

Im Gegensatz zum letzten Kapitel arbeiten wir hier mit elektromagnetischen Wellen von deutlich kleinerer Wellenlänge ( $\lambda = 3,2 \text{ cm}$ ). Hierzu verwenden wir einen anderen Sender (ein sogenanntes Klystron). In den meisten Fällen nutzen wir dabei Leittrichter an Sender und Empfänger, die gerichtetes Aussenden und Empfangen ermöglichen (Draufsicht siehe Zeichnung). Der grundsätzliche Aufbau unterscheidet sich aber kaum vom bekannten Dezimeterwellensender.

**Notiere, welche Materialien Mikrowellen durchlassen, welche nicht!**

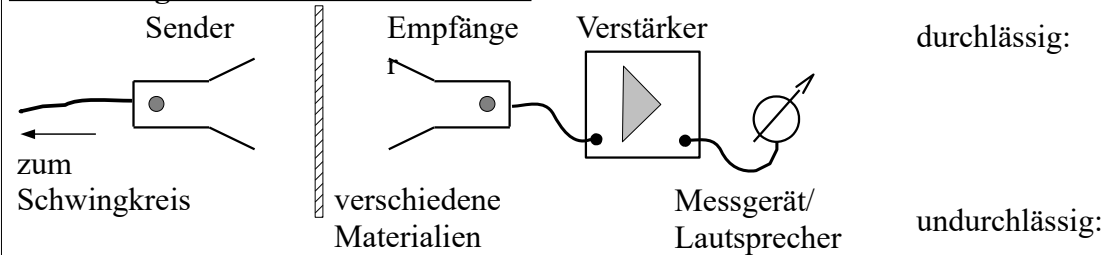
Im Verlauf dieses Kapitels werden wir auf bereits bekannte Eigenschaften elektromagnetischer Wellen treffen, aber auch neue kennenlernen. Dieses Experiment kennen wir schon vom Dezimeterwellensender. Es erlaubt uns, die Wellenlänge zu bestimmen. Hier kommt der Empfangsdipol ohne Leittrichter zum Einsatz, in der Draufsicht erscheint die Antenne als kleiner Kreis. **Bescribe Deine Beobachtung und berechne aus unserem Messwert die Wellenlänge der eingesetzten Mikrowellenstrahlung!** → Lösung

Auch dieses Experiment kennen wir prinzipiell schon vom Dezimeterwellensender. Die gerichtete Abstrahlung des Mikrowellensenders erlaubt nun eine zumindest grobe Messung der Winkel.

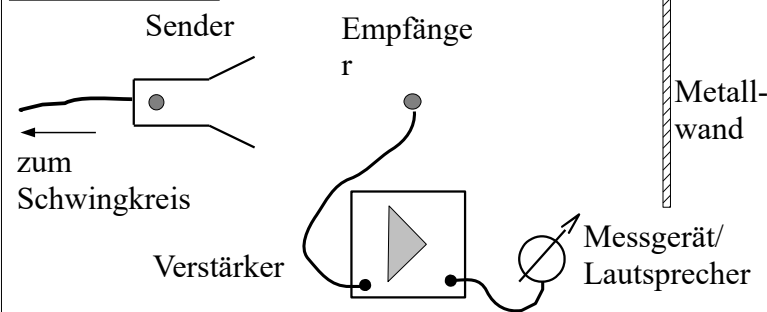
**Zeichne den Empfänger in den Bereich des maximalen Empfangs! Welche quantitative Regel (7. Jgst. Optik) können wir mit unseren Messungen nun auch für die Mikrowellen bestätigen?** → Lösung

