



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: Dr. Dirk Sindersberger

## **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: Dr. Dirk Sindersberger

# 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 Magnetostiction . . . . .          | 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>15</b> |
| <b>6 Anhang</b>                        | <b>25</b> |

# 1 Einleitung

Kapitel 2.3 erklärt die Definition und Eigenschaften von Magneto-aktiven Polymeren (MAP), welche als Sohle für den Nao Roboter eingesetzt wurden. Diese Erklärungen basieren auf einem Buch von Pelteret und Steinmann [1], welches ich für tiefergehende Lektüren empfehle.

## 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]

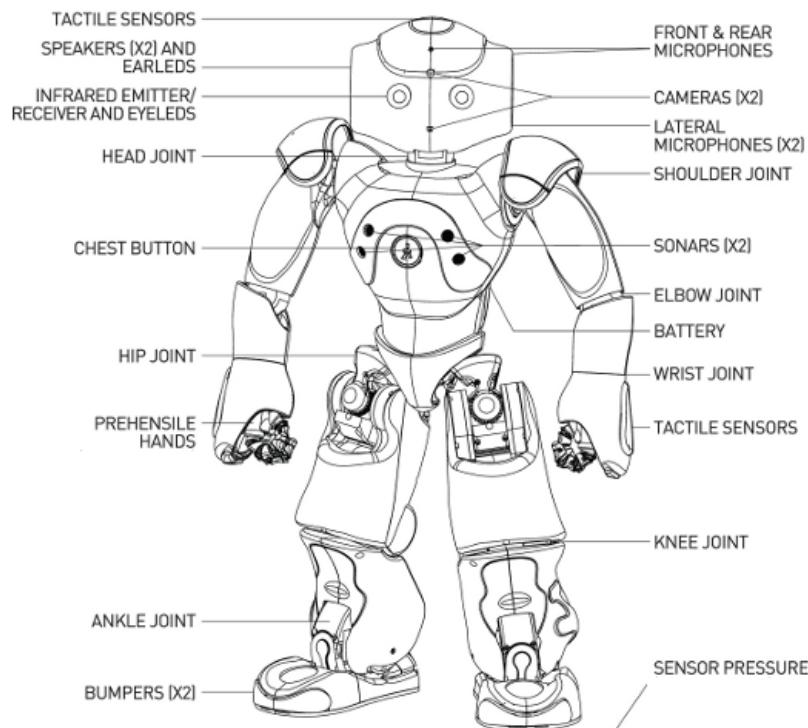
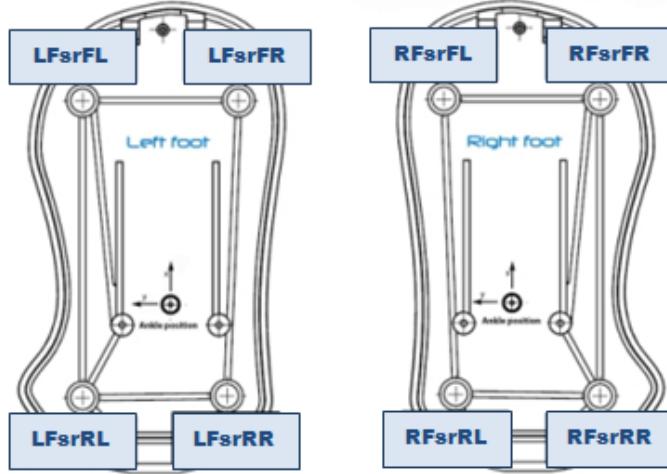


Abb. 2. Sensorenüberblick des NAO-H25 Version 6 [6, in /H25]

Das hier verwendete Modell ist NAO-H25 Version 6, dessen Sensoren in Abb. 2 zu sehen sind. Im Unterschied zu anderen Ausführungen besitzt NAO-



