

# Sehen und Bildschirmarbeit

Physiologische Grundlagen für Arbeitsmediziner  
und Betriebsärzte



---

Die in diesem Merkblatt enthaltenen technischen Lösungen schließen andere, mindestens ebenso sichere Lösungen nicht aus, die auch in technischen Regeln anderer Mitgliedstaaten der Europäischen Union oder anderer Vertragsstaaten des Abkommens über den Europäischen Wirtschaftsraum ihren Niederschlag gefunden haben können.

<b>1</b>	<b>Physikalische Grundlagen</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Das optische System des Auges</b>	<b>6</b>
2.1	Dioptrik	6
2.2	Refraktionsanomalien	6
2.3	Akkommodation	8
2.4	Sehschärfe	11
<b>3</b>	<b>Psychophysik des Sehens</b>	<b>13</b>
3.1	Farbsehen	13
3.1.1	Trichromatische Theorie	13
3.1.2	Störungen des Farbsehens	15
3.2	Adaptation	16
3.3	Simultankontrast	19
3.4	Zeitliches Auflösungsvermögen	20
3.5	Binokulares Sehen	22
3.5.1	Bildverschmelzung	22
3.5.2	Schielen (Strabismus)	25
3.6	Gesichtsfeld und subjektives Bild	26
<b>4</b>	<b>Praktische Folgerungen</b>	<b>28</b>
<b>5</b>	<b>Literatur</b>	<b>30</b>

Gegenstände sind nur dann sichtbar, wenn sie räumlich verteilt unterschiedlich Licht emittieren, d. h. wenn sie entweder selbst leuchten oder einfallendes Licht reflektieren. Für das Erkennen ist dabei der Kontrast  $C$  entscheidend, den man aus der Leuchtdichte  $L_2$  des Gegenstandes (z. B. eines schwarzen Buchstabens) und der Leuchtdichte  $L_1$  der Umgebung (des weißen Papiers) definiert:

$$C = (L_1 - L_2) / L_1$$

Jeder Gegenstand reflektiert Licht mehr oder weniger stark, je nach der Oberflächenbeschaffenheit gerichtet oder gestreut. Polierte Oberflächen reflektieren gerichtet, raue Oberflächen gestreut. Als Reflexionsgrad  $\rho$  bezeichnet man das Verhältnis des einfallenden zum rückgestrahlten Lichtstrom. Der Reflexionsgrad verschiedener Oberflächen unterscheidet sich erheblich. Weißes Papier reflektiert etwa 80 % des einfallenden Lichtes ( $\rho = 0.8$ ), 20 % werden absorbiert. Schwarze Druckbuchstaben reflektieren nur wenige Prozent des einfallenden Lichtes. Für das weiße Papier und den schwarzen Druckbuchstaben gilt aber: Der Reflexionsgrad ist nur unwesentlich von der Wellenlänge des Lichtes abhängig. Das ist nicht der Regelfall. Alle Gegenstände, die uns farbig erscheinen, reflektieren bevorzugt bestimmte Wellenlängenbereiche und absorbieren weitgehend die übrigen Wellenlängen im sichtbaren Spektrum. Eine Oberfläche, die uns bei normalem Licht blau erscheint, reflektiert bevorzugt Licht mit kurzen Wellenlängen (400–500 nm) und absorbiert das langwellige Licht (600–700 nm). Oberflächen, die uns rot erscheinen, verhalten sich umgekehrt. Daher ist die spektrale Zusammensetzung des Lichtes in einem geschlossenen Raum in hohem Maße von den Farben der Wände abhängig.

Aus dem Reflexionsgrad  $\rho$  und der Beleuchtungsstärke  $E$  lässt sich die Leuchtdichte  $L$  eines diffus reflektierenden Gegenstandes berechnen. Es gilt

$$L = \rho E / \pi$$

Wird die Beleuchtungsstärke in Lux angegeben, so ist bei vollständiger Reflexion ( $\rho = 1$ ) die Leuchtdichte  $E/\pi$  nt = E asb\*. Weißes Papier ( $\rho = 0.8$ ), mit einer Beleuchtungsstärke von 500 lx beleuchtet, hat also eine Leuchtdichte von 400 asb = 127 nt.

Für das Problem der Bildschirmarbeitsplätze ist besonders die gerichtete Reflexion von Licht an der Oberfläche des Bildschirms von Bedeutung, für die das Reflexionsgesetz gilt: Der reflektierte Strahl liegt in der Einfallsebene, die durch den einfallenden Strahl und das Einfallslot definiert ist; er bildet mit dem Einfallslot einen Winkel, der entgegengesetzt gleich dem Winkel zwischen Einfallslot und einfallendem Strahl ist. Während also bei diffuser Reflexion eine beleuchtete Fläche aus allen Richtungen gleich hell erscheint, wird bei gerichteter Reflexion die durch eine Lichtquelle beleuchtete Fläche aus der Richtung am hellsten gesehen, die dem Einfallswinkel entgegengesetzt ist. Da auch entspiegelte Bildschirme einen kleinen Teil des einfallenden Lichtes gerichtet reflektieren, muss bei der Beleuchtung des Arbeitsplatzes auf die Richtung des Lichteinfalles geachtet werden.

---

\* Die Einheit der Leuchtdichte nach der SI-Norm ist das Nit, abgekürzt nt.  
Es ist  $1 \text{ cd/m}^2 = 1 \text{ nt} = \pi \text{ asb}$  (Apostilb).

# 2 Das optische System des Auges

## 2.1 Dioptrik

Das Auge ist ein bildentwerfendes System mit einem optischen Apparat, bestehend aus Hornhaut-Kammerwasser-System und Linse, einer Aperturblende, die die einfallende Lichtintensität begrenzt (der Iris) und einer lichtempfindlichen Aufnahmeschicht (der Netzhaut). Wie jedes optische System ist das Auge durch seine Brechkraft charakterisiert. Die Brechkraft, angegeben in Dioptrien (dptr), ist der Kehrwert der (in Metern gemessenen) bildseitigen reduzierten Brennweite.

Gegenüber technischen optischen Systemen bestehen zwei wesentliche Unterschiede: 1. Das Auge wird für verschiedene Entfernungen durch Veränderung der Brechkraft (Änderung der Linsenkrümmung) scharf eingestellt, während bei technischen Systemen meist der Abstand zwischen Optik und Bildebene verstellt wird. 2. Beim Auge ist der gesamte Raum hinter den brechenden Flächen mit einem Medium erfüllt, dessen Brechungsindex  $n = 1,336$  größer ist als der der Luft. Hierauf beruht das extrem große Gesichtsfeld des Auges.

## 2.2 Refraktionsanomalien

Beim normalen (emmetropen) Auge liegt im akkommodationslosen Zustand die Netzhaut in der Brennebene. Gegenstandspunkte, die im Unendlichen liegen, werden daher auf der Netzhaut scharf abgebildet (Abb. 1). Das Auge hat eine Brechkraft von etwa 58 dptr. Dieser Wert ist (wie jeder Normwert) individuellen Streuungen unterworfen, Abweichungen können in beiden Richtungen auftreten. Ist die Brechkraft zu groß (oder der Bulbus zu lang), so werden im akkommodationslosen Zustand nur Gegenstandspunkte auf der Netzhaut zu Bildpunkten, die in endlichem Abstand liegen (Myopie, Kurzsichtigkeit). Ist die Brechkraft zu klein (oder der Bulbus zu kurz), kann das akkommodationslose Auge überhaupt keine Strahlen, die von reellen Gegenstandspunkten kommen, auf der Netzhaut vereinen. Es kann nur solche Strahlen vereinen, die konvergent einfallen, also scheinbar von einem Bildpunkt hinter der Netzhaut kommen (Hyperopie, Übersichtigkeit; Abb. 1). Der Fernpunkt des Emmetropen liegt also im Unendlichen, der des Myopen in der Nähe und der des Hyperopen ist virtuell und liegt hinter der Netzhaut. Der Grad der Refraktionsanomalie wird als Differenz zur normalen Brechkraft in Dioptrien angegeben, indem der reziproke Wert der Fernpunktentfernung (in Metern) als Abweichung angegeben wird.\*

\* Für den Vergleich von 2 optischen Systemen mit gleicher Bildweite gilt:

$D_1 - D_2 = 1/f_1 - 1/f_2 = 1/FP_1 - 1/FP_2$ . Für die Berechnung wird die Tatsache vernachlässigt, dass die meisten Refraktionsanomalien Achsenametropien sind.

Liegt der Fernpunkt 0,2 m vor dem Auge, so beträgt die Myopie  $1/0,2 = +5$  dptr, liegt der virtuelle Fernpunkt 0,5 m hinter dem Auge, beträgt die Hyperopie  $-1/0,5 = -2$  dptr.