## 5.4 Versuche mit Mikrowellen

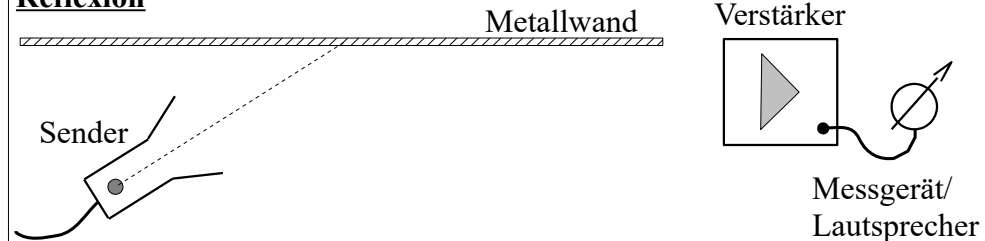
### Durchlässigkeit verschiedener Medien



### Stehende Welle



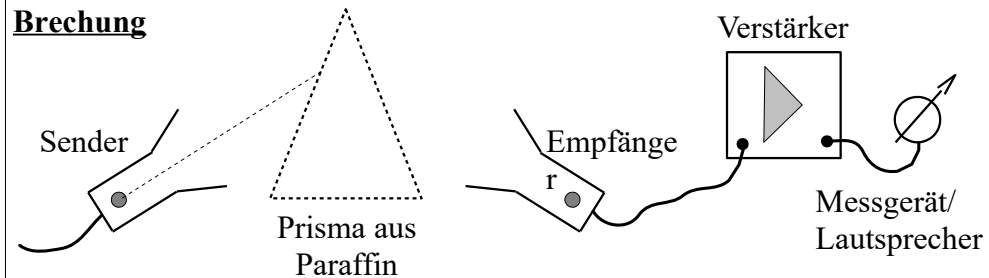
### Reflexion



Der Empfänger wird so außerhalb des Strahlkegels positioniert, dass kaum Strahlung zu ihm gelangt. Bringt man ein Prisma aus Paraffin wie gezeichnet ein, so erhält man einen guten Empfang.

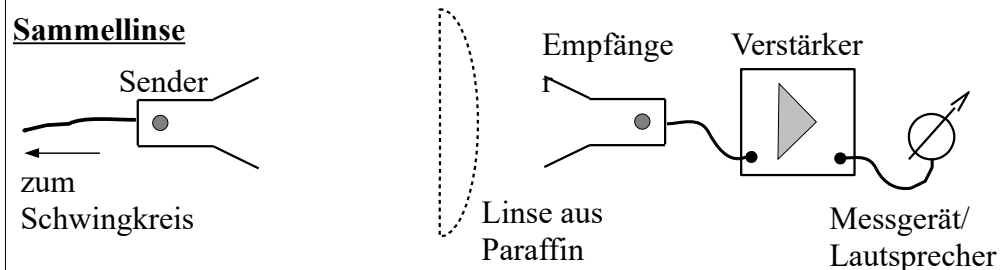
**Stelle mit einer durchgezogenen Linie (bunt) dar, wie die Strahlung vom Sender zum Empfänger gelangt, wenn man das Prisma aufstellt! Woher kennst Du den Effekt? Erwähne Dich an eine entsprechende Regel aus deinem früheren Physikunterricht. → Lösung**  
 Beachte: Wir argumentieren hier im Strahlmodell, sprechen aber nach wie vor über Wellen!

### Brechung



**Beschreibe die Beobachtung des Versuches und erkläre sie! Unterstütze Deine Ausführung durch schematische Ergänzung der Zeichnung mit Hilfe des Strahlmodells! → Lösung**

### Sammellinse



### **Selbst-Check:**

- Durchlässigkeit verschiedener Materialien
- Reflexionsgesetz und stehende Welle
- Brechung und Sammellinse

