

2.1 Einige Grundbegriffe aus der Physik

2.1.1 Maßeinheiten

Wir werden es teilweise mit sehr großen und sehr kleinen Zahlen zu tun haben, etwa bei der Frequenz und Wellenlänge von Licht. Die folgende Tab. 2.1 gibt die wichtigsten Einheiten mit ihren Namen und Abkürzungen wieder. Das amerikanische Namensystem wird neben der USA ebenfalls in einigen wenigen Ländern wie Puerto Rico, Brasilien und der Türkei verwendet. Hierbei wird das Wort billion für eine Milliarde verwendet.

Die große Mehrheit der Länder verwendet das sogenannte *logarithmische Zillionensystem* der französischen Mathematiker Nicolas Chuquet und Jacques Peletier du Mans, das auch *lange Leiter* genannt wird, da hier in Sechsergruppen gezählt wird. Für das Tausendfache aller Millionen-Potenzen wird die Endung -illiarde statt -illion verwendet. Es wird also in Stufen $10^{x \cdot 6}$ mit den Namen *X-illon* und $10^{3+x \cdot 6}$ mit den Namen *X-illiarde* gezählt, wobei X auf lateinisch ausgedrückt wird. So sind 10^{31} entsprechend zehn Quintillionen wegen

$$10^{31} = 10 \cdot 10^{30} = 10 \cdot 10^{5 \cdot 6},$$

und $10^{35} = 100 \cdot 10^{5 \cdot 6+3}$ sind dementsprechend einhundert Quintilliarden.

Das amerikanische System benutzt die *kleine Leiter*. Sie hat sich generell in englischsprachigen Finanzkreisen durchgesetzt. Hier wird in Schritten $(10^3)^{1+x}$ gezählt mit dem Namen *X-illion*, wobei X wieder lateinisch ausgedrückt wird. Bei $x = 0$ spricht man von *thousand*, bei $x = 1$ von *million* und erst für $x \geq 2$ kommen die lateinischen Bezeichner zum Tragen. Wie etwa *billion* für $x = 2$, also $(10^3)^{1+2} = 10^9$. Dementsprechend heißt $10^{31} = 10 \cdot (10^3)^{1+9}$ in den USA *ten nonillion*.

Wir verwenden die Abkürzungen für physikalische Einheiten wie in Tab. 2.2 gezeigt. Für das Kilogramm und die Nanosekunde gilt also: $1 \text{ kg} = 10^3 \text{ g}$, $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$. Da *s* sowohl die Abkürzung für Sekunde also auch die übliche Variable für Entfernung dar-

Tab. 2.1 Größen und ihre technischen, deutschen und amerikanischen Namen

Abk.	Wert	technisch	deutsch	amerikanisch
da	10^1	Deka	Zehn	ten
h	10^2	Hekto	Hundert	hundred
k	10^3	Kilo	Tausend	thousand $(10^3)^{1+0}$
M	10^6	Mega	Million $(10^6)^1$	million $(10^3)^{1+1}$
G	10^9	Giga	Milliarde	billion $(10^3)^{1+2}$
T	10^{12}	Tera	Billion $(10^6)^2$	trillion $(10^3)^{1+3}$
P	10^{15}	Peta	Billiarde	quadrillion $(10^3)^{1+4}$
E	10^{18}	Exa	Trillion $(10^6)^3$	quintillion $(10^3)^{1+5}$
d	10^{-1}	Dezi	Zehntel	tenth
c	10^{-2}	Zenti	Hundertstel	hundredth
m	10^{-3}	Milli	Tausendstel	thousandth
μ	10^{-6}	Mikro	Millionstel	millionth
n	10^{-9}	Nano	Milliardstel	billionth
p	10^{-12}	Piko	Billionstel	trillionth
f	10^{-15}	Femto	Billiardstel	quadrillionth
a	10^{-18}	Atto	Trillionstel	quintillionth

