenständen können zu ein und derselben empfundenen Farbe führen. Man spricht dann von bedingtgleichen oder metameren Farben. So gibt es z.B. bei monochromen bernsteinfarbigen BS Energiespektren mit nur einem Maxi-

mum bei einer Lichtwellenlänge von 580 nm, während dieselbe empfundene Farbe bei einem Farb-BS aus einem Energiespektrum mit drei Maxima bei Wellenlängen von 540 nm, 624 nm und 707 nm erzeugt werden kann.

Farbbildschirme

Farben werden sowohl bei monochromen als auch bei mehrfarbigen BS verwendet. Bei mehrfarbigen BS werden sie durch Mischung der Grundfarben Rot, Grün und Blau erzeugt. Das Spektrum der Grundfarben entspricht nicht den spektralen Empfindlichkeiten der Zapfen. Nicht das gesamte Farbdreieck kann am BS dargestellt werden (Abb. 21).

Mit den Koordinaten u' und v' der $u'v'$ -Farbtafel und der zugehörigen Leuchtdichte L können Farbdifferenzen Δ zwischen zwei Farben messtechnisch bestimmt werden (Abb. 22).

Empfehlungen

- Farbungleichmässigkeiten bei 15"- oder grösseren Bildschirmen werden nicht wahrgenommen, wenn $\Delta u'v' \leq 0,03$ ist.
- Sollen Farbpaare unterschieden werden, muss $\Delta E_{uv}^* > 20$ sein. Je nach Grösse und Abstand ist ein grösserer Farbunterschied erforderlich.
- Blau auf Schwarz soll nicht verwendet werden, da der Helligkeitskontrast zu gering ist und da der Farbton im Fixationspunkt nicht erkennbar ist.
- Um Farbfehlsichtige zu begünstigen, sind neben Farbtonunterschieden zusätzlich auch Helligkeitsunterschiede vorzusehen.

L, u', v' :	Leuchtdichte und Farbkoordinaten von untersuchter Farbe 1 oder 2	
L_n, u'_n, v'_n :	Leuchtdichte und Farbkoordinaten von Referenzweiss (Adaptationsfläche):	
Farbtemperatur	u'_n	v'_n
5600 K	0,206	0,478
6500 K	0,198	0,468
9300 K	0,181	0,454

$$\Delta u'v' = \sqrt{(\Delta u')^2 + (\Delta v')^2}$$

$$L^* = 116(L/L_n)^{1/3} - 16$$

$$u^* = 13L^*(u' - u'_n)$$

$$v^* = 13L^*(v' - v'_n)$$

$$\Delta E_{uv}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2}$$

Abb. 22: Berechnung der Farbdifferenzen aus der Leuchtdichte und den Farbkoordinaten u' und v' der zu vergleichenden Farben.

Farbsehstärke

Sehprozess

Abhängigkeit der Sehstärke von der Farbe

Dass die Sehstärke von der Farbe abhängt, hat mehrere Ursachen:

- Die Farben werden von der Linse unterschiedlich gebrochen und daher (bei mehrfarbigen Gegenständen) z.T. unscharf abgebildet (\leftarrow chromatische Aberration).
- Sieht man einen Gegenstand bei monochromatischem Licht, so sprechen nur die Rezeptortypen an, die diese Wellenlänge vorwiegend als Reiz verarbeiten können. Die Dichte der aktivierten Rezeptoren wird damit geringer und mit ihr die Sehstärke.
- Der Aufbau der rezeptiven Felder bedingt, dass die Sehstärke für reine Farbkontraste welche keine Leuchtdichtekontraste aufweisen, bis auf 30% (rot-grün oder blau-gelb) reduziert sein kann.

Andere Farbkombinationen reduzieren die Sehstärke noch stärker (z.B. gelb-weiss).

Praxisbezug

Farbkodierung

Die Vorteile von Farbe kommen vor allem beim Kodieren von graphischen Informationen zur Geltung. Ihr Einsatz ist sorgfältig zu planen. Reine Farbkontraste sind zugunsten von Hell-Dunkel-Kontrasten zu vermeiden.