Refraktionsanomalien können durch Brillen oder Kontaktlinsen korrigiert werden. Die Korrekturgläser haben dabei das umgekehrte Vorzeichen wie die Refraktionsanomalie, daher geben Laien das Vorzeichen der Refraktionsanomalie meist falsch an. Geringe Grade von beiden Refraktionsanomalien sind sehr häufig. Myopien werden meistens schon in früher Jugend erkannt und korrigiert, Hyperopien blei-

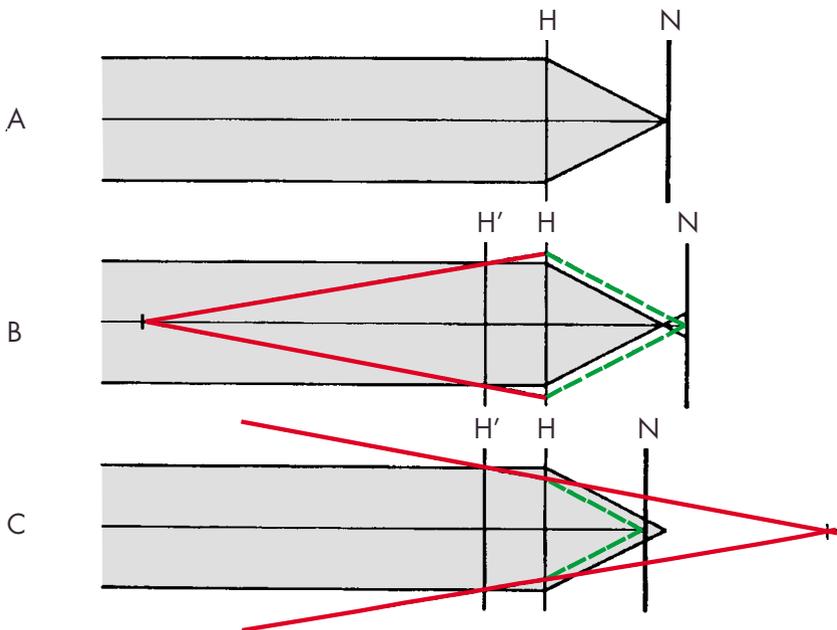


Abb. 1: Schematische Darstellung der Refraktionsanomalien. H = Hauptebene des Auges, H'= Hauptebene der Korrekturbrille, N = Netzhaut. Dicke Striche: Strahlengang für parallel einfallende Strahlen. A) Emmetropie. N liegt in der Brennebene. Parallel einfallende Strahlen werden auf N vereinigt, der Fernpunkt liegt im Unendlichen. B) Myopie. Der Bulbus ist zu lang, N liegt hinter der Brennebene. Divergent einfallende Strahlen (von einem im Endlichen liegenden Gegenstandspunkt, dem Fernpunkt, rote Linien) werden scharf abgebildet. C) Hyperopie. Konvergent einfallende Strahlen (rote Linien) werden auf N abgebildet. Ihr Schnittpunkt, der virtuelle Fernpunkt, liegt hinter der Netzhaut. Die korrigierenden Gläser für B und C müssen parallel einfallende Strahlen so brechen, als ob sie aus dem Fernpunkt kämen, d. h. der Brennpunkt der Brille entspricht dem Fernpunkt des nicht korrigierten Auges. (Aus Reichel u. Bleichert, 1980)

ben häufig lange unentdeckt, weil jüngere Hyperope die fehlende Brechkraft des Auges meistens durch die Akkommodation ausgleichen können.

Nach der Korrektur mit einer Brille ist das Bild eines Gegenstandes auf der Netzhaut beim Hyperopen größer, beim Myopen kleiner als beim Emmetropen. Der Unterschied ist nur bei stärkeren Differenzen der Refraktion auf beiden Augen wegen der binokularen Fusion von Bedeutung, bei Korrektur durch Kontaktlinsen spielt er keine Rolle.

Eine weitere Refraktionsanomalie ist der Astigmatismus, der auf ungleichen Krümmungsradien in zwei senkrecht aufeinanderstehenden Ebenen einer brechenden Fläche (meist der Hornhaut) beruht. Geringer Astigmatismus (Brechkraftdifferenzen um 0,5 dptr in den verschiedenen Ebenen) ist normal und beeinträchtigt das Sehvermögen nicht. Höhere Grade müssen durch Brillen mit eingeschliffenen Zylindergläsern korrigiert werden. Starker Astigmatismus ist nicht befriedigend zu korrigieren, in solchen Fällen ist die Sehschärfe (s. S. 11) auch nach der bestmöglichen Korrektur vermindert.

Neben diesen Fehlern im optischen System hat das Auge, wie jedes optische System, bestimmte Mängel, von denen für uns nur die chromatische Aberration von Bedeutung ist: Da kurzwellige Lichter stärker gebrochen werden als langwellige, ist die Brechkraft des Auges für kurzwellige Lichter größer als für langwellige. Der Mangel wird bei Mischlicht nicht bemerkbar, er kann aber bei der Beobachtung mit Licht aus vorwiegend einem Wellenlängenbereich eine Rolle spielen. So wird z. B. das Display aus roten LEDs, wie es noch vielfältig üblich ist, vom Emmetropen in der Ferne nur dann scharf gesehen, wenn er etwa 0,5 dptr akkommodiert. Der Emmetrope wird also beim Sehen mit langwelligem Licht leicht hyperop und umgekehrt beim Sehen mit kurzwelligem Licht (blauviolett) leicht myop.

## 2.3 Akkommodation

Die Linse des Auges ist elastisch, sie ist über die Fasern der Zonula mit dem Ziliarmuskel verbunden. Im nicht akkommodierten Zustand (Einstellung auf die Ferne) steht sie unter Spannung und wird dadurch in einer wenig gekrümmten Form gehalten. Zur Einstellung des Auges auf die Nähe kontrahiert sich der Ziliarmuskel, der Radius des durch den Ziliarmuskel gebildeten Ringes nimmt ab, die Linse kann sich durch ihre Formelastizität stärker krümmen. Mit der Brechkraft der Linse nimmt

auch die Brechkraft des Auges zu. Das Ausmaß der Akkommodation, die Akkommodationsbreite AB (in Dioptrien) wird durch die Differenz der (in Metern gemessenen) Kehrwerte von Fern- und Nahpunktentfernung (FP bzw. NP) angegeben:

$$AB = 1/NP - 1/FP$$

Für die Ableitung dieser Beziehung gilt eine analoge Überlegung wie für die Ableitung auf S. 4. Man betrachtet das nicht akkommodierte und das akkommodierte Auge als zwei optische Systeme mit gleichen Bildweiten und den Gegenstandsweiten NP und FP. Die Differenz der Brechkräfte der beiden Systeme ist die Akkommodationsbreite.

Die Akkommodationsbreite nimmt im Verlaufe des Lebens von frühester Jugend an bis zum 50. Lebensjahr nahezu linear um etwa 0,3 dptr pro Jahr ab (Abb. 2). Für einen Emmetropen wird dieser Alterungsvorgang, der auf einer Abnahme der Formelastizität der Linse beruht, aber erst im 4. Lebensjahrzehnt spürbar: Die Akkommodationsbreite beträgt dann noch etwa 3 dptr, der Nahpunkt liegt also bei 0,3 m. Wenn in den folgenden 3 Jahren die Akkommodationsbreite auf 2 dptr abnimmt, liegt der Nahpunkt bei 0,5 m. Innerhalb dieser 3 Jahre wird die Akkommodation scheinbar rapid schlechter, Lesen in der bequemen Leseentfernung ist nicht mehr möglich. Dieser Zustand wird als Presbyopie bezeichnet.

Trotzdem hat die frühe Abnahme der Akkommodationsbreite erhebliche praktische Bedeutung. Ein hoher Prozentsatz aller Menschen ist hyperop. Mäßige Grade von Hyperopie können aber von jungen Menschen auch ohne Brille leicht ausgeglichen werden. Bei der Ferneinstellung müssen solche Menschen den Fehlbetrag ihrer Refraktion durch die Akkommodation kompensieren. Bei einem jungen Menschen im Alter von 20 Jahren beträgt die durchschnittliche Akkommodationsbreite 10 dptr. Wenn er emmetrop ist, liegt sein Nahpunkt bei 0,1 m; beim gleichaltrigen Hyperopen mit  $-3$  dptr würde er bei 0,14 m liegen, weil ihm nur  $10 - 3 = 7$  dptr Akkommodationsbreite zur Verfügung stehen. Dieser Unterschied ist praktisch ohne Bedeutung, er wird aber mit zunehmendem Lebensalter wichtiger: Während der Emmetrope mit 40 Jahren noch etwa 5 dptr akkommodieren kann (NP = 0,2 m), verbleiben dem nicht korrigierten Hyperopen mit  $-3$  dptr nur noch 2 dptr für die Naheinstellung, er würde also ohne Korrektur der Refraktionsanomalie 10 Jahre früher als der Emmetrope eine Lesebrille benötigen.

