

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	2
2.	Funktionsweise	3
3.	Umsetzung	4
4.	Verwendete Geräte	5
4.1	Der Laser (1)	5
4.2	Der Lautsprecher (2).....	6
4.3	Die Empfangs- und Auswerteelektronik (3.1 und 3.2).....	7
4.4	Der Low-Noise-Verstärker(LNV)	11
4.5	Der Frequenzgenerator (4.1) / Mini-Disc-Player (4.2).....	12
4.6	Das digitale Speicheroszilloskop (2- Kanal) (5.1)	12
5.	Die Versuchsdurchführung.....	13
5.1	Sinusförmige Anregung unterschiedlicher Frequenzen	14
5.2	Schaffung der Möglichkeit eines quantitativen Vergleichs	15
5.3	Quantitative Auswertung verschiedener Sinusfrequenzen	17
5.4	Anlegen einer Rechteckspannung als Eingangssignal	18
5.5	Vergleich einer Sinus- mit einer Rechteckspannung	19
5.6	Anlegen einer Dreieckspannung als Eingangssignal	20
5.7	Vergleich einer Sinus- mit einer Dreieckspannung	21
5.8	Abhören eines vielfrequenten Signals	21
5.9	Hörprobe.....	22
6.	Zusammenfassung.....	23
7.	Weg von der Themenvergabe zum funktionierenden Modell	23
8.	Schluss.....	24
9.	Literaturangabe	25

Modell einer Laserabhöranlage

1. Einleitung

Laser- ein Zauberwort für Fortschritt und die Lösung vieler Probleme. So hat er heute Eingang in fast alle Bereiche gefunden. Angefangen bei der Medizin, z.B. in der Dermatologie, über den Autobau, z.B. zum Verschweißen von Nähten, bis hin zum einfachen Alltagsgebrauch als Laserpointer, z.B. bei Präsentationen.

Auch die Geheimdienste profitieren ungemein von dieser Technik, namentlich in Form der Laserabhöranlage.

Eine Laserabhöranlage ist ein Gerät, das ermöglicht über größere Entfernungen unbemerkt Gespräche abhören zu können. Hierbei wird ein Laserstrahl auf die Fensterscheibe des anzuhörenden Raumes gerichtet und die Reflexion des Strahls mit einem Detektor aufgefangen.

Gespräche oder Geräusche breiten sich über Schallwellen in der Luft aus. Der sich ständig ändernde Schalldruck erreicht auch die Fensterscheibe und regt sie zu Schwingungen an, die über das Laserssystem abgetastet werden können.

Man könnte sich Fragen, weshalb es unbedingt eine Laserabhöranlage sein muss und nicht eine Taschenlampenabhöranlage völlig ausreichen würde.

Dies ist verschiedenen Besonderheiten des Laserlichts geschuldet. Das Kunstwort „Laser“ bedeutet Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, also Lichtverstärkung durch stimulierte Strahlungsemission. Dieses Laserlicht ist kohärent, d.h. es läuft auch über große Distanzen parallel. Weiterhin hat Laserlicht eine geringe Divergenz. So ist es auch nach vielen Metern noch zu einem Strahl gebündelt, und es lässt sich am Auftreffort ein deutlicher Laserspot ausmachen.

Dies sind zwei Eigenschaften die das Licht einer herkömmlichen Lichtquelle (Taschenlampe) nicht aufweisen kann, aber für den Betrieb einer Laserabhöranlage unabdinglich sind. Die Gründe hierfür werden sich im Laufe der folgenden Arbeit klären. Es wird in ihr zu Beginn die Funktionsweise einer Laserabhöranlage eingehend erklärt werden. Anschließend wird eine Versuchsreihe vorgestellt werden, die mit einem Modell einer Laserabhöranlage durchgeführt wurde.

2. Funktionsweise

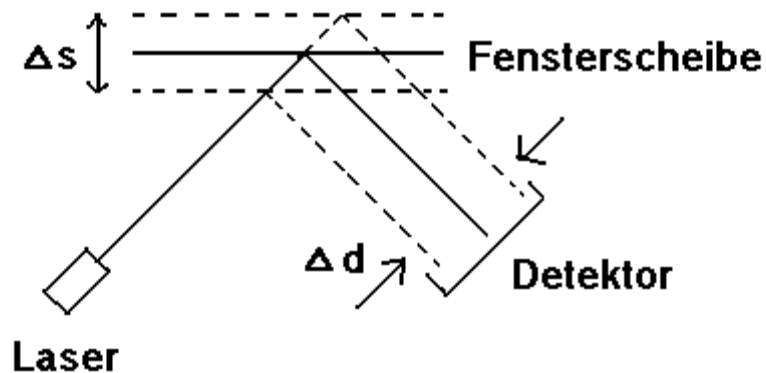


Abb. 1: schematische Darstellung der Laserstrahlauslenkung

Wie in der Skizze angedeutet, verursacht eine Schwingung der Scheibe um Δs eine Verschiebung des reflektierten Strahls um den Weg Δd .

Der Detektor besteht aus zwei Phototransistoren, die im Ruhezustand (= keine Schwingung der Scheibe) gleichmäßig ausgeleuchtet werden.

Befindet sich die Scheibe in einem angeregten Zustand (= Schwingung der Scheibe), so kann der Laserstrahl um bis zu $\pm \Delta d/2$ ausgelenkt werden, was dazu führt, dass die beiden Phototransistoren unterschiedlich stark beleuchtet werden.

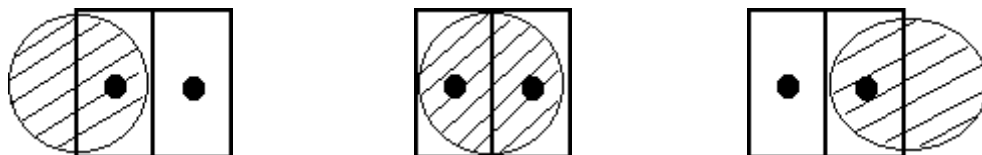


Abb. 2: Ausleuchtung der Fototransistoren

Aus der Differenz der beiden Photosignale kann daher das Schwingungssignal der Fensterscheibe und damit das akustische Signal im abgehörten Raum reproduziert werden.

3. Umsetzung

Eine Umsetzung dieses Versuchs über realistische Entfernungen würde zu großen technischen Schwierigkeiten führen, die den gegebenen Handlungsspielraum übersteigen würden. Zu nennen wäre unter anderem die Präzisionsjustage, die ohne Stative mit exakter Justiermechanik nicht zufriedenstellend zu bewältigen wäre. Weiter würde Fremdlicht (z.B. Sonnenlicht, Beleuchtungen irgendeiner Art, Infrarotstrahlung) zu Störungen des empfangenen Signals führen, die nur mit Hightech- Geräten, d.h. hochempfindlichen Filtern und Verstärkern, zu beseitigen wären. Schließlich könnte es sogar notwendig sein, das Laserlicht zu modulieren, um durch eine anschließende Demodulation die Störungen zu eliminieren und so das gewünschte Signal zu erhalten.

Daher der Entschluss, einen vereinfachten Modellaufbau zu konstruieren, der unter Laborbedingungen realisiert werden kann.

