



**Georg-Wilhelm-Steller Gymnasium
Bad Windsheim**

Seminararbeit

über das Thema

Hacken von Sprachassistenten mithilfe von Audio-Injektion durch Laser

Autor: Tom Gaimann

Prüfer: StR Dr. Stefan Bärthlein

Abgabedatum: 10.11.2020

Seminar: Halbleiterphysik und Optoelektronik

Jahrgang: 2019/2021

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	3
2 Mikroelektromechanische Systeme	4
2.1 Anwendungsbereiche von mikroelektromechanischen Systemen	4
2.2 Funktionsweise eines MEMS-Mikrofons	5
3 Laser	6
3.1 Geschichte des Lasers	6
3.2 Anwendungsbereiche des Lasers	6
3.3 Eigenschaften des Lasers	7
3.4 Funktionsweise und Aufbau	7
3.4.1 Besetzungsinversion und stimulierte Emission	7
3.4.2 Bestandteile eines Lasers	8
3.5 Modulation eines Lasers	8
4 Sprachassistenten	9
4.1 Funktionsweise eines Sprachassistenten am Beispiel von Alexa	9
4.2 Schwächen von Sprachassistenten	9
5 Experimente zur Untersuchung des thermoakustischen Effekts eines MEMS-Mikrofons	10
5.1 Sicherheitsvorkehrungen	10
5.2 Hypothese	10
5.3 Verwendete Komponenten	10
5.4 Experiment 1: Charakterisierung des MEMS-Mikrofons	12
5.4.1 Aufbau des Experiments	12
5.4.2 Auswertung	12
5.5 Experiment 2: Reagiert das MEMS-Mikrofon auf einen 1 mW-Laser? . .	12
5.5.1 Aufbau des Experiments	12
5.5.2 Auswertung	13
5.6 Experiment 3: Reagiert ein MEMS-Mikrofon auf eine Glühbirne? . . .	14
5.6.1 Aufbau des Experiments	14
5.6.2 Auswertung	14
6 Zusammenfassung und Ausblick	15
7 Anhang	17
8 Danksagungen	17
9 Eidesstattliche Erklärung	18

1 Einleitung

Der erste Smart Speaker „Alexa“ von Amazon kam in Deutschland Ende 2016 auf den Markt. Seit dem Verkaufsstart steigt der Absatz von intelligenten Lautsprechern weltweit stetig an. Während 2019 schon 134,8 Millionen Smart Speaker weltweit verkauft wurden, zeigt eine Prognose, dass der Absatz bis 2023 um ungefähr 50 Prozent, also auf rund 200 Millionen verkaufte Einheiten, steigen wird. Zudem ergeben Umfragen, dass 60 Prozent der Deutschen eine Sprachsteuerung nutzen und 91 Prozent zumindest schon einmal von „Amazon Alexa“ gehört haben [vgl. Ten19b].

Einhergehend mit dem Wachstum der Absatzzahlen von intelligenten Lautsprechern steigt auch die Anzahl an Internet of Things¹ (IoT) Geräten, die sich über Sprachsteuerungen von Anbietern wie Amazon und Google steuern lassen. 2018 wurden weltweit circa 41.500 neue Patente in Bezug auf IoT-Technologie angemeldet [vgl. Ten19a], was zur Folge hat, dass immer mehr Menschen diese Geräte, die sich über Sprache kontrollieren lassen, kaufen und mit ihnen in ihrer vertrauten Wohnumgebung interagieren. Dieser Trend macht sogar vor smarten Türschlössern keinen Halt, die sich ganz einfach mit dem Satz „Alexa, mach die Tür auf!“ oder „Hey Google, mach die Tür auf!“ öffnen lassen.

Wenn so sensible Geräte wie Türschlösser sogar schon mit intelligenten Lautsprechern geöffnet werden können, müsste man meinen, dass Smart Speaker im Allgemeinen sehr sicher sind und nicht ohne Weiteres durch bösartige Dritte manipuliert werden können. Diese Meinung wurde jedoch widerlegt, als amerikanische Wissenschaftler 2019 herausfanden, dass Mikrofone in Smart Speakern auf Licht reagieren. Mit der Anwendung des thermoakustischen Effekts gelang es ihnen, Sprache über einen Laser in die Mikrofone von diversen intelligenten Lautsprechern (darunter die Marktführer Amazon Alexa und Google Home [vgl. Ten19b]) zu injizieren. Dieser Angriff gelang ihnen mit der Amplitudenmodulation eines gewöhnlichen Laserpointers. Dass man diesen Angriff mit einfachsten Mitteln durchführen kann ist erschreckend, jedoch ist bisher noch kein Fall bekannt, bei dem diese Technik der Audio-Injektion ausgenutzt wurde, um sich beispielsweise illegal Türen zu öffnen, deren Schlosser mit einem Sprachassistenten verbunden sind, oder um anderweitig sensible Strukturen oder Daten zu manipulieren. In der Theorie wäre ein solches Vorgehen jedoch durchaus denkbar [vgl. Sug+19].

Ausgehend von diesen Sicherheitsrisiken hat sich diese Arbeit zum Ziel gesetzt, die Manipulation von Sprachassistenten bzw. von MEMS-Mikrofonen durch Laser zu untersuchen. Dabei werden zuerst der Aufbau, die Geschichte und die Funktionsweisen

¹Internet of Things: Eine Technologie mit der alltägliche Gegenstände wie zum Beispiel eine Kaffeemaschine oder ein Kühlschrank mit dem Internet verbunden sind und sich über ein Smartphone oder einen Smart Speaker steuern lassen.

von MEMS-Mikrofonen, Lasern und Sprachassistenten aufgezeigt und erläutert. Im Anschluss wird mit Experimenten gezeigt, dass MEMS-Mikrofone auf Licht reagieren.

