Untersuchungen an brechenden und reflektierenden Oberflächen



Josef Nagelschmidt und Stefan Heimersheim

St. Michael-Gymnasium Bad Münstereifel

Jugend forscht 2013

Inhaltsverzeichnis

1.	Kurzfassung2
2.	Zielsetzung2
3.	Einleitung3
4.	Erweiterung des Reflexions- und Brechungsgesetzes4
5.	Metamaterialien 5.1 Theorie und Bau
6.	Die Metamaterial-Linse 6.1 Idee und Planung14 6.2 Theoretische Vorbetrachtung und Herstellung14 6.3 Messung und Auswertung16
7.	Ausblick18
8.	Danksagung19
9.	Literatur

1. <u>Kurzfassung</u>

Die Untersuchung von Oberflächen ist seit jeher ein komplexes Forschungsgebiet und hat auch heute nicht an Aktualität verloren. Bei der Untersuchung spezialisieren wir uns auf den Aspekt der Brechung und Reflexion. Erstmals theoretisch vorhergesagt von Victor Veselago im Jahre 1968 und zuerst erfolgreich hergestellt im Jahre 2000 von John Pendry und David Smith, sind Metamaterialien auf dem Gebiet der Brechung und Reflexion der Schlüssel zur Innovation, denn in ihren Eigenschaften unterscheiden sie sich von jedem natürlichen Material.

Das Ziel unserer Jugend forscht Arbeit ist es deshalb, die besonderen Eigenschaften von Metamaterialoberflächen bezüglich Reflexion und Transmission zu erforschen, da sie ein hohes Potenzial für zukünftige Technologien darstellen. Mit unseren Metamaterialien ist es möglich, dass sich die Phase der Wellen, die auf unsere mit Resonatoren beschichtete Platine treffen, kontinuierlich ändert. Auf diese Weise lassen sich beliebige Phasenlandschaften erstellen. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für technische Innovationen. Dies ist gerade für Deutschland so bedeutend, um auf dem internationalen Wettbewerb nicht unterzugehen und mit Großmächten wie China und den USA konkurrieren zu können.

Mithilfe unserer selbst hergestellten Metamaterialoberflächen, gelang uns im Mikrowellenbereich der experimentelle Nachweis der Notwendigkeit einer Erweiterung des herkömmlichen Brechungs- und Reflexionsgesetzes. Besonders stolz sind wir auf unsere Sammellinse aus Metamaterial der Dicke "0", deren Konstruktion auf den neu hergeleiteten Gesetzen basiert.

Zusätzlich ermöglichen unsere Forschungsergebnisse es Schulen, in Zukunft mit geringem finanziellem Aufwand den Unterricht zu erweitern und somit das aktuelle Forschungsgebiet der Metamaterialien in den Unterricht zu integrieren.

2. Zielsetzung

Metamaterialoberflächen unterscheiden sich in grundlegenden Eigenschaften von natürlichen Oberflächen, sodass sich ein breites Anwendungsfeld eröffnet und sie somit Raum für technische Innovationen bieten.

Aus diesem Grund ist es das Ziel unserer Jugend forscht Arbeit, die besonderen Eigenschaften von Metamaterialoberflächen bezüglich Reflexion und Transmission zu erforschen. Des Weiteren sollen unsere Ergebnisse es den Schulen ermöglichen, mit geringem finanziellem Aufwand den Unterricht zu erweitern und somit das aktuelle Forschungsgebiet der Metamaterialien in den Unterricht zu integrieren.

3. <u>Einleitung</u>

Reflexion und Brechung sind alltägliche Phänomene von großer technischer Bedeutung. Die theoretischen Grundlagen scheinen vollständig verstanden zu sein. Trotz der allumfassenden Präsenz der Reflexion und Brechung, sind Richtigkeit und Vollständigkeit der physikalischen Gesetze die sie beschreiben, kaum angezweifelt worden, da sie bis vor kurzem alle bekannten Fälle der Reflexion und Brechung richtig beschrieben.

Dies änderte sich jedoch, als 1968 erstmals von dem sowjetischen Physiker Viktor Veselago, ein Material mit negativer Brechzahl vorhergesagt wurde. Durch diese Vorhersage eröffnete er der Menschheit das völlig neue Forschungsfeld der Metamaterialien. John Pendry und David Smith gelang dann schließlich im Jahre 2000 der experimentelle Nachweis dieser Materialien. Im Gegensatz zu anderen Gebieten ist das Forschungsfeld der Metamaterialien noch weitgehend unerforscht.