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

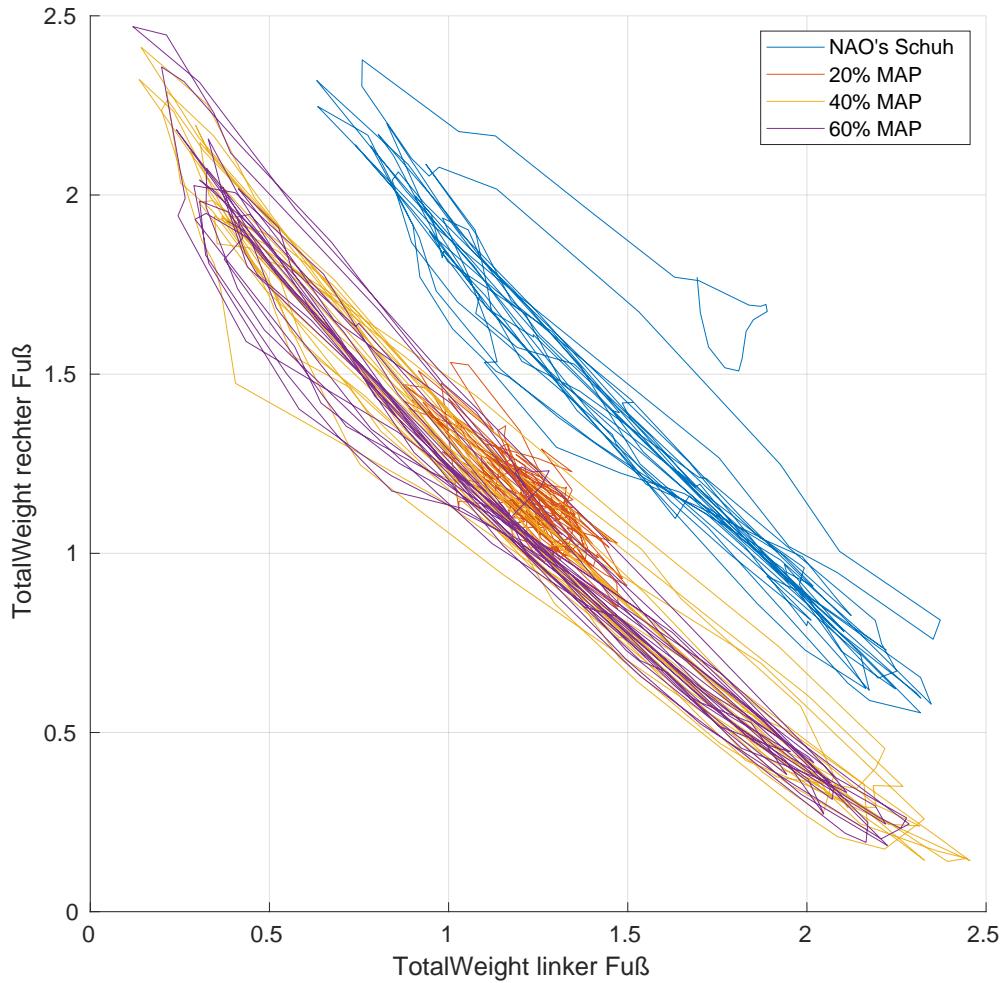
H25 Drucksensoren an Händen und Fußsohlen. Er gehört zu den kommerziellen Robotern deren Gelenke positionsbasierenden sind [7], hat 25 Freiheitsgrade und wiegt 5,4 kg. Über die an der Brust angebrachten Sonar Sensoren, die Kameras oberhalb und unterhalb der Augen LEDs, die vorder- und rückseitigen Mikrofone, 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 6. 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.

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



**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.

Sensoren und auf den Verbindungszylinern 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 beschrieben 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

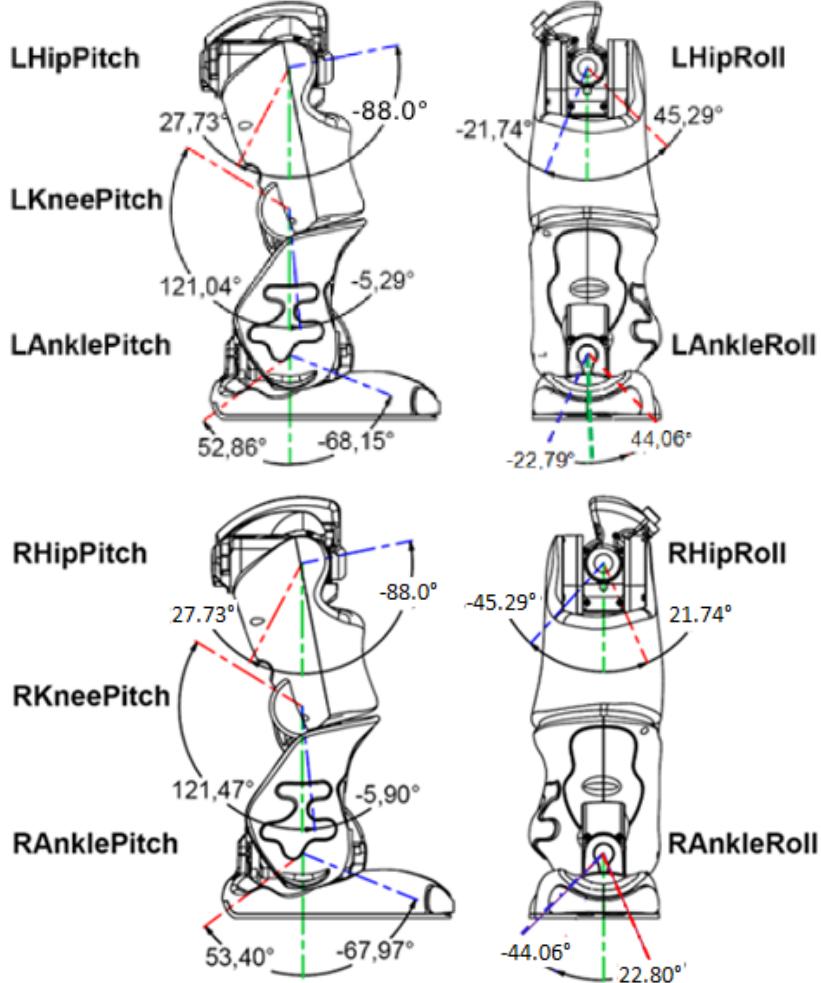
Hierbei unterscheiden sich die Pfade bei „...“ je nach Aktor. Die Bezeichnungen in Klammern dahinter dienen der abkürzenden Benennung für spätere Kapitel. Der Effekt der Sohlen auf die Aktoren wurde mit AnkleRoll und AnklePitch zu sehen in Abb. 5 aufgenommen.