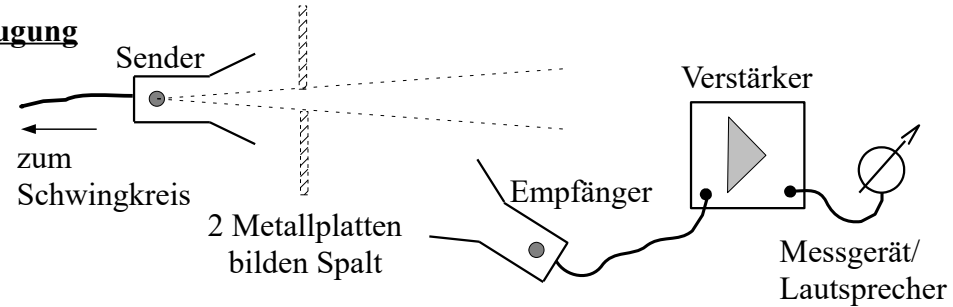
**In der Aufgabe S.184/18b findest Du ein weiteres, aus der Optik bekanntes Phänomen, das sich mit Mikrowellen demonstrieren lässt (überlege Dir zur Klärung der Aufgabe, wie das entsprechende Experiment mit Licht aussehen würde). Zur stehenden Welle gibt's die Aufgabe S.184/23.**

Beugung ist eine ebenso merkwürdige wie bedeutsame Eigenschaft von Wellen. Sie sorgt dafür, dass wir „um die Ecke hören“ können und ist die Grundlage für viele Interferenzerscheinungen. Im Experiment stellen wir zunächst den Empfänger wieder außerhalb des Funkkegels liegt. Dann bilden wir vor dem Sender mit zwei Metallplatten einen schmalen Spalt.

**Beschreibe Deine Beobachtung und gehe insbesondere darauf ein, weshalb dieses Versuchsergebnis höchst merkwürdig ist. Erkläre die Beobachtung mit Deinem Wissen aus der 10. Jgst. ! → Lösung**

Der Effekt tritt auch an Kanten auf, seine Stärke hängt vom Verhältnis der Wellenlänge zur Dimension des beugenden Objektes ab.

### Beugung

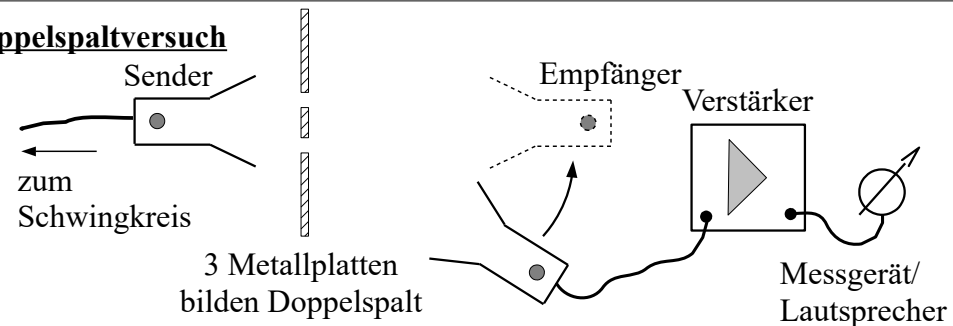


Diesen Versuch (ausgeführt mit Wasserwellen) solltest Du ebenfalls aus der 10. Jgst. kennen.

**Beschreibe Deine Beobachtung und notiere auch die gemessenen Winkel für minimalen Empfang! Wie ist der Empfang, wenn sich der Empfänger in der gestrichelten Position befindet, warum ist das auf den ersten Blick merkwürdig?**

**Erläutere kurz das Prinzip des beobachteten Effekts! (eine genaue Untersuchung erfolgt im nächsten Abschnitt) → Lösung**

### Doppelspaltversuch



Der Doppelspaltversuch (für welchen Wellentyp auch immer) ist der Klassiker unter den Abituraufgaben. Nebenstehende Zeichnung zeigt die Situation vergrößert inklusive der wesentlichen Messgrößen. Die gestrichelte Hilfslinie (blau) ist ein Lot auf die schräge Achse. Durch sie entsteht in der Zeichnung ein kleines Dreieck, das im Zentrum unserer Berechnung steht. → Lösung

**Markiere in der Zeichnung den Unterschied  $\Delta s$  der beiden grünen Weglängen farbig! Leite eine Formel für diesen Wegunterschied (abhängig von  $d$  und  $\alpha$ ) her mit Hilfe des kleinen, fast rechtwinkligen Dreiecks!**

Auf Basis dieses Zusammenhangs und der Regeln für Auslöschung und Verstärkung (siehe Kap. 5.3) kannst Du nun die Messwerte aus dem Versuch überprüfen.

