E4: Mikrowellen (Lehramtspraktikum)
Erzeugung und Ausbreitung Elektromagnetischer Wellen, Beugungs- und Interferenzeffekte

Elektromagnetische Strahlung mit Wellenlängen im cm Bereich erlauben es die Erzeugung EM Strahlung und viele Eigenschaften der Strahlung selbst sehr einfach und anschaulich zu demonstrieren und zu messen,.Diese treten natürlich auch in der Optik auf, sind dort aber auf Wie ist das elektrische Feld polarisiert?
Grund der kleinen Wellenlänge sehr viel schwieriger quantitativ nachzuweisen.. Zudem hat diese Strahlung natürlich auch sehr wichtige technische Anwendungen.

Die genutzten Frequenzbereiche sind für allgemeine Anwendungen frei gegeben.

Teil 1: Hertzscher Dipol (69 cm Sender, 433 MHz)) (Demonstrationsversuch)

Dieser Versuchsteil wird vom Tutor oder einem Studenten vorgeführt.
Der Frequenzbereich 433-434,8 MHz ist für die Allgemeinheit freigegeben zur Nutzung im ISM-Bereich (Idustrial,Scientific,Medical). Es besteht kein Schutz vor Störungen durch andere Sender.

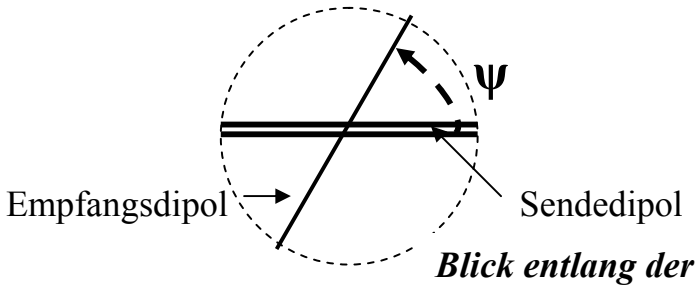
1.1: Ausstrahlungscharakteristik eines Hertzschen Dipols und Polarisation der Strahlung

Nehmen sie den Sender mit Schleifendipol in Betrieb.

Achtung: diese Messungen werden durch Reflektionen der Strahlung an Wänden, Decken etc. beeinträchtigt. Eine Abschirmung ist schwierig . Sie sollten daher keine allzu große Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen erwarten.

a) qualitative Messungen:
- messen sie den Spannungsverlauf entlang des Dipols mit einer Neonröhre.
  Wo sind die Maxima bzw. Minima der Spannung? Wie sieht's mit dem Strom im Dipol aus?

b) Nutzen sie den Empfangsdipol mit Glühbirnchen um sich eine Überblick zu verschaffen
Wie ändert sich die gemessene Signalstärke mit:
- dem relativen Winkel ψ zwischen den Achsen des Empfangdipols und des Senderdipols. Drehen sie den Dipol dazu bei festem Abstand vom Sender senkrecht zu seiner Achse.