2 Mikroelektromechanische Systeme

MEMS steht für *Micro Electro-Mechanical Systems* und kann mit *mikroelektromechanische Systeme* (manchmal auch *elektromechanische Mikrosysteme*) ins Deutsche übersetzt werden. Unter mikroelektromechanischen Systemen versteht man in der Fertigungstechnik nicht nur extrem kleine Sensoren, wie Beschleunigungs-, Temperatur-, und Drucksensoren, sondern auch hochpräzise, mikroskopisch kleine Strukturen und Komponenten, wie Löcher oder Grabenstrukturen, die in Sieben, Filtern und Analysegeräten ihre Anwendung finden. Aktive Elemente wie zum Beispiel Mikropumpen oder mikroelektromechanische Antriebe gruppiert man unter dem Namen Mikroaktuatoren und gehören auch zur Klasse der mikroelektromechanischen Systemen [vgl. Glü05, Seite 13]. Der Grundprozess der Herstellung von MEMS ist die sogenannte Fotolithographie, in der Strukturen mithilfe von Masken und der Einstrahlung von Licht übertragen werden. Die minimale Breite der möglichen Strukturen beträgt etwa $1\mu\text{m}$ bei einer Wellenlänge von 250 nm bis 350 nm [vgl. Glü05, Seite 69-72]. Die Fertigungstechnologie für noch kleinere Strukturen, genannt *nanoelektromechanische Systeme*, ist allerdings noch nicht marktreif. In *nanoelektromechanischen Systemen* können zukünftig sogar Quanteneffekte genutzt werden [vgl. Wer04].

2.1 Anwendungsbereiche von mikroelektromechanischen Systemen

Die Automobilindustrie ist, neben den Smartphone-Herstellern, einer der Hauptabnehmer für mikroelektromechanische Systeme. Sie werden dort für sicherheitsrelevante Systeme genutzt wie zum Beispiel für Spurhalteassistenten, Traktionskontrollen, Anti-Blockier-Systeme, Airbagkontrolle oder Gurtstraffer. Die MEMS-Technologie reduziert somit die Zahl der Verkehrstoten stark. Die MEMS-Sensoren werden in Kraftfahrzeugen hauptsächlich wegen ihres geringen Stromverbrauchs und ihren geringen Anschaffungskosten verbaut [vgl. Glü05, Seite 17]: Ein weiterer Anwendungsbereich für mikroelektromechanische Systeme ist die Medizintechnik. Dort werden sie für die Diagnostik und Analyse des menschlichen Körpers verwendet, da Sensoren direkt am beziehungsweise im Körper eingesetzt werden und somit präzise Messungen durchgeführt werden können [vgl. Glü05, Seite 18-19].

2.2 Funktionsweise eines MEMS-Mikrofons

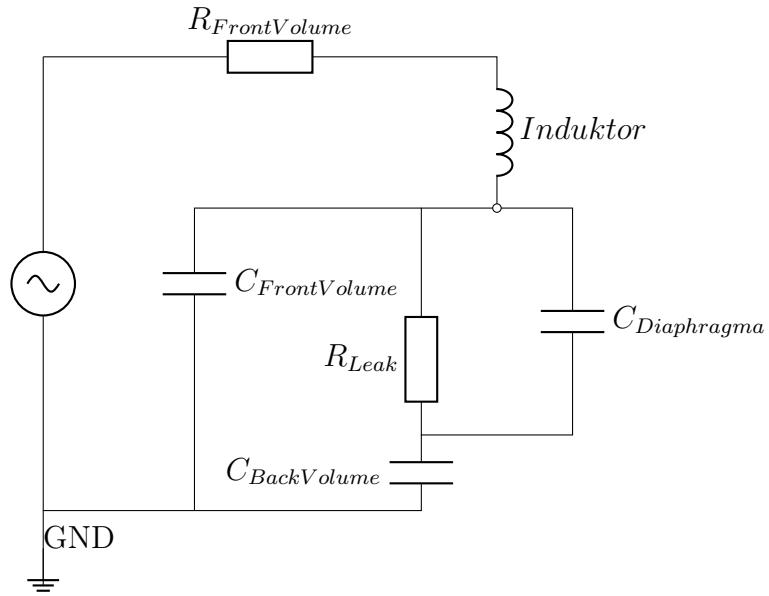


Abbildung 1: Schaltplan eines MEMS-Mikrofons

MEMS-Mikrofone sind eigentlich Drucksensoren, die kleinste Druckunterschiede erkennen und diese anschließend in elektrische Spannung umwandeln. Sie bestehen aus einer Kammer, in der das eigentliche MEMS und ein ASIC² untergebracht sind (vgl. Abbildung 2). Das Diaphragma des Mikrofons gerät in Schwingung, wenn es eine leichte Änderung des Druckes, ausgelöst durch eine akustische Quelle, wahrnimmt. Das Diaphragma wandelt den Schalldruck nun in elektrische Spannung um, indem es an einen Kondensator gekoppelt ist (siehe $C_{Diaphragma}$ in Abbildung 1), der seine Kapazität aufgrund der Schwingung des Diaphragmas verändert. Aus diesem Grund nennt man dieses Prinzip auch kapazitives Wandlerprinzip. Die Eigenschaften des MEMS-Mikrofons werden durch das Gehäuse und die akustischen Löcher (in Abbildung 2 dargestellt durch gestrichelte Linie über dem Diaphragma) definiert. Die richtige Zusammensetzung erlaubt eine hohe Sensitivität gegenüber Druckänderungen und eine gleichzeitig niedrige Sensitivität gegenüber dem statischen Luftdruck [vgl. Glü05, Seite 152][vgl. Cor17].

