



VIBRATIONSSIMULATIONS- SYSTEM FÜR MRT

Bachelorarbeit Medizintechnik
Hochschule Luzern – Technik & Architektur, HS 18

Markus Kästli
7. Semester

Industriepartner

Philipp Stämpfli
Psychiatrische Universitätsklinik Zürich

Michael Meier
Universitätsklinik Balgrist

Betreuer

Philipp Schütz
Damian Gwerder

Bachelor-Thesis an der Hochschule Luzern - Technik & Architektur

Titel	Vibrationssimulationssystem für MRT
Diplomandin/Diplomand	Kästli, Markus
Bachelor-Studiengang	Bachelor Medizintechnik
Semester	HS18
Dozentin/Dozent	Schütz, Philipp
Expertin/Experte	Jerjen, Iwan

Abstract Deutsch

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Vibrationssimulationssystems für Magnetresonanztomographen. Dieses wird zur Untersuchung der Schmerzzentren im menschlichen Gehirn eingesetzt. Das Ziel ist es, ein MR-kompatibles Funktionsmuster zu entwickeln, welches die geforderten Werte in Auslenkungsamplitude und Frequenz erreicht. Nach der Entwicklung wird ein Funktionsnachweis erbracht. Als Grundlage dienen die Ergebnisse der durchgeführten Literaturrecherche. Ausgehend von diesen wird der optimale Lösungsansatz ausgesucht und in ein Funktionsmuster umgesetzt. Zur Validation der Anforderungen dienen Messungen. Es zeigt sich, dass die entwickelten Funktionsmuster die Anforderungen nicht ganz erfüllen. Bei Ansteuerung mit tiefen Frequenzen erreichen sie die geforderten Auslenkungsamplituden. Bei hohen Frequenzen erreicht nur ein Muster, in einer bestimmten Konfiguration, die Werte. Die Ansteuerung des Systems erfolgt über Ventile, welche mit einer Software gesteuert werden. Die Entwicklungen zeigen, dass es möglich ist mit bestehenden Lösungsansätzen ein Vibrationssimulationssystem zu bauen. Für die Entwicklung des optimalen Designs braucht es weitere Messdaten.

Abstract Englisch

In this report we investigate the development of a vibration simulator for magnetic resonance imaging (MRI) studies. The device will be used to investigate the pain center in the human brain. The goal of the project is to develop a prototype that can generate the necessary displacement amplitude and frequency. After the development phase, the prototype will be validated by performing several measurements. First, we conduct a literature review to choose the most promising approach and build a prototype model which is then tested by measurements. The developed models meet the requirements partly. At low frequencies the desired displacement amplitude is reached. However, at high frequencies, the device only performs well in with certain configuration. The device is driven by valves controlled through a computer program. The work in this project has shown, that it is possible to construct vibration simulators using state of the art methods. However, further measurements are required to find the optimal design

Ort, Datum Horw, 07.01.2019

© Markus Kästli, Hochschule Luzern – Technik & Architektur

Alle Rechte vorbehalten. Die Arbeit oder Teile davon dürfen ohne schriftliche Genehmigung der Rechteinhaber weder in irgendeiner Form reproduziert noch elektronisch gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Sofern die Arbeit auf der Website der Hochschule Luzern online veröffentlicht wird, können abweichende Nutzungsbedingungen unter Creative-Commons-Lizenzen gelten. Massgebend ist in diesem Fall die auf der Website angezeigte Creative-Commons-Lizenz.

Inhalt

1.	Einleitung.....	1
1.1.	Ausgangslage	1
1.2.	Zielsetzung.....	1
1.3.	Literaturrecherche.....	2
2.	Material und Methoden.....	3
2.1.	Funktionsmuster.....	3
2.1.1.	Exzentrische Masse.....	3
2.1.2.	Presslufthammer	4
2.2.	Steuerung des Systems.....	6
2.2.1.	Hardware	6
2.2.2.	Software.....	7
2.3.	Auslenkungsmessungen	8
2.3.1.	Messaufbau und Vorgehen.....	8
2.3.2.	Erwartungswerte	9
3.	Ergebnisse	11
3.1.	Technologievergleich.....	11
3.2.	Funktionsmuster Design.....	12
3.2.1.	Exzentrische Masse.....	12
3.2.2.	Presslufthammer	12
3.3.	Resultate Auslenkungsmessungen	13
3.3.1.	Exzentrische Masse.....	13
3.3.2.	Presslufthammer	16
4.	Diskussion.....	20
	Danksagung.....	22
	Glossar	23
	Quellenverzeichnis.....	24
	Gedruckte Quellen.....	24
	Internetquellen.....	24
	Abbildungsverzeichnis.....	25
	Tabellenverzeichnis.....	25
	Anhang.....	26
	Anhang A: Messanleitungen	26
	Anhang B: Technische Zeichnungen	30
	Anhang C: Python Sourcecode.....	41
	Anhang D: Datenblätter.....	45

1. Einleitung

In diesem Kapitel wird die Ausgangslage sowie die Zielsetzung des Projekts dargelegt. Des Weiteren werden die gefundenen Lösungsansätze der Literaturrecherche aufgezeigt.

1.1. Ausgangslage

In der heutigen Gesellschaft sind Rückenschmerzen eine häufig auftretende Krankheit. Rund 80 Prozent der erwachsenen Bevölkerung leidet im Verlauf ihres Lebens unter Rückenschmerzen. Diese können akut, aber auch chronisch auftreten (rheumaliga.ch, o.J.). Um diese Schmerzen besser zu verstehen und zu behandeln, ist es wichtig, zu wissen, wo sie im menschlichen Gehirn entstehen. Mit dieser Fragestellung setzen sich Wissenschaftler der Universitätsklinik Balgrist in einem Projekt auseinander.

Für die Erkennung der Schmerzzentren im Gehirn wird die funktionale Magnetresonanztomographie verwendet. Die Rezeptoren im Rücken werden, während der Patient im Magnetresonanztomographen (MRT) liegt, angeregt. Die Anregung findet durch Applikation von Vibration an einzelnen Wirbelkörpern statt. Die Hochschule Luzern entwickelt in Zusammenarbeit mit der Universitätsklinik Balgrist, ein solches MRT-kompatibles Vibrationssimulationssystem. Dieses bringt, nach einem vorgegebenen Protokoll, eine Vibration an einzelnen Wirbeln an.

1.2. Zielsetzung

Das Vibrationssimulationssystem (VSS) soll im Rahmen dieser Bachelordiplomarbeit zu einem funktionsfähigen Demonstrator erweitert, und dessen Funktionstüchtigkeit nachgewiesen werden. Dabei ist das System durch folgende Anforderungen definiert:

- Das System ist MRI-kompatibel, das heisst eine Messung mit dem Gerät im Isozentrum ist möglich.
- Der Systemkopf vibriert mit einer Frequenz von 20 bis 120 Hertz.
- Eine Amplitude von circa 1.5 Millimeter bei 20 Hertz und 0.5 Millimeter bei 80 Hertz kann erreicht werden. Im Idealfall ist diese Amplitude einstellbar.
- Die Grundfläche des bestehenden Systems wird nicht vergrössert.

Die Entwicklung des Systems wird in den Schritten Literaturrecherche, Prototypenbau und Systemtest durchgeführt. Während der Literaturrecherche ist das Ziel herauszufinden, ob und welche Lösungsansätze bereits zu dieser Problemstellung vorhanden sind. Die gefundenen Ideen werden während des Prototypenbaus in Funktionsmuster umgesetzt. In der letzten Phase werden die Anforderungen an diese Funktionsmuster mit Messungen validiert.

1.3. Literaturrecherche

Die Literaturrecherche soll zeigen, welche Verfahren bereits angewendet werden, um Vibrationen in einem MRT zu erzeugen. Zusätzlich werden Vibrationserzeugungsarten aus der Industrie untersucht. Die Recherche brachte eine breite Auswahl an Möglichkeiten hervor.

Ein gefundener Lösungsansatz bringt eine Membran durch Luftdruck in Schwingung. Der Luftdruck wird durch eine Doppelmembranpumpe erzeugt. Die Erzeugung findet ausserhalb des MR-Raums¹ statt. Die Luft wird über einen Schlauch zum MRT geführt (Golaszewski & Zschiegner et al., 2002). Eine weitere Möglichkeit ist die Ansteuerung eines Magnetventils über ein verstellbares Widerstands-Kondensator-Netzwerk. Die Ventile sind an Druckluft angeschlossen und erzeugen durch schnelles ein- bzw. ausschalten Schwingungen einer Latexmembran (Briggs et al., 2004). Die Erzeugung einer Vibration mittels eines Elektromotors ist ebenfalls möglich. Der Motor befindet sich ausserhalb des MR-Raums. Die Drehung wird über einen dünnen Kunststoffstab zum MRT geführt. Dort befindet sich ein Vibrationskopf mit einer exzentrischen Masse (Golaszewski & Siedentopf et al., 2002). Graham, Staines, Nelson, Plewes, und McIlroy (2001) beschreiben einen Ansatz, der sich die Lorenzkraft zu Nutzen macht. Dabei wird ein elektrischer Leiter mit an einem Stab mechanisch verbunden. Der Leiter wird von einem Strom durchflossen. Durch die Lorenzkraft wird er in Bewegung versetzt und mit ihm der Stab. Der piezoelektrische Effekt kann ebenfalls zur Vibrationserzeugung genutzt werden. Ein piezoelektrischer Schwinger wird mit einer Wechselspannung angeregt. Diese erzeugt Bewegung im Schwinger, welche durch schnellen Spannungswechsel zur Vibration wird (Harrington, Wright & Downs, 2000). Weiter kann auch ein Rotor mit exzentrischer Masse eine Vibration erzeugen. Der Rotor wird über eine Achse mit einem zylindrischen Gehäuse verbunden. Die Drehung des Rotors wird über Druckluft angeregt (Montant, Romaiguère & Roll, 2009). Ein Lösungsansatz aus dem Baugewerbe ist der Presslufthammer. Dieser verfügt über eine Kammer, welche durch einen beweglichen Bolzen in zwei Teile geteilt wird. Die beiden Kammerhälften können durch je ein Ventil mit Druckluft gefüllt werden. Durch das abwechslungsweise Füllen der Kammern bewegt sich der Bolzen auf und ab (ARD, 2011).

¹ Siehe Kapitel 2.2.

2. Material und Methoden

Das folgende Kapitel zeigt die Funktionsweise und den Aufbau der entwickelten Funktionsmuster. Weiter ist beschrieben, wie das VSS angesteuert und bedient wird. Im letzten Teil sind Messaufbau und Ablauf der durchgeführten Messungen beschrieben.

2.1. Funktionsmuster

Im Rahmen der Arbeit wurden zwei verschiedene Funktionsmuster entwickelt. Diese basieren auf verschiedenen Funktionsprinzipien. Die Beschreibung in Kapitel 3.1 zeigt, wieso diese Muster für die Weiterentwicklung gewählt wurden. In den folgenden Unterkapiteln sind diese Funktionsmuster beschrieben.

2.1.1. Exzentrische Masse

Die Erzeugung von Vibration in diesem Funktionsmuster basiert auf dem Prinzip einer exzentrischen Masse. An einem sich drehenden Körper wird eine Masse angebracht. Diese befindet sich nicht im Rotationszentrum, sondern leicht versetzt dazu, wie in Abbildung 1 dargestellt. Die Masse besteht aus einem dichteren Material als der rotierende Körper. Durch dieses exzentrische Gewicht, rotiert der ganze Körper unregelmässig und vibriert.

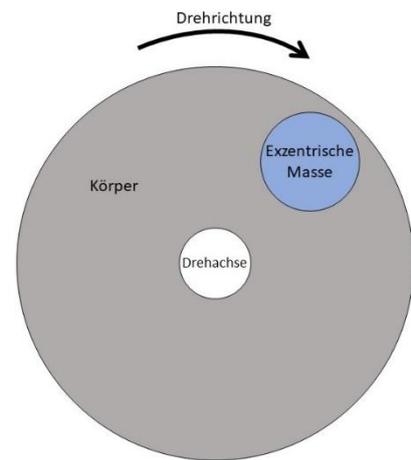


Abbildung 1: Prinzip der exzentrischen Masse

Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, besteht das Funktionsmuster aus vier Einzelteilen. Das Gehäuse, der Deckel und der Rotor bestehen aus Polyactid-Kunststoff (PLA). Sie wurden mit einem 3D-Drucker hergestellt. Das Gehäuse besitzt zwei Anschlüsse für die Druckluft. Einer ist für den Zufluss von Luft, der andere für den Abfluss. Die exzentrische Masse besteht aus Blei, da dieses eine sehr hohe Dichte von $11,34 \text{ g/cm}^3$ (wikipedia.org, 2004) hat. Eine zweite exzentrische Masse besteht aus Aluminium. Diese soll später bei den Messungen zum Vergleich dienen. Die Achse besteht aus einem Chromstahlstab, welcher an den Enden ein Aussengewinde besitzt. Auf diesen Gewinden sind Kunststoffmutter zur Befestigung angebracht.



Abbildung 2: Einzelteile des Funktionsmusters Exzentrische Masse

2.1.2. Presslufthammer

Das zweite Funktionsmuster bedient sich des Funktionsprinzips des Presslufthammers. Dieser besteht aus einem Drücker, welcher in ein Gehäuse eingebracht ist. Der Drücker unterteilt die Kammer in zwei Teile. Beide Teile können über ein Ventil mit Druckluft versorgt werden. Durch das Öffnen des oberen Ventils, strömt die Druckluft in die obere Kammer. Diese wird gefüllt und erzeugt Druck auf den Drücker. Durch diesen Druck wird er nach unten bewegt. Wenn die Bewegung nach unten abgeschlossen ist, wird das obere Ventil geschlossen und das untere geöffnet. Der Drücker verschiebt sich nach oben. Die Abbildung 3 zeigt diesen Vorgang schematisch. Wenn nun die Ventile schnell geschlossen beziehungsweise geöffnet werden, schwingt der Drücker auf und ab.

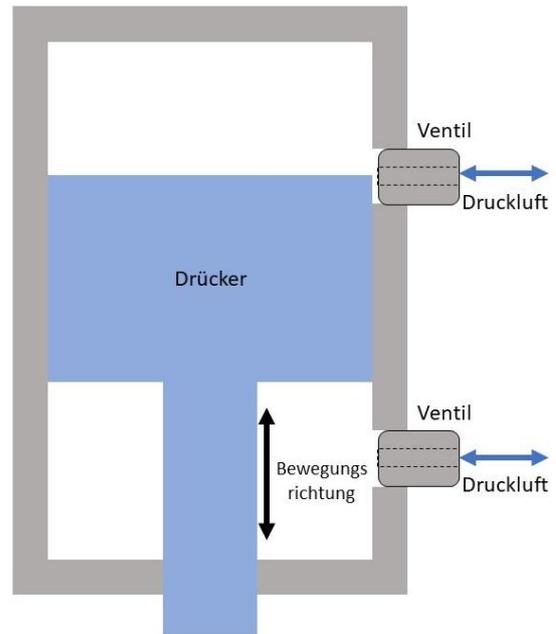


Abbildung 3: Funktionsprinzip des Presslufthammers

Das Funktionsmuster besteht aus fünf Teilen. Alle Teile sind aus PLA und sind mit einem 3D-Drucker hergestellt worden. Die Teile sind in Abbildung 4 zu sehen. Das Gehäuse besitzt zwei Steckanschlüsse, an welche ein schnellschaltendes Ventil angeschlossen wird. Der Drücker wird in das Gehäuse eingelassen und das Ganze mit dem Deckel verschlossen. Der Überwurf wird an der Unterseite des Gehäuses angebracht. Er dient dazu die Auslenkungsamplitude auf den Patienten, auf die gewünschten zwei Millimeter zu beschränken. Der Aufsatz wird mit einem Bajonettverschluss am Drücker befestigt. Dadurch kann die Kontaktfläche zum Patienten verändert werden.



Abbildung 4: Einzelteile des Funktionsmusters Presslufthammer. Herstellungsverfahren: 3D-Drucker

Eine weitere Version des Presslufthammers ist mit alternativen Herstellungsverfahren und Materialien produziert worden. Dieses besteht aus drei Einzelteilen. Das Muster ist mit den Fertigungsverfahren Fräsen und Drehen hergestellt. Alle Teile bestehen aus Polyoxymethylen-Kunststoff (POM). Die Abbildung 5 zeigt das Muster. Dieses Funktionsmuster hat prinzipiell den gleichen Aufbau wie das erste. Dementsprechend funktioniert es auch gleich.

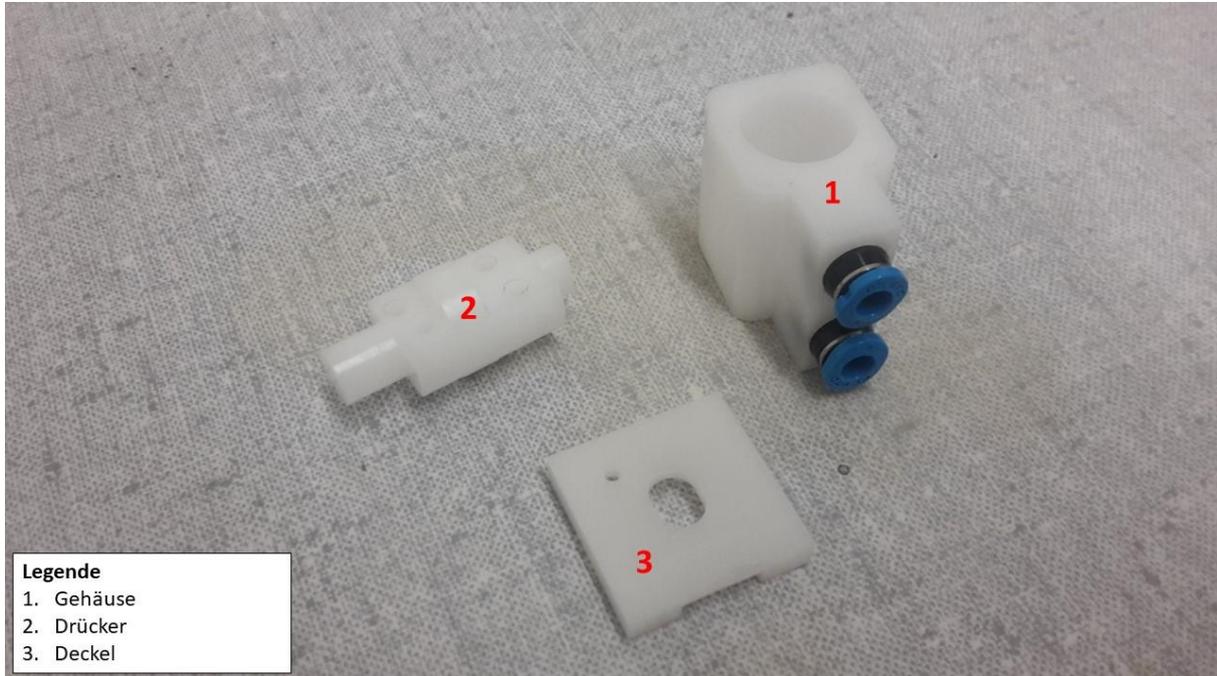


Abbildung 5: Einzelteile des Funktionsmusters Presslufthammer. Herstellungsverfahren: Fräsen, Drehen

2.2. Steuerung des Systems

Für die einwandfreie Funktion braucht der MRT ein homogenes Magnetfeld. Dieses Magnetfeld wird vom MRT selbst erzeugt. Allerdings kann die Homogenität durch äussere Einflüsse gestört werden. Um den MRT vor solchen Einflüssen zu schützen, werden die Geräte in einem abgeschirmten Raum betrieben. Dieser Raum wird auch als Faraday-Käfig, oder im Folgenden als MR-Raum bezeichnet. Die Steuerung des MRT erfolgt von ausserhalb, aus dem Kontrollraum. Dort befinden sich Computer und Software für die Steuerung und Überwachung des MRT. Die Signale für die Steuerung des VSS müssen also in den MR-Raum gebracht werden.