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 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.



**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]

## 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 plattform-übergreifende 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 ersteres 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 vonstatten 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.

## 2.3 Magneto-aktive Polymere

### Begriffserklärung und Eigenschaften

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.

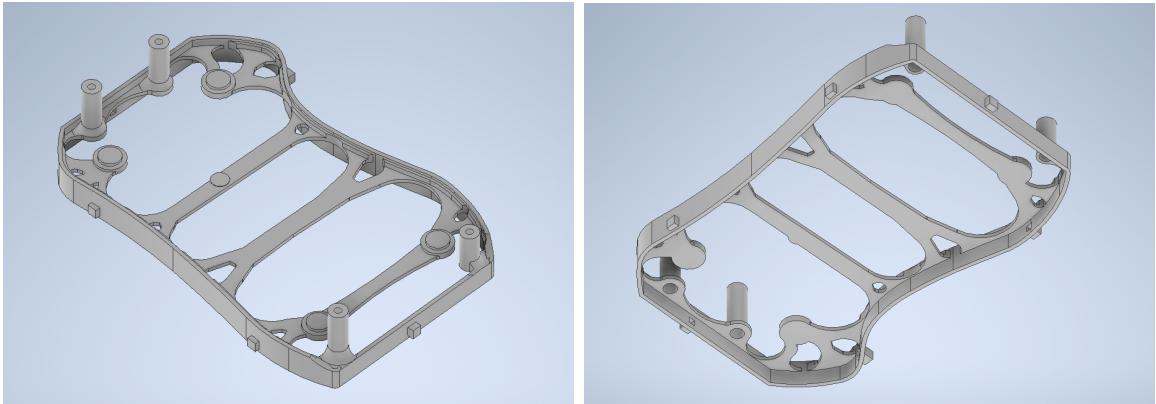
Weiche, mit einem Feld manipulierbare, Polymere haben diverse Anwendungsbereiche in akademischen und industriellen Bereichen. Angefangen von anpassungsfähiger Vibrationsabsorption in der Luftfahrt und Automobilindustrie durch das Einsetzen durch Scherung [25] [26], Windung [27] und Kompression bzw. Elongation [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 Magnetostiction

Der Begriff Stiction ist in erster Linie eine englische Wortneuschöpfung aus dem Wort *friction*, also Reibungskraft und *sticking*, also kleben. Ersteres wird unterschieden in Haftreibung, welche den Schwellenwert einer äußeren Kraft darstellt, der überwunden werden muss um ein Objekt in Bewegung zu versetzen, sowie in Gleitreibung, welche den Widerstand, der entgegen der Bewegungsrichtung wirkt, beschreibt. Stiction entsteht wenn die Haftreibung die Gleitreibung übersteigt. Dies sorgt für einen plötzlichen Stillstand, bis dann die auf das Objekt wirkende Kraft ausreicht, um eine erneute Bewegung zu erlauben. Dies kann zu ruckartigen Bewegungen führen und ist deshalb in vielen Fällen eine unerwünschte Eigenschaft [43]. Es gilt dies nicht zu verwechseln mit Adhäsion, welche entsteht, wenn z.B. Silikon auf dem Boden flach aufliegt und sich an den Boden auf die Art anpasst, dass bei dem Versuch, es zu schieben, sich an den Boden anklebt. Wenn die Adhäsion fehlt, aber die Reibung noch kontrollierbar ist, dann handelt es sich um Stiction. [44]



**Abb. 6.** Linker Schuh in Autodesk Inventors, 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.

In Abb. 6 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 eingespaart 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. 6 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

$$m_{CIP} = \frac{Ratio_{CIP}[\%]}{100\%} \cdot m_{ges}, \quad (4)$$

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:

$$V_A = \frac{m_A}{\rho_A}, \quad V_B = \frac{m_B}{\rho_B} \quad (5)$$

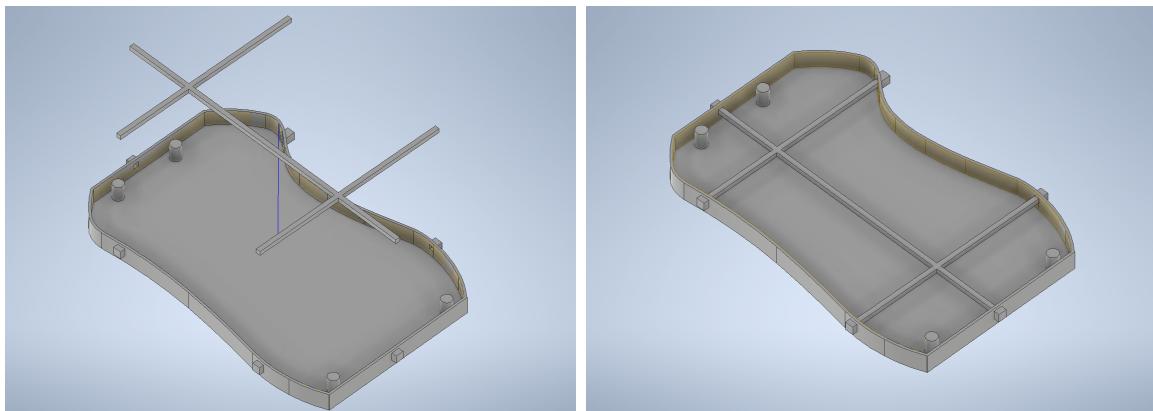
mit  $\rho_A = 1.071$  sowie  $\rho_B = 1.046$  sowie

$$m_A = \left(1 - \frac{Ratio_{CIP}[\%]}{100\%}\right) \times \frac{m_{ges}}{\alpha + \beta} \times \alpha, \quad m_B = \left(1 - \frac{Ratio_{CIP}[\%]}{100\%}\right) \times \frac{m_{ges}}{\alpha + \beta} \times \beta, \quad (6)$$

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:

$$m_A = \left(1 - \frac{Ratio_{CIP}[\%]}{100\%}\right) \times \frac{m_{ges}}{2}, \quad m_B = \left(1 - \frac{Ratio_{CIP}[\%]}{100\%}\right) \times \frac{m_{ges}}{2}. \quad (7)$$

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



**Abb. 7.** Gussform der MAP Sohlen. Links ist die Innenhalterung herausgenommen, rechts ist sie eingespannt in den sechs Eckhalterungen.

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.

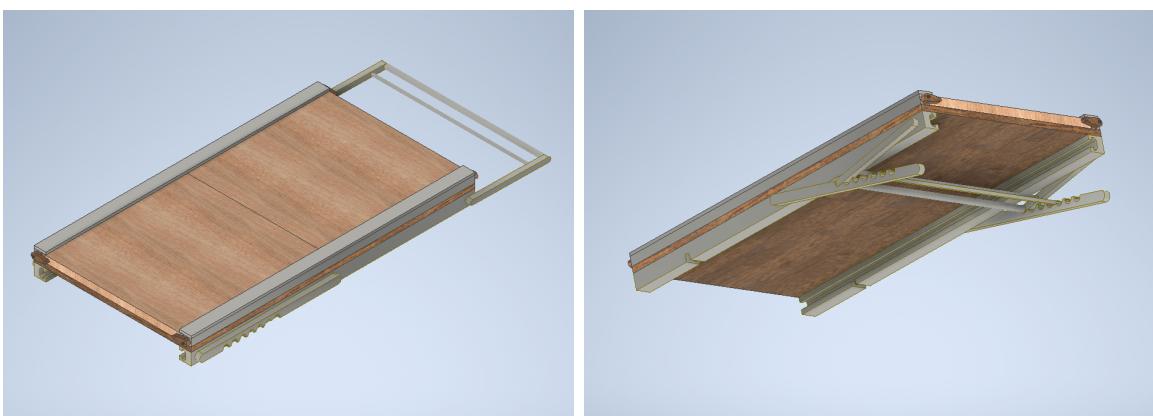
Da Silikon selbst sich nur sehr schlecht durch etwaige Klebstoffe nach der Vernetzung verkleben lässt wird hier wie in Abb. 7 zu sehen ist, eine 2 mm dicke Stangenkonstruktion eingehängt, welche bis auf die 6 Enden mit MAP umschlossen wird. Dieses aus PLA gedruckte Konstrukt ist flexibel und kann deshalb 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



