



OSTBAYERISCHE  
TECHNISCHE HOCHSCHULE  
REGENSBURG



# MASTERARBEIT

Tamara Szecsey

## Entwicklung eines magneto-aktiven Schuhwerks für den humanoiden NAO Roboter zur Verbesserung der Gangstabilität

Fakultät: Elektro- und Informationstechnik  
Studiengang: Master Electrical- and Microsystem Engineering  
Abgabefrist: 31. März 2021  
Betreuung: Prof. Dr. Gareth Monkman  
Zweitbegutachtung: Prof. Dr. Bernhard Hopfensperger

## **Erklärung**

1. Mir ist bekannt, dass dieses Exemplar der Masterarbeit als Prüfungsleistung in das Eigentum der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg übergeht.
2. Ich erkläre hiermit, dass ich diese Masterarbeit selbstständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

---

Ort, Datum und Unterschrift

Vorgelegt durch: Tamara Szecsey  
Matrikelnummer: 3140789  
Studiengang: Master Electrical- and Microsystem Engineering  
Bearbeitungszeitraum: 1. Juni 2020 – 31. März 2021  
Betreuung: Prof. Dr. Gareth Monkman  
Zweitbegutachtung: Prof. Dr. Bernhard Hopfensperger

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Theoretischer Hintergrund</b>	<b>2</b>
2.1 Aufbau des NAO . . . . .	2
2.2 Verwendete Software . . . . .	6
2.3 Magneto-aktive Polymere . . . . .	8
2.4 Carbonyleisenpulver . . . . .	9
<b>3 Versuchsaufbau</b>	<b>10</b>
3.1 Schuhkonstruktion . . . . .	10
3.2 Herstellung des MAP . . . . .	11
3.3 Laufstegkonstruktion . . . . .	12
<b>4 Versuchsdurchführung</b>	<b>14</b>
<b>5 Auswertung und Interpretation</b>	<b>17</b>
5.1 Gleichgewichtssensoren . . . . .	17
5.2 Sensoren der Aktoren . . . . .	22
<b>6 Fazit und Ausblick</b>	<b>28</b>
<b>7 Anhang</b>	<b>29</b>

# 1 Einleitung

In der Robotik werden seit je her Roboter gebaut, die dem Menschen ähnlich sehen, und damit auf zwei Beinen laufen. Diese Gangart ist jedoch deutlich instabiler, als insektenähnliche Roboter oder Konstrukte mit 4 oder mehr Rädern. Dennoch ist es durchaus sinnvoll humanoide Roboter zu entwickeln und verbessern, da sie erstens mit der für Menschen gemachten Umwelt besser zurecht kommen und zum anderen eine verbesserte, menschliche Interaktion ermöglichen.

Magneto-aktive Polymere (MAP) sind Stoffe, die auf magnetische Felder reagieren und wurden in der Robotik zumeist in Greifern oder als Teilkomponente von Softrobotern verwendet. Das Material kam bisher auf der Lauffläche bei zweibeinigen Robotern nicht zum Einsatz und könnte flexiblere Oberflächenanpassung ermöglichen.

Diese Arbeit handeln von der Konstruktion eines Schuhs, welcher an die Stelle der Schuhunterseite des humanoiden NAO Roboters angebracht werden kann und eine Sohle aus MAP hält. Ziel ist es hierbei, eine erhöhte Stabilität des zweibeinigen Roboters durch das Anlegen eines magnetischen Feldes bei einer Gangart ohne Rückkopplungsschleife zu erreichen.

Durch die Analyse der Gleichgewichtssensoren des NAO wird gezeigt, dass durch den Einsatz von Magneten unter dem Laufgrund der Roboter stabiler läuft, wenn MAP Sohlen eingesetzt werden. Außerdem wird die MAP Sohle, welche gewichtsmäßig dem Originalschuh am nächsten kommt, gleichzeitig sich als stabilsten Schuh herausstellen.

Zunächst wird im theoretischen Hintergrund in Kapitel 2 auf die Grundlagen der vorhandenen Materialien und Software eingegangen. Dies beginnt mit den Aufbau des NAO Roboter und geht dann über in die verwendete Software bei der sowohl die Robotersoftware als auch die für die Erstellung der Konstruktionen im Folgekapitel und für die Auswertung nötigen Programme vorgestellt werden. Schließlich wird die Definition und Eigenschaften von magneto-aktiven Polymeren erklärt, welche als Sohle für den NAO Roboter eingesetzt werden. Diese Erklärungen basieren auf einem Buch von Pelteret und Steinmann [1], welches für weiterführende Lektüre empfehlenswert ist. Danach wird noch kurz auf die Eigenschaften von Carbonyleisenpulver eingegangen, welche in dem MAP eingebettet werden.

In dem Kapitel 3 werden die für diese Arbeit konstruierten und hergestellten Konstruktionen vorgestellt. Dies beginnt mit einem Teil von NAOs Schuh, welcher durch ein 3D gedrucktes Gestell ersetzt wird. Weiterhin wird erklärt, wie die Herstellung der MAP Sohle vollzogen wird und schließlich geht es um die Laufstegkonstruktion, welche als Untergrund für die Gangdurchläufe des NAO verwendet wird.

Die Versuchsdurchführung, Kapitel 4, gibt einen Einblick der tatsächlichen Konstrukte aus Kapitel 2 und 3 sowie über den Ablauf von der Herstellung bis zur Messung. Außerdem wird hier detailliert auf den Messvorgang eingegangen.

Schließlich werden die Messergebnisse in Kapitel 5 aufgearbeitet wiedergeben und interpretiert.

## 2 Theoretischer Hintergrund

### 2.1 Aufbau des NAO

NAO ist ein 574 mm großer, humanoider Roboter (siehe Abb. 1) ursprünglich entwickelt von dem französischen Unternehmen Aldeberan Robotics, welche 2015 von Softbank Group aufgekauft [3] und in Softbank Robotics umbenannt wurde. Während NAO's große Schwester Pepper mit ihren 1,20 m mit einem Tablet und Rollen statt Beinen ausgestattet ist [4], gibt es NAO in verschiedenen Ausführungen, sowohl ab der Hüfte aufwärts als auch mit Beinen. Es handelt sich hier um Roboter, die unter anderem Kindern und Jugendlichen die Robotik näher bringen sollen und der Vorführung von Mensch-Roboter Interaktionen dienen. NAO bietet außerdem die Gelegenheit zweibeinige Robotersysteme zu studieren und ist bereits in psychologischen Studien verwendet worden [5].



Abb. 1. NAO V6 [2]

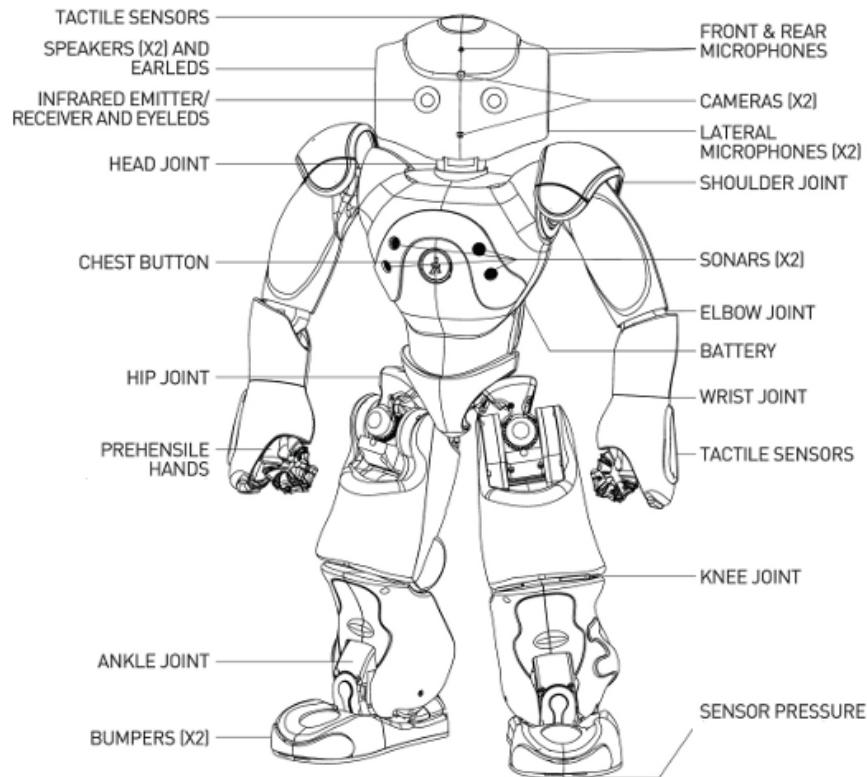
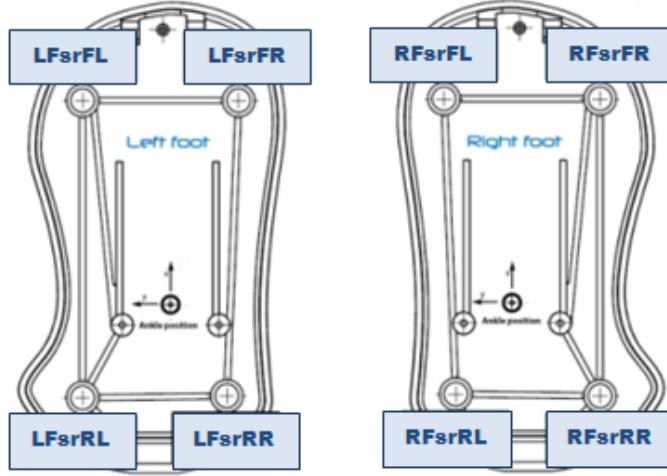


Abb. 2. Sensorenüberblick des NAO-H25 Version 6 [6, in /H25]



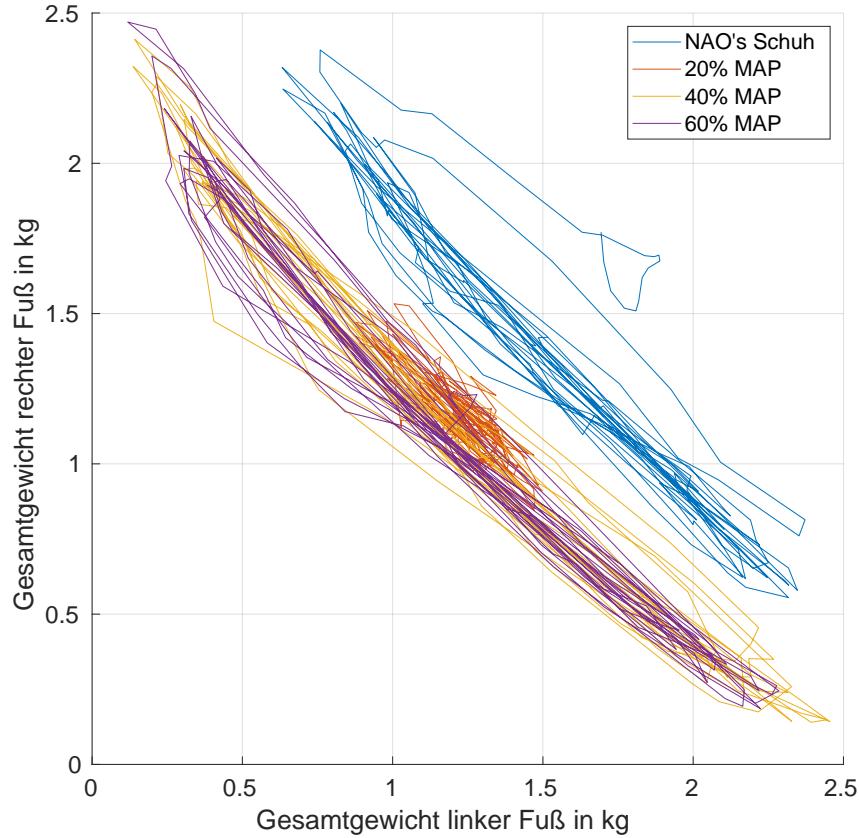
**Abb. 3.** Drucksensoren und deren Bezeichnung in den Füßen von NAO [2, in /Technical overview/FSRs]

Das hier verwendete Modell ist NAO-H25 Version 6, dessen Sensoren in Abb. 2 zu sehen sind. Im Unterschied zu anderen Ausführungen besitzt NAO-H25 Drucksensoren an Händen und Fußsohlen. Er gehört zu den kommerziellen Robotern deren Gelenke positionsbasierenden sind [7], hat 25 Freiheitsgrade und wiegt 5,4 kg. Über die an der Brust angebrachten Sonar Sensoren, die Kameras oberhalb und unterhalb der Augen LEDs, die vorder- und rückseitigen Mikrofone, den Stoßfängern an den Füßen sowie den KontaktSENSOREN an Händen und Kopf kann der NAO mit seiner Umwelt vielseitig interagieren. Jedes Gelenk ist mit Sensoren für die Winkelmessung, den Stromverbrauch und die Temperaturmessung ausgerüstet. In seiner Brust befindet sich außerdem ein Gyroskop. Auf die in dieser Arbeit verwendeten Messausgaben wird im Folgenden genauer eingegangen.

### Druckempfindlicher Widerstand

An den Fußsohlen des NAO befinden sich pro Fuß vier sogenannte *Force Sensitive Resistors* (FSR), zu sehen in Abb. 3. Diese ändern ihren Widerstand sobald Druck ausgeübt wird und messen im Bereich von 0 bis 25 N.

Die Ausgaben der Sensoren sind im Dateiverzeichnis des NAO hinterlegt und können jederzeit ausgelesen werden. Dies geschieht hier über dasselbe Pythonprogramm, welches ebenfalls die Bewegung steuert, näheres dazu in Kap. 2.2 und im Anhang 7. Des Weiteren können der berechnete zweidimensionale Massenschwerpunkt und das Gesamtgewicht ausgegeben werden. Diese Werte sind allerdings unzuverlässig, sobald wenig oder kein Gewicht auf den Sensoren lastet. In [8] haben Shayan et al. die eingebauten FSR mit barometrischen Drucksensoren verglichen und sind zu dem Schluss gekommen, dass die Sensoren, welche im NAO verbaut wurden, nicht sehr aussagekräftig sind. Deshalb werden hier die Ausgaben kritisch betrachtet, sowie die Balance des Roboters zusätzlich mit dem Gyroskop erfasst.



**Abb. 4.** Berechnetes Gesamtgewicht der Messungen für die normalen Sohlen von NAO in blau und dem Silikon versetzt mit Eisenpartikeln in 20%, 40% und 60% Anteilen. Das Gewicht wird in kg ausgegeben.

Eine weitere Einschränkung der Messungen ist die Kraftverteilung auf die FSRs. Denn in dem ursprünglichen unteren Teil des Schuhs liegt der obere Teil ausschließlich auf den Sensoren und auf den Verbindungszyllindern für die Schrauben auf. Dies ist für die Einlegesohlen aus Silikon bzw. MAP nicht der Fall, zu sehen in den Kapiteln 3.1 und folgende. Dies führt dazu, dass das Gewicht nicht mehr akkurat aufgenommen wird, siehe Abb. 4. Hier wird deutlich, dass sich die Messung des Gewichtes etwa um 0,5 kg von den NAO Schuhsohlen abweicht.