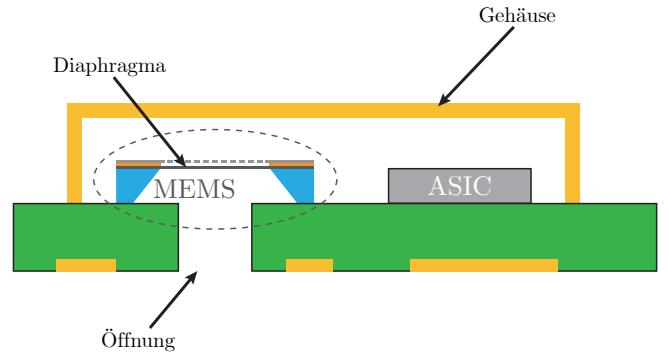
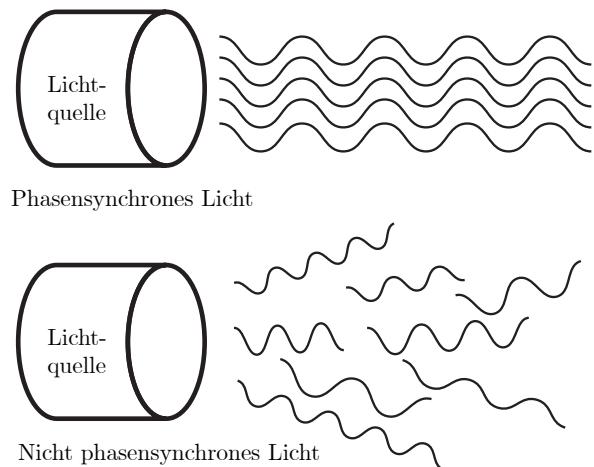


Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines MEMS-Mikrofons

²Application-specific integrated circuit. Zu deutsch: Anwendungsspezifische integrierte Schaltung.

3 Laser

Das Wort *Laser* ist ein Akronym und steht für *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, was übersetzt soviel heißt wie *Licht-Verstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung*.



3.1 Geschichte des Lasers

Im Jahre 1917 bildete die Entdeckung Einsteins, dass Atome neben ihrer spontanen Emission von Lichtquanten auch eine stimulierte Emission aufweisen, die Grundlage für die Entwicklung des Lasers. Elektronen springen bei der stimulierten Emission von einem höheren Energieniveau in einen tieferen Energieniveau, indem sie ein Photon abgeben und nicht mehr wie bei der spontanen Emission Photonen abgeben, wenn sie von einem tieferen in einen höheren Energieniveau angehoben werden. Um in den Ausgangszustand der stimulierten Emission zu gelangen, muss jedoch eine Inversion der Besetzung vorliegen. Die Anzahl der Elektronen in einem höheren Energieniveau muss also höher sein als die Anzahl der Elektronen in einem tieferen Energieniveau. Erste Methoden zur Umsetzung dieses Prinzips in die Wirklichkeit wurden jedoch erst 1954 veröffentlicht, wobei die stimulierte Emission zunächst mit Mikrowellen gelang. Diese Methode der Verstärkung und Erzeugung von Mikrowellen nannte man damals „Maser“, was für *Microwave amplification by stimulated emission of radiation* steht. 1958 kamen die ersten Überlegungen auf, das Maserprinzip auf das sichtbare Spektrum zu übertragen, was den amerikanischen Wissenschaftlern um Theodore Maiman im Jahr 1960 auch gelang. Sie führten ein Experiment durch, in dem die Verstärkung von Licht durch stimulierte Emission in einem Rubin-Kristall zum ersten Mal realisiert wurde [vgl. Rad10, Seite 1-2].

3.2 Anwendungsbereiche des Lasers

Anfänglich fand der Laser ausschließlich Anwendung für Justier- und Fluchtungsarbeiten [vgl. Rad10, Seite 63]. Dies änderte sich jedoch in den 1980er Jahren mit der Entwicklung von kostengünstigen und langlebigen Halbleiterlasern. Der Laser konnte somit erstmals in Alltagsgegenständen verbaut und unter anderem zum Lesen von Daten benutzt werden. Geräte wie CD-Player und Laserdrucker fanden so erstmals den Weg in die Haushalte der Menschen [vgl. Rad10, Seite 68]. Heutzutage sind Laser kaum mehr wegzudenken. Laser sind präsent in der Nachrichten- und Kommunikationstechnik, der Medizin sowie in der Materialbearbeitung [vgl. Rad10, Seite 76-117].

Dieses breite Einsatzfeld lässt sich auf die vielen nützlichen Eigenschaften des Lasers zurückführen.

3.3 Eigenschaften des Lasers

Ein Laser ist eine höchst monochromatische³ und phasensynchrone⁴ Lichtquelle, die Licht in gebündelter Form emittiert und auf einen sehr kleinen Punkt fokussiert. Die meisten Laser bewegen sich in einem Wellenlängenbereich von ultraviolet bis ins mittlere Infrarotspektrum. Davon sind aber nur Laser sichtbar die eine Wellenlänge von circa 400 nm bis circa 800 nm besitzen (vgl. Abbildung 4) [vgl. Glü05, Seite 32-46].

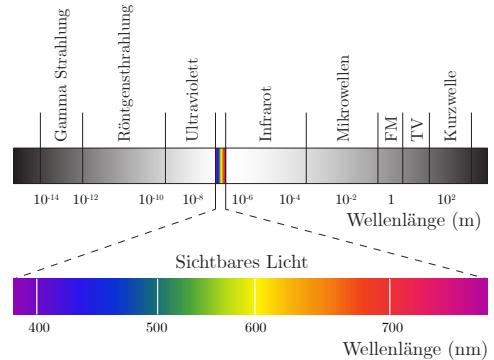


Abbildung 4: Wellenlängen im Bereich von 10^{-14} m bis 10^2 m

3.4 Funktionsweise und Aufbau

3.4.1 Besetzungsinverson und stimulierte Emission

Um einen Laser zu betreiben, müssen mehr Elektronen in einem höheren Energiezustand E_2 als in einem tieferen Energieniveau E_1 vorliegen (vgl. 3.1). Dieses Schema nennt man Besetzungsinverson, da die Anzahl der Elektronen in E_2 größer sein soll als die Anzahl der Elektronen in E_1 . Die Besetzungsinverson der Energieniveaus in Atomen ist die Voraussetzung für die stimulierte Emission.

Bei der stimulierten Emission wird ein Atom, das im Energieniveau E_2 ist, von einem Photon getroffen. Das Atom absorbiert das Photon jedoch nicht, sondern erzeugt ein zweites Photon mit der gleichen Energie, die das erste Photon hat. Es *verstärkt* somit das erste Photon. Abschließend fällt das Atom vom anfänglichen Energieniveau E_2 in den Energieniveau E_1 ab. Das neu erzeugte Photon hat nicht nur dieselbe Energie wie das erste Photon, sondern teilt auch seine Schwingungsphase, Bewegungsrichtung und Polarisation, was die Eigenschaften des Lasers in Abschnitt 3.3 erklärt [vgl. Lüt20].

