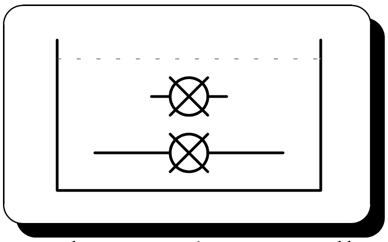
2.2.3 Reflexion, Brechung, Polarisation, Interferenz und Beugung elektromagnetischer Wellen

Elektromagnetische Wellen in Materie

Im Gegensatz zu mechanischen Wellen (z. B. Schallwellen, Wasserwellen) brauchen elektromagnetische Wellen zur Ausbreitung keinen Träger. Die sich selbst erhaltenden elektrischen und magnetischen Felder breiten sich ohne vermittelndes Medium aus.

Die Frage, ob sich eine elektromagnetische Welle beim Durchgang durch Materie ändert, kann durch folgenden Versuch beantwortet werden:

Versuch:



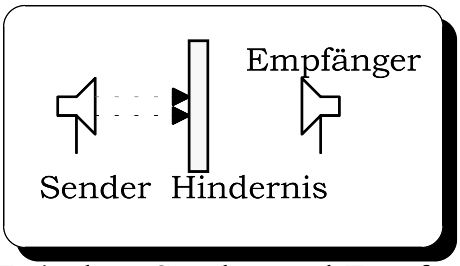
Vor dem Dezimeterwellensender steht ein Trog mit zwei verschieden langen Dipolen mit Anzeigelämpchen. Das eine ist 34,5 cm, das andere 34,5/9 cm = 3,8 cm lang.
Ergebnis: Zunächst leuchtet das Lämpchen im längeren Dipol. Füllt man Wasser ein, erlischt dieses, und das Lämpchen in der Mitte des kürzeren Dipols leuchtet auf.
Erklärung: Unter der Voraussetzung, dass beide Dipole in der Grundschwingung schwingen, ist die Wellenlänge in Wasser auf den neunten Teil der Wellenlänge in Luft (λ_M = 7,6 cm) abgesunken. Dies lässt sich folgendermaßen verstehen:
Für die Ausbreitungsgeschwindigkeit c_M in Materie erhielten wir im letzten Kapitel die Gleichung
$c_M = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} = c_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}}$ mit $c_0 = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$.
Für Wasser ist die Permeabilitätszahl $\mu_r \approx 1$, während die Dielektrizitätszahl $\varepsilon_r \approx 81$ beträgt. Daraus folgt für die Ausbreitungsgeschwindigkeit c_M in Wasser
$c_M = \frac{c_0}{\sqrt{81}} = \frac{c_0}{9}$.
Mit der für alle Wellenvorgänge gültigen Beziehung
$c = \lambda \cdot f \Rightarrow \lambda_M = \frac{c_M}{f}$
folgt die Verkürzung der Wellenlänge um denselben Faktor, um den die Ausbreitungsgeschwindigkeit c abnimmt, in Übereinstimmung mit dem experimentellen Ergebnis.

Zusammenfassung: Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c elektromagnetischer Wellen in Stoffen mit $\mu_r = 1$ und der Dielektrizitätszahl $\varepsilon_r > 1$ beträgt $c = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon_r}}$. Sie ist kleiner als die Ausbreitungsgeschwindigkeit c_0 im Vakuum.

Experimente mit Mikrowellen

Versuche zum Nachweis von Welleneigenschaften führen nur dann zu befriedigenden Ergebnissen, wenn die verwendeten Versuchsanordnungen (Drahtgitter, Reflexionsschirme, Spaltbreiten usw.) in der Größenordnung der Wellenlänge liegen. Dies führt bei den bisher verwendeten Dezimeterwellen (λ = 69 cm) zu unhandlichen Apparaturen. Die weiteren Versuche werden deshalb mit Mikrowellen durchgeführt, die in einem sog. Reflexklystron erzeugt werden. Der Sender strahlt dabei die elektromagnetischen Wellen als schmales Bündel ab, der Empfänger besteht aus einer $\lambda/2$-Hochfrequenzdiode, die zugleich als Empfangsdipol und als Gleichrichter dient.