2.2.1. Hardware

Das VSS wird mittels Raspberry Pi (RPI), einem Ein-Chip-Computer, gesteuert. Dazu sind zwei RPI nötig. Einer dieser Computer befindet sich im Kontrollraum. Auf diesem läuft eine graphische Benutzeroberfläche (engl. graphical user interface, GUI), mit welcher der Benutzer das VSS steuern kann. Die Übertragung der Steuersignale erfolgt über Lichtwellenleiter. Mittels eines Adapters ist dieser mit den RPis verbunden. Im MR-Raum befindet sich das zweite RPI. Dieses steuert die Ventile an, welche mit dem VSS verbunden sind. Das zweite RPI, sowie die Ventile sind in einem separaten Faraday-Käfig eingeschlossen. Somit können diese im MR-Raum platziert werden, ohne das Magnetfeld zu stören. Die Druckluft für das VSS wird über Schläuche in den MR-Raum transportiert. Die Abbildung 6 bildet diesen Aufbau schematisch ab.

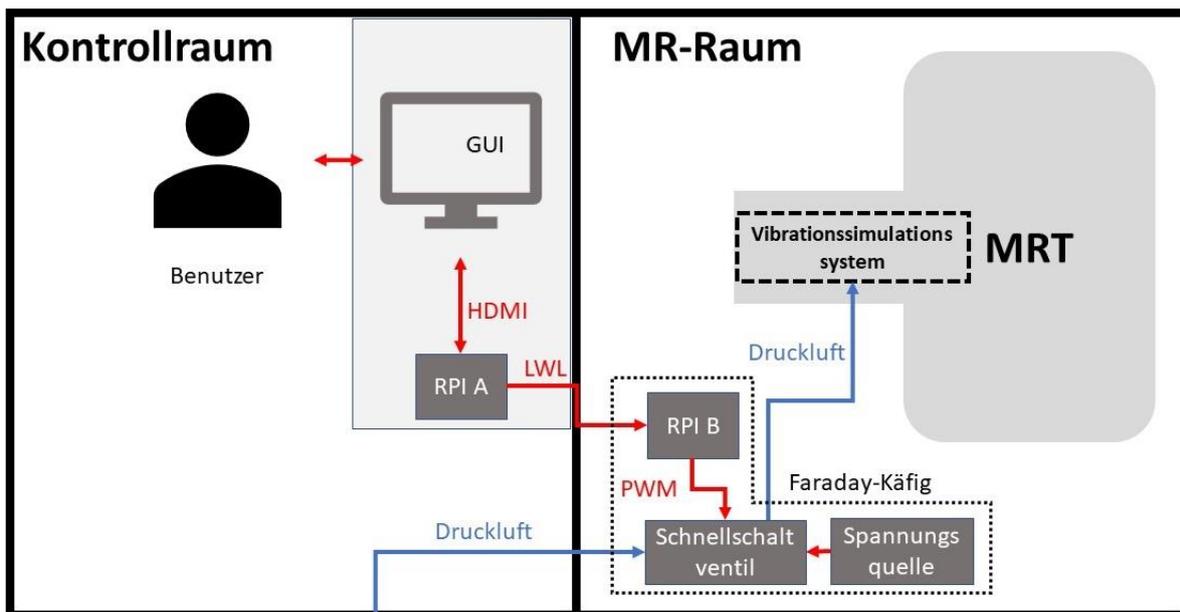


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Aufbaus und der Vernetzung der Hardware

Die verwendeten Ventile (MHE2, Festo) werden mit einem Rechtecksignal angesteuert. Dies kann allerdings nicht direkt vom RPi aus gemacht werden. Deshalb ist eine Verstärkerschaltung zwischen dem RPi und dem Schnellventil nötig. Diese Schaltung ist in Abbildung 7 dargestellt.

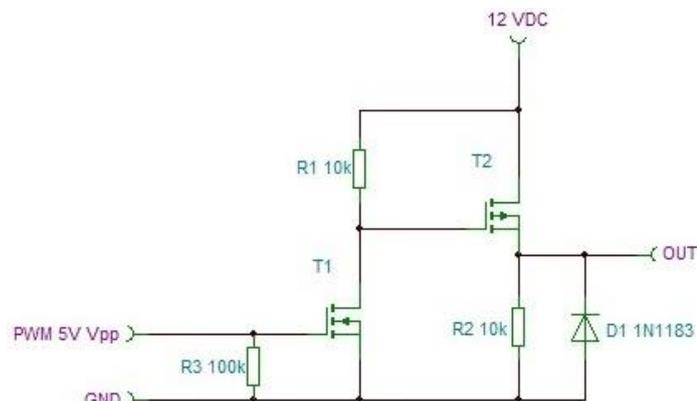


Abbildung 7: Elektronisches Schema der Verstärkerschaltung

2.2.2. Software

Für die beiden Raspberry Pis existiert je ein Softwareteil. Auf dem RPi im Kontrollraum läuft das GUI. Auf diesem kann der Benutzer Parameter für die Steuerung des VSS eingeben. Das zweite RPi im MR-Raum übernimmt die Umsetzung dieser Parameter. Die Ansteuerung des VSS funktioniert nach einem bestimmten Muster. Dabei erzeugt das VSS abwechselungsweise eine Vibration oder befindet sich im Ruhezustand. Diese Phasen heissen Stimulationsphase beziehungsweise Interstimulationsphase. Die Gesamtheit dieser Phasen heisst Steuerungszyklus. Die für die Anregung verwendeten Frequenzen sind durch eine Zufallsabfolge bestimmt. In dieser Zufallssequenz kommt eine Frequenz nicht mehr als dreimal hintereinander vor. In jedem Steuerungszyklus kommen zwei verschiedene Frequenzen zum Einsatz. Die Abbildung 8 bildet die verschiedenen Phasen ab.

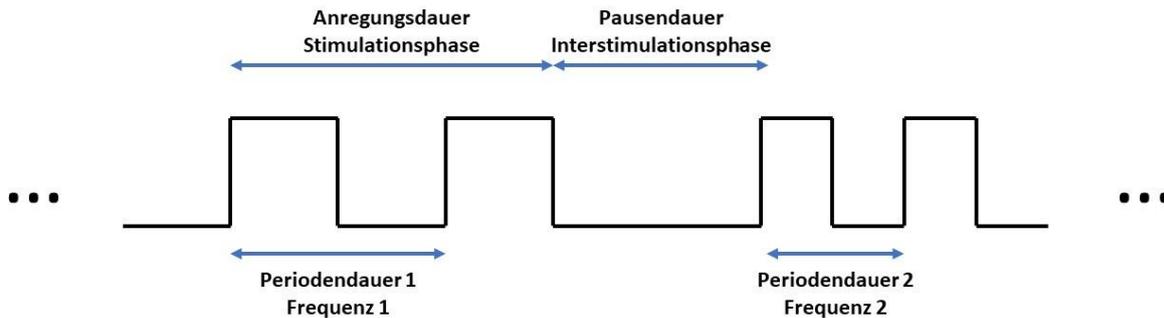


Abbildung 8: Prinzipieller Aufbau eines Steuerungssignals

Das RPi A im Kontrollraum (siehe Abbildung 6) verarbeitet die Eingaben des Benutzers. Beim Starten des Programms wird die graphische Benutzeroberfläche angezeigt. Diese funktioniert basierend auf Events. Den Knöpfen auf dem GUI sind Funktionen zugeordnet, welche beim Anklicken aufgerufen werden. Auf der Abbildung 9 ist das GUI ersichtlich. Der Benutzer kann folgende Einstellungen vornehmen:

- Anzahl Stimulationsphasen in einem Steuerungszyklus im Feld "Number of Stimuli".
- Die beiden Frequenzen für den Steuerungszyklus im Feld "Frequency 1" und "Frequency 2".
- Die Anregungsdauer im Feld "Stimulus Interval".
- Die Pausendauer im Feld "Interstimulus Interval".

Das GUI ist in englischer Sprache verfasst, da es im internationalen Forschungsumfeld benutzt wird. Der Start eines Steuerungszyklus erfolgt durch die Betätigung des Start-Knopfes. Durch Drücken des Stop-Knopfes wird der Zyklus abgebrochen.

Nachdem der Start-Knopf gedrückt worden ist, beginnt das Programm mit der Erstellung einer Zufallssequenz aus den gegebenen Frequenzen. Die Abbildung 10 zeigt das Struktogramm (Nassi-Shneiderman-Diagramm) zu dieser Unterfunktion. Nachdem die Sequenz erstellt ist, werden die Daten zum RPi im MR-Raum gesendet. Zu den gesendeten Daten gehören auch die restlichen Angaben des Benutzers. Die Übertragung erfolgt nach dem Transmission Control Protocol (TCP). Das TCP funktioniert mit sogenannten Sockets. Das Prinzip der Socket-

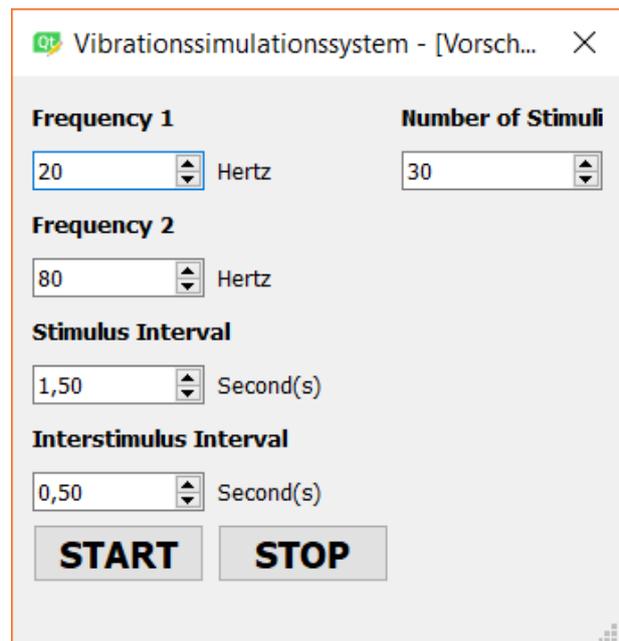


Abbildung 9: Graphische Benutzeroberfläche der Software

Kommunikation ist in Abbildung 11 dargestellt. Zur Übertragung in diesem Programm muss lediglich der Socket des Empfängers gebunden werden. Danach können die Daten gesendet werden. Für die Übertragung wandelt das Programm die Daten in die JavaScript Object Notation (JSON) um.

Zufallssequenz

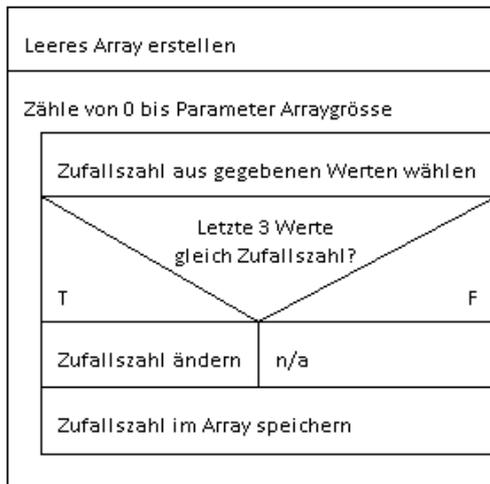


Abbildung 10: Struktogramm für die Erstellung einer Zufallssequenz

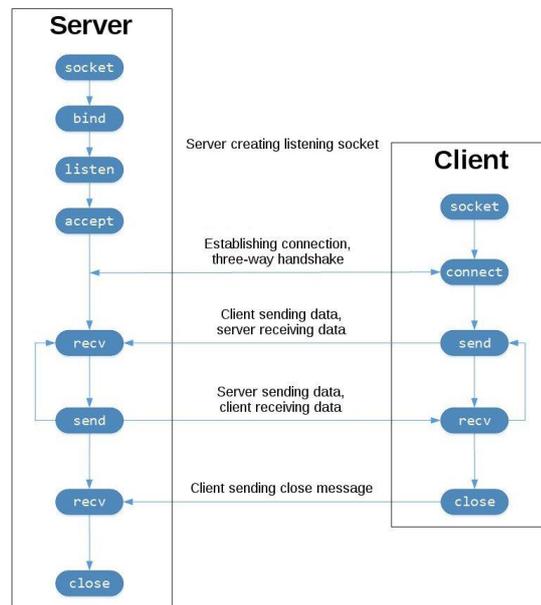


Abbildung 11: Prinzipieller Ablauf einer TCP Kommunikation

Das RPi B im MR-Raum (siehe Abbildung 6) empfängt die Daten des RPi A und startet die Ansteuerung des Ventils. Die Kommunikation mit dem anderen RPi erfolgt dabei mit Hilfe von Nebenläufigkeit. Somit kann der Thread der die Kommunikation verarbeitet, auch während dem Betrieb des VSS laufen. Die Ansteuerung des Ventils erfolgt über die GPIO Anschlüsse des RPi. Das Ansteuerungssignal ist ein PWM-Signal (Pulse Width Modulation). Der Duty-Cycle ist dabei auf 50 Prozent eingestellt, um ein Rechtecksignal zu erzeugen. Das Struktogramm für die Ansteuerungsroutine ist in Abbildung 12 dargestellt.

2.3. Auslenkungsmessungen

Für die Charakterisierung des Systems und die Validierung der Anforderungen werden Messungen durchgeführt. Die Auslenkungsmessung dient der Bestimmung der Auslenkungsamplitude, in Abhängigkeit der Frequenz.

2.3.1. Messaufbau und Vorgehen

Die Messung wird mit einem Testaufbau durchgeführt. Für die Ansteuerung des Ventils verwenden wir ein Funktionsgenerator und eine Spannungsquelle. Die beiden Teile sind über die im Kapitel 2.2.1 beschriebene Verstärkerschaltung mit dem Ventil verbunden. Die Druckluft ist über eine Druckregelung mit dem Ventil verbunden. Die Messung wird mit dem Laserdistanzmesser AWLG-008-S von Welotec durchgeführt. Dieser Sensor ist über ein digitales Oszilloskop (OpenScope MZ von

Ansteuerung Ventil

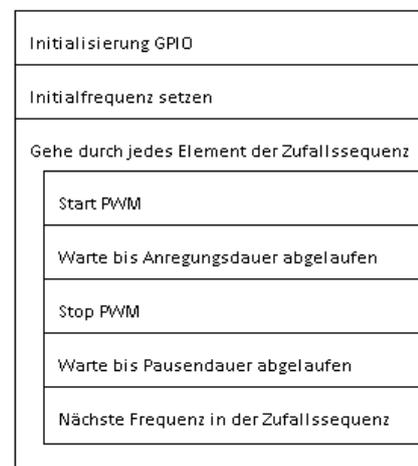


Abbildung 12: Struktogramm zur Ansteuerung des Ventils

Digilent) mit einem Computer verbunden. Auf dem Computer werden die Messungen der Sensorsignale vorgenommen. In der Abbildung 13 ist der Messaufbau dargestellt.

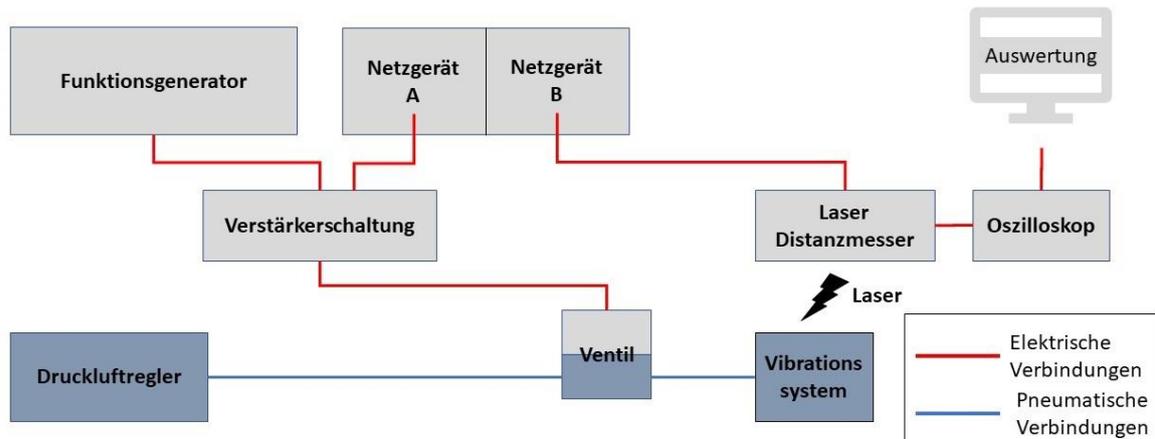


Abbildung 13: Blockdiagramm der Messvorrichtung

Für die Messung des Funktionsmusters Exzentrische Masse ist das Muster an einem Schlauch unter dem Sensor befestigt (siehe Anhang A). Für die Ansteuerung wird lediglich der Druckluftregler gebraucht. Dieser ist direkt am VSS angebracht. Durch die Verstellung des Luftdrucks ändert sich die Amplitude beziehungsweise die Frequenz. Der Druck wird in einem Bereich zwischen 0.5 bis 6 bar eingestellt. Die Schrittweite ist 0.5 bar. Auf jeder Druckstufe wird eine Messung gemacht. Der Bereich wird dreimal durchlaufen. Da die Ansteuerung über den Druck erfolgt und nicht über die Frequenz, wird die Frequenz ebenfalls gemessen.

Die Messung des Funktionsmusters Presslufthammer wird mit dem oben aufgeführten Aufbau durchgeführt. Das Funktionsmuster wird auf einem Tisch unterhalb des Sensors montiert (siehe Anhang A). Für eine Messung wird der Funktionsgenerator auf die benötigte Frequenz eingestellt. Als Ausgangssignal dient ein Rechteck. Die Messungen werden im Bereich von 15 bis 125 Hertz durchgeführt. Der Abstand zwischen den einzelnen Messpunkten beträgt zehn Hertz. Somit ist der in Kapitel 1.2 geforderte Bereich von 20 bis 120 Hertz abgedeckt. Der Bereich ist jeweils um fünf Hertz grösser beziehungsweise kleiner gewählt, um allfällige Phänomene an den Grenzen zu detektieren. Für jede Frequenz werden jeweils sechs Messungen durchgeführt. Bei jeweils drei Messungen wird der Sensornullpunkt bei ausgefahrenem beziehungsweise eingefahrenem Drücker durchgeführt. Weiter variieren wir die Schlauchlänge zwischen dem Ventil und dem Vibrationssystem. Die Schlauchlängen betragen ein, zwei und drei Meter. Der Druck wird mit dem Regler ebenfalls verändert. Bei drei und sechs bar Druck, wird jeweils eine Messung durchgeführt.

Die im Kapitel 3.3 dokumentierten Messwerte, sind jeweils die Mittelwerte aus den Messreihen. Für beide Messungen verwenden wir eine Abtastrate von 2362 Samples pro Sekunde. Dieser Wert hat sich als günstig herausgestellt. Da die gemessene Auslenkung voraussichtlich nicht einem homogenen Signal entspricht, kann die Amplitude nicht direkt gemessen werden. Für die Bestimmung der Amplitude wird ein Least Square Fitting vorgenommen. Dieses versucht ein passendes Sinussignal auf die gemessenen Daten zu projizieren. Die Amplitude dieses Signals wird als Wert für die Auslenkungsamplitude verwendet.

2.3.2. Erwartungswerte

Die Messresultate sind in Kapitel 3.3 als Frequenz-Auslenkungs-Diagramme oder Ansteuerungsdruck-Auslenkungs-Diagramme abgebildet. Im besten Fall kann die Auslenkungsamplitude des VSS beliebig verstellt werden. Somit wären bei allen Frequenzen alle Amplituden möglich. Die Amplitude wäre

konstant und unabhängig von Schlauchlänge oder Ansteuerungsdruck. In Abbildung 14 ist dieser Fall dargestellt.