Die Entfernung Laser- Lautsprecher- Detektor beträgt hier ca. 1m. Dies verringert einerseits die Justierarbeit erheblich und erlaubt andererseits die Experimente mit einem handelsüblichen Laserpointer durchzuführen. Für größere Entfernungen würde ein Laser dieser Qualität nicht ausreichen, ein besserer Laser aber das Budget sprengen und wäre weiterhin auch aus Sicherheitsgründen bedenklich.

Um den Versuchsaufbau vor Fremdlichteinfluss zu schützen wurde eine lichtundurchlässige Holzummantelung gebaut.

Schließlich wurde, anstelle einer Fensterscheibe, ein direkt auf einer Lautsprechermembran angebrachter Spiegel zur Reflexion des Laserstrahls verwendet. Die Fensterschwingung konnte so durch ein an den Lautsprecher angelegtes elektrisches Signal simuliert werden.

Darüber hinaus konnte man so einen höheren Reflexionsgrad, und damit ein besseres Empfangssignal, erreichen (da es sich ja um einen Spiegel anstelle einer Glasscheibe handelt).

Dieser Aufbau ermöglicht es, das empfangene Signal mit dem die Schwingungen verursachenden Signal unmittelbar zu vergleichen.

4. Verwendete Geräte

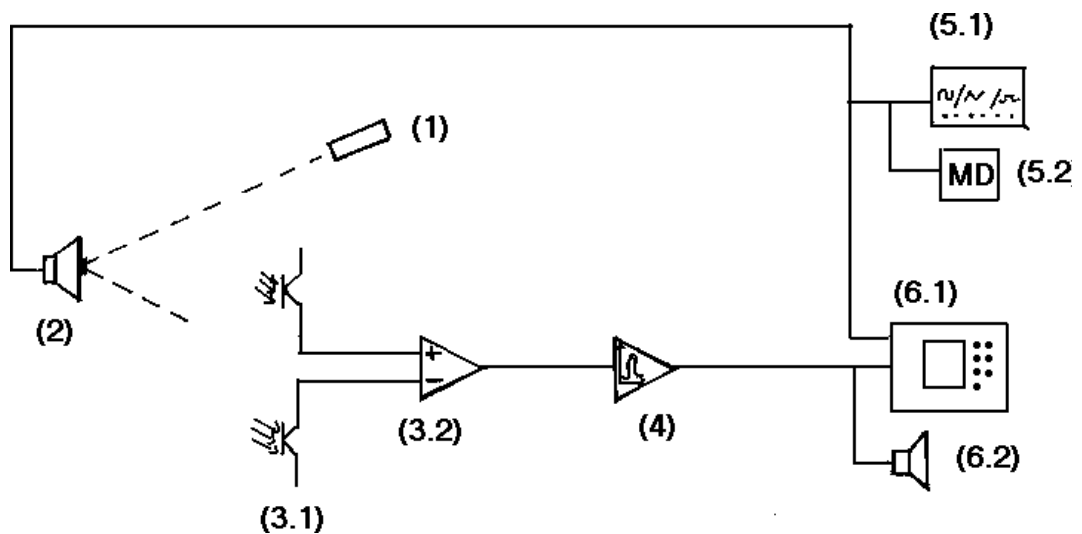


Abb. 3: Schematischer Versuchsaufbau

Die einzelnen Bauteile sind nummeriert und werden nun der Reihe nach besprochen.

Die Bauteile (1), (2) und (3) bilden das Kernstück des gesamten Versuchsaufbaus.

4.1 Der Laser (1)

Es handelt sich um einen handelsüblichen Laserpointer der Klasse 2. Damit besitzt er eine Maximalleistung von 1mW und kann bei versehentlicher, kurzzeitiger Beleuchtung der Netzhaut des Auges keine Schäden herbeiführen. Seine Wellenlänge liegt im roten Bereich, bei $\lambda = 630\text{nm}$ bis 680nm . Zur besseren Justierung ist er auf einer horizontal bzw. vertikal verstellbaren Mechanik befestigt, mit der anhand von Mikrometerschrauben präzise Einstellungen vorgenommen werden können. Der Laserpointer über einen Tastschalter Um die Justierungsarbeit nicht jedesmal beim Ein- bzw. Ausschalten des Lasers zunichte zu machen wurde an den Laser ein „externer“ Schalter zur Bedienung angeschlossen.

4.2 Der Lautsprecher (2)

Auch der Lautsprecher ist ein gängiges Modell das in jedem Haushalt vorzufinden ist.

Es wurde eine zusätzliche Verbindung zur Befestigungsplatte angebracht, die es ermöglicht, die Neigung des Lautsprecher zu variieren, und damit eine grobe Ausrichtung vorzunehmen. Zuvor wurde der schon angesprochene Spiegel auf die Lautsprechermembran geklebt. Auf diese Idee möchte ich an dieser Stelle noch weiter eingehen, da sie einen wichtigen Schritt in Richtung Umsetzbarkeit des Modells bedeutete.

Eine wichtige Eigenschaft des Spiegel ist seine gütebeschichtete Oberfläche, die eine präzise und streuungsarme Reflexion gewährleistet, zumal der Spiegel von einem alten optischen Experiment der Universität Regensburg stammt. Dies ist unbedingt notwendig um einen deutlichen Laserspot bei der Empfangselektronik ausmachen zu können, der wiederum Bedingung für gute Versuchsergebnisse ist.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die zur Lautsprecherfrequenz synchrone Auslenkung des Laserstrahls. Diese wäre bei einer Fensteratrappe nicht sicherzustellen, und damit möglicherweise Ursache für Verzerrungen oder gar Verfälschungen des Signals.

4.3 Die Empfangs- und Auswerteelektronik (3.1 und 3.2)

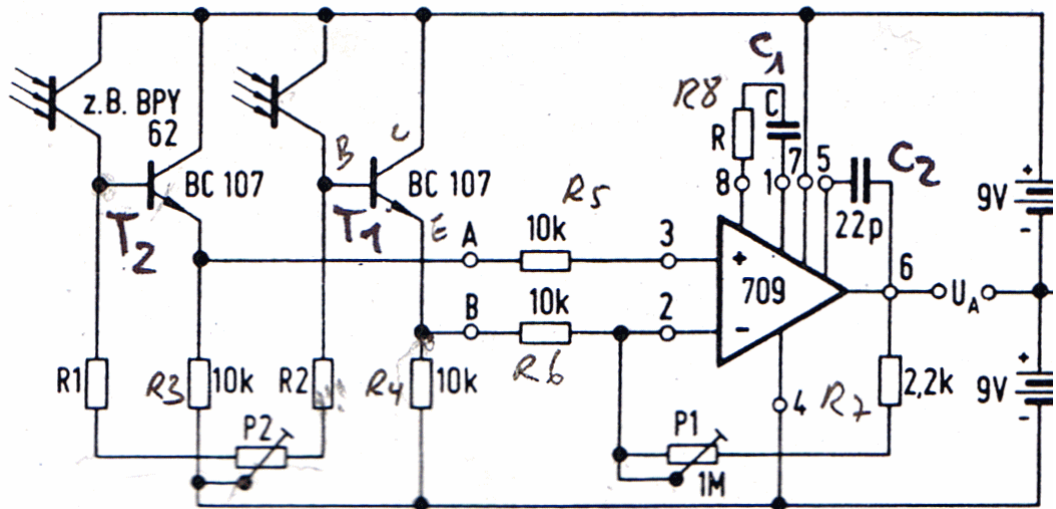


Abb. 4: Schaltplan der Empfangs- und Auswerteelektronik

Die Elektronik lässt sich in zwei Bestandteile untergliedern:

- Zwei Fototransistoren (3.1) als Detektor des Laserstrahls
- Differenzverstärker (3.2), um aus der Differenz der beiden Fotoströme das Originalsignal zu rekonstruieren

zu a) Der Detektor(3.1)

Der Detektor besteht aus einem Doppel-Fototransistor (DFT) mit jeweils einem nachgeschalteten Verstärkertransistor. Der DFT ist, wie der Name schon andeutet, aus zwei einzelnen Fototransistoren zusammengesetzt. Ein solcher Fototransistor ist ein optoelektronisches Bauteil das es ermöglicht, Licht in ein Spannungssignal zu übersetzen, das anschließend verarbeitet werden kann. Die einzelnen Fototransistoren sind in einem Gehäuse untergebracht, verfügen aber über separate Anschlüsse. Der DFT ist auf einer mikrometergenau justierbaren Mechanik befestigt.

