
2.1 Definition des Lichtes

Licht definiert man als Naturerscheinung, die im Spektralbereich der optischen Strahlung im sichtbaren Bereich bei einer **Wellenlänge** von **380 bis 780 nm** auftritt. Licht besitzt einen Doppelcharakter, ist sowohl elektromagnetische Welle als auch Photonenstrom. In Verbindung mit der Lichtausbreitung, Lichtfarbe und Lichtbrechung interessiert vorrangig die Eigenschaft „elektromagnetische Welle“, bei der fotografischen Abbildung oder dem Nachweis mit CCD-Chips oder Vidicons der Photonenstrom [2.1].

Die Zusammenhänge zwischen Wellenlänge λ , Frequenz f , und Ausbreitungsgeschwindigkeit C wird mit der Formel

$$C = \lambda \cdot f$$

beschrieben. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes beträgt im Vakuum ca. 300000 km/s, in lichtdurchlässigen Medien kann sie geringer sein. Tabelle 2.1 zeigt Beispiele für Lichtgeschwindigkeiten in verschiedenen Medien (C_{Medium}). Die Bestimmung ist über die Brechungszahl n möglich:

$$C_{\text{Medium}} = \frac{C_0}{n}$$

Licht breitet sich geradlinig aus. Seine Ausbreitung wird von magnetischen Feldern nicht beeinflusst, lediglich starke Gravitation etwa in Sonnennähe führt zu Biegungen der sonst geradlinigern Ausbreitung.

Tab. 2.1 Lichtgeschwindigkeiten und Brechzahlen verschiedener Medien

Medium	Lichtgeschwindigkeit C_{Medium} (km/s)	Brechungszahl = n (bezogen auf 20°C und 1013 hPa bei (=589,3 nm)
Vakuum (C_0)	299 792	1
Luft	299 711	1,000292
Wasser	225 000	1,333
Kronglas (leicht)	199 000	1,51
Polystyrol	189 000	1,59
Flintglas	186 000	1,613
Diamant	125 000	2,417

2.2 Lichtreflexion und Brechung

Ein **Spiegel reflektiert** auffallendes Licht **gerichtet**. Analog verhalten sich auch blanke oder polierte metallische und nichtmetallische Oberflächen. Man spricht von Spiegelung. Es gilt bei Spiegelung: Einfallswinkel = Ausfallswinkel (Reflexionswinkel).

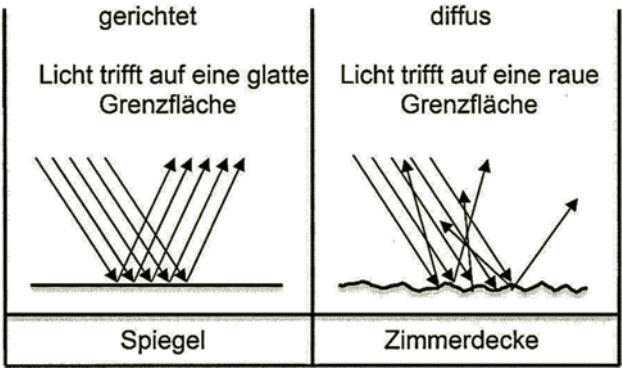
Bei Reflexion an Oberflächen wird nur ein Teil des einfallenden Lichtes reflektiert, ein Teil wird absorbiert. Beispielsweise beträgt der Reflexionsverlust abhängig von der Wellenlänge bei 500 nm an einer reflektierenden Al- Spiegelschicht ca. 8%, bei Silber nur 3%.

Strukturierte, raue Oberflächen, beispielsweise Textilien oder Papier reflektieren das Licht ebenfalls. Sie **reflektieren ungerichtet** und unregelmäßig in alle Richtungen, sozusagen **als diffuse Reflexion**.

Erfolgt die Reflexion in eine gewisse Vorzugsrichtung, so spricht man von **Streuung** (Abb. 2.1).

