

Experimente mit Mikrowellen

25. Mai 2018

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen elektromagnetischer Wellen	1
2 Technische Bedeutung von Mikrowellen	2
3 Experimente	3
3.1 Genereller Versuchsaufbau	3
3.2 Test auf Transmission	4
3.3 Test auf Polarisierung	4
3.4 Direkte Messung der Wellenlänge	4
3.5 Brechung am Prisma	6
3.6 Ausbreitung hinter einem Spalt	7
3.7 Beugung am Doppelspalt	7
3.8 Informationsübertragung mit Mikrowellen	9

1 Grundlagen elektromagnetischer Wellen

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts beschäftigten sich viele Physiker mit der damals völlig unbekanntem Natur **elektromagnetischer Wellen**. Durch Experimente, teilweise vom österreichischen Physiker **Ernst Lecher** durchgeführt, konnte gezeigt werden, dass elektromagnetische Wellen aus schwingenden **magnetischen** und **elektrischen Feldern** bestehen, welche sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Eine vollständige, zufriedenstellende mathematische Beschreibung elektromagnetischer Wellen gelang 1864 dem berühmten schottischen Physiker **James Clerk Maxwell** in seinen wichtigen vier Gleichungen, den nach ihm benannten *Maxwellschen Gleichungen*. Für Interessierte: Der Zusammenhang zwischen Energie und Wellenlänge ist: $E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ mit der Lichtgeschwindigkeit $c = 3 \cdot 10^8 \text{m/s}$ und dem **Planckschen Wirkungsquantum** $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{Js}$. λ ist die Wellenlänge. Die elektromagnetischen Wellen werden nach ihrer Wellenlänge geordnet und in verschiedene Gruppen zusammengefasst (sichtbares Licht, Mikrowellen, Radiowellen usw.). Die Gesamtheit aller elektromagnetischen Wellen wird als **elektromagnetisches Spektrum** bezeichnet (siehe Abbildung 1).

Elektromagnetische Wellen sind, wie in Abb. 2 dargestellt, **transversal**. Das bedeutet, dass sie senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung schwingen, wie z.B. auch eine Wasserwelle, die vertikal (auf und nieder) schwingt sich aber horizontal ausbreitet. Was genau schwingt, sind elektrische und magnetische Felder, wobei jeweils ein elektrisches und ein magnetisches Feld zusammen auftreten. Die Feldstärkevektoren eines zusammen auftretenden magnetischen und elektrischen Feldes stehen immer senkrecht zueinander (siehe Abb. 2). Die Ebene, in der das elektrische