Tab. 2.2 Einheiten

Größe	Einheit	Abk.	Dimension	Variable
Länge	Meter	m	L	s
Zeit	Sekunde	s	T	t
Masse	Gramm	g	M	m
Wellenlänge	Meter	m	L	λ
Frequenz	Hertz	Hz	T^{-1}	f
Energie	Joule	J	$L^2 \cdot M \cdot T^{-2}$	E
Energie	Elektronenvolt	eV	$L^2 \cdot M \cdot T^{-2}$	E

stellt, werden wir meistens *sec* als Abkürzung für Sekunde verwenden. Etwas Vorsicht ist geboten, da in der Physik die Einheit der Masse das Kilogramm ist, entsprechend dem physisch vorhandenen Urkilogramm in Paris. Von der Logik her ist aber das Gramm die bessere Einheit. Ein Problem ergibt sich nur dann, wenn man in Formeln die Einheiten weglässt, wie es allerdings in der Physik weit verbreitet ist.

Um eine Vorstellung dieser Größen zu erhalten, finden sich in Tab. 2.3 einige Beispiele für Längen und in Tab. 2.4 einige Zuordnungen von Zeiten zu der in dieser Zeit vom Licht im Vakuum zurückgelegten Strecke. In der Tab. 2.3 mag vielleicht die geschätzte Größe des sichtbaren Universums am meisten überraschen, da das Alter des Universums auf knapp unter 14 Milliarden Jahre gesetzt wird und man daher auch 14 Milliarden Lichtjahre als Obergrenze des Radius des Sichtbaren erwarten könnte. Dieser einfache Gedankengang berücksichtigt aber nicht die zunehmende Expansion des Universums, die zu diesem deutlich größeren Durchmesser führt.

Tab. 2.3 Größenvergleiche

Größe	Beispiele dieser Größenordnung
$1\,l_p = 1,6 \cdot 10^{-33}\,\text{m}$	Plancklänge
$< 10^{-18}\,\text{m}$	Elektron, Quark, eventuell punktförmig ohne Größe
$10^{-17}\,\text{m}$	Reichweite der schwachen Kraft, verantwortlich für radioaktiven Zerfall
$10^{-15}\,\text{m}$	Proton, Reichweite der starken Kraft, verbindet Quarks
$10^{-14}\,\text{m}$	Atomkern
$10^{-10}\,\text{m}$ (1 Å, 0,1 nm)	Atom
0,15 nm	Atomabstand im Diamanten
1 nm	Radius der DNA-Helix
10 nm	Dicke einer Zellmembran
100 nm	HIV-Virus
200 nm	Länge E.Coli-Bakterium
1000 nm	Zigarettenrauchpartikel
7000 nm	Dicke von Spinnenseide
100.000 nm	Dicke eines menschlichen Haares
90 Milliarden Lichtjahre $\approx 9 \cdot 10^{26}\,\text{m}$	geschätzter Durchmesser des sichtbaren Universum

Tab. 2.4 In dieser Zeit vom Licht zurückgelegte Strecke

Zeit	Strecke
$1t_p = 5 \cdot 10^{-44}\,\text{sec}$ (Planckzeit)	Plancklänge
10 fsec	3 μm
1 nsec	30 cm
1 millisec	300 km

2.1.2 Elektromagnetische Wellen

Während Schall- und Wasserwellen ein Medium zur Fortpflanzung benötigen, bewegen sich elektromagnetische Wellen im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit c_0 fort. Die *Wellenlänge* λ einer Welle ist die Entfernung zwischen zwei benachbarten Orten gleicher Phase, also beispielsweise zwischen zwei Wellenbergen, ihre *Frequenz* f ist die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde und die Ausbreitungs- oder Phasengeschwindigkeit c ist die Geschwindigkeit eines Ortes gleicher Phase. Es gilt

$$\lambda = \frac{c}{f}.$$

Statt mittels Wellenlänge und Frequenz werden in der Physik elektromagnetische Wellen auch über deren *Energie* gemessen, die sich aus

$$E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

berechnet, wobei h das *plancksche Wirkumsquantum* ist mit

$$h \approx 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec} \approx 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{sec}.$$

h besitzt die Dimension von Energie mal Zeit. Statt h wird auch das so genannte *reduzierte plancksche Wirkungsquantum* \hbar verwendet, für das gilt

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \approx 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec} = 6,582 \cdot 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{sec}.$$