1. Berechne die Wellenlänge für eine Sendefrequenz von 9,45 GHz.
2. Berechne den Winkel, unter dem zum ersten Mal Auslöschung auftritt (Spaltabstand  $b = 8 \text{ cm}$ ).
3. Berechne den Winkel, unter dem danach wieder Verstärkung auftritt.
4. Berechne den Winkel für die 2. Auslöschung.

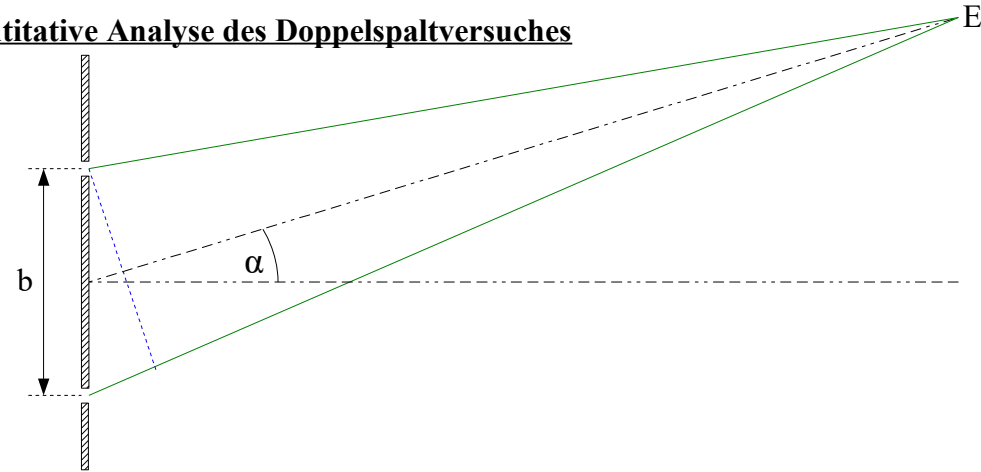
Verstärkung bei  $\Delta s = k \cdot \lambda$

Auslöschung bei  $\Delta s = (2k - 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$

**Selbst-Check:**

- Beugung
- Doppelspaltversuch Ergebnis
- Doppelspaltversuch quantitative Analyse

### Quantitative Analyse des Doppelspaltversuches



Die Aufgabe S.185/24 passt exakt hierher. Auch auf die Leifi-Seiten für die 10.Jgst. (Wellen) sei nochmals verwiesen. Auf Leifiphysik finden sich unter **Teilgebiet Elektrizitätslehre – Elektromagnetische Wellen – Ausbreitung elektromagnetischer Wellen Aufgaben** einige Abituraufgaben speziell zu den Versuchen mit Mikrowellen.

Der Holländer Christiaan Huygens beschreibt Ende des 17. Jahrhunderts die Ausbreitung von Wellen mit einem elementaren Prinzip. → Animationen auf Leifiphysik unter **Teilgebiet Mechanik – Mechanische Wellen – Ausblick – Huygensches Prinzip zur Beschreibung ...**

Mit diesem einen Prinzip gelingt die Erklärung ganz unterschiedlicher Wellenphänomene wie Reflexion, Brechung, Beugung.

