Demonstration optischer Aktivität in Metamaterialien durch intrinsische und extrinsische Chiralität

„Jugend forscht“-Arbeit

von

Jasmin Bentler, Andreas Bülow, Stefan Hück

Landeswettbewerb 2010

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzfassung....2
2 Unsere ersten Versuche mit Metamaterialien....2
3 Zielsetzung....3
4 Intrinsische Chiralität....4
4.1 Theoretische Vorbetrachtung....4
4.2 Herstellung der verwendeten Strukturen....5
4.3 Versuchsaufbau und Messungen....7
4.4 Messergebnisse....8
4.5 Deutungen....10
5 Extrinsische Chiralität....11
5.1 Theoretische Vorbetrachtung....11
5.2 Messungen....12
5.3 Deutung....13
6 Ausblick....13
7 Dank....14
8 Anhang....14
8.1 Aachener Messungen....14
8.2 Mathematische Beschreibung der optischen Aktivität unserer Metamaterialien....17
8.3 Ideen für praktische Anwendungen....19
9 Literatur- und Linkliste....21

1 Kurzfassung

In einer früheren Arbeit konnten wir zeigen, dass Metamaterialien einen negativen Brechungsindex besitzen. Ziel unserer jetzigen „Jugend forscht“-Arbeit ist es, die chiralen Eigenschaften von Metamaterialien zu untersuchen. Die Chiralität ist bei den natürlichen Stoffen schon seit vielen Jahrzehnten ein wichtiges Forschungsthema. Umso mehr hofften wir, bei den Metamaterialien auf neue interessante Ergebnisse in Sachen Chiralität zu stoßen.

Anhand von unterschiedlichen Strukturen konnten wir für den Mikrowellenbereich zeigen, dass chirale Metamaterialien eine wesentlich stärkere optische Aktivität besitzen als natürliche Materialien. Sie haben zudem den Vorteil, dass alle Parameter beim Fertigungsprozess frei bestimmt werden können.

Besonders stolz sind wir darauf, dass wir experimentell nachweisen konnten, dass selbst achirale Metamaterialmuster bei einem entsprechenden Versuchsaufbau chirales Verhalten zeigen. Solche Materialien gibt es in der Natur nicht! Die Zukunft wird zeigen, welche technischen Anwendungen aus dieser besonderen Eigenschaft der Metamaterialen entstehen werden.

2 Unsere ersten Versuche mit Metamaterialien

Metamaterialien sind zur Zeit eines der aktuellsten Forschungsobjekte im Bereich der Physik. Und das zu Recht! Diese außergewöhnlichen Materialien kommen in der Natur nicht vor. Das Interessante an ihnen ist ihr negativer Brechungsindex. In diesen Metamaterialien sind Poyntingvektor und Wellenvektor antiparallel ausgerichtet, Gruppen- und Phasengeschwindigkeit laufen also in entgegengesetzte Richtungen!

Die Geschichte zeigt, dass immer dann eine Vielzahl von technischen Neuentwicklungen entstand, nachdem der Mensch grundlegende Dinge entwickelt hat, die so in der Natur nicht vorkommen. Als zum Beispiel das Rad erfunden wurde, konnte man sich dessen vielfältigere, spätere Bedeutung noch nicht ausmalen. Ähnlich verhielt es sich mit Kunststoff oder dem Laser. Wahrscheinlich wird es auch bei den Metamaterialien so sein. Bereits jetzt wissen wir, dass es möglich ist, aufgrund des negativen Brechungsindex ganz neuartige Produkte zu entwickeln. Tarnkappen, die elektromagnetische Wellen um ein Objekt herumleiten oder neuartige Linsen sind nur ein kleiner Ausblick in die Zukunft. Noch lässt sich der enorme praktische Nutzen von Metamaterialien nicht ausmalen!

Bereits im Jahr 2007 haben zwei von uns (Andreas und Stefan) erste Versuche mit Metamaterialien durchgeführt. Aus sogenannten „Split-Ring-Resonatoren“ bauten wir einen Metamaterial-Keil für

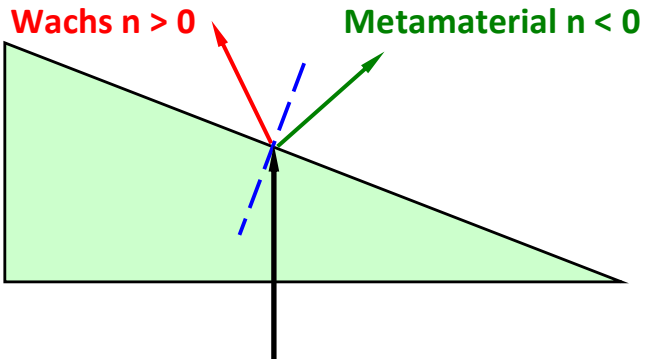


Abb. 2.1 Ein einfallender Strahl wird in unserem Wachsprisma auf die gegenüberliegende Seite des Einfallslot, bei unserem Metamaterial-Keil jedoch auf die selbe Seite des einfallenden Strahls gebrochen.

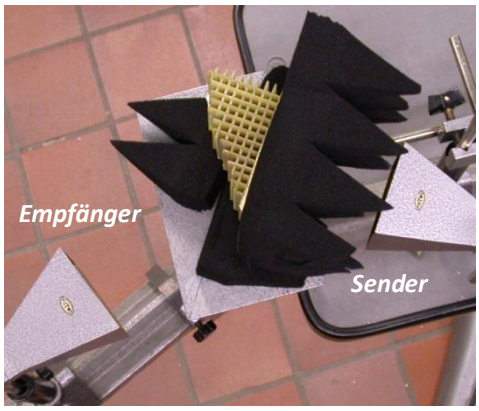


Abb. 2.2 Messung mit Mikrowellen an unserem Metamaterialprisma

Mikrowellen, mit dem sich die negative Brechung experimentell nachweisen lässt (siehe *Abb.2.2*).

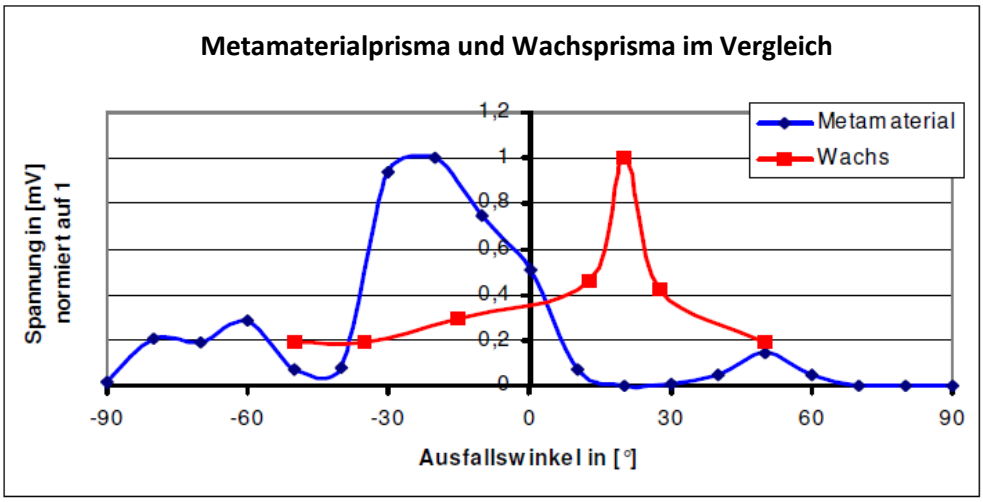


Abb. 2.3 Der Ausfallswinkel der Mikrowellen bei unserem Metamaterial- und unserem Wachsprisma

3 Zielsetzung

Ziel unserer „Jugend forscht“-Arbeit ist es, die chiralen Eigenschaften von Metamaterialien zu untersuchen. Wir hoffen hierbei auf interessante Ergebnisse zu stoßen, da, wie in Kapitel 2 erwähnt, Metamaterialien zum Teil überraschend andere Eigenschaften besitzen als Materialien, die in der Natur vorkommen.

Doch warum entschieden wir uns gerade für das Thema Chiralität? Nun, die optische Aktivität eines Stoffes beschreibt seine Fähigkeit die Polarisationsebene einer elektromagnetischen Welle zu drehen. Seit der Entdeckung am Anfang des 19. Jahrhunderts entwickelte sich die optische Aktivität zu einem äußerst wichtigen Hilfsmittel in der Mikrobiologie, analytischen Chemie, Optoelektronik und sogar zur Erkennung von Lebensformen. Aber egal, ob künstlich oder natürlichen Ursprungs, optische Aktivität wird stets mit chiralen Molekülen beziehungsweise Strukturen erklärt.

Was ist aber nun diese *Chiralität*? Als chiral bezeichnet man jene Objekte, die nicht durch Drehung mit ihrem Spiegelbild deckungsgleich übereinander gebracht werden können. So sind beispielsweise die menschlichen Hände chiral. Denn das Spiegelbild der rechten Hand ist die linke Hand und umgekehrt. Doch können beide, egal wie sehr man sich auch verdreht, nicht übereinander gebracht werden: Der linke Handschuh passt einfach nicht an die rechte Hand. Andernfalls heißen die Strukturen *achiral*. Die zunächst unspektakulär wirkende Chiralität erfordert in Wirklichkeit aber höchste Beachtung in der Forschung als auch im Alltag. Die Beispiele in *Abbildung 3.1* zeigen dies in aller Deutlichkeit.