Energie wird in Joule, J, oder Elektrovolt, eV, gemessen mit

$$1 \text{ eV} \approx 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}.$$

Bei Schallwellen benutzt man statt λ auch L als Variable für die Wellenlänge. Elektromagnetische Wellen bewegen sich im Vakuum mit der Lichtgeschwindigkeit

$$c \approx 2,9979 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{sec}} \approx 300.000 \frac{\text{km}}{\text{sec}} \approx 1 \text{ Milliarde} \frac{\text{km}}{\text{Stunde}}.$$

Licht bewegt sich in anderen Medien mit einer geringeren Geschwindigkeit. Für Luft gilt etwa

$$c_L \approx \frac{c_0}{1,0003},$$

für Wasser

$$c_W \approx 0,75 \cdot c.$$

Im Wasser beträgt die Geschwindigkeit des Lichts also nur etwa 3/4 der Geschwindigkeit im Vakuum und es existieren Teilchen, die sich im Wasser schneller als Licht bewegen können. So wird das bläuliche *Tscherenkow*-Licht in Kernkraftwerken durch Elektronen erzeugt, die sich im Wasser schneller als mit c_W bewegen.

Der Frequenzbereich von elektromagnetischen Wellen umfasst viele Größenordnungen. Die Wellenlängen können von einigen Trillionstel Meter bis zu mehreren Tausend Kilometer reichen. Die Angaben der Wellenlängenbereiche in Tab. 2.5 variieren von Quelle zu Quelle leicht.

Auf dem einen Extrem der Skala liegen *Längstwellen* (engl. *Very Low Frequency*, abgekürzt als VLF) im Frequenzbereich unter 30 kHz, also mit Wellenlängen über 10 km und extreme Längstwellen (*Extremly Low Frequency*, ELF, 30 bis 3 Hz) mit Wellenlängen bis zu 100.000 km. Im Bereich 50 bis 60 Hz sendet Wechselstrom. Beispiele noch niedriger Frequenzen finden sich in den Gehirnaktivitäten von 0,4 bis 3,5 Hz (Delta-Wellen im Tiefschlaf, Koma) oder 4 bis 7 Hz (Theta-Wellen im Traumschlaf). Da Längstwellen einige Dutzend bis Hunderte Meter ins Meerwasser eindringen, werden sie z. B. zur Kommunikation mit U-Booten genutzt. Ein existierender VLF-Sender sendet mit 82 Hz, also einer Wellenlänge von 3656 km.

Tab. 2.5 Namen von elektromagnetischen Wellen

Name	Wellenlänge	Frequenz/Energie
Gammastrahlung	≤ 10 pm	≥ 200 keV
Röntgenstrahlung	0,01 bis 15 nm	30 EHz bis 20 PHz, 120 keV bis 80 eV
Ultraviolettes Licht (UV)	15 bis 100 nm	bis 3 PHz, 12 eV
Sichtbares Licht		
Violett	400 bis 420 nm	750 THz, 3,1 eV bis 710 THz, 3 eV
Blau	420 bis 490 nm	bis 610 THz, 2,5 eV
Grün	490 bis 575 nm	bis 520 THz, 2,2 eV
Gelb	575 bis 585 nm	bis 512 THz, 2,1 eV
Orange	585 bis 650 nm	bis 460 THz, 1,9 eV
Rot	650 bis 750 nm	bis 400 THz, 1,7 eV
Infrarotes Licht (IR)		
nahes Infrarot (A)	750 bis 1400 nm	bis 210 THz, 890 meV
nahes Infrarot (B)	1400 bis 3000 nm	bis 100 THz
nahes Infrarot (C)	3 bis 10 μ m	bis 30 THz
fernes Infrarot	10 μ m bis 1 mm	bis 300 GHz
Mikrowellen		
Millimeterwellen (EHF)	1 bis 10 mm	bis 30 GHz
Zentimeterwellen (SHF)	10 bis 100 mm	bis 3 GHz
Radio-/Fernschwellen		
Dezimeterwellen (UHF)	0,1 bis 1 m	bis 300 MHz
Ultrakurzwellen (VHF)	1 bis 10 m	bis 30 MHz
Kurzwellen (HF)	10 bis 100 m	bis 3 MHz
Mittelwellen (MF)	100 bis 1000 m	bis 300 kHz
Langwellen (LF)	1 bis 10 km	bis 30 kHz
Längstwellen (VLF)	10 bis 100 km	bis 3 Hz
Extreme Längstwellen (ELF)	10.000 bis 100.000 km	bis 3 Hz

Auf dem anderen Extrem findet sich Gammastrahlung. Mit Gammastrahlung bezeichnet man elektromagnetische Strahlung einer Energie oberhalb von etwa 200 keV, also mit Wellenlängen kleiner als etwa 10 pm.