**Abb. 8.** 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 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.

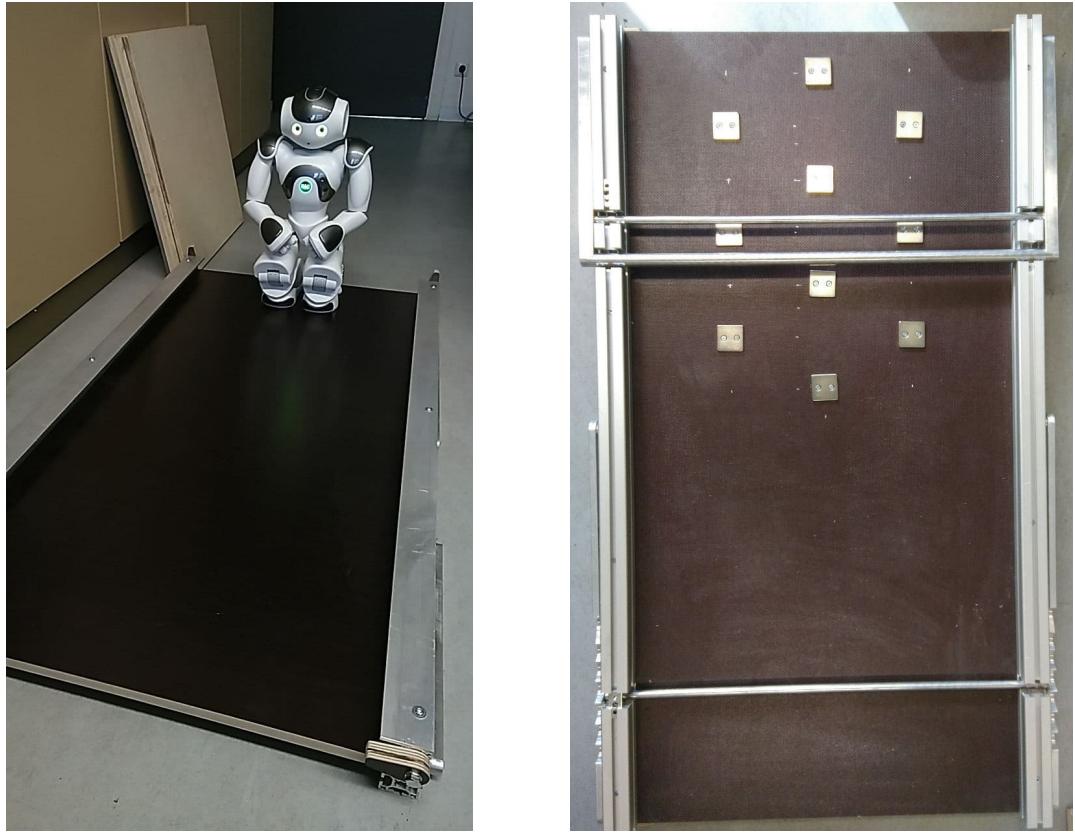
Der Laufsteg besteht aus einer  $120 \times 66,4$  cm großen Pressholzplatte, die auf der Oberseite mit einem Aluminiumkonstrukt erweitert ist, welches die Einschubplatten von beiden Längsseiten und nach oben hin abschließt, Abb. 8 links. Auf den kurzen Seiten verriegeln jeweils zwei drehbare Keile den Einschub, so dass die Platten eingeschlossen werden, Abb. 9.



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

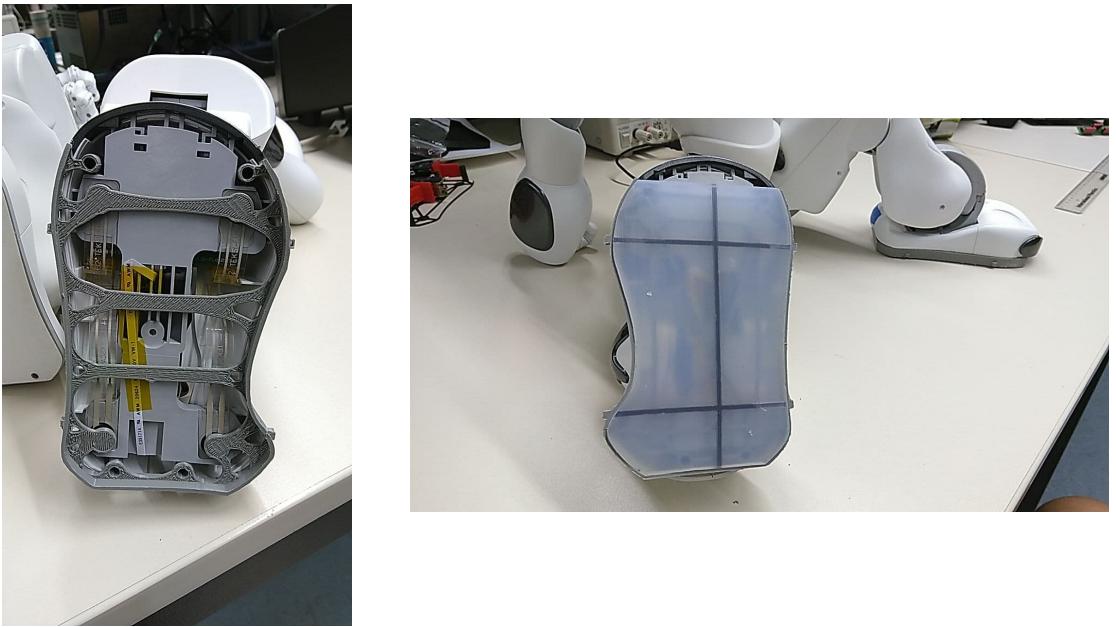
Auf der Unterseite sind an den Längsseiten zwei mit T-Nut versehene Aluminiumstangen angebracht, sowie eine zweiteilige Stangenkonstruktion, die eine Winkelverstellung mit Raste erlaubt, zu sehen in Abb. 8 rechts. Die einstellbaren Winkel betragen ca.  $5^\circ$  bis  $17^\circ$ , oder es wird für  $0^\circ$  vollständig eingeklappt.

