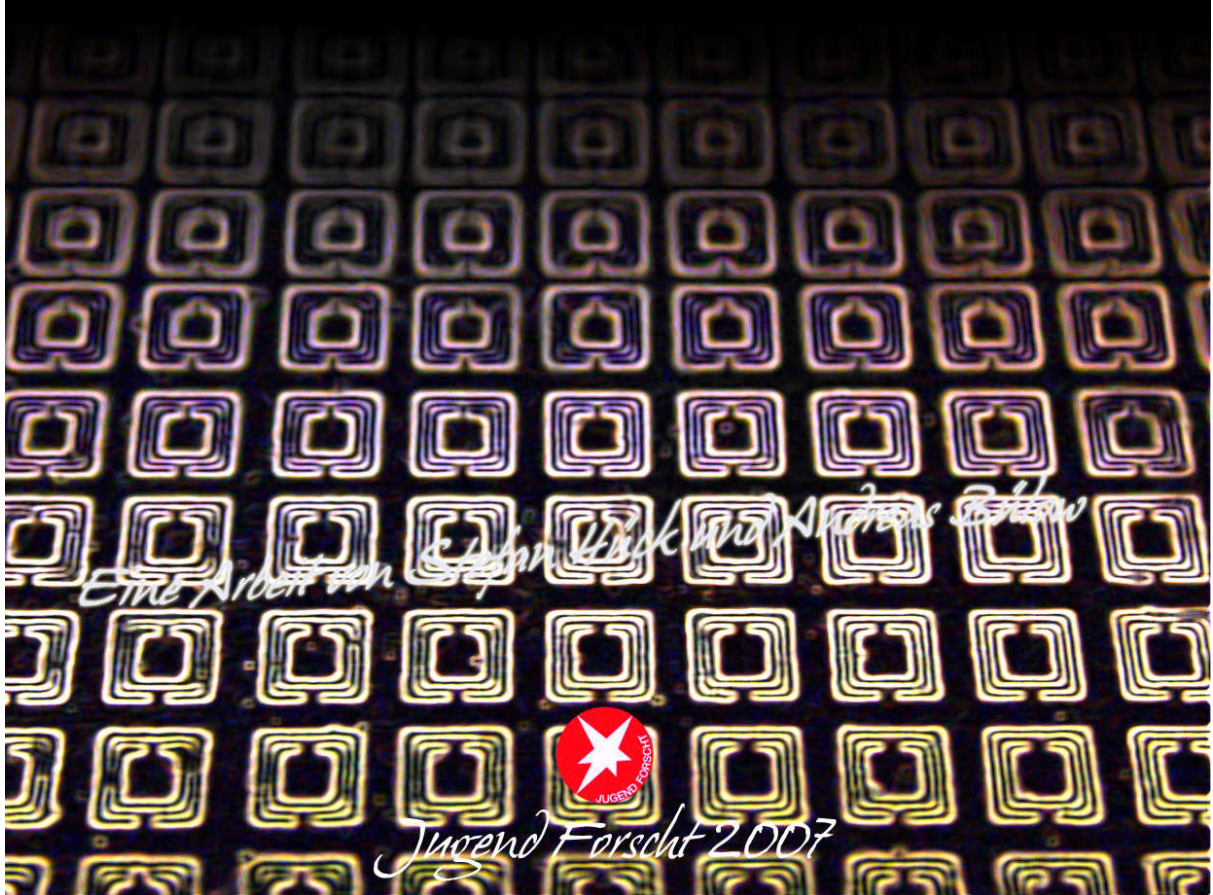




Metamaterialien



Eine Arbeit von Stephan Winkler und Johannes Bittner



Jugend forscht 2007

Inhaltsverzeichnis

1. Kurzfassung.....	2
2. Einleitung	3
3. Theoretische Vorbetrachtung	3
4. Rechnerische Abschätzung für den Bau der Split-Ring-Resonatoren	7
5. Ätzen der Split-Ring-Resonatoren	9
6. Bau des Metamaterials	11
7. Experimente mit dem Metamaterialprisma	11
8. Experimente mit planparallelen Platten	134
9. Ausblick	15
10. Literatur- und Linkliste	15

1. Kurzfassung

Metamaterialien sind zur Zeit eine der aktuellsten Forschungsobjekte im Bereich der Physik. Das bemerkenswerte an diesen Materialien, die in der Natur nicht vorkommen, ist ihr **negativer Brechungsindex**. In einem solchen Material sind Pointingvektor und Wellenvektor antiparallel. D. h., Gruppen- und Phasengeschwindigkeit laufen in entgegengesetzte Richtungen. Man arbeitet mit Nachdruck daran Metamaterialien für Licht zu entwickeln, mit denen man dann neuartige Linsen, Tarnkappen und andere Dinge bauen kann.

Die Herstellung von Metamaterialien mit schulischen Mitteln stellt eine sehr große Herausforderung dar, da die Theorie hierzu recht kompliziert ist. Doch wir waren von ihnen so fasziniert, dass wir diese Herausforderung annahmen.

Nachdem wir uns zuerst mit der Theorie beschäftigt hatten, stellten wir uns den praktischen Problemen, die ja auch erst mal gemeistert werden mussten. Als wir unser erstes, aus Metamaterial geschaffenes Prisma auf die optische Bank stellten und mit Mikrowellen bestrahlt wurde es spannend. Die Freude war groß, als wir eine negative Brechzahl experimentell nachweisen konnten.