Zur Funktionsweise des Fototransistors:

Ein Transistor ist ein aktives elektrisches Bauteil, dessen Widerstand zwischen Emitter und Kollektor durch eine kleine Spannung (0...0,7V) zwischen Basis und

Emitter geregelt werden kann. Bei einem **Fototransistor** erfolgt die Regulierung dieses Widerstandes direkt über die Bestrahlungsintensität der Basis

Die beiden Bilder zeigen die auf das Wesentliche vereinfachte Einbindung eines Fototransistors in der verwendeten Schaltung.

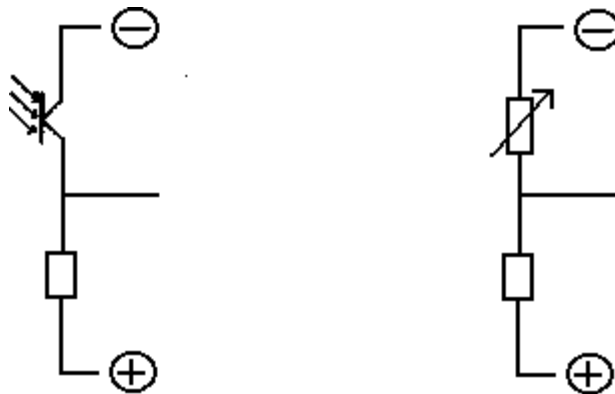


Abb. 5: lichtintensitätsabhängiger Spannungsteiler

Das rechte Bild ist ein Ersatzschaltbild, das ein leichteres Verständnis ermöglichen soll. Anstelle des Fototransistors ist ein Potentiometer(P) eingezeichnet. Er ist ebenfalls ein regulierbarer Widerstand. Fototransistor (links) und Potentiometer (rechts) liegen in Reihe zum Festwiderstand R zwischen den Versorgungsspannungen. Betrachtet man die beiden Bilder, so ist zu erkennen, dass es sich hierbei um einen Spannungsteiler handelt, dessen Teilungsverhältnis von der Ausleuchtung des Fototransistors bzw. der manuellen Einstellung des P abhängig ist. Der Spannungsabfall ist somit proportional zur Lichtintensität (bzw. zur Potentiometerstellung).

zu b) Der Differenzverstärker(DV)

Der gesamte elektrische Aufbau besteht aus 17 Einzelteilen: 8 Widerstände, 2 Potentiometer, 2 Kondensatoren, dem eben angesprochenen DFT mit den beiden Verstärkertransistoren und einem Operationsverstärker, dem „Rechenzentrum“ des DV.

Im Schaltbild lassen sich die Weiterführungen der beiden separaten, schon beim Detektor angesprochenen, Stromkreisläufe erkennen, die im nichtinvertierten („+“) bzw. im invertierten („-“) Eingang des Operationsverstärkers enden. Der DV bildet die Differenz der beiden an den Eingängen anliegenden Spannungen.

Was hat es damit auf sich?

Um das zu klären werden drei mögliche Fälle betrachtet, die beim Betrieb auftreten können, und anhand einer Skizze verdeutlicht werden.

1. Fall : Grundzustand

Im Grundzustand werden beide Fototransistoren (FT) gleich stark ausgeleuchtet. Für den auf dem DFT aufkommenden Laserstrahl ergibt sich folgendes Bild:

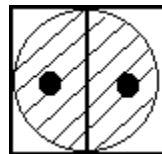


Abb. 6: Laserspot mittig, gleiche Lichtintensität an beiden FT

Das bedeutet, dass ein gleich starkes Spannungssignal bei beiden FT erzeugt wird, das über die oben angesprochenen Wege zum Operationsverstärker übertragen wird.

Die gebildete Differenz der beiden Signale ist als Ausgangssignal (U_a) entnehmbar. Aus dieser Operation leitet sich der Name **DV** ab. Das V (**DV**) zeigt die Möglichkeit der Verstärkung des Ausgangssignals an. Sie ist über das Potentiometer P1 regelbar.

Im soeben betrachteten Fall ist die Differenz Null, damit auch das Ausgangssignal (U_a). Falls nötig, kann mittels des Potentiometers P2 eine Eichung des Grundzustandes erfolgen, d.h. die Ausgangsspannung kann ggfs. auf exakt 0V eingestellt werden.

2. Fall: Auslenkung links

Im nächsten Fall erfolgt die Ausleuchtung der beiden Dioden unterschiedlich stark: FT1 wird stärker ausgeleuchtet als FT2.

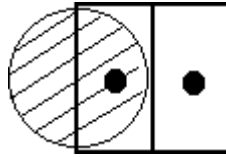


Abb. 7: FT1 wird stärker ausgeleuchtet als FT2

Mit der unterschiedlich starken Ausleuchtung der FT gehen zwei unterschiedlich große Signale einher, die zum Operationsverstärker übertragen werden. Die Folge ist eine Differenz ungleich Null, die dem Ausgangssignal entspricht. Es wird in diesem Fall als positiv definiert.

3. Fall: Auslenkung rechts

Nun kann aber eben genau der entgegengesetzte Fall eintreten. FT2 wird stärker beleuchtet als FT1.

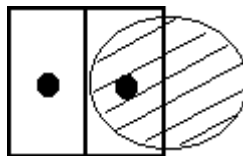


Abb. 8: FT2 wird stärker ausgeleuchtet als FT1

Für diesen Fall gilt das Gleiche wie oben, nur dass die berechnete Differenz als ein negatives Ausgangssignal (U_a) entnehmbar ist.

Was bedeutet das nun konkret? Durch die vom Schalldruck im abgehörten Raum in Schwingung versetzte Glasscheibe (bzw. durch den vom Lautsprecher bewegten Spiegel) wird der Laserstrahl abgelenkt und beleuchtet die beiden Fototransistoren unterschiedlich stark. Die Differenz der beiden erzeugten Fotospannungen ist proportional zur Druckschwankung des Schalls, somit ist – theoretisch – die Möglichkeit gegeben, ein akustisches Signal mit Hilfe eines Laserstrahls an einem mehrere hundert Meter entfernten Ort hörbar zu machen,

ohne sich dem abzuhörendem Objekt jemals genähert zu haben. Es gilt noch zu überprüfen, inwiefern die Theorie in die Praxis übertragbar ist.

