



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna | Austria

Diplomarbeit

Entwicklung zur Optimierung eines magnetischen Aktuators zur Bewegung eines Braille Anzeigeelements

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für
Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Patrick Karner, BSc

Matr.Nr.: e01425938

unter der Anleitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl. -Ing. Dr.med. Dr.techn. Dr.phil. **Thomas Angeli**

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Wolfgang Zagler**

Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung

Bereich: Biomechanik und Rehabilitationstechnik

Technische Universität Wien

Getreidemarkt 9, 1060 Wien, Österreich

Wien, im November 2021

Erklärung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna | Austria

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im November 2021

Danksagung

Ich möchte mich zuerst bei dem gesamten Tetragon-Team bedanken, das mir die Möglichkeit gegeben hat, meine Diplomarbeit in diesem Bereich zu machen und dabei einen kleinen Beitrag zu leisten, den Alltag für viele Menschen zu erleichtern.

Ein besonderer Dank gilt Wolfgang, du hast mir im Laufe des Projektes immer wieder gezeigt, dass mit genügend Erfindergeist auch mit einfachen Dingen hervorragende Versuche möglich sind. Des Weiteren möchte ich mich bedanken, dass ich auf deine Unterstützung zählen und deine Daniel-Düsentrieb-Werkstatt verwenden durfte. Danke auch dir, Andreas, dass du mir jedes notwendige Teil immer blitzschnell 3D-gedruckt hast und mir die Basics von Solidworks gezeigt hast.

Ein Dankeschön gilt auch an Herrn Prof. Angeli, welcher meine Arbeit betreut hat.

Ein weiterer Dank gilt meinen Eltern, welche mich während meines Studiums immer in jeder erdenklichen Lage unterstützt haben.

Der größte Dank gilt Magdalena, du hast mich stets bei allen Schritten unterstützt und bist immer hinter mir gestanden.

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird ein neues Aktuatorsystem für den Tetragon Braille-Ring entwickelt. Der Braille-Ring ist ein Braille-Display, das vom Spin-off Fellowship geförderten Unternehmen Tetragon entwickelt wird. Tetragon hat sich zum Ziel gesetzt, ein kostengünstiges und wartungsarmes Braille-Display für Menschen mit komplettem oder schwerem Sehverlust zu bauen, damit diese die Möglichkeit bekommen, im Alltag mit geringeren Einschränkungen lesen zu können. Um dies zu erreichen, setzt Tetragon statt auf ein konventionelles Display auf einen Ring. In diesem zum Lesen aufgestellten Ring werden in der unteren Hälfte mit dem Finger die Braille-Buchstaben gelesen und in der oberen Hälfte generiert. Hierzu werden drei Quader jeweils aneinander liegend positioniert, wobei jeder Quader vier mögliche Positionen einnehmen kann.

Mittels Aktuatorsystem werden die drei Quader in eine der vier verschiedenen Positionen gebracht und somit die entsprechenden Punktkombinationen, die gelesen werden können, realisiert.

Um die bisherigen im Braille-Ring verbauten Aktuatoren ersetzen zu können, muss der neue Aktuator störungsfrei und unter jeglichen Umgebungsbedingungen funktionieren. Zudem muss das neue System wartungsarm bleiben. Außerdem muss das neue Aktuator-System das alte System mit seinen Vorteilen überbieten können.

Als Kernidee für diese Arbeit setzte man auf ein elektromagnetisches System und einen magnetisierbaren Quader. Der neue magnetische Aktuator soll ein magnetisches Feld erzeugen, welches den Quader in eine in Laufrichtung liegende V-Kerbe zieht. Somit kann durch eine Drehung eine neue Positionen generiert werden.

In dieser Arbeit wurden mehrere magnetische Aktuatoren getestet. Zuvor wurden diese jedoch immer individuell an den Braille-Ring angepasst, um den Platz bestmöglich auszunutzen. Zudem wurde jeder Aktuator mittels Finite-Elemente-Programm simuliert und vor den Testaufbauten auf seine magnetischen Eigenschaften überprüft. Erst nach diesen Schritten wurde der Prototyp angefertigt und in einem Versuchsaufbau getestet.

Es zeigte sich, dass das magnetische Funktionsprinzip durch immer weitergehende Optimierungen die gewünschten Resultate erzielte. Am Ende dieser Arbeit konnte auch ein Aktuator gefertigt und getestet werden, welcher nun in einem originalgetreuen Braille-Ring verwendet wird.

Abstract

In this thesis, a new actuator system for the Tetragon Braille-Ring is developed. The Braille-Ring is a Braille-Display developed by the spin-off fellowship funded company "Tetragon". Tetragon's goal is to build a low-cost, low-maintenance Braille-Display for people with complete or severe vision loss to enable them to read with fewer limitations in everyday life. To achieve this, Tetragon uses a ring instead of a conventional display. In this ring, which is set up for reading, the Braille-Letters are read with the finger in the lower half and generated in the upper half. For this purpose, three cuboids are positioned next to each other, whereby each cuboid can assume four possible positions.

By using an actuator system, the three cuboids are brought into one of the four different positions and thus the corresponding point combinations that can be read are realized.

In order to be able to replace the previous actuators installed in the Braille-Ring, the new actuator must function trouble-free and under any environmental conditions. In addition, the new system must remain low-maintenance. Furthermore, the new actuator system must be able to outperform the old system with its advantages.

The core idea for this work was an electromagnetic system and a magnetizable cuboid. The new magnetic actuator should generate a magnetic field, which pulls the cuboid into a "v-shaped notch" in the running direction. Thus, a new position can be generated by a rotation.

In this work several magnetic actuators were tested. Beforehand, however, these were always individually adapted to the Braille-Ring in order to make the best possible use of the space available. In addition, each ring was simulated using a finite element program and its magnetic properties were checked before the test setups. Only after these steps was the prototype made and tested in a test setup.

It was found that the magnetic operating principle achieved the desired results through ever more advanced optimizations. At the end of this work, an actuator was manufactured and tested, which is now being used in an original Braille-Ring.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Problemstellung und Motivation	7
1.2	Allgemeine Einleitung in das Themenfeld	7
1.3	Tetragon und der „Braille-Ring“	8
1.4	Forschungsfrage und Zielsetzung	10
2	Theoretische Grundlagen	11
2.1	Die Brailleschrift	11
2.1.1	Die Geschichte der Entwicklung	11
2.1.2	Der Aufbau der Brailleschrift	11
2.1.3	Schriftsysteme - Anzeigesysteme	13
2.2	Elektromagnetismus	15
2.2.1	Ampère'sches Gesetz	15
2.2.2	Magnetkern	16
2.2.3	Die Energie in einer magnetischen Flussdichte	18
2.2.4	Magnetische Kraft	20
2.3	Finite Elemente Analyse	22
2.3.1	FEMM	23
2.3.2	Comsol®	23
3	Stand der Technik/ Der Tetragon Braille-Ring	24
3.1	Das Grundprinzip	24
3.2	Technische Umsetzung	24
3.3	Die Idee	25
3.3.1	Die geeignete Form	25
3.3.2	Die Verschiebung der Elemente	27
3.3.3	Das Gesamtkonzept	29
3.4	Aktuelles Aktuator Prinzip	31
3.4.1	Die Drehung	31
3.4.2	Gefederte Führung	31
3.4.3	Drehung durch gefederte Stifte	32
3.5	Der Prototyp	33
4	Anforderung an den Aktuator	35
5	Neues Aktuator-Konzept	37
5.1	Die Grundidee	37
5.1.1	Die V-Kerbe	37
5.1.2	Die Idee des neuen Aktuators	38
5.2	Machbarkeit	39
5.2.1	Die magnetische Verkipfung	39
5.2.2	Die notwendige Kraft	40
5.3	Externe Machbarkeitsstudie	42
5.4	Die verschiedenen Faktoren	43
5.5	Alternative Formen	43

5.6	Änderungen am Quader	45
5.7	Schlussfolgerung Austrian Audio	46
6	Der Versuchaufbau	47
6.1	Aktuatoraufbau	47
6.2	Fertigung Aktuator	47
6.3	Wicklung der Spule	49
6.4	Quader	50
6.4.1	Kunststoff	51
6.4.2	Metall	51
6.5	Kuppel	52
6.5.1	Kuppel ohne Führung	53
6.5.2	Kuppel mit Führung	53
6.6	Versuchsaufbau	55
7	Resultate	57
7.1	Aktuator FINWE	58
7.1.1	Simulation FINWE	58
7.1.2	Test FINWE	60
7.2	Aktuator EISCONE	61
7.2.1	Simulation EISCONE	62
7.2.2	Test EISCONE	64
7.3	Aktuator SPALTER	65
7.3.1	Simulation SPALTER	67
7.3.2	Test 1 SPALTER	68
7.3.3	Test 2 SPALTER	69
7.4	Aktuator SENIOR	70
8	Fazit der Prototypen	74
9	Diskussion und Ausblick	77
9.1	Diskussion der Ergebnisse	77
9.2	Nächste mögliche Schritte zur Weiterentwicklung	77
A	Anhang	85
B	Anhang	86

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Motivation

Im Jahr 2015 gab es weltweit schätzungsweise 36 Millionen Menschen mit einem vollkommenen Sehverlust (Blindheit) und 216,6 Millionen Menschen mit einem hochgradigen Sehverlust. Vergleicht man diese Werte mit jenen von 1990 (30,6 Millionen Blinde, 159,9 Millionen Personen mit hochgradigem Sehverlust), gibt es unter Berücksichtigung von Bevölkerungswachstum, Alterung der Bevölkerung nach Bevölkerungswachstum und altersspezifischer Häufigkeit, um 17,9% mehr blinde Menschen und 35,5% mehr Menschen mit schwerer Sehbehinderung (Bourne u. a. 2017).

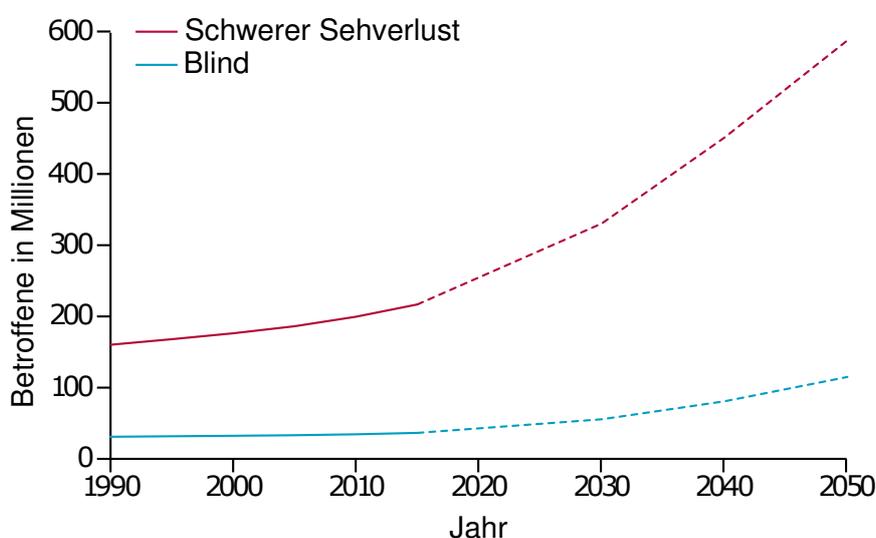


Abb. 1: Schätzung von Menschen mit kompletten oder schweren Sehverlustes in den Jahren 1990-2050 (Bourne u. a. 2017)

Durch das Bevölkerungswachstum und der steigenden Lebenserwartung kommt es zu einer starken Zunahme von Sehbehinderungen (siehe Abbildung 1). So könnten ohne weitere Maßnahmen, vor allem in Ländern mit geringem gesundheitlichen Standard, die Zahl für blinde Menschen bis 2050 auf 115 Millionen Menschen ansteigen (Bourne u. a. 2017).

Um jenen Menschen zu helfen, welche bereits erblindet sind, kann mittels technischer Geräte wie Braille-Displays wieder die Möglichkeit gegeben werden, selbstständig zu lesen. In Entwicklungsländern befinden sich aufgrund der schlechten medizinischen Versorgung und spezifischer Krankheiten besonders viele Menschen mit Sehverlust (Organization 2012; Bourne u. a. 2017). Die Entwicklung eines günstigen und zuverlässigen Braille-Displays wird deshalb immer wichtiger, um vielen Personen das Lesen zu ermöglichen.

1.2 Allgemeine Einleitung in das Themenfeld

Die Brailleschrift wurde vor fast 200 Jahren für blinde Menschen entwickelt, um ihnen das Lesen und Schreiben zu ermöglichen. Dazu wird eine Anordnung von sechs (später

auch acht) physisch erfühlbaren Punkten verwendet (siehe Abbildung 2). Diese werden durch zwei Punkte in der horizontalen und drei (oder vier) Punkte in der vertikalen Linie dargestellt (Allen u. a. 2006; Busse 2016).

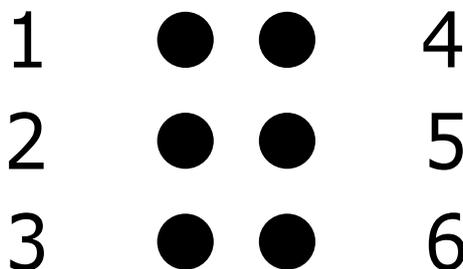


Abb. 2: Anordnung der Braille-Punkte.

Um diese Schrift abzubilden, können die individuellen Punktanordnungen auf ein Papier geprägt und dadurch von blinden Menschen gelesen werden. Sie kann mit Hilfe spezieller Geräte auch von blinden Personen selbst erstellt werden (Busse 2016).

Im technologischen Zeitalter wurden mechanische Braille-Displays entwickelt. Diese sind im Vergleich zu der gedruckten Form wesentlich platzsparender und können wie ein „E-Book“ für blinde Menschen verwendet werden. In diesen elektronischen Braille-Displays werden die Punkte des Braille-Codes einzeln angesteuert und dadurch die Buchstaben beziehungsweise Zahlen dargestellt. Die Ansteuerung der Punkte kann durch verschiedene Mechanismen erfolgen, der Biegebalken aus piezoelektrischer Keramik stellt dabei den am häufigsten in Braille-Displays verwendeten Mechanismus dar, welcher die Punkte der Zeichen einzeln hebt beziehungsweise senkt (Busse 2016).

1.3 Tetragon und der „Braille-Ring“

Tetragon ist ein durch das Spin-off Fellowship Förderungsprogramm der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG 2020) gefördertes Unternehmen (Tremel 2016). Tetragon selbst hat sich das Ziel gesetzt, ein Braille-Display anzubieten, das kostengünstig hergestellt und mit möglichst geringem Wartungsaufwand betrieben werden kann. Tetragon setzt dabei nicht auf eine konventionelle Braille-Zeile, sondern auf einen Hohlzylinder als Lesefläche. Ein Mockup dieser Idee ist in der Abbildung 3 zu erkennen.

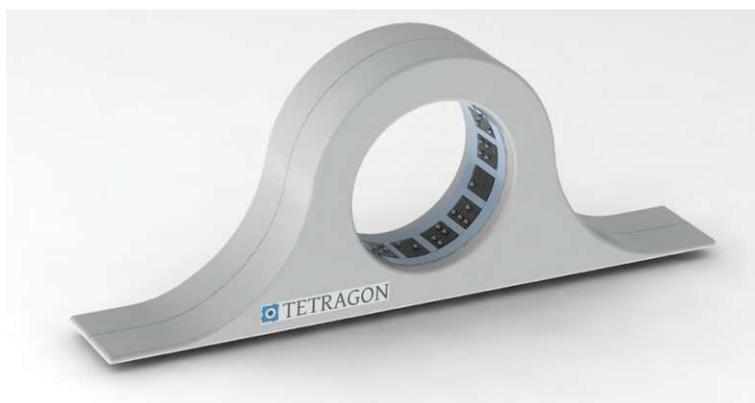


Abb. 3: Ein Mock-Up des Braille-Ringes von Tetragon (Tremel 2016)

Um die Umsetzung zu prüfen, wurde bereits ein Prototyp durch Tetragon gefertigt (Tremel 2016; Busse 2016). Die Grundidee ist die Verwendung von drei jeweils aneinander liegenden Quadern, wobei jeder Quader vier mögliche Positionen einnehmen kann. Die verschiedenen Zustände werden durch die vier Seitenflächen mit den entsprechenden Punktkombinationen realisiert. Daraus ergeben sich 64 ($4^3=64$) Kombinationsmöglichkeiten, was somit den Ansprüchen des Sechs-Punkt Braille-Standard entspricht. Der durch Busse (2016) gefertigte Prototyp ist in der Abbildung 4 dargestellt.

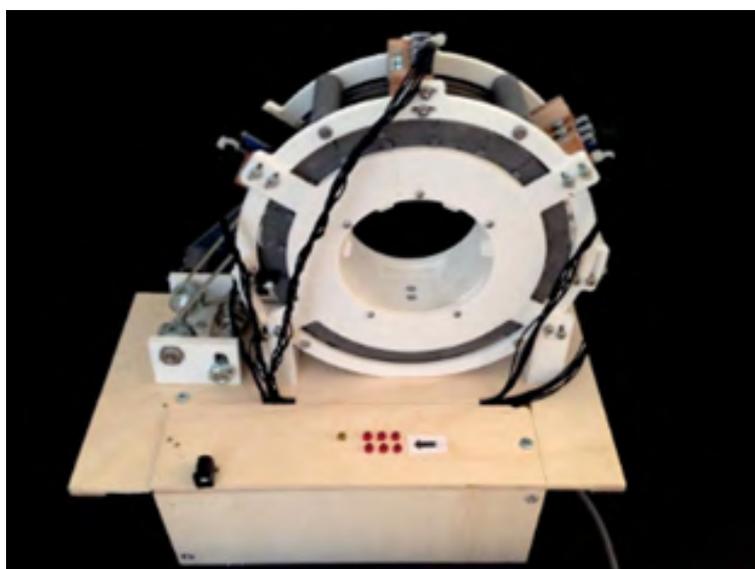


Abb. 4: Der erste von Tetragon gefertigte Prototyp (Busse 2016)

Um die geforderten Kombinationsmöglichkeiten der Quader zu ermöglichen, müssen die Quader bis zu dreimal gedreht werden. Bisher wurde dies mittels elektrisch betätigter Aktuatoren ermöglicht. Die Zahl der bewegten Teile im Inneren des Braille-Displays soll jedoch weiter minimiert werden, um einen langen, störungsfreien Betrieb zu garantieren.

1.4 Forschungsfrage und Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, einen elektromagnetischen Aktuator-Prototypen zu konstruieren, welcher eine stabile Drehung eines Braille-Ring Anzeigeelementes einleitet und sich geometrisch gut in den Braille-Ring implementieren lässt. Der neue Ansatz soll den bisherigen im Braille-Ring verwendeten Aktuator ablösen.

Als Kernidee setzt man auf die magnetische Wechselwirkung zwischen Quader und einem elektromagnetischen Aktuator. Ein Aktuator soll dazu ein magnetisches Feld erzeugen, welches Kraft auf den Quader ausübt und ein Drehmoment in diesem bewirkt. Dieses Drehmoment löst eine Verdrehung des auf den Achsen gelagerten Anzeigeelementes aus. In der Abbildung 5 ist diese Grundidee schematisch dargestellt.

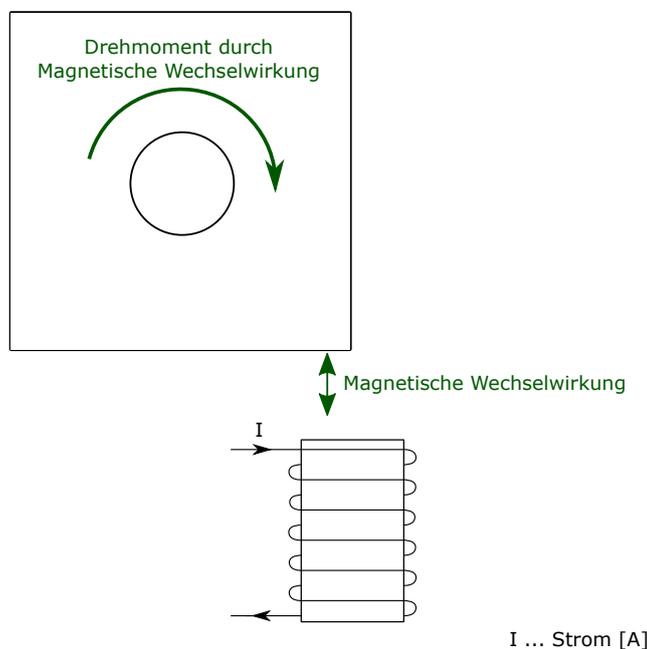


Abb. 5: Die Grundidee eines magnetischen Aktuators

In weiteren Schritten soll der Aktuator platztechnisch als auch in der Funktion optimiert werden und einen möglichst hohen Wirkungsgrad erzielen.

2 Theoretische Grundlagen

In den folgenden drei Kapiteln werden die theoretischen Grundlagen zum Verständnis dieser Arbeit genauer erörtert.

2.1 Die Brailleschrift

Die Brailleschrift ist das faktisch einzige verwendete Schriftsystem für blinde Menschen, welches ihnen selbstständiges Lesen und Schreiben ermöglicht. In den nächsten Abschnitten wird explizit auf die Entstehung und die heutige Verwendung eingegangen.

2.1.1 Die Geschichte der Entwicklung

Die Brailleschrift, wie wir sie heute kennen, wurde von Louis Braille in Paris entwickelt. Braille erblindete selbst bei einem Unfall in der Werkstatt seines Vaters, dabei stach er sich beim Spielen eine Schusterahle in sein rechtes Auge. Durch das verunreinigte Werkzeug entzündete sich sein Auge, diese Entzündung breitete sich auch auf sein linkes Auge aus, was zur Folge hatte, dass der damals fünfjährige Louis Braille zur Gänze erblindete (American Foundation for the Blind 2020).

Aufgrund der guten schulischen Leistung und der Hilfe seines damaligen Lehrers ging er auf das Nationale Institut für junge Blinde (Institut National des Jeunes Aveugles) in Paris. Dieses Institut wurde durch Valentin Haüy 1784 gegründet und war die erste Schule für Blinde weltweit. Die Ausbildung, die Louis Braille dort genoss, bildete den Grundstein der Entwicklung seines eigenen Schriftsystems. Später lehrte er selbst an dieser Schule (American Foundation for the Blind 2020).

Bereits im Alter zwischen 13 und 16 Jahren entwickelte Louis Braille ein Schriftsystem und publizierte dieses im Jahr 1829, welches, wie das System der Nachtschrift von Charles Barbier, auf dreidimensionale „Punkte“ beruht. Diese neue Schrift war um einiges einfacher als die bisherige „Nachtschrift“. Obwohl das Erlernen dieser neuen Schreibweise schneller und einfacher für Blinde war, wurde diese anfangs vom Schulleiter des „Institut National des Jeunes Aveugles“, welcher selbst unter keinem Sehverlust litt, boykottiert. Begründung dafür war die Angst, dass Blinde durch die neue Schrift keine sehenden Personen mehr brauchen und vereinsamen würden (American Foundation for the Blind 2020, Jiménez u. a. 2009).

Seit 1850 gilt die Brailleschrift als offizielles Schriftsystem und hat sich als die allgemeine Blindenschrift durchgesetzt. Durch weitere Adaptionen Anfang des 20. Jahrhunderts wurde die Lese- und Schreibgeschwindigkeit immer weiter verbessert. Eine dieser Adaptionen war unter anderem das Kurzschriftsystem (American Foundation for the Blind 2020).

2.1.2 Der Aufbau der Brailleschrift

Ein Zeichen der Brailleschrift besteht aus sechs möglichen Punkten. Diese sind in einer zwei mal drei Matrix angeordnet, wobei sich maximal zwei Punkte auf der horizontalen und

maximal drei Punkte auf der vertikalen Linie befinden. Für den in 2.1.3 erwähnten Euro-Braille Standard, wurde dieses System auf zwei Punkte horizontal und vier Punkte vertikal erweitert. Für diese Arbeit wurde der Sechs-Punkt-Standard herangezogen. Ein Buchstabe wird durch verschiedene Variationen der Punkte zusammengesetzt, die Aneinanderreihung der Punktmatrizen bildet ein Wort. Die genauen Abstände der Punkte und Matrizen zueinander sind in der DIN 32976 Norm wiedergegeben (Behling 2007; *DIN 32976:2007-08 : Blindenschrift-Anforderung und Maße* 2007). In der folgenden Abbildung 6 sind die genauen Abmessungen nach der DIN 32976 Norm (*DIN 32976:2007-08 : Blindenschrift-Anforderung und Maße* 2007) für die Brailleschrift dargestellt.

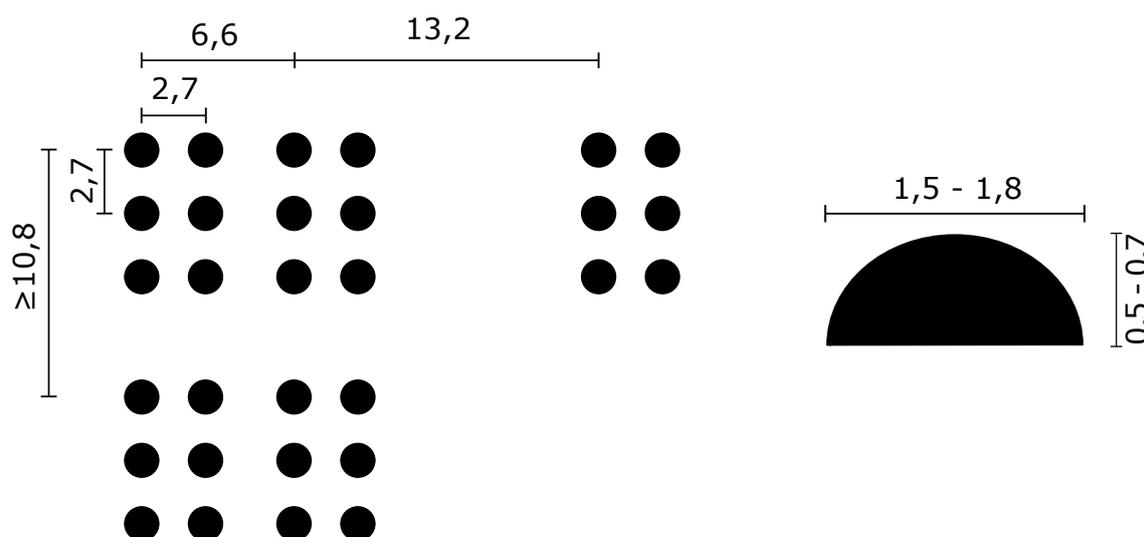


Abb. 6: Schema der genauen Bemaßung der Brailleschrift nach DIN 32976 Norm in [mm] (*DIN 32976:2007-08 : Blindenschrift-Anforderung und Maße* 2007))

Ein Braille-Punkt muss einen Durchmesser von 1,5 bis 1,8 mm und eine Höhe zwischen 0,5 und 0,7 mm vorweisen. Die Punkte haben innerhalb des eigenen Buchstabens eine Entfernung von 2,7 mm zu ihren Nachbarn, wobei sich diese Maße immer auf die Mitte des Punktes beziehen. Dieser Abstand gilt sowohl für horizontale, als auch für die vertikale Richtung. Der Abstand vom ersten Punkt des Buchstabens zum ersten Punkt des Nachbarbuchstabens beträgt 6,6 mm, ein Leerzeichen wird durch einen fehlenden Buchstaben dargestellt. Der Zeilenabstand vom ersten Punkt der ersten Zeile zum ersten Punkt der zweiten Zeile muss mindestens 10,8 mm betragen (Behling 2007, *DIN 32976:2007-08 : Blindenschrift-Anforderung und Maße* 2007).

Durch die verschiedenen Variationen lassen sich aber nicht nur alle Buchstaben des deutschen Alphabetes darstellen, sondern auch Sonderzeichen und Zahlen. Hier gilt anzumerken, dass eine Zahl immer mittels eigener Sonderzeichen wiedergegeben wird. Durch Sonderzeichen werden der lesenden Person generell Informationen zum Text gegeben. So wird zum Beispiel ein Großbuchstabe mit einem Sonderzeichen vor dem Kleinbuchstaben dargestellt. Die genauen Regeln können in den „Marburger Systematiken der Blindenschrift – Teil 1 – Das System der deutschen Blindenschrift“ nachgelesen werden (Heuer u. a. 2005; Busse 2016).

2.1.3 Schriftsysteme - Anzeigesysteme

Im Laufe der Zeit haben sich unterschiedliche Brailleschrift-Systeme entwickelt. Viele von ihnen bauen auf das Basis-Braille-System auf oder sind eine Weiterentwicklung des Basissystems. Die Wichtigsten von ihnen sind in den folgenden Absätzen kurz beschrieben.

- **Basis-System**

Im Basis-System sind alle Buchstaben, Zahlen und Sonderzeichen definiert und werden kürzungsfrei wiedergegeben (Heuer u. a. 2005; Busse 2016). In der Abbildung 7 werden die 26 Buchstaben des lateinischen Alphabetes, Umlaute, Eszett, Zahlen und die wichtigsten Sonderzeichen abgebildet.

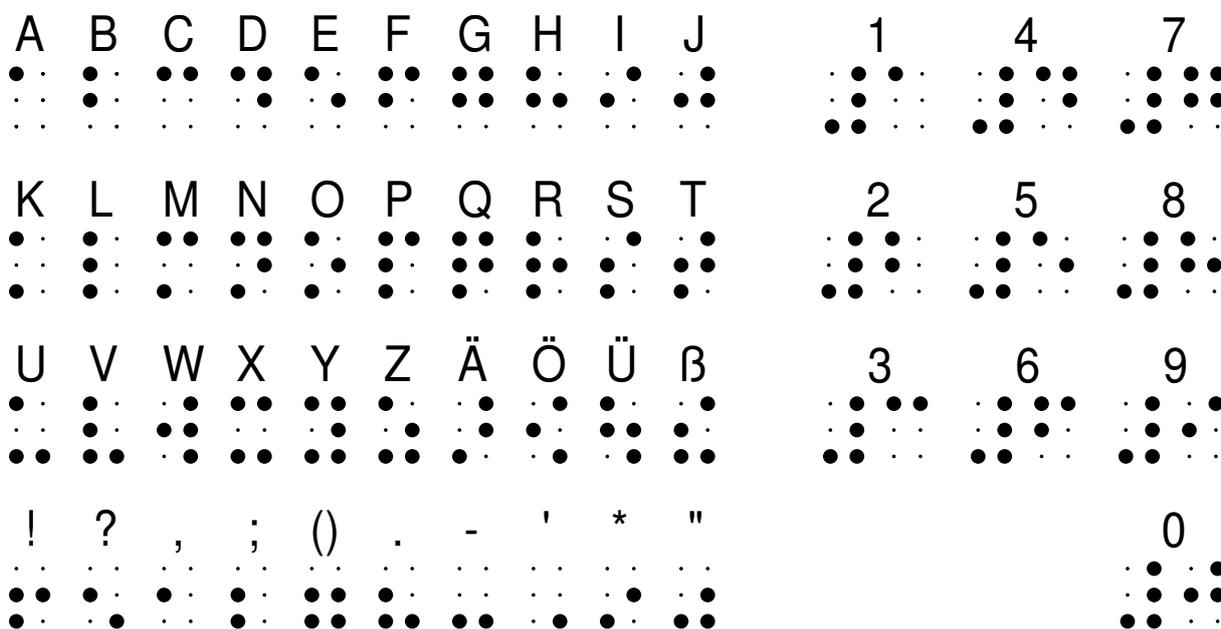


Abb. 7: Wichtigste Buchstaben, Zahlen und Sonderzeichen des Basis-Braille-System (Heuer u. a. 2005)

- **Die Vollschrift**

Die Vollschrift gilt als Standard der deutschen Blindenschrift und fügt dem Basis-System Lautgruppenkürzungen hinzu, welche auch in Abbildung 8 zu sehen sind (Heuer u. a. 2005).