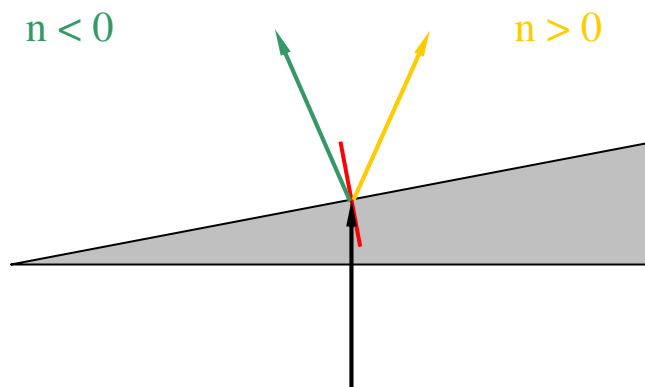


Abb. 1.1 Unterschied zwischen positivem und negativem Brechungsindex



Abb. 1.2 Messung mit Mikrowellen an unserem Metamaterialprisma

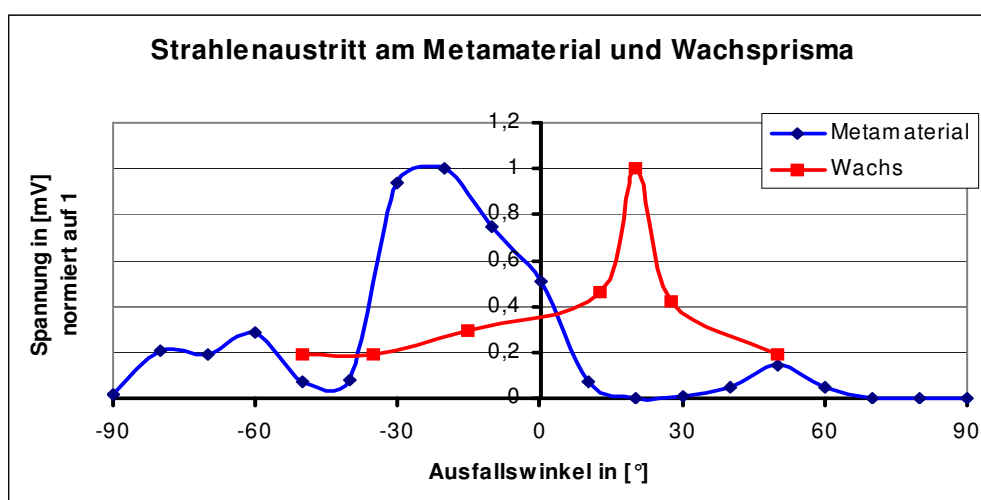


Abb. 1.3 Die Ausfallswinkel der Mikrowellen im Vergleich

2. Einleitung

Metamaterialien gehören mit zu aktuellsten Forschungsobjekten im Bereich der Physik. Das Bemerkenswerte an diesen künstlich geschaffenen Materialien ist die Tatsache, dass es in der Natur keine Materialien mit vergleichbaren Eigenschaften gibt. Erst im Jahre 2000 gelang es einem Forscherteam die bereits in den sechziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts postulierte Idee zum ersten Mal praktisch umzusetzen. Der **negative Brechungsindex** dieser Materialien ermöglicht es, dass Zerstreuungslinsen zu Sammellinsen werden und diese so ein vergleichsweise erheblich geringeres Gewicht aufweisen. Außerdem können mit Metamaterialien sogenannte Superlinsen gebaut werden, die das Nahfeld nutzen und so eine Auflösung jenseits der Beugungsgrenze erreichen.

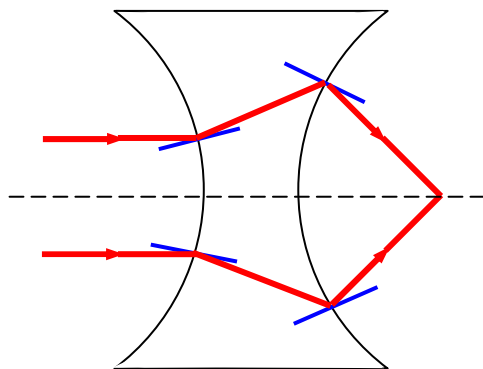


Abb. 2.1 „Sammellinse“ aus Metamaterial

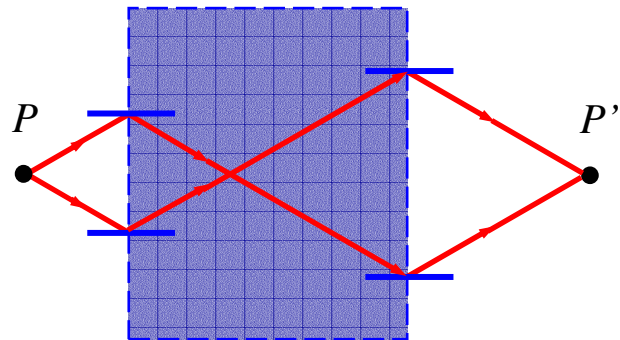


Abb. 2.2 Superlinse aus Metamaterial

3. Theoretische Vorbetrachtung

Brechung

Der Holländer Willebrord van Roijen Snell formulierte 1618 das nach ihm benannte snelliussche Brechungsgesetz, welches besagt, dass Wellen bei dem Übergang zwischen Medien unterschiedlicher optischer Dichte gebrochen werden. Dies wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c_1}{c_2} \quad (1)$$

Für den Übergang aus dem Vakuum in ein Medium gilt:

$$\frac{\sin \alpha_{\text{Vakuum}}}{\sin \alpha_{\text{Medium}}} = \frac{n_{\text{Medium}}}{n_{\text{Vakuum}}} = \frac{c_{\text{Vakuum}}}{c_{\text{Medium}}}$$

mit $c_{\text{Vakuum}} = c_0$ folgt daraus: $c_M < c_0$

Maxwellgleichungen

Die zwischen 1861 und 1864 von dem schottischen Physiker James Clerk Maxwell aufgestellten „Maxwellschen Gleichungen“ beschreiben die Wechselwirkung zwischen elektrischen und magnetischen Feldern.

Ohne Ströme und freie Ladungen gilt:

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \operatorname{div} \vec{D} = 0$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad \vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$$

Aus ihnen folgen die Amplitudengleichungen $\vec{k} \times \vec{E} = \omega \mu_r \mu_0 \vec{H}$ (2)

$$\vec{k} \times \vec{H} = -\omega \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E}$$
 (3)

Als Betragsgleichung mit $\alpha = 90^\circ$ ($\sin \alpha = 1$) erhält man:

$$kE = \omega \mu_r \mu_0 H$$

$$kH = \omega \epsilon_r \epsilon_0 E$$

Eliminiert man H und E durch Multiplikation:

$$k^2 EH = \omega^2 \epsilon_r \mu_r \epsilon_0 \mu_0 EH$$

So erhält man:

$$\frac{\omega^2}{k^2} = \frac{1}{\epsilon_r \mu_r \epsilon_0 \mu_0} = \frac{c_0^2}{n^2}$$

$= c^2 \qquad \qquad \qquad = c_0^2$

Da $c = \frac{\omega}{k}$ und $c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ ergibt sich folgende „Maxwell-Relation“:

$$n^2 = \frac{c_0^2}{c^2} = \epsilon_r \mu_r$$
 (5)

Veselagos Idee

Der ukrainische Physiker Victor Veselago formulierte 1967 eine These, die besagt, dass, sollten die magnetische Permeabilitätszahl μ sowie die elektrische Permittivitätszahl ϵ gleichzeitig negativ sein, so kann auch der Brechungsindex n negativ sein. Nach seiner Meinung gibt es kein Naturgesetz, welches dies verbietet. Da man bis zum Jahr 2000 solche Metamaterialien aber nicht bauen konnte, beachtete man seine Idee fast 30 Jahre lang nicht.