4.4 Der Low-Noise-Verstärker(LNV)

Es ist ein Verstärker hoher Qualität, mit geringem Rauschen (= low noise), und einstellbaren Verstärkungsfaktor. Desweiteren besitzt er integrierte und einstellbare Hoch- und Tiefpassfilter, die eine Begrenzung des verstärkten Frequenzbandes erlauben. Damit wird ein Ausblenden ungewollter Frequenzen möglich, wie z.B. Trittschall und Netzbrumm. Der sog. Trittschall entsteht durch Schwingungen, die z.B. durch Schritte oder Klopfen erzeugt werden und bis zu der Befestigungsplatte übertragen werden können. Die Frequenzen des Trittschalls bewegen sich in einem sehr niedrigem Bereich (2,3... Hz), können aber durchaus sehr relevant sein¹. Der Netzbrumm ist eine Folge der Wechselfrequenz der Netzspannung (50Hz), weitere Störungen ergeben sich z.B. durch thermische Anregung der Elektronen in aktiven und passiven elektronischen Bauteilen und ist als ein Rauschen (Lautsprecher) bzw. als Verzerrung (Oszilloskop) wahrnehmbar.

Eine Folge die auch mit dem Einbau des LNV zusammenhängen kann und im folgenden Teil der Arbeit häufig zu beobachten sein wird, ist eine Phasenverschiebung zwischen Referenz- und Ausgangssignal. Diese ergibt sich u.a. aus den Bauelementen eines Bandfilters zu denen hauptsächlich Kondensatoren und Spulen gehören, die bekanntermaßen bei Wechselströmen eine Verschiebung zwischen U und I hervorrufen und so zu einer Phasenverschiebung zwischen den einzelnen Verstärkungsstufen führen kann.

¹ Das zeigte sich auch beim Betrieb des Elektronenmikroskops an der Universität Regensburg zeigte. Hier wurde extra der Boden aufgebrochen und das Elektronenmikroskop auf einem schwingungsblockenden Grundstock befestigt um eben solche Störungen zu vermeiden.

Beim LNV ist eine Verstärkung in vier Abstufungen möglich. Der Verstärkungsfaktor lässt sich in einen „einheitlosen“ Wert umrechnen (vgl. Tabelle). Dieser Verstärkungsfaktor wird später noch benötigt.

Verstärkungsfaktor	Verstärkungsfaktor´
10 dB	3.162
20 dB	10
30 dB	31.62
40 dB	100

Tabelle 1: Umrechnungstabelle

4.5 Der Frequenzgenerator (4.1) / Mini-Disc-Player (4.2)

Der Frequenzgenerator ist ein kommerzielles Gerät, das Signale unterschiedlicher Frequenz, Form und Amplitude erzeugt. Er wird benötigt, um die Lautsprechermembran gezielt zu Schwingungen anzuregen, und somit die Fensterschwingung zu simulieren. Schließlich kann, falls sich der Aufbau bewährt, z.B. ein Mini-Disc-Player (4.2) verwendet werden, um die Übertragungsqualität eines vielfrequenten Signals zu überprüfen.

4.6 Das digitale Speicheroszilloskop (2- Kanal) (5.1)

Um sowohl Ein- als auch Ausgangssignal sichtbar und vergleichbar machen zu können, und so Aussagen über die Qualität der Übertragung treffen und mögliche Mängel beheben zu können, verwendet man ein zweikanaliges Speicheroszilloskop.

Zuguterletzt kann man einen Audioverstärker mit Lautsprecher (5.2) zwischen DV und Oszilloskop schalten, der das Ausgangssignal hörbar macht.

5. Die Versuchsdurchführung

Bevor man mit der Versuchsdurchführung beginnen kann, müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein. Es muss gewährleistet sein, dass die Ebene des Laserstrahls, vor und nach der Reflexion, parallel zur Bodenplatte liegt, um Verzerrungen des Laserspots möglichst gering zu halten. Weiterhin ist es wichtig, dass der Laserstrahl in der Spiegelmitte auftrifft, da es ansonsten möglich ist, dass er beim Betrieb außerhalb des Spiegels gelangt. Ebenso muss der Auftreffpunkt des Laserstrahls bei der Empfangselektronik exakt justiert sein, da davon das Gelingen der Abhörmethode abhängig ist.

Nachdem diese Punkte sichergestellt waren, wurde ein Sinussignal des Frequenzgenerators an den Lautsprecher, sowie an den Kanal Eins des Oszilloskops angelegt. An Kanal Zwei des Oszilloskops wurde das abgehörte Verstärkersignal angelegt.

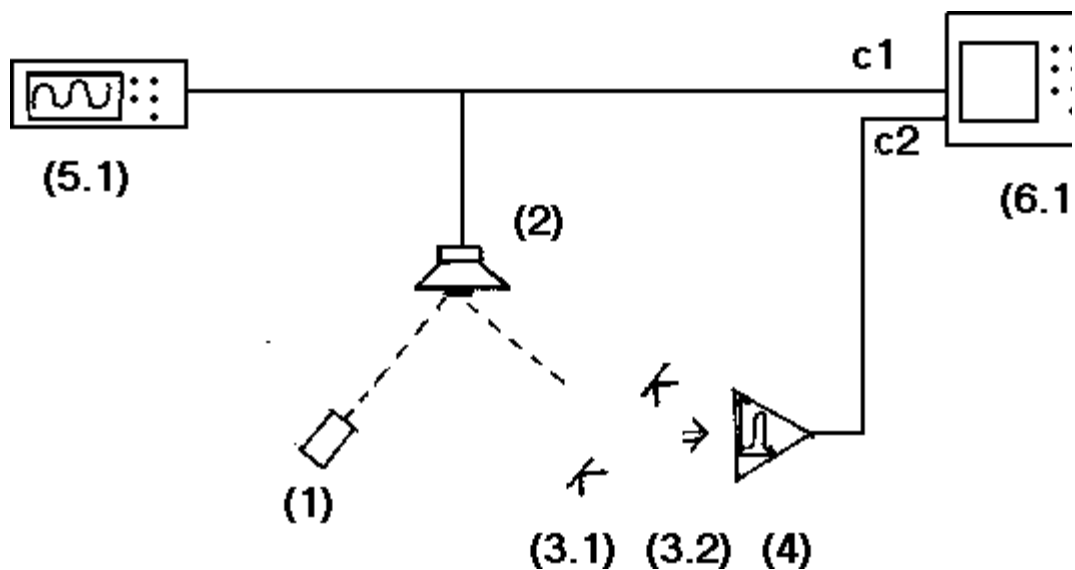


Abb. 9: Signalvergleich mit dem Zweikanal-Oszilloskop

Folgendes Oszilloskopbild war zu sehen:

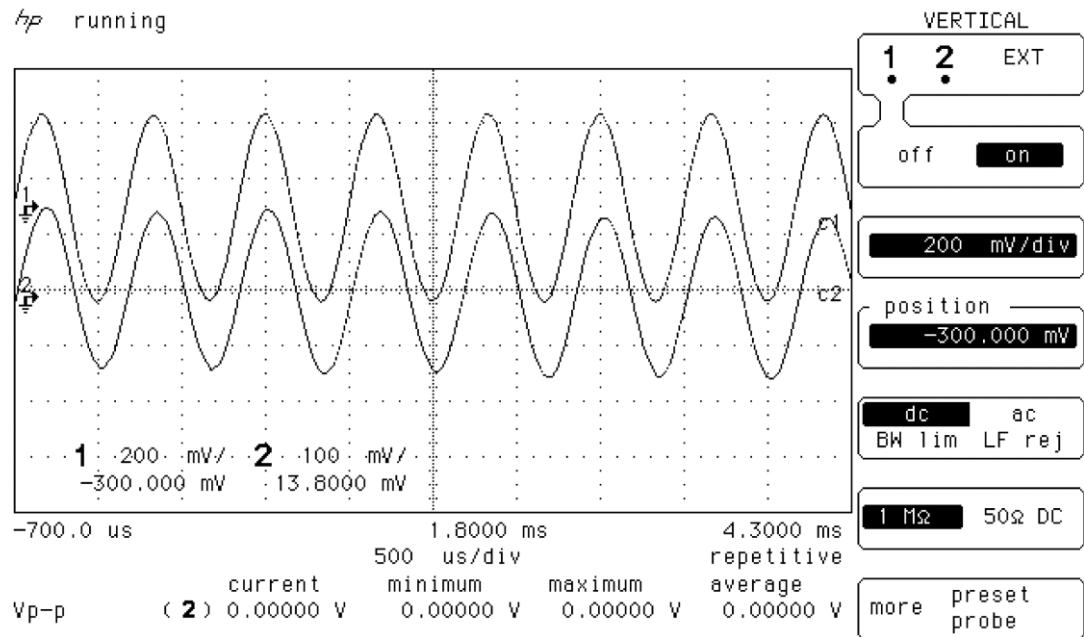


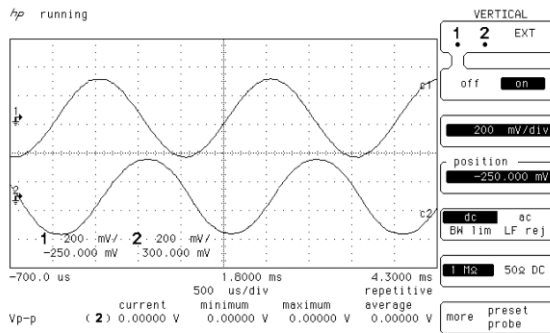
Abb. 10: **Messung 05 aus Tabelle 2:** $f=1.5$ kHz; Verstärkungsfaktor (Verst.) 30 dB; LP 2kHz; HP 200 Hz

Es fällt sofort auf, dass das „Antwortsignal“, bis auf eine geringe Phasenverschiebung, der Anregung folgt, und der Form nach mit der angelegten Sinusspannung übereinstimmt. Für das bloße Auge erscheinen beide Signale geradezu identisch.

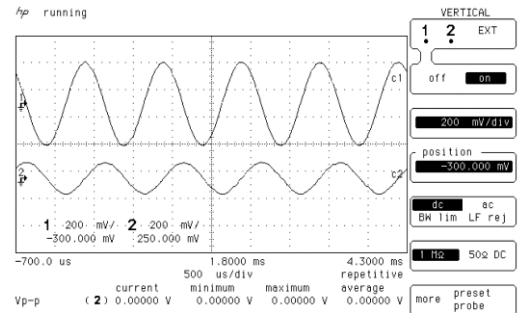
Dieses Ergebnis war der erste Beweis, dass die Abhörmethode, zumindest für einfrequente Signale auch in der Praxis erfolgreich ist.

5.1 Sinusförmige Anregung unterschiedlicher Frequenzen

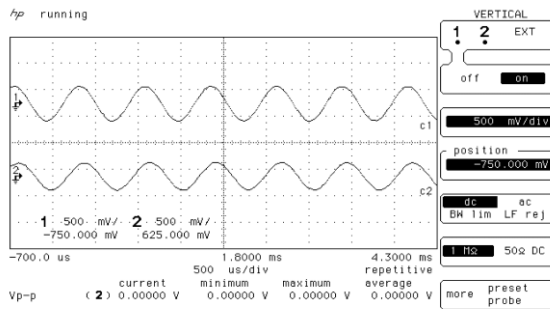
Beim Anlegen einer Sinusspannung, unter Varianz der Frequenz, des Verstärkungsfaktors und der Bandfiltereinstellungen, erhielt man unterschiedliche Ergebnisse. Es wurden mehrere Signale aufgenommen (siehe Tabelle 2).



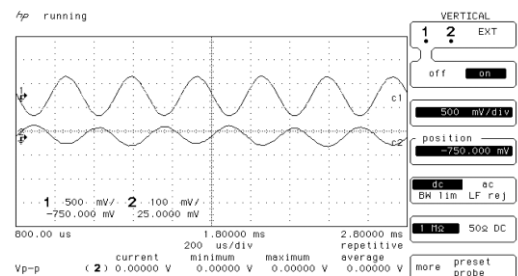
Messung 02: f=0.5 kHz; Verst. 30 dB;
LP 2 kHz; 20 Hz



Messung 03: f=1.0 kHz; Verst.10 dB;
LP 2kHz; HP 20 Hz



Messung 04: f=1.3 kHz; Verst. 30 dB;
LP 2 kHz;HP 20 Hz



Messung 07: f=3.0 kHz; Verst. 30 dB;
LP 2 kHz;HP 20 Hz

Abb. 11: Messungen siehe Tabelle 2

Wie schon bei Messung 05 kann auch hier eine grundsätzlich gute Übereinstimmung zwischen Antwortsignal und Anregung beobachtet werden.

5.2 Schaffung der Möglichkeit eines quantitativen Vergleichs

Bisher wurden nur Aussagen über die Qualität der Übertragung getroffen. Um die Messungen auch quantitativ vergleichen zu können wurden die Amplituden aus den Graphiken ausgemessen und über das Anregungssignal normiert:

In einem ersten Schritt wurde mit Hilfe der Umrechnungstabelle (vgl. Tabelle 1) die Signalamplitude berechnet.

$$\text{Signalamplitude} = \frac{\text{Amplitude Ausgangssignals}}{\text{Verstärkungsfaktor}}$$

(Signal)

Das normierte Signal lässt sich wie folgt berechnen:

$$\text{normiertes Signal} = \frac{\text{Signalamplitude (Signal)}}{\text{Anregungsamplitude}}$$

Es ergaben sich folgende Werte:

Messung	Signal- form	Freq. [Hz]	Gain [dB]	LP [Hz]	HP [Hz]	Signal [mV]	Norm. Signal [10 ⁻³]
01	Sin	500	40	200	200	0.4	0.6
02	Sin	500	30	2.000	20	18	33
03	Sin	1.000	10	2.000	20	80	130
04	Sin	1.300	30	2.000	20	18	27
05	Sin	1.500	30	2.000	200	10	15
06	Sin	2.000	30	2.000	20	9	13
07	Sin	3.000	30	2.000	20	3	3.6
08	Rechteck	500	30	2.000	20	29	-
09	Rechteck	1.000	40	2.000	20	17.5	-
10	Dreieck	1.000	30	2.000	20	30	47
11	MD	-	10	2.000	2	-	-
12	MD	-	10	2.000	2	-	-

Tabelle 2: Übersicht der Messergebnisse

Die Berechnung des normierten Signals für die Rechtecksspannung aus den Oszilloskopbildern erschien nicht geeignet, da die jeweilige Amplitude nicht klar bestimmbar war (Überschwingen an den Kanten), ohne Vereinfachungen zu treffen, die das Ergebnis verfälscht hätten.