Kosmische Strahlung besteht nicht aus elektromagnetischen Wellen, sondern aus Protonen und ionisierten Atomkernen, die sich mit annähernd Lichtgeschwindigkeit bewegen. Indirekt gemessen wurden bereits extragalaktische Teilchen mit bis zu 10^{20} eV. Allerdings sind sie so selten, dass man für eine feste Fläche von 1 qm nur in allen paar Jahrhunderten U erwarten darf, dass solch ein Teilchen diese Fläche passiert, wobei hier U das Alter des Universums ist. Im Jahr 2010 wurden am CERN bereits Protonen einer Energie von 3,5 TeV erzeugt. 1 TeV entspricht etwa der kinetischen Energie einer fliegenden Mücke. Dazu wurden Protonen bis in die Nähe der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt, so dass ein einzelnes Proton die kinetische Energie von ca 3 fliegenden Mücken erhielt. Ziel am CERN sind 14 TeV.

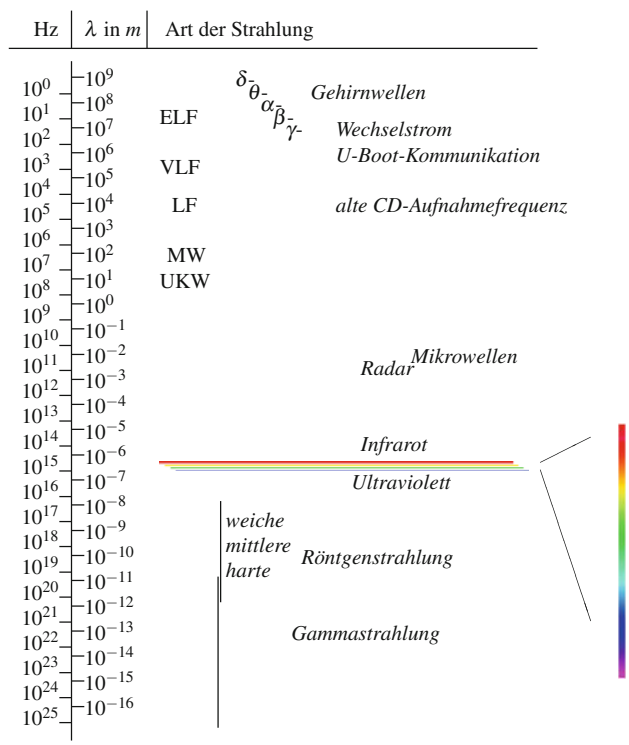


Abb. 2.1 Das Spektrum der Wellenlängen von 1 bis 10^{25} Hz. Der kleine Bereich des sichtbaren Lichts ist farbig dargestellt

Röntgenstrahlung überdeckt einen Wellenlängenbereich von ca 10^{-12} bis 10^{-8} m. Sie überschneidet sich mit ultravioletter Strahlung (im niederen energetischen Bereich) und Gammastrahlung (im höheren energetischen Bereich).

Das sichtbare Licht nimmt nur einen winzigen Ausschnitt aus diesem Spektrum ein und liegt für den Menschen im Wesentlichen zwischen 400 nm (violett) und 700 nm (rot).

Wir wollen in der Abb. 2.1 die Frequenzen von 1 bis 10^{25} Hz, also den Wellenlängenbereich von 10^{-16} (Gammastrahlung von 100 am) bis 10^9 m (ELF), betrachten. Das sind 26 Größenordnungen oder 10^{26} Einheiten. In dieser Tabelle ist wie üblich der Maßstab logarithmisch.