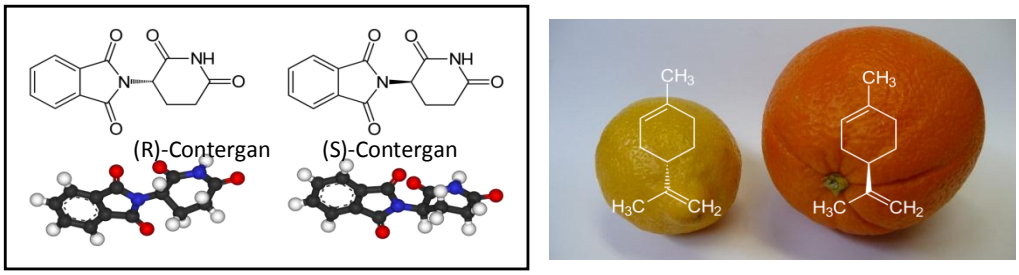


Abb. 3.1 Beispiele für die unterschiedlichen Wirkungen von chiralen Molekülen:
(S)-Contergan verursacht Missbildungen, (R)-Contergan ist ein mildes Beruhigungsmittel.
(*R*)-(+)-Limonen bzw. (*S*)-(–)-Limonen ergeben Zitronen- bzw. Orangenduft

4 Intrinsische Chiralität

4.1 Theoretische Vorbetrachtung

Die optische Aktivität des chiralen Metamaterials, also die Eigenschaft die Schwingungsebene einer einfallenden Welle zu drehen, ist das Ergebnis der elektromagnetischen Wechselwirkungen zwischen den zueinander verdrehten Metallstrukturen der verschiedenen Lagen. Bei Bestrahlung des Metamaterials regt die einfallende Mikrowelle die Elektronen in den Metallstrukturen zu Schwingungen an - ein zusätzliches elektromagnetisches Feld entsteht.

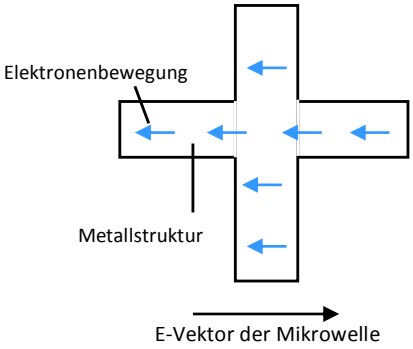


Abb. 4.1 angeregter Elektronenfluss

Die Strukturen einer einzelnen Lage beeinflussen den Polarisationszustand im Fernfeld nicht, weil der von der einfallenden Welle (Primärwelle) ausgelöste elektrische Dipol mit dieser in derselben Schwingungsebene schwingt und das induzierte magnetische Feld parallel zu dem der Mikrowelle steht (vgl. *Abb. 4.1*). Jedoch macht das Nahfeld, bzw. die wechselseitige Beeinflussung der hintereinander liegenden Strukturen das Metamaterial optisch aktiv.

Zum besseren Verständnis führen wir unsere weiteren Überlegungen an einem konkreten Beispiel, dem Rosettenmuster durch. Fällt die Mikrowelle auf die zueinander verdrehten Rosettenstrukturen des Metamaterials, schwingen die Elektronen der hintereinanderliegenden Rosettendrähte simultan in die gleiche Richtung (vgl. Abb. 4.2). Der gleichgerichtete Elektronenfluss lässt die übereinander liegenden Drähte einen elektrischen Dipol bilden. Aufgrund seiner Ausrichtung erzeugt dieser selbst Wellen, die in der Polarisationsrichtung von der Primärwelle abweichen und sich mit dieser überlagern.

Betrachtet man die linear polarisierte Mikrowelle als Überlagerung einer links- und einer rechtszirkular polarisierten Komponente, wird verständlich, dass der im Rosettenpaar vorhandene 3D-chirale Linksdrehsinn in der gesamten Anordnung eine verstärke Anregung der Resonanz durch den links- und weniger durch den rechtszirkular polarisierten Wellenanteil begünstigt. Eine ungleich starke Resonanzanregung der beiden zirkularen Wellenkomponenten bedeutet unterschiedliche Brechungsindizes (Doppelbrechung). Mit dem Chiralitätsparameter κ, der ein Maß für die optische Aktivität ist, werden die Brechungsindizes für die zirkular polarisierten Wellenteile folgendermaßen ermittelt [08]:

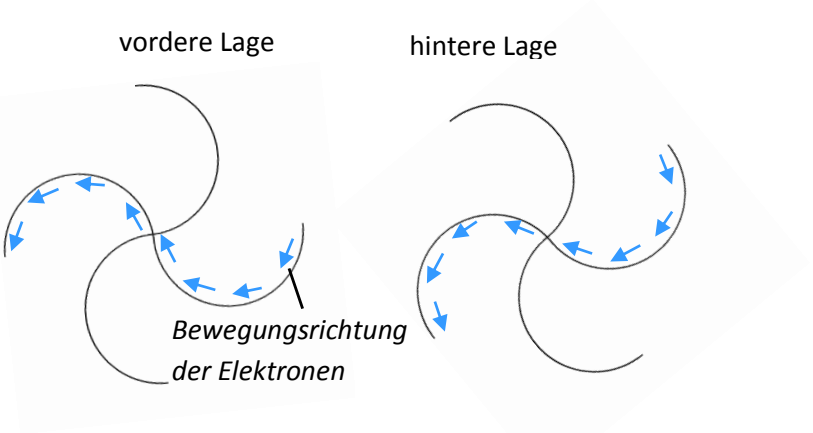


Abb. 4.2 Elektronenbewegung in zwei hintereinanderliegenden verdrehten Rosetten (Vorderansicht)

$$n_{\pm} = \sqrt{\mu \cdot \varepsilon} \pm \kappa$$

Hierbei ist zudem zu beachten, dass bei großer Chiralität, also großem κ, ein negativer Brechungsindex ohne das zeitgleiche Auftreten einer negativen magnetischen Permeabilität μ und negativer Permittivität ε möglich ist.

Die Doppelbrechung ist relevant für die optische Aktivität, da der Drehwinkel Φ (Winkel zwischen den E-Vektoren der ein- und ausfallenden Welle) durch den Phasenunterschied der beiden Wellenteile bestimmt wird [01]:

$$\phi = -\frac{1}{2}[\arg(E_+) - arg(E_-)]$$

Wobei die jeweilige Phase *arg(E)* wiederum vom Brechungsindex abhängt:

$$\arg(E_\pm) = \frac{2\pi l}{\lambda_0} \cdot Re(n_\pm)$$

mit *l* = Dicke des Materials und λ_0 = Wellenlänge im Vakuum. Daraus ergibt sich für die Rotation der Polarisationsebene:

$$\phi = -\frac{1}{2}\frac{2\pi l}{\lambda_0} \cdot Re(n_+ - n_-)$$

Da der links- und der rechtszirkular polarisierte Wellenanteil bei einer Frequenz unterschiedlich mit dem Metamaterial wechselwirken können, kann es anstatt der reinen Drehung der Schwingungsebene auch zur elliptischen Polarisation kommen. Die ungleiche Absorption der Wellenanteile (Zirkulardichroismus) resultiert in einem sich entlang der Ausbreitungsrichtung periodisch ändernden elektrischen Feldvektor. Die Elliptizität η wird durch die Transmissionsdifferenz festgelegt [08]:

$$\eta = \frac{1}{2} sin^{-1}\left(\frac{|T_{++}|^2 - |T_{--}|^2}{|T_{++}|^2 + |T_{--}|^2}\right)$$

4.2 Herstellung der verwendeten Strukturen

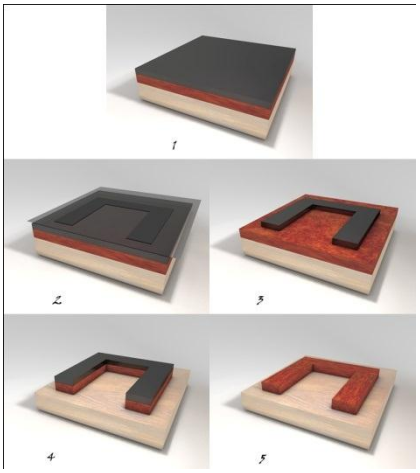


Abb. 4.4 Ätzvorgang: Eine photopositiv beschichtete Platine (1) wird mit einer Vorlage unter UV-Licht belichtet (2). Anschließend wird die belichtete Schutzschicht mit NaOH entfernt (3). Im Ätzbad kann das ungeschützte Kupfer mit $Na_2S_2O_8$ abgeätzt (4) und die restliche Schutzschicht daraufhin entfernt werden (5).

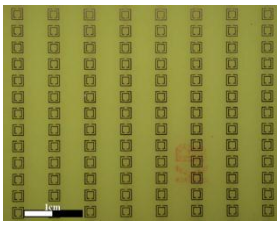


Abb. 4.3 Geätzte Platine mit Split-Ring-Resonatoren aus unserer Arbeit von 2007

Die Herstellung eines Metamaterials mit schulischen Mitteln stellt eine große Herausforderung dar, da die Theorie recht kompliziert ist. Bereits im Jahr 2007 haben wir in einer „Jugend-forscht"-Arbeit die Herstellung von Ätz-masken und Platinen, sowie den anschließende Bau beschrieben. Dies stellte damals den größten Zeitaufwand dar, da das Ätzen so feiner Strukturen (160µm breit) sehr schwierig ist. Aus unseren damaligen Versuchen haben wir gelernt und den Herstellungsvorgang optimiert. Vor zwei Jahren verlief der Fertigungsprozess wie folgt: Auf eine photopositiv beschichtete Platine wurde eine gedruckte Ätzvorlage gelegt. Diese hatten wir mit Hilfe eines Tintenstrahldruckers erstellt, da ein Laserdrucker zwar präziseres Drucken ermöglicht, der Toner jedoch eine geringe Opazität aufweist. So kann bei dem anschließenden Belichtungsvorgang das UV-Licht die schwarze

Tonerschicht durchdringen - dies ist nicht erwünscht. Anschließend wurde jede einzelne Platine belichtet, in einer NaOH-Lösung entwickelt und schließlich geätzt. Diese Schritte konnten wir damals nicht besonders fachmännisch durchführen, da das nötige Wissen und die notwendigen Apparaturen nicht vorhanden waren.