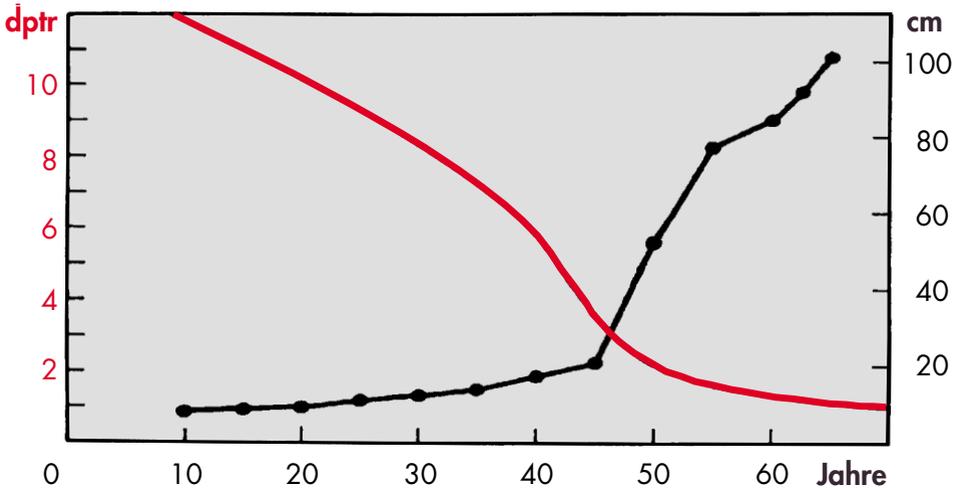


Abb. 2: Abnahme der Akkommodationsbreite mit dem Lebensalter.  
 Rote Kurve: Akkommodationsbreite in dptr,  
 Kurve mit Punkten: Nahpunktentfernung.  
 (Daten nach Duane, 1922 und Graff, 1952)

Es muss beachtet werden, dass Presbyopie und Hyperopie zwei verschiedene Dinge sind, die nur eines gemeinsam haben: Sie sind keine „Weitsichtigkeit“, denn weder der Presbyope noch der Hyperope kann in die Ferne besser sehen als der Emmetrope, während der Kurzsichtige sehr wohl in der Nähe besser sehen kann. Der Hyperope unterscheidet sich vom Emmetropen durch die Lage des Fernpunktes im akkommodationslosen Zustand, der Presbyope kann emmetrope sein, er hat aber eine verminderte Akkommodationsbreite. Ein emmetroper Presbyoper benötigt nur für das Nahsehen eine „Lesebrille“, ein Presbyoper mit einer Refraktionsanomalie benötigt je eine Brille für die Nähe und für die Ferne. Man kann aber auch beide Korrekturen in einer Brille unterbringen (Bifokalgläser). Bei Menschen mit einer Akkommodationsbreite unter 2 dptr (etwa ab dem 50. Lebensjahr) kann die Brille zusätzlich noch auf eine mittlere Entfernung korrigiert werden (Trifokalgläser, Gläser mit gleitender Brechkraft).

## 2.4 Sehschärfe

Beim normalen emmetropen Auge ist das Auflösungsvermögen, d. h. der kleinste Abstand, unter dem zwei Bildpunkte noch getrennt wahrgenommen werden können, sowohl aus physikalischen als auch aus anatomischen Gründen begrenzt. Beide Grenzwerte sind bei fovealer Betrachtung nahezu gleich. Die physikalischen Grenzen sind durch die Beugungserscheinungen an der Pupille gegeben, sie hängen von der Pupillenweite und der Wellenlänge des Lichtes ab, die anatomischen durch das foveale Zapfenraaster; es spielt für das Auflösungsvermögen dieselbe Rolle wie das Korn bei Fotos oder Druckbildern.

Für praktische Zwecke ist es unbequem, das Auflösungsvermögen aus dem Abstand der Bildpunkte direkt zu bestimmen. Man benutzt vielmehr den kleinsten Bildwinkel, unter dem die beiden Bildpunkte noch getrennt gesehen werden und bestimmt diesen Bildwinkel mit genormten Sehprobentafeln. Diese Tafeln bestehen aus unterschiedlich großen Zeichen, deren wesentliche Merkmale (z. B. die Lücke in einem Landoltring, Abb. 3) dem Auge aus einer vorgeschriebenen Entfernung unter einem Winkel von  $1'$  (Winkelminute) erscheinen.

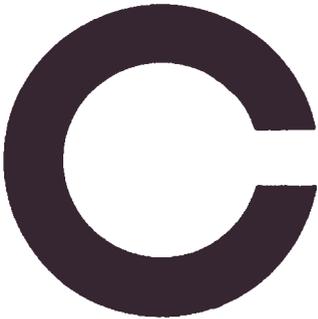


Abb. 3: Der Landoltring,  
das Normsehzeichen nach  
DIN 58 220.

Als Visus bezeichnet man den Kehrwert des kleinsten in Minuten gemessenen Sehwinkels, unter dem die Zeichen noch sicher erkannt werden. Wird das Zeichen aus der vorgeschriebenen Entfernung eben noch erkannt, so ist der Visus 1. In allen anderen Fällen ergibt sich der Visus aus dem Quotienten der „Istentfernung“ dividiert durch die „Sollentfernung“. Wird also eine Sehprobe mit der Sollentfernung 5 m noch aus 6 m richtig erkannt, beträgt der Visus 1,2, entsprechend einem Sehwinkel von 50" (Winkelsekunden). Visusbestimmungen werden im Allgemeinen am voll korrigierten Auge unter optimalen Lichtbedingungen durchgeführt. Bei ungünstigen Bedingungen kann der Visus wesentlich schlechter sein. Auch bei optimalen Bedingungen nimmt der Visus bei parafovealer Betrachtung mit zunehmendem Gesichtsfeldwinkel steil ab, weil das Raster der Rezeptoren mit eigener zentraler Projektion gröber wird (Abb. 4).

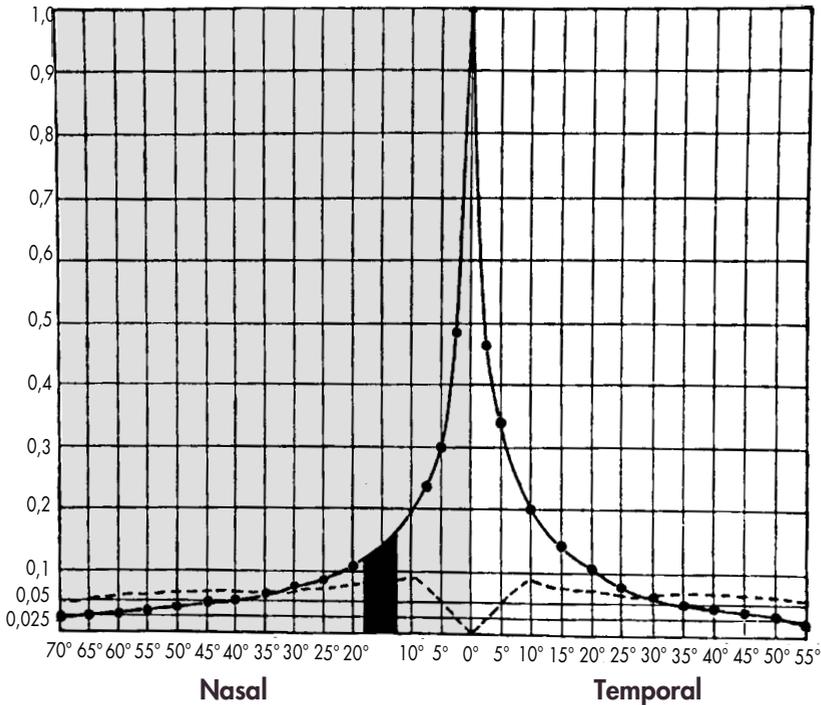


Abb. 4: Visus im Gesichtsfeld für Tages- und Dämmerungssehen (durchgezogene bzw. unterbrochene Linie). Die schwarze Fläche ist der blinde Fleck. (Nach Wertheim 1894 aus Ruch 1965)

## 3.1 Farbsehen

### 3.1.1 Trichromatische Theorie

Lichter unterschiedlicher Wellenlängen lösen unterschiedliche Farbempfindungen aus: Lichter einer Wellenlänge („monochromatische Lichter“) können alle Farbempfindungen des Regenbogens von Rot (langwelliges Licht um 700 nm), über Gelb (um 580 nm), Grün (um 520 nm), Blau (um 480 nm) zu Violett (um 400 nm) hervorrufen. Lässt man gleichzeitig Lichter von verschiedener Wellenlänge auf die gleiche Netzhautstelle wirken (additive Farbmischung)\*, so gibt es drei Möglichkeiten:

1. Die resultierende Empfindung entspricht einer Empfindung, die durch ein Licht erzeugt wird, dessen Wellenlänge zwischen den Wellenlängen der verwendeten Reizlichter liegt.
2. Die resultierende Empfindung entspricht einem Purpurton, der durch kein monochromatisches Licht erzeugt werden kann.
3. Die resultierende Empfindung ist eine Unbuntempfindung (Grau).