Das für den Menschen sichtbare Licht nimmt in diesem Spektrum einen Bereich von etwas mehr als 300 nm ein, das sind gerade 3 mal 2 Größenordnungen. Prozentual sind 300 von 10^{26} Einheiten 3 Quadrillionstel. Also ist das menschliche Auge nur in einem 3 Quadrillionstel des hier betrachteten Wellenlängenbereichs empfindlich.

Elektromagnetische Wellen unterschiedlicher Frequenzen haben durchaus unterschiedliche optische Eigenschaften. So lassen sich Gamma- und Röntgenstrahlen nicht mittels Glaslinsen bündeln oder mittels Spiegel reflektieren. Ein Gammastrahlenteleskop wie das

MAGIC (*Major Atmospheric Gamma-Ray Imaging Cherenkov Telescope*) auf La Palma misst Gammastrahlen indirekt über entstehende Sekundärteilchen bei der Wechselwirkung mit Atomen der Hochatmosphäre. Ein *Wolter-Teleskop* bündelt Röntgenstrahlung mittels schmaler werdender tubusartiger Hohlkörper aus Metall einer geometrischen Form von Rotationsparaboloiden, an denen streifende Röntgenstrahlen reflektiert werden. So lassen sich Linsen etwa für Röntgensatelliten simulieren.

Neben dem Modell von Licht als elektromagnetischer Welle gibt es in der Quantenelektrodynamik das Modell von Licht als Teilchen, dem Photon. Unterschiedliche Wellenlängen im Wellenmodell entsprechen unterschiedlichen Energien im Teilchenmodell. Ein Photon ist masselos und bewegt sich stets mit Lichtgeschwindigkeit. Die Tatsache, dass Photonen eine Energie, aber keine Masse besitzen, scheint der berühmten Gleichung

$$E = m \cdot c^2$$

zu widersprechen. In dieser Gleichung ist E aber die *Ruheenergie*, die für Photonen so nicht existiert, da diese sich nicht langsamer als mit Lichtgeschwindigkeit bewegen können. Die geringeren Geschwindigkeiten c_L, c_W von Licht in Luft oder Wasser sind damit erklärbar, dass Photonen mit Molekülen in Wechselwirkung treten: Elektronen absorbieren und emittieren Photonen, und dieser Vorgang dauert eine gewisse Zeit. Zwischen den Wechselwirkungen mit Elektronen bewegen sich Photonen aber auch in allen Medien mit c_0 . Diese Vorgänge sind aber noch viel komplexer. Für Nichtphysiker sind sie schön beschrieben in der hochinteressanten Einführung in die Quantenelektrodynamik in dem kleinen Buch QED des Physiknobelpreisträgers Richard Feynman [24].

Biologische und technische Fotosensoren sind sehr unterschiedlich aufgebaut. Wir werden ausführlicher das menschliche Sehen und insbesondere die menschliche Farbwahrnehmung betrachten. Technische Fotosensoren werden hingegen nur grob behandelt werden. Der Grund dafür ist, dass sich technische Sensoren ständig verändern und schnell weiterentwickeln und es nicht Aufgabe einer Universität oder eines einführenden Lehrbuchs sein kann, den jährlichen Status quo in der Technik von Rechnern oder Kameras zu vermitteln.

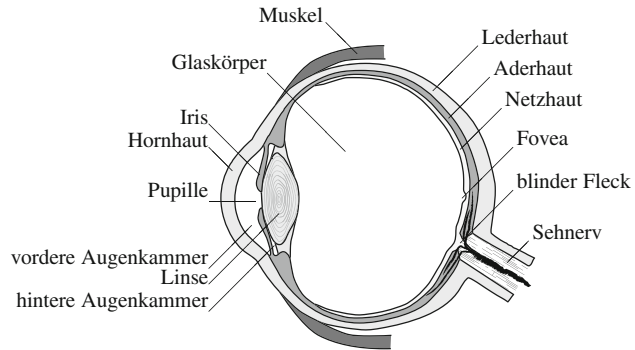
3.1 Menschliches Sehen

Zum menschlichen Sehen gehören die Bildaufnahme und Vorverarbeitung im Auge sowie die Weiterverarbeitung im Gehirn.

