



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

## **Bachelorarbeit**

Robert Timm

# **Entwicklung eines Modellprüfstands zur Vibrationsprüfung von Traktionsbatterien mit Vierpunkt-Anregung**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Automotive and  
Aeronautical Engineering*

---

**Robert Timm**

**Entwicklung eines Modellprüfstands zur  
Vibrationsprüfung von Traktions-  
batterien mit Vierpunkt-Anregung**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Fahrzeugtechnik  
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:  
RMS Dynamic Test Systems  
Gutenbergstrasse 27  
21465 Reinbek

Erstprüfer: *Prof. Dr.-Ing. B. Plaumann*  
Zweitprüfer: *Dipl.-Ing. S. Kos*

Abgabedatum: 30.04.2023

---

# Zusammenfassung

**Robert Timm**

## Thema der Bachelorthesis

Entwicklung eines Modellprüfstands zur Vibrationsprüfung von Traktionsbatterien mit Vierpunkt-Anregung

## Stichworte

Traktionsbatterie, Vibrations- und Schockprüfung, Elektrodynamische Schwingungserregung

## Kurzzusammenfassung

Mit dieser Bachelorarbeit wird eine Voruntersuchung im Bereich der dynamischen Traktionsbatterieprüfung unter Vibration und Schock durchgeführt. Das Ziel ist ein auf dem Wege der methodischen Produktentwicklung (MPE) entworfener Modellprüfstand, der in kleinem Maßstab und mit vereinfachtem Aufbau die wesentlichen Funktionen präsentiert. Grundlegend sind die realitätsnahe Vierpunkt-Anregung und die elektrodynamischen Shaker. Die aus der MPE gewonnenen Schlüsse werden in einer CAD-Konstruktion umgesetzt und anschließend gefertigt. Die Konstruktion ist auf die additive Fertigung ausgerichtet, welche auch die Hauptrolle bei der Herstellung des Prüfstands spielt.

**Robert Timm**

## Title of the paper

Development of scaled testing equipment for vibration testing of rechargeable energy storage systems with four point stimulation

## Keywords

rechargeable energy storage systems, vibration and shock testing, electrodynamic oscillatory pulse

## Abstract

This bachelor thesis is a preliminary assessment for the testing of rechargeable energy storage systems under dynamic vibration and shock. The goal is a scaled testing equipment designed along the path of methodical product engineering (MPE), which presents the essentials functions in a small scale and with a simplified structure. The realistic four-point stimulation and the electrodynamic shakers are fundamental.

The conclusions drawn from the MPE are used for CAD-construction and the subsequent production. The design is geared towards additive manufacturing, which also is the leading process in production of the testing equipment.

---

# Aufgabenstellung

Entwicklung eines Modellprüfstands zur Vibrationsprüfung von Traktionsbatterien mit Vierpunkt-Anregung

## Hintergrund

Durch signifikante Fortschritte im Bereich der Elektromobilität sowie staatlicher Förderungen hat die Lithium-Ionen-Technik den Akkumulatorbau in der Fahrzeugtechnik erobert und seine Dominanz gefestigt. Ein Bereich befasst sich dabei mit der Prüfung derartiger Speichermedien. Hier gilt es Sorge zu tragen, dass Performance-, Sicherheits-, sowie Umweltstandards erreicht werden. Zum Zwecke der Nachweisführung während der Homologation, zur internen Qualitätssicherung oder der Bauteilprüfung nach der Einführung neuer Fertigungsmethoden bilden elektrodynamische Vibrations- und Schockprüfungen ganzer Traktionsbatterien ein wichtiges Prüfverfahren für Belastbarkeit und Betriebssicherheit.

Bisherige Prüfverfahren aus Fahrzeugkonzepten mit Verbrennungsmotoren betrachten zu prüfende Bauteile als Anbauteile, z.B. der Struktur. Da eine großflächig unterflurmontierte Traktionsbatterie in Abmessungen und Gewicht mit starker mechanischer Interaktion mit dem Restfahrzeug nicht als Anbauteil betrachtet werden kann, sind neuartige Prüfverfahren und Prüfmethoden zu entwickeln. Insbesondere die Anregung der Fahrzeugbatterie in ihren vier Ecken ist realitätsnah für einen entsprechenden Komponententest im Labor nachzubilden.

In der vorliegenden Aufgabenstellung soll als Voruntersuchung ein solcher Vier-Stempel-Shaker-Aufbau mit elektrodynamischen Schwingungserregern kleinstmöglich und stark vereinfacht aufgebaut werden, um die Realisierung der wichtigsten Funktionen exemplarisch zu demonstrieren und für spätere Folgeentwicklungen größerer System Analysen zu ermöglichen.

## Aufgabenstellung

Im Rahmen der Bachelorarbeit soll mit den gängigen Mitteln der methodischen Produktentwicklung ein Prüfstandsmodell erarbeitet werden, welches im Maßstab 1:10 den Prüfvorgang eines Originals veranschaulichen soll.

Das methodische Vorgehen der Entwicklung, die Konstruktionsphase und die Fertigstellung des Modells sind ausführlich in einem technischen Bericht darzustellen.

---

## Arbeitsschritte

- Darlegung der Problemstellung und Abgrenzung der Thematik
- Methodische Entwicklung eines Prüfstandsentwurfes mit kritischer Bewertung der Teilsysteme
- Realisierung wesentlicher Teilfunktionen wie zum Beispiel:
  - Flexible Positionierung der wichtigen Komponenten für unterschiedliche Batteriedummies
  - Verbindungselement zwischen Anregung und Batteriedummy an den Eckpunkten
  - Kräfte und Momente aus gesperrten Freiheitsgraden und ungewollten Bewegungen aufnehmen (in der Lagerung)
  - Bewegungen aus geometrischen Zwängen ausgleichen (Rotation und Seitwärtsbewegung)
- Erstellung einer CAD-Konstruktion
- Auswahl eines geeigneten Batteriedummies mit skalierten Eigenschaften
- Herstellung eines funktionsfähigen Modells zu Präsentationszwecken
- Zusammenfassung des Projekts und Ausblick zur Machbarkeit eines Originals

Die Arbeit gliedert sich in folgende Abschnitte:

1. Einleitung
2. Stand der Technik
3. Anforderungsliste
4. Funktionsstruktur
5. Ideen Workshop
6. Morphologischer Kasten
7. Bewertung
8. Finaler Entwurf
9. CAD-Konstruktion
10. Herstellung
11. Zusammenfassung und Ausblick

---

# Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung .....	III
Abbildungsverzeichnis .....	VI
Abkürzungsverzeichnis .....	IX
Tabellenverzeichnis .....	IX
1. Einleitung.....	1
2. Stand der Technik.....	2
3. Anforderungsliste.....	3
4. Funktionsstruktur .....	4
5. Ideenfindung.....	5
6. Morphologischer Kasten .....	7
7. Bewertung .....	12
8. Finaler Entwurf.....	15
9. CAD-Konstruktion.....	17
10. Herstellung .....	22
11. Zusammenfassung und Ausblick.....	27
Literatur- und Quellenverzeichnis.....	28
A1 – Mindmap „Aufnahme der Querkräfte.....	29
A2 – Lückenanalyse „Ausgleichselement“.....	30
A3 – Morphologischer Kasten .....	31
A4 – Lösungsbewertung .....	33
A5 – Funktionsbewertung .....	34
A6 – Galerie CAD-Teile .....	35
A7 – Galerie Fertigungsteile.....	44

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Batteriedesign [1] .....	2
Abbildung 2: Mindmap-Ausschnitt „Aufnahme der Querkräfte“ .....	5
Abbildung 3: Lückenanalyse-Ausschnitt „Ausgleichselement“ .....	6
Abbildung 4: Legende zu den Lösungsskizzen .....	8
Abbildung 5: Lösung 1 .....	9
Abbildung 6: Lösung 2 .....	10
Abbildung 7: Lösung 3 .....	11
Abbildung 8: Gehäuse mit Magnetanbindung und Führung.....	15
Abbildung 9: Geklebte Eckanbindung .....	15
Abbildung 10: Finaler Entwurf .....	16
Abbildung 11: Shaker - Draufsicht perspektivisch .....	17
Abbildung 12: Shaker - Untersicht perspektivisch .....	17
Abbildung 13: Gehäuseoberteil mit Profilskizze - Vorderansicht .....	17
Abbildung 14: Gehäuseunterteil - Oberseite .....	18
Abbildung 15: Führungskrone - Vorderansicht .....	19
Abbildung 16: Führungskrone Profilskizze .....	19
Abbildung 17: Gehäuse - Vorderansicht Explosion .....	19
Abbildung 18: Gehäuse - Vorderansicht.....	19
Abbildung 19: Gehäuse mit Klemmbemaßung.....	20
Abbildung 20: Eckanbindung Unterseite Explosion .....	21
Abbildung 21: Verstärkeraufnahme Paar .....	21
Abbildung 22: Grundplatte .....	22
Abbildung 23: Gehäuse demontiert.....	23
Abbildung 24: Gehäuse montiert.....	23
Abbildung 25: Eckanbindung .....	24
Abbildung 26: Modellprüfstand montiert.....	24
Abbildung 27: Modellprüfstand mit Verstärkern Vorderseite.....	25
Abbildung 28: Modellprüfstand mit Verstärkern perspektivisch .....	26
Abbildung 29: Modellprüfstand mit Verstärkern seitlich .....	26
Abbildung 30: Lösungsvariationen 1 bis 3.....	33
Abbildung 31: Shaker - Oberseite .....	35
Abbildung 32: Shaker - Unterseite .....	35
Abbildung 33: Gehäuseoberteil - Oberseite .....	35
Abbildung 34: Gehäuseoberteil mit Profilskizze .....	35

---

Abbildung 35: Gehäuseoberteil - Vorderansicht.....	35
Abbildung 36: Gehäuseoberteil mit Profilskizze – Vorderansicht.....	36
Abbildung 37: Gehäuseoberteil – Unterseite.....	36
Abbildung 38: Gehäuseunterteil - Draufsicht.....	37
Abbildung 39: Gehäuseunterteil - Oberseite.....	37
Abbildung 40: Gehäuseunterteil – Unterseite.....	37
Abbildung 41: Gehäuseunterteil mit Profilskizze - Vorderansicht.....	37
Abbildung 42: Führungskrone - Vorderansicht.....	37
Abbildung 43: Führungskrone Profilskizze.....	38
Abbildung 44: Führungskrone mit Profilskizze - Vorderansicht.....	38
Abbildung 45: Führungskrone - Draufsicht.....	38
Abbildung 46: Führungskrone - Untersicht.....	38
Abbildung 47: Führungskrone - Oberseite.....	38
Abbildung 48: Führungskrone - Unterseite.....	38
Abbildung 49: Gehäuse – Vorderansicht Explosion.....	39
Abbildung 50: Gehäuse – Unterseite Explosion.....	39
Abbildung 51: Gehäuse - Vorderansicht.....	39
Abbildung 52: Gehäuse – Oberseite Explosion.....	39
Abbildung 53: Gehäuse - Untersicht.....	40
Abbildung 54: Gehäuse Unterseite.....	40
Abbildung 55: Gehäuse Profilskizze - Vorderansicht.....	40
Abbildung 56: Gehäuse Profilskizze - Kronenspitze.....	40
Abbildung 57: Gehäuse Profilskizze - Übergang Krone-Oberteil.....	40
Abbildung 58: Gehäuse Profilskizze – Übergang Oberteil-Unterteil.....	40
Abbildung 59: Eckanbindung Vorderansicht.....	41
Abbildung 60: Eckanbindung Vorderansicht Explosion.....	41
Abbildung 61: Eckanbindung Unterseite.....	41
Abbildung 62: Eckanbindung Unterseite Explosion.....	41
Abbildung 63: Drahtaufnahme Oberseite.....	41
Abbildung 64: Drahtaufnahme Unterseite.....	41
Abbildung 65: Prüflingsaufnahme Unterseite.....	42
Abbildung 66: Verstärkeraufnahme links.....	42
Abbildung 67: Verstärkeraufnahme Paar.....	42
Abbildung 68: Verstärkeraufnahme - Innenseite.....	42
Abbildung 69: Verstärkeraufnahme - Außenseite.....	43
Abbildung 70: Grundplatte lose.....	44
Abbildung 71: Grundplatte Materialien.....	44

---

Abbildung 72: Grundplatte verschraubt.....	44
Abbildung 73: Gehäuse demontiert.....	44
Abbildung 74: Gehäuse montiert.....	45
Abbildung 75: Gehäuse Unterseite .....	45
Abbildung 76: Drahtanbindung.....	45
Abbildung 77: Drahtanbindung gesteckt .....	45
Abbildung 78: Prüflingsanbindung Oberseite .....	45
Abbildung 79: Prüflingsanbindung Unterseite .....	45
Abbildung 80: Prüflingsanbindung 35 mm.....	45
Abbildung 81: Prüflingsanbindung 30 mm mit Montagewerkzeug .....	45
Abbildung 82: Eckanbindung montiert.....	46
Abbildung 83: Modellprüfstand montiert Vorderseite .....	46
Abbildung 84: Modellprüfstand montiert Oberseite.....	46
Abbildung 85: Modellprüfstand mit Verstärkern Vorderseite.....	47
Abbildung 86: Modellprüfstand mit Verstärkern perspektivisch .....	47
Abbildung 87: Modellprüfstand mit Verstärkern seitlich .....	47

---

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
BEV	Batteriebetriebenes Elektrofahrzeug – engl. Battery Electric Vehicle
EV	Elektrofahrzeug – engl. Electric Vehicle
FDM	Schmelzschichtung – engl. Fused Deposition Modelling
ICE	Verbrennungsmotor – engl. Internal Combustion Engine
MPE	Methodische Produktentwicklung
OEM	Hersteller – engl. Original Equipment Manufacturer
RESS	Traktionsbatterie – engl. Rechargeable Energy Storage Systems

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anforderungsliste .....	3
Tabelle 2: Funktionsstruktur.....	4
Tabelle 3: Morphologischer Kasten.....	7
Tabelle 4: Aufstellung der Lösungsvariationen.....	8
Tabelle 5: Lösungsbewertung .....	12
Tabelle 6: Bewertungssystem Beispielrechnung .....	12
Tabelle 7: Ausschnitt Lösungsbewertung.....	13
Tabelle 8: Funktionsbewertung .....	13
Tabelle 9: Ausschnitt Funktionsbewertung.....	14
Tabelle 10: Daten - Brett.....	22
Tabelle 11: Daten - Blech .....	23
Tabelle 12: Lösungsbewertung .....	33
Tabelle 13: Funktionsbewertung 1 .....	34
Tabelle 14: Funktionsbewertung 2 .....	34

## 1. Einleitung

Diese Arbeit wird kooperativ von der „HAW Hamburg“ und „RMS Regelungs- und Messtechnik Dipl.-Ing. Schaefer GmbH & Co KG“ durchgeführt. RMS produziert elektrodynamische Schwingprüfanlagen und Schockprüfmaschinen für einen weiten Anwendungsbereich und steht mit ihrer über 60-jährigen Expertise dieser Bachelorarbeit zur Seite. Das Ziel ist ein Modellprüfstand zum Zwecke der Veranschaulichung und als Vorstudie zur Machbarkeit. Zudem soll er im Weiteren als Grundlage für einen Messaufbau im modellierten Maßstab, sowie einer Reglerentwicklung dienen können.

Mit dem Bestreben die Prüfung von Fahrzeugbatterien, insbesondere bei der Elektromobilität, zu modernisieren und an die Anforderungen von heute anzupassen, wird neue Prüfausrüstung benötigt. Um große unterflurmontierte Fahrzeugbatterien als schlanke und schwingfähige Komponenten ausbilden zu können, muss ihre Schwingfähigkeit und -beständigkeit reproduzierbar und in einem für die Industrie angemessenen Zeit- und Kostenaufwand prüfbar sein. Ressourcenschonung und Effizienzsteigerung durch Gewichtersparnis machen diese Strukturänderung lohnenswert.

Für die Gestaltung des Modellprüfstands wird mit Hilfe der methodischen Produktentwicklung ein funktionierendes und produzierbares Konzept zur Demonstration aufgestellt. Mit den Ergebnissen der MPE wird eine CAD-Konstruktion erstellt, die als Grundlage für die Produktion dient und in einem Maße erweiterbar ist, dass in der Zukunft daran weitergearbeitet werden kann. Der Prüfstand wird in gemischter Bauweise hergestellt, jedoch liegt das Hauptaugenmerk auf der additiven Fertigung, so dass auch die CAD-Konstruktion überwiegend darauf ausgerichtet ist. Das Interesse liegt in einer modularen und zukunftsfähigen Bauweise, die das CAD-Modell und den Prüfstand für weitere Arbeiten verwendbar macht.

