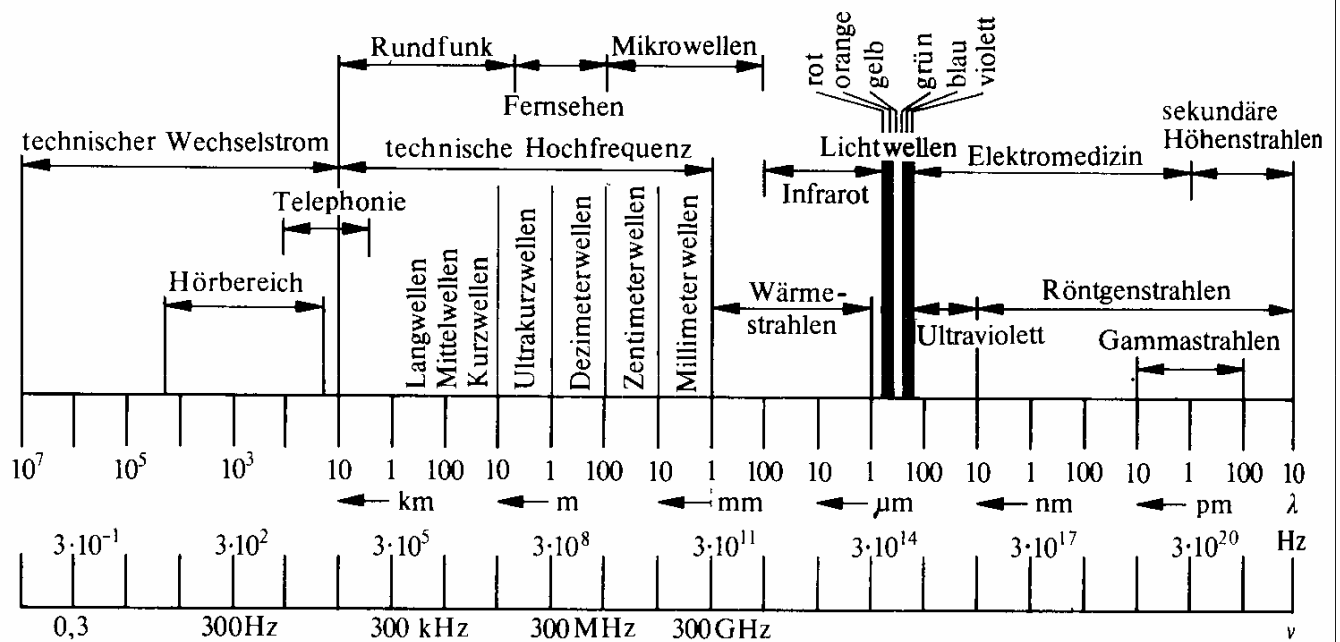


8 Optik

8.1 Das elektromagnetische Spektrum

Das elektromagnetische Spektrum erstreckt sich vom technischen Wechselstrom über Radiowellen, Wärmestrahlung, dem sichtbaren Bereich, ultravioletter bis zu harter Gamma Strahlung. Für die Anwendung ist neben der Energie der Strahlung auch die Absorption in Materie von Bedeutung, dadurch ist die Reichweite gegeben. Der Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts zeichnet sich dadurch aus, daß es von Gasmolekülen nicht absorbiert wird. Im Gegensatz dazu wird die auf der kurzwelligen Seite angrenzenden Röntgenstrahlung stark absorbiert. Sie regt die inneren Elektronen der Atome an, unabhängig von ihrer chemischen Bindung, also auch unabhängig vom Aggregatzustand. Mit der elektromagnetischen Strahlung des sichtbaren Lichtes bis zu niederen Frequenzen des technischen Wechselstroms werden die Leitungselektronen und die Gitterschwingungen angeregt. Dieser Effekt ist aber an den festen Zustand gebunden und von hängt von der Art des Kristallbaus ab. So ist z. B. Diamant klar und durchsichtig, Graphit dagegen schwarz, beide bestehen aus Kohlenstoff.