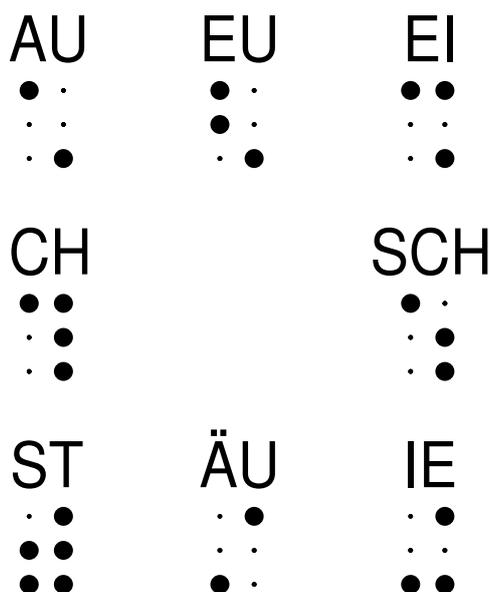


Abb. 8: In der Vollschrift verwendete Lautgruppenkürzungen (Heuer u. a. 2005)

- **Die Kurzschrift**

Die Kurzschrift soll die Lese- und Schreibgeschwindigkeit erhöhen, dazu übernimmt und erweitert diese die Lautgruppenkürzungen der Vollschrift (Heuer u. a. 2005).

- **Computer-Braille (Euro-Braille)**

Das Computer-Braille, welches auch oft als Euro-Braille System bezeichnet wird, wurde aufgrund der in der EDV verwendeten Zeichensätze eingeführt (Heuer u. a. 2005). Computer-Braille setzt dazu auf eine 8 Punkt Darstellung, diese ermöglicht 256 verschiedene Zeichen. Der größte Nachteil dieser Schrift liegt darin, dass die Punkte nicht mehr auf einer Fingerspitze Platz haben und dadurch wesentlich schwieriger zu lesen sind (Fakoo.de 2020).

- **Spezielle Systeme**

Die Anzahl aller verfügbaren 6- und 8- Punkt Braille-Zeichen genügt nicht, um alle gebräuchlichen Formen der Schwarzschrift wiederzugeben. Aus diesem Grund wurden spezielle Schriftsysteme entwickelt, um unter anderem Fachgebiete wie Mathematik und Chemie für Blinde wiederzugeben (Heuer u. a. 2005). Eine der ersten speziellen Schriftsysteme war die im Jahr 1828 von Louis Braille entwickelte Musikschrift, die das Notenlesen ermöglichte (Fakoo.de 2020).

2.2 Elektromagnetismus

In den folgenden Unterpunkten werden die magnetischen Kräfte beschrieben, welche durch einen stromdurchflossenen Leiter entstehen. Diese sind notwendig, um zu verstehen, wie sich magnetisierbare Materie in einem magnetischen Feld verhält.

2.2.1 Ampère'sches Gesetz

Das Ampère'sche Gesetz gehört zu den Maxwell-Gleichungen. Dieses Grundgesetz der Elektrodynamik beschreibt die Beziehung zwischen der magnetischen Flussdichte entlang eines geschlossenen Pfades und dem Strom, der dieses Feld durchfließt. Mathematisch kann dies mit der darunterliegenden Formel 1 beschrieben werden (Demtröder 2004).

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I \quad (1)$$

\vec{B} gibt hierbei die magnetische Flussdichte, $d\vec{s}$ den geschlossenen Pfad, μ_0 die magnetische Feldkonstante (Vakuumpermeabilität) und I den Strom an. Diese Beziehung (Formel 1) beschreibt somit auch das Verhalten eines stromdurchflossenen Leiters. Durchfließt Strom einen Leiter, entsteht dadurch radial zum Leiter eine magnetische Flussdichte. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 9 dargestellt. Die Orientierung der Flussdichte kann mit der Rechten-Hand-Regel bestimmt werden. Hierbei gibt die Richtung, in welche der ausgestreckte Daumen zeigt, die Richtung des Stromes an und die restlichen Finger die Feldrichtung der Flussdichte (*Intelligent Mechatronic Systems* 2013). In Abbildung 9 ist die Rechte-Hand-Regel auf den stromdurchflossenen Leiter angewandt.

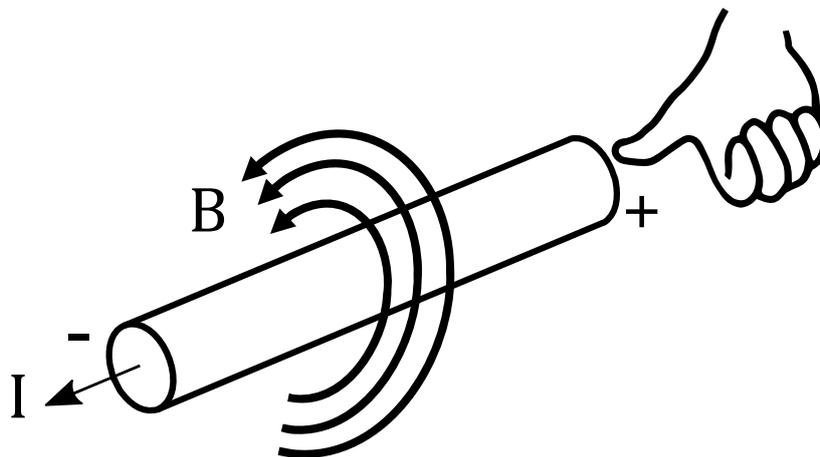


Abb. 9: Links: Ein stromdurchflossener Leiter erzeugt eine magnetische Flussdichte (*Intelligent Mechatronic Systems* 2013) Rechts: Die Rechte-Hand-Regel angewandt auf den elektrisch durchflossenen Leiter

Plaziert man nun zwei Leiter parallel zueinander, verbinden sich die Flussdichten miteinander. Dadurch kann die Stärke der magnetischen Flussdichte erhöht werden. Ein Beispiel dieser Überlappung stellt Abbildung 10 dar (*Intelligent Mechatronic Systems* 2013).

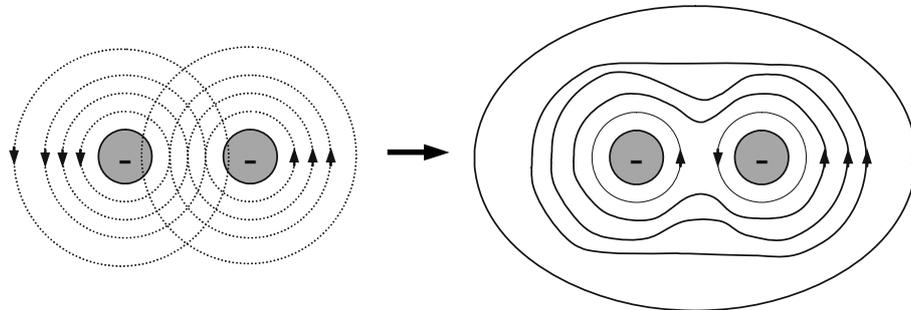


Abb. 10: Die Überlappung der Flussdichte zweier parallel in die gleiche Richtung mit Strom durchflossener Leiter (*Intelligent Mechatronic Systems* 2013)

Wickelt man in weiterer Folge einen Leiter zu einer Spule mit vielen kompakten Wicklungen, dann konzentriert sich die magnetische Flussdichte im Zentrum der Spule und erzeugt darin eine noch stärkere Flussdichte. Hierbei gilt zu erwähnen, dass diese Spule keinen Kern besitzen muss. Die folgende Abbildung 11 zeigt, wie sich die Feldlinien im Inneren einer einfachen Spule bündeln (*Intelligent Mechatronic Systems* 2013).

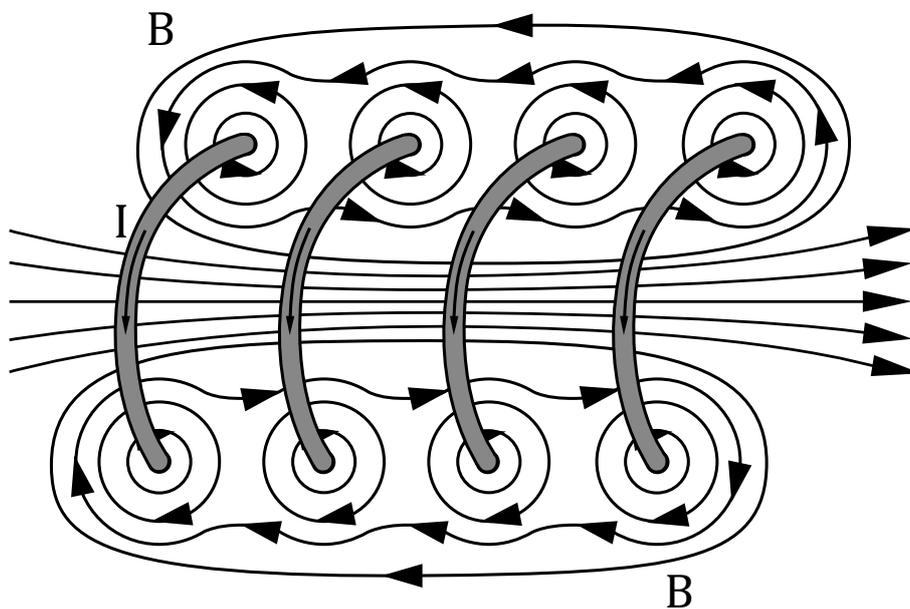


Abb. 11: Die Feldlinien der magnetischen Flussdichte einer einfachen Spule mit 4 Wicklungen (Demtröder 2004)

2.2.2 Magnetkern

Gibt man in den Innenraum der Spule einen Kern, zum Beispiel aus Eisen, so verändert sich die Flussdichte um den Faktor μ . Dieser Faktor wird als magnetische Permeabilität bezeichnet.

Der Zusammenhang der magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit von Vakuum und Materie kann mittels der magnetischen Permeanilität (μ) mit der Formel 2 beschrieben werden (Demtröder 2004):

$$B_{\text{materie}} = \mu B_{\text{vakuum}} \quad (2)$$

Die Veränderung der magnetischen Flussdichte durch Zugabe eines Kernes entsteht durch die Einwirkung der Flussdichte der Spule auf die Atome des Kernes. Durch die äußere Flussdichte kommt es zu einer Polarisierung der Atome und dadurch zu einem atomaren magnetischen Moment (p_m). Bildet man die Summe aller atomar magnetischen Momente pro Volumeneinheit (V) gibt uns dies die Magnetisierung (M) des Kernes (Demtröder, 2004):

$$M = \frac{1}{V} \sum_V p_m \quad (3)$$

Daraus erhalten wir die neue magnetische Flussdichte (B) für die Spule mit Ihrem Kern (siehe Formel 4):

$$B = \mu_0 \cdot (H_0 + M) \quad (4)$$

H_0 gibt hierbei die magnetische Erregung der Spule an, welche sich mit der Magnetisierung (M) des Kernes addiert und dann mit der magnetische Feldkonstante (μ_0) multipliziert wird. Einfach gesagt setzt sich die gesamte Flussdichte aus der Flussdichte, die durch die Spule erzeugt wird, und der Flussdichte, welche durch die Ausrichtung der Atome im Magnetkern entsteht, zusammen. Experimentell wurde festgestellt, dass bei nicht zu großen äußeren magnetischen Flussdichten auf den Kern die magnetische Erregung (H_0) proportional zur Magnetisierung (M) ist. Dieser Proportionalitätsfaktor wird auch Suszeptibilität (χ) genannt und gibt das magnetische Verhalten verschiedener Materialien an (Demtröder 2004):

$$M = \chi \cdot H_0 \quad (5)$$

Bei genauerer Betrachtung stellt man fest, dass sich die Materialien je nach Größe und Vorzeichen der Suszeptibilität (χ) in drei wesentliche Klassen einteilen lassen (Demtröder 2004):

- Diamagnetisch $\chi < 1$
- Paramagnetisch $\chi > 1$
- Ferromagnetisch $\chi \gg 1$

Dia- und paramagnetische Materialien besitzen eine nur sehr geringe Magnetisierbarkeit und eignen sich nicht als Spulenkern für Elektromagneten. Ferromagneten weisen im Gegensatz dazu eine um oft 10000-fach höhere Magnetisierbarkeit auf und eignen sich als sehr gute Spulenkern für Elektromagneten. Aus der Abbildung 12 ist ersichtlich, dass sich ferromagnetische Stoffe bei gleicher magnetischer Erregung um ein Vielfaches stärker magnetisieren lassen als paramagnetische und diamagnetische Materialien (Demtröder 2004).

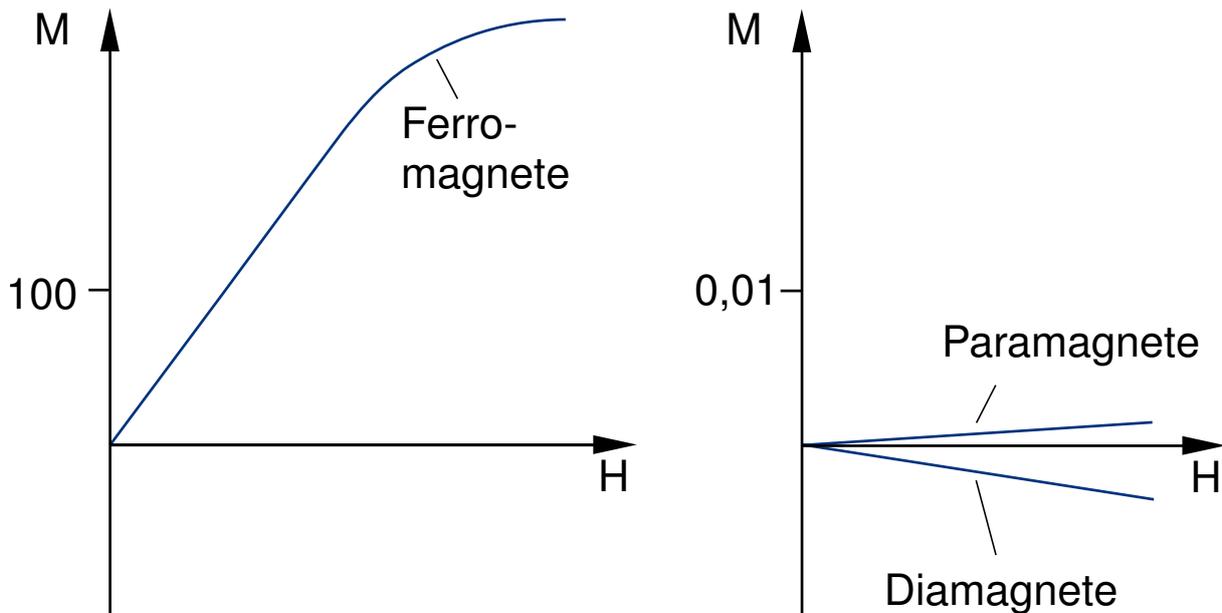


Abb. 12: Vergleich der Magnetisierbarkeit von dia-, para- und ferromagnetischen Stoffen. Links: Ferromagnete; Rechts: Dia- und Paramagnete (Demtröder 2004).

Eine weitere, wichtige Rolle zur Eigenschaft eines magnetischen Kernes spielt die magnetische Sättigung. Sie gibt an, ab welcher magnetischen Erregung (H_0) keine weitere Magnetisierbarkeit (M) des Materials mehr möglich ist. Eine solche Sättigung tritt typischerweise für ferromagnetische Materialien auf, wie zum Beispiel Eisen. Dies kann damit erklärt werden, dass sämtliche Atome ausgerichtet sind welche mit ihrem atomaren magnetischen Moment (p_m) zur Verstärkung der magnetischen Flussdichte beitragen (Schmitt 2020).

2.2.3 Die Energie in einer magnetischen Flussdichte

Um die Energie in einem Elektromagneten zu definieren, betrachten wir die Flussdichte im Inneren eines Toroids, welches gleichmäßig von einer Spule eingewickelt ist. Eine Darstellung eines solchen Toroids befindet sich in Abbildung 13. Durch die Ringform mit einer Querschnittsfläche von $A = \pi \cdot r_t^2$ kann eine gleichmäßige Flussdichte über den gesamten Ring angenommen werden. Die Pfadlänge des Ringes wird mit $L_p = 2 \cdot \pi \cdot R$ angenommen. Sowohl der Radius der Querschnittsfläche (r_t) als auch der Gesamradius des Toroids (R) sind in der Abbildung 13 ersichtlich (Clarke, Fishlock und Worpe 2014).

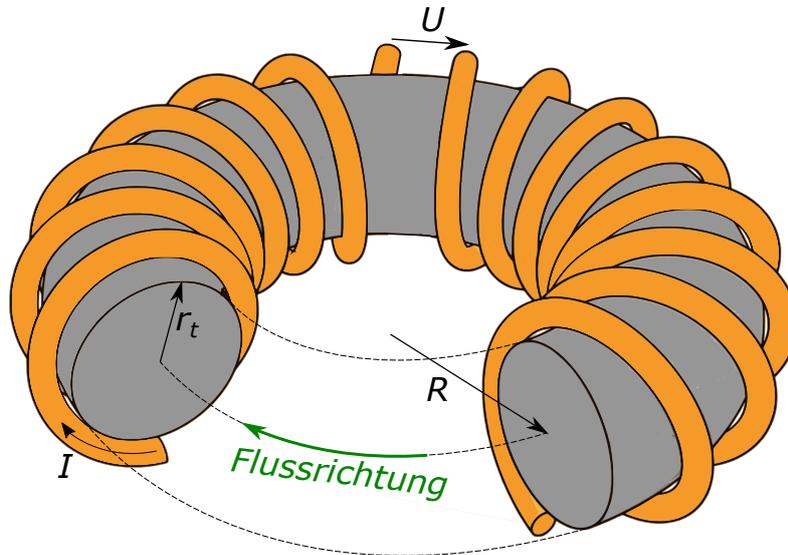


Abb. 13: Darstellung eines Toroids welcher gleichmäßig von einer Spule umwickelt ist (Clarke, Fishlock und Worpe 2014).

Wir nehmen an, dass sämtliche elektrische Energie (W) der Spule in die magnetische Flussdichte induziert wird. Daraus kann die Energie der Flussdichte mit der folgenden Formel definiert werden. U gibt hierbei die Spannung und I den Strom an (Clarke, Fishlock und Worpe 2014):

$$W = \int U \cdot I \, dt \quad (6)$$

Anhand des Faraday'schen Gesetzes beschreiben wir die Spannung (U) der Spule mittels Formel 7. N gibt hierbei die Anzahl der Wicklungen an und $d\phi$ nach dt die zeitliche Änderung des magnetischen Flusses, wobei der magnetische Fluss (ϕ) in weiterer Folge anhand Formel 10 definiert ist (siehe Seite 20): (Clarke, Fishlock und Worpe 2014):

$$U = N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (7)$$

Aus den oben beschriebenen Gesetzen ergibt sich für uns die Energie (W) folgendermaßen (Clarke, Fishlock und Worpe 2014):

$$W = \int N \cdot I \, d\phi \quad (8)$$

Es wird nun angenommen, dass die Wicklungsanzahl (N) multipliziert mit dem Strom (I) gleich der magnetischen Erregung (H) multipliziert mit der Pfadlänge (L_p) ist (Clarke, Fishlock und Worpe 2014).

$$N \cdot I = H \cdot L_p \quad (9)$$

Berücksichtigt man nun die Definition des magnetischen Flusses (Φ) im magnetischen Kern mit Formel 10, kann dadurch die magnetische Energie im gesamten Toroid mit Formel 11 angegeben werden. A beschreibt hierbei die Querschnittsfläche des Toroids (Clarke, Fishlock und Worpe 2014):

$$\Phi = A \cdot B \quad (10)$$

$$W = \int H \cdot L_p \cdot A \cdot dB \quad (11)$$

Um in weiterer Folge die Energiedichte W_d im Ring zu bestimmen, dividieren wir die Energie W des gesamten Ringes durch das Volumen V des Ringes. Daraus ergibt sich die Energiedichte in Abhängigkeit der magnetischen Erregung H (Clarke, Fishlock und Worpe 2014):

$$W_d = \frac{\int H \cdot L_p \cdot A \cdot dB}{V} = \frac{\int H \cdot L_p \cdot A \cdot dB}{L_p \cdot A} = \int H \cdot dB \quad (12)$$

Durch die Definition $B = \mu \cdot H$ kann die Energiedichte wie folgt wiedergegeben werden (Clarke, Fishlock und Worpe 2014):

$$W_d = \int \frac{B}{\mu} \cdot dB = \frac{B^2}{2 \cdot \mu} \quad (13)$$

Die Energiedichte (W_d) gibt die Dichte im magnetischen Kreis an. Mittels dieser kann in weiterer Folge auch die Kraft eines Elektromagneten auf ein naheliegendes magnetisierbares Objekt beschrieben werden (Clarke, Fishlock und Worpe 2014).

2.2.4 Magnetische Kraft

Wenn der Spalt zwischen Elektromagnet und dem Stück, welches angezogen werden soll, sehr klein ist, kann die Kraft F mittels der Änderung der Feldenergie dW im Verhältnis zum Luftspalt dx berechnet werden. Diese Kraft wird auch als Reluktanzkraft bezeichnet (Clarke, Fishlock und Worpe 2014):

$$F = \frac{dW}{dx} \quad (14)$$

Wird die Feldenergiedichte (W_d) mit dem Volumen (V) des Luftspaltes multipliziert, kann die totale Energie (W) im Luftspalt berechnet werden, wobei von einer gleichförmigen magnetischen Flussdichte (B) im Luftspalt (x) ausgegangen wird. Bei einem kleinen Stück magnetisierbarem Eisen (Abbildung 14), welches sehr nahe an der Seitenfläche eines Elektromagneten liegt, beträgt das Volumen (V) die Querschnittsfläche (A) des Eisenstückes multipliziert mit dem Abstand (x) zum Elektromagneten (Clarke, Fishlock und Worpe 2014).

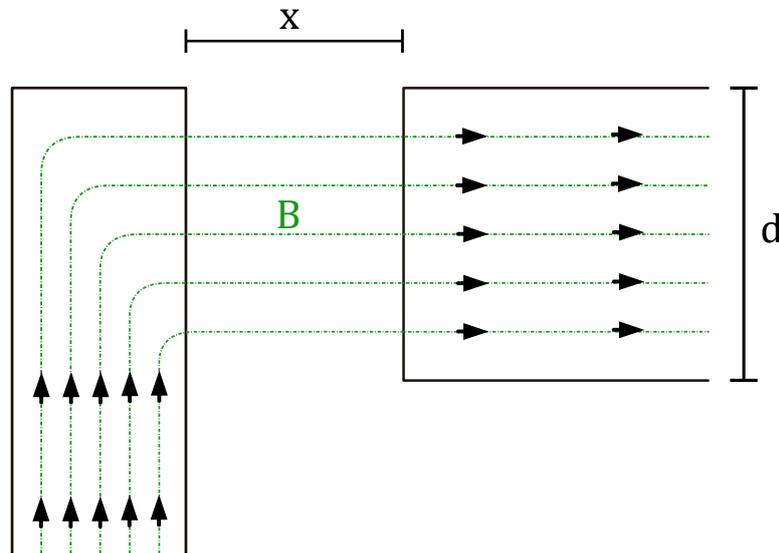


Abb. 14: Ein magnetisierbares Eisen mit geringem Abstand zu einem Elektromagneten (Clarke, Fishlock und Worpe 2014)

Mit der Feldenergiedichte kann somit die Kraft (F) mit Formel 15 berechnet werden (Clarke, Fishlock und Worpe 2014);

$$F = \frac{B^2 \cdot A}{2 \cdot \mu_0} \quad (15)$$

Die magnetische Flussdichte (B) ist definiert durch (Clarke, Fishlock und Worpe 2014):

$$B = \frac{N \cdot I \cdot \mu_0}{x} \quad (16)$$

Hierbei stellt N die Anzahl der Wicklungen der Spule, I die Stromstärke, welche in die Spule eingespeist wird, und μ_0 die Vakuumpemreabilität dar. x beträgt die Pfadlänge, welche in unserem Fall der Abstand zum Elektromagneten ist. Substituiert man nun die magnetische Flussdichte in die Formel der Kraft, ergibt sich die ausübende Kraft (F) des Elektromagneten auf das Eisenstück (Clarke, Fishlock und Worpe 2014):

$$F = \frac{N^2 \cdot I^2 \cdot \mu_0 \cdot A}{2 \cdot x^2} \quad (17)$$

Wird der Luftspalt gleich null, kommt es zu einem magnetischen Kurzschluss. Hierbei ist die Flussdichte nur mehr abhängig vom Material des Eisenkernes und dem anziehenden Material. Als Pfadlänge wird die gesamte Länge des Kernes (L_k) und des anziehenden Materials (L_m) angenommen. Die magnetische Flussdichte ohne Spalt (B_{oS}) ist somit wie folgt definiert (Clarke, Fishlock und Worpe 2014):

$$B_{oS} = \frac{N \cdot I}{\left(\frac{L_k}{\mu_k} + \frac{L_m}{\mu_m}\right)} \quad (18)$$

Dadurch kann mittels der Formel 19 die Kraft des Magneten ohne Luftspalt (F_{oS}) berechnet werden (Clarke, Fishlock und Worpe 2014):

$$F_{oS} = \frac{B_{oS}^2 \cdot A}{2 \cdot \mu_0} \quad (19)$$

2.3 Finite Elemente Analyse

Obwohl die Grundgleichungen simpel erscheinen, werden die Probleme zur Berechnung einer Simulation schnell sehr kompliziert, wenn die Formen nicht vereinfacht werden, weshalb die Finite Elemente Analyse verwendet wird. Diese Methode baut darauf auf, geometrische Formen durch eine einfachere Geometrie in eine Vielzahl von Regionen aufzuteilen. Es spielt hier keine Rolle, ob diese Formen zwei- oder drei-dimensional sind (David 2018).

Aus einer Vielzahl von einfachen Formen wird die originale, komplizierte Form approximiert („Meshing“). Der daraus entstehende Vorteil besteht darin, ein kleines, aber schwer zu lösendes Problem, in ein großes leicht zu lösendes Problem zu ändern. Obwohl dadurch ein Problem der linearen Algebra mit oft mehreren Tausenden unbekanntem entsteht, kann dieses aufgrund spezieller Algorithmen in sehr kurzer Zeit gelöst werden. Eine zur Meshing oft verwendete Form sind Dreieckselemente, bei der die Lösung durch eine lineare Interpolation an den drei Eckpunkten des Dreiecks angenähert werden kann (David 2018).

Zur Finiten Elemente Analyse wurden die Programme „FEMM“ und „Comsol“ verwendet, worauf nun näher eingegangen wird.

2.3.1 FEMM

Finite Element Method Magnetics oder kurz „FEMM“ ist eine Ansammlung von Programmen zur Berechnung und Lösung elektromagnetischer Probleme. Hierbei beschränkt sich „FEMM“ auf zweidimensionale Planare und Achsensymmetrische Bereiche (David 2018).

2.3.2 Comsol ®

Aufgrund der zweidimensionalen Beschränkung von „FEMM“ eignet sich „Comsol®Multiphysics“ zur Simulation von dreidimensionalen Objekten. Diese dreidimensionale Berechnung und die dadurch erhöhte Komplexität führt jedoch zu einer höheren benötigten Rechenleistung.

3 Stand der Technik/ Der Tetragon Braille-Ring

Die folgenden Kapitel dienen einem allgemeinen Verständnis über die Funktionsweise des Tetragon Braille-Ringes.

3.1 Das Grundprinzip

Auf der Innenseite eines Hohlzylinders wird die Brailleschrift im 6 Punkt Standard abgebildet. Der Bediener oder die Bedienerin des Ringes legt den Lesefinger auf die Innenseite dieses Zylinders. Der Hohlzylinder wird durch eine laterale oder mediale Bewegung der Hand in eine Rotation versetzt, wodurch sich die Brailleschrift, welche auf der Innenseite des Ringes abgebildet ist, relativ zum Finger bewegt. In Abbildung 15 ist das Grundprinzip des Tetragon Braille-Ringes grafisch dargestellt (Busse 2016).

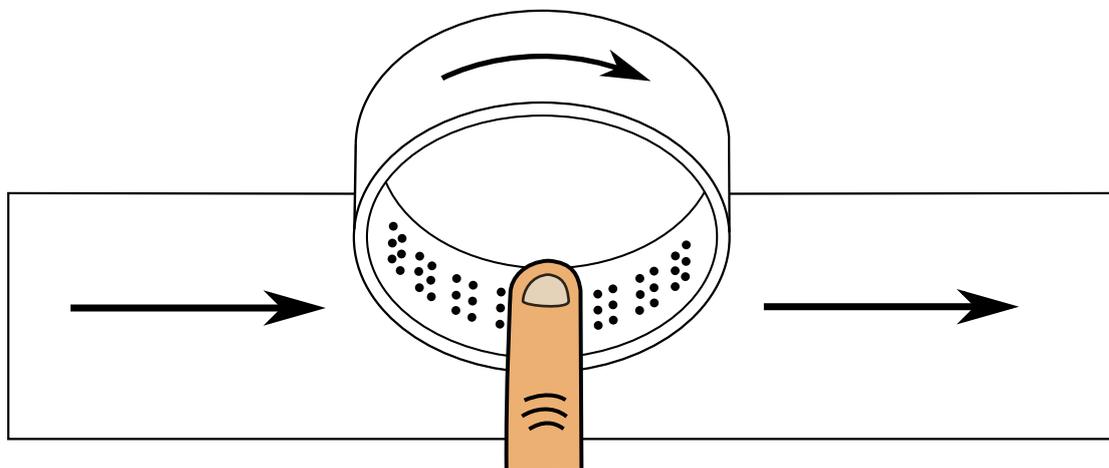


Abb. 15: Darstellung eines vereinfachten, nach rechts abrollenden Braille-Ringes und dem Finger einer Person, die Brailleschrift liest (Busse 2016)

3.2 Technische Umsetzung

Ein zentrales Problem bei der Umsetzung des Braille-Ringes ist das Generieren neuer Braille-Zeichen, um nach einer vollständigen Rotation des Ringes nicht nochmals den gleichen Text darzustellen.

Für Tetragon ergab sich durch die Arbeit von Busse (2016) folgende technische Schlussfolgerung, um dieses Problem zu lösen:

„Es ist eine mechanische Lösung zu finden, die Braille-Zeichen in der oberen Hälfte (Blackbox) des Zylinders generiert und diese nach der Generierung bei Einhaltung der vergebenen Abstände fixiert“ (Busse 2016, S. 28).

Somit wurde entschieden, die Generierung in der oberen Hälfte des Braille-Ringes durchzuführen. In der vereinfachten Darstellung (Abbildung 16) ist der Bereich, in welchem dieser Prozess stattfinden soll (Blackbox), dunkel hinterlegt.