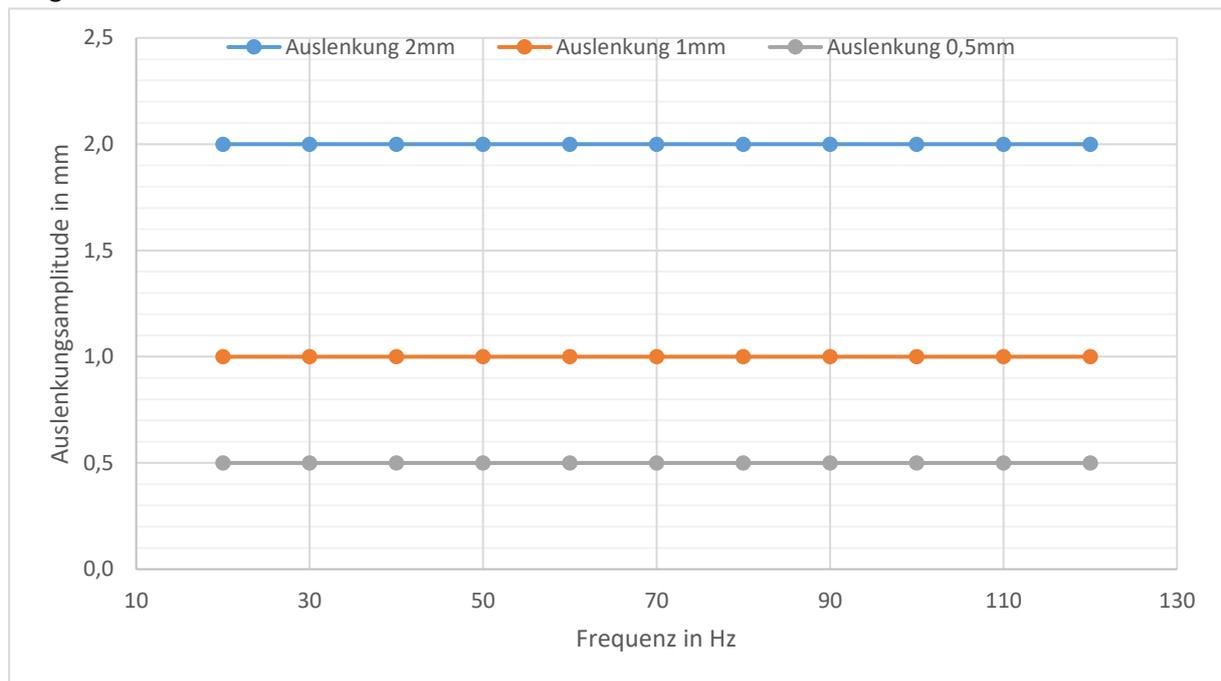


Abbildung 14: Ideales Frequenz-Auslenkungsdiagramm

Dieser Fall wird nicht eintreten, da keine Einstellung der Amplitude möglich ist. Der praktische Erwartungswert entspricht dem in der Abbildung 15 gezeigten Bild. Die Amplitude nimmt mit zunehmender Frequenz ab. Die Luftdruckveränderung und die Änderung der Schlauchlänge hat einen proportionalen Einfluss auf die Lage der Kurve. Beispielsweise wird sich die Kurve bei gleicher Schlauchlänge und höherem Druck nach oben verschieben. Das heisst die Amplitude wird grösser. Ein weiteres zu erwartendes Phänomen ist der mechanische Anschlag. Dieser könnte vor allem bei tiefen Frequenzen erreicht werden. Somit würde die Kurve bei tiefen Frequenzen horizontal verlaufen.

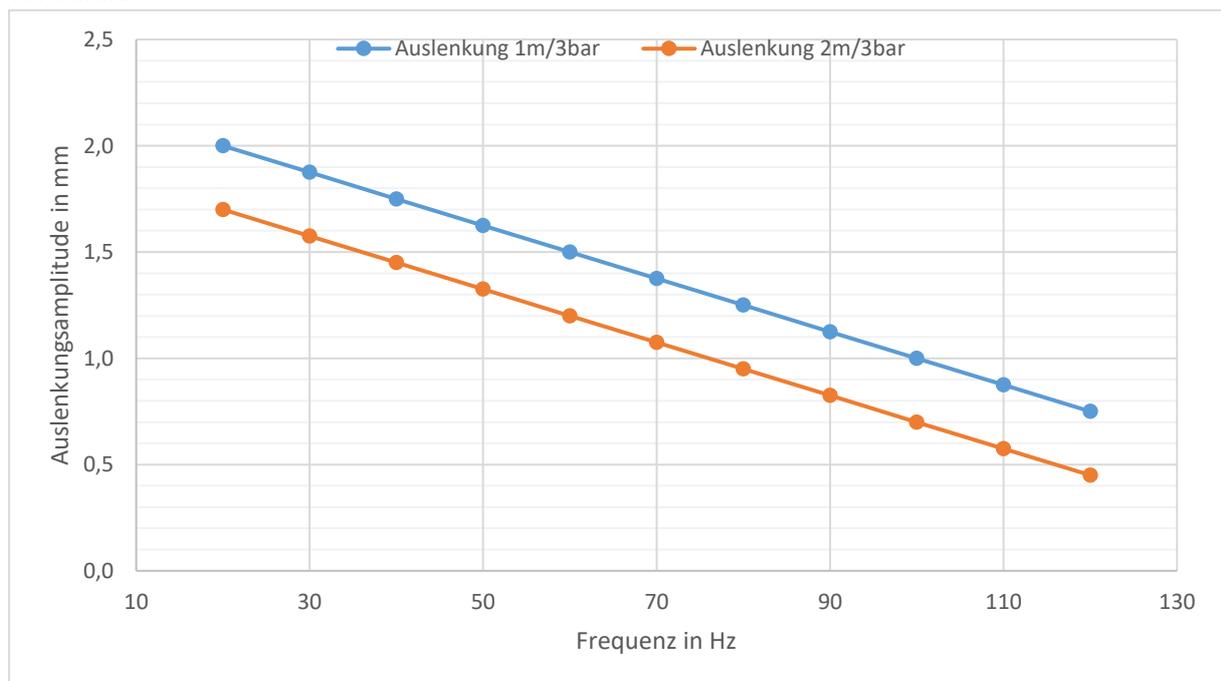


Abbildung 15: Erwartungswerte der Messreihen als Frequenz-Auslenkungsdiagramm

3. Ergebnisse

Das nachstehende Kapitel beinhaltet den Vergleich, der in der Literaturrecherche gefundenen Lösungsansätze. Danach ist der Designprozess der Funktionsmuster veranschaulicht. Des Weiteren sind die Ergebnisse der Auslenkungsmessung beschrieben und dargestellt.

3.1. Technologievergleich

Der Technologievergleich dient dazu, die in der Literaturrecherche gefundenen Lösungsansätze zu vergleichen. Dieser Vergleich stellt die Grundlage für die Auswahl des geeigneten Ansatzes dar. Zu den Vergleichskriterien gehören die Schwingfrequenz, die Auslenkungsamplitude und das Design. Die Frequenz und Amplitude sind grundlegende Anforderungen an das System. Es wird bewertet, wie gut die beschriebenen Werte mit den geforderten Werten übereinstimmen. Beim Kriterium Design wird überprüft, wie machbar ein Nachbau des Systems ist. In der Tabelle 1 ist das Ergebnis des Vergleichs ersichtlich. Die Lösungsvorschläge sind in der Tabelle von links nach rechts, in der gleichen Reihenfolge wie in Kapitel 1.3 beschrieben, das heisst:

- | | |
|---|--|
| 1. Doppelmembranpumpe | Autor: Golaszewski & Zschiegner et al. |
| 2. Magnetventil mit Druckluft | Autor: Briggs et al. |
| 3. Mechanischer Antrieb mit exzentrischer Masse | Autor: Golaszewski & Siedentopf et al. |
| 4. Lorenzkraft | Autor: Graham et al. |
| 5. Piezoelektrischer Schwinger | Autor: Harrington et al. |
| 6. Exzentrische Masse mit Druckluft | Autor: Montant et al. |
| 7. Presslufthammer | Autor: ARD |

Beim Vergleich der Technologien gibt es zwei Schwierigkeiten. Zum einen sind die Systeme teilweise unvollständig beschrieben. Das liegt unter anderem daran, dass die meisten Lösungsansätze aus medizinischen Publikationen stammen. Diese fokussieren sich auf die medizinischen Ergebnisse und weniger auf die technischen Aspekte der Systeme. Zum anderen fehlen in einigen Publikationen die Daten zu Frequenz und Amplitude.

Kriterium/Lösung	1	2	3	4	5	6	7
Frequenz	III	II	III	-	III	III	-
Amplitude	III	I	III	-	I	-	-
Design	I	II	I	II	I	III	III

Tabelle 1: Vergleich der einzelnen Lösungsvarianten

Legende: - Keine Angaben, I erfüllt Kriterium nicht, II erfüllt Kriterium teilweise, III erfüllt Kriterium

Der Apparat von Golaszewski und Zschiegner et al. (2002) kann Frequenzen bis zu 150 Hertz erzeugen. Die Amplitude ist mit maximal zwei Millimeter ebenfalls ausreichend. Der Nachteil des Systems besteht im Design. Die verwendete Doppelmembranpumpe ist ein kostspieliges Gerät. Es wäre auch möglich, diese selber zu bauen. Dies wäre allerdings sehr aufwendig. Der von Briggs et al. (2004) dargelegte Lösungsansatz, ist mit Frequenzen von bis zu 100 Hertz beschrieben. Er erreicht eine Amplitude von zwei Millimeter bei fünf Hertz. Diese Amplitude ist zwar ausreichend, es muss aber davon ausgegangen werden, dass sie mit zunehmender Frequenz sinkt und somit nicht auf die geforderten Werte kommt. Die mechanische Steuerung von Golaszewski und Siedentopf et al. (2002) kommt auf eine Frequenz von höchstens 130 Hertz, bei einer Amplitude von 0.5 bis 4 Millimeter. Allerdings ist die Konstruktion der mechanischen Übertragung der Rotation, sowie des Vibrationskopfes äusserst aufwendig. Der Ansatz mit der Lorenzkraft von Graham et al. (2001) beschreibt weder Auslenkungsamplitude, noch die Frequenz. Die Lösung von Harrington et al. (2000) welche sich den piezoelektrischen Effekt zunutze macht, ist mit Frequenzen von maximal 300 Hertz beschrieben. Dabei erreicht die Amplitude allerdings nur 0.5 Millimeter. Der Aufbau könnte zum Problem werden, weil Signale mit hohen Spannungsunterschieden über lange Distanzen transportiert werden müssen. Ein Rotor mit exzentrische Masse welcher durch Druckluft angetrieben wird,

beschreibt die Arbeit von Montant et al. (2009). Dieser Ansatz erreicht Frequenzen von bis zu 120 Hertz. Das Design ist sehr einfach und leicht zu reproduzieren. Die letzte Möglichkeit ist ein Prototyp welcher nach dem Prinzip des Presslufthammers funktioniert. Da diese Idee nicht aus einer Publikation stammt, existieren keine Wert zu Frequenz und Auslenkungsamplitude. Der Aufbau hingegen ist sehr leicht nachzubauen.

Aufgrund der oben beschriebenen Kriterien, wurden zur Entwicklung eines Funktionsmusters die Ansätze sechs und sieben entsprechend der obigen Nummerierung ausgewählt. Beide haben ein sehr einfaches Design, welches mit den verfügbaren Herstellungsmethoden realisiert werden kann. Obwohl beim Presslufthammer keine vergleichbaren Daten zu Frequenz und Amplitude vorliegen, hat dieser Lösungsvorschlag viel Potential. Die beiden Vorschläge werden in Funktionsmuster umgesetzt und getestet.

3.2. Funktionsmuster Design

In diesem Kapitel ist beschrieben, wie der Aufbau der Funktionsmuster zustande gekommen ist.

3.2.1. Exzentrische Masse

Das Design des Funktionsmusters Exzentrische Masse funktionierte im ersten Anlauf. Dieses ist in der Publikation von Montant et al. (2009) vorgegeben. In der Abbildung 16 ist dieser Entwurf dargestellt.

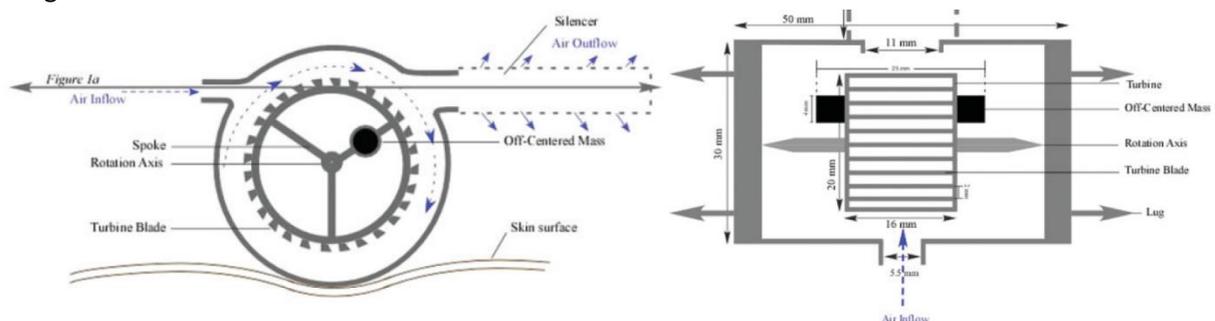


Abbildung 16: Exzentrische Masse Design aus Publikation (Montant et al., 2009). Links: Seitenansicht, Rechts: Aufsicht

Die Gestaltung des Funktionsmusters entspricht deshalb grösstenteils diesen Vorgaben. Eine Anpassung ist die exzentrische Masse, welche im Funktionsmuster verkleinert ist. Sie befindet sich in einer Kavität am äusseren Rand des Rotors, wie Abbildung 17 zeigt. Ein Schalldämpfungselement existiert ebenfalls nicht.

3.2.2. Presslufthammer

Bei der Gestaltung des Funktionsmusters Presslufthammer brauchte es einige Anläufe. Das erste Design bestand aus einem T-förmigen Drückerteil und einem runden Gehäuse. Die Abbildung 18 zeigt diesen Drücker. Dieses System war nicht funktionsfähig. Zum einen war die Führung des Drückers nicht gewährleistet. Zum anderen blockierte der horizontal ausgerichtete Teil des Drückers den Druckluftanschluss oben komplett. Somit konnte keine neue Luft eindringen, um den Drücker in Bewegung zu versetzen. Bei der Weiterentwicklung wurden diese Fehler behoben, wie in Abbildung 19 dargestellt. Der mittlere Teil des Drückers wurde auf der oberen Seite verlängert. Dadurch war die Führung des Drückers gewährleistet. Weiter wurden Abstandsbolzen oben eingebaut. Diese verhindern die komplette Schliessung der Anschlusslöcher. Das System war in dieser Form funktionsfähig. Allerdings bewegte sich der Drücker nicht nur auf und ab, sondern drehte sich auch um die eigene Achse. Eine Formänderung der Führung sollte das Problem beheben. Die Form wurde

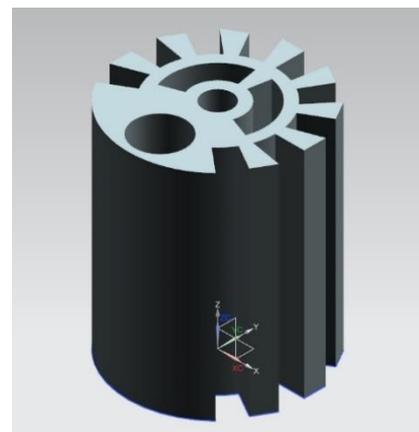


Abbildung 17: 3D Modell des Rotors

in ein Sechseck geändert. Dieses Design funktionierte aber nicht. Das Produktionsverfahren des 3D-Druckers war zu ungenau, sodass Deckel und Drücker nicht ineinanderpassten. Durch die Ecken des Hexagons bestand ebenfalls das Risiko, dass die Teile verkanten. Das Design ist in Abbildung 20 dargestellt.

Für die letzte Weiterentwicklung ist die sechseckige Führung in eine Langloch-artige Form umgestaltet worden. Die Abbildung 21 stellt dies dar. Somit existieren keine Ecken mehr, die ineinanderpassen müssen. Am Deckel sind kleine Beine angebracht. Diese helfen dabei, das VSS aufzustellen.

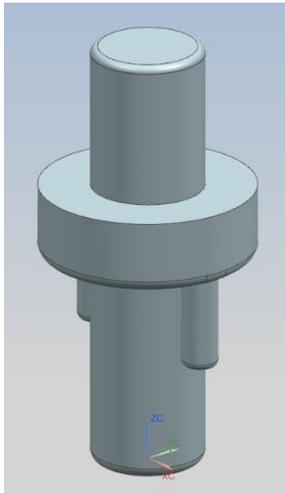


Abbildung 18: Erster Entwurf des Drücker Modells

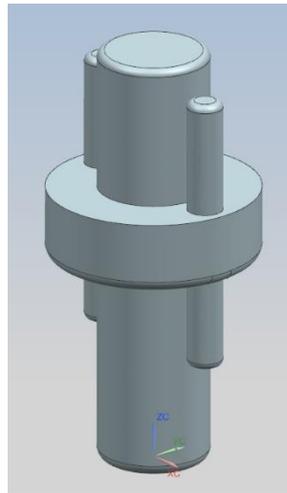


Abbildung 19: Drücker Model mit Führung und Abstandhalter

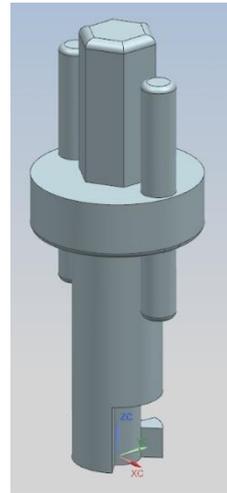


Abbildung 20: Drücker Model mit sechseckiger Führung

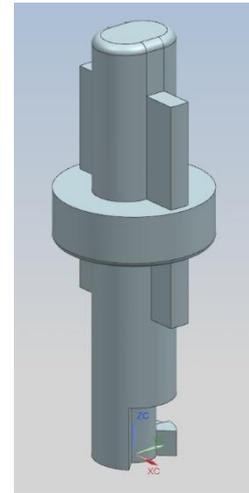


Abbildung 21: Finales Drücker Model

Ein Problem das dieses Design mit sich bringt, ist der Luftaustritt beim vorderen Drückerteil. Dieser wirkt direkt auf die Haut des Patienten und beeinflusst dessen Wahrnehmung der Vibrationsreize. Durch die anbringbaren Aufsetzer zur Flächenvergrößerung, wird dieses Problem behoben. Die Luft wird vom Aufsetzer abgelenkt.

Das zweite Funktionsmuster des Presslufthammers ist mit den Herstellungsverfahren Fräsen und Drehen hergestellt worden. Das oben beschriebene Design kann nicht mit diesen Methoden produziert werden. Deshalb brauchte es Änderungen im Design. Der Hauptfokus lag darauf, alle 90 Grad Winkel zu entfernen. Die Grundform des Gehäuses wurde in eine rechteckige Form umgewandelt. Der Deckel musste dementsprechend angepasst werden. Beim Drücker sind lediglich die Distanzhalter angepasst worden.

3.3. Resultate Auslenkungsmessungen

Die Resultate der Messungen sind im Folgenden aufgeführt.

3.3.1. Exzentrische Masse

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben sind die Resultate für die exzentrische Masse in Ansteuerungsdruck-Auslenkungs-Diagrammen dargestellt. Weiter sind auch Ansteuerungsdruck-Frequenz-Diagramme dargestellt.