Diese Ergebnisse der Farbmischung lassen sich im Farbdreieck anschaulich darstellen (Abb. 5). Dabei sind die Farbempfindungen auf den Seiten eines Dreiecks aufgetragen, beginnend mit Violett an der linken unteren Ecke über Blau, Grün (obere Ecke), Rot (untere rechte Ecke) und Purpur zur linken unteren Ecke zurück. Die die Empfindungen auslösenden Wellenlängen monochromatischer Lichter sind an den entsprechenden Stellen eingetragen. Im Inneren des Dreiecks ist die Fläche der „ungesättigten“ (d. h. mit der Empfindung „weiß“ gemischten) Farben. Im Zentrum des Dreiecks liegt schließlich der Weißpunkt. Mischt man Lichter von 2 verschiedenen Wellenlängen, entspricht die ausgelöste Empfindung einem Punkt im Bereich des Dreiecks, der auf der Verbindungslinie der beiden Wellenlängen liegt. So kann man durch Mischung von Lichtern der Wellenlängen 670 nm und 535 nm alle Farbempfindungen zwischen Rot, Orange, Gelb, Gelbgrün und Grün erzeugen, wenn man das Verhältnis der Beleuchtungsstärken ändert. Purpurtöne, die

\* Die Mischung von Farbstoffen im Malkasten wird als subtraktive Farbmischung bezeichnet, weil die resultierende Empfindung von den Wellenlängen des vom Farbstoffgemisch reflektierten Lichtes abhängt. Ein gelber Farbstoff reflektiert maximal im Bereich um 580 nm, aber auch weniger stark Lichter benachbarter Wellenlängen; ein blauer Farbstoff reflektiert vorwiegend im Bereich um 480 nm. Mischt man beide Farbstoffe, so wird nur dasjenige Licht reflektiert, das von keinem der beiden Farbstoffe absorbiert wird. Dieses Licht ist Licht mit Wellenlängen, die die Empfindung Grün auslösen.

durch monochromatische Lichter nicht erzeugt werden können, entstehen durch Mischung von Rot- und Violett-empfindungen. Mischungen von Farb-empfindungen, deren gerade Verbindung durch den Weißpunkt geht (Komplementärfarben) erzeugen bei geeignetem Mischungsverhältnis Unbunt-empfindungen.

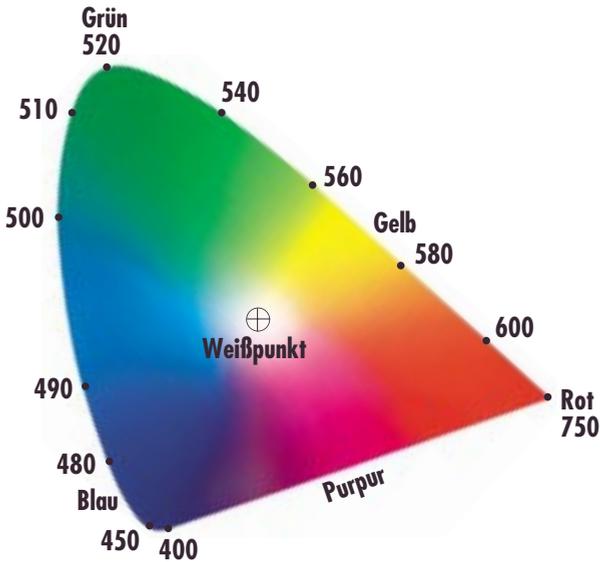


Abb. 5: Farbendreieck in Anlehnung an DIN 5033

Die beschriebenen Gesetzmäßigkeiten der Farbmischung und die Störungen des Farbsehens (s. u.) haben zur Aufstellung der „trichromatischen Theorie“ des Farbsehens durch Helmholtz und Young geführt, die alle Farbempfindungen letztlich auf die unterschiedlich starke Erregung von 3 verschiedenen Rezeptorpopulationen zurückführen, die sich in ihrer spektralen Empfindlichkeit unterscheiden (Rot-, Grün- und Blaurezeptoren).

### 3.1.2 Störungen des Farbsehens

Neben dem sehr seltenen totalen Ausfall des Farbensinnes (Monochromasie) sind Störungen einzelner Komponenten des trichromatischen Systems von praktischer Bedeutung.

Das vollständige Fehlen einer Komponente wird als partielle Farbenblindheit oder Dichromasie bezeichnet. Es betrifft fast immer entweder die Rotkomponente (Protanopie) oder die Grünkomponente (Deutanopie). Tritanopien sind sehr selten. Abweichungen vom normalen trichromatischen System des Farbsehens im Sinne einer Schwäche einer der Komponenten sind als Protanomalie und Deutanomalie relativ häufig.

Man kann solche Abweichungen quantitativ mit dem Anomaloskop bestimmen. Dabei wird dem Probanden ein geteiltes Feld dargeboten, dessen eine Hälfte durch monochromatisches Licht der Wellenlänge 589 nm (Gelb, Na-Licht) beleuchtet wird, während der Proband in der anderen Hälfte Lichter der Wellenlängen 670 und 546 nm (Rot, Li-Licht und Grün, Hg-Licht) mischen kann. Er kann dabei den Anteil der beiden Lichter durch eine Veränderung der Spaltbreite variieren, bis er in beiden Feldern die gleiche Farbe erkennt. Der Normale stellt im Mittel die Gleichung

$$40 \text{ Li} + 33 \text{ Hg} = 15 \text{ Na}$$

ein. Manche Menschen können zwar eine definierte Farbgleichung einstellen, sie verwenden aber für diese Gleichung deutlich mehr Rot (Protanomale), andere mehr Grün (Deutanomale), entsprechend erscheint das Mischfeld dem Normalen rot bis orange oder grün bis gelbgrün. Quantitativ wird die Anomalie durch den Anomalquotienten AQ angegeben. Der AQ ist definiert als das Verhältnis der Anteile von Grün zu Rot (Hg/Li) des Anomalen, dividiert durch das gleiche Verhältnis der Normalpopulation:

$$AQ = \left(\frac{\text{Hg}}{\text{Li}}\right)_{\text{anom}} + \left(\frac{\text{Hg}}{\text{Li}}\right)_{\text{norm}}$$

Daher haben normale Farbentüchtigte einen AQ um 1 (Streubereich 0,7 – 1,4) Protanomale einen kleineren, Deutanomale einen größeren Wert.

Dichromaten können bei der Gleichung im Anomaloskop zwar Helligkeitsunterschiede, aber keine Farbunterschiede erkennen. Trotzdem kann man auch am Anomaloskop die beiden Störungen unterscheiden. Der Protanomale (Rotblinde) und der Deuteranomale (Grünblinde) erkennen im Anomaloskop die Gleichungen

$$670 \text{ nm} = 589 \text{ nm} \text{ und } 546 \text{ nm} = 589 \text{ nm}$$

an, sie verwenden aber unterschiedliche Helligkeiten für das gelbe Feld. Außerdem haben Dichromaten eine Graustelle im Spektrum, die für Protanope bei 486 nm, für Deuteranope bei 500 nm liegt. Für Protanope ist zusätzlich das Spektrum im langwelligen Bereich verkürzt: Die Kurve der Helligkeitsempfindung als Funktion der Wellenlänge sinkt beim Protanopen ab 570 nm steiler ab als beim Deuteranopen und beim Normalen, für Wellenlängen oberhalb 700 nm ist der Protanope praktisch blind.

Prot- und Deuteranope sind Rot-Grün-Verwechsler, sie sind daher bei allen Tätigkeiten benachteiligt, wo Farbunterschiede in diesem Spektralbereich von Bedeutung sind. Der Protanope ist zusätzlich behindert, weil er am langwelligen Ende des Spektrums blind ist. Gerade diese Wellenlängen machen aber einen erheblichen Teil des Lichtes aus, das von Signalanlagen (Rotampel, Bremslicht) ausgeht. Der Protanope kann solche Signale also viel leichter übersehen als der Deuteranope, der zwar Farbunterschiede nicht erkennt, wohl aber Helligkeitsunterschiede. Eine analoge Überlegung gilt auch für Bildschirmarbeitsplätze. Der Protanomale kann an einem Farbbildschirm leicht eine rote Linie übersehen, der Deuteranomale kann nur ihre Farbe nicht erkennen.

## 3.2 Adaptation

Ziel einer richtigen Belichtung in der Fotografie ist es im Allgemeinen, ein möglichst kontrastreiches Bild zu erzielen. Bei falscher Belichtung ist das Bild „flau“, d. h. kontrastarm. Das menschliche Auge hat für die richtige Belichtung nicht die Möglichkeit, die Belichtungszeit zu verändern. Ihm verbleiben aber zwei andere Möglichkeiten, die in der Fototechnik ebenfalls verwirklicht sind: Die Einstellung der Blende und die Veränderung der „Filmempfindlichkeit“. Die Blendeneinstellung ist allerdings beim Auge sehr beschränkt; sie umfasst maximal eine Änderung der

Pupillenweite um den Faktor 16, wenn sich der Durchmesser der Pupille von 8 mm auf 2 mm verändert. Dies entspricht etwa der Abblendung vom Blendenwert 2 auf 8 beim Fotoobjektiv. Die mittleren Beleuchtungsstärken, mit denen wir im täglichen Leben konfrontiert sind, differieren aber erheblich mehr. Der Bereich der Beleuchtungsstärke, die wir als angenehm zum Lesen empfinden, liegt zwischen 100 und 3000 lx, aber auch bei 20 lx kann man bereits gut lesen und bei 10 000 lx auch noch. In diesem Bereich empfinden wir unser subjektives Bild von der Umwelt als kontrastreich, also richtig belichtet. Erst wenn die Beleuchtungsstärke wesentlich größer oder kleiner wird, werden die Kontraste „flau“, das Bild insgesamt zu hell oder zu dunkel wie ein falsch belichtetes Foto. Die Beleuchtungsstärken können sich also um mehrere Zehnerpotenzen ändern, ohne dass eine „Fehlbelichtung“ auftritt. Bei sehr langsamer Änderung der Beleuchtungsstärke ändert sich dabei die Pupillenweite in weiten Helligkeitsbereichen fast überhaupt nicht, sie kann die Anpassung an die wechselnde Helligkeit nicht erklären.

