

4., vollständig überarbeitete
und erweiterte Auflage



Ulrich SCHMIDT · Johannes C. SCHMIDT

Digitale Film- und Videotechnik

Eine Einführung für Medientechnik
und Filmhochschulen

HANSER



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Medien

Herausgeber: Ulrich Schmidt

Weitere Bücher der Reihe:

Fries: Mediengestaltung

Görne: Tontechnik

Greule: Licht und Beleuchtung im Medienbereich

Kapp: Motion Picture Design

Petrasch: Videofilm

Raffaseder: Audiodesign

Rehfeld: Game Design und Produktion

Johannes Schmidt/Ulrich Schmidt

Digitale Film- und Videotechnik

Eine Einführung für Medientechnik und Filmhochschulen

4., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

Die Autoren:

Dipl.-Ing. Johannes Schmidt (M.A.), Ingenieur für digitale Medien- & Broadcastsysteme, Produktionsingenieur
NDR Fernsehen

Prof. Dr. Ulrich Schmidt, Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Hamburg



Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benützt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2023 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Frank Katzenmayer

Herstellung: Frauke Schafft

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Titelmotiv: © Johannes Schmidt

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Satz: Eberl & Koesel Studio, Kempten

Druck und Bindung: Beltz Grafische Betriebe GmbH, Bad Langensalza

Printed in Germany

Print-ISBN: 978-3-446-45463-7

E-Book-ISBN: 978-3-446-46069-0

Vorwort

Digitale Film- und Videotechnik ist heute allgegenwärtig – sowohl im Produktionsumfeld als auch im Alltag. Ob Sportübertragung im Fernsehen, Streaming von Filmen und Serien, Webvideos oder der klassische Besuch im Kino, alle Rezeptionsformen basieren inzwischen auf den gleichen Formen des digitalen Videosignals, der Bildaufnahme oder Datenreduktion, die in diesem Buch vorgestellt werden. Dabei haben sich die Bereiche Film und Video, die in der Geschichte technisch auf sehr unterschiedlichen Ansätzen basierten, in den letzten zwanzig Jahren immer weiter angenähert.

Dieses Buch stellt die grundlegenden Aspekte der digitalen Film- und Videotechnik beginnend bei den analogen Signalformen vor. Die Technologien zur digitalen Bildaufnahme, Speicherung, Bearbeitung und Wiedergabe bewegter Bilder werden im Detail und anwendungsnah erklärt.

Das Buch greift außerdem Aspekte der konventionellen Film- und Kinotechnik auf, beginnend bei den Grundlagen der Filmschwärzung über die analoge Kinokamera und den Kinoprojektor bis hin zum Filmtransfer in die digitale Ebene und wieder zurück.

Damit bildet dieses Buch nicht nur für all diejenigen, die mit modernsten Technologien produzieren, eine umfangreiche Einführung in die technische Welt der bewegten Bilder, sondern auch für alle, die sich nach wie vor zur konventionellen Produktionsweise des Kinos hingezogen fühlen. Für diejenigen, die mit professioneller Videotechnik in den Bereichen TV, Film, Veranstaltungstechnik oder Streaming arbeiten, soll das Buch als fundierter Werkzeugkasten sowie umfangreiches Nachschlagewerk dienen und ist somit vor allem für Studierende von Studiengängen im Bereich Medientechnik, Studierende an Filmhochschulen, Mediengestalterinnen und -gestalter oder Quereinsteiger:innen in den oben genannten Berufsfeldern gedacht.

Nachdem ich den überaus schnellen Wandel der Medientechnologie mit diesem Buch seit mehr als 20 Jahren begleitet habe, wandelt sich nun auch die Autorenschaft. Ich bin überaus erfreut, mit Johannes Schmidt eine Person gefunden zu haben, die dieses Buch kompetent und engagiert weiterführen wird. Johannes Schmidt hat einen Masterabschluss in Medientechnik und ist bestens qualifiziert. Trotz seines jungen Alters hat er neben fundierten Kenntnissen der Grundlagen und der modernsten Entwicklungen hin zu IP-basierten Produktionen auch weitreichende Erfahrungen im praktischen Produktionsumfeld. Hinzu kommt ein gutes Gefühl für die ästhetischen Dimensionen hochqualitativer Produktionen. Bezüglich seiner Eigenschaften als Buchautor bin ich sehr angetan von seiner Fähigkeit, auch komplexe Zusammenhänge in klarer Sprache auszudrücken und klare Bezüge herzustellen. Es fällt ihm leicht, inhaltliche Bereiche zu strukturieren und die Balance zu finden,

um trotz Verknappung des umfangreichen Stoffes an den richtigen Stellen praxisnah in die Tiefe zu gehen. Ich bin ihm sehr dankbar, dass er diese große Aufgabe übernommen hat.

Hamburg im August 2023

Dr. Ulrich Schmidt

Vorwort zur vierten Auflage

Die vierte Auflage dieses Buches wurde gegenüber der letzten Ausgabe grundlegend neu strukturiert, überarbeitet und erweitert. So ist beispielsweise ein neues Kapitel zum Thema Wahrnehmung hinzugekommen. Es bildet die Verständnisgrundlage für die neuen Abschnitte zu den Themen UHD, HDR und HFR, die sich wesentlich an den Eigenschaften und Grenzen der menschlichen visuellen Wahrnehmung orientieren.

Zahlreiche weitere Themen dieses Buches wurden an den aktuellen Entwicklungsstand im Bereich der professionellen Videotechnik angepasst und erweitert. Dazu gehören unter anderem die IP-basierte Übertragung unkomprimierter und komprimierter Videosignale in Produktionsnetzwerken, neue Displaytechnologien oder aktuelle Entwicklungen im Bereich der Digital Cinematography.

Auch die Struktur des Buches wurde grundsätzlich überarbeitet. Das zentrale Thema des digitalen Videosignals bildet direkt im Anschluss an die geschichtliche Einordnung und die Ausführungen zur Wahrnehmung das erste technische Kapitel. Die konventionelle Filmtechnik wurde hingegen in einigen Themenbereichen gekürzt, aktualisiert und im hinteren Teil des Buches platziert. Auf die Grundlagen folgen nun direkt im Anschluss die entscheidenden Themenbereiche zur digitalen Kamera, Videodaten-speicherung sowie zu Display- und Projektionstechnologien, die erweitert und neu strukturiert wurden und nun jeweils eigenständige Kapitel bilden. Das Kapitel zum Digital Cinema wurde mit einem stärkeren Fokus auf die DCI-Spezifikationen erweitert und um immersive, objektbasierte Audioformate ergänzt. Es bildet gemeinsam mit dem Kapitel zu aktuellen Abläufen der Postproduktion den Schlussteil des Buches.

Mein herzlicher Dank gilt Prof. Dr. Ulrich Schmidt für die langjährige Unterstützung und Förderung sowie das Vertrauen, dieses Buch in seinem Sinne weiterzuführen. Zudem möchte ich mich in besonderem Maße bei Nathalie Mai bedanken, die große Teile dieser Neuauflage vorab gelesen, fachlich geprüft und durch zahlreiche Anregungen bereichert hat. Weiterhin gilt mein Dank Niklas Jansen und Bernhard Schmidt für die vielen Anregungen zu ausgewählten Abschnitten und Abbildungen. Auch bei Frau Kubiak und Herrn Katzenmayer vom Hanser Verlag möchte ich mich herzlich für die vertrauensvolle Zusammenarbeit bedanken.

Viele Elemente und Abschnitte dieser Neuauflage (zum Beispiel das Thema Wahrnehmung) stammen weiterhin von Dr. Ulrich Schmidt. Andere Themenbereiche habe ich erweitert, ergänzt und neu strukturiert. Nun wünsche ich Ihnen viel Freude beim Lesen, Nachschlagen und Anwenden dieser spannenden Themenbereiche der Medientechnologie.

Hamburg im August 2023

Dipl.-Ing. Johannes C. Schmidt

Inhalt

Vorwort	V
1 Geschichte	1
2 Wahrnehmung	20
2.1 Lichttechnische Kenngrößen	21
2.2 Das Auge	23
2.3 Helligkeit und Kontrast	28
2.4 Grauwertunterschiede	30
2.5 Farbe	33
2.6 Die Zeitauflösung	37
2.7 Räumlichkeit und Stereoskopie	40
2.8 Die auditive Wahrnehmung	44
3 Das Videosignal und seine Schnittstellen	46
3.1 Analoge Videosignalformen	47
3.1.1 Der Bildaufbau	49
3.1.2 BAS-Signal und Gammakurve	50
3.1.3 Das Farbvideosignal	54
3.1.4 Analoge SD-Signale	57
3.1.5 Analoge HD-Signale	61
3.2 Digitale SD-Signale	62
3.2.1 Der Digitalisierungsprozess	63
3.2.2 Das digitale SD-Komponentensignal	65
3.2.3 Serial Digital Interface	70
3.2.4 Signalkontrolle	70

3.3	Digitale HD-Signale	72
3.3.1	Digitale HD-Schnittstellen	76
3.3.2	HD und 2K	78
3.4	Digitale UHD-Signale	79
3.4.1	UHD-Schnittstellen	84
3.4.2	UHD und HFR	87
3.5	High Dynamic Range (HDR)	90
3.5.1	Übertragungsfunktion und Codewortzuordnung	94
3.5.2	Hybrid Log Gamma	97
3.5.3	Perceptual Quantization (PQ)	100
3.5.4	HDR für Liveproduktionen	104
3.5.5	HDR im Kino	110
3.6	Schnittstellen	111
3.6.1	High Definition Multimedia Interface (HDMI)	112
3.6.2	DisplayPort	115
3.7	IP-basierte Videosignalübertragung	116
3.7.1	Systemarchitektur und Multicast-Routing	117
3.7.2	SDI over IP	122
3.7.3	Pfadredundanz	124
3.7.4	SMPTE ST 2110	125
3.7.5	Network Device Interface	132
3.7.6	Secure Reliable Transport (SRT)	133
4	Videodatenreduktion	137
4.1	Codec und Container	139
4.2	Grundlagen der Datenreduktion	140
4.2.1	Entropiecodierung (Redundanzreduktion)	140
4.2.2	Intraframe-Datenreduktion	142
4.2.3	Interframe-Datenreduktion	146
4.3	Standards zur Videodatenreduktion	148
4.3.1	JPEG und JPEG2000	149
4.3.2	JPEG XS	151
4.3.3	DV (Digital Video)	152
4.3.4	MPEG	153

4.3.5	H.264 (Advanced Video Coding – AVC)	156
4.3.6	H.265 (High Efficiency Video Coding – HEVC)	158
4.3.7	H.266 (Versatile Video Coding – VVC)	160
4.3.8	Google VPx	161
4.3.9	AV1	163
4.3.10	Intermediate-Codecs	164
4.3.11	RAW-Codecs	167
4.4	Containerformate	169
4.4.1	Material eXchange Format (MXF)	170
4.4.2	QuickTime (QT)	171
4.4.3	AAF & OMF	172
4.4.4	Einzelbildformate für das digitale Kino	172
5	Die digitale Film- und Videokamera	175
5.1	Die optische Abbildung	176
5.1.1	Objektivbefestigung und Auflagemaß	178
5.1.2	Die Blende	180
5.1.3	Fokus und Schärfentiefe	181
5.1.4	Brennweite und Abbildungsmaßstab	183
5.1.5	Bild- und Sensorgrößen	186
5.1.6	Crop-Faktor	190
5.1.7	Filter und Defokussierung	191
5.2	Bildwandler	193
5.2.1	CCD-Bildsensoren	194
5.2.2	CMOS-Bildsensoren	195
5.2.3	Dynamikumfang und Dual-ISO	200
5.2.4	HDR-Sensoren	204
5.3	Shutter und Belichtung	204
5.4	Farbbilderzeugung	207
5.4.1	Strahlteiler	207
5.4.2	Mosaikfilter	208
5.5	Signalverarbeitung	210
5.6	Bauformen	214
5.6.1	Kinokameras	215

5.6.2	Dokumentation und Reportage	223
5.6.3	EB-Kameras	226
5.6.4	Studiokameras	228
5.6.5	DSLR und DSLM	233
5.6.6	Sonderformen	237
6	Videodatenspeicherung	240
6.1	Magnetbandaufzeichnung (MAZ)	241
6.2	Optische Datenträger	245
6.3	Festwertspeicher	250
6.3.1	SD-Karten	251
6.3.2	P2, SxS, SR und Codex	253
6.3.3	CFast, XQD und CFexpress	255
6.3.4	Solid State Drives	258
6.4	RAID-Konfigurationen	260
7	Bildwiedergabe	263
7.1	Definition aktiver und passiver Bildwiedergabe	263
7.2	Großbildprojektion	264
7.2.1	LC-Projektoren	266
7.2.2	Reflektive LC-Projektion	268
7.2.3	Spiegelprojektion & Kinoprojektoren	270
7.2.4	Laserprojektion ohne DMD	273
7.3	Flachdisplays	274
7.3.1	LC-Displays	274
7.3.2	OLED-Displays	278
7.3.3	Micro-LED-Displays	281
8	Konventionelle Filmtechnik	283
8.1	Film als Speichermedium	283
8.1.1	Filmschwärzung	284
8.1.2	Farbfilm	286
8.2	Filmformate	288
8.2.1	Filmbreiten	289