## 2. Stand der Technik

Auf Grund der Entwicklung hin zur Elektromobilität sind in den letzten Jahren diverse große unterflur montierte Batterien für BEV entwickelt worden. Diese Traktionsbatterien werden unter anderem auch Battery Pack genannt und können je nach Größe hunderte bis tausende Lithium-Ionen-Batteriezellen enthalten. Üblicherweise werden die Zellen auf eine von zwei Arten verbaut. Wie in Abbildung 1 dargestellt, werden die Zellen entweder durch den cell2car-Ansatz direkt verbaut oder mit dem cell2module-Ansatz schrittweise als Verband zusammengefasst und als Pakete unterflur verbaut. Besonders die Traktionsbatterien nach cell2car-Ansatz sind hochintegrativ und sollten in das Schwingungsverhalten des Fahrzeuges eingebunden werden. [1]

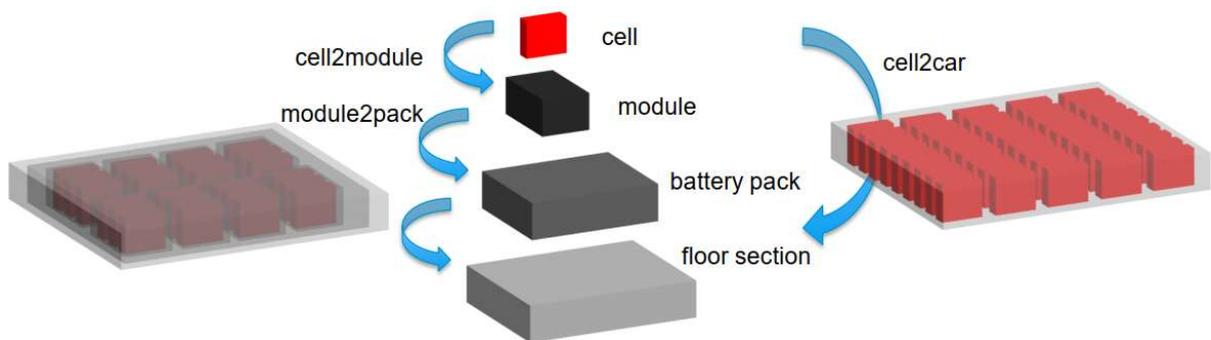


Abbildung 1: Batteriedesign [1]

Diese Batteriezellen stellen durch innere oder äußere Kurzschlüsse, hervorgerufen z. B. durch mechanische Verformung oder Kontakt zu stromführenden Bauteilen, ein potenzielles Brandrisiko dar. Die OEMs der Branche begegnen diesem Risiko jedoch mit diversen Sicherheitsmaßnahmen, weswegen es bei aktuellen Serien-BEV nicht höher ist als bei vergleichbaren ICE-Fahrzeugen [2].

Um die Sicherheit von BEV weiter zu verbessern, ist es erforderlich die bestehenden Prüfmethoden an die neuen Bedingungen anzupassen. Bei der Vibrationsprüfung von Batterien entsprechend ISO 16750-3 werden beispielsweise Fahrzeugbatterien lediglich als starre Anbauteile betrachtet [3]. Diese Betrachtungsweise ist jedoch nicht mit den mehreren hundert Kilogramm schweren, unterflur montierten Traktionsbatterien, die das Fahrverhalten der BEV beeinflussen, kompatibel. Deswegen existieren bereits mehrere neue Ansätze zur Prüfung der Traktionsbatterien. Mit ihnen werden die wichtigsten Parameter, wie z.B. die Steifigkeiten der Lagerung in Abhängigkeit des Frequenzbereichs der Anregung und Materialermüdung, die zur Auslegung der Traktionsbatterien benötigt werden, überprüft. [2]

### 3. Anforderungsliste

Als ersten Arbeitsschritt sieht die VDI 2221 das Erstellen einer Anforderungsliste vor, was in Abstimmung mit dem Erst- und dem Zweitprüfer geschehen ist. [4]

Die einzelnen Anforderungen an den zu entwickelnden Modellprüfstand sind in der Anforderungsliste in Tabelle 1 aufgeführt. Die Kategorien „Funktional“ und „Randbedingung“ unterscheiden sich in ihrem Einfluss auf das Zielkonzept. Die funktionalen Anforderungen haben eine direkte Auswirkung, während die Randbedingungen der Grundvoraussetzung entsprechen und sich aus Aufgabenstellung und üblicher Entwicklungspraxis ergeben.

Neben der Durchnummerierung und der Beschreibung in Textform, sind die Spalten „Wert“ und „Einheit“ für den Fall, dass sich eine Anforderung in Zahlen fassen lässt. Die Spalte „Priorität“ gibt die Relevanz an, mit der die Anforderung zu behandeln ist und auch in der folgenden Bewertung gewichtet wird.

Tabelle 1: Anforderungsliste

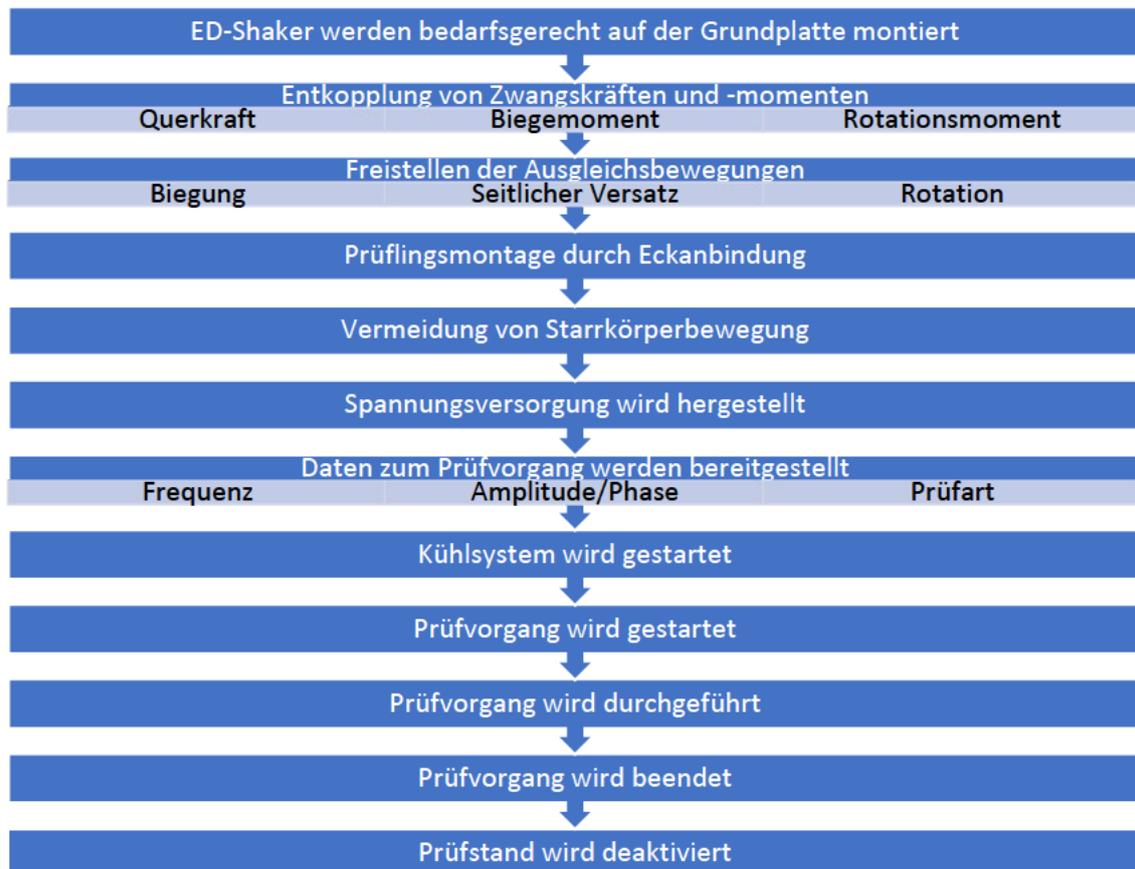
Nr.	Anforderung	Wert	Einheit	Priorität
<b>Funktional</b>				
1	Grundplatte möglichst starr und schwingungsfrei			hoch
2	Integration der durch die Aufgabenstellung gegebenen ED-Shaker			hoch
3	Zwangskräfte und -momente von ED-Shaker entkoppeln			hoch
4	Variable Positionierung der ED-Shaker ermöglichen			mittel
5	Minimale Ausgleichsbewegungen des Prüflings ermöglichen			mittel
6	Ungewollte Starrkörperbewegung vermeiden			mittel
7	Prüfling mit realitätsnaher Steifigkeit			mittel
8	Eckanbindung für den Prüfling ist realitätsnah und lösbar			gering
<b>Randbedingung</b>				
1	Ablauf des Prüfvorgangs wird für Zuschauer ersichtlich			hoch
2	Geringe Anschaffungs- oder Fertigungskosten			hoch
3	Geringer Fertigungsaufwand			hoch
4	Sicherheitsbewertung			mittel
5	Mindestens abzudeckender Frequenzbereich	10-500	Hz	mittel
6	Geringes Transportgewicht			gering
7	Einfacher Standortwechsel			gering
8	Maßstabsgetreue Herstellbarkeit	1:10	-	gering
9	Einfache Bedienung			gering

Mit der Anforderungsliste sind die Ziele und Teilprobleme klar abgesteckt und für alle am Projekt Arbeitenden stets einsehbar. Sie beschreibt den Grundbaustein der methodischen Produktentwicklung und dient als Bezugspunkt für die einzelnen Schritte bis zum finalen Entwurf.

## 4. Funktionsstruktur

Die Funktionsstruktur bildet, wie in Tabelle 2 dargestellt, eine Aneinanderreihung der einzelnen Teilfunktionen, die zur Erfüllung der Gesamtfunktion aus der Aufgabenstellung führen. [4] Sie ist bewusst nicht lösungsorientiert gestaltet und kleingliedrig aufgebaut um jeden Schritt, der benötigt wird, ohne Wertung und Lösungsansatz aufzuzeigen. So ist es möglich unvoreingenommen und optimal vorbereitet in die Ideenfindung einzusteigen und zu vermeiden, dass mögliche Schwierigkeiten erst bei der Konstruktion oder im schlimmstmöglichen Fall während der Produktion auffallen.

Tabelle 2: Funktionsstruktur



Die Funktionsstruktur lässt sich thematisch in zwei Hälften teilen. In der ersten Hälfte wird die Prüfbereitschaft händisch von der bedienenden Person hergestellt, bis der Punkt „Spannungsversorgung wird hergestellt“ abgeschlossen ist. In der zweiten Hälfte übernimmt das Programm des Reglers, der die interne Prüfbereitschaft herstellt und den Prüfablauf überwacht. Die Reglergestaltung beschreibt jedoch nicht den Aufgabenumfang dieser Arbeit, womit der Schwerpunkt auf die erste Hälfte der Funktionsstruktur fällt.

## 5. Ideenfindung

Die Shaker-Wahl und die Spannungsversorgung spielen in der Lösungsfindung keine Rolle, da sie bereits vorhanden sind und als „gegeben“ betrachtet werden. Zudem werden die Funktionen - Daten zum Prüfvorgang werden bereitgestellt, Kühlsystem wird gestartet, Prüfvorgang wird gestartet, Prüfvorgang wird durchgeführt, Prüfvorgang wird beendet und Prüfstand wird deaktiviert – vernachlässigt, da sie nicht Teil dieser Entwicklung sind und anschließend in der Reglergestaltung zu betrachten sind.

Basierend auf den noch offenen Funktionen der Funktionsstruktur werden während der Ideenfindung Teilkonzepte entwickelt, um einen morphologischen Kasten aufzubauen, der mit möglichst großer Vielfalt den Weg zur optimalen Lösung bereitet.

Auf Grund persönlicher technischer Vorbildung und den umfangreichen Lehrinhalten des Studiums konnten Teile des morphologischen Kastens direkt mit möglichen Konzepten gefüllt werden. Für die Vervollständigung wurden darüber hinaus unter anderem die folgenden Strategien angewendet.

Um bei der Aufnahme der Querkräfte zu weiteren Ergebnissen zu kommen, wurde eine Mindmap [5] angelegt. Der gesamte Verlauf befindet sich im Anhang A1 – , der relevante Teil wird in Abbildung 2 dargestellt.

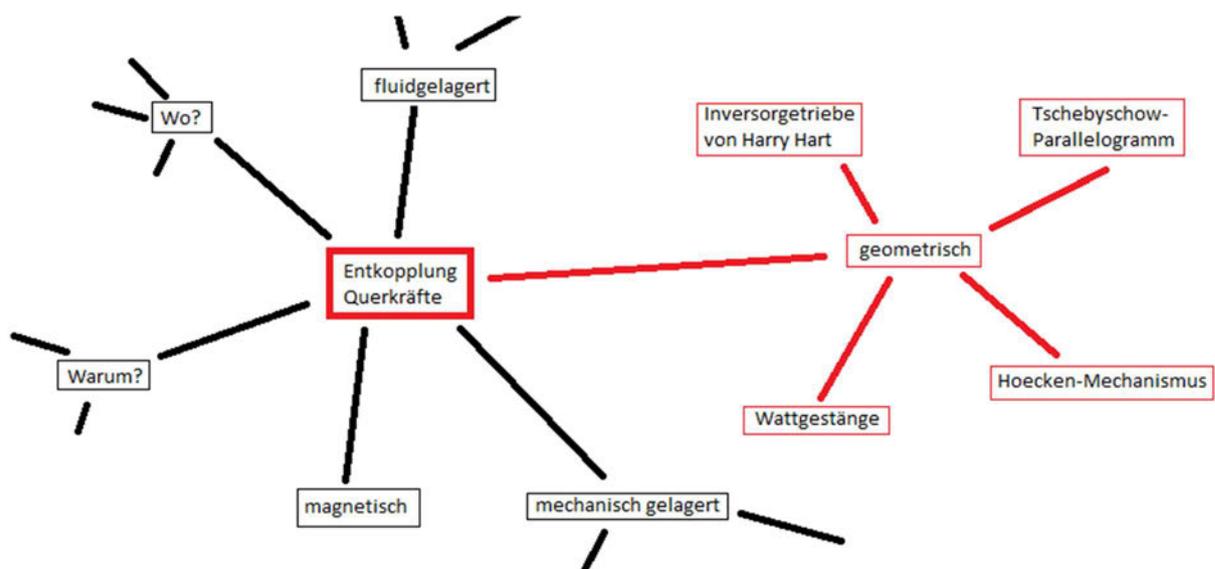


Abbildung 2: Mindmap-Ausschnitt „Aufnahme der Querkräfte“

In dem die Möglichkeiten der physikalischen Ansätze durchgegangen worden sind, konnte bei der Querkraftentkopplung der Zweig der geometrischen Lösung erschlossen werden. Die ermittelten Beispiele an den vier Enden des rot markierten Weges ermöglichen durch ein geometrisches Zusammenspiel aus Stäben und Gelenken auf einem bestimmten Hubweg den Ablauf einer exakten Geraden. Die Komplexität dieser Geometrien ist an dieser Stelle notwendig, da der seitliche Versatz einer normalen Lenkeranbindung in diesem Fall nicht vernachlässigbar wäre und zu neuen schädigenden Querkräften führen würde.

Die Lückenanalyse kommt ursprünglich aus dem Wirtschaftssektor. Ihr Vorgehen wird auf die Problemstellung dieser Arbeit adaptiert. Hierbei wird der Anfangs- und der Endzustand aufgezeichnet und im weiteren nach einer funktionierenden Verbindung gesucht. [6] Im Fall des Ausgleichselements sieht der Anfangszustand einen rein eindimensional gerichteten Impuls vor, der vom Shaker ausgeht. Auf Grund von Eigenfrequenzen, der Verwindung des Prüflings oder anderer Störeinflüsse kann am Ende der Wirkkette eine dreidimensionale, translatorische und rotatorische Bewegung resultieren. Auf dem Pfad dazwischen, der „Lücke“ in dieser Analyse, muss daher eine Möglichkeit gefunden werden, die entstehenden Kräfte abzustützen, abzuleiten, zu verhindern, etc., um die Eindimensionalität im Shaker zu wahren.

Der gesamte Verlauf befindet sich im Anhang A2 – Lückenanalyse „Ausgleichselement“, der relevante Teil wird verkürzt in Abbildung 3 dargestellt.