Die Ursache für dieses Phänomen der „Helligkeitskonstanz“ ist die Adaptation. Gemeinhin wird die Adaptation durch die Veränderung der Absolutschwelle für Lichtreize charakterisiert. Sie verläuft in zwei Phasen: In der ersten schnellen Phase nimmt die Schwelle innerhalb von 5 Min. auf etwa 1/10 ab, im weiteren Verlauf über ca. 1 Std. nochmals um einen Faktor 1/1000. Diese Kurve ist für unser Problem von untergeordneter Bedeutung. Die wichtigste Funktion der Adaptation ist nicht die Verschiebung der Absolutschwelle, sondern vielmehr die Verschiebung des zur Signalgebung im visuellen Kanal verfügbaren Bereiches in den herrschenden Helligkeitsbereich. Die Adaptation ist damit vergleichbar der Wahl der richtigen Filmempfindlichkeit in der Fotografie. Betrachten wir nur die Unbuntempfindung. Auf einem Schwarzweißbild guter Qualität glaubt man nahezu unendlich viele unterschiedliche Helligkeitswerte der Grautöne – vom hellsten Weiß zum tiefsten Schwarz – zu erkennen. Messungen der Unterschiedsschwellen haben aber gezeigt, dass die Zahl der unterscheidbaren Helligkeitsstufen bei konstanter Adaptation sehr gering ist. Nach Messungen von Kern (1952) sind es maximal etwa 25 Stufen. Dies ist auch nicht weiter verwunderlich, wenn man bedenkt, dass der einzelnen Faser des N. opticus zur Kodierung der Helligkeit nur die Modulation der Impulsfrequenz zur Verfügung steht und dass dieser Frequenzmodulation nach oben und unten biologische Grenzen gesetzt sind. Ihr Bereich reicht maximal bis etwa 500 Impulse/s. Das ZNS kann aber sicher nicht beliebig kleine Unterschiede der Impulsfrequenz verarbeiten. Auf Grund von Vergleichen mit dem akustischen

System kommt Ranke (1952) zu etwa derselben Zahl unterscheidbarer Grauwerte wie sie von Kern (1952) gemessen wurden. Vereinfachend gesehen ist danach die Aufgabe der Adaptation, bei einer gegebenen Helligkeit die mittlere Signalfrequenz der Sehnervenfasern etwa in die Mitte des zur Kodierung verfügbaren Bereiches zu verschieben. In diesem Arbeitsbereich stehen dann nach oben und unten genügend Unterschiedsschwellen für das Erkennen der Umwelt zur Verfügung. Trägt man die Unterschiedsempfindlichkeit (gemessen als Kehrwert der Unterschiedsschwellen) gegen die Leuchtdichte auf, so erhält man über einen weiten Bereich ähnliche Kurven für verschiedene Adaptationsleuchtdichten, mit einem Maximum bei der jeweiligen Adaptationsleuchtdichte (Abb. 6). Solange aber die Kurven halbwegs ähnlich sind, bleibt der Helligkeitskontrast konstant und maximal, das Bild ist richtig „belichtet“. Erst in der Dämmerung und auch in blendender Helligkeit werden die Kurven flacher, das Bild also flau und das Erkennen erschwert. Bei blendender Helligkeit spielt sich der Sehvorgang an der oberen Grenze, bei Dämmerung an der unteren Grenze des verfügbaren Frequenzbereiches ab, es bleibt dann nach oben bzw. unten nur noch ein kleiner Bereich mit wenig unterscheidbaren Zuständen.

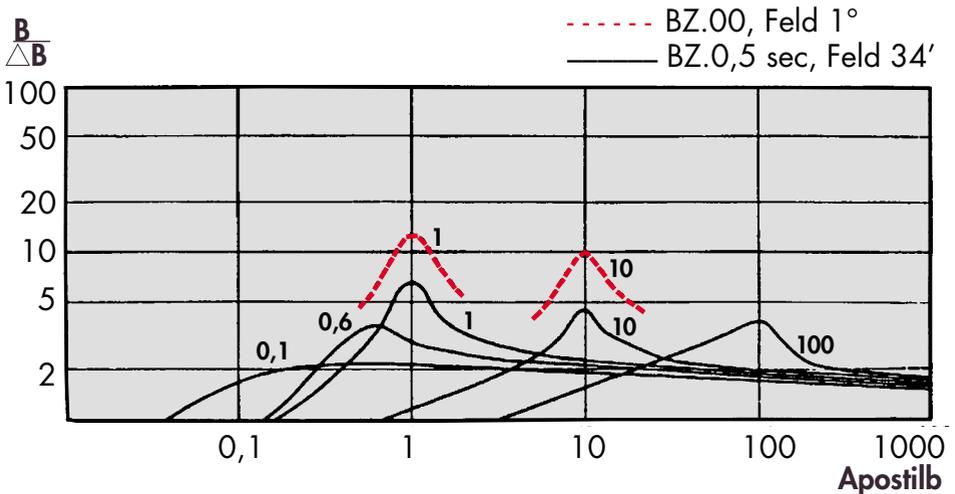


Abb. 6: Relative Unterschiedsempfindlichkeit (Kehrwert der Unterschiedsschwelle  $B/\Delta B$ ) als Funktion der Umfeldleuchtdichte. Zahlen an den Kurven: Adaptationsleuchtdichte. BZ = Beobachtungszeit. (Aus Kern, 1952)

Ganz ähnliche Gesichtspunkte gelten auch für die Farbadaptation. Das „weiße“ Licht, das alle Frequenzen des sichtbaren Bereiches enthält, hat nämlich durchaus unterschiedliche spektrale Zusammensetzung; in der Fotografie verwendet man daher Farbfilm mit unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit für Aufnahmen bei Tages- und Lampenlicht. Bei Tageslicht ist der Anteil kurzwelliger Strahlen größer als bei Lampenlicht, seine Farbtemperatur ist höher. Benutzt man den falschen Film, so erscheint das Bild „blautichig“ (Kunstlichtfilm bei Tageslicht) oder „rotstichig“ (Tageslichtfilm bei Kunstlicht). Das Auge passt sich an die veränderte Farbtemperatur des Lichtes durch die Adaptation an. In einem grün gestrichenen Zimmer überwiegen im Licht wegen der bevorzugten Reflexion mittlere Wellenlängen. Ein weißes Papier müsste daher grünlich erscheinen – und tut es auch auf einem Farbfoto – das Auge aber sieht das Papier weiß, weil die Empfindlichkeit der Netzhaut für mittlere Wellenlängen abgenommen hat. Die Adaptation ist also auch für die „Farbkonstanz“ verantwortlich.

### 3.3 Simultankontrast

Das Auflösungsvermögen nahezu aller Sinnesorgane und auch des Auges ist mit physikalischen Gesetzen kaum zu erklären. Eine der wichtigsten Maßnahmen der Natur, das Auflösungsvermögen zu verbessern, ist das Prinzip der lateralen Hemmung. In die aufsteigenden Bahnen aller Sinnessysteme sind Synapsen eingeschaltet. Dabei besteht nirgends eine absolut isolierte Leitung, die durch benachbarte Bahnen nicht beeinflusst wird, auch dann nicht, wenn wir eine 1:1-Projektion vom Rezeptor zur zentralen Projektion annehmen können. Immer werden die einzelnen Bahnen durch Kollaterale benachbarter Bahnen beeinflusst: Eine stärker erregte Bahn hemmt eine schwächer erregte Nachbarbahn. Dadurch wird der Unterschied im Erregungspegel zwischen unterschiedlich erregten Bahnen im Verlauf der aufsteigenden Bahn immer größer und der subjektiv empfundene Kontrast steiler als der objektive Kontrast der Bildpunkte auf der Retina. Am besten ist das Phänomen an der Hörbahn untersucht, es lässt sich aber auch am Auge leicht anschaulich machen (Abb. 7).

Die physiologische Bedeutung der lateralen Hemmung liegt auf der Hand. Durch die Erhöhung des Kontrastes wird das räumliche Auflösungsvermögen trotz optischer Mängel des Auges wesentlich verbessert. Sie korrigiert z. B. für das subjektive Bild die chromatische und die sphärische Aberration und kleinere Fehler des optischen Systems.

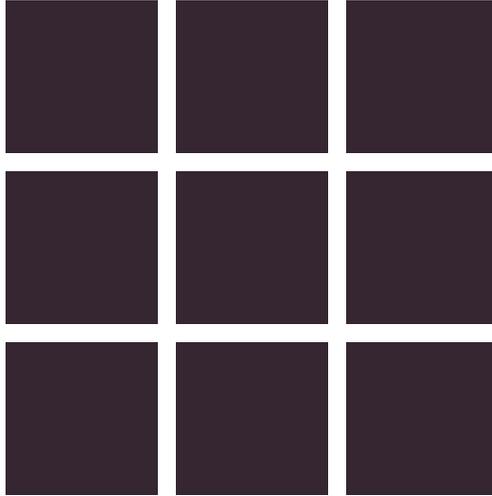


Abb. 7: Gittertäuschung nach Hermann. Betrachtet man das weiße Gitter auf schwarzem Grund, so erscheinen an den Kreuzungsstellen graue Flecke. Die Ursache ist die laterale Hemmung: An den Bahnen, die dem Bild der Kreuzungsstellen entsprechen, wird die Erregung durch die laterale Hemmung der ebenfalls stark erregten Nachbarbahnen gehemmt, während die Nachbarschaft der Bahnen, die den durchgehenden weißen Linien entsprechen, weniger gehemmt wird.