Man hat NAO bereits schräge Flächen gehen lassen wie in [45]. 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 [46] 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.



**Abb. 10**

## **4 Versuchsdurchführung**



**Abb. 11**

## 5 Auswertung und Interpretation

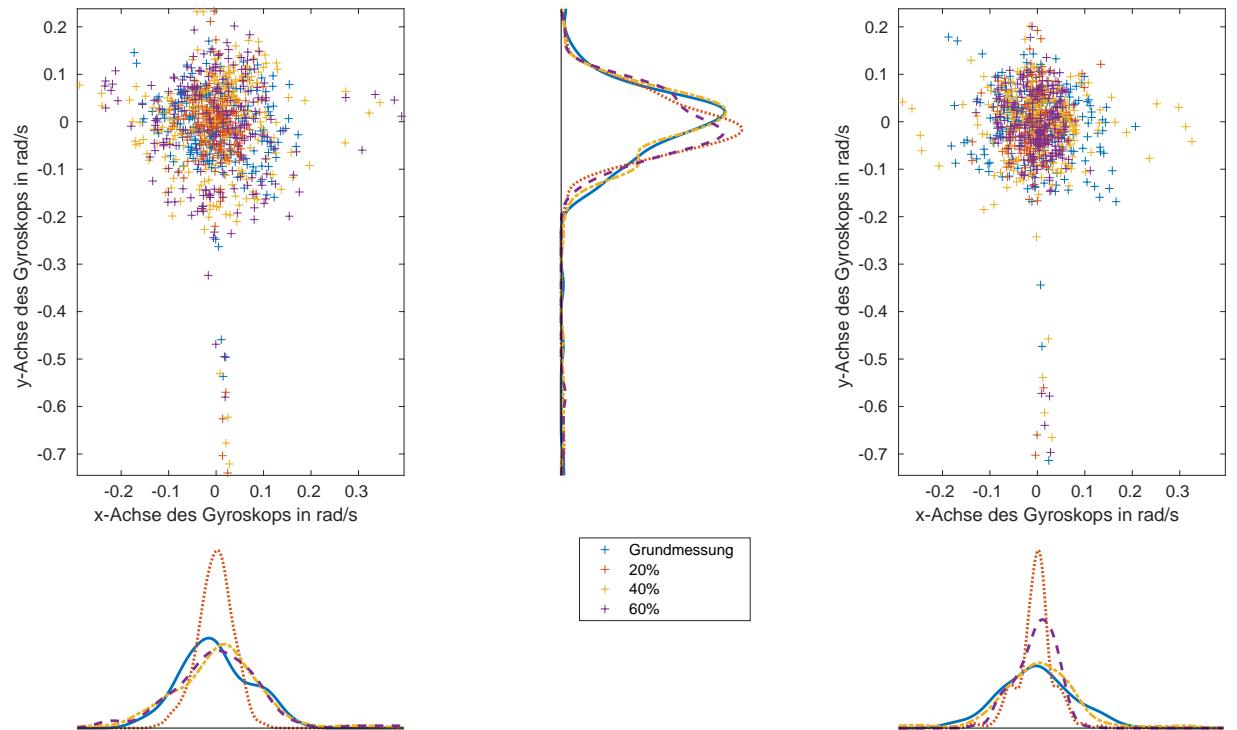
Notizen:

Die folgenden Graphen unterscheiden sich in ihrer Darstellung: Zum einen wurden Gyroskop, Beschleunigungssensors, Winkel und Center of Mass in sog. Scatterhistogrammen geplottet, siehe Abb 12,13,14. Der Hauptplot ist ein scatter-Plot, welcher die Verteilung auf der X verglichen zur Y-Achse zeigt. An den Rändern sind jeweils die Histogramme der Achsen aufgetragen, welche die Wahrscheinlichkeitsverteilung angeben. Dabei ist die Annahme, dass ein stabilierer Gang eine steilere Wahrscheinlichkeitsverteilung hervorbringt, da sich die Aufnahmepunkte in der Mitte häufen müssten. Eine flache Verteilungskurve würde im Gegenzug bedeuten, dass NAO während dem Gang große Schwankungen aufweist und deshalb instabiler läuft.