### Aktoren und Sensoren der Beinen

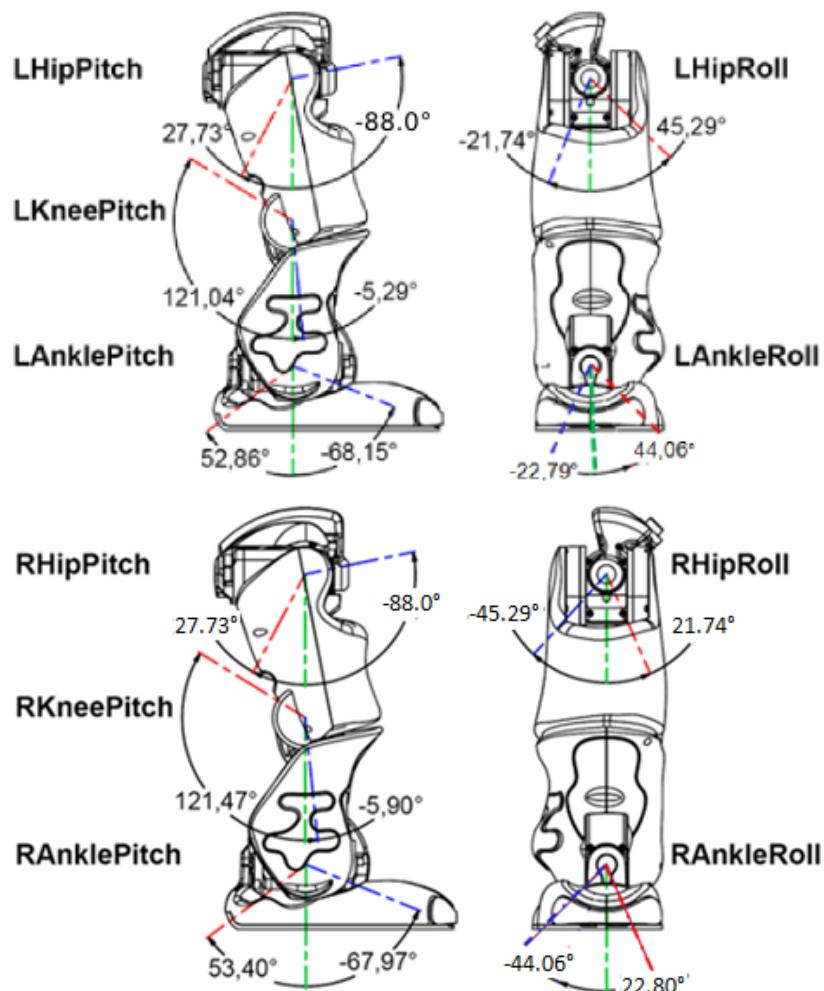
Neben dem für diese Arbeit uninteressanten Bumper Sensoren und den bereits beschriebenen Drucksensoren hat NAO eine Ausgabe für jeden eingebauten Aktor mit den Werten:

- .../Position/Actuator/Value (Pos/Act)
- .../Position/Sensor/Value (Pos/Sens)
- .../ElectricCurrent/Sensor/Value (Current)

- .../Temperature/Sensor/Value
- .../Hardness/Actuator/Value
- .../Temperature/Sensor/Status

Hierbei unterscheiden sich die Pfade bei „...“ je nach Aktor. Die Bezeichnungen in Klammern dahinter dienen der abkürzenden Benennung für spätere Kapitel. Der Effekt der Sohlen auf die Aktoren wurde mit AnkleRoll und AnklePitch zu sehen in Abb. 5 aufgenommen.

Die Temperaturausgaben sowie die Starrheit der Motoren liefern keine verwertbaren Messausgaben, da sich beide während einer Messung nicht oder kaum ändern. Pos/Act und Pos/Sens geben ähnliche Werte in rad aus, da ersteres die Ausgabe des Programms vorgibt und zweiteres den tatsächlich gemessenen Wert an dem Gelenk ausgibt. Der Current



**Abb. 5.** Das obere Bild zeigt Vorder- und Seitenansicht der Positionen und möglichen Winkel des linken Beins. Die untere Abbildung veranschaulicht dieselben Parameter für das rechte Bein. [2, in /kinematics-data/joints]

Wert wird in Ampère gemessen und gibt an, wie viel Strom für das Erreichen der entsprechenden Aktorposition und Starrheit aufgewendet werden muss. Dies bedeutet, dass dieser Wert unter anderem eine Aussage über den Zustand des Aktors geben kann.

Bei den Probegängen des NAO stellte sich heraus, dass er in einer Kurve nach links läuft bei einem Befehl, der ihn hätte gerade aus laufen lassen sollen. Softbank Robotics betonte, dass es nicht möglich ist, dass NAO komplett gerade läuft. Grund dafür ist zum einen, dass die Motoren nicht immer komplett identisch hergestellt sind. Zum anderen ist der Gehbefehl, welcher hier ausgeführt wird, ohne Rückkopplungsschleife für Einwirkungen der Umgebung ausgestattet. Näheres zur Software wird in Kapitel 2.2 beschrieben.

## Gyroskop

Der NAO Roboter verfügt über eine Inertialeinheit, welche sich zusammensetzt aus den 3 Achsen des Gyrometers, im einer Achsengeschwindigkeit von bis zu  $500^\circ/\text{s}$ , sowie den 3 Achsen des Beschleunigungssensors, mit einer Beschleunigung bis zu  $2\text{ g}$  [2, /Technical overview/Inertial unit]. Die Z-Achse des Gyroskops, welche die Höhenorientierung des Roboters anzeigen würde, ist allerdings noch nicht verfügbar. Außerdem wird durch diese beiden Sensoren der Winkel des Torsos bestimmt.

## 2.2 Verwendete Software

### Die Rahmenumgebung NAOqi

NAOqi wird die Hauptsoftware genannt, welche auf diesem Roboter sowie auf Pepper läuft, das Betriebssystem NAOqi OS basiert auf Linux. Der NAOqi Rahmen ist eine plattformübergreifende und sprachenübergreifende Umgebung, mithilfe derer Anwendungen für den NAO erstellt werden können. Sie kann über Windows, MacOS und Linux verwendet werden und es werden die Sprachen Python und C++ unterstützt, wobei letzteres direkt auf dem NAO kompiliert werden kann, während C++ komplizierter benutzt wird, aber mehr Eingriffe erlaubt. [9, /Former NAOqi Framework/Key concepts]

Außerdem gibt es eine Desktop Anwendung namens Choregraphe in der Dialoge und Verhaltensmuster erstellt werden können ohne Code schreiben zu müssen. Hierüber ist der Akkustand und aktuelle Position in Form eines virtuellen Bildes des tatsächlichen NAO einsehbar, sowie der autonome Zustand ein- und ausschaltbar. [9, /Choregraphe Suite/What is Choregraphe]

Für die in dieser Masterarbeit benötigten Anwendungen war Python am besten geeignet. Erforderlich waren eine sich wiederholende Schrittabfolge sowie die Aufzeichnung diverser bereits im NAO verbauten Sensoren. Text verarbeitende Funktionen sind in dieser Sprache leicht zu erhalten und anzupassen. Es wurde sich für den `moveTo()` Befehl als Fortbewegungsmethode entschieden, denn dieser wird durch das Objekt `post` zu einem sogenannten *non-blocking call*. Dies ermöglicht das Aufrufen von weiteren Befehlen zeitgleich zur Bewegung. Der Nachteil ist, dass der Gang dadurch unbeaufsichtigt vorstatten geht, d.h. NAO

kann seine Schritte nicht seiner Umgebung anpassen. Die aufgezeichneten Daten werden in eine csv Datei übertragen und mit Matlab ausgewertet. Im Anhang ist der gesamte Programmcode 1 abgebildet, welcher auf dem NAO ausgeführt wird.

## Konstruktionssoftware

Das CAD-Programm Inventor von Autodesk ist für 3D Konstruktionen ausgelegt und bietet einige nützliche Simulationserweiterungen, welche unter anderem einen Shape Generator enthält [10]. Dieser kann Flächen minimieren während die Stabilität erhalten bleibt, sodass ein minimaler Anteil an Material verwendet wird [11].

Für die Herstellung der Prototypen und Gussformen wurde das FDM (fused deposition modeling) 3D Druckverfahren mit PLA oder PETG Filamenten von filamentworld [12] verwendet und für die Vorbereitung auf den Druck der Slicer Cura von Ultimaker [13].

## Datenauswertung mit Matlab

Für die Auswertung wurden neben der gewöhnlichen `plot` Funktion von Matlab [14] auch die *Statistics and Machine Learning Toolbox* mit deskriptiver Statistik und Visualisierung verwendet [15]. Eine Messreihe ergibt sich aus 40 Messungswiederholungen, in denen NAO etwa einen Meter zurücklegt. Jede Auswertung enthält das arithmetische Mittel eines Sensors von allen Messungen der Messreihe. Diese Mittel wurden mit dem Befehl `mean()` berechnet und mit Werten aus weiteren Messreihen, mit anderem Schuh oder anderen Untergrundvoraussetzungen aber gleicher Schrittänge und Sensorenmessung verglichen. Dieser Vergleich wurde mit den Funktionen `hist` und `scatterhist` der genannten Toolbox angestellt. Ersteres erstellt ein Histogramm und ist damit optimal für eine Häufigkeitsverteilung. Zweiteres erstellt einen aus zwei Vektoren resultierenden Scatterplot sowie zwei Histogramme, welche die Häufigkeitsverteilung der jeweiligen Vektoren darstellen. Dies ermöglicht eine umfangreiche Verteilungsanalyse für Sensorausgaben, die sich aus zwei Achsen zusammensetzen, wie z.B. der 2 dimensionalen Gyroskop Ausgabe.

Das arithmetische Mittel berechnet Matlab durch [16, S.50]

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

und wurde auf eine Messreihe angewendet. Die Darstellung der Verteilungen per Histogramm wurde ergänzt durch ein gleitendes Histogramm, errechnet durch den Kern-Dichteschätzer [16, S.93]

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right), \quad x \in \mathbb{R} \quad (2)$$

mit dem Gauss-Kern [16, S.93],

$$K(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}u^2\right), \quad u \in \mathbb{R} \quad (3)$$

welcher in Matlab mit 'Kernel' und dann standardmäßig mit 'normal' in der `fitdist()` Funktion aufgerufen wird [17] [18]. Das Scatterhistogramm ermöglicht dieselbe Verwendung dieser Distribution. Bei den in dieser Arbeit verwendeten Graphen ist zu beachten, dass die jeweilige x bzw. y Komponente mit einer Häufigkeitsskala ausgestattet ist, welche sich auf das Histogramm bezieht. Das bedeutet, die Häufigkeit, welche auf der jeweiligen y-Achse der Wahrscheinlichkeitsdichten neben den Scatterplots angezeigt wird, hängt von den Histogrammbalkenbreite, d.h. von der Breite der x-Achse ab, die wiederum von der Breite des Scatterplots abhängt.

Schließlich wurde für eine Veranschaulichung der Verteilung der Dichtefunktionen die Halbwertsbreiten für das Gyroskop, den Beschleunigungssensor und die Winkelangabe berechnet mit:

$$|x_1 - x_2|, \quad \text{für } f(x_1) = f(x_2) = \frac{1}{2}f(x_{\max}). \quad (4)$$

## 2.3 Magneto-aktive Polymere

Der Begriff Magneto-Aktive Polymere (MAP) gehört zur Gruppe der intelligenten, auf magnetische Felder ansprechende Materialien, welche typischerweise Kombinationen aus einer weichen Polymermatrix und darin eingebetteten, magnetischen Partikeln sind. Diese Partikel werden während dem Vernetzungsprozess des Polymers in dieses eingebettet.

Die wesentlichen Verhaltensweisen, die MAP in der heutigen Zeit attraktiv für seine Verwendung macht, wurde bereits in den 80er Jahren von Rigbi und Jilken [19] sowie Rigbi und Mark [20] beschrieben. Ein Jahrzehnt später wurde eine genauere Analyse zum ersten Mal von Ginder und Jolly et al. [21] veröffentlicht. Diese aus mehreren Komponenten bestehenden Materialien stechen durch zwei Schlüsseleigenschaften heraus. Zum einen das magnetostriktive Verhalten, bei dem es sich um das Phänomen der Verformung eines Materials handelt, welches durch ein Magnetfeld hervorgerufen wird [22]. Zum anderen die veränderbaren Materialeigenschaften wie Elastizität und Dämpfungsfaktor, welche hauptsächlich mit der Mikrostruktur des Grundlagenmaterials zusammenhängen. [23] [24]

Außerdem ist entscheidend, wie die magnetischen Partikel in das Polymer eingebettet werden. Je nachdem ob während des Vernetzungsprozesses ein Magnetfeld wirkt, können sich die Partikel kettenförmig ausrichten und dadurch dem MAP eine anisotropisches Verhalten zuführen. Isotropisches MAP hingegen enthält keine gerichteten Partikel. Diese verschiedenen Ausrichtungsarten und Herstellungsarten können sowohl die Steifigkeit verändern, als auch bestimmen, ob das MAP in einem Magnetfeld ausgedehnt oder zusammengedrückt wird.

Weiche, mit einem Feld manipulierbare, Polymere haben diverse Anwendungsbereiche in akademischen und industriellen Bereichen. Angefangen von anpassungsfähiger Vibrationsabsorption in der Luftfahrt und Automobilindustrie durch das Einsetzen durch Scherung [25] [26], Windung [27] und Kompression bzw. Elongation [28] und Vibrationsisolatoren [29] sowie Sensoren [29] [22], Ventile und Aktoren [30] [31] und anpassungsfähige, sandwichartige Strukturen [32] [33] [34] bis hin zur Anwendung in der Bionik wie zum Beispiel

durch Mikro- und Nanoroboter und Schwimmroboter [35] [36] [37] [38], Schlauchradpumpen [39] und Erschütterungsdämpfer [40].

Des Weiteren wird die Verhärtung bei Anlegen eines Magnetfeldes für Greifer genutzt [41], ebenso wird der 3D Druck von magneto-aktiven Polymeren [42] bereits erforscht.

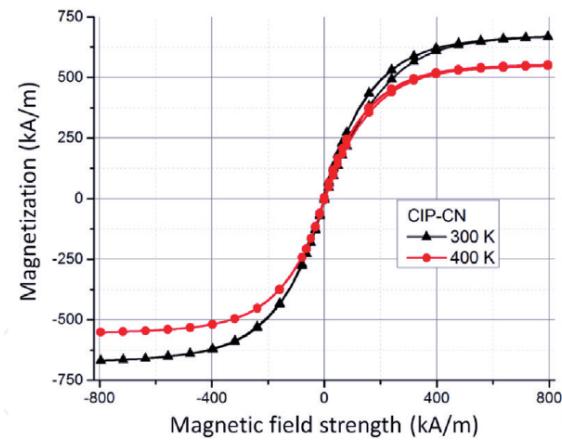
## 2.4 Carbonyleisenpulver

Bei den in dieser Arbeit verwendeten magnetischen Partikel für die Herstellung des MAP handelt es sich um das von BASF vor über 85 Jahren entdeckte Carbonyleisenpulver (engl. *carbonyl iron powder*), CIP) [44]. Es wird durch thermische Zersetzung von Eisenpentacarbonyl hergestellt und besteht aus Teilchen in einer Größenordnung von 5 bis  $1\text{ }\mu\text{m}$ .

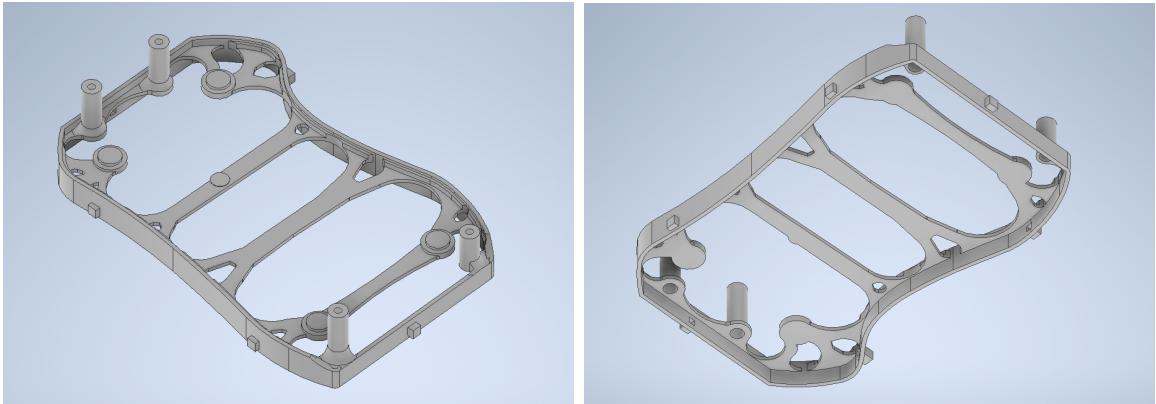
Die magnetischen Eigenschaften dieses Materials lassen sich durch die Suszeptibilität [45, Gleichung (2)]

$$\chi = \frac{3\chi_p}{3 + \chi_p} \varphi \quad (5)$$

mit  $\chi_p$  als Suszeptibilität der einzelnen Teilchen und einem Partikel Volumen  $\varphi$  welches sehr viel kleiner als 1 ist, beschreiben. CIP zählt zu den ferromagnetisch weichen Materialien, was sich durch Untersuchungen der Hysteresekurve veranschaulichen lässt, wie zum Beispiel von Liu u.a. [43] zu sehen in Abb. 6



**Abb. 6.** Hysteresekurve von CIP entnommen aus [43, Abb.4]



**Abb. 7.** Linker Schuh in Autodesk Inventor, *Links von Oben, Rechts von Unten*.

### 3 Versuchsaufbau

In diesem Kapitel wird auf alle selbstkonstruierten Komponenten eingegangen, welche für die Messungen benötigt wurden. Zum einen gibt es eine Schuhkonstruktion, die es erlaubt, die in einer Gussform angefertigten MAP Sohlen einzuhängen, zum anderen wurde ein Laufsteg mit Rampenfunktion entworfen, welcher es erlaubt, Magnete unter die Lauffläche zu montieren.