Veselagos Idee soll die folgende Rechnung verdeutlichen:

Gegeben sei: $\epsilon_r = e^{i\pi} = -1$ und $\mu_r = e^{i\pi} = -1$

$$n = \sqrt{e^{i\pi} \cdot e^{i\pi}}$$

$$n = e^{\frac{i\pi}{2}} \cdot e^{\frac{i\pi}{2}}$$

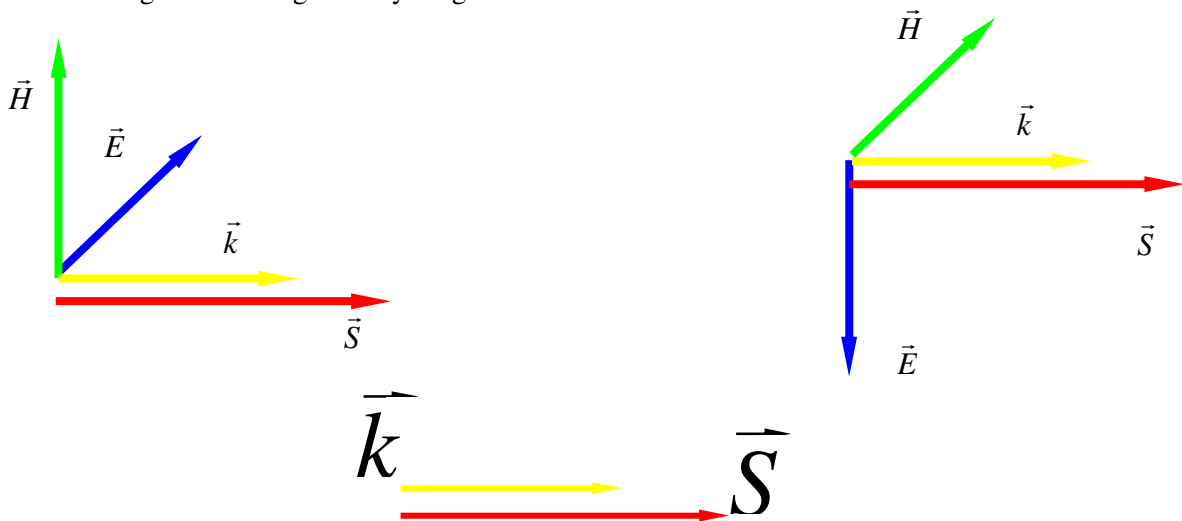
$$n = e^{i\pi}$$

$$n = -1$$

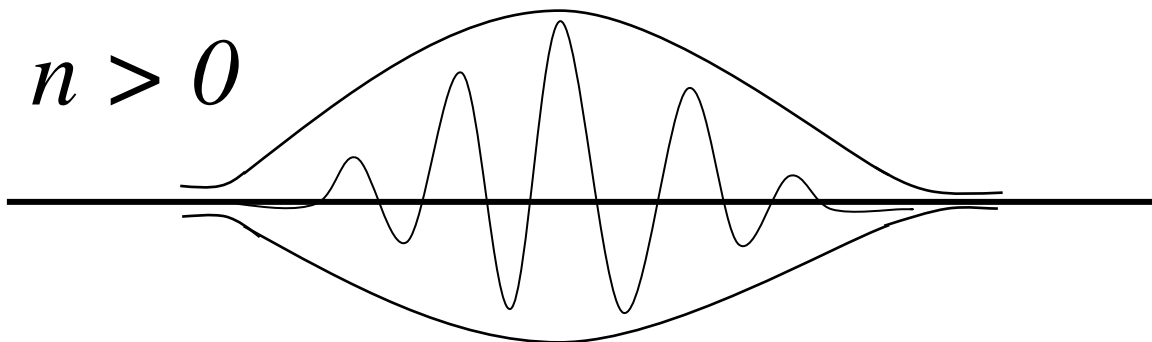
Aus den obigen Überlegung folgt:

1. sind ϵ_r und μ_r gleichzeitig größer 0, so formen \vec{k} , \vec{E} und \vec{H} ein rechtshändiges Tripel.

\vec{k} zeigt in Richtung des Poynting-Vektors $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$

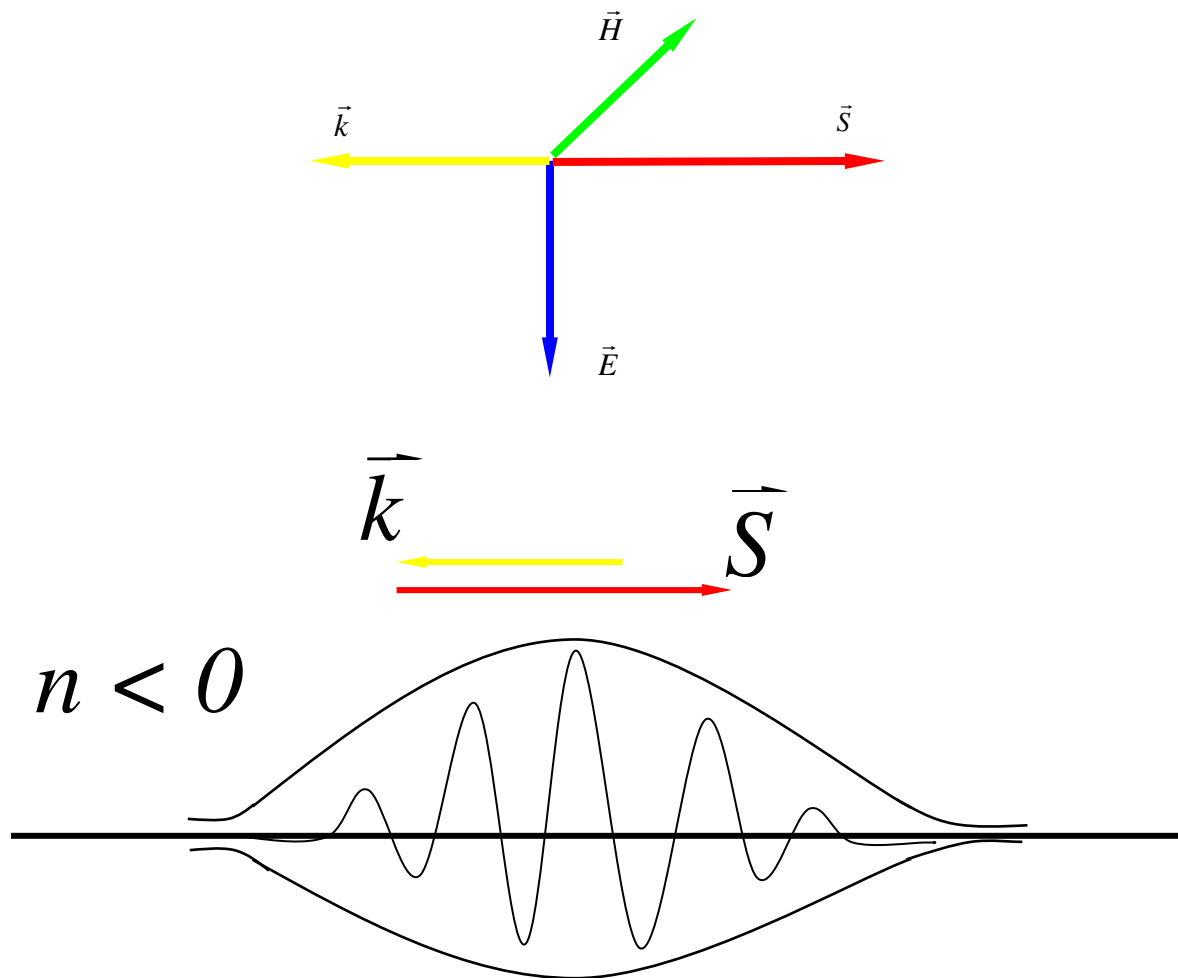


$n > 0$



2. sind entweder ϵ_r und μ_r kleiner 0, so existiert keine EM-Welle im Medium.