Tritt Licht unter einem Winkel $< 90^\circ$ von einem lichtdurchlässigen Medium in ein anderes, erfolgt sog. Brechung. Die Brechung ist mit einer Änderung der Ausbreitungsge-

Abb. 2.1 Gerichtete und diffuse Reflexion [2.1]

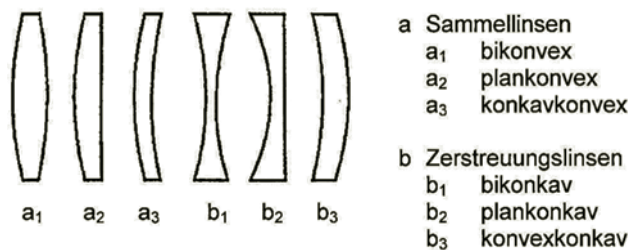


schwindigkeit verbunden und erfolgt nach dem **Snelliusschen Brechungsgesetz** (Vergl. UT):

$$\frac{\sin_{\alpha_1}}{\sin_{\alpha_2}} = \frac{C_1}{C_2}$$

mit den Geschwindigkeiten $C_1 = \text{Medium 1}$, $C_2 = \text{Medium 2}$ sowie den Sinuswerten der zugehörigen Einfallswinkel α_1 und α_2 . Tritt Licht aus einem Medium hoher Geschwindigkeit in ein Medium geringerer Geschwindigkeit, so wird es zum Einfallslot hin gebrochen ($\alpha_2 < \alpha_1$).

Abb. 2.2 Sammel- und Zerstreuungslinsen [2.2]



Lichtbrechung wird bei Linsen, die von Kugelflächen begrenzt sind, sog. Sphärischen Linsen, genutzt. Einfachstes Beispiel ist die Lupe: Man unterscheidet konvexe oder **Sam-mellinsen**, die vergrößern und konkave oder **Zerstreuungslinsen**, die verkleinern (Abb. 2.2 und 2.3) [2.2].

Linsensysteme, auch Objektive an Kameras besitzen Abbildungsfehler. Es werden z.B. bei solchen Systemen die Randstrahlen nicht mehr zu einem Punkt fokussiert, es tritt die sog. **sphärische Aberration** ein.

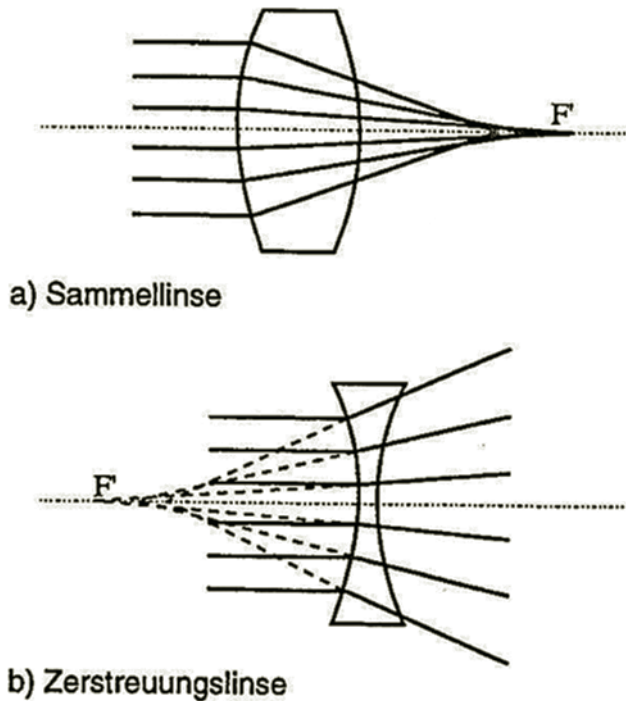
Ebenfalls fehlerhaft ist u.U. bei Linsensystemen die wellenlängenabhängige Brechung der unterschiedlichen Lichtwellenlängen in verschieden liegende Brennpunkte, die man als **chromatische Aberration** bezeichnet.