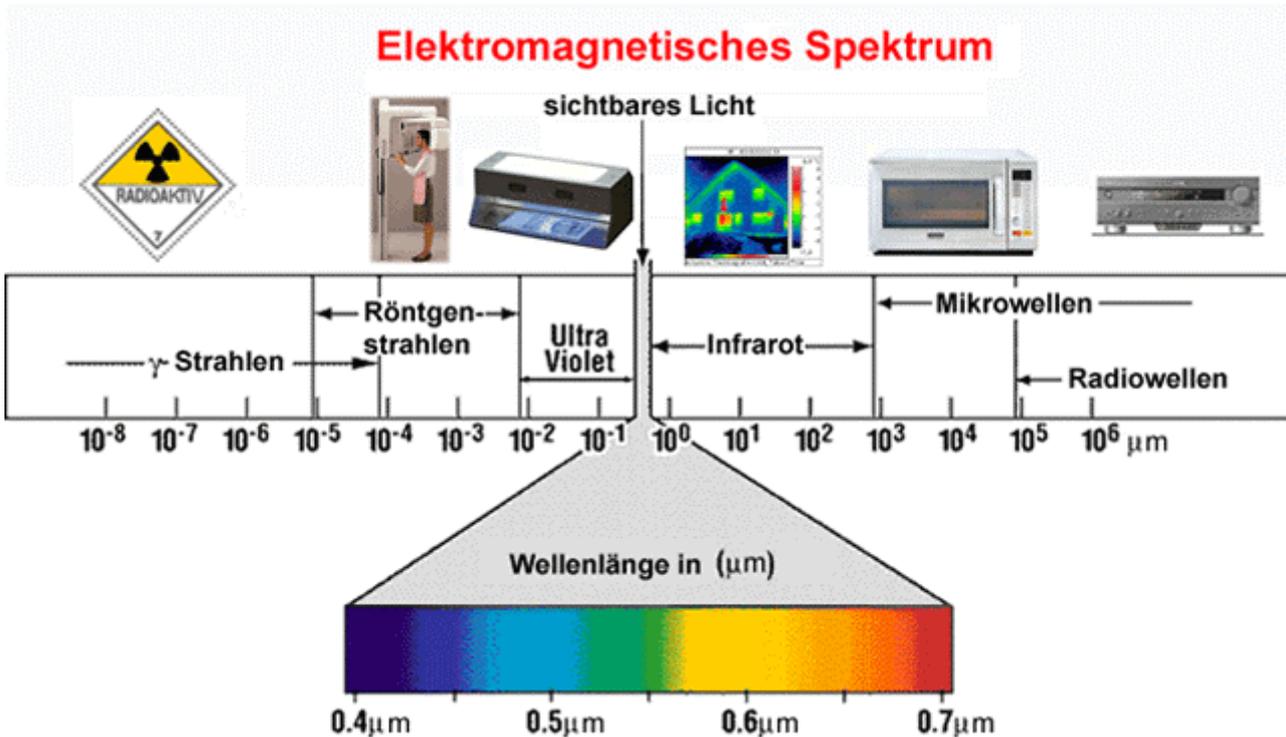


Abbildung 1: Übersicht über das [elektromagnetische Spektrum](#). Auf der horizontalen Skala ist die Wellenlänge aufgetragen. Die [Mikrowellen](#), mit denen hier experimentiert wird, befinden sich ungefähr bei der Wellenlänge $10^4 \mu\text{m} = 1 \text{ cm}$.

Feld schwingt, ist als Polarisationssebene definiert worden.¹ Im allgemeinen Fall schwingt eine elektromagnetische Welle (im Unterschied zu Wasserwellen) gleichzeitig in viele/alle Richtungen senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung. Schwingt sie im speziellen Fall nur in genau einer Richtung, so wird solch eine Welle als linear [polarisiert](#) (meistens nur kurz „polarisiert“) bezeichnet.

2 Technische Bedeutung von [Mikrowellen](#)

Unsere heutige Gesellschaft ist ohne die Nutzung des gesamten Spektrums elektromagnetischer Wellen unvorstellbar. Der [Frequenzbereich der Mikrowellen](#) erstreckt sich von ca. 1 GHz bis 300 GHz entsprechend Wellenlängen von 1 mm bis 30 cm.

Als erstes denkt beim Wort Mikrowelle wahrscheinlich jeder an die „Mikrowelle“ in der Küche, in der Speisen schnell erwärmt werden. Die Erwärmung darin kommt dadurch zustande, dass die Wassermoleküle in den Speisen durch die Mikrowellenstrahlung zu einem stärkeren Schwingen angeregt werden.

Doch damit sind die Anwendungsmöglichkeiten für diesen Spektralbereich keineswegs erschöpft:

- Im untersten Frequenzbereich, um 1 GHz herum, befinden sich die Frequenzbänder der [Mobiltelefonie](#). Sie liegen teilweise knapp außerhalb teilweise aber auch knapp innerhalb der [Mikrowellenfrequenzen](#).
- Der Datenfunk von Computern ([WLAN](#), [Bluetooth](#)) arbeitet im Mikrowellenbereich.

¹Genauso gut hätte auch die Schwingungsebene des magnetischen Feldes zur Definition der Polarisationssebene benutzt werden können. Man hat sich für das elektrische Feld entschieden und muss, um Missverständnisse zu vermeiden, bei dieser einmal gewählten Definition bleiben.