Da die Herstellung so zeitaufwändig ist, entschieden wir uns dieses Mal für eine professionellere Herangehensweise. Zunächst ersetzten wir unsere selbstgebauten Belichtungs-, Entwicklungs- und Ätzvorrichtungen und besorgten uns einen Amateur-Belichtungsrahmen und eine Ätzstation. Diese haben den Vorteil, dass man wesentlich präziser und sauberer Arbeiten kann. Vor allem kann man so viel effizienter arbeiten und zehn Platinen in nur 15 Stunden herstellen. Das hört sich zunächst wenig effektiv an, mit unseren alten Vorrichtungen hätten wir jedoch mehrere Tage benötigt.

Des Weiteren haben wir die Qualität unserer Ätzvorlagen verbessert, indem wir sie mit einem Laserdrucker - also Toner - bedrucken. Dadurch entstehen jedoch, wie bereits weiter oben erwähnt, auf den bedruckten Flächen kleine Poren, die bei der Belichtung das Licht streuen. Diese „Löcher“ im Toner haben wir dann mit Tonerverdichter geschlossen. Dieser sorgt dafür, dass die schwarze Farbe absolut blickdicht ist.

Für unsere Messungen zur intrinsischen Chiralität benötigten wir zwangsweise Strukturen, die in drei Dimensionen chiral sind. Dies erreichten wir durch mehrere Lagen zueinander verdrehter Kreuzstrukturen. Während sich die Zentren der Kreuze auf einer Geraden befinden, ist das jeweilige nachfolgende Kreuz um einen spezifischen Winkel verdreht. Diese Verdrehung erfolgte stets gegen den Uhrzeigersinn. Doch leider erzielten unsere Kreuzstrukturen keine Effekte, was wir auf eine falsche Größenabschätzung zurückführten. Nach reiflicher Überlegung und ausführlicher Literaturrecherche haben wir uns für „verdrillte“ Kreuze, sogenannte Rosetten, entschieden. Diese haben den Vorteil, größere „Kreuze“ auf kleinerer Fläche unterbringen zu können. So können die Strukturen deutlich miniaturisiert werden kann.

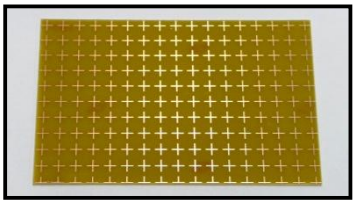


Abb. 4.5 Platine mit Kupferkreuzen

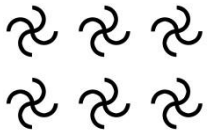
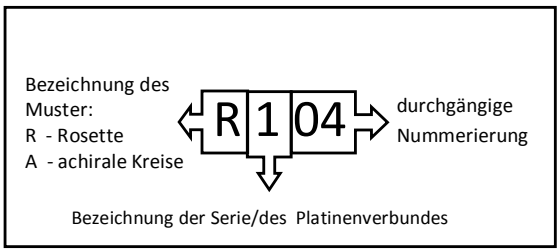


Abb. 4.6 verdrillte Kreuze / Rosetten

Bei dem Verdrehungswinkel von sowohl 0° als auch bei 45° würde aufgrund fehlender Chiralität keine Effekte auftreten. Somit wählten wir ein Drittel (15°) und die Hälfte dieses Intervalls (22,5°). Wir gingen intuitiv davon aus, dass genau im Mittel bei 22,5° der stärkste Effekt zu beobachten ist.

Um aus allen möglichen Parametern (Rosettengröße, Verdrehungswinkel, Platinenanzahl) das Optimum zu ermitteln, entwickelten wir aus ihnen mehrere Kombinationen (*vgl. Tabelle 4.1*). Um bei der Vielzahl an einzelnen Platinen nicht den Überblick zu verlieren, entschieden wir uns für systematische Bezeichnungen. Diese seien an einem Beispiel erklärt:



Serie	Rosettengröße (Radius eines kleines Armes)	Einheits-zellengröße	Verdrehung der Rosetten zueinander	Anzahl der Platinen
R10X	1,84 mm	9,21 mm	15°	4
R20X	1,61 mm	8,33 mm	15°	4
R30X	1,84 mm	9,21 mm	22,5°	2

Tabelle 4.1 Übersicht über die Platinen

So entstanden die Gruppen R101-R104, R101-120, R101-102, R201-R204 und R301-R302. Eine Besonderheit bildet die Platine R120. Auf der Vorderseite befindet sich das Muster R101 und auf der Rückseite befindet sich das Muster R102.

Abb. 4.7 Vier Platinen **R101-R104** mit großem Rosettenmuster jeweils um 15° verdreht

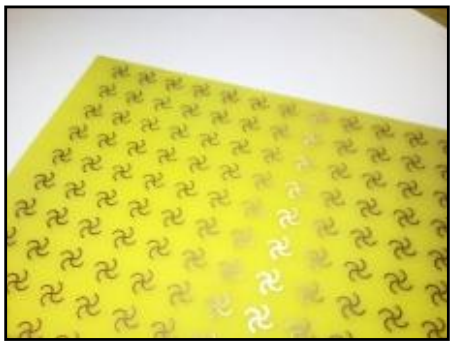


Abb 4.8 Doppelseitige Platine R120 mit Rosettenmustern

4.3 Versuchsaufbau und Messungen

Um die Messungen durchführen zu können, benötigen wir eine Apparatur, die es ermöglicht den Empfänger im Zentrum des Strahlengangs um 360° drehen zu können, da es so möglich ist, die Drehung der Polarisationsebene zu messen. Also wird der Mikrowellensender und –empfänger auf einer optische Bank montiert. Der Empfänger wird dabei drehbar an einer Leiste aus Plexiglas befestigt und die Platine zwischen Sender und Empfänger platziert.

Bei dieser Apparatur treten jedoch am Sender und Empfänger Hebelkräfte auf, wodurch sich diese deplatzieren und die Messwerte nicht reproduzierbar sind.

Es ist also sinnvoller Sender und Empfänger *übereinander* auszurichten und so mit einer stabilen Apparatur zu arbeiten.

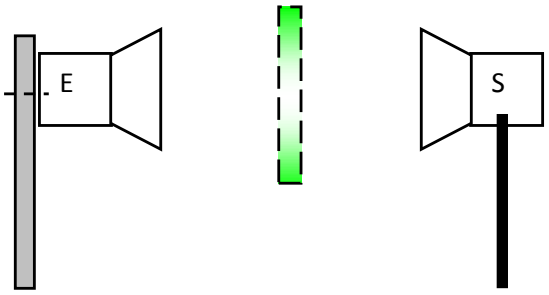


Abb. 4.9 Versuchsaufbau unseres Prototyps

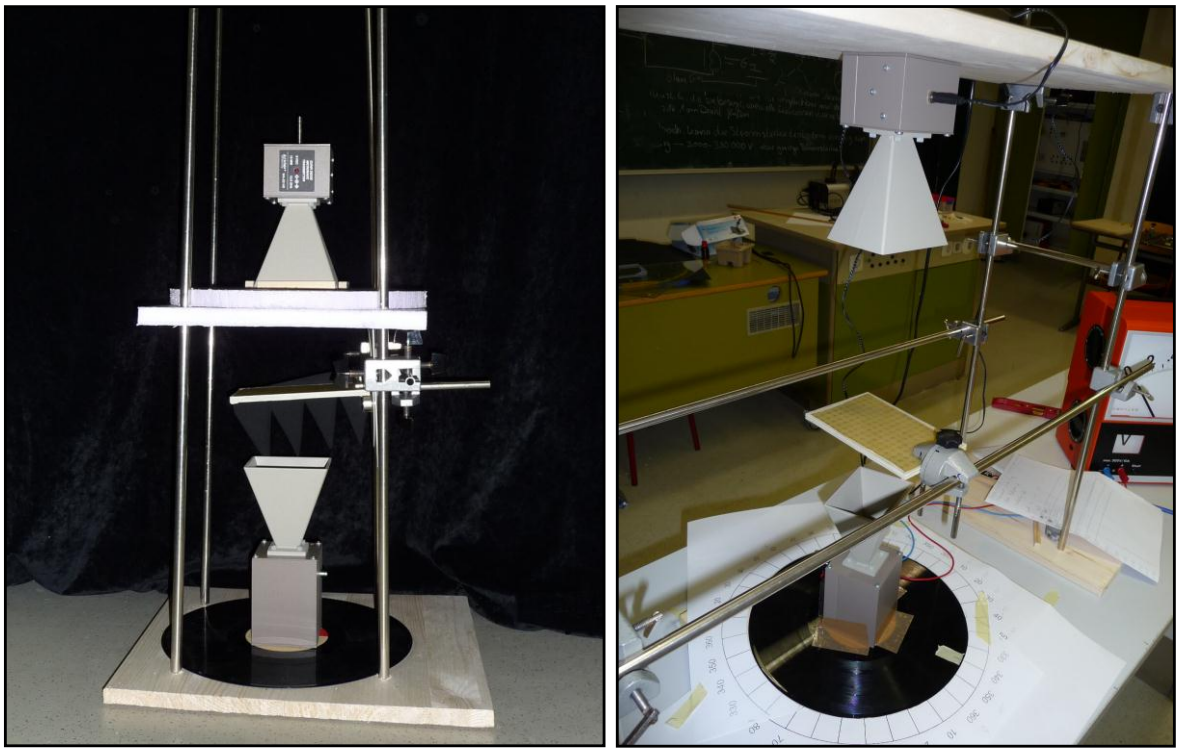


Abb. 4.10 Der zweite und der finale Versuchaufbau (rechts). Der Empfänger ist jeweils unten positioniert

Also bauten wir zwei weitere Apparaturen, die unseren Messanforderungen genügen. Dabei ist der zweite Aufbau komfortabler bezüglich der Erfassung der Messwerte, denn bei weit über 1000 Messwerten die es zu notieren gilt, stellt dies ein wichtiges Kriterium dar.