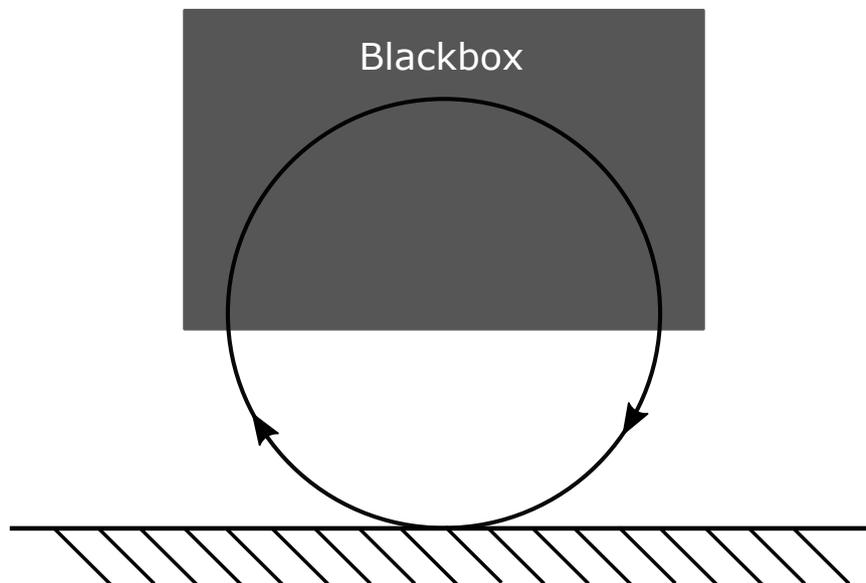


Abb. 16: Darstellung der Blackbox, welche den zur Verfügung stehenden Bereich zur Lösung des mechanischen Problems des Ringes zeigt (Busse 2016)

3.3 Die Idee

Aus mehreren Lösungsansätzen setzte sich die Verwendung von auf Achsen gelagerten, in sich drehbaren Elementen auf der Innenseite des Hohlzylinders durch. Diese drehbaren Elemente besitzen auf jeder ihrer Außenflächen eine unterschiedliche Braille-Punkt-Kombination. Durch Drehung und Aneinanderreihung mehrerer Elemente kann dadurch jedes beliebige Braille-Zeichen gebildet werden.

Diese Drehung findet im Bereich der „Blackbox“ statt, siehe Abbildung 16. Danach werden die Elemente fixiert, um von einer Person im unteren Bereich gelesen werden zu können.

3.3.1 Die geeignete Form

Im Zuge der Arbeit von Busse (2016) wurden folgende Kriterien zur Auswahl einer geeigneten Elementform festgelegt:

- **Darstellbarkeit**
Es müssen alle 64 Punktkombinationen des 6 Punkt Standard darstellbar sein.
- **Punktabstand**
Die Punktabstände der Braille-Punkte müssen den vorgegebenen Abständen entsprechen. Die genauen Abstände wurden im Kapitel 2.1.2 unter Berücksichtigung der *DIN 32976:2007-08 : Blindenschrift-Anforderung und Maße* (2007) beschrieben.

- **Anordnung**
Die Drehung beziehungsweise Verkippung der Elementarformen muss möglichst einfach sein, um die Anordnung im Bereich der Blackbox zu ermöglichen.
- **Achsendurchmesser**
Der Achsendurchmesser darf aus Stabilitäts- und Festigkeitsgründen nicht weniger als 1mm betragen.
- **Erweiterung**
Hierbei wird die Erweiterung auf einen 8 Punkt/ Computerbraille-Standard angestrebt. Diese kann mit 256 möglichen Punktkombinationen mehr Braille-Zeichen darstellen.

Bei der Untersuchung mehrerer Elementformen für die Einsetzbarkeit im Braille-Ring durch Busse (2016) wurde festgestellt, dass nur eine Form alle Kriterien erfüllt. Die Wahl fiel daher auf einen Quader mit zwei Punkten quer zur Achsenausrichtung (Busse 2016).

Diese Variante besteht aus flachen Quadern welche pro Element zwei Punkte quer zur Achsenrichtung und je einen Punkt in Achsenrichtung ermöglichen. Durch die vier Seitenflächen des Quaders kann jede Variante der Punktmöglichkeiten, welche mit zwei Punkten möglich ist, dargestellt werden. Durch eine Drehung dieser Quaderelemente kann somit der Punktzustand verändert werden. In der Abbildung 17 werden die 4 Zustände in Abhängigkeit des Drehwinkels gezeigt (Busse 2016).

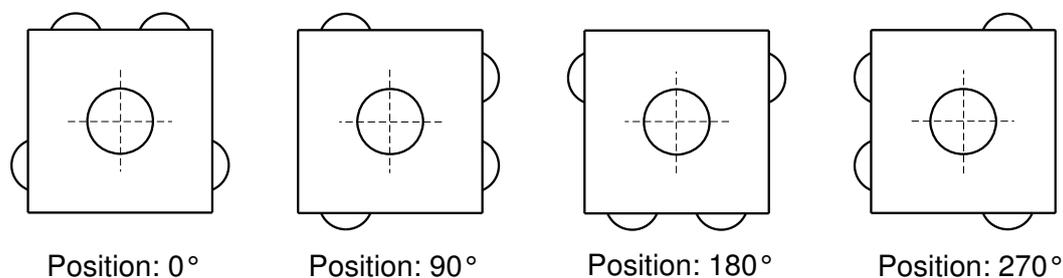


Abb. 17: Die vier Darstellungsmöglichkeiten durch ein Quaderelement in Abhängigkeit des Drehwinkels (Busse 2016).

Werden nun drei Elemente eines solchen Quaders auf einer Achse aneinandergereiht, ergibt sich ein Braille-Zeichen mit sechs Punktmöglichkeiten. Durch die Drehung jedes einzelnen Elementes kann somit jedes der 64 Braille-Zeichen dargestellt werden. In der folgenden Abbildung 18 wird mittels dreier aneinander gereihter Quader auf einer Achse der Buchstabe „t“ an der Oberseite in Brailleschrift dargestellt.

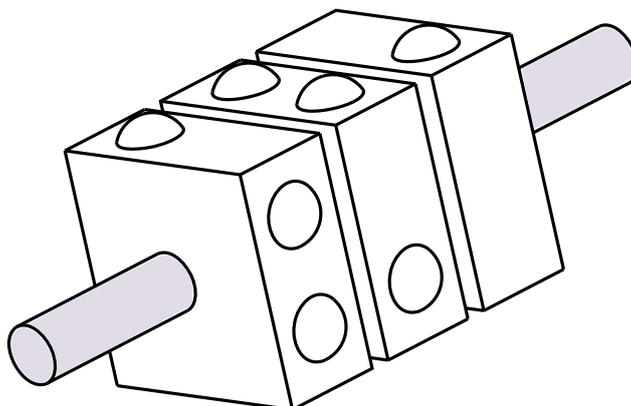


Abb. 18: Drei aneinander gereihte Quaderelemente, welche durch ihre Punktkombinationen den Buchstaben „t“ an der Oberseite darstellen (Busse 2016).

3.3.2 Die Verschiebung der Elemente

Grundsätzlich wird ein geringer Freiraum zwischen den Quadern auf den nächstliegenden Achsen angestrebt. Ist dieser Freiraum zu groß, würde die Lesequalität der Braille-Zeichen darunter leiden. Dies wird verhindert, indem wir die Braille-Punkte nicht an den Ecken der Quader positionieren und sich die Braille-Punkte der nebeneinanderliegenden Quader berühren. In der Abbildung 19 wird der Abstand zweier nebeneinander liegender Quader zueinander vereinfacht dargestellt (Busse 2016).

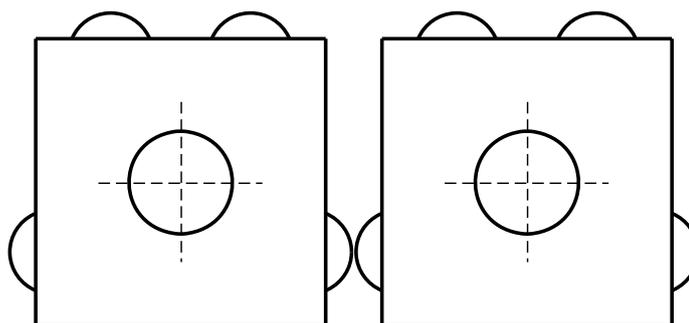


Abb. 19: Zwei nebeneinanderliegende Quader und deren Abstände nach Din 32976 (*DIN 32976:2007-08 : Blindenschrift-Anforderung und Maße* 2007, Busse 2016).

Unter Einhaltung der DIN 32976 und der Berücksichtigung eines geringen Freiraumes können die Seitenlänge des idealen Quaders ohne Berücksichtigung einer Krümmung durch

die Ringanordnung bestimmt werden. Diese Quaderlänge beträgt 5,6mm (Busse 2016).

Ein anderer Aspekt, der berücksichtigt werden muss, ist, dass der Quader, um eine Drehung durchführen zu können, einen Mindestabstand zu seinem nebenliegenden Quader besitzen muss. Dieser Mindestabstand wird in Abbildung 20 unter Berücksichtigung der idealen Quaderlänge dargestellt. Der Abstand zum Nachbarquader ist so definiert, dass sich der Quader ohne Berührung eines benachbarten Quaders vollständig drehen kann. Hierbei ergibt sich ein minimaler Achsenabstand der Quader von 7.1mm (Busse 2016).

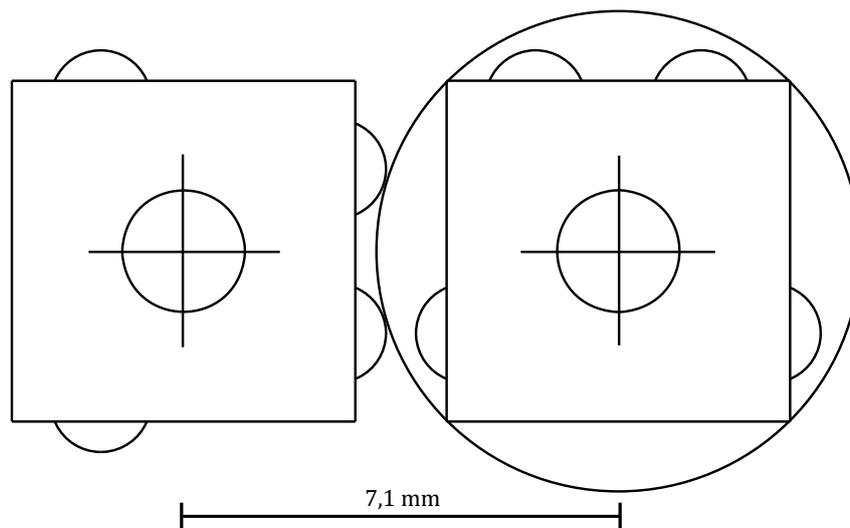


Abb. 20: Mindestabstand zweier aneinandergrenzender Quader (Busse 2016)

Um die in der DIN 32976 definierten Leseabstände der Braille-Zeichen einzuhalten und dennoch eine Drehung der Quader zu ermöglichen, hat Busse (2016) das Konzept der Elementverschiebung eingeführt. Hierbei werden die Quader nach dem Lesen auf einen größeren Kreisradius geführt, um somit den Abstand zueinander zu vergrößern. Nach der Ausrichtung der Quader im Bereich der Blackbox werden die Quader vor dem Lesen wieder auf einen kleineren Radius geführt, um den definierten Leseabständen gerecht zu werden. Diese Elementverschiebung wird in Abbildung 21 dargestellt.

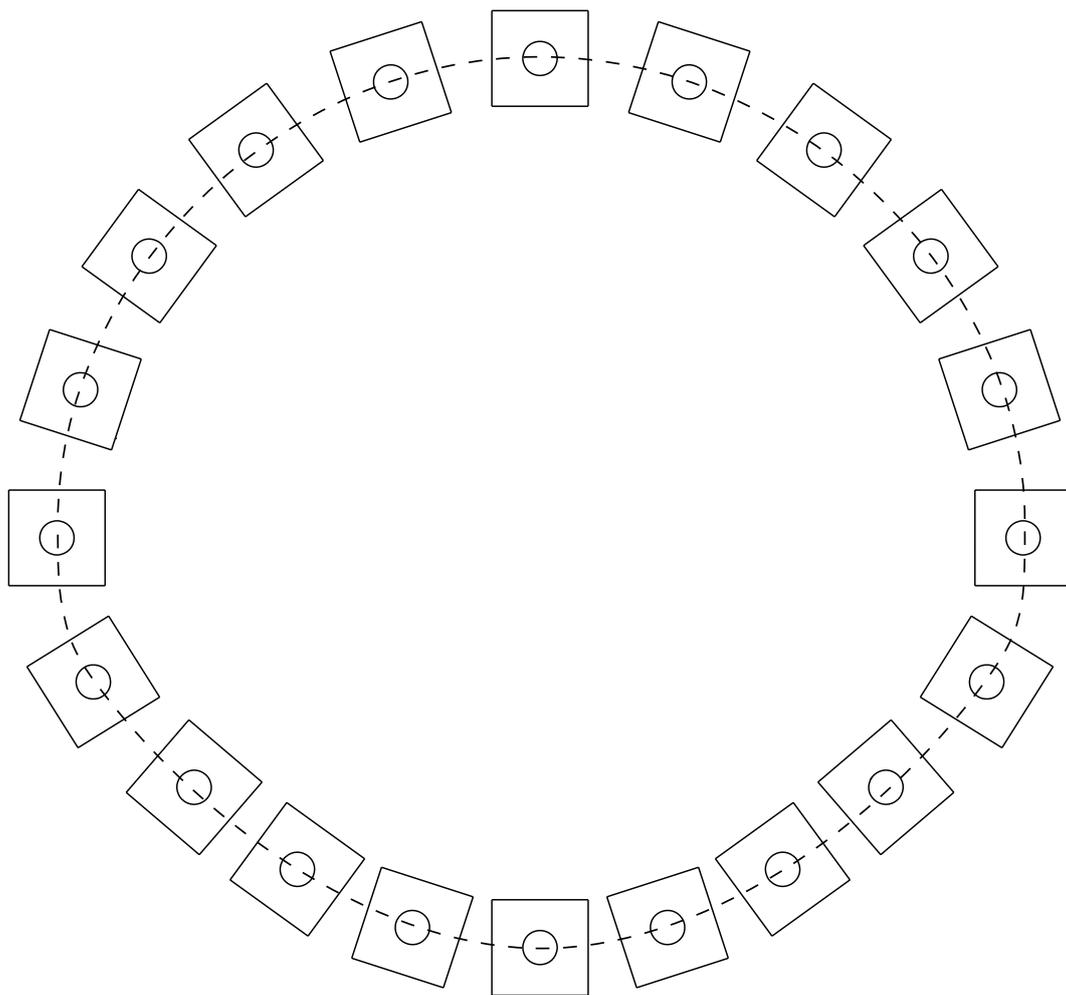


Abb. 21: Darstellung der Elementverschiebung: Im oberen Bereich haben die Quader einen größeren Abstand zueinander als im unteren Bereich (Busse 2016).

3.3.3 Das Gesamtkonzept

Der Braille-Ring soll im Betriebszustand in beide Laufrichtungen funktionieren, damit einzelne Wörter oder Sätze gegebenenfalls wiederholt gelesen werden können. Dieser Betrieb kann durch die Aktuatoren gewährleistet werden, die den individuellen Quader auf der Achse drehen. Um alle vier Zustände des Quaders (Abbildung 17) zu generieren, muss dieser bis zu dreimal gedreht werden können. In der folgenden Abbildung 22 ist eine einzelne Drehung eines einzelnen Quaderelements dargestellt.

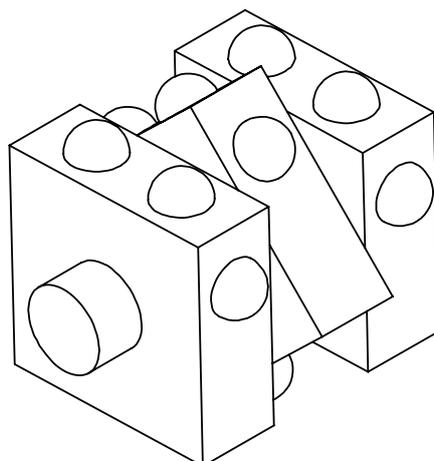


Abb. 22: Darstellung einer Drehung für ein einzelnes Quaderelement auf der Achse

Um alle der vier Zustände in Brailleschrift darzustellen, werden jeweils drei Aktuatoren für jedes der drei Quaderelemente auf einer Achse in der Blackbox (Abbildung 23) positioniert. Die Positionierung dieser Aktuatoreinheiten für ein Quaderelement wird in der folgenden Abbildung 23 schematisch dargestellt.

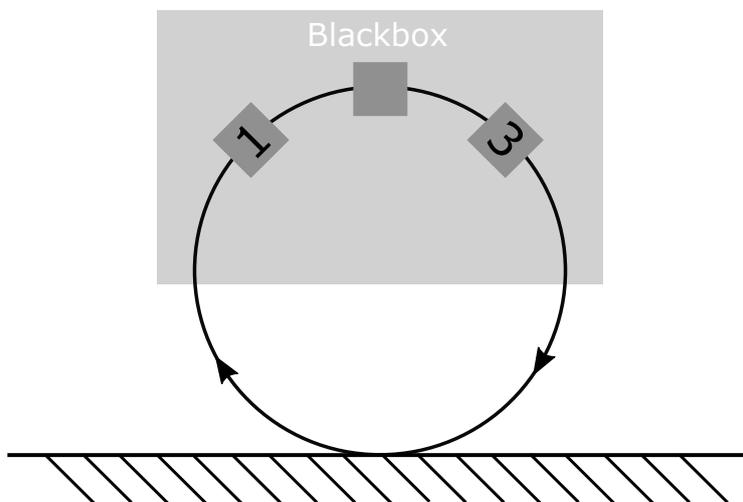


Abb. 23: Schematische Anordnung der Aktuatoren für ein Quaderelement (Busse 2016)

Jeder Aktuator kann eine Drehung um 90° einleiten, dadurch kann mittels neun Aktuatoren, jedes der 64 Braille-Zeichen generiert werden.

3.4 Aktuelles Aktuator Prinzip

3.4.1 Die Drehung

Um eine, wie im vorangegangenen Kapitel beschriebene Drehung zu ermöglichen, wird in diesem Kapitel näher auf diese Drehung eingegangen.

Die größten Schwierigkeiten einer Drehung sind folgende:

- **Genauigkeit der Drehung**

Um einen Zustandswechsel zu erreichen, muss der Quader um exakt 90° gedreht werden. Zusätzlich dazu muss berücksichtigt werden, dass der Quader diese Drehung im Vorbeifahren am Aktuator durchführt. Die Bewegung des Quaders besteht somit aus einer translatorischen und einer Rotationsbewegung. Trotz dieser zwei Bewegungsarten muss der 90° Stellungswechsel der Quader einwandfrei funktionieren.

- **Timing**

Ein weiterer wichtiger Punkt ist das richtige Timing der Drehung. Der Aktuator muss genau beim Vorbeifahren des Quaders den Stellungswechsel ausführen. Ein davor- oder dahinterliegender Quader darf durch falsches Timing nicht von der Drehung betroffen sein.

Zusammengefasst muss die Drehung des Quaders genau in dem dafür eingeplanten Bereich stattfinden. Auch der Aktuator muss durch das richtige Timing der Drehung eine Störung des Ringes verhindern. Im Allgemeinen geht die größte Gefahr von einem Verkanten des Quaders aus, welches zu einem Stopp der translatorischen Bewegung des gesamten Braille-Ringes führt.

3.4.2 Gefederte Führung

Bei einer Führung der Quader an der Innenseite des Ringes, wie in Abbildung 24 dargestellt, wäre ohne weitere Maßnahmen keine Drehung des Quaders möglich. Dies ergibt sich daraus, dass der Achsenabstand zur Innenseite des Ringes fixiert ist.

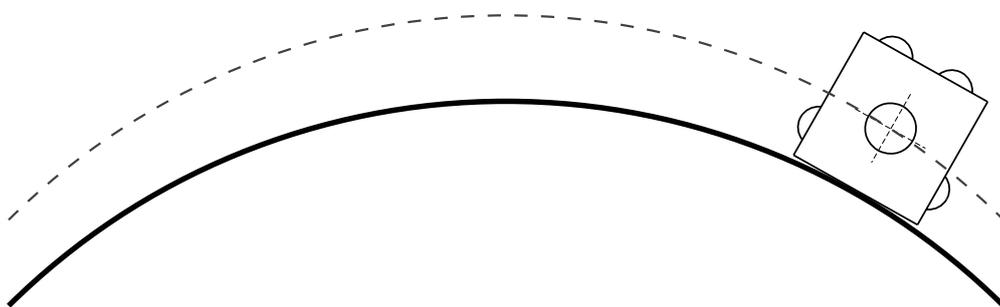


Abb. 24: Starre Führung

Als Lösung für diese Problem wurde ein gefedertes Führungselement entwickelt. Durch die Drehung des Quaders entsteht dabei genügend Kraft, um einen Teil der Führung zur Seite zu drücken und dem Element genügend Platz für eine Drehung zu geben. Wenn keine

Drehbewegung ausgeführt werden soll, übt das gefederte Führungselement genügend Kraft aus, um den Quader auf Position zu halten und keine unerwünschte Drehung zuzulassen. In der folgenden Abbildung 25 ist dieser Mechanismus schematisch abgebildet.

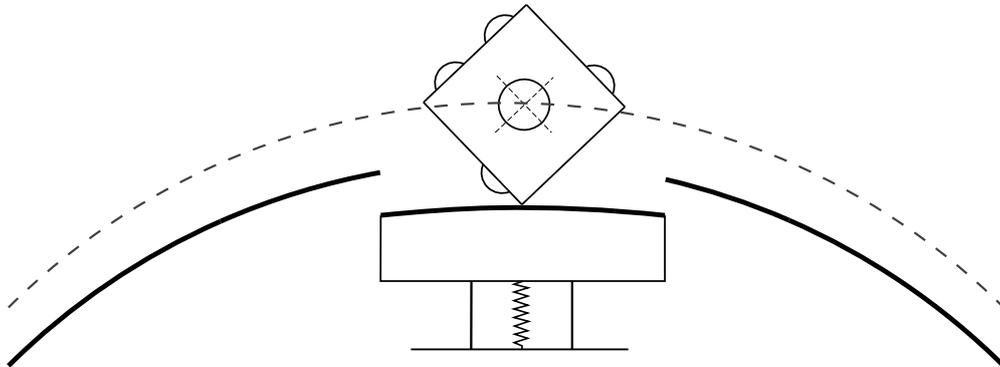


Abb. 25: Federgeführtes Element

3.4.3 Drehung durch gefederte Stifte

Tetragon entschied sich für den Bau ihres ersten Prototyp Aktuators mit einem gefederten Stift, der direkt beim Quaderelement ansetzt, die Drehung einzuleiten. Der ausgefahrene Stift hakt hierzu an der Kante des Quaders ein und lässt diesen eine Drehbewegung um 90° ausführen. Die folgende Abbildung 26 stellt diesen Drehvorgang in vier Schritten dar.

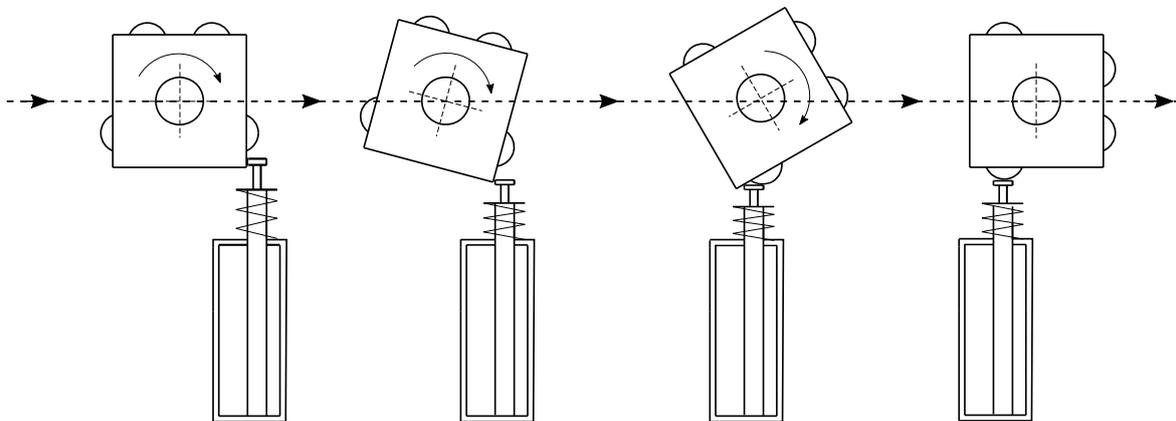


Abb. 26: Der Drehvorgang eines Quaders mittels gefederten Stifts

Im Inneren des mechanischen Aktuators befindet sich eine magnetische Spule. Durch das Induzieren von Strom entsteht ein magnetisches Feld, welches den Stift in die Spule hineinzieht. Durch das Hineinziehen wird der Stift somit in den passiven Zustand versetzt und kann keine Drehung mehr einleiten. Die Stifte werden durch eine Feder nach Unterbrechung der Stromzufuhr wieder in den aktiven Zustand versetzt, wodurch der ausgefahrene Stift wieder eine Drehbewegung einleiten kann. Da die Aktuatoren auch im passiven Zustand

Energie verbrauchen ist dieses Funktionsprinzip jedoch nicht optimal. In der Abbildung 27 werden drei parallel angeordnete Aktuatoren gezeigt.

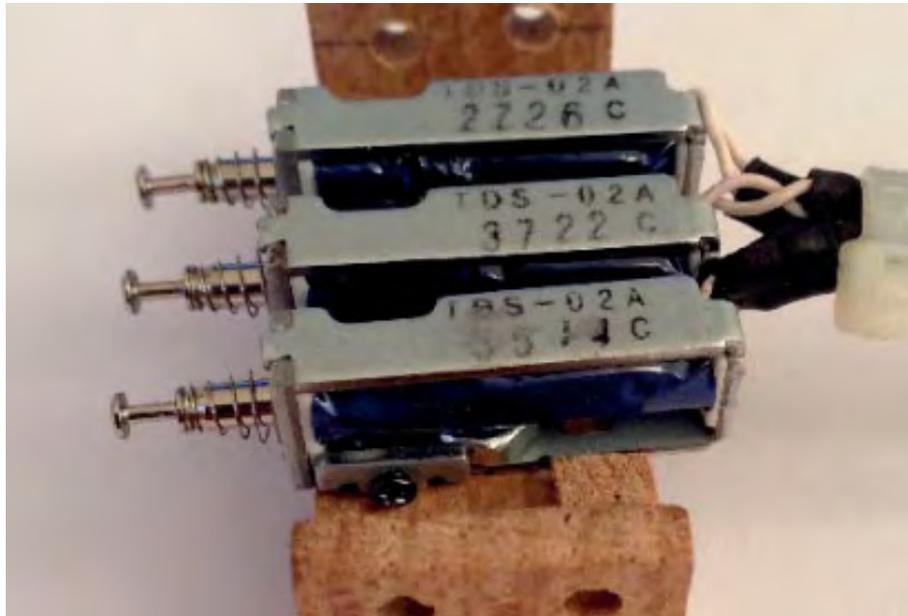


Abb. 27: Drei parallel angeordnete Aktuatoren (Busse 2016)

Bei der Drehbewegung wird der Stift durch die translatorische Bewegung der Quader zurückgedrängt, wodurch kein Verhaken zustande kommen kann.

3.5 Der Prototyp

Im Zuge der Diplomarbeit Busse (2016) wurde ein funktionstüchtiger Prototyp im Maßstab 2,5:1 gebaut, ein Querschnitt des Braille-Ringes ist in Abbildung 28 dargestellt. Hier ist die Elementverschiebung und der daraus entstehende, vergrößerte Achsenabstand erkennbar, auch die derzeitigen Aktuatoren und die dazu notwendigen gefederten Führungselemente sind in der Skizze ersichtlich.

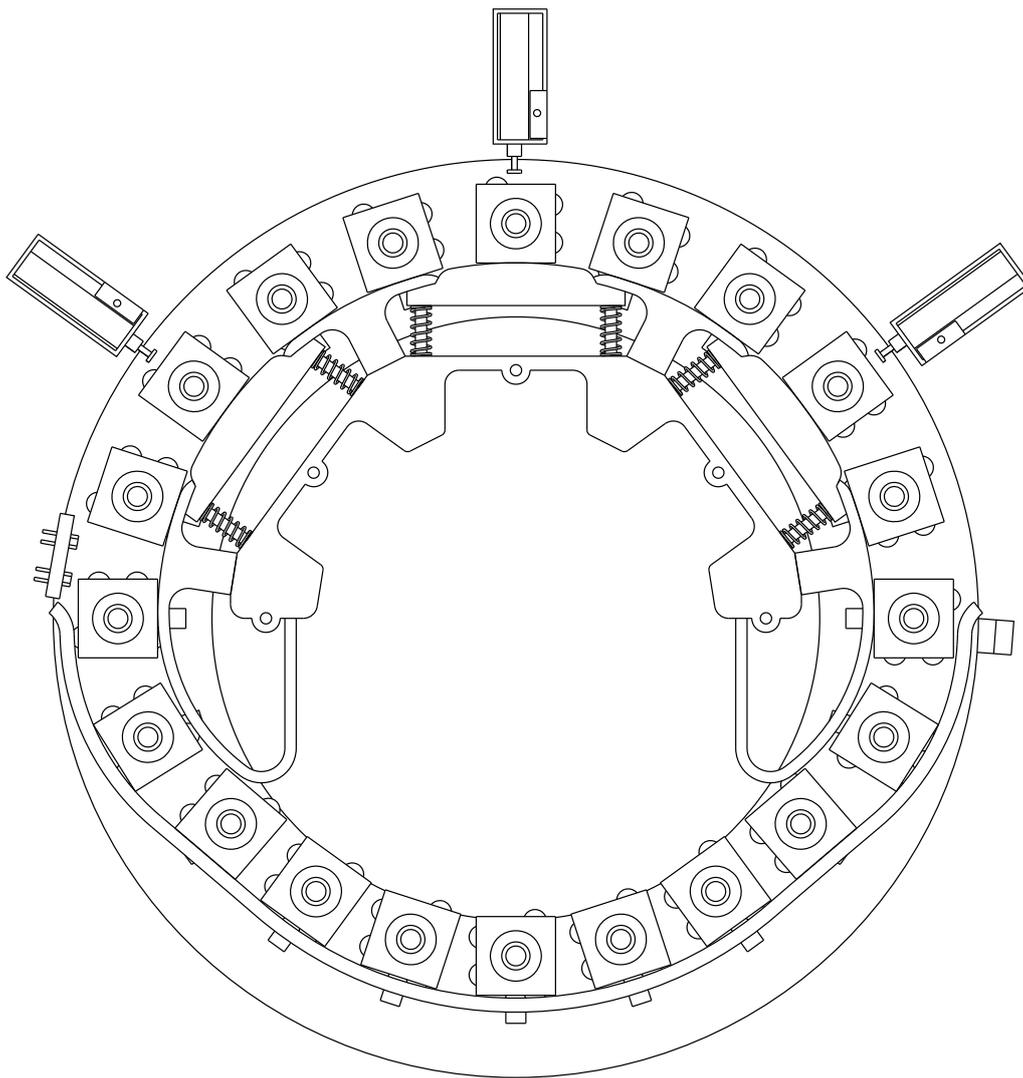


Abb. 28: Schematischer-Querschnitt des Braille-Ringes (Busse 2016).

Im Anhang A dieser Arbeit sind Originalbilder des Prototypen von Busse (2016) zu finden.

