

# Mikrowellen

## Einführung

Mikrowellen erstrecken sich im elektromagnetischen Spektrum (vgl. Abb. 1) über den Bereich von etwa  $10^9$  Hz bis etwa  $3 \cdot 10^{11}$  Hz. Das entspricht Wellenlängen von etwa 30 cm bis etwa 1 mm. In diesem Versuch sollen Mikrowellen mit Wellenlängen im Zentimeterbereich dazu dienen, Ihnen Phänomene der elektromagnetischen Strahlung näher zu bringen, die mit sichtbarem Licht (Wellenlänge im Nanometerbereich) nur schwer zu beobachten sind.

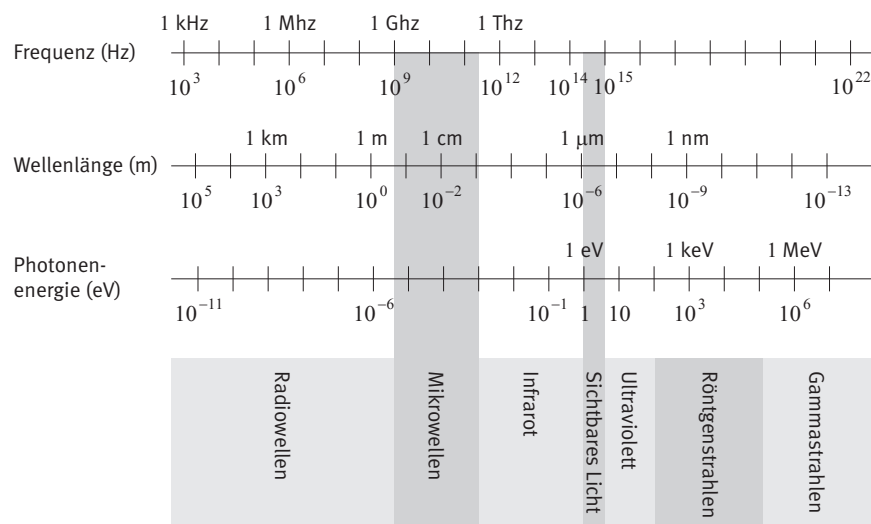


Abbildung 1: Das elektromagnetische Spektrum erstreckt sich kontinuierlich von der Gammastrahlung bis zu den Radiowellen. Die elektromagnetische Strahlung unterscheidet sich dabei nur in ihrer Frequenz (bzw. Wellenlänge oder Photonenenergie), die Natur der Strahlung ist in allen Bereichen die gleiche, sie gehorcht den Maxwellschen Gleichungen.

Interessant sind Mikrowellen, neben ihrem Einsatzgebiet in der Küche, vor allem in der Radioastronomie. Die Hyperfeinstruktur-Aufspaltung des  $1s$ -Niveaus im Wasserstoff beträgt  $5.87 \mu\text{eV}$ , was einer Wellenlänge von 21.1 cm entspricht. Aus der Intensität, Doppler-Verbreiterung und -Verschiebung dieser Mikrowellen ergeben sich Informationen über Dichte, Tem-

peratur und Bewegung von interstellaren und intergalaktischen Wasserstoffwolken.

## Braggsche Reflexion

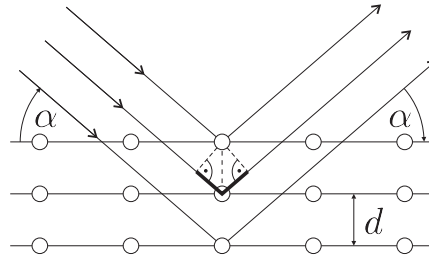


Abbildung 2: Braggsche Reflexion. Von links oben trifft eine ebene Welle unter dem sogenannten “Glanzwinkel”  $\alpha$  auf den Kristall. Die kleinen Kreise geben die Orte der regelmäßig angeordneten Streuzentren an (in unserem Fall die Metallkugeln). Der Netzebenenabstand wird mit  $d$  bezeichnet. Für die Braggsche Reflexionsbedingung muss der dick eingezeichnete Gangunterschied  $2d \sin \alpha$  ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge betragen.

Analog zur Beugung von Röntgenstrahlung an Kristallen können Mikrowellen an einem Gitter aus Metallkugeln gebeugt werden. Durch die regelmäßig angeordneten Metallkugeln lassen sich gedachte Ebenen legen, die *Netzebenen* genannt werden. Eine einfallende ebene Mikrowelle, die Primärwelle, regt die Elektronen in den Metallkugeln zum Schwingen an, was Sekundärwellen zur Folge hat. Aufgrund der Interferenz der Sekundärwellen untereinander wird ein Bruchteil der Primärwelle an der obersten Netzebene nach dem Reflexionsgesetz *Einfallswinkel* = *Ausfallswinkel* reflektiert. Die nichtreflektierte Strahlung dringt weiter in den Kristall ein und kann an der 2. oder 3. usw. Netzebene reflektiert werden. Jede Netzebene reflektiert also eine ebene Welle. Alle diese Wellen überlagern sich. Da sie verschieden lange Wege – bis zu ihrer Netzebene und zurück – hinter sich haben, werden sie fast immer alle möglichen relativen Phasen besitzen und sich deshalb gegenseitig auslöschen. Es sei denn, der Gangunterschied zweier an benachbarten Netzebenen reflektierten Wellen beträgt ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge  $\lambda$ . Dann sind alle reflektierten Wellen in Phase und überlagern sich konstruktiv. Der Gangunterschied ergibt sich aus Abbildung 2 zu  $2d \sin \alpha$ . Wenn also der Glanzwinkel  $\alpha$  der Braggschen Reflexionsbedingung

$$2d \sin \alpha = n\lambda \quad \text{mit} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

genügt, wird die Strahlung der Wellenlänge  $\lambda$  reflektiert, sonst nicht.