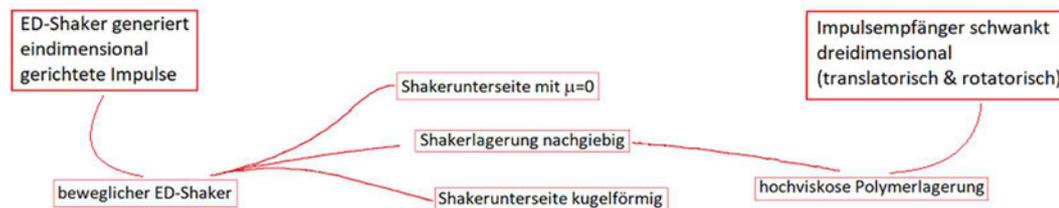


Abbildung 3: Lückenanalyse-Ausschnitt „Ausgleichselement“

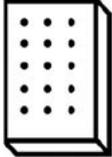
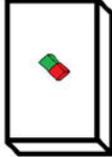
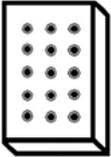
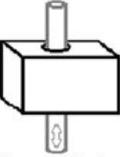
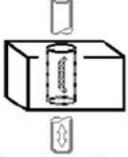
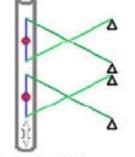
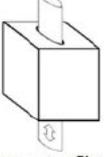
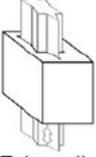
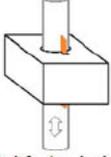
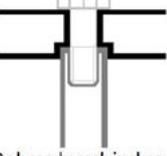
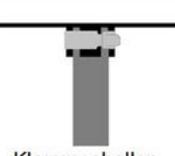
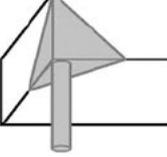
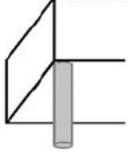
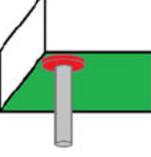
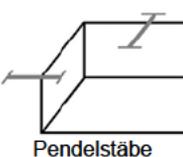
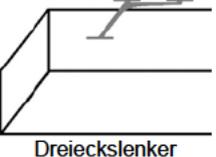
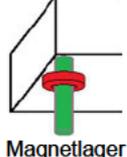
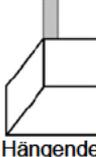
Mit dem beweglichen Shaker bietet sich die Möglichkeit die in Richtung Shaker geleiteten Kräfte abzuleiten. Dabei würde die Verbindung zwischen Shaker und Prüfling sehr kurz und kompakt ausfallen und die Ausgleichsbewegung beispielsweise durch eine viskose Polymerlagerung aufgenommen.

Abseits der zuvor aufgeführten Strategien, wurde am 06.03.2023 mit dem Erst- und dem Zweitprüfer eine Expertenrunde durchgeführt, um einen Blick aus der berufserfahrenen Richtung zu erlangen. Aus diesem Gespräch gehen bei der rotatorischen Abstützung der shakerintegrierte Ansatz und bei der Aufnahme der Aktoren das Spannungsfeld direkt hervor, sowie diverse Verbesserungsvorschläge und Korrekturen.

## 6. Morphologischer Kasten

In Tabelle 3 befindet sich der morphologische Kasten mit den generierten Lösungsansätzen aus der Ideenfindung. Die beigefügten Skizzen dienen der schnelleren Orientierung. Dieser ist in Anhang A3 – Morphologischer Kasten mit größeren Skizzen abgebildet.

Tabelle 3: Morphologischer Kasten

Aktoren bedarfsgerecht montieren	 Vordefinierte Bohrungen	 Langlöcher	 Magnetische Befestigung	 Spannfeld
Querkräfte aufnehmen	 Führungsbolzen (Gleitlager)	 Linearkugellager	 Lenkerführung z. B. Tschebyschow	
Rotation abstützen	 Polygonprofilwelle in Führung	 Zahnwelle in Zahnnahe	 Gleitfeder in Nut	 Im Shaker integriert
Ausgleichsbewegungen ermöglichen	 Flexibler Stab	 Kugelgelenke	 Hochviskose Polymerlagerung	
Ausgleichselement und Eckenbindung verbinden	 Schraubverbindung	 Klebeverbindung	 Klemmschellenverbindung	 Gewindestift-Klemmverbindung
Prüfling am Prüfstand montieren	 Eckplatte verschraubt	 Auf Stoß verschraubt	 Magnetisch	
Seitliche Starrkörperbewegung verhindern	 Pendelstäbe	 Dreieckslenker	 Magnetlager	 Hängende Anordnung

In der ersten Spalte des morphologischen Kastens sind die entsprechenden Funktionen aufgeführt. Sie leiten sich aus den Teilfunktionen der Funktionsstruktur ab. In den weiteren Spalten sind die entwickelten Lösungsansätze zu den entsprechenden Teilfunktionen dargestellt.

Mit der Fertigstellung des morphologischen Kastens wird nach möglichen Verknüpfungen der unterschiedlichen Ansätze gesucht und ein funktionierender Systemablauf zusammengestellt.

[4]

Die folgenden drei Abläufe wurden gebildet und gehen als Ergebnis des morphologischen Kastens in die Bewertung über.

Tabelle 4: Aufstellung der Lösungsvariationen

Funktion	Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3
Aktoren bedarfsgerecht montieren	magnetische Befestigung	Spannfeld	Langlöcher
Querkräfte aufnehmen	Führungsbolzen	Linearkugellager	Führungsbolzen
Rotation abstützen	shakerintegriert	shakerintegriert	shakerintegriert
Ausgleichsbewegungen ermöglichen	flex. Stab	Kugelgelenk	Kugelgelenk
Ausgleichselement und Eckanbindung verbinden	Klemmschelle	verschraubt	Klebung
Prüfling am Prüfstand montieren	Eckplatte	Eckplatte	Eckplatte
Seitliche Starrkörperbewegung verhindern	Dreieckslenker	Pendelstäbe	Pendelstäbe

In Tabelle 4 sind die drei Lösungsvariationen mit ihren Ansätzen aufgelistet. Damit die Umsetzungen besser vorstellbar sind, wurde für jede Variation eine Skizze angefertigt.



Abbildung 4: Legende zu den Lösungsskizzen

Innerhalb der Skizzen wird bereits eine Vorauswahl für Werkstoffe getroffen, wie sie für die weitere Verwendung angedacht sind. Gemäß Abbildung 4 steht hellgrau für metallische Werkstoffe, dunkelgrau für Kunststoffe und das Zweifarbiges für einen Permanentmagneten.

Die in Abbildung 5 dargestellte „Lösung 1“, verfolgt den Ansatz der geringen Komplexität bei hoher Flexibilität.

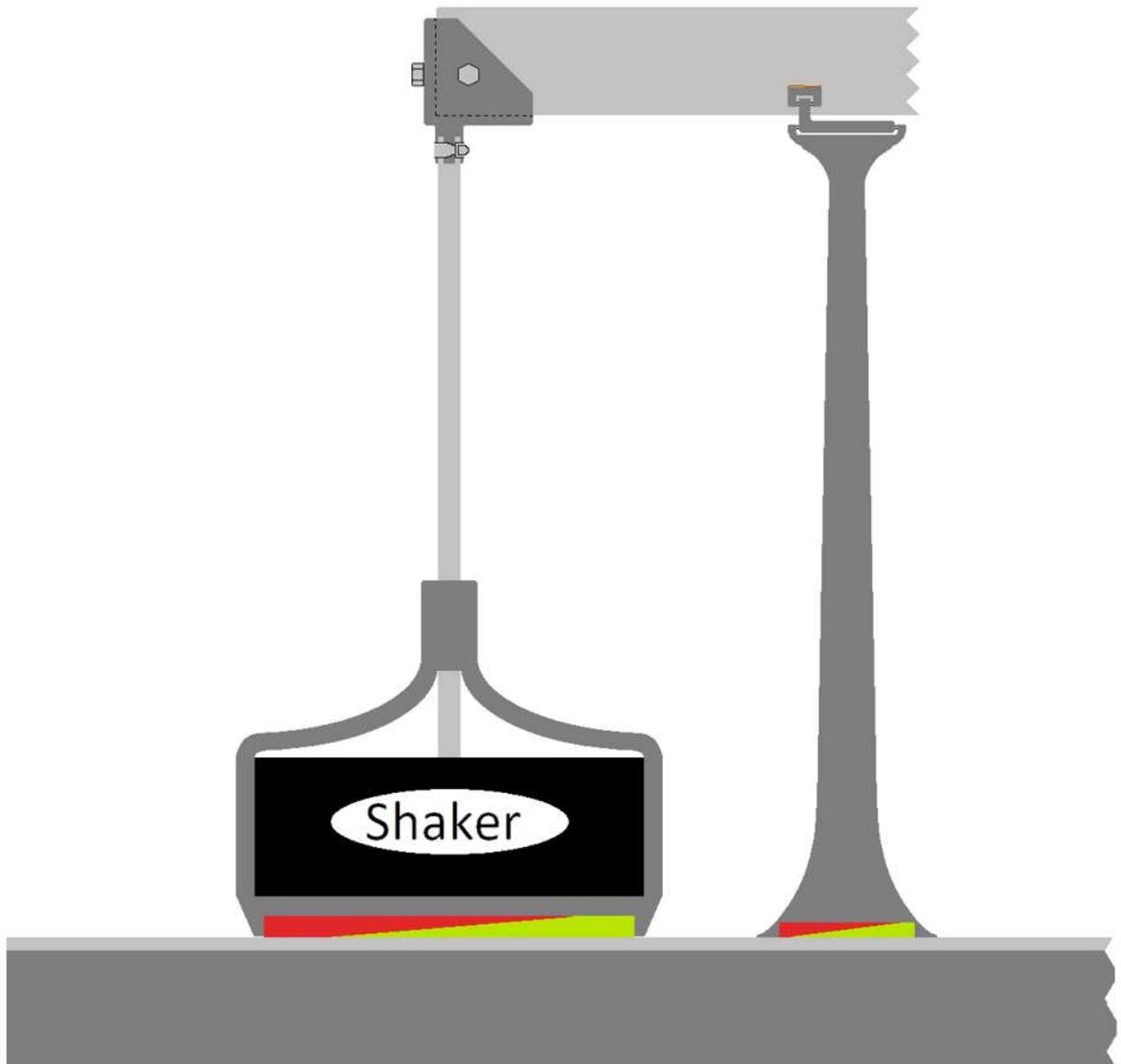


Abbildung 5: Lösung 1

Auf der metallischen Oberseite der Grundplatte lassen sich die Magnetfüße der Shaker und des Dreiecklenkers uneingeschränkt platzieren und ermöglichen eine Anpassung an jede Prüflingsgröße. Die resultierenden Ausgleichsbewegungen und -kräfte werden von einem flexiblen Stab kompensiert und über eine Gleitlagerführung an die Shaker-Umhausung abgegeben. Die Eckenbindung ist mit einer Klemmschelle am Stab und mit einer Verschraubung am Prüfling befestigt. Die Starrkörperbewegung des Prüflings wird von einem einzelnen Dreieckslenker unterbunden.

Mit „Lösung 2“ wird eine Struktur skizziert die der Realität (Maßstab 1:1) Nahe kommen soll. Dementsprechend sind von mehreren Hundert Kilogramm Prüflingsmasse und Shaker-Kräften im kN-Bereich auszugehen. „Lösung 2“ wird in Abbildung 6 dargestellt.

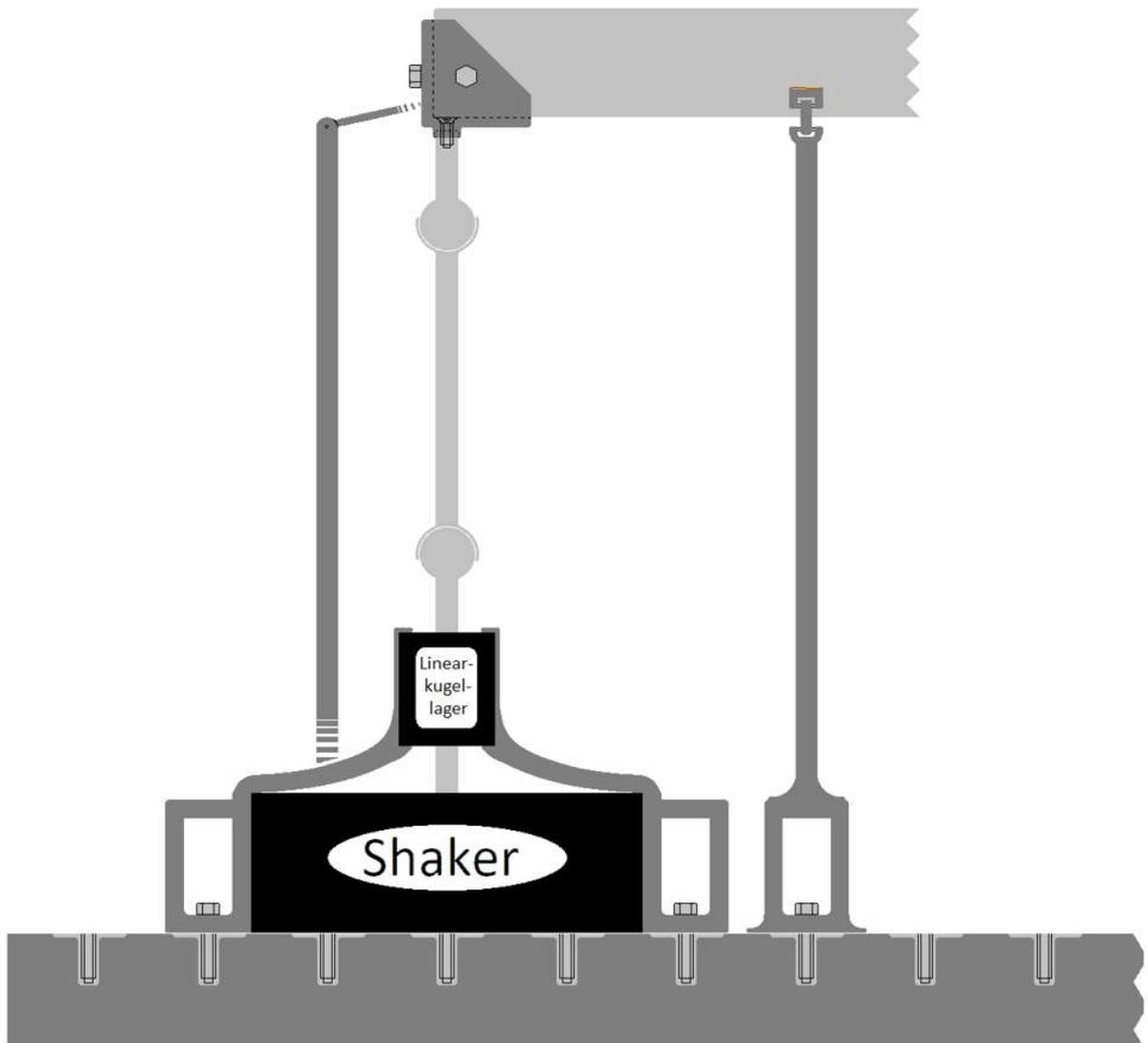


Abbildung 6: Lösung 2

In der Grundplatte ist ein Spannfeld integriert, auf dem sich die Shaker-Umhausung mit Shaker niederschrauben lässt. Die Spannungspunkte schränken in der Flexibilität ein, bieten dafür jedoch eine äußerst stabile Anbindung. Besonders im Großformat ließen sich damit die hohen wechselseitigen Belastungen aufnehmen. Die Ausgleichsbewegungen ermöglichen die Kugelgelenke, welche von einem in der Shaker-Umhausung eingepassten Linearkugellager geführt werden. Die Eckanbindung ist mit dem Prüfling, sowie mit den Kugelgelenken verschraubt. Das Einknicken in den Gelenken und das Aufschwingen des Prüflings werden durch Pendelstäbe unterbunden.

In Abbildung 7 wird „Lösung 3“ skizziert, die eine einfache Kombination aus Kauf- und Fertigungsteilen bildet.

