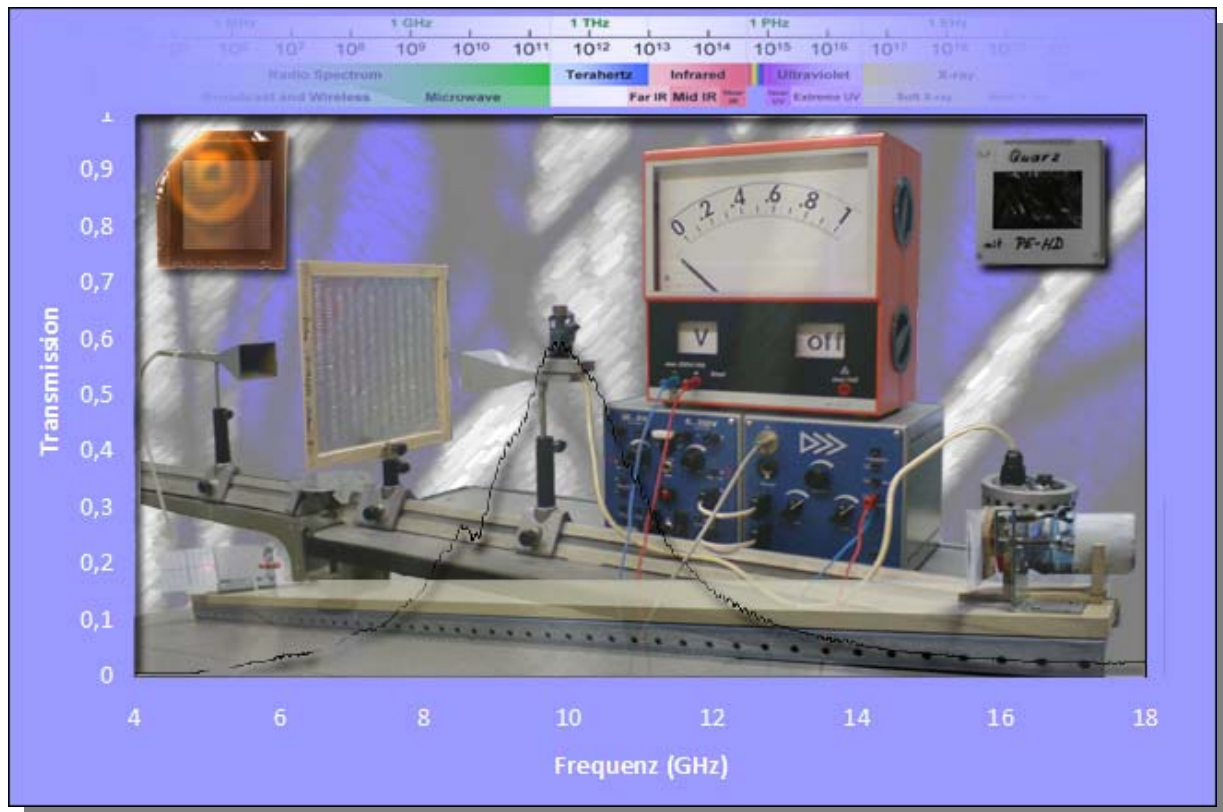


# Wege zur Terahertzstrahlung



Andreas Bülow, Mike Schmidt und Niklas Trzaska

Jugend forscht

Bundeswettbewerb 2009

# Inhaltsverzeichnis

<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>1</b>
<b>1 KURZFASSUNG</b> .....	<b>2</b>
<b>2 ZIELSETZUNG</b> .....	<b>2</b>
<b>3 STAND DER TECHNIK</b> .....	<b>2</b>
<b>4 SCHWARZER KÖRPER</b> .....	<b>3</b>
<b>5 EIN NEUARTIGER FILTER</b> .....	<b>4</b>
5.1 <i>Der Weg zum Filter</i> .....	4
5.2 <i>Der ideale Filter</i> .....	6
5.3 THZ-METAMATERIALFILTER .....	7
5.3.1 <i>Simulation</i> .....	7
5.3.2 <i>Experiment</i> .....	7
5.4 THEORIE.....	8
<b>6 GOLAY-ZELLE – MARKE EIGENBAU</b> .....	<b>9</b>
6.1 DETEKTION VON TERAHERTZSTRAHLUNG.....	9
6.2 GOLAY-ZELLE.....	9
6.2.1 <i>Funktion der Golay-Zelle</i> .....	9
6.3 EIGENBAU DER GOLAY-ZELLE .....	10
6.4 GOLAY-ZELLE II .....	13
<b>7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b> .....	<b>14</b>
<b>8 DANKSAGUNG</b> .....	<b>15</b>
<b>9 LITERATUR- UND LINKLISTE</b> .....	<b>15</b>

## 1 Kurzfassung

Das Thema unserer Jugend-forscht-Arbeit lautet: „Wege zur Terahertzstrahlung“. Da dieses hochaktuelle und spannende Forschungsgebiet auf Grund der hohen Kosten für Sender und Empfänger im Physikunterricht leider nicht behandelt wird, machten wir uns auf den Weg, diesem Frequenzbereich zwischen Infrarot und Mikrowellen mit preiswerten Mitteln experimentell möglichst nahe zu kommen.

Wir entwickelten nach zahlreichen Experimenten und verschiedenen Simulationen einen neuartigen Metamaterialfilter für elektromagnetische Wellen. Weiterhin konstruierten wir einen sehr wirksamen und preiswerten THz-Filter aus einer Müllsackfolie und einem Quarzobjektträger.

Aus einem mit Nanoröhrchen beschichtetem Joghurtbecher bauten wir eine äußerst empfindliche Golay-Zelle für den Infrarot- und THz-Bereich. Völlig überraschend stießen wir beim Bau dieser Golay-Zelle auf einen bisher unbekanntem CO<sub>2</sub>-Absorber.

## 2 Zielsetzung

Terahertzstrahlung - Dies ist ein aktueller und spannender Forschungsbereich. Während in der Öffentlichkeit über das Für und Wider von THz-Nacktscanner diskutiert wird, arbeiten die Forscher und Techniker an zahlreichen, zukunftsweisenden Anwendungen. Sie glauben, dass die Terahertzstrahlung eine echte Goldgrube ist.

Leider wird dieses aktuelle Forschungsthema im Physikunterricht nicht behandelt. Der ausschlaggebende Grund hierfür ist, dass die zur THz-Erzeugung notwendigen Geräte jeglichen Schuletat deutlich überschreiten.

Trotzdem wollen wir uns auf den Weg machen, diesem interessanten Frequenzbereich experimentell möglichst nahe zu kommen, ihn gar zu betreten. Wir hoffen hierbei interessante Entdeckungen zu machen. Denn wie sagte schon Paul Dirac: „Wir gehen vorwärts in ein unbekanntes Gebiet, wir wissen nicht, wohin uns unser Weg führen wird, das macht die Physik so spannend.“

## 3 Stand der Technik

Bei der Terahertzstrahlung handelt es sich um den Bereich des elektromagnetischen Spektrums zwischen 500 GHz und 10 THz. Er grenzt im kurzwelligen Bereich an die Infrarot- und im langwelligen an die Mikrowellenstrahlung.

Terahertzstrahlung, auch aufgrund ihres Wellenlängenbereiches als Submillimeterwellen bezeichnet, war lange Zeit nur sehr eingeschränkt nutzbar. Deswegen sprach man auch von der „Terahertz-Lücke“. Frequenzen unterhalb des Terahertz-Frequenzbandes sind sehr gut durch die Elektronik erschlossen und Frequenzen oberhalb dieses Bereiches beherrscht man mit optischen Strahlern und Detektoren. Der Terahertz-Bereich hingegen war bisher ein weitgehend unerschlossener Bereich. Selbst heute mangelt es noch an kompakten, effizienten und kostengünstigen Sende- und Empfangsvorrichtungen.