³Die Wellenlänge des emittierten Lichts ist exakt dieselbe. Siehe Abbildung 4

⁴Praktisch für das Beobachten von Interferenzerscheinungen. Siehe Abbildung 3

3.4.2 Bestandteile eines Lasers

Der Laser besteht grundsätzlich aus drei Komponenten: dem Lasermedium, einer Pumpe und dem Resonator. Das Lasermedium ist zuständig für die Besetzungsinversion (siehe Abschnitt 3.4.1). Es gibt feste, flüssige und gasförmige Lasermedien. Gängige Materialien für Festkörperlaser sind unter anderem Rubin und Nd:YAG⁵. Bei Gaslasern werden vorrangig Gemische aus Helium-Neon oder CO₂ verwendet. Für das Anregen der Besetzungsinversion ist die Pumpe zuständig. Sie „pumpt“ Energie in das System, unter anderem durch Lichteinstrahlung, elektrische Vorgänge oder chemische Prozesse. Für das Ausrichten des Laserstrahls und um die stimulierte Emission aufrechtzuerhalten, ist der Resonator eines Lasers verantwortlich. Er besteht aus zwei parallelen Spiegeln,⁶ S₁ und S₂, wobei S₁ alles reflektiert und S₂ eine Durchlässigkeit von 1 % bis 50 % besitzt (siehe Abbildung 5). Durch diese Anordnung treffen die Laserstrahlen ständig auf das Lasermedium und lösen dadurch immer häufiger die stimulierte Emission aus. Der Laserstrahl wird dadurch immer intensiver und der Anlaufprozess des Lasers ist damit beendet [vgl. Glü05, Seite 7-9].

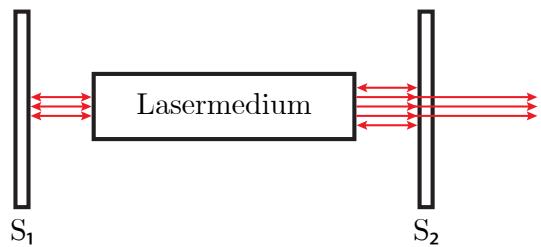


Abbildung 5: Anordnung von Resonator und Lasermedium

3.5 Modulation eines Lasers

Die Modulation von Lasern ist das Grundprinzip der Audio-Injektion in ein Mikrofon. Man unterscheidet dabei zwischen Amplitudenmodulation und Frequenzmodulation. Bei der Audio-Injektion sowie allgemein bei der optischen Datenübertragung, wird die Amplitudenmodulation verwendet, da man mit ihr mehr Zustände darstellen kann als nur binäre Informationen (1 und 0), wie es bei der Frequenzmodulation der Fall ist. Die Intensität eines Lasers kann man mit der Stromstärkenmodulation verändern⁷. Die Ausgangsleistung eines Lasers ist somit abhängig von der zugeführten Stromstärke.

⁵Neodym-dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat

⁶Hier nur zur Vereinfachung. In der Realität werden oft leicht konkav gekrümmte Spiegel benutzt, da diese die Justierung einfacher machen [vgl. Glü05, Seite 8].

⁷Bis zu einer Frequenz von ungefähr 10 MHz. Bei höheren Frequenzen ändern sich die Charakteristika der Intensitätsmodulation von Lasern [vgl. Pet88, Seite 78].

4 Sprachassistenten

Als Sprachassistenten bezeichnet man Geräte, mit denen der Mensch allein durch Sprache interagieren kann. Die Verbreitung und die Beliebtheit von Sprachassistenten steigt stark an, wie in der Einleitung schon beschrieben wurde.

4.1 Funktionsweise eines Sprachassistenten am Beispiel von Alexa

Amazons Sprachassistent namens „Alexa“ hat mehrere Mikrofone verbaut, um Sprache im Raum gut erfassen zu können, wobei die Anzahl der verbauten Mikrofone je nach Modell und Hersteller des Smart Speakers variiert. Diese Mikrofone warten darauf, dass ein Signalwort (z.B. „Alexa“ oder „Echo“) gesagt wird. Nachdem dieses Signalwort erkannt wurde, wird der dem Signalwort nachfolgende Befehl an einen Server von Amazon geschickt. Dieser Befehl wird auf dem Server gespeichert und verarbeitet. Die Verarbeitung erfolgt durch eine künstliche Intelligenz, die durch *Natural Language Processing*⁸ den Befehl verstehen kann. Abschließend wird eine Antwort vom Server an Alexa zurückgeschickt. Diese *serverseitige* Verarbeitung wird bei den meisten Sprachassistenten verwendet, da eine *interne* Verarbeitung der Befehle sehr teure Hardware voraussetzen würde.

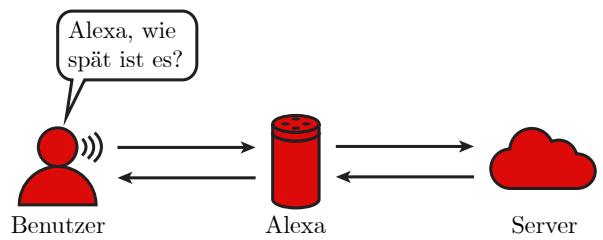


Abbildung 6: Sprachbefehl an Amazon Alexa

4.2 Schwächen von Sprachassistenten

Sprachassistenten haben neben ihren vielen Vorteilen allerdings auch einiges an Schwächen vorzuweisen. Zu diesen zählt vor allem die korrekte Erkennung von Sprache: Eine Gruppe von Forschern der Ruhr-Universität Bochum und des Bochumer Max-Planck-Instituts für Sicherheit und Privatsphäre hat 2020 die Spracherkennungssoftware von elf verschiedenen Smart Speakern untersucht, indem sie die Geräte 16 Tage lang mit TV-Serien und Nachrichten beschallten [vgl. Eck20]. Dabei kam es zu rund 735 fehlerhaften Erkennungen des Signalworts, das dafür zuständig ist, dass der Smart Speaker aus seinem passiven Modus aufwacht und versucht, das Gehörte zu verarbeiten. Dabei sollen Wörter, die einen ähnlichen Klang wie das Signalwort haben, zu Problemen mit der Spracherkennung geführt haben.