Damit man den Drehwinkel des Empfänger exakt bestimmen kann, haben wir diesen drehbar auf einer Schallplatte gelagert. Mit einer 360°-Skala, die wir um die Vinylscheibe herum anbrachten, lässt sich der Winkel optimal ablesen.

Nun wurde es spannend! Doch was erwarten wir eigentlich? Einige der Materialien sollen die Polarisationsebene drehen, d.h. wenn die Mikrowellen senkrecht polarisiert auf das Metamaterial treffen, wird die Polarisation um einen bestimmten Winkel gedreht, welchen wir dann mit dem Empfänger bestimmen können, indem wir die Orte der Transmissionsmaxima vergleichen.

4.4 Messergebnisse

4.4.1 Methodik

Zu allererst stellte sich die Frage, wie sich die Drehung der Polarisationsebene am besten und genauestens messen lässt. Aus dem Grunde entschieden wir uns, nicht nur die Ausrichtung der maximalen Transmission zu untersuchen und den hierzu gehörigen Winkel möglichst genau zu bestimmen, sondern möglichst viele Messpunkte zu nutzen. Denn „genau“ in schulischen Maßstäben ist sehr relativ. Folglich haben wir in 5°-Schritten eine vollständige Drehung des Empfängers um 360° durchgeführt und somit pro Messung 72 anstatt lediglich einen einzelnen Messwert erhalten. Somit konnten Ungenauigkeiten minimiert werden. Wurde der Empfänger einmal um 180° gedreht, so war aus seiner Sicht wieder die Ausgangslage erreicht, Sende- und Empfangsantennen wieder parallel ausgerichtet. Somit konnte man die 72 Messwerte auf ein 180° breiten Bereich um die Ausgangslage herum zusammenfassen und statistische Schwankungen verringert werden (vgl. Auswertung). Um schließlich alle Messwerte an der Bestimmung der maximalen Transmission zu beteiligen,

entschieden wir uns, Fits – also Ausgleichskurven – für unsere einzelnen Messreihen zu entwickeln. Offensichtlich kann die Empfangsleistung als trigonometrische Funktion in Abhängigkeit von dem Winkel zur Ausgleichslage betrachtet werden. Da unsere Messungen bei paralleler Antennenausrichtung und somit maximalem Empfang begannen, bot sich eine Cosinus-Funktion an. Allgemein wählten wir als Ansatz

$$f(\phi) = A * \cos\big(B(C - \phi)\big) + D.$$

Wobei A, B, C und D frei wählbare Parameter darstellen und $\phi \in [0°, 360°]$ den Winkel gemessen zur Ausgangslage beschreibt. In Abhängigkeit von den tatsächlichen Messwerten bestimmten wir deshalb die Parameter über die χ^2-Methode, oder auch Methode der kleinsten Quadrate genannt, mittels der *MS Excel* eigenen *Solver*-Funktion. Somit konnten Fits bestimmt werden, die die geringsten Abweichungen zur gesamten Messreihe aufweisen und somit den wahren Verläufen sehr nahe kommen.

4.4.2 Auswertung

Legt man sein Augenmerk zunächst auf die Messungen, bei denen die Kupferstrukturen zum Sender hin zeigten (*Abb. 4.11*), so zeigt der Fit zur Messung ohne Platine (rot) eine vollkommene Übereinstimmung mit den Erwartungen: Sein Maximum liegt bei 0° und zu beiden Seiten hin fällt die Kurve gleichmäßig ab. Somit zeigt sich, dass die Fits sehr gut die Realität widerspiegeln. Doch, was zeigt das Diagramm überhaupt? Auf der Abszisse aufgetragen ist der relative Winkel gemessen zur ursprünglichen Polarisationsebene. Das Vorzeichen dieses Winkels ist konventionell positiv, wenn sich die Schwingungsebene für einen Beobachter, der dem Lichtstrahl entgegenblickt, im Uhrzeigersinn dreht. Das Material wird dann als rechtsdrehend bezeichnet. Entsprechend ist das Vorzeichen bei einer Linksdrehung – also gegen den Uhrzeigersinn – negativ. Die Hochwertachse zeigt entsprechend die relative Transmission, normiert auf den Maximalwert der jeweiligen Messkurve.

Die Transmissonskurven der einzelnen Proben sind offensichtlich verschoben. Der Fit zur vier Platinen starken Probe R101-R104 (Ocker) zeigt eine Verschiebung des Maximums um -7° auf. Als halb so dicke Struktur R101-R102 ist die Verschiebung auf -9° angewachsen. Die etwas größer dimensionierten Strukturen der gleich dicken Probe R201-R204 (hell blau) zeigen hingegen eine etwas geringere Verschiebung um -5°. Dem entgegen zeigt die doppelseitige Platine R101-R120 (grün) als einzige Probe eine Verschiebung um +3°. Als letzte Probe schiebt die zweilagige Platine R301-R302 die maximale Transmission um -15°.

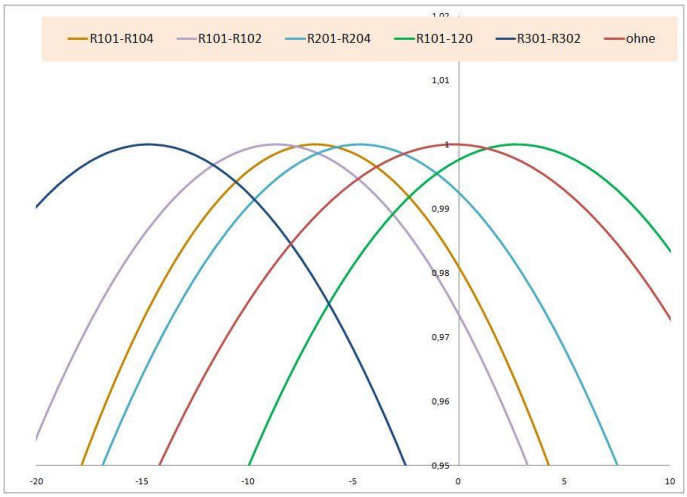


Abb. 4.11 Fit der intrinsischen Messwerte

4.5 Deutungen

Die Intensität des Empfanges ist bekanntermaßen dann am höchsten, wenn die Empfangsantenne parallel zur Sendeantenne ausgerichtet ist, da dann die Polarisationsrichtung entlang der Antennenachse verläuft. Hieraus lässt sich sofort schlussfolgern, dass bei den Messungen, bei denen die Maxima verschoben wurden, die Polarisationsebene gedreht wurde – und zwar um den Winkel, um den das Maximum verschoben ist.

Um die unterschiedlichen Drehvermögen verstehen zu können, muss man sich die Unterschiede in der Konstruktion der einzelnen Proben vor Augen führen. Dies ist am übersichtlichsten in folgeneder Tabelle möglich:

Platine	Rosettengröße (Einheitszelle)	Drehwinkel der Rosetten zueinander	Anzahl der Platinen	Drehung der Polarisations-ebene
R101-120	9,52 mm	15°	2 (doppelseitig)	+3°
R201-R204	8,33 mm	15°	4	-5°
R101-R104	9,52 mm	15°	4	-7°
R301-R302	9,52 mm	22,5°	2	-15°
R101-R102	9,52 mm	15°	2	-9°

Tabelle 4.2 Übersicht über die Messergebnisse der einzelnen Platinengruppen

Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass sowohl Rosettengröße, Drehwinkel als auch die Anzahl der Lagen Einfluss auf die optische Aktivität des Metamaterials hat. Verändert man die Rosettengröße auch nur um einen Bruchteil, so bricht die optische Aktivität deutlich ein (vgl. R101-R104 mit R201-R204). Die Verringerung der Lagenanzahl um die Hälfte veränderte das Rotationsvermögen auf -9°. Den deutlichsten Effekt konnten wir allerdings mit der Variation des Drehwinkels zwischen den einzelnen Rosetten erzielen. Dabei wurde unsere bei der Konstruktion genannte Annahme mehr als deutlich bestätigt. Wir gingen bekanntlich in Kapitel 4.2 davon aus, dass genau zwischen den beiden optisch inaktiven Winkelstellungen der beste Drehwinkel liegt und somit folglich bei 22,5° die stärkste Rotation der Polarisationsebene beobachtet werden kann. Wir denken, da geben unsere Experimente uns Recht.

Ein ganz besonderes Verhalten zeigte sich bei der Reduzierung der Strukturlagen auf lediglich zwei Strukturen auf nur eine Platine: Die Drehung erfolgt plötzlich in die entgegengesetzte Richtung. Dies hat uns äußerst verwundert, ist es doch im Grunde die gleiche Gruppe wie R101-R102 nur mit verminderter Dielektrikumsschicht. Diesem äußerst spannenden Phänomen müssen wir noch weiter auf den Grund gehen und hierzu ein Modell erarbeiten. Wir gehen bisher davon aus, dass dieser Effekt durch das Fehlen der zweiten Dielektrikumsschicht begründet ist. Doch dies werden wir noch näher untersuchen.

Auf den ersten Blick scheint das Drehvermögen des Metamaterials recht gering, wenn man bedenkt, dass Quarz rotes Licht um 18° pro mm Schichtdicke drehen soll und violettes sogar um 44°/mm [12]. Doch handelt es sich hierbei um total verschiedene Frequenzen, namentlich sichtbares Licht und Mikrowellen, die um die Größenordnung 10^5 verschieden sind. Um hier einen sinnvollen Vergleich ziehen zu können, muss das Drehvermögen in Bezug auf die Wellenlänge angegeben werden. Da lediglich ein Farbbereich angegeben ist und nicht näher spezifiziert ist, welche Wellenlänge exakt

gemeint ist, setzen wir als Wellenlänge für rot $\lambda_{rot} = 700nm$ und für violett $\lambda_{violett} = 400nm$. So erhält man ein Drehvermögen einer Quarzschicht, die eine Wellenlänge dick ist, von 0,0126° (rot) bzw. 0,0176° (violett). Im Rahmen der Ungenauigkeiten durch den unklaren Bereich kann vereinfachend und optimistisch angenommen werden, dass Quarz eine optische Aktivität von 0,02°/λ besitzt.