3. sind ϵ_r und μ_r gleichzeitig kleiner 0, so bilden \vec{k} , \vec{E} und \vec{H} ein linkshändiges Tripel.



Konsequenz

Wenn n_2 negativ ist, so folgt aus Gleichung (1), dass auch α_2 negativ ist und somit auf der selben Seite des Lotes liegen muss wie die einfallende Welle. Somit würde ein bisher in der Natur nicht beobachtetes Phänomen eintreten, denn es gibt keine natürlichen Materialien, bei denen ϵ und μ gleichzeitig negativ sind. Dies liegt darin begründet, dass bei den natürlichen Stoffen die magnetischen Resonanzen nur bei niedrigen Frequenzen auftreten und die elektrischen Resonanzen erst bei hohen Frequenzen zu beobachten sind.

Des Weiteren würde aus (1) folgen, dass auch c_2 negativ sein müsste. Dies würde jedoch alle bisherigen Gesetze auf den Kopf stellen und zum Teil auch gegen sie verstoßen. Daraus ergab sich ein längerer anhaltender wissenschaftlicher Disput zwischen der Pendry-Gruppe und der Valanju-Gruppe. Jedoch ergibt sich bei genauerer Betrachtung folgendes:

Der **Energiefluss** einer elektromagnetischen Welle für ein Metamaterial wird durch den folgenden Term beschrieben:

$$\vec{S} \propto \vec{E} \times \vec{H} \quad (6)$$

Der Poynting-Vektor \vec{S} ist proportional zu dem Kreuzprodukt der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Feldstärke.

Der Energiefluss ist vorwärtsgerichtet.

Die **Ausbreitungsrichtung** der Welle in einem Metamaterial wird durch folgenden Term beschrieben:

$$\vec{k} \propto -\vec{E} \times \vec{H} \quad (7)$$

Der Wellenvektor \vec{k} ist proportional zu dem negativen Kreuzprodukt der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Feldstärke.

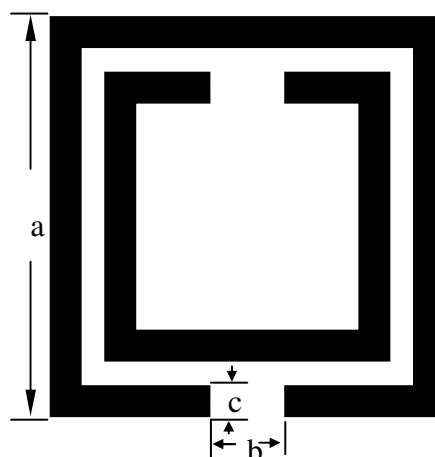
Die Phasengeschwindigkeit ist rückwärtsgerichtet!

Fazit

In einem Material mit negativer Brechzahl zeigen der Poynting-Vektor \vec{S} und der Wellenvektor \vec{k} in entgegengesetzte Richtungen. Das heißt, Gruppen- und Phasengeschwindigkeit laufen in entgegengesetzte Richtungen.

4. Rechnerische Abschätzung für den Bau der Split-Ring-Resonatoren

Nachdem wir einschlägige Literatur studiert und all unsere technischen Möglichkeiten bedacht hatten, kamen wir zu dem Schluss, dass wir bei der uns zur Verfügung stehenden Mikrowellenlänge von circa 3 cm sehr kleine Strukturen (Split-Ring-Resonatoren) bauen mussten. Die Strukturen müssen deshalb wesentlich kleiner sein als die verwendete Wellenlänge, damit das Metamaterial für die Welle wie ein homogenes Medium erscheint. Jedoch waren unsere Möglichkeiten durch Fehler, die beim Ätzen entstehen, beschränkt. (siehe Kapitel *Ätzen der Split-Ring-Resonatoren*) Moderne Fotolithografieverfahren stehen uns in unserer Schule leider nicht zur Verfügung. Letztendlich trauten wir uns zu, einen Split-Ring-Resonator mit einer Kantenlänge von 2,2 mm x 2,2 mm zu bauen. Hierbei ergab sich eine Leiterbahnbeile von 160 μm . Die Kupferauflage beträgt 35 μm .



$$a = 2,2 \text{ mm}; c = 0,16 \text{ mm}; b = 0,2 \text{ mm}$$

Abb. 4.1 Entwurf unseres Split-Ring-Resonators

Mit einer groben rechnerischen Abschätzung überprüften wir, ob die von uns verwendeten Maße der Split-Ring-Resonatoren die von uns gewünschten Eigenschaften im zeigen könnten. Die von uns verwendete Mikrowellenanlage besitzt eine Frequenz von rund 10 GHz.

Zu erst berechnen wir die Kapazität des Schwingkreises:

Es gilt:

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad \text{mit } \epsilon_r = 1$$

Werte eingesetzt:

$$C = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm} \cdot \frac{160 \cdot 10^{-6} m \cdot 35 \cdot 10^{-6} m}{200 \cdot 10^{-6} m}$$

$$C = 2,479176 \cdot 10^{-6} F$$

Und danach die Induktivität:

Es gilt:

$$L = \mu_r \mu_0 \frac{n^2}{l} A \quad \text{mit } \mu_r = 1$$

Werte eingesetzt:

$$L = 4\pi \cdot 10^{-7} Hm^{-1} \cdot \frac{1}{35 \cdot 10^{-6} m} \cdot (22 \cdot 10^{-4} m)^2$$

$$L = 1,7377 \cdot 10^{-7} H$$

Mit diesen beiden Werten berechnet man nun die Eigenfrequenz der Schwingkreise:

Es gilt:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Werte eingesetzt:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{2,479176 \cdot 10^{-6} F \cdot 1,7377 \cdot 10^{-7} H}}$$

$$f = 2,42 \cdot 10^{10} Hz = 24,2 GHz$$

Unsere Abschätzung für einen Split-Ring-Resonator ist um den Faktor 2,4 zu groß. Bedenkt man aber, dass die Kapazität C größer wird, wenn man, wie in Abbildung 4.1 skizziert, zwei Split-Ring-Resonatoren ineinandersetzt, so wird die Frequenz deutlich unter 24,2 GHz liegen.