5.3 Quantitative Auswertung verschiedener Sinusfrequenzen

Beim Vergleich der Übertragungsstärke eines Sinussignals bei verschiedenen Frequenzen, aber gleichbleibenden Verstärkungsfaktor und Bandfiltereinstellungen, ergab sich folgendes in einem Diagramm dargestellte Ergebnis. Es wurde die Frequenz in Abhängigkeit vom normierten Signal angetragen.

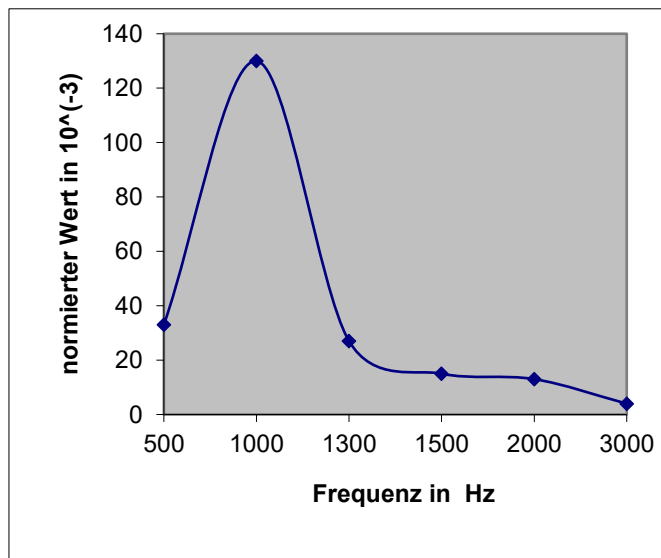


Abb. 12: Abhängigkeit der Übertragungsamplitude von der Frequenz

Es lässt sich ein deutliches Maximum bei einer Frequenz von 1000 Hz ausmachen, die der Eigenfrequenz des Systems „Lautsprechermembran mit Spiegel“ entsprechen könnte. Um diesen Wert fällt die Stärke der Übertragung stark ab.

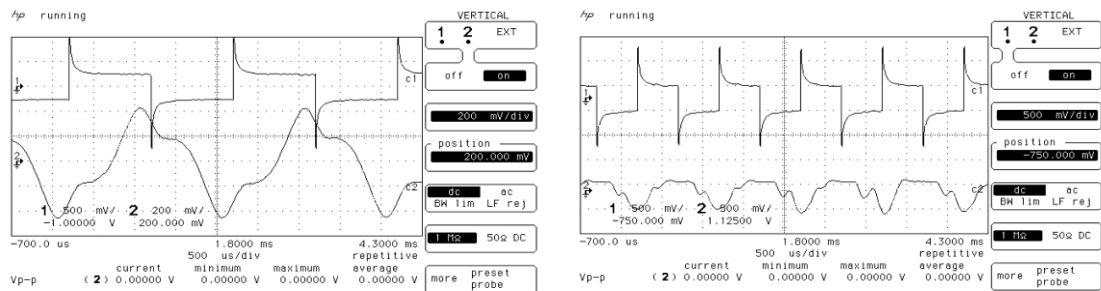
Der Abfall der Übertragungsstärke gegen hohe Frequenzen lässt sich aus der relativ hohen Masse des Spiegels erklären. Sie bedeutet für den Lautsprecher eine große Zunahme an Trägheit, die bei jedem Richtungswechsel überwunden werden muss. Die Anzahl der Richtungswechsel ist direkt proportional zur Frequenz, nimmt also mit der Frequenz zu. Für den Lautsprecher hat das zur Folge, dass er pro Zeiteinheit mehr Richtungswechsel durchführen muss, d.h. Beschleunigung und Geschwindigkeit kontinuierlich steigern muss um die Anforderungen zu erfüllen. Mit der Geschwindigkeit nimmt aber auch die Arbeit zu, die aufgewandt werden muss, um einen Richtungswechsel herbeizuführen.

Daher wird es für den Lautsprecher mit zunehmender Frequenz immer schwieriger das Eingangssignal nachzuvollziehen.

Der geringere Wert bei 500 Hz könnte mehrere Ursachen haben, z.B. eine vom Membrandurchmesser bestimmte frequenzabhängige Umsetzung von elektrischer in mechanische Leistung (Wirkungsgrad) oder der nichtlinearen Kennlinie der nachfolgenden Verstärker.

5.4 Anlegen einer Rechteckspannung als Eingangssignal

Nun wurde die Wiedergabequalität beim Anlegen einer Rechteckspannung überprüft. Dazu wurden zwei Oszilloskopbilder (08 und 09) verglichen.



Messung 08: $f=0.5$ kHz; Verst. 30 dB;

LP 2 kHz;HP 2 Hz

Messung 09: $f=1,0$ kHz; Verst. 40 dB;

LP 2 kHz;HP 20 Hz

Abb. 13: Messungen aus Tabelle 2; Vergleich Rechteckspannungen

Gemeinsam ist beiden Bildern eine verzerrte Wiedergabe des Eingangssignals, wobei die Unstimmigkeit bei höherer Frequenz größer ausfällt. So kann bei Messung 08 die Rechtecksform bis auf einen anfangs zu hohen Ausschlag gut nachvollzogen werden. Das Abweichen des Graphen aus der Rechtecksform entspricht dem Ausschlagen der Lautsprechermembran aus seiner Soll-Bewegung. Selbes gilt für den Graphen Messung 09, doch ist hier die zweifache Frequenz des Eingangssignals zu berücksichtigen. Sichtbare Folge ist ein stärkeres Nachschwingen der Membran und damit ein stärker verzerrtes Ausgangssignal.

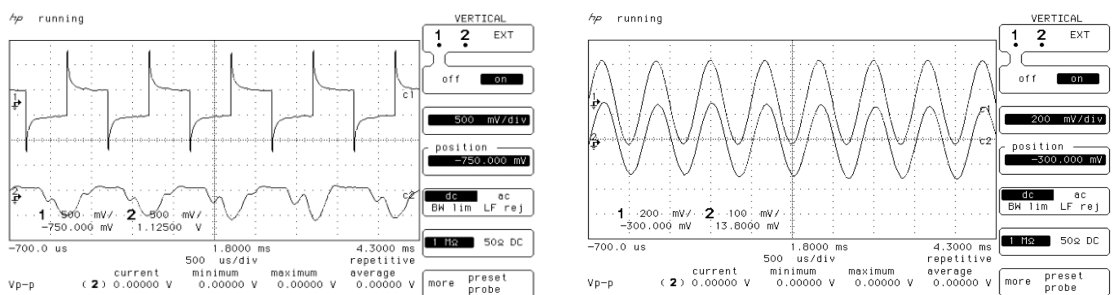
Geschuldet ist dieses Verhalten einem Charakteristikum der Rechtecksspannung:

Bei dieser erfolgt die Umpolung nicht, wie bei einer Sinusspannung, durch ein kontinuierliches Abfallen und schließlich ein Ansteigen der Spannung, sondern sprunghaft. Das hat zur Folge, dass sich die Lautsprechermembran, inklusive Spiegel, ebenfalls sprunghaft von Maximalausschlag zu Maximalausschlag bewegen müsste, was einer unendlichen Beschleunigung der Selben gleich kommen würde. Doch dies ist bekanntlich unmöglich. Was geschieht also?