8.2.2	Perforation	290
8.2.3	Randkennzeichnung	291
8.3	Filmeigenschaften	293
8.3.1	Belichtung und Schwärzung	293
8.3.2	Kennlinie und Kontrastumfang	294
8.3.3	Farbfilmeigenschaften	298
8.3.4	Lichtempfindlichkeit	299
8.3.5	Filmkorn	300
8.3.6	Auflösungsvermögen	302
8.4	Filmkamera und -projektor	304
8.4.1	Die Filmkamera	304
8.4.2	Filmprojektion	308
8.5	Filmproduktion	313
8.5.1	Filmaufnahme	313
8.5.2	Kopierwerksaufgaben	315
8.5.3	Der Filmschnitt	320
8.6	Transfer in die digitale Ebene	322
8.6.1	Die Bildauflösung	323
8.6.2	Die Grauwertauflösung	324
8.6.3	Filmabtaster	327
8.6.3.1	Filmabtastung bildpunktweise	329
8.6.3.2	Filmabtastung zeilenweise	330
8.6.3.3	Filmabtastung bildweise	332
8.7	Filmbelichtung	334
8.7.1	CRT-Belichter	335
8.7.2	Laserbelichter	335
8.8	Konventioneller Filmtton	336
8.8.1	Magnettonverfahren	339
8.8.2	Lichttonverfahren	339
8.9	Mehrkanaltonverfahren	341
8.9.1	Dolby Stereo	342
8.9.2	Dolby Digital	343
8.9.3	DTS und SDDS	345

9	Digital Cinema	347
9.1	Systemspezifikation der DCI	348
9.1.1	Bildtechnische Vorgaben	349
9.1.2	Audiotechnische Vorgaben	353
9.1.3	Aufbau des Digital Cinema Packages (DCP)	354
9.1.4	Digitale Wiedergabesysteme	356
9.2	3D-Kino	359
9.2.1	Polarisationsverfahren	362
9.2.2	Shutter-Verfahren	364
9.2.3	Dolby 3D	365
9.2.4	3D-Produktion	366
9.2.5	3D-Postproduktion	368
9.3	Immersive Audioformate	369
10	Postproduktion	373
10.1	Digitale Schnittsysteme	376
10.1.1	Zentrale Elemente des Schnittsystems	380
10.1.2	Optionen zum Einfügen neuer Clips	383
10.1.3	Feinschnitt und Trimming	384
10.1.4	Keyframes und Effekte	386
10.1.5	Audio und Zusatzfunktionen	387
10.1.6	Rendering und Export	389
10.2	Farbkorrektur und Color-Grading	391
10.2.1	Nodebasierter Prozess	393
10.2.2	Kontrollwerkzeuge und Color-Checker	396
10.3	Compositing-Systeme	399
10.4	Computeranimation	407
10.5	Schlusswort	410
	Literaturverzeichnis	411
	Index	415

1

Geschichte

Die Geschichte der Bewegtbildmedien, das heißt, die Verwendung von Bildsequenzen, die die Illusion einer Bewegung hervorrufen, begann mit der Filmtechnik und damit mit der Aneinanderreihung fotografischer Bilder. Die Fotografie wurde zu Beginn des 19. Jahrhunderts entwickelt, nachdem bestimmte Fortschritte in den Bereichen Chemie, Optik und Mechanik gemacht worden waren. Die Lichtempfindlichkeit von Silbersalzen wurde bereits 1727 entdeckt, doch erst 1826 gelang es J. N. Niépce, ein Bild auf einer Zinnplatte festzuhalten, was mit einer Belichtungszeit von acht Stunden verbunden war. Nach dem Tode von Niépce wurde die Entwicklung von Daguerre weitergetrieben und führte zu den sogenannten Daguerreotypen, Unikaten, die noch nicht vervielfältigt werden konnten.

Um 1838 experimentierte der Engländer Talbot mit Papier als Trägermaterial, das er durch Chlorsilber lichtempfindlich machte. Das nasse Papier musste mehr als zwei Stunden belichtet werden, bevor die Umrisse der Abbildung als Negativ erschienen, das heißt, dass helle Stellen im Gegenstand dunkel wiedergegeben wurden und umgekehrt. Das Negativpapier konnte anschließend durch Wachs transparent gemacht werden, sodass nach Durchleuchtung und Schwärzung eines zweiten Chlorsilberpapiers das Positiv erschien. Die Erfindung wurde Photo Drawing oder auch Photo Graphics genannt, woraus der Name Fotografie entstand, der das wesentliche Merkmal, nämlich die nicht flüchtige Speicherung des Bildes, bezeichnet. Zu diesem Zeitpunkt waren bereits zwei wesentliche Bestandteile der modernen Fotografie entwickelt, nämlich das Negativ-Positiv-Verfahren und die Verwendung lichtempfindlicher chemischer Schichten auf Silberbasis.

Durch die Entwicklung lichtstarker Objektive und die Verbesserung der lichtempfindlichen Substanzen konnte im Laufe der Zeit die Belichtungsdauer auf ca. 30 Sekunden gesenkt werden. Eine weitere wesentliche Unterschreitung dieses Wertes wurde möglich, als um 1860 nach einem Verfahren von Gray, Bingham und Archer ein feuchtes Bindemittel auf Glasplatten aufgetragen und mit lichtempfindlichen Silbersalzen überzogen wurde. Die Platte wurde nach der Belichtung sofort einer Entwicklung unterzogen, das heißt, die belichteten Stellen wurden chemisch gewandelt, wodurch sich das unsichtbare, latente Bild erheblich verstärkte. Anschließend entfernte man die nicht gewandelten Substanzen in einem Fixierprozess. Mit der Entwicklung und Fixierung lagen zwei weitere wesentliche Bestandteile des fotografischen Prozesses vor, die es nun ermöglichten, Belichtungszeiten im Sekundenbereich zu erreichen.

Durch die Verwendung von Gelatine als Bindemittel wurde das Verfahren weiter vereinfacht, da trocken gearbeitet werden konnte und auch die Entwicklung vor Ort nicht mehr erforderlich war /83/. Eine weitere entscheidende Vereinfachung ergab sich schließlich um

1888 durch die Verfügbarkeit von Nitrozellulose als flexiblem Schichtträger. Damit war die Basis der Filmtechnik geschaffen und die Fotografie wurde massentauglich. Die Popularisierung der Fotografie begann mit der Kodak-Box von G. Eastman, die mit aufrollbarem Film geladen wurde, sodass die Handhabung sehr vereinfacht war.

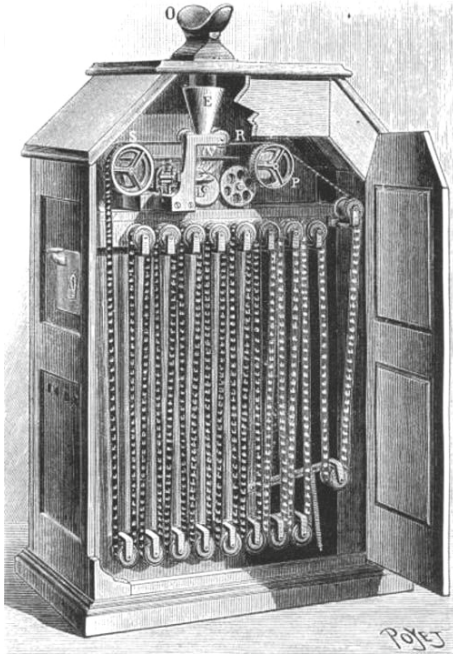


Bild 1.1
Kinematoskop

Der ab 1889 verfügbare Rollfilm und die verkürzten Belichtungszeiten ermöglichten es zu dieser Zeit, bereits einzelne Phasen von Bewegungen durch Reihenphotografie zu studieren bzw. bei Wiedergabe von mehr als 15 Bildern pro Sekunde einen fließenden Bewegungseindruck hervorzurufen. Mit dieser Bewegungsaufzeichnung, der Kinematographie, war ein neues Medium geboren. Neben dem flexiblen Rollfilm war dafür ein Apparat erforderlich, der den Film schnell genug transportierte und in den Transportpausen automatisch belichtete. Die Entwicklung eines solchen Apparates geschah in den Laboratorien von Thomas Alva Edison, der im Jahre 1891 den Kinematographen und das Kinematoskop als Geräte für die Aufnahme und Wiedergabe von Bewegtbildsequenzen zum Patent anmeldete (Bild 1.1). Der Filmtransport wurde dabei mithilfe einer Perforation im Film ermöglicht, die mit vier Löchern pro Bild definiert war. Das Kinematoskop war kein Projektionsgerät und damit nur für die Einzelbetrachtung geeignet. Eine Vorrichtung zur Projektion wurde in Europa entwickelt.

Im Jahre 1895 war der Cinematograph der Gebrüder Lumière (Bild 1.2) einsatzbereit, bei dem die Funktionen von Kamera und Projektor in einem Apparat vereinigt waren. Mittels eines Greifers wurden die Filmbilder vor das Bildfenster gezogen und nach kurzem Stillstand automatisch weitertransportiert. Obwohl die Brüder Skladanowski in Berlin bereits am 1. November eine Filmvorführung vor Publikum gaben, gilt die erste öffentliche Filmvorführung mit dem Gerät der Brüder Lumière am 28.12.1895 heute als Geburtsstunde des Mediums Film.



Bild 1.2
Gebrüder Lumière



Bild 1.3 Filmbilder aus „L'arrivée d'un train à La Ciotat“ (1895)

Zum ersten Mal war die Massentauglichkeit des Bewegtbildverfahrens als wesentliches Bestimmungsmerkmal erreicht, sodass sich die Gruppenrezeption als besonderes Spezifikum dieses Mediums etablieren konnte. Abgesehen von der Trennung von Kamera und Projektionsgerät hat sich das Grundprinzip der analogen Kinematographie seither nicht verändert: Der perforierte Filmstreifen wird bei der Aufnahme und Wiedergabe schrittweise transportiert und steht bei Belichtung bzw. Projektion still. Während des Transports wird der Lichtweg abgedunkelt. Die technische Entwicklung wurde dabei auch von Oskar Meßter vorangetrieben, der mit dem Malteserkreuz ein hochwertiges Schaltwerk für den intermittierenden Filmtransport einsetzte. Meßter gilt als Begründer der deutschen Filmindustrie und arbeitete als Techniker, Regisseur und Produzent.

Bereits ab 1897 begann durch die Brüder Pathé die Filmproduktion in großem Stil, durch die Brüder Lumière wurden die ersten Wochenschauen produziert. Ein Jahr später war mit der Doppelbelichtung bereits der erste Filmtrick entdeckt und 1902 wurde von Georges Méliès ein 16-Minuten-Film voller Spezialeffekte produziert (Bild 1.4). Der erste Animationsfilm, bei dem einzelbildweise belichtet und Objekte bewegt werden, entstand 1907.

Vor dem Ersten Weltkrieg dominierten die Handkurbelkameras, die in den 1920er-Jahren mit Federwerken ausgestattet wurden und mit denen man den Film im wahrsten Sinne des Wortes drehte. Schon damals waren die Kameras mechanische Präzisionsinstrumente. Ab 1908 wurden die Geräte mit Suchern ausgestattet, die es ermöglichten, das aufgenommene

Geschehen zu beurteilen und Bildkompositionen zu erzeugen. Stative mit Schwenkköpfen wurden entwickelt, die es gestatteten, den Schwenk des menschlichen Kopfes nachzuahmen und Fahrstative ermöglichten die Illusion von Raumtiefe durch Verschiebung der Verhältnisse von Vorder- und Hintergrund.

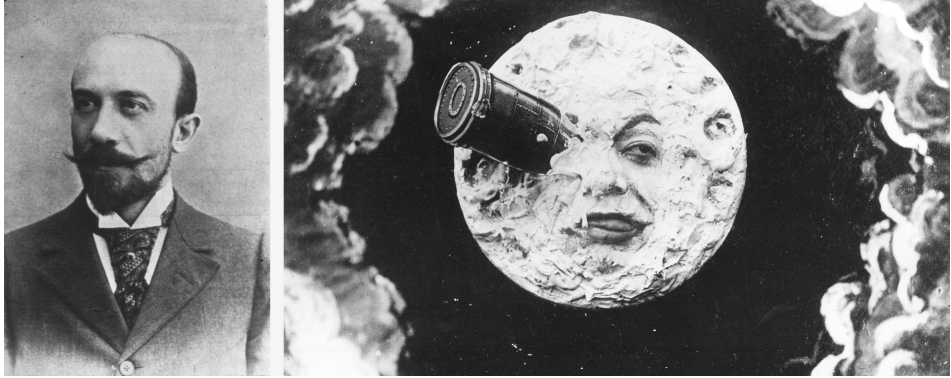


Bild 1.4 Georges Méliès und Filmbild aus „Die Reise zum Mond“

Parallel zur Technik wurde auch die Filmästhetik weiterentwickelt. Nachdem zunächst oft einfach reale kurze Szenen eingefangen wurden, ermöglichte es die Steigerung der Film­längen später ganze Geschichten zu erzählen. Diesbezüglich unterschied sich die Herangehensweise erheblich zwischen Ost und West. Während vor allem in den USA die Filminszenierung und die ökonomische Seite der Produktion im Vordergrund standen, wurden diese Aspekte in der UdSSR, insbesondere von den bekanntesten Vertretern Vertov und Eisenstein abgelehnt (Bild 1.5). Sie hatten einen eher auf künstlerische und gesellschaftliche Aspekte bezogenen Ansatz mit einem starken Fokus auf der assoziativen Montage der Bilder und waren die ersten Filmtheoretiker, die das Wesen der sogenannten 7. Kunstform ergründen wollten.