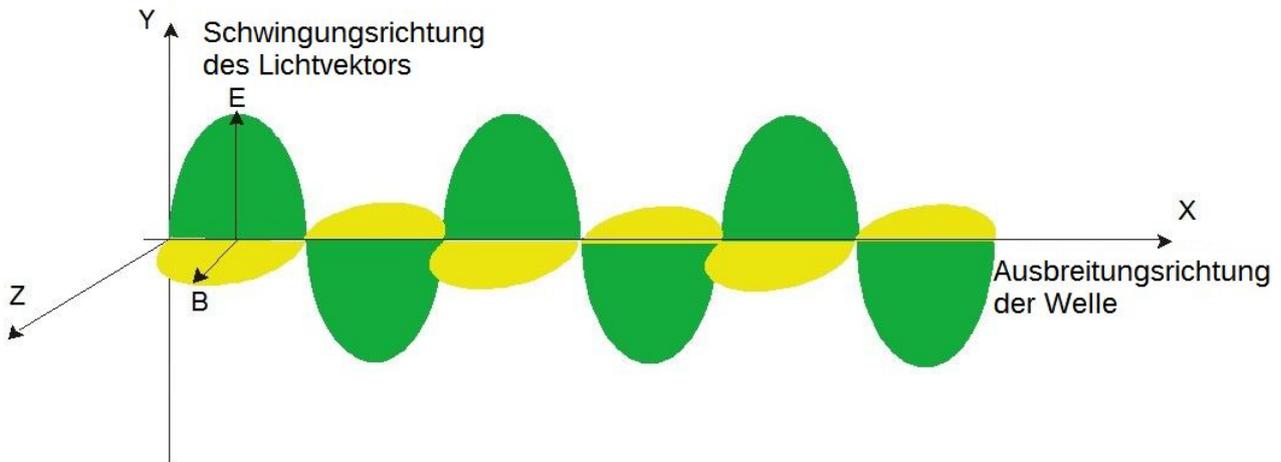


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer (polarisierten) elektromagnetischen Welle. Als Schwingungsebene ist die Schwingungsrichtung des elektrischen Feldvektors vereinbart worden. Senkrecht dazu steht *immer* die Schwingungsrichtung des zugehörigen magnetischen Feldvektors.

- Sämtliche [Radarsysteme](#) arbeiten mit elektromagnetischer Strahlung mit Wellenlängen im cm-Bereich und nutzen damit ebenfalls Mikrowellen.

In den folgenden Experimenten werden Mikrowellen benutzt, weil mit ihnen, aufgrund ihrer Wellenlänge, Messungen besonders einfach sind und sehr anschauliche Ergebnisse erzielt werden können.

3 Experimente

3.1 Genereller Versuchsaufbau

Das Experiment besteht aus einem Mikrowellensender und zwei Mikrowellenempfängern, die an ein Betriebsgerät angeschlossen werden müssen. Zur quantitativen Erfassung von Abständen und Winkeln gibt es zwei Schienen, die mit einem Gelenk verbunden werden. Auf die Schiene mit der Halterung kommt der Sender.

Von den Empfängern hat einer eine rechteckige trichterförmige Öffnung und der andere die Form einer kleinen Sonde. Der trichterförmige Empfänger kommt auf die Schiene, die keine Halterung hat. Die Empfängersonde kommt nicht auf die Schiene, sondern wird auf einen Fuß montiert und mit Stativmaterial auf die gleiche Höhe wie der Sender gebracht. Dabei muss die dunkle Markierung hinter der weißen Plastikkappe der Sonde *nach oben zeigen* und ist es wichtig einen *rechteckigen* Fuß zu benutzen! Sender und jeweils einer der beiden Empfänger müssen an das Betriebsgerät angeschlossen werden. Eine Skizze des Versuchsaufbaus ist in Abb. 3 dargestellt. Ob der Empfänger ein Mikrowellensignal empfängt, kann auf