⁸Eine Technik, mit der Computer menschliche Sprache verstehen und verarbeiten können.

5 Experimente zur Untersuchung des thermoakustischen Effekts eines MEMS-Mikrofons

5.1 Sicherheitsvorkehrungen

Um die Sicherheit während des Projekts dauerhaft zu gewährleisten, wurden für die Durchführung ausschließlich Laser mit einer Leistung von 1mW verwendet (Laserklasse 2), da diese bei kurzem direkten Blickkontakt zu keiner dauerhaften Schädigung der Netzhaut führen [vgl. Wür07]. Außerdem wurde zusätzlich eine Laserschutzbrille verwendet.

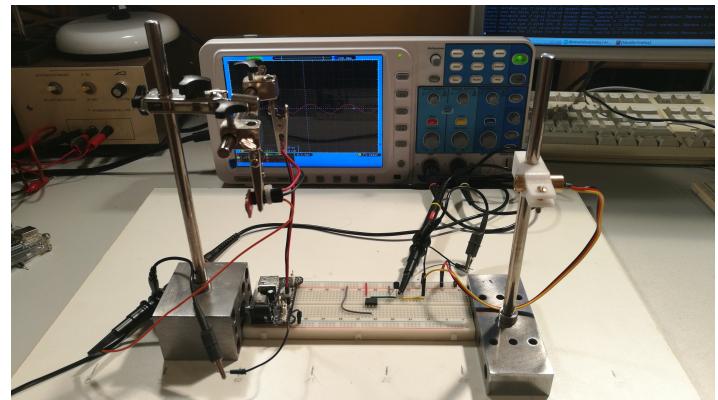


Abbildung 7: Versuchsaufbau mit ATtiny13a

5.2 Hypothese

Die Hypothese ist, dass MEMS-Mikrofone auf Lichteinstrahlung reagieren, da sich durch leichte Änderungen der Temperatur am Eingang des MEMS-Mikrofons leichte Druckänderungen ergeben, welche zur Folge haben, dass sich die Membran des MEMS bei Bestrahlung von Licht erst ausdehnt und anschließend wieder zusammenzieht. Das Ziel dieser Experimente ist es, die Hypothese zu untermauern.

5.3 Verwendete Komponenten

Der Versuch besteht im Wesentlichen aus zwei Komponenten: einem Laser und einem MEMS-Mikrofon. Als Laser wird ein 650 nm roter Punktscanner verwendet, da er eine angegebene optische Leistung von 1 mW besitzt. Gewählt wurde der Laser, da er einen relativ kleinen Fokus von 2 mm bei einem Abstand von 1 m hat und seine schwache Leistung für das menschliche Auge bei kurzem Blickkontakt bei weitem nicht so gefährlich ist als ein Laser mit einer höheren Leistung. Die Wellenlänge von 650 nm ist aufgrund seiner Erschwinglichkeit und Verfügbarkeit im Gegensatz zu Lasern mit anderen Wellenlängen gewählt worden. Zusätzlich ist der Laser über ein drittes Kabel bis 200 kHz digital modulierbar, wenn eine Spannung von 5 V an dieses Kabel angelegt wird [vgl. Gmb20].

Das MEMS-Mikrofon des Typs ADMP401 ist ebenfalls hauptsächlich wegen seiner Erschwinglichkeit und seiner breiten Verfügbarkeit ausgewählt worden. Die aufnehmbaren Frequenzen liegen in einer Spanne von 60 Hz bis 15 kHz [vgl. Dev12, Seite 3].

Um Fehlerquellen wie das Verwackeln des Laserstrahls zu vermeiden, wird der Laser

und das Mikrofon mithilfe einer selbst angefertigten 3D-gedruckten Klemme an zwei sich gegenüberstehenden schweren Ständern aus Metall befestigt (siehe Abbildung 7). Durch diesen Aufbau muss der Laser auch nicht nach jedem Versuchsdurchgang neu auf das MEMS-Mikrofon ausgerichtet werden.

Der Laser wird mit einer eigens entworfenen minimalistischen Schaltung, die aus einem Transistor und einem Mikrocontroller (ATtiny 13A) besteht, auf 1 Hz gepulst. Der Mikrocontroller erzeugt den 1 Hz Puls mit folgendem Programmcode:

```

1 int outputPin = 4;                      // ATtiny Bein 3
2 long period = 1000;                     // Frequenz in ms
3
4 void setup() {
5   pinMode(outputPin, OUTPUT);           // Pin 4 auf OUTPUT setzen
6 }
7
8 void loop() {
9   digitalWrite(outputPin, HIGH);        // Pin 4 auf HIGH setzen
10  delay(period);                    // Wartezeit
11  digitalWrite(outputPin, LOW);       // Pin 4 auf LOW setzen
12  delay(period);
13 }
14

```

Code 1: C++ Programmcode für den Puls-Betrieb des Lasers

In einem kleinen Vorexperiment wurde so ermittelt, ob das MEMS-Mikrofon überhaupt auf den Laser reagiert. Im Diagramm dieser Messung (Abbildung 8) erkennt man deutliche Spannungsspitzen in regelmäßigen Abstand von 1 s. Da die Frequenz vorher im Programmcode (siehe Code 1) auf 1 Hz gesetzt wurde kann man davon ausgehen, dass der Laser die Spannungsschwankungen des MEMS-Mikrofons verursacht hat.