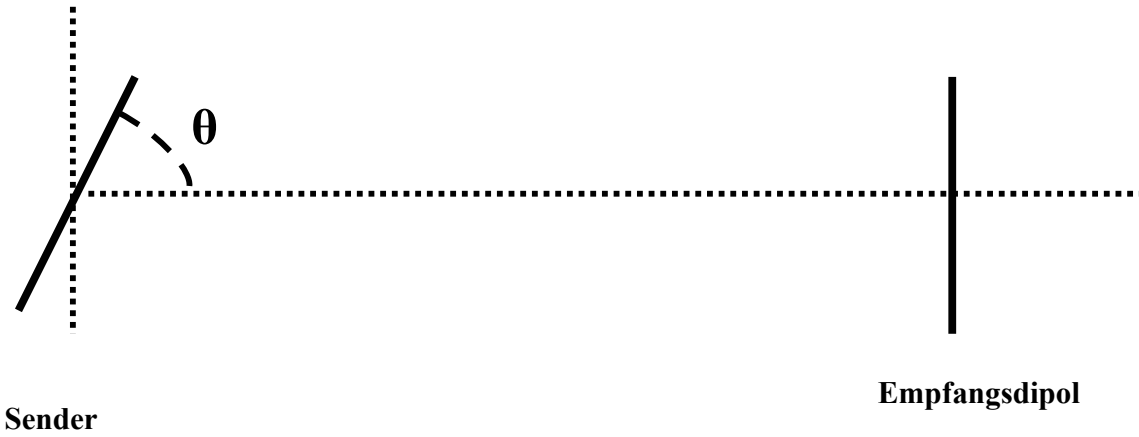


Blick entlang der Ausbreitungsrichtung

Wie ist das elektrische Feld polarisiert?

Wie ändert sich die Feldstärke mit

- der Entfernung vom Sender?
- dem Polarwinkel **θ** **b**ei festem Abstand vom Sender
- dem Azimuthalwinkel φ



b) Ausbreitung und Wellenlänge in destilliertem Wasser.:

Stellen sie den Wassertrog mit kurzem und langem Empfangsdipil im Abstand von ca. 0.5 m vor dem Sender auf. Welche Wellenlänge der Strahlung erwarten sie im Wasser? Giessen sie langsam destilliertes Wasser in das Gefäss, so dass beide Dipole nacheinander bedeckt werden. Was beobachten sie? *Wie lang ist der abgestimmte Dipol? Erklärung? Warum destilliertes Wasser?*

Teil 2: Versuch mit Mikrowellen (3.2 cm, 9.3 GHz)

Auch hier gibt es Probleme mit Reflektionen. Diese lassen sich aber gut in den Griff bekommen durch 2 Maßnahmen: erstens kann die direkte Strahlung zwischen Sender und Empfänger durch Metallschirme unterbunden werden. Zweitens hilft der Einsatz der Hornantenne dabei, nur Strahlung aus einer Richtung zu empfangen. Schließlich lässt sich die Mikrowellenstrahlung durch die verfügbaren Prismaabsorber aus leitendem Schaumstoff sehr gut absorbieren. Als letzten Tip: bei Messreihen das Messgerät (z.B. Zeigerinstrument) weit weg vom Strahlengang stellen und nach Einstellen der neuen Konfiguration zurücktreten, damit beim Ablesen der Körper nicht als Streuer etc. fungiert.

2.1: Messung der Wellenlänge

Die Frequenz dieser Strahlung ist so hoch dass sie mit Oszillgraphen nicht aufgelöst werden kann. Der Sender wird daher mit einer Frequenz von ca. 3 kHz amplitudenmoduliert. Gemessen wird das Modulationssignal.

Setzen sie den Sender auf ein Ende einer langen Messchiene. Nutzen sie den kleinen offenen Dipol, setzen sie ihn im Abstand von ca. ½ m davon auf die Messschiene. Messen sie das verstärkte AC Signal mit dem Oszillographen und mit einem Zeigerinstrument.

- Stellen sie die Modulationsfrequenz so ein, dass sie maximales Signal erhalten
- Erzeugen sie eine stehende Welle, indem sie einen Metallschirm in ca. 1.5 m Entfernung aufstellen und so verschieben, dass das Signal des Messdipols maximal wird. Dann den Schirm auf der Messschiene fixieren.

Verfahren sie jetzt den Dipol entlang der Messschiene. In welchen Abständen erwarten sie Maxima und Minima? **Messen sie jetzt die Wellenlänge der Strahlung durch ein möglichst einfaches und genaues Verfahren!**

Wo befinden sich die Minima und Maxima von E- und B-feld entlang der Ausbreitungsrichtung. Begründen sie warum sie verschoben sind (im Gegensatz zu freien Wellen). Hinweis: welche Bedingungen müssen an der Metalloberfläche gelten?

2.2 Polarisation und Drehung der Polarisationsebene, Polarisationsgitter

Stellen sie den el. Messdipol in ein Maximum der E-Feldstärke.