Bemerkenswert ist noch, dass sich bei schrägem Lichtdurchgang durch planparallele Platten die Einfallswinkel zur Ausfallswinkel nicht ändert. Es wird dabei allerdings ein abzubildender Bildpunkt parallel seitlich versetzt. Man spricht von der sog. **Doppelbrechung**.

2.3 Lichtdispersion und -farbe

Das natürliche Sonnenlicht ist weiß, enthält aber alle Farben von rot ($\lambda = 780 - 650 \text{ nm}$) bis violett ($\lambda = 425 - 380 \text{ nm}$). Licht erscheint farbig, wenn bestimmte Frequenzanteile des sichtbaren Spektrums fehlen.

Abb. 2.3 Strahlengang bei sphärischen Linsen [2.2]



Licht nur einer Wellenlänge nennt man **monochromatisch**, es ist ebenfalls farbig, z.B. Natriumlicht (gelborange).

Die spektrale Zusammensetzung des Lichtes ist abhängig von der Erzeugung, besonders von der Erzeugungstemperatur (Farbtemperatur).

Man unterscheidet bei Lichtquellen verschiedene Lichtfarben:

- Tageslichtweiß (tw) Farbtemperatur 6000 K,
- Neutralweiß (nw) Farbtemperatur 4000 K,
- Warmweiß (ww) Farbtemperatur 3000 K.

Bei hohen Farbtemperaturen sind im Spektrum die UV und Blaulichtanteile besonders hoch, bei niedrigen Anregungstemperaturen fehlen sie, bzw. die Rot- und Infrarotanteile sind größer.

Tagesweißlicht entspricht dem natürlichen Sonnenlicht. Es enthält fast das gesamte Spektrum und ist optimal geeignet, Farben von Gegenständen richtig wiederzugeben. Monochromatische Lichtquellen, wie Natrium-Dampflampen oder Halogen-Dampflampen verfälschen die Farben am meisten.

Eine Dispersion des weißen Lichtes kann über Prismen in einzelne Spektralfarbbanteile erfolgen. Anteile des Lichts können auch ausgefiltert werden (z.B. UV Licht bei Leuchtstoffröhren, UV- B, C bei Hg-Dampflampen für fluoreszierende Prüfungen). In Lichtwel-

lenleitern (Endoskope) kann es zu einer sog. **chromatischen Dispersion** kommen. Das Lichtleitermaterial bedämpft wellenlängenabhängig in Form eines Tiefpassfilters das übertragene Spektrum.

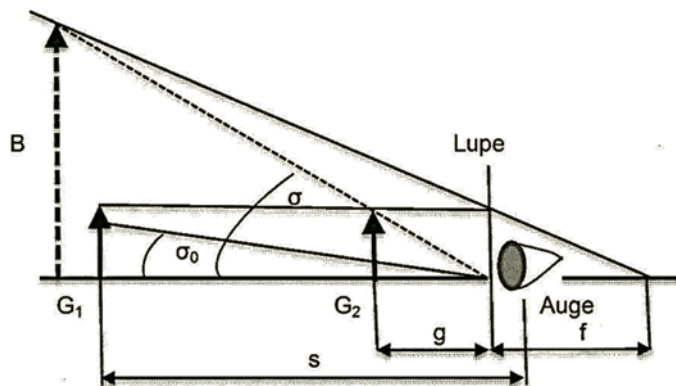
2.4 Optische Abbildung

Mit normalsichtigem Auge wird ein Gegenstand in Abhängigkeit vom Abstand verschieden groß wahrgenommen. Der Gegenstand erscheint umso größer, je näher er an das Auge herangeführt wird. Dabei wird gleichzeitig der Sehwinkel σ , unter dem der Gegenstand betrachtet wird, größer (Abb. 2.4).