Empfehlungen

- Sehobjekte in extremem Blau mit Sehwinkelgrösse $< 2^\circ$ können schlecht erkannt werden und sind zu vermeiden.
- Wenn eine genaue Farberkennung von isolierten Sehobjekten erforderlich ist, müssen diese mindestens $30'$, besser $45'$ Sehwinkel gross sein.

Farbverarbeitung

Sehprozess

Gegenfarbentheorie (Hering)

Die Wahrnehmung von Farbe unterliegt vielfältigen Einflüssen. Mit dem Einfluss der Feldgrösse auf die Farbsättigung, der Farbintensität auf den Farbton, der Farbkonstanz, der Farbumstimmung, den farbigen Nachbildern und dem farbigen Simultan-contrast seien nur einige genannt.

Hering postulierte 1878, dass es zum Farbsehen drei Zelltypen gibt: Einen für rot-grün Gegensätze, einen für blau-gelb Gegensätze und einen für hell-dunkel Gegensätze. Diese Theorie der Komplementärfarben widerspricht auf den ersten Blick derjenigen mit den drei Zapfentypen, die von

Helmholtz vertreten wurde. Die Heringsche Annahme wurde jedoch durch elektrophysiologische Versuche bestätigt, nämlich als Eigenschaft der retinalen Ganglienzellen. Diese weisen also mit ihren rezeptiven Feldern nicht nur aktivierend und hemmende Anteile auf, sondern auch Farbgegensätze. Mit dem Informationsverarbeitungsmodell nach Abb. 23 lassen sich die Heringsche und die Helmholtzsche Anschauung zusammenführen.

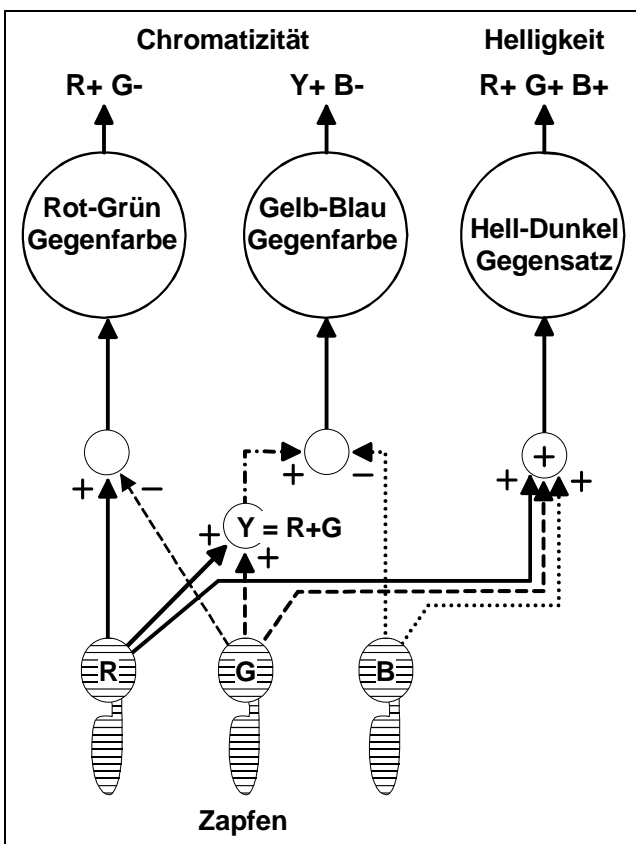


Abb. 23: Farbverarbeitung vom Rezeptor zur Ganglienzelle.

Praxisbezug

Farbkontraste

Farbige Zeichen sind auf farbigem Grund nur dann gut erkennbar, wenn ein ausreichender Leuchtdichtekontrast vorhanden ist. Bei ungeeigneter Wahl kann in ungünstigen Fällen an der Grenze beider Farben

die Mischfarbe auftreten, z.B. ein weisser Rand bei Blau auf Gelb. Bei kleinen Flächen kann sich die wahrgenommene Farbe in Richtung des Untergrunds verändern (Assimilation), bei grossen Flächen in Richtung der Komplementärfarbe des Untergrunds (Simultankontrast).

Farbe soll sparsam und für grössere Flächen eingesetzt werden. In der Farbbezeichnung ungeübte Personen können nicht mehr als sechs Farben sowie Unbunt (schwarz-grau-weiss) unterscheiden.