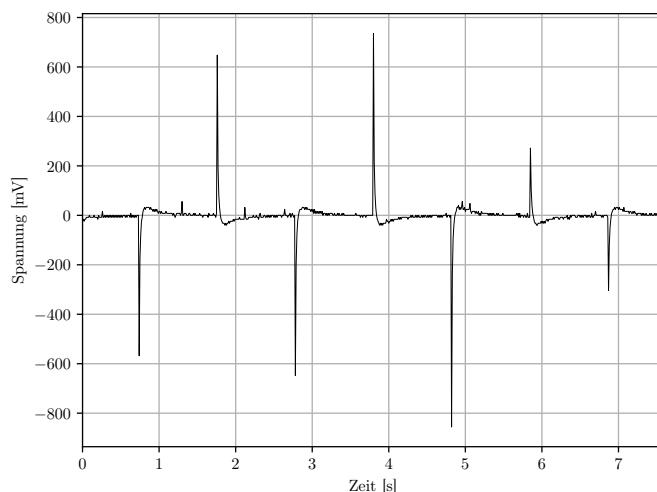


Abbildung 8: Oszilloskop Messung vom MEMS-Mikrofon

5.4 Experiment 1: Charakterisierung des MEMS-Mikrofons

5.4.1 Aufbau des Experiments

In dem Experiment wird jeweils eine Frequenz über den Lautsprecher eines Smartphones ausgegeben. Der Lautsprecher des Smartphones und das Mikrofon haben bei den Messungen immer einen Abstand von 10 cm. Für jede ausgegebene Frequenz wird, nach einer zehn sekündigen Wartezeit damit sich das MEMS-Mikrofon auf die Frequenz einpendeln kann, die maximale Ausgangsspannung V_{max} des Mikrofons auf dem Oszilloskop abgelesen. V_{max} wird hierbei über die eingebaute Funktion des Oszilloskops abgelesen, sodass keine Messfehler durch ungenaues Ablesen entstehen können. Es werden insgesamt elf Messungen mit Frequenzen von 500 Hz bis 5500 Hz in einem Abstand von 500 Hz durchgeführt.

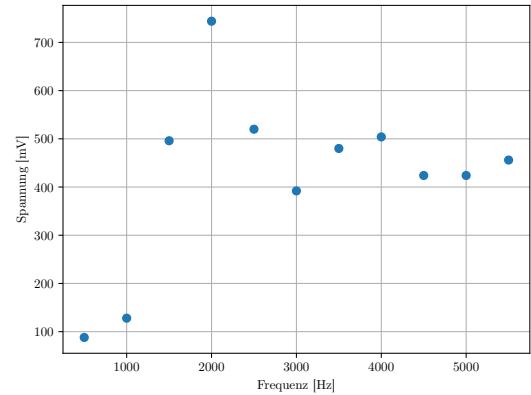


Abbildung 9: Diagramm zur Darstellung von der Ausgangsspannung des MEMS-Mikrofons ADMP401 in Abhängigkeit von Frequenzen im Bereich von 500 Hz bis 5500 Hz

5.4.2 Auswertung

Wenn man die Ausgangsspannung in Abhängigkeit der Frequenz in einem Diagramm (Abbildung 9) darstellt, lässt sich erkennen, dass das MEMS-Mikrofon des Typs ADMP401 seine größte Ausgangsspannung V_{max} bei Frequenzen im Bereich von 1500 Hz bis 2500 Hz erreicht. Außerdem ist festzustellen, dass die Ausgangsspannung bei 500 Hz im Vergleich zu den anderen Werten sehr niedrig ist, was zu erwarten war, da diese Frequenz vom menschlichen Gehör eher leise wahrgenommen wird. Interessant ist jedoch, dass Frequenzen im höheren Bereich unterschiedlich vom Mikrofon aufgefasst werden, entgegen der Erwartung, dass eine höhere Frequenz eine höhere Ausgangsspannung liefert.

5.5 Experiment 2: Reagiert das MEMS-Mikrofon auf einen 1 mW-Laser?

5.5.1 Aufbau des Experiments

In dem Experiment stehen sich der Laser und das MEMS Mikrofon in einem Abstand von 15 cm gegenüber. Der Laserpunkt ist dabei immer so genau wie möglich auf die Mitte der Öffnung des MEMS-Mikrofons gerichtet. Die Größe des Laserpunkts wird durch Verstellen der Linse am Laser vergrößert. Es werden sieben Messungen durchgeführt mit Punktdurchmessern von 0,5 mm bis 12 mm. Die Messungen erfolgen wieder

über die eingebaute V_{max} -Funktion des Oszilloskops nach einer Wartezeit von zehn Sekunden.

5.5.2 Auswertung

Das Diagramm dieser Messreihe (Abbildung 10) zeigt an, dass die Ausgangsspannung des MEMS-Mikrofons mit der Vergrößerung des Laserpunkt durchmessers sinkt. Dass die Steigung der Funktion einen negativen Wert hat wurde erwartet, da das Laserlicht durch die Vergrößerung des Punktdurchmessers an Intensität verliert. Geht man davon aus, dass die Leistungsdichte mit der Formel

$$\text{Leistungsdichte} \left[\frac{W}{cm^2} \right] = \frac{250}{d^2} \cdot \text{Leistung}$$

berechnet wird [vgl. Hab12], kommt man für einen Laserpunkt durchmesser von $d = 12\text{ mm}$ auf eine Leistungsdichte von $0,0017 \frac{W}{cm^2}$. Die Leistungsdichte für einen Laserpunkt durchmesser von $d = 0,5\text{ mm}$ beträgt hierbei $0,5 \frac{W}{cm^2}$. Dieses Verhalten stützt die Hypothese, dass das MEMS-Mikrofon auf den Laser wegen eines thermoakustischen Effekts reagiert. Von einem linearen Verlauf der Funktion kann jedoch nicht ausgegangen werden, da die Funktion für $x \rightarrow 0$ nicht negativ werden kann. Die Messungen sollten sich daher durch eine gebrochen-rationale Funktion beschreiben lassen. Mithilfe von `scipy.optimize` und Python ergibt sich ein Fit der folgenden Form:

$$f(x) = \frac{a}{x^b} = \frac{402,9}{x^{0,4}}$$

Mehr und bessere Messwerte könnte man mit einem Verfahren bekommen, das eine genauere Einstellung des Laserpunkt durchmessers erlaubt, wie zum Beispiel eine software gesteuerte Linse.