Zurzeit wird Terahertzstrahlung in den Labors hauptsächlich mittels Femtosekundenlasern und Quantenkaskadenlasern erzeugt.

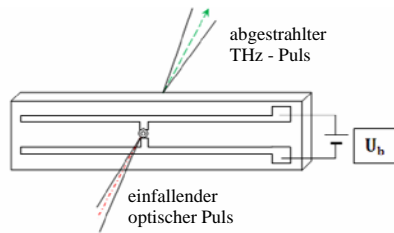


Abbildung 3.1 Dipolantenne auf Galliumarsenidsubstrat

Ein Femtosekundenlaser sendet sehr energiereiche Pulse von  $10^{-15}$  Sekunden aus. Diese treffen auf einen Halbleiterchip und setzen dort Ladungsträger frei. Diese Elektronen-Lochpaare werden durch das angelegte elektrische Feld beschleunigt, sodass es zu einer Aussendung von kurzen, aber relativ energiereichen THz-Pulsen kommt (Abbildung 3.1).

Quantenkaskadenlaser bestehen aus zahlreichen, nanometer-dünnen Halbleiterschichten, die durch ebenso dünne Isolatoren getrennt sind. Die Halbleiterschichten bilden Potenzialtöpfe, in denen sich die Ladungsträger befinden. Durch das Anlegen einer Spannung ist es den Ladungsträgern möglich, von einem Potenzialtopf mit einer niedrigeren Energie in einen Topf mit höherer Energie zu tunneln, von wo diese wieder zurückfallen und hierbei kontinuierlich THz-Wellen aussenden.

Das Erzeugen von Terahertz-Wellen mit Femtosekundenlasern ist für den schulischen Bereich jedoch aus Kostengründen (ca. 200.000€) nicht realisierbar. Das gleiche gilt für den oben beschriebenen Quantenkaskadenlaser, der zusätzlich gekühlt werden muss.

## 4 Schwarzer Körper

Einen thermischen Strahler kann in idealisierter Form als ein Schwarzer Körper betrachtet werden. Da ein Schwarzer Körper nahezu jede Frequenz des elektromagnetischen Spektrums emittiert, ist dieser auch als Quelle für THz-Wellen geeignet. Nach dem Planckschen Strahlungsgesetz und dem Wien'schen Verschiebungsgesetz besitzt ein Körper mit einer Temperatur von 9,6 K sein Strahlungsmaximum bei einer Frequenz von  $f = 1$  THz ( $\lambda = 300\mu\text{m}$ ) (vgl. *Abbildung 4.1*).

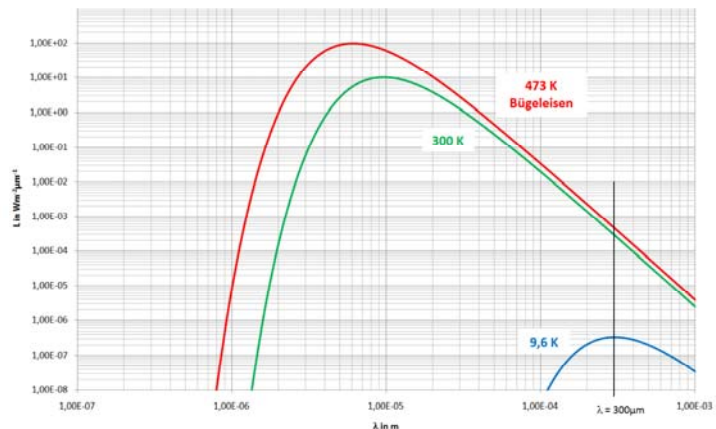


Abbildung 4.1 Doppeltlogarithmische Darstellung der Strahlungsintensität von schwarzen Körpern verschiedener Temperatur

Eine Strahlungsquelle mit einer Temperatur von  $T = 9,6$  K lässt sich jedoch in der Schule nicht realisieren und ist auch nicht sinnvoll, da schon die Wände im Physikraum ( $T = 300$  K) für  $f = 1$  THz eine um den Faktor 1000 größere Strahlungsleistung besitzen. Wir benötigen also einen Schwarzen Körper, der für 1 THz eine deutlich höhere Strahlungsleistung besitzt als die Wände des Physikraums. Wir entschieden uns für ein Bügeleisen, dessen Unterseite wir zusätzlich mit Kohlenstoff-Nanoröhrchen beschichteten, um die Abstrahlung noch zu erhöhen. Die Temperatur dieses großflächigen Strahlers beträgt 473 K.

## 5 Ein neuartiger Filter

### 5.1 Der Weg zum Filter

Ein Schwarzer Körper als Sender mit einem sehr breiten Frequenzbereich verlangt nach einer geeigneten Filtermethode. Ausgehend von dem bekannten Hertzschen Gitter war evident, dass die Filter eine metallische Struktur aufweisen müssen. Aus Ermangelung an uns zur Verfügung stehenden Messinstrumenten im Terahertz-Bereich entschieden wir uns zunächst Versuche im Mikrowellenbereich durchzuführen. Uns stand für die Versuche eine vertikal polarisierte Mikrowellen-Anlage der Schule mit der Frequenz von  $f = 9,45\text{GHz}$  zur Verfügung.

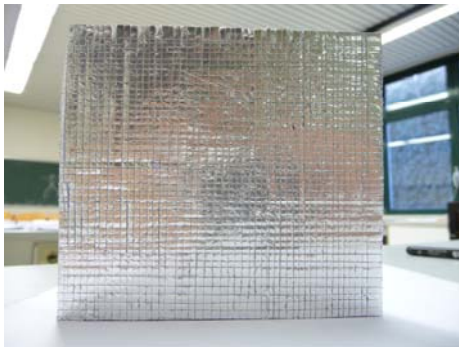


Abbildung 5.1.1 Das „Antisieb“ aus  $2 \times 2\text{ mm}^2$  großen Alu-Quadraten

Erwartungsgemäß zeigte der Versuch mit einem einfachen Metallsieb, dass dies die elektromagnetischen Wellen blockiert. Somit entschieden wir uns für die scheinbar verrückte Idee, eine Art „Antisieb“ zu konstruieren. Dieser Negativabdruck eines Siebes wurde mit einer mittels doppelseitigen Klebebands auf Jackodur befestigter Alu-Folie realisiert. Hierzu wurde die Alu-Folie in  $2 \times 2\text{ mm}^2$  große Quadrate geteilt (Abbildung 5.1.1). Zu unserem Erstaunen zeigte sich eine nahezu ungedämpfte Transmission.

Um diesem Phänomen näher auf den Grund zu gehen, begannen wir, die Struktur zu vereinfachen. Hierzu erzeugten wir nur noch  $2\text{ mm}$  breite Streifen (Abbildung 5.1.2). Dieses Mal zeigte die Messung eine Abhängigkeit von der relativen Ausrichtung zur Polarisationssebene. War die Ausrichtung der Streifen parallel zur Schwingungsrichtung des elektrischen Feldes, so zeigte sich ähnlich dem Hertzschen Gitter eine nahezu vollständige Auslöschung hinter der Probe. War die Ausrichtung jedoch senkrecht zur Polarisationssebene, zeigte sich eine ca.  $80\%$ ige Transmission.