## Totalreflexion und Evaneszente Welle

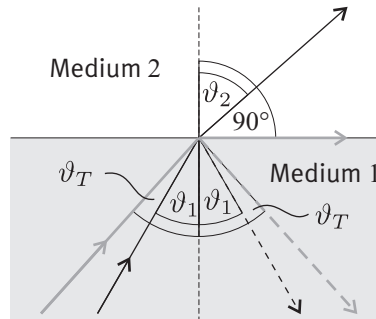


Abbildung 3: Totalreflexion. Von links unten trifft eine ebene Welle auf die Grenzfläche zwischen dem optisch dichteren Medium 1 und dem optisch dünneren Medium 2 ( $n_1 > n_2$ ). Der transmittierte Strahl wird von der Flächennormalen weggebrochen. Beim Einfall unter dem Grenzwinkel der Totalreflexion  $\vartheta_T$  ist  $\vartheta_2 = 90^\circ$ .

Wir betrachten zwei Medien 1 und 2 mit den Brechungsindizes  $n_1$  und  $n_2$ , die durch eine Ebene voneinander getrennt sind. Wenn eine elektromagnetische Welle aus Medium 1 unter dem Winkel  $\vartheta_1$  auf die Ebene fällt<sup>1</sup>, wird sie teils reflektiert und teils gebrochen (vgl. Abb. 3). Die gebrochene Welle pflanzt sich im Medium 2 unter dem Winkel  $\vartheta_2$  fort, für den nach dem Brechungsgesetz von Snellius

$$n_1 \sin \vartheta_1 = n_2 \sin \vartheta_2 \quad (2)$$

gilt.

Das Brechungsgesetz führt zum Phänomen der Totalreflexion. Eine Welle, die von einem optisch dichteren Medium in ein optisch dünneres Medium ( $n_1 > n_2$ ) propagiert, wird von der Flächennormalen weggebrochen. Es gibt dann einen Winkel  $\vartheta_T$ , für den  $\sin \vartheta_T = n_2/n_1$  gilt, und folglich  $\sin \vartheta_2 = 1$  bzw.  $\vartheta_2 = 90^\circ$ . Man nennt  $\vartheta_T$  den Grenzwinkel der Totalreflexion. Wenn der Einfallswinkel  $\vartheta_1 > \vartheta_T$  ist, wird 100 % der einfallenden Welle reflektiert, da  $\sin \vartheta_2$  nicht größer als 1 werden kann. Dieses Phänomen wird zum Beispiel bei der Lichtleitung in Glasfasern ausgenutzt.

Da das elektromagnetische Feld an der Grenzfläche nicht unstetig ist, existiert auch im Fall der Totalreflexion im Medium 2 eine Welle endlicher Feldstärke, die allerdings parallel zur Grenzfläche propagiert. Die Amplitude der Welle nimmt senkrecht zur Grenzfläche exponentiell mit dem Abstand zur Grenzfläche ab und wird auf einer Distanz von wenigen Wellenlängen

<sup>1</sup>Der Einfallswinkel wird, im Unterschied zum Glanzwinkel bei der Braggschen Reflexionsbedingung, bezüglich der Normalen gerechnet.

vernachlässigbar klein. Diese Welle nennt man *evaneszente Welle* oder *Oberflächenwelle*. Die optische Nahfeldmikroskopie nutzt die evaneszente Welle aus, um das Beugungslimit in der Lichtmikroskopie zu umgehen.

Bringt man ein Medium 3 mit höherem Brechungsindex  $n_3 > n_2$  so nah an das Medium 1 heran, dass die evaneszente Welle noch eine verhältnismäßig große Amplitude besitzt, kann elektromagnetische Energie durch die Lücke, also durch Medium 2 (in unserem Versuch ist Medium 2 Luft) in das Medium 3 fließen und dort weiter propagieren. Dieses Phänomen nennt sich *frustrierte Totalreflexion*. Ist die evaneszente Welle also auf der anderen Seite der Lücke noch stark genug, um im “frustrierenden” Medium Elektronen anzuregen, können diese eine in Medium 3 propagierende Welle erzeugen. Der Prozess ist dem quantenmechanischen Tunneln nicht unähnlich. Anwendung findet die frustrierte Totalreflexion unter anderem in der TIRF (total internal reflection fluorescence) Mikroskopie oder in Strahlteilern.

## Weiterführende Literatur

Mehr zur Optik finden Sie zum Beispiel in *Optik für Ingenieure* von F. Pedrotti, L. Pedrotti, W. Bausch und H. Schmidt. Die “Bibel” der Optik ist fraglos *Optics* von E. Hecht.