Empfehlungen

- Um Farben unterscheiden und identifizieren zu können, müssen sie auf achromatischem Hintergrund dargestellt werden.
- Ohne Vergleichsmöglichkeit können von farbtüchtigen Personen die sieben Farben Grün, Gelb, Rot, Türkis, Weiss, Blau und Violett unterschieden werden.

Zeitfaktoren

Flimmern

Sehprozess

Flimmerverschmelzungsfrequenz

Oberhalb der *Flimmerverschmelzungsfrequenz* (FVF) nimmt das Auge Oszillationen nicht mehr wahr. Es entsteht der Eindruck konstanter Helligkeit. Die FVF hat keinen festen Wert, sie kann grösser als 90 Hz sein. Einflussfaktoren sind:

- mittlere Leuchtdichte: Die FVF steigt mit zunehmender Leuchtdichte (Abb. 24).
- Oszillationsgrad der Leuchtdichte: Bei Frequenzen um 20 Hz können bereits

geringe Leuchtdichteschwankungen wahrgenommen werden (Abb. 25).

- Feldgrösse: Grosse flimmernde Felder bewirken eine höhere FVF als kleine (Abb. 25).
- Ort des flimmernden Felds: Die FVF ist im seitlichen Gesichtsfeld (Peripherie der Netzhaut) höher als im Fixationszentrum (Fovea).

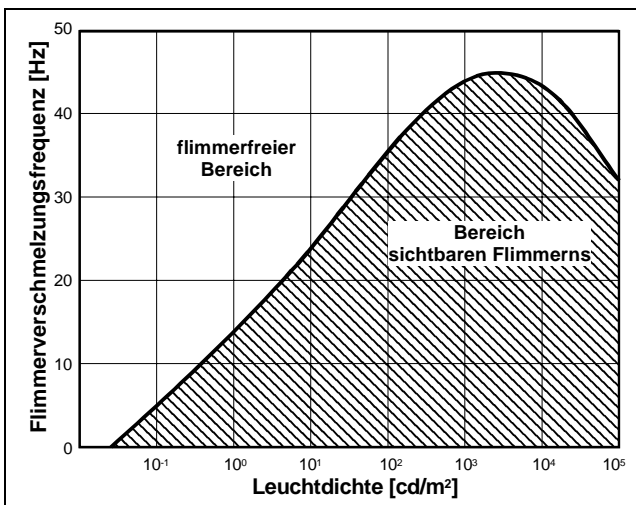


Abb. 24: Zunahme der FVF mit der Leuchtdichte für foveales Sehen.

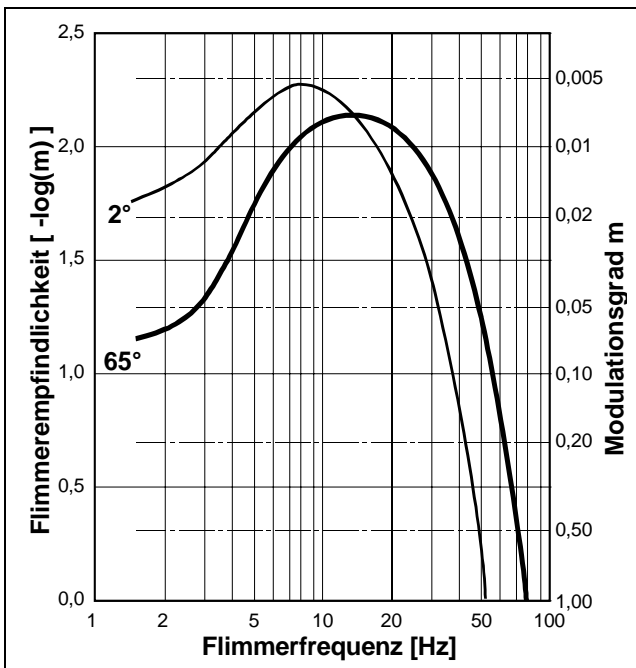


Abb. 25: Zusammenhang zwischen Flimmerfrequenz und Flimmerempfindlichkeit des Auges für zwei verschiedene Feldgrössen.