### 3.4 Zeitliches Auflösungsvermögen

Wenn man Lichtblitze in kontinuierlicher Folge mit zunehmender Frequenz auf das Auge wirken lässt, so wird der subjektive Eindruck von einzelnen Lichtempfindungen über eine Flimmerempfindung schließlich zu einer kontinuierlichen Empfindung übergehen. Das zeitliche Auflösungsvermögen ist also begrenzt. Auf dieser Tatsache beruhen Film, Fernsehen, Bildschirmarbeit, aber auch die Möglichkeit, Leuchtstoffröhren zu verwenden. Die Frequenz der Lichtblitze, bei der die Flimmerempfindung in eine kontinuierliche Lichtempfindung übergeht, nennt man die Flimmerverschmelzungsfrequenz. Man sollte meinen, dass die Flimmerverschmelzungsfrequenz mit zunehmender Reizstärke abnimmt, weil ein stärkerer Reiz länger wirken sollte. Das Gegenteil ist aber der Fall, weil mit wachsender Reizstärke bereits in den ersten Neuronen der Sehbahn zunehmend Hemmungsvorgänge ins Spiel kommen, die die durch den Lichtblitz ausgelöste Erregung wieder unterdrücken. Im „mesopischen“ Bereich, also im Bereich des Dämmerungssehens, liegt die Flimmer-

verschmelzungsfrequenz bei 10 Hz. Sie steigt mit zunehmender Leuchtdichte etwa proportional dem Logarithmus der Leuchtdichte an (Ferry-Porter-Regel) und hängt außerdem von der Größe des Sehfeldes und vom Ort im Gesichtsfeld ab (Abb. 8). Für kleine Testfelder ist sie am größten bei fovealer Betrachtung, für größere Testflächen bei zunehmend parafovealer Betrachtung. Daher bemerkt man das Flimmern von Fernsehbildern gelegentlich, wenn man das Gerät seitlich im Gesichtsfeld hat.

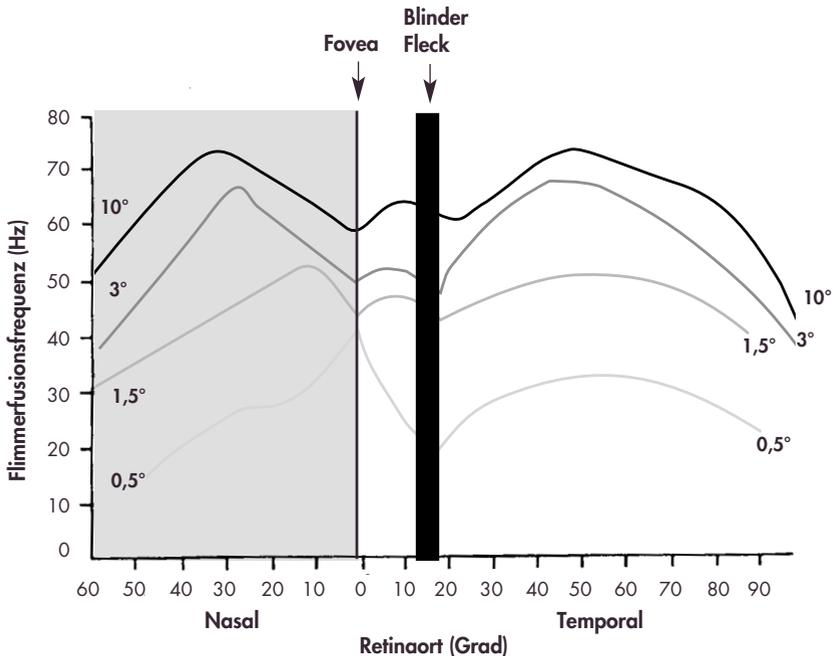


Abb. 8: Abhängigkeit der Flimmerverschmelzungsfrequenz vom Reizort bei verschiedener Reizfeldgröße (Zahlen an den Kurven). Reizstärke: 2460 nt. (Nach Hykema, 1942 aus Bornschein und Hanitzsch 1978)

Die hier gezeigten Kurven sind aus rechteckigen Lichtreizen mit einem Hell-Dunkelverhältnis von 1:1 gewonnen. Bei den meisten flimmernden Lichtquellen, vor allem beim Fernseh- und Bildschirm, leuchtet aber der Lichtpunkt mehr oder weniger nach. Die Zeitkurve der Leuchtdichte ähnelt also einer Sägezahnkurve. Unter diesen Bedingungen ist die Verschmelzungsfrequenz niedriger, die subjektiv empfunden

dene Helligkeit ist aber in jedem Fall proportional dem zeitlichen Mittelwert der Leuchtdichte. Daher erscheint das Bild auf einem Leuchtschirm bei gleicher maximaler Leuchtdichte umso heller, je länger der Schirm nachleuchtet.

## **3.5 Binokulares Sehen**

### **3.5.1 Bildverschmelzung**

Der Mensch nimmt bei binokularer Beobachtung in der Regel ein einfaches Bild der Umwelt wahr, obwohl die beiden Bilder auf der Netzhaut nicht identisch sind. Durch einen leichten Druck seitlich auf ein Auge kann man sich davon überzeugen, dass dies nicht so sein muss. Offenkundig werden bei der zentralen Verarbeitung der von der Netzhaut kommenden Erregungen bestimmte Stellen auf beiden Netzhäuten zu einem (subjektiven) Bildpunkt vereint. Solche Stellen werden als „korrespondierende Netzhautstellen“ bezeichnet. Es sind die beiden Foveae und (in guter Näherung) alle Stellen, die in gleicher Richtung gleichen Abstand von den Foveae haben. Der geometrische Ort aller Gegenstandspunkte, die auf korrespondierenden Netzhautstellen abgebildet werden, ist der Horopter. Unter der oben gemachten vereinfachten Annahme ist der Horopter in der horizontalen Ebene ein Kreis, der durch die beiden Knotenpunkte und den Fixationspunkt festgelegt ist (Abb. 9).

Daraus folgt, dass für jede Fixationsentfernung ein eigener Horopter existiert. Gegenstandspunkte, die außerhalb des Horopters liegen, werden aber nur dann doppelt wahrgenommen, wenn man die Aufmerksamkeit auf diesen Gegenstand richtet und wenn der Gegenstand eine bestimmte Mindestentfernung vom Horopter hat. Liegt der Gegenstandspunkt innerhalb dieses „Panumschen Raumes“, wird er einfach gesehen, die Abweichung der Bildpunkte von den korrespondierenden Netzhautstellen (die Querdissipation) wird zentral als Information für die Tiefenwahrnehmung benutzt.

Beim normalen Menschen entspricht das subjektive Bild der Umwelt, abgesehen von der Tiefenwahrnehmung, einem Bild, wie es von einem Auge (Z) entworfen würde, das sich in der Mitte zwischen den beiden Augen befindet und dessen „Netzhautpunkte“ jeweils den beiden korrespondierenden Netzhautpunkten der beiden Augen entsprechen (Abb. 10). Da auf beiden Augen der Fixationspunkt (A) auf der Fovea abgebildet wird, wird er auch auf der „Fovea“ von Z abgebildet und liefert nur einen Bildpunkt. Die Gegenstandspunkte B und C liegen aber weit außerhalb des Horopters, ihre Bildpunkte fallen nicht auf korrespondierende Netz-

hautstellen; sie liefern auf der „Netzhaut“ von Z jeweils zwei Bilder (bl, br, cl, cr) und können (bei ausreichender Querdissipation) als Doppelbilder wahrgenommen werden. Die Querdissipation wird aber für die Tiefenwahrnehmung verarbeitet. Dabei kommt es auf die Größe und die Richtung an: Der Gegenstandspunkt B, der weiter entfernt ist als der Fixationspunkt A, wird auf dem rechten Auge links, auf dem linken Auge rechts von der Fovea abgebildet, das vom rechten Auge entworfene Bild muss also rechts vom tatsächlichen Ort des Punktes B gesehen werden, das vom linken Auge entworfene aber links (ungekreuzte Doppelbilder,  $\beta_l, \beta_r$ ). Für den Punkt C sind die Verhältnisse umgekehrt, es entstehen gekreuzte Doppelbilder. Im täglichen Leben werden die Doppelbilder nicht wahrgenommen, weil die Aufmerksamkeit immer auf den fixierten Gegenstand gerichtet ist. Das Gehirn verarbeitet aber Querdissipationen bei ungekreuzten Doppelbildern im Sinne von „weiter entfernt als der Fixationspunkt“, bei gekreuzten Doppelbildern im Sinne von „näher“.