Spektrum. Graphische Darstellung des gesamten elektromagnetischen Spektrums (λ ist die im logarithmischen Maßstab aufgetragene Wellenlänge, ν die Frequenz)

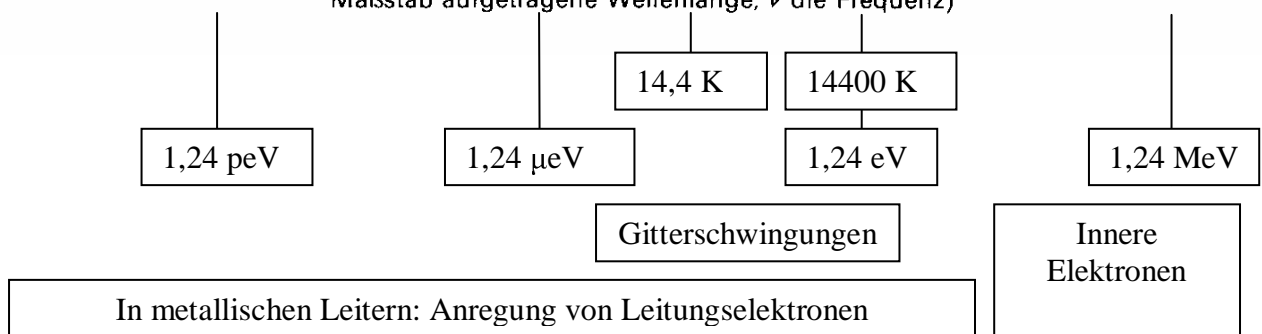


Abbildung 1 Elektromagnetisches Spektrum ("Meyers Enzyklopädisches Lexikon") und Energie der Strahlung in eV und K. Die letzte Zeile zeigt die Beiträge zur Absorption in unterschiedlichen Energiebereichen. „Telephonie“ steht für den Funkfernsprechverkehr auf See.

Bezüglich ihrer biologischen Wirksamkeit läßt sich die Strahlung wie folgt einteilen:

Spektralbereich	Wirkung
Mikrowellen, infrarotes Licht	Erwärmung
Sichtbares Licht	Photosynthese
Ultraviolettes Licht	Vitaminsynthese, Ionisation, Ozonbildung
Röntgen- und γ -Strahlung	Ionisation von Molekülen in den Zellen

Tabelle 1 Biologische Wirksamkeit elektromagnetischer Strahlung

Näheres zu Farben: http://www.uni-tuebingen.de/uni/pki/skripten/V8_2_8Farben.DOC

8.2 Geometrische Optik

8.2.1 Vorbemerkung zur Strahlen- und Wellenoptik

Das sichtbare Licht besteht aus elektromagnetischen Wellen, die folglich wie oben beschrieben mit den Elektronen der Materie in Wechselwirkung treten. Zur Berechnung der optischen Effekte müßte man also die *Maxwellschen Gleichungen* für die einfallende Welle und die Elektronenverteilung der im Strahl befindlichen Materie formulieren und die Lösungen dazu bestimmen. Dieses wäre im allgemeinen Fall sehr rechenintensiv und mühsam, es würde aber mit einem einheitlichen Formalismus die exakte Lösung aller in der Optik auftretenden Probleme liefern.

Glücklicherweise ist der Rückgriff auf die Maxwellschen Gleichungen nur in Spezialfällen nötig. Viele Beobachtungen und Erscheinungen kann man unter der Annahme von Lichtstrahlen verstehen. Sie breiten sich geradlinig aus und stehen senkrecht zur Wellenfront der elektromagnetischen Welle. Für die im Strahl befindlichen optischen Komponenten, Schirme, Blenden und Linsen gibt es Regeln, etwa das Brechungsgesetz für den Durchtritt durch Materie. Diese Sicht der Optik ist Thema der *Strahlenoptik*.

Es gibt aber auch Effekte, die mit der Vorstellung von Strahlen nicht erklärbar sind, dafür aber mit der Annahme miteinander wechselwirkender (interferierender) Wellen. Interferenzen sind auch in Wasserwellen beobachtbar, so daß man auch dazu mit einiger Erfahrung einen intuitiven Zugang bekommt. Diese Effekte sind Thema der *Wellenoptik*.