Praxisbezug

Bildschirmflimmern

Die Punkte eines BS werden periodisch zum Leuchten angeregt, so dass ihre Leuchtdichte zeitlich oszilliert. Qualitativ kann das Flimmerverhalten eines BS von einer Person mit sehr guter Sehschärfe bei grösster für den Betrieb vorgesehener BS-Helligkeit im seitlichen Blick beurteilt werden.

Blinkende Zeichen

Oft werden zur Erregung der Aufmerksamkeit Teile des BS-Inhalts blinkend dargestellt. Wie stark die Aufmerksamkeit erregt wird, hängt neben der Blinkfrequenz auch vom Zeitverhältnis zwischen Ein- und Ausschaltung ab, sowie von der Grösse des blinkenden Objekts.

Empfehlungen

- Mit negativer Polarität ist Flimmern weniger wahrnehmbar.
- BS mit 100 cd/m^2 Leuchtdichte sollten mindestens eine Refreshrate von 80 Hz, besser aber 90 Hz aufweisen.
- Blinkende Zeichen zur Erregung der Aufmerksamkeit sollen mit einer Frequenz zwischen 1 und 5 Hz im Zeitverhältnis 1 : 1 ein- und ausschalten.
- Blinkender Text, der lesbar sein soll, muss mit Frequenzen zwischen $1/3$ und 1 Hz im Zeitverhältnis 1 : 0,7 ein- und ausgeschaltet werden.

Bewegung

Sehprozess

Netzhautperipherie

Im Gegensatz zur Sehschärfe ist das Bewegungssehen und das zeitliche Auflö-

sungsvermögen in der Peripherie der Netzhaut besser, aufgrund geringerer Rezeptordichte und höherer Nervenleitungsgeschwindigkeiten.

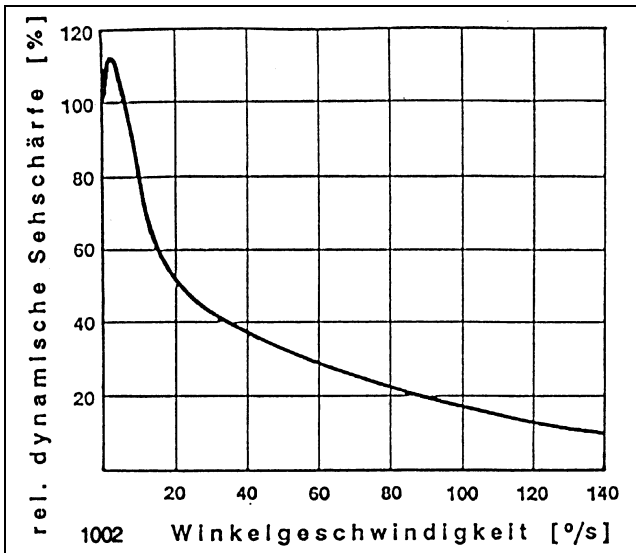


Abb. 26: Sehschärfe in Abhängigkeit der Winkelgeschwindigkeit.

Sehschärfe und relative Bewegung

Die Signalübertragung und -verarbeitung des Reizes braucht Zeit. Bewegt sich ein Gegenstand schnell, so kommt es vor, dass zwei oder mehrere benachbarte Rezeptoren kurz hintereinander vom selben Punkt des Objekts gereizt werden. Werden die Reize der beiden Rezeptoren praktisch gleichzeitig bearbeitet, so erscheint dies als lokale Unschärfe (Abb. 26).

Praxisbezug

Jitter

Zitterbewegungen (Jitter) von Zeichen mindern die Zeichenschärfe und stören Fixation und Aufmerksamkeit. Sie erhöhen die visuelle Beanspruchung. Wegen der unterschiedlichen Empfindlichkeit der Netzhaut für Bewegungswahrnehmung, kann es geschehen, dass Zeichen am BS-Rand zu

zittern scheinen, während sie im direkten Blick unverändert am Ort stehen.

Zitterbewegungen werden manchmal von äusseren magnetischen Feldern hervorgerufen (z.B. Lüftermotor, vorbeifahrende Eisenbahn). Im Extremfall können diese mit speziellen „Schutztunnels“, in welche der BS gestellt wird, abgeschirmt werden. Moderne Flachbildschirme sind von Jitter nicht betroffen.