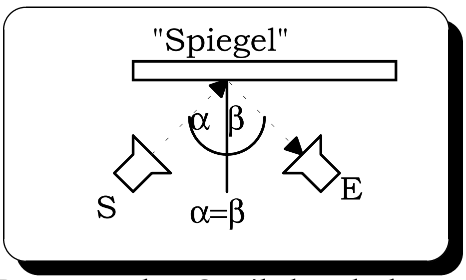
Versuch 1 (Absorption von Mikrowellen):



Zwischen Sender und Empfänger werden verschiedene Stoffe gebracht; dabei wird die Absorption beobachtet.
Ergebnisse: Isolatoren absorbieren kaum, Leiter schirmen kräftig ab.

Anmerkungen:
1. In den Mikrowellenherden wird die Energieaufnahme von Nahrungsmitteln durch Absorption genutzt.
2. Hochhäuser aus Stahlbeton schirmen elektromagnetische Wellen weitgehend ab; dies kann zum Beispiel zu Schwierigkeiten beim Rundfunkempfang führen.

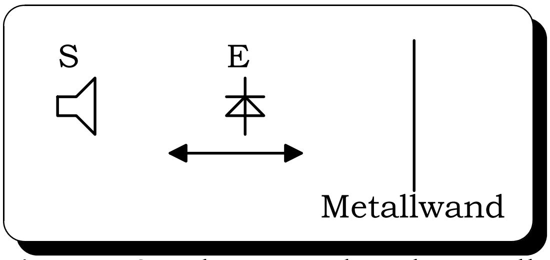
Versuch 2 (Reflexion):



Das von der Optik her bekannte Reflexionsgesetz wird mit Mikrowellen untersucht.

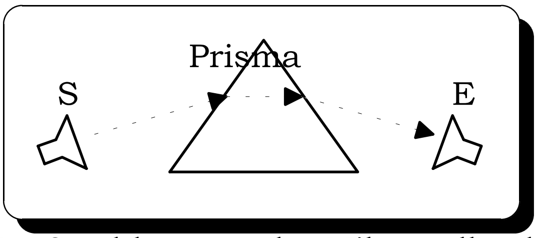
Ergebnis: Einfallswinkel α = Reflexionswinkel β (Reflexionsgesetz).

Versuch 3 (Wellenlängenmessung mit stehenden Wellen):



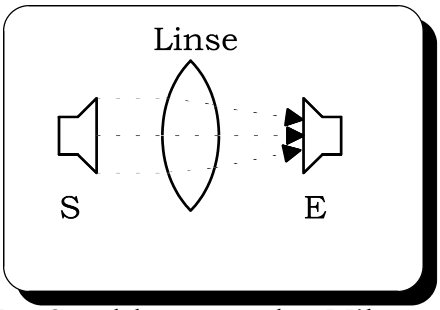
Die vom Sender ausgehenden Wellen werden an einer Metallwand reflektiert. Vor der Wand wird der Empfänger längs der Verbindungslinie Sender-Wand bewegt.
Ergebnisse: Es sind abwechselnd Maxima und Minima zu beobachten. Aus dem Abstand $d = \frac{\lambda}{2} = 1{,}6\text{cm}$ zweier benachbarter Knoten ergibt sich die Wellenlänge λ = 3,2 cm. Der Mikrowellensender schwingt also mit der Frequenz
$c = \lambda \cdot f \Rightarrow f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2d} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}}{3{,}2\text{cm}} = 9{,}4 \cdot 10^9 \text{Hz}$.

Versuch 4 (Brechung):



Im Strahlengang der Mikrowellen befindet sich ein Paraffinprisma.
E: Analog zum Licht werden Mikrowellen an der Grenzfläche zweier verschieden durchlässiger Medien gebrochen.