#### 3.1 Schuhkonstruktion

Die Hülle eines Fußes von NAO besteht aus einem zweiteiligen Oberteil, welches das Fußgelenk abschließt und einem unteren Teil, welcher mit 4 Schrauben angebracht wird. Ohne Schraubenbefestigung liegt der Fuß nicht fest an. Die in Kapitel 2.1 beschriebenen vier Drucksensoren liegen dabei in dem unteren Teil auf Erhöhungen auf. Um die Auswirkungen anderer Sohlen für NAO messen zu können, muss der untere Teil des Fußes ausgetauscht werden. Dieser „Schuh“ welcher die ursprüngliche Fußsohle ersetzt, enthält wiederum einen Steckplatz für die MAP Sohlen in verschiedenen Stärkegraden.

Zur Formabnahme wurden sowohl die obere als auch die untere Hülle des Fußes von NAO 3D gescannt und in Polygonnetzformat (engl. *mesh*) bei Autodesk Inventor eingespeist. Somit konnten alle Maße direkt abgenommen und eingehalten werden.

In Abb. 7 sind links die vier flachen Zylinder zu sehen, auf denen die Drucksensoren aufliegen. Die vier Zylinder an den Seiten sind die Führung der Schrauben, welche an das obere Teil des Fußes von NAO geschraubt werden. Die Außenform umschließt den oberen Teil während eine zweite Erhöhung, welche an den Innenseiten verläuft, auf dem Rand des oberen Teils aufsitzt, sodass die Passform fest ineinander greift. Da das gesamte Gewicht des NAO auf den 4 Drucksensoren lastet, kann Druckmaterial für die restliche Gesamtfläche bis auf stabilitätserhaltende Streben eingespart werden. Diese Form wurde mit dem Shape Generator von Autodesk Inventor generiert, sodass sie längs bis zu einem  $45^\circ$  Winkel ohne zu brechen gebogen werden kann. Die instabilsten Stellen sind die Zylinder der Schraubvorrichtung, welche durch Fillets verstärkt wurden. Diese Instabilität ist auf den

schichtweise Druckvorgang durch das FDM Verfahren geschuldet und kann durch kleinere Schichthöhen ausgeglichen werden.

Die Unterseite, zu sehen in Abb. 7 rechts, ist ein Hohlraum für die MAP Sohle zusammen mit den viereckigen Steckeinlässen für die Halterung. Die Seiten des Schuhs sind so hoch, dass das MAP etwa 1 mm herausragt. Andernfalls würde NAO auf der Schuhkante laufen und nicht auf dem MAP.

### 3.2 Herstellung des MAP

Der Herstellungsprozess allein dauert nicht mehr als eine halbe Stunde. Zunächst muss das Verhältnis für den Anteil des CIPs bestimmt werden. Die Masse ergibt sich aus

$$m_{CIP} = \frac{Ratio_{CIP}[\%]}{100\%} \cdot m_{ges}, \quad (6)$$

Die beiden additiven Komponenten A und B, welche auch als Basis und Katalysator bezeichnet werden, sind im Verhältnis 1:1 zu mischen. Das Volumen in ml ergibt sich aus:

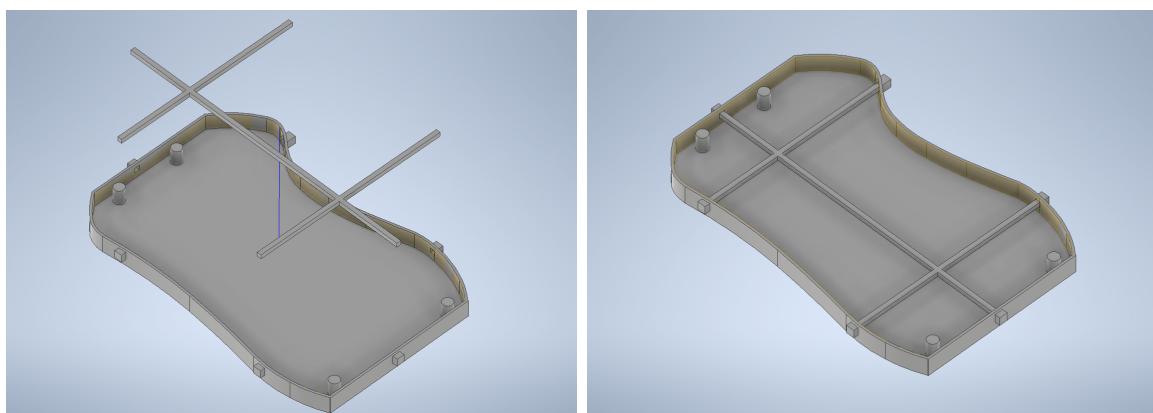
$$V_A = \frac{m_A}{\rho_A}, \quad V_B = \frac{m_B}{\rho_B} \quad (7)$$

mit  $\rho_A = 1,071$  sowie  $\rho_B = 1,046$  sowie

$$m_A = \left(1 - \frac{Ratio_{CIP}[\%]}{100\%}\right) \cdot \frac{m_{ges}}{\alpha + \beta} \cdot \alpha, \quad m_B = \left(1 - \frac{Ratio_{CIP}[\%]}{100\%}\right) \cdot \frac{m_{ges}}{\alpha + \beta} \cdot \beta, \quad (8)$$

Die Platzhalter  $\alpha$  und  $\beta$  stehen für das Mischverhältnis der jeweiligen Komponenten und sind hier Beide gleich 1, sodass die Formeln vereinfacht werden können in:

$$m_A = \left(1 - \frac{Ratio_{CIP}[\%]}{100\%}\right) \cdot \frac{m_{ges}}{2}, \quad m_B = \left(1 - \frac{Ratio_{CIP}[\%]}{100\%}\right) \cdot \frac{m_{ges}}{2}. \quad (9)$$



**Abb. 8.** Gussform der MAP Sohlen. *Links* ist die Innenhalterung herausgenommen. *Rechts* ist sie eingespannt in den sechs Eckhalterungen.

Mit der Laborwaage ABT 120-5DM von Kern wird  $m_{CIP}$  in einem Becher abgemessen. Mit den Spritzen lassen sich  $V_A$  und  $V_B$  auf die ersten Nachkommastelle genau beifügen. Es handelt sich um SF13 2k-Silikon vom Hersteller Silikon Fabrik. Der Becherinhalt wird dann mit einem kleinen Mixstab gemischt, um eine gleichmäßige Verteilung der beiden Komponenten zu erreichen und somit eine optimale Vernetzung zu gewährleisten. Anschließend wird die Probe in einen Exsikkator gestellt, welcher mit einer Vakuumpumpe entgast wird, sodass das Silikon entgast ist. Schließlich kann das bis dahin noch flüssige MAP in die Gussform gegossen werden, nach spätestens einem Tag ist die Sohle dann komplett vernetzt.

Da Silikon selbst sich nur sehr schlecht durch etwaige Klebstoffe nach der Vernetzung verkleben lässt wird hier wie in Abb. 8 zu sehen ist, eine 2 mm dicke Stangenkonstruktion eingehängt, welche bis auf die 6 Enden mit MAP umschlossen wird. Dieses aus PLA gedruckte Konstrukt ist flexibel und kann deshalb durch Verbiegen in die Verankerungen gedrückt werden. Nach der vollständigen Vernetzung kann die Sohle aus der Form entnommen und in den Schuh aus dem vorherigen Kapitel eingesetzt werden.

Die vier Zylinder dienen als Platzhalter um die sechs Ecken in der Halterung des Schuhs für einen besseren Halt festzukleben und dann durch die Löcher des MAPs die Schrauben lockern zu können.

Das Silikon selbst hat eine zu große Haftung, v.a. durch die Fläche des Schuhs. Deshalb wird es vor der Messung mit Speisestärke eingedeckt, was eine Bodenhaftung ähnlich der Plastiksohle des Originalschuhs von NAO zur Folge hat. Dies verhindert außerdem ungewollte Adhäsion.

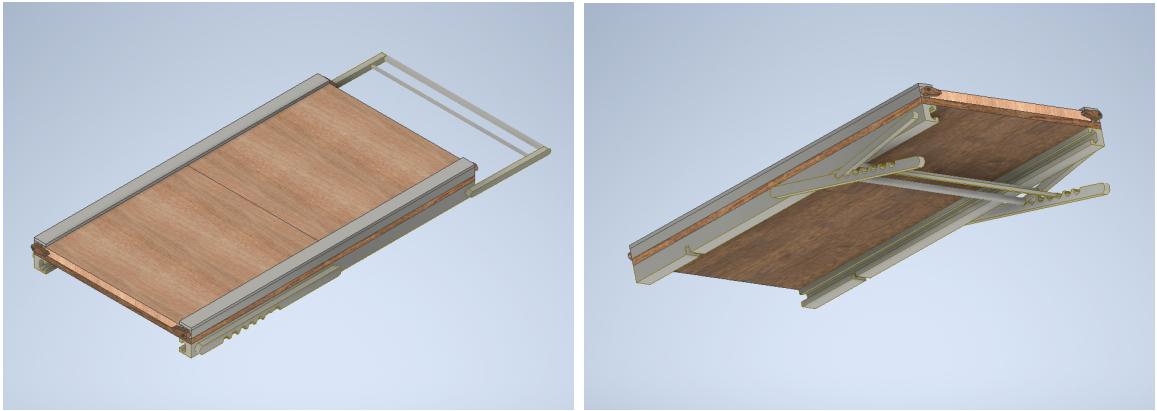
### 3.3 Laufstegkonstruktion

Der NAO Roboter ist für den Einsatz auf geraden Bodenflächen im Innenbereich ausgelegt wobei er bei einem Bewegungsablauf ohne Anpassung an die Umwelt wie mit dem Befehl `moveTo()` durch Rutschen nicht immer die gleiche Strecke zurücklegt. Um wiederholbare Messreihen garantieren zu können ist eine Teststrecke von Nöten. Des Weiteren sind verschiedene, flache Untergründe für eine Sohlenentwicklung interessant. Außerdem kann auf das MAP nur Einfluss genommen werden, wenn ein magnetisches Feld angelegt wird. Deshalb wurde ein Laufsteg mit einem Hohlraum angefertigt, um unter der Fläche, auf der NAO läuft, Magneten anzubringen.

Der Laufsteg besteht aus einer  $120 \times 66,4$  cm großen Pressholzplatte, die auf der Oberseite mit einem Aluminiumkonstrukt erweitert ist, welches die Einschubplatten von beiden Längsseiten und nach oben hin abschließt, Abb. 10 links. Auf den kurzen Seiten verriegeln jeweils zwei drehbare Keile den Einschub, so dass die Platten eingeschlossen werden, Abb. 9.



**Abb. 9.** Seitenansicht der Rampe mit einer Breite von 66,4 cm.



**Abb. 10.** Laufstegrampenkonstruktion mit zwei austauschbaren Platten und einer Winkelverstellung mit Raste. *Links:* Sicht von schräg oben mit eingeklappter Winkelverstellung. *Rechts:* Sicht von schräg unten mit niedrigster Winkeleinstellung.

Auf der Unterseite sind an den Längsseiten zwei mit T-Nut versehene Aluminiumstangen angebracht, sowie eine zweiteilige Stangenkonstruktion, die eine Winkelverstellung mit Raste erlaubt, zu sehen in Abb. 10 rechts. Die einstellbaren Winkel betragen ca.  $5^\circ$  bis  $17^\circ$ , oder es wird für  $0^\circ$  vollständig eingeklappt.

Man hat NAO bereits schräge Flächen gehen lassen wie in [46]. Dies erfordert einen komplett anderen Gang und wäre über den zeitlichen Rahmen dieser Arbeit hinausgegangen. Die Neodymmagnete, die verwendet wurden, haben eine Haftkraft von ca. 16 kg, eine Maße von  $40 \times 40 \times 4$  mm [47] und wurden an die Unterseite der Rampe geschraubt. Die ersten Versuche ergaben schließlich, dass das MAP nur bei einem Abstand ohne Einlageplatten reagierte. Deshalb wurden in den gesamten Messungen ohne diese Platten durchgeführt.

## 4 Versuchsdurchführung



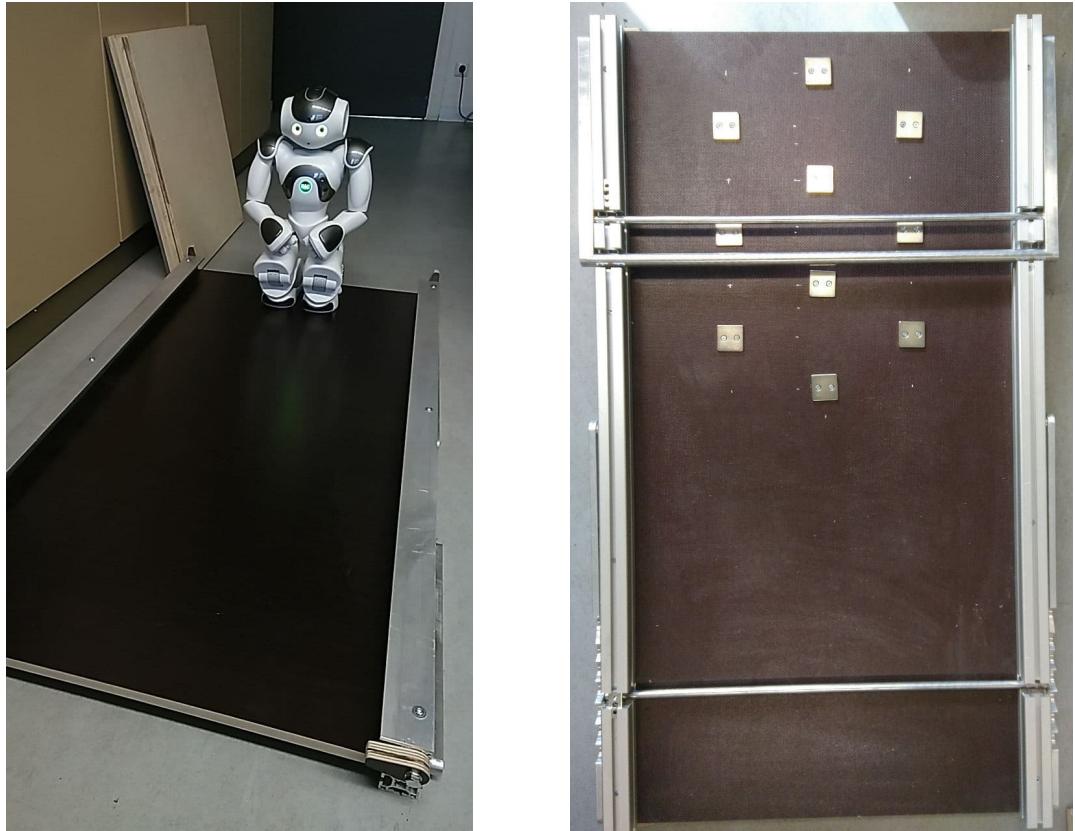
**Abb. 11.** Links: Der in Abb. 7 in Autodesk Inventor erstellte Schuh aus PETG befestigt an der Unterseite des Fußes von NAO. Rechts: Die aus der Gussform aus Abb. 8 entnommene Sohle mit 20 % MAP Anteil befestigt in dem aus PETG gedruckten Schuh.