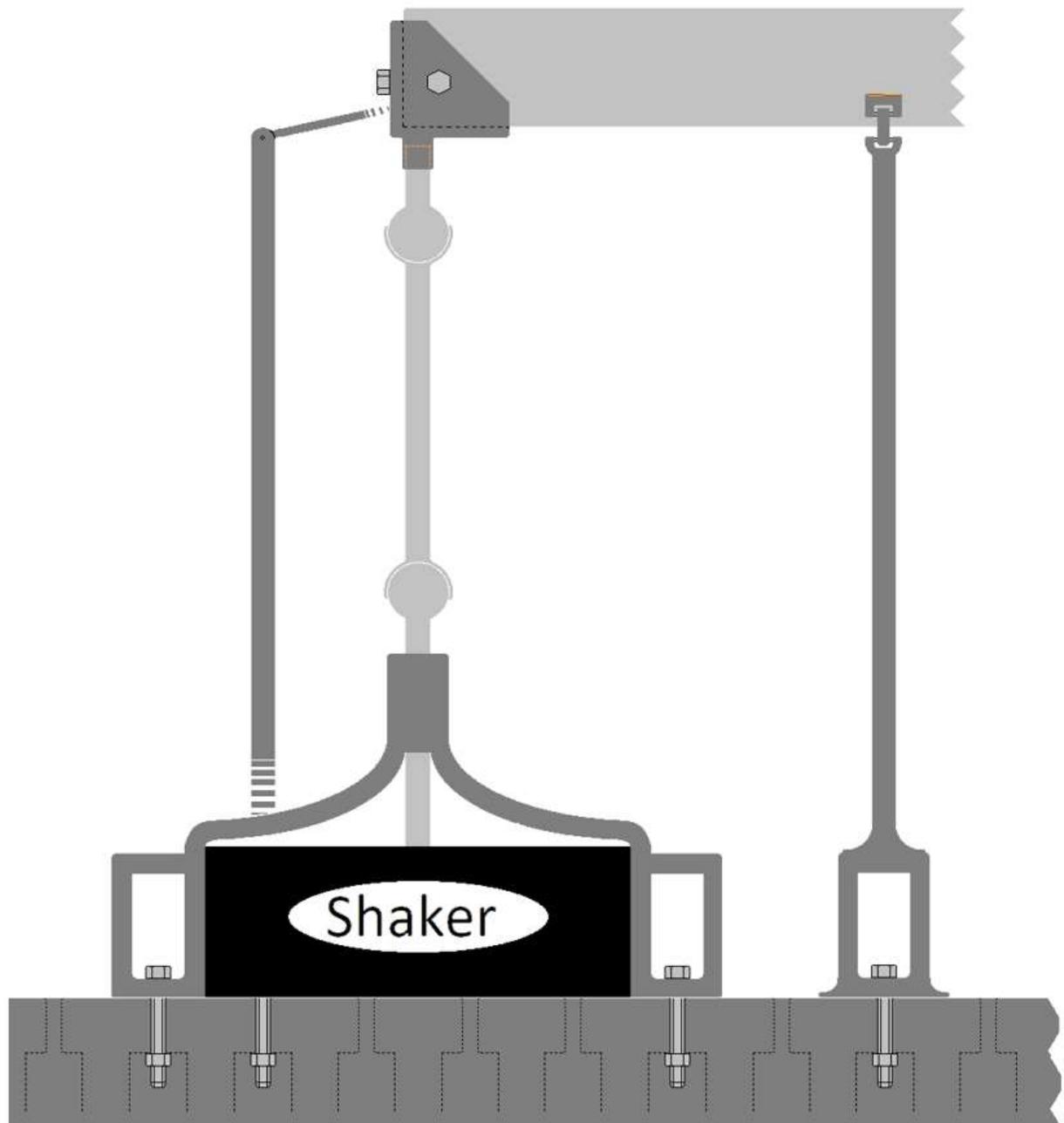


Abbildung 7: Lösung 3

Die Grundplatte ist mit Langlöchern durchzogen, bei der sich der Shaker mit einer Durchsteckverbindung montieren lässt. Die Kugelgelenke werden unten von einer Gleitlagerführung gestützt und oben in die Eckenbindung eingeklebt. Die Eckenbindung wird wie gewohnt an dem Prüfling angeschraubt. Das Einknicken und Aufschaukeln wird durch Pendelstäbe vermieden.

## 7. Bewertung

Das gewählte Bewertungssystem ist in Tabelle 5 dargestellt und wie folgt aufgebaut. In den ersten beiden Spalten sind die Anforderungen an den Demonstrator aufgelistet. Sie ergeben sich aus der Anforderungsliste und sind in die drei Kategorien Kosten, Portabilität und Potenzial einsortiert. In Summe hat jede Kategorie dieselbe Relevanz, dabei sind die Anforderungen untereinander jedoch gewichtet. Die Wertung der Relevanz kann der dritten Spalte entnommen werden. In die letzten drei Spalten werden die individuellen Bewertungen der Lösungsvariationen eingetragen. Ohne Betrachtung der Relevanz wird für jede Lösung eine Bewertung von „1 = nicht gut“ bis „5 = sehr gut“ für das Erfüllen der entsprechende Anforderung notiert.

Tabelle 5: Lösungsbewertung

Anforderung an den Demonstrator		Relevanz	Bewertung		
			Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3
Kosten	Entwicklung	3			
Σ 10	Fertigung & Montage	3			
	Betrieb	2			
	Wartung	2			
Portabilität	Auf- und Abbaukomplexität	5			
Σ 10	Masse	3			
	Größe	2			
Potenzial	Realitätsnähe	5			
Σ 10	Anpassbarkeit / Erweiterbarkeit	5			
Summe					

Hat jede Lösungsvariation für jede Anforderung ihre Bewertung erhalten, wird wie in Tabelle 6 dargestellt die Gesamtpunktzahl berechnet. In dem Beispiel gibt es die beiden Anforderungen „x“ und „y“, sowie die Lösung „a“. Wie nebenstehend abgebildet wird zeilenweise der Relevanzfaktor mit dem Bewertungsfaktor multipliziert und anschließend aufsummiert, so dass es in diesem Beispiel zu der Gesamtpunktzahl von 10 kommt.

Tabelle 6: Bewertungssystem Beispielrechnung

Anforderung	Relevanz	Bewertung Lösung a
Anforderung x	2	3
Anforderung y	1	4
Summe		10

	2	*	3
+	1	*	4
=	10		

Die vollständige Bewertung der drei Lösungen befindet sich inklusive Zwischenergebnissen im Anhang A4 – Lösungsbewertung. Das Endergebnis der Bewertung beinhaltet der Ausschnitt in Tabelle 7. „Lösung 1“ erlangt mit 127 Punkten den höchsten Wert, gefolgt von „Lösung 2“ mit 120 Punkten und „Lösung 3“ mit 117 Punkten.

Tabelle 7: Ausschnitt Lösungsbewertung

	Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3
Summe	127	120	117

Mit einem Vorsprung von 7 Punkten zum zweiten Platz und 10 Punkten zum letzten Platz abzuschneiden, vermittelt bei möglichen Punktzahlen zwischen 30 und 300 einen sehr knappen Sieg. Ausreichend knapp, um in Frage zu stellen, ob die Bewertung eines ausschließlich in der Theorie zusammengefügt Konzeptes derart präzise ist. Zudem sieht die methodische Produktentwicklung vor, dass aus dem morphologischen Kasten drei Lösungsvariationen gebildet werden, die in sich stimmig sind und funktionieren könnten. Auf Grund des mechanisch sehr simplen Ablaufs dieser Funktionsstruktur und der sich erübrigenden Frage nach dem Impulsgeber und der Energieversorgung, lässt sich tendenziell jede Prinziplösung miteinander verknüpfen. Dieses Ausbleiben von strikten Abhängigkeiten unter den Prinziplösungen führt zu dem Vorgehen, eigene Leitfäden für die Lösungen zu bilden. Mit den Hintergedanken „unkompliziert & flexibel“, „realitätsnah“ und „gut produzierbar“ werden die drei Lösungen bereits weitergedacht und die ausdrückliche Problemorientierung der methodischen Produktentwicklung verletzt.

Mit der Umgestaltung des Bewertungssystems lässt sich ein lösungsorientiertes Arbeiten, sowie eine endlose Zahl an Lösungsvariationen vermeiden. Das neue Bewertungssystem basiert auf den Prinziplösungen und beurteilt nach der individuellen Qualität der Anforderungserfüllung. Am Vorgehen hat sich entsprechend Tabelle 8 jedoch nichts geändert.

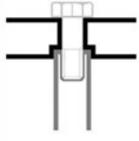
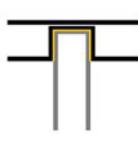
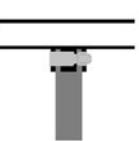
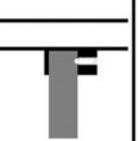
Tabelle 8: Funktionsbewertung

Anforderung an die Funktionslösung		Relevanz	Bewertung der entsprechenden Teilfunktion			
			Funktion 1	Funktion 2	Funktion 3	Funktion 4
Kosten	Entwicklung	3				
Σ 10	Fertigung & Montage	3				
	Betrieb	2				
	Wartung	2				
Portabilität	Auf- und Abbaukomplexität	5				
Σ 10	Masse	3				
	Größe	2				
Potenzial	Realitätsnähe	5				
Σ 10	Anpassbarkeit / Erweiterbarkeit	5				
Summe						

Die vollständige Bewertung der einzelnen Funktionen befindet sich in Tabelle 13 und Tabelle 14 im Anhang A5 – Funktionsbewertung. Die Bewertungsergebnisse sind dem Anhang zu entnehmen und werden in diesem Kapitel nicht einzeln beschrieben.

Wie beispielsweise in Tabelle 9 dargestellt, wird die Funktionslösung mit der höchsten Wertung innerhalb ihrer Funktion mit einem blassen Gelb hinterlegt. Wegen der eingeschränkten Präzision bei der Bewertung, werden auch die Funktionslösungen mit bis zu 5 Punkten weniger gelb hinterlegt und im gleichen Maße für den finalen Entwurf in Betracht gezogen.

*Tabelle 9: Ausschnitt Funktionsbewertung*

Bewert.: Verbindung Ausgleichselement-Eckan.				
	1.	2.	3.	4.
Summe	123	120	125	104
				

Mit Abschluss der Bewertung werden die hochbepunkteten Prinziplösungen in Erwägung gezogen und zum finalen Entwurf kombiniert.

## 8. Finaler Entwurf

Jeder Shaker erhält ein additiv gefertigtes Gehäuse, welches die entsprechenden Funktionen des morphologischen Kastens ausübt. Schematisch in Abbildung 8 dargestellt. Der Shaker bleibt unverändert und wird im Gehäuse verspannt. Auf der Oberseite schließt sich direkt die Gleitlagerführung für den flexiblen Stab an und kann die aufgenommenen Kräfte gleich nach unten abgeben. Auf der Unterseite werden die Magneten für die magnetische Befestigung aufgenommen. Diese verhindern das Abheben des Shakers bei Zugbewegungen und leiten die von der Gleitlagerführung aufgenommenen Kräfte in die Bodenplatte, ohne dass der Shaker seitlich verrutscht.



Abbildung 8: Gehäuse mit Magnetanbindung und Führung

Den Ausgleich zwischen Prüfling und Shaker übernimmt ein flexibler Stab oder Draht, der durch die Gleitlagerführung gestützt wird. Auf diese Weise kann der Prüfling oben frei schwingen und der Shaker unten von Querkräften entkoppelt werden. Das Wegknicken in den flexiblen Stäben, sowie das Aufschaukeln im Prüfbetrieb wird durch einen Querlenker unterbunden.

Die Verbindung zwischen Prüfstand und Prüfling übernimmt die Eckanbindung. Zum Ausgleichselement hin wird die Eckanbindung verklebt, um eine einfache und langlebig spielfreie Verbindung herstellen zu können. Der Prüfling wird verschraubt, um das System montier- und demontierbar zu halten und auch einen Prüflingswechsel zu ermöglichen. Abbildung 9 stellt das Konzept schematisch dar.

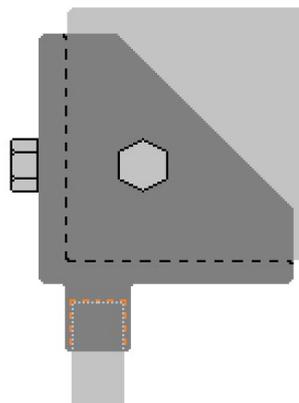


Abbildung 9: Geklebte Eckanbindung

Das Gesamtkonzept des finalen Entwurfs wird in Abbildung 10 ersichtlich. In ihm sind die oben beschriebenen Komponenten zu einem Gesamtsystem zusammengefasst.

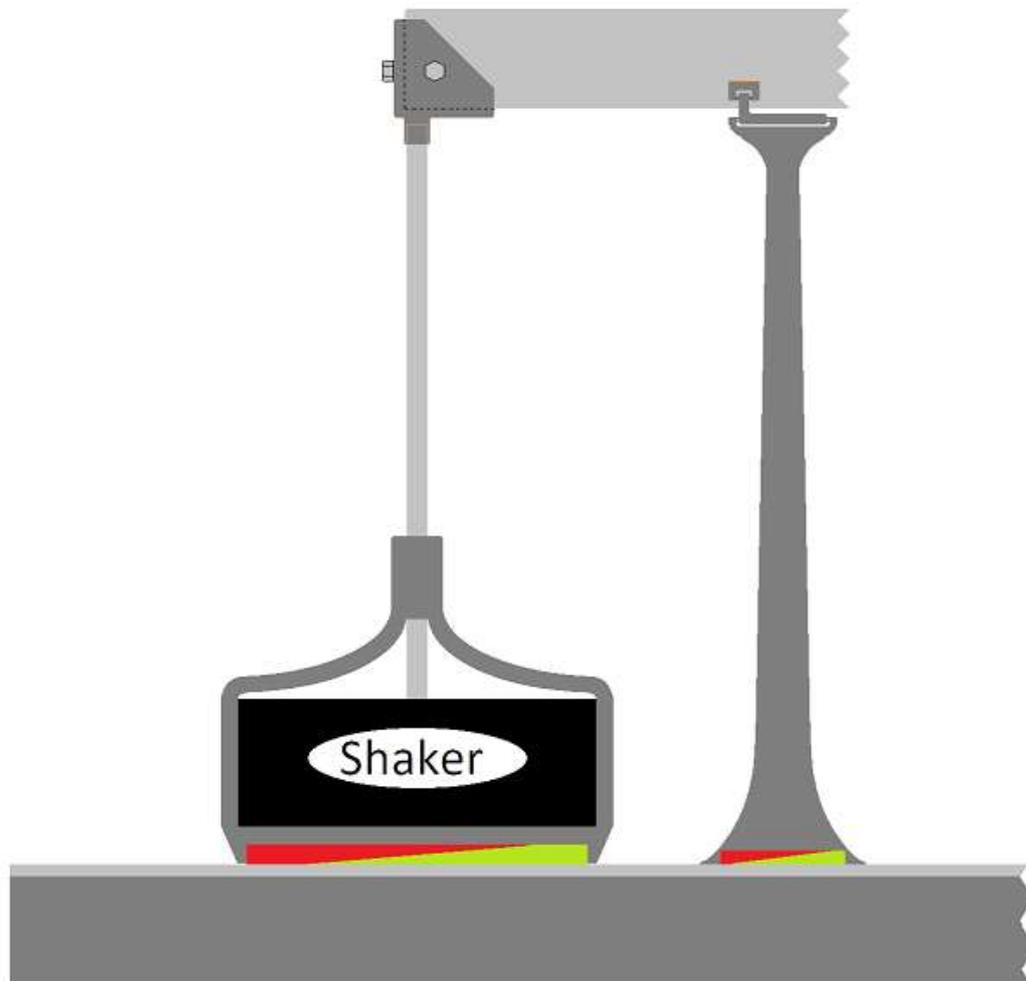


Abbildung 10: Finaler Entwurf

Für die Ansteuerung kommt die Anwendung „keuwlsoft“ via Mobiltelefon zum Einsatz. Mit diesem kostenlosen Programm lassen sich unter anderem Sinusschwingungen mit variabler Amplitude und Frequenz erzeugen.

Über ein 3,5 mm Klinenstecker wird das Signal von einem Mobiltelefon abgenommen und über ein Y-Stück verteilt an zwei Verstärker weitergegeben.

## 9. CAD-Konstruktion

In diesem Kapitel werden die konstruierten Bauteile kurz umrissen und auf die Besonderheiten aufmerksam gemacht. Ausgewählte Bilder dienen der Präsentation, während sich die gesamte Bildersammlung in Anhang A6 – Galerie CAD-Teile befindet.

Das CAD-Modell des Shakers dient als Platzhalter und bedarf daher wenig Details. Relevant sind die Gewindebohrung in der Schwingscheibe, der Gehäuserand, auf dem sich von oben abgestützt werden kann und die beiden Bohrungen auf der Unterseite. Siehe Abbildung 11 und Abbildung 12.



Abbildung 11: Shaker - Draufsicht perspektivisch

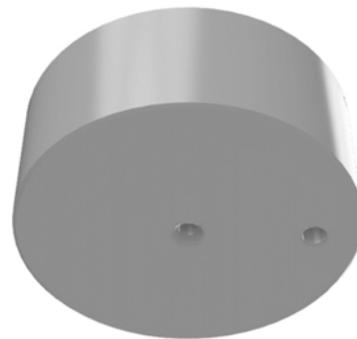


Abbildung 12: Shaker - Untersicht perspektivisch

Die Shaker werden dreiteilig verkleidet, bestehend aus einem Oberteil, einem Unterteil und der Führungskrone. In Abbildung 13 ist das Gehäuseoberteil mit Profilskizze dargestellt. Auf dem dargestellten Profil basierend wurde das Oberteil als Rotationskörper konstruiert. Die Öffnung in der Mitte unten dient der Kabelführung und wurde vom Rotationskörper nachträglich abgezogen. Die halbkreisförmige Aussparung oben im Profil dient dem passgenauen Ansetzen und Verkleben der Führungskrone. Die Innenecke im oberen Bereich besitzt einen Freistich, um das saubere Anlegen an den Shaker zu gewährleisten.



Abbildung 13: Gehäuseoberteil mit Profilskizze - Vorderansicht

Das Gehäuseunterteil ist ebenfalls ein Rotationskörper mit Abzug für die Kabelführung. Das Gehäuseoberteil lässt sich in das Unterteil stecken, wobei sie gemeinsam eine durchgängige Aussparung für die Kabel des Shakers lassen. Auf der Unterseite sind die Sockel für die Magneten bereits vordefiniert. Das Gehäuseunterteil ist als Ring und nicht als volle Scheibe ausgeformt, um Material zu sparen und die Möglichkeit zu lassen, ein Kühlsystem ins bestehende Gehäuse zu integrieren. Denn erste Testläufe des Shakers ergaben eine intensive Temperatursteigerung, vor allem bei langem Betrieb mit niedrigen Frequenzen.