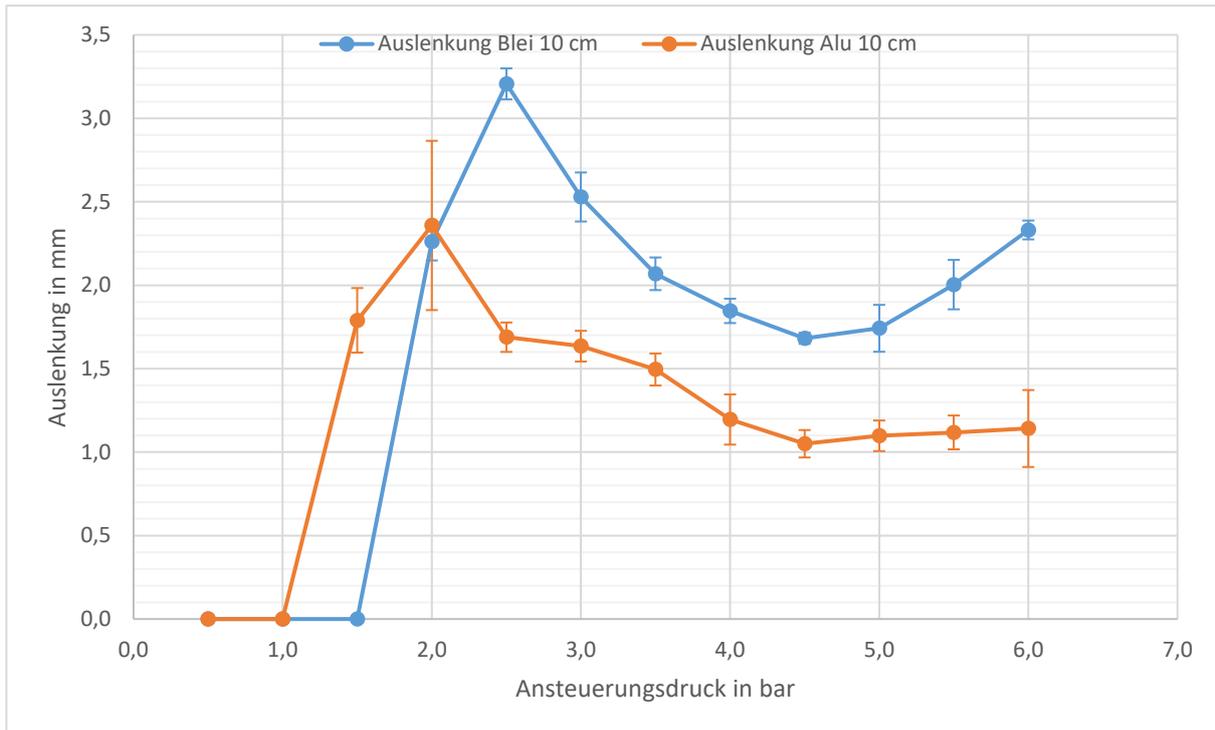


Abbildung 22: Ansteuerungsdruck-Auslenkungsdiagramm des Funktionsmusters Exzentrische Masse

Die Abbildung 22 zeigt die Auslenkungsamplituden zweier verschiedener exzentrischer Massen. Bei beiden Messungen sind die Objekte in einem Abstand von 10 Zentimeter vom Befestigungspunkt montiert (siehe Anhang A). Auffällig ist bei beiden Kurven der Abfall von einem Druck von 6 bar aus. Danach steigen beide wieder an, bevor steil nach unten gehen. Beide Kurven gehen bis auf eine Auslenkung von 0 Millimeter zurück. Der Rotor mit Blei-Masse erreicht einen maximalen Amplitudenwert von 3.21 Millimeter. Beim Rotor mit Aluminium-Masse geht die Auslenkung bis 2.36 Millimeter. Die geschätzten Standardabweichungen liegen bei der Blei-Masse zwischen 0 und 0.15 Millimeter. Bei der Aluminium-Masse zwischen 0 und 0.51 Millimeter.

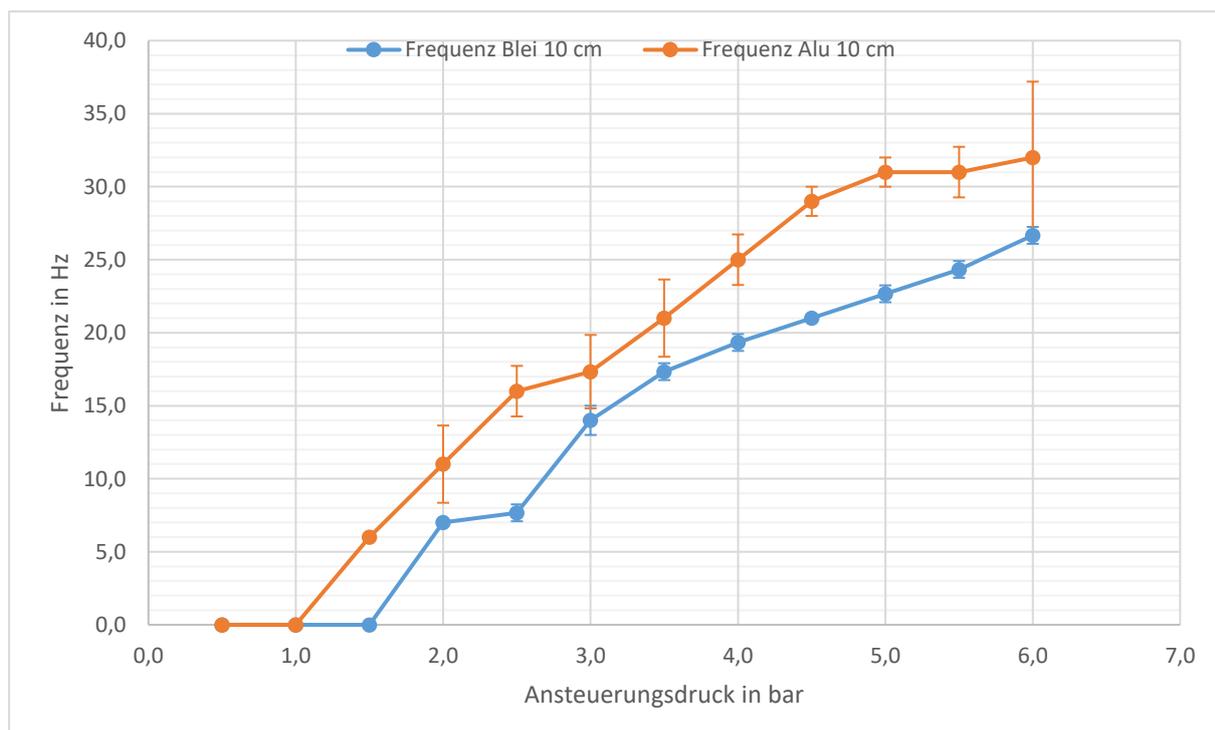


Abbildung 23: Ansteuerungsdruck-Frequenz-Diagramm des Funktionsmusters Exzentrische Masse

Wie in Abbildung 23 zu sehen ist, nehmen die Frequenzen kontinuierlich ab. Dabei erreicht die Blei-Masse einen Höchstwert von 26.67 Hertz. Die Aluminium-Masse hingegen kommt bis auf 32 Hertz. Die Standardabweichungen liegen beim Rotor mit Blei-Masse zwischen 0 und 1 Hertz. Beim Rotor mit Alu-Masse zwischen 0 und 5.2 Hertz.

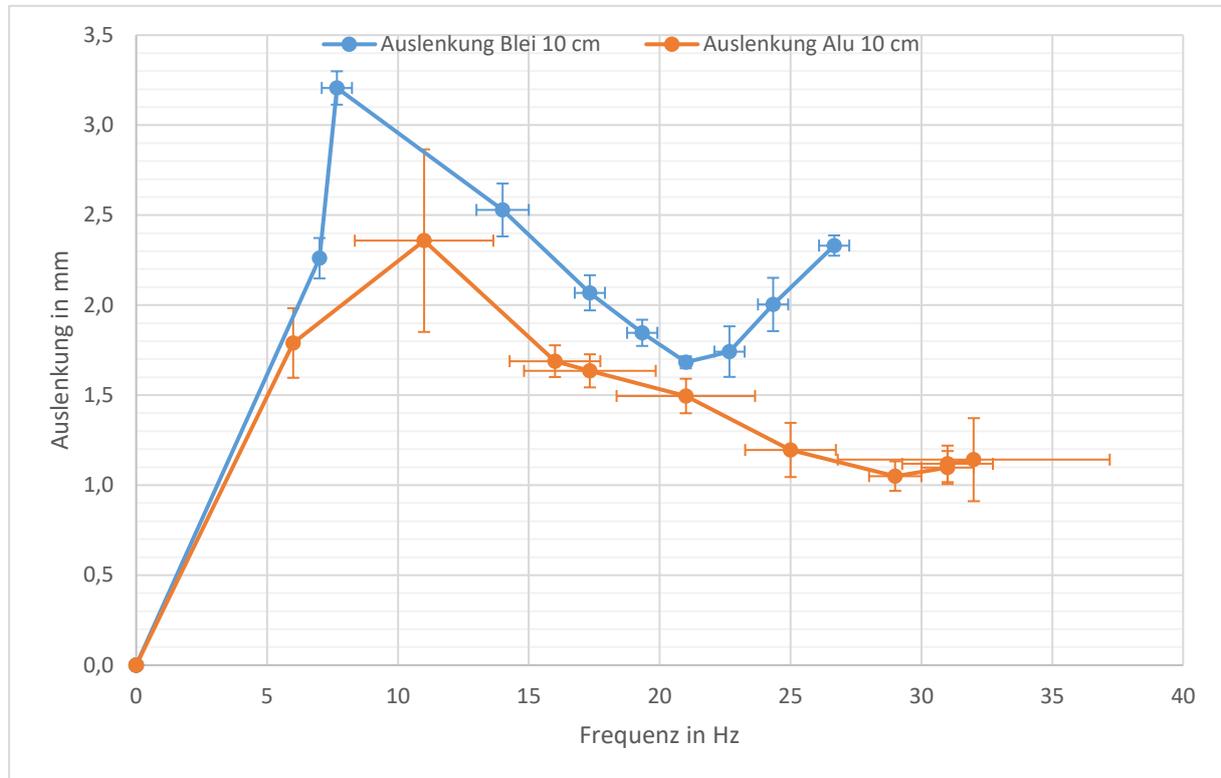


Abbildung 24: Frequenz-Auslenkungs-Diagramm aus den Messresultaten zusammengesetzt.

Wenn die beiden oben beschriebenen Ergebnisse zusammengeführt werden, ergibt sich das in Abbildung 24 gezeigte Frequenz-Auslenkungs-Diagramm. Der Vergleich zeigt, dass die Auslenkung mit abnehmender Frequenz zuerst zunimmt und danach steil abfällt.

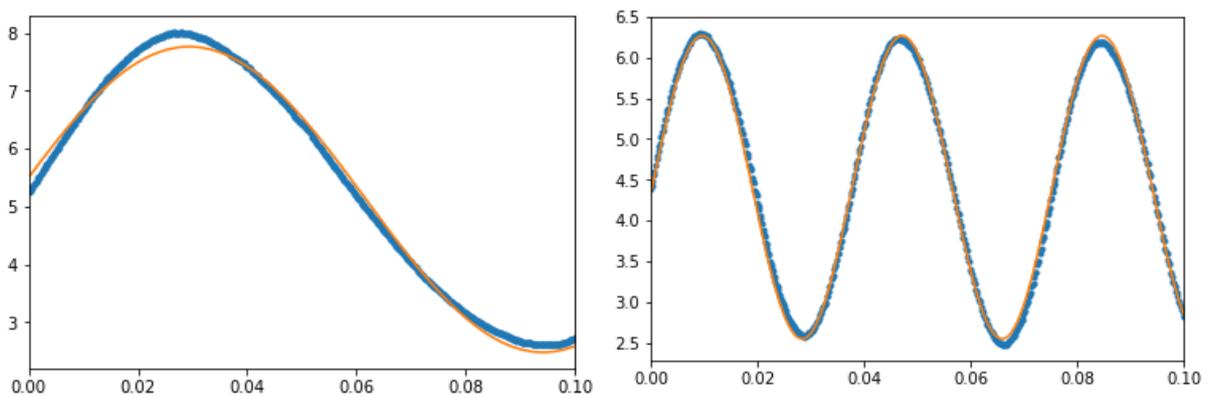


Abbildung 25: Gemessene Auslenkungskurve der exzentrischen Masse. Rechts bei 2.5 bar und links bei 6 bar Ansteuerungsdruck. In blau: gemessene Werte. In orange: Resultate des Least Square Fitting

Die Abbildung 25 zeigt eine sehr homogene Auslenkung bei diesen Messungen. Dies über den gesamten Messbereich. Deswegen ist die Berechnung der Amplitude äusserst genau.

Bei den Ergebnissen fällt auf, dass der Rotor mit Blei-Masse eine grössere Auslenkung erreicht, als derjenige mit Aluminium-Masse. Die Masse hat also einen Effekt auf die Auslenkung. Je schwerer die Masse, desto höher die Auslenkung. Diese Beobachtung macht Sinn, weil die schwerere Masse ein höheres Drehmoment hat. Es wirkt also mehr Kraft auf die Achse und somit auch den gesamten Körper. Ein anderes Phänomen zeigt sich bei der Frequenz. Dort erzeugt der Rotor mit leichtere

Masse höhere Frequenzen. Die Aluminium-Masse ist leichter und dreht sich demnach schneller. Weiter gilt es festzuhalten, dass beide Funktionsmuster die geforderte Frequenz von 120 Hertz nicht erreichen. Eine Amplitude von 2 Millimeter kann zwar erreicht werden, allerdings nicht bei der benötigten Frequenz. Ein Nachteil der Messungen ist das Fehlen der Hysterese. Die Messungen konnten jeweils nur von hohen zu tiefen Druckwerten durchgeführt werden. Die Massen haben eine hohe Trägheit und brauchen einen gewissen Startdruck, bis sie sich in Bewegung setzen.

3.3.2. Presslufthammer

Die folgenden Frequenz-Auslenkungs-Diagramme zeigen die Messresultate des Funktionsmusters Presslufthammer, welches mit dem 3D-Drucker gefertigt wurde.

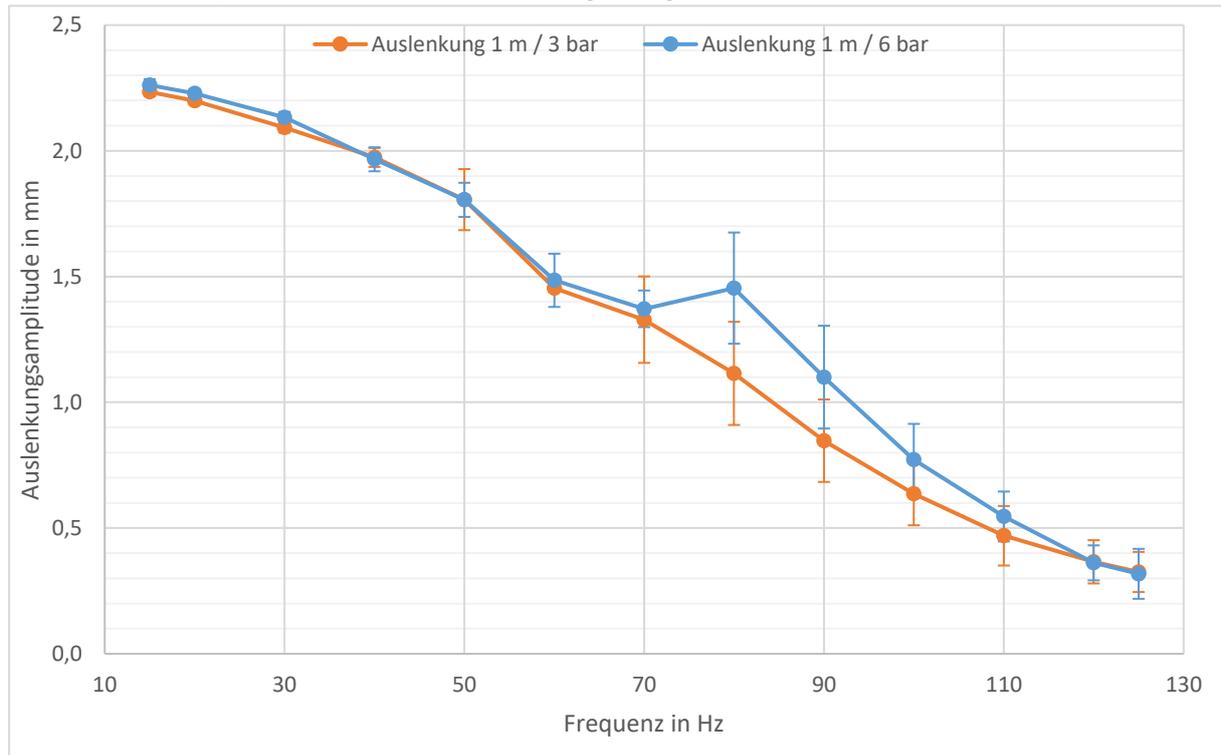


Abbildung 26: Messresultate bei einem Meter Schlauchlänge

Die Abbildung 26 zeigt die Resultate der Messungen, bei denen das VSS mit einem ein Meter langen Schlauch mit dem Ventil verbunden ist. Die Auslenkung hat seinen maximalen Wert bei 2.26 Millimeter und den minimalen Wert bei 0.318 Millimeter. Der Unterschied zwischen den Ansteuerungsdrücken ist klein. Die Kurven fallen mit fast konstanter Steigung ab. Dieses Bild entspricht den Erwartungswerten aus dem Kapitel 2.3.2. Die Standardabweichung liegt zwischen 0.016 und 0.221 Millimeter.

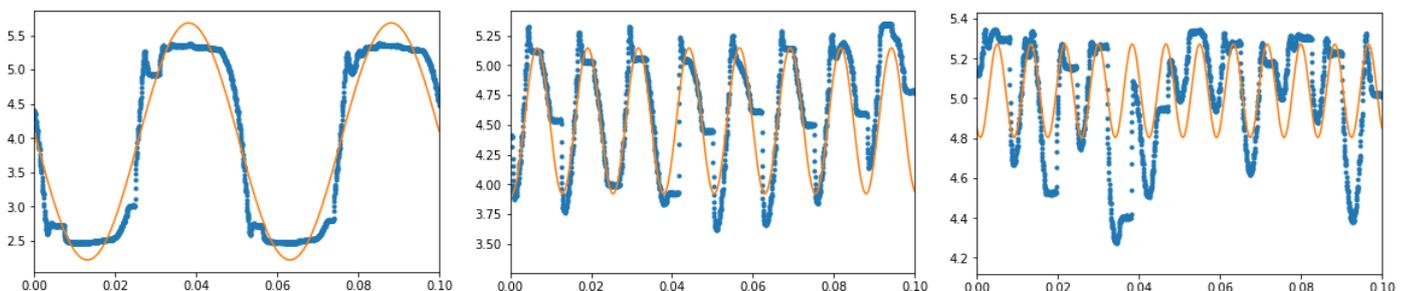


Abbildung 27: Gemessene Auslenkungskurven. V.l.n.r. bei 20 Hertz, 80 Hertz, 120 Hertz. In blau: Auslenkung. In orange: Resultate des Least Square Fitting

Bei der Auslenkung in Abbildung 27 ist zu erkennen, dass mit zunehmender Frequenz die Auslenkung ihre Regelmässigkeit verliert. Bei 20 Hertz ist ein klares, periodisches Signal vorhanden. Ab 80 Hertz nimmt diese Homogenität ab. Bei 120 Hertz sind die Ausschläge unregelmässig.