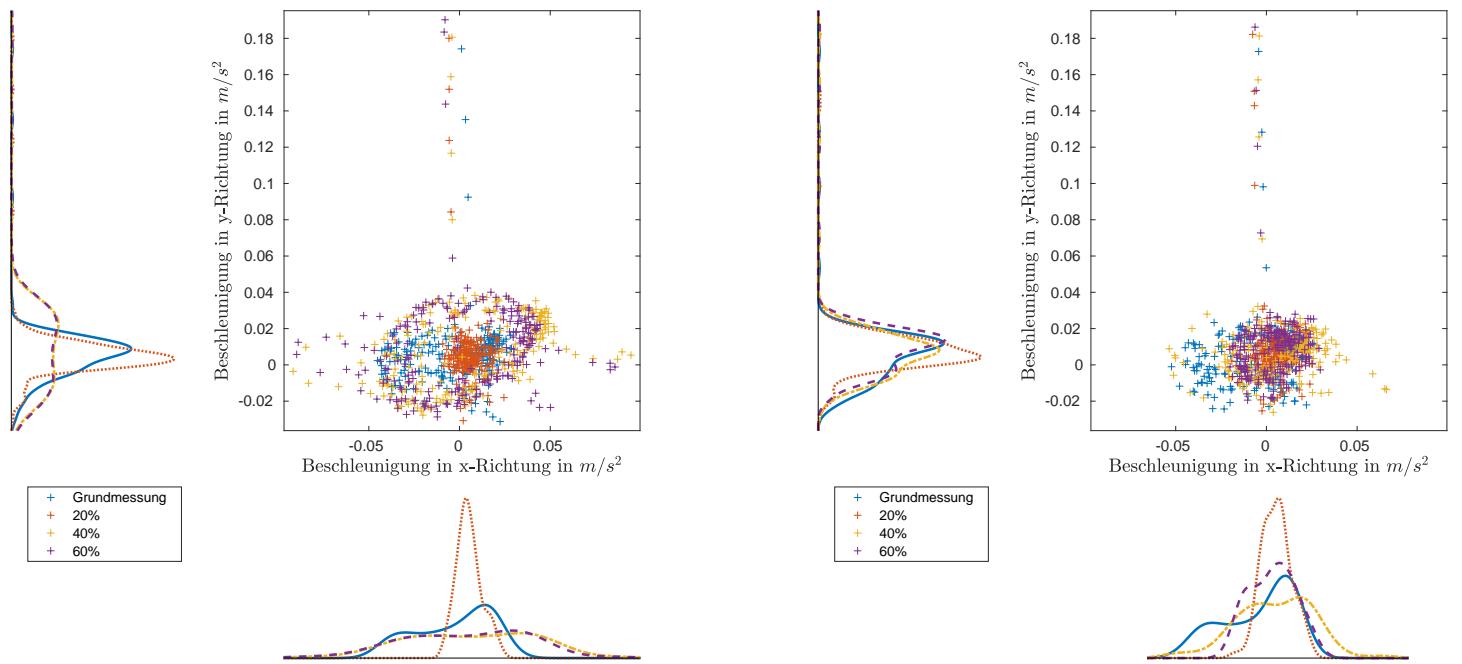
Es lässt sich eine Tendenz erkennen, dass der Gang mit Magneten stabiler ist, als ohne. Außerdem zeichnet sich das 20% MAP durch besonders gute Stabilität hab.

Der Strom wurde in Histogrammen aufgetragen, welche die relative Häufigkeit des Stroms während der Messung aufzeigt. Die Graphen 17,18,19,20 sind unterteilt in zwei Arten von Plots. Einerseits ist ein Histogramm mit jeweils 20 Säulen zu sehen. Diese wurde mit der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von Matlab (pdf) ergänzt, um die Verteilung besser einsehen zu können.

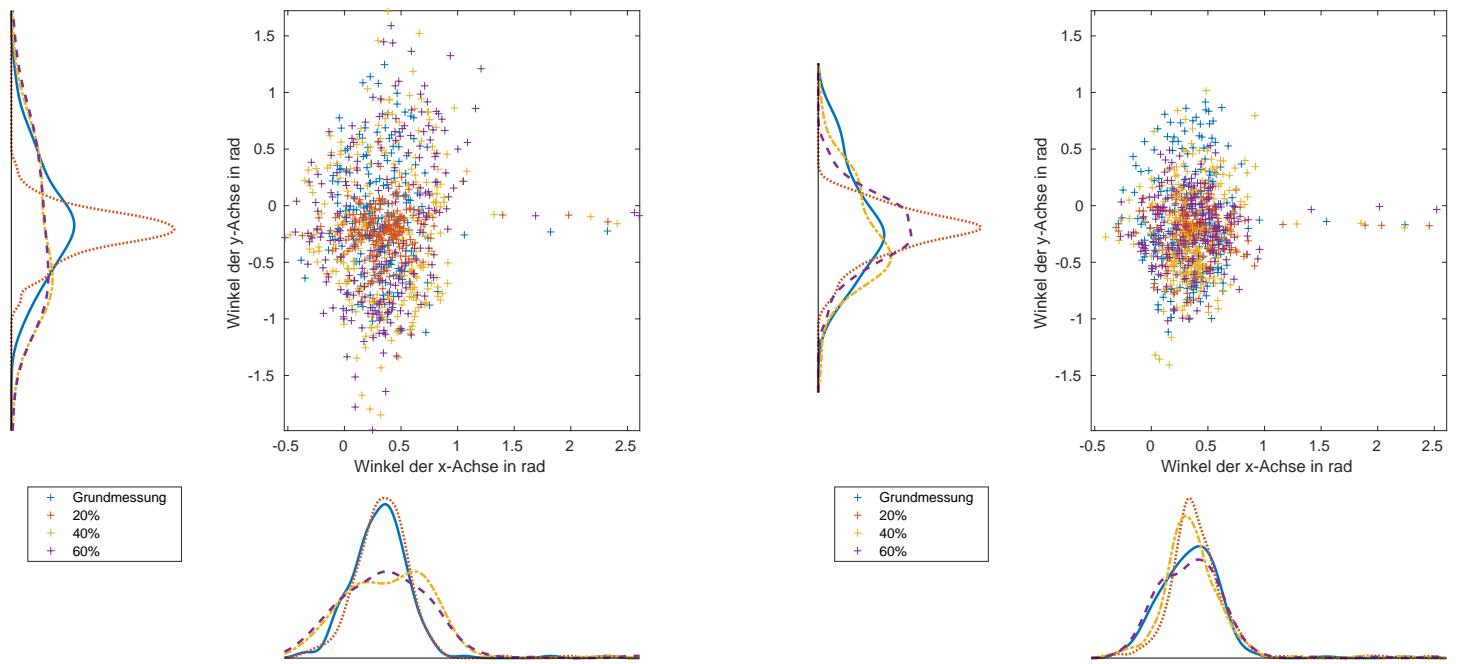
Die Annahme ist, dass ein höherer Strom mehr Reibungs- oder Haftwiderstand bedeuten. Leider ist die Datenlage hier sehr uneindeutig.