Bereits in den vorherigen Kapiteln wurde auf die Durchführung dieses Versuchs eingegangen. Im Folgenden wird über den Ablauf und einige Problematiken gesprochen, welche sich während dem Herstellungs- und Laufprozess herauskristallisierten.

Wie bereits in Kapitel 3.2 beschrieben, wird zunächst das MAP hergestellt und anschließend in die Formen gegossen. Während der Vermengung wurde festgestellt, dass bei 60 % gem. MAP die Durchmischung nicht gewährleistet werden kann, solang der verwendete Becher über die Hälfte voll ist. Deshalb wurden in diesem Fall zwei identische Proben hergestellt, welche erst in der Form zusammengegossen wurden. Alle anderen Proben mussten nach der Durchmischung in zwei separate Becher umverteilt werden, da während der Entgasung das Gemisch an Volumen bis zu einer Druckabnahme von etwa 15 mbar zunimmt. Dies hat zur Folge, dass der Becher nur etwa halb voll sein darf, damit das MAP nicht „überkocht“.

Nach spätestens 24 Stunden ist das Silikon vollständig ausgehärtet und kann aus der Form gelöst werden. Aufgrund der Einhängevorrichtung musste die Gussform hierbei aufgebrochen werden, um die nur 2 mm dicken Stangen nicht abzubrechen oder aus dem MAP zu reißen. Zudem verkeilt sich das Silikon in den Unebenheiten des 3D Drucks, sodass selbst mithilfe von Silikonöl, welches vor dem Gießen in die Form gegeben werden kann, sich das MAP nur schwer lösen lässt.

Um nun die Sohlen an dem Roboter anzubringen, wird zuerst der aus PETG bestehende Schuh angebracht, zu sehen in Abb. 11 links. Im Unterschied zu dem Originalteil ist dieser größtenteils offen und besitzt kein Gegenstück des Magneten unter der zweiten Strebe, welcher bei der Montage hilft. Anschließend wird die MAP Sohle durch Verbiegen und Druck eingehängt und schließt dadurch den Schuh ab, siehe Abb. 11 rechts. Nun ist der Roboter bereit für das Testen des Gangs.



**Abb. 12.** *Links:* Der NAO Roboter steht im Ruhezustand an der Startposition auf der Rampe ohne Einlageplatten (an der Wand links neben NAO). *Rechts:* Rampenunterseite mit befestigten Neodymmagneten.

Zunächst wurde der Laufsteg ohne Magneten verwendet. Erst nach der erfolgreichen Messung aller Sohlen, d.h. mit höchstens einem Sturz pro Messreihe, wurden die Magneten wie in Abb. 12 rechts zu sehen, angebracht.

Zu Beginn jeder Messung wird NAO in hockender Position aufgestellt, Abb. 12 links. Dies ist seine Ruheposition, in der er gestartet wird und in die er bei dem Herunterfahren zurückkehrt. Der autonome Modus muss in Choregraphe (siehe Kapitel 2.2) bei Start ausgeschaltet werden, andernfalls würde NAO sich sofort aufstellen, sich leicht bewegen und bei Gesichtserkennung mit Spracherkennung beginnen und antworten.

Sowohl über Lan als auch Wlan lässt sich über SSH eine Verbindung zu NAO herstellen. Um das Gleichgewicht besser messen zu können wurde Wlan genutzt. Über die Shell wurde das Programm 1 (siehe Anhang) ausgeführt. Der Roboter steht zuerst auf, wobei seine Beine hierbei in einer schiebenden Bewegung zur Seite gedrückt werden. Dies hat zur Folge, dass bereits hier der Schuh zerstört wird, wenn die Sohlen nicht rutschen können. Anschließend wird die Messung begonnen während NAO den vorgefertigten Gang ausführt.

Für jede Messabfrage benötigt der Roboter eine Verarbeitungszeit, das bedeutet, dass die Dauer eines Abfragendurchlaufs, also der Abfrage aller erwünschten Werte, an die Anzahl der Ausgaben gekoppelt ist. In den im folgenden Kapitel ausgewerteten Abfragen wurden

insgesamt 24 unterschiedliche Sensorenausgaben eingeholt. Damit NAO hierbei etwa einen Meter Strecke zurücklegt, werden 220 Durchläufe dieser Abfragen durchgeführt (zu erkennen in der For-Schleife von Code 1). Schlussendlich nimmt NAO erneut die hockende Position ein und kann wieder an den Anfang des Laufstegs getragen werden.

Anfangs war die Stabilität mit MAP Sohlen nicht gewährleistet. Dies lag zum einen daran, dass das Silikon am Boden durch Adhäsion festklebte. Dadurch wurde entweder die Sohle aus der Verankerung gerissen, NAO verlor das Gleichgewicht oder die Schuhe brachen. Dies wurde durch die bereits genannte Speisestärke verbessert. Ein weiteres Problem waren die Zylinder, welche den Schuh durch Schrauben an der Oberseite befestigen. Diese brachen meist auf Höhe der Querstreben, wodurch NAO sehr instabil wurde. Durch eine Verstärkung dieser Stellen in Autodesk konnte auch diese Schwachstelle eliminiert werden.

Die Schräglagefunktion der Rampe wurde nicht genutzt. Grund hierfür ist eine sehr differenzierte Herangehensweise des Gangs, die erforderlich wäre, damit NAO laufen kann, siehe auch [46].

Zur besseren Vergleichbarkeit wurden schließlich die Sohle von NAO und alle angebrachten Teile gewogen. Hierbei ergab sich, dass die Originalsohle um über 30 g leichter ist, als der leichteste Schuh, zu sehen in Tabelle 1. Ein höherer CIP Anteil hat nicht nur zur Folge, dass das MAP an Festigkeit zunimmt, sondern trägt auch erheblich zu dem Gesamtgewicht bei.

**Tabelle 1.** Gemessenes Gewicht des Originalschuhs und des Ersatzes zur Verwendung von MAP als Lauuntergrund.

Gewogenenes Bauteil	Gewicht
Originalschuhteil	61 g
PETG Schuhgerüst	16 g
MAP mit 20% CIP	88 g
MAP mit 40% CIP	107,5 g
Sohle mit 60% MAP	182 g

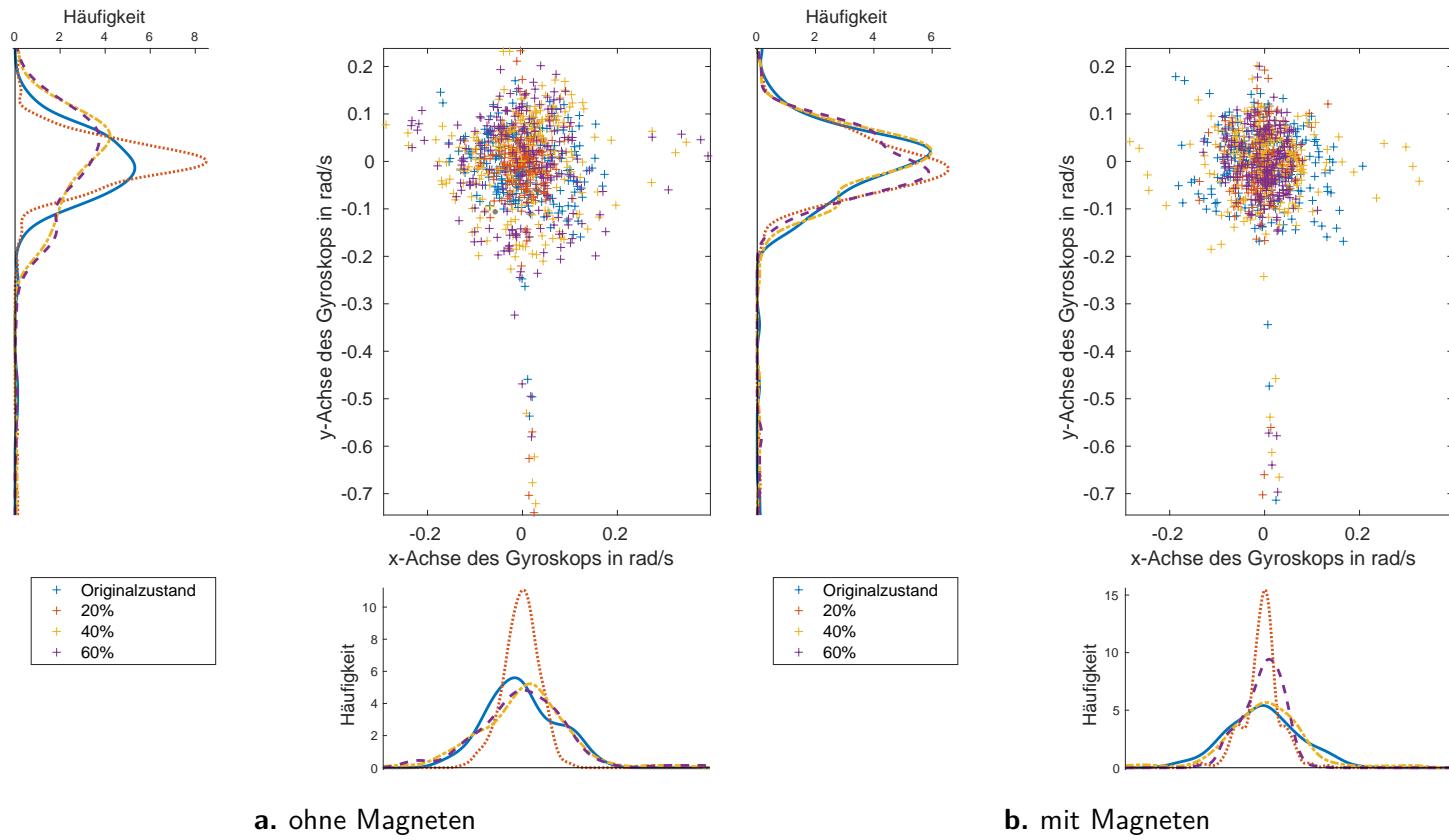
# 5 Auswertung und Interpretation

In diesem Kapitel werden die aufgenommenen Messungen ausgewertet und deren Bedeutung graphisch analysiert. Hierbei werden die Aufnahmen von zwei dimensionalen Ausgaben, welche das Gleichgewicht des Roboters widerspiegeln und die Werte der Aktoren in den Gelenken unterschieden.

## 5.1 Gleichgewichtssensoren

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, werden zwei dimensionale Ausgaben, wie die x- und y-Ausgabe des Gyroskops, in einem Scatterhistogramm dargestellt, welches es ermöglicht, die DichteVerteilung einzusehen.

In Abb. 13 sind die Aufnahmen des Gyroskops zu erkennen. Jede Ausgabe besteht aus 220 Punkten, da dies die Anzahl der Messdurchläufe pro Lauf sind. Jeder Wert wurde durch das arithmetische Mittel aus Gleichung (1) aller Messpunkte zu diesem Zeitpunkt ermittelt. Der Graph 13a ist die Ausgabe für die Messungen ohne Magneten an der Rampenunterseite, in 13b ist die für die Messungen mit Magneten. Die jeweils zwei errechneten DichteVerteilung



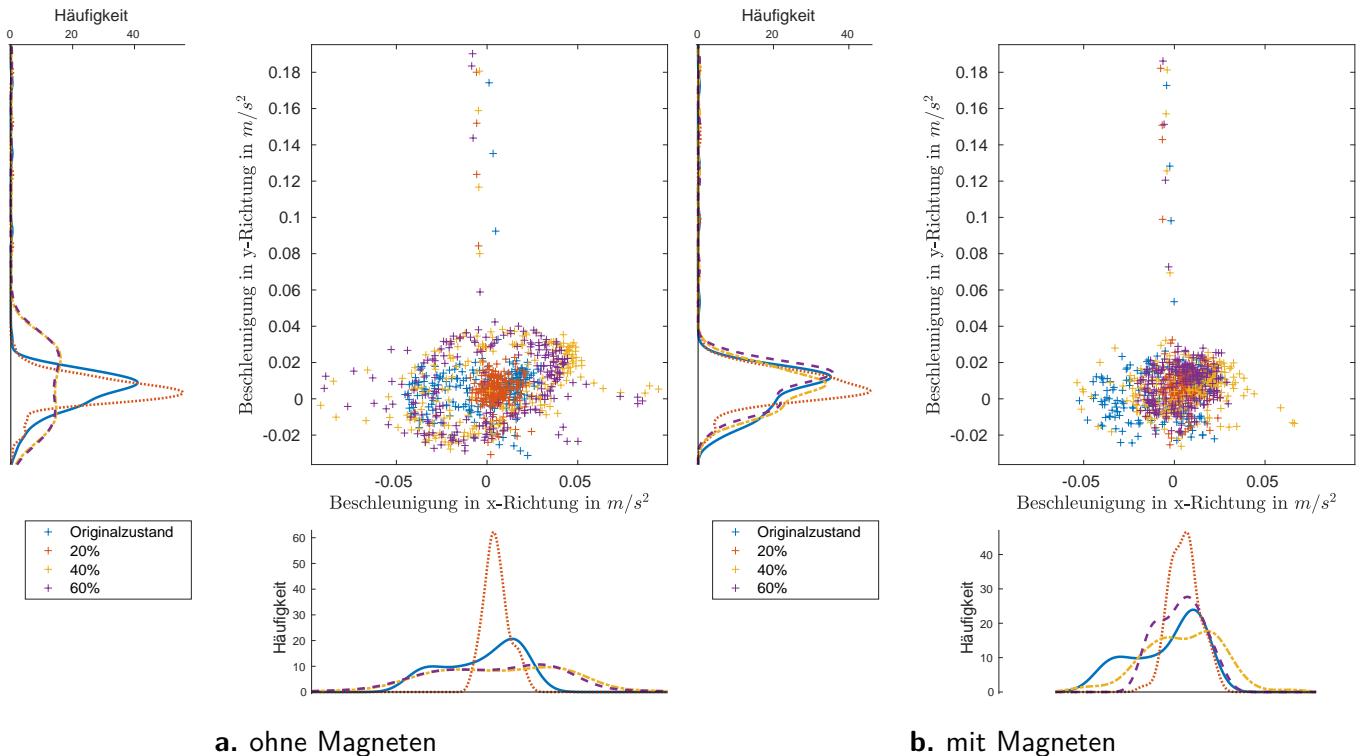
**Abb. 13.** Ausgabe des Gyroskops, x-Achse auf y-Achse mit jeweiliger Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

am linken und am unteren Rand des Hauptplots spiegeln die Verteilung des Scatterplots eindimensional wider. Die vereinzelten Punkte unterhalb von  $-0,3 \text{ rad/s}$  sind dem Beginn der Messung geschuldet, während derer NAO sich in aufrechtem Stand befindet. Sobald der Roboter die laufende Haltung einnimmt, wird der Torso deshalb relativ schnell bewegt. Dies wird während der restlichen Aufnahmen nur passieren, wenn NAO umfällt.

Bei einem stabilen Gang würde man erwarten, dass die Geschwindigkeit, in der sich der Torso bewegt, gering bleibt. Dies bedeutet, je mehr Ausschwankungen zu sehen sind, desto instabiler läuft dieser Roboter und desto eher würde er das Gleichgewicht verlieren.