1. Wellenfront läuft ein und erreicht ersten Modellpunkt des Mediums, dort läuft erste Elementarwelle los.
2. Wellenfront läuft weiter und erreicht zweiten Punkt, in dieser Zeit hat erste Elementarwelle bereits kleine Ausdehnung erreicht. Beachte: in gleicher Zeit ist der Laufweg im optisch dichteren Medium (blau) kleiner als in Luft (grün), da die Ausbreitungsgeschwindigkeit kleiner ist.
3. Wellenfront trifft 3. Modellpunkt. Inzwischen ist die zweite Elementarwelle los- und die dritte weitergelaufen.
4. Entsprechend geht's weiter. Die Einhüllende der Elementarwellen definiert die neue Wellenfront.  
*Wir haben nur wenige Modellpunkte gezeichnet, davon gibt's eigentlich unendlich viele, die beliebig dicht beinander liegen, damit liegen auch die Elementarwellen beliebig dicht.*

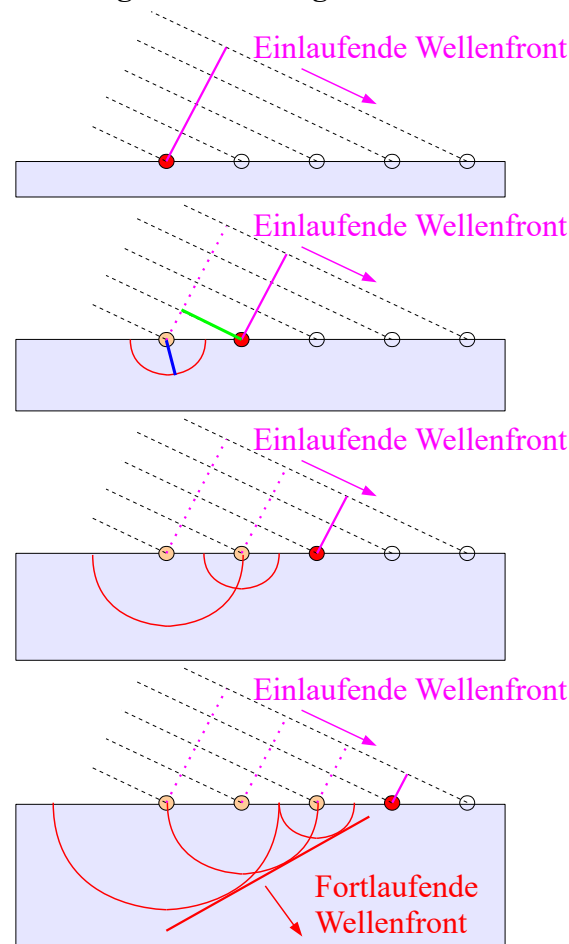
**Führe schrittweise die Konstruktion der fortlaufenden Wellenfront für die Reflexion durch.** → Lösung

Sehr instructive Animationen gibt es am oben gegebenen Link. S.184/20 ist hier eine passende Aufgabe, die Auflösung ergibt sich in den Animationen.