Dies eröffnet Möglichkeiten für technische Innovationen, denn in der Geschichte zeigte sich, dass die Forschung in relativ unerschlossenen Gebieten der Physik, zu unerwarteten Durchbrüchen in der Technologie führte. Speziell für Deutschland ist die Forschung für die Technik so bedeutend, um auf dem internationalen Wettbewerb nicht unterzugehen und mit Großmächten wie China und den USA konkurrieren zu können. Doch für neue Produkte benötigt man zuerst neue Ideen. Wir möchten mit unserer Forschung und unseren Entdeckungen Anstöße für die Technologiebranche geben, denn was wir mit Mikrowellen erfolgreich durchführen, lässt sich natürlich auf nahezu alle Bereiche des elektromagnetischen Spektrums übertragen.

4. Erweiterung des Reflexions- und Brechungsgesetzes

Da das normale Reflexions- und Brechungsgesetz nicht ausreicht um die von uns beobachteten Phänomene zu beschreiben, muss das Gesetz entsprechend angepasst werden. Wir sind im Internet [3] auf eine Formel dazu gestoßen, doch wir wollten diese nicht einfach übernehmen. Daher haben wir uns diese Formel zunächst theoretisch hergeleitet, um diese dann später mit unseren Versuchen zu überprüfen.



Abb. 4.1 Strahlung trifft auf eine Metamaterialoberfläche

Die Strahlen treffen an den Punkten A und B zu verschiedenen Zeitpunkten ein.

An den Punkten A und C ist die elektromagnetische Welle in Phase (da beide Punkte auf der Wellenfront liegen). Über die Strecke Δ_i (Strecke BC) ändert sich die Phase um d Φ (Die Phasendifferenz zwischen B und C). Also beträgt der Phasenunterschied zwischen C und B oder A und B d Φ .

Das gezeigte Dreieck ABC ist rechtwinklig, also gilt:

$$\sin(\alpha) = \frac{\Delta_i}{dx}$$

Daraus folgt:

$$\Delta_i = dx * \sin(\alpha)$$
 (1)

λ (Wellenlänge) ist die Strecke die nach 2π (also einer Periode) im Vakuum zurückgelegt wird. In dieser Zeit wird im Medium 1 die Strecke $λ_1$ zurückgelegt. ($n_1 = \frac{\lambda}{\lambda_1}$ (2)). Δ_i ist die Strecke, die dΦ nach zurückgelegt wird.

Da zwischen λ_1 und 2π das gleiche Verhältnis wie zwischen Δ_i und d Φ besteht, gilt:

$$\frac{\lambda_1}{2\pi} = \frac{\Delta_i}{d\Phi}$$

Daraus folgt:

$$d\Phi = 2\pi * \frac{\Delta_i}{\lambda_1}$$

Durch Einsetzten von (1) erhält man:

$$d\Phi = 2\pi * dx * \frac{\sin(\alpha)}{\lambda_1}$$

Setzt man (2) ein, ergibt sich:

$$d\Phi = 2\pi * dx * \sin(\alpha) * \frac{n_1}{\lambda}$$
 (3)

Dies ist die, durch den Einfallswinkel verursachte Phasenverschiebung zwischen A und B.

Diese Phasenverschiebung (3) alleine würde eine normale Brechung verursachen und bei uns würde es zu keiner kommen, da bei uns beide Materialien neben der Oberfläche (die Dicke der Platine ist im Vergleich zur Wellenlänge vernachlässigbar gering) den gleichen Brechungsindex besitzen. Die Besonderheit von unserer Art von Metamaterialien ist, dass sie eine zusätzliche Phasenverschiebung hinzufügen können. Bei unserem Metamaterial werden die Schwingungen am Punkt A im Vergleich zu B durch das Metamaterial "später" (phasenverschoben) weitergegeben.