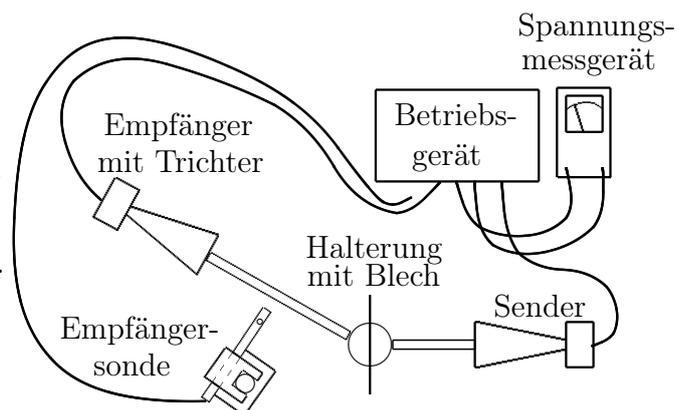


Abbildung 3: Schematische Skizze des Versuchsaufbaus aus der Vogelperspektive mit allen Komponenten.

zwei Arten nachgewiesen werden:

1. *Qualitativ* durch Einschalten des im Betriebsgerät eingebauten Lautsprechers. Kommt ein Signal an, so gibt es einen Pfeifton.
2. *Quantitativ* durch Anschluss eines Spannungsmessgerätes an das Betriebsgerät (Messbereich geeignet einstellen, Wechselstrom). Die angezeigte Spannung ist proportional zur Intensität des empfangenen Signals. Diese Methode ist für die meisten Messungen zu bevorzugen.

In der Regel muss dabei am Betriebsgerät der Modulatorschalter auf „INtern“ stehen und der „AMPLIFICATION“-Drehregler sollte hinreichend aufgedreht sein.

3.2 Test auf **Transmission**

Hierfür werden Sender und trichterförmiger Empfänger auf der Schiene in einer geraden Linie gegenüber aufgestellt. Als Nachweismethode reicht der eingebaute Lautsprecher. Auf die Halterung dazwischen werden nacheinander die Sperrholz- und die (keine Öffnungen enthaltende) Blechplatte gestellt. **Notiere hier deine Beobachtungen und Schlussfolgerungen:**

3.3 Test auf **Polarisation**

Hierfür werden Sender und trichterförmiger Empfänger auf der Schiene in einer geraden Linie gegenüber aufgestellt. Als Nachweismethode reicht der eingebaute Lautsprecher. Auf die Halterung dazwischen wird das Schlitzblech (d.i. das Blech mit den vielen Schlitzten) gestellt und zwar nacheinander in verschiedenen Orientierungen:

1. Senkrecht stehende Schlitzte,
2. um 45^0 geneigte Schlitzte (Blech steht auf einer Ecke),
3. waagrecht stehende Schlitzte.

Notiere für jede Orientierung die Beobachtung und interpretiere sie. Überlege dir eine Erklärung dafür, warum bei einer bestimmten Orientierung am meisten und bei der anderen Orientierung am wenigsten Strahlung am Empfänger ankommt.

Der gleiche Effekt lässt sich auch erzielen, wenn man, ohne das Schlitzblech dazwischen, entweder Sender oder Empfänger (am Trichter anfassen) um 45° bzw. 90° verdreht.

3.4 Direkte Messung der Wellenlänge

Hierfür muss der sondenförmige Empfänger an das Betriebsgerät angeschlossen werden.

Achtung: Zeigt die schwarze Markierung auf der Sonde nach oben (siehe Abschnitt 3.1) ?