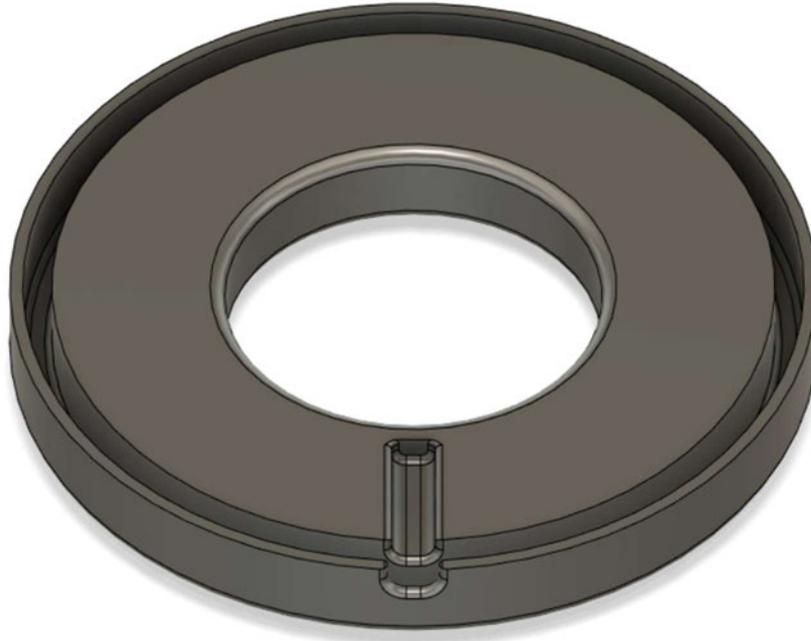


Abbildung 14: Gehäuseunterteil - Oberseite

Die Führungskrone sitzt auf dem Gehäuseoberteil und nimmt die aus Biegemomenten resultierenden Querkräfte auf, um den Shaker davor zu schützen. An ihr kann man besonders gut die FDM-gerechte Konstruktion erkennen, da sie in derselben Form nur mit hohem Materialverbrauch oder deutlich höherem Fertigungsaufwand mit den konventionellen Fertigungsverfahren zu realisieren wäre. [7] Sie besteht, wie in Abbildung 15 dargestellt, aus dem Grundring, den fünf Armen und der Führungsbuchse.

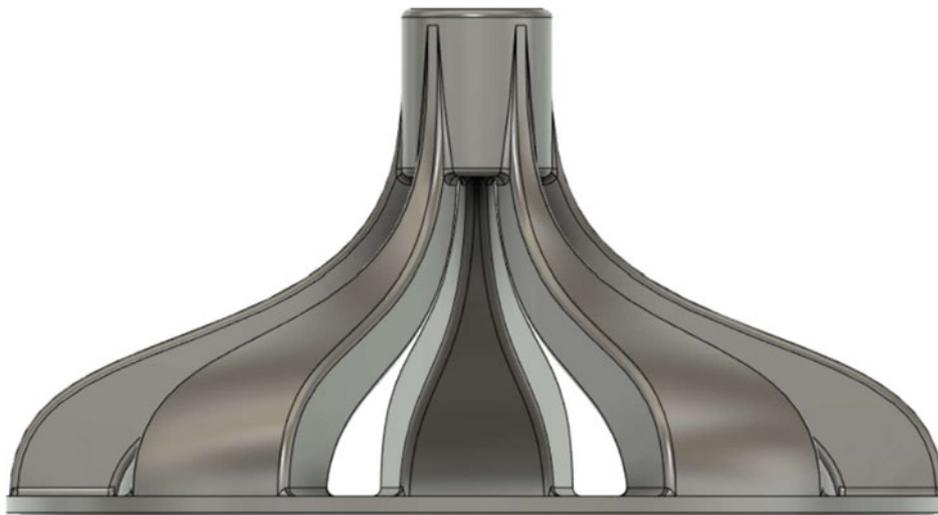


Abbildung 15: Führungskrone - Vorderansicht

Abbildung 16 zeigt die drei Profilskizzen der Führungskrone. Die Arme sind mit 24° Breite als Rotationskörper ausgebildet und im Kreis alle 72° positioniert. Der Grundring und die Führungsbuchse sind vollständig ausgebildet. Die Skizze des Grundrings besitzt auf der Unterseite einen halbkreisförmigen Steg, der ins Gehäuseoberteil passt.

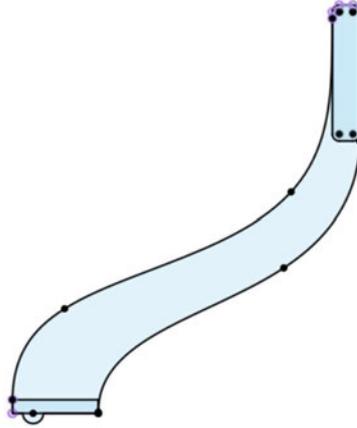


Abbildung 16: Führungskrone Profilskizze

Als Zusammenbau ist das Gehäuse in Abbildung 17 und Abbildung 18 zu sehen. Der Luftspalt zwischen Ober- und Unterteil im zusammengebauten Zustand ist als Reserve gegen mögliche Ungenauigkeiten bei der additiven Fertigung gedacht.



Abbildung 17: Gehäuse - Vorderansicht Explosion



Abbildung 18: Gehäuse - Vorderansicht

Die Priorität beim Zusammenstecken der beiden Teile liegt beim Verspannen des Shakers, so dass keine Bewegungsfreiheit in z-Richtung und somit in Impulsrichtung besteht. Das betreffende Maß wird in Abbildung 19 rot dargestellt und entspricht der Shaker-Höhe.

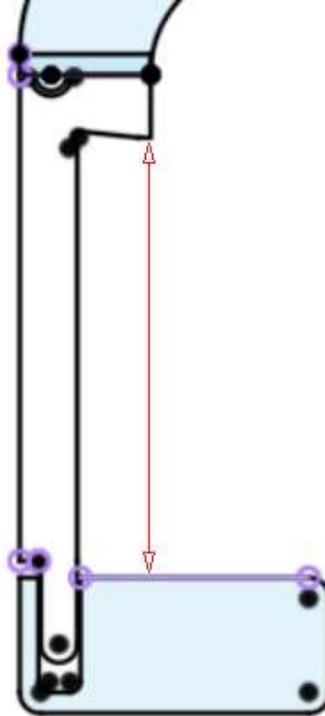


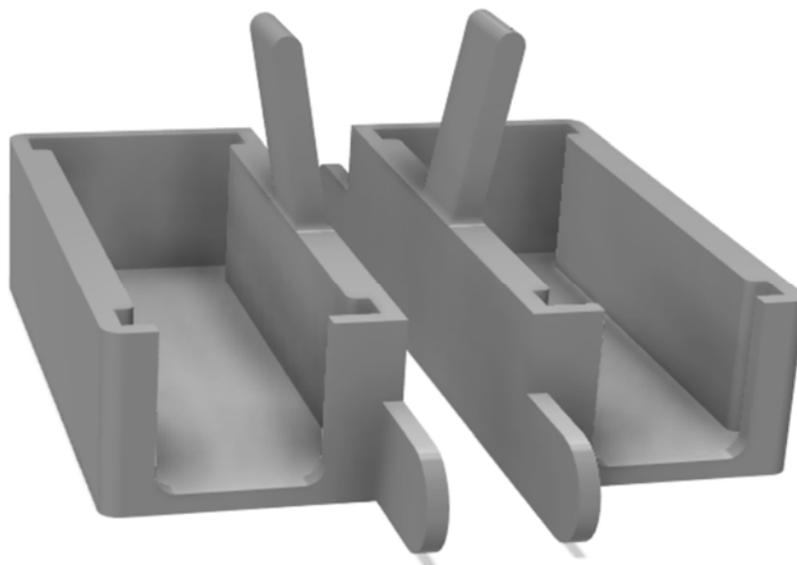
Abbildung 19: Gehäuse mit Klemmbemaßung

Die Eckanbindung sollte gemäß finalem Entwurf im Ganzen an das Ausgleichselement angeklebt werden, jedoch wird dieses Vorgehen überarbeitet. Auf Grund der Gestaltung der Gleitlagerführung, würde dies bedeuten, dass vom Führungsbolzen bis zur Eckanbindung das System auf einen Prüfling ausgelegt ist. Bei einem Wechsel oder einer Überarbeitung des Prüflings, wäre keine zerstörungsfreie Demontage möglich und eine neue Führung, mit neuem Draht und neuer Eckanbindung wären herzustellen. Daher ist die Eckanbindung wie in Abbildung 20 dargestellt zweiteilig aufgebaut. Der obere Teil, die Prüflingsanbindung, ist an den Prüfling angepasst und wäre bei einem Prüflingswechsel neu zu entwickeln und herzustellen. Der untere Teil, die Drahtanbindung, wird mit dem Ausgleichsdraht verklebt und bietet eine universelle Anbindung, die auch in zukünftigen Projekten ihren Platz findet. In den unteren Teil lässt sich eine M5-Schlossschraube schieben, die auf Grund der inneren Geometrie der Drahtanbindung nicht rotieren und sich nach oben verspannen kann. In die zentrale Bohrung der Prüflingsanbindung wird die Schlossschraube eingefädelt und mit einer Mutter gesichert. Für eine akkurate Ausrichtung besitzt die Prüflingsanbindung einen Rand auf der Unterseite, welche die Drahtanbindung umschließt.



*Abbildung 20: Eckanbindung Unterseite Explosion*

Um die Verstärker an der Grundplatte fixieren zu können, werden sie in die in Abbildung 21 dargestellten Aufnahme gesteckt. Je Aufnahme drückt ein Arm leicht gegen die Verstärker, um ein Klappern dieser zu vermeiden. Die Aussparung auf der Bildvorderseite ermöglicht das Verbinden mit der Stromversorgung. In die kleinen Laschen lassen sich bedarfsgerecht Löcher bohren, um die Verstärkeraufnahmen an die Grundplatte zu schrauben.



*Abbildung 21: Verstärkeraufnahme Paar*

## 10. Herstellung

In diesem Kapitel wird auf die Vorgehensweise bei der Fertigung und Montage eingegangen. Der Prüfstand entsteht in gemischter Bauweise, jedoch mit überwiegend additiv gefertigten Teilen. Gedruckt wird mit 1,75-mm-PLA auf einem Creality Ender 3, die nötigen .gcode-Dateien für die Schichtmodelle werden mittels Creality Slicer 4.8.2 erzeugt. Mit ausgewählten Bildern werden im Folgenden die Vorgehensweisen verdeutlicht, für einen umfangreicheren Überblick wird auf die Bildergalerie in Anhang A7 – Galerie Fertigungsteile verwiesen.

Dem finalen Entwurf entsprechend, besteht die Grundplatte aus einem Unterbau und einer magnetischen Oberfläche. In Abbildung 22 sind die entsprechenden Materialien dargestellt.



Abbildung 22: Grundplatte

Der Unterbau hat die Steifigkeit zu erzielen, sich mit der magnetischen Oberfläche zu verbinden und die übrigen Komponenten aufzunehmen. Da diverse Holzsorten bei akzeptabler Dichte eine gute Steifigkeit bieten, es gut zu bearbeiten ist und als organischer Stoff keinen langfristigen Müll bedeutet, ist die Auswahl darauf gefallen. Die Daten zum verwendeten Brett sind in Tabelle 10 aufgeführt.

Tabelle 10: Daten - Brett

Sorte	Fichte Naturwuchs
Ursprungsmaße LxBxH [mm]	800x300x18
Bearbeitungsmaß LxBxH [mm]	303x202x18
Beschaffung	Hagebaumarkt, April 2023
Artikelnummer	4002908143847

Der Oberbau hat ausschließlich magnetisch haftbar zu sein und wird daher aus einem 1 mm starken Glattblech hergestellt. Zum Zwecke der Langlebigkeit wurde ein verzinktes Blech gewählt. Die Daten dazu befinden sich in Tabelle 11.

Blech und Brett sind mit acht 4,8x13mm-Schrauben verschraubt.

Tabelle 11: Daten - Blech

Sorte	Stahlblech verzinkt
Ursprungsmaße LxBxH [mm]	1000x200x1
Bearbeitungsmaß LxBxH [mm]	300x200x1
Beschaffung	Hagebaumarkt, April 2023
Artikelnummer	4004338465827

Das gedruckte Gehäuse des Shakers ist dreiteilig aufgebaut und in Abbildung 23 zu sehen. Der Shaker wird im Gehäuseoberteil und -unterteil verspannt. Die Führungskrone wird in die Nut eingepasst und verklebt.



Abbildung 23: Gehäuse demontiert

Das fertige Gehäuse ist in Abbildung 24 zu sehen. Zum Schutz sind die Kabel mit Schrumpfschlauch umschlossen. Der Führungsbolzen ist mit einer feinen Schicht Mehrzweckfett versehen, um die Gleiteigenschaften zu verbessern.



Abbildung 24: Gehäuse montiert

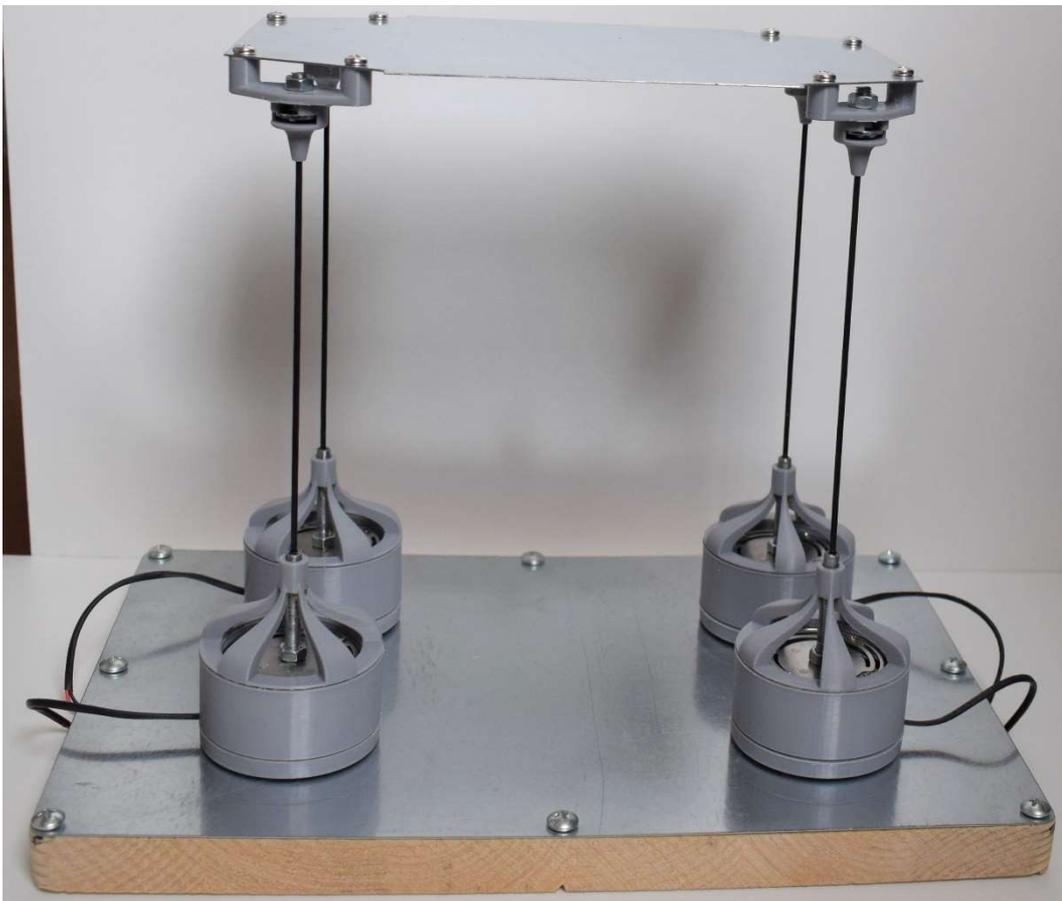
Der Ausgleichsdraht ist nach unten zum Führungsbolzen und nach oben zur Drahtanbindung gesteckt und verklebt.

Wie in Abbildung 25 dargestellt, besteht die Eckanbindung aus der Drahtanbindung (im Bild links), einer M5-Schlossschraube und der Prüflingsanbindung (im Bild rechts). Die Prüflingsanbindung gibt es in den beiden Varianten mit 30 mm und 35 mm Lochabstand, da der Prüfling von vorne nach hinten in seinen Abständen variiert.