Der Gradient der Phasenverschiebung (Die Phasenverschiebung(d Φ)) auf einer bestimmten Strecke(dx)) des verwendeten Metamaterials beträgt $\frac{d\Phi}{dx} = \frac{2\pi}{\Gamma}$

(Γ ist die Länge der Einheitszelle, Abb. 5.1.1). Stellt man die Gleichung um erhält man:

$$d\Phi_{Metamaterial} = dx * \frac{2\pi}{\Gamma}$$

Dies ist die durch das Material bedingte Phasenverschiebung. Die Phasenverschiebung durch den Einfallswinkel war:

$$d\Phi_{Einfallswinkel} = 2\pi * dx * \sin(\alpha) * \frac{n_1}{\lambda}$$

Die gesamte Phasenverschiebung beträgt daher:

$$d\Phi_{Gesamt} = d\Phi_{Einfallswinkel} + d\Phi_{Metamaterial}$$
$$d\Phi_{Gesamt} = 2\pi * dx * \sin(\alpha) * \frac{n_1}{\lambda} + dx * \frac{2\pi}{\Gamma}$$
$$\frac{d\Phi_{Gesamt}}{dx} = 2\pi * \sin(\alpha) * \frac{n_1}{\lambda} + \frac{2\pi}{\Gamma}$$
(4)

Nun senden die Resonatoren am Punkt B ihre Elementarwellen "früher" (phasenverschoben), sodass diese Reflexion entsteht:



In diesem Dreieck gilt erneut:

$$\sin(\beta_r) = \frac{\Delta_r}{dx}$$

Daraus folgt:

$$\Delta_r = dx * sin(\beta_r) \quad (5)$$

Ferner wissen wir, dass die Wellenfront in Phase ist, also muss auf der Strecke BC(Δ_r) eine Phasenveränderung von $d\Phi_{Gesamt}$ stattfinden. So wie 2π Phasenverschiebung auf λ_1 stattfinden, muss $d\Phi_{Gesamt}$ auf Δ_r entstehen:

$$\frac{2\pi}{\lambda_1} = \frac{d\Phi_{Gesamt}}{\Delta_r}$$

Durch Umformen und Einsetzen von (5) erhält man:

$$dx * \sin(\beta_r) * \frac{2\pi}{\lambda_1} = d\Phi Gesamt$$
$$\frac{d\Phi_{Gesamt}}{dx} = \sin(\beta_r) * 2\pi * \frac{n_1}{\lambda}$$

Setzt man dies in (4) ein, ergibt sich:

$$\sin(\beta_r) * 2\pi * \frac{n_1}{\lambda} = 2\pi * \sin(\alpha) * \frac{n_1}{\lambda} + \frac{2\pi}{\Gamma}$$
$$\sin(\beta_r) * 2\pi * \frac{n_1}{\lambda} - \sin(\alpha) * 2\pi * \frac{n_1}{\lambda} = \frac{2\pi}{\Gamma}$$
$$\sin(\beta_r) - \sin(\alpha) = \frac{\lambda}{n_1 * 2\pi} * \frac{2\pi}{\Gamma}$$

Man kann den speziellen Gradienten der Phasenverschiebung unseres Metamaterials $(\frac{2\pi}{\Gamma})$ durch die allgemeine Form $\frac{d\Phi}{dx}$ ersetzen, um eine allgemeine Formel für die Reflexion zu erhalten:

$$\sin(\beta_r) * n_1 - \sin(\alpha) * n_1 = \frac{\lambda}{2\pi} * \frac{d\Phi}{dx}$$
(6)

Auf ähnliche Weise haben wir die Formel für die Brechung hergeleitet:

$$\sin(\beta_t) * n_2 - \sin(\alpha) * n_1 = \frac{\lambda}{2\pi} * \frac{d\Phi}{dx}$$
(7)

Vergleicht man die Gleichung (7) mit der Gleichung (6), so sieht man, dass sie sich nur unterscheiden wenn $n_1 \neq n_2$ ist. Bei unseren Messungen ist jedoch $n_1 = n_2 \approx 1$ (Brechungsindex von Luft).

Daher können wir für Reflexion und Brechung die gleiche Formel verwenden.