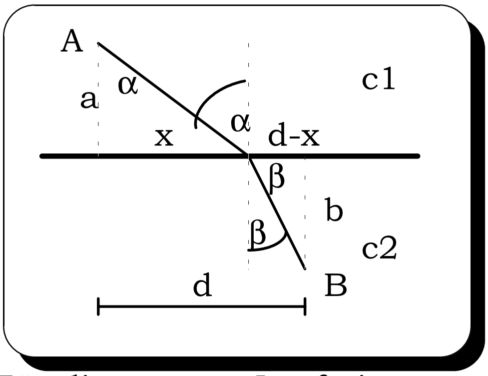
Versuch 5 (Bündelung):



Im Strahlengang der Mikrowellen befindet sich eine Paraffinlinse.
Ergebnis: Mikrowellen können durch wie sichtbares Licht durch Linsen gebündelt werden.

Auf die Brechung von Mikrowellen lässt sich das aus der geometrischen Optik bekannte Prinzip von Fermat (1601 - 1665) anwenden: Es besagt, dass sich Licht beim Übergang von einem Medium (Ausbreitungsgeschwindigkeit c_1) in ein anderes Medium (Ausbreitungsgeschwindigkeit c_2) so ausbreitet, dass es seinen Weg in möglichst kurzer Zeit zurücklegt. Es soll jetzt die Bedingung dafür berechnet werden:

Skizze:

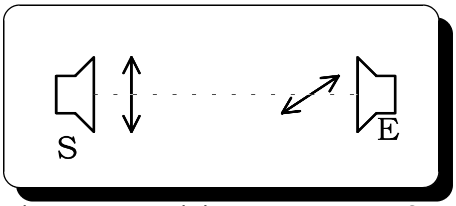


Für die gesamte Laufzeit t_{ges} von A nach B folgt, da auf den Teilwegen die Geschwindigkeit jeweils konstant ist, wegen
$c = \frac{s}{t} \Rightarrow t = \frac{s}{v}$

$t_{ges} = t_1 + t_2 = \frac{s_1}{c_1} + \frac{s_2}{c_2} = \frac{\sqrt{a^2+x^2}}{c_1} + \frac{\sqrt{b^2+(d-x)^2}}{c_2}$.
Notwendige Bedingung für ein Extremum der Laufzeit t_{ges} ist, dass die erste Ableitung von t_{ges} Null wird:
$t_{ges}' = \frac{2x}{2c_1 \cdot \sqrt{a^2+x^2}} + \frac{-2 \cdot (d-x)}{2c_2 \cdot \sqrt{b^2+(d-x)^2}}$.
Aus der Zeichnung entnimmt man die trigonometrischen Beziehungen
$\sin\alpha = \frac{x}{\sqrt{a^2 x^2}}$ bzw. $\sin\beta = \frac{d-x}{\sqrt{b^2+(d-x)^2}}$.
Für $t_{ges}' = 0$ gilt dann nach dem Kürzen durch 2 in jedem Term
$\frac{\sin\alpha}{c_1} = \frac{\sin\beta}{c_2}$ bzw.
$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{c_1}{c_2} = n$.
Für Mikrowellen gilt (vgl. den ersten Absatz des Kapitels!) für die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Materie
$c = c_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}}$.
Lässt man Mikrowellen aus dem Vakuum (oder Luft) auf ein Dielektrikum (ε_r, $\mu_r = 1$, für $\mu_r \neq 1$ findet keine Brechung statt!) fallen, so gilt für den Brechungsindex n:
$n = \frac{c_0}{c_r} = \sqrt{\varepsilon_r}$.

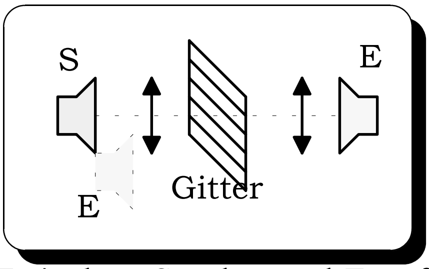
Zusammenfassung: Für den Übergang einer elektromagnetischen Welle vom Vakuum (Ausbreitungsgeschwindigkeit c_0) in einen Stoff (Ausbreitungsgeschwindigkeit c_r) gilt das Brechungsgesetz $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{c_0}{c_r} = n$. n heißt Brechzahl des betreffenden Stoffes. Für sie gilt $n = \sqrt{\varepsilon_r}$. Dabei ist ε_r die Dielektrizitätszahl des Stoffs.