4 Anforderung an den Aktuator

Zur Neuentwicklung eines Aktuators für den Tetragon Braille-Ring, werden in diesem Kapitel die Anforderungen an einen solchen aufgelistet.

- **Zuverlässige Funktion**

Das höchste Ziel für den verwendeten Aktuator im Braille-Ring ist die einwandfreie Funktion. Der Aktuator muss zudem unter allen zumutbaren Umständen in der Lage sein eine 90° Verkipfung in beide Richtungen zu bewerkstelligen. Da die Anforderung besteht, dass der Ring in beide Leserichtungen (rechts und links) funktionieren soll.

- **Stellgeschwindigkeit**

Der Aktuator sollte im Stande sein die Verkipfung des Quaders in jeder Lesegeschwindigkeit der blinden Person auszuführen. Hierbei muss der Aktuator die Braille-Zeichen in der maximalen Geschwindigkeit des Lesers aber auch in einer sehr langsamen Geschwindigkeit bereitstellen können. Die maximale Lesegeschwindigkeit wurde durch Tetragon auf Basis der Arbeit von Hughes, Van Gemmert und Stelmach (2011) auf 5 cm/s definiert (Busse 2016).

- **Größe**

Eine wichtige Rolle für die Umsetzung eines 1:1 Modells des Braille-Ringes spielt die Größe des Aktuators. Der Aktuator sollte sich bestmöglich an die Geometrie des Ringes anpassen können, um möglichst viel Platz zu sparen. Im weiteren Sinne hat dies auch eine große ästhetische Rolle, so waren die bisherigen Aktuatoren im Prototypen von Busse (2016) so groß, dass sie über den äußeren Rand des Braille-Ringes hervor standen.

- **Wartung**

Der Braille-Ring als Ganzes soll wartungsarm sein und bleiben. Die Aktuatoren selbst tragen durch zwei Faktoren zu einem wartungsarmen System bei.

- ***Bewegte Teile***

Ziel eines Aktuators ist es, die beweglichen Teile im Inneren auf ein solches Minimum zu reduzieren, damit keine unbeabsichtigte Bewegung stattfindet. Durch Minimierung der Anzahl an beweglichen Teilen an den Aktuatoren kann somit auch die Zuverlässigkeit für einen langen Zeitraum garantiert werden. Auch der Verschleiß an den einzelnen Komponenten kann dadurch langfristig minimiert werden.

- ***Verschmutzung***

Die Verschmutzung im Inneren des Ringes spielt eine wesentliche Rolle im System des Braille-Ringes. Da eine Verschmutzung auf Dauer nicht verhindert werden kann, müssen die Aktuatoren auch trotz leichter Verschmutzung einen zuverlässigen Betrieb garantieren. Sollte die Verschmutzung die Funktion des Ringes dennoch beeinträchtigen, muss die Wartung und Säuberung des Ringes einfach sein. Größtes Ziel hierbei ist, dass die blinde Person die Wartung und Säuberung selbst vornehmen kann.

- **Lautstärke**

Idealerweise sollten die Aktuatoren im Braille-Ring lautlos agieren. Sollte es dennoch zu Geräuschen kommen gilt, es in weiteren Schritten abzuwiegen, inwiefern sie lesende Personen beeinträchtigt.

Bei den bisherigen Prototypen von Busse (2016) waren die Aktuatoren und deren Verkippung durch Berührung an den Kanten lauter als das Schreiben auf einer Tastatur.

- **Stromversorgung**

Die Aktuatoren sollten einen möglichst geringen Stromverbrauch besitzen. In einer idealen Lösung führt ein Aktuator nur dann einen Stellungswechsel aus, wenn dieser mit Spannung versorgt wird. Des Weiteren sollten die Aktuatoren mit einer geringen Spannung (Batteriebetrieb, USB) betrieben werden können.

- **Gewicht**

Das Gewicht der Aktuatoren soll so gering wie möglich gehalten werden. Ein Maximalgewicht wurde jedoch noch nicht definiert.

- **Preis/Herstellungskosten**

Als Wunschpreis für den Braille-Ring werden 1000,- Euro angesetzt, weswegen die Herstellungskosten so gering wie möglich gehalten werden sollten. Dies spielt auch eine Rolle für die Aktuatoren und dadurch verwendbaren Quader.

5 Neues Aktuator-Konzept

Im Laufe der Arbeit stellte sich heraus, dass der Aktuator nach Busse (2016) unter Berücksichtigung der Parameter aus dem Kapitel 4 eine zuverlässige Möglichkeit darstellt, dennoch wurde für den Baille-Ring ein neues Konzept erarbeitet. Dieses neue Konzept soll im Vergleich zu dem aktuell verwendeten Aktuator Verbesserungen vor allem in den Bereichen Größe, Wartung, Verschleiß und Lautstärke bringen. Hierbei hat eine zuverlässige Funktion des Aktuators die höchste Priorität.

5.1 Die Grundidee

5.1.1 Die V-Kerbe

Die Grundidee für den neuen Aktuator basiert auf einem Elektromagneten, welcher den individuellen Quader bei Bedarf in eine V-förmige Kerbe zieht und dadurch eine Rotation einleitet. Im Gegensatz zu dem bisherigen Aktuator würde sich der Quader in Laufrichtung des Braille-Ringes drehen und ein federgeführtes Element ersetzen. Im Fall, dass der Elektromagnet ausgeschaltet bleibt, würde der Quader einfach über die Kerbe gleiten und keine Drehung ausführen. Die folgende Abbildung 29 zeigt die Drehung des Quaders in eine Kerbe.

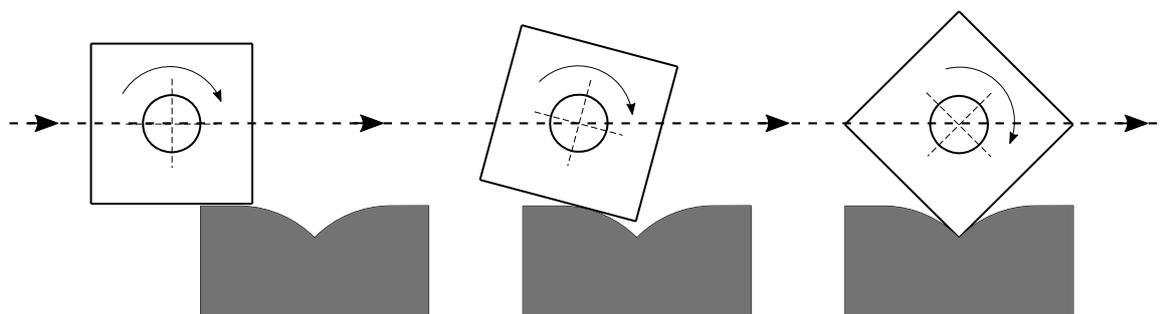


Abb. 29: Ein in die V-Kerbe gezogener Quader

Durch das Wegfallen der feder-geführten Elemente und der gefederten Aktuatoren wäre ein annähernd lautloses Drehen der Quader möglich. Zudem würden sich dadurch weniger bewegliche Teile für das Einleiten einer Drehung im Braille-Ring befinden, was sich wiederum positiv auf das Minimieren von Störfaktoren auswirkt.

Des Weiteren würde in diesem neuen Konzept kein Aktuator beziehungsweise kein Aktuatorstift mehr in die Laufbahn hineinragen und somit Störungen weiter minimieren. Einen weiteren Vorteil bringt auch, dass der Quader nur dann gedreht wird, wenn Strom induziert wird, was wiederum Strom spart. Außerdem würde die lesende Person im Falle einer Stromunterbrechung wieder den gleichen Text wie zuvor lesen und somit sofort wissen, dass keine neue Generierung der Braille-Zeichen ausgeführt wurde.

Obwohl durch die neue Idee Störungen minimiert werden, können auch neue Störungen entstehen. Die größte Gefahr ist es, dass der Quader unbeabsichtigt in die V-Kerbe gezogen

wird und somit eine ungewollte Drehung verursacht. Die gilt es für die weiteren Schritte zu vermeiden.

5.1.2 Die Idee des neuen Aktuators

Die Form des elektromagnetischen Aktuators muss so gewählt werden, dass eine möglichst große Kraft auf den Quader wirkt. Im Zuge dieser Arbeit wurden deshalb mehrere Formen getestet, welche die Drehung einleiten sollen.

Die Ursprungsidee bestand aus zwei rechteckigen, aufgestellten Seitenwänden, welche durch einen Stift in der unteren Hälfte verbunden und auf Abstand gehalten wurden. Um diesen Stift wurde ein Kupferdraht gewickelt, um dadurch einen magnetischen Fluss in den Aktuator zu induzieren. Hierbei entsteht ein magnetischer Kreis, welcher nur in der oberen Hälfte durch den Abstand der Seitenwände unterbrochen wird. Die Seitenwände wurden in der oberen Hälfte nach innen verjüngt und abgeflacht. Diese Verjüngung nach innen war angedacht, um genügend Wicklungen auf den Verbindungsstift zu bringen aber dennoch den Aktuator unter der Laufbahn eines einzelnen Quaderelements zu positionieren. In der folgenden Abbildung 30 wird eine schematische Seiten- und Frontansicht dargestellt.

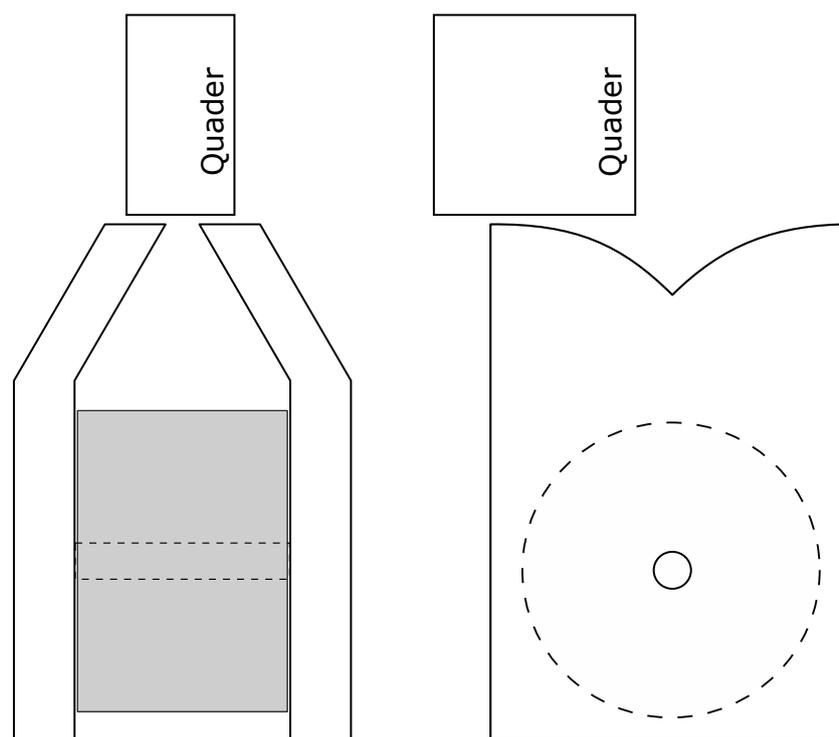


Abb. 30: Schema eines Aktuators und einem Quader als Größenrelation; Links: Seitenansicht des neuen Aktuators; Rechts: Frontansicht des neuen Aktuators;

Obwohl sich die Form der Aktuatoren für die verschiedenen Prototypen ständig veränderte, blieb sie dieser Ursprungsform dennoch sehr ähnlich.

5.2 Machbarkeit

Bevor man diese Idee weiter verfolgte, wurde dieses Prinzip der Kerbe und magnetischen Anziehung auf die Quader-Elemente in einem einfachen Versuchsaufbau getestet. Des Weiteren wurde mittels einer externen Machbarkeitsstudie geprüft, ob die notwendigen Kräfte mit einem Elektromagneten erreicht werden können.

5.2.1 Die magnetische Verkippung

Ataie (2018) führte Versuche zur Verkippung von Quadern mittels Permanentmagneten im Zuge seiner Projektarbeit bei Tetragon durch. Im Zuge dessen wurde im 3D-Druck eine Schiene mit Ausschnitten angefertigt, welche Platz für eine Drehung ermöglichten. Die Abmessungen dieser Ausschnitte betragen 3,5mm in der Breite und 5mm in der Länge. Die für die Versuche verwendete Schiene ist in der folgenden Abbildung 31 dargestellt.



Abb. 31: Schiene zur Untersuchung des Kippmechanismus (Ataie 2018)

In diesem Ausschnitt wurde ein Eisenkern gegeben, der mittels darunter liegenden Permanentmagneten magnetisiert wurde. Die Stärke des Magnetfeldes wurde durch den Abstand des Permanentmagneten unter dem Eisenkern reguliert. In der folgenden Abbildung 32 ist dieser Versuchsaufbau von Ataie (2018) dargestellt.

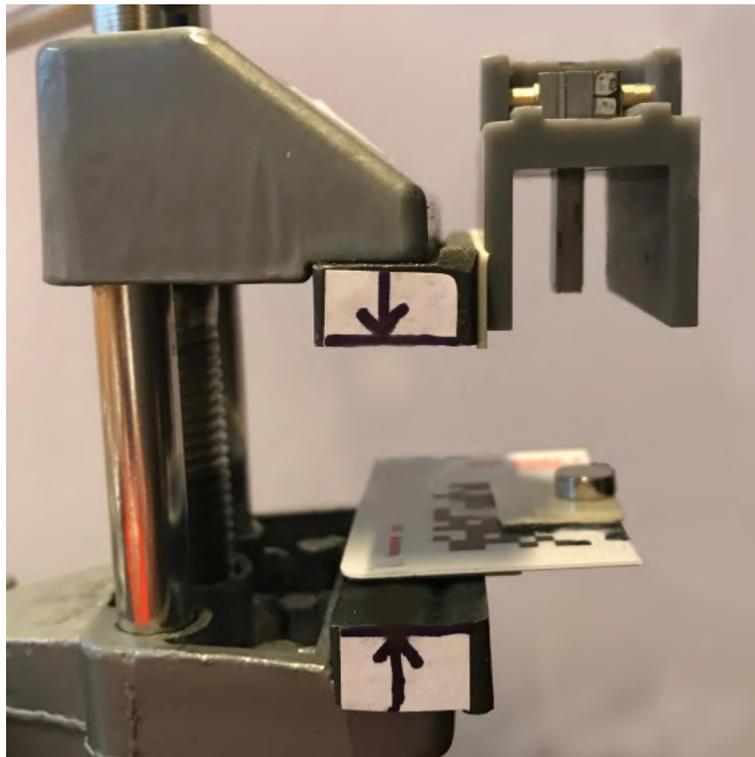


Abb. 32: Versuchsaufbau für die Testung der Verkippung des Quaders mittels Permanentmagneten (Ataie 2018)

Im weiteren Schritt wurde ein auf einer Achse gelagerter magnetisierbarer Quader mittels eines Führungsschlittens auf der Schiene über den magnetisierten Eisenkern gezogen. Hier zeigte sich, dass dann, wenn die magnetische Kraft groß genug war, sich der Quader wie gewünscht drehte (Ataie 2018).

Wurden alle drei Quader auf der Achse positioniert, zeigte sich, dass der Eisenkern ein groß gestreutes Magnetfeld besitzt, das auch umliegende Quader in eine Rotation versetzte, wenn diese durch einen Ausschnitt in der Schiene die Möglichkeiten dazu hatten (Ataie 2018).

Zusammengefasst zeigt die Arbeit von Ataie (2018), dass das Einleiten einer Rotation durch eine magnetische Kraft funktioniert. Es gilt jedoch den magnetisierten Kern so zu konstruieren und die Magnetisierung so zu regulieren, dass benachbarte Quader nicht beeinflusst wurden.

5.2.2 Die notwendige Kraft

In einem einfachen Versuchsaufbau wurde mithilfe einer Balkenwaage die Kraft gemessen, die notwendig ist, damit sich der Quader auf der Achse dreht. Dazu wurde ein starrer Draht, welcher an einer sehr leichten Balkenwaage befestigt war, exakt über der Kante eines auf einer Achse gelagerten Quaders positioniert. In der folgenden Abbildung 33 ist dieser Versuchsaufbau dargestellt.



Abb. 33: Eine einfache Balkenwaage mit einem starren Draht als Verlängerung

Der starre Draht liegt nun auf der Kante der Quader auf, ohne eine Drehung zu initiieren. Nun wurde das Gewicht auf der einen Seite des Balkens solange erhöht bis eine Drehung des Quaders erfolgt ist. Dies wird in der folgenden Abbildung 34 gezeigt.



Abb. 34: Drehung des Quaders bei genügend Gegengewicht

Die Kraft auf die Kante des Quaders wurde mittels Gewichtskraft der Beilagscheiben erzeugt. Die resultierende Kraft an der Spitze des Drahtes wurde dann in weiterer Folge durch das Momentengleichgewicht berechnet.

In diesem Aufbau ergab sich ein Grenzwert zur Einleitung der Drehung bei 8mN. Ein sicheres Drehen des Quaders wurde jedoch erst bei einer Kraft von 15mN beobachtet. Für weitere Schritte wurden aufgrund dieses Ergebnisses nur mehr die 15mN herangezogen

Der Quader selbst besitzt von der Kante, an welcher der Draht ansetzte, bis zur Mitte der Achse, an welcher der Quader angebracht war, einen Hebelarm von circa 2,8mm. Daraus ergibt sich das notwendige Drehmoment des Quaders bei 42mN*mm.

5.3 Externe Machbarkeitsstudie

Obwohl die ersten Versuche mittels Permanentmagneten gute Erfolge erzielten, kann ein solcher in einem neuen Aktuatortyp nicht verwendet werden. Um also die Drehung der Quader selbst bestimmen zu können, wurde der Permanentmagnet durch einen Elektromagnet ersetzt.

Vor Beginn der Versuche wurde auf die Expertise von Pinter (2019) vertraut, welcher mittels Simulationen von Elektromagneten eine Abschätzung der Machbarkeit dieses Projektes geben sollte. Dabei simulierte er anhand des Programms „FEMM“ die neu geplanten Aktuatoren. In dieser Simulation wird die Wechselwirkung zwischen dem Quader und dem Aktuator beschrieben und mittels Kraft (N) ausgegeben. Eine solche Simulation ist in Abbildung 35 ersichtlich. Die Flussdichte B wird in Tesla (T) mittels Farbstufen dargestellt.

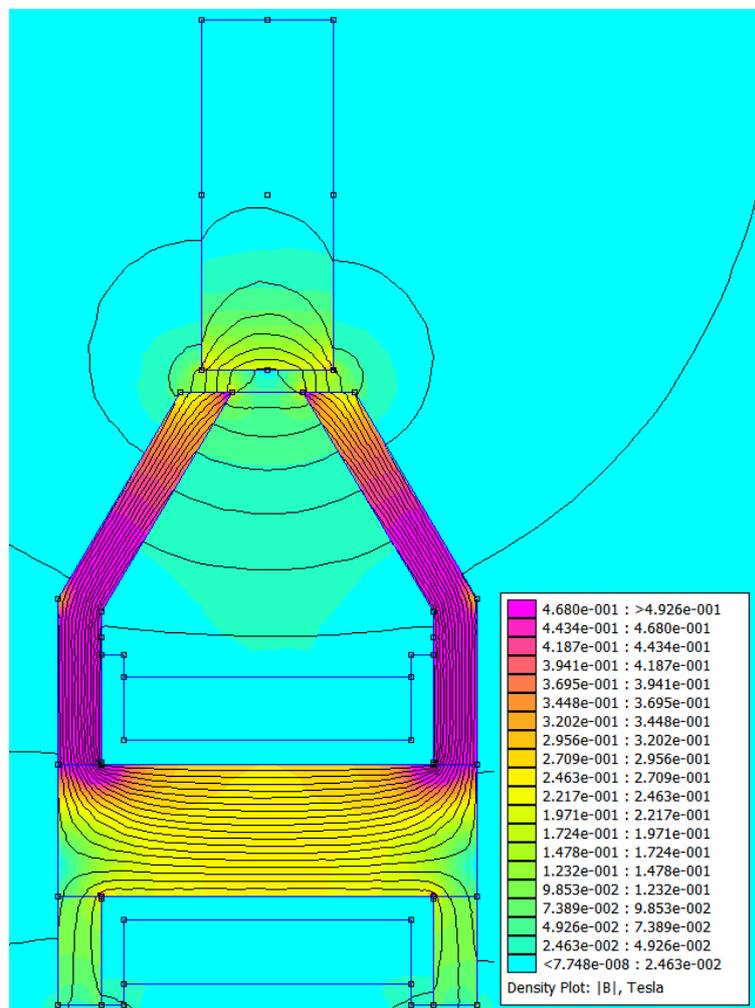


Abb. 35: Simulation des Prototypen-Aktuators (Pinter 2019)

Aufgrund der zweidimensionalen Einschränkung durch „FEMM“ wurde die Tiefe des Objektes mit 4mm angesetzt. Dies entspricht der halben Länge des im Versuchsaufbau verwendeten Quaders (Pinter 2019).

5.4 Die verschiedenen Faktoren

Durch Pinter (2019) wurde der geplante Prototyp-Aktuator (Abbildung 30) untersucht. Zuerst wurde die Wirkung unterschiedlicher Kupferdrahtstärken bei einer Spannung von 5V simuliert. In der folgenden Tabelle werden bei unterschiedlichen Drahtstärken die daraus folgende Wechselwirkungskraft in $[mN]$ und die Stromstärke in $[A]$ angegeben. Die Spulengröße wurde bei einer Länge von 6,5mm mit einem Außendurchmesser von 7mm und einem Innendurchmesser von 4.1mm angesetzt.

Tab. 1: Verschiedene Drahtstärken und deren Auswirkung auf die ausübende Kraft bei einer fixen Spannung von 5V (Pinter 2019).

Drahtstärke [mm]	Spannung [V]	Drahtlänge [m]	Widerstand [Ω]	Stromstärke [A]	Kraft [mN]
0.08	5.0	20.0	68.0	0.07	28
0.10	5.0	11.7	25.0	0.20	82
0.16	5.0	4.60	3.9	1.28	444

In dieser Simulation kann also selbst mit dem dünnsten Kupferdraht und der daraus resultierenden geringen Stromstärke die notwendige Kraft für eine Drehung aufgebracht werden. Bei einer Drahtstärke von 0,1mm kann rechnerisch das 5,4-fache und bei einer Drahtstärke von 0,16mm sogar das 29,6-fache der notwendigen Kraft erreicht werden (Pinter 2019).

Im weiteren Verlauf wurde die Spule mit der Drahtstärke von 0,1mm statt einer fixierten Spannung mit einer fixen Stromstärke von 1A und 3A simuliert. Diese großen Ströme sollten zeigen, ob sich die Seitenflanken in dem Bereich der magnetischen Sättigung befinden. Es zeigte sich, dass schon bei 1A die magnetische Sättigung erreicht wurde und bei einer Stromstärke darüber große Verluste hingenommen werden müssen. Diese Verluste bedeuten, dass keine Verstärkung des Magnetfeldes durch den Kern mehr stattfindet und sich der Wirkungsgrad des Aktuators rapide verschlechtert (Pinter 2019).

5.5 Alternative Formen

Im Vergleich zu dem von uns geplanten Prototypen wurden auch einfachere Elektromagnetformen simuliert. Unter diesen befanden sich ein Stab- und ein U- Form-Aktuator (Pinter 2019). Beide Aktuatorformen und deren Positionierung zu einem Quader sind in Abbildung 36 und 37 dargestellt .

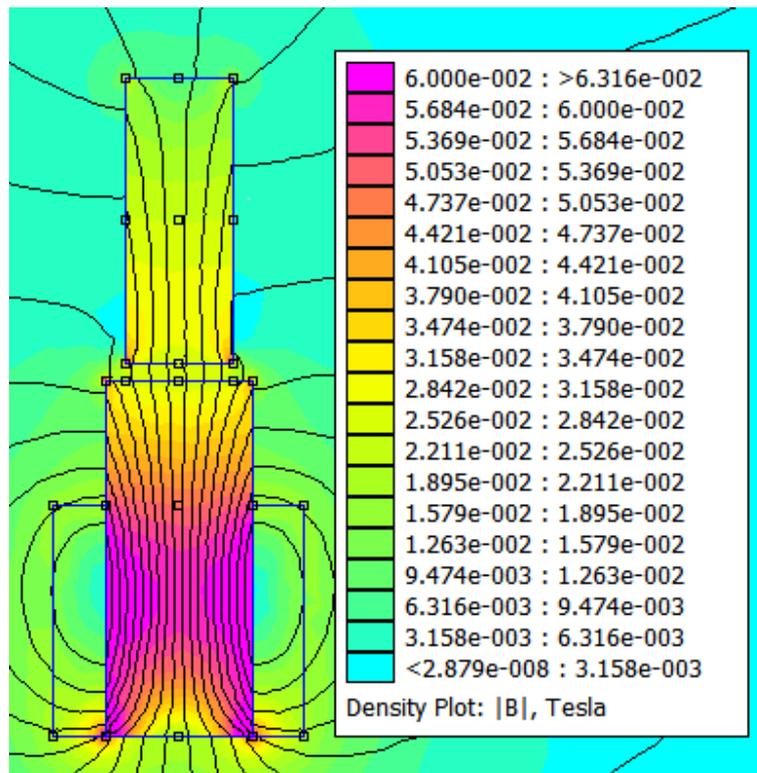


Abb. 36: Einfachere elektromagnetische Formen Pinter 2019

Der Stabelektromagnet zeigte in den Simulationen nur sehr schlechte Wechselwirkungskräfte, welche jedoch für das Einleiten der Rotation notwendig sind. Aus diesem Grund wurde dieser Ansatz trotz einfacher Umsetzung und einfacher Fertigung nicht weiterverfolgt (36).

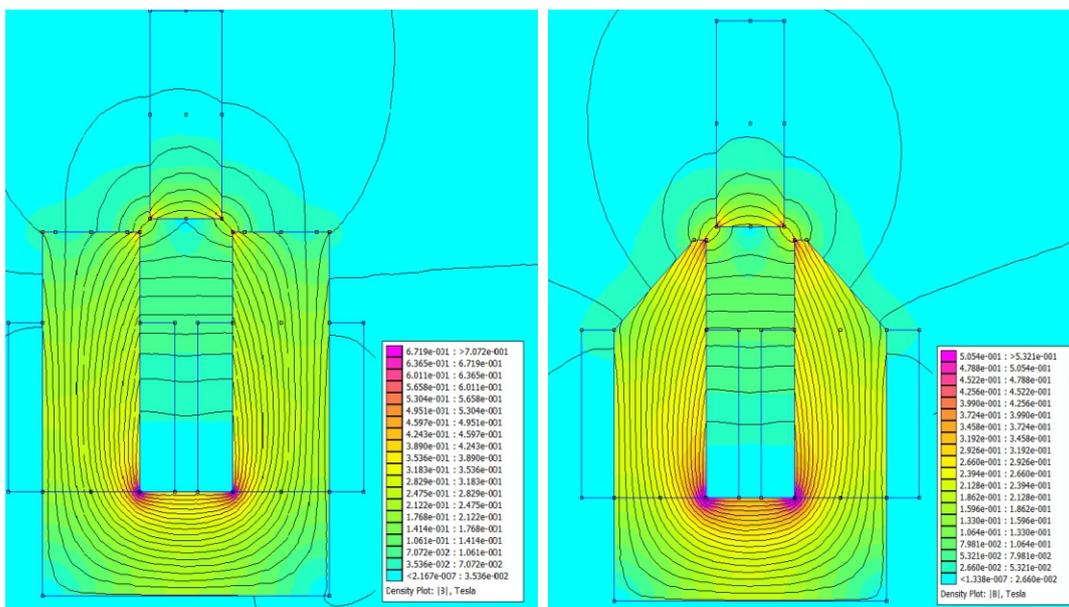


Abb. 37: Links: Simulation eines U-Form Elektromagneten; Rechts: U- Form- Elektromagnet mit abgeschrägten Endkappen (Pinter 2019)

Die U-Form zeigte in den Simulationen sehr gute Ergebnisse. Hier waren die Wechselwirkungskräfte sogar höher als in unserem speziell geformten Aktuator. Die Größe des U-Form-Aktuators ist jedoch um ein Vielfaches zu groß und die Endkappen würden bereits in die Spur des nächsten Quaders reichen. Zudem wurden in diesem Modell die Wicklungen auch jeweils an den Seitenwänden angebracht, was diesen Aktuator im Gesamten nochmals breiter machte. Um zumindest die Breite im oberen Bereich der Spurlaufbahn der Quader zu verringern, wurden die Endkappen abgeschrägt (Abbildung 37, rechts). Dies hatte keine Auswirkung auf die Wechselwirkungskräfte, jedoch bleibt der Aktuator in seiner gesamten Form zu breit und es würden keine neun Aktuatoren im Braille-Ring Platz finden (Pinter 2019).

5.6 Änderungen am Quader

Ein anderer Ansatz von Pinter (2019) war die Verwendung von magnetisierbarem Material nur an den Ecken des Quaders. Hierzu wurde, wie in Abbildung 38 ersichtlich, nur ein kleines magnetisierbares Objekt (Stift) über dem Aktuator simuliert. Dieses sollte einen Stift mit 1mm Durchmesser in den Ecken der Quader darstellen (Pinter 2019).

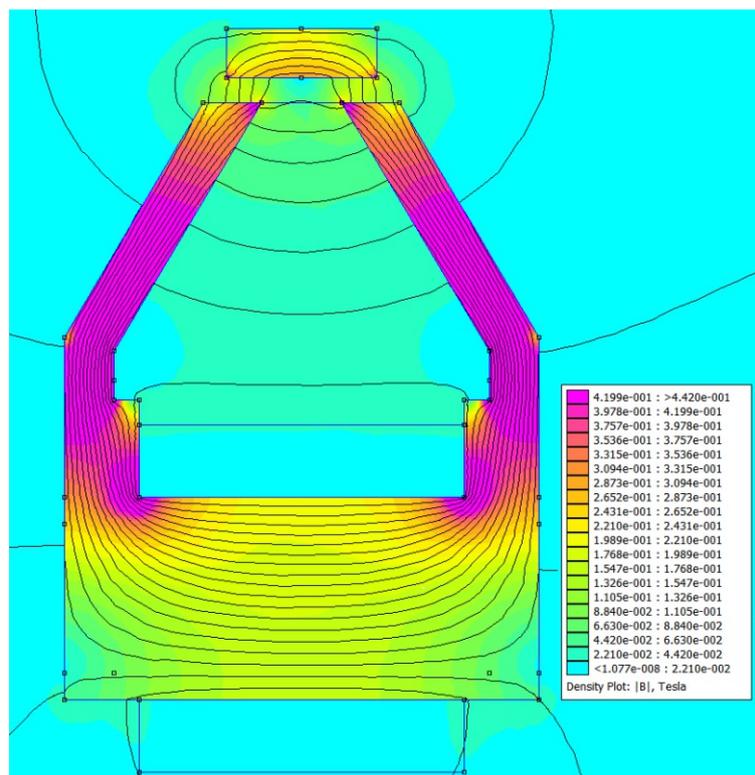


Abb. 38: Simulation mit einem Eckstift anstelle eines ganzen Quaders (Pinter 2019)

Bei einer Simulation mit einer Drahtstärke von 0,1mm und einer Stromstärke von 0,2A wurde eine ausübende Kraft von 21mN berechnet (Pinter 2019).

In der folgenden Abbildung 39 ist der Ansatz eines Quaders mit Eckstiften abgebildet.