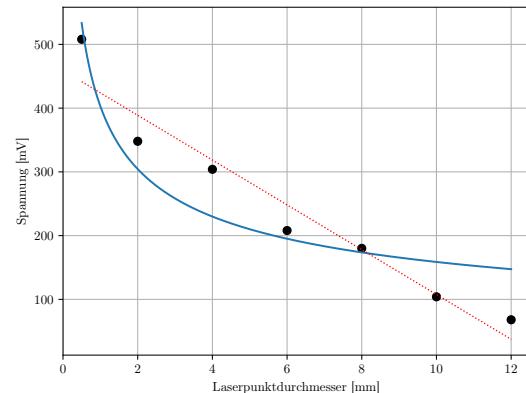


Abbildung 10: Ausgangsspannung des MEMS-Mikrofons in Abhängigkeit der Laserpunktgröße eines 1 mW Lasers. Rot: linearer Fit; Blau: gebrochen-rationaler Fit.

5.6 Experiment 3: Reagiert ein MEMS-Mikrofon auf eine Glühbirne?

5.6.1 Aufbau des Experiments

Um zu belegen, dass ein MEMS-Mikrofon auf Lichteinstrahlung reagiert, wird das letzte Experiment, anstatt mit einem Laser, der gebündeltes Licht mit gleicher Wellenlänge abgibt, mit einer handelsüblichen weißen 40 W Glühbirne durchgeführt. Die Glühbirne steht dem Mikrofon in einem Abstand von 15 cm gegenüber (siehe Abbildung 11). Dabei wird die Lampe in der ersten Messung in einem regelmäßigen Abstand mit einem Stück Alufolie abgedeckt und in der zweiten Messung nicht.

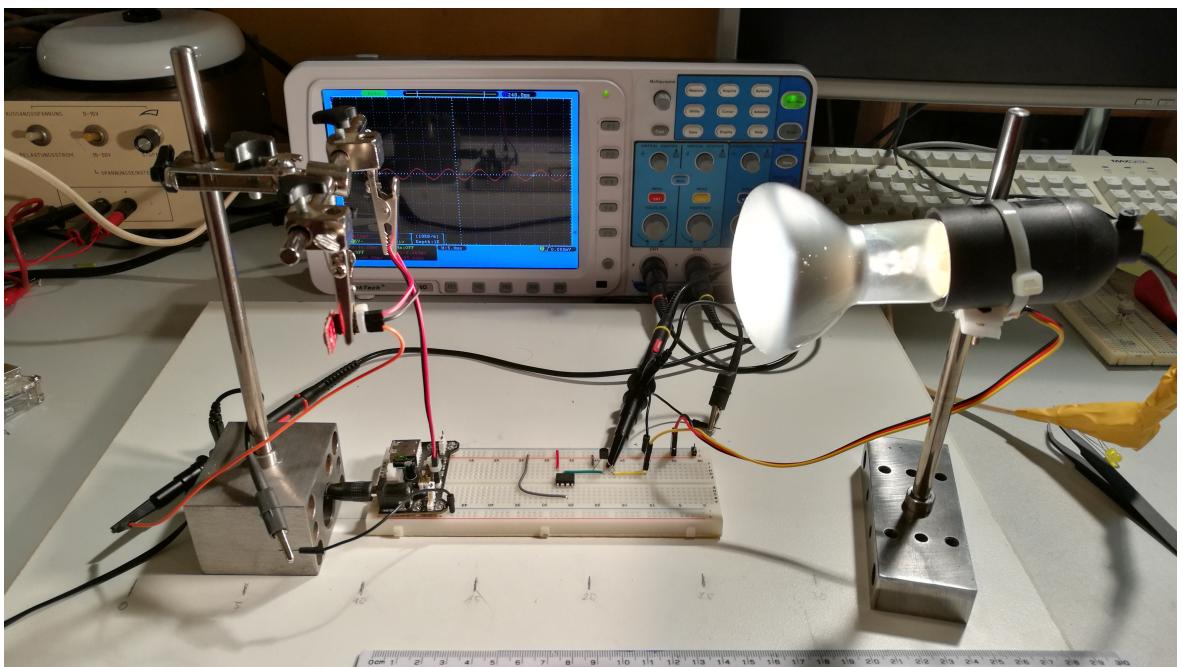


Abbildung 11: Versuchsaufbau mit 40W Lampe statt Laser

5.6.2 Auswertung

Man erkennt deutliche Spannungsspitzen und -tiefen in einem regelmäßigen Abstand im oberen Diagramm (Abbildung 12). Dieses Verhalten beweist, dass das MEMS-Mikrofon nicht nur auf monochromatisches und kohärentes Licht, sondern auch auf Licht mit vielen verschiedenen Wellenlängen reagiert. Im unteren Diagramm (Abbildung 12) ist eine Sinusfunktion mit einer Frequenz von 100 Hz zu sehen, welche durch bloßes Beleuchten des MEMS-Mikrofons mit der Lampe erzeugt wird.

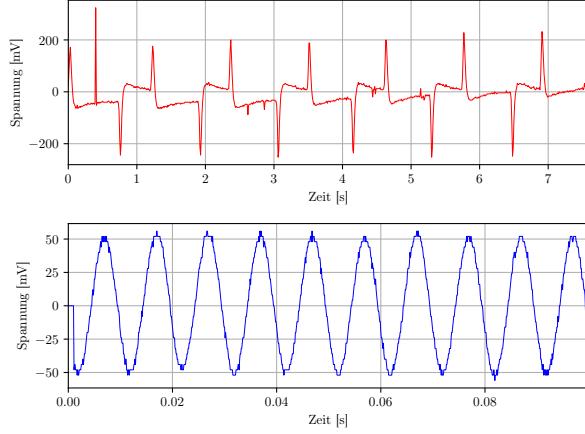


Abbildung 12: Reaktion des MEMS-Mikrofons auf eine Glühbirne. Oben mit Abschirmen der Lampe durch Alufolie, unten ohne.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde mit drei Experimenten dargestellt, dass MEMS-Mikrofone auf Licht reagieren. Im ersten Experiment wurde der Charakter des MEMS-Mikrofons untersucht, wobei sich herausstellte, dass das MEMS-Mikrofon seine größte Sensitivität bei 2000 Hz besitzt. Experiment 2 legte die Abhängigkeit der Ausgangsspannung am MEMS-Mikrofon vom Durchmesser des Laserpunkts dar, wobei die Ausgangsspannung mit zunehmendem Durchmesser des Laserpunkts abnimmt. Im letzten Experiment wurde der Laser durch eine Glühbirne ersetzt und der thermoakustische Effekt aufgezeigt. Demzufolge können Smart Speaker und andere Geräte durch diesen thermoakustischen Effekt manipuliert werden, da sie MEMS-Mikrofone verbaut haben.