Unser Metamaterial dagegen ist aus je 1,6 mm dicken Platinen aufgebaut, während die Wellenlänge der Mikrowellenanlage bei 2,855 cm liegt. Somit zeigen unsere chirale Metamaterialien folgende relative optische Aktivitäten:

R101-R120	**+53,5°/λ**
R201-R204	**-22,3°/λ**
R101-R104	**-31,2°/λ**
R301-R302	**-133,8°/λ**

Das ist beispielsweise bei R301-R302 das 6691fache des Drehvermögens von Quarz!

Ein künstliches Metamaterial weißt somit eine sehr viel stärkere optische Aktivität auf, als natürliche Materialien.

Zusätzlich hat es den Vorteil, dadurch, dass es künstlich ist, dass alle Parameter wie beispielsweise Schichtdicke, Rosettengröße, Verdrehung der einzelnen Rosetten zueinander etc. beim Fertigungsprozess frei bestimmt werden können und somit im Grunde jede beliebige Drehung bei beliebiger Frequenz realisiert werden.

5 Extrinsische Chiralität

5.1 Theoretische Vorbetrachtung

Eine intensive Beschäftigung mit der Theorie und die positiven Ergebnisse unserer Messungen (*Kap. 4.4 – 4.5*) ermutigten uns der Frage nachzugehen: Können nicht-chirale Metamaterialien optisch aktiv sein?

Nach intensiver Literaturrecherche entschieden wir uns für die folgende nicht-chirale Kreisform: Das an sich nicht chirale Metamaterial weist eine Symmetrieachse auf, ohne jedoch rotationssymmetrisch zu sein (vgl. *Abb. 5.1*). Zusammen mit einer schräg einfallenden Mikrowelle wird der Gesamtaufbau aber chiral (vgl. *Abb. 5.2*). **Das heißt, extrinsische Chiralität entsteht durch die geeignete Anordnung eines achiralen Metamaterials und der einfallenden Mikrowelle.**

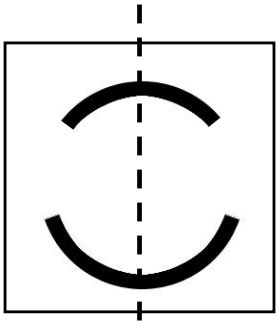


Abb.5.1 Symmetrieachse / Drehachse

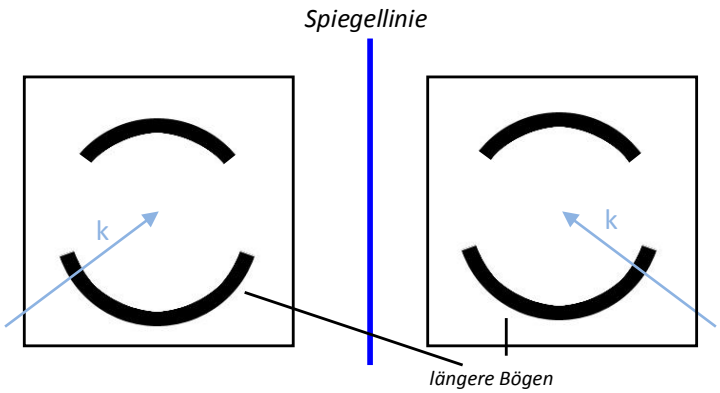


Abb.5.2 chiraler Aufbau

Bestrahlt man einen einzelnen Ring mit einer Mikrowelle, welche parallel zum Spalt des Ringes polarisiert ist, erhält man die maximalen Elektronenschwingungen. Wegen des Längenunterschiedes besitzen die beiden Metallbögen unterschiedliche Resonanzfrequenzen. Entspricht nun die Frequenz der einfallenden Welle der Resonanzfrequenz eines Bogens, werden in diesem Bogen die Elektronen zu Schwingungen angeregt. Entsteht so ein Elektronenüberschuss an einem Ende des Bogens, geraten aufgrund der Ladungsverteilung auch die Elektronen des anderen Bogens in Bewegung (vgl. *Abb. 5.3*), sodass eine Stromschleife und somit ein magnetischer Dipol (m) entsteht.

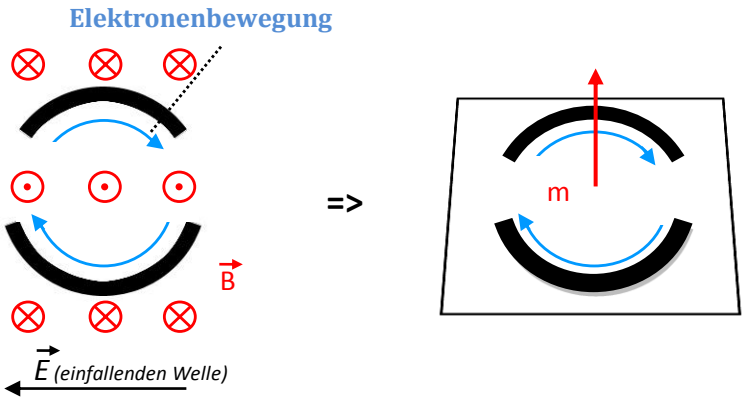


Abb. 5.3 Elektrische und magnetische Resonanz in der Struktur

Ist der Bestrahlungswinkel α = 0, d.h. fällt die Mikrowelle senkrecht auf die Ringebene ein, oszilliert der magnetische Dipol entlang der Ausbreitungsrichtung der einfallenden Welle, sodass keine Beeinflussung der Schwingungsebene erfolgt. Bei verändertem α entstehen durch den magnetischen Dipol zur Primärwelle phasenverschobene Wellenkomponenten, welche senkrecht zur magnetischen Schwingung der Primärwelle polarisiert sind. Durch den Einfallswinkel α lässt sich beeinflussen, wie die Drehung der Schwingungsebene erfolgen soll.

5.2 Messungen

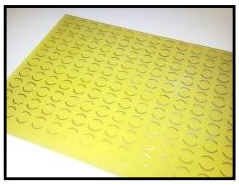


Abb. 5.5 Einseitige Platine mit dem achiralen Muster

Für diese Messreihen brauchten wir ein Platine mit dem achiralen Muster. Nachdem diese geätzt war, begannen wir unsere Messungen mit vier verschiedenen Einstellungen. Als Winkel zwischen der Flächennormalen und dem einfallenden Strahl wählten wir 20° und 30° und ihre negativen Pedanten. Da wir mit unserer Fit-Methode eine genaue Darstellung gefunden hatten, konnten wir angesichts der sehr zeitintensiven Messungen in 5°-Schritten diese auf 15° reduzieren und somit vier verschiedene Einstellungen überprüfen.

Die Fits zu diesen Messungen ergaben die in *Abb. 5.6* gezeigten Verläufe. Es zeigte sich, wie von der Theorie vorhergesagt, dass entgegengesetzte Einfallswinkel die Polarisationsebene in unterschiedliche Richtungen drehen. So zeigt sich beispielsweise bei $\alpha = +20°$ eine Drehung um -2° und für den Gegenwinkel $\alpha = -20°$ eine Drehung von +3°. Noch verstärken ließ sich dies durch die Erhöhung auf $\alpha = \pm 30°$, was analog zu Drehungen um -3° bzw. +5° führte.

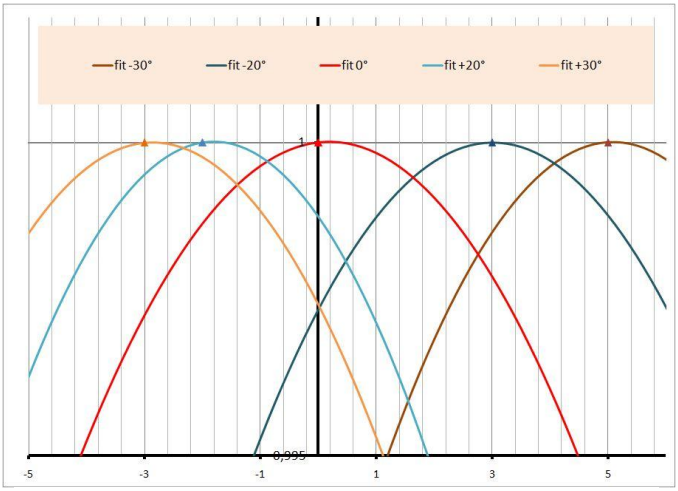


Abb. 5.6 Fit der extrinsischen Messwerte

5.3 Deutung

Unsere Messungen bestätigen es: Optische Aktivität ist nicht gleichbedeutend mit chiralen Molekülen oder Strukturen. Diese Jahrzehnte lang durch viele Messungen bestätigte Meinung muss erweitert werden.

Dies ist von besonderer wirtschaftlicher Bedeutung, denn eine einzige Konstruktion kann beliebige Drehungen der Polarisationsebene erzeugen. Somit wird nicht für jede neue Einstellung ein neues Platinensystem benötigt. Dies spart Zeit, Geld, Material und reduziert den Kalibrationsaufwand enorm.

6 Ausblick

Unsere Versuchsergebnisse mit intrinsischer und extrinsischer Chiralität bei Metamaterialien erfüllen unsere Erwartungen zu vollster Zufriedenheit.

Bei unseren Versuchsreihen deuteten sich noch weitere interessante Effekte an, deren Untersuchung uns lohnenswert erscheint. Zu nennen sind hier das Zusammenspiel von Nah- und Fernfeld sowie der Einfluss des Dielektrikums. Vor kurzem ermöglichte uns das HF-Institut der RWTH Aachen unter Prof. Dr.-Ing. Heberling den Zugang zu einem linearen Netzwerkanalysator, sodass wir unsere Proben in einem Frequenzband von 8 – 12 GHz untersuchen konnten. Diese Auswertungen haben jedoch gerade erst begonnen, doch lässt sich schon jetzt sagen, dass unsere Materialien ein ausgeprägtes frequenzselektives Verhalten zeigen.