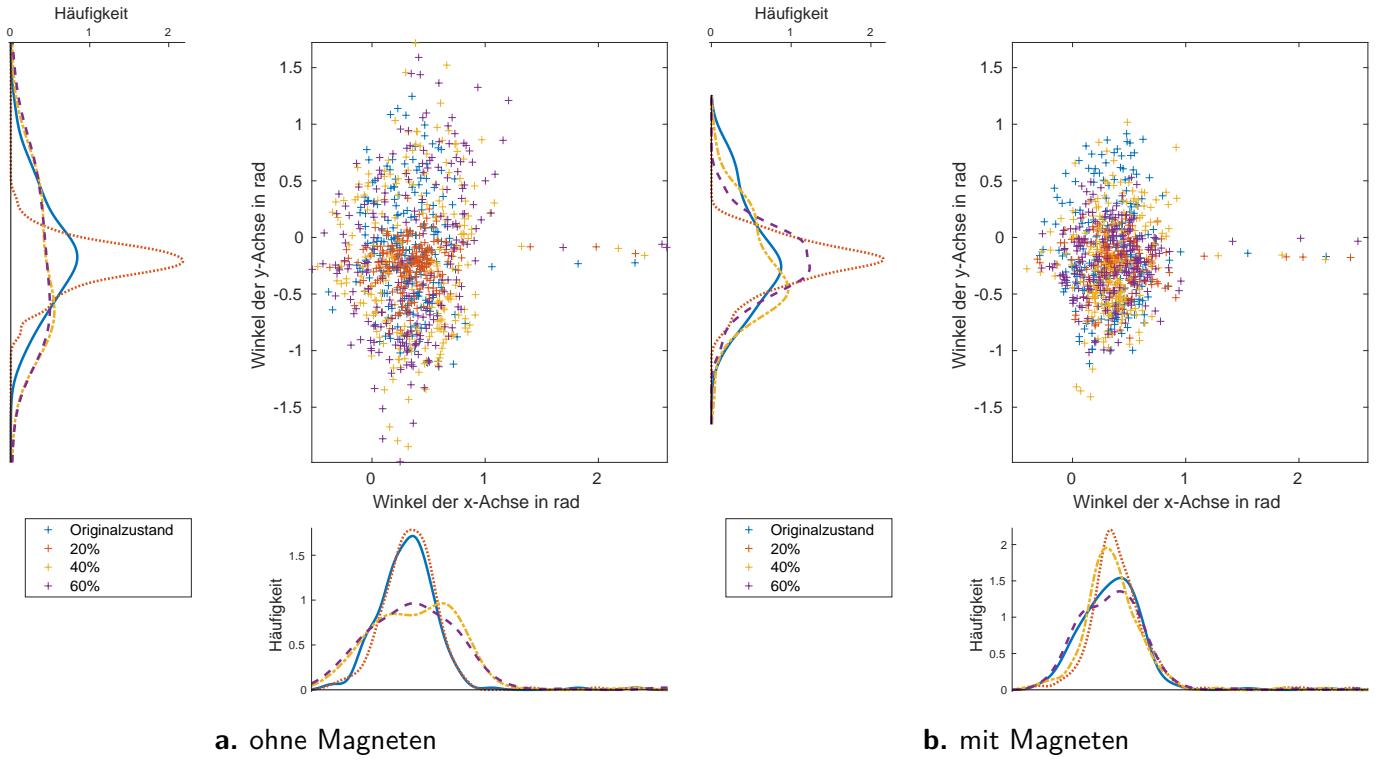
In Abb. 13 ist eine Tendenz von stabiler werdendem Gang von ohne Magneten zu mit Magneten zu erkennen. Allerdings fällt dies auch für den Originalschuh auf, welcher kein MAP enthält. Grund hierfür könnte der etwa 1 cm breite Magnet sein, welcher den unteren Teil des Schuhs in Stellung hält, bevor die Schrauben zur Befestigung verwendet werden.

Des Weiteren heben sich die Sohlen mit 20 % CIP Anteil besonders hervor. Durch die Magneten erfahren sie ebenfalls eine minimale Verbesserung. Hierbei sollte erwähnt werden, dass diese Sohle mit der gedruckten Halterung dem Gewicht der Originalsohle am nächsten kommt und dadurch die Stabilität vielleicht besser gewährleistet ist. Die stärkste Auswirkung sowohl für die x- als auch die y-Achse gab es für 60 % CIP Anteil. Dies ist nicht verwunderlich, da hier die größte magnetische Kraft wirkt.



**Abb. 14.** Ausgabe des Beschleunigungssensors, x-Achse auf y-Achse mit jeweiliger Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

Die Beschleunigungssensoren messen wie bereits erwähnt in  $\text{m/s}^2$  die Beschleunigung des Torsos. Deshalb ist ebenfalls zu erwarten, dass bei einem stabilen Gang diese Werte sich



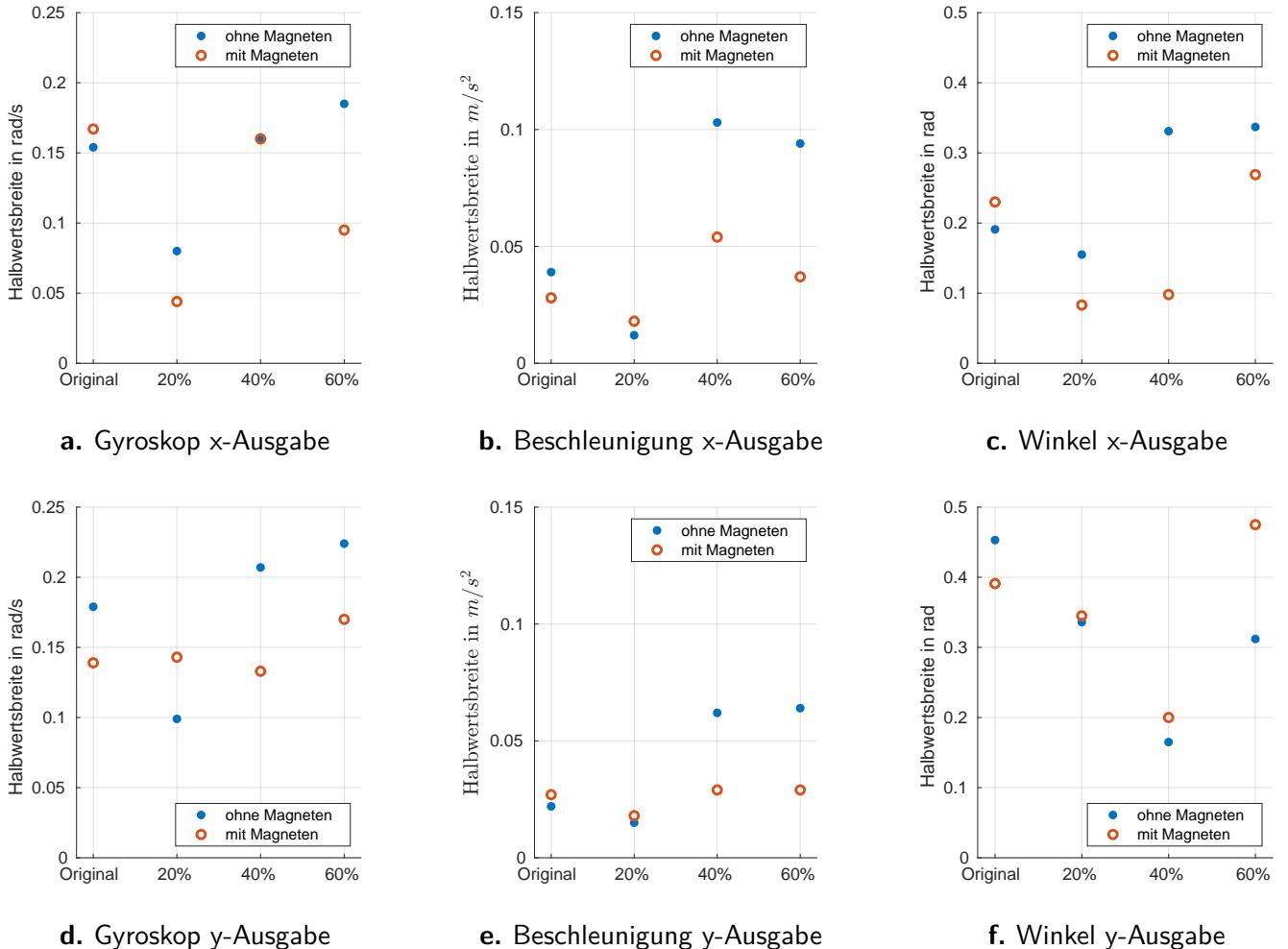
**Abb. 15.** Echtzeit errechneter Winkel, x-Achse auf y-Achse mit jeweiliger Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

in der Nähe des Nullpunkts zentrieren, sollte NAO stabil laufen. Genau wie in Abb. 13 zeigen die Graphen in Abb. 14 eine Tendenz zu einem stabileren Lauf mit Magneten. Auch hier wirken die 20 %igen Proben außergewöhnlich stabil, während die 60 %igen Proben in x-Richtung von den Magneten am meisten profitieren. Gleichzeitig verhalten sich 40 zu 60 % in y-Richtung ähnlich.

Die Winkelwerte in Abb. 15 entstehen aus der Berechnung durch Gyroskop und Beschleunigungssensor. Da beide alle Graphen zuvor eine Tendenz von höherer Stabilität durch Magneten aufwiesen, ist zu erwarten, dass dies bei den Winkelgraphen auch der Fall ist. In der y-Achse ist eine Verbesserung von 40 und 60 % erkennbar. In x-Richtung scheint 40 %iges MAP am meisten zu profitieren, allerdings gilt für den Originalschuh eher das Gegenteil.

In Abb. 16 wurden die Halbwertsbreiten aller Dichtefunktionen von den Graphen aus Abb. 13 bis 15 berechnet. Diese Werte sind aufgeteilt in die 4 Schuharten von Originalschuh bis 60 %, ein höherer Wert bedeutet eine größere Instabilität. Es fällt auf, dass alle Originalschuhmessungen und für 20 % nah beieinander liegen. Hingegen sind die Unterschiede ohne und mit Magneten für höhere Prozente in den meisten Fällen deutlich größer. Dies bestätigt, dass das Magnetfeld den größten Einfluss auf MAP Sohlen mit höherem CIP Anteil hat.

Das hier verwendete Modell von NAO bietet die Möglichkeit die Stabilität des Gangs über die in Kapitel 2.1 erwähnten Drucksensoren in den Fußsohlen zu messen. Die errechneten

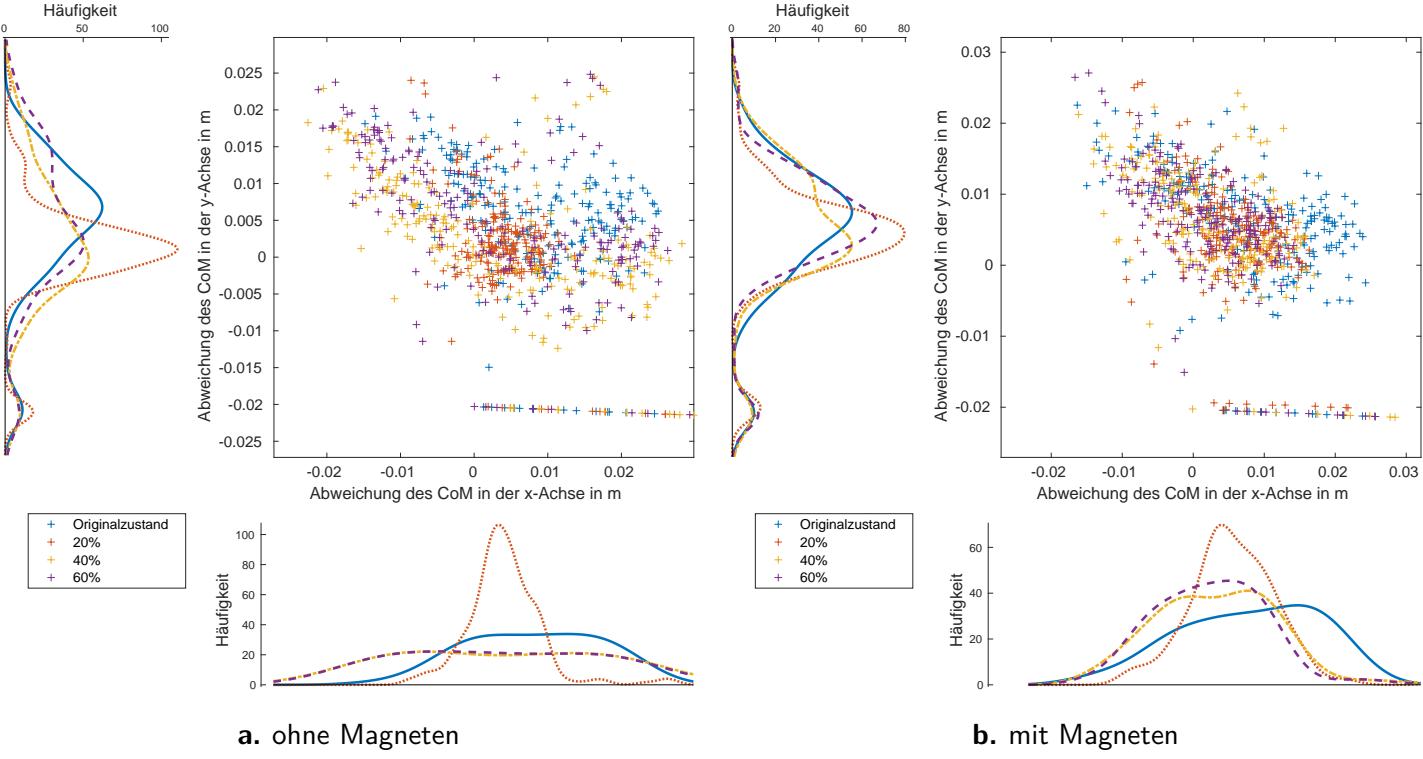


**Abb. 16.** Halbwertsbreiten der jeweiligen Achsen für Gyroskop, Beschleunigungssensor und Winkelangabe.

Werte der zweidimensionalen Massenschwerpunkte durch die 8 FSR Sensoren sind in Abb. 17 und 18 zu sehen. Auf einer Zeitskala aufgetragen lässt sich erkennen, dass zu Beginn der Messaufzeichnungen einige y-Werte sich in der Nähe von  $-0,02$  bzw.  $0,02$  aufhalten. Dies geschieht während des Ganges allerdings nicht, daher entsteht bei allen Aufnahmen ein zu vernachlässigender Sammelbereich im rechten unteren Bereich bei Abb. 17 und im rechten oberen Bereich von Abb. 18.

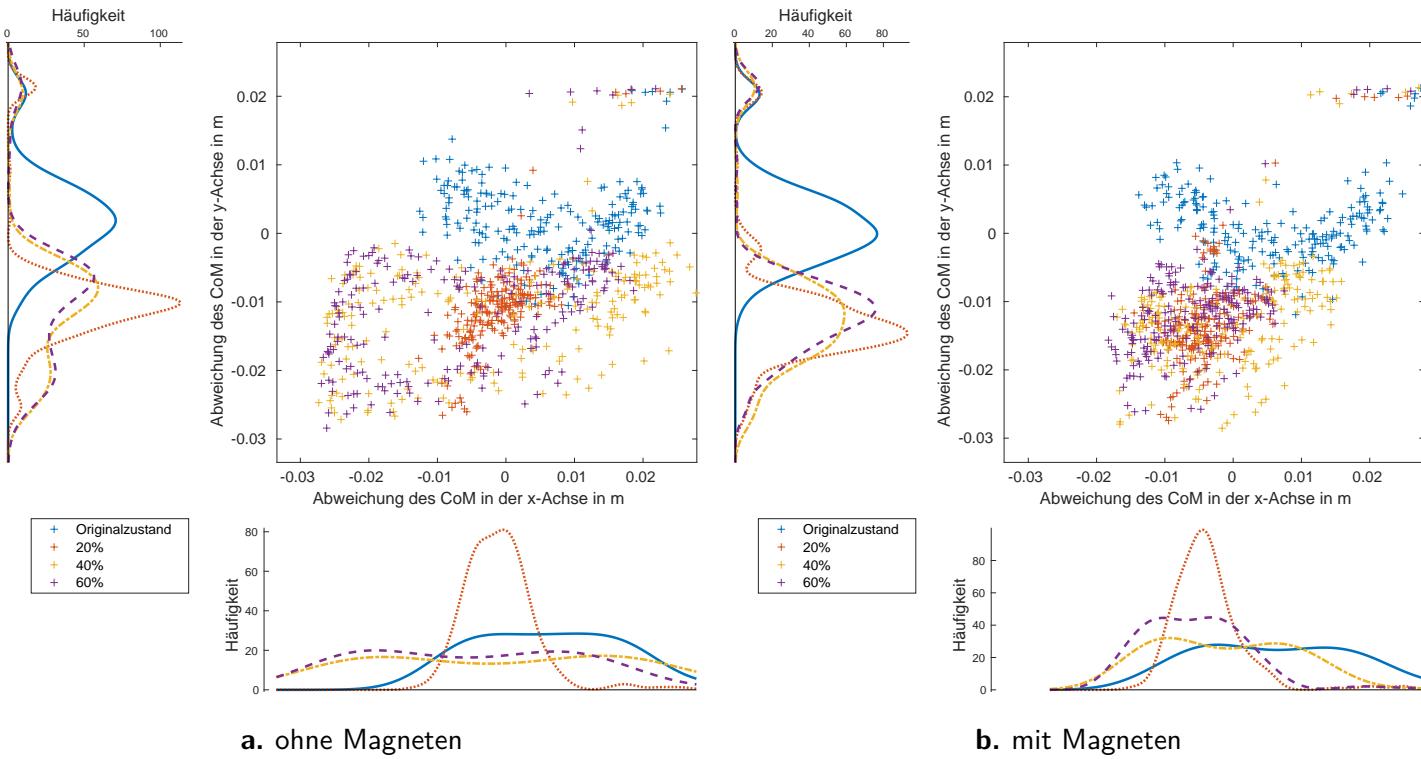
In beiden Abbildungen ist wie bei den bisherigen Graphen die erhöhte Stabilität mit Magneten sichtbar. Die Werte liegen konzentrierter um einen Punkt. Hier ist der Unterschied zwischen dem Originalschuh größer, denn wie in Abb. 4 gezeigt, vermessen die FSR weniger mit den MAP Sohlen, die größte Differenz ist in Abb. 18 zu sehen, bei der das Maximum der Dichtevertteilung der y-Achse deutlich weiter links liegt. Auf der x-Achse ist zu vermerken, dass der Originalschuh durch das Magnetfeld eher an Stabilität verliert, während alle anderen Sohlen der Stabilität zuträglich sind.