5. Ätzen der Split-Ring-Resonatoren

Bevor wir überhaupt mit dem eigentlichen Ätzen beginnen konnten, stellte sich das Problem, wie wir Ätzmasken für diese doch relativ geringen Maße herstellen konnten. Unsere erste Überlegung war es, ein Foto-Negativ als Maske zu verwenden. Hier gab es aber das Problem, dass lediglich sogenannte Reprofilme UV-strahlungsdurchlässig sind. Wir fanden jedoch keine Druckerei in unserer Gegend, die noch mit Reprofilmen arbeitet. Auch die Möglichkeit, die Formen der Split-Ring-Resonatoren direkt mit einem Silberstift auf die Platinen zu zeichnen wurde schnell verworfen, da es einfach keinen Stift mit einer passend feinen Mine gibt. Ganz zu Schweigen davon, dass man beim Zeichnen von über 700 Resonatoren pro Platine anfängt durchzudrehen. Schließlich überlegten wir uns die Formen am Computer zu erstellen und dann auf eine Folie auszudrucken. Wir erstellten eine Vorlage mit einem Grafikprogramm und druckten sie jeweils mit einem Tintenstrahldrucker und mit einem Laserdrucker auf Folie. Bei einer vergrößerten Betrachtung fiel auf, dass die mit einem Laserdrucker gedruckte Folie kleine Löcher in den Streifen aufwies und die mit einem Tintenstrahldrucker gedruckte Folie kleine Farbtröpfchen neben den Formen besaß. Wir entschieden uns für die Tintenstrahlfolie und begannen mit unserem ersten Ätzversuch.

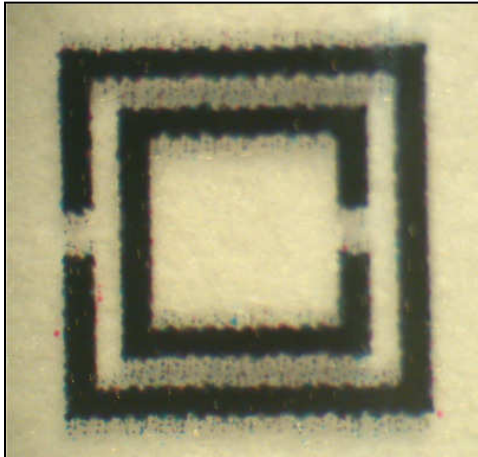


Abb. 5.1 Vergrößerung der Maske eines Split-Ring-Resonators, der mittels Tintenstrahldrucker aufgedruckt wurde

Das erste Ätzen gestaltete sich insofern schwierig, als noch keiner von uns jemals Platinen geätzt hatte und dies somit Neuland für uns war. Nach einigen Recherchen im Internet starteten wir unsere ersten Versuche. Unter einer 300 Watt starken Osram® Ultra Vitalux-Lampe belichteten wir ein Platinenstück mit der darauf befindlichen Ätzmase, welche wir mit dem Tintenstrahldrucker erstellt hatten. Da die Belichtungszeit anfänglich zu groß war und die Lampe eine große Wärmemenge abstrahlte, schmolz die Folie auf dem Platinenstück fest. Solche Probleme haben natürlich nur Anfänger. Unsere ersten Ätzversuche dienten so hauptsächlich dazu, uns erst einmal mit dem Ätzen so kleiner Objekte vertraut zu machen. Mit einem Gesichtsbräuner ($P = 75 \text{ W}$) konnten wir die Platinen schonender und gleichmäßiger belichten als mit der Vitalux-Lampe. Außerdem stellten wir unseren Entwickler nach einer eigenen Rezeptur her. So konnten wir nach und nach unser Ätzergebnis optimieren (siehe Abbildungen).

Das erste Ätzen gestaltete sich insofern schwierig, als noch keiner von uns jemals Platinen geätzt hatte und dies somit Neuland für uns war. Nach einigen Recherchen im Internet starteten wir unsere ersten Versuche. Unter einer 300 Watt starken Osram® Ultra Vitalux-Lampe belichteten wir ein Platinenstück mit der darauf befindlichen Ätzmase, welche wir mit dem Tintenstrahldrucker erstellt hatten. Da die Belichtungszeit anfänglich zu groß war und die Lampe eine große Wärmemenge abstrahlte, schmolz die Folie auf dem Platinenstück fest. Solche Probleme haben natürlich nur Anfänger. Unsere ersten Ätzversuche dienten so hauptsächlich dazu, uns erst einmal mit dem Ätzen so kleiner Objekte vertraut zu machen. Mit einem Gesichtsbräuner ($P = 75 \text{ W}$) konnten wir die Platinen schonender und gleichmäßiger belichten als mit der Vitalux-Lampe. Außerdem stellten wir unseren Entwickler nach einer eigenen Rezeptur her. So konnten wir nach und nach unser Ätzergebnis optimieren (siehe Abbildungen).

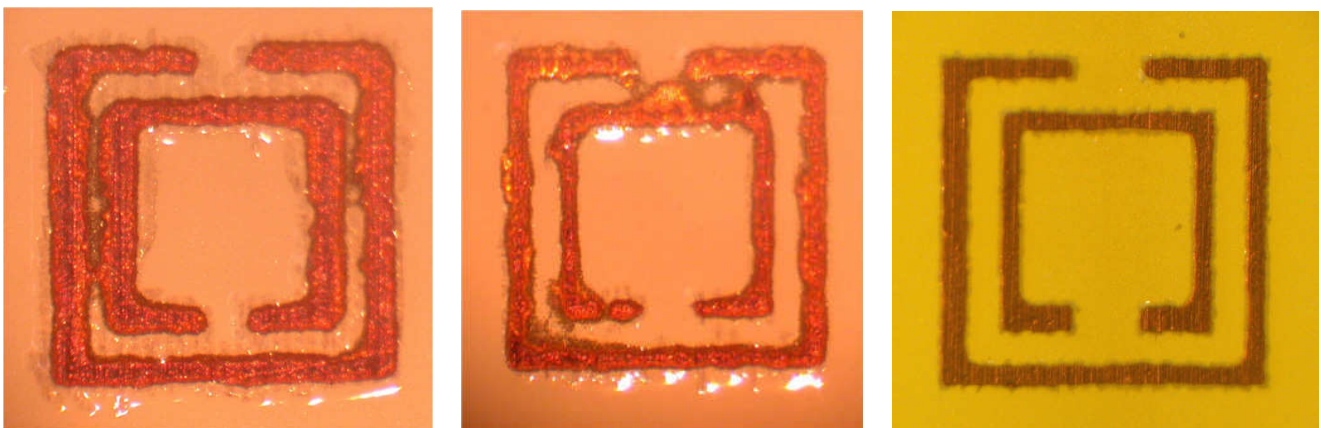


Abb. 5.2 – 5.4 Verbesserung unserer Ätzversuche - ganz rechts ist die finale Version eines Resonators