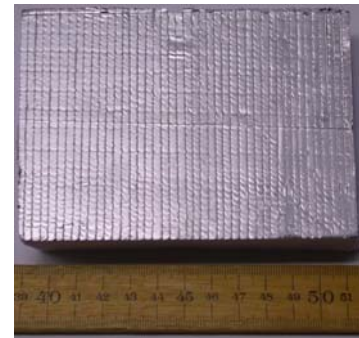


Abbildung 5.1.2 Vereinfachung der Struktur auf  $2\text{ mm}$  breite Alu-Streifen

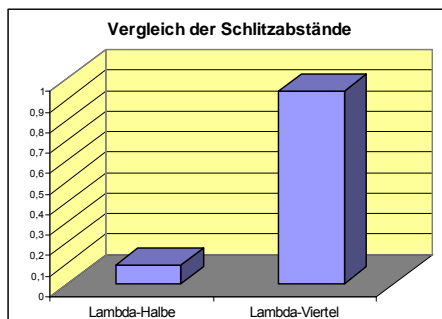


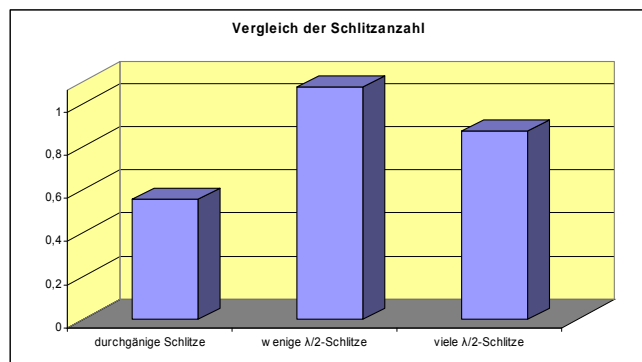
Abbildung 5.1.3 Der Vergleich der Filter mit unterschiedlichen Schlitzabständen bei Lambda-Halbe langen Schlitz zeigt deutlich die Abhängigkeit der Transmission von den Abständen zwischen den Schlitzten.

Es folgten zahlreiche Versuche mit unterschiedlichen Schlitzlängen, Schlitzabständen und Schlitzbreiten. Dabei stellten wir fest, dass mit der Verkürzung der Schlitzlängen die Transmission zunächst abnahm und anschließend wieder anstieg. Die optimale Transmission erhielten wir bei einer Schlitzlänge entsprechend der halben Wellenlänge. So hatten wir einen Ansatz für die Filter gefunden.

Eine enorme Verbesserung der Transmission erzielten wir mit weiteren Experimenten zu den Schlitzabständen. Unsere Versuche ergaben, dass die Lambda-Halbe-Schlitz bei einem Abstand von Lambda-Viertel eine sehr gute bis fast vollständige Transmission aufzeigten (vgl. *Abbildung 5.1.3*).

Auch die Breite der Schlitz selbst hatte Einfluss auf die Transmissionseigenschaften des Filters. Betrug die Transmission bei der Schlitzbreite von unter  $100\ \mu\text{m}$  noch  $90\ \%$ , so brach diese bei einer Verbreiterung auf  $1\ \text{mm}$  zusammen und es erfolgte nahezu keine Transmission mehr.

Die Verringerung der Anzahl der Schlitz führte zu einer weiteren Überraschung: Obwohl eine Verringerung der Transmissionsintensität zu erwarten war, stieg diese auf über  $100\ \%$ . Offensichtlich zeigt diese Struktur ein einer Linse ähnliches Fokussierverhalten. Ferner hatten wir in Anlehnung an unsere ersten Experimente ebenfalls einen Filter mit durchgängigen Schlitz im Lambda-Viertel-Abstand untersucht. *Abbildung 5.1.4* zeigt diese Messreihe.



**Abbildung 5.1.4** Die Anzahl der Schlitz ist somit auch für die Transmissionseigenschaften entscheidend. Während eine Folie voller Schlitz  $87\ \%$  der Energie hindurch lässt, sorgt eine Reduzierung auf rund ein Drittel der Schlitz für eine Transmission von scheinbar nicht möglichen  $107\ \%$ , welche durch einen Linseneffekt der Struktur begründbar ist.

Somit zeigten unsere Versuche, dass dann ein idealer Filter vorliegt, wenn er aus äußerst schmalen Schlitz der Länge, entsprechend der halben Wellenlänge, in einem Abstand, entsprechend ein Viertel der Wellenlänge, besteht. Demnach hängt die Transmissionseigenschaft von der geometrischen Struktur der Materie ab und weniger vom Material. Folglich handelt es sich nach gängiger Definition um einen Metamaterialfilter.



**Abbildung 5.1.5** Verschiedene Filter

## 5.2 Der ideale Filter

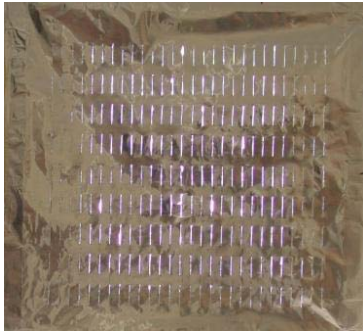


Abbildung 5.2.1 Der ideale Filter

Unsere Messungen ergaben, dass bei einem ideale Filter der Schlitzabstand ein Viertel Lambda, die Schlitzlänge ein Halb Lambda und die Schlitzbreite unter  $100 \mu\text{m}$  betragen mussten, um eine gewünschte Frequenz durchzulassen.

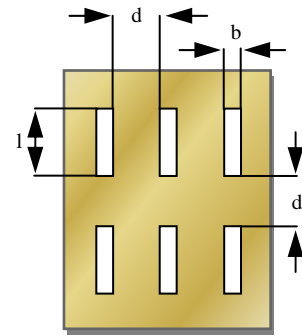


Abbildung 5.2.2 Aufbau der idealen Filter  
 $l$  = Schlitzlänge; ideal: Lambda-Halbe  
 $d$  = Schlitzabstand; ideal: Lambda-Viertel  
 $b$  = Schlitzbreite; ideal:  $\sim 90 \mu\text{m}$  bei Mikrowellen

Da wir nur eine Mikrowellen-Anlage mit einer festen Frequenz besaßen, war es uns unmöglich die Qualität unseres Filters mittels eines Sweeps zu überprüfen. Somit entschlossen wir uns, Filter für unterschiedliche Frequenzen zu bauen und diese dann mit unserer einen, festen Frequenz zu untersuchen. Wir veränderten mit dieser sehr zeitaufwendigen Methode also nicht die Frequenz sondern die Schlitzlängen und -abstände. Alle folgenden Filter wurden dann nach der in *Abbildung 5.2.2* gezeigten Skizze gefertigt. Die Abstände betragen immer ein Viertel der Wellenlänge der Designfrequenz und die Schlitzlängen stets die halbe Wellenlänge.

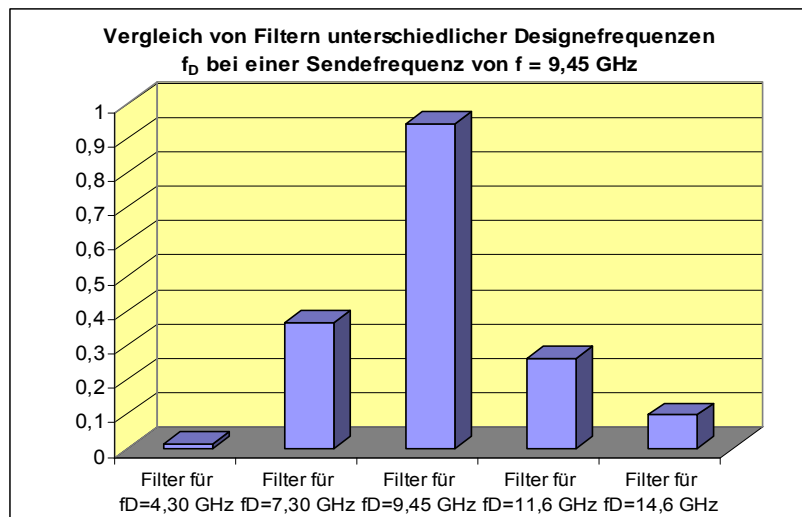


Abbildung 5.2.3 Der Vergleich der idealen Filter für verschiedene Frequenzen in der

Die Qualität unseres Metamaterialfilters zeigt *Abbildung 5.2.3*. Deutlich zu erkennen ist die hohe Transmission des Filters für die Designfrequenz  $f_D = 9,45 \text{ GHz}$ , welche gleich der Sendefrequenz ist. Weicht die Designfrequenz der Filter nur geringfügig von der Sendefrequenz ab, so sinkt die Transmission rapide. Damit jegliche Zweifel beseitigt werden konnten, entschieden wir uns, unseren Filter von einem Profi mit einem Sweep ausmessen zu lassen. Diese Messung ist in *Abbildung 5.2.4* dargestellt. Die deutliche Übereinstimmung mit unseren Messergebnissen ist offensichtlich.