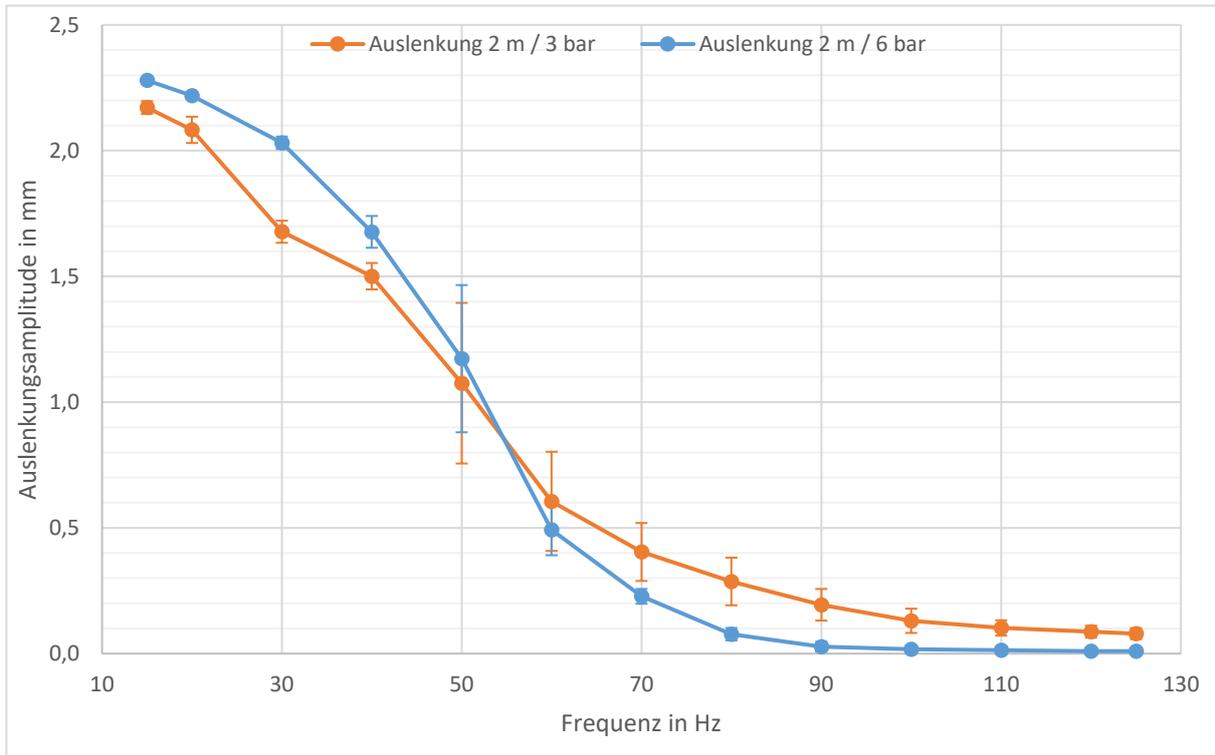


Abbildung 28: Frequenz-Auslenkungs-Diagramm bei zwei Metern Schlauchlänge

Die Abbildung 28 zeigt einen nicht linearen Abfall der Auslenkung. Auch hier liegt der maximale Wert von 2.27 Millimeter in den Anforderungen, allerdings nimmt die Auslenkung viel schneller ab. Ab etwa 90 Hertz ist die Veränderung der Amplitude nur noch sehr klein. Die beiden Kurven kreuzen sich bei ungefähr 55 Hertz. Die Standardabweichung liegt zwischen 0.008 und 0.319 Millimeter.

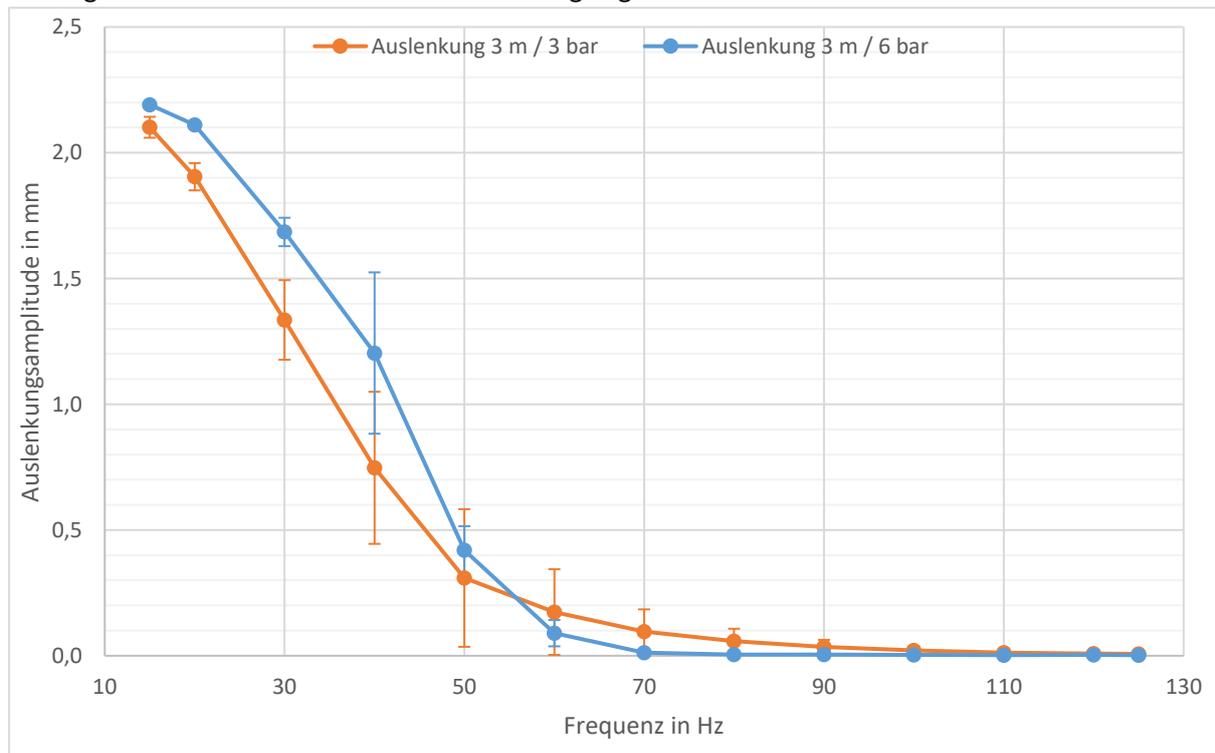


Abbildung 29: Frequenz-Auslenkungs-Diagramm bei drei Metern Schlauchlänge

Auch in Abbildung 29 ist ein nichtlinearer Abfall zu sehen. Die Kurve ist noch steiler als bei zwei Metern Schlauchlänge. Auch hier kreuzen sich die beiden Kurven bei etwa 55 Hertz. Die Standardabweichung liegt im Bereich zwischen 0.004 bis 0.321 Millimeter.

Bei Schlauchlängen von zwei beziehungsweise drei Metern, zeigen sich bereits bei 50 Hertz unregelmässige Muster, wie Abbildung 30 zeigt. Bei Auslenkungen um 120 Hertz ist praktisch keine Bewegung des VSS vorhanden. Das gemessene Signal entspricht eher einem Rauschen.

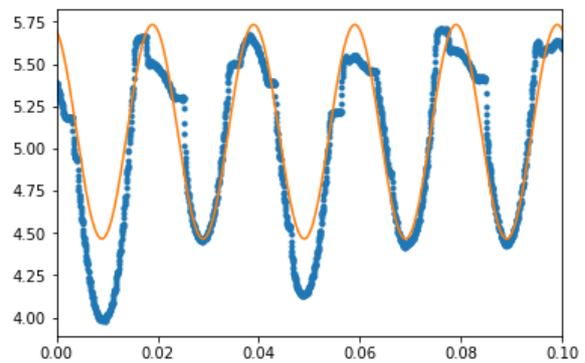


Abbildung 30: Gemessene Auslenkung bei 50 Hertz.
In blau: Gemessene Auslenkung. In orange: Resultat des Least Square Fitting

Die bisherigen Resultate zeigen, dass die Schlauchlänge zwischen Ventil und VSS eine entscheidende Rolle spielt. Während bei einem Meter Schlauchlänge die Auslenkung linear abnimmt, zeigt sich bei zwei beziehungsweise drei Metern Länge eine klare Nichtlinearität. Das Funktionsmuster erfüllt die Zielsetzung nur bei einem Meter Schlauchlänge vollständig. Bei einer Schlauchlänge von zwei Metern liegt die Auslenkung bei 80 Hertz nur noch bei 0.3 Millimeter, bei drei Metern sogar noch tiefer. Die Abbildung 31 zeigt nochmals alle Kurven auf einen Blick.

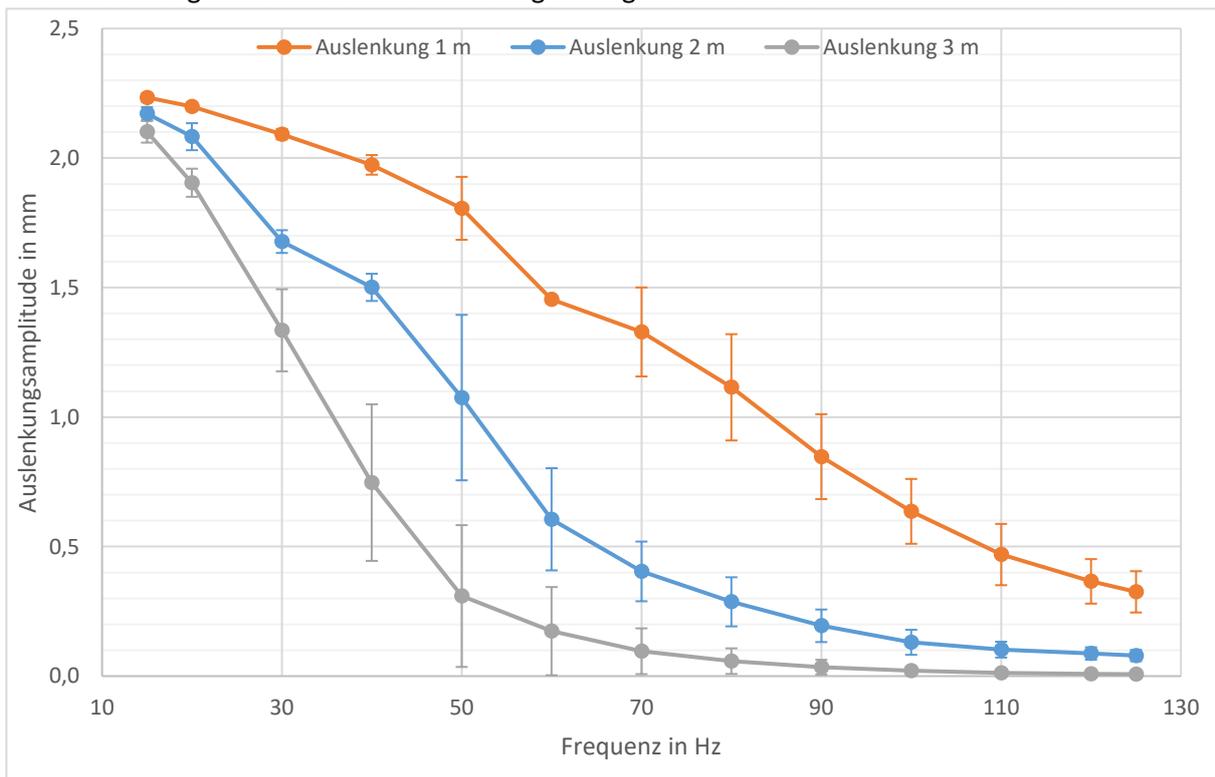


Abbildung 31: Vergleich der Ergebnisse bei 1, 2 und 3 Meter

Weiter ist festzuhalten, dass der Ansteuerungsdruck nur minimale Auswirkungen auf die Auslenkung hat. Interessant sind die Kreuzungen der Kurven bei zwei und drei Metern Schlauchlänge. Dieser Kreuzungspunkt befindet sich bei beiden um 55 Hertz. Bei tiefen Frequenzen scheint ein hoher Druck effektiver, als bei hohen Frequenzen.

Die Abbildung 33 zeigt den Vergleich des Funktionsmusters, welches gefräst wurde, mit demjenigen aus dem 3D-Drucker. Beim Funktionsmuster welches gefräst wurde, fällt die Amplitude weniger schnell ab, als beim 3D gedruckten. Die Oberfläche des gefrästen Systems ist weniger rau. Dadurch bewegt sich das Muster homogener. Die Auslenkung ist demnach bis in hohe Frequenzbereiche sinusförmig, wie Abbildung 32 zeigt.

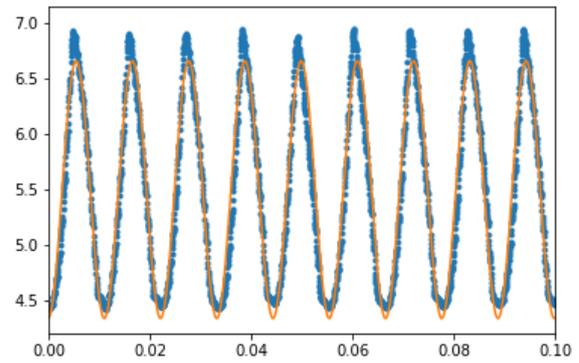


Abbildung 32: Gemessene Auslenkung des gefrästen Funktionsmusters.
In blau: Gemessene Auslenkung. In orange: Resultat des Least Square Fitting

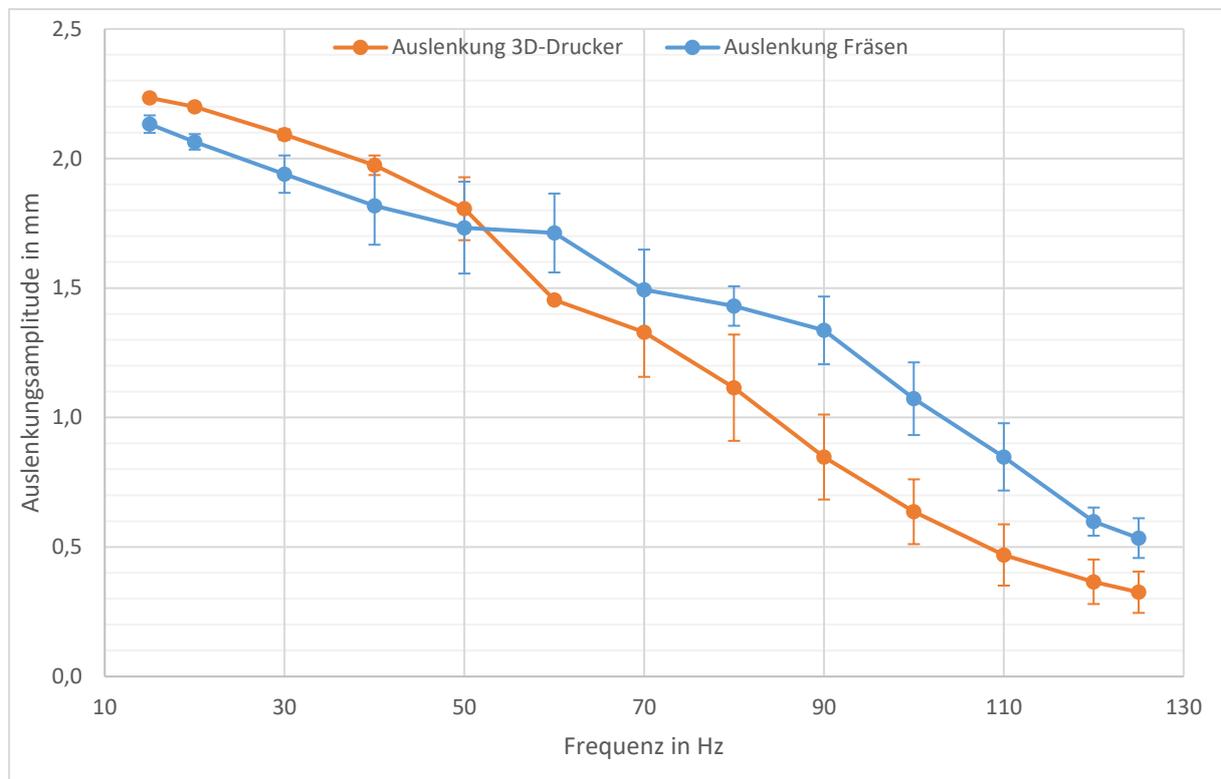


Abbildung 33: Vergleich der Herstellungsverfahren bei einem Meter Schlauchlänge

4. Diskussion

Ein MR-kompatibles Vibrationssimulationssystem zu entwickeln und zu testen, war das Ziel dieses Projektes. Die Literaturrecherche zeigt, es gibt viele Wege ein solches System zu bauen. Nicht nur im medizinischen Umfeld können Ansätze gefunden werden, auch der Alltag bietet Lösungsideen. Gerade in medizinischen Publikationen fällt die Beschreibung der technischen Hilfsmittel meistens knapp aus. Die Lösungsvarianten sind demnach je nach Ansatz einfacher oder schwieriger umzusetzen. Der Fokus liegt darauf, eine möglichst einfach herzustellende Variante zu finden. Die zwei gefundenen Lösungsansätze mit exzentrischer Masse und Presslufthammer erfüllen diese Kriterien. Die parallele Entwicklung zweier Varianten ermöglicht einen Vergleich der Funktionsmuster. Die Literaturrecherche ist ein fortlaufender Prozess. Er sollte immer weitergeführt werden. Aus zeitlichen Gründen sind in diesem Projekt nur wenige Ansätze miteinander verglichen. Die Möglichkeiten, Vibration zu erzeugen sind vielfältig. Vor allem ausserhalb der medizinischen Anwendung gibt es noch viele Möglichkeiten, beispielsweise in der Natur. In künftigen Entwicklungen ist darauf zu achten, die Literaturrecherche auf diese allgemeinen Gebiete zu erweitern.

Das mechanische Design eines Funktionsmusters spielt die zentrale Rolle in der späteren Fertigung. Durch den Einsatz eines 3D-Druckers kann fast jede beliebige Form erzeugt werden. Deshalb gab es beim Gestalten der Muster keine grossen Einschränkungen. Weiter ist ein Druck kostengünstig und es können mehrere, verschiedene Muster gleichzeitig gedruckt werden. Das macht die Entwicklung des optimalen Designs effizient. Allerdings gibt es Einschränkungen bei der Genauigkeit. Gerade beim Funktionsmuster Presslufthammer ist dies kritisch. Die Teile müssen sauber ineinandepassen, damit das Muster funktioniert. Die Entwicklung des Prototyps wurde dadurch beeinflusst, sodass gewisse Muster teilweise mehrfach gedruckt werden mussten. Die Nachbearbeitung der Teile mit klassischen Methoden, wie Bohren oder Drehen, ist nur bedingt wirksam. Der PLA-Kunststoff ist dafür eher zu weich. Als Alternative kann das Funktionsmuster komplett aus POM-Kunststoff gefertigt werden. Dabei kommen die Herstellungsverfahren Fräsen und Drehen zum Einsatz. Diese haben eine höhere Genauigkeit als ein 3D-Drucker. Dementsprechend passen die Teile besser ineinander. Auch die Materialeigenschaften sind besser geeignet. Das POM hat bessere Gleitfähigkeiten und ist härter. Das entsprechende Bild zeigt sich auch beim Vergleich der Messresultate. Das Design hat in künftigen Entwicklungen noch viel Potential. Für eine bessere Integration in das Gesamtsystem können die Funktionsmuster verkleinert werden. Vor allem das Muster Exzentrische Masse besitzt in diesem Bereich noch Luft nach oben. Weiter müssen alternative Herstellungsverfahren und Materialien geprüft werden. Dazu gehört auch die Anwendung anderer 3D-Druckverfahren.