Der Lautsprecher vollbringt sein Möglichstes und beschleunigt die Membran schnellstmöglich in die eine Richtung, nach der Umpolung in die entgegengesetzte. Da die Membran aber, samt Spiegel, eine (träge) Masse besitzt, muss diese nach jeder Beschleunigungsphase erst einmal abgebremst werden um in die andere Richtung beschleunigt werden zu können. Im Gegensatz zur sinusförmigen Bewegung erfolgt das Abbremsen und Beschleunigen ruckartig. Dieser Zeitraum entspricht dem oben angesprochenen Ausschlagen der Membran aus seiner Soll- Bewegung. Dieser Vorgang wiederholt sich mit jeder Umpolung.

5.5 Vergleich einer Sinus- mit einer Rechtecksspannung

Nun wurde eine Sinusspannung mit einer Rechtecksspannung, bei gleicher Frequenz und Bandfiltereinstellungen, verglichen.



Messung 09: $f=1,0$ kHz; Verst. 40 dB;

LP 2 kHz; HP 20 Hz

Bild 05: $f=1.5$ kHz; Verst. 30 dB;

LP 2kHz; HP 200 Hz

Abb. 14: Messungen aus Tabelle 2; Vergleich Sinus-/Rechtecksspannung

Grundsätzlich fällt die bessere Wiedergabe des Sinussignals auf. Es ist eine Folge der unterschiedlich gearteten Beschleunigungen. Das Sinussignal kommt der Trägheit des Lautsprechers sehr entgegen, wohingegen die Rechteckspannung die weitaus ungünstigste Anregungsform darstellt. Das spiegelt sich in den Oszilloskopbildern deutlich wider.

5.6 Anlegen einer Dreieckspannung als Eingangssignal

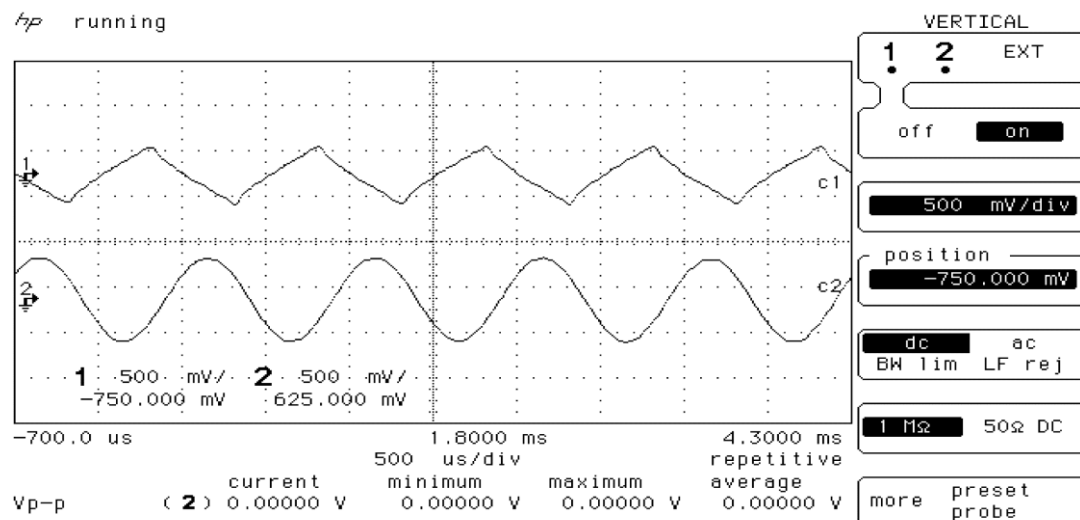
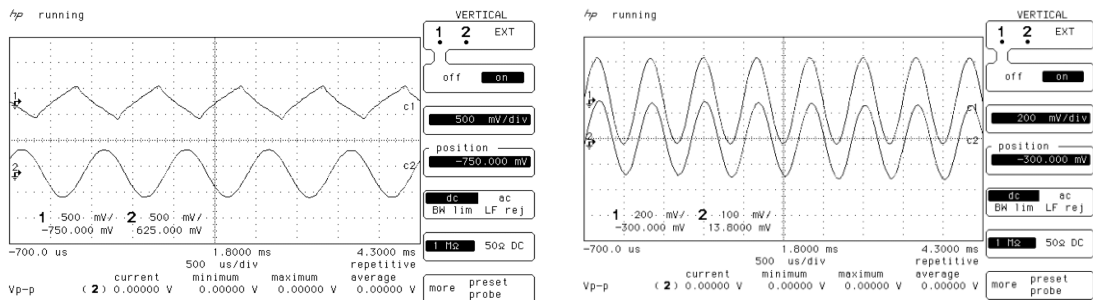


Abb. 15: Bild 10: $f=1.0$ kHz; Verst. 30 dB; LP 2kHz; HP 20 Hz

Hier fällt die sinusartige Form des Ausgangssignals auf. Es liegt wie schon bei der Rechteckspannung an der bis zum geforderten Umkehrpunkt gleichbleibenden Beschleunigung des Lautsprechers und der unmittelbar darauf geforderten gleich hohen Beschleunigung in die entgegengesetzte Richtung, und der Schwierigkeit desselben, diese Anforderung auf Grund seiner Trägheit, zu erfüllen. Es ist ein Abbrems- bzw. Beschleunigungsvorgang von Nöten, der sinusartig erfolgt.

5.7 Vergleich einer Sinus- mit einer Dreiecksspannung

Bei einem Vergleich zwischen einer Sinus und Dreiecksspannung gleicher Frequenz und Bandfiltereinstellungen fällt das annähernd dreimal so große Ausgangssignal (normiert) der Sinusspannung auf.



Messung 10: $f=1.0$ kHz; Verst. 30 dB;
LP 2kHz; HP 20 Hz

Messung 05: $f=1.5$ kHz; Verst. 30 dB;
LP 2kHz; HP 200 Hz

Abb. 16: Messungen aus Tabelle 2; Vergleich Dreieck-/Sinusspannung

Man darf sich nicht von den Oszilloskopbildern täuschen lassen, da bei diesen der Verstärkungsfaktor noch mit eingerechnet ist.

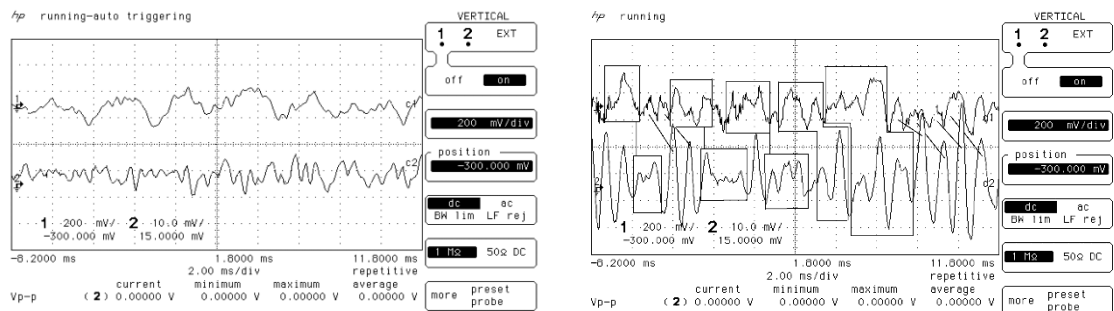
Dieses Ergebnis ist ein weiteres Mal die Folge der leichteren Umsetzbarkeit des Sinussignals für den Lautsprecher.

5.8 Abhören eines vielfrequenten Signals

Nachdem der Versuchsaufbau nach allen Seiten hin untersucht wurde, galt es schließlich zu testen, inwiefern es möglich ist, ein vielfrequentes Signal abzuhören.