Man stellt bei Annäherung an das Auge fest, dass es eine Grenze der Auflösung von Details des Prüfobjektes gibt. Ab einem bestimmten Abstand, dessen Größe individuell und altersbedingt unterschiedlich ist, kann das Auge Detailunterschiede nicht mehr erkennen. Ursache dafür ist die Unterschreitung des Sehwinkels von ca. 1 Bogenminute in Verbindung mit dem Auflösungsvermögen unserer Netzhaut. Durch eine Nahsichtbrille oder Lupe lässt sich der Sehwinkel vergrößern, die Details werden wieder erkennbar.

Die erreichte Vergrößerung Γ ergibt sich aus dem Verhältnis der Tangens der Sehwinkel:

$$\Gamma = \frac{\tan \sigma}{\tan \sigma_0} \quad \text{mit } \sigma_0 = \text{Sehwinkel des Auges ohne Lupe und} \\ \sigma = \text{Sehwinkel mit Lupe.}$$



σ_0	Sehwinkel des Gegenstandes in der deutlichen Seheweite s ohne Lupe		
σ	Sehwinkel des gleichen Gegenstandes innerhalb der einfachen Brennweite mit Lupe		
s	Seheweite (Auge zum Gegenstand)	g	Gegenstand im virtuellen Bild
G_1	Gegenstandsposition 1	G_2	Gegenstandsposition 2
B	Akkomodationsbereich	f	Distanz Lupe zum virtuellen Bild

Abb. 2.4 Sehwinkel und Vergrößerung mit einer Lupe [2.2]

Die eingesetzte Lupe **vergrößert** den Schwinkel und die Abbildung des Gegenstandes. Der Abstand muss innerhalb der einfachen Brennweite liegen. Es entsteht ein virtuelles Bild.

Das Erfordernis einer Vergrößerung kann durch sehr kleine oder weit entfernte Gegenstände entstehen. Das Auge nimmt den Gegenstand G1 in der deutlichen Sehweite s unter dem Winkel σ_0 wahr. Die unmittelbar vor dem Auge angeordnete Lupe erzeugt von dem gleichen Gegenstand, wenn er sich innerhalb deren Brennweite befindet (Gegenstandsposition G_2), ein virtuelles Bild. Die Vergrößerung kann dann durch den Ausdruck wiedergegeben werden [2.2]

$$\Gamma = \frac{G}{G} : \frac{g}{s} = \frac{s}{g}.$$

Wenn das Auge in der Entfernung das virtuelle Bild noch akkomodieren kann, können durch Verschiebung des Gegenstandes innerhalb der Brennweite der Linse auch andere Vergrößerungen erreicht werden [2.2].

2.5 Größen und Einheiten der Lichttechnik

Von einer Lichtquelle geht Licht aus, dessen Gesamtheit der **Lichtstrom Φ** (Einheit Lumen, lm) ist. Der Lichtstrom geht in alle Richtungen. Beleuchtet er eine Fläche, so spricht man von der **Beleuchtungsstärke E** (in lm/m^2 oder Lux (lx)).