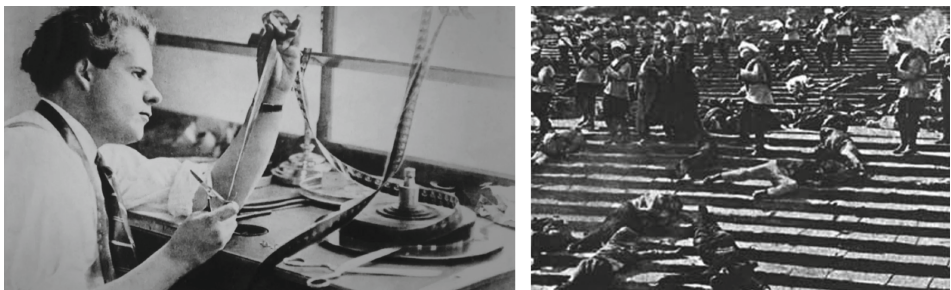


Bild 1.5 Sergej M. Eisenstein und Filmbild aus „Panzerkreuzer Potemkin“ 1925

Eisenstein wehrt sich gegen die Formatierung des Films, die in den USA sehr früh begann. Im Jahre 1909 wurde nach einer internationalen Vereinbarung der 35-mm-Film als Standardformat festgelegt. Um 1910 begann die Konzentration im Filmgeschäft und für die regelmäßigen Produktionen wurden große Tageslichtstudios gebaut, da die künstlichen Beleuchtungseinrichtungen noch nicht weit entwickelt waren. Und so wurde 1911 auch in Hollywood, einem Vorort von Los Angeles in den USA, ein Filmstudio eröffnet, dem innerhalb eines Jahres viele weitere Studios folgten, sodass sich dieser Ort innerhalb kürzester Zeit zum Zentrum der US-Filmindustrie entwickelte. Die Studios erreichten eine monopolartige Stellung und bestimmten die Rechte über Kameras und Vorführsysteme ebenso wie das Filmverleihgeschäft. Erst 1919 gelang es Regisseuren und Schauspielern, darunter Griffith und Chaplin, mit der Gründung der United Artists die enge Verflechtung aufzubrechen (Bild 1.6). Insgesamt etablierte sich in Hollywood die industrielle Herstellung weitgehend standardisierter Filme. In großen, technisch gut ausgestatteten Anlagen wurde in sehr arbeitsteiliger Form produziert. Zusammen mit dem Starkult entstand so die „Traumfabrik“, die bis heute ihre Funktion hat und den Weltfilmmarkt dominiert.



Bild 1.6
United Artists

Auch in Deutschland entwickelte sich in den 1920er-Jahren mit der UFA in Babelsberg ein Filmkonzern, der ähnliche Produktionsweisen verwendete. Hier wurde viel experimentiert, unter anderem mit der „Entfesselten Kamera“, die in atemberaubende Bewegungen versetzt wurde, um extrem eindrücklichen Szenen zu erzielen. Dies geschah in einem recht kurzen, aber sehr bedeutenden Zeitraum, bevor die Kamera durch die Einführung des Tonfilms wieder „gefesselt“ wurde, was unter anderem durch die schweren Schallschutzgehäuse bedingt war. In dieser Zeit entstanden die großen deutschen Filme, wie z.B. Fritz Langs *Metropolis*, der sehr viele tricktechnische Aufnahmen enthält (Bild 1.7).

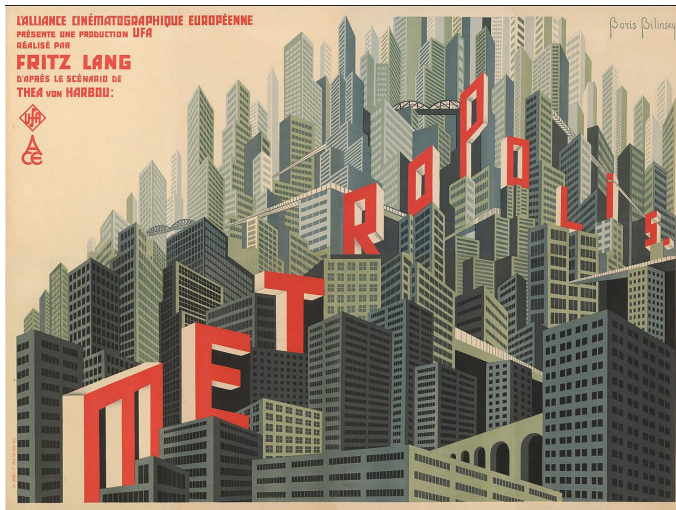


Bild 1.7 Plakat für den Film „Metropolis“ von Boris Bilinski (1900–1948)

Obwohl Edison bereits früh die Idee zur Verkopplung von Bild und Tonaufzeichnungsverfahren formulierte, dauerte es bis zu den 1930er-Jahren, bis der Tonfilm ausgereift war. Das Problem des Filmtons besteht darin, dass im Gegensatz zu Rundfunk und Fernsehen ein Verfahren zur Schallspeicherung erforderlich ist. Die Entwicklung von Schallaufzeichnungsverfahren begann parallel zur Entwicklung der Kinematographie zum Ende des 19. Jahrhunderts. Das erste Verfahren war die mechanische Speicherung von Schallschwingungen auf einer Wachsrolle, die 1877 von Edison vorgestellt und als Phonograph bezeichnet wurde. Dabei werden die Schwingungen einer vom Schall angeregten Mikrofonmembran auf eine Nadel übertragen, die eine Spur in das weiche Material schreibt. Bei der Wiedergabe wird die Spur wiederum mit einer Nadel abgetastet und eine Membran oder ein Wandler zur Erzeugung elektrischer Spannungen angetrieben.

Dieses Nadeltonverfahren wurde durch das 1888 von Emil Berliner entwickelte Grammophon abgelöst, das mit einer Platte anstelle der Walze arbeitet. Seit 1902 wurden dabei Schellackplatten verwendet. Um die Spieldauer einer Filmspule mit 300 Metern 35-mm-Film zu erreichen, wiesen diese Platten einen Durchmesser von circa 40 Zentimetern auf. So konnten Tonfilme mit einer Maximaldauer von elf Minuten am Stück gezeigt werden. Obwohl der historisch als erster Tonfilm bezeichnete Film „The Jazz Singer“ aus dem Jahre 1927 (Bild 1.8) mit diesem Nadeltonverfahren arbeitete, konnte sich das Verfahren im Filmbereich nicht durchsetzen, da eine sichere Synchronisation zwischen Bild und Ton aufgrund der separierten Geräte nicht zu gewährleisten war.

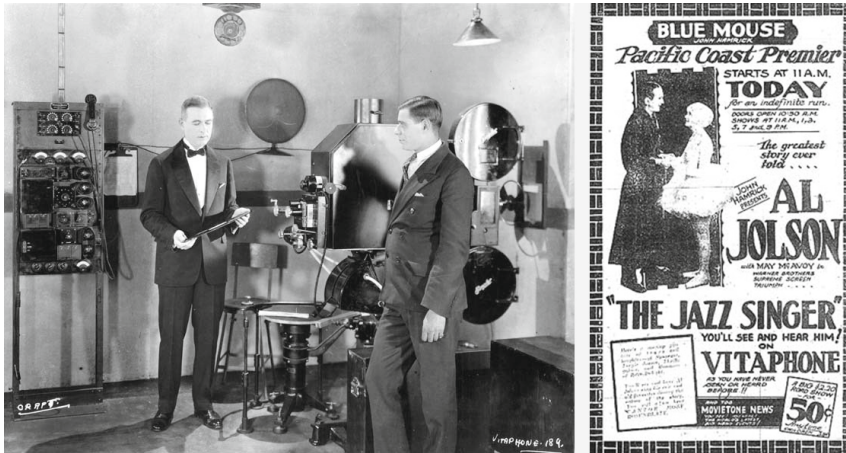


Bild 1.8 Ingenieure bei Western Electric demonstrieren das Vitaphone-Nadeltonverfahren (links), Zeitungsanzeige für den Film „The Jazz Singer“ mit dem Slogan „You’ll see and hear him!“ (rechts)

Eine unproblematische Synchronisation ergibt sich dagegen beim Lichttonverfahren, bei dem die wechselnde Schallintensität in eine veränderliche Filmschwärzung auf demselben Filmstreifen umgesetzt wird. Dieses Verfahren wird bis heute bei der analogen Filmwiedergabe verwendet, während auf der Aufnahmeseite ab den 1940er-Jahren Magnettonverfahren eingesetzt wurden. Die Entwicklung des Lichttons begann bereits zu Beginn des Jahrhunderts durch E. Ruhmer, doch erst im Jahre 1922 wurde von der deutschen Firma Trierigon ein Lichttonsystem zum ersten Mal bei einer öffentlichen Vorführung verwendet. Die Patente an dem Verfahren wurden in die USA verkauft, und von dort aus setzte sich der Tonfilm nach dem Erfolg von „The Jazz Singer“ so schnell durch, dass bereits zu Beginn der 1930er-Jahre die Ära der sogenannten Stummfilme wie „Modern Times“ von Charlie Chaplin (Bild 1.9) beendet war.

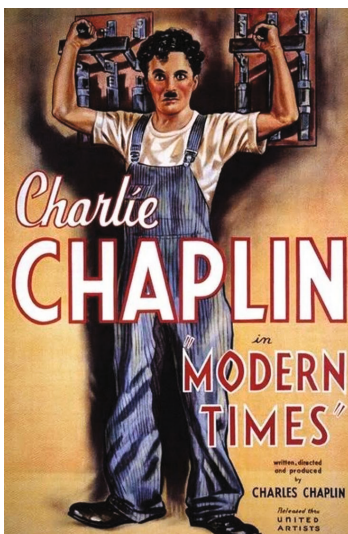


Bild 1.9 Filmplakat zu Charlie Chaplins „Modern Times“ (Stummfilm, 1936)

Diese Bezeichnung bezieht sich auf das Fehlen der direkt aufgenommenen Dialoge. Doch waren auch vor der Einführung des Tonfilms die Filmvorstellungen oft von Erzählern, Musikern und sogar Geräuschemachern begleitet, die direkt auf die dargestellten Bildsequenzen reagierten und eine besondere Form eines Live-Erlebnisses erzeugten, die auch heute noch ihre eigenen Reize hat. Die schnelle Einführung des Tonfilms hatte weitreichende Folgen. So mussten teure Tonaufzeichnungsgeräte angeschafft und bei der Produktion Rücksicht auf die Tonaufzeichnung genommen werden, was u. a. dazu führte, dass Außen- aufnahmen wegen der Störgeräusche erheblich eingeschränkt wurden und deutsche Schauspieler aufgrund von Sprachproblemen ihre US-Karrieren abbrechen mussten. Ab diesem Zeitpunkt musste zudem darauf geachtet werden, dass die Kameras sehr geräuscharm gebaut oder entsprechend mit schweren Schallschutzgehäusen versehen wurden. Zudem konnten die Kameraleute die Filmgeschwindigkeit nicht mehr frei bestimmen, sondern mussten sich an einen genormten Wert halten, der auf 24 Bilder pro Sekunde festgelegt wurde.



Bild 1.10
Citizen Kane, Orson Welles (Tonfilm, 1942)

Auch der Wunsch nach farbigen Abbildungen bestand sehr früh. Die Entwicklung der Farbfilmtechnik begann um 1870, die Einführung dauerte aber erheblich länger als die des Tonfilms. Nachdem zunächst mit einer nachträglichen Kolorierung der Schwarz-Weiß-Filme von Hand begonnen worden war, gelang es später, die lichtempfindlichen Emulsionen durch den Zusatz bestimmter Farbstoffe farbsensitiv zu machen. Ab 1915 verwendete man zwei Filmstreifen für Orange und Blaugrün; die Projektion erfolgte dabei ebenfalls zweistreifig. Ab 1922 konnten mit einer aufwendigen Technik die beiden Farbauszüge auf einen Filmstreifen aufgebracht werden und es kam der erste abendfüllende Farbfilm in die Kinos. Größere Bedeutung erhielt der Farbfilm aber erst durch das Technicolor-Verfahren. Dabei wurde auf drei unterschiedlich farbsensitive Streifen aufgezeichnet und die Auszüge wurden übereinander gedruckt. Der erste abendfüllende Farbfilm nach dem Technicolor-Verfahren entstand 1935. Das Verfahren erforderte jedoch Spezialkameras und war kostspie-

Fig. Einer der auch heute noch bekanntesten Filme, der das Verfahren einsetzte, war „Der Zauberer von Oz“ von 1939 (Bild 1.11).



Bild 1.11
Der Zauberer von Oz,
Victor Fleming, 1939

Preisgünstigere Farbfilm, bei denen auch aufnahmeseitig alle farbsensitiven Anteile auf einem Filmstreifen untergebracht werden konnten, standen erst ab 1948 zur Verfügung, nachdem die chromogene Entwicklung nutzbar war, die auf Erkenntnissen über die Bildung von Farbstoffen beim Entwicklungsprozess beruht und im Jahre 1912 von Fischer erstmals beschrieben wurde. Diese Erkenntnisse sind die Basis des Kodachrome-Verfahrens, das ab 1935 von Mannes und Godowsky in den USA eingeführt wurde. Ein Jahr später kam in Deutschland der Agfacolor-Film auf den Markt, der mit einem einfacheren Verfahren und mit fest in die Schicht eingebrachten Farbkupplern arbeitete. Nach dem Zweiten Weltkrieg wurden die Agfa-Patente durch die Siegermächte freigegeben und für die Entwicklung von Eastman-Color- und Fuji-Filmen, der zweiten bedeutenden Farbfilmmarke, verwendet.