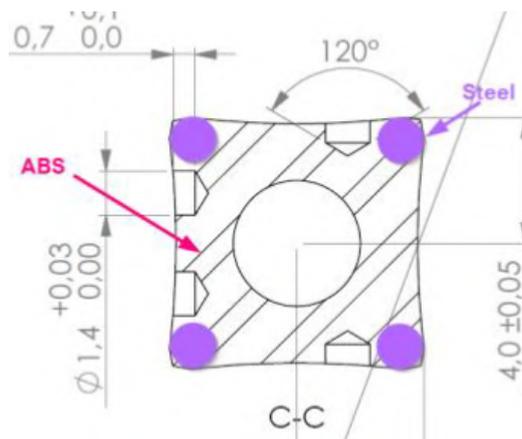


Abb. 39: Skizze eines Quaders mit Stiften in den Ecken (Pinter 2019)

5.7 Schlussfolgerung Austrian Audio

Aus den ersten Ergebnissen der Simulationen durch „Austrian Audio“ und dem Simulationsprogramm „FEMM“ wurde die Machbarkeit des neuen Aktuators validiert. So wurden selbst für eine geringe Stromstärke die notwendigen Kräfte berechnet (Tabelle 1) (Pinter 2019).

Zudem stellte sich heraus, dass alternative Formen nicht weiterverfolgt werden sollten. Der einfache Stab-Elektromagnet erreichte nicht die gewünschten Wechselwirkungskräfte und die U-Form ist mit ihren doppelten Spulen aus platztechnischen Gründen nicht einsatzfähig. Aus diesem Grund wurde für die weiteren Schritte der Fokus speziell auf die für den Ring angepassten Aktuatoren gelegt.

Die Idee, nur die Ecken des Quaders aus einem magnetisierbaren Material herzustellen, zeigte einen weitreichenden Optimierungspunkt. Die Eckstifte erreichten mittels Simulation genügend Angriffsfläche für den Aktuator und sind in der Fertigung erheblich günstiger als Vollmetallquader (Pinter 2019).

Das Machbarkeitskonzept des Simulationsprogrammes „FEMM“ zeigt sehr gute Ergebnisse, dennoch müssen zunächst Versuche in einem Versuchsaufbau gemacht werden, um eine tatsächliche Machbarkeit unter realen Bedingungen zu validieren.

Der Report zur Machbarkeit von Pinter (2019) liegt im Anhang B bei.

6 Der Versuchaufbau

In den folgenden Punkten wird auf die Fertigung des Aktuators, der Quader und der Kuppel für den Versuchsaufbau eingegangen.

6.1 Aktuatoraufbau

Der Aktuator besteht, wie bereits in Kapitel 5.1.2 beschrieben, aus zwei parallelen Seitenwänden, welche durch einen Stift in der unteren Hälfte verbunden und auf Abstand gehalten werden. Auf diesen Verbindungsstift wird der Spulendraht aufgewickelt.

6.2 Fertigung Aktuator

Die ersten Aktuatorseitenwände wurden aufgrund der Größe des Aktuators im oberen Bereich nach innen verjüngt, um die Seitenbleche in die Spurbreite eines einzelnen Quaderelementes zu bekommen. Anfangs wurde bewusst ein großer Abstand zwischen den Seitenblechen gewählt, um möglichst viele Spulenwicklungen auf dem Aktuator unterzubringen. Ein solcher Aktuator wird in folgender Abbildung 40 als CAD-Modell dargestellt.

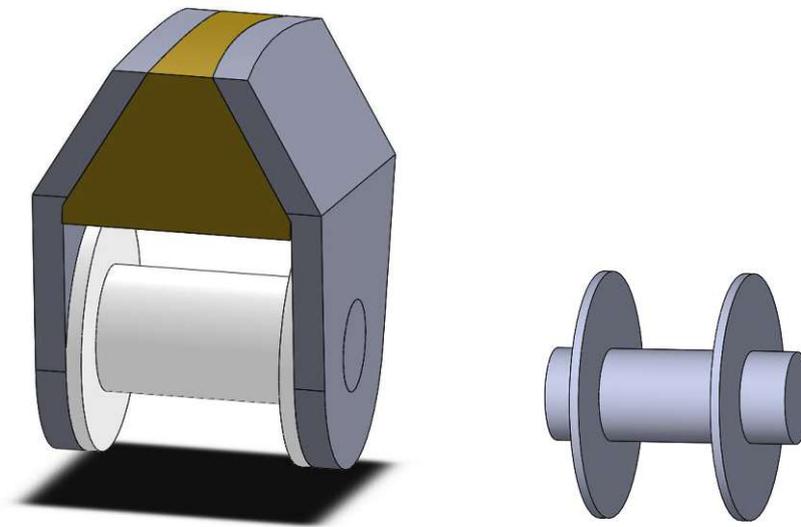


Abb. 40: Links: CAD-Modell eines Aktuators mit nach innen verjüngten Seitenwänden und ohne Kerbe; Rechts: CAD-Modell eines Spulenkerns mit Verbindungsstift

Für die ersten Versuche wurden Wicklungen auf einen Wicklungsstift aufgetragen, der den gleichen Durchmesser wie der Verbindungsstift hat. Auf diesen Wicklungsstift wurde zuvor eine Lage Papier gelegt. Nach dem Auftragen der Wicklungen wurde ein Kleber auf die Spule aufgetragen um die weitere Verarbeitung zu vereinfachen. Nach dem Aushärten des Klebers konnte nun die Spule samt Papier vom Stift herabgezogen und auf den eigentlichen Verbindungsstift geschoben werden.

Im späteren Verlauf der Versuche wurden die Spulenwicklungen direkt auf einen adaptierten Spulenkern aufgebracht. Dieser wurde dann gleichzeitig als Verbindungsstift genutzt. Ein solcher Stift ist in der obigen Abbildung 40 als CAD-Modell dargestellt.

Als erste Adaptierung des Aktuators wurde angedacht die Bleche nicht mehr zu verjüngen, sondern zu fräsen und im oberen Bereich einen Steg nach innen stehen zu lassen. Dies sollte eine einfachere Fertigung der Seitenbleche ermöglichen. Diese Bauweise fordert jedoch eine geringe Gesamtbreite, damit der Aktuator in die Spur der Quaderelemente passt. Nach weiteren Überlegungen und noch vor Fertigung eines Prototypen wurde die Idee dieses Seitenbleches mit ausgefrästen Stegen verworfen. Stattdessen wurde der Verbindungsstift noch weiter gekürzt und die Seitenwände geradlinig belassen. Durch die daraus folgende geringe Breite eines solchen Aktuators ist die Spulengröße stark begrenzt, die Fertigung jedoch um ein Vielfaches einfacher. In der folgenden Abbildung 41 ist ein geplantes Seitenblech mit Steg links und ein einfacher, zusammengefügter Aktuator mit geradlinigen Seitenblechen ohne Kerbe rechts dargestellt.

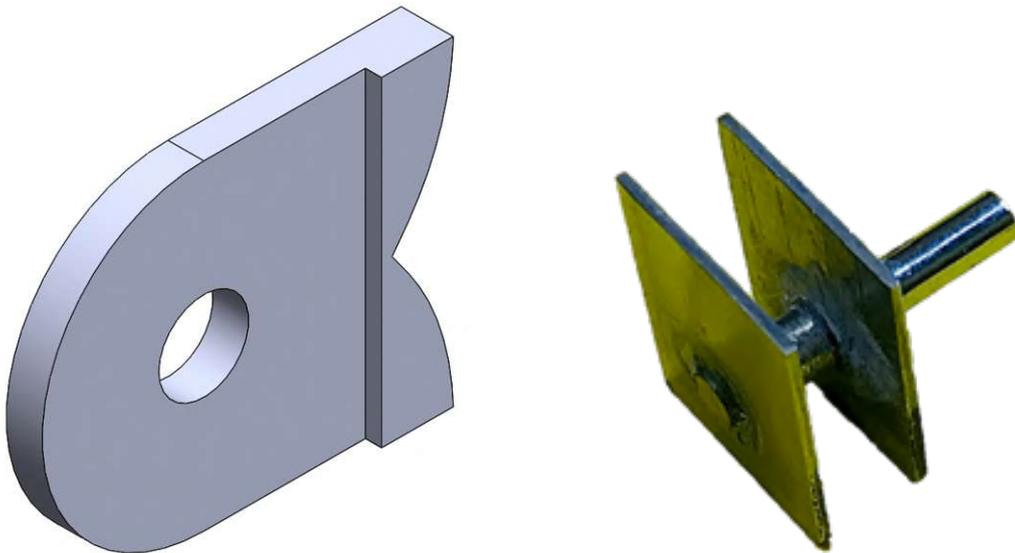


Abb. 41: Links: Zeichnung einer Seitenflanke mit Steg in der oberen Hälfte; Rechts: Aktuator mit geradlinigen Seitenflächen ohne Kerbe

Ein Vorteil des Aktuators mit geradlinigen Seitenblechen ist, dass die Spulenwicklungen direkt auf den fertig zusammengesetzten Aktuator aufgewickelt werden können. Dadurch ist kein speziell geformter Verbindungsstift mehr notwendig, was die Fertigung wesentlich vereinfacht.

Für die Seitenwände in unseren Versuchen wurde immer ein handelsübliches Elektroblech herangezogen. Elektrobleche weisen sehr gute elektromagnetische Eigenschaften auf und zeigten in unseren Versuchen eine geringe Remanenz (zurückbleibender Magnetismus). Eine genaue Materialauswahl für die Aktuatoren wurde nicht getroffen.

Um eine magnetische Sättigung der Seitenwände zu vermeiden, wurden Seitenwände von einer Dicke von 1mm zur weiteren Verarbeitung herangezogen. Die Blechstärke wurde später auf 0,5mm reduziert, da wir sowohl in der Simulation als auch in den Versuchen keine Sättigung des Materials erreichen konnten.

6.3 Wicklung der Spule

Die Anzahl der Wicklungen bestimmt zu einem großen Anteil die Stärke eines Aktuators. Aus diesem Grund ist es wichtig zu wissen, wie viele Wicklungen auf dem dafür vorgesehenen Füllbereich Platz finden. Als erste Einschätzung kann folgende Formel 20 verwendet werden:

$$N = \frac{h \cdot b}{d^2} \quad (20)$$

h gibt hierbei die Höhe und b die Breite des für die Wicklung zur Verfügung stehenden Raumes an. Der Drahtdurchmesser wird durch d beschrieben. Andere Formeln können eine genauere Prognose ermöglichen. Für die Erstellung eines Prototypen gibt es aber zu große Ungenauigkeiten, weshalb eine grobe Prognose der Wicklungszahl ausreicht.

Um die Wicklungen entweder auf den Verbindungsstift oder direkt auf den Aktuator zu bringen wurde zu Beginn der Versuche ein Elektro-Gummibandwickler verwendet. Solche Wickler kommen üblicherweise im Modellbaubereich zum Einsatz.

Im Verlauf des Projektes wurde ein Spulenwicklungsgerät angeschafft, um die Wicklungen schneller aufzubringen und den vorhandenen Raum zwischen den Seitenblechen besser auszufüllen. Dies ermöglichte auch sehr feine Kupferdrähte mit einem Durchmesser von 0,1mm und 0,08mm in kurzer Zeit auf den Verbindungsstift aufzuwickeln. In der Abbildung 42 ist der Wickelvorgang auf einen Verbindungsstift und ein vorläufiger Aktuator ohne Kerbe, auf dem der Wicklungsvorgang direkt ausgeführt werden konnte, dargestellt.

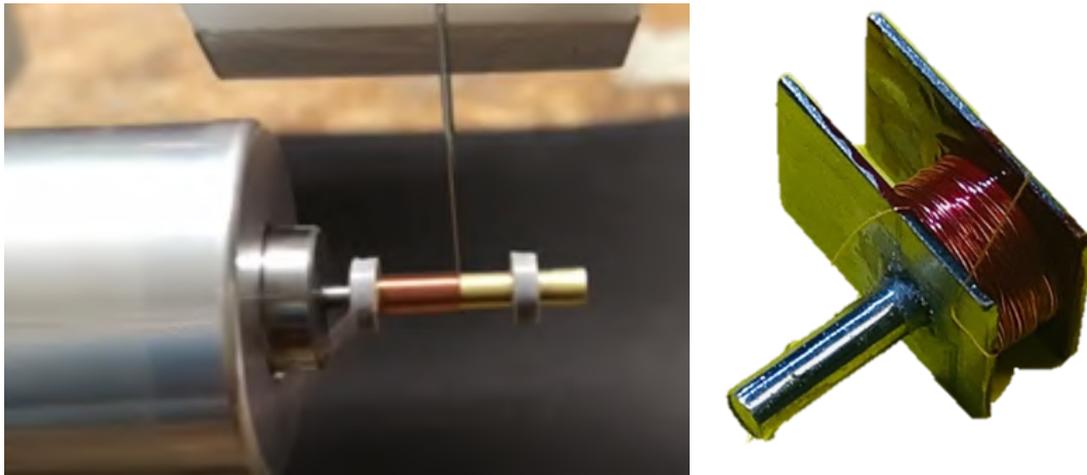


Abb. 42: Links: Wickelvorgang auf einen Verbindungsstift; Rechts: Ein Aktuator ohne Kerbe auf den die Wicklungen aufgetragen wurden.

Sobald die Wicklungen aufgetragen und im Falle von verjüngten Seitenwänden alles zusammengesetzt war, wurde ein Stiftstecker mit 2 Polen mittels eines Zwei-Komponenten-Epoxidharzklebers von UHU an die Unterseite des Aktuators befestigt. Anschließend wurde je ein Drahtende an einen Stiftstecker gelötet. Diese Anordnung wird in Abbildung 43 dargestellt.

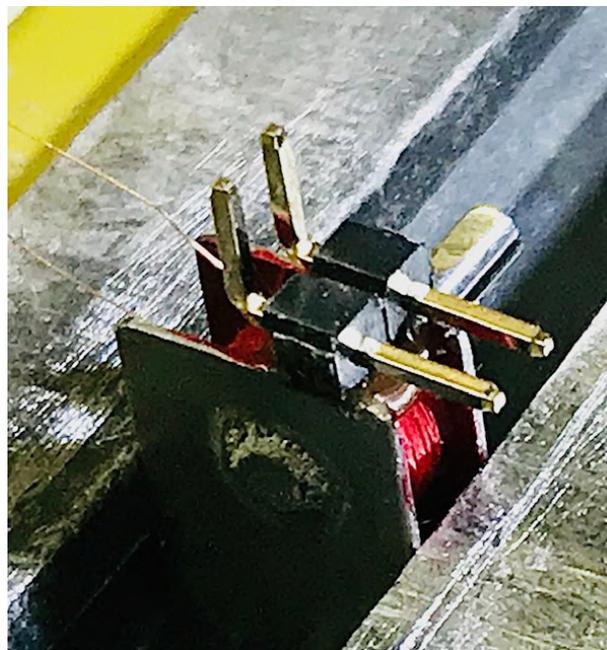


Abb. 43: Zweipoliger Stiftstecker verklebt an der Unterseite des Aktuators.

6.4 Quader

Die Quader sind neben dem Aktuator die wichtigste Komponente für den Kippmechanismus. In den Versuchen wurden die Kunststoffquader mittels SLA 3D-Drucker gedruckt

und die Vollmetallquader mittels CNC-Technik gefertigt. Die Braille-Punkte wurden sowohl in den Kunststoffquadern als auch in den Metallquadern für die Versuche weggelassen.

6.4.1 Kunststoff

Quader aus Kunststoff werden durch einen Elektromagneten nicht angezogen, weswegen diese durch Materialien mit magnetischen Eigenschaften ergänzt werden müssen. Hierzu werden Rundstifte mit einer Länge von 3mm und einem Durchmesser von 1mm in den Ecken der Quader eingesetzt. Die Ecken wurden entsprechend angepasst, um die Rundstifte als Presspassung darin zu positionieren. Als Alternative wurden quadratische Stifte mit einer Seitenlänge von 1mm mal 1mm verwendet und in die Ecken eingeklebt. In der Abbildung 44 sind Quader mit runden und mit quadratischen Stiften in den Ecken abgebildet.



Abb. 44: Links: Quader mit einem Rundstift in den Ecken; Rechts: Quader mit quadratischen Stiften in den Ecken.

Die Fertigung dieser wurde durch einen eigenen SLA 3D-Drucker ermöglicht. Dies bringt den Vorteil, dass Quader für individuelle Versuchsaufbauten einfach und schnell neu gestaltet werden können.

Ein Nachteil des 3D-Druckens ist, dass die Oberfläche nicht glatt und gleichmäßig ist und an vielen Kanten ein Grat vorhanden ist, weswegen jeder Quader nach dem Drucken nachbearbeitet werden muss. Zudem muss für jeden Quader das Loch der Achsenaufhängung individuell nachgebohrt werden, um die gewünschte Reibung zwischen Quader und Achse zu erreichen.

6.4.2 Metall

Im Gegensatz zu den Kunststoffquadern sind die Vollmetallquader bereits magnetisierbar und es müssen keine zusätzlichen Materialien ergänzt werden. Die Metallquader weisen im Gegensatz zu den Kunststoffquadern eine hohe Präzision auf und müssen für die Versuche

nicht nachbearbeitet werden.

Die verwendeten Vollmetallquader wurden durch einen Zulieferer mittels CNC-Fräse einzeln hergestellt. Diese Art der Produktion führt dazu, dass die Herstellungskosten eines einzelnen Quaders verhältnismäßig hoch sind. In der folgenden Abbildung 45 ist ein Vollmetallquader abgebildet.



Abb. 45: Vollmetallquader

6.5 Kuppel

Die "Kuppel" dient dem Quader als Führungsschiene. Sie wurde mittels SLA-3D-Drucker gefertigt und für die unterschiedlichen Aktuatortypen angepasst. Die individuellen Kuppeln wurden dann auf einem Prüfstand befestigt und konnten mit den unterschiedlichen Quadern und Aktuatoren getestet werden.

In der folgenden Abbildung 46 ist eine 3D-Druck-Kuppel dargestellt, welche für einen Versuchsaufbau gedruckt wurde.



Abb. 46: 3D-Druck-Kuppel

Für unsere Versuche unterscheiden wir zwischen zwei grundlegenden Kuppeltypen: Jene mit und jene ohne Führung. In den folgenden zwei Punkten wird näher auf diese eingegangen.

6.5.1 Kuppel ohne Führung

Bei dieser Variante werden die Abstände der Quader auf der Achse mittels Beilagscheiben fixiert. Die Quader werden dadurch auf der Achse auf Distanz gehalten. In der Abbildung 47 ist dies als Querschnitt durch Kuppel und Quader schematisch dargestellt.

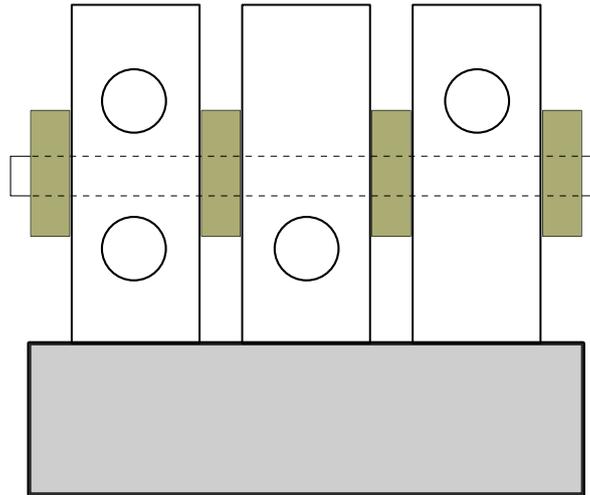


Abb. 47: Kuppel ohne Führung (weiß: Quader, grau: Kuppel, gold: Beilagscheiben)

6.5.2 Kuppel mit Führung

Bei der Variante mit Führung wurde ein Steg zwischen den einzelnen Quadern auf die Kuppel gedruckt. Die Quader werden auf der Achse nicht mehr auf Position gehalten, sondern können sich in der Spur der Kuppel frei bewegen. Die Kuppel mit Führungsstegen ist in Abbildung 48 dargestellt.

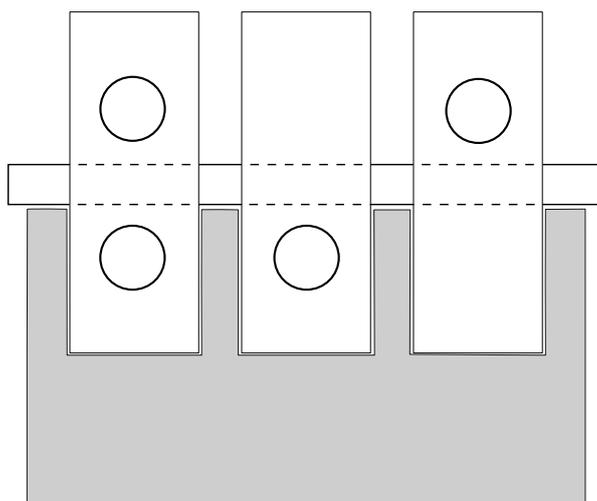


Abb. 48: Kuppel mit Führung (weiß: Quader, grau: Kuppel)

Die freie Bewegung nach links oder rechts in Laufrichtung wird durch die Spurbreite der Kuppel vorgegeben. Hierbei darf die Spurbreite nicht zu klein oder zu groß sein, da diese das Verkappen des Quaders stark beeinflussen kann. Die Spurbreite muss so schmal wie möglich sein, damit der Quader auf seiner Achsenposition bleibt. Ist sie allerdings zu schmal, beeinflusst dies die Verkappung und das Rollverhalten des gesamten Braille-Ringes aufgrund der zu großen Reibung zwischen dem Steg und den Quadern.

In der Entwicklung dieser Kuppeltypen wurden Schlitten zur Ermittlung der gewünschten Spurbreite mittels 3D-Drucker gedruckt. Diese Schlitten bestehen jeweils aus fünf Spurrinnen mit unterschiedlichen Spurbreiten. In Abbildung 49 sind drei solcher Schlitten abgebildet.



Abb. 49: Schlitten zur Spurbreitenermittlung

Die Spurbreiten wurden beginnend bei 3,01mm in 0,01mm-Schritten bis 3,15mm festgelegt. Der Quader mit einer Breite von 3,00mm wurde per Hand durch jede Spurrinne gezogen, so konnte eine ideale Spurbreite von 3,10mm ermittelt werden.

6.6 Versuchsaufbau

Für den Testaufbau wurden Aktuator, Quader und Kuppel auf einem eigens gefertigten Versuchsaufbau zusammengesetzt. Zunächst wurden die Aktuatoren auf ihre Funktion geprüft indem sie an eine Spannungsversorgung mit 5V angeschlossen wurden und die Wechselwirkung mit einem Metallquader überprüft wurde. Zudem wurde die Spule auf einen Kurzschluss in den Wicklungen untersucht um einen Spulendefekt auszuschließen. Nachdem eine Wechselwirkung zwischen Aktuator und Quader stattgefunden hat und ein Kurzschluss der Wicklungen auf der Spule ausgeschlossen werden konnte, galt der Funktionstest als bestanden. Der Aktuator wurde daraufhin in die passende Kuppel gesetzt und die Unterseite mit Sicherungslack angeklebt. Der Sicherungslack diente dazu, dass der Aktuator in der Kuppel nicht verrutscht aber dennoch jederzeit wieder leicht herausgenommen werden konnte.

Nach dem Einsetzen der Aktuatoren in die Kuppel wurde die Kuppel auf den Versuchsaufbau geschraubt und unter die Achsen der Quaderhalterungen geschoben. Die Kuppel kann im Testaufbau quer zur Laufrichtung der Quader verschoben werden. Durch diese Verschiebung kann die Spurlaufbahn jederzeit an die Quaderlaufbahn angepasst, aber auch ein Kuppeltausch bei montierten Quadern durchgeführt werden.

Am Ende wurden die Quader auf die Achsen des Versuchsaufbaus geschoben. Die Achsen selbst sind radial auf einer eigens gefertigten Aufhängung befestigt. Diese Aufhängung ermöglicht eine Elementverschiebung und einen individuell einstellbaren Radius. Durch den veränderbaren Radius kann der relative Abstand zwischen unterschiedlichen Kuppeln und Quadern für jeden Versuch eingestellt werden.

Die Aufhängung selbst kann entweder per Hand gedreht oder für einen Langzeitversuch mittels Schrittmotor angetrieben werden. In der folgenden Abbildung 50 sind zwei Versuchsaufbauten dargestellt.

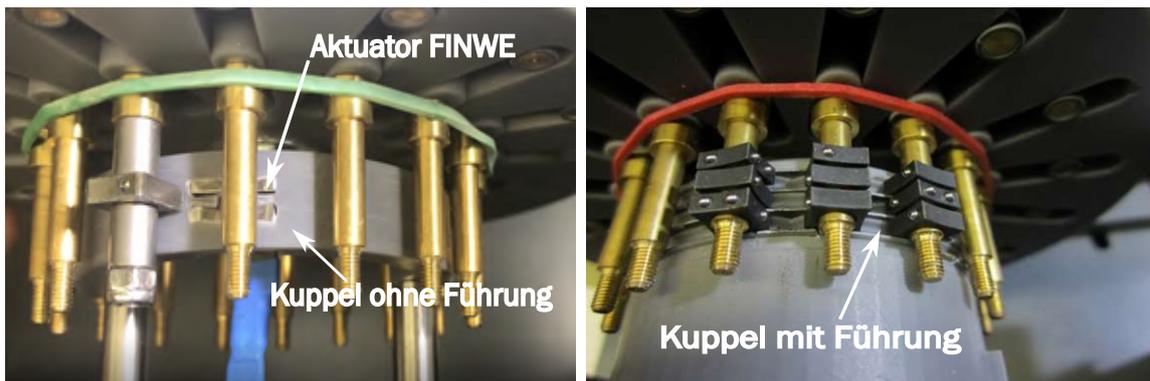


Abb. 50: Versuchsaufbau: Links: Kuppel ohne Führung; Rechts: Kuppel mit Führung

In der folgenden Abbildung 51 ist der Drehvorgang des Quaders in Laufrichtung nach rechts in vier Sequenzen dargestellt. In diesem Testaufbau wurde eine Kuppel mit Führungselementen verwendet, weshalb die Unterseite des Quaders verdeckt ist.

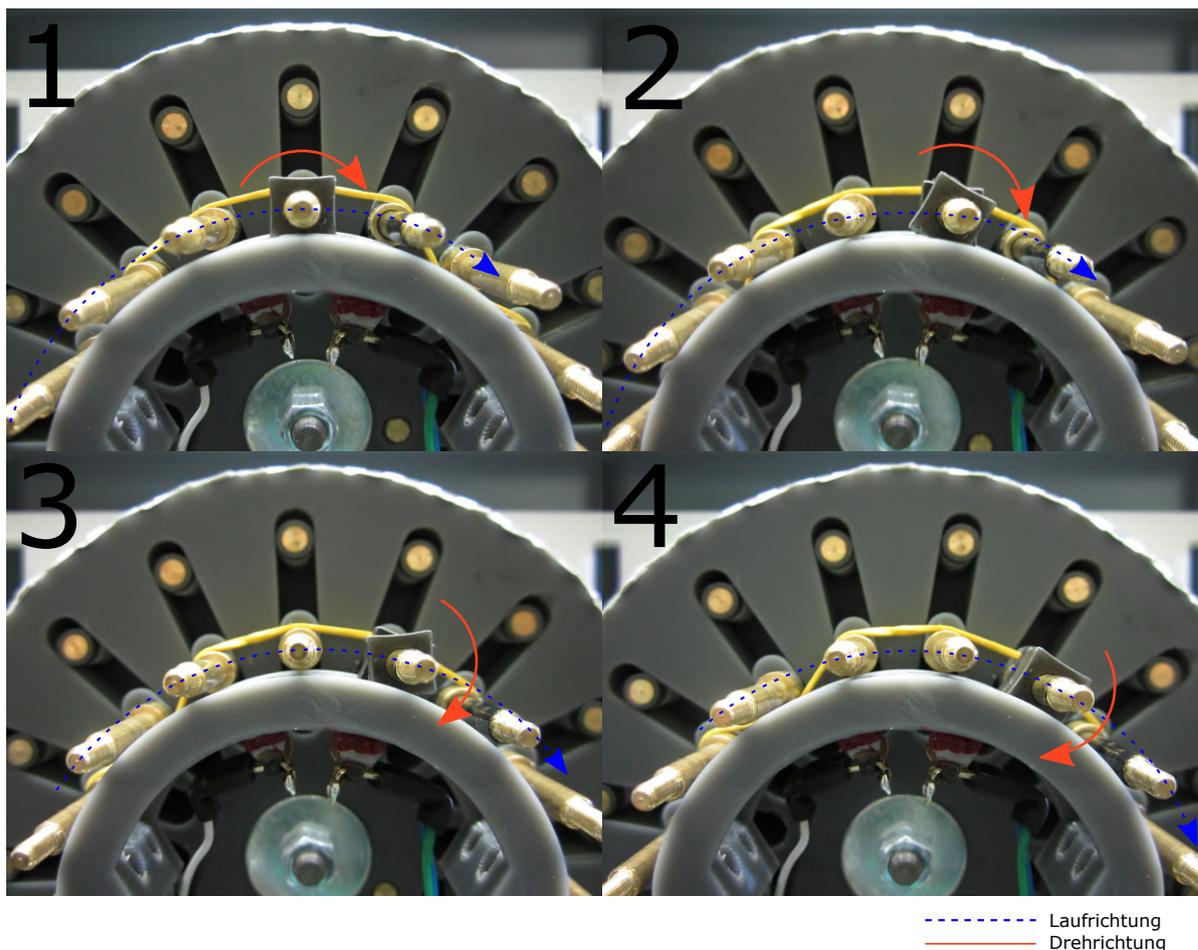


Abb. 51: Drehbewegung eines Quaders im Testaufbau

7 Resultate

In diesem Kapitel werden die Resultate aus den Versuchsaufbauten aller Prototypen präsentiert, die im Zuge dieses Projektes für den Braille-Ring gefertigt wurden. Dazu sind die Aktuatoren in chronologischer Folge aufgelistet, angefangen mit dem ersten entworfenen Aktuator. Die Aktuatoren wurden zudem benannt, um sie im Kapitel 8 besser voneinander unterscheiden zu können.

Die Vorbereitung für einen neuen Prototypen erfolgte immer nach folgenden 3 Punkten:

1. Zu Beginn wurde mittels CAD-Programm ein erster Entwurf des Aktuators erstellt. Dies gab als ersten Schritt eine Einschätzung der Größe und Form des Aktuators. Jedes 3D-Modell wurde unter Berücksichtigung des Funktionsprinzips laut Kapitel 5.1 Grundidee, entworfen.
2. Als zweiter Schritt wird der als 3D-Modell erstellte Aktuator in das FE-Elemente-Simulationsprogramm Comsol übertragen und dessen magnetische Eigenschaften berechnet.
3. Entsprechen die Simulationsergebnisse dem gewünschten Verhalten, wird als letzter Schritt der Aktuator gefertigt und im Versuchsaufbau nach Kapitel 6.6 getestet.

Jeder Aktuator wurde erst nach erfolgreichem Passieren dieser drei Schritte im Versuchsaufbau getestet.

Um in den folgenden Punkten eine Strukturierung zu schaffen und die einzelnen Aktuatoren besser untereinander zu vergleichen wird bei den getesteten Prototypen auch immer auf die Ergebnisse dieser drei Punkten eingegangen.