Versuch 6 (Polarisation):



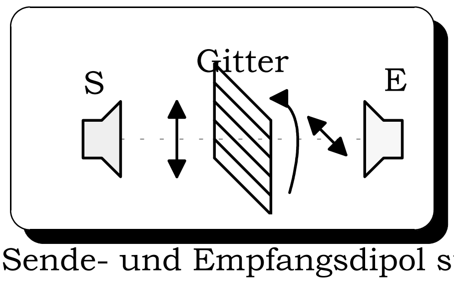
Die gegenseitige Lage von Sende- und Empfangsdipol wird variiert.
Ergebnis: Bei Parallelität von Sende- und Empfangsdipol erhält man maximalen Empfang; stehen beide Dipole senkrecht aufeinander, so geht der Empfang auf Null zurück.
Folgerung: Die Mikrowellen sind linear polarisiert. Auf der Mittelsenkrechten zum Dipol sind E-Vektor und Dipol stets parallel.

Versuch 7 (Polarisation/Reflexion)



Zwischen Sender und Empfänger wird ein Gitter gestellt.
Ergebnis: Stehen die Gitterstäbe parallel zum Sende- und Empfangsdipol, so wird kein Empfang registriert; steht dagegen der Empfänger neben dem Sender, so registriert er eine reflektierte Welle. Dreht man die Stäbe um 90^0, so sind die Ergebnisse genau umgekehrt.
Erklärung: Die Elektronen in den Metallstäben werden zu erzwungenen Schwingungen angeregt. Nun stellt ein solcher Gitterstab einen Dipol dar, dessen Eigenfrequenz f_0 wegen seiner verhältnismäßig großen Länge wesentlich kleiner als die Frequenz der Mikrowelle ist. Deshalb erfolgen die erzwungenen Schwingungen der Elektronen auf den Stäben im Gegentakt (vgl. erzwungene Schwingungen am Pohlschen Rad!). Dabei wirken die Stäbe als Sendedipole und strahlen nach beiden Seiten eine elektromagnetische Welle ab. Sie läuft hinter dem Gitter in derselben Richtung wie die Originalwelle; da sie aber gegenüber dieser in der Phase um 180^0 verschoben ist, löschen sich die beiden Wellen hinter dem Gitter aus.

Versuch 8 (Drehung der Polarisationsebene):



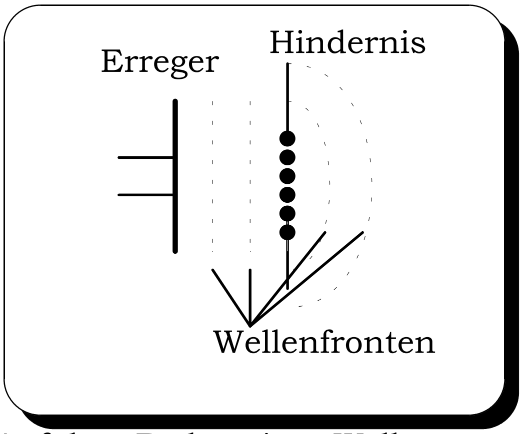
Sende- und Empfangsdipol stehen senkrecht aufeinander.
Ergebnis: Bringt man das Drahtgitter schräg zum E-Vektor in das Mikrowellenbündel, dann spricht der Empfänger wieder an.

Erklärung: Durch das Einbringen des Gitters wird die Polarisationsebene der Welle gedreht. Deshalb trifft der E-Vektor den Empfangsdipol nicht mehr senkrecht, so dieser durch eine Komponente des E-Vektors angeregt werden kann.