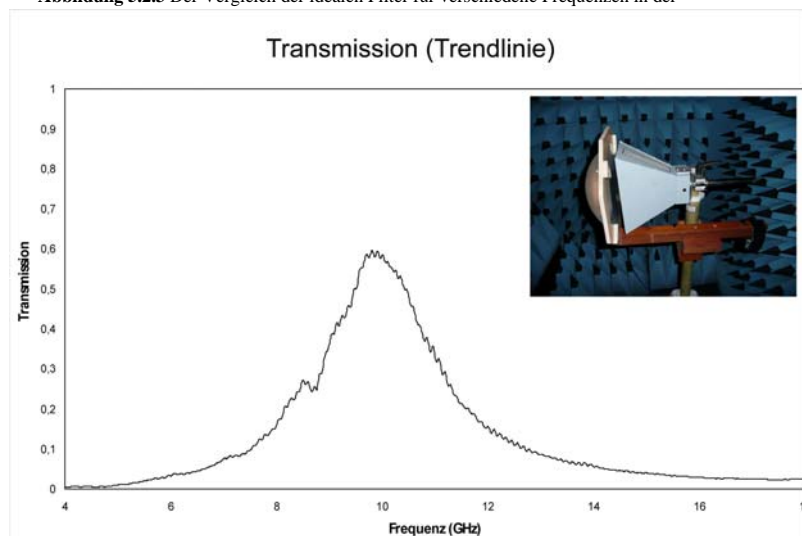


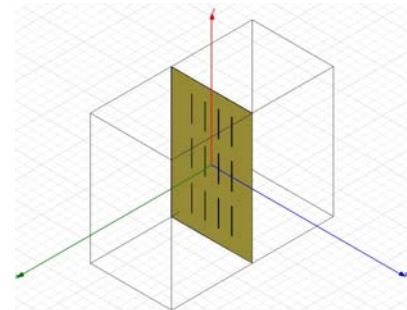
Abbildung 5.2.4 Sweep-Messung unseres Filters für  $f_D = 9,45 \text{ GHz}$  durch Eric Plum (University of Southampton); rechts oben: Empfangsantenne aus dem Versuchsaufbau

## 5.3 THz-Metamaterialfilter

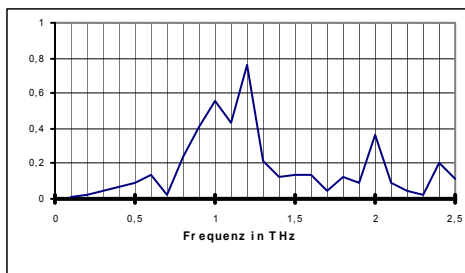
### 5.3.1 Simulation

Nachdem die Versuche mit den Alu-Filter für den Mikrowellen-Bereich erfolgreich abgeschlossen waren, stand eine Skalierung in den Terahertz-Bereich an. Für eine Frequenz von 1 THz ergaben die Berechnungen, dass für die Schlitze eine Länge von unter  $150\ \mu\text{m}$  bei einer Breite von  $3,2\ \mu\text{m}$  nötig seien. Diese Größen waren jedoch nicht mit schulischen Ätzmethoden realisierbar. Ein lithografisches Verfahren stellte die einzig brauchbare Lösung dar und somit war eine professionelle Firma von Nöten.

Obwohl die Experimente im Großen mit den Mikrowellen zufrieden stellend verliefen, blieb dennoch der Zweifel, ob die Funktion des Filters durch die Verkleinerung unbeeinflusst bleiben würde, denn in der Mikrowelt funktionieren manche altbekannten Methoden nicht mehr (z.B. Propellerantrieb).



**Abbildung 5.3.1** Die Simulation erfolgte lediglich von einer funktionellen Einheitszelle, denn die Simulation der gesamten Struktur würde Hardwareressourcen erfordern, die für keinen Heimrechner realistisch sind.



**Abbildung 5.3.2** Der Transmissions-Sweep der Einheitszelle gemäß der Simulation bestätigt, dass die im Mikrowellen-Bereich gemachten Messungen auch im Terahertz-Bereich auftreten. Dargestellt ist der Graph eines 1-THz-Filters bei senkrecht zur Schlitzzrichtung stehender Polarisation.

Deswegen waren Simulationen die ideale Lösung, auch, wenn diese sehr zeitaufwändig sind. Unsere Simulation der funktionellen Einheitszelle - in den Terahertz-Bereich verkleinert - ergab, wie die Grafik *Abbildung 5.3.2* zeigt, in guter Näherung eine Übereinstimmung mit den Messergebnissen aus dem Mikrowellen-Bereich. Jedoch ist zu bedenken, dass es sich hierbei lediglich um eine Simulation handelt, die die Wirklichkeit nur bedingt wiedergeben kann. Allerdings minimiert die Kombination von Mess- und Simulationsergebnis das Risiko so weit, dass die

Investition von 350 Euro für die Herstellung einer Lithografie-Maske durch die Firma ML&C GmbH gerechtfertigt war und in Auftrag gegeben werden konnte. Um jedoch sicher zu stellen, dass die Filter im Terahertz-Bereich funktionsfähig sind, hat sich das Institut für Halbleitertechnik (IHT) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) in Aachen freundlicherweise bereit erklärt, die Filter auszumessen.

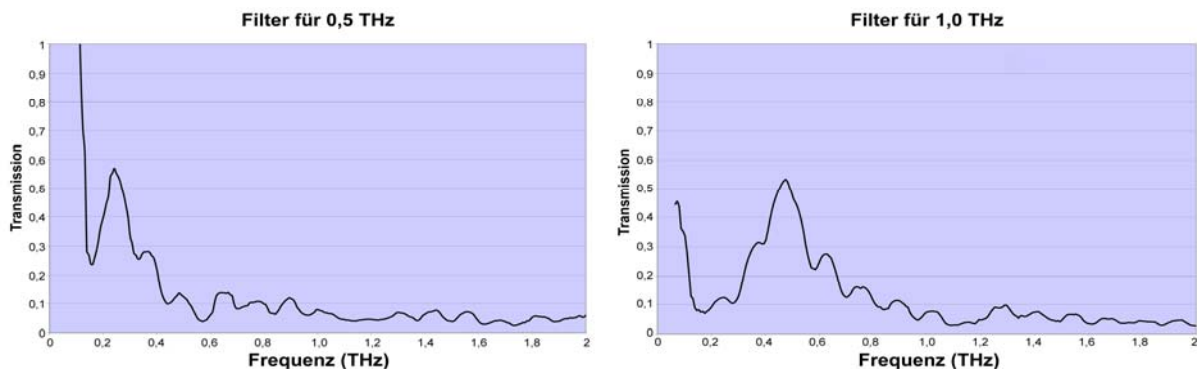
### 5.3.2 Experiment

Nachdem wir die Maske entworfen und durch die Firma ML&C Jena haben fertigen lassen, erstellte Tobias Plötzing im IHT mit Hilfe dieser Maske über Kontaktlithografie zwei Filter aus einer  $200\ \text{nm}$  dicken Goldschicht auf einem Saphir-Wafer ( $340\ \mu\text{m}$ ) her. Diese Filter waren für die Frequenzen  $f_D = 0,5\ \text{THz}$  und  $f_D = 1,0\ \text{THz}$  konzipiert und wurden anschließend von Mohammad Awad im IHT mittels eines Sweeps im Frequenzband bis  $2\ \text{THz}$  ausgemessen. Dessen Erzeugung der THz-Strahlung fand mit einem Femtosekundenlaser statt.