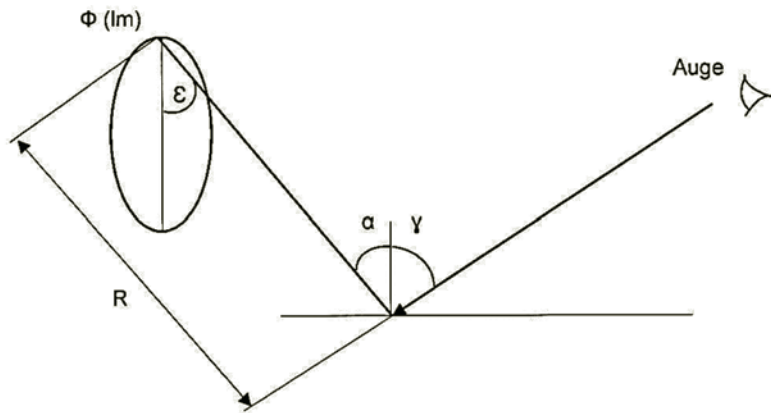
Betrachtet man den Teil des Lichtstromes, der nur in einem Teil des Raumes, in dem sog. Raumwinkel gemessen wird, ist das die **Lichtstärke I** (Candela, cd). Die Lichtstärke, die auf eine Fläche auftrifft, sie leuchten lässt (durch diffuse Reflexion oder bei Mattglas durch hindurch tretendes Licht selbst leuchtend) erzeugt eine **Leuchtdichte L** in cd/m^2 , (vergl. DIN EN 25580 [2.4] Betrachtungsgeräte für die industrielle Radiografie).

Der Zusammenhang zwischen Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke (Abb. 2.5) ist einfach, wenn die Fläche F senkrecht getroffen wird und der Abstand R groß genug ist ($R^2 \gg F$). Dann gilt bei $1 \text{ lx} = 1 \text{ cd}/\text{m}^2$ mit $R = 1 \text{ m}$

$$E = \frac{I \cdot \cos \alpha}{R^2}$$

Dabei ist α der Winkel zwischen der Flächennormalen und der Richtung des einfallenden Lichtes.

Die Beleuchtungsstärke ist mit einem Luxmeter messbar. Zur Messung der Leuchtdichte ist bei einigen Luxmetern ein Aufsatzkegel vorhanden, der die Messung in cd/m^2 ermöglicht. Die Prüfflächen werden beleuchtet, aber unser Auge nimmt **die Leuchtdichte** der beleuchteten Fläche auf.



α	Winkel zwischen der Flächennormalen und der Richtung des einfallenden Lichtes
R	Abstand der Lichtquelle zur beleuchteten Fläche
Φ	Lichtstrom
γ	Winkel zwischen dem Beobachter und der Flächennormalen

Abb. 2.5 Zusammenhänge Leuchtdichte, Beleuchtungsstärke [2.3]

$$\text{Leuchtdichte } L = \frac{\text{Lichtstärke}}{\text{Fläche}} \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$$

Was wir wahrnehmen, hängt noch davon ab, wie die Oberfläche reflektiert. Messbar sind die Beleuchtungsstärken, deren Größe für die spezielle VT $\geq 500 \text{ lx}$ betragen soll. Für die allgemeine VT genügen 150 lx (ASME-Code, Sect. V, Art. 9).

L ist auch $E \times \rho$ mit ρ als Reflexionsgrad. Der Reflexionsgrad ist abhängig vom Einfallswinkel des Lichtes und dem Winkel zwischen dem Beobachter und der Flächennormalen [2.2].

2.6 Beleuchtungs- und Betrachtungsrichtung

Ein beleuchteter Körper wirft Schatten. Je nach Größe der Lichtquelle entsteht ein Kernschatten und ein mehr oder weniger großer Halbschatten (Abb. 2.6 und 2.7). Besitzt der bestrahlte Körper eine raue Oberfläche, kann dies bei senkrechter Beleuchtung kaum oder nur schlecht erkannt werden. Eine schräge Beleuchtung bringt günstigere Ergebnisse, da die Konturen der Rauigkeit durch Schattenwurf verbessert werden (Kontrastverbesserung). Diese Verbesserung ist sowohl bei senkrechter Beleuchtung als auch bei Betrachtung aus der Beleuchtungsrichtung erkennbar. Eine Beobachtung entgegengesetzt zur Beleuchtungsrichtung ist bei diffus reflektierenden Oberflächen möglich, erfolgt aber gerichtete Reflexion, besteht Blendung.