3.1.1 Auge

Das menschliche Auge (*Oculus*) ist relativ kugelförmig mit einem Durchmesser von ca. 23 mm. Der *Augapfel* umschließt den flüssigen *Glaskörper* und die mit *Kammerwasser* gefüllten *Augenkammern*. Die Augenkammern befinden sich im vorderen Teil von der *Hornhaut* bis zur *Linse*. Der Bereich von der Hornhaut bis zur *Regenbogenhaut (Iris)* wird *vordere*, der zwischen Iris und *Linse* *hintere* Augenkammer genannt. In der Mitte der Iris befindet sich die größenveränderliche lichtdurchlässige *Pupille*. Die Größenveränderung dient der Anpassung an die herrschende Helligkeit. Hinter Iris und Pupille liegt die Linse. Die Wölbung der Linse lässt sich über Muskeln verändern, so dass eine Fokussierung ermöglicht wird. Diese Fähigkeit nimmt im Alter ab, so dass für die Nahsicht eine Lesebrille erforderlich wird. Bei einer Operation zur Behebung des *grauen Stars (Katarakt)*, einer Trübung der Linse, wird diese durch eine feste künstliche Linse ersetzt. Dadurch geht die

Abb. 3.1 Schema eines menschlichen Auges, nicht maßstabgerecht. So ist der Durchmesser des Auges etwa 23 mm, die Dicke der Netzhaut nur 0,2 mm. Nach [46, 76].



Fokussierfähigkeit komplett verloren und es bedarf einer Brille für Nahsicht oder Fernsicht, je nach Auswahl der implantierten Linse. Abbildung 3.1 gibt einen schematischen Schnitt von oben durch das menschliche Auge wieder.

Der Augapfel wird von drei Schichten umfasst, und zwar von

- der äußeren *Lederhaut (Sclera)* mit einer Dicke bis über 1 mm, die vorne in die durchsichtige *Hornhaut (Cornea)* mit einer Dicke von ca. 0,6 mm übergeht,
- der mittleren *Aderhaut (Chorioidea, Choroidea)* mit einer Dicke von 0,1 bis 0,3 mm, und
- der inneren *Netzhaut (Retina)* mit einer Dicke von etwa 0,1 bis 0,6 mm.

Zwischen Linse und Netzhaut befindet sich der *Glaskörper*, der aus einer Flüssigkeit besteht. Die Lederhaut (auch *weiße Augenhaut* genannt) umschließt das Auge und gibt ihm mit dem Glaskörper zusammen Stabilität. In der Aderhaut liegen die Arterien und Venen zur Versorgung der Netzhaut. Die Netzhaut selbst besteht aus mehreren Schichten. Direkt an der Aderhaut befinden sich in der Netzhaut die lichtempfindlichen Sensoren des Auges und in der Netzhaut **vor** diesen Fotorezeptoren werden die Reaktionen der Sensoren in mehreren Nervenschichten gesammelt, vorverarbeitet und zum *Sehnerv (Nervus Opticus)* gesammelt. Die Sensoren des Auges liegen also nicht auf der inneren Schicht der Netzhaut, sondern auf der äußeren, zur Aderhaut hin. Der lichtempfindliche Teil der Fotosensoren liegt am nächsten zur Aderhaut, also in der Netzhaut am weitesten vom Lichteintritt entfernt. Der Vorteil liegt in einer besseren Energieversorgung der Rezeptoren durch die unmittelbar angrenzende Aderhaut. Ein Vorteil, der den Nachteil einer Lichtabsorption durch die Nervenschichten vor der Rezeptorenschicht wettzumachen scheint. Zur Verbesserung des Nachtsehens befinden sich bei manchen Tieren Reflektoren auf der Aderhaut, die das eingefallene Licht, das die vorgelagerten Fotorezeptoren nicht getroffen hat, für eine zweite Chance reflektieren. Der Sehnerv durchdringt im *blinden Fleck (Papille)* die Aderhaut und führt in das weitere *Gehirn (Cerebrum)*. Der blinde Fleck hat einen Durchmesser von fast 2 mm. Aus ihm treten neben den Nerven auch Blutgefäße ins Auge. Physiologisch ist das Auge selbst ein Teil des Gehirns und zwischen Auge und Gehirn existiert keine *Blut-Hirn-Schranke*.