7.1 Aktuator FINWE

Der erste Prototyp mit dem Namen FINWE wurde mit dem Grundgedanken konzipiert möglichst viele Kupferwicklungen auf dem Aktuator unterzubringen. Die Seitenbleche wurden mit einer Stärke von 1 mm geplant, um eine magnetische Sättigung in dem Material zu vermeiden. In der folgenden Abbildung 52 ist der erste Entwurf des Aktuators ohne Kerbe und dessen Maße dargestellt.

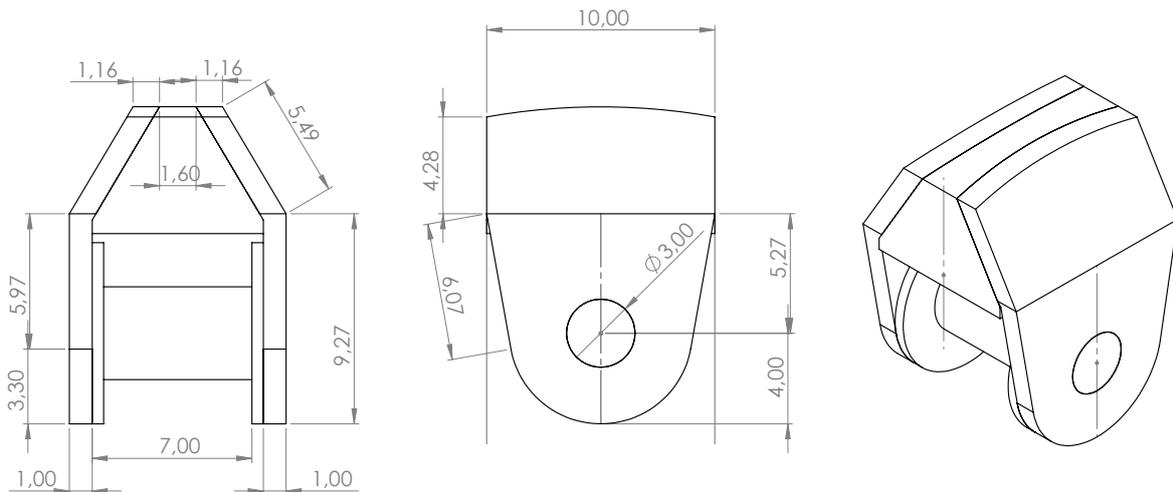


Abb. 52: Maßschema FINWE ohne Kerbe

Der Aktuator selbst ist 13.5mm hoch, 9mm Breit und hat eine Tiefe von 10mm. Die Tiefe beschreibt hier die Länge in Laufrichtung der Quader.

7.1.1 Simulation FINWE

Für die Simulation wurde der Aktuator in Comsol als 3D-Modell rekonstruiert. Für die Berechnung der magnetischen Kräfte (Reluktanzkraft) zwischen Aktuator und Quader wurden folgende Parameter angenommen:

Tab. 2: Parameterwerte für die Simulation des Aktuators FINWE.

Parameter	Parameterwerte
Wicklungszahl	828
Drahtstärke	0.1mm
Material Draht	Kupfer
Material Aktuator	Eisen
Abstand zwischen Aktuator und Quader	0.2mm
Überlappung von Quader und Aktuators in Laufrichtung	1.0mm
Spannungsversorgung	5.0V

Die Wicklungszahl wurde anhand eines bestehenden Mockups definiert. Die Überlappung beschreibt hier wie weit der Quader in Laufrichtung über den Aktuator ragt (Abbildung

53, Mitte). Dieser Wert der Überlappung wurde dann auch für die weiteren Simulationen verwendet.

Mit den in Tabelle 2 definierten Parametern wurde die Simulation durchgeführt. In Abbildung 53 sind zwei Seitenansichten und ein 3D-Modell des simulierten Aktuators abgebildet.

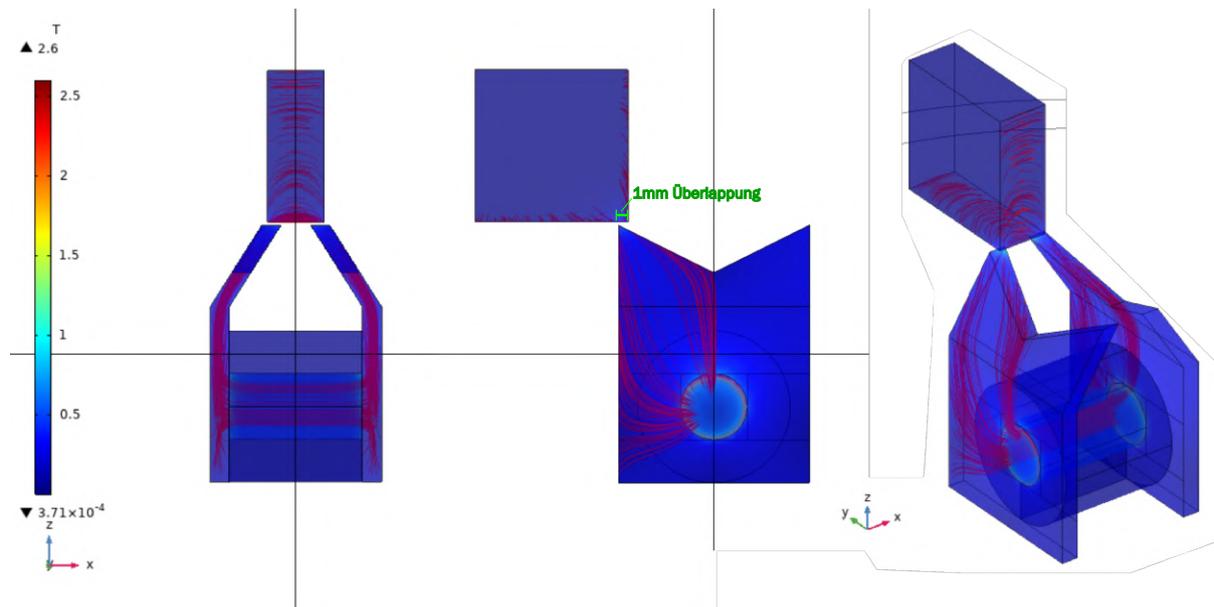


Abb. 53: 3D-Simulation des Aktuators FINWE

Die farbliche Schattierung in der Abbildung 53 stellt hierbei die magnetische Flussdichte B dar. In dieser ist gut zu erkennen, dass die magnetische Flussdichte B vor allem in scharfkantigen Übergängen erhöhte Werte aufzeigt. Diese sind vor allem an dem Übergang des Verbindungsstifts zu den Seitenwänden und vom Aktuator auf den Quader zu sehen. In diesen Bereichen überschreitet die magnetische Flussdichte $1,8\text{T}$ und liegt somit in der magnetischen Sättigung eines Elektroleches. Ein solches Elektrolech wurde auch für die Fertigung der Prototypen verwendet. In allen anderen Bereichen liegt die magnetische Flussdichte unter 1T .

Die berechneten Kräfte, die der Aktuator auf den Vollmetallquader ausübt, sind in Tabelle 3 aufgelistet. F_z beschreibt die Kraft in z -Richtung und F_y die Kraft in y -Richtung, welche initial auf den Quader wirken. Aus diesen beiden kann das wirkende Drehmoment M auf den Quader berechnet werden. Die Kraft in x -Richtung ist aufgrund der Symmetrie annähernd 0mN und hat deswegen eine vernachlässigbare Auswirkung auf das Drehmoment. Weiters sind auch der Strom und der Widerstand der Spule, welcher durch Comsol ermittelt wurde, berechnet.

Tab. 3: Ergebnisse der Simulation des Aktuators FINWE

Quader	F_z [mN]	F_y [mN]	M [mN · mm]	Strom [mA]	Widerstand [Ω]
Vollmetall	-106.16	-8.69	437.93	186.37	26.82

Das notwendige Drehmoment von 42mN*mm, welches zuvor durch den Test mit der Balkenwaage ermittelt wurde (Kapitel 5.2.2), kann durch die Ergebnisse der Simulation um mehr als das Zehnfache überboten werden.

7.1.2 Test FINWE

Nach der Simulation und den daraus folgenden Ergebnissen wurde der Aktuator angefertigt und in eine speziell dafür vorbereitete Kuppel platziert. Die Wicklungszahl und die Spannungsversorgung wurden für die ersten Testläufe mit den gleichen Werten wie in der Simulation durchgeführt. Diese lag bei 5V.

In der folgenden Abbildung 54 ist der Testlauf bei einem aktivierten (Spule wird mit Spannung versorgt) Aktuator in vier Sequenzen dargestellt.

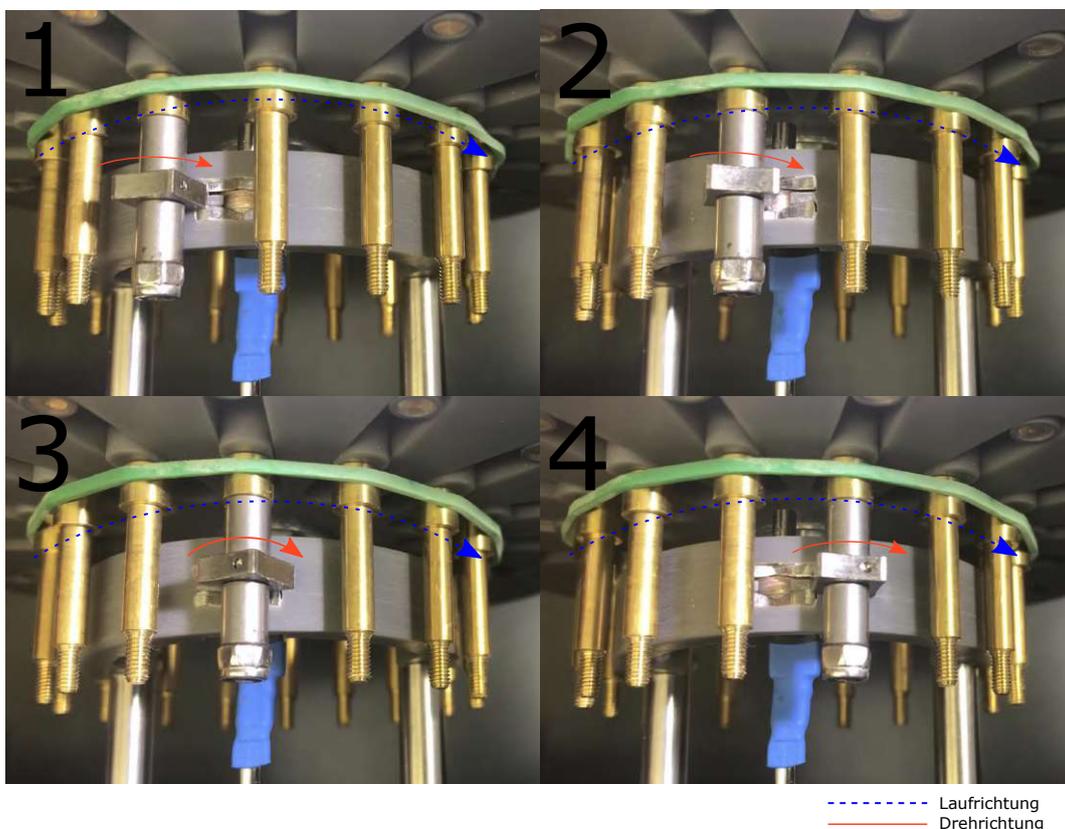


Abb. 54: Erster Testlauf des Aktuators FINWE und einem Metallquader

Für den Test wurde der Quader mehrere Male (>10) in beide Richtungen über den aktivierten Aktuator gezogen. In der folgenden Tabelle 4 ist die Drehwahrscheinlichkeit für das Einleiten einer Drehung in % angegeben. Des weiteren beinhaltet die Tabelle 4 den durch einen Amperemeter gemessenen Strom der Spule.

Tab. 4: Bewertung des Testlaufs für den Aktuator FINWE

Quader	Spannung [V]	Drehwahrscheinlichkeit [%]	Strom [mA]
Vollmetall	5.0	100	150

Die Drehwahrscheinlichkeit lag in diesem Testlauf bei 100% und erreichte dabei schon beim ersten Versuch das gewünschte Ergebnis.

Nach diesen positiven Ergebnissen wurde entschieden keine weiteren Tests für diesen Aktuator mehr durchzuführen. Stattdessen wurde der Fokus auf die Entwicklung eines einfacher zu fertigenden und platztechnisch effizienteren Aktuators gelegt. Der aus diesen Motiven entstandene Prototyp wird im dem nächsten Kapitel 7.2 beschrieben.

7.2 Aktuator EISCONE

EISCONE stammt aus der Idee den Aktuator FINWE zu vereinfachen und zusätzlich dessen Effizienz zu verbessern. Nach dem erfolgreichen Test von FINWE wurden zuerst Ideen zur Entfernung der nach innen verjüngten Seitenwände verfolgt. Dies führte dazu, dass nur mehr ein geradliniger Steg nach innen vorhanden bleiben sollte (Abbildung 41 links). Nach weiteren Überlegungen wurde dann beschlossen einen Aktuator zu planen, der nur mehr aus zwei geradlinigen Seitenwänden besteht. Dies bringt den Vorteil keine komplexen Verbindungsstege fertigen zu müssen, sondern die Wicklungen direkt auf den Aktuator aufzutragen. Aber auch die Fertigung des Aktuators selbst wird um ein Vielfaches einfacher. In Abbildung 55 ist der neu entworfene Aktuator EISCONE mit seinen Maßen dargestellt.

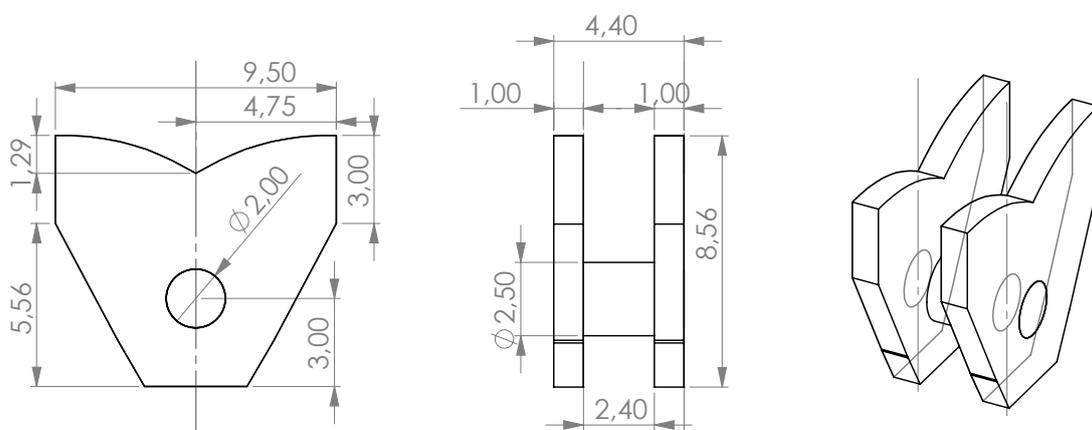


Abb. 55: Maßschema des Aktuators EISCONE

Der Aktuator besitzt eine Breite von 4,4mm und ist somit um etwas mehr als die Hälfte schmaler als sein Vorgänger. Auch die Höhe ist mit 8,56mm niedriger als bei FINWE gewählt. Die Seitenwandstärke wurde vorerst mit 1mm beibehalten.

7.2.1 Simulation EISCONe

Für die Simulation des Aktuators wurden in Comsol folgende Parameter angenommen:

Tab. 5: Parameterwerte für die Simulation des Aktuators EISCONe.

Parameter	Parameterwerte
Wicklungszahl	516
Drahtstärke	0.08mm
Material Draht	Kupfer
Material Aktuator	Eisen
Abstand zwischen Aktuator und Quader	0.2mm
Überlappung von Quader und Aktuator in Laufrichtung	1.0mm
Spannungsversorgung	5.0V

In der Abbildung 56 ist das das graphische Ergebnis der Simulation dargestellt.

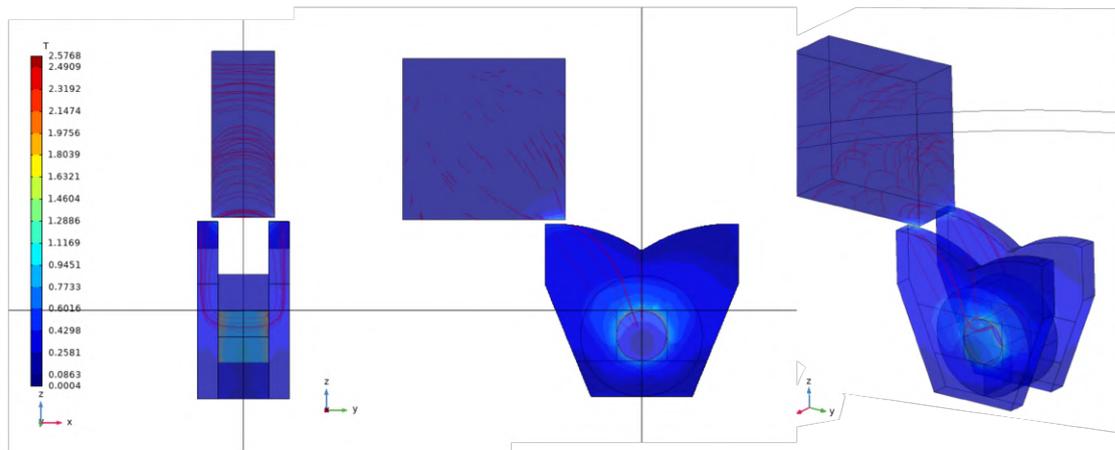


Abb. 56: Maßschema des Aktuators EISCONe

Die Flussdichte im Verbindungsstift liegt sehr nahe der Sättigung von 1,8T. Im Gegensatz dazu liegt die Flussdichte in den Seitenwänden, wie bereits bei FINWE, weit entfernt von der magnetischen Sättigung, weshalb in weiterer Folge eine Blechstärke von 0,5mm und 0,3mm simuliert wurde. Eine Seitenansicht dieser Blechstärken und deren Flussdichte sind in Abbildung 57 dargestellt.

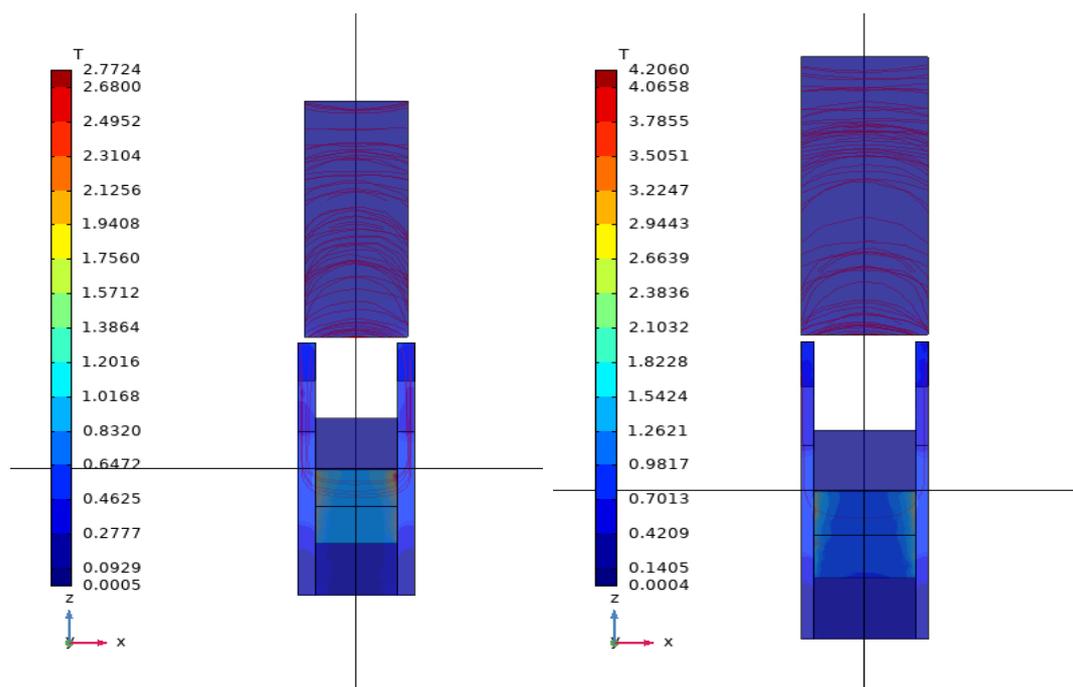


Abb. 57: Berechnung mit einer geringeren Wandstärke: links: 0,5mm; rechts: 0,3mm

Sowohl in der 0,5mm und der 0,3mm Seitenwandstärke konnte in der Simulation mit den gewählten Parametern keine Sättigung erreicht werden. Eine Sättigung tritt nur am scharfkantigen Übergang vom Verbindungsstift auf die Seitenwände auf. Diese hohe Flussdichte an den Übergängen entsteht aber auch im Fall des Aktuators mit einer Blechstärke von 1mm.

Bei FINWE wurden nur Vollmetallquader simuliert, bei EISCONE wurden jedoch auch Kunststoffquader mit eingesetzten Stiften getestet. Für die eingesetzten Stifte wurden Rundstifte und Quadratstifte simuliert.

In der folgenden Tabelle 6 können die aus der Simulation berechneten Kräfte auf die unterschiedlichen Quader bei den unterschiedlichen Wandstärken verglichen werden.

Tab. 6: Simulationsergebnisse des Aktuators EISCONE.

Wandstärke [mm]	Quader	F_z [mN]	F_y [mN]	M [mN * mm]
1	Vollmetall	-132.24	28.41	346.77
1	Quadratstifte	-115.78	12.82	359.02
1	Rundstifte	-69.23	8.65	211.21
0.5	Vollmetall	-124.02	21.14	349.42
0.5	Quadratstifte	-114.63	13.61	351.39
0.5	Rundstifte	-60.71	7.48	185.38
0.3	Vollmetall	-104.16	21.63	278.14
0.3	Quadratstifte	-100.00	7.26	328.17
0.3	Rundstifte	-52.86	7.53	158.26

Vergleicht man nun das Drehmoment der unterschiedlichen Simulationen, kann bei der Reduktion der Wandstärke von 1mm auf 0,5mm kaum eine Verschlechterung der magnetischen Anziehungskraft des Aktuators gesehen werden. Das verursachte Drehmoment M für Vollmetallquader, wird dabei sogar minimal größer. Bei einer weiteren Reduktion der Blechstärke auf 0,3mm ist eine Verschlechterung des Drehmomentes ersichtlich.

Vergleicht man die unterschiedlichen Quader miteinander, erkennt man, dass die Quadratstifte und Vollmetallquader ähnliche Kräfte verursachen. Bei der Simulation von Rundstiften ist eine Verschlechterung des Drehmomentes erkennbar, die aufgrund der Geometrie erklärbar ist. So besitzen die Quadratstifte und Vollmetallquader eine große Überlappung mit den Seitenwänden des Aktuators bei gleichbleibender Höhe, die Rundstifte haben jedoch keine gleichbleibende Form und der Abstand zum Aktuator ist nur auf sehr kleiner Fläche gering.

7.2.2 Test EISCONE

Für den Testaufbau wurde aufgrund der Ergebnisse der Simulation ein Aktuator mit einer Blechstärke von 0,5mm gefertigt.

Nach Fertigung und Einbau des Aktuators in eine Kuppel ohne Führung wurden die unterschiedlichen Quader bei unterschiedlichen Spannungen getestet. Die folgende Tabelle 7 zeigt hierbei die Auswirkung auf die Drehwahrscheinlichkeit.

Tab. 7: Drehwahrscheinlichkeit der unterschiedlichen Quader bei verschiedenen Spannungen im Testaufbau EISCONe.

Spannung	Strom	Drehwahrscheinlichkeit		
		Vollmetal	Quadratstifte	Rundstifte
[V]	[mA]	[%]	[%]	[%]
5.0	270	100	100	100
4.0	230	100	100	100
3.0	170	60	40	60
2.0	120	50	10	40

Man erkennt an diesen Ergebnissen, dass eine Drehung bis zu einer Spannung von 4V für alle verwendeten Quader garantiert erreicht wurde. In dem Test zeigte sich, dass die selbst gefertigten Quadratstifte keine gleichen magnetischen Eigenschaften aufwiesen. Dies hatte zur Folge, dass einige Quadratstifte selbst bei 5V keine Wechselwirkung mit dem Aktuator zeigten. Für den Versuch wurden deshalb nur jene quadratischen Stifte verwendet, welche auch magnetische Wechselwirkung zeigten.

7.3 Aktuator SPALTER

Der Aktuator SPALTER beruht auf der Idee den Aktuator nicht unter dem Quader zu positionieren, sondern den Quader durch den Aktuator durchlaufen zu lassen (siehe Abbildung 60). Dieses neue Prinzip setzt darauf, dass der Quader beim Einlaufen auf eine Seite gezogen wird und dadurch einen magnetischen Kurzschluss mit einer der beiden Aktuatorwände erzeugt. Durch diesen magnetischen Kurzschluss entsteht zwischen Quader und Aktuatorwand eine starke Haftung. Der Aktuator würde somit den Quader nicht mehr aktiv in die V-Kerbe der Kuppel ziehen sondern nur mehr punktuell halten. Durch die Ringbewegung, welche durch die laterale Bewegung der Hand entsteht, und das punktuelle Halten wird der Quader dann in die V-Kerbe der Kuppel gedrückt. Dieser Drehvorgang wird in der folgenden Abbildung 58 als Seitenansicht dargestellt. Wird der Aktuator nicht aktiviert, kommt es zu keinem magnetischen Kurzschluss zwischen Quader und Aktuator und der Quader bewegt sich ohne Drehbewegung über die Kerbe.

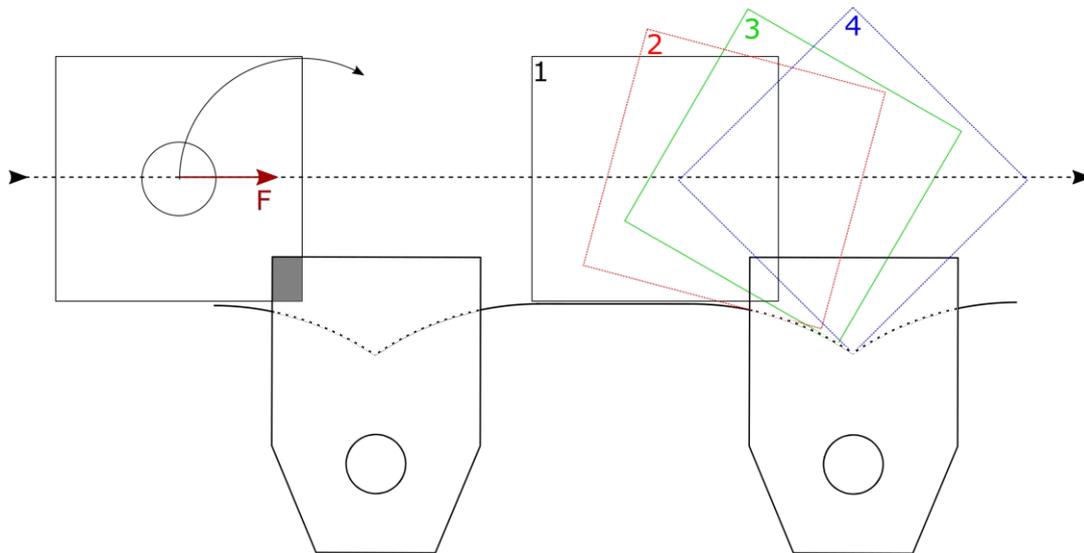


Abb. 58: Drehung durch den Aktuator Spalter in Seitenansicht

Die Form des Aktuators ändert sich hierbei etwas im Vergleich zu FINWE und EISCONE. Durch das unterschiedliche Funktionsprinzip wird die V-Kerbe als Ausschnitt im Aktuator selbst nicht mehr benötigt. Aber auch die Tiefe des Aktuators fällt für diesen Aktuatortyp wesentlich schmaler aus. Die Breite dieses Aktuators fällt aufgrund des Seitenblechabstandes von 3,3mm größer aus als die Breite von EISCONE. Der verbreiterte Seitenblechabstand von 3,3mm bringt auch den Vorteil eine breitere Spule aufwickeln zu können. Die genauen Maße sind in der Abbildung 59 angegeben.

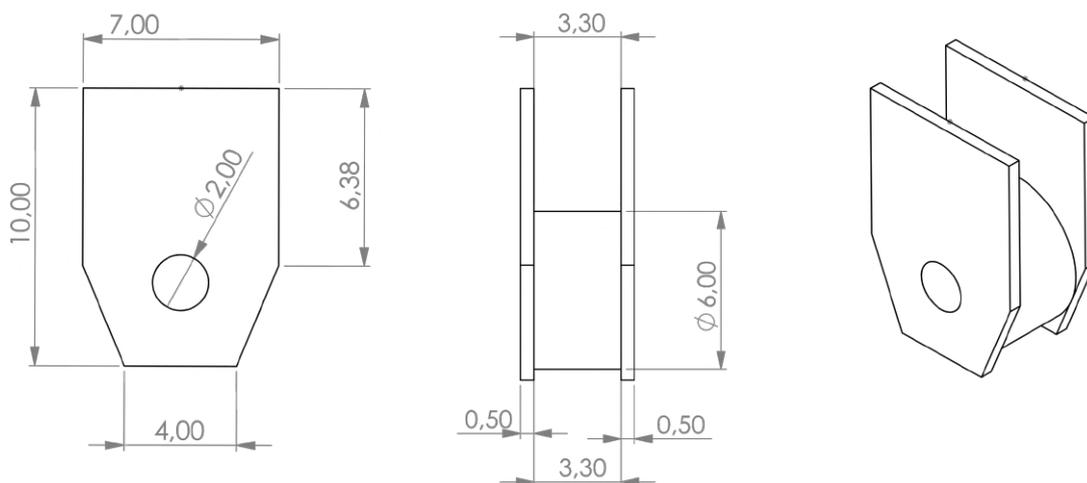


Abb. 59: Maßschema des Aktuators SPALTER

7.3.1 Simulation SPALTER

Aufgrund des neuen Funktionsprinzipes ist die Simulation des erzeugten Drehmomentes, welches der Aktuator auf den Quader verursacht, aufgrund der Komplexität der Simulation in dieser Arbeit nicht durchgeführt worden.

Um jedoch Aussagen über die magnetische Sättigung und die Kraft zu tätigen, welche durch den Kurzschluss zwischen Aktuator und Quader entsteht, wurde die Simulation mit folgenden Parametern durchgeführt:

Tab. 8: Parameter für die Simulation des Aktuator SPALTER.

Parameter	Parameterwerte
Wicklungszahl	738
Drahtstärke	0.08mm
Material Draht	Kupfer
Material Aktuator	Eisen
Abstand zwischen Aktuator und Quader	-1.5mm
Überlappung von Quader und Aktuators in Laufrichtung	1.0mm
Spannungsversorgung	5.0V

Die folgende Abbildung 60 zeigt die Auswirkung des Kurzschlusses auf die magnetische Sättigung zwischen Aktuator und Quader.