Das Polarisationsgitter besteht aus parallelen Metallstäben im Abstand von ca. 1 cm.

Halten sie das Gitter vor den Empfangsdipol. In welcher Orientierung lässt das Gitter das E-Feld praktisch ungeschwächt durch, wann absorbiert es das Feld komplett und warum ist das so?
Bemerkung: die Polaroidfilter in der Optik funktionieren mit demselben Prinzip!

Positionieren sie das ‚Polarisationsgitter' vor dem Empangsdipol und rotieren sie es. Was beobachten Sie?

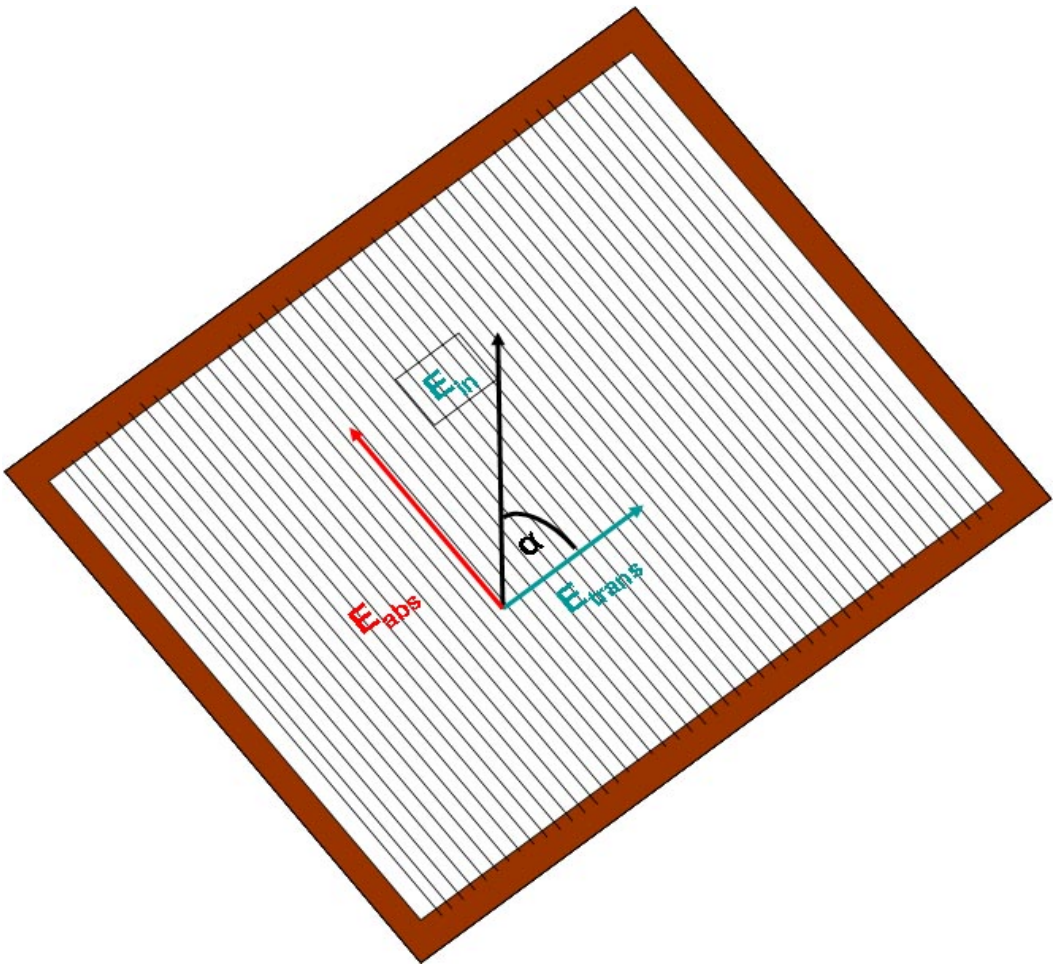


Abb. 1 Effekt des Polarisationsgitters.