5. Metamaterialien

5.1 Theorie und Bau

Bei der Arbeit mit Metamaterialien stellt die Herstellung der Platinen und die richtige theoretische Vorbetrachtung eine erste große Hürde dar. Im Gegensatz zu der normalen Reflexion und Transmission die das Snelliussche Gesetz beschreibt, muss dieses erweitert und generalisiert werden, damit die Theorie wieder mit den Messergebnissen übereinstimmt. Bei natürlichen Materialien, deren Oberflächen grundlegend homogen sind, wird die Phasenveränderung beim Übergang von Medium 1 in Medium 2 durch die optischen Eigenschaften der Materialien bewirkt. D.h., die Photonen bewegen sich in verschiedenen Medien mit unterschiedlicher Geschwindigkeit, da sie von einem Molekül zum anderen weitergereicht werden und dies die Lichtgeschwindigkeit im Medium verändert. Bei unseren Metamaterialien trifft die Welle auf eine Struktur aus leitenden Metallelementen, in unserem Fall auf kleine Kupferwinkel (Resonatoren). Die Oberfläche ist also einerseits inhomogen und besteht zusätzlich aus plasmonischen Antennen. Die einfallende Welle regt in diesen Kupferresonatoren (Antennen) die Elektronen zu Schwingungen an, sodass die Metallelemente phasenverschoben selbst wieder elektromagnetische Wellen aussenden. Durch eine wohl überlegte Strukturierung kann man so eine beliebige Phasenlandschaft erzeugen, wenn jeder Resonator eine andere Phasenverschiebung besitzt. Denn jedes Metallelement der Einheitszelle (Abb. 5.1.1) besitzt eine andere Resonanzfrequenz. Ihnen wird durch die einfallende Welle eine Frequenz aufgezwungen, die sie dann phasenverschoben wiedergeben.



Abb. 5.1.1 Phasenverschiebung durch Resonatoren [3]

Nacheiner intensiven Internetrecherche stießen wir auf eine solche Struktur, die aber nicht für Mikrowellen sondern für Infrarotstrahlung ausgelegt war. Diese Anordnung aus 8 Resonatoren, welche wir im Folgenden als Einheitszelle bezeichnen, wurde 2011 von Federico Capasso, Nanfang Yu und ihrem Team entwickelt.

Bei der Herstellung unserer Metamaterialien, konnten wir uns bezüglich Verfahren, Material und Größe auf keine eigenen Erfahrungen stützen, denn die von Capasso aus Gold konstruierten Resonatoren sind für den Infrarot-Bereich bestimmt.

Die richtige Größe der Resonatoren ist in unserem Fall so wichtig, weil sich die Phase der reflektierten oder gebrochenen Welle über die Breite der Einheitszelle um 2π ändern muss.

Capasso verwendet eine Einheitszelle (Abb. 5.1.1) für die Wellenlänge 8 μ m. Das Trägermaterial ist Silizium, welches den Brechungsindex von 3,5 für 8 μ m Wellenlänge besitzt.

Wir mussten beachten, dass unsere Platinen einen niedrigeren Brechungsindex für 3 cm Wellenlänge haben als Capassos Silizium für 8 µm. Wir nahmen an, dass unsere Platinen etwa den Brechungsindex 2 haben. Weil das Trägermaterial für eine Rotverschiebung der Resonanzen sorgt, muss, je größer der Brechungsindex des Substrats ist, auch die Größe der Resonatoren kleiner sein, um das gleiche Verhalten bei der gleichen Wellenlänge zu erhalten. Darum mussten unsere Resonatoren im Verhältnis etwas größer sein, als die Capassos.

Dazu nahmen wir für den effektiven Brechungsindex den Mittelwert: (Brechungsindex von Luft und Material)

Capasso: $(3,5+1) \div 2=2,25$ Wir: $(2+1) \div 2 = 1,5$

Das macht also unsere Resonatoren im Verhältnis zur Wellenlänge um 50% größer als die Capassos.

Daraus folgt: Einheitszelle für eine Wellenlänge von 3 cm: 62 x 8,4 mm²

Nach diesen theoretischen Vorbetrachtungen mussten wir das Ganze dann in die Praxis umsetzen. Wir erstellten am PC unterschiedliche Masken mit jeweils unterschiedlich großen Einheitszellen (Abb. 5.1.2) und druckten sie mit einem Tintenstrahldrucker auf eine Folie. So hofften wir die optimale Größe der Einheitszelle für unsere Mikrowellenanlage herauszufinden. Bei der Herstellung wird die Ätzvorlage auf eine photopositiv vorbeschichtete Platine gelegt und dann mit einer UV-Lampe belichtet, sodass nur die Strukturen, die durch die Tinte abgedeckt werden, beim Entwickeln und Ätzen erhalten bleiben. Nach dem Belichten wurde jede Platine in einer NaOH-Lösung entwickelt und schließlich geätzt. Obwohl das Ätzen für uns völliges Neuland war, kamen wir zu brauchbaren Ergebnissen. Ein wichtiger Schritt zur Verbesserung des Herstellungsprozesses, war die Anschaffung eines Platinen-Ätzgerätes mit regelbarer Heizung, Luftverteilerschlauch und eines verstellbaren Platinenhalters (Abb. 6.2.3). Dadurch waren die Platinen viel leichter zu ätzen, denn vorher mussten wir die oben genannten Funktionen alle manuell durchführen und eine Schüssel benutzen. Zudem benötigten wir dieses Gerät, weil wir später dazu übergingen DINA4-Platinen zu ätzen.