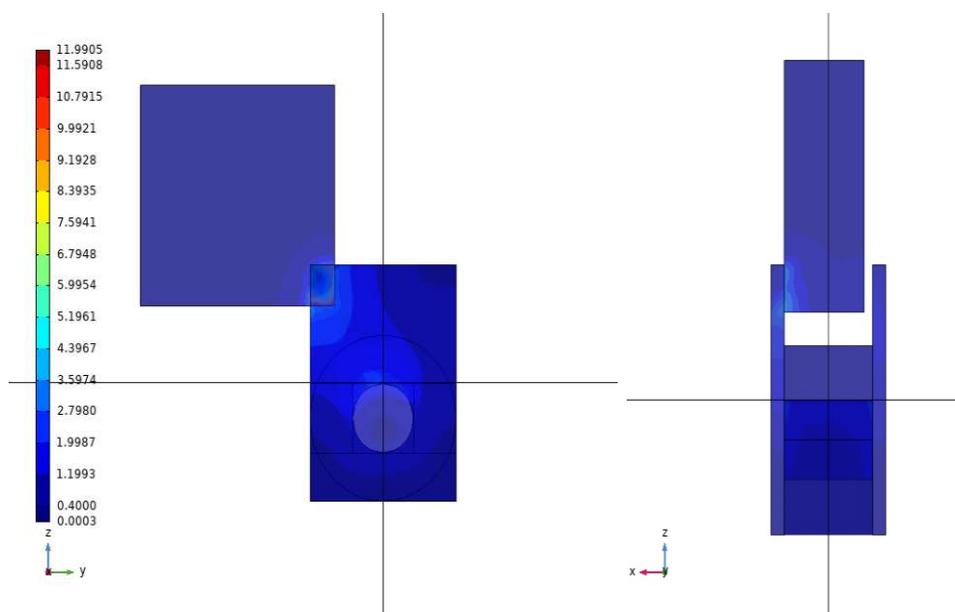


Abb. 60: Simulation des Aktuators SPALTER

In der Simulation erkennt man, dass anhand der Flussdichte eine starke magnetische Sättigung im Bereich der punktuellen Überlappung zwischen Aktuator und Quader vorherrscht. Aufgrund dieser Sättigung wird die Kraft in z-Richtung begrenzt. Dies bedeutet, dass der Betrieb des Aktuators mit einer Spannung von 5 [V] nicht notwendig ist, da man daraus

aufgrund der Sättigung keine zusätzliche Kraft erzeugt.

Die Kräfte in x-Richtung, welche in den vorherigen Aktuatoren aufgrund der Symmetrie im Bereich von 0mN lagen, sind nun durch die gewollte Asymmetrie auf 450mN gestiegen.

7.3.2 Test 1 SPALTER

Aufgrund der für das Durchlaufen des Quaders notwendigen breiten Bauweise, wurde der Aktuator in eine Kuppel mit Führung eingebettet. Somit wurden für den ersten Test die Seitenbleche des Aktuators vollständig in die Führungsschiene der Kuppel integriert. Die Breite der Spurrinne der Kuppel hatte 3,3mm. Die Position des Aktuators in der Kuppel kann in der folgenden Abbildung 61 gesehen werden.

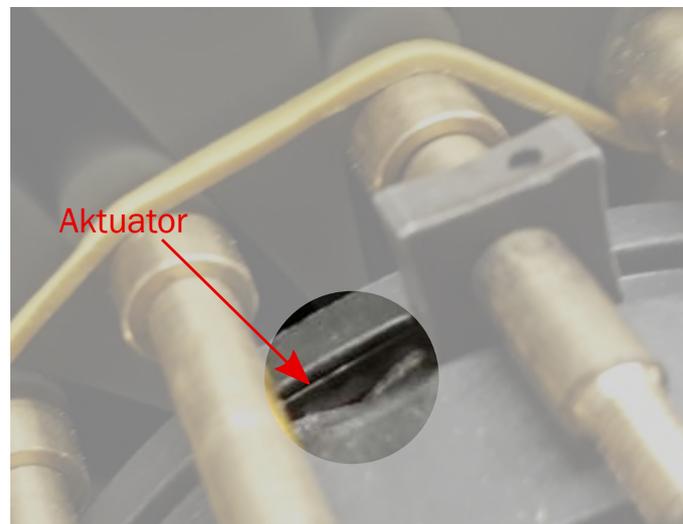


Abb. 61: Position des Aktuators SPALTER in der Kuppel mit Führung.

Der Aktuator selbst hatte 738 Wicklungen und für die ersten Tests wurde die Spule mit einer Spannung von 5V versorgt. Die Spannung wurde trotz der Sättigung in der Simulation zu Beginn bewusst sehr hoch gewählt, weil davon ausgegangen wurde, dass der Quader erst mit dem Einlaufen in den Aktuator zur Seite gezogen wird. In dem Testaufbau wurde ein Vollmetallquader aufgrund seiner hohen Verarbeitungsqualität verwendet.

In den ersten Testläufen zeigte sich, dass der Aktuator sehr gut funktioniert, solange der Quader von Beginn an in Kontakt mit dem Seitenblech stand. Ein bewusstes Anziehen des Quaders zu den Seitenwänden bei Eintreten in den Aktuator konnte nicht erreicht werden. Beim Fall, dass der Quader einen Luftspalt sowohl zur rechten und linken Seitenwand vorwies, konnte aufgrund des fehlenden Kurzschlusses, keine Drehung eingeleitet werden.

Als kein Luftspalt vorhanden war und der Aktuator in Kontakt mit dem Seitenblech kam, konnte ein Kurzschluss erzeugt werden und eine zuverlässige Drehung bis zu einer Spannung von 4V beobachtet werden. Die Drehwahrscheinlichkeit bei unterschiedlichen Spannungen ist in der Tabelle 9 dargestellt.

Tab. 9: Drehwahrscheinlichkeit für den Test 1 SPALTER

Quader	Spannung [V]	Drehwahrscheinlichkeit [%]	Strom [mA]
Vollmetall	5.0	100%	105
Vollmetall	4.0	100%	84
Vollmetall	3.0	80%	63
Vollmetall	2.5	40%	42

7.3.3 Test 2 SPALTER

Das Drehverhalten des Quaders mit dem neuen Aktuator zeigte für den Testaufbau sehr gute Ergebnisse, dennoch war das Einleiten der Drehung zu sehr vom Luftspalt zwischen Aktuator und Quader abhängig. Um dieses Problem zu beheben, wurde für den zweiten Test mittels Spurbreitenermittlung (Kapitel 6.5.2) eine ideale Spurbreite von 3,10mm festgelegt. Durch diese Adaptierung stand der Quader stabiler in der Spur und der Luftspalt wurde auf beiden Seiten minimiert. Der Spalt wurde so schmal wie möglich gewählt aber dennoch breit genug, damit der Quader annähernd widerstandslos durch die Spur gleiten kann. Die geringere Spurbreite verursachte nun einen permanenten Kontakt zwischen Quader und der Aktuatorwand. Diese daraus entstehende Reibungskraft hat bei diesen Tests keine Auswirkung, da die Anzahl der Quader auf dem Teststand sehr gering ist (maximal 9 Quader). Für spätere Tests mit einer größeren Anzahl von Quadern muss die Reibungskraft jedoch berücksichtigt werden.

Für den zweiten Testlauf wurde nach der Kuppel auch der Aktuator angepasst. Diese Anpassung bestand größtenteils darin den Seitenwandinnenabstand des Aktuators von 3,30mm auf 3,10mm zu reduzieren um diesen in die neue Kuppel einsetzen zu können.

Der Steg zwischen den einzelnen Spurrinnen der drei Laufbahnen betrug 0,5mm. Die Aktuatorwand wurde somit selbst Teil des Führungsstegs. Für den zweiten Test wurde auf den Aktuator die gleiche Wicklungszahl wie zuvor beim ersten Test aufgewickelt. Die verwendete Kuppel mit den eingesetzten Aktuatoren ist in Abbildung 62 abgebildet.



Abb. 62: Kuppel mit einer Spurbreite von 3,10mm mit eingesetzten Aktuatoren

Die Adaptierung für den zweiten Testlauf hatte zur Folge, dass der Aktuator selbst bei einer Spannung von 2,5V eine zuverlässige Drehung der Vollmetallquader verursachte. Die Ergebnisse der Drehung bei unterschiedlicher Spannung sind in der folgenden Tabelle 10 zu sehen.

Tab. 10: Drehwahrscheinlichkeit für den Test 2 SPALTER

Quader	Spannung [V]	Drehwahrscheinlichkeit [%]	Strom [mA]
Vollmetall	5.0	100%	105
Vollmetall	4.0	100%	84
Vollmetall	3.0	100%	63
Vollmetall	2.5	100%	42

7.4 Aktuator SENIOR

Aufgrund der guten Resultate des Aktuators SPALTER wurde ein weiterer Versuch im Originalmaßstab des Braille-Ringes mit dem Funktionsprinzip des Aktuator SPALTER gemacht. Hierbei war die Verkleinerung der Quader und der Kuppel die größte Veränderung. Die Quader hatten infolgedessen nur mehr eine Breite von 2,7mm statt wie zuvor 3mm. Durch diese Verkleinerung wurde auch die Breite des Aktuators verringert und veränderte sich insgesamt von 4,30mm auf 3,80mm. Bei einer Seitenwandstärke von jeweils 0,5mm ergibt dies eine Spurbreite von 2,8mm. Die Spurbreite ist hierbei durch die Geometrie des Braille-Ringes vorgegeben und wurde vorerst nicht wie im Versuch 2 des Aktuators SPALTER angepasst.

Der Aktuator wurde deshalb für diesen Test noch besser in die Kuppel eingearbeitet, sodass der Führungssteg der Kuppel und die Seitenbleche keine Unebenheiten vorwiesen. Um vorerst eine hohe Fertigungsqualität zu gewährleisten, wurden für die ersten Versuche

nur Vollmetallquader verwendet. Kunststoffquader mit eingesetzten Rundstiften wurden erst für spätere Versuche herangezogen, da die Qualität aufgrund der Fertigungsmethoden nicht immer gewährleistet werden konnte.

Für den Versuch wurden zudem neun Aktuatoren in die Kuppel eingesetzt um 3 auf einer Achse liegende Quader gleichzeitig zu testen. Der fertige Versuchsaufbau im Originalmaßstab mit Vollmetallquadern wird in der folgenden Abbildung 63 gezeigt.

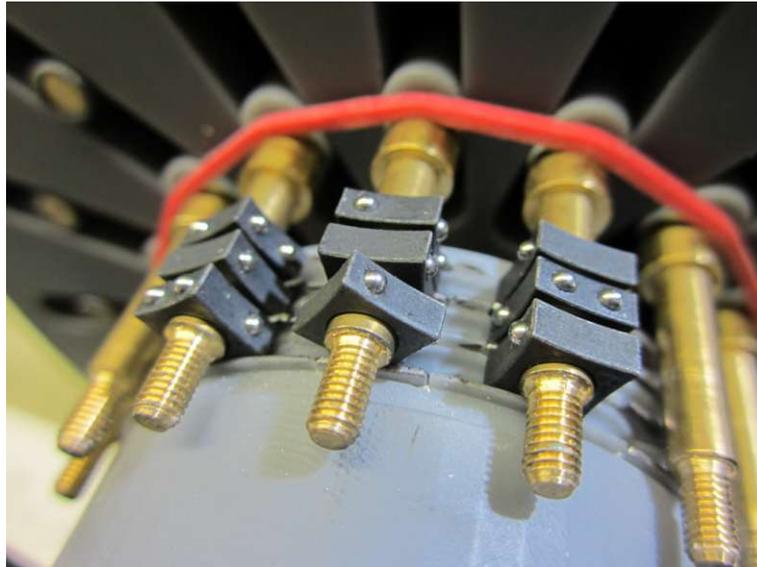


Abb. 63: Testaufbau für den Prototyp SENIOR mit Vollmetallquadern

Der Aktuator SENIOR wurde vor dem Test nicht mehr in Comsol simuliert, da mit den Ergebnissen keine Aussage über das Gelingen einer Drehung getroffen werden konnte.

Die Spule wurde bei einer Wicklungsanzahl von 400 mit einer Spannung von 5V betrieben. Es zeigte sich, dass die Drehung der Vollmetallquader durch den Aktuator ausgelöst wird. In einigen Fällen kam es jedoch zu einer nicht vollständigen Drehung, was in weiterer Folge dazu führte, dass der Quader auf der anderen Seite des Aktuators aufgrund der V-Kerbe wieder in seine ursprüngliche Position gerückt wurde. Bei wenigen Quadern kam es sogar zu einem Verkanten am Bogen der V-Kerbe. Diese nicht vollständige Drehung und der Kontaktpunkt mit der V-Kerbe ist in der Abbildung 64 in Seitenansicht dargestellt.

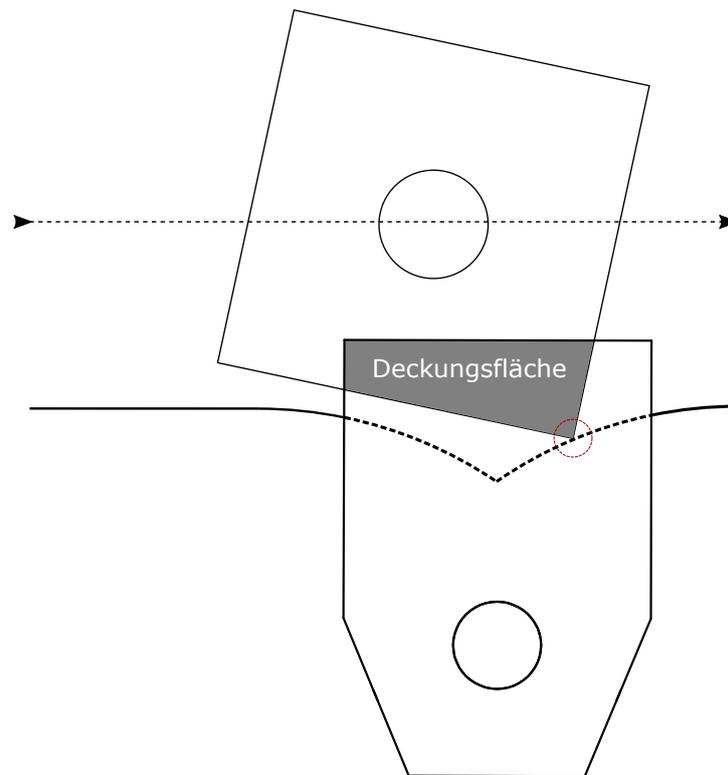


Abb. 64: Verkanten des Quaders.

Das Verkanten führt neben einer nicht erfolgreich ausgeführten Drehung und einem Blockieren zusätzlich zu einer Abnutzung der V-Kerbe in der Kuppel durch die Vollmetallquader.

Diese Resultate wurden der immer größer werdenden Deckungsfläche zugeschrieben (Abbildung 64), welche durch den Vollmetallquader bei Einlaufen in den Aktuator entsteht. Dadurch wird der Quader beim Einlaufen in den Aktuator immer fester an der Aktuatorwand gehalten und deshalb am Ende nicht in die Spitze der V-Kerbe hinunter gezogen. Bei Reduktion der Spannung konnte dies vermieden werden, jedoch ist die Spannung hierbei so niedrig, dass dadurch bereits die Drehung des Quaders nicht mehr garantiert werden konnte.

Um diese immer größer werdende Deckungsfläche zu vermeiden, wurde die Seitenflächen des Quaders bis auf die Ecken zurückgeschliffen. Dies ist in der Abbildung 65 dargestellt. Dadurch besteht nur mehr an den Ecken der Quader ein Kontakt mit dem Seitenblech der Aktuatoren. Diese Änderung führte zum gewünschten Drehverhalten des Quaders und es konnte keine Störung mehr beobachtet werden.

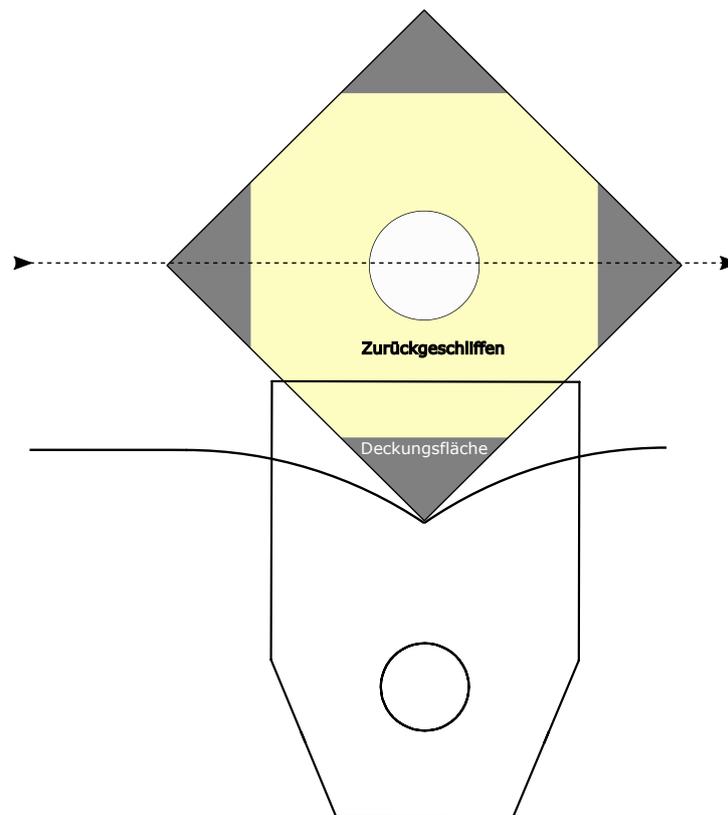


Abb. 65: Verringerte Deckungsfläche.

Als nächster Schritt wurden die Vollmetallquader wieder durch SLA-3D-Druck-Quader mit eingesetzten Rundstiften ersetzt. Wie bereits zuvor mit den modifizierten Vollmetallquadern, zeigten die Quader mit Rundstiften ein fehlerfreies Drehverhalten. Die Kunststoffquader mussten dabei nicht zurückgeschliffen werden, sondern konnten im bereits bekannten Format verwendet werden. Die Ergebnisse des Tests mit Vollmetallquadern und Kunststoffquadern sind in der folgenden Tabelle 11 zu sehen.

Tab. 11: Drehwahrscheinlichkeit im Testaufbau SENIOR

Spannung	Strom	Drehwahrscheinlichkeit	
		Vollmetall (Zurückgeschliffen)	Rundstifte
[V]	[mA]	[%]	[%]
5.0	260	100	100
4.0	210	100	100
3.0	156	100	100
1.5	78	100	100

Die Ergebnisse dieser zwei Quader Typen unterscheiden sich nicht bezüglich ihrer Drehwahrscheinlichkeit. Beide Quader konnten bis zu einer Spannung von 1,5V eine sichere Drehung ermöglichen.

8 Fazit der Prototypen

Im diesen Kapitel werden die getesteten Aktuatoren unter Berücksichtigung der im Kapitel 7 angeführten “Anforderungen an den Aktuator” bewertet.

In den folgenden Punkten wird jeder getestete Aktuator aus dem Kapitel 7 individuell betrachtet.

- **Zuverlässige Funktion**

- *FINWE*

Dieser war der erste gefertigte und getestete Prototyp. Die Drehung erfolgte zuverlässig bei einer Spannung von 5V. Niedrigere Spannungen wurden aufgrund der einschränkenden Größe nicht weiter getestet. Mehr dazu im Punkt “Größe”.

- *EISCONE*

Als Nachfolger von FINWE zeigte EISCONE ebenfalls eine zuverlässige Drehung. Für diesen Aktuator wurden auch niedrigere Spannungen geprüft, wobei sich zeigte, dass niedrigere Spannungen als 4V zu keiner zuverlässigen Drehung führten.

- *SPALTER*

Der Aktuator SPALTER basiert auf dem neuen in Kapitel 7.3 beschriebenen Funktionsprinzip. Obwohl es bei den ersten Tests mit diesem Aktuator noch einige Startschwierigkeiten gab, zeigte sich bei richtigen Voraussetzungen auch bei niedrigen Spannungen eine sehr zuverlässige Drehung. So konnte während der Tests auch bei 2,5V eine sichere Drehung eingeleitet werden.

- *SENIOR*

Als optimierte Version des Aktuators SPALTER, konnte SENIOR nach einigen Adaptierungen eine zuverlässige Drehung bis zu einer Spannung von 1,5V einleiten. SENIOR zeigte am Ende der Tests die zuverlässigste Einleitung einer Drehung.

- **Stellgeschwindigkeit**

Bei allen getesteten Aktuatoren, wurde die Bewegung der Achsen per Hand gesteuert. Hierbei zeigte sich, dass alle Aktuatoren bei kleinen und großen Lesegeschwindigkeiten problemlos funktionieren. Eine genaue Aussage über die maximale und minimale Stellgeschwindigkeit kann aber dennoch nicht getroffen werden. Für die genaue Evaluierung müsste der Stellmotor auf die gewünschten Geschwindigkeit eingestellt werden.

- **Größe**

- *FINWE*

FINWE war als Aktuator sehr groß geplant und es hätten davon keine 9 Stück ohne Einschränkungen Platz in der Originalkuppel gefunden, weshalb nach erfolgreicher Einleitung der Drehung der Fokus primär auf der Weiterentwicklung des Aktuators lag.

- *EISCONE*

Als eine Weiterentwicklung von FINWE wurde auch die Integrierbarkeit des Aktuators in die Originalkuppel berücksichtigt. Das Design des Aktuators würde 9 Stück der Aktuatoren in der Kuppel gewährleisten.

- *SPALTER und SENIOR*

Die Aktuatorentypen SPALTER und SENIOR sind aufgrund ihrer Größe sehr leicht in die Kuppel integrierbar. Aber auch durch ihre spezielle Funktionsweise wird das Volumen, das sie in der Kuppel einnehmen, ideal ausgenutzt.

- **Wartung**

- *Bewegte Teile*

Alle getesteten Aktuatoren sind fest in der Kuppel verbaut und führen für die Einleitung des Drehvorganges keine aktive Bewegung durch. Durch diese Funktionsweise, welche auf die Reluktanzkraft zurückzuführen ist, ist die einzige Bewegung innerhalb des Braille-Ringes die Bewegung der Quader selbst.

- *Verschmutzung*

Eine mögliche Bedrohung für die Verschmutzung des Braille-Ringes ist die V-Kerbe. Für eine zuverlässige Drehung darf diese nicht verunreinigt sein. Für eine genaue Prognose wie sehr diese über die Zeit verschmutzt wird, muss die Verschmutzung des Ringes über einen langen Zeitraum beobachtet werden.

Ein weiteres Problem, welches zukünftig näher beobachtet werden sollte, ist das Abreiben der Kuppel durch Vollmetallquader. Dieser Abrieb könnte zu einer Verschmutzung in der Laufbahn der Quader führen. Diese potenzielle Gefahr muss ebenfalls durch einen Langzeittest beobachtet werden.

- **Lautstärke**

Die Drehung der Quader verläuft aufgrund des Funktionsprinzipes wie zu erwarten für alle getesteten Aktuatoren lautlos.

- **Stromversorgung**

In diesem Schritt wurde getestet bei welcher geringsten Spannung die Aktuatoren ein sicheres Drehen noch bewerkstelligen konnten. Die folgende Tabelle 12 vergleicht die getesteten Aktuatoren mit ihrem geringstem Stromverbrauch [mA] und der dazugehörigen Spannung [V].

Tab. 12: Vergleich des Stromverbrauches.

Aktuator	Drahtstärke [mm]	Spannung [V]	Stromverbrauch [mA]
FINWE	0.10	5.0	150
EISCONE	0.08	4.0	230
SPALTER	0.08	2.5	42
SENIOR	0.08	1.5	78

Hierbei zeigt sich, dass die Aktuatoren SPALTER und SENIOR den geringsten Stromverbrauch vorweisen, wobei SENIOR aufgrund der niedrigeren Wicklungszahl und des daraus folgenden niedrigeren Widerstandes einen höheren Stromverbrauch hat. Der Verbrauch kann jedoch durch Variation der Wicklungszahl und der Drahtstärke für weitere Aktuatoren optimiert werden.

- **Gewicht**

Das Gewicht der Aktuatoren konnte vor allem bei EISCONE, SPALTER und SENIOR durch die geringe Wandstärke der Seitenbleche reduziert werden. Auch die Größe der Aktuatoren wurde im Verlauf der Tests immer weiter optimiert, wodurch in den meisten Fällen Gewicht gespart werden konnte. So wiegt der Aktuator SENIOR am Ende 1,02g.

Einen größeren Einfluss auf das Gewicht des Braille-Ringes haben die Quader. Bei 60 Quadern im gesamten Ring ist der Unterschied zwischen Kunststoffquadern und Vollmetallquadern stark spürbar. So wiegen 60 Kunststoffquader ca. 16g und 60 Vollmetallquader ca. 34g.

Bei 9 Aktuatoren und 60 Kunststoffquadern kommt somit ein Gewicht von 25g beziehungsweise für Vollmetallquader 43g zustande.

- **Preis/Herstellungskosten**

Auch hier haben wieder die Quader selbst einen großen Einfluss. So liegen die Herstellungskosten bei einem 3D-Druck um ein Vielfaches unter den Herstellungskosten der Vollmetallquader, welche durch einen Zulieferer mittels CNC Technik gefertigt werden müssen. Ein Umstellen der Fertigung auf ein Spritzguss-Verfahren würde die Herstellungskosten bei einer hohen Stückzahl von Kunststoffquadern weiter massiv senken und auch die reproduzierbare Qualität der Kunststoffquader verbessern.

9 Diskussion und Ausblick

9.1 Diskussion der Ergebnisse

Die im Zuge der Arbeit gefertigten magnetischen Aktuatoren zeigen, dass das beschriebene Konzept für die Verkipfung der Quader im Braille-Ring in den Testaufbauten funktionsfähig ist und die bisherigen mechanischen Aktuatoren ersetzen kann. So konnte bereits beim ersten getesteten Aktuator (Kapitel 7.1) eine erfolgreiche Drehung eingeleitet werden. Aufbauend auf dieses positive Ergebnis und der Notwendigkeit den Aktuator zu verkleinern wurde der Aktuator EISCONE als Weiterentwicklung intensiver getestet. Hier kam es jedoch bei Spannungen unter 4V zu Einschränkungen im Drehverhalten, welche zu einem Umdenken beim Funktionsprinzip führten.

Aus diesem Grund entstand der Aktuator SPALTER (Kapitel 7.3). Dieser baut auf dem neuen Funktionsprinzip, welcher auf einen Kurzschluss des Quaders mit dem Aktuator setzt. Nach einigen Adaptierungen zeigte SPALTER eine wesentlich geringere Störanfälligkeit bei geringeren Spannungen als EISCONE. Dadurch kam es auch zur Entscheidung, keine weiteren Versuche mit EISCONE oder FINWE zu machen.

Aufgrund der Änderung der Kuppel für den Testaufbau war es notwendig, den Aktuator SPALTER in seiner Geometrie anzupassen. Der daraus entstandene Aktuator SENIOR unterscheidet sich somit vom SPALTER nur in seiner Größe.

Die Versuche mit SENIOR leiteten auch bei geringen Spannungen eine zuverlässige Drehung ein. Diese Tests zeigten aber auch, dass es zu einem Verkannten des Quaders kommen kann. So konnte dieses Verhalten nach Adaptierungen an den Quadern nicht mehr reproduziert werden, dennoch kann dieser Fehler aber ohne weitere Tests außerhalb der Testumgebung nicht ausgeschlossen werden.

Als nächster Schritt ist es notwendig, den Aktuator außerhalb der Testumgebung zu testen. Deswegen wurde entschieden, den Aktuator SENIOR in den Prototypen Braille-Ringes einzubauen und weiter Langzeittest außerhalb des Testsetups zu verfolgen. Erst danach kann eine wirkliche Abschätzung für das Funktionsprinzip und dessen Zuverlässigkeit abgegeben werden.

9.2 Nächste mögliche Schritte zur Weiterentwicklung

Ein wichtiger Schritt ist die Lagerung der Quader auf den Achsen, welche so gewählt werden muss, dass der Quader bei einem deaktivierten Aktuator ohne der Einleitung einer Drehung über die V-Kerbe gleitet. In den Testaufbauten wurde in manchen Fällen beobachtet, dass sich ohne angelegter Spannung der Quader ungewollt drehte. Daher gilt es als nächster Schritt, die Lagerung der Quader zu optimieren, sodass eine Drehung bei einem deaktivierten Aktuator nicht möglich ist.

Um eine sichere Funktion des Braille-Ringes zu garantieren, müssen zudem Faktoren wie die Verschmutzung von Außen aber auch der Abrieb der Kuppel und Quader im Inneren des Ringes für die Weiterentwicklung berücksichtigt werden. Vollmetallquader verursachen beim Verkannten einen hohen Abrieb in der aus Kunststoff gefertigten V-Kuppel. Zwar kann durch das Umstellen auf Kunststoffquader diese Gefahr minimiert, aber ohne einen Langzeittest nie ganz ausgeschlossen werden.

Abkürzungsverzeichnis

3D	Drei Dimensional.
CAD	Computer-aided design.
CNC	Computerized Numerical Control.
DIN	Deutsches Instituts für Normung.
E-Book	Elektronisches Buch.
EDV	Elektronische Datenverarbeitung.
FE	Finite Elemente.
FEMM	Finite Element Method Magnetics.
SLA	Stereolithographie.
USB	Universal Serial Bus.