Auf die Halterung wird die Blechplatte gestellt. Die Entfernung des Senders (Trichteröffnung) beträgt ca. 30-40 cm. Die Empfängersonde wird am Anfang möglichst nahe an der Blechplatte positioniert mit dem rechteckigen Fuß an die Schiene stoßend (**Achtung ! Sonde auf richtiger Seite der Blechplatte aufstellen !**), so dass ihre Position auf der Skala der Schiene an einer Fußkante gut abgelesen werden kann. Zur Messung das Spannungsmessgerät benutzen !

Experimentelles Vorgehen: Man verschiebt die Sonde langsam in Richtung des Senders und notiert nacheinander die Positionen von mindestens vier aufeinander folgenden Maxima oder Minima (beides ist möglich, man muss sich aber für *eines* von beiden entscheiden).

Die Wellenlänge λ lässt sich sehr einfach aus dem arithmetischen Mittelwert der Abstände berechnen. **Achtung:** Dieser Abstand ist nicht die Wellenlänge !

Frage: Wie hängen die Abstände der Minima bzw. Maxima mit der Wellenlänge zusammen ?

Antwort: _____

Messung der Wellenlänge: gemessen wurde die Position der _____

Position in mm					
Positionsdifferenz in mm					

Also ist die Wellenlänge $\lambda =$ _____

Die Frage nach der Wellenlänge ist jetzt beantwortet. Offen bleibt, *warum* sich zwischen Sender und Blech Maxima und Minima ausbilden.

Frage: Welche Erklärung gibt es dafür und wie heißt das damit verbundene Phänomen ?

3.5 Brechung am Prisma: Bestimmung von Lichtgeschwindigkeit und Brechungsindex von Paraffin

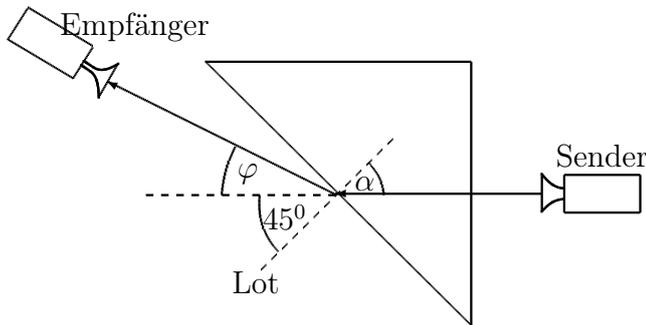


Abbildung 4: Geometrie der Brechung der Mikrowellen am Prisma. Aus welchen Winkeln setzt sich der Brechungswinkel β (nicht eingezeichnet) zusammen?

Auf die Halterung kommt das **Prisma**, so dass eine Kathete genau senkrecht zum Sender zeigt, der einen Abstand (Trichteröffnung) von ca. 10-20 cm haben sollte. Wie bei den Beugungsexperimenten kommt der trichterförmige Empfänger am Ende der Schiene gegenüber vom Sender zum Einsatz. Zur Messung der Signalstärke der gebrochenen Welle muss das Spannungsmessgerät benutzt werden.

Durch Drehen der Empfängerschiene wird der Winkel φ bestimmt, bei dem die Signalstärke am größten ist. Dieser Winkel beträgt $\varphi = \text{_____}$. Die Geometrie kann Abbildung 4 entnommen werden.

Auswertung: Die Grundflächen des **Prismas** haben die Form eines gleichschenkligen, rechtwinkligen Dreiecks (wie ein Geodreieck). Die Mikrowellen werden beim Durchgang durch die Kathete nicht gebrochen, weil sie dort senkrecht auftreffen. Die **Brechung** findet an der Hypotenuse statt. Bestimmen Sie aus der Geometrie den Einfallswinkel α und aus dem gemessenen Winkel φ für das Strahlungsmaximum den Brechungswinkel β . Wenden Sie das **Brechungsgesetz von Snellius** $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{1}{n}$ (c_1 ist die Lichtgeschwindigkeit auf der Seite des Einfalls, hier also im **Paraffin**; c_2 die Lichtgeschwindigkeit auf der Seite des Ausfalls, hier also in Luft, d.h. $3 \cdot 10^8$ m/s, n ist der Brechungsindex von **Paraffin** für Mikrowellen) an, um Lichtgeschwindigkeit und Brechungsindex von **Paraffin** zu berechnen.