Die Messung der Auslenkung dient der Validierung der Anforderungen an das System. Dieses soll mit Frequenzen von 20 bis 120 Hertz vibrieren können. Bei 20 Hertz soll die Auslenkungsamplitude mindestens 1.5 Millimeter betragen. Bei 80 noch mindestens 0.5 Millimeter. Das Funktionsmuster Exzentrische Masse erfüllt diese Vorgaben nur teilweise. Bei 20 Hertz erreicht das Muster mit beiden getesteten Massen die geforderten 1.5 Millimeter. Jedoch erreicht es mit keiner der Massen die gewünschten 120 Hertz. Beim höchsten Ansteuerungsdruck kommt das System maximal auf 32 Hertz. Das ist ein grosser Nachteil. Durch den Einsatz einer leichteren Masse kann die Frequenz erhöht werden. Allerdings verringert sich dadurch die Auslenkung. Ein Vorteil des Systems ist die homogene Schwingung, die erzeugt wird. Für die Weiterentwicklung müssen weitere Messungen vorgenommen werden. Der Fokus sollte dabei auf dem Einsatz von verschiedenen Massen liegen. Dadurch kann ein optimales Verhältnis zwischen Auslenkung und Frequenz gefunden werden. Des Weiteren sollte das gesamte Funktionsmuster kleiner werden. Nach einer Verkleinerung ändert sich auch der Einfluss verschiedener Massen auf den Gesamtkörper. Zudem fehlt im Moment ein automatisiertes Steuerungssystem. Das Muster kann nicht mit den schnellschaltenden Ventilen angesteuert werden. Dazu braucht es eine computergesteuerte Druckregelung. Voraussichtlich ist es

auch nötig, den Rotor oder die exzentrische Masse auszutauschen. Diesem Umstand muss im Design Sorge getragen werden. Durch eine auswechselbare Masse, könnte das Auslenkungs-Frequenz-Verhältnis je nach Gebrauch angepasst werden.

Das Funktionsmuster Presslufthammer erfüllt die Anforderungen nur teilweise. Dabei ist das Ergebnis stark von der Schlauchlänge zwischen Ventil und Funktionsmuster abhängig. Bei einem Meter Schlauchlänge erfüllt das System die Anforderungen. Bei 20 Hertz erreicht das System eine Auslenkung von mehr als 2 Millimeter. Bei 80 Hertz sind es immer noch mehr als 1 Millimeter. Bei dieser Schlauchlänge fällt die Auslenkung linear, umgekehrt proportional zu der Frequenz ab. Ein anderes Bild zeigt sich bei Schlauchlängen von zwei beziehungsweise drei Metern. Zwar erreicht das System ähnliche Auslenkungswerte bei 20 Hertz, wie bei einem Meter Schlauchlänge, jedoch fällt die Auslenkung danach steiler ab. Die Kurve gleicht einem exponentiellen Zerfall. Bei 80 Hertz kommt das System mit zwei Metern Länge nur noch auf knapp 0.3 Millimeter. Das Muster mit drei Metern Schlauchlänge befindet sich mit 0.06 Millimetern Auslenkung bei 80 Hertz praktisch im Stillstand. Interessanterweise hat der Ansteuerungsdruck einen viel kleineren Einfluss auf das Messresultat, als die Schlauchlänge. Die Ergebnisse unterscheiden sich bei unterschiedlichem Druck kaum. Bei einer Schlauchlänge ab zwei Metern scheint es so, als ob ein höherer Druck bei tiefen Frequenzen eine grössere Amplitude bewirkt. Dies ändert sich aber bei etwa 55 Hertz. Von da an ist ein tieferer Druck besser. Dies zeigt sich in der Kreuzung der Kurven bei zwei und drei Metern Schlauchlänge. Dieser Unterschied ist aber nur klein. Die gemessenen Auslenkungen sind bei diesem Funktionsmuster unregelmässiger, als jene des Musters Exzentrischen Masse. Dies kann daran liegen, dass die Führung des Drückers zu viel Spielraum hat. Andererseits kann sich das Gehäuse bei der Befestigung auch verziehen, was die Bewegung beeinflusst. In den nächsten Entwicklungsschritten müssen weiter Messungen gemacht werden. Damit ist ein besserer Vergleich der verschiedenen Materialien, Herstellungsverfahren, Schlauchlängen und Ansteuerungsdrücken möglich. Die Ansteuerung des Systems kann durch Verbesserungen an der Software, beispielsweise am GUI, optimiert werden. Eine Speicherung der Zufallssequenz muss möglich sein. Im optimalen Fall kann sich das System selbst überprüfen und die gemessenen Daten an den Benutzer zurückschicken, oder diese mit Rückkopplung zur Regelung des Systems benutzen.

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle noch ganz herzlich bei allen Personen bedanken, die mich während der Durchführung dieser Arbeit unterstützt haben. Als erstes möchte ich mich bei meinem betreuenden Dozenten Philipp Schütz bedanken. Dank dir hatte ich die einmalige Chance an diesem Projekt mitzuarbeiten. Deine Inputs und Ideen waren eine grosse Hilfe und Inspiration während des ganzen Projektes. Dein unermüdlicher Einsatz hat mir eine optimale Plattform für die Durchführung geboten. Egal ob es um das Ausdrucken eines Musters oder die Hilfe bei einer Berechnung ging, egal ob während der Schulzeit oder mitten in der Nacht, du warst stets da und hast deinen Beitrag geleistet.

Weiter geht ein Dank an Damian Gwerder. Bei den wöchentlichen Sitzungen hattest du immer gute Ideen und Verbesserungsvorschläge. Selbst wenn es nur darum ging, wie eine Sitzung geführt werden soll. Ich konnte immer von deinem Wissen profitieren.

Als nächstes möchte ich mich bei meinen Industriepartnern Michael Meier und Philipp Stämpfli bedanken. Auch dank ihnen hatte ich die Chance, an diesem spannenden Projekt mitzuhelfen. Sie haben mir immer gute Ideen für Verbesserungen geliefert. Auch die Tests auf dem MRT haben sie direkt selbst übernommen. Die Kommunikation mit euch war sehr angenehm und ich hoffe, dass wir später in der Arbeitswelt wieder einmal zusammenarbeiten können.

Ein weiteres Dankeschön geht an Markus Flury, Leiter Physiklabor an der Hochschule Luzern. Ich konnte während der gesamten Projektarbeit sein Büro und sein Equipment nutzen. Ohne dieses Vertrauen wäre ich bestimmt nie so weit gekommen. Weiter hatte er immer gute Ideen und hat auch tatkräftig mitgeholfen.

Zum Schluss geht mein Dank auch an Ivo Brand. Er hat für mich die Messungseinrichtung aufgestellt und vorbereitet. Dank seiner Hilfe konnte ich direkt mit den Messungen beginnen. Er hat mir viel Aufwand und Zeit erspart.

Ich danke euch allen herzlich für euren Einsatz und eure Zeit. Ich hoffe, dass ich irgendwann wieder einmal die Chance bekomme, mit euch zu arbeiten. Vielen Dank!

Glossar

Bajonettverschluss: Ein Bajonettverschluss ist eine mechanische Verbindung zweier Teile. Sie ist schnell herstell- und trennbar. Die Verbindung erfolgt durch ineinanderstecken der Teile und eine entgegengesetzte Drehbewegung (wikipedia.org, 2008).

Doppelmembranpumpe: Eine Pumpe welche durch die entgegengesetzte Bewegung von zwei Membranen, eine Bewegung von Flüssigkeit erzeugt.

Isozentrum: Das Isozentrum ist der Ort eines Magnetresonanztomographen, an dem das Magnetfeld am stärksten wirkt.

Transmission Control Protocol (TCP): Das TCP ist ein Netzwerkprotokoll, welches zur Kommunikation zwischen zwei oder mehreren Teilnehmern verwendet wird. Das Protokoll ist garantiert eine verlustlose Datenübertragung. Bei Kommunikationsproblem fordert der Empfänger den Sender automatisch auf, die Daten erneut zu senden.

Quellenverzeichnis

Gedruckte Quellen

Briggs, R. W., Dy-Liacco, I., Malcolm, M. P., Lee, H., Peck, K. K., Gopinath, K. S., Himes, N. C., Soltysik, D. A., Browne, P. & Tran-Son-Tay, R. (2004). A pneumatic vibrotactile stimulation device for fMRI. *Magnetic Resonance in Medicine*, 51, S. 640-643.

Golaszewski, S. M., Siedentopf, C. M., Baldauf, E., Koppelstaetter, F., Eisner, W., Unterrainer, J., Guendisch, G. M., Mottaghy, F. M. & Felber, S. R. (2002). Functional Magnetic Resonance Imaging of the Human Sensorimotor Cortex Using a Novel Vibrotactile Stimulator. *NeuroImage*, 17, S. 421-430.

Golaszewski, S. M., Zschiegner, F., Siedentopf, C. M., Unterrainer, J., Sweeney, R. A., Eisner, W., Lechner-Steinleitner, S., Mottaghy, F. M., Felber, S. (2002). A new pneumatic vibrator for functional magnetic resonance imaging of the human sensorimotor cortex. *Neuroscience Letters*, 324, P. 125-128.

Graham, S., Staines, W., Nelson, A., Plewes, D. & McIlroy, W. (2001). New devices to deliver somatosensory stimuli during functional MRI. *Magnetic Resonance in Medicine*, 46, S. 436-442.

Harrington, G. S., Wright, C. T. & Downs, J. H. (2000), A new vibrotactile stimulator for functional MRI. *Human Brain Mapping*, 10, S. 140-145.

Montant, M., Romaiquère, P. & Roll, J. (2009), A new vibrator to stimulate muscle proprioceptors in fMRI. *Human Brain Mapping*, 30, S. 990-997.

Internetquellen

ARD. (2011). *Wie hämmert der Presslufthammer? - Wissen macht Ah! - DAS ERSTE – WDR*. [Videodatei]. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=vqMzGOX8-Cw&t=1s> (02.11.2018).

Jennings N. (2018). *Socket Programming in Python (Guide)*. Verfügbar unter: <https://realpython.com/python-sockets/> (03.01.2019).

Rheumaliga.ch (o.J.). *Rückenschmerzen*. Verfügbar unter: <https://www.rheumaliga.ch/rheuma-von-a-z/rueckenschmerzen> (09.12.2018).

Wikipedia.org (2004). *Blei*. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Blei> (22.11.2018).

Wikipedia.org (2008). *Bajonettverschluss*. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Bajonettverschluss> (04.01.2018).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzip der exzentrischen Masse	3
Abbildung 2: Einzelteile des Funktionsmusters Exzentrische Masse	3
Abbildung 3: Funktionsprinzip des Presslufthammers.....	4
Abbildung 4: Einzelteile des Funktionsmusters Presslufthammer. Herstellungsverfahren: 3D-Drucker	4
Abbildung 5: Einzelteile des Funktionsmusters Presslufthammer. Herstellungsverfahren: Fräsen, Drehen.....	5
Abbildung 6: Schematische Darstellung des Aufbaus und der Vernetzung der Hardware.....	6
Abbildung 7: Elektronisches Schema der Verstärkerschaltung.....	6
Abbildung 8: Prinzipieller Aufbau eines Steuerungssignals	7
Abbildung 9: Graphische Benutzeroberfläche der Software	7
Abbildung 10: Struktogramm für die Erstellung einer Zufallssequenz	8
Abbildung 11: Prinzipieller Ablauf einer TCP Kommunikation.....	8
Abbildung 12: Struktogramm zur Ansteuerung des Ventils.....	8
Abbildung 13: Blockdiagramm der Messvorrichtung.....	9
Abbildung 14: Ideales Frequenz-Auslenkungsdiagramm	10
Abbildung 15: Erwartungswerte der Messreihen als Frequenz-Auslenkungsdiagramm	10
Abbildung 16: Exzentrische Masse Design aus Publikation (Montant et al., 2009). Links: Seitenansicht, Rechts: Aufsicht.....	12
Abbildung 17: 3D Modell des Rotors.....	12
Abbildung 18: Erster Entwurf des Drücker Modells.....	13
Abbildung 19: Drücker Model mit Führung und Abstandhalter	13
Abbildung 20: Drücker Model mit sechseckiger Führung	13
Abbildung 21: Finales Drücker Model	13
Abbildung 22: Ansteuerungsdruck-Auslenkungsdiagramm des Funktionsmusters Exzentrische Masse	14
Abbildung 23: Ansteuerungsdruck-Frequenz-Diagramm des Funktionsmusters Exzentrische Masse .	14
Abbildung 24: Frequenz-Auslenkungs-Diagramm aus den Messresultaten zusammengesetzt.	15
Abbildung 25: Gemessene Auslenkungskurve der exzentrischen Masse. Rechts bei 2.5 bar und links bei 6 bar Ansteuerungsdruck. In blau: gemessene Werte. In orange: Resultate des Least Square Fitting.....	15
Abbildung 26: Messresultate bei einem Meter Schlauchlänge	16
Abbildung 27: Gemessene Auslenkungskurven. V.l.n.r. bei 20 Hertz, 80 Hertz, 120 Hertz. In blau: Auslenkung. In orange: Resultate des Least Square Fitting	16
Abbildung 28: Frequenz-Auslenkungs-Diagramm bei zwei Metern Schlauchlänge.....	17
Abbildung 29: Frequenz-Auslenkungs-Diagramm bei drei Metern Schlauchlänge	17
Abbildung 30: Gemessene Auslenkung bei 50 Hertz. In blau: Gemessene Auslenkung. In orange: Resultat des Least Square Fitting	18
Abbildung 31: Vergleich der Ergebnisse bei 1, 2 und 3 Meter	18
Abbildung 32: Gemessene Auslenkung des gefrästen Funktionsmusters. In blau: Gemessene Auslenkung. In orange: Resultat des Least Square Fitting	19
Abbildung 33: Vergleich der Herstellungsverfahren bei einem Meter Schlauchlänge	19

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der einzelnen Lösungsvarianten Legende: - Keine Angaben, I erfüllt Kriterium nicht, II erfüllt Kriterium teilweise, III erfüllt Kriterium.....	11
--	----

Anhang

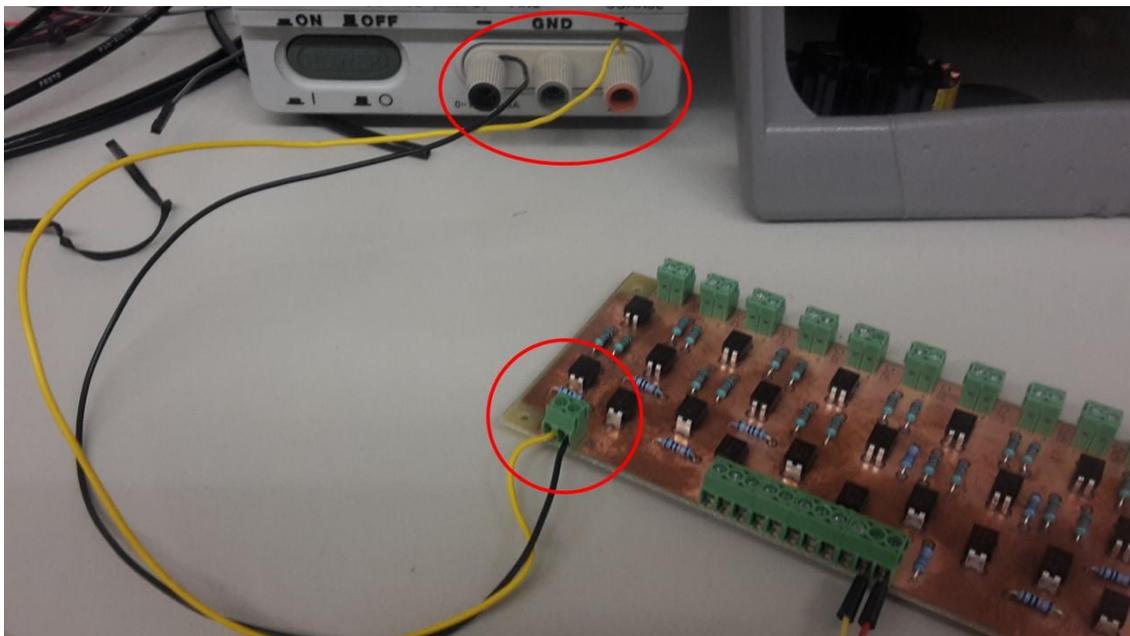
Anhang A: Messanleitungen

Verwendete Geräte und Einstellungen (siehe Blockdiagramm Kapitel 2.3.1):

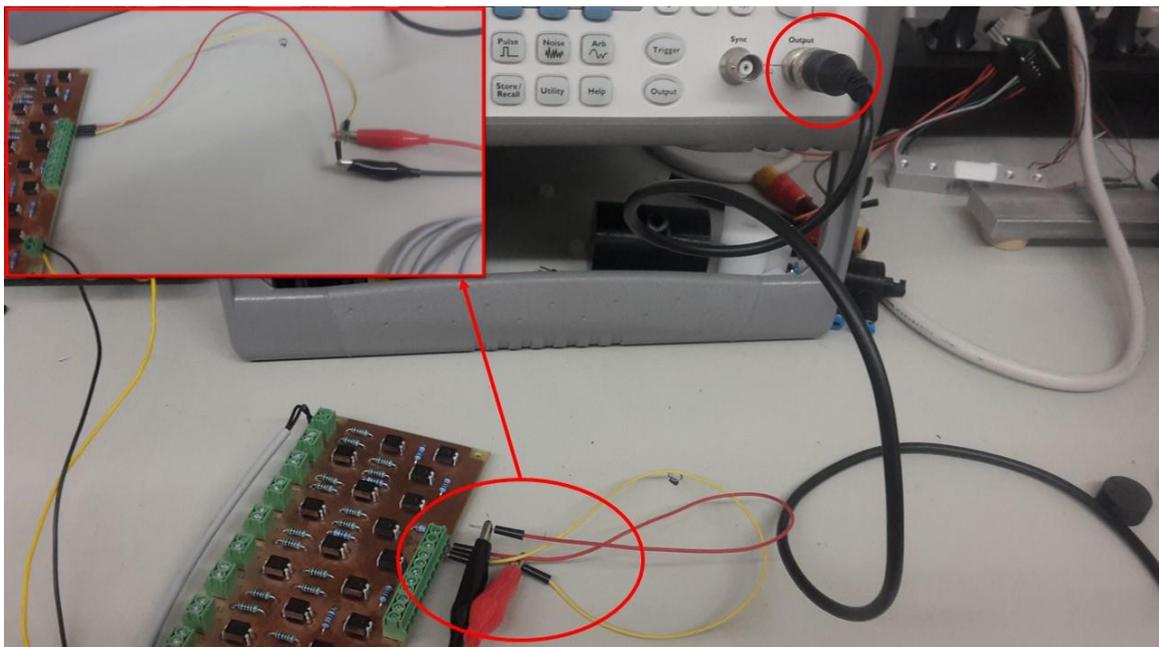
- Netzgerät A: Einstellungen: Ausgangsspannung = 12VDC
- Netzgerät B: Einstellungen: Ausgangsspannung = 24VDC
- Funktionsgenerator: Einstellungen: Ausgangssignal = Rechteck, Amplitudenspannung = 5V
- Ventil: Magnetventile MHE2 Schnellschaltventil, Hersteller: Festo
- Laser-Distanzmesser: AWLG 008 S Laser-Distanzsensor, Hersteller: Welotec
- Oszilloskop: OpenScope MZ, Hersteller: Digilent

Anleitung:

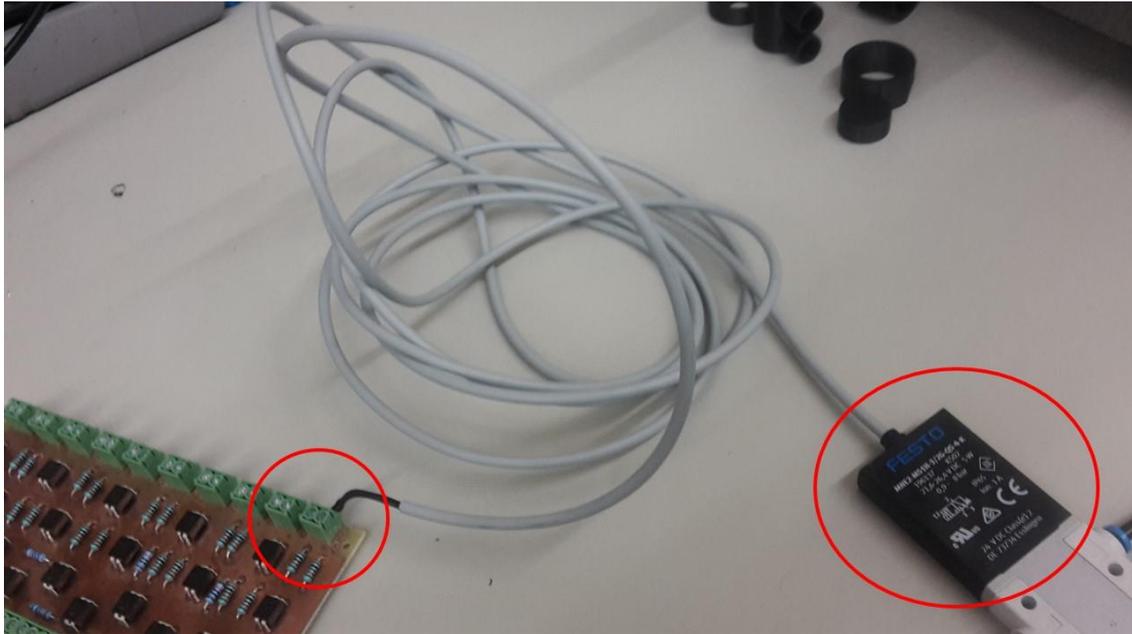
1. Netzgerät A mit Verstärkerschaltung verbinden.