Abb. 5.5 Geätzte Platine mit Split-Ring-Resonatoren

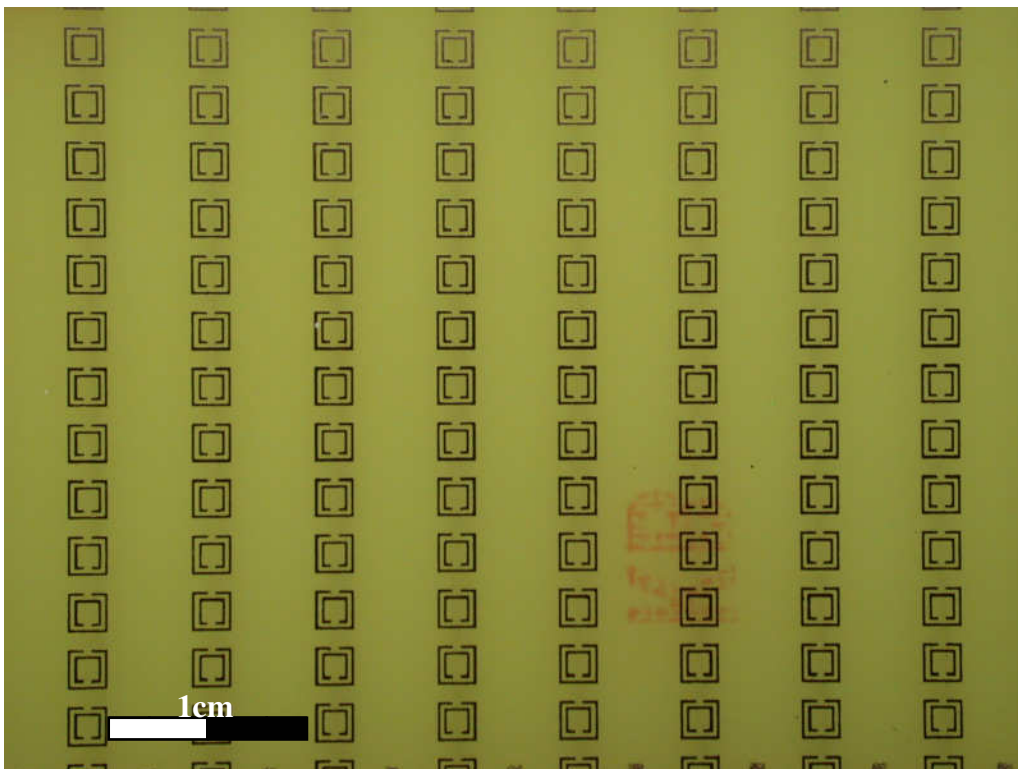


Abb. 5.6 Geätzte Platine mit Split-Ring-Resonatoren

6. Bau des Metamaterials

Für den Bau unseres Metamaterials wählten wir die Form eines keilförmigen Prismas, da wir hier nur einen Winkel bei unseren Messungen berücksichtigen mussten. Außerdem stellten wir ein vergleichbares Wachsprisma her, um Messwerte des Metamaterials mit denen eines normal brechend Mediums vergleichen zu können.

Der Bau des Metamaterials erforderte einige Überlegungen. Das Prisma stellt eine Struktur aus vertikal und horizontal angeordneten Platinen dar, welche ohne Hilfsmittel wie Kleber oder Schrauben miteinander verbunden werden müssen. Diese könnten eventuell die Brechung beeinflussen und so die Messergebnisse verfälschen. So entschieden wir uns für ein Stecksystem. Dazu mussten in die Platinen jeweils zur Hälfte Schlitz



Abb. 6.1 Fräsen der Schlitz für das Stecksystem

werden, in die dann die entsprechenden Platinen, welche senkrecht zu den anderen stehen, gesteckt werden können. Diese Schlitz müssen eine Breite von 1,5 mm aufweisen, da dies der Platinendicke entspricht. Da der Kauf einer Dekupiersäge aus preislichen Gründen nicht in Frage kam, suchten wir nach einer einfachen Alternative. Wir entschieden uns dann für eine Stichsäge, welche gedreht in einen Schraubstock eingespannt und mit einer Sperrholzplatte versehen wurde. Beim Sägen unserer Testplatte traten neue Probleme auf. Ein übliches Holzsägeblatt war bereits nach sehr kurzer Zeit stumpf und erst nachdem wir uns ein Metallsägeblatt gekauft hatten, welches die richtige Dicke aufwies, konnte das Sägen richtig losgehen. Die Schlitz waren nun sauber und gerade zugeschnitten und trotzdem gab es beim Zusammenstecken des Metamaterials Probleme. Alle Schlitz mussten noch etwas verbreitert werden. Mit einer Dremelbohrmaschine lösten wir das Problem, indem wir die Bohrmaschine als Fräse benutzten (siehe Abb. 6.1).

Dank unseres Stecksystems war es nun möglich die einzelnen Platinenteile zu einem Keil mit einem Winkel von 34° ineinander zu stecken.

7. Experimente mit dem Metamaterialprisma

Nachdem der Bau nun abgeschlossen war, wurde es spannend. Unser Metamaterialprisma wurde auf die optische Bank gesetzt und die Intensität für verschiedene Austrittswinkeln zu messen. Zum Vergleich führten wir den gleichen Versuch mit dem bereits hergestellten Wachsprisma durch.

Wir waren über die Ergebnisse unserer Messungen mehr als erfreut, denn wir hatten es geschafft ein Material herzustellen welches in der Tat einen negativen Brechungsindex aufweist. Wir konnten dort ein Intensitätsmaximum feststellen, wo beim vorhergehenden Wachsversuch keine Strahlung zu messen war (siehe Abb. 7.5 – 7.7). Umgekehrt konnten wir ein Maximum beim Wachsprisma messen, welches beim Metamaterial nicht auftrat.

Damit hatten wir das Ziel unserer Jugend-forscht-Arbeit erreicht.