Der einfallende Vektor des E-Feldes sei $E_{in.}$ Durchgelassen wird nur die Komponente E_{trans}, die senkrecht auf den Gitterstäben steht. Wenn das Gitter um den Winkel α gegen den Sendedipol gedreht ist, dann ist Etrans = Ein * cosα und die Polarisationsrichtung der durchgehende Welle ist um den Winkel α relativ zur Polarisation der einfallenden Welle gedreht.

Quantitative Messung: Positionieren sie das Gitter so, dass die Metallstäbe senkrecht zum Dipol stehen.

- Registrieren sie die Höhe des Signals
- Stellen sie das Gitter jetzt unter 45° auf und registrieren sie die Signalhöhe
- Drehen sie den Empfangsdipol jetzt hinter dem Gitter. In welcher Richtung ist das Signal maximal? Reistrieren sie dieses Signal
- Interpretieren sie die Resultate. Welche Grösse wird im Dipol gemessen? Die Feldstärke E oder die Intensität ~ E^2?

2.2 Michelsoninterferometer

Bauen sie ein Michelsoninterferometer auf- siehe Abbildung. Positionieren sie dazu die Schienen zu einem Kreuz. Als Strahlteiler eignet sich eine unter 45° aufgestellte Plexiglasscheibe. Die Arme werden durch Metallschirme abgeschlossen.

a) stellen sie die Metallschirme so ein, dass in jedem Arm stehende Wellen auftreten, die dann im Empfänger interferieren. Als Empfänger sollte hier eine Hornantenne benutzt werden.

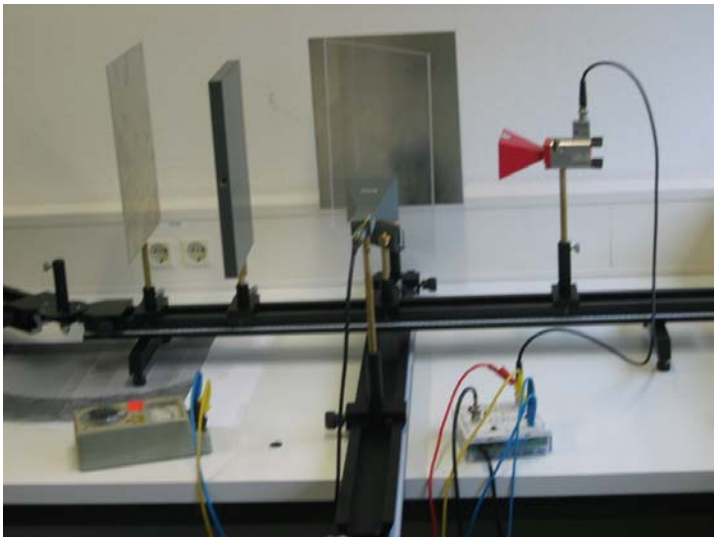


Abb. 2 : Aufbau für das Michelsoninterferometer

c) Verschieben sie jetzt einen Metallschirm auf der Schiene und registrieren sie die Minima und Maxima des Signals im Empfänger als Funktion der Verschiebung. Bestimmen sie daraus die Wellenlänge.

Was ist der Vorteil eines solchen Aufbaus relativ zur Messung oben?

2.3. Brechung von Mikrowellen, Totalreflektion und Tunneleffekt.

Bauen sie die Schienen so zusammen, dass ein Arm (mit dem Empfänger) drehbar ist.
Positionieren sie den Drehtisch über dem Drehpunkt der Schienen. Stellen sie hinter den Drehtisch einen Absorber, so dass kein Strahl reflektiert werden kann. Schirmen sie den Empfänger von direkter Einstrahlung des Senders ab.