Abb. 2.6 Kern- und Halbschatten bei Verwendung zweier punktförmiger Lichtquellen [2.3]

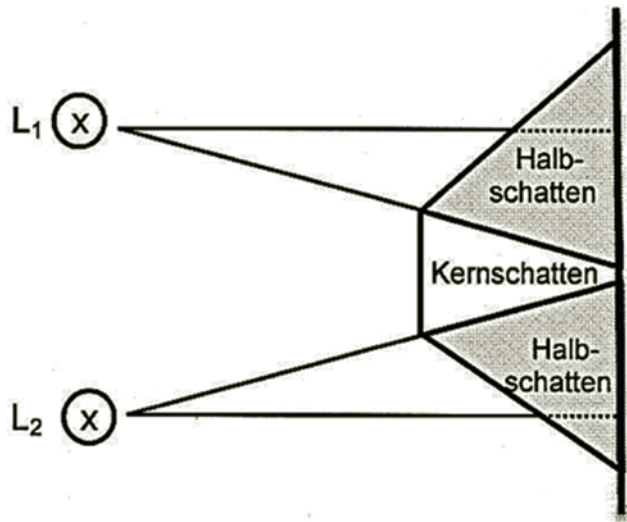
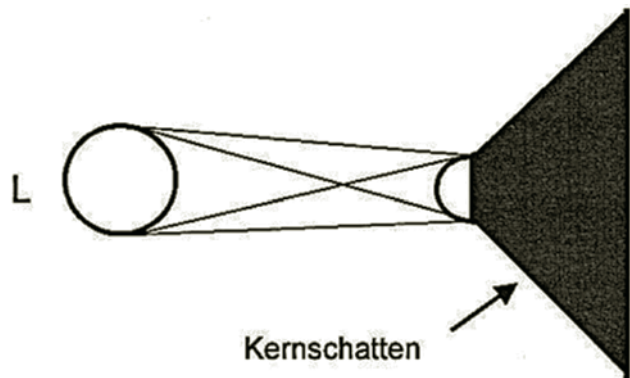


Abb. 2.7 Kern- und Halbschatten bei Verwendung von flächenhaften Lichtquellen [2.3]



Bezüglich der Beleuchtungsrichtung gibt es vielfältige Techniken in der Mikroskopie, Kriminaltechnik und bei der Rauigkeitsmessung. Scharfe, kontrastreiche Schatten entstehen durch gebündelte gerichtete Bestrahlung bei kurzen Abständen zwischen Lichtquelle und Objekt. Diffuse und großflächige Lichtquellen werfen kaum scharfe Schatten.

2.7 Sehfähigkeit und Sehvermögen

Jeder Prüfer, der für die VT zertifiziert werden will, muss seine Sehfähigkeit gemäß DIN EN ISO 9712 [2.7] nachweisen. Dazu muss er seinen Nahsehvisus im Abstand von 30 cm durch Lesen von Buchstaben und Zahlen bestimmter Größe nachweisen (Jägertafel; DIN EN ISO 9712 J 1; ASME J2 [2.8]) und Farbkontraste unterscheiden können. Dieser Nach-

weis wird kurz als „Sehtest“ bezeichnet. Die dabei ermittelte Sehschärfe, z.B. 2 Linien getrennt wahrzunehmen, wird nach dem reziproken Sehwinkel in Bogenminuten angegeben also $1' = \text{Visus } 1$ (0,1 mm Differenz in 33 cm Abstand auflösen).

Für die allgemeine VT sind die Anforderungen eigentlich höher. Es muss räumliches Sehen vorausgesetzt werden, d.h. der Prüfer muss in der Lage sein, zwei Details hinsichtlich ihres unterschiedlichen Abstandes vom Betrachter unterscheiden zu können. Unsere Augen, die sich in bestimmtem Abstand voneinander befinden, können in Wechselwirkung mit dem Gehirn und unserer Erfahrung diesen Vorgang schnell erledigen.