Das Huygenssche Prinzip und seine Anwendung auf Mikrowellen

Zum Verständnis des Huygenschen Prinzips sollen zunächst einige Grundversuche mit Wasserwellen durchgeführt werden:

Versuch 1 (Grundversuche mit Wasserwellen):



Auf dem Boden einer Wellenwanne liegt ein Spiegel, der schräg von oben beleuchtet wird und die Wasserbewegung auf einen Schirm abbildet. Zur Verhinderung von Reflexionen am Wannenrand hat diese flache Böschungen, die mit einem weichen Tuch belegt sind. Die Wasserwellen werden durch Stifte, Kämme usw. auf einem periodisch schwingenden Erreger erzeugt; die von den einzelnen Stiften erzeugten fortschreitenden Wellen haben gleiche Wellenlängen und eine feste Phasenbeziehung untereinander (kohärente Wellen). In die Wellenwanne werden verschiedene Hindernisse (Spalt, Doppel- und Mehrfachspalte) eingebaut.
Ergebnisse:

1. Punktförmige Erreger erzeugen kreisförmige, langgestreckte Erreger gerade Wellenfronten.
2. Schrumpft die Spaltöffnung auf die Größenordnung der Wellenlänge zusammen, dann laufen die Wellenfronten hinter dem Spalt fast kreisförmig auseinander: die Wellen werden gebeugt.
3. Der Raum hinter einem Doppel- oder Mehrfachspalt wird von "Straßen" durchzogen, auf denen die Wasseroberfläche in Ruhe bleibt: Es entsteht ein Interferenzfeld mit ausgeprägten Maxima und Minima.

Beugung und Interferenz lassen sich mit dem sog. Huygensschen Prinzip (Chr. Huygens, 1629 - 1695) verstehen:
Jeder Punkt einer Wellenfläche kann als Ausgangspunkt einer neuen Welle (einer sog. Elementarwelle) aufgefasst werden, die sich im gleichen Medium mit der gleichen Geschwindigkeit wie die ursprüngliche Welle ausbreitet. Die

sich weiter ausbreitende Wellenfront ergibt sich als äußere Einhüllende der Elementarwellen.

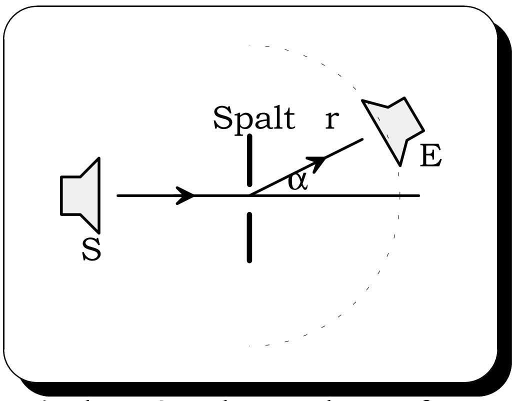
Anmerkung:
Die Beugung ist eine direkte Anwendung des Huygensschen Prinzips, die Interferenzmuster ergeben sich aus der Überlagerung der Elementarwellen. Aber auch Brechung (verschiedene Ausbreitungsgeschwindigkeiten in verschiedenen Medien) und Reflexion lassen sich mit diesem Prinzip erklären.

Für spätere Überlegungen sollten die wichtigsten Begriffe klar definiert sein:

1. Kohärenz: Wellen, deren Phasendifferenz in jedem Punkt des Wellenfeldes über längere Zeit konstant bleibt, heißen kohärent.
2. Beugung: Unter Beugung versteht man die Abweichung der Wellenausbreitung vom geometrisch-optischen Strahlenverlauf; ein Teil der Wellenenergie gelangt dadurch in den Schattenbereich. Beugungserscheinungen treten auf, wenn die freie Ausbreitung der Wellen durch Hindernisse im Strahlengang gestört wird.
3. Interferenz: Unter Interferenz versteht man die Gesamtheit der charakteristischen Überlagerungserscheinungen, die beim Zusammentreffen mehrerer Wellenzüge mit fester Phasenbeziehung untereinander am gleichen Raumpunkt beobachtbar sind. Die Interferenz beruht auf dem Superpositionsprinzip, wonach die Amplitude der resultierenden Welle gleich der Summe der Amplituden der Einzelwellen ist; dabei ist der Vektorcharakter der Einzelschwingungen zu beachten.