Meilensteine der Entwicklung des Kinos

- 1888** Der etwa zweisekündige Film „Roundhay Garden Scene“ gilt als erster mit einer Bewegtbildkamera aufgenommene Film
- 1895** Erste öffentliche Filmvorführung der Gebrüder Lumière
- 1911** Gründung des ersten Filmstudios in Hollywood
- 1919** Gründung der „United Artists“
- 1922** Erster stereoskopischer 3D-Film: „The Power of Love“
- 1927** Erster Tonfilm: „The Jazz Singer“
- 1929** Erstmals Verleihung der Academy-Awards („Oscars“)
- 1932** Technicolor „Process No. 4“ verhilft dem Farbfilm zum kommerziellen Durchbruch und macht den Namen Technicolor zum Inbegriff für den Farbfilm
- 1952** Kommerzielle Einführung des Breitbild-Films unter dem Namen „Cinema-Scope“ durch 20th Century Fox
- 1971** Installation des ersten permanenten IMAX-Projektionssystems

- 1975** Einführung von Dolby Stereo ermöglicht vier Audiokanäle im Lichtton
- 1990** Erster ausschließlich digital generierter Spielfilm: „The Rescuers Down Under“
- 1992** Mit Dolby-Digital hält digitaler Ton Einzug ins Kino
- 1999** Erste öffentliche digitale Kinoprojektion unter Nutzung der DLP-Technologie
- 2009** Der 3D-Blockbuster „Avatar – Aufbruch nach Pandora“ wird zum erfolgreichsten Film aller Zeiten (Stand 2022)
- 2016** Erster Film, der nativ in 8K-DCI produziert wurde: „Guardians of the Galaxy Vol. 2“



Bild 1.12 Krieg der Sterne, George Lucas, 1977 (© Lucasfilm Ltd. & TM.)

Die Farbfilmtechnik wurde fortlaufend verbessert. Das Gleiche gilt für die Filmtontechnik. Der Ton ist dabei in besonderem Maße für die emotionale Wirkung des Films von Bedeutung. Entsprechend wurde bereits in den 1940er-Jahren mit Mehrkanalsystemen experimentiert, die das Räumlichkeitsgefühl der Audiowiedergabe steigern. Als erster Film mit Mehrkanalton gilt der Zeichentrickfilm „Fantasia“ von Walt Disney, der mit drei Tonkanälen für links, Mitte und rechts arbeitete. Etwas größere Verbreitung erreichten Mitte der 1950er-Jahre im Zusammenhang mit dem Breitbildverfahren Cinemascope vier- und sechskanalige Systeme, die bei der Wiedergabe das Magnettonverfahren verwendeten. Die Klangqualität ist hierbei vergleichsweise hoch, doch die Herstellung von Magnettonkopien übersteigt die Kosten von Lichttonkopien erheblich, sodass der Magnetton im Kino keine Bedeutung erlangen konnte. Seit Mitte der 1970er-Jahre fanden schließlich Mehrkanalsysteme erhebliche Verbreitung, die auf Lichtton beruhten. Diese Entwicklung ist bis heute eng mit dem Namen Dolby verknüpft. Neben der Entwicklung von Rauschunterdrückungssystemen gelang es den Dolby Laboratories, beim Dolby-Stereo-System vier Tonkanäle in zwei Lichttonspuren unterzubringen. Da das Verfahren abwärtskompatibel zu bestehenden Mono-Lichttonsystemen war, fand es im Laufe der Zeit eine erhebliche Verbreitung. 1992 wurde von Dolby schließlich das sechskanalige Dolby-Digital-Verfahren eingeführt, das wiederum abwärtskompatibel zu Dolby Stereo ist und nach wie vor große Bedeutung unter den digitalen Kinotonformaten hat.



Bild 1.13 Das Boot, Wolfgang Petersen, 1983 (© Bavaria Film)



Bild 1.14 Jurassic Park, Steven Spielberg, 1993 (© Universal Pictures)

Neben der Einführung der Digitaltechnik im Tonbereich gewann in den 1990er-Jahren auch die digitale Bildbearbeitung immer größeren Einfluss. Zum Ende des Jahrtausends waren die Computersysteme so leistungsfähig, dass ganze Spielfilmsequenzen in hoher Auflösung digital gespeichert aufwendig bearbeitet werden konnten – sowohl für eindrucksvolle Tricksequenzen und Special Effects als auch für ausgefeilte und selektive Grauwert- und Farbanpassungen. Die Sequenzen mussten anschließend zunächst wieder auf Film ausbelichtet werden.



Bild 1.15 The Matrix, Lana Wachowski/Lilly Wachowski, 1999 (© Warner Brothers)

Die Digitaltechnik eroberte anschließend auch Distribution und Wiedergabe. Für die Verteilung stehen hochwertige Datenreduktionsverfahren und hochauflösende Projektoren zur Verfügung. Mit dem Einsatz von digitalen High-Definition- und 4K-Kameras wurde dann schließlich eine vollständige digitale Infrastruktur im Kinobereich möglich (Digital Cinema), die einen Bruch mit den klassischen Produktions- und Distributionssystemen darstellt und sich denen im Fernseh- und Videobereich nähert.



Bild 1.16 Gravity, Alfonso Cuarón, 2013 (© Warner Brothers)

Die Grundlagen von Fernsehen und Video, die elektronischen Formen der Bewegtbildübertragung, wurden bereits zu einer Zeit geschaffen, als der Zellulosefilm gerade erst entwickelt war. Es war der Beginn der Fernsehtechnik als ein flüchtiges Medium, das als wesentlichen Unterschied zum Film die Eigenschaft hat, dass keine Bilder gespeichert werden, sondern zu jedem Zeitpunkt nur die Information über einen einzelnen Bildpunkt vorliegt. Aus diesem Grunde spielte die Filmtechnik als Speichermedium bis zur Einführung von Videorekordern auch im Bereich der Fernsehproduktion eine entscheidende Rolle.

Zwei für die Fernsehentwicklung wesentliche Erfindungen wurden bereits im 19. Jahrhundert gemacht. Im Jahre 1873 entdeckte C. May die Lichtempfindlichkeit des Selen, welche es ermöglicht, elektrische Ströme in Abhängigkeit von der Lichtintensität zu steuern. Um 1875 entwickelte Carey die Idee zur Zerlegung des Bildes in einzelne Elemente. Die parallele Übertragung der zugehörigen elektrischen Signale und die Ansteuerung eines entsprechenden Lampenrasters waren jedoch mit enormem Aufwand verbunden. Sehr wichtig für die Entwicklung der Fernsehtechnik ist daher die Erkenntnis, dass bei genügend schneller Abtastung die Bildpunktinformationen nicht gleichzeitig vorliegen müssen, sondern auch nacheinander übertragen werden können. Für entsprechende Realisierungskonzepte zur Bildzerlegung und Reduktion der großen Informationsflut erhielt im Jahre 1884 Paul Nipkow ein Patent. Nach Nipkow wird das Bild zeilenweise abgetastet. Dazu dient eine runde, drehbare Lochscheibe mit einer Anzahl von Löchern, die der Zeilenzahl des zerlegten Bildes entspricht. Die Löcher sind spiralförmig angeordnet, sodass die Abtastung der zweiten Zeile genau dann beginnt, wenn das erste Loch das Bildfeld verlassen hat (Bild 1.17). Die Helligkeitsinformationen der abgetasteten Zeile werden fortwährend von einer hinter dem Loch angebrachten Fozelle in elektrische Signale umgesetzt, wobei sich bei großer Helligkeit entsprechend hohe Ströme ergeben.

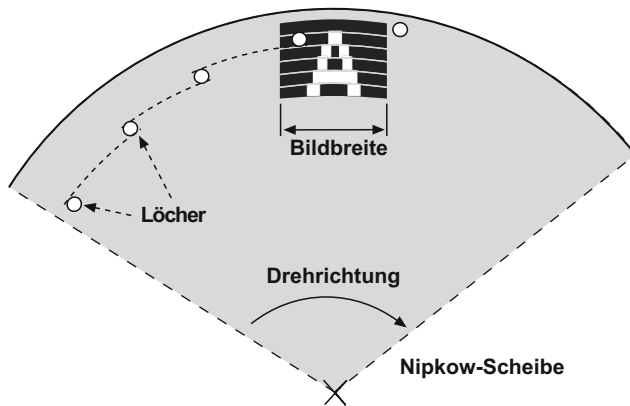


Bild 1.17
Nipkow-Scheibe

Im Empfänger steuert das übertragene elektrische Signal die Helligkeit einer schnell reagierenden Lampe. Vor der Lampe befindet sich eine ähnliche Nipkow-Scheibe wie im Sender. Falls beide Scheiben mit gleicher Umdrehungszahl laufen, und zwar so, dass der Beginn der ersten Zeile im Sender und im Empfänger übereinstimmen, entspricht das durch die Scheibe transmittierte Licht dem abgetasteten Bild (Bild 1.18). Wichtige Aspekte der heutigen Videosysteme sind hier bereits anzutreffen: Die Abtastung geschieht zeilenweise, die parallel vorliegenden Informationen werden seriell übertragen und es besteht die Notwendigkeit der Synchronisation von Sender und Empfänger.

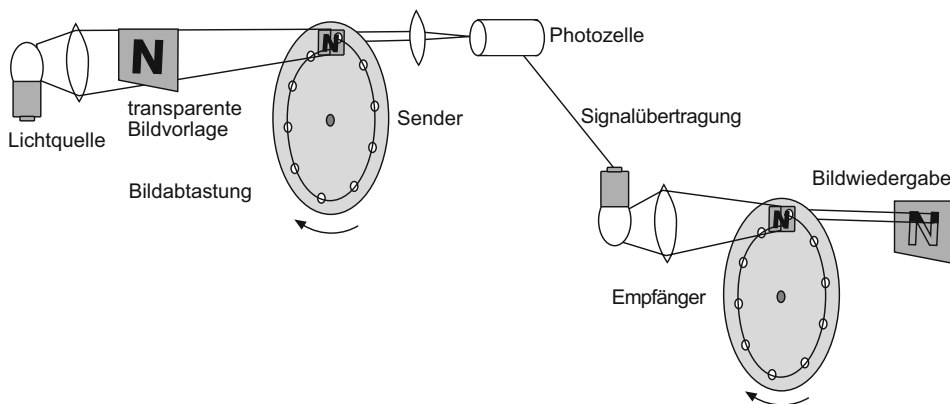


Bild 1.18 Das Bildübertragungsprinzip mit der Nipkow-Scheibe

Ab 1920 wurde die Fernsehforschung intensiviert und die Nipkow-Scheibe professionell eingesetzt. Die Scheibe auf der Empfangsseite wurde dabei noch per Handbremse zum Sendesignal synchronisiert. Die weitere Entwicklung bezog sich vor allem auf die Steigerung der Feinheit der Bildauflösung. Die damit verbundene Übertragung einer erhöhten Informationsdichte war eng mit der Erschließung kurzwelliger Radiofrequenzbereiche (UKW) verknüpft, in denen größere Bandbreiten zur Verfügung stehen.

Die Fernseh-Sendegeschichte begann 1935, als in Deutschland der erste regelmäßige Fernsehdienst eröffnet wurde, ohne dass eine elektronische Kamera zur Verfügung stand. Live-Übertragungen unter dem Einsatz der Nipkow-Scheibe waren sehr aufwendig, daher diente meist konventioneller Film als Zwischenstufe vor der Bildwandlung. Fast alle aktuellen Beiträge wurden zunächst auf Film aufgezeichnet und über Filmabtaster mit der Nipkow-Scheibe umgesetzt. Die erste elektronische Kamera, das Ikonoskop, wurde 1936, zur Olympiade in Berlin, vorgestellt. Durch den Einsatz der Braunschen Röhre auf der Aufnahme- und Wiedergabeseite konnten dabei schließlich alle mechanischen Elemente aus den Bildwandelungssystemen entfernt werden.

In Großbritannien erfolgte 1937 die erste Außenübertragung, in den Jahren 1938 und 1939 begannen die ersten öffentlichen Programmausstrahlungen in Frankreich und in den USA. Die Fernsehentwicklung wurde in Europa wegen des Krieges unterbrochen. Wesentlicher Träger der Entwicklung waren nun die USA, wo 1940 bereits mehr als 23 TV-Stationen arbeiteten und 1941 die lange Zeit gültige 525-Zeilen-Norm eingeführt wurde.

Im Jahr 1950 gründeten die sechs Landesrundfunkanstalten in Deutschland die „Arbeitsgemeinschaft der öffentlich-rechtlichen Rundfunkanstalten der Bundesrepublik Deutschland“ (ARD). Zwei Jahre später, 1952, sendete der Nordwestdeutsche-Rundfunk (NWDR) erstmals ein Fernseh-Versuchsprogramm vom Hochbunker auf dem Hamburger Heiligengeistfeld im Hamburger Stadtgebiet aus. Erst zwei weitere Jahre später startete das gemeinschaftliche Fernsehprogramm der ARD, damals unter dem Namen „Deutsches Fernsehen“ in der gesamten Bundesrepublik. Im selben Jahr wurden die Krönung von Königin Elizabeth II. sowie die Fußballweltmeisterschaft zu den ersten Fernseh-Großereignissen der Nachkriegszeit.

1969 sahen Hunderte Millionen Menschen die TV-Liveübertragung der Mondlandung. Die verwendete Kamera, die von der Firma Westinghouse für die NASA gebaut wurde, musste extremen Umwelteinflüssen standhalten. Die sogenannte Apollo Lunar Television Camera konnte 320 Zeilen bei 10 Bildern pro Sekunde oder 1280 Zeilen bei 0,625 Bildern pro Sekunde abbilden und Temperaturen zwischen etwa -34°C im Schatten und 50°C in der Sonne aushalten /84/. Da die Temperaturunterschiede auf dem Mond deutlich größer sein können, verfügte sie über ein System zur Kühlung und Heizung. Der langsamere Modus, bei dem ein Vollbild etwa 1,6 Sekunden für den Bildaufbau benötigt, wurde nur zu wissenschaftlichen Zwecken eingesetzt. Zudem war die Übertragungsbandbreite auf nur 500 kHz begrenzt, sodass nur 260 Zeilen im schnellen und 500 Zeilen im langsamen Modus tatsächlich übertragen werden konnten /84/. Das Bildsignal wurde gemeinsam mit den Telemetriedaten des Landers über eine Parabolantenne zu den drei Erdstationen in den USA und Australien gesendet. Zur Formatwandlung wurde das Signal mit 250 Zeilen bei 10 Hz auf einen Monitor gegeben, der wiederum von einer regulären TV-Kamera im NTSC-Standard abgefilmt wurde. Im Verlauf der TV-Übertragung wurden die Bildsignale aller drei Empfangsstationen verwendet, die man aufgrund markanter Bildfehler der Formatwandlung (Flecken im Bild, Kontrastunterschiede, Bildqualität) gut unterscheiden kann. In Deutschland sendete der WDR die Übertragung der Mondlandung federführend für die ARD in einer 28-stündigen Sondersendung. Erstmals wurde in großem Umfang auch die Satellitentechnik eingesetzt, um das Signal der NASA aus Houston weltweit zu verteilen und Schaltgespräche in die USA zu ermöglichen.