In allen Graphen ist ersichtlich, dass die Probeläufe mit 20 % CIP in der MAP Sohle unge-



**Abb. 17.** Linker errechneter Massenschwerpunkt aufgenommen durch die FSR, x-Achse auf y-Achse mit jeweiliger Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

wöhnlich stabil sind, was auf einen Zufall hindeuten könnte. Denn insgesamt gab es zwei Fehlschläge bei denen NAO das Gleichgewicht verloren hat, einmal mit 20 % und einmal mit 40 %, beides mit Magneten an der Rampe. Außerdem wurde bei früheren Messungen eine erhöhte Stabilität bei 40 % im Vergleich zu anderen Proben und dem Grundschatz festgestellt, allerdings nicht so deutlich wie diese 20 %. Dies lässt darauf schließen, dass für eine Sicherstellung der Unterschiede zwischen den einzelnen Proben deutlich mehr Testläufe erforderlich sind. Dennoch lässt sich abschließend sagen, dass ein stabilerer Lauf durch die Magneten erzielen wurde. Die größte Auswirkung hatten die Magneten wie zu erwarten war auf die Proben mit einem höheren CIP Anteil. Gleichzeitig sind diese Sohlen allerdings bis zu doppelt so schwer wie der Originalschuh, siehe Tabelle 1.



**Abb. 18.** Rechter errechneter Massenschwerpunkt aufgenommen durch die FSR, x-Achse auf y-Achse mit jeweiliger Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

## 5.2 Sensoren der Aktoren

Es wird angenommen, dass die Stromausgabe eine Größe ist, die den Aufwand anzeigt, die NAO aufwenden muss, um seine Bewegung so auszuführen, wie es seine Programmierung vorgibt. In Kapitel 2.1 wurden diese Aktoren und die messbaren Größen vorgestellt. Bei einem Probelauf wurden alle Sensoren von der Hüfte abwärts gemessen. Hierbei stellte sich heraus, dass der linke AnklePitch im Durchschnitt einen höheren Stromwert ausgab, ebenso das rechte Kniegelenk KneePitch. Außerdem ist für das Hüftgelenk keine Bewegung vorgesehen, aber eine zu vermessen. Dies liegt daran, dass NAO automatisch Fehler der Motoren ausgleicht. Dennoch ist deshalb der Gang, welcher standardmäßig gerade aus führen sollte, leicht gebogen.

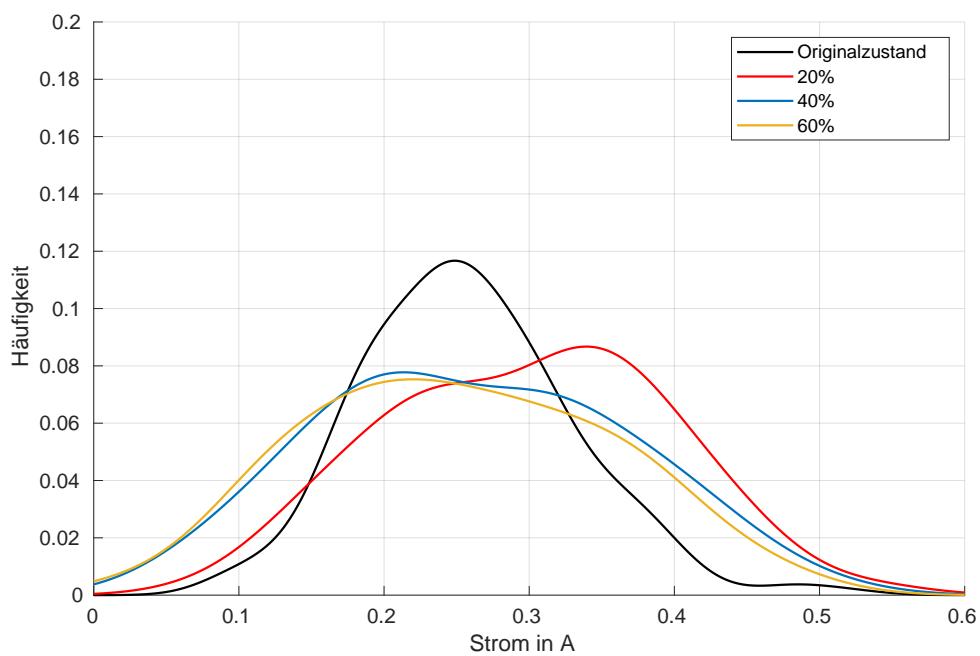
Um den Gesamtaufwand einzusehen, müssten alle Aktoren aufgenommen werden. Der Nachteil bei dieser Methode ist, dass dadurch die Messzeiten verlängert würden und damit weniger Messungen pro Gang aufgezeichnet werden können. Deshalb wurde sich auf die Fußgelenke beschränkt, welche einen Hinweis auf verstärkte Haftung der Sohle auf dem Untergrund geben könnte. AnklePitch ist in dem Abb. 5 auf der linken Seite zu sehen, AnkleRoll auf der rechten Seite.

Die Abb. 19 und 20 sowie Abb. 21 und 22 zeigen im oberen Bereich die Graphen ohne Magneten, im unteren Teil die mit Magneten. Die Grundlage der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen welche aus Gleichung (2) errechnet wurden, sind Histogramme mit einer

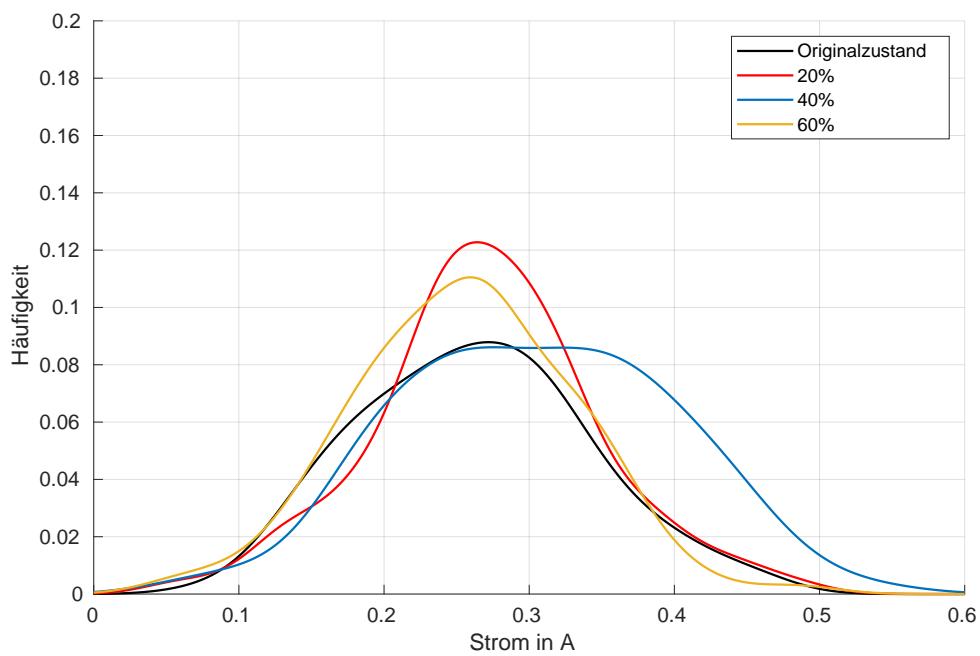
Balkenzahl von 20.

Sowohl für AnklePitch als auch AnkleRoll lässt sich keine eindeutige Veränderung erkennen, wenn ein Magnetfeld anliegt. Bis auf Abb. 20 lässt sich kein höherer Strom für die Grundmessung mit dem Originalschuh feststellen. Des Weiteren ist von dem außergewöhnlich stabilen Gang von 20 % welcher im vorherigen Kapitel zu sehen war, nichts zu erkennen. Ein erwarteter höherer Stromverbrauch für 60 % wegen des Gewichts und des hohen CIP Anteils ist ebenfalls ausgeblieben.

Es scheint keine erheblichen Auswirkungen auf die beiden Fußgelenke zu geben, was darauf schließen lässt, dass es während der Bewegung trotz höherer Stabilität keinen höheren Aufwand für NAO gibt. Außerdem bleibt eine befürchtete höhere Haftung der Oberflächen durch die magnetische Kraft aus. Für eingehendere Untersuchungen müssten alle Aktoren gemessen werden, was in den Rahmen der Arbeit zeitlich nicht mehr gepasst hat.