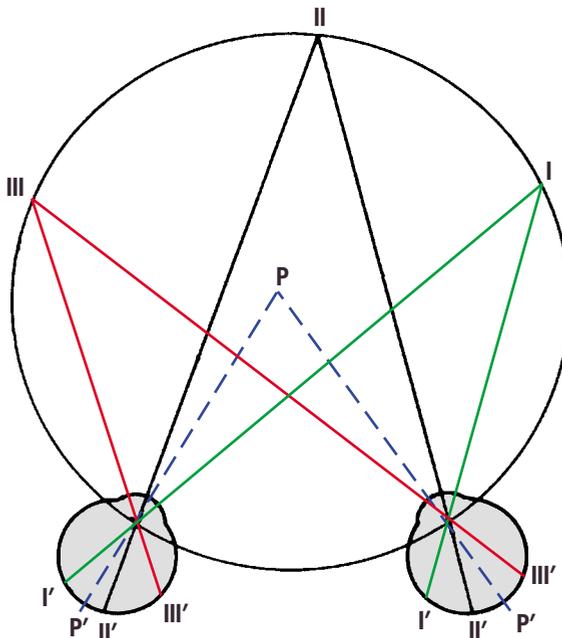


Abb. 9: Konstruktion des Horopters. Die Punkte I, II und III liegen auf dem Horopter und werden auf korrespondierenden Netzhautstellen (I', II', III') abgebildet. P' liegt vor dem Horopter, die Bildpunkte P' werden nicht auf korrespondierenden Netzhautstellen abgebildet. (Aus Reichel u. Bleichert, 1980)

Die bisher geschilderte Fusion zweier Netzhautbilder zu einem subjektiven Bild ist eine kombinierte sensomotorische Leistung, denn sie setzt neben der zentralen Fusion der Bilder die motorische Leistung der Konvergenz der beiden Augenachsen auf den Fixationspunkt (Orthophorie) voraus. Die neuralen Impulse, die zur Konvergenz der Augenachsen führen, sind mit der Akkommodation gekoppelt: Auch bei monokularer Betrachtung konvergieren die Augenachsen bei der Akkommodation auf die Nähe.

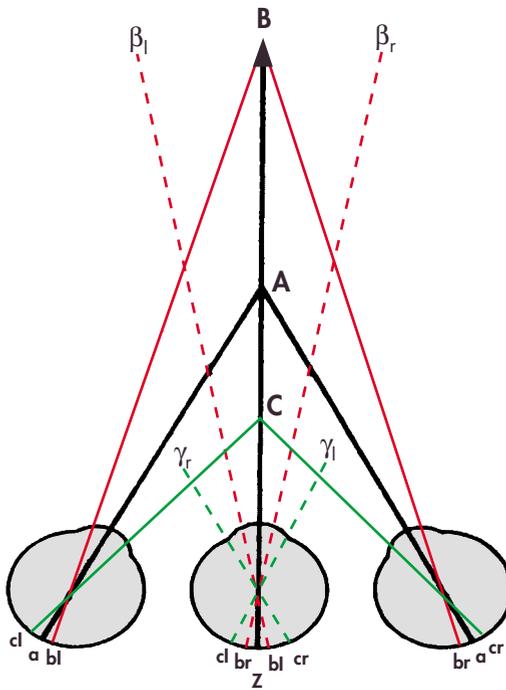


Abb. 10: Projektionen von Bildpunkten beim binokularen Sehen. Der Punkt A wird fixiert, er wird auf beiden Netzhäuten foveal abgebildet. Die Punkte B und C liegen vor bzw. hinter dem Horopter und werden nicht auf korrespondierenden Netzhautstellen abgebildet, sie können doppelt gesehen werden.

(Aus Reichel u. Bleichert, 1980)

### 3.5.2 Schielen (Strabismus)

Abweichungen der Augenstellung von der normalen Konvergenz der Augenachsen auf den Fixationspunkt kommen bei 5 bis 6 % der Bevölkerung vor, überwiegend als „Begleitschielen“ (Strabismus concomitans)\*. Um 80 % der Betroffenen schielen nach innen (Strabismus convergens, Esotropie), um 20 % nach außen (Strabismus divergens, Exotropie). Höhenschielen ist selten. Für die Entstehung des Begleitschielens kommen eine Reihe von Ursachen in Betracht, unter denen die Muskelanomalien eine untergeordnete Rolle spielen, auch wenn durch die operative Behandlung die Zugwirkungen einzelner Muskeln gestärkt oder abgeschwächt werden. Nicht korrigierte Refraktionsanomalien, vor allem die bei Kindern sehr häufige Hyperopie, können das Schielen begünstigen, weil Akkommodation und Konvergenz gekoppelte Reaktionen sind. Hyperope müssen bei gleicher Entfernungseinstellung stärker akkomodieren als Emmetrope, daher fällt auch ihre Konvergenzreaktion stärker aus, sie entwickeln einen Strabismus convergens, Myope aus analogen Gründen einen Strabismus divergens. Die häufigste Ursache des Schielens scheint eine genetisch bedingte Fusionsschwäche zu sein. Solche Fusionsschwächen müssen nicht unbedingt zum manifesten Schielen führen, viel häufiger ist latentes Schielen (Heterophorie), bei dem die Augenachsen bei binokularer Fixation in Normalstellung sind, die aber aus dieser Orthophorie nach Abdecken eines Auges in Schielstellung gehen, besonders häufig nach außen (Exophorie), seltener nach innen (Esophorie), sehr selten auch in einer Drehbewegung um die Achse. Heterophorie ist sehr häufig. Sie kann durch Ermüdung, Allgemeinerkrankungen, Alkoholgenuß und andere Ursachen temporär zum manifesten Schielen werden und zur Entstehung von Doppelbildern führen. Patienten mit ausgeprägter Heterophorie sind daher für länger dauernde Arbeit am Bildschirm nicht geeignet.

Bei jeder Form des Schielens wird der Fixationspunkt nur auf der Fovea eines Auges abgebildet, auf dem anderen Auge wird er parafoveal abgebildet. Auf beiden Augen wird also die Umwelt nicht auf korrespondierenden Netzhautstellen abgebildet, der Patient sollte Doppelbilder sehen. Das ist in der Tat nur dann der Fall, wenn das Schielen plötzlich auftritt, also z. B. nach Alkoholgenuß oder bei Augenmuskellähmung. Patienten mit Strabismus concomitans, also die überwiegende Mehrzahl der Schieler, sehen einfach. Bei der Prüfung der Sehschärfe findet man in der Regel ein Auge mit normaler Sehschärfe, das andere mit einem stark

---

\* Beim Begleitschielen bleibt der Schielwinkel bei Änderung der Blickrichtung annähernd gleich, während er sich beim „Lähmungsschielen“ deutlich vergrößert, wenn der Patient in die Richtung blickt, in die der gelähmte Muskel (meist M. abducens oder trochlearis) das Auge ziehen sollte.

verminderten Visus, in manchen Fällen aber auch Patienten, deren Visus auf beiden Augen normal ist. Die erste Gruppe sind unilaterale Schieler, die stets mit dem gleichen Auge fixieren, die letzteren alternierende Schieler, die wechselweise mit dem linken oder dem rechten Auge fixieren. Beim alternierenden Schielen wird mit dem Wechsel des fixierenden Auges das vom nicht fixierenden Auge entstehende Bild zeitweilig unterdrückt. Diese Suppression ist ein zentralnervaler Akt. Beim unilateralen Schielen kommt es zu einer im Endeffekt irreversiblen Dauerhemmung des zentralen Sehens (Amblyopie) mit einer kompensatorischen Veränderung der peripheren Korrespondenz (anomale Korrespondenz) und der Entwicklung einer „Pseudomakula“ in der Netzhautperipherie. Man kann die Pseudomakula mit dem Visuskop-Sternstest bestimmen: Eine im Augenspiegel eingebaute sternförmige Testmarke wird auf die Netzhautstelle projiziert, mit der der Patient die Marke fixiert. Entsprechend der geringen peripheren Sehschärfe (vgl. Abb. 4) ist auch die Sehschärfe dieses Auges meist stark vermindert. Wegen der Entwicklung der Amblyopie und dem damit verbundenen Verlust an Sehschärfe ist es wichtig, eine Schielbehandlung möglichst frühzeitig zu beginnen.

### 3.6 Gesichtsfeld und subjektives Bild

Die äußersten Gesichtsfeldgrenzen des menschlichen Auges reichen, sofern sie nicht durch anatomische Hindernisse eingeschränkt sind, bis etwa 180°. Das Auge gleicht damit scheinbar den extremsten Weitwinkelobjektiven, die von der Industrie „Fisheye“ genannt werden. Ein Bild, das mit einem solchen Objektiv aufgenommen wurde, gleicht aber überhaupt nicht dem Bild, das wir von der Umwelt bekommen. Das Auge arbeitet also offenbar nach einem anderen Prinzip. Die erste Frage ist, ob unser Gesichtsfeld tatsächlich so groß ist, wie wir es am Perimeter messen. Betrachten wir noch einmal die Sehschärfe im Gesichtsfeld (Abb. 4). Schon 10° parafoveal beträgt der Visus nur noch 0,2 und er nimmt nach der Peripherie noch weiter ab. Ein „Erkennen“ der Umwelt ist somit nur in einem extrem engen Bereich des Gesichtsfeldes möglich, eben im Bereich des Fixationspunktes. Wenn wir trotzdem in jedem Zeitpunkt ein vollständiges Bild von der Umwelt haben oder zu haben glauben, so ist das ein Ergebnis der zentralnervalen Summation zeitlich auseinanderliegender Sinneseindrücke. Wenn wir ein Bild betrachten, z. B. ein Porträt im Postkartenformat, so sind wir nicht in der Lage, bei festgehaltenem Fixationspunkt das ganze Gesicht zu erkennen. Wir suchen uns vielmehr ständig einen neuen (meist markanten) Fixationspunkt auf dem Bild, wir tasten also das Bild mit unseren Augen ab und unser Gehirn verarbeitet die in zeitlicher Folge gewonnenen Teilbilder zu einem scheinbar gleichzeitigen Gesamtbild. Man kann diesen