Das Ergebnis dieser Messung zeigt *Abbildung 5.3.3*. Die Messungen der THz-Profis bestätigt überzeugend die Wirksamkeit unserer Filter! Erwartungsgemäß ist bei diesen Messungen



eine Verschiebung der Transmissionsmaxima in den niederfrequenten Bereich fest zu stellen. Die bestehenden Filter sind aus 200 nm dünnem Gold gebaut, welches ohne Trägerschicht nicht stabil wäre. Diese Trägerschicht besteht aus einer hauchdünnen Saphir-Schicht. Diese bewirkt die Transposition der Maxima gemäß  $f_R = f_D / n$  mit  $n = 2$ .

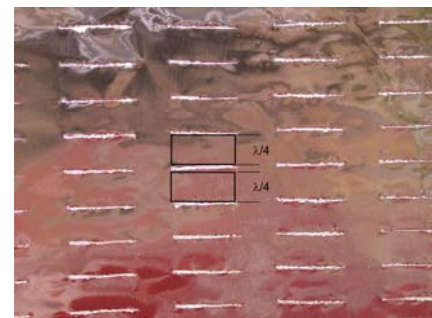


**Abbildung 5.3.3** Transmissions-Messung der Filter für 0,5 und 1,0 THz (Trendlinie). Im Bereich bis rund 0,2 THz herrscht ein anlagenbedingtes Rauschen. Deutlich sind die verschobenen Transmissions-Maxima zu erkennen, welche aufgrund des 340  $\mu\text{m}$  starken Saphir-Waveres in den niederfrequenten Bereich verschoben sind.

## 5.4 Theorie

„Wie funktioniert das überhaupt?“ Diese Frage stellten wir uns von Anfang an und begannen neben der Suche nach dem idealen Filter auch mit der Suche nach der theoretischen Begründung. Betrachtet man die Größen der Schlitzzwischenräume, drängt sich auf, dass es sich bei den Filtern um Antennen-Dipole handelt, zumal die Transmission nur für den Fall auftritt, dass die Schlitz senkrecht zum elektrischen Feld ausgerichtet sind (vgl. *Abbildung 5.4.1*). Diese werden an den Schlitz durch die ankommende elektromagnetische Welle fremd gespeist und senden ihrerseits in ihrer Resonanzfrequenz. So könnte die Transmission zu Stande kommen. Dies waren unsere ersten Gedanken, doch was ist mit der Schlitzlänge? Diese zeigte einen hohen Einfluss auf die Transmissionseigenschaften.

Gemäß unserer anfänglichen Dipol-Theorie müssten durchgängige Schlitz bei selbem Abstand zwischen den Schlitz eine gleich hohe Transmission aufzeigen, wie Lambda-Halbe lange Schlitz, doch dies war, so zeigten unsere Messungen, nicht der Fall (vgl. *Abbildung 5.4.1*). Somit musste diese Theorie verworfen werden, denn der Parameter Schlitzlänge spielt eine entscheidende Rolle. Und somit wurde uns klar, dass es sich bei den Filtern um Metamaterial handelt und nicht um einfache Antennen.



**Abbildung 5.4.1** „Die Abstände zwischen den Schlitz, welche senkrecht zum elektrischen Feld der ankommenden Welle ausgerichtet sein müssen, beträgt ein Viertel der Wellenlänge und somit bilden immer zwei Schlitzabstände einen Sende-Dipol mit Fremdeinspeisung in der Mitte.“ – So unsere anfängliche Theorie.



**Abbildung 5.4.2** möglicher Split-Ring-Resonator

In Anlehnung an die linksbrechenden Metamaterialien begannen wir die Untersuchung auf Split-Ring-Resonatoren (SRR), welche die Transmissionseigenschaften beeinflussen könnten. Auch, wenn diese Schwingkreise normalerweise zur Erzeugung negativer Brechungsindizes verwendet werden, sehen wir hierin einen Weg, die Metamaterialfilter theoretisch zu erklären. Bei unseren Berechnungen zeigte sich der in *Abbildung 5.4.2* dargestellte SRR als guter Ansatz. Doch noch ist dies erst ein Ansatz. Wir arbeiten jedoch daran, diesen Ansatz zur Erklärung des ungewöhnlichen Filter-Verhaltens auszubauen.

## 6 Golay-Zelle – Marke Eigenbau

### 6.1 Detektion von Terahertzstrahlung

Alle hochempfindlichen Detektoren sind sehr teuer und müssen teilweise stark gekühlt werden, um den störenden Einfluss des thermischen Umgebungsräuschens zu kompensieren. Ein weiteres allgemeines Problem für kleine Detektoren ist die relativ große Wellenlänge der Strahlung. Leistungsstarke Detektoren sind z.B. Si- oder Ge-Bolometer, die die Temperaturabhängigkeit eines Widerstandes ausnutzen. Bolometer werden aber in der Regel bei einer Temperatur von 5 K betrieben. Schulische Mittel reichen also bei weitem nicht für den Bau dieser Detektoren aus.

### 6.2 Golay-Zelle

Es gibt aber einen Detektor, der bei Raumtemperatur betrieben werden kann: die so genannte „Golay-Zelle“ (Abbildung 6.2.1). Aber auch dieser Detektor kostet aufgrund seines komplexen Aufbaus 12.000€ bzw. 15.000€ (Fenster aus Polyethylen bzw. Diamant). Obwohl der Preis für die Golay-Zelle gerechtfertigt ist, so ist sie für eine normale Schule nicht zu bezahlen. So waren wir gezwungen, eine eigene Golay-Zelle zu bauen, obgleich wir wussten, dass es nicht einfach werden würde.

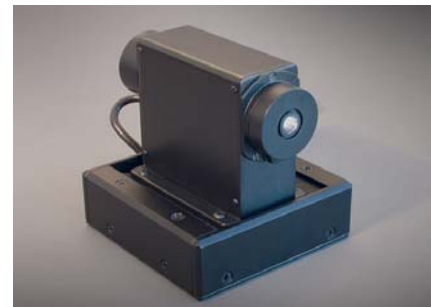


Abbildung 6.2.1 Golay-Zelle  
Quelle: Microtech instruments, inc.