Beide Sichtweisen ersparen die Lösung der Eingangs zitierten Maxwellschen Gleichungen. Man bezahlt dafür mit der Aufteilung eines einheitlichen und mathematisch klar formulierten Themas in zwei Teilgebiete, an deren Zusammenhang man sich immer wieder erinnern muss.

8.2.2 Das Huygens-Fresnelsche Prinzip

Eine anschauliche, konstruktive Verbindung zwischen Wellen und Strahlen zeigt das Huygens-Fresnelsche Prinzip. Es besagt, daß man sich jeden Punkt einer Wellenfront als Ausgangspunkt einer kugelförmigen Elementarwelle denken kann. Alle diese Kugelwellen überlagern sich dann zu neuen Wellen, die sich in alle Richtungen ausbreiten. Einige Richtungen sind durch konstruktive Interferenz besonders bevorzugt: Die Normale zu diesen Wellenfronten zeigt den dieser Welle entsprechenden „Strahl“.

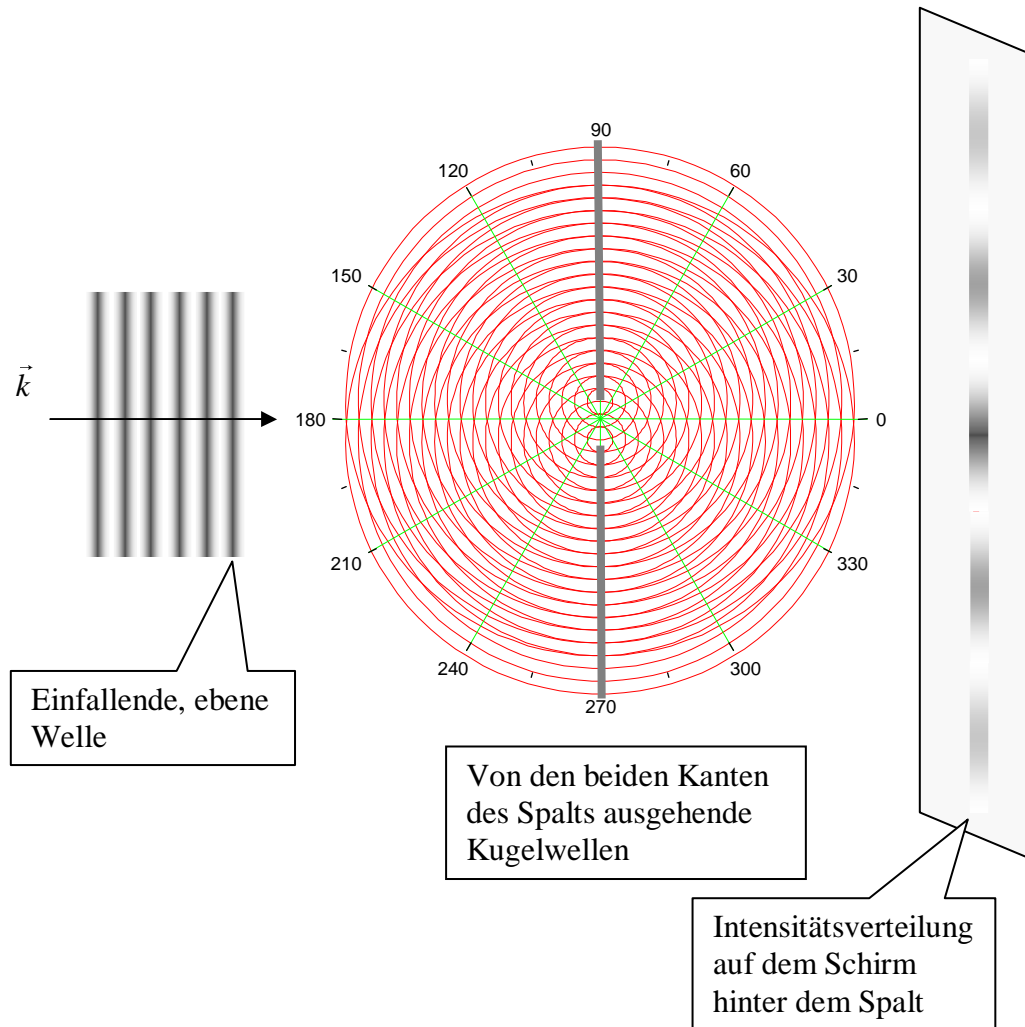


Abbildung 2 Ein beleuchteter Spalt stehe senkrecht zur Zeichenebene. Sein Beugungsbild entsteht aus Interferenz aller Wellen, die - nach dem Huygens-Fresnelschen Prinzip - von den Punkten zwischen den Kanten ausgehen. Gezeichnet sind nur die von beiden Kanten des Spalts ausgehende Wellen. Man erkennt qualitativ Richtungen hoher und geringer Intensität.

Das Huygens-Fresnelsche Bild zur Konstruktion einer einzigen Wellenfront als Summation vieler Wellen, die von „unendlich nah beieinander liegenden“ Streuzentren ausgehen, hat seine mathematische Entsprechung in der Fourier Transformation. Letztere ist die Grundlage für die mathematische Behandlung der Beugung.

8.2.3 Abbildung und Beugung

Betrachtet man ein Objekt, z. B. den Spalt in Abbildung 2, mit dem Auge, dann steht das Auge an irgendeinem Ort im Beugungsfeld des Spaltes. Vor der Linse ist die Information über die Gegenstände in der Intensität, Richtung und Phase der einzelnen Wellenzüge codiert. Die Linse lenkt die vom Objekt kommenden, divergierenden Wellen zu konvergenten Bündeln um. In der Ebene der Netzhaut entsteht das Bild durch die passende, d. h. phasentreue Überlagerung aller durch die Pupille fallenden Wellenfelder. Voraussetzung für eine Abbildung mit Information über das Objekt ist, dass genügend viele Wellenfelder durch die Pupille fallen:

Um die Breite des Spalts in Abbildung 2 zu sehen, mindestens zwei. Diese Betrachtungen werden beim Auflösungsvermögen optischer Geräte vertieft.