*Abbildung 25: Eckanbindung*

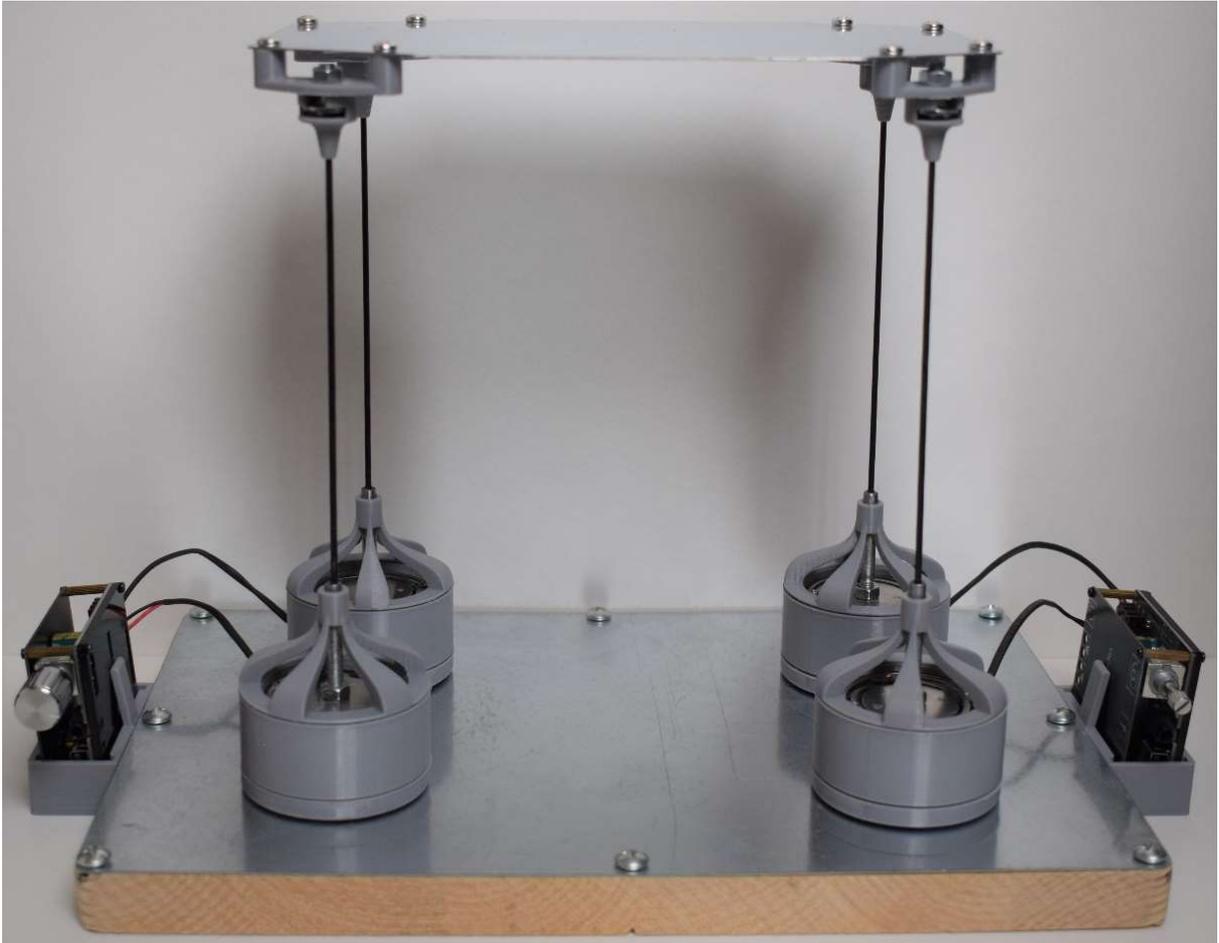
In Abbildung 26 ist der montierte Modellprüfstand dargestellt. Die Ausgleichsdrahte aus 2 mm starkem Stahlschweißdraht sind auf eine biegsame Länge von 12 cm abgesägt.



*Abbildung 26: Modellprüfstand montiert*

Der Prüfling ist flexibel gelagert, aber ausreichend steif angebunden, um auf einen Querlenker zur Unterbindung von Starrkörperbewegungen verzichten zu können.

Der Modellprüfstand, in seinem Aufbau mit den zum Betrieb der elektrodynamischen Shakern benötigten Verstärkern, ist in Abbildung 27, Abbildung 28 und Abbildung 29 zu sehen. Die Aufnahmen sind auf einer Höhe positioniert, die für die Shakerkabel gut zu erreichen ist und zu wenig Schlaufenbildung führt.



*Abbildung 27: Modellprüfstand mit Verstärkern Vorderseite*

Der Prüfling besteht aus demselben Material wie die Grundplattenoberfläche, einem 1 mm starkem Glattblech. Zu Beginn der Arbeit war eine Blechdose zu diesem Zweck angedacht, jedoch stellt sich diese als zu steif heraus. Um sichtbare Schwingungen während des Prüfvorgangs einstellen zu können, wäre eine für diesen Modellprüfstand unrealistisch hohe Prüflings-eigenmasse notwendig gewesen. Mit dem Blechprüfling lässt sich bedarfsgerecht durch magnetische Anbindung, Aufkleben oder Anschrauben von Zusatzgewichten ein Schwingverhalten simulieren.

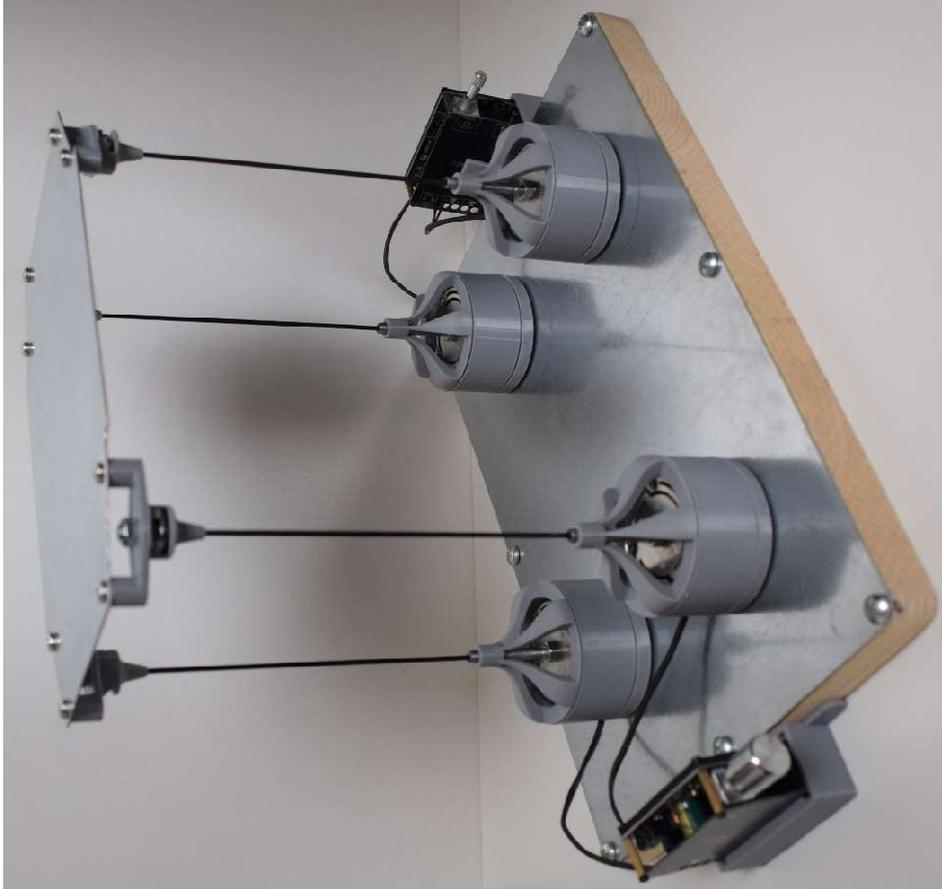


Abbildung 28: Modellprüfstand mit Verstärker perspektivisch

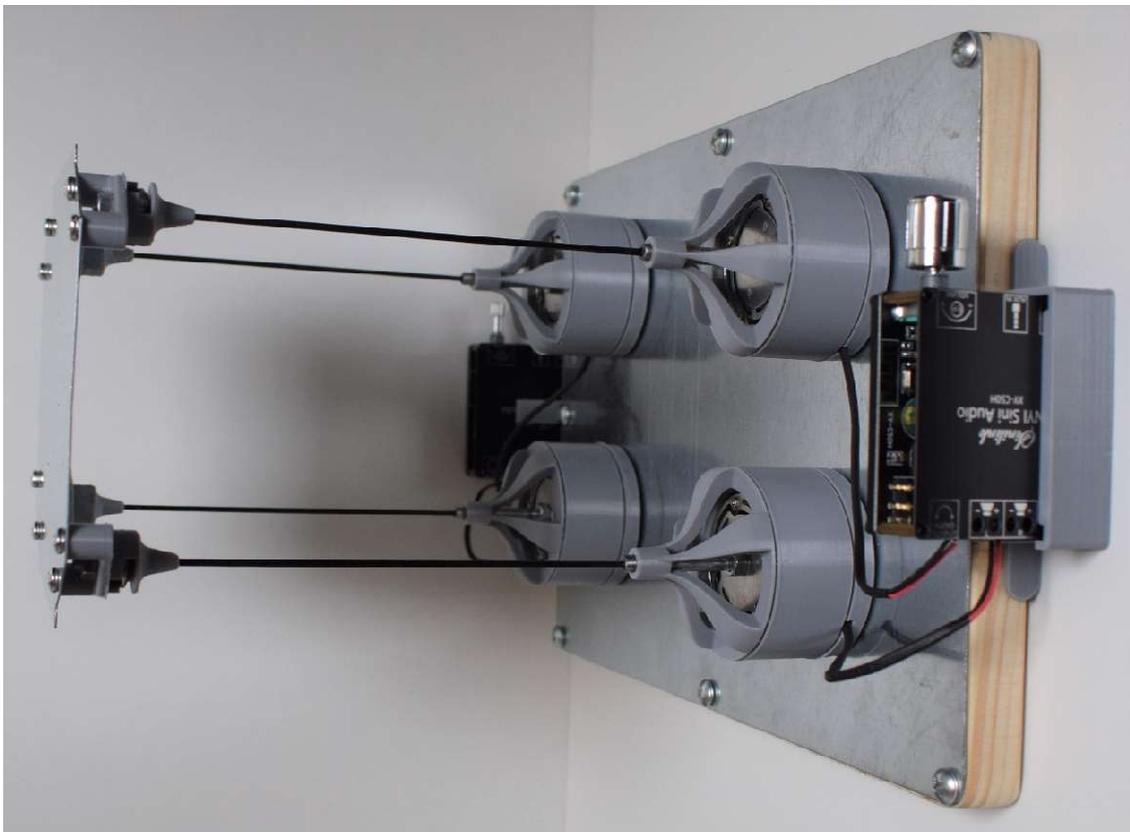


Abbildung 29: Modellprüfstand mit Verstärker seitlich

## 11. Zusammenfassung und Ausblick

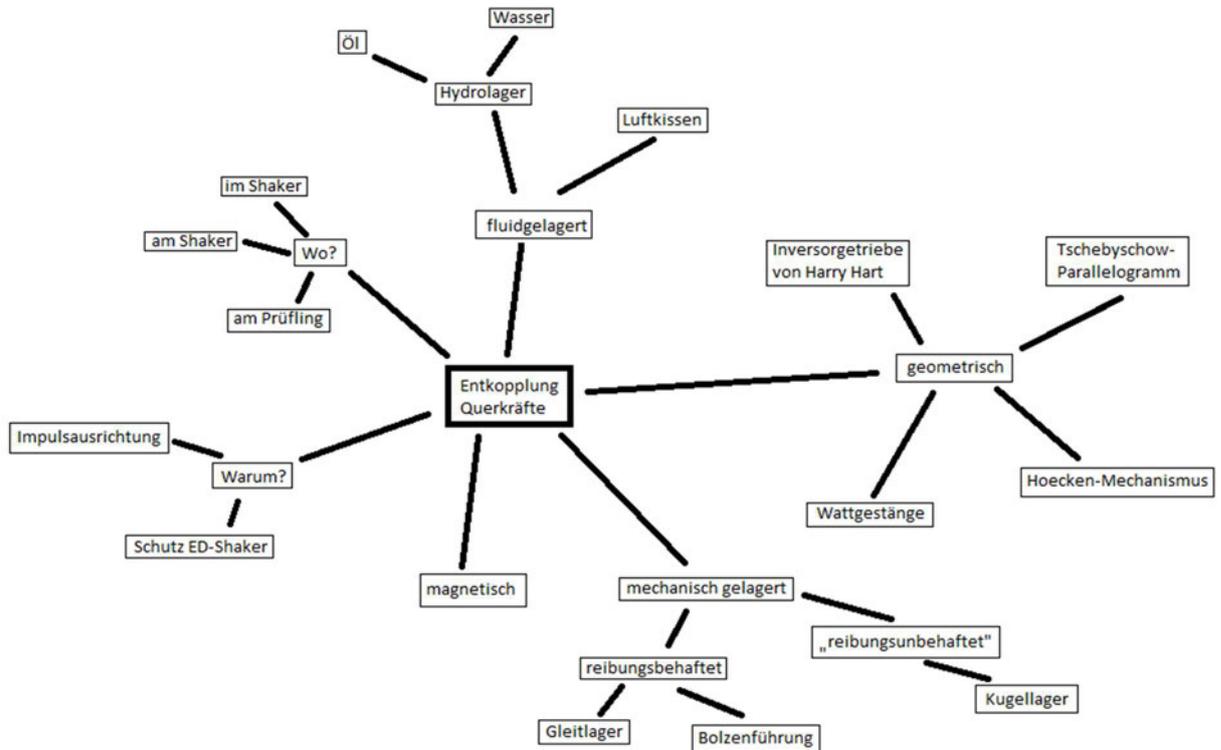
Im Rahmen dieser Bachelorarbeit konnte ein erster Demonstrator eines Vibrationsprüfstands für Traktionsbatterien erarbeitet werden. Dieser zeichnet sich vor allem durch den hohen Grad an Flexibilität durch die gemischte Bauweise und die im weiteren verwendbaren CAD-Modelle aus. Mit diesem Prüfstand können ganz einfach auch andere Prüfkörper geprüft werden. Das liegt an der bewusst modular gestalteten Prüfkörper- und Drahtanbindungsschraubverbindung, welche einen minimalen Konstruktionsaufwand ermöglicht. Es wird lediglich eine andere, für den neuen Prüfkörper passende, Prüfkörperanbindung benötigt. Die Drahtanbindung, das Ausgleichselement, die Shaker mit Gehäuse und Ansteuerung sowie die Grundplatte können weiterverwendet werden. Die Grundplatte hat bei dem aktuellen Prüfling noch Reserven, so dass die Prüflingsgröße nach oben hin angepasst werden könnte. Die Magnetfüße bieten eine vollvariable Positionierung auf der Grundplatte und sind für diverse Prüflingsformen geeignet. Denkbar wäre dabei auch eine Prüfanwendung auf jeder beliebigen magnetischen Oberfläche, wie z. B. Werkbänke mit Blechüberzug. Der limitierende Faktor ist hierbei vor allem das Gewicht des Prüfkörpers, welches von den Ausgleichselementen, den Drähten, getragen werden muss.

Während des Entwicklungsprozesses und der damit verbundenen Tests ist bereits eine Verbesserungsmöglichkeit aufgefallen, die nicht mehr Teil dieser Arbeit ist. Das Gehäuse der Shaker könnte noch materialsparender gedruckt werden, in dem Luftlöcher hinzugefügt werden, die gleichzeitig zur Kühlung der Shaker dienen können. Dies könnte einen positiven Effekt auf die Lebensdauer der Shaker haben.