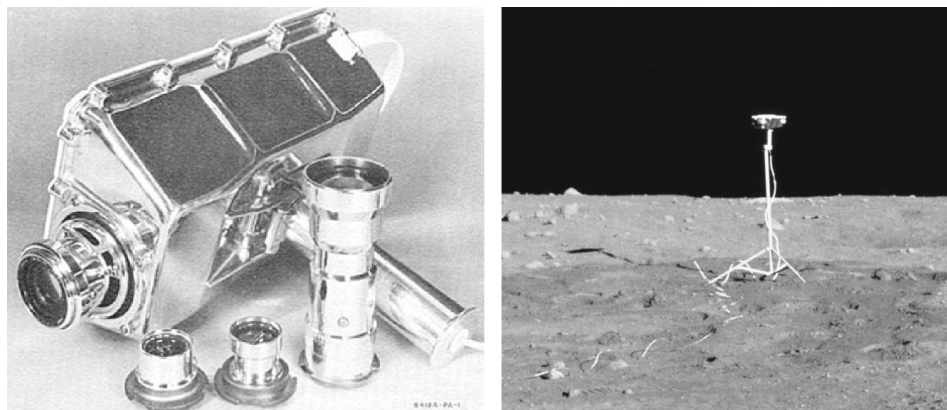


Bild 1.19 Westinghouse-Mondkamera im Detail und aufgestellt auf der Mondoberfläche /84/

Im Jahr 1984 startete dann in der Bundesrepublik das duale Rundfunksystem. Neben den öffentlich-rechtlichen Programmen von ARD und ZDF, das seit 1963 auf Sendung war, gab es nun erstmals private Rundfunksender, die sich primär aus Werbeeinnahmen finanzierten. Im gleichen Jahr startete mit „Teleclub“ der erste Bezahlfernsehsender Europas.

Im Gegensatz zur Bundesrepublik wurde in den USA sehr früh mit den ersten Farbfernsehversuchen begonnen. Bereits 1953 war das aktuelle vollelektronische, S/W-kompatible NTSC-Farbfernsehsystem (National Televisions Systems Committee) entwickelt. Japan und die meisten Staaten Südamerikas übernahmen NTSC, aber in Europa wurde das Verfahren wegen der schlechten Farbstabilität („Never the same colour“) nicht akzeptiert. In Frankreich wurde als Alternative SECAM (Séquentiel Couleur À Mémoire) und in Deutschland das PAL-Verfahren (Phase Alternation Line) eingeführt. Dieses, 1963 bei Telefunken entwickelte System, ist farbstabil und mit weniger Problemen behaftet als SECAM, sodass viele Staaten das Verfahren übernahmen.

Am 25. August 1967 wurde das Zeitalter des Farbfernsehens in Deutschland öffentlichkeitswirksam durch einen symbolischen Knopfdruck des damaligen Bundeskanzlers Willy Brandt eingeläutet (Bild 1.20). Dabei betätigte das technische Personal die Umschaltung wenige Sekunden zu früh und damit vor dem eigentlichen Knopfdruck, der sich somit als Attrappe entpuppte. Im selben Jahr begann die regelmäßige Ausstrahlung von PAL-Sendungen in Deutschland. Als einziger Übertragungsweg stand dafür zunächst die terrestrische Ausstrahlung unter Nutzung einer erdbodennahen elektromagnetischen Welle zur Verfügung. In den 1970er- und 1980er-Jahren kamen als Alternativen die satellitengestützte und die kabelgebundene Übertragung hinzu, die heute die terrestrische Fernsehausstrahlung weitgehend verdrängt haben.

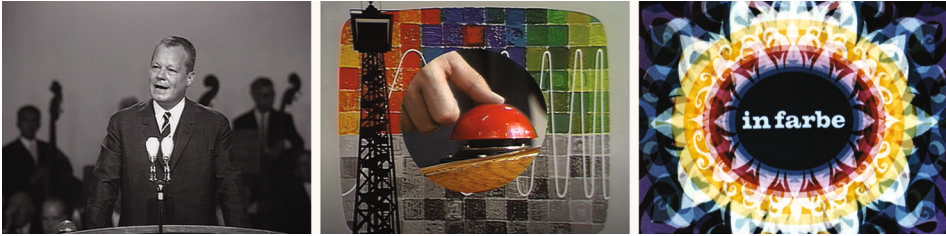


Bild 1.20 Symbolischer Start des Farbfernsehens in Deutschland durch Bundeskanzler Willy Brandt



Meilensteine der TV-Entwicklung in Europa

1935 Fernsehsender „Paul Nipkow“ beginnt in Berlin die erste regelmäßige TV-Ausstrahlung der Welt

1936 Erste größere vollelektronische TV-Übertragungen ohne Nipkow-Scheibe (Olympische Spiele 1936)

1937 Erste TV-Liveübertragung eines Fußballspiels durch die BBC

1950 Gründung der „Arbeitsgemeinschaft der öffentlich-rechtlichen Rundfunkanstalten der Bundesrepublik Deutschland“ (ARD)

1950 Start eines Fernseh-Versuchsprogramms durch den Nordwestdeutschen Rundfunk (NWDR) vom Bunker des Heiligengeistfeldes in Hamburg

1960 Die ersten Magnetbandaufzeichnungsverfahren (MAZ) werden marktreif

1967 Start des Farbfernsehens in Deutschland

1969 Liveübertragung der Apollo-Mondlandung wird zum weltweiten TV-Event

1977 Erste Heimvideogeräte kommen auf den Markt

1984 Einführung des dualen Rundfunksystems und Start des Privatfernsehens

1990er Die Digitalisierung erfasst den Produktionsbereich

2000er Start der digitalen Fernsehdistribution per DVB und Einführung von HDTV

2015 Erste Übertragungen in UHD/HDR

2020 Die Olympischen Spiele werden durch NHK erstmals in UHD2 („8K“) übertragen

2020er Produktionskomplexe und Videosignalübertragung basieren zunehmend auf IP-Datennetzwerken

Auch das hoch entwickelte PAL-Verfahren ist mit Artefakten verbunden, an deren Eliminierung in den 1980er-Jahren gearbeitet wurde. Dies geschah bereits mit Blick auf eine wesentlich höhere Bildauflösung (HD-MAC). Die Entwicklung dieser noch analogen Systeme wurde aber durch die Digitaltechnik rasch überholt, insbesondere nachdem die Möglichkeit

deutlich wurde, sehr effiziente Datenreduktionsverfahren (MPEG) einzusetzen. Das letzte Jahrzehnt vor der Jahrhundertwende war geprägt von dem Versuch der Einführung eines PAL-kompatiblen Breitbildsystems (PALplus) und der Entwicklung digitaler Übertragungsverfahren. Das entsprechende System für das Digital Video Broadcasting (DVB) ist heute bereits in der zweiten und dritten Generation in Europa umfassend verfügbar und wurde zudem von vielen außereuropäischen Staaten übernommen.

Bis zum Ende der 1980er-Jahre war das PAL-Signal sowohl Sende- als auch Produktionsstandard. Im Produktionsbereich trat ein erheblicher Wandel ein, als ab 1960 elektronische Magnetbandaufzeichnungsverfahren (MAZ) zur Verfügung standen, die das Medium Film als einzige Möglichkeit der Bewegtbildspeicherung ablösten. Sie ermöglichten erstmals unmittelbare Wiederholungen aufgenommener Signale – ohne die Notwendigkeit einer aufwendigen Laborentwicklung der zuvor genutzten Filme.

Nach den ersten MAZ-Geräten, die mit Magnetbändern von ca. 5 cm Breite arbeiteten, wurden bis zum Ende der 1980er-Jahre die kostspieligen MAZ-Formate B und C verwendet, noch mit offenen Spulen und Bändern von 2,5 cm Breite. Als sich mit Betacam SP die Verfügbarkeit eines preiswerteren MAZ-Systems auf Kassettenbasis abzeichnete, wurde der Wechsel zu dem bei diesem Format verwendeten Komponentensignal als Standard im Produktionsbereich vollzogen. Mitte der 1980er-Jahre waren sowohl preiswerte Videorekorder für den Heimgebrauch als auch bereits erste digitale MAZ-Systeme verfügbar. Zeitgleich erfolgte die Digitalisierung zahlreicher Studiogeräte und Schnittstellen.

Bis in die 1980er-Jahre des 20. Jahrhunderts hinein gab es neben der Fernsehtechnik auf der Produktionsseite nur die Studio- bzw. Broadcasttechnik mit sehr aufwendigen Geräten, denn die Videotechnik war zu Beginn ihrer Entwicklung immer ein Teilgebiet der Fernsehtechnik. Dann entwickelte sich der sogenannte Consumersektor, das heißt, videotechnische Geräte wurden für die Heimanwendung verfügbar. Mit VHS zogen ab 1975 preiswerte Rekorder in die Wohnzimmer ein, mit denen bespielte oder selbst aufgenommene Kassetten wiedergegeben werden konnten. Camcorderformate wie Video8 oder Hi8 ermöglichten um 1990 auch preisgünstige Eigenproduktionen.

Die Digitalisierung erfasste zum Ende des Jahrhunderts schließlich auch die Heimanwendergeräte. Insbesondere durch das Kassettenaufzeichnungsformat DV wurde eine Bildqualität ermöglicht, die nahe an die Qualität der professionellen Studios heranreichte. Entsprechend wurden DV-Systeme nun für den professionellen Bereich adaptiert (DVCam, DVCPPro). Viele weitere Entwicklungen wie z. B. Bildstabilisierungssysteme für Camcorder begannen nun im Consumersektor und wurden für den Studiobereich übernommen. Die Digitalisierung beseitigte für die Heimanwender auch die letzte Hürde für eigene Videoproduktionen, nämlich die Nachbearbeitung, denn aufgrund der inzwischen stark angestiegenen Leistungsfähigkeit von Heim-PCs konnten die Videosignale nun im Rechner geschnitten und vertont werden, wobei die Verbindung zwischen PC- und Videogeräten mit Firewire- oder USB-Schnittstellen erheblich vereinfacht wurde. Zwischen Heim- und Studio-Systemen entwickelte sich der sogenannte Prosumermarkt mit Geräten, die ein Zehntel der Broadcastgeräte kosten.

Die Digitalisierung des Videobereichs vereinfachte auch die Einführung von High Definition Video (HD), also den bereits in den 1990er-Jahren anvisierten Umstieg auf Systeme mit einer Bildauflösung, die der von Film nahekammt. Diese Entwicklung wurde erheblich dadurch forciert, dass nun preisgünstige Displays (LCD und Plasma) zur Verfügung standen,

die diese Bilder adäquat wiedergeben können. Nach dem Jahre 2000 wurde fast nur noch in HD-taugliche Studiogeräte investiert. Kurze Zeit später wurde HD auch für die Heimanwender verfügbar und setzte sich lange Zeit als neue Standardauflösung durch.

Ein wichtiger Aspekt für die Vereinfachung der Produktionsabläufe (Medienhandhabung) ist die Verfügbarkeit bandloser Speichersysteme auf Disc- und Flashkartenbasis. Sie erlauben einen Szenenzugriff ohne Spulzeiten und damit sowohl die Vereinfachung der Postproduktion als auch die Verkleinerung von Kameras und Aufzeichnungsgeräten. In der Postproduktion wurden bandbasierte Schnittsysteme dabei vollständig durch nichtlineare Speicher (HDD, SSD, NAS, SAN) ersetzt. Dabei sind in größeren Komplexen server- und netzwerkbasierte Speichersysteme inzwischen unverzichtbar, die die Verwaltung, Verteilung und Archivierung von Medieninhalten sicherstellen. Sie ermöglichen es, von mehreren unabhängigen Arbeitsplätzen auf dieselben Rohdaten zuzugreifen und damit flexible und schnelle Arbeitsabläufe zu gestalten.

Nachdem die Digitalisierung im Produktionsbereich weitgehend abgeschlossen ist, ist die weitere Entwicklung des professionellen Videosektors von der Transformation konventioneller digitaler Schnittstellen und Systeme hin zu netzwerkbasierten und virtualisierten Studiogeräten geprägt. Dabei wurden Produktionskomplexe sowohl in der TV- als auch in der Filmproduktion zunehmend vernetzt. Nachdem IP-Datennetze erst nur in der Postproduktion und zum Dateiaustausch eingesetzt wurden, werden in den letzten Jahren zunehmend auch Echtzeit- und Studiosysteme vollständig netzwerkbasierend aufgebaut. Konventionelle digitale Audio- und Videoschnittstellen für unkomprimierte Signale können im Produktionsumfeld inzwischen vollständig durch logische Echtzeitverbindungen in Daten Netzwerken ersetzt werden.

Der nächste Entwicklungsschritt nach der Umstellung zu HD-TV war der Einsatz stereoskopischer Bildsequenzen, die die Illusion eines dreidimensionalen Bildes erzeugen. Das Verfahren erfordert zwei Videoströme, die leicht versetzte Perspektiven der Szene zeigen und die den beiden Augen, meist mithilfe einer Brille, separat zugeführt werden. Die Stereoskopie konnte sich im Kino etablieren, ist aber auf der Heimanwenderseite weitgehend wieder verschwunden.