Vorgang deutlich machen, wenn man dem Betrachter eine Haftscheibe mit einem aufgeklebten kleinen Spiegel aufsetzt. Richtet man jetzt einen Lichtpunkt auf den Spiegel, so kann man die Augenbewegungen (Blicksakkaden) als Auslenkungen des reflektierten Strahles auf einem Fotopapier registrieren. Auf der Registrierung kann man dann Grundelemente des betrachteten Bildes erkennen, denn das Auge tastet sich von einem markanten Punkt zum anderen und zeichnet so das Bild nach. Ständige Augenbewegungen und Änderungen des Fixationspunktes sind mit dem normalen Sehvorgang unmittelbar verknüpft. Das Gehirn setzt dabei das Bild nicht so zusammen, wie es auf der Netzhaut abgebildet ist, es führt vielmehr Korrekturen durch, die das Bild „entzerren“. Stürzende Linien, wie sie den Fotografen wohl bekannt sind, kommen ebenso wenig vor wie optisch bedingte Verzerrungen, die man an einem isolierten Auge auf der Netzhaut beobachten kann. Auch Größenverhältnisse werden geändert. So nimmt z. B. die Bildgröße eines Gegenstandes auf der Netzhaut um das Doppelte zu, wenn man den Gegenstand von 40 cm auf 20 cm an das Auge heran bringt. Die subjektive Bildgröße bleibt aber dabei praktisch konstant, wie man leicht sehen kann, wenn man einen Bleistift dem Auge nähert. Diese Fähigkeit des Auges ist die Ursache für manche enttäuschenden Erlebnisse unerfahrener Fotografen.

## 4 Praktische Folgerungen

Zu den arbeitsmedizinischen Gesichtspunkten für Bildschirmarbeitsplätze liegen eine Reihe von Vorschriften und Empfehlungen vor, die sowohl die ergonomische Ausstattung des Arbeitsplatzes als auch ärztliche Betreuung betreffen. Sie behandeln ophthalmologische, orthopädische und psychologische Probleme. Die häufig geäußerten Beschwerden von Benutzern beruhen zum überwiegenden Teil auf Missachtung ergonomischer Regeln am Bildschirmarbeitsplatz. Neben den durch falsche Anordnung der Arbeitsplätze bedingten Beschwerden am Haltungs- und Bewegungsapparat der Benutzer (auf die hier nicht eingegangen wird) ist heute wohl die Hauptursache die falsche Beleuchtung des Bildschirms und des Arbeitsplatzes. Blendung vom Bildschirm durch gerichtete Reflexion ist bei modernen entspiegelten Bildschirmen zwar vermindert, sie lässt sich aber nicht vollständig ausschalten. Die Spiegelung vermindert den Kontrast der Zeichen auf dem Bildschirm, der ohnedies meistens geringer ist, als der Kontrast zwischen Druckbuchstaben und Papier. Der Effekt ist geringer, wenn man statt der heute noch verbreiteten „Negativdarstellung“ (helle Zeichen auf dunklem Grund) „Positivdarstellung“ verwendet.

Da bei der Positivdarstellung die Leuchtdichte des Bildschirms insgesamt größer ist als bei der Negativdarstellung, muss auch die Bildfrequenz des Bildschirms größer sein (Ferry-Porter-Regel, s. S. 21). Auch Blendung durch Gegenlicht vermindert den subjektiven Kontrast der Zeichen auf dem Bildschirm gegenüber dem Hintergrund, weil das Auge durch das Gegenlicht nicht an die mittlere Leuchtdichte des Bildschirms adaptiert ist, sondern an eine höhere Leuchtdichte. Aus dem gleichen Grunde sollten die Leuchtdichteunterschiede von Bildschirm, Vorlage und Tastatur möglichst klein gehalten werden.

Die Beleuchtungsstärke des Arbeitsplatzes sollte mindestens bei 300, möglichst jedoch bei 650 lx liegen. Nach DIN EN 29 241 Teil 3 soll die Zeichengröße eines Großbuchstabens unter einem Sehwinkel von 20 bis 22' erscheinen. Das entspricht einer Höhe von etwa 3 mm bei einem Betrachtungsabstand von 500 mm. Die zum Erkennen der Buchstaben notwendigen Details erscheinen unter einem Winkel von etwa 7 bis 9'. Die der Norm entsprechenden Zeichen sind also auch von Benutzern mit etwas verminderter Sehschärfe und bei nicht ganz optimalen Kontrastverhältnissen noch erkennbar. Für das Zeichenformat ist für Großbuchstaben eine Zeichenmatrix von 5 x 7, in besonderen Fällen (Korrekturlesen) 7 x 9 Bildelemente (Breite x Höhe) vorgeschrieben. Ähnliche Vorschriften gelten für das Strichrasterverfahren. Die Leuchtdichteunterschiede zwischen Zeichen und Untergrund sollen 3 : 1 betragen. Das Bild muss zeitlich und örtlich stabil sein. Alle diese Forderungen werden von guten Bildschirmen leicht eingehalten.

Bei Beachtung der ergonomischen Regeln bestehen für einen gesunden Menschen mit normalem Sehvermögen keine Probleme, die spezifisch für die Arbeit am Bildschirm wären. Häufiger Wechsel der Akkommodationsentfernung oder der Blickrichtung ist physiologisch für die Sehtätigkeit und stellt keine besondere Belastung dar. Daher können einseitig Blinde oder Menschen mit einseitig stark verminderter Sehschärfe (z.B. unilaterale Schieler) unbedenklich am Bildschirm arbeiten. Auch für Menschen mit Refraktionsanomalien gelten bei richtiger Korrektur keine besonderen Regeln. Presbyope können, unabhängig von einer Refraktionsanomalie, eine Brille speziell für die Entfernung der Bildschirmarbeit benutzen. Gegen die Verwendung von Mehrstärkengläsern bestehen keine grundsätzlichen Einwände.

Die häufig geäußerte Befürchtung, man könne sich durch Überanstrengung die Augen verderben, entbehrt jeder Grundlage. Auch eine lang dauernde Akkommodationsanstrengung per se verursacht keine wesentlichen Beschwerden, sie ist im Übrigen keine Spezialität von Bildschirmbenutzern, sondern kommt bei einer Reihe anderer Tätigkeiten (Uhrmacher, Feinmechaniker, Korrektoren) ebenso häufig vor. Spezialbrillen, die dem emmetropen Benutzer die Akkommodation und die Konvergenz der Augenachsen auf einen Punkt des Bildschirms abnehmen (durch Kombination von Sammellinsen und Prismen) sind daher zumindest sinnlos.

Trotzdem ist eine regelmäßige ärztliche Untersuchung von Beschäftigten mit Bildschirmarbeit, wie sie im berufsgenossenschaftlichen Grundsatz für arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen „Bildschirmarbeitsplätze“ (G 37) gefordert wird, wichtig, weil die Verminderung der Akkommodationskraft im Alter für den Menschen häufig kaum subjektiv bemerkt wird, die mit der Arbeit verbundene Sehtätigkeit aber dann erheblich mehr mentale Anstrengung erfordert und zu gehäuften Fehlern und erhöhter Beanspruchung führt. Es wäre aber falsch zu meinen, solche Untersuchungen auf den Personenkreis um 45 Jahre und darüber zu beschränken, weil bei Hyperopen schon ein kleinerer Verlust an Akkommodationskraft, wie er schon in jungen Jahren zu erwarten ist, zu Schwierigkeiten führen kann.

Bornschein H., Hanitzsch, R. (1978):

Die Netzhaut. In Baumgarten et al. Sehen. Sinnesphysiologie III Urban und Schwarzenberg, München, Wien, Baltimore.

Duane, A. (1912):

Normal values of accommodation at all ages. J. Amer. med. Ass. 59, 1010.

Graf, T. (1952):

Grundlagen der Akkommodationsmessung. Pflüg. Arch. 255, 302.

Kern, E. (1952):

Der Bereich der Unterschiedsempfindlichkeit des Auges bei festgehaltenem Adaptationszustand. Z. Biol. 105, 237.

Ranke, O.F. (1952):

Die optische Simultanschwellen als Gegenbeweis gegen das Fechnersche Gesetz. Z. Biol 105, 224.

Reichel, H., Bleichert A. (1980):

Medizinische Physiologie Bd. I, Schattauer, Stuttgart, New York.

Ruch, Th. C. (1965):

Vision. In Ruch and Patton (Herausg.) Physiology and Biophysics. Saunders, Philadelphia, London.

**Herausgeber:**



**VBG**

Verwaltungs-Berufsgenossenschaft  
Deelbögenkamp 4  
22297 Hamburg  
Postanschrift: 22281 Hamburg

Verfasser:  
Prof. Dr. med. A. Bleichert  
Lenhartzstraße 10  
20249 Hamburg

**Druck:**

C.L. Rautenberg-Druck  
Königstraße 41 - 25348 Glückstadt  
Ausgabe: Februar 2001