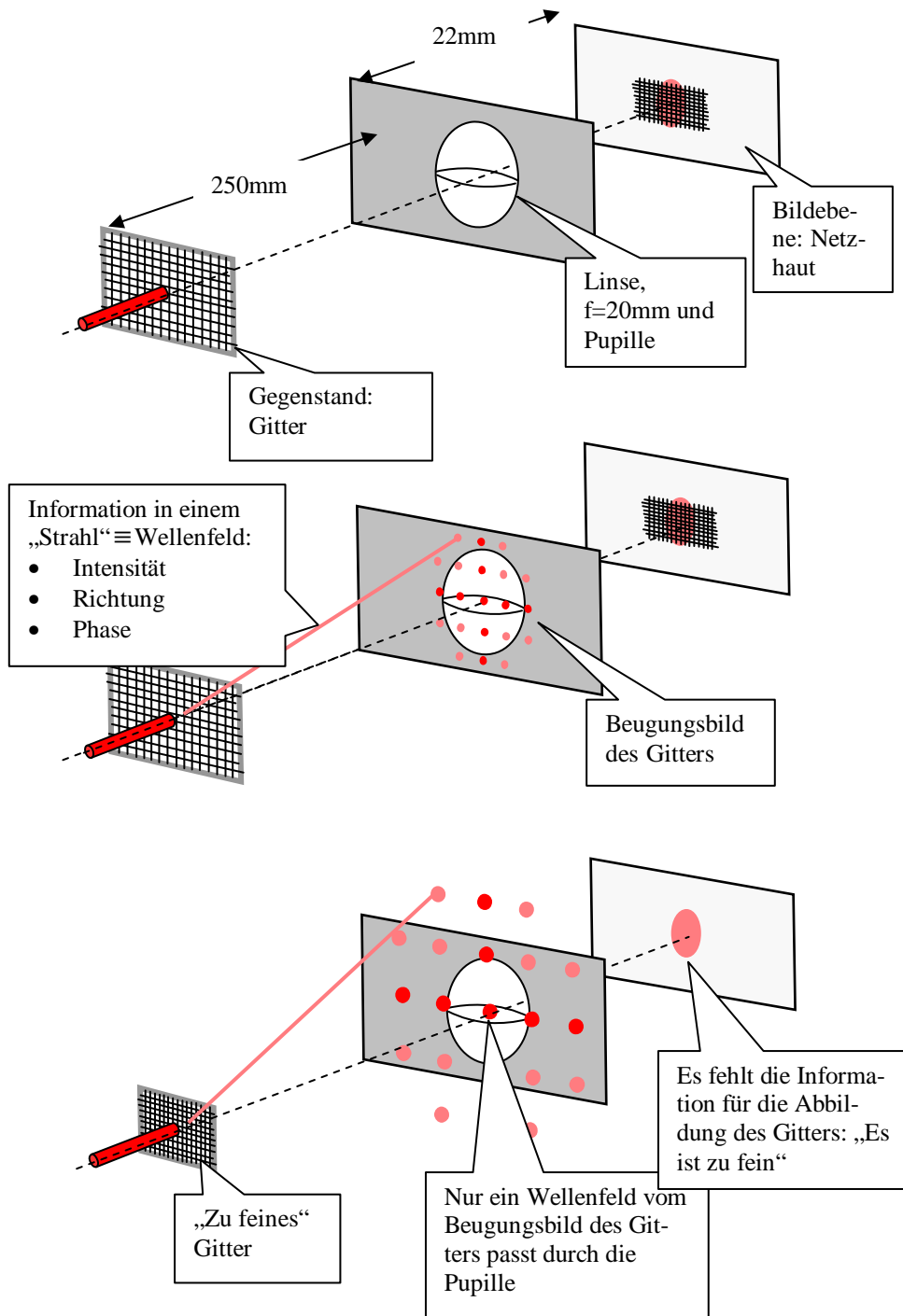


Abbildung 3 Verbindung zwischen Strahlen und Wellenoptik bei der Betrachtung eines Gitters mit dem Auge. Oben: Gegenstand, Linse, Pupille und Abbildung auf der Netzhaut, gemäß den Gesetzen der Strahlenoptik. Mitte: Diese Abbildung im Wellenbild: Linse und Pupille stehen inmitten der vom beleuchtenden Gitter ausgehenden, sich überlagernden Wellen, dem „Beugungsbild“ des Gitters. Die Linse rekonstruiert aus diesem „Input“ das Abbild auf der Netzhaut. Unten: „Zu feines“ wird das Gitter, wenn nur ein Strahl durch die Pupille passt: Die Information über das Gitter, der Abstand der Stäbe, ist verloren. Er ist im Winkel zwischen den Wellenfeldern (Strahlen) zu benachbarten Maxima enthalten.

Steht anstelle der Linse ein Schirm, dann wird darauf das Interferenzmuster abgebildet, entsprechend dem gepunkteten Muster in der Abbildung oben. Es ist zwar noch die Intensität der unterschiedlichen Wellenfelder zu erkennen und auch ihre Richtung kann angegeben werden, aber die Information über ihre Phasenlage ist verloren: So ist verständlich, daß das die Rekonstruktion des Gegenstands aus der Intensitätsbeobachtung des Beugungsbilds nicht ohne weiteres möglich ist. (vgl. http://www.uni-tuebingen.de/uni/pki/skripten/V8_4Beugung.DOC)

Versuch 1 Ein Spalt (Spaltbreite etwa 0,2 mm) wird mit Laserlicht beleuchtet, in ca. 1 m Entfernung steht ein Schirm. Zunächst wird der Spalt mit einer Linse abgebildet. Anschließend wird die Linse durch einen Schirm ersetzt. Man erkennt, daß die Linse das Beugungsbild des Spalts „sieht“. (Alle Bilder werden mit der Mikroprojektion vergrößert abgebildet.)