Brauchten wir vorher noch mehr als eine Stunde zum Herstellen einer Platine, belief sich nun die Zeit auf etwa die Hälfte. Für unsere ersten Messungen nahmen wir zwei Platinen mit den Maßen 10 cm x 16 cm, aber unterschiedlicher Einheitszellengröße, um die Breitbandigkeit der unnormalen Reflexion und Brechung zu untersuchen (Abb. 5.1.2)



Abb. 5.1.2 Unsere ersten Platinen

5.2 Erste Versuche

Nachdem wir erfolgreich die beiden Metamaterialplatinen hergestellt hatten, führten wir Messungen mit diesen durch. Doch leider waren weder unsere Ergebnisse mit der 62 x 8,4 mm² großen Einheitszelle, noch die mit der um 33% kleineren Einheitszelle erfolgreich. Stattdessen empfingen wir nur Wellen in den für normale Reflexion und Brechung relevanten Bereichen. Aus diesem Grunde sahen wir uns gezwungen, die Theorie noch einmal gründlich zu überdenken und nach möglichen Fehlern in der Konstruktion oder der Anordnung der Resonatoren zu suchen. An den Resonatoren lag es nicht, doch wir hatten zwei Dinge übersehen:

Die Ursache unseres Problems lag hauptsächlich in den Polarisationsebenen der Wellen. Resonatoren werden durch die Wellen, welche in unserem Fall horizontal polarisiert waren, zum Schwingen angeregt und senden dann die Wellen in beiden von uns messbaren Polarisationsrichtungen wieder aus.

Die Wellen, welche in der horizontalen Polarisationsebene wieder abgestrahlt werden, überlagern sich mit denen der normalen Reflexion, denn unsere Platinen haben in der horizontalen Polarisationsebene auch normale Reflexion. Die Metamaterialreflexion kann man von der normalen trennen, indem man die Polarisationsebene des Empfängers um 90° dreht. Er empfängt also nun nur noch die vertikal polarisierten Wellen, die auf die besonderen Metamaterialeigenschaften zurückzuführen sind.

Als wir dies korrigierten, konnten wir tatsächlich unnormale Reflexion und Brechung nachweisen, doch noch immer war die Intensität sehr gering, weil die Platine sehr klein war. Zusätzlich waren die Ergebnisse nicht gut reproduzierbar, da die Platine auf Grund ihrer geringen Fläche, immer nur teilweise von unserem Sender bestrahlt wurde. Aus all diesen Gründen entschlossen wir uns, die Platine mit den großen Einheitszellen nicht mehr in DIN A6 sondern in DIN A4-Format zu ätzen.



5.3 Reflexion und Brechung an Metamaterialien

Abb. 5.3.1 Aufbau unserer Messaparatur

Nun mussten wir die Wirkung unserer neuen DIN A4 Platinen testen. Zur Messung der Brechung und Reflexion haben wir Sender und Empfänger auf einer optischen Bank befestigt. Anschließend konnten wir den Empfänger von -90° bis 90° bewegen und dabei die Werte auf einer Skala ablesen.



Wir haben die Messwerte in Diagramme eingetragen, wobei die x-Achse den variablen Brechungs- bzw. Reflexionswinkel und die y-Achse die Intensität (Spannung, normiert auf 1) darstellt. Der Einfallswinkel war immer konstant. Die Maxima, die die Formeln (6)/(7)

Abb. 5.3.2 Skizze unseres Aufbaus zur

Datenerfassung

βt

voraussagen, werden durch die gelben Pfeile gekennzeichnet.

Empfänger

Bei diesen zwei Diagrammen handelt es sich um Messungen zur Reflexion. Wir können erkennen, dass die Theoriewerte mit den gemessenen Werten nahezu übereinstimmen. (Die Lücken in den Diagrammen rühren daher, dass an diesen Stellen unser Sender stand und wir den Empfänger nicht vor/hinter den Sender stellen konnten.)