Aktuelle Entwicklungen betreffen heute zum einen die Steigerung der Bildauflösung. So wird die Anzahl der aktiven Pixel bei UHD1 gegenüber HD vervierfacht, bei UHD2 gegenüber HD sogar um den Faktor 16 gesteigert. Weitere Entwicklungen betreffen die Optimierung der Qualität der Bildpunkte, insbesondere die Steigerung des Kontrastumfangs unter der Bezeichnung HDR (High Dynamic Range).

Die Miniaturisierung der Elektronik erlaubt seit etwa 2010 trotz der genannten Qualitätssteigerungen insbesondere eine Verkleinerung der Kameras, die hier eine neue „Entfesselung“ erfahren. Sie können nun bei guter Bildqualität an verschiedenste mobile Halterungen angebracht werden, wie z.B. an Helmen im Sportbereich (Actionkameras) oder an kleinen Multikoptern (Drohnen). Elektronische Stabilisierungssysteme (Gimbals) ermöglichen es, auch extreme Bewegungen ohne Verwackelung aufzunehmen. Dabei sind die fliegenden Elektroniksysteme inzwischen so leistungsfähig, dass sie Objekte erkennen und eigenständig verfolgen können.

Die Steigerung der Rechenleistung ermöglicht auch die Verarbeitung der Daten mehrerer Kameras, was heute über stereoskopische Verfahren hinaus und zu VR (Virtual Reality)-Systemen führt, die in der Lage sind, die gesamte kugelförmige Umgebung um einen Stand-

punkt zu erfassen. Die gewonnenen Daten können so umgerechnet werden, dass bei der Wiedergabe mit speziellen Brillen das Gefühl entsteht, in dem entstehenden virtuellen Raum navigieren zu können.

Weiterhin ist sowohl im professionellen als auch im Heimanwenderbereich eine zunehmende Konvergenz unterschiedlicher Medientypen von Film über Fernsehen bis hin zum gering aufgelösten Handy-TV zu beobachten. Das Ganze ist wiederum verbunden mit sehr leistungsfähigen drahtgebundenen oder drahtlosen Datennetzen, die es mittels Streaming ermöglichen, Videosignale zu übertragen, die qualitativ teilweise deutlich über der linearen TV-Ausstrahlung liegen. Derartige Inhalte werden über Mediatheken oder Streaming-Dienstleister verbreitet. Neben Computern, Tablets und Smartphones gehören Smart-TVs, also Fernsehgeräte mit Internetkonnektivität dabei zu den wichtigsten Endgeräten. Diese Medien- und auch die Technologiekonvergenz zu IT-Systemen sind kennzeichnend für die zukünftige Entwicklung der professionellen Video- und Filmtechnik.

2

Wahrnehmung

Das visuelle Wahrnehmungsvermögen des Menschen basiert auf einem komplexen System. Der Prozess des Sehens beginnt mit der Umsetzung der Licht- in Nervenreize im Auge, setzt sich mit der Weiterleitung der Reize im Sehnerv fort und schließt mit der umfangreichen Verarbeitung der Signale im Gehirn. Diese geschieht insbesondere im Visual Cortex, wobei Teile des Hirnstamms sowie die Sehrinde am Hinterteil des Kopfes benutzt werden. Bild 2.1 zeigt, dass hier eine recht lange Reizleitung mittels Nervenbahnen als Verbindung zum Auge im vorderen Teil dient. Dabei kreuzen sich die vom Auge kommenden Sehnerven und laufen danach als Sehbahnen vom linken Auge zur rechten Gehirnhälfte und umgekehrt. Einige der Sehnerven dienen nicht dem Sehen selbst, sondern der Steuerung im Auge, z. B. der Akkommodations- und Pupillenreflexe.

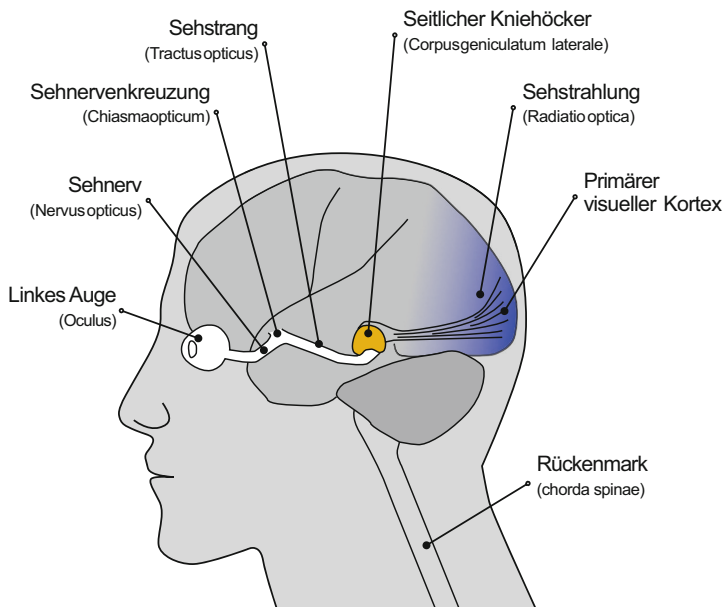


Bild 2.1 Die Verarbeitung der visuellen Information

Das Auge ist bereits selbst für viele wesentliche Phänomene bestimmend, die unsere visuelle Wahrnehmung prägen. Doch sollte bei der Darstellung aller Einzelaspekte stets beachtet werden, dass das Gesamtsystem stark und vorrangig auf die Reduktion der Vielfalt von Reizen ausgerichtet ist und u. a. auch Wahrnehmungserfahrungen des erwachsenen Menschen ausnutzt. Dazu gehören zum Beispiel die Erfahrungen, dass Licht meist von oben kommt, da die Sonne die dominante Lichtquelle ist, dass es bei einer einzigen Lichtquelle keine doppelten Schattenwürfe geben kann und dann auf dem kugelförmigen Augapfel auch nur ein einziger runder Lichtreflex zu sehen ist. Diese Aspekte müssen bei der Umsetzung optischer Abbildungen mit technischen Mitteln wie Foto, Film und Video beachtet werden. Dies ist unabhängig davon, ob damit eine möglichst natürliche Wirkung und Darstellung erzielt, oder die Brechung der Wahrnehmung als besonderer Effekt oder eigenartige Anmutung erzielt werden soll.

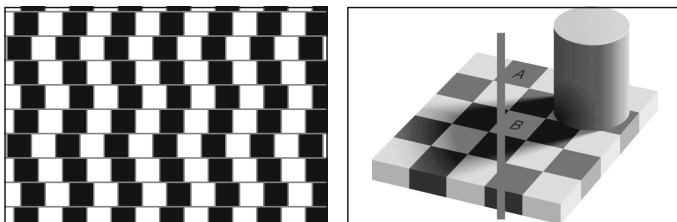


Bild 2.2

Optische Täuschungen
(Café Wall Illusion sowie
Checker Shadow Illusion
von Edward H. Adelson)

Ein Beispiel für einen gezielt abweichenden Umgang mit unserer Interpretation der Seherfahrung sind die optischen Täuschungen. Bild 2.2 zeigt zwei Beispiele: Im linken erscheinen uns die horizontalen Trennlinien zwischen den Schwarz-Weiß-Feldern schräg zu sein, obwohl leicht nachzuprüfen ist, dass sie parallel verlaufen. Das rechte Bild zeigt die Fehlinterpretation einer Hellwahrnehmung: Die Felder A und B erscheinen uns aufgrund der Annahme eines Schattenwurfs unterschiedlich hell. Erst der Vergleich mit der gleichmäßigen vertikalen Graufäche zeigt, dass sie exakt gleich hell dargestellt sind. In ähnlicher Weise gelingt es uns auch, in Mustern bekannte Strukturen zu interpretieren, wobei wir besonders an Gesichtern (z. B. der Mann im Mond) oder an Tieren interessiert sind, die wir dann zum Beispiel in Wolkenformationen erkennen.

■ 2.1 Lichttechnische Kenngrößen

Basis des Sehens ist das Licht. Die Lichtenergie pro Zeit wird als Lichtstrom Φ_v mit der Einheit Lumen (lm) bezeichnet /38/. Ein Watt Strahlungsleistung entspricht im Maximum des Hellempfindlichkeitsgrades, bei $\lambda = 555 \text{ nm}$, einem Lichtstrom von 683 lm. Die Angabe eignet sich zum Beispiel zur Einordnung von elektrischen Leuchtmitteln. Dividiert durch die aufgenommene elektrische Leistung des Leuchtmittels in Watt ergibt sich die Lichtausbeute [Einheit: lm/W]. Wird der Lichtstrom auf einen Raumwinkel Ω [Einheit: Steradian (sr)] bezogen, so ergibt sich die Lichtstärke I_v :

$$I_v = \Phi_v / \Omega$$

mit der Einheit Candela (cd), wobei gilt: $1 \text{ cd} = 1 \text{ lm/sr}$. Die Lichtstärke gibt also den Lichtstrom in eine bestimmte Raumrichtung an und bezieht damit die Abstrahleigenschaften der Lichtquelle mit ein. Die Lichtstärke relativ zu einer leuchtenden Fläche A_1 ergibt die Leuchtdichte L_v . Unter Einbeziehung eines Winkels ε_1 relativ zur Flächennormalen gilt:

$$L_v = I_v / (A_1 \cos \varepsilon_1)$$

die Einheit der Leuchtdichte ist cd/m^2 , die alte Einheit ist ein Apostilb (asb), wobei gilt: $1 \text{ cd/m}^2 = 3,14 \text{ asb}$. Die Leuchtdichte ist zum Beispiel zur Einordnung von Displays interessant, die oft durch ihre maximal mögliche Leuchtdichte klassifiziert werden. Auch zur Definition der Helligkeit des Bildes auf der Kinoleinwand wird die Leuchtdichte herangezogen.

Auf der Empfängerseite interessiert vor allem der Lichtstrom pro beleuchteter Fläche A_2 , der als Beleuchtungsstärke E_v bezeichnet wird. Unter Einbeziehung des Winkels ε_2 zwischen Strahlrichtung und Flächennormale gilt:

$$E_v = \Phi_v / A_2 = (I_v \cos \varepsilon_2 \Omega_0) / r^2$$

r beschreibt dabei den Abstand zwischen der Lichtquelle und A_2 . Es wird deutlich, dass die Beleuchtungsstärke quadratisch mit r abnimmt. Die Einheit der Beleuchtungsstärke ist $\text{lm/m}^2 = \text{lx}$ (Lux).

Wenn ein Objekt nicht selbst leuchtet, sondern angestrahlt wird, so folgt die Leuchtdichte aus der Beleuchtungsstärke, mit der es bestrahlt wird, und den Reflexionseigenschaften des Objektes. Die Reflexionseigenschaften hängen mit der Oberflächenbeschaffenheit zusammen. Reflexion im engeren Sinne liegt vor, wenn der Strahlrückwurf ideal gerichtet ist, dagegen spricht man von Remission, wenn der Rückwurf ideal diffus ist und das Licht nach allen Seiten gestreut wird. Da die meisten Oberflächen eher rau sind, wird gewöhnlich mit dem Remissionsgrad R gerechnet. Tabelle 2.1 zeigt Remissionsgrade verschiedener Materialien. Bei einem durchschnittlichen Bild geht man davon aus, dass der Mittelwert der Gesamtremission 18 % beträgt. Bezugswerte für mittlere Helligkeiten und Bezugsblenden werden entsprechend anhand einer grauen Fläche mit 18 % Remission gewonnen.

Tabelle 2.1 Remissionsgrade verschiedener Materialien

Material	Remission	Material	Remission
schwarzer Samt	1 %	grüne Blätter	15...30 %
matte schwarze Farbe	1...5 %	helle Haut	25...35 %
schwarzes Papier	5...10 %	weißes Papier	60...80 %
Mauerwerk	10...15 %	weißes Hemd	80...90 %
Normalgrau (Fotokarte)	18 %	frischer Schnee	93...97 %
gebräunte Haut	18...21 %		

Bei idealer Remission gilt folgende Beziehung zwischen Leuchtdichte L und Beleuchtungsstärke E :

$$L = R \times E / \pi$$

Das Verhältnis von geringster zu größter Leuchtdichte oder Beleuchtungsstärke in einer Szene bestimmt den Kontrastumfang L_{\min}/L_{\max} . Er kann mit dem sogenannten Spot-Photometer bestimmt werden, einem Belichtungsmessgerät mit sehr kleinem Öffnungswinkel. Mit dieser Objektmessung können die Helligkeitsunterschiede erfasst werden, die auch bei gleichmäßiger Ausleuchtung durch die verschiedenen Reflexionsgrade bzw. Remissionsgrade der in der Szene vorhandenen Materialien sowie durch Abschattungen hervorgerufen werden. Tabelle 2.2 gibt eine Übersicht über Leuchtdichten in verschiedenen Situationen.

Tabelle 2.2 Leuchtdichten im Vergleich

TV-Umfeldleuchtdichte	ca. 10 cd/m ²	bedeckter Himmel	500 cd/m ²
TV-Bildschirmweiß	ca. 80 cd/m ²	klarerer Himmel	4000 cd/m ²
helles Material im Raum	100 cd/m ²	elektrische Lampen	ca. 10 ⁴ cd/m ²
bei trübem Wetter	2000 cd/m ²	Lampenfaden	ca. 10 ⁷ cd/m ²
bei Sonnenschein	5000 cd/m ²	Mittagssonne	ca. 10 ⁹ cd/m ²

■ 2.2 Das Auge

Das menschliche Auge hat eine Kugelform mit etwa 24 mm Durchmesser. Es kann gedreht werden, um die Aufmerksamkeit zu richten und das Sehfeld abzutasten. Der Aufbau ist in Bild 2.3 als Querschnitt dargestellt. Das Licht gelangt durch den dioptrischen Apparat, dem lichtbrechenden Teil, der gewöhnlich als Linse bezeichnet wird, auf die Retina, die Netzhaut, die der Umsetzung in die Nervenreize dient.