Der thermoakustische Effekt stellt somit ein relevantes Sicherheitsrisiko für Geräte dar, die MEMS-Mikrofone verbaut haben. Eine mögliche Lösung für dieses Problem wäre es, mehrere MEMS-Mikrofone zu verbauen, die nur reagieren, wenn sie ein ähnliches Signal empfangen. Eine weitere Gegenmaßnahme wäre der Schutz des MEMS-Mikrofons vor direkter Lichteinstrahlung durch eine geeignete Barriere, während gleichzeitig sichergestellt wird, dass akustische Wellen die Membran noch erreichen können [vgl. Sug+19, Kapitel VII].

Die Audio-Injektion mit Lasern birgt jedoch nicht nur Potenzial für kriminelle Vorhaben, sondern auch für technologische Anwendungen. Sie könnte beispielsweise benutzt werden um Audio-Signale direkt ins menschliche Ohr zu injizieren, wie Forscher des *Massachusetts Institute of Technology* im Jahr 2019 herausfanden [vgl. SKW19].

Trotz dieses bekannten Sicherheitsrisikos werden Smart Speaker wahrscheinlich dennoch ihren Weg in die Haushalte der Menschen finden. Daher wird man sich auch weiterhin noch fragen: „Alexa, quo vadis?“

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [Cor17] Knowles Corporation. *Frequency Response and Latency of MEMS Microphones: Theory and Practice*. 2017. URL: <https://www.knowles.com/docs/default-source/default-document-library/frequency-response-and-latency-of-mems-microphones---theory-and-practice.pdf?sfvrsn=4> (besucht am 05.11.2020).
- [Dev12] Analog Devices. *Omnidirectional Microphone with Bottom Port and Analog Output*. 2012. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/obsolete-data-sheets/ADMP401.pdf> (besucht am 29.10.2020).
- [Eck20] Strozyk J.L. und Wirtz H. Eckert S. Köhler E. *Alexa, Siri & Co. Die lauschenden Lautsprecher*. 30. Juni 2020. URL: <https://www.tagesschau.de/investigativ/ndr/smart-speaker-101.html> (besucht am 06.11.2020).
- [Glü05] Dr.-Ing Markus Glück. *MEMS in der Mikrosystemtechnik*. 2005. DOI: 10.1007/978-3-663-10778-1.
- [Gmb20] Picotronic GmbH. *Produktinformationen "Laserfuchs ARD-LASER-MDI650-1-5(10x26)"*. 2020. URL: <https://www.laserfuchs.de/Laserfuchs-ARD-LASER-MDI650-1-5-10x26/70142167> (besucht am 30.10.2020).
- [Hab12] Ilan Haber. *A Shortcut for Calculating Laser Power Density*. 5. Juli 2012. URL: <https://www.ophiropt.com/blog/laser-measurement/a-shortcut-for-calculating-power-density-of-a-laser-beam/> (besucht am 04.11.2020).
- [Lüt20] Dr. Henneke Lütgerath. *Stimulierte (induzierte) Emission*. 2020. URL: <https://www.leifiphysik.de/atomphysik/laser/grundwissen/stimulierte-induzierte-emission> (besucht am 02.11.2020).
- [Pet88] Klaus Petermann. *Laser Diode Modulation and Noise*. 1988. DOI: 10.1007/978-94-009-2907-4.
- [Rad10] Prof. Dr. Wolfgang Radloff. *Laser in Wissenschaft und Technik*. 2010. DOI: 10.1007/978-3-8274-2428-0.
- [Sug+19] Takeshi Sugawara u. a. „Light Commands: Laser-Based Audio Injection Attacks on Voice-Controllable Systems“*. In: (2019).
- [SKW19] Ryan M. Sullenberger, Sumanth Kaushik und Charles M. Wynn. „Photo-acoustic communications: delivering audible signals via absorption of light by atmospheric H₂O“. In: *Opt. Lett.* 44.3 (Feb. 2019), S. 622–625. DOI: 10.1364/OL.44.000622. URL: <http://ol.osa.org/abstract.cfm?URI=ol-44-3-622>.

- [Ten19a] F. Tenzer. *Anzahl der jährlichen Patentanmeldungen weltweit im Bereich IoT von 2009 bis 2018*. 27. Juni 2019. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1021375/umfrage/anzahl-der-iot-patentanmeldungen-weltweit/> (besucht am 20.10.2020).
- [Ten19b] F. Tenzer. *Statistiken zum Thema Digitale Sprachassistenten*. 6. Dez. 2019. URL: <https://de.statista.com/themen/4271/digitale-sprachassistenten/> (besucht am 20.10.2020).
- [Wer04] Patrick Werner. „Quanteneffekte in nanomechanischen Systemen“. Juni 2004. URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bvb:19-25438>.
- [Wür07] Universität Würzburg. *Übersicht der Laserklassennach DIN EN 60825-1 (2007)*. 2007. URL: https://www.uni-wuerzburg.de/fileadmin/32070000/Arbeitssicherheit_und_Unfallverhuetung/Beauftragte/LaSchBe/Laserklassen.pdf (besucht am 07.11.2020).

7 Anhang

Sämtliche Programme, Diagramme, Messdaten und Grafiken, die im Rahmen dieser Arbeit angefertigt wurden, sind in einem Github Repository abrufbar.

Link: <https://github.com/tomg404/WSeminar19-21>

8 Danksagungen

Für die Unterstützung bei meinen Experimenten bedanke ich mich bei Daniel Aichinger vom Erlanger SchülerForschungsZentrum (ESFZ).

Ein herzliches Dankeschön auch an meinen Kursleiter Herrn Dr. Stefan Bärthlein für das Bereitstellen eines Lasers und beim Sponsorpool Bayern für eine Förderzusage meines Projekts im Rahmen einer Anmeldung für JugendForscht.

9 Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die Seminararbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ort, Datum

Unterschrift des Schülers