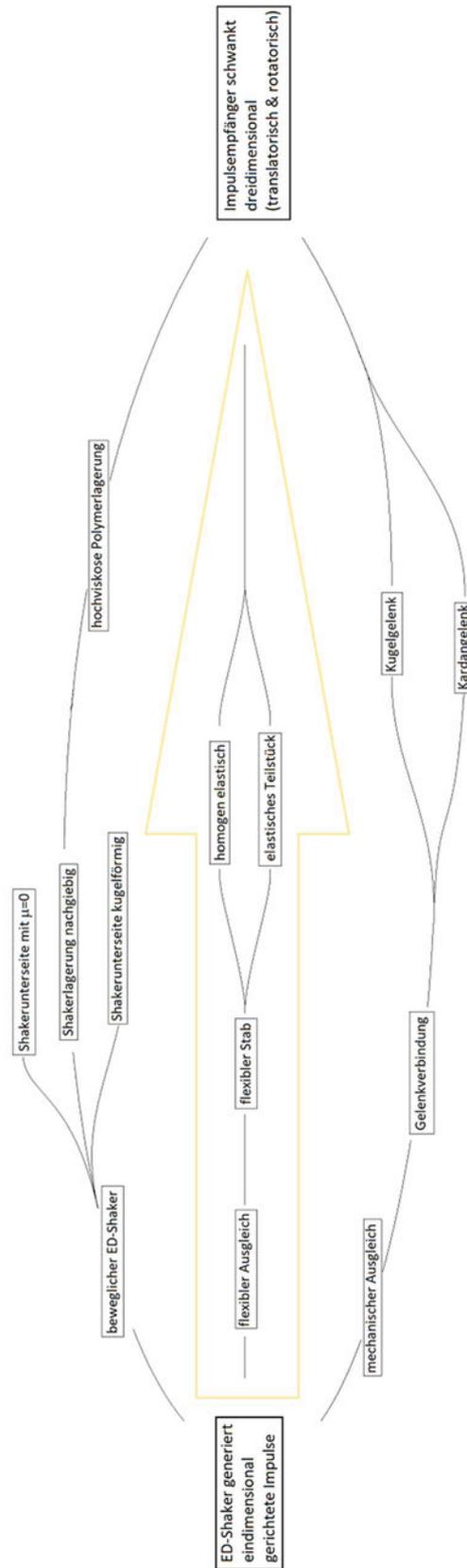
## Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Plaumann, Benedikt: Mechatronisches Design, 2022.
- [2] Plaumann, Benedikt: Anforderungen an die Vibrationsprüfung von großen unterflur-montierten Batterien für batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (BEV),
- [3] International Organisation for Standardization, ISO 16750-3 Road vehicles - Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment- Part 3: Mechanical loads, 12/2012.
- [4] Verein Deutscher Ingenieure, VDI 2221- Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, 05/1993.
- [5] MindMapping.com: Was ist eine Mind Map?, <https://www.mindmapping.com/de/mind-map> [27.04.2023].
- [6] Stoi, Roman; Dillerup, Ralf: Unternehmensführung, 6., komplett überarbeitete und erweiterte Auflage, Verlag Franz Vahlen, München, 2022.
- [7] Gebhardt, Andreas; Kessler, Julia; Thurn, Laura: 3D-Drucken, 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Hanser, München, 2016.

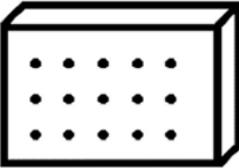
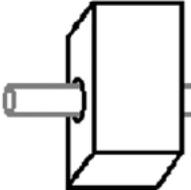
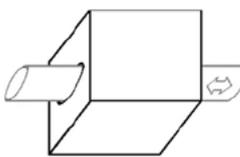
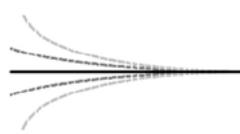
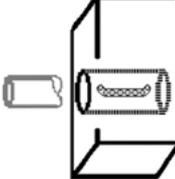
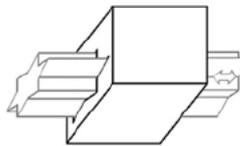
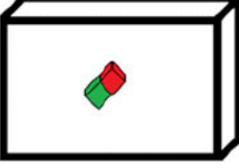
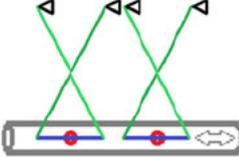
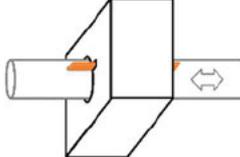
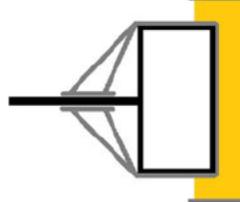
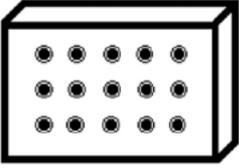
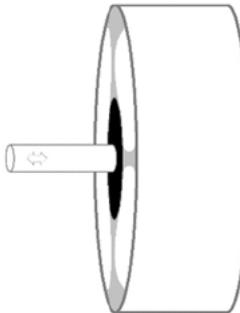
A1 – Mindmap „Aufnahme der Querkräfte

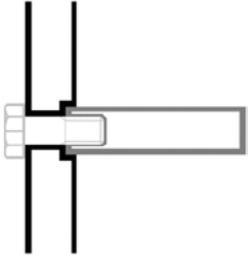
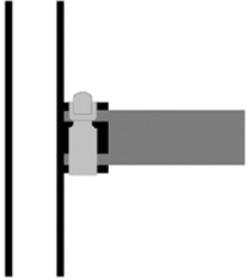
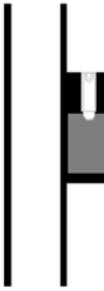
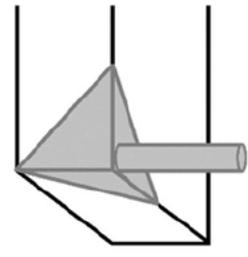
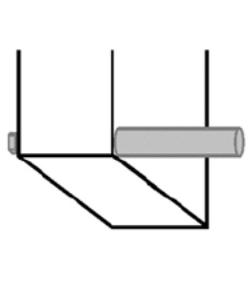
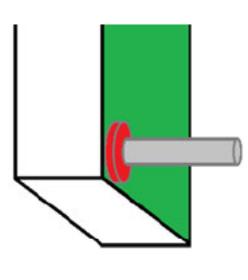
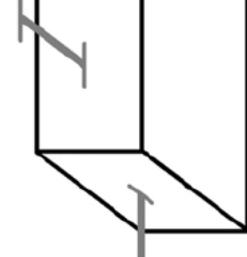
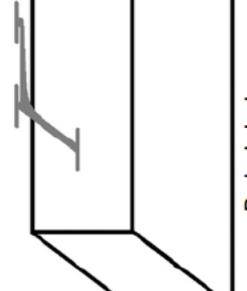
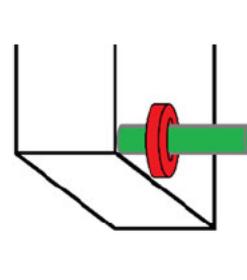
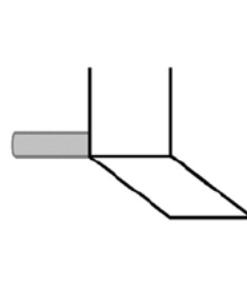


## A2 – Lückenanalyse „Ausgleichselement“



A3 – Morphologischer Kasten

<p>Aktoren Bedarfsgerecht montieren</p>	 <p>Vordefinierte Bohrungen</p>	 <p>Führungsbolzen (Gleitlager)</p>	 <p>Polygonprofilwelle in Führung</p>	 <p>Flexibler Stab</p>
<p>Aktoren Bedarfsgerecht montieren</p>	 <p>Langlöcher</p>	 <p>Linearkugellager</p>	 <p>Zahnwelle in Zahnnahe</p>	 <p>Kugelgelenke</p>
<p>Aktoren Bedarfsgerecht montieren</p>	 <p>Magnetische Befestigung</p>	 <p>Lenkerführung z. B. Tschebyschow</p>	 <p>Gleitfeder in Nut</p>	 <p>Hochviskose Polymerlagerung</p>
<p>Aktoren Bedarfsgerecht montieren</p>	 <p>Spannfeld</p>	 <p>Im Shaker integriert</p>		

<p>Ausgleichselement und Eckanbindung verbinden</p>	 <p>Schraubverbindung</p>	 <p>Klebeverbindung</p>	 <p>Klemmschellenverbindung</p>	 <p>Gewindestiftklemmverbindung</p>
<p>Prüfling am Prüfstand montieren</p>	 <p>Eckplatte verschraubt</p>	 <p>Auf Stoß verschraubt</p>	 <p>Magnetisch</p>	 <p>Hängende Anordnung</p>
<p>Seitliche Starrkörperbewegung verhindern</p>	 <p>Pendelstäbe</p>	 <p>Dreieckslenker</p>	 <p>Magnetlager</p>	 <p>Hängende Anordnung</p>

# A4 – Lösungsbewertung

Tabelle 12: Lösungsbewertung

Anforderung an den Demonstrator	Relevanz	Bewertung			Zwischenergebnis		
		Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Kosten Σ 10	Entwicklung	3	5	4	15	9	12
	Fertigung & Montage	3	5	4	15	9	12
	Betrieb	2	5	5	10	10	10
Portabilität Σ 10	Wartung	2	4	4	8	10	8
	Auf- und Abbaukomplexität	5	5	4	25	20	15
	Masse	3	3	4	9	9	12
Potenzial Σ 10	Größe	2	5	4	10	8	8
	Realitätsnähe	5	2	5	10	25	20
	Anpassbarkeit / Erweiterbarkeit	5	5	4	25	20	20
Summe		127	120	117			

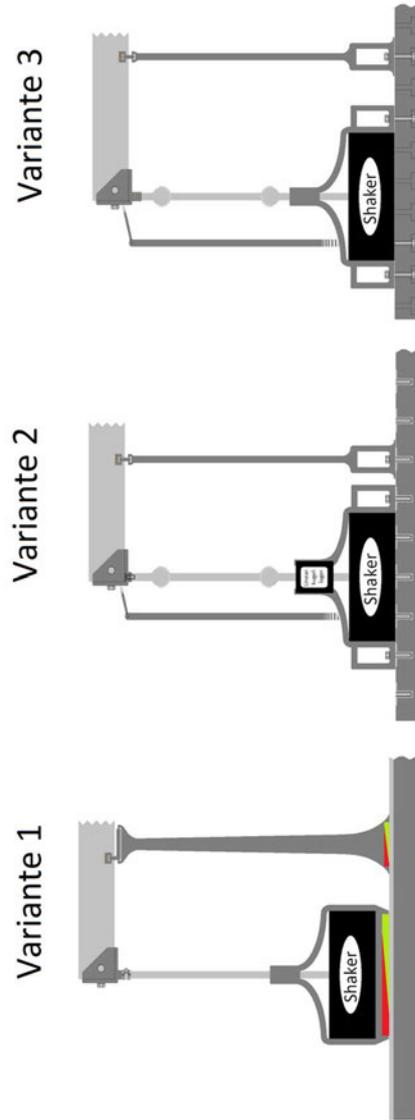


Abbildung 30: Lösungsvariationen 1 bis 3

# A5 – Funktionsbewertung

Tabelle 13: Funktionsbewertung 1

Anforderung an die Funktionslösung	Relevanz	Bewertung: Aktoren bedarfsgerecht montieren				Bewert.: Entkoppeln der Querkräfte				Bewert.: Rotation abstützen				Bewert.: Ausgleichsbew. ermögl.			
		1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.	4.
Kosten Σ 10	3	4	5	3	3	5	4	1	4	5	3	3	5	3	4	1	
	3	3	5	2	5	5	3	1	5	1	4	5	4	5	4	1	
Portabilität Σ 10	2	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	
	7	5	5	5	5	4	4	7	3	4	4	7	5	4	4	3	
Potenzial Σ 10	5	3	3	5	4	5	5	1	4	5	5	5	5	5	3	5	
	3	4	5	2	2	4	3	4	4	3	3	5	5	5	4	2	
Anpassbarkeit / Erweiterbarkeit Summe	5	2	3	1	5	2	5	4	3	4	5	5	5	2	4	1	
	5	2	3	5	2	2	1	4	3	1	1	5	5	2	4	1	
	104	111	121	106	115	111	79	98	99	139	122	124	117	65			

Tabelle 14: Funktionsbewertung 2

Anforderung an die Funktionslösung	Relevanz	Bewert.: Verbindung Ausgleichselement-Eckan.				Bewert.: Verb. Prüfling-Prüfstand				Bewert.: Starrkörperbewegung verhindern			
		1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.	4.
Kosten Σ 10	3	5	3	5	5	3	4	5	4	3	3	1	5
	3	5	5	5	5	4	4	2	4	5	2	2	4
Portabilität Σ 10	2	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	1	5
	2	5	3	5	3	5	5	5	4	4	4	4	5
Potenzial Σ 10	5	4	5	4	3	3	4	5	4	4	2	2	5
	3	3	5	4	4	4	5	3	4	5	7	4	4
Anpassbarkeit / Erweiterbarkeit Summe	5	5	3	3	2	4	5	3	4	5	3	2	1
	5	3	3	4	3	5	2	1	5	5	2	2	1
	123	120	125	104	121	119	111	132	137	56	106		