2. Funktionsgenerator mit Verstärkerschaltung verbinden.

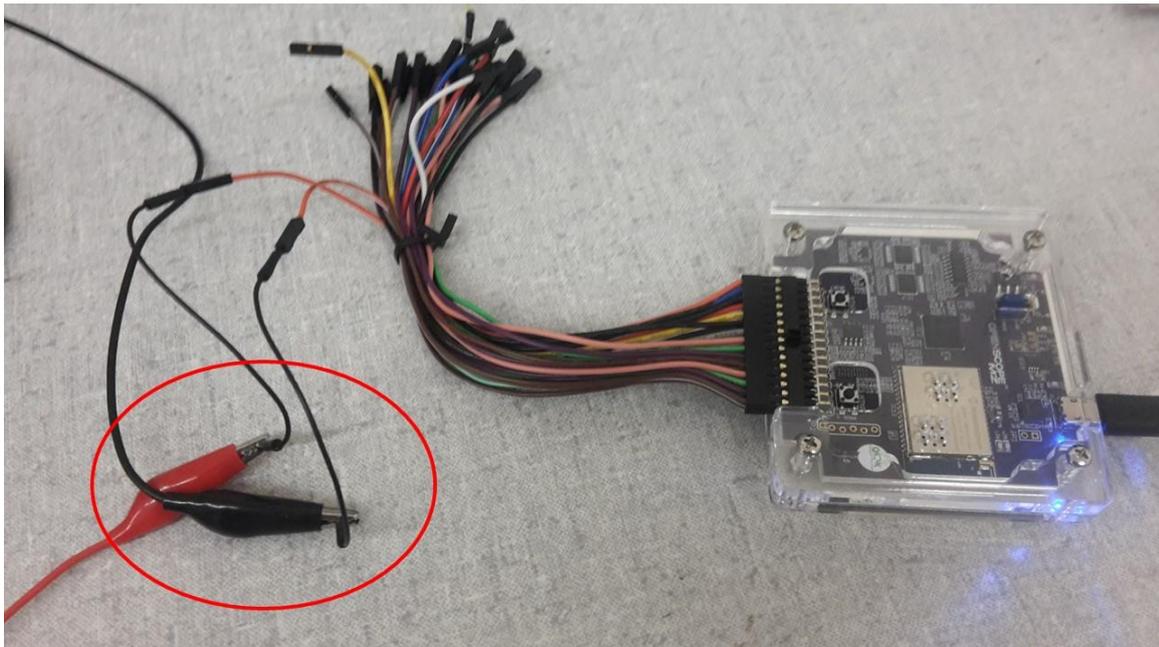


3. Verstärkerschaltung mit Ventil verbinden.



4. Netzgerät B mit Laser-Distanzmesser verbinden.

5. Laser-Distanzmesser mit Oszilloskop verbinden.

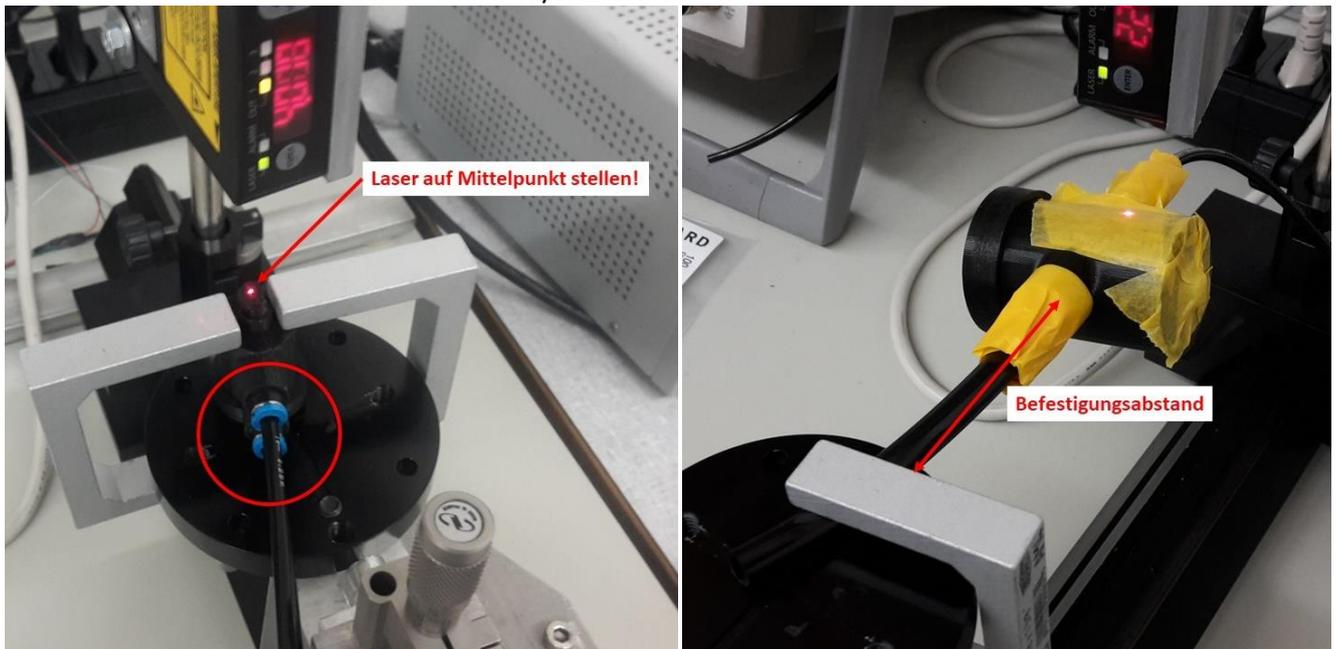


6. Oszilloskop mit Computer verbinden.

7. Druckluftregler an Ventil anschliessen.



8. Ventil mit Vibrationssystem verbinden.



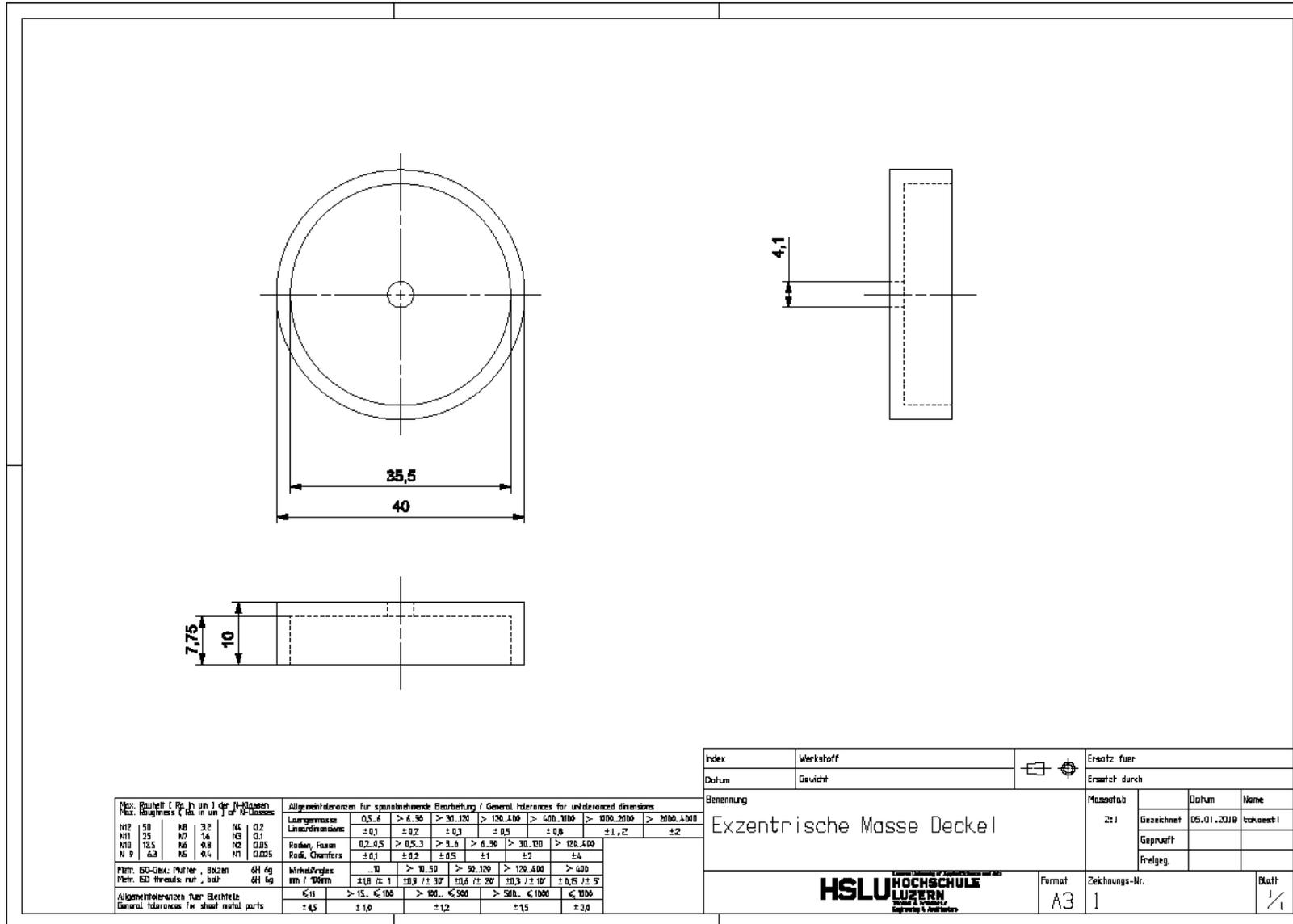
9. Vibrationssystem für die Messung montieren.

10. Messsoftware starten.



11. Netzgerät A, Netzgerät B und Funktionsgenerator einschalten.
12. Druckluft aufdrehen.
13. Messung durchführen.

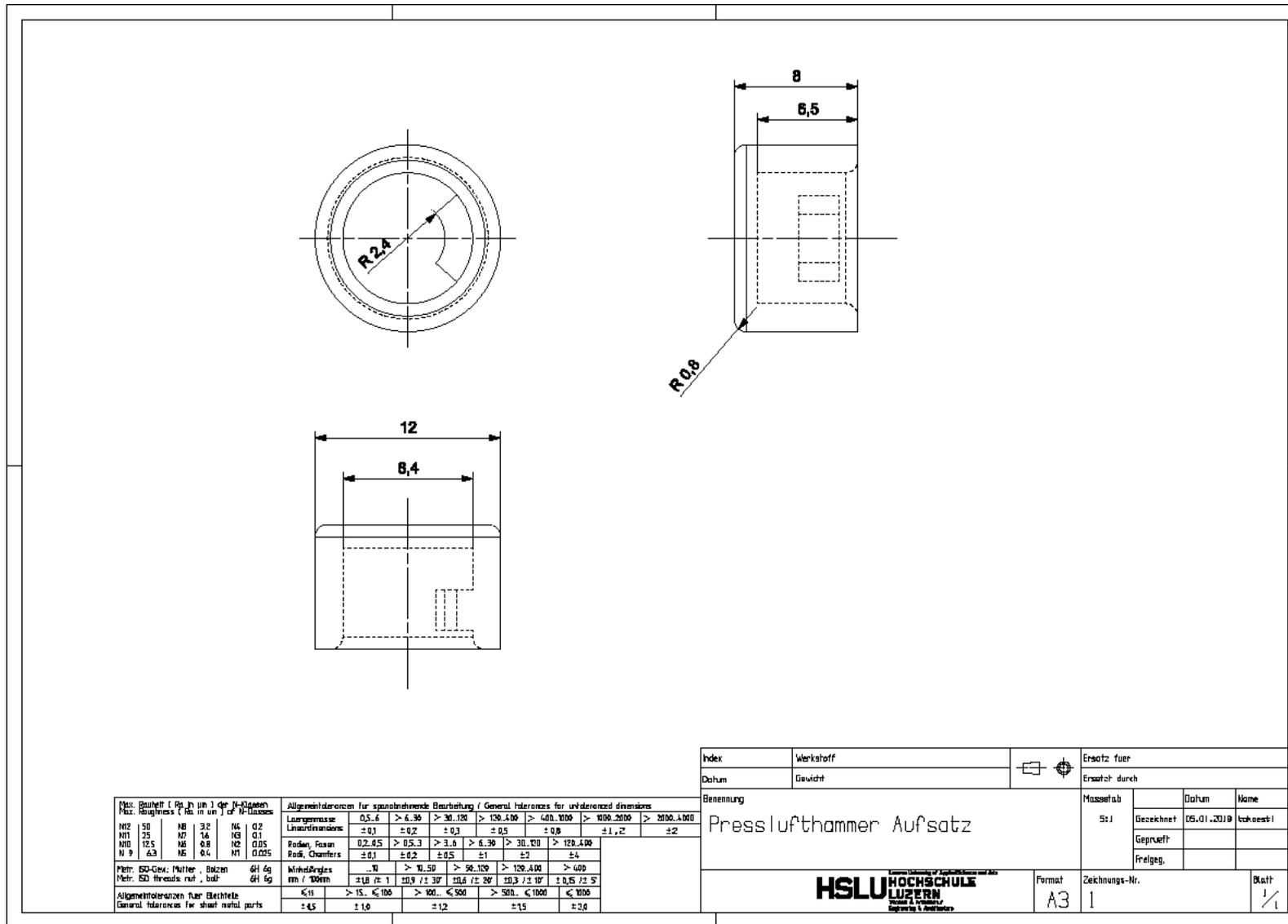
Anhang B: Technische Zeichnungen



Technical drawing of a press air hammer cover. The front view shows a circular cover with a diameter of 25 mm and an inner diameter of 20.5 mm. It features a central hole with a diameter of 2.1 mm and a chamfered edge with a radius of R 3.1. The side view shows a thickness of 5 mm. A detail view shows a chamfered edge with a radius of R 1 and a chamfered hole with a radius of R 5.8. Dimensions for the detail view include 4.5 mm, 7 mm, and 11 mm.

Obj. Rauffheit (Ra in µm) der N-Flächen	Allgemeintoleranzen für spanabhebende Bearbeitung / General tolerances for unfactored dimensions	
Max. Rauffheit (Ra in µm) of N-surfaces	Längsgrösse	
	0.5-6	> 6-30
	> 30-120	> 120-400
	> 400-1000	> 1000-2000
	> 2000-4000	
	±0.1	±0.2
	±0.3	±0.5
	±0.8	±1.2
	±2	
	±0.2-0.5	> 0.5-3
	> 3-6	> 6-30
	> 30-100	> 100-400
	±0.1	±0.2
	±0.5	±1
	±2	±4
	...10	> 10-50
	> 50-100	> 100-400
	> 400	
	±10 / ±1	±10 / ±30
	±10 / ±20	±10 / ±10
	±0.5 / ±5	
	≤ 15	> 15... ≤ 100
	> 100... ≤ 500	> 500... ≤ 1000
	≤ 1000	
	±0.5	±1.0
	±1.2	±1.5
	±0.8	

Index	Werkstoff	Ersatz fuer
Datum	Gewicht	
Benennung		Masstab
Presslufthammer Deckel		Datum
		Name
		Gezeichnet
		05.01.2019
		Geprüft
		Freigegeben
		Format
		A3
		Zeichnungs-Nr.
		1
		Blatt
		1/1



Max. Bauteil L. (in µm) der N-Sizes	Max. Bauteil L. (in µm) der N-Sizes			
N2	N3	N4	N5	N6
30	32	35	40	45
N7	N8	N9	N10	N11
50	55	63	70	80

Allgemeintoleranzen für spanabhebende Bearbeitung / General tolerances for un-dimensioned dimensions	
Laengemaesse Linear dimensions	0,5-6 ±0,1
Radial, Form Radial, Chamfers	0,2-0,5 ±0,1
Winkel/Ringles mm / 100mm	±10 / ±1

Index	Werkstoff	Ersatz fuer
Datum	Gewicht	Erstatt durch
Benennung		Massstab
Presslufthammer Aufsatz		5:1
Format		Zeichnungs-Nr.
A3		1
Blatt		1/1

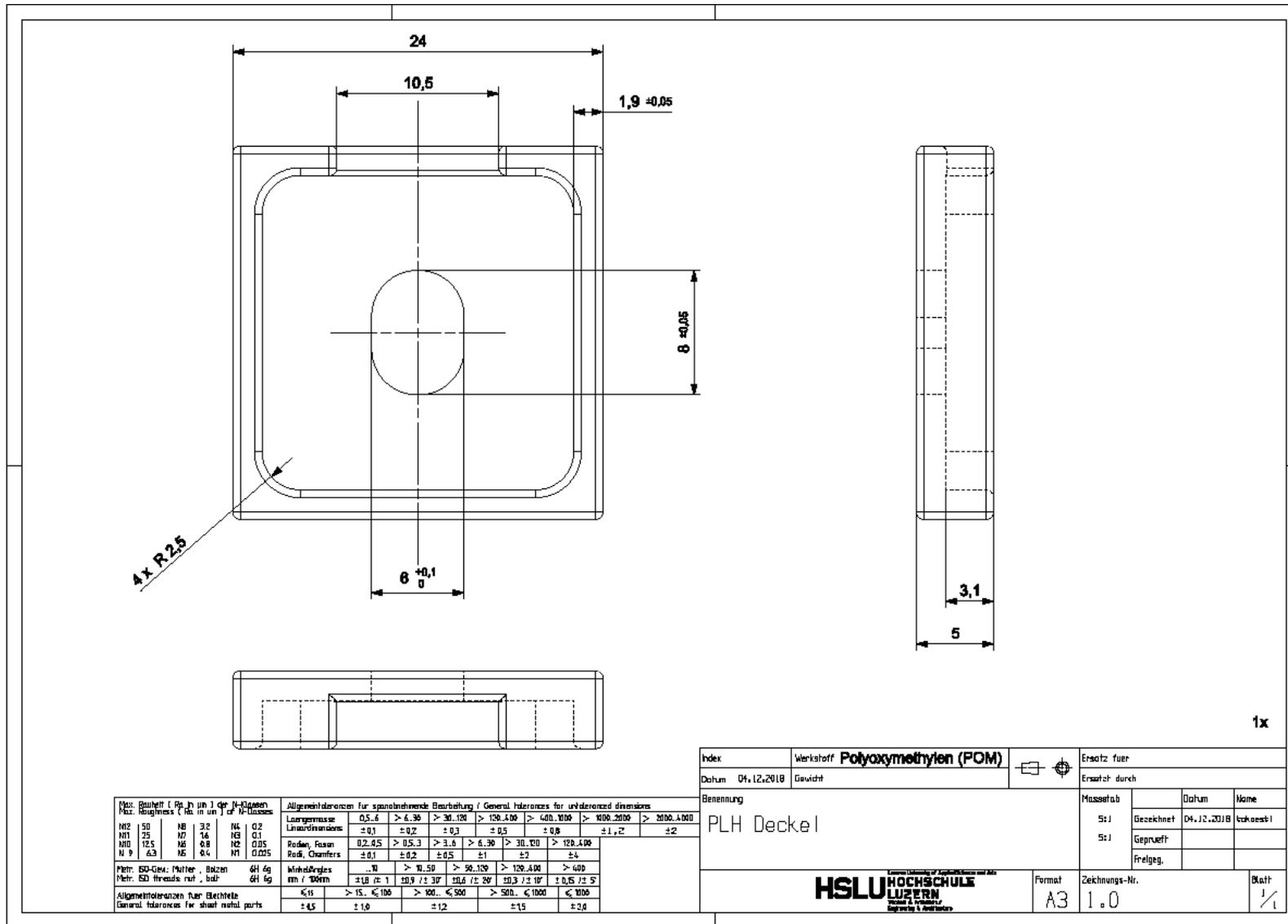
Max. Roughness (Ra in µm) of N-class		Allgemeintoleranzen für spanabhebende Bearbeitung / General tolerances for unvalerized dimensions	
N12	50	N8	3.2
N11	25	N7	1.6
N10	12.5	N6	0.8
N9	6.3	N5	0.4
		N4	0.2
		N3	0.1
		N2	0.05
		N1	0.025