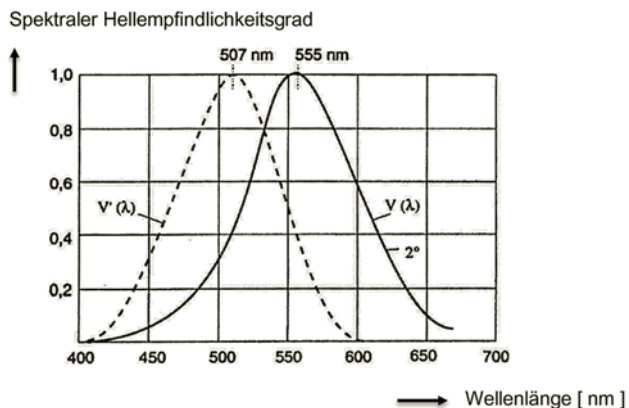
Das optische System unseres Auges, bestehend aus Netzhaut mit Zäpfchen und Stäbchensensoren, dem Glaskörper, der Augenlinse mit vor gelagerter Irisblende und der Hornhaut, nimmt wie eine Kamera oder ein Fernsehvidicon das Bild auf. Die Reize der Sensoren werden punktförmig über Nerven dem Gehirn zugeleitet, das daraus ein Bild erzeugt. Optisch entsteht auf der Netzhaut ein verkleinertes reelles Bild, das im Verhältnis zum Objekt auf dem Kopf steht. Für das Farbsehen sind die weniger empfindlichen Zäpfchen zuständig, für Schwarzweißsehen die sehr empfindlichen Stäbchen (Abb. 2.8).

Die Maximalempfindlichkeit unseres Auges liegt bei einer spektralen Helligkeit von 555 nm, sofern normale Beleuchtung vorliegt (sog. $V(\lambda)$ – Kurve). Bei schlechterer Beleuchtung verschiebt sich dieses Empfindlichkeitsmaximum zu 507 nm hin.

Unsere Augenlinse ist an Muskeln befestigt, die die Sehschärfe auf verschiedene Abstände einstellen können. Diesen Vorgang nennt man **Akkommodation**. In höherem Alter ist die Akkommodation auf nahe Abstände eingeschränkt. Das jugendliche Auge kann bis auf 10 cm Abstand noch akkomodieren. Als Normalabstand wird eine **deutliche Sehweite** mit **25 cm** festgelegt.

Das Gesichtsfeld des gesunden normalsichtigen Augenpaars beträgt ca. 60° (ohne Kopf- und Augenbewegung). Das Blickfeld mit Augenbewegung ist größer. Unter **Adaption** versteht man die Anpassung des Auges an unterschiedliche Leuchtdichten. Der Empfindlichkeitsbereich geht dabei von 10^{-6} bis 10^5 cd/m^2 , die Anpassungszeit von 5–10 Min. für Zäpfchen, bis 30 Min. für Stäbchen. Adaptionszeiten sind für die Anpassung von Prüfern an Prüfbedingungen von besonderer Bedeutung.

Abb. 2.8 Spektrale Empfindlichkeiten des Auges [2.3]



Wesentlich für eine gute Erkennbarkeit von Einzelheiten an Objekten ist die **Schleistung**. Darunter versteht man die Fähigkeit, Objekteigenschaften zu erkennen und zu bewerten. Sie ist von einer Reihe von Einflussfaktoren abhängig, beispielsweise vom Sehvermögen, Objekteigenschaften, Kontrast zwischen Objekt und Umfeld, Bewegungen und der Wahrnehmungszeit. Maßgeblich ist der **Kontrast**, der sowohl Leuchtdichtekontrast als auch Farbkontrast sein kann.