Es soll nun untersucht werden, ob auch Mikrowellen diese typischen Wellenphänomene Beugung und Interferenz zeigen. Dazu werden die Versuchsanordnungen für Wasserwellen entsprechend übertragen:

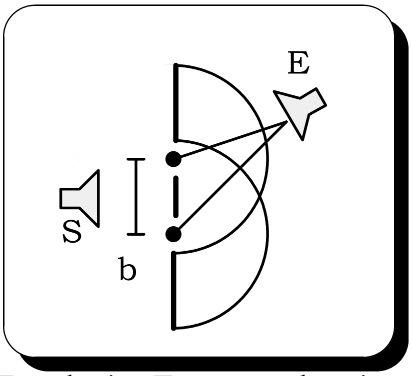
Versuch 2 (Beugung von Mikrowellen):



Zwischen Sender und Empfänger steht eine Spaltblende mit einer Blendenöffnung $d \approx \lambda$. Dann wird der Empfänger hinter der Blende geschwenkt.
Ergebnis: Die Mikrowellen werden am Spalt gebeugt.

Versuch 3:

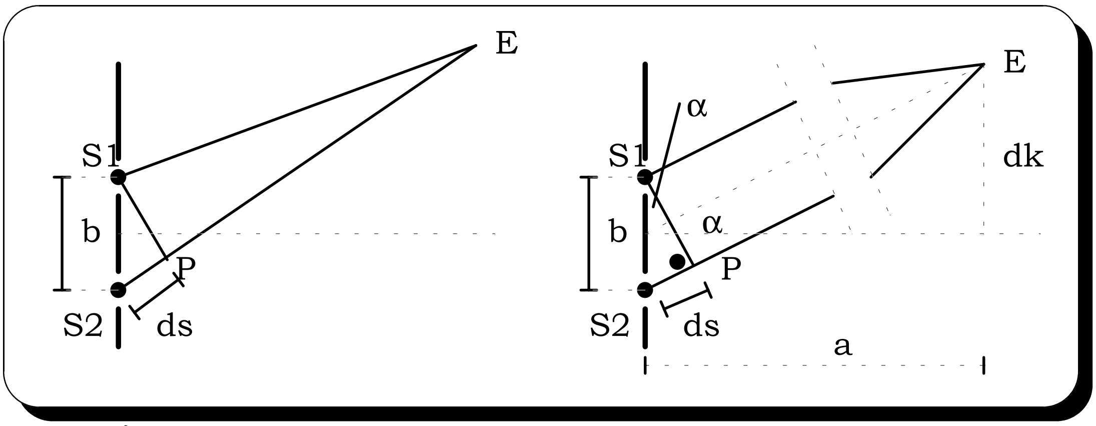
Zwischen Sender und Empfänger befindet sich ein Doppelspalt. Spaltöffnungen und der Spaltabstand sind in der Größenordnung der Wellenlänge. Dann wird der Empfänger hinter dem Doppelspalt geschwenkt.



Ergebnis: Es entsteht ein typisches Interferenzmuster aus Maxima und Minima.

Anmerkung:
Die für ein zeitlich konstantes Interferenzmuster notwendige Kohärenzbedingung wird durch die Verwendung des Doppelspalts anstelle von zwei unabhängigen Sendedipolen erreicht.