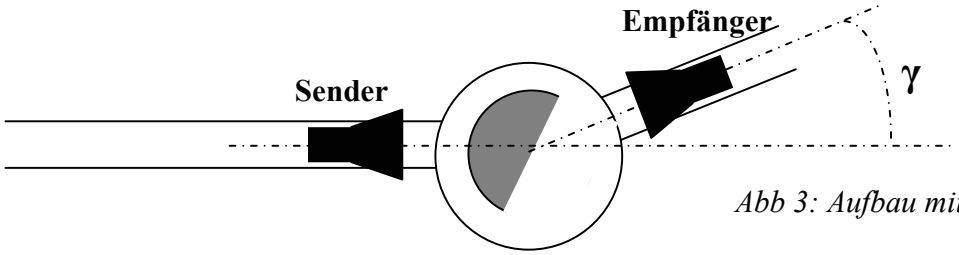


Abb 3: Aufbau mit ‚Prisma'

a) Brechung und Reflektion

Nullmessung:

Stellen sie einen PVC-Halbzylinder wie gezeigt auf den Drehtisch, so dass der gebrochene Strahl an der geraden Seite des Halbzylinders austritt. Stellen sie den Drehtisch so, dass die gerade PVC Fläche senkrecht zur Einfallsrichtung steht. Dann ist die Brechung Null. Drehen sie den Arm mit dem Empfänger (Hornantenne), suchen sie das Maximum des Signals und lesen sie den Drehwinkel γ ab (er muss nicht genau Null sein).

Bestimmung von n:

Drehen sie nun das Prisma um 30°, d.h.stellen sie einen Prismenwinkel α von 30° ein und fixieren sie den Drehtisch. Registrieren sie dann den Winkel γ des gebrochenen Strahls und den Reflektionswinkel bei dem das Signal jeweils maximal wird. (Sender und Empfänger sollten auf gleicher Höhe sein und nahe am Drehteller).

Berechnen sie dann aus dem Brechungsgesetz den Brechungsindex **n** von PVC.
Es gilt

$$\sin\gamma/\sin\alpha = n$$

Da $\sin\gamma$ maximal 1 werden kann ($\gamma=90^o$) tritt Totalreflektion auf für den Einfallswinkel

$$\sin\alpha_{max} = 1/n$$

Berechnen sie den Winkel der Totalreflektion und versuchen sie durch Drehen des Prismas in der Umgebung von α_{max}, wann der gebrochene Strahl tatsächlich verschwindet.

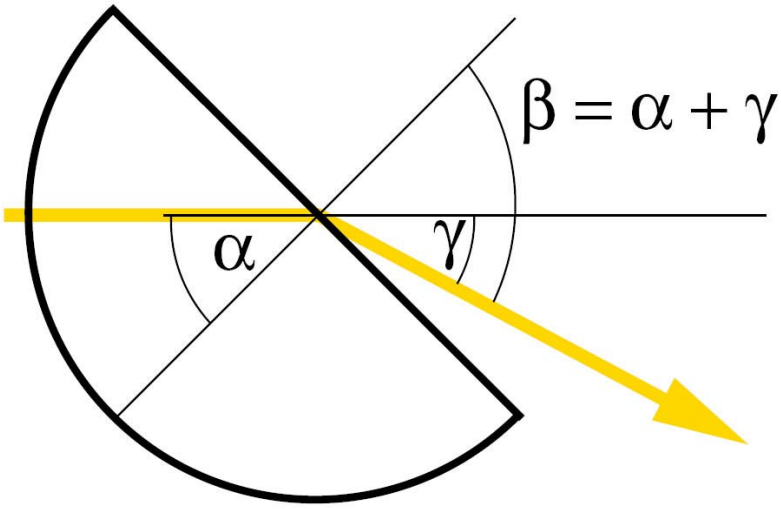


Abb. 4: Definition der Winkel bei der Brechung der Strahlen

b) Tunneleffekt (frustierte Totalreflektion)

Stellen sie den Drehtisch auf einen Winkel ein der deutlich grösser als der der Totalreflektion ist , so dass sie keinen gebrochenen Strahl mehr detektieren können. Stellen sie den Empfänger auf den reflektierten Strahl ein.