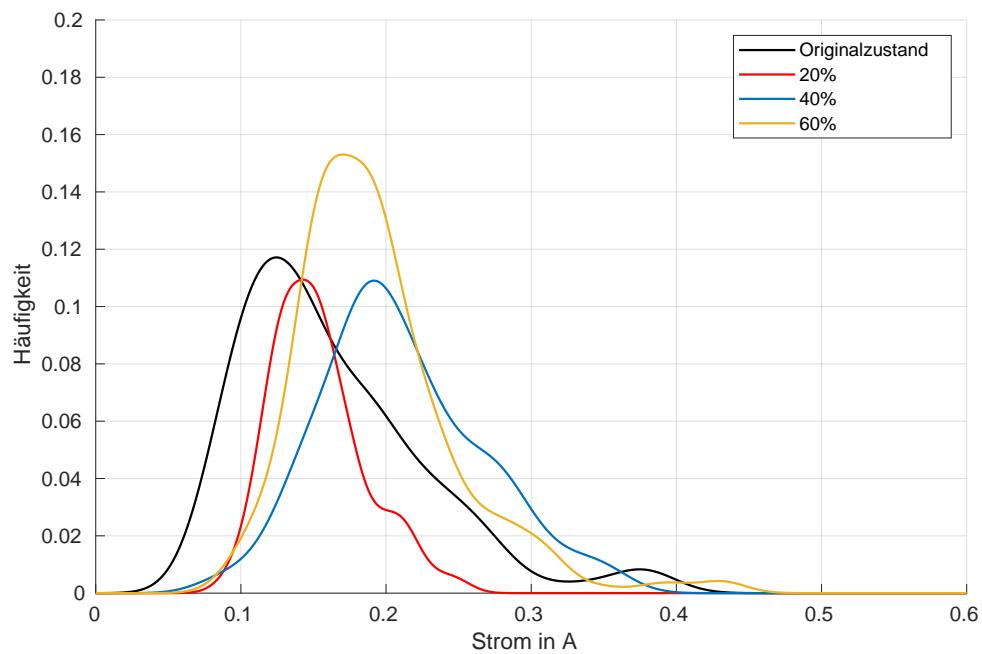


a. ohne Magneten

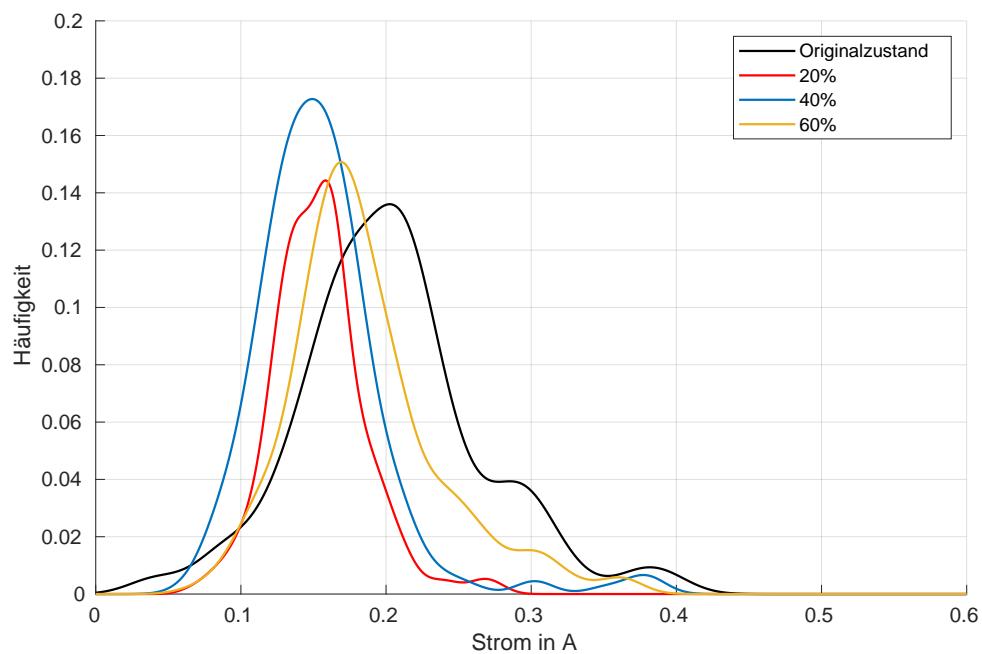


b. mit Magneten

**Abb. 19.** AnklePitch gemessener Strom im linken Fuß, Strom in Ampère aufgetragen auf die Häufigkeit.

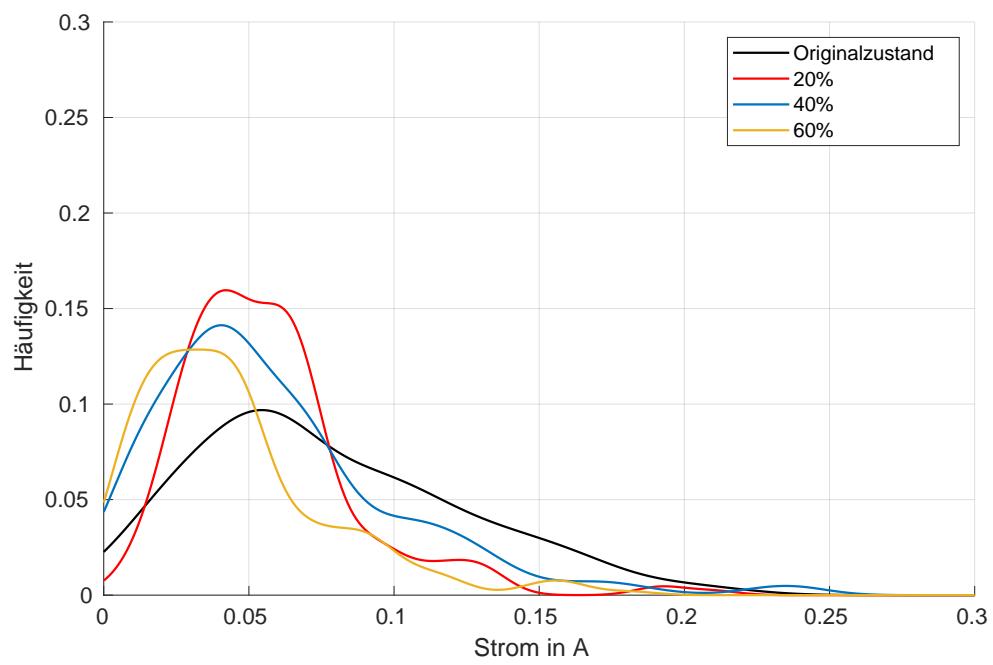


a. ohne Magneten

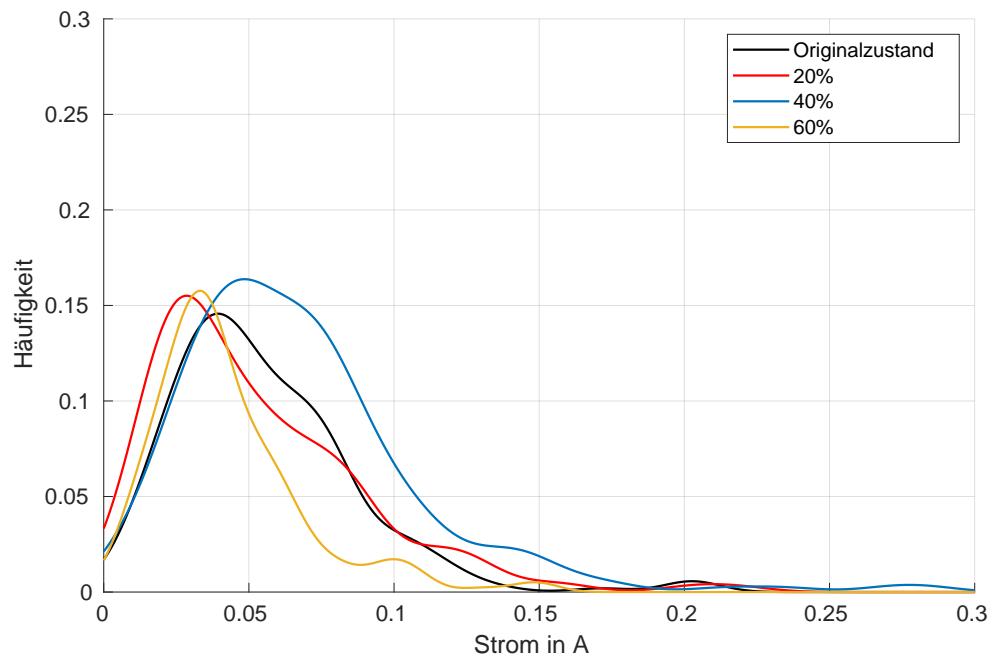


b. mit Magneten

**Abb. 20.** AnklePitch gemessener Strom im rechter Fuß, Strom in Ampère aufgetragen auf die Häufigkeit.

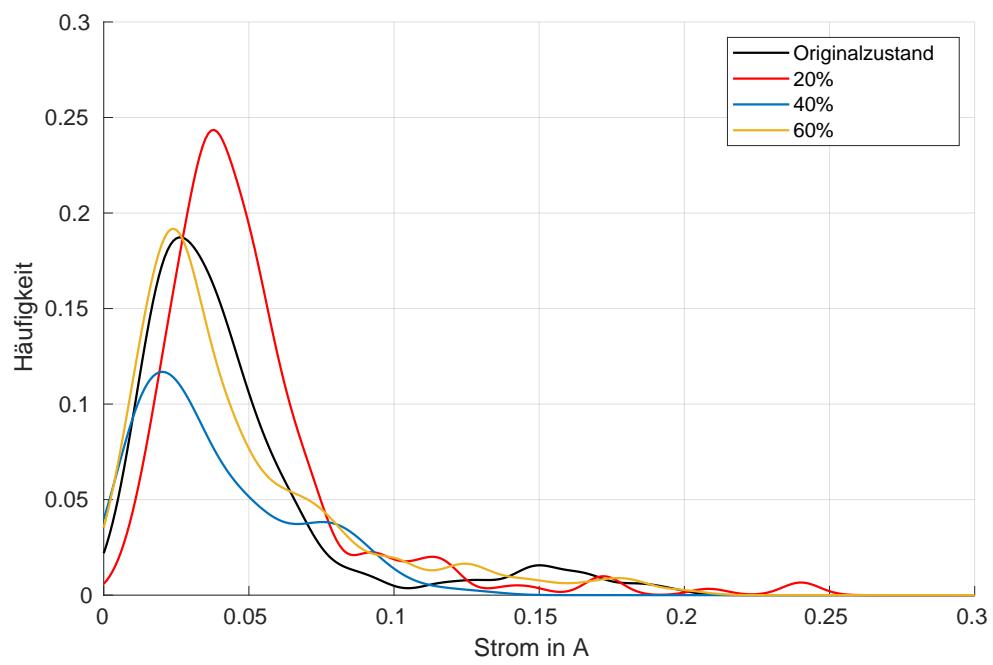


a. ohne Magneten

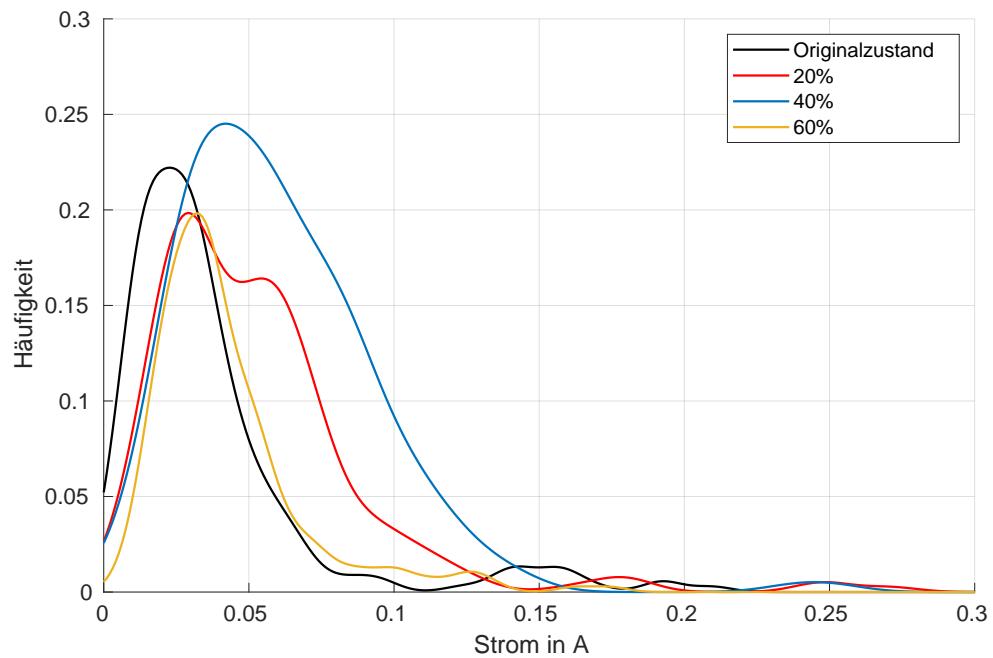


b. mit Magneten

**Abb. 21.** AnkleRoll gemessener Strom im linken Fuß, Strom in Ampère aufgetragen auf die Häufigkeit.



**a. ohne Magneten**



**b. mit Magneten**

**Abb. 22.** AnkleRoll gemessener Strom im rechter Fuß, Strom in Ampère aufgetragen auf die Häufigkeit.

## 6 Fazit und Ausblick

Diese Arbeit beschäftigte sich mit dem Konstruieren eines Schuhs für den von Softrobotics hergestellten humanoiden Roboter NAO. Ziel war es, das bisher bereits vielseitig angewendete, aber noch nicht an Roboterfüßen verwendete MAP zu testen, eine Teststrecke mit der Möglichkeit Magneten anzubringen und verschiedene Winkel einzustellen zu bauen und die Stabilität des NAO zu erhöhen. Des Weiteren sollten die Auswirkungen der neuen Lauffläche auf den Roboter getestet werden.

Zusammenfassend lässt sich, wie in Kapitel 5.1 beschrieben, einen Zusammenhang zwischen erhöhter Stabilität und Magneten erkennen. Die Prozentanteile die verwendet wurden, unterscheiden sich sehr im Anteil von CIP und Gewicht. Die Reaktion auf das Magnetfeld waren für höhere Prozente ersichtlich, während der Originalschuh kaum Reaktion zeigte. Der Gang mit 20 % war ungewöhnlich stabil, sowohl mit als auch ohne Magneten.

Während der Messarbeiten sind einige Problematiken in der Arbeit mit dem NAO Roboter herausgetreten. Bereits bei der Programmierung gab es Grenzen. NAO ist ein Roboter, der für das Arbeiten mit Kindern und Jugendlichen konzipiert wurde und ist hauptsächlich ein Vorführungsobjekt. Die Gangarten sind begrenzt und ein Ausgleichssystem, welches dem Roboter eine Rückkopplung für Umgebungserkennung gewährleisten würde, lies sich nicht mit der Aufnahme von Messdaten vereinbaren. Dazu hätten externe Sensoren und weitere Geräte angeschlossen werden müssen. Hinzu kommt, dass NAOs Sensoren nicht genau genug sind, wie bereits in [8] beschrieben. Das erschwert eine genaue Bestimmung von Stabilität und Aufwand. Des Weiteren konnte NAO zu Beginn bereits nicht geradeaus laufen. Dies musste manuell ausgeglichen werden und führte dazu, dass NAO u.U. nicht exakt dieselbe Strecke zurücklegte. Und schließlich begann der `moveTo()` Befehl per Zufall mit dem linken oder rechten Fuß zu erst. Dies hat zur Folge, dass die Aktoren unterschiedliche Ausgaben zu gleichen Zeiten haben und könnte die Mittelwerte verfälscht haben, welche zum Vergleich erstellt wurden.

Da eine höhere Stabilität feststellbar war, könnte diese Art der Sohlenentwicklung durchaus interessant sein für künftige Konstruktionen in der Robotik. Außerdem ist die durch diese Arbeit entstandene Rampe vor allem für künftige Testläufe mit diversen Laufrobotern und Softrobotern geeignet.

## 7 Anhang

**Code 1.** Pythonprogramm für Messaufnahmen

```
1 # ! /usr/bin/env python
2 # -*- encoding: UTF-8 -*-
3
4 """Example: Use getData Method to Use FSR Sensors"""
5
6 import qi
7 import argparse
8 import sys
9 import time
10 import csv
11 import re
12 import shutil
13 from tempfile import mkstemp
14 import os
15
16 def sed(pattern, replace, source, dest=None, count=0):
17     """Reads a source file and writes the destination file.
18
19     In each line, replaces pattern with replace.
20
21     Args:
22         pattern (str): pattern to match (can be re.pattern)
23         replace (str): replacement str
24         source (str): input filename
25         count (int): number of occurrences to replace
26         dest (str): destination filename, if not given,
27                     source will be over written.
28
29         fin = open(source, 'r')
30         num_replaced = count
31
32         if dest:
33             fout = open(dest, 'w')
34         else:
35             fd, name = mkstemp()
36             fout = open(name, 'w')
37
38         for line in fin:
39             out = re.sub(pattern, replace, line)
40             fout.write(out)
41
```

```

42         if out != line:
43             num_replaced += 1
44             if count and num_replaced > count:
45                 break
46     try:
47         fout.writelines(fin.readlines())
48     except Exception as E:
49         raise E
50
51     fin.close()
52     fout.close()
53
54     if not dest:
55         shutil.move(name, source)
56
57
58 def zeilen_aufteilen(file):
59     sed(',platzhalter,' , '\n' , file)
60     sed(',platzhalter' , '' , file)
61
62
63 def recordData(memory_service):
64     """ Get pressure sensor data from ALMemory
65     Returns a matrix of values
66
67     """
68     print "Recording data..."
69     data = list()
70     for range_counter in range(1, 220):
71         #Gyroscope
72         GyrX = memory_service.getData("Device/SubDeviceList
73             /InertialSensor/GyroscopeX/Sensor/Value")
74         GyrY = memory_service.getData("Device/SubDeviceList
75             /InertialSensor/GyroscopeY/Sensor/Value")
76         AngleX = memory_service.getData("Device/
77             SubDeviceList/InertialSensor/AngleX/Sensor/Value"
78             )
79         AngleY = memory_service.getData("Device/
80             SubDeviceList/InertialSensor/AngleY/Sensor/Value"
81             )
82         AccX = memory_service.getData("Device/SubDeviceList
83             /InertialSensor/AccelerometerX/Sensor/Value")
84         AccY = memory_service.getData("Device/SubDeviceList
85             /InertialSensor/AccelerometerY/Sensor/Value")
86         data.append(GyrX)
87         data.append(GyrY)

```

```

80     data.append(AngleX)
81     data.append(AngleY)
82     data.append(AccX)
83     data.append(AccY)
84
85     # Adding the summary of the FSR
86     LFsrTw = memory_service.getData("Device/
87         SubDeviceList/LFoot/FSR/TotalWeight/Sensor/Value"
88         )
89     RFsrTw = memory_service.getData("Device/
90         SubDeviceList/RFoot/FSR/TotalWeight/Sensor/Value"
91         )
92
93     LFcopX = memory_service.getData("Device/
94         SubDeviceList/LFoot/FSR/CenterOfPressure/X/Sensor
95         /Value")
96     LFcopY = memory_service.getData("Device/
97         SubDeviceList/LFoot/FSR/CenterOfPressure/Y/Sensor
98         /Value")
99     RFCopX = memory_service.getData("Device/
100        SubDeviceList/RFoot/FSR/CenterOfPressure/X/Sensor
101        /Value")
102     RFCopY = memory_service.getData("Device/
103        SubDeviceList/RFoot/FSR/CenterOfPressure/Y/Sensor
104        /Value")
105     data.append(LFsrTw)
106     data.append(RFsrTw)
107     data.append(LFcopX)
108     data.append(LFcopY)
109     data.append(RFcopX)
110     data.append(RFcopY)
111
112     # LeftAnkleRoll
113     PosAct = memory_service.getData("Device/
114         SubDeviceList/LAnkleRoll/Position/Actuator/Value"
115         )
116     PosSens = memory_service.getData("Device/
117         SubDeviceList/LAnkleRoll/Position/Sensor/Value")
118     ElectrSens = memory_service.getData("Device/
119         SubDeviceList/LAnkleRoll/ElectricCurrent/Sensor/
120         Value")
121     data.append(PosAct)
122     data.append(PosSens)
123     data.append(ElectrSens)
124
125     # RightAnkleRoll

```

```
109     PosAct = memory_service.getData("Device/
110         SubDeviceList/RAnkleRoll/Position/Actuator/Value")
111     )
112     PosSens = memory_service.getData("Device/
113         SubDeviceList/RAnkleRoll/Position/Sensor/Value")
114     ElectrSens = memory_service.getData("Device/
115         SubDeviceList/RAnkleRoll/ElectricCurrent/Sensor/
116         Value")
117     data.append(PosAct)
118     data.append(PosSens)
119     data.append(ElectrSens)
120
121     # LeftAnklePitch
122     PosAct = memory_service.getData("Device/
123         SubDeviceList/LAnklePitch/Position/Actuator/Value")
124     PosSens = memory_service.getData("Device/
125         SubDeviceList/LAnklePitch/Position/Sensor/Value")
126     ElectrSens = memory_service.getData("Device/
127         SubDeviceList/LAnklePitch/ElectricCurrent/Sensor/
128         Value")
129     data.append(PosAct)
130     data.append(PosSens)
131     data.append(ElectrSens)
132
133     data.append('platzhalter')
134     time.sleep(0.05)
135
136
137     def count_files():
138         counter = 1
```

```

139     # str.zfill schreibt vor, wie lang die Zahl mit Nullen
140     # davor sein soll. also zfill(3) ist 3 Zahlen lang.
141     filename = 'measurement' + str(counter).zfill(3) + '.'
142             csv'
143
144     # Wenn das file nicht exisiert, erstelle measurement001
145             .csv
146     while os.path.exists(filename):
147         counter = counter + 1
148         filename = 'measurement' + str(counter).zfill(3) +
149             '.csv'
150         create_file(filename)
151     return filename
152
153
154
155 def create_file(filename):
156     with open(filename, "w") as f:
157         pass
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178