3.1.2 Retina

Die Netzhaut bedeckt mit ca. 1100 mm^2 den Großteil des Inneren des Augapfels. Ihre Dicke variiert von ca. 0,1 mm am gelben Fleck über 0,2 mm am Äquator bis hin zu 0,6 mm am Sehnerv. Sie besteht von außen nach innen aus einer Schicht Rezeptoren und mehreren Schichten Nervengeflecht.

Fotorezeptoren

Die Rezeptoren werden nach Funktionalität und Form in *Zapfen (Cones)* und *Stäbchen (Rods)* unterteilt, wobei der Name die Form wiedergibt. Stäbchen sind etwa $1\text{ }\mu\text{m}$ dick und $40\text{ }\mu\text{m}$ lang, Zapfen etwas kürzer. Der lichtempfindliche Teil der Zapfen und Stäbchen befindet sich an deren äußeren Ende zur Aderhaut hin. Die Stäbchen dienen zur Rezeption von Helligkeit, die Zapfen für Farbe. Dabei sind die Stäbchen etwa 10^4 -mal empfindlicher als die Zapfen. Damit dienen die Stäbchen zum Nachtsehen (*skotopisches Sehen*) und die Zapfen zum Farbsehen (*photopisches Sehen*) am Tag. Im Nachtsehen sind keine Farben mehr wahrnehmbar (nachts sind alle Katzen grau). Das menschliche Auge besitzt ca. $120 \cdot 10^6$ Stäbchen, aber nur ca. $5 \cdot 10^6$ Zapfen. Sie sind über die Netzhaut nicht gleichverteilt. Am Rand überwiegen die Stäbchen, nahe dem Zentrum die Zapfen. Nahe dem optischen Zentrum befindet sich der *gelbe Fleck (Macula Lutea)* von ca. 5 mm Durchmesser und in dessen Mitte mit ca. 1,5 mm Durchmesser die *Sehgrube (Fovea Centralis)*. Am äußeren Rand der Macula sind die Stäbchen am dichtesten gepackt, inmitten der Fovea befinden sich aber nur noch sehr dicht gepackte Zapfen ohne Stäbchen. Daher muss man nachts, wenn man ein Objekt erkennen will, knapp daneben fixieren. Da das schärfste Sehen im gelben Fleck stattfindet, bewegt sich das Auge ständig mit kleinen zittrigen Bewegungen und erzeugt so die Illusion, dass wir überall im Blickfeld scharf sehen. Der Mensch besitzt in der Fovea etwa 170.000 Zapfen pro mm^2 , der Bussard hingegen eine Million. Damit kann der Mensch noch zwei Punkte im Winkelabstand von einer Minute ($= 1/60^\circ$) unterscheiden. Zum Größenvergleich, der Vollmond nimmt im Himmel $0,5^\circ$ ein. Außerhalb der Sehgrube sieht der Mensch recht schlecht, was auf Grund der stets vorhandenen schnellen Augenbewegung, die eine Abtastung des Sehfeldes darstellt, nicht wahrgenommen wird.

Der Mensch besitzt drei Arten von Zapfen, die auf unterschiedliche Wellenlängen reagieren. Diese sind

- S-Zapfen (für short wave lenght) mit einer Empfindlichkeit hauptsächlich im blauen Bereich und einem Empfindlichkeitsmaximum bei 420 nm,
- M-Zapfen (medium wave lenght) für den grünen Bereich mit maximaler Empfindlichkeit bei 534 nm und
- L-Zapfen (long wave lenght) für den roten Bereich mit maximaler Empfindlichkeit bei 564 nm.

Abbildung 3.2 (nach [5]) zeigt die Verteilung der Empfindlichkeit der drei Zapfenarten. Der Verlauf ist nur grob dargestellt.

Computer Vision

Einführung in die Verarbeitung und Analyse digitaler
Bilder

Priese, L.

2015, XVII, 332 S. 138 Abb., 50 Abb. in Farbe.,

Softcover

ISBN: 978-3-662-45128-1