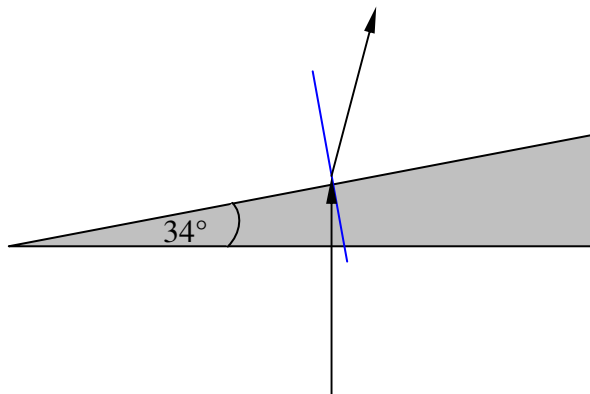


Abb. 7.1 Darstellung des Strahlenverlauf bei unserem Wachsprisma

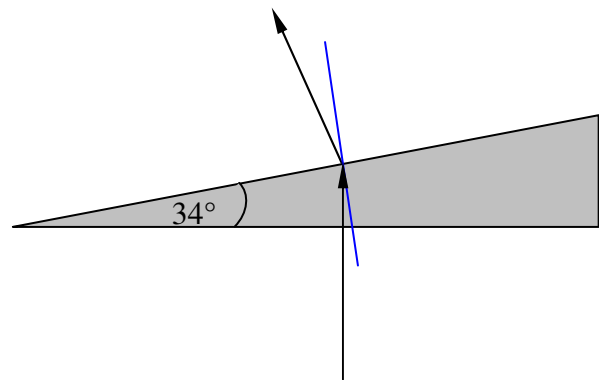


Abb. 7.2 Darstellung des Strahlenverlauf bei unserem Metamaterial

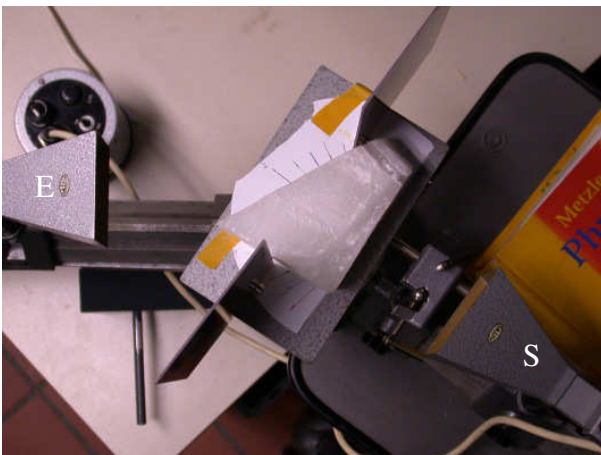


Abb. 7.3 Aufbau des Brechungsversuch mit dem Wachsprisma. Ein Teil der Abschirmung wurde entfernt.

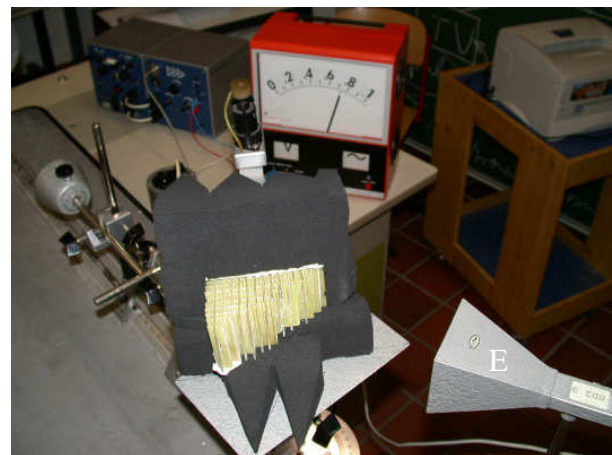


Abb. 7.4 Aufbau des Brechungsversuch mit dem Metamaterialprisma

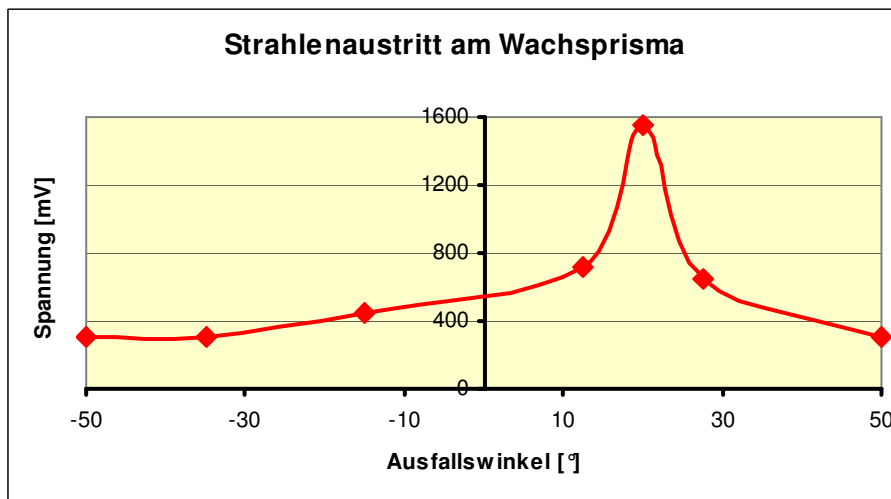


Abb. 7.5 Der Brechungsversuch mit dem Wachsprisma zeigt, dass Wachs eine positive Brechzahl besitzt

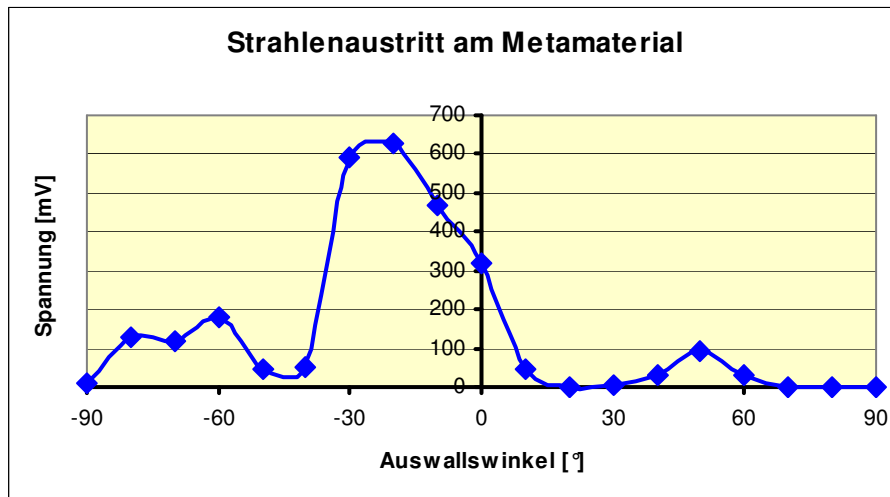


Abb. 7.6 Der Brechungsversuch mit dem Metamaterial zeigt, dass unser Prisma aus Metamaterial eine negative Brechzahl besitzt