7 Dank

Wir möchten allen Personen danken, die uns bei unserem Projekt so tatkräftig unterstützt haben, sei es finanziell, ideologisch oder materiell. Dies sind im Einzelnen:

Dem ehemaligen Miniforscher des St. Michael-Gymnasiums Herrn Dr. Eric Plum vom EPSRC Centre for Nanostructured Photonic Metamaterials an der University of Southampton für viele Anregungen und dafür, dass er sich stets die Zeit genommen hat unsere zahlreichen Fragen zu beantwortet.

Herrn Walter Stein, unser unermüdlicher Betreuungslehrer, der viele Stunden seiner Freizeit und auch seiner Nächte für uns geopfert hat und uns stets motiviert hat. Ebenso danken wir seiner Frau, dass sie dies wunderbar unterstützt hat.

Dem Institut für Hochfrequenztechnik der RWTH Aachen unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Heberling für die Möglichkeit, die Messungen mit dem linearen Netzwerkanalysator durchzuführen. Insbesondere den Herren M.Sc. Alireza Ajami und Dipl.-Ing. Jörg Pamp für die hervorragende Betreuung hierbei.

8 Anhang

8.1 Aachener Messungen

Unerwartete Messergebnisse wie bei der doppelseitigen Platine R101-R120 und die systematischen Ungenauigkeiten in unseren Messapparaturen veranlassten uns, uns nach einer professionellen Einrichtung umzusehen. Wir fanden Unterstützung bei dem Institut für Hochfrequenztechnik der RWTH Aachen. Hier hatten wir die Gelegenheit, unsere Platinen selbst mit einem linearen Netzwerkanalysator zu untersuchen. Unsere Untersuchungen dort ergaben, dass unsere Platinen ein stark frequenzselektives Verhalten an den Tag legen (vgl. *Abb. 8.1*).

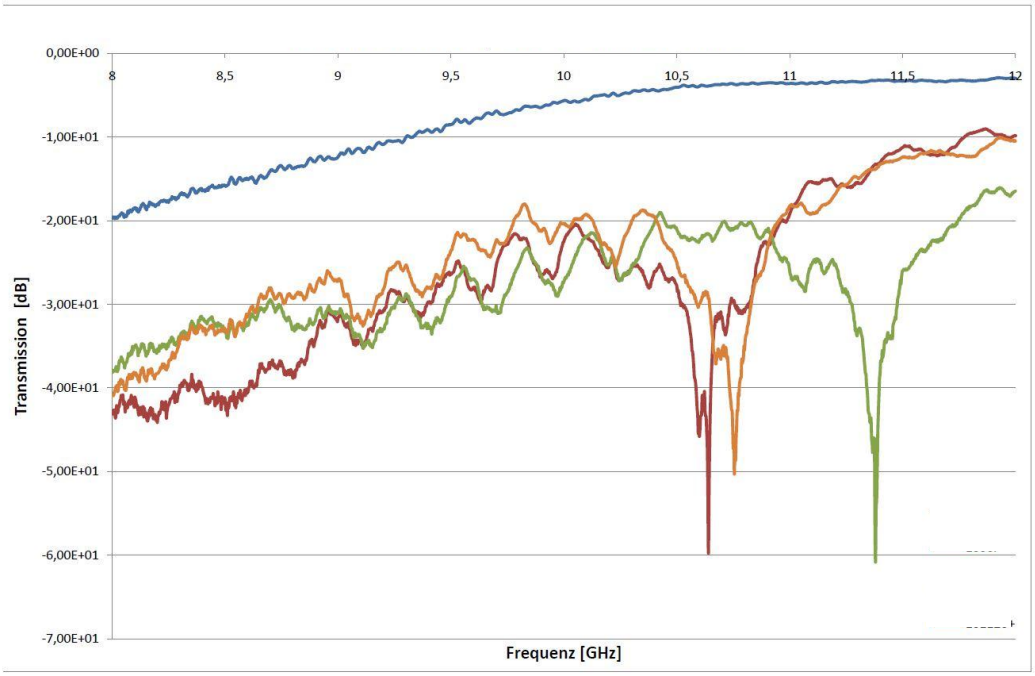


Abb. 8.1 Transmissionssweep unseres Metamaterials (Legende: ohne Platine (blau), R101-104 (rot), R201-204 (grün) und R101-R120 mit einer Blanko-Platine auf der Rückseite (orange))

Das heißt, dass (im Idealfall) eine Frequenz bevorzugt transmittiert wird und alle anderen geblockt werden. In der Realität ist dies offenkundig nicht so scharf möglich, folglich wird eine Frequenz und ihre Umgebung bevorzugt transmittiert und abweichende Frequenzen zunehmend geschwächt. Vergleicht man diese Resonanzfrequenzen mit den Untersuchungen zur optischen Aktivität, so zeigt sich, dass die optische Aktivität um die Resonanzfrequenz herum auftritt (vgl. *Abb. 8.2*).

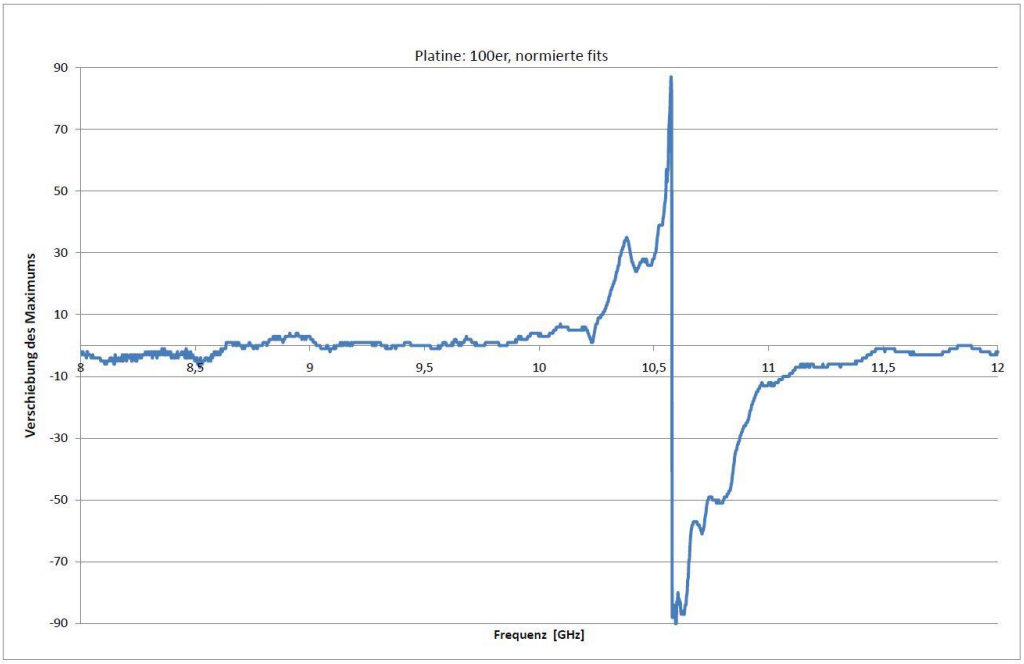


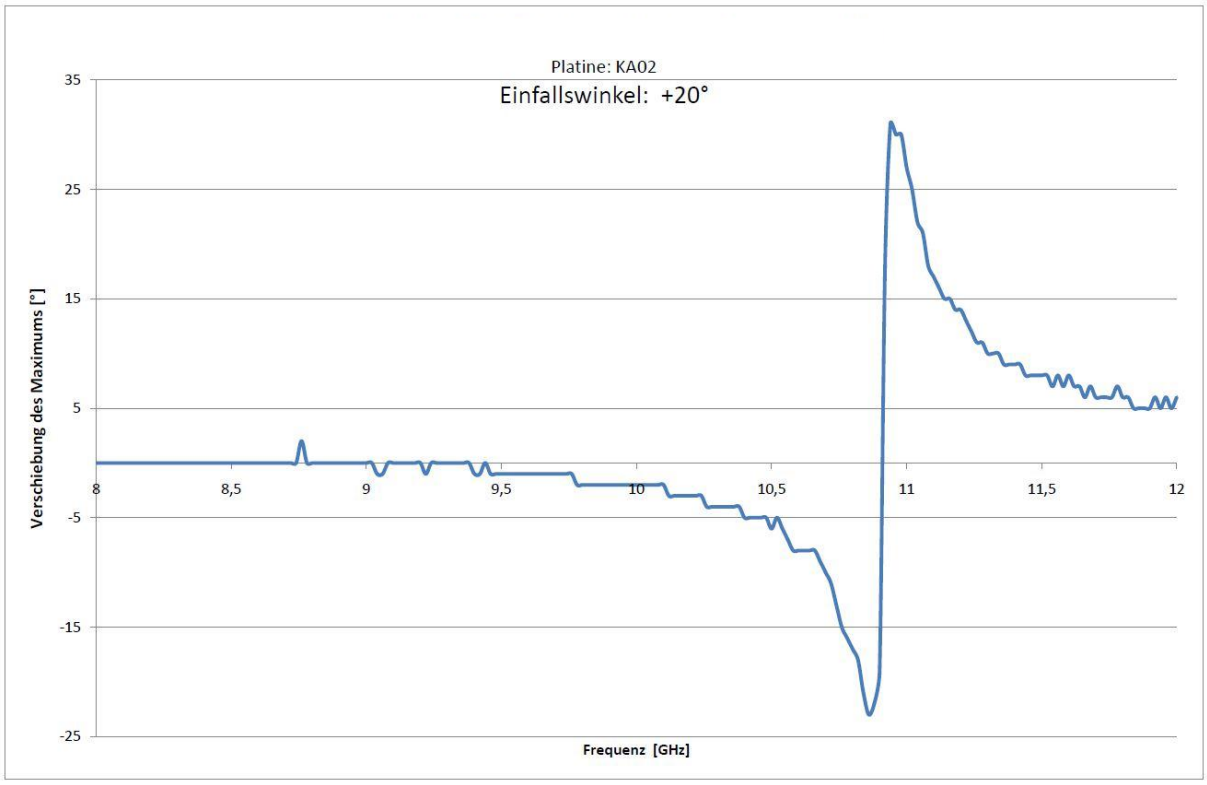
Abb. 8.2 optische Aktivität unseres intrinsisch chiralem Metamaterials (Platinen R101-104)

Es zeigt sich, dass bei einer Frequenz ein "Umschalten" der Drehrichtung zu beobachten ist. Dies ist dadurch verständlich, dass eine Drehung um 95° bspw. einer Drehung um -5° entspricht, diese sind nicht zu unterscheiden. Doch stellten wir in manchen Messungen fest, dass dieser Switch bereits bei Drehungen weit unter 90° stattfand. Dies gilt es weiter zu untersuchen. Doch konnten wir so das bisher unerklärbare Verhalten der doppelseitigen Platine erklären: Hier war durch die geringere Dielektrikumsmenge die Switch-Frequenz gegenüber R101-R102 verschoben, sodass wir auf dem anderen Zweig gelandet sind.