Tabellenverzeichnis

1	Verschiedene Drahtstärken und deren Auswirkung auf die ausübende Kraft bei einer fixen Spannung von 5V (Pinter 2019).	43
2	Parameterwerte für die Simulation des Aktuator FINWE.	58
3	Ergebnisse der Simulation des Aktuators FINWE	60
4	Bewertung des Testlaufs für den Aktuator FINWE	61
5	Parameterwerte für die Simulation des Aktuators EISCONE.	62
6	Simulationsergebnisse des Aktuators EISCONE.	64
7	Drehwahrscheinlichkeit der unterschiedlichen Quader bei verschiedenen Spannungen im Testaufbau EISCONE.	65
8	Parameter für die Simulation des Aktuator SPALTER.	67
9	Drehwahrscheinlichkeit für den Test 1 SPALTER	69
10	Drehwahrscheinlichkeit für den Test 2 SPALTER	70
11	Drehwahrscheinlichkeit im Testaufbau SENIOR	73
12	Vergleich des Stromverbrauches.	75

Abbildungsverzeichnis

1	Schätzung von Menschen mit kompletten oder schweren Sehverlustes in den Jahren 1990-2050 (Bourne u. a. 2017)	7
2	Anordnung der Braille-Punkte.	8
3	Ein Mock-Up des Braille-Ringes von Tetragon (Tremml 2016)	9
4	Der erste von Tetragon gefertigte Prototyp (Busse 2016)	9
5	Die Grundidee eines magnetischen Aktuators	10
6	Schema der genauen Bemaßung der Brailleschrift nach DIN 32976 Norm in [mm] (<i>DIN 32976:2007-08 : Blindenschrift-Anforderung und Maße</i> 2007))	12
7	Wichtigste Buchstaben, Zahlen und Sonderzeichen des Basis-Braille-System (Heuer u. a. 2005)	13
8	In der Vollschrift verwendete Lautgruppenkürzungen (Heuer u. a. 2005)	14
9	Links: Ein stromdurchflossener Leiter erzeugt eine magnetische Flussdichte (<i>Intelligent Mechatronic Systems</i> 2013) Rechts: Die Rechte-Hand-Regel angewandt auf den elektrisch durchflossenen Leiter	15
10	Die Überlappung der Flussdichte zweier parallel in die gleiche Richtung mit Strom durchflossener Leiter (<i>Intelligent Mechatronic Systems</i> 2013)	16
11	Die Feldlinien der magnetischen Flussdichte einer einfachen Spule mit 4 Wicklungen (Demtröder 2004)	16
12	Vergleich der Magnetisierbarkeit von dia-, para- und ferromagnetischen Stoffen. Links: Ferromagnete; Rechts: Dia- und Paramagnete (Demtröder 2004).	18
13	Darstellung eines Toroids welcher gleichmäßig von einer Spule umwickelt ist (Clarke, Fishlock und Worpe 2014).	19
14	Ein magnetisierbares Eisen mit geringem Abstand zu einem Elektromagneten (Clarke, Fishlock und Worpe 2014)	21
15	Darstellung eines vereinfachten, nach rechts abrollenden Braille-Ringes und dem Finger einer Person, die Brailleschrift liest (Busse 2016)	24
16	Darstellung der Blackbox, welche den zur Verfügung stehenden Bereich zur Lösung des mechanischen Problems des Ringes zeigt (Busse 2016)	25
17	Die vier Darstellungsmöglichkeiten durch ein Quaderelement in Abhängigkeit des Drehwinkels (Busse 2016).	26
18	Drei aneinander gereihte Quaderelemente, welche durch ihre Punktkombinationen den Buchstaben „t“ an der Oberseite darstellen (Busse 2016).	27
19	Zwei nebeneinanderliegende Quader und deren Abstände nach Din 32976 (<i>DIN 32976:2007-08 : Blindenschrift-Anforderung und Maße</i> 2007, Busse 2016).	27
20	Mindestabstand zweier aneinanderlegender Quader (Busse 2016)	28
21	Darstellung der Elementverschiebung: Im oberen Bereich haben die Quader einen größeren Abstand zueinander als im unteren Bereich (Busse 2016).	29
22	Darstellung einer Drehung für ein einzelnes Quaderelement auf der Achse	30
23	Schematische Anordnung der Aktuatoren für ein Quaderelement (Busse 2016)	30
24	Starre Führung	31
25	Federgeführtes Element	32
26	Der Drehvorgang eines Quaders mittels gefederten Stifts	32

27	Drei parallel angeordnete Aktuatoren (Busse 2016)	33
28	Schematischer-Querschnitt des Braille-Ringes (Busse 2016).	34
29	Ein in die V-Kerbe gezogener Quader	37
30	Schema eines Aktuators und einem Quader als Größenrelation; Links: Seitenansicht des neuen Aktuators; Rechts: Frontansicht des neuen Aktuators;	38
31	Schiene zur Untersuchung des Kippmechanismus (Ataie 2018)	39
32	Versuchsaufbau für die Testung der Verkippung des Quaders mittels Permanentmagneten (Ataie 2018)	40
33	Eine einfache Balkenwaage mit einem starren Draht als Verlängerung . . .	41
34	Drehung des Quaders bei genügend Gegengewicht	41
35	Simulation des Prototypen-Aktuators (Pinter 2019)	42
36	Einfachere elektromagnetische Formen Pinter 2019	44
37	Links: Simulation eines U-Form Elektromagneten; Rechts: U- Form- Elektromagnet mit abgeschrägten Endkappen (Pinter 2019)	44
38	Simulation mit einem Eckstift anstelle eines ganzen Quaders (Pinter 2019)	45
39	Skizze eines Quaders mit Stiften in den Ecken (Pinter 2019)	46
40	Links: CAD-Modell eines Aktuators mit nach innen verjüngten Seitenwänden und ohne Kerbe; Rechts: CAD-Modell eines Spulenkerns mit Verbindungsstift	47
41	Links: Zeichnung einer Seitenflanke mit Steg in der oberen Hälfte; Rechts: Aktuator mit geradlinigen Seitenflächen ohne Kerbe	48
42	Links: Wickelvorgang auf einen Verbindungsstift; Rechts: Ein Aktuator ohne Kerbe auf den die Wicklungen aufgetragen wurden.	50
43	Zweipoliger Stiftstecker verklebt an der Unterseite des Aktuators.	50
44	Links: Quader mit einem Rundstift in den Ecken; Rechts: Quader mit quadratischen Stiften in den Ecken.	51
45	Vollmetallquader	52
46	3D-Druck-Kuppel	52
47	Kuppel ohne Führung (weiß: Quader, grau: Kuppel, gold: Beilagscheiben) .	53
48	Kuppel mit Führung (weiß: Quader, grau: Kuppel)	54
49	Schlitten zur Spurbreitenermittlung	54
50	Versuchsaufbau: Links: Kuppel ohne Führung; Rechts: Kuppel mit Führung	56
51	Drehbewegung eines Quaders im Testaufbau	56
52	Maßschema FINWE ohne Kerbe	58
53	3D-Simulation des Aktuators FINWE	59
54	Erster Testlauf des Aktuators FINWE und einem Metallquader	60
55	Maßschema des Aktuators EISCONE	61
56	Maßschema des Aktuators EISCONE	62
57	Berechnung mit einer geringeren Wandstärke: links: 0,5mm; rechts: 0,3mm	63
58	Drehung durch den Aktuator SPALTER in Seitenansicht	66
59	Maßschema des Aktuators SPALTER	66
60	Simulation des Aktuators SPALTER	67
61	Position des Aktuators SPALTER in der Kuppel mit Führung.	68
62	Kuppel mit einer Spurbreite von 3,10mm mit eingesetzten Aktuatoren . . .	70
63	Testaufbau für den Prototyp SENIOR mit Vollmetallquadern	71
64	Verkanten des Quaders.	72

65	Verringerte Deckungsfläche.	73
66	Draufsicht auf den Braille-Ring Prototypen von Busse (2016) und Trembl (2016)	85
67	Der Braille-Ring Prototyp von Busse (2016) und Trembl (2016)	85

Literatur

- Allen, Julie D u. a., Hrsg. (2006). *The unicode standard/ the Unicode Consortium*. Unicode Inc. URL: <https://www.unicode.org/history/>.
- American Foundation for the Blind (2020). *200 Years: The Life and Legacy of Lois Braille*. URL: <https://www.afb.org/about-afb/history/online-museums> (besucht am 30.01.2021).
- Ataie, Ali (2018). „Development of a Braille-Display- Magnetic shifting mechanism“. Magisterarb. FH Technikum Wien, S. 32.
- Behling, Klaus (2007). *Richtlinie für taktile Schriften*. Deutscher Blinden- und Sehbehindertenverband e.V., S. 1–11.
- Bourne, Rupert R.A. u. a. (2017). „Magnitude, temporal trends, and projections of the global prevalence of blindness and distance and near vision impairment: a systematic review and meta-analysis“. In: *The Lancet Global Health* 5.9, e888–e897.
- Busse, Dominik (2016). „Konstruktion eines Braille-Displays“. Magisterarb. TU Wien.
- Clarke, Richard A., David J. Fishlock und Eric A. Worpe (2014). *The force produced by a magnetic field The energy in a magnetic field*. URL: <http://info.ee.surrey.ac.uk/Workshop/advice/coils/force.html>.
- David, Meeker (2018). *Finite Element Method Magnetics : ComputationalMagneticsLinks*. URL: <http://www.femm.info/wiki/ComputationalMagneticsLinks>.
- Demtröder, Wolfgang (2004). *Experimentalphysik Elektrizität und Optik*. 4. Auflage. Springer Berlin Heidelberg New York. ISBN: 3-540-33794-6.
- DIN 32976:2007-08 : Blindenschrift-Anforderung und Maße* (Aug. 2007). Berlin.
- Fakoo.de (2020). *8-Punkt-Computer-Braille / Eurobraille*. URL: <http://www.fakoo.de/computerbraille.html> (besucht am 30.01.2021).
- FFG (2020). *Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH*. URL: <https://www.ffg.at/> (besucht am 30.01.2021).
- Heuer, Richard u. a. (2005). *Marburger Systematiken der Blindenschrift- Das System der deutschen Blindenschrift*. Bd. 4. Brailleschriftkommission der deutschsprachigen Länder. ISBN: 3-89642-022-43.
- Hughes, Barry, Arend W.A. Van Gemmert und George E. Stelmach (2011). „Linguistic and perceptual-motor contributions to the kinematic properties of the braille reading finger“. In: *Human Movement Science* 30.4, S. 711–730. ISSN: 01679457. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.humov.2010.05.005>.
- Intelligent Mechatronic Systems* (2013). ISBN: 9781447146278. DOI: 10.1007/978-1-4471-4628-5.
- Jiménez, Javier u. a. (2009). „Biography of louis braille and invention of the braille alphabet“. In: *Survey of ophthalmology* 54.1, S. 142–149.
- Organization, World Health (2012). *Global Data on Visual Impairment 2010*. World Health Organization. URL: www.who.int.
- Pinter, Bernhard (2019). *Tetragon magnetic field simulation*. Techn. Ber. Austrian Audio, S. 1–12.
- Schmitt, Franz-Josef (2020). *Magnetische Sättigung*. URL: <https://www.supermagnete.at/magnetismus/magnetsaettigung> (besucht am 30.01.2021).
- Treml, Michael (2016). „Grobkonzeption und Steuerung eines Brailledisplays mit gruppierten Punkten“. Magisterarb. TU Wien.

A Anhang

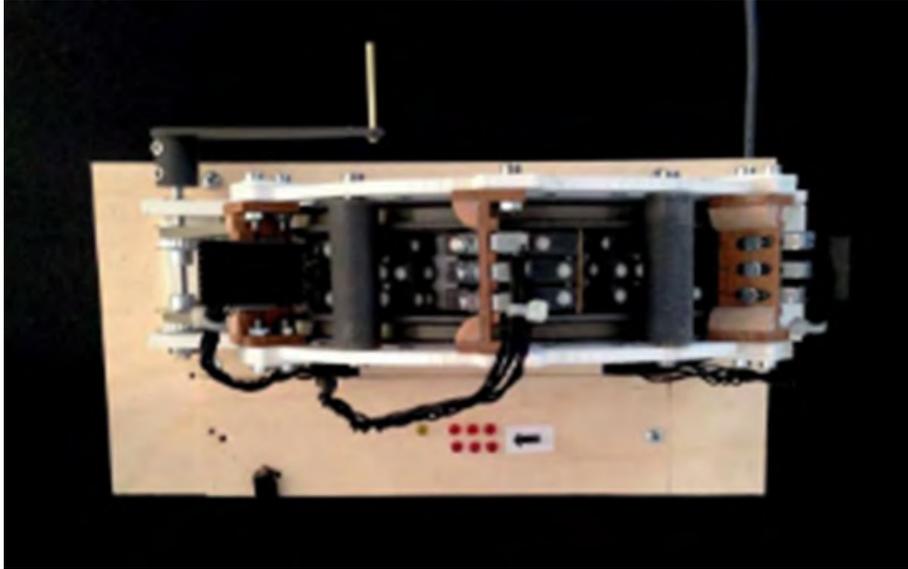


Abb. 66: Draufsicht auf den Braille-Ring Prototypen von Busse (2016) und Treml (2016)

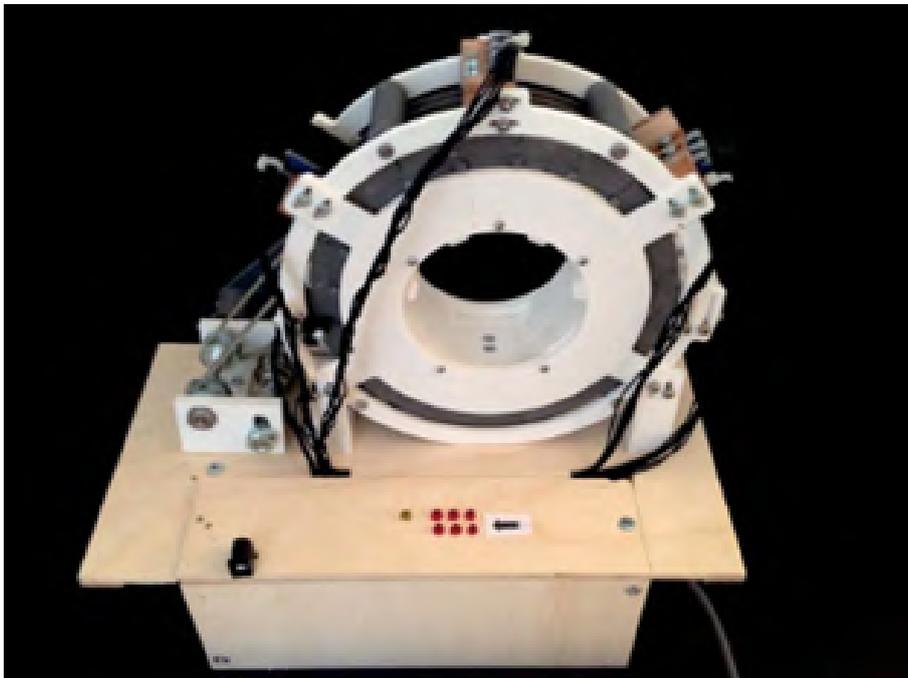


Abb. 67: Der Braille-Ring Prototyp von Busse (2016) und Treml (2016)

B Anhang

Auf den folgenden Seiten befindet sich der Report von Austrian Audio, welcher durch Pinter (2019) erstellt wurde.

Report			
Description: Tetragon magnetic field simulation			
Document Owner: Bernhard Pinter	Revision: 1.0	Last Date Changed: 07.06.2019	Page 1 of 12



REPORT by Austrian Audio

Revision History

Issue	Date	Handled by	Comment
1.0	07.06.2019	Bernhard Pinter	



Contents

1	Task definition.....	3
2	First simulations.....	3
2.1	Simulation with coil A.....	4
2.2	Simulation with coil B.....	5
2.3	Simulation with coil C.....	5
3	Optimization	6
4	Alternative option.....	7
4.1	2 coils	7
5	Existing yoke with more power.....	9
6	Option with modified cube	10
7	Supplier of coils.....	11
8	Conclusion.....	11



1 Task definition

Target was to do a first evaluation of the existing magnet-system of the TETRAGON actuator in FEMM 4.2.

Dxf data was provided by TETRAGON team. Target force on the actuator cube should be between 8-15mN on the edge (this means around 55E-6Nm).

The assignment was to do the simulation model and some first quick optimizations.

The FEMM model should be handed over to the TETRAGON team for further investigations.

2 First simulations

The dxf was converted into the right scale factor and loaded in FEMM.

A coil was dimensioned with a 0.1mm magnet wire (copper). The inner diameter is according to drawings 4.1mm, the height is max. 6.5mm and the outer diameter is according drawings 8mm.

Three coils were calculated with an input voltage of 5V. For a comparison approximately the same outer diameter of 7mm was taken.

The distance to the cube was chosen to 0.5mm.

The depth was chosen to 4mm (half the cube size, this means this is the force if the cube is half over the yoke).

! All these results are approximation because it is a 2D model and an absolute torque force is hard to calculate. It gives a good tool to see relative figures and if the magnet system is into saturation.

Coil dimensions:

Coil	Nominal d	Material	di	Wire length	Height	Layer	Wdg/Lay	da	Imp	U	I
	[mm]		[mm]	[m]	[mm]			[mm]	[Ohm]	[V]	[A]
A	0.08	Cu	4.1	20	6.5	16	72	7	68	5	0.07
B	0.1	Cu	4.1	11.7	6.41	12	57	6.8	25	5	0.2
C	0.16	Cu	4.1	4.6	6.4	8	32	7.3	3.9	5	1.28



2.1 Simulation with coil A

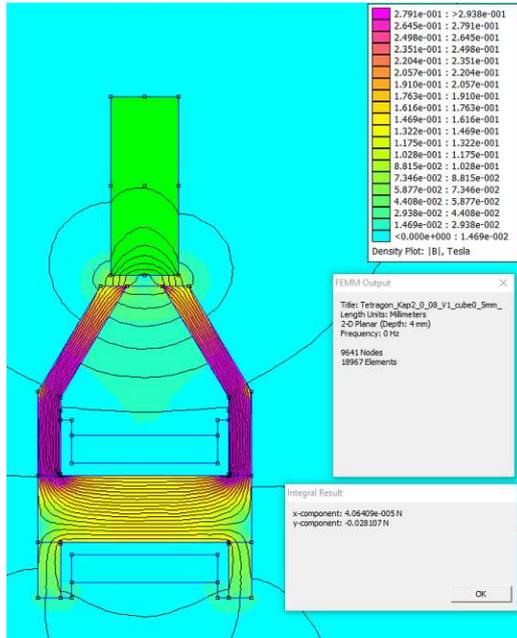


Fig. 2.1. Simulation of existing yoke with coil A at a distance of 0.5mm.

In Fig. 2.1 you see the plot of the magnetic flux. It shows a force of around 28mN on the cube at a distance of 0.5mm. With this coil and power there is no saturation in the yoke.

By reducing the distance of the cube to 0.01mm (touching with coated steel) the force rises to 5.8N. Even there is no saturation.

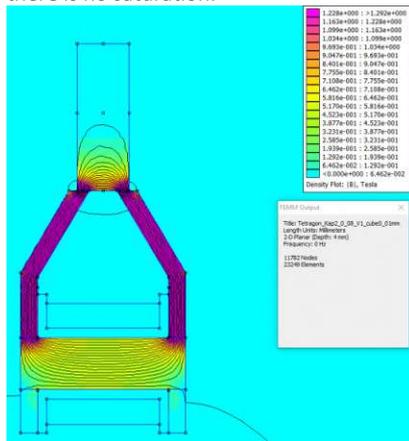


Fig. 2.2. Simulation of existing yoke with coil A at a distance of 0.01mm.



2.2 Simulation with coil B

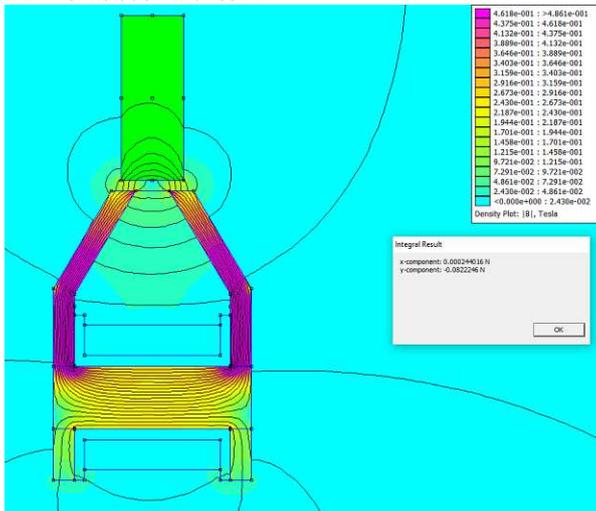


Fig. 2.3. Simulation of existing yoke with coil B at a distance of 0.5mm.

With this coil B at 5V of course the flux and force are higher due to more power. Force is around 82mN and no saturation is in the yoke.

2.3 Simulation with coil C

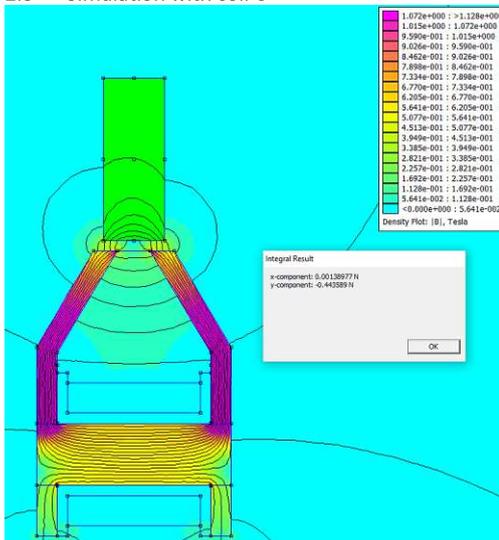


Fig. 2.4. Simulation of existing yoke with coil C at a distance of 0.5mm.

With this coil C at 5V of course the flux and force are higher due to more power. Force is around 444mN and still no saturation is in the yoke.



3 Optimization

All optimizations are done with coil B at 0.2A.

First recommendation is to leave the coil carrier and mount the coil direct to the yoke. So the coil inner diameter stays at 4.1mm and the bolt was made thicker. To compare results the height of the coil was not changed. So still coil B was used.

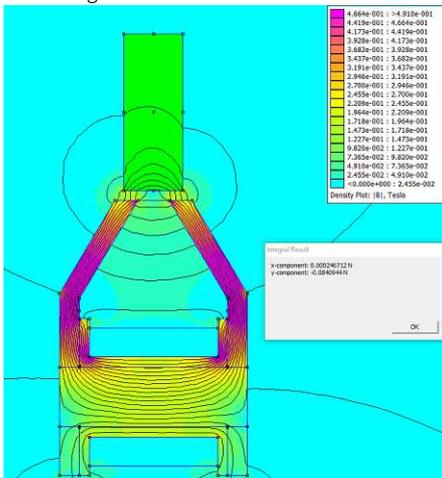


Fig. 3.1. Simulation of mod yoke with coil B at a distance of 0.5mm without coil carrier. The force is now a little higher compared to Fig. 2.3 (84mN instead of 82mN)

Now the lower part of the yoke was removed to see the influence

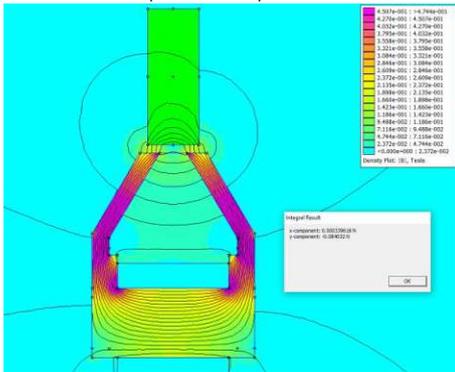


Fig. 3.2. Simulation of mod yoke with coil B at a distance of 0.5mm without coil carrier and lower yoke. There is no big influence.



4 Alternative option

To investigate if a simple solution also will be ok a coil with a simple steel core was simulated. Again the same coil B was used at 0.2A.

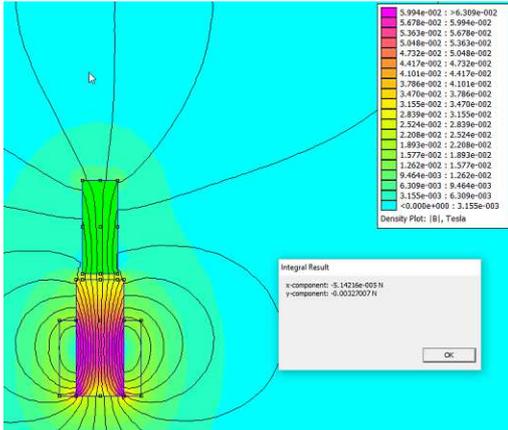


Fig. 4.1. Simulation of an alternative solution.

This alternative shows that it is not recommended even this would be very cheap. Only 3mN of force is generated. But if it shows that low force is enough, or the distance could be reduced this would be a cheap option. Another disadvantage of this system is high stray field.

4.1 2 coils

To save costs maybe two coils on a simple yoke would be better. 2 coils B were driven parallel (so 0.2A each coil).



Fig. 4.2. Simulation of an alternative solution.

Here you get (of course with the double of the power) around 77mN.

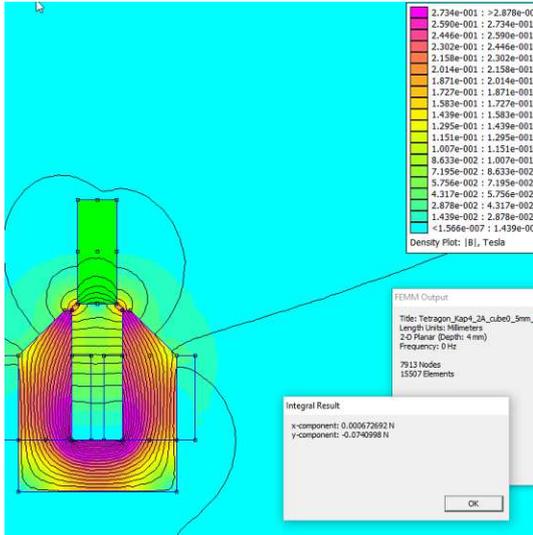


Fig. 4.3. Simulation of an alternative solution.

In Fig. 4.3 you see an additional modification which doesn't get more force.

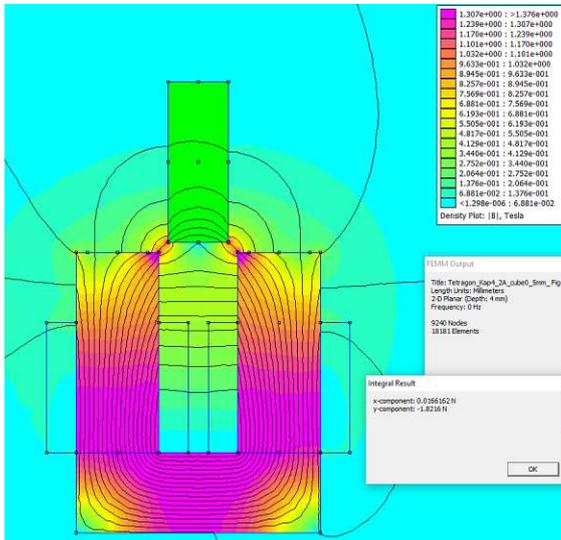


Fig. 4.4. Simulation of an alternative solution with 1A input current.

The advantage of this system would be that you can drive it with much more power without getting into saturation. With 1A (each coil) you can get 1.8N



5 Existing yoke with more power

Coil B is now driven with 1 ampere.

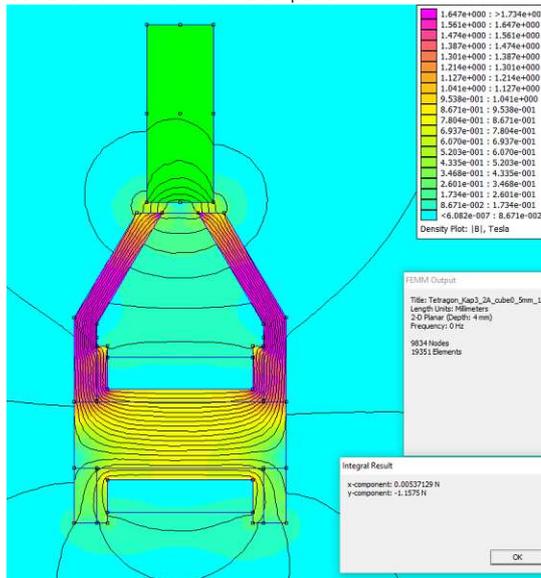


Fig. 5.1. Simulation of existing solution with 1A input current.
Here you can get 1.16N but the yoke is at saturation limit.

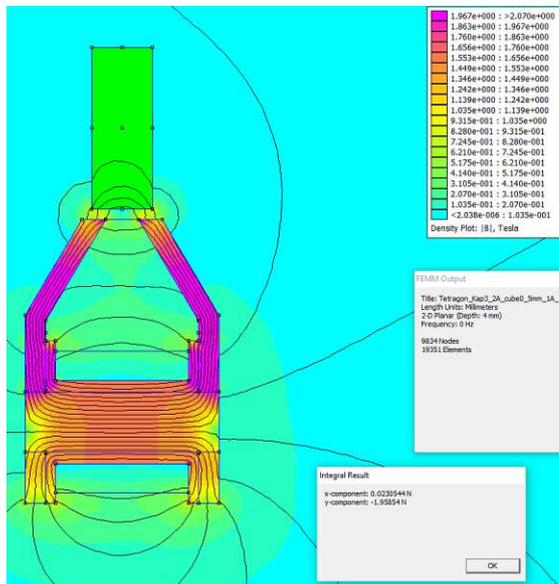


Fig. 5.2. Simulation of existing solution with 3A input current.
Here you can see the magnetic flux with 3A input but you loose power due to the saturation. Force would be 1.96N.

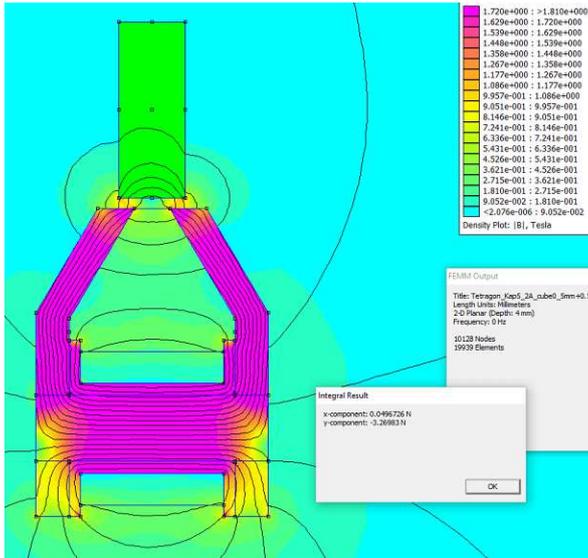


Fig. 5.3. Simulation of existing solution with 0.5mm yoke thickness with 3A input current.

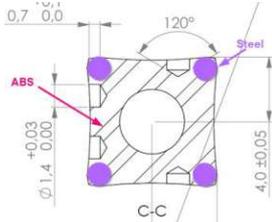
In Fig. 5.3 the yoke wall thickness was increased about 0.5mm. Now with the same input power as in Fig. 5.2 the force rises to 3.3N.

6 Option with modified cube

It seems that a cube out of steel will be very expensive.

Maybe an ABS cube with steel bolt inserts will be cheaper and the force is concentrated on the edges which gives a good torque force. These bolts could be very cheap standard part (<math><0.03\text{EUR}</math>) (https://eu.shop.bossard.com/at/de/10221/stifte-niete-keile/zylanderstifte/bn-1208_zylanderstifte-un-gehaertet).

! Surface of course should be protected against corrosion or some magnetic INOX should be used.



Simulation was done with 1mm depth (simulating a bolt of around $d=1\text{mm}$) and 0.2A with coil B.

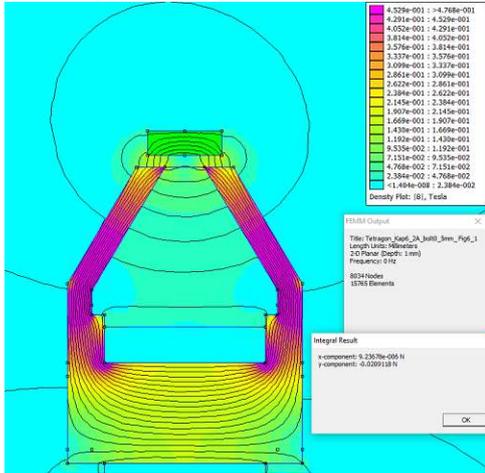


Fig. 6.1. Simulation of existing solution with modified cube and 0.2A input voltage. With 0.2A there is a force of around 21mN on the bolt. This is of course lower than with the cube full out of steel, but the torque force could be enough.

7 Supplier of coils

It should be a self-bonding copper coil. Important are the dimensions and not the impedance or inductance. Also, low MOQ are important.

Research show following possible suppliers.

https://www.alibaba.com/product-detail/SELF-BONDING-ENAMELLED-VOICE-COIL-WIRE_60614721428.html?spm=a2700.7724838.2017115.73.376e29b0E5cPIV&s=p

https://www.alibaba.com/product-detail/Small-Speaker-Voice-Coils-for-Ear-phone_60056649758.html?spm=a2700.7724857.normalList.6.c777373evSoDEk&s=p

https://www.alibaba.com/product-detail/RX-Inductance-Coil-rf-Air-Core_60545991656.html?spm=a2700.7724838.2017115.150.6623542cAfXpPO

8 Conclusion

Maybe a thicker yoke should be used to get more headroom even if these simulations show that it could work.

It seems that this system (especially the cube and yoke) has high costs. Recommendation is to use standard parts or plastic parts (for the cube). Suggestion is that all steel parts at least should have a standard



coating against corrosion. Where parts are handles the recommendation is to make a good coating and a salt spray test or at least a palm perspiration test.

Bernhard Pinter
+43 676 847 490 201
bernhard.pinter@austrianaudio.com