Platz für die Rechnung:

3.6 Ausbreitung hinter einem Spalt

Der Lautsprecher wird eingeschaltet. Der trichterförmige Empfänger wird ans Ende der Schiene gesetzt und der Sender etwa 20 cm von der Halterung entfernt. Die Halterung bleibt zunächst leer.

Experimentelles Vorgehen: Der Winkel zwischen Sender und Empfänger wird so weit vergrößert, dass der Lautsprecher keinen Ton mehr von sich gibt. Dann wird auf der Halterung das Blech mit den beiden rechteckigen Öffnungen so befestigt, dass eine Öffnung genau auf der Mittelachse ist. Die andere wird mit dem kleinen Blech zum Einhängen zugemacht, so dass nur eine offen bleibt. Was passiert jetzt ? **Notiere deine Beobachtung und finde eine Begründung!**

3.7 Beugung am Doppelspalt

Das Blech mit beiden rechteckigen Öffnungen (sogenannter **Doppelspalt**) wird mittig auf der Halterung festgeschraubt. Der trichterförmige Empfänger kommt zum Einsatz. Er wird ans Ende der Schiene hinter dem Blech mit den Spalten gesetzt. Zur Messung der Signalstärke der gebeugten Welle muss das Spannungsmessgerät benutzt werden.

Experimentelles Vorgehen: Die Abstände s (Empfänger - **Doppelspalt**), b (Spaltbreite) und d (Spaltmittenabstand) werden gemessen und in der nachfolgenden Tabelle notiert. Nun wird der Winkel φ zwischen Sender und Empfänger so lange verändert, bis ein erstes Empfangsminimum erreicht ist. Dessen Winkel wird notiert. Ein weiteres Vergrößern des Winkels führt dazu, dass die Stärke des empfangenen Signals wieder zunimmt bis zu einem Maximum, dessen Winkel ebenfalls notiert wird. Die Position von Sender und Empfänger auf ihren Schienen bleibt die ganze Zeit konstant.

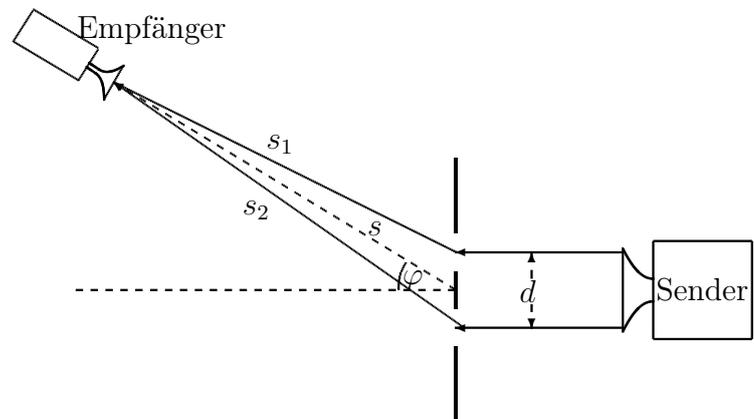


Abbildung 5: Beugung am Doppelspalt. Maxima werden mit dem Empfänger bei den Winkeln φ gemessen, bei denen der Wegunterschied $\Delta s = s_2 - s_1$ ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge λ beträgt.

Abstand des Empfängers von der Doppelspaltmitte	Spaltbreite	Abstand der Spaltmitten
$s =$	$b =$	$d =$

	1.Minimums- winkel in $^{\circ}$	1.Maximums- winkel in $^{\circ}$
Doppelspalt		

Frage: Durch welchen physikalischen Effekt kommen die Maxima und Minima seitlich der zentralen Achse zustande?