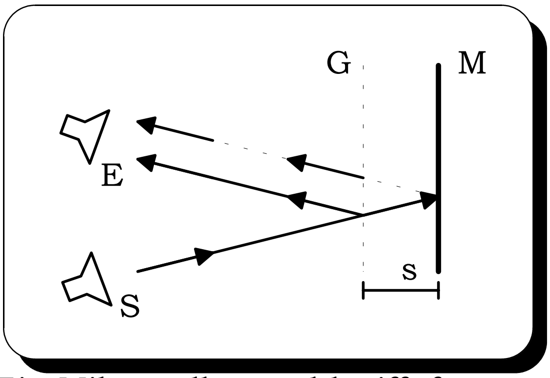
Ein derartiger Interferenzversuch ist grundsätzlich zur Bestimmung der Wellenlänge geeignet, wenn der Ablenkwinkel α, unter dem ein Maximum oder Minimum bestimmter Ordnung auftritt, oder der Abstand vom nullten Maximum an einer Beobachtungswand bekannt ist.
Ein Interferenzmaximum k-ter Ordnung tritt auf, wenn bei gleichphasig schwingenden Erregern der Wegunterschied zwischen den Ausgangspunkten der interferierenden Elementarwellen und dem Interferenzort ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge ist (vgl. Skizze):



$\Delta s = k \cdot \lambda$.
Zur weiteren Auswertung verwendet man häufig die für relativ große Entfernungen des Empfängers vom Doppelspalt gültige Näherung
$\frac{\Delta s}{b} = \sin\alpha \;\Rightarrow\; \Delta s = b \cdot \sin\alpha$,
wobei b den Abstand der beiden Spaltmitten (= Zentren der Elementarwellen) angibt. Durch Gleichsetzen der beiden Terme für .s erhält man
$k \cdot \lambda = b \cdot \sin\alpha$.

Insbesondere gilt für den Winkel zum 1. Maximum (k = 1)
$\lambda = b \cdot \sin\alpha$.
Ist der Ablenkwinkel α (z. B. wegen seiner geringen Größe) nicht unmittelbar zugänglich, dann lässt er sich wegen
$\frac{d_k}{a} = \tan\alpha$
durch den Abstand a zwischen Doppelspalt und Empfangsebene und die Ablenkung d_k vom nullten Maximum ersetzen.
Zwischen sin α und tan α besteht die Beziehung (vgl. FS S. 38)
$\sin\alpha = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{1+\tan^2\alpha}}$,
so dass für λ folgt:
$$\lambda = \frac{b}{k} \cdot \sin\alpha = \frac{b}{k} \cdot \frac{\tan\alpha}{\sqrt{1+\tan^2\alpha}} = \frac{b}{k} \cdot \frac{\frac{d_k}{a}}{\sqrt{1+\left(\frac{d_k}{a}\right)^2}} \;.$$
Für kleine Winkel α lässt sich in guter Näherung
$\sin\alpha \approx \tan\alpha$
setzen. Dann gilt die Vereinfachung
$$k \cdot \lambda = b \cdot \sin\alpha \approx b \cdot \tan\alpha = b \cdot \frac{d_k}{a} \Rightarrow \lambda \approx \frac{b \cdot d_k}{k \cdot a} \;.$$

Versuch 4 (Reflexion und Interferenz an einer Schicht):



Ein Mikrowellenstrahl trifft fast senkrecht auf eine Glasplatte G, hinter der eine Metallwand M aufgestellt ist, so dass die Mikrowellen teilweise bereits an der Glasplatte, teilweise erst an der Metallplatte reflektiert werden und in den Empfänger gelangen. Die Dicke der von Glas- und Metallplatte gebildeten Luftschicht wird variiert.
Ergebnis: Bei der Schichtdicke $s = \lambda/4$ erhält man ein Empfangsminimum. Bei weiterer Zunahme von s um jeweils $\lambda/4$ folgen Maxima und Minima aufeinander.
Erklärung: Bei der Reflexion an der Glas- und der Metallplatte erhält jeder der beiden Strahlen eine Phasensprung von 180^0. Der gesamte Gangunterschied beträgt $\Delta s = 2 \cdot s$. Einer Vergrößerung von s um $\lambda/4$ entspricht dann eine Zunahme des Gangunterschieds um $\lambda/2$.

Anmerkung: Würde der Phasensprung von 180^0 nur bei der Reflexion an der Metallplatte auftreten, dann entstünde bei $s = \lambda/4$ wegen des Gangunterschieds $\lambda/2$ und eines einzigen Phasensprungs ein Maximum.