Abb. 5.3.3 Unsere Messergebnisse mit Theoriewert (gelber Pfeil)

$$\sin(\beta_r) * n_1 - \sin(\alpha) * n_1 = \frac{\lambda}{2\pi} * \frac{d\Phi}{dx}$$
(6)





Diese drei Diagramme präsentieren die Brechung mit den konstant gehaltenen Einfallswinkeln 0°, 20° und -20°. Man erkennt, dass die gemessenen Maxima mit den Theoriewerten auch hier gut übereinstimmen.

$$\sin(\beta_t) * n_2 - \sin(\alpha) * n_1 = \frac{\lambda}{2\pi} * \frac{d\Phi}{dx} (7)$$





Abb. 5.3.3 Unsere Messergebnisse mit Theoriewert (gelber Pfeil)

6. Metamaterial-Linse

6.1 Idee

Indem wir mit unseren Messungen an Metamaterialoberflächen gezeigt haben, dass das Reflexions- und Brechungsgesetz erweitert werden muss, suchten wir nach praktischen Anwendungsmöglichkeiten. Denn wie bereits in der Einleitung thematisiert, ist es vor allem unser Vorhaben, für die Technik Nutzen aus dieser Entdeckung zu ziehen. Als einfaches, aber nicht zu unterschätzendes Beispiel wählten wir eine Metamaterial-Linse. Diese soll wie eine gewöhnliche Sammellinse funktionieren. Die Mikrowellen sollen also an einem von uns ausgewählten Brennpunkt hinter der Linse fokussiert werden.

Im Gegensatz jedoch zu normalen Sammellinsen, hat unsere Linse bezogen auf die Wellenlänge von 3 cm quasi die Dicke '0'. Der Brennpunkt sollte 20 cm hinter der Linse liegen. Doch die Umsetzung von unserer Idee ist alles andere als einfach. Wie muss man die Resonatoren anordnen, dass sie die Wellen genau 20 cm hinter der Platine an dem Brennpunkt fokussieren? Man könnte mehrere Platinen nebeneinander und aufeinander platzieren um dies zu erreichen, doch das ist sehr unelegant und läuft letztendlich auf ein Ergebnis heraus: Den Kreis. Doch auch wenn wir uns sicher waren, dass die Resonatoren im Kreis angeordnet werden müssen, gab es viele Varianten der Konstellation. Durfte die Anordnung der Resonatoren wie sie in der Einheitszelle herrscht, verändert werden? Wuchs die Anzahl der Resonatoren nach außen oder war die Struktur etwa radialsymmetrisch? Schließlich, nachdem wir uns lange Zeit unschlüssig waren, kamen wir zu dem in Kapitel 6.2 beschriebenen Ergebnis.

6.2 Theoretische Vorbetrachtung und Herstellung

Wir haben 8 verschiedene Resonatoren, die die Phase um $\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3}{4}\pi, \pi, \frac{5}{4}\pi, \frac{3}{2}\pi$ und $\frac{7}{4}\pi$ verschieben (Abb. 5.1.1). Wir haben uns überlegt, die Resonatorentypen ringförmig (Abb. 6.2.4) anzuordnen, sodass die Strecke von einem Resonatorentyp bis zum Brennpunkt immer um $\lambda/8$ länger ist, als die des vorherigen Typs im nächst inneren Ring, dessen Resonatoren die Wellen $2\pi/8$ "früher" weitergeben als die im nächst inneren Ring. Dadurch erreichen wir, dass sich Wellenfronten bilden, die sich in Richtung des Brennpunkts bewegen (Abb. 6.2.1).

Dabei sollten die am stärksten "verzögernden" Resonatoren in der Mitte sein. In Ring A wären die um 7/4 π verzögernden Resonatoren. Die Resonatoren in Ring B müssten die Phase um 6/4 π verschieben. Da die Resonatoren die Welle um 1/4 π weniger verschieben, müssen diese sich um $\lambda/8$ weiter als die in Ring A bewegen. Die Strecke von Resonator-Ring B zum Brennpunkt S_B muss um $\lambda/8 \approx 0.4$ cm länger sein als die Strecke von Resonator-Ring A zum





Die Radien der Resonator-Ringe bezeichnen wir mit R_A bis R_H. Unser Brennpunkt soll ca. 20 cm von der Platine entfernt sein.