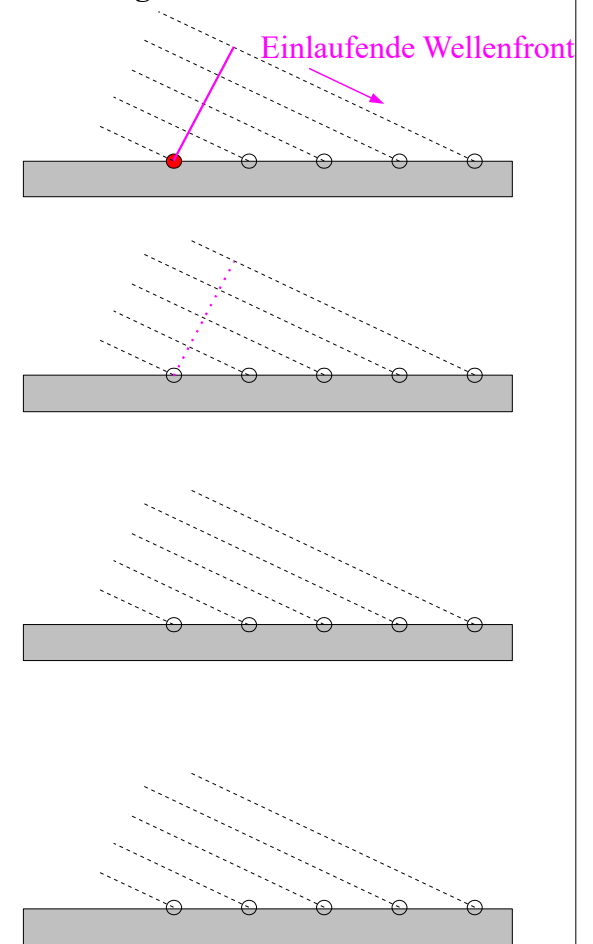
## Das Prinzip von Huygens

**Jeder Punkt der Wellenfront kann als Ausgangspunkt von Elementarwellen (Kreiswellen) angesehen werden, die sich mit derselben Geschwindigkeit wie die Welle selbst ausbreiten. Die Einhüllende dieser Elementarwellen ist die neue Wellenfront.**

### Erklärung der Brechung



### Erklärung der Reflexion



Für die Erklärung der Brechung war im letzten Abschnitt die geringere Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium entscheidend.

Maxwell konnte in seiner umfassenden Theorie über elektromagnetische Felder nachweisen, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen mit den früher ermittelten Feldkonstanten zusammenhängt. Das funktioniert im Vakuum ebenso wie in Materie (mit den entsprechenden relativen Konstanten).

**Berechne die Lichtgeschwindigkeit in Petroleum mit  $\epsilon_r = 2,2$  und  $\mu_r \approx 1$  (die Konstanten für's Vakuum gibt's in der FS oder im Skript, Kap. 1 und 2).**

Unsere Mikrowellen haben eine Schwingungsrichtung, die sich aus der Orientierung der Sendeantenne ergibt. Unser letzter Versuch mit dem Mikrowellensender untersucht diese sogenannte Polarisation. Wir halten ein Drahtgitter zwischen Sender und Empfänger. Dabei liegen die Gitterstäbe einmal parallel zu den beiden Antennen und einmal senkrecht.

**Beschreibe die unterschiedlichen Beobachtungen und versuche eine Erklärung! → Lösung**

Bei Licht werden wir mit sogenannten Polarisationsfiltern noch ganz spannende Versuche machen.

**Selbst-Check:**

- **Huygensprinzip: Brechung und Reflexion**
- **Ausbreitungsgeschwindigkeit u. Feldkonstanten**
- **Polarisation**

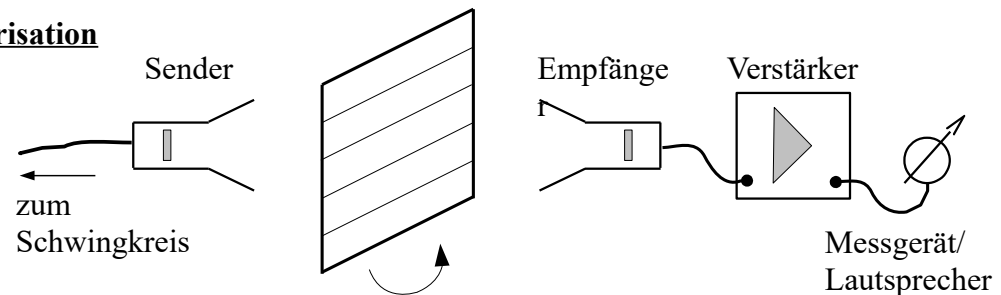
### Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen

Elektromagnetische Wellen breiten sich im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit aus ( $c = 2,99792 \cdot 10^8$  m/s). Diese Geschwindigkeit steht in direktem Zusammenhang mit den

Feldkonstanten für elektrische und magnetische Felder: 
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$$

Für die Geschwindigkeit in Medien ergibt sich entsprechend 
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}}$$

### Polarisation



Hier gibt es wenig an Aufgaben. Auf Leifiphysik gibt's unter **Teilgebiet Elektrizitätslehre – Elektromagnetische Wellen – Ausbreitung elektromagnetischer Wellen** Aufgaben eine alte Abituraufgabe zur Polarisation.