8.2.4 Reflexion und Brechung

Das Reflexionsgesetz

Fällt ein Lichtstrahl auf eine ebene Fläche die zwei Medien voneinander trennt, so wird er teilweise oder auch vollständig reflektiert. Dabei gilt das Reflexionsgesetz: Die reflektierten Strahlen liegen in einer Ebene und der Einfallswinkel α_1 ist gleich dem Reflexionswinkel α_2 .

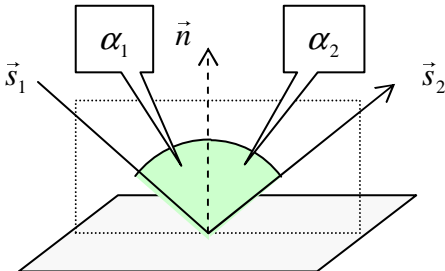
		$\alpha_1 = \alpha_2$
		$\vec{s}_1, \vec{s}_2, \vec{n}$ liegen immer in einer Ebene
	α_1	Einfallswinkel
	α_2	Reflexionswinkel
	\vec{s}_1, \vec{s}_2	Richtungsvektor des einfallenden und reflektierten Strahls
	\vec{n}	Normalenvektor auf der reflektierenden Ebene

Tabelle 2 Das Reflexionsgesetz

Die Gültigkeit des Reflexionsgesetzes ist jedem vertraut, z. B. vom Spiegel, Parabolspiegel im Scheinwerfer, Hohlspiegel.

Das Brechungsgesetz

Elektromagnetische Strahlung breitet sich im Vakuum mit der Lichtgeschwindigkeit c aus. In Materie ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit v kleiner als c . Fällt ein Lichtstrahl auf die Trennfläche zweier Medien, dann wird ein Teil reflektiert, der Rest dringt ins Medium ein. Dabei gilt das Brechungsgesetz von Snellius (Leiden, 1621):

		$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$
		$\vec{s}_1, \vec{s}_2, \vec{s}_3$ und \vec{n} liegen immer in einer Ebene
	v_1, v_2	Ausbreitungsgeschwindigkeiten im Medium 1 und 2
	\vec{s}_3	Vektor des ins Medium gebrochenen Strahls
	$n_i = \frac{c}{v_i}$	i=1,2: Definition des Brechungsindex

Tabelle 3 Brechungsgesetz. Alle Winkel beziehen sich auf das Lot \vec{n} . Es gilt auch die Legende zu Tab. 2

Läuft der Strahl vom optisch dichteren ins optisch weniger dichte Medium, dann wird der Strahl vom Lot \vec{n} weg gebrochen.

		$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$
		$\vec{s}_1, \vec{s}_2, \vec{s}_3$ und \vec{n} liegen immer in einer Ebene
	\vec{s}_3	Vektor des ins Medium gebrochenen Strahls
	$\frac{\sin \alpha_T}{\sin 90^\circ} = \sin \alpha_T = \frac{n_2}{n_1}$	Grenzwinkel für Totalreflexion

Tabelle 4 Brechung und Reflexion beim Übergang ins optisch weniger dichte Medium

Wird der Winkel β zum Lot $>90^\circ$, dann wird der Strahl im Medium *totalreflektiert*. In *Refraktometern* bestimmt man den Grenzwinkel α_T , bei bekanntem n_1 wird dann der gesuchte Brechungsindex n_2 eines Stoffes bestimmt:

Versuch 2 Reflexion und Brechung an einer Glasscheibe.

Versuch 3 Stehende Radarwellen von $\lambda = 3,2$ cm werden ausgemessen.

Versuch 4 Ein Paraffinquader, der von den Wellen durchdrungen wird, kann in zwei Paraffinblöcke (45° Prismen) zerlegt werden. Daran wird die Totalreflexion untersucht. Wenn der Spalt zwischen den Blöcken $< \lambda$ ist, dann gibt es außer der totalreflektierten noch eine durchlaufende Welle.