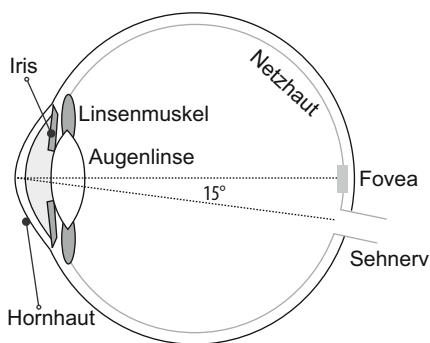


Bild 2.3
Das menschliche Auge

Wie in einem Fotoapparat erzeugt die einzelne bikonvexe Linse ein Bild, das auf der Retina auf dem Kopf steht. Zunächst durchdringt das Licht aber die Horn- und Bindehaut und fällt auf die Pupille, die natürliche Öffnung, die als Blende wirkt und abhängig vom Lichteinfall mit zwei Muskeln der Iris zwischen 1,5 und 8 mm Durchmesser veränderlich ist. Damit ist eine schnelle Anpassung (Adaption) an verschiedene Helligkeiten möglich. Das Licht fällt

dann durch die Linse, die es ermöglicht, unterschiedlich entfernte Gegenstände scharf auf die Netzhaut abzubilden. Dieser Vorgang wird als Akkommodation bezeichnet.

Im Gegensatz zum Fotoobjektiv, bei dem zu diesem Zweck eine starre Linse räumlich verschoben wird, geschieht die Fokussierung auf verschieden entfernte Objekte beim Auge mithilfe von Muskeln, die die Dicke der Linse und damit den Brechungsgrad verändern. Das Innere des Auges ist mit einer transparenten Substanz gefüllt, die einen Brechungsindex von 1,33 aufweist. Die darin befindlichen Moleküle streuen das Licht ein wenig und erzeugen so die Halo-Effekte die in dunkler Umgebung um helle Objekte herum sichtbar werden.

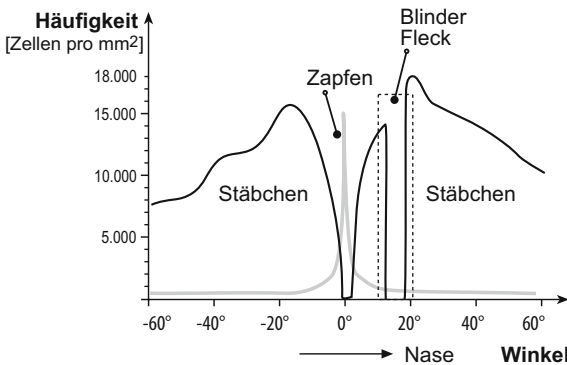


Bild 2.4

Horizontale Verteilung der Sehnerven auf der Netzhaut

Das Licht fällt schließlich auf die lichtempfindliche Schicht in der Netzhaut, die die optischen Reize in Nervenreize umsetzt. Sie besteht aus mehr als 10^8 Zellen, die in Stäbchen und Zapfen unterschieden werden (engl. rods and cones). Die Stäbchen sind dabei deutlich empfindlicher als die Zapfen, sie registrieren die schwachen Helligkeitswerte und bestimmen das periphere Sehen. Dabei erlauben sie aber keine Farbwahrnehmung („Nachts sind alle Katzen grau“). Beim Tagsehen sind sie gesättigt und tragen dann nicht mehr zur Sehschärfe bei. Bild 2.4 zeigt die horizontale Verteilung von Stäbchen und Zapfen in der Netzhaut. Hier wird deutlich, dass die größte Fläche nur mit Stäbchen belegt ist. So wird ein Blickwinkel von ca. 180 Grad erreicht, allerdings nur mit farbloser und unscharfer Wahrnehmung, um das Gehirn mit Informationen nicht zu überfordern. Dieser große Bereich des peripheren Sehens dient damit vor allem dazu, auf Gefahren aufmerksam zu werden und nicht der detaillierten Wahrnehmung. Im Film kann dieser Umstand genutzt werden, um immersive emotionale Elemente wie Schrecken zu erzeugen, indem diese zunächst in den Seitenbereichen des Blickfeldes erscheinen. Dieser Effekt funktioniert insbesondere bei sehr großen Leinwänden gut.

Ein mittlerer Sehwinkel, das deutliche Sehfeld oder der Bereich des „Normalsehens“ beträgt vertikal etwa 30° , oft wird hier auch der Bildwinkel der Diagonale angegeben, der dann 45° beträgt. Wenn ein Objekt bequem „mit einem Blick“ erfassbar sein soll, sollte sich der vertikale Betrachtungswinkel auf etwa 10° beschränken (Bild 2.4).

Der Bereich des deutlichen Sehens (Fovea centralis) umfasst nur ca. 5° , wobei die Grenze der Unterscheidbarkeit von Bildpunkten dann erreicht ist, wenn pro Winkelgrad 60 Bildpunkte zur Verfügung stehen, d.h. bei ca. 30 Schwarz/Weiß-Paaren pro Grad. Größere Bereiche unserer Umgebung erfassen wir deshalb durch Aufmerksamkeitslenkung und Ab-

tastung, dabei akkommodiert und adaptiert sich das Auge ständig für jede neue Blickrichtung, die wir mit dem begrenzten scharfen Sehfeld erfassen und kurz fixieren. Der optische Gesamteindruck ergibt sich aus dieser Abtastung und der Gedächtnisleistung des Gehirns.

Im Gegensatz zu den Stäbchen haben die Zapfen mit ca. 6 Millionen einen relativ kleinen Anteil an der Gesamtzahl der Rezeptoren, jedoch eine hohe Konzentration im zentralen Blickfeld, der Fovea centralis. Ein kleiner Bereich ist dabei ausgespart: Am Ort des sogenannten blinden Flecks gibt es keine Rezeptoren, dort leitet der Sehnerv die Reize zum Zentralnervensystem und zum Gehirn (Bild 2.4).

Die Reduktion der großen Informationsmenge, die bei den Rezeptoren beginnt, setzt sich auch bei der neuronalen Weiterverarbeitung fort. Für die ca. 10^8 Rezeptoren stehen nur etwa $5 \cdot 10^6$ Neuronen zur Verfügung. Nur im Bereich des schärfsten Sehens gibt es daher eine 1:1-Zuordnung zwischen Rezeptoren und Neuronen. Für die anderen Bereiche gilt, dass die Erregung einer Nervenfasern von mehreren Rezeptoren herrührt, die auf der Netzhaut zusammen das rezeptive Feld bilden. Das rezeptive Feld ist veränderlich, so kann die Lichtempfindlichkeit z. B. durch eine Vergrößerung des Feldes auf Kosten der Sehschärfe erhöht werden.

Durch den Lichtreiz entsteht eine Erregung in Form von elektrischen Impulsen, wobei sich der Grad der Erregung aus der Impulsfrequenz ergibt. Nun sind die rezeptiven Felder so gestaltet, dass sie konzentrische Bereiche aufweisen, wobei in einem Bereich eine Erregung und im anderen eine sogenannte laterale Hemmung auftritt. Bild 2.5 zeigt dies anhand der Vorzeichen. Das Innere des rezeptiven Feldes mit etwa der Hälfte der Zellen arbeitet damit genau gegenläufig wie die Umgebung.



Bild 2.5 Rezeptives Feld und Auswirkung, z. B. beim Simultankontrast

Dieses Zusammenspiel wirkt wie ein Hochpass, der die hohen Ortsfrequenzen verstärkt, die zu den feinen Bilddetails und scharfen Helligkeitsunterschieden gehören. Damit lassen sich z. B. die Erscheinung der Machschen Streifen erklären, das heißt, die subjektiv empfundene Hervorhebung der Übergänge an einer Grautreppe sowie die Tatsache, dass die Schärfewahrnehmung bei großen Kontrasten hoch ist. Als Kontrast wird das Verhältnis der Leuchtdichten zweier Objekt- oder Bildbereiche bezeichnet. Die Hochpasswirkung erklärt auch den sogenannten Simultankontrast. Ein mittleres Grau erscheint dabei in dunkler Umgebung heller als in heller Umgebung (Bild 2.5 rechts).

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt erwähnt, kann auch die Empfindlichkeit aufgrund der Zusammenfassung zu den rezeptiven Feldern erhöht werden. Dies führt auch dazu, dass schnell bewegte oder schwach beleuchtete Objekte aus den Augenwinkeln mit einer hohen Bewegungsauflösung wahrgenommen werden. Dasselbe Phänomen bewirkt,

dass die Betrachtung eines Röhrenmonitors oder flimmernder Leuchtmittel aus den Augewinkeln eine stärkere Flimmererscheinung als bei zentraler Sicht hervorruft.

Bild 2.5 zeigt links, dass die Strukturen der rezeptiven Felder auch dazu führen, dass sie auf Bildstrukturen abgestimmt sind, die zur Größe der rezeptiven Felder passen (Tuning). Damit bestimmen sie auch den Verlauf der Wahrnehmbarkeit örtlicher Strukturen. Das Wahrnehmungsvermögen der feinsten Strukturen und Details wird Ortsauflösungsvermögen genannt. Als Maß dafür kann untersucht werden, wie viele Schwarz/Weiß-Linienpaare pro Grad im Blickfeld als getrennt wahrgenommen werden können. Bild 2.6 zeigt, wie die menschliche Wahrnehmung des Kontrasts von der Raumfrequenz, der Linienzahl auf einer bestimmten Distanz, abhängt.

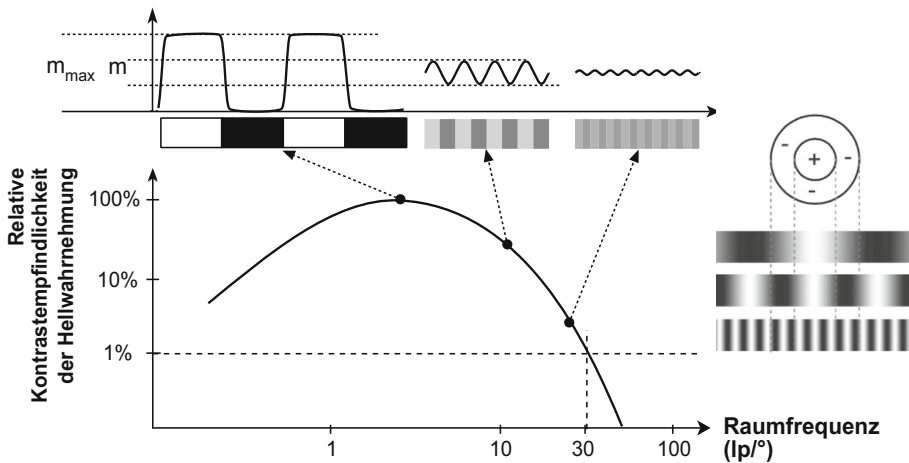


Bild 2.6 Rezeptives Feld und Auswirkung auf die Kontrastwahrnehmung

Es wird deutlich, dass wegen des „Tunings“ Kontraste am deutlichsten bei 2 bis 10 Linienpaaren pro Grad gesehen werden. Bei höheren Liniendichten, d.h. bei höherer Ortsfrequenz, nimmt die Unterscheidbarkeit ab und findet eine Grenze bei ca. 30 lp/°, d.h. 60 Linien/° oder einer Winkelminute. Der Empfindlichkeitsverlauf wird als Contrast Sensitivity Function (CSF) angegeben. Bild 2.7 zeigt die Wirkung noch einmal anhand eines Graustufenbildes.

Die Ortsauflösung ist ein wichtiges Merkmal, das die Schärfewahrnehmung von Bildern bestimmt. Es ist aber nur ein Teilaspekt. Aufgrund der oben beschriebenen Hochpasswirkung, die durch die rezeptiven Felder bewirkt wird, ist es für die Schärfewahrnehmung ebenfalls wichtig, wie kontrastreich ein Bild wiedergegeben wird. Dieser Umstand zeigt sich in Bild 2.8 beim Vergleich zweier Bilder, von denen das obere horizontal doppelt so viele Bildpunkte bzw. Auflösung hat wie das untere. Beim unteren Bild wurden die Kontraste an den groben Umrissen durch Filter verstärkt und es erscheint trotz verminderter Details zumindest auf den ersten Blick schärfer.

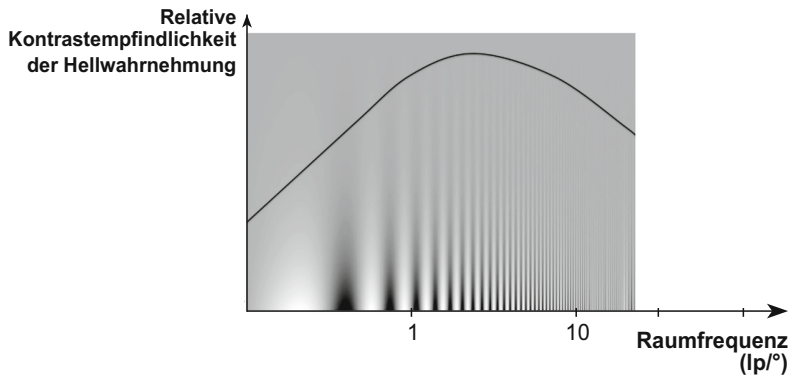


Bild 2.7 Contrast Sensitivity Function und die Kontrastempfindung in Abhängigkeit von der Ortsauflösung

Beide Mechanismen zusammen werden über das Heynacher-Integral dargestellt (Bild 2.8 rechts). Je größer die Fläche unter der Kurve, desto größer die Schärfenwirkung, gleich ob sie durch Details oder Kontrast hervorgerufen wird. Diese beschriebene Verstärkung der groben Umrisse führt zu erhöhter Modulation mit entsprechender Auswirkung auf die Modulationstransferfunktion. Die MTF für das obere, hoch aufgelöste Bild weist bei hohen Ortsfrequenzen noch Werte auf, bei denen die MTF für das untere Bild bereits null ist. Im Bild wird dies an den feineren Strukturen deutlich. Die MTF des oberen Bildes zeigt aber bei tiefen Frequenzen relativ kleine Werte, während die MTF-Werte des unteren Bildes durch die Filterung bei den tiefen Ortsfrequenzen verstärkt sind. Trotz geringerer Auflösung wird das untere Bild auf den ersten Blick als schärfer empfunden. Der Schärfeeindruck korrespondiert mit der Fläche unter der Kurve. Vereinfacht gesagt: Je größer die Fläche, desto schärfer das Bild.