#### 6.2.1 Funktion der Golay-Zelle

Die Funktion der Golay-Zelle lässt sich wie folgt beschreiben:

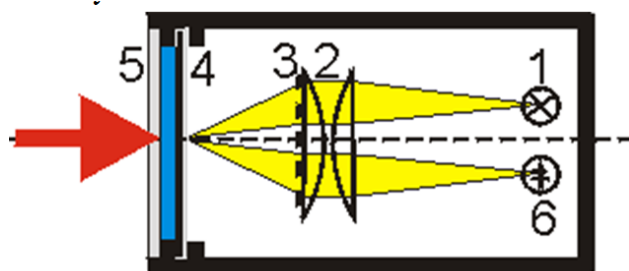


Abbildung 6.2.2 Funktion der Golay-Zelle  
Quelle: Wikipedia – Die freie Enzyklopädie

Die Golay-Zelle ist ein mit Gas gefüllter Behälter mit einer geschwärtzten und außen verspiegelten Empfängermembran (4). Sichtbares Licht (gelb) einer Glühlampe oder LED (1) wird durch Linsen (2) und durch ein Gitter (3) auf die verspiegelte Membran (4) fokussiert. Nun wird das Licht wieder durch das Gitter und die Linsen auf den Detektor (6) gespiegelt. Bei Absorption von Strahlungsenergie (rot) durch das Fenster (5) erwärmt sich das Gas (blau) in der Zelle, was somit zu einer Ausdehnung und zu einer Verschiebung der Spiegelmembran (4) führt. Diese Verschiebung zeigt dann ein verändertes Gitterbild auf dem Detektor (6) an. Die Intensität des Lichtes verändert sich und wird dann gemessen. Die einfallende Strahlungsleistung (rot) kann also als proportionaler Strom der Photodiode detektiert werden.

### 6.3 Eigenbau der Golay-Zelle

Da wir noch keine Terahertz-Quelle besaßen, beschlossen wir zunächst eine Golay-Zelle für das ferne Infrarot (FIR) zu bauen. Unsere ersten beiden Zellen stellten wir aus Metallrohren



Abbildung 6.3.1 Unsere ersten Prototypen aus Metall

(Aluminium und Edelstahl) her. Metall deshalb, damit die Wärme schnell wieder abgeführt werden kann und sich so schnelle Änderungen der FIR-Strahlung nachweisen lassen. Des Weiteren versahen wir die Metallrohre mit Ventilen, damit wir unterschiedliche Gase einfüllen konnten, denn FIR-Strahlung wird von unterschiedlichen Gasen unterschiedlich stark absorbiert. Als Fenster wählten wir verschiedene Kunststoffplatten. Den Rohrabschluss bildet eine verspiegelte Luftballonfolie als Membran.

Um die Funktionsweise unserer Zellen zu testen, richteten wir einen Laserstrahl auf die verspiegelte Luftballonfolie und hielten unsere Hand als Strahlungsquelle vor das Eingangsfenster. Das Ergebnis dieses Versuchs war enttäuschend. Auf der 8 m entfernten Wand sahen wir nur einen diffusen Lichtfleck, der sich nicht von der Stelle bewegte. Wir schlossen daraus, dass die Wärme durch das Metallgehäuse zu schnell abgeführt wurde und die metallisierte Luftballonfolie zu unelastisch war.

Bei unserer zweiten Versuchsreihe verwendeten wir Kunststoffdosen, die mit einem normalen Luftballon überzogen wurden. Auf diese Membran klebten wir einen kleinen Spiegel.



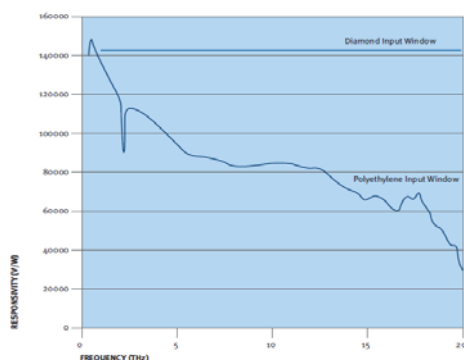
Abbildung 6.3.2 Unsere Kunststoffzelle: Von links nach rechts sind folgende Dosen zu sehen: 1 eine Spitze einer Silikonkartusche; 2 eine Hälfte einer Zahnstocherdose; 3 eine Schutzhülle einer Spritze; 4 vorderer Teil eines Kunststoffdöschens mit Deckel einer CD-Hülle; 5 ein kleines Element eines Knopfes und 6 ein Stopfen einer Powerradeflasche.

Diese Kunststoffzellen funktionierten besser als die Metallzellen, jedoch unterschiedlich gut. Die besten Ergebnisse erhielten wir mit einer Landliebe-Joghurt-Dose. Uns wurde klar, dass Kunststoff nicht gleich Kunststoff ist. Auf der Landliebe-Joghurt-Dose findet man die Bezeichnung „PS“. PS steht für Polystyrol welches für IR-Strahlung in weiten Bereichen transparent ist. Als wir unsere Hand in die Nähe der Zelle hielten, wanderte der Lichtzeiger auf der 8m entfernten Wand in ca. 20 s um 4 cm.



Abbildung 6.3.3 Landliebe-Prototyp

Unsere Landliebe-Joghurt-Dose besaß noch den Nachteil, dass sie transparent ist, d.h., dass das Eingangsfenster Licht und nahes Infrarot (NIR) durchlässt. Bei der käuflichen Golay-Zelle besteht das Fenster entweder aus Diamant oder aus Polyethylen (vgl. *Abbildung 6.3.4*).



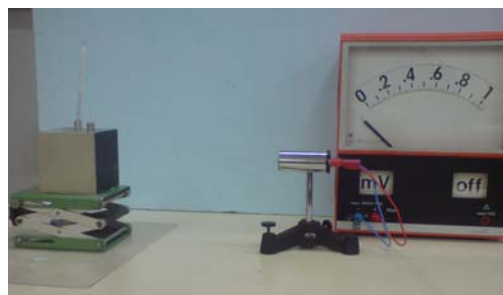
**Abbildung 6.3.4** Frequenzbereich der Golay-Zelle mit Diamant- und Polyethylenfenster  
Quelle: Microtech instruments, inc.

Welches Polyethylen bei der Golay-Zelle eingebaut ist, gibt der Hersteller jedoch nicht an. Deswegen versuchten wir experimentell herauszufinden, welches Polyethylen sich als Eingangsfenster bei unserer Golay-Zelle am Besten eignet. Bei Polyethylen unterscheidet man zwischen PE-HD (schwach verzweigte Polymerketten), PE-LD (stark verzweigte Polymerketten) und PE-LLD (Polymermolekül mit nur kurzen Verzweigungen).

Bei unserem Versuch benutzten wir einen schwarzen Strahler (Lesliewürfel) der im konstanten Abstand von 90 cm auf eine Thermosäule gerichtet ist (*Abbildung 6.3.5*). Die Wassertemperatur betrug während der Messung konstant 72 °C. Ohne Folie betrug die gemessene Thermospannung  $U = 0,55$  mV. Erwartungsgemäß zeigt die schwarze PE-HD-Müllsackfolie die besten Werte, da sie weder Licht noch NIR-Strahlung durchlässt. Dies haben wir optisch und mit Hilfe von Infrarotdioden überprüft.

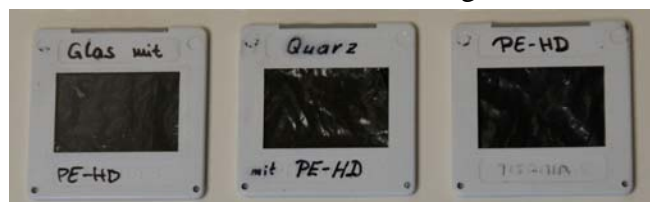
Kombiniert man die schwarze PE-HD Folie noch mit einem Glas- bzw. Quarzobjekträger, so konnten noch bessere Ergebnisse aufgezeigt werden, da Glas ja auch langwellige IR-Strahlung abblockt (Gewächshauseffekt).

Wir glauben somit das optimale Eingangsfenster für unsere Terahertz-Golay-Zelle gefunden zu haben: schwarze PE-HD-Müllsackfolie kombiniert mit einer Glas- bzw. Quarzplatte.



**Abbildung 6.3.5** Versuch mit schwarzem Strahler und Thermosäule

Um unsere Thesen nun zu bestätigen, schickten wir drei Proben (s. *Abbildung 6.3.6*) zum Forschungszentrum Dresden-Rossendorf, wo ein Mitschüler vergangenes Jahr ein Praktikum absolvierte.