Empfehlungen

- Zitterbewegungen (Jitter) zwischen 0,5 und 30 Hz sollten weniger als 0,7' Sehinkelgrösse bzw. weniger als 0,1 mm in 50 cm Sehentfernung betragen.
- Externe elektromagnetische Felder, welche Jitter verursachen (z.B. mit 16,7 Hz) sollen vermieden oder abgeschirmt werden. Die magnetische Induktion muss $< 2 \mu\text{T}$ sein.
- Bewegte Objekte, die erkannt werden sollen, müssen eine Sehinkel-Geschwindigkeit von weniger als $10^\circ/\text{s}$ aufweisen.

Dauerleistung

Sehprozess

Asthenopische Beschwerden (nach Krueger)

Überbeanspruchung der Augen verursacht *asthenopische Beschwerden*. Darunter versteht man unterschiedliche Symptome wie Augenrötung, Augenbrennen, vermehrter Tränenfluss, „Sandkorn im Auge“, Lidzucken, Verschwommensehen, erhöhte Blendempfindlichkeit und im Extremfall Kopfschmerzen. Sie sind ein Zeichen für Überforderung der Augen. Mit zunehmenden

dem Alter nehmen sie an Häufigkeit zu. Sie treten akut auf, wenn die Leistungsfähigkeit der Augen nicht für die Erfüllung einer Sehaufgabe ausreicht. Neben diesem Ungleichgewicht können auch psychische Anforderungen Ursache sein. Asthenopische Beschwerden sind damit im Hinblick auf Ursache wie auf Symptom unspezifisch und lassen keinen direkten Schluss auf die aktuelle Ursache zu. Nach bisheriger Kenntnis werden sie im Gegensatz zu muskulären Beschwerden auch nach langer Zeit nicht chronisch.

In augenärztlichen Untersuchungen werden im allgemeinen Werte kurzfristiger *Höchstleistung* erhoben, wie beispielsweise die Sehschärfe. Die Arbeitswissenschaft interessiert sich zwar im Falle extremer Aufgaben für solche Höchstleistungswerte, viel bedeutsamer für die tägliche Arbeit ist die *Dauerleistung*. Im Einzelfall ist keineswegs erwiesen, dass die Höchstleistung im Test grundsätzlich mit der Leistungsfähigkeit am Arbeitsplatz gleich gesetzt werden kann.

Praxisbezug

Beanspruchung

Akkommodation, Konvergenz und Version sind muskuläre Anstrengungen. Akkommodation auf den Nahpunkt ist ausserordentlich anstrengend. Verlassen einer Ruhelage bedeutet muskuläre und nervöse Arbeit. Sehr häufiger Wechsel der Sehentfernung strengt, sehr genaues Fixieren, dauernder Blick nach oben oder zur Seite strengen an. Ein Wechsel der Sehentfernung oder der Sehrichtung in Massen entlastet das Auge.

Empfehlungen

- Der Wechsel zwischen belastender BS-Arbeit und Erholung darf nicht dem Zufall überlassen werden, sollte aber auch nicht in ein starres Schema „55 Minuten Arbeit – 5 Minuten Pause“ gepresst werden. Häufig reicht es, den Ablauf der Arbeit zu ändern und Phasen erhöhter mit solchen geringer visueller Anforderung zu mischen.
- Bei stundenlangen Dateneingaben mit hohen Sehanforderungen müssen Pausen eingeführt werden.

Literatur

- Krueger H.: Arbeit mit dem Bildschirm. Handbuch der Arbeitsmedizin; Konietzko, Dupuis (Hrsg.) Kap. IV-9.2.1 (1993).
- Krueger H.: Arbeiten mit dem Bildschirm - aber richtig! Bayerisches Staatsministerium für Arbeit, Familie und Sozialordnung (1993).
- Thorell L.G., Smith W.J.: Using computer color effectively. Prentice-Hall (1990).
- ISO 9241: Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs). Parts 3, 6, 7, 8.
- Schmidt R.F.: Neuro- und Sinnesphysiologie. 2. Aufl. Springer, Berlin (1995).
- Rock I.: Wahrnehmung. Spektrum Akademischer Verlag (1985).
- Goldstein E.B.: Wahrnehmungspsychologie. Spektrum Akad. Verlag (1997).