Stellen sie jetzt einen 2. PVC-Halbzylinder so auf, dass die beiden geraden Seiten im Abstand von ca 2 cm parallel sind (Abb.5). Hierzu können sie die bereitgestellten Distanzstücke mehmen.

- Registrieren sie das Signal des reflektierten Strahls und notieren sie die Stellung des Dreharms.
- Stellen sie den Arm mit der Hornantenne auf Null Grad. Beobachten sie eine durchgehenden Strahl?
- schieben sie jetzt den 2. Halbzylinder sukzessive an den ersten Zylinder heran und beobachten sie die Stärke des durchgehenden Strahls. Er wird bei kleinen Abständen gross.
- gehen sie mit dem Dreharm zurück auf die Position wo der reflektierte Strahl beobachtet wurde. Notieren sie Ihre Beobachtung.
- entfernen sie jetzt das 2. Prisma wieder möglichst parallel von 1. unter Beobachtung des refektierten Strahls.

Es gibt einen durchgehenden Strahl bei 0°! Wie kommt der zustande?

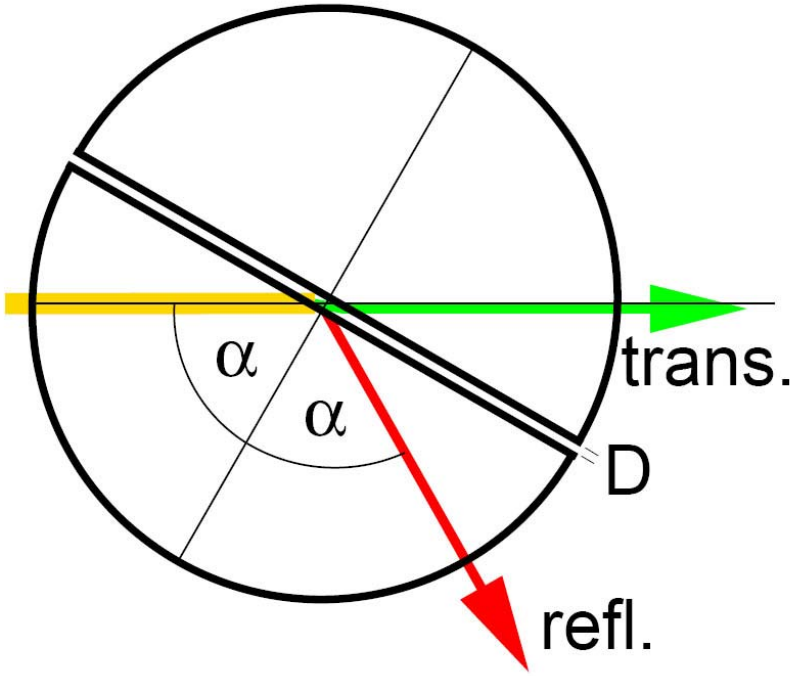


Abb.5: Messung des ‚Tunneleffekts'

Der Effekt wird frustierte Totalreflektion oder auch Tunneleffekt genannt. Er kommt dadurch zustande, dass das elektrische Feld an der Grenze von PVC und Luft (beim Übergang vom dichten zum dünnen Medium auch bei Totalreflektion nicht schlagartig auf Null fällt, sondern im dünnen Medium ein mit D/λ exponentiell abfallendes Feld existiert. Ist $D \ll \lambda$, dann kann die el.magnetische Welle den Spalt durchtunneln.

Quantitativ wird folgende Abhängigkeit der Intensität I_T im durchgehenden Strahl von D erwartet: $\mathbf{I_T \sim e^{-2\pi D/\lambda}}$

Bemerkung: ein analoger Effekt spielt in der Quantenmechanik als ‚Tunneleffekt' eine sehr wichtige Rolle.