**Abbildung 6.3.6**, (1) PE-HD-Müllsackfolie kombiniert mit Glas, (2) PE-HD-Müllsackfolie kombiniert mit Quarz, (3) PE-HD Müllsackfolie

Unsere Filter wurden dort untersucht und unsere Theorie wurde hervorragend bestätigt. Im THz-Bereich lässt die Folie ca. 80% der Strahlung durch, mit Quarz ca. 60% und Glas anfangs 30% und ab 1

THz gar nichts mehr (*Abbildung 6.3.7*). Man könnte somit also schon denken, dass die Folie alleine der optimale THz-Filter ist. Betrachtet man allerdings die Transmission im fernen Infrarotbereich, so wird deutlich, dass die PE-HD-Folie leider noch etwas über 10% der FIR-Strahlung durchlässt. Kombiniert mit Quarz wird dieser Bereich jedoch fast vollständig abgeschnitten (*Abbildung 6.3.8*).

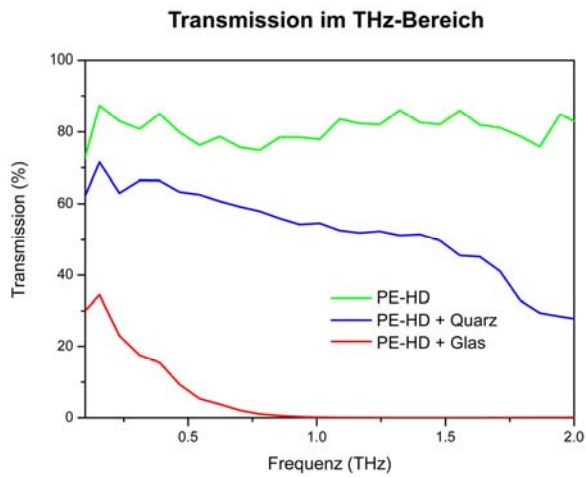


Abbildung 6.3.7 Transmission unserer Filter im THz-Bereich

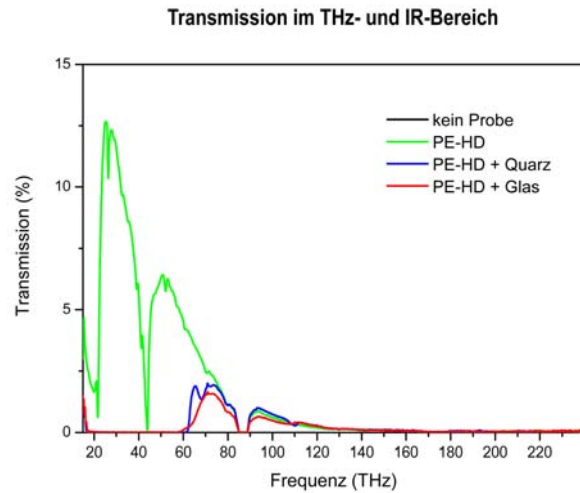


Abbildung 6.3.8 Transmission unserer Filter im THz- und IR-Bereich

Der optimale THz-Filter steht somit also fest, eine schwarze PE-HD-Müllsackfolie kombiniert mit einem Quarzobjekttträger. Für schulische Zwecke ganz einfach herzustellen. Man nehme einen handelsüblichen Müllsack und einem Quarzobjekttträger.

Nachdem wir das optimale Eingangsfenster ermittelt hatten, überlegten wir uns, ob wir auch das Innenleben der Landliebe-Joghurt-Dose verbessern konnten. Eine Schwärzung der Innenseite der Membran (Luftballon) brachte keine großartigen Verbesserungen. Als wir jedoch ein gastransparentes Grafitvlies einbauten und zusätzlich die Dose mit CO<sub>2</sub>-Gas füllten, war die Empfindlichkeit der Zelle zwar verbessert, aber ihr Reaktionsvermögen war nun sehr träge. Als wir jedoch die Innenseite der Landliebe-Joghurt-Dose aufrauten und mit Nanoröhrchen einrieb, verbesserte sich die Empfindlichkeit enorm. Daraus schlossen wir, dass Nanoröhrchen auch gute Terahertzabsorber sind.

Kommen wir jetzt aber zum Bau der Golay-Zelle. Folgendes Experiment verhalf nun zum erhofften Prinzip der Golay-Zelle:

Skizziert ist in *Abbildung 6.3.9* ein Tisch, auf dem ein Laser justiert ist. Um den Laserpunkt

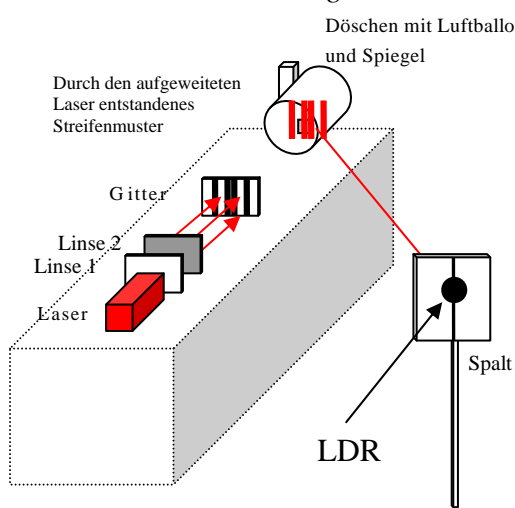


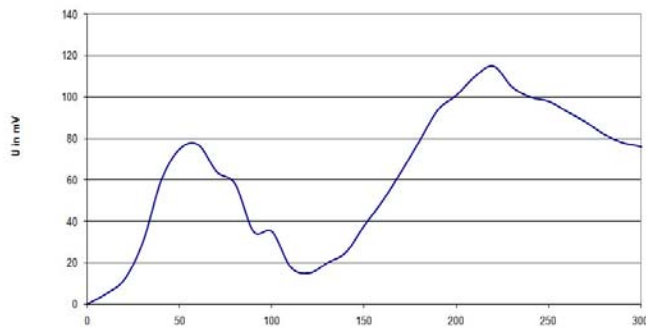
Abbildung 6.3.9 Prinzip unserer Golay-Zelle

aufzuweiten, ist vor dem Laser die Linse 1 platziert. Damit diese Aufweitung dann auch wieder zu einem parallelen Strahl wird, kommt hinter dieser Linse die zweite Linse. Nun trifft der aufgeweitete Laserstrahl auf ein Gitter, dass dann ein Streifenmuster auf den Spiegel des Döschens projiziert. Dieses Streifenmuster wird dann auf einen Spalt gespiegelt, der nur einen Lichtstreifen auf einen Schirm durchlässt.

Wenn nun die Strahlung auf das Döschen trifft und sich dementsprechend das Gas ein wenig ausdehnt und so den Spiegel verstellt, verschiebt sich das Streifenmuster.

Da der Spalt nur einen einzigen Streifen auf den LDR durchlässt, lässt sich bei Wölbung der

Membran, eine Hell-Dunkel-Folge aufzeichnen. (*Abbildung 6.3.10*).



**Abbildung 6.3.10** Der Spannungsverlauf gemessen am LDR zeigt die Hell-Dunkel-Folgen als Folge der Ausdehnung der Membran und der damit einhergehenden Verschiebung des Spiegels, wodurch das Streifenmuster über den Spalt wandert.