Wir brauchen also Ringe für S_A=20 cm, S_B=20,4 cm, ..., S_H=22,8 cm. Der Ring A muss dementsprechend den Bereich von S_{A1} =20 cm bis S_{A2} =20,2 cm abdecken, der Ring B den Bereich von S_{B1}=20,2 cm bis S_{B2}=20,6, (S_{B1} bzw. R_{B1} ist die innere Grenze eines Rings, R_{B2} der Radius der äußeren Begrenzung. Daher ist S_{B2}=S_{C1} und R_{B2}=R_{C1} usw.)

Die zugehörigen Radien ermitteln wir mit Hilfe des Satzes des Pythagoras.



Abb. 6.2.2 Maße der Ringe

Josef Nagelschmidt & Stefan Heimersheim St. Michael-Gymnasium

Untersuchungen an brechenden und reflektierenden Oberflächen

Jugend forscht 2013

Wir erstellten abermals am PC zwei Ätzvorlagen und stellten die Platinen mit dem von uns neu angeschafften Ätzgerät (Abb. 6.2.3) her. Wir mussten 2 Platinen ätzen, denn wir wussten noch nicht, welche Anordnung von Resonatoren zum Verhalten einer Streu- oder Sammellinse führte, da wir uns nicht sicher waren welcher Resonator am meisten und welcher am wenigsten Phase hinzufügt und wir wollten nicht allein auf Capassos Graphik (Abb. 5.1.1) vertrauen. Nach der Auswertung der Messungen mit den beiden Linsen, stellten wir fest, dass die erste Linse eine Streulinse war. Also konzentrierten wir unsere Untersuchungen auf die zweite Linse. (Abb. 6.2.4)



Abb. 6.2.3 Der Ätzvorgang

Abb. 6.2.4 Optimierte Sammellinsenstruktur

6.3 Messung und Auswertung

Um unsere Metamaterial-Linse zu testen, haben wir die Intensität (Spannung in mV) in Relation zum Abstand zur Platine gemessen. Das Diagramm zeigt ein deutliches Maximum ca. 31 cm hinter der Platine. Natürlich ist dies nicht unser geplanter Brennpunkt von 20 cm, doch leider konnte unser Mikrowellensender keine parallelen Wellen aussenden, wodurch die Wellen nicht überall gleichzeitig auf der Linse auftreffen und der Brennpunkt zwangsläufig nach hinten verschoben wird.



Abb. 6.3.1 Brennpunkt unserer ersten Linse (31 cm)

Josef Nagelschmidt & Stefan Heimersheim St. Michael-Gymnasium Die wichtigste Erkenntnis unserer Messungen ist aber, dass unsere Metamaterial-Linse für Mikrowellen funktioniert und einen Brennpunkt besitzt. Diese Entdeckung stellt einen bedeutenden Fortschritt für unsere Arbeit dar. Die Ungenauigkeit kommt des Weiteren noch daher, dass jeder Resonatorentyp einen Bereich in der Linse besetzt und nicht nur seine optimale Position (Abb. 6.2.4). Noch höher ist die gemessene Intensität wenige Zentimeter

hinter der Platine. Zuerst vermuteten wir dies hinge mit Nahfeld-Effekten zusammen, die durch den geringen Abstand im Vergleich zur Wellenlänge entstehen. Doch wie im Ausblick erläutert, gab es eine andere Ursache. Nun wollten wir genau wissen, wie gut die Strahlen durch unsere Linse an dem Brennpunkt gebündelt werden. Dazu maßen wir die Intensität links und rechts der optischen Achse. Der blaue Graph zeigt eine Messung mit unserer Sammellinse und der rote Graph eine Messung ohne diese. Wie man der Graphik entnehmen kann, ist die



Abb. 6.3.2 Fokussierung entlang der optischen Mittelachse

Fokussierung an der optischen Achse mit unserer Linse sehr deutlich von der Messung ohne Linse zu unterscheiden. Mit dieser Messung wurde die Funktion unserer Sammellinse aus Metamaterial bestätigt.