Wieso begründen wir dies mit der Schichtdicke des Dielektrikums? Das Dielektrikum ändert die Wellenlänge der einfallenden Welle zu größeren Werten, folglich werden sich innerhalb des Dielektrikums befindliche Strukturen relativ verkleinern. Auch, wenn die Platinen physikalisch getrennt sind, liegen sie doch direkt aufeinander auf und wirken für eine mehr als 2-cm-Wellelänge als Einheit. Folglich verschiebt dieses die Resonanzfrequenz und somit auch die Frequenz, bei der die optische Aktivität umspringt. Hierzu konnten wir allerdings mangels Zeit leider keine ausreichenden Versuche mehr durchführen.

Ebenso wie die intrinsischen Platinen konnten wir an einem zweiten Messtag unsere extrinsische Anordnung untersuchen. Da all diese Messungen sehr zeitaufwändig waren, war es uns nur möglich, hier zwei Einstellungen zu untersuchen: Einen Winkel zwischen der Flächennormalen und dem Wellenvektor von +20° bzw. -20°. Wie man aus den Messungen (vgl. *Abb. 8.3*) sehr deutlich sieht, hat das Vorzeichen dieses Winkels starken Einfluss auf die Drehrichtung, beide spiegelbildlichen

Aufbauten drehen spiegelbildlich. Unsere Messungen ergaben jedoch anders als erwartet nicht dieselben Größenordnungen vor dem Switch, was wir auf Fehler im Messaufbau und Asymmetrien in der Platine zurück führen. Auch hier gilt es weiter zu analysieren, was uns leider zeitlich nicht mehr möglich war.



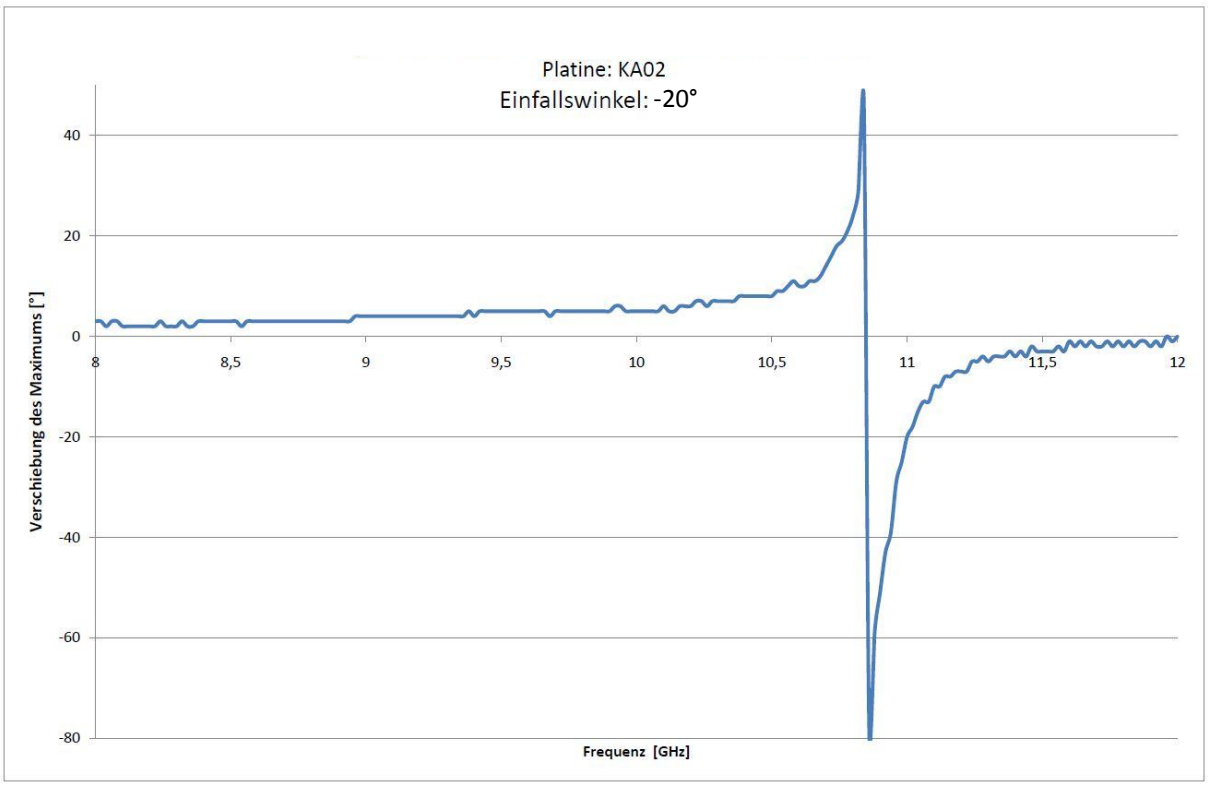


Abb. 8.3 und 8.4 optische Aktivität unseres extrinsisch chiralem Metamaterials bei Einfallswinkeln von +20° (oben) und -20° (unten) (Platine: KA02)

8.2 Mathematische Beschreibung der optischen Aktivität unserer Metamaterialien

Wir wollen eine einfache mathematische Formulierung entwickeln, die unsere Messwerte möglichst gut beschreibt. Betrachtet wir die jüngsten Messungen mit zirkularpolarisierten bzw. linearpolarisierten Wellen, treten zunächst zwei unabhängige Effekte auf. Je weiter die optische Aktivität unseres Materials steigt, desto geringer fällt die Transmission aus.

So stellt sich die Frage, ob es einen direkten Zusammenhang zwischen Transmission und Polarisationsrotation gibt.

Analysieren wir dazu einen Ausschnitt der Messung der Transmission. Wenn wir eine Funktion an die Messung annähern erhalten wir eine $-1/x^{2n}$ Abhängigkeit für $n \in \mathbb{N}^+$, also gerade Exponenten. Um subtile Konstruktionen zu vermeiden, benutzen wir hier eine einfache $-1/x^2$ Abhängikeit (siehe *Abb. 8.5*).

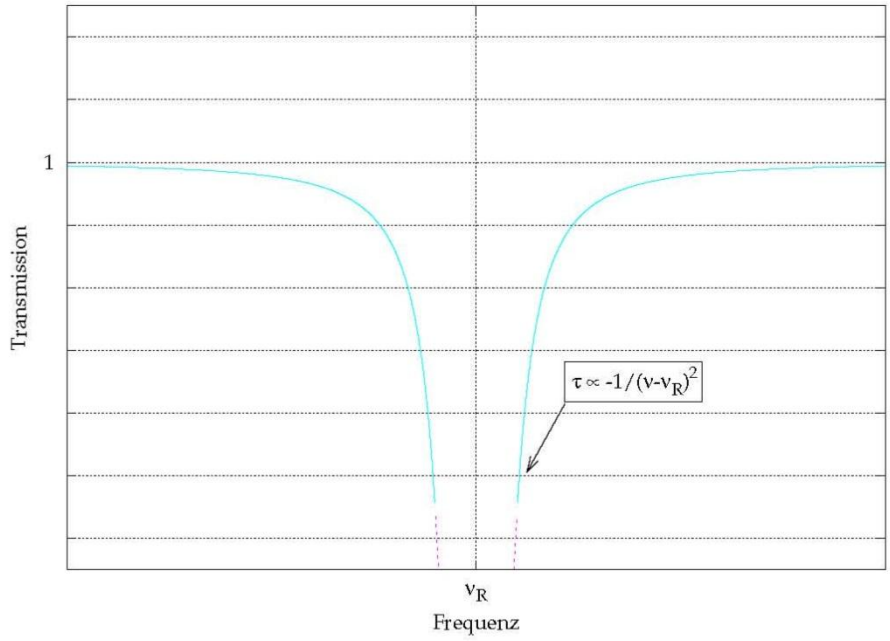


Abbildung 8.5: *Abhängigkeit von Frequenz und Transmission für zirkularpolarisierte Wellen*

Die reale Transmission hat natürlich ein Minimum und keinen Pol. Dieses Minimum entsteht gerade durch den kleinsten gemessenen Wert, da im Bereich der resonanten Frequenz ν_R nur begrenzt Messwerte vorliegen. Diesen Gedanken führen wir weiter unten fort.

Durch Integration ist es jetzt möglich, auf die Polarisationsrotation zu schließen:

$$-\int \frac{1}{(\nu-\nu_R)^{2n}} d\nu = -(2n+1)^{-1} \frac{1}{(\nu-\nu_R)^{2n-1}} \qquad (*)$$

Somit erhält man in *Abb. 8.6* (wieder einfachheithalber) eine Funktion proportional zu $\frac{1}{\nu-\nu_R}$.