5. Beugung von Mikrowellen:

Bauen sie die Metallblende mit Spalt (Spaltbreite 8 cm) an Stelle des Drehtisches auf. Messen sie das Signal als Funktion des Drehwinkels des Empfängerarms, wenn dieser hinter dem Metallschirm gedreht wird mit Oszillograph oder Zeigerinstrument . (! Schirmen sie den Empfänger bei großen Drehwinkeln von direkter Einstrahlung ab und verhindern sie die Detektion von reflektierter Strahlung dadurch, dass sie Absorber hinter den Empfänger stellen.). Schwächen sie gegebenenfalls das Signal so ab, dass das Empfangssignal nicht in Sättigung geht. Hierzu eignen sich die 50 Ω BNC-Widerstände.

Abb.6: Aufbau zur Beugung am Spalt

Fahren sie den Winkelbereich einmal relativ schnell durch. Was beobachten sie?
Messen sie das Signal als Funktion des Drehwinkels, insbesondere die Lage von Maxima und Minima. *Dies ist keine Präzisionsmessung! Daher nicht sehr viele Punkte messen.*

Stellen sie die Intensität als Funktion des Drehwinkels graphisch dar. Vergleichen sie die Beobachtung mit der Erwartung indem sie näherungsweise annehmen, dass die Hornantenne sehr

weit vom Spalt entfernt ist (‚das wäre dann die ‚Fraunhoferbeugung' für die die Interferenzbedingung sehr einfach abzuleiten ist.)

6. Induzierte sekundäre Dipole und Interferenz

Induzierte Dipole: wenn ein resonanzfähiger (abgestimmter) Dipol in das Wechselfeld gestellt wird, dann wird er zu erzwungenen Schwingungen angeregt und strahlt selbst wieder ein elektromagnetisches Feld ab. Auf atomaren bzw. molekularen sekun dären Dipolen beruhen sehr viele physikalische Effekte wie z.B. die Blau- bzw. Rotfärbung des Himmels, der Brechungsindex von Materialien etc. Sind die Dipole regelmäßig angeordnet, dann treten Interferenzeffekte auf wie z.B. bei der Braggreflektion von Röntgenstrahlen an Kristallen.

Einige einfache Beispiele sollen hier untersucht werden. Hierzu existieren abgestimmte Oszillatorstäbe, die hier 7/2 λ lang sind. Sie können auf einem Steckbrett in Abständen von λ oder λ/2 gesteckt werden..

Setzen sie den Steckteller anstelle des Drehtisches auf die Schiene und suchen sie nach Maxima der Strahlung als Funktion des Empfangswinkels. Wo erwarten sie diese?

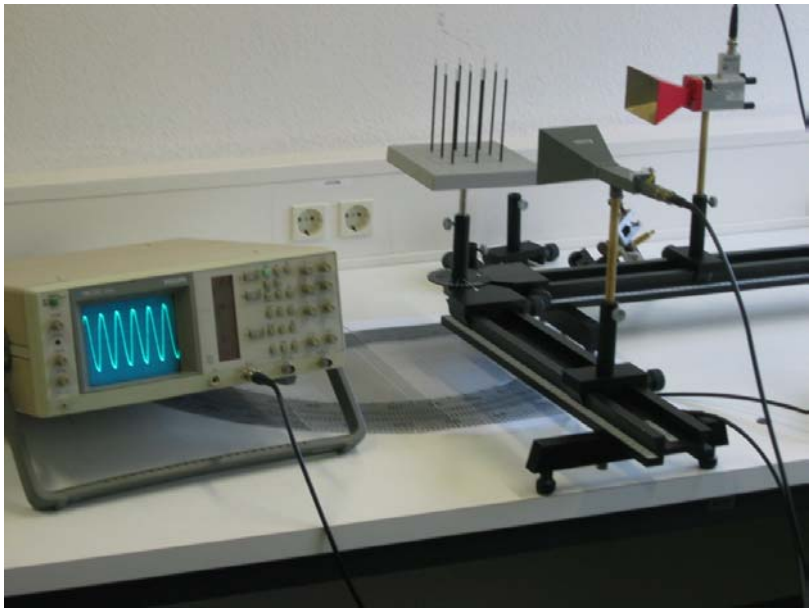


Abb.7: Messungen mit verschiedenen Anordnungen von sekundären Oszillator-arrays

a) Gitter entlang der Ausbreitungsrichtung aus mehreren Ozillatoren im Abstand λ. (siehe Abb.)
b) Stellen sie den Dreharm auf das Interferenzmaximum. Stecken sie jetzt die Oszillatorstäbe sukzessiv so um, dass sie mehr und mehr Stäbe haben, die im Abstand λ/2

stehen. Was beobachten sie?