Zudem ist es uns gelungen bis zum Landeswettbewerb in Leverkusen, unsere Sammellinse zu optimieren. Durch präzisere Abstände und eine genauere Strukturierung der Resonatorgruppen, konnten wir die in 6.3 aufgestellte Theorie, dass das Maximum kurz hinter der Linse mit Nahfeld-Effekten zusammenhängt (Messung des Brennpunktes), widerlegen und einen neuen Schluss ziehen. Denn bei der optimierten Linse gibt es einen solchen Effekt nicht und die Intensität nimmt zum Brennpunkt hin stetig zu. Somit ist die Ursache des Anstiegs kurz hinter der Linse, eine Ungenauigkeit in der Strukturierung, die Resonatoren waren bei unseren ersten Linsen zu dicht beisammen und beeinflussten sich somit zu stark. Abb. 6.2.4 zeigt bereits die optimierte Linse, die ursprüngliche ist in der Arbeit nicht mehr aufgeführt. In 6.3.3 ist das Messergebnis mit der optimierten Linse gezeigt. Dabei wurde wieder die Intensität in Relation zum Abstand der Platine. Wie man erkennen kann ist das Maximum deutlicher ausgeprägt und die Nebenmaxima sind verschwunden.



Abb. 6.3.3 Messergebnis des Brennpunktes der optimierten Linse

7. <u>Ausblick</u>

Wir haben es geschafft eine Metamaterial-Linse für Mikrowellen zu bauen, die nahezu die Dicke "O" hat. Sie ist nicht zu vergleichen mit ähnlichen Objekten, wie der Fresnel'schen Zonenplatte, deren Dicke im Vergleich zur Wellenlänge (Licht) immer noch sehr groß ist. Durch diese neuen Entdeckungen können bisherige Grenzen überschritten und vielleicht neue Maßstäbe gesetzt werden. Eine ähnliche Linse für Mikrowellen haben wir in der Literatur nicht gefunden. Wir haben also unser Ziel, eine neuartige Metamaterial-Linse zu bauen, erreicht.

Wie wir bereits auf dem Regionalwettbewerb in Düsseldorf präsentiert haben, ist es uns zudem gelungen eine neuartige Metamaterialstruktur auf den Mikrowellenbereich zu übertragen. Diese ist von Shulin Sun u.a. [5] für den Infrarot Bereich erstellt worden, jedoch ist ihre Metamaterialstruktur eine ganz andere als die vorherige, wie an der Einheitszelle ganz deutlich zu erkennen ist (Abb. 7.1).



Abb. 7.1 Unsere neue Metamaterialoberflächenstruktur

Bei dieser Einheitszelle lässt sich nur Reflexion beobachten, jedoch ist auf Grund einer anderen Einheitszellengröße auch der Reflexionswinkel anders (nach Formel 6 und 7). Zudem kann man bei dieser Metamaterialoberfläche die Reflexion in gleicher Polarisationsebene messen, indem man eine zweite Platine aus Kupfer hinter der Oberfläche anbringt. Dies muss aber noch genauer von uns untersucht werden, da die auftretenden Effekte eng miteinander zusammenhängen und es zu mehreren Interferenzen und Wechselwirkungen der Oberfläche mit der Kupferplatine dahinter kommt.

8. Danksagung

Wir bedanken uns besonders bei unserem Betreuungslehrer Herrn Walter Stein, der viele Stunden mit uns in der Physik verbracht hat. Des Weiteren danken wir Herrn Dr. Eric Plum vom Optoelectronics Research Centre der University of Southampton, für seine fachkundige Unterstützung. Weiterer Dank gebührt Herrn Stefan Hück, der uns mit seiner Erfahrung beim Ätzen unterstützte.

9. <u>Literatur</u>

- 1. John B. Pendry und David R. Smith, "Die Superlinse", Spektrum der Wissenschaft, Oktober 2006
- 2. John B. Pendry, "Negative Refraction Makes a Perfect Lense", Physical Review Letters, Volume 85, Number 18, 3966-3970 (2000)
- 3. N. Yu, P. Genevet, M. A. Kats, F. Aieta, J.-P. Tetienne, F. Capasso, Z. Gaburro, "Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction," Science 334, 333 (2011).
- 4. Slyusar, "Metamaterials On Antenna Solutions", International Conference on Antenna Theory and Techniques, 19-24, October 2009
- Shulin Sun, Kuang-Yu Yang, Chih-Ming Wang, Ta-Ko Juan, Wei Ting Chen, Chun Yen Liao, Qiong He, Shiyi Xiao, Wen-Ting Kung, Guang-Yu Guo, Lei Zhou and Din Ping Tsai, "High-Efficiency Broadband Anomalous Reflection by Gradient Meta-Surfaces", Nano Letters 6223–6229 (2012)