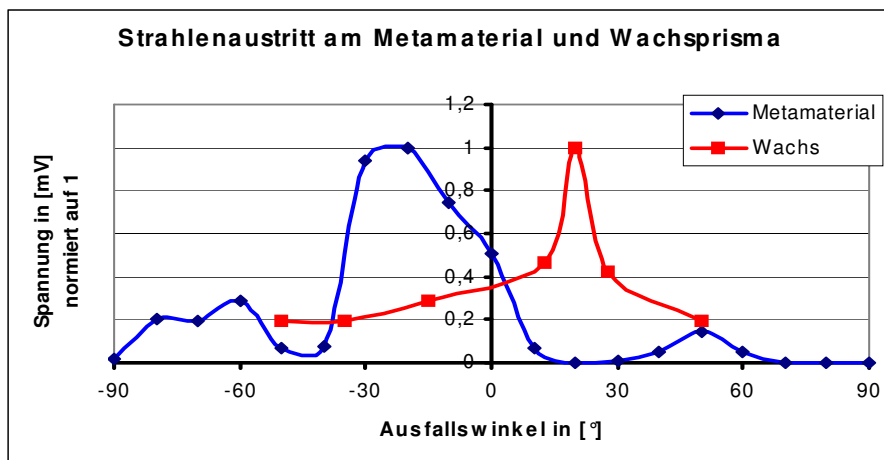


Abb. 7.7 Die Ausfallswinkel der Mikrowellen im Vergleich

8. Experimente mit planparallelen Platten

Nach dem erfolgreichen Experiment mit unserem Metamaterialprisma führten wir noch einige Versuche mit planparallel angeordneten Metamaterialplatten durch. (siehe Abbildung 8.1)

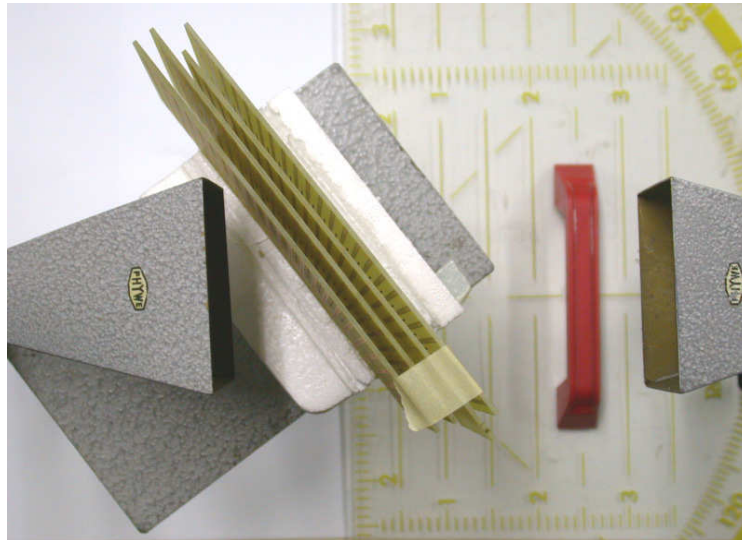


Abb. 8.1 Versuchsaufbau mit planparallelen Platten aus Metamaterial

In Abbildung 8.2 haben wir dargestellt, welches Ergebnis wir bei diesem Versuch erwarteten. Wie bei normal brechenden Medien sollte auch bei den Metamaterialplatten der austretende Strahl parallel zum einfallenden Strahl verlaufen. Durch mehrere Messungen konnten wir dies bestätigen. D.h., wir waren mit unserem Metamaterial sehr zufrieden.

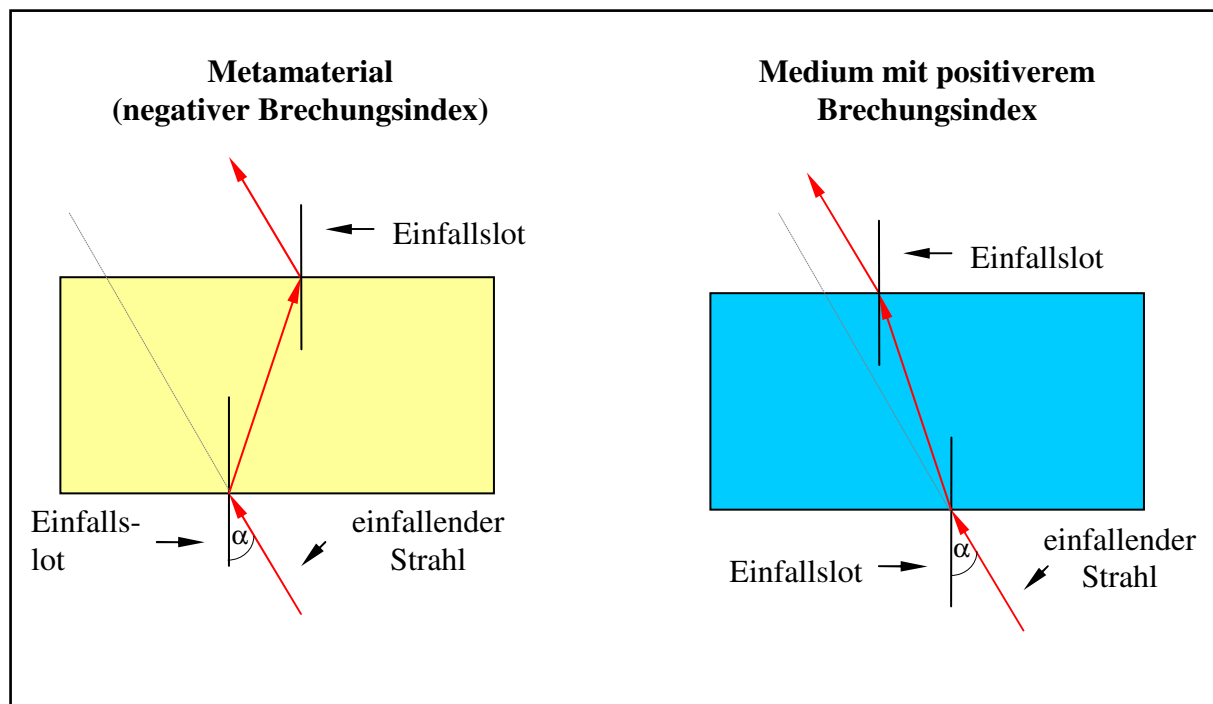


Abb. 8.2 Darstellung des Strahlenverlaufs bei einem Metamaterial und einem Medium mit positiven Brechungsindex

9. Ausblick

Das Ziel unserer Arbeit haben wir erreicht. Wir hoffen, auf dem Wettbewerb mit weiteren, interessanten Ergebnissen aufwarten zu können.

10. Literatur- und Linkliste

- [1] John B. Pendry und David R. Smith: Die Superlinse, Spektrum der Wissenschaft, Oktober 2006
- [2] Arbeitsgruppe Wegener, Universität Karlsruhe, Institut für Angewandte Physik:
<http://www.aph.uni-karlsruhe.de/ag/wegener/index.de.html>
- [3] Ekaterina Shamonia: Herrschaft der Ringe, Physik Journal 5 Nr.8/9, 2006
- [4] Angela Meyer: Tarnkappe, c't Heft 23, 2006
- [5] Victor Georgijewitsch Veselago: The Electrodynamics of Substances with simultaneously negative values of ϵ und μ , Soviet Physics Uspekhi, Januar/Februar 1968
- [6] Stefan Linden und Martin Wegener: Metamaterialien werden „sichtbar“, Physik Journal Nr. 12, 2006
- [7] John B. Pendry und David R. Smith: Reversing Light: Negative Refraction, Physics Today, Dezember 2003