c) Reflektion: gerade Reihe von Oszillatoren in $\lambda/2$ Abstand unter verschiedenen Winkeln. beobachten und nach Intensitätsmaxima suchen. Diese Reihe wirkt wie ein Spiegel.!

Falls noch Zeit ist , dann spielen sie mit eigenen Anordnungen herum …

Erwartungen :

Die Feldstärke , die unter einem Winkel φ mit der Hornantenne im Abstand r vom Drehpunkt beobachtet wird, ist die kohärente Summe aller von den sekundären Dipolen gestreuten Wellen. (von jeder Antenne geht eine Kugelwelle aus und die Signale aller Antennnen haben feste Phasenbezieheungen untereinander, da sie von derselben einfallenden Welle angeregt werden.

Sei $\vec{r}_D=(r\cos\varphi, r\sin\varphi)$ der Ortsvektor des Detektors

Seien $\vec{r}_j = (x_j , y_j)$ die Ortsvektoren der sekundären Oszillatoren

Dann gilt:

$$E_D= A_0 * | \sum_i \exp[i\, k *|r_j-r_D| + \delta_j] | /|r_j - r_D|$$

Dabei sind die δ_j die relativen Phasen der sekundären Antennen, die davon abhängen, in welchen Abständen sie vom Sender aufgestellt sind, $k=2\pi/\lambda$.

In der Anordnungder Abb.7 in der alle Antennen in einer Matrix mit Abständen λ stehen, sind alle Antennen in Phase, d.h. alle δ_i können Null gesetzt werden.

Für diese Anordnung gibt Abb. 8 die erwartete Feldstärke als Funktion des Einstellwinkels des Detektor für einen Detektorabstand von 30 cm. Wir erwarten also ein Maximun unter 90°. Warum?

Andere Anordnungen können leicht mit dem verfügbaren Mathematica Notebook berechnet werden.

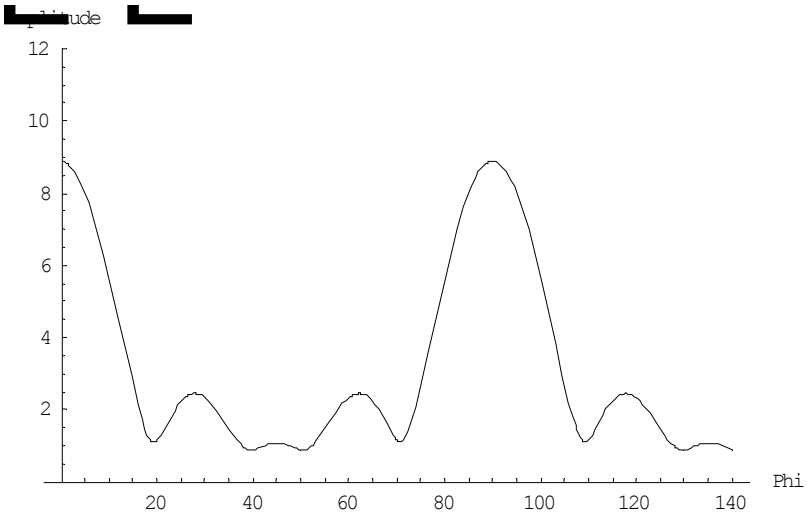


Abb.8
Elektrische Feldstärke im Detektror als Funktion des Streuwinkels für eine regelmässige Antennenanordnung im Abstand λ (siehe Abb. …..)