```

# str.zfill schreibt vor, wie lang die Zahl mit Nullen  
davor sein soll. also zfill(3) ist 3 Zahlen lang.  
filename = 'measurement' + str(counter).zfill(3) + '.  
csv'  
# Wenn das file nicht exisiert, erstelle measurement001  
.csv  
while os.path.exists(filename):  
 counter = counter + 1  
 filename = 'measurement' + str(counter).zfill(3) +  
'.csv'  
create\_file(filename)  
return filename

def create\_file(filename):  
 with open(filename, "w") as f:  
 pass

def main(session):  
 """  
 This example uses the getData method to use FSR sensors  
 """  
 # Get the ALProxy ALMemory and ALMotion  
 from naoqi import ALProxy  
 memory\_service = session.service("ALMemory")  
 motion = ALProxy("ALMotion", "nao.local", 9559)  
  
 # wake up nao  
 motion.wakeUp()  
  
 motion.moveInit()  
 motion.post.moveTo(0.90, -0.2, -0.4, [[  
 "MaxStepFrequency", 0.0]])  
  
 data = recordData(memory\_service)  
 filename = count\_files()  
  
 output = os.path.abspath(filename)  
 with open(output, "wb") as file:  
 writer = csv.writer(file, delimiter=',')  
 writer.writerow(data)  
 zeilen\_aufteilen(output)  
 print "Results written to", output

```

179     # go back to crouch position and sleep
180     motion.rest()
181
182
183 if __name__ == "__main__":
184     parser = argparse.ArgumentParser()
185     parser.add_argument("--ip", type=str, default="",
186                         127.0.0.1",
187                         help="Robot IP address. On robot or Local Naoqi: use
188                         '127.0.0.1'.")
189     parser.add_argument("--port", type=int, default=9559,
190                         help="Naoqi port number")
191
192     args = parser.parse_args()
193     session = qi.Session()
194     try:
195         session.connect("tcp://" + args.ip + ":" + str(args
196                         .port))
197     except RuntimeError:
198         print ("Can't connect to Naoqi at ip \\" + args.ip
199               + "\\" on port " + str(args.port) + ".\n"
200         "Please check your script arguments. Run with -h
201             option for help.")
202     sys.exit(1)
203     main(session)

```

Der Programmcode 1 kann in mehrere Funktionen aufgeteilt betrachtet werden. Die Funktion `sed` ist aus [48] entnommen und funktioniert wie die gleichnamige Funktion der Linux-Bash. Sie wird benötigt, um nach jedem Durchgang der Messschleife in `recordData` eine neue Zeile in die CSV Datei zu schreiben. Dies geschieht durch die Funktion `zeilen_aufteilen`. `recordData` wurde aus den Beispielen der NAO Dokumentation [9, /Other tutorials/Python SDK - Tutorials/Python SDK - Examples/Sensors] entnommen und angepasst, sodass am Ende jeder Zeile von `data` ein Platzhalter eingefügt wird und alle gewünschten Sensoren abgegriffen werden. Die Funktion `count_files` sorgt dafür, dass keine vorhandenen Messungen überschrieben werden und jede Messdatei eine fortlaufende Nummerierung erhält.

In der `main` Funktion werden `ALMemory` und `ALMotion` geladen, und der Gang einschließlich des Abgreifens der Sensorwerte ausgeführt. Die Ausgabe der Messwerte während dem Gang ist nur möglich durch den Präfix `post` vor `moveTo`.

Abschließend dient die letzte `if`-Abfrage zur Verbindung mit NAO, allerdings nur, wenn dieses Pythonprogramm selbst auf dem NAO liegt. Die Methode `post` sowie die Aufnahme der Sensoren während dem Lauf der Methode `moveTo` funktionieren nur lokal, deshalb ist es in diesem Fall nicht möglich, das Programm von dem eigenen Rechner aus zu starten. Mit anderen Methoden wäre eine Programmaufrufung über eine Wlan Verbindung durch-

aus möglich. Um Programme direkt auf dem NAO zu starten, wird eine ssh-Verbindung hergestellt und darüber dann python ausgeführt.

## Literatur

- [1] Jean-Paul Pelteret und Paul Steinmann. *Magneto-Active Polymers - Fabrication, characterisation, modelling and simulation at the micro- and macro-scale*. De Gruyter, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1515/9783110418576>.
- [2] SoftBank Robotics. *NAO - Documentation*. URL: <https://developer.softbankrobotics.com/nao6/nao-documentation/nao-developer-guide> (besucht am 21.12.2020).
- [3] URL: <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/humanoids/aldebaran-robotics-founder-and-ceo-steps-down-softbank-appoints-new-leader> (besucht am 04.01.2021).
- [4] URL: <https://www.softbankrobotics.com/emea/en/pepper> (besucht am 04.01.2021).
- [5] Syamimi Shamsuddin u. a. "Humanoid Robot NAO Interacting with Autistic Children of Moderately Impaired Intelligence to Augment Communication Skills". In: *Procedia Engineering* 41 (2012). International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors 2012 (IRIS 2012), S. 1533–1538. ISSN: 1877-7058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.346>.
- [6] *NAO (NAOqi-2.1) NAO - documentation*. URL: <https://developer.softbankrobotics.com/nao-naoqi-2-1/nao-documentation/nao-technical-guide/> (besucht am 04.01.2021).
- [7] P. Shahverdi, M. J. Ansari und M. T. Masouleh. "Balance Strategy for Human Imitation by a NAO Humanoid Robot". In: *2017 5th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*. 2017, S. 138–143. DOI: <10.1109/ICRoM.2017.8466225>.
- [8] A. M. Shayan u. a. "Design and Development of a Pressure-Sensitive Shoe Platform for Nao H25". In: *2019 7th International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*. 2019, S. 223–228. DOI: <10.1109/ICRoM48714.2019.9071802>.
- [9] SoftBank Robotics. *NAOqi - Developer guide*. Accessed: 2020-12-21. URL: <https://developer.softbankrobotics.com/nao6/naoqi-developer-guide> (besucht am 21.12.2020).
- [10] Version 2020.3. URL: <https://www.autodesk.de/products/inventor/overview?plc=INVPROSA&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1#internal-link-what-is-inventor> (besucht am 31.01.2021).
- [11] URL: <https://knowledge.autodesk.com/support/inventor/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/Inventor-Help/files/GUID-D74F47F3-FE22-44EF-85BE-7C6B1F56DCF9-htm.html> (besucht am 31.01.2021).
- [12] URL: <https://www.filamentworld.de/> (besucht am 12.03.2020).
- [13] Version 4.8.0. URL: <https://ultimaker.com/de/software/ultimaker-cura> (besucht am 31.01.2021).
- [14] Version R2020 Update 3. URL: <https://de.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html> (besucht am 31.01.2021).

- [15] URL: <https://de.mathworks.com/help/stats/exploratory-data-analysis.html> (besucht am 31.01.2021).
- [16] Ludwig Fahrmeir u.a. *Statistik. Der Weg zur Datenanalyse*. 8., überarb. und erg. Auflage. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg 2016. ISBN: 978-3-662-50371-3.
- [17] URL: <https://de.mathworks.com/help/stats/kernel-distribution.html> (besucht am 18.03.2020).
- [18] URL: <https://de.mathworks.com/help/stats/fitdist.html> (besucht am 18.03.2020).
- [19] Z. Rigbi und L. Jilken. "The response of an elastomer filled with soft ferrite to mechanical and magnetic influences". In: *J. Magn. Magn. Mater* 37(3) (Juli 1983), 267–276. DOI: [10.1016/0304-8853\(83\)90055-0](https://doi.org/10.1016/0304-8853(83)90055-0).
- [20] Z. Rigbi und J. E. Mark. "Effects of a magnetic field applied during the curing of a polymer loaded with magnetic filler". In: *J. Polym. Sci., Polym. Phys. Ed.* 23(6) (Juni 1985), 1267–1269. DOI: [10.1002/pol.1985.180230618](https://doi.org/10.1002/pol.1985.180230618).
- [21] J. M. Ginder. "Encyclopedia of Applied Physics". In: Bd. 16. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, New York, New York, 1996. Kap. Rheology controlled by magnetic fields, 487–503. DOI: [10.1002/3527600434.eap402](https://doi.org/10.1002/3527600434.eap402).
- [22] James E Martin u.a. "Magnetostriction of field-structured magnetoelastomers". In: *Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics* 74.5 Pt 1 (2006), S. 051507. ISSN: 1539-3755. DOI: [10.1103/physreve.74.051507](https://doi.org/10.1103/physreve.74.051507).
- [23] G. Filipcsei Z. Varga und M. Zrínyi. "Smart composites with controlled anisotropy". In: *Polymer* 46(18) (Aug. 2005), 7779–7787. DOI: [10.1016/j.polymer.2005.03.10](https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.03.10).
- [24] G. Filipcsei Z. Varga und M. Zrínyi. "Magnetic field sensitive functional elastomers with tuneable elastic modulus". In: *Polymer* 47(1) (Jan. 2006), 227–233. DOI: [10.1016/j.polymer.2005.10.139](https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.10.139).
- [25] John M. Ginder, William F. Schlotter und Mark E. Nichols. "Magnetochemical elastomers in tunable vibration absorbers". In: *Smart Structures and Materials 2001: Damping and Isolation*. Hrsg. von Daniel J. Inman. Bd. 4331. International Society for Optics und Photonics. SPIE, 2001, S. 103 –110. DOI: [10.1117/12.432694](https://doi.org/10.1117/12.432694).
- [26] H.X. Deng und X.L. Gong. "Adaptive Tuned Vibration Absorber based on Magnetorheological Elastomer". In: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 18.12 (2007), S. 1205–1210. DOI: [10.1177/1045389X07083128](https://doi.org/10.1177/1045389X07083128).
- [27] N Hoang u.a. "Development of a torsional dynamic absorber using a magnetorheological elastomer for vibration reduction of a powertrain test rig". In: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 24.16 (2013), S. 2036–2044. DOI: [10.1177/1045389X13489361](https://doi.org/10.1177/1045389X13489361).
- [28] M Kallio u.a. "Dynamic compression testing of a tunable spring element consisting of a magnetorheological elastomer". In: *Smart Materials and Structures* 16.2 (2007), S. 506–514. DOI: [10.1088/0964-1726/16/2/032](https://doi.org/10.1088/0964-1726/16/2/032).

- [29] John M. Ginder u. a. "Controllable-stiffness components based on magnetorheological elastomers". In: *Smart Structures and Materials 2000: Smart Structures and Integrated Systems*. Hrsg. von Norman M. Wereley. Bd. 3985. International Society for Optics und Photonics. SPIE, 2000, S. 418 –425. DOI: [10.1117/12.388844](https://doi.org/10.1117/12.388844).
- [30] Holger Böse, Raman Rabindranath und Johannes Ehrlich. "Soft magnetorheological elastomers as new actuators for valves". In: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 23.9 (2012), S. 989–994. DOI: [10.1177/1045389X11433498](https://doi.org/10.1177/1045389X11433498).
- [31] Marc-André Keip, Paul Steinmann und Jörg Schröder. "Two-scale computational homogenization of electro-elasticity at finite strains". In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 278 (2014), S. 62–79. ISSN: 0045-7825. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2014.04.020>.
- [32] G Y Zhou und Q Wang. "Design of a smart piezoelectric actuator based on a magnetorheological elastomer". In: *Smart Materials and Structures* 14.4 (2005), S. 504–510. DOI: [10.1088/0964-1726/14/4/007](https://doi.org/10.1088/0964-1726/14/4/007).
- [33] G Y Zhou, K C Lin und Q Wang. "Finite element studies on field-dependent rigidities of sandwich beams with magnetorheological elastomer cores". In: *Smart Materials and Structures* 15.3 (2006), S. 787–791. DOI: [10.1088/0964-1726/15/3/014](https://doi.org/10.1088/0964-1726/15/3/014).
- [34] Meng G. Zhang Wm. et al Wei Kx. "Experimental investigation on vibration characteristics of sandwich beams with magnetorheological elastomers cores". In: *J. Cent. South Univ. Technol.* 15 (2008), 239–242. DOI: [10.1007/s11771-008-0354-7](https://doi.org/10.1007/s11771-008-0354-7).
- [35] Famin Qiu und Bradley J. Nelson. "Magnetic Helical Micro- and Nanorobots: Toward Their Biomedical Applications". In: *Engineering* 1.1 (2015), S. 021–026. ISSN: 2095-8099. DOI: <https://doi.org/10.15302/J-ENG-2015005>.
- [36] Tiantian Xu u. a. "Magnetic Actuation Based Motion Control for Microrobots: An Overview". In: *Micromachines* 6 (Sep. 2015), S. 1346–1364. DOI: [10.3390/mi6091346](https://doi.org/10.3390/mi6091346).
- [37] Guo Zhan Lum u. a. "Shape-programmable magnetic soft matter". In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* (2016). ISSN: 0027-8424. DOI: [10.1073/pnas.1608193113](https://doi.org/10.1073/pnas.1608193113).
- [38] Wenqi Hu u. a. "Small-scale soft-bodied robot with multimodal locomotion". In: *Nature* 554.7690 (2018), S. 81–85. DOI: [10.1038/nature25443](https://doi.org/10.1038/nature25443).
- [39] Roland Fuhrer u. a. "Soft Iron/Silicon Composite Tubes for Magnetic Peristaltic Pumping: Frequency-Dependent Pressure and Volume Flow". In: *Advanced Functional Materials* 23.31 (2013), S. 3845–3849. DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201203572>.
- [40] Yancheng Li u. a. "A highly adjustable magnetorheological elastomer base isolator for applications of real-time adaptive control". In: *Smart Materials and Structures* 22.9 (2013), S. 095020. DOI: [10.1088/0964-1726/22/9/095020](https://doi.org/10.1088/0964-1726/22/9/095020).
- [41] Song Qi u. a. "3D printed shape-programmable magneto-active soft matter for biomimetic applications". In: *Composites Science and Technology* 188 (2020), S. 107973. ISSN: 0266-3538. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107973>.

- [42] Dirk Sindersberger u. a. "Printing of hybrid magneto active polymers with 6 degrees of freedom". In: *Materials Today Communications* 15 (2018), S. 269–274. ISSN: 2352-4928. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.02.032>.
- [43] Taixiang Liu und Yangguang Xu. "Magnetorheological Elastomers: Materials and Applications". In: März 2019. ISBN: 978-1-78984-716-1. DOI: [10.5772/intechopen.85083](https://doi.org/10.5772/intechopen.85083).
- [44] URL: [https://electronics-electric.bASF.com/global/en/electronics/products/carbonyl\\_iron\\_powder.html](https://electronics-electric.bASF.com/global/en/electronics/products/carbonyl_iron_powder.html) (besucht am 22.03.2020).
- [45] Sergei Gorodkin, R James und William Kordonski. "Magnetic Properties of Carbonyl Iron Particles in Magnetorheological Fluids". In: *Journal of Physics: Conference Series* 149 (März 2009), S. 012051. DOI: [10.1088/1742-6596/149/1/012051](https://doi.org/10.1088/1742-6596/149/1/012051).
- [46] C. Lutz u. a. "NAO walking down a ramp autonomously". In: *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2012, S. 5169–5170. DOI: [10.1109/IROS.2012.6386268](https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6386268).
- [47] URL: [https://www.supermagnete.de/magnete-zum-anschrauben/quadermagnet-40-x-40-x-4mm\\_CS-Q-40-40-04-N](https://www.supermagnete.de/magnete-zum-anschrauben/quadermagnet-40-x-40-x-4mm_CS-Q-40-40-04-N) (besucht am 06.01.2021).
- [48] URL: <https://stackoverflow.com/questions/12714415/python-equivalent-to-sed> (besucht am 08.03.2020).