## A6 – Galerie CAD-Teile



Abbildung 31: Shaker - Oberseite

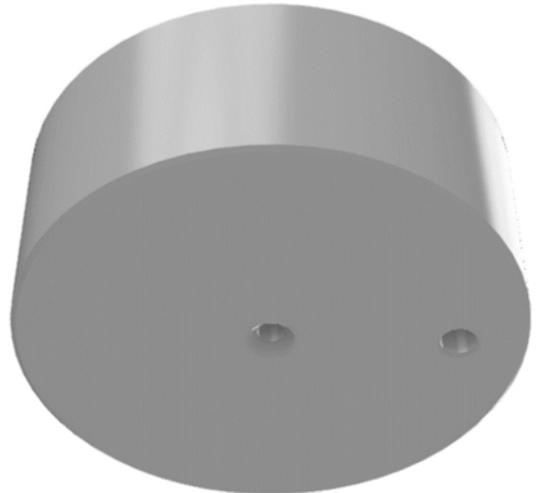


Abbildung 32: Shaker - Unterseite



Abbildung 33: Gehäuseoberteil - Oberseite



Abbildung 34: Gehäuseoberteil mit Profilskizze



Abbildung 35: Gehäuseoberteil - Vorderansicht

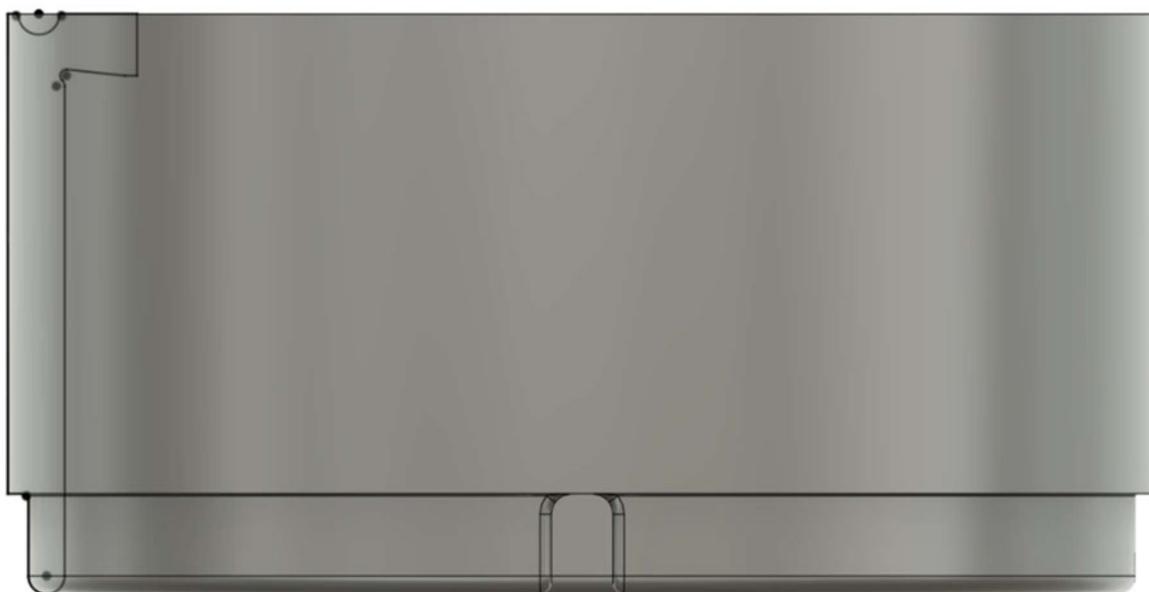


Abbildung 36: Gehäuseoberteil mit Profilskizze – Vorderansicht



Abbildung 37: Gehäuseoberteil – Unterseite

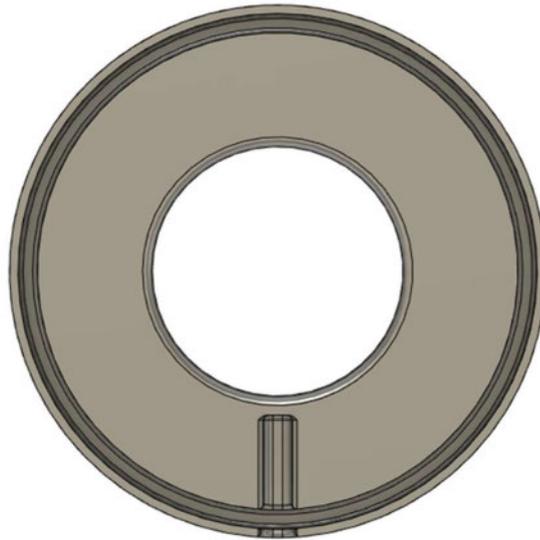


Abbildung 38: Gehäuseunterteil - Draufsicht

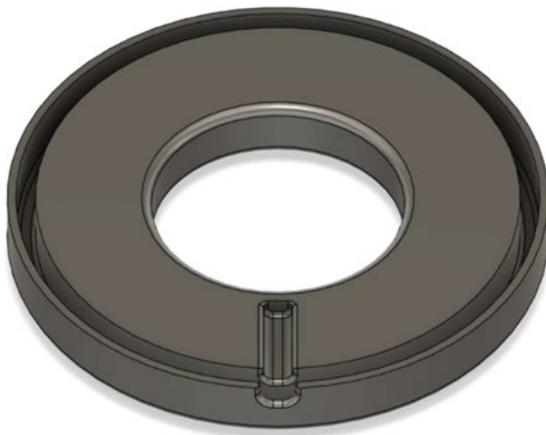


Abbildung 39: Gehäuseunterteil - Oberseite

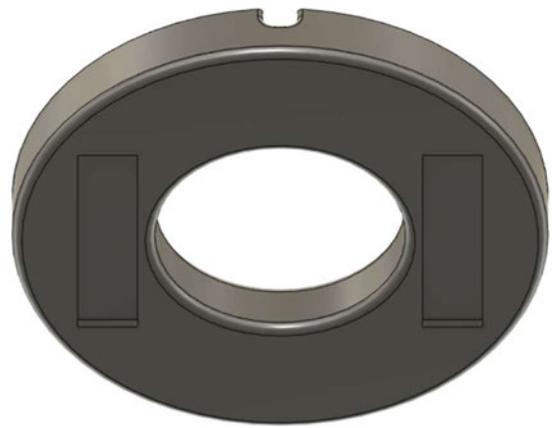


Abbildung 40: Gehäuseunterteil – Unterseite



Abbildung 41: Gehäuseunterteil mit Profilskizze - Vorderansicht

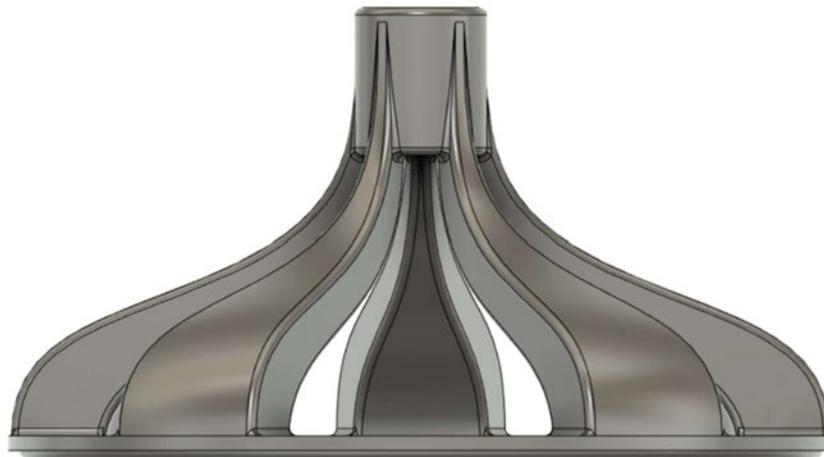


Abbildung 42: Führungskrone - Vorderansicht

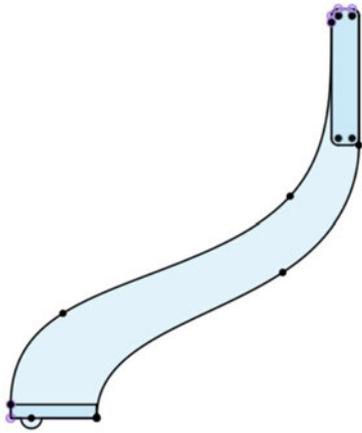


Abbildung 43: Führungskrone Profilskizze



Abbildung 44: Führungskrone mit Profilskizze - Vorderansicht



Abbildung 45: Führungskrone - Draufsicht



Abbildung 46: Führungskrone - Untersicht



Abbildung 47: Führungskrone - Oberseite



Abbildung 48: Führungskrone - Unterseite



Abbildung 49: Gehäuse – Vorderansicht Explosion



Abbildung 50: Gehäuse – Unterseite Explosion



Abbildung 51: Gehäuse - Vorderansicht



Abbildung 52: Gehäuse – Oberseite Explosion

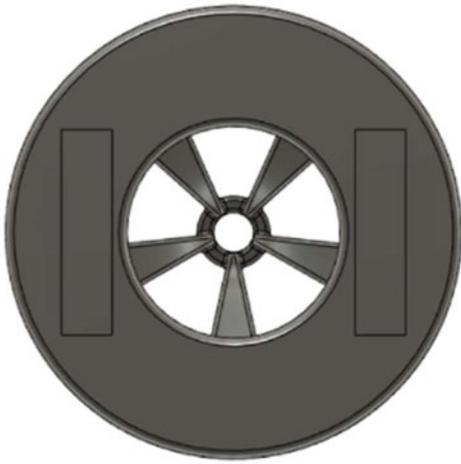


Abbildung 53: Gehäuse - Untersicht



Abbildung 54: Gehäuse Unterseite

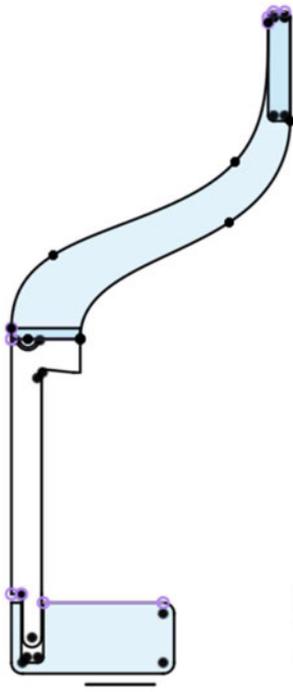


Abbildung 55: Gehäuse Profilskizze - Vorderansicht

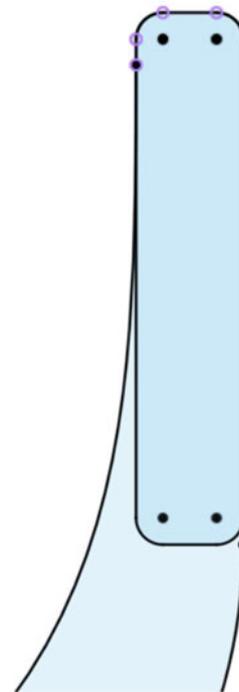


Abbildung 56: Gehäuse Profilskizze - Kronenspitze

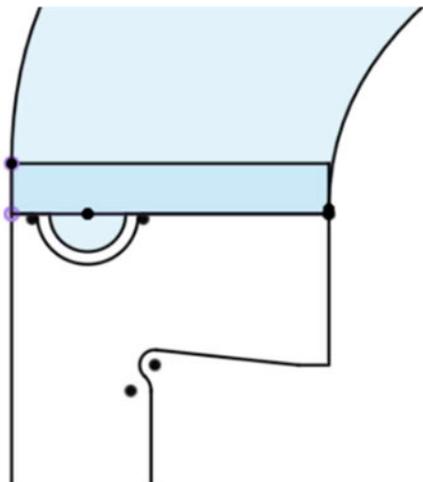


Abbildung 57: Gehäuse Profilskizze - Übergang Krone-Oberteil



Abbildung 58: Gehäuse Profilskizze – Übergang Ober-  
teil-Unterteil



Abbildung 59: Eckenbindung Vorderansicht



Abbildung 60: Eckenbindung Vorderansicht Explosion



Abbildung 61: Eckenbindung Unterseite



Abbildung 62: Eckenbindung Unterseite Explosion



Abbildung 63: Drahtaufnahme Oberseite



Abbildung 64: Drahtaufnahme Unterseite



Abbildung 65: Prüflingsaufnahme Unterseite

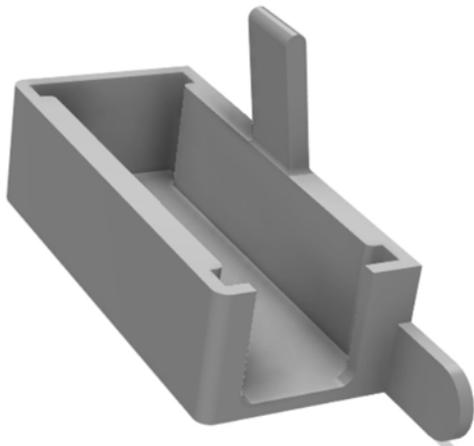


Abbildung 66: Verstärkeraufnahme links

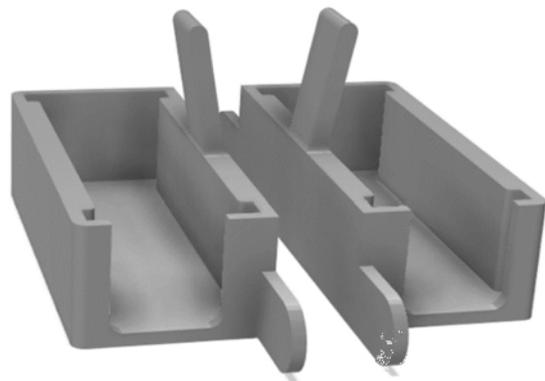


Abbildung 67: Verstärkeraufnahme Paar

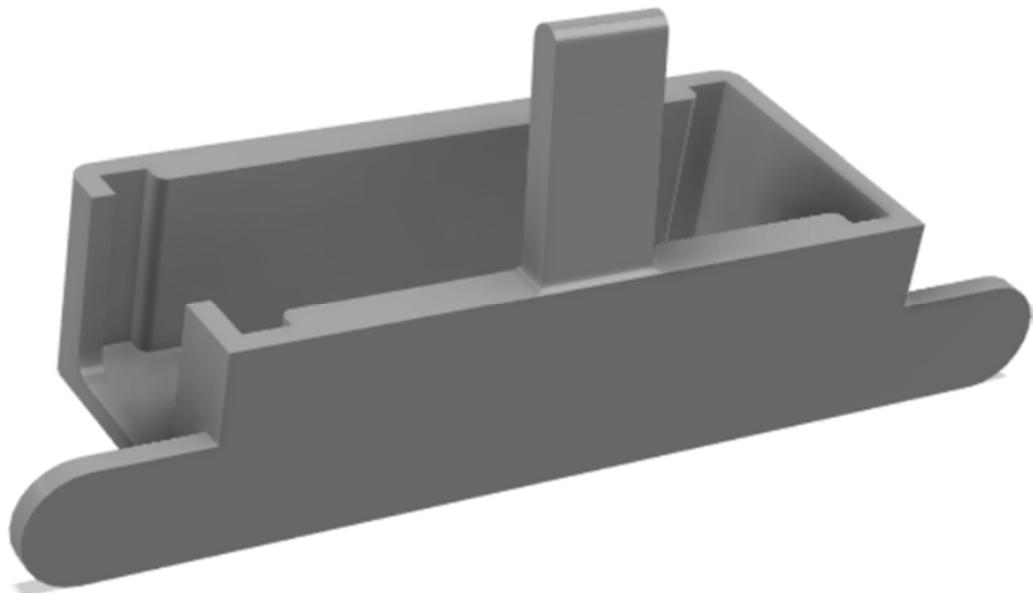
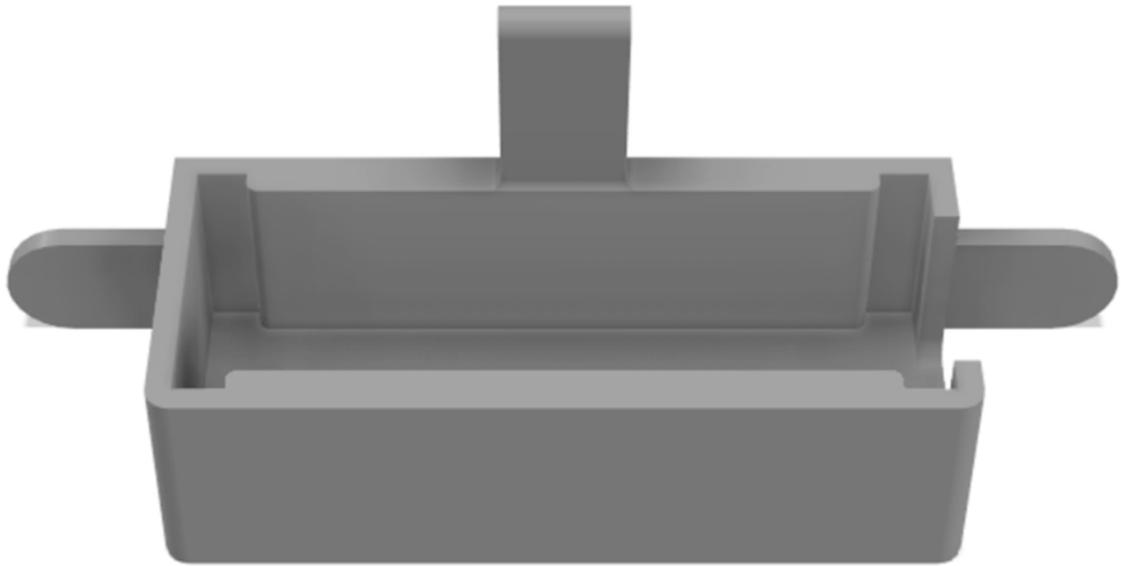


Abbildung 68: Verstärkeraufnahme - Innenseite



*Abbildung 69: Verstärkeraufnahme - Außenseite*

## A7 – Galerie Fertigungsteile



Abbildung 70: Grundplatte lose



Abbildung 71: Grundplatte Materialien



Abbildung 72: Grundplatte verschraubt



Abbildung 73: Gehäuse demontiert



Abbildung 74: Gehäuse montiert

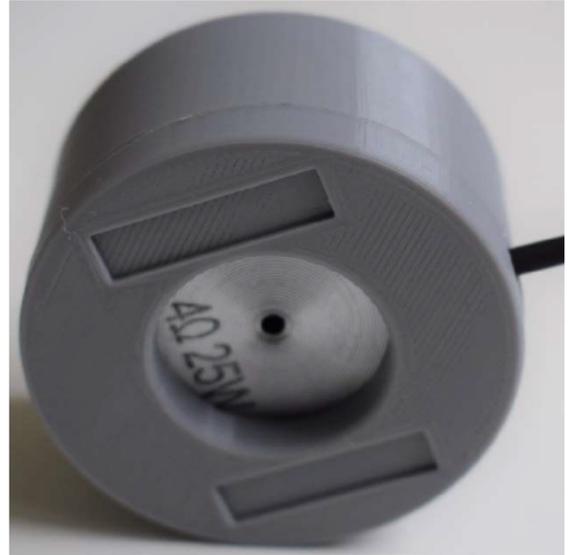


Abbildung 75: Gehäuse Unterseite



Abbildung 76: Drahtanbindung



Abbildung 77: Drahtanbindung gesteckt



Abbildung 78: Prüflingsanbindung Oberseite



Abbildung 79: Prüflingsanbindung Unterseite



Abbildung 80: Prüflingsanbindung 35 mm



Abbildung 81: Prüflingsanbindung 30 mm mit Montagewerkzeug



Abbildung 82: Eckenbindung montiert



Abbildung 83: Modellprüfstand montiert Vorderseite



Abbildung 84: Modellprüfstand montiert Oberseite

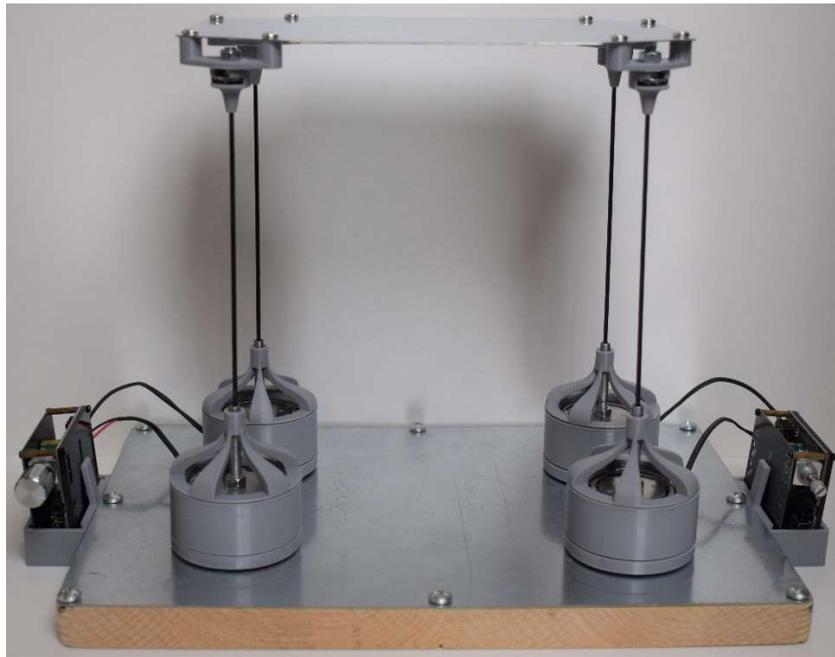


Abbildung 85: Modellprüfstand mit Verstärkern Vorderseite



Abbildung 86: Modellprüfstand mit Verstärkern perspektivisch



Abbildung 87: Modellprüfstand mit Verstärkern seitlich



## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name:

Vorname:

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Entwicklung eines Modellprüfstands zur Vibrationsprüfung von Traktionsbatterien mit Vierpunkt-Anregung

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

*- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -*

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Ort Datum Unterschrift im Original