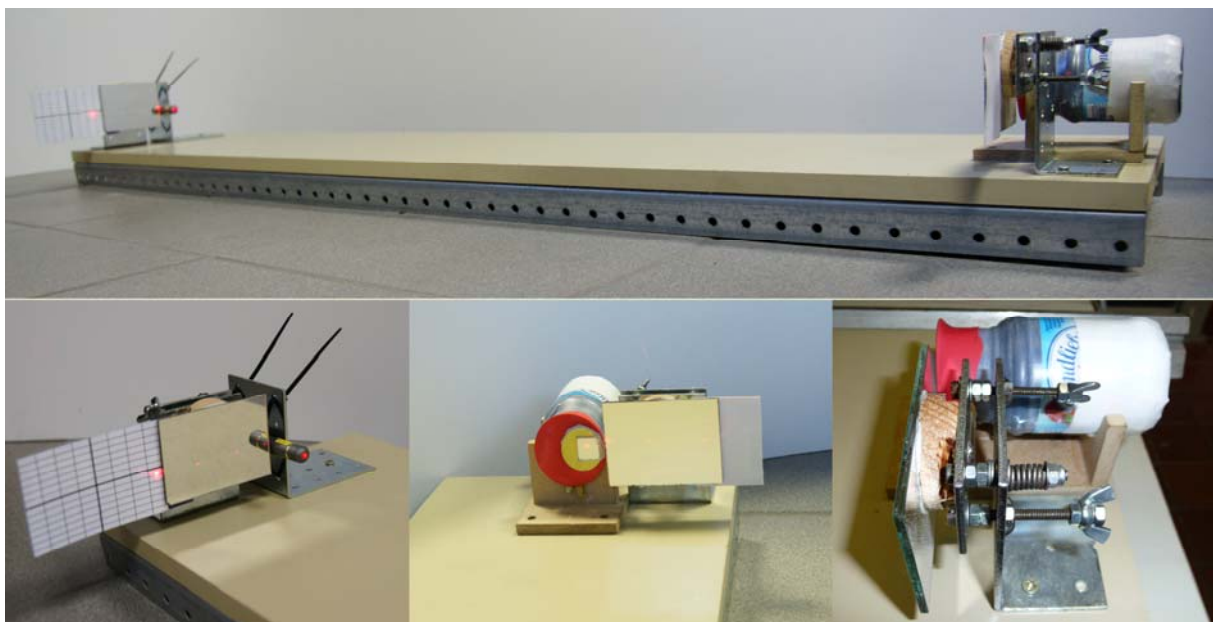


**Abbildung 6.3.11** Prototyp der Golay-Zelle

## 6.4 Golay-Zelle II

Um unsere Golay-Zelle zu verbessern, haben wir uns dazu entschlossen, eine zweite Messapparatur zu konstruieren (*Abbildung 6.4.1*). Dazu wollten wir einen Laserstrahl zwischen zwei Siegel so oft hin und her reflektieren, bis sich eine Weglänge von ca. 7m ergibt.

Dies stellte sich aber als äußerst schwierig heraus. Erst als uns die Idee kam, unsere Spiegel so zu montieren wie es bei einem Autoscheinwerfer der Fall ist, gelang die Lösung des Problems. Der Spiegel ist an einer Ecke fest fixiert, an den zwei anderen Ecken kann über Stellschrauben die Höhe bzw. die Seitenlage eingestellt werden.



**Abbildung 6.4.1** Aufbau Golay-Zelle II

Nun wanderte der Lichtpunkt bei geringster Erwärmung der Landliebe-Dose schnell über den Schirm. Bei Entfernung der Strahlungsquelle wanderte er auch schnell wieder zurück.

Wir verwendeten jetzt auch als wirksame Strahlungsquelle ein handelsübliches Bügeleisen. Die Oberflächen haben wir jedoch aufgeraut und mit Nanoröhrchen eingeschmiert, um so die Strahlungsleistung zu erhöhen.



Abbildung 6.4.2  
Strahlungsquelle  
Bügeleisen

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Erinnern Sie sich noch an den Satz von Paul Dirac: „Wir gehen vorwärts in ein unbekanntes Gebiet, wir wissen nicht, wohin uns unser Weg führen wird, dass macht die Physik so spannend.“? Auf unserem Weg in Richtung Terahertzstrahlung haben wir einen neuartigen Metamaterialfilter für elektromagnetische Wellen entwickelt. Weiterhin konstruierten wir einen äußerst wirksamen und preiswerten THz-Filter aus einer Müllsackfolie und einem Quarzobjektträger. Zusätzlich gelang es uns, aus einem mit Nanoröhrchen beschichtetem Joghurtbecher eine äußerst empfindlichen Golay-Zelle zu bauen.



Abbildung 7.1 Unsere Golay-Zelle nach einer Nacht gefüllt mit CO<sub>2</sub>

Eine vollkommen überraschende Entdeckung machten wir beim Eigenbau unserer Golay-Zelle. Um die Absorption innerhalb der Zelle zu erhöhen, haben wir Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) in die aus Polystyrol bestehende Dose eingeleitet und mit einem Luftballon gasdicht verschlossen. Am nächsten Morgen war jedoch ein Unterdruck innerhalb der Zelle zu beobachten, denn die

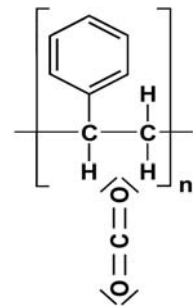


Abbildung 7.2  
Anlagerung des CO<sub>2</sub>  
Moleküls an die  
Polystyrol-  
Verbindung

Landliebe-Dose war verformt und auch die Membran (Luftballon) war nach innen gezogen (vgl. *Abbildung 7.1*). Dieses Phänomen stellte uns vor ein Rätsel. Wir stellten hierzu folgende These auf: Eine Diffusion durch die Wände nach außen ist auszuschließen, denn in diesem Falle hätten kleinere Moleküle wie das O<sub>2</sub>-Molekül der Außenluft in die Zelle hinein diffundieren müssen. Nach unserer Theorie lagert sich das CO<sub>2</sub> gemäß *Abbildung 7.2* an das Polystyrol an. Es wird von der Dosenwand absorbiert. Kann man hieraus einen wirksamen CO<sub>2</sub>-Absorber entwickeln?

Bis zum Bundeswettbewerb wollen wir die Empfindlichkeit unserer Golay-Zelle verbessern. Ferner wollen wir durch weitere Experimente und Simulationen die Theorie zu unseren Metamaterialfiltern weiter entwickeln.

## 8 Danksagung

Wir danken allen, die uns bei unserer Arbeit unterstützt haben. Dies sind im Einzelnen:

Den Herren Mohammad Awad und Tobias Plötzing des Institutes für Halbleitertechnik der RWTH Aachen für die fachkundige Beratung in Bezug auf die Simulation und für die Lithografie unserer 1-THz-Filer sowie deren Ausmessung.

Herrn Doktor Stephan Winnerl vom Forschungszentrum Dresden-Rossendorf für die freundliche Unterstützung in Bezug auf die Ausmessung unserer PE-HD-Proben.

Herrn Eric Plum des Optoelectronics Research Centre der University of Southampton für die Sweep-Messung unseres Mikrowellen-Filters.

Herrn Walter Stein, unseren Betreuungslehrer, der für uns etliche Stunden seiner Zeit geopfert hat.

## 9 Literatur- und Linkliste

- [1] Samulat, Gerhard: *Vorstöß in die Terahertzlücke*. Spektrum der Wissenschaft, April 2008.
- [2] Stellmach, Christian: *Terahertz-Photoleitung in Quanten-Hall-Systemen*. Sierke Verlag, 2007. – ISBN 938-3-940333-02-5
- [3] Zimmermann, Anne: *Goldmine in Wissenschaft und Technik: Terahertz-Wellen*. Universität Bonn, SS 2006
- [4] Seite „*Terahertzstrahlung*“. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 26. November 2008, 23:57 UTC. URL: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Terahertzstrahlung&oldid=53475169>