Auswertung für den Doppelspalt: Unter der Voraussetzung, dass der Empfänger weit genug vom **Doppelspalt** entfernt ist, lässt sich der Wegunterschied $\Delta s = s_2 - s_1$ mit sehr guter Näherung ausdrücken durch (siehe Abbildung 5):

$$\Delta s = s_2 - s_1 = d \cdot \sin \varphi$$

Da beim n . Nebenmaximum der Wegunterschied das n -fache der Wellenlänge sein muss, gilt auch

$$\Delta s = n \cdot \lambda$$

Maxima, seitlich von der geraden Richtung, treten bei Winkeln φ auf, bei denen der Wegunterschied ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge beträgt (also $\Delta s = \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$). Nur dann überlagern sich („interferieren“) die Mikrowellen, die von den beiden Spalten ausgehen, verstärkend („konstruktiv“).

Weil hier nur die Position des ersten Nebenmaximums gemessen werden kann, ist $n = 1$, also $\Delta s = \lambda$.

Aufgabe: Berechnen Sie aus Ihren Messdaten die Wellenlänge der Mikrowellenstrahlung und vergleichen Sie sie mit dem Wert aus der direkten Messung (Abschnitt 3.4).

Hier ist Platz für die Rechnung:

3.8 Informationsübertragung mit Mikrowellen

Für diesen Versuch müssen 2 Mikrowellenexperimente gemeinsam benutzt werden. Von dem einen wird nur der Sender benutzt, von dem anderen nur der Empfänger. Jeder der beiden Empfänger kann zum Einsatz kommen (ausprobieren).

Experimentelles Vorgehen: Sender und Empfänger der beiden Geräte werden ein Stück weit voneinander aufgestellt und aufeinander ausgerichtet. Mit dem eingebauten Lautsprecher des Empfängergeräts wird getestet, ob ein Signal ankommt.

Der Schalter „MODULATOR“ des Sendegeräts wird nun auf „EXT“ gestellt. Dann wird ein mp3-Abspielgerät an das Sendegerät angeschlossen (grüne und schwarze Buchse rechts) und eingeschaltet.

Technische Hinweise:

1. Beide Empfänger haben bei diesem Versuch Probleme. Das Abspielgerät muss auf jeden Fall mit einem hohen Ausgangspegel (d.h. voller Lautstärke) auf dem Kopfhörerausgang betrieben werden, damit überhaupt etwas zu hören ist. Bei vielen Smartphones ist der maximale Ausgangspegel leider zu klein, um etwas zu hören.
2. Mitunter hilft es, den Sendertrichter zu drehen, so dass sich die Polarisationssebene verändert. Zwei der drei Sender müssen so verdreht werden. Siehe [Abbildung 6](#)
3. Wenn der Verstärkungsknopf am Empfänger voll aufgedreht wird, kann unter Umständen die Übertragung unterbrochen werden. Zunächst ist dann zu prüfen, ob ein Verdrehen des Sendertrichters wie in [Abbildung 6](#) Abhilfe bringt. Wenn dies nichts nutzt, dann muss die Verstärkung wieder zurückgedreht werden werden.

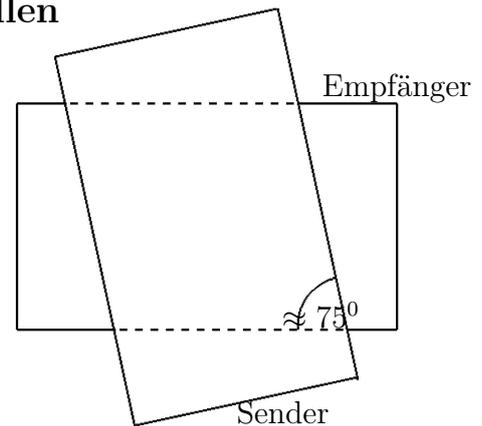


Abbildung 6: Verdrehung des Sendertrichters gegenüber dem Empfängertrichter vom Sender aus gesehen, um einen besseren Empfang zu ermöglichen.

Was wird beobachtet ?