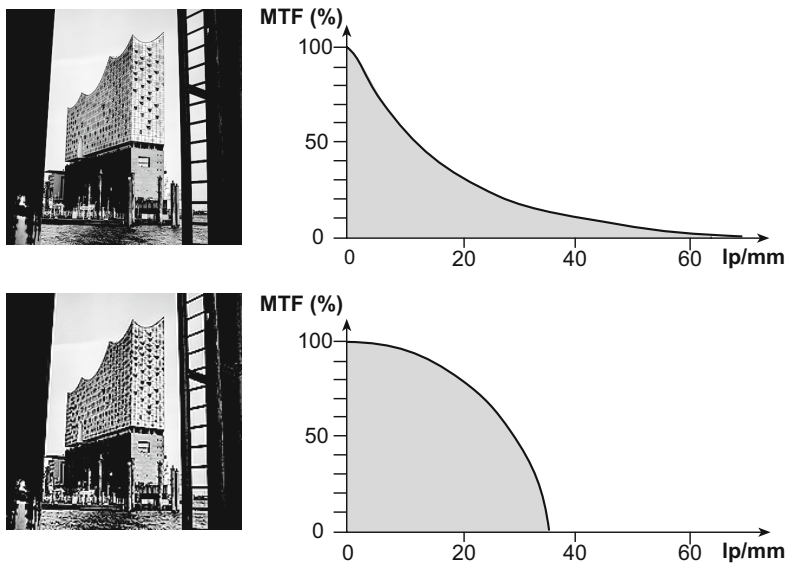


Bild 2.8 Bilder mit unterschiedlichem Kontrast und die zugehörigen MTF

■ 2.3 Helligkeit und Kontrast

Die Helligkeit lässt sich messtechnisch über mehrere Größen, u. a. als Leuchtdichte der Quelle mit der Einheit cd/m^2 bestimmen (vgl. Abschnitt 2.1). Bezogen auf die Helligkeitswirkung im Auge unterscheiden sich, wie gesagt, die Zapfen und die Stäbchen. Die Zapfen im zentralen Blickfeld, der Fovea centralis, dienen bei hohen Leuchtdichten (bei $L > 3 \text{ cd}/\text{m}^2$) als Rezeptoren der Helligkeits- und Farbwahrnehmung und für das scharfe Sehen bei Tage, das auch photopisches Sehen genannt wird. Dieser Bereich erstreckt sich bis hinauf zu $L = 10^6 \text{ cd}/\text{m}^2$. Darüber hinaus tritt Blendung ein.



Photopisches Sehen: $L \approx 3$ bis $10^6 \text{ cd}/\text{m}^2$

Mesopisches Sehen: $L \approx 0,03$ bis $3 \text{ cd}/\text{m}^2$

Skotopisches Sehen: $L \approx 3 \cdot 10^{-6}$ bis $0,03 \text{ cd}/\text{m}^2$

Die Stäbchen arbeiten bei geringen Leuchtdichten zwischen $3 \cdot 10^{-6} \text{ cd}/\text{m}^2$ und ca. $3 \text{ cd}/\text{m}^2$ und erlauben damit das sogenannte skotopische Nachtsehen, wobei ab ca. $0,03 \text{ cd}/\text{m}^2$ (Mondlichtstärke) auch die Zapfen aktiv werden und den Zwischenbereich mitbestimmen, der mesopisch genannt wird. Bild 2.9 zeigt, dass die Menschen damit theoretisch in der Lage sind, Helligkeitswerte über einen Bereich von 12 Dekaden zu erfassen. Das ist allerdings nicht instantan möglich. Normalerweise gruppiert sich der wahrnehmbare Helligkeitsbereich um einen konstanten Mittelwert. Man spricht dann von adaptiertem Auge. In diesem Zustand können zu einem Zeitpunkt Helligkeitsunterschiede und damit ein Kontrast von wenig mehr als 1000:1 vom Auge verarbeitet werden. Neueste Untersuchungen /1/, die im Rahmen der HDR-Entwicklung durchgeführt wurden, zeigen jedoch, dass bei adaptiertem Auge ein Kontrastbereich von etwa 3,7 Zehnerpotenzen erfasst werden kann.

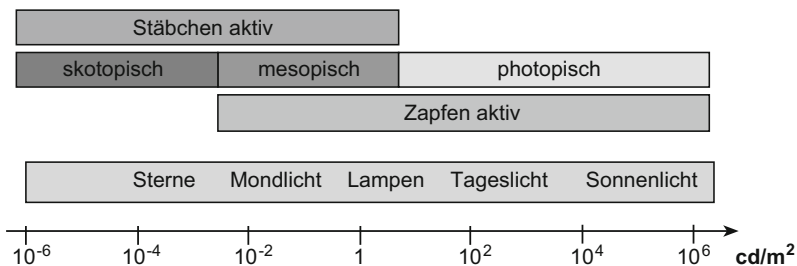


Bild 2.9 Hellempfindungsbereich des Menschen

Im Alltag verschiebt sich der adaptierte Helligkeitsbereich in der Regel langsam, zum Beispiel, wenn die Dämmerung einsetzt. Wird der Bereich aber schnell verschoben bzw. ausgeweitet, versucht das Auge, durch weitere Mechanismen eine Blendung zu vermeiden. Das geschieht durch verschiedene biochemische Prozesse in den Photorezeptoren, vor allem durch die Änderung der Rhodopsin-Konzentration und Größenanpassung der rezeptiven Felder. Dies wird retinale Adaption genannt. Zur Anpassung an sehr helle Lichtverhältnisse

wird die Empfindlichkeit also sehr schnell herabgesetzt (zur Not durch Schließen des Auges). Der umgekehrte Mechanismus, die Empfindlichkeitssteigerung durch Dunkeladaption, läuft viel vorsichtiger und langsamer ab. Dabei kann es bei Zapfen bis zu 10 und bei Stäbchen bis zu 30 Minuten dauern, bis sich das Sehvermögen vollständig angepasst hat.

Auch bei der Bildwiedergabe und -wahrnehmung mit technischen Systemen kann heute ohne die Nutzung von HDR-Technologien nur ein Kontrastumfang von höchstens 1:1000 erreicht werden. Die Wiedergabesysteme haben eine begrenzte Maximalleuchtdichte und der Minimalwert ist limitiert durch Umfeldbeleuchtungen, die ihn überstrahlen können. Gewöhnlich ist daher ein Kontrast von 1:200 und die Bildung von 200 Graustufen ausreichend, um bei typischen Umgebungshelligkeiten am Display ein gutes Bild zu erhalten.

Dazu zwei Beispiele: Bis heute arbeiten typische TV-Geräte ohne HDR-Funktionalität bei einer Maximalleuchtdichte von 100 bis 300 cd/m^2 . Alle relevanten Grauwerte liegen darunter, sodass bei einem Leuchtdichteverhältnis (Kontrast) zweier Bildteile von 1:100 bei TV-Displays ein Minimalwert von 1 cd/m^2 vorliegt. Kleinere Werte wären wegen der hellen Umgebungsleuchtdichte in den meisten Betrachtungsumgebungen, zum Beispiel in einem Wohnzimmer, nicht wahrnehmbar. Nimmt man als zweites Beispiel das Kino, wo in dem dunkleren Kinoraum kleinere Leuchtdichten erfasst werden können, ergibt sich bei einem Kontrast von z. B. 1:1000, eine Minimalleuchtdichte von 0,05 cd/m^2 , da die Maximalleuchtdichte im Kino auf 48 cd/m^2 genormt ist. Diese Absolutwerte zeigen, dass im Kino die meisten Grauwerte schon im Bereich des Dämmerungssehens liegen.

Mit weiter entwickelten Bildwiedergabesystemen wird neuerdings versucht, Maximalleuchtdichten von bis zu 1000 cd/m^2 oder mehr zu erreichen. Spitzensysteme erreichen heute bereits 10 000 cd/m^2 (Dolby Vision). Diese Verfahren werden im Rahmen der Entwicklung zur Bildung einer High Dynamic Range (HDR) interessant, bei denen Kontraste von mehr als fünf Zehnerpotenzen erreicht werden. Die entsprechenden Technologien und Ansätze werden im nachfolgenden Kapitel eingehend beschrieben.

Hier muss zunächst allerdings zwischen Kontrasten auf der Aufnahme- und bei der Wiedergabe unterschieden werden. Während die Erfassung eines hohen Kontrasts aufnahmeseitig wünschenswert sein kann, kann der Kontrastbereich des Wiedergabesystems aus den o. g. Gründen begrenzt sein, da der wahrnehmbare Kontrastbereich nicht nur von der Leuchtdichte in der Umgebung begrenzt ist. Wie bereits zuvor erwähnt, legen aktuelle Untersuchungen nahe, dass ein Kontrastbereich von etwa 3,7 Zehnerpotenzen durch das adaptierte Auge erfasst werden kann. Es ist also auch langfristig ausreichend, technische Systeme so zu konzipieren, dass sie einen Kontrast von 1:5000 bieten. Das entspricht ca. 12–13 Blendenstufen. Eine Blendenstufe entspricht dabei der Verdopplung der Lichtmenge. Das hieße in der Praxis, dass im Bereich des Hellsehens Werte von z. B. 1000 cd/m^2 im Maximum und 0,2 cd/m^2 im Minimum verwendet werden können. Im Bereich des Dunkelsehens unter Erzeugung einer kinoähnlichen Bildanmutung lägen die Werte dann zum Beispiel bei 0,03 cd/m^2 bis 150 cd/m^2 .

■ 2.4 Grauwertunterschiede

Bei der Untersuchung der Zusammenhänge von sensorischen Reizen und Wahrnehmung lässt sich generell feststellen, dass der Mensch weniger auf Absolutwerte als auf Relationen zwischen den Werten ausgerichtet ist. Entsprechend arbeiten sowohl die akustische als auch die visuelle Wahrnehmung nicht linear. So empfinden wir z.B. ein mittleres Grau nicht dann, wenn auf einer weißen Fläche die Leuchtdichte halbiert wird. Die Helligkeit muss dafür erheblich weiter gesenkt werden. Deshalb benutzen Film- und Fotoschaffende als Referenzfläche für einen mittleren Grauwert auch eine Graukarte die eine Remission (ungerichtete Reflexion) von 18% aufweist.

Wissenschaftlich wurde der Zusammenhang von Sinnesreizen und Wahrnehmung bereits früh von Weber und Fechner untersucht. Nach Webers Postulat ergibt sich für die sensitive, die auditive oder eben auch die Lichtwahrnehmung der Zusammenhang, dass der Reizunterschied, der aufgewandt werden muss, um wahrgenommen zu werden, umso größer ist, je größer der Absolutwert ist. Der minimale, gerade wahrnehmbare Reizunterschied wird Just Noticeable Difference (JND) genannt (Bild 2.10). Das Verhältnis von Reizsteigerung ΔL zum Absolutwert L ist demnach konstant: $\Delta L/L = c$. Die Konstante c wird als Weber Fraction bezeichnet.

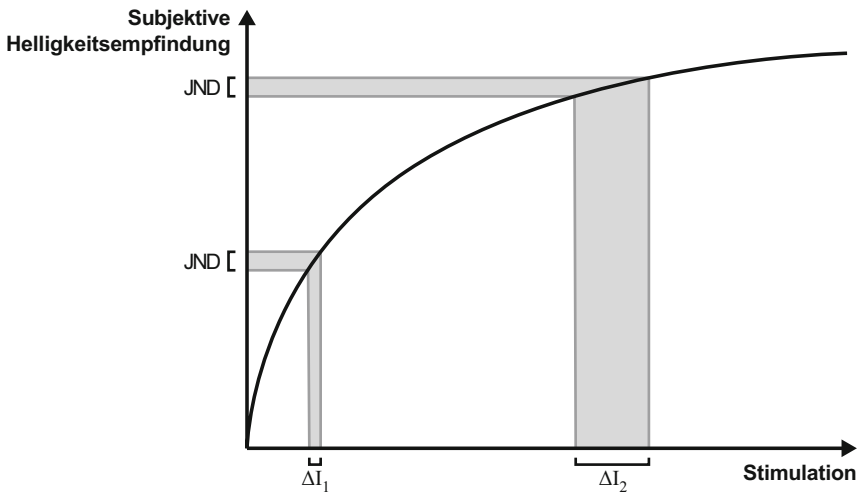


Bild 2.10 Just Noticeable Difference (JND)

Die Größenangaben für c schwanken in der Literatur deutlich. Besonders große Unterschiede ergeben sich zwischen Werten, die als Steigerung der Absolutwerte gemessen werden und Differenzen, die als sogenannter Simultankontrast bei gleichzeitigem Vorliegen mehrerer Werte, z.B. in einer Fläche vorliegen. Für Helligkeitswerte wird in letzterem Fall in der Regel ein Wert von $c = 0,8\%$ angenommen.