Die Annäherung erfüllt die Messung um den Bereich maximaler optischer Aktivität zunächst sehr gut. Der Übergang zwischen ν_R^- und ν_R erscheint jedoch ungewöhnlich.

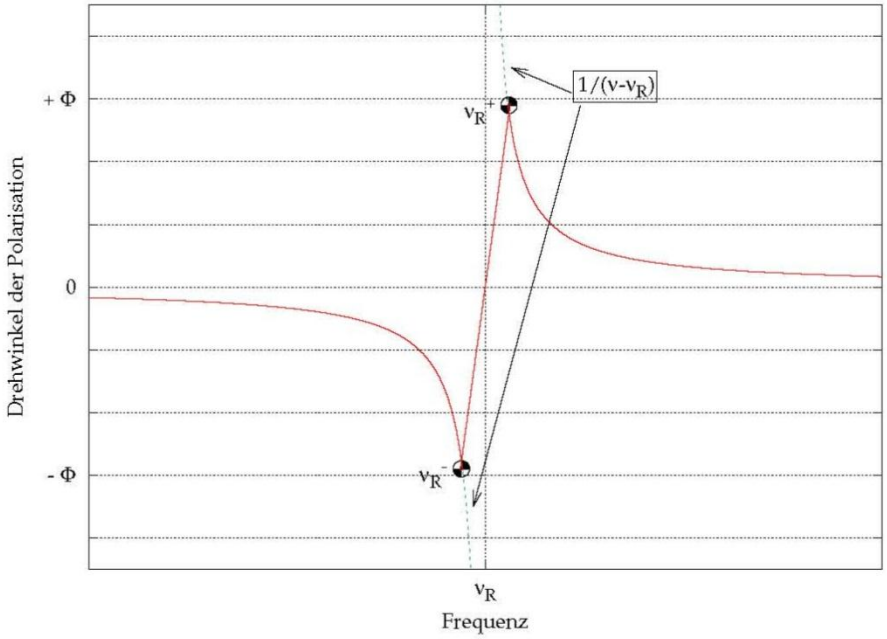


Abbildung 8.6: *Abhängigkeit von Frequenz und Polarisationsrotation*
Die durchgezogenen Linie entspricht unserer Messung, während die gestrichelte eine Annäherung durch (∗) darstellt.

Es stellt sich jedoch heraus, dass im Intervall $I_\nu = \left(\nu_R^-, \nu_R^+\right)$ kein weiterer Messpunkt liegt. Der Graph der Messung wird somit über den mathematischen Pol hinaus von ν_R^- zu ν_R gezeichnet, um eine geschlossene Kurve zu erhalten.

Der scheinbare Richtungswechsel der Drehung lässt sich durch folgende Theorie erklären: Bisher wurde angenommen, dass Metamaterial drehe die Schwingungsebene der einfallenden Welle bei einigen Frequenzen nach links, bei anderen Frequenzen nach rechts. Eine Ursache für dieses Verhalten war nicht bekannt. Dieses Phänomen wird allerdings verständlich, wenn der Drehwinkel der Schwingungsebene sich asymptotisch zum Pol hin verhält, d.h. in sehr kleinen Frequenzschritten enorm zunimmt bzw. wieder abnimmt. Dies bedeutet nämlich, dass niemals eine wirkliche Richtungsänderung der Drehung erfolgt, sondern sich der Drehwinkel nur in bisher noch nicht untersuchten kleinen Frequenzschritten weiter sehr stark vergrößert. Der Pol entspricht also nicht einer Drehung von $0°$ sondern von $180°$. Auch wenn dies in der Messung das gleiche Ergebnis ist, wäre somit einsichtlich, dass die bei weiterer Frequenzerhöhung messbare Drehung in die scheinbar andere Richtung lediglich eine Drehung von $\Phi > 180°$ ist.

Es ist also wissenswert, die Metamaterialien mit einer kleineren Schrittweite $d\nu$, vorallem im interessanten Bereich um ν_R, zu vermessen.

8.3 Ideen für praktische Anwendungen

Bisher kannte die Wissenschaft noch keine praktischen Anwendungen für diese neuartige Grundlagenforschung. Unsere Arbeit und unsere Messungen führten uns zu folgenden Anwendungsgebieten.

8.3.1 Antennen-Feinjustierung

Ähnlich wie bei der Frequenzbestimmung kann die starke Drehung des Polarisationszustandes bei geringen Frequenzabweichungen auch genutzt werden, um Antennen auf der gewünschten Sendefrequenz zu halten. Durch eine Rückkopplung wird ständig der Polarisationszustand kontrolliert und sollte sich z.B. durch Temperaturänderungen die Sendeanlage verstimmen, so wird dies umgehend bemerkt und anhand der Drehrichtung der Polarisationsebene kann bestimmt werden, wie stark und in welche Richtung nachjustiert werden muss.

8.3.2 Frequenzselektiver totaler Spiegel

Unsere Metamaterialien weisen ein relativ scharfes Transmissionsminimum auf. Dies kann als Blockung einer bestimmten Frequenz genutzt werden. Dadurch kann genau diese Frequenz – unabhängig vom Einfallswinkel – blockiert werden, ohne den Empfang bei anderen Frequenzen wesentlich zu behindern.

So könnte z.B. den Wirten des Oktoberfestes geholfen werden, die in den letzten Jahren versuchten, mit Störsendern das Telefonieren auf den Damen-Toiletten zu verhindern.
Aber generell, wenn es darum geht bestimmte Frequenzen abzuschirmen (z.B. Sicherheitsinteressen), kann unser Metamaterial Abhilfe schaffen. Es käme ohne zusätzliche Strahlung aus, wäre total passiv und kann jegliche gewünschte linear polarisierte Frequenz blocken.

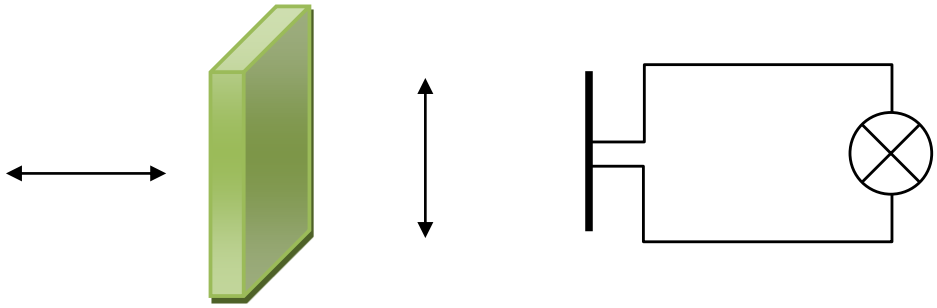
8.3.3 Detaillierte Frequenzbestimmung

Der radikale Umbruch des Polarisationszustandes kann zur hochaufgelösten Frequenzanalyse genutzt werden. Kleine Veränderungen in der Frequenz führen zu starken Änderungen in der optischen Aktivität. So kann anhand der Drehung der Polarisationsebene Rückschlüsse auf die Frequenz gezogen werden.

8.3.4 Frequenzsensitiver Schalter

Der Sprung des Polarisationszustandes ermöglicht es, einen Schalter zu bauen, der bei Erreichen einer gewissen Frequenz umgelegt wird und einen Alarm auslöst. So können beispielsweise empfindliche Produkte geschützt werden.

Auch zum Personenschutz kann dies eingesetzt werden. So löst z.B. ein interner Sensor in einer Jacke Alarm aus, sobald eine bestimmte Frequenz registriert wird.



einfallende Polarisation | unser Metamaterial | gedrehte Polarisation | entsprechend ausgerichtete Antenne

9 Literatur- und Linkliste

[01] Hans Joachim et al.: Bergmann-Schäfer: *Lehrbuch der Experimentalphysik*. Band 3, Gruyter Verlag, 6. Auflage, 1974.

[02] E Plum et al.: *Metamaterial with negative index due to chirality*. PHYSICAL REVIEW B **79** 035407, 2009.

[03] Stefan Hück, Andreas Bülow: *Metamaterial.* Jugend forscht 2007.

[04] Martin Wegener, Stefan Linden: *Giving light yet another new twist.* Physics 2, 3, 2009.

[05] Wen Zhang: *Optical activity and applications of planar chiral metamaterials*. University of Southampton, September 2009.

[06] E Plum, V A Fedotov and N I Zheludev: *Extrinsic electromagnetic chirality in metamaterials*. JOURNAL OF OPTICS A: PURE AND APPLIED OPTICS 11 074009, Mai 2009.

[07] Jiangfeng Zhou et al.: *Negative refractive index due to chirality*. PHYSIKAL REVIEW B **79**, 121104, 2009.

[08] Bingnan Wang, Jiangfeng Zhou, Thomas Koschny, Maria Kafesak and Costas M Soukoulis: *Chiral metamaterials: simulations and experiments.* JOURNAL OF OPTICS A: PURE AND APPLIED OPTICS **11** 114003, 2009.

[09] E. Plum, X.-X. Liu, V. A. Fedotov, Y. Chen, D. P. Tsai, N. I. Zheludev: *Metamaterials: Optical Activity without Chirality.* PHYSICAL REVIEW LETTERS 102, 113902, März 2009.

[10] E. Plum, V. A. Fedotov, and N. I. Zheludev: *Planar metamaterial with transmission and reflection that depend on the direction of incidence.* APPLIED PHYSICS LETTERS 94, 131901, 2009.

[11] Ben A. Munk: *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design.* John Wiley & Sons, 2000.

[12] Nan Jiang: *Struktur, Eigenschaften und Verwendung von optisch aktiven Kristallen*. http://www.andreashoesch.de/AM1_Optische%20Aktivitaet_Jiang.pdf