2.8 Beobachtungsfehler und optische Täuschungen

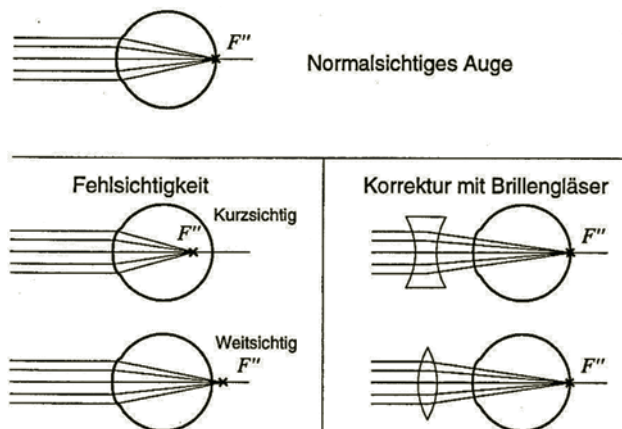
Die Möglichkeiten bei der Visuellen Prüfung Fehler zu übersehen oder sich zu täuschen, sind vielfältig. Es ist daher ratsam, reproduzierbare Belege anzufertigen (Fotos, Abdrücke, Videoaufzeichnungen o.ä.). Beobachtungsfehler kommen meist zustande, wenn bei längerer Tätigkeit Ermüdung eintritt. Begünstigend dabei sind die Monotonie von Abläufen, ungünstige Beleuchtungsbedingungen, aber auch Wegfall des räumlichen Sehens bei Lupenbetrachtung und Einschränkung des Gesichtsfeldes. Bei Arbeiten mit Lupen mit hoher Vergrößerung können große Unregelmäßigkeiten übersehen werden.

Bei der Betrachtung regelmäßiger Strukturen in unterschiedlichen Abständen kann es durch Parallaxenverschiebung zu Fehlinterpretationen kommen. Physiologisch besteht durch Eigenschaften des Auges die Möglichkeit, Details nicht zu sehen, nämlich dann, wenn das Detail im Auge auf den sog. grauen Fleck projiziert wird.

Optische Täuschungen sind besonders dann möglich, wenn Bewegungen ablaufen oder kurzzeitige Helligkeitsänderungen erfolgen, z.B. bei Blendung. Es ist bekannt, dass unser Auge mehr als 25 Wechsel pro Sekunde nicht mehr auflösen kann. Das trifft aber nur unter Normalbedingungen zu.

Extreme Belichtungen der Netzhaut führen zur Überlastung der Sensoren und zu partieller Blindheit. Ist dabei die Umgebungsleuchtdichte extrem verschieden von der Blendungshelligkeit, wird über längere Zeit das Auge mit hell und dunkel getäuscht. Bewegt

Abb. 2.9 Kurz- und Weitsichtigkeit und deren Korrektur durch Brillen [2.2]



sich bei intensiver Betrachtung ein Prüfobjekt längere Zeit in eine Richtung (weg vom Betrachter) und wird dann angehalten, so erfolgt scheinbar eine Bewegung in umgekehrter Richtung.

Am bekanntesten sind wohl beim Menschen die Kurz- und Weitsichtigkeit als Sehstörungen, die durch den Optiker mit Brillen korrigiert werden (Abb. 2.9).

Literatur

- [2.1] Schiebold, Skript LVQ-WP Werkstoffprüfung GmbH VT3;
- [2.2] DGZfP, Skript VT2;
- [2.3] DGZfP, Skript VT3;
- [2.4] DIN EN 25580, ZfP Betrachtungsgeräte für die industrielle Radiographie; Minimale Anforderungen, Juni 1992;
- [2.5] DIN EN 970, ZfP von Schmelzschweißnähten- Sichtprüfung, März 1997;
- [2.6] DIN EN ISO 17636, ZfP von Schweißverbindungen, Sichtprüfung, Mai 2011;
- [2.7] DIN EN ISO 9712, Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung, Dez. 2012;
- [2.8] ASME-Code Section V, Artikel 9;

Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung - Sichtprüfung

Schiebold, K.

2015, XVI, 132 S. 73 Abb., 13 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-662-44666-9