Als Signalquelle wurde anstelle eines Frequenzgenerators ein Mini-Disc-Player (4.2), und zusätzlich ein Audioverstärker mit Lautsprecher (5.2) an den Ausgang des LNV angeschlossen, um das Ausgangssignal hörbar zu machen.

Folgende Oszilloskopbilder ergaben sich.



Messung 11: Verst. 10 dB; LP 2kHz; HP 2 Hz **Messung 12:** Verst. 10 dB; LP 2kHz; HP 2 Hz

Abb. 17: Messungen aus Tabelle 2; Anlegen eines vielfrequenten Signals

Wie zu erwarten, sind die Bilder weit komplexer als bei Anlegen einer einrequenten Signals, und somit ist es schwieriger, Übereinstimmungen zwischen Ein- und Ausgangssignal zu finden. Mit einem guten Willen und etwas Geduld jedoch lassen sich durchaus Übereinstimmungen ausmachen. Im Messung12 habe ich versucht diese nachzuvollziehen und durch Einrahmungen (bzw. Verbindungslinien) besser kenntlich zu machen.

5.9 Hörprobe

Den endgültigen Beweis lieferte aber die Hörprobe.

Bis auf einen vernachlässigbaren Verlust an Klangqualität konnte das Eingangssignal sehr deutlich wiedergegeben werden.

Beim Hören verschiedener Musikbeispiele stellte sich heraus, dass die Qualität der Übertragung mitunter von der gespielten Musik abhängig ist. Die Ursache ist nicht etwa ein individueller Musikgeschmack der Laserabhöranlage, sondern hängt von den gespielten Frequenzen ab.

Wollte man dennoch eine Geschmacksrichtung definieren, hieße sie wohl: Je härter, desto besser.

6. Zusammenfassung

Es wurde nun zuerst ein Überblick über die Funktionsweise einer Laserabhöranlage und die dazu benötigten Geräte gegeben. Dabei wurde auch auf ihre Funktion eingegangen. Anschließend wurden verschiedene Versuchsreihen vorgestellt. es ergab sich, dass die beste Übertragung bei einer Sinusspannung (1kHz) erfolgt, bei einer Dreieck- bzw. Rechteckspannung die Übertragungsqualität auf Grund der abrupten Umpolung schlechter ausfällt. Als grundlegende Ursache hierfür wurde die Trägheit des Lautsprechers gefunden. Schließlich wurde ein mehrfrequentes Anregungssignal angeschlossen, dass überraschend gut wiedergegeben werden konnte.

Somit bewies das im Rahmen meiner Facharbeit präsentierte Modell seine Funktionsfähigkeit, und damit seine Fähigkeit, mechanisch erzeugte Schwingungen mithilfe einer Laserabtastung in elektrische Signale umzuwandeln und zu reproduzieren. Es ist also tatsächlich möglich, über eine größere räumliche Entfernung, Gespräche in einem anderen Raum abzuhören.

7. Weg von der Themenvergabe zum funktionierenden Modell

Mag der Weg von der Themenvergabe bis zur fertigen Facharbeit sich auch als mühelos und von Erfolgserlebnissen geegnet dargestellt haben, so war er es doch keineswegs. So galt es für mich zu Beginn erst einmal, nachdem ich eine grobe Vorstellung von der Funktionsweise einer Laserabhöranlage erlangt hatte, eine Idee davon zu entwickeln wie eine mögliche Empfangselektronik auszusehen habe. Nachdem mir dies gelungen war, und ich in der Bibliothek der Universität Regensburg eine passende Schaltung gefunden hatte, die es mir ermöglicht hat meine Idee umzusetzen, stellte sich mir die Aufgabe, einen Differenzverstärker zu bauen. Da ich vorher noch nie in den Genuss des Lötens gekommen war, beanspruchte der Bau des Differenzverstärkers volle zwei Tage und kostete mich zusätzlich eine Packung Brandsalbe.

Nachdem dies nun geschafft war, ging es darum den weiteren Aufbau voranzutreiben. Der Lautsprecher war schnell montiert, doch bereitete mir die Montage des Lasers und der Empfangselektronik Sorgen. Nach manchen aussichtslosen Überlegungen, hatte ich mich schon fast mit einer wenig zufriedenstellenden Befestigung abgefunden, als mir in einem Labor der Universität Regensburg, an der ich die Möglichkeit hatte, Messgeräte und Verstärker auszuprobieren, plötzlich zwei Präzisionsjustagemechaniken in mein Blickfeld fielen. Als Eigentümer ließ sich Dr. Sergey Danilov ausmachen, der mir in gebrochenen Englisch erklärte, dass er durchaus nicht abgeneigt wäre mir diese russischen Justiertischchen, in gut altrussischer Tradition, gegen ein Bier feil zu bieten. Wer kann da schon nein sagen?

Nun besser ausgerüstet, als in meinen kühnsten Träumen ersehnt, konnte ich mit den Experimenten anfangen.

Zu meiner großen Freude sollte der Aufbau damit von Anfang an bestens funktionieren, sodass ich ohne größere Komplikationen meine Versuchsreihen durchführen konnte.

8. Schluss

Abschließend möchte ich noch eine paar Worte zur Relevanz dieser Abhörmethode sagen.

Wie ich in Erfahrung gebracht habe, sind alle Fensterscheiben des Regensburger Siemensgeländes, die zu wirtschaftsspionagerelevanten Räumen gehören, so gelagert, dass jedwede, z.B. durch Sprechen erzeugte, Schwingungen nicht durch eine Laserabhöranlage abgetastet werden könnten. Um mehr über die Relevanz dieser Methode zu erfahren habe ich des weiteren sowohl an den BND (Bundes-Nachrichten-Dienst) als auch an das BSI (Bundesamt-für-Sicherheit-in-der-Informationstechnik) geschrieben. Auf die Antworten warte ich bis heute.

Es gilt also zu vermuten, dass diese Methode durchaus ihre Anwendung findet. Für einen Normalbürger sind die Möglichkeiten der Spionageabwehr verschwindend. Schlussendlich bleibt bloß die altbewährte Methode bei wichtigen Gesprächen die Stereoanlage auf Anschlag zu stellen.

An dieser Stelle möchte ich noch der Universität Regensburg, und hierbei besonders Stephan Giglberger danken, da es mir durch ihn ermöglicht wurde, meine Forschungen unter bestmöglichen Bedingungen durchzuführen.

Abschließend kann ich sagen, dass ich, um einiges an Erfahrung in der praktischen Physik und jede Menge neuen Wissen reicher, die Arbeit hochzufrieden beendet habe.

9. Literaturangabe

Folgende Literatur wurde für diese Arbeit verwendet:

- Dieter Nährmann (ber. Ing. VSI):
„Professionelle Schaltungstechnik - Über 1000 Applikationsschaltungen für Praxis, Labor und Studium“; 2. verbesserte Auflage; Franzis Handbuch
- Anton Müller, Ernst Leitner, Wolfgang Dilg:
„Physik – Leistungskurs 2. Semester ; Elektromagnetische Schwingungen und Wellen, Wellenoptik, Relativitätstheorie“; Ehrenwirth
- Paul A. Tipler
„Physik“; 3. korrigierter Nachdruck, 2000, der 1. Auflage 1994; Spektrum Akademischer Verlag
- www.Wikipedia.de