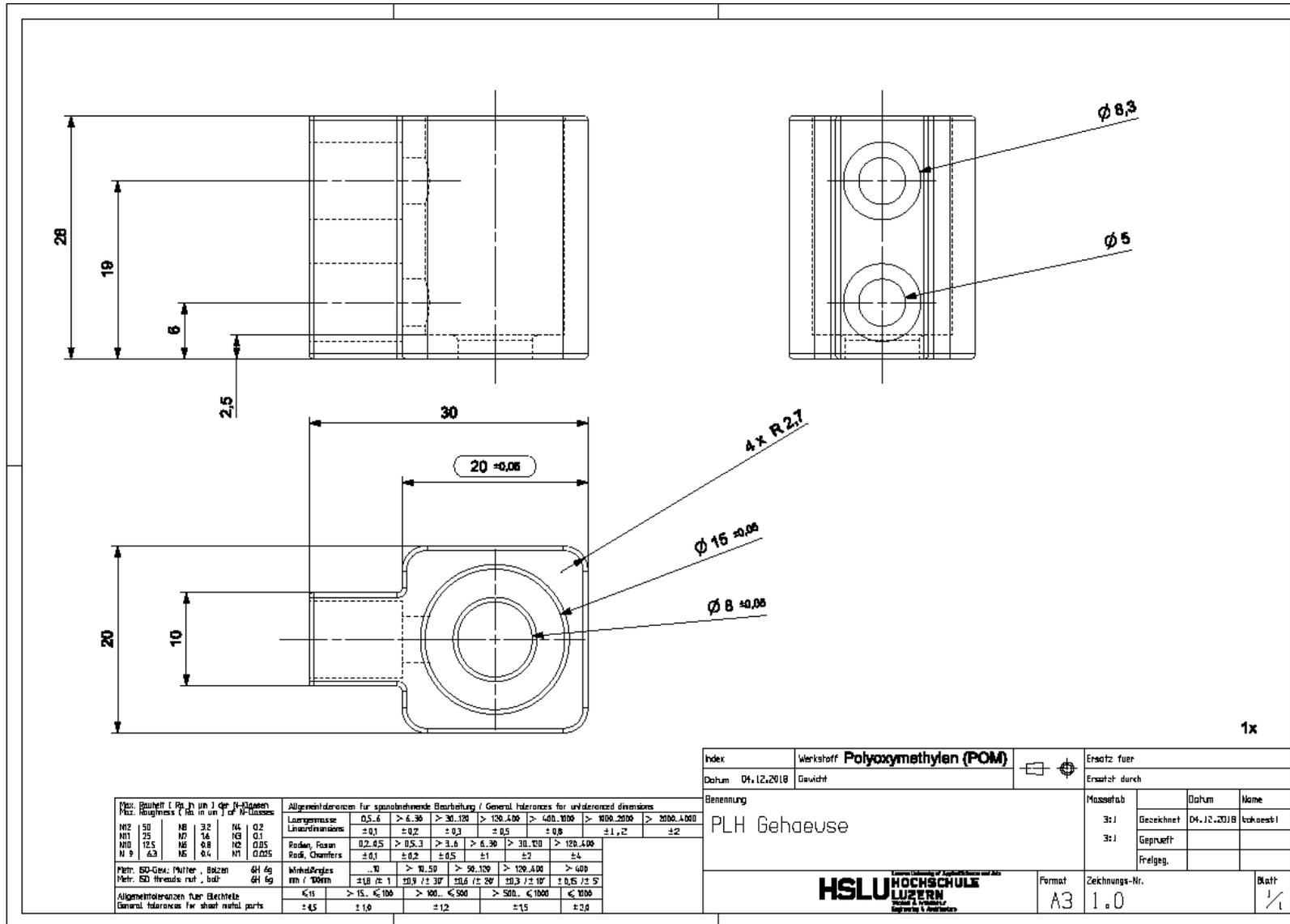
Lineardimensionen	0.5..6	> 6..30	> 30..120	> 120..400	> 400..1000	> 1000..2000	> 2000..4000
Laengermasse	±0.1	±0.2	±0.3	±0.5	±0.8	±1.2	±2
Radren, Fasen	±0.1	±0.2	±0.5	±1	±2	±4	±6
Radri, Chamfers	±0.1	±0.2	±0.5	±1	±2	±4	±6

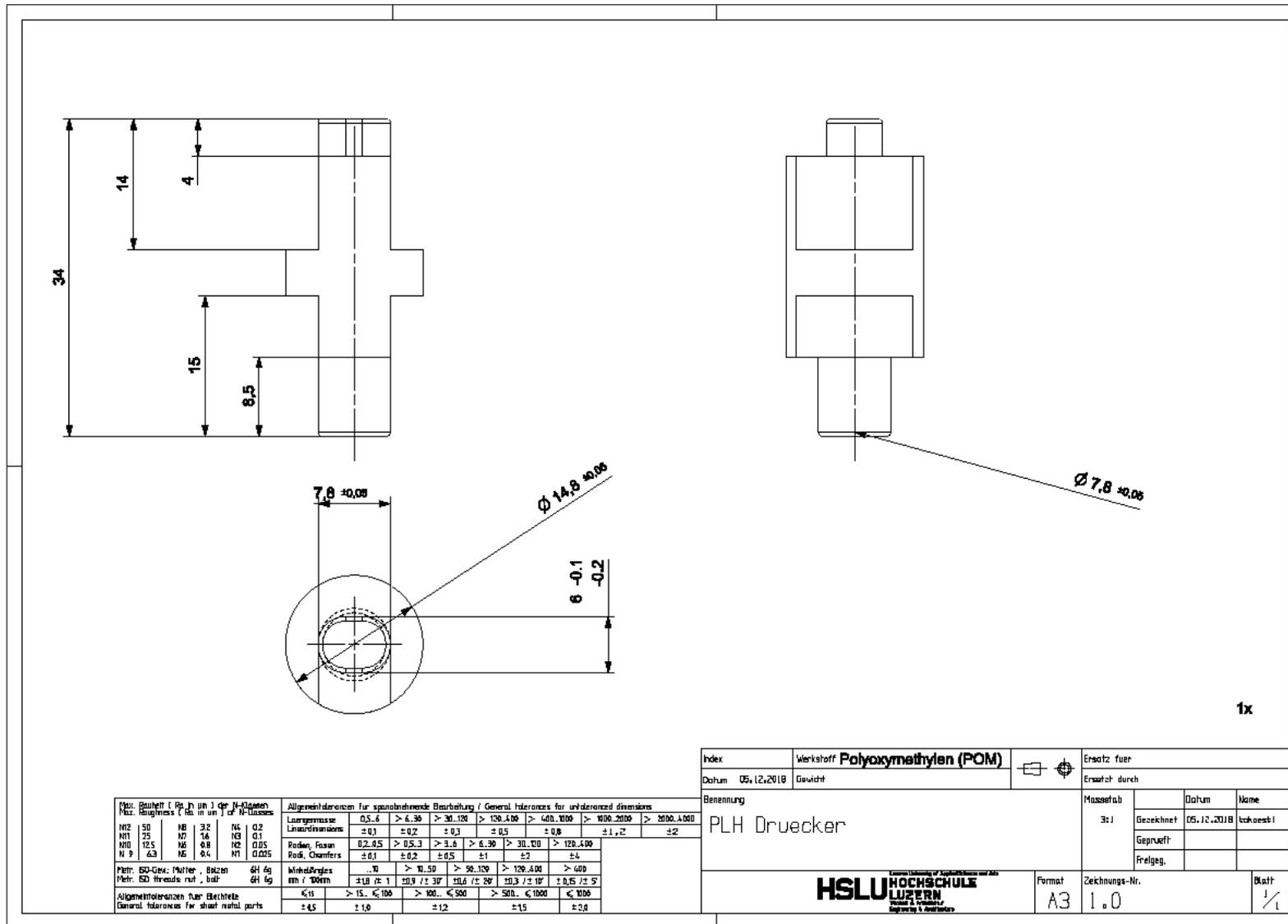
Winkel/Angles	≤ 15	> 15..≤ 30	> 30..≤ 60	> 60..≤ 90	> 90..≤ 120	> 120..≤ 150	> 150..≤ 180
mm / 100mm	±1.0	±1.5	±2.0	±2.5	±3.0	±3.5	±4.0

Allgemeintoleranzen fuer Blechteile / General tolerances for sheet metal parts	
≤ 1.5	±0.5
> 1.5..≤ 100	±1.0
> 100..≤ 500	±1.2
> 500..≤ 1000	±1.5
> 1000	±2.0

Index	Werkstoff	Ersatz fuer	
Datum	Gewicht		Ersatz durch
Benennung		Massestab 3:1	
Presslufthammer Ueberwurf			Gezeichnet
			Geprueft
		Freigegeben	
HSLU HOCHSCHULE LUZERN		Format	
		A3	
		Zeichnungs-Nr.	
		1	
		Blatt	
		1/1	







Anhang C: Python Sourcecode

```

# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Sun Dec 16 11:21:51 2018

@author: Markus
"""

import time, sys, socket, json
import numpy as np

from PyQt5.QtWidgets import QApplication, QMainWindow
from MainWindow_GUI import Ui_MainWindow

HOST = "127.0.0.1" # IP address of receiver
PORT = 65432      # Port to listen on

class MainWindow(QMainWindow, Ui_MainWindow):
    """Describes the main window."""

    def __init__(self):
        """Initializes the main window."""

        super(MainWindow, self).__init__()
        self.setupUi(self)

        self.state = True

        self.btnStart.clicked.connect(self.startPressed)
        self.btnStop.clicked.connect(self.stopPressed)

    def sendData(self, data):
        """Sends the data via TCP to the given IP-address

        Parameters
        -----
        data (json): The data which will be sent
        """
        with socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM) as s:
            s.connect((HOST, PORT))
            s.sendall(data.encode())

    def sequenceGenerator(self, numValues, valueArr):
        """Generates a pseudo-random sequence. Where a value can appear max
three
times in a row. Values to choose from are given by the user

        Parameters
        -----
        numValues (int): The number of generated values in the array
        valueArr (int): The numbers from which the generator chooses

        Returns
        -----
        arr (int[]): Returns an array with the pseudo-random sequence
        """
        np.random.seed(int(time.time()))
        arr = []

        for i in range(numValues):

```

```
        randomNumber = np.random.choice(valueArr)
        arr.append(int(randomNumber)) #casting is necessary for data
transfer
    if(i > 2):
        if(arr[i-1] == arr[i] and arr[i-2] == arr[i] and arr[i-3] ==
arr[i]):
            if(arr[i] == valueArr[0]):
                arr[i] = valueArr[1]
            else:
                arr[i] = valueArr[0]

    return arr

def startPressed(self):
    """Slot that is connected to the start button."""
    self.state = True
    freqArr = [self.boxFreq1.value(), self.boxFreq2.value()]
    seq = self.sequenceGenerator(self.boxNumStimuli.value(), freqArr)

    data = json.dumps({"State": self.state, "Stim":
self.dbxStimulus.value(),
                      "InterStim": self.dbxInterstimulus.value(), "Seq":
seq})

    self.sendData(data)

def stopPressed(self):
    """Slot that is connected to the stop button"""
    self.state = False

    data = json.dumps({"State": self.state})
    self.sendData(data)

def main():
    """Starts the GUI"""
    app = QApplication(sys.argv)
    main_window = MainWindow()
    main_window.show()
    sys.exit(app.exec_())

if __name__ == "__main__":
    main()
```

```

# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Sun Dec 16 17:45:52 2018

@author: Markus
"""

import time, socket, json
import RPi.GPIO as GPIO
from PyQt5.QtCore import QThread, pyqtSignal

DUTY_CYCLE = 50
PWM_PIN = 18
MRI_SIGNAL_PIN = 1

HOST = "127.0.0.1" # IP address of receiver
PORT = 65432 # Port to listen on
BUF_SIZE = 1024 # Buffer size

receivedData = []
mainState = False

class ListeningThread(QThread):
    """Describes the listening thread"""
    sig = pyqtSignal(dict)

    def __init__(self):
        """Initialize thread"""
        QThread.__init__(self)

    def __del__(self):
        """End the thread"""
        self.wait()

    def run(self):
        """Listens for data from the given sender"""
        self.sig.connect(dataReceived)

    while True:
        with socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM) as s:
            s.bind((HOST, PORT))
            s.listen()
            conn, addr = s.accept()
            with conn:
                while True:
                    data = conn.recv(BUF_SIZE)
                    if not data:
                        break
                    else:
                        dataBytes = data

                    decodedData = json.loads(dataBytes.decode())
                    self.sig.emit(decodedData)

def dataReceived(data):
    """Function is called when data has been received

    Parameters
    -----
    data (json): The data was received
    """
    global receivedData

```

```
global mainState

receivedData = data
mainState = receivedData.get("State")

def main():
    """Starts the listening thread. Operates the valves"""
    listener = ListeningThread()
    listener.sig.connect(dataReceived)
    listener.start()

global receivedData
global mainState

while True:
    if mainState:
        GPIO.setmode(GPIO.BCM)
        GPIO.setup(MRI_SIGNAL_PIN, GPIO.IN)
        GPIO.setup(PWM_PIN, GPIO.OUT)

        # Synchronizes the stimulation with the MRI machine.
        while not GPIO.input(MRI_SIGNAL_PIN):
            time.sleep(0.5)

        seqArr = receivedData.get("Seq")
        timePulse = receivedData.get("Stim")
        timePause = receivedData.get("InterStim")

        p = GPIO.PWM(PWM_PIN, seqArr[0])
        for i in range(len(seqArr)):
            p.start(DUTY_CYCLE)
            time.sleep(timePulse)
            p.stop()
            time.sleep(timePause)
            p.ChangeFrequency(seqArr[i])

            if not mainState:
                break

        GPIO.cleanup()
        mainState = False

if __name__ == "__main__":
    main()
```

Anhang D: Datenblätter

Industrielle Sensoren / Laser- & LED-Distanzsensoren

AWLG Laser-Distanzsensoren

Triangulation (bis 400 mm)



In puncto Genauigkeit macht den Sensoren der AWLG Serie kaum jemand etwas vor. Auflösungen ab 0.5 µm und eine Messfrequenz von bis zu 5.000 Hz zeigen deutlich wie performant diese Serie ist. Dank der neuesten Lasertechnologie und dem CMOS Sensor ist eine hohe Farbunabhängigkeit auch auf schwierigen Oberflächen garantiert. Doch auch die Ausstattung des Sensors kann

überzeugen, eine integrierte Distanzanzeige, eine serielle RS-422 und RS-485 Schnittstelle und je nach Version ein Spannungs- oder Stromausgang. Dazu verfügt der mit besonders leichte Sensor über 3 Transistorausgänge. Mittels serieller Schnittstelle können Sensoren der AWLG Serie mit einer separaten, speziell abgestimmten Anzeige verbunden werden.

	AWLG 008 x	AWLG 020 x	AWLG 040 x	AWLG 120 x	AWLG 300 x
MESSDATEN					
Messbereich	26 - 34 mm	40 - 60 mm	65 - 105 mm	60 - 180 mm	100 - 400 mm
Auflösung	0,5 µm	1,5 µm	2,5 µm	8 µm	20 µm
Linearitätsabweichung	0,008 mm	0,02 mm	0,04 mm	0,12 mm	0,9 mm
Strahldurchmesser	0,1 - 0,1 mm	0,5 - 1 mm	0,75 - 1,25 mm	1 - 1,5 mm	1,75 - 3,5 mm



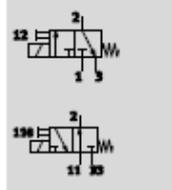
Zum Hagenbach 7 • D-48366 Laer • Fon: +49 (0)2554/9130-00 • Fax: +49 (0)2554/9130-10 • info@welotec.com
www.welotec.com

Magnetventile MHE2, Schnellschaltventile

FESTO

Datenblatt – Einzelventil, 3/2-Wegeventil

Funktion



- Spannung
24 V DC
- Druck
-0,9 ... +8 bar
- Temperaturbereich
-5 ... +60°C



Allgemeine Technische Daten	
Ventilfunktion	3/2, monostabil ¹⁾
Konstruktiver Aufbau	druckentlastetes Sitzventil
Überdeckung	negative Überdeckung
Dichtprinzip	weich
Rückstellart	mechanische Feder
Betätigungsart	elektrisch
Steuerart	direkt
Strömungsrichtung	reversibel mit Einschränkungen ²⁾
Abluftfunktion	drosselbar
Handhilfsbetätigung	tastend
Einbaulage	beliebig
Baubreite	[mm] 10
Rastermaß	[mm] 14 (Mindestabstand 4 mm)
Nennweite	[mm] 2
Normalnenndurchfluss	[l/min] 100
Befestigungsart	mit Durchgangsbohrung
Pneumatischer Anschluss	Anschlussgewinde M7 Steckanschluss für Schlauch-Außen-Ø 4 mm
Produktgewicht	[g] 60

- 1) Durch Verschließen von Anschluss 3 oder 33 als 2/2-Wegeventil einsetzbar
- 2) Im Druckbereich -0,8 bar bis +0,5 bar kann eine geringe Leckage auftreten.

Betriebs- und Umweltbedingungen	mit Schnellschaltelektronik		ohne Schnellschaltelektronik	
	Betriebsmedium	Druckluft nach ISO 8573-1:2010[7:4:4]		
Hinweis zum Betriebs-/Steuermedium	geölter Betrieb möglich (m weiteren Betrieb erforderlich)			
Betriebsdruck	[bar]	-0,9 ... +8		
	reversibel	[bar]	-0,9 ... +1	
Umgebungstemperatur	[°C]	-5 ... +60		
Mediumstemperatur	[°C]	-5 ... +60		
Einschränkung Umgebungs- und Medientemperatur	in Abhängigkeit von der Schaltfrequenz (siehe Diagramm)			
Korrosionsbeständigkeit KBK ¹⁾	2			
CE-Zeichen (siehe Konformitätserklärung)	nach EU-EMV-Richtlinie ²⁾			-
Zulassung	c UL us - Recognized (OL)			c UL us - Recognized (OL)
	RCM Mark			-

- 1) Korrosionsbeständigkeitsklasse 2 nach Festo Norm 940 070
Bauteile mit mäßiger Korrosionsbeanspruchung. Außenliegende sichtbare Teile mit vorrangig dekorativer Anforderung an die Oberfläche, die im direkten Kontakt zur umgebenden industriellen Atmosphäre bzw. Medien, wie Kälte- und Schmelzstoffe stehen.
- 2) Bitte entnehmen Sie den Nutzungsbereich der EG-Konformitätserklärung: www.festo.com/ep → Zertifikate.
Im Falle von Nutzungsbeschränkungen der Geräte in Wohn-, Geschäfts- und Gewerbebereichen, sowie Kältebetrieben, können weitere Maßnahmen zur Reduzierung der Störaussendung erforderlich sein.