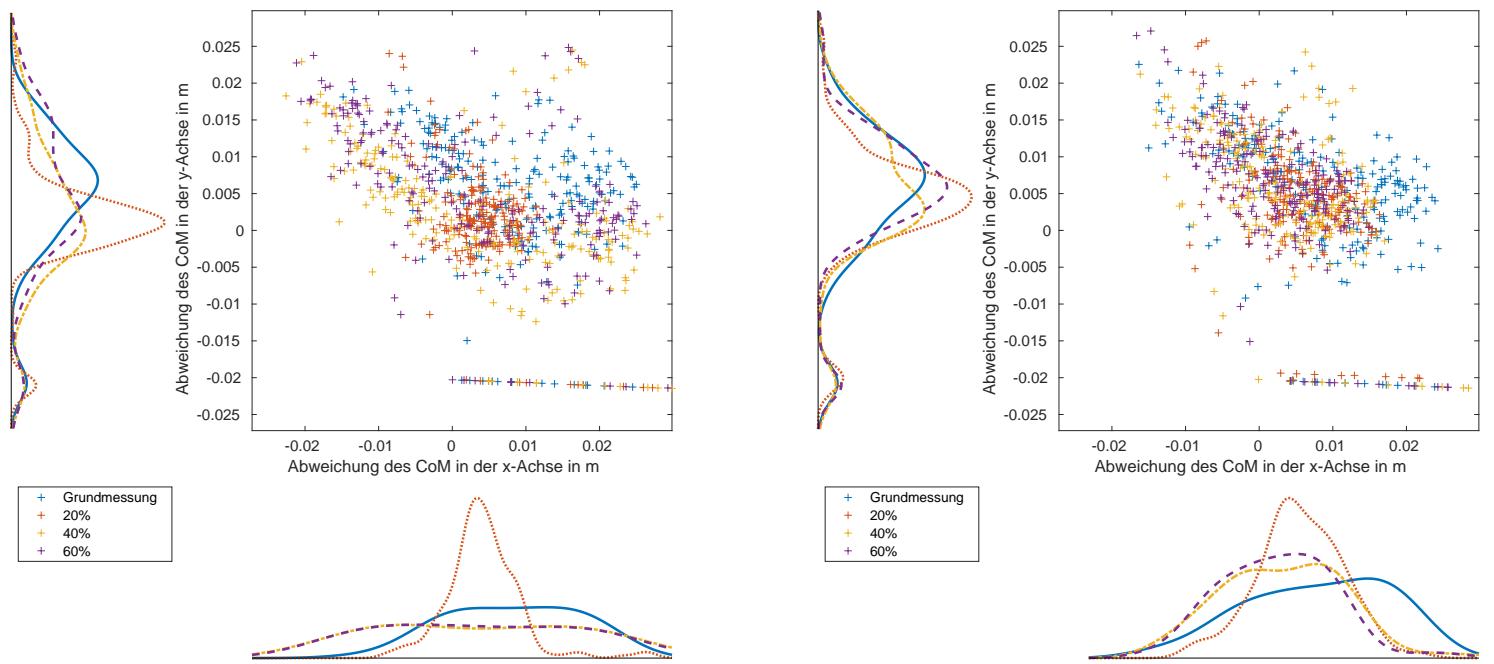
**Abb. 12.** Ausgabe des Gyroskops, x-Achse auf y-Achse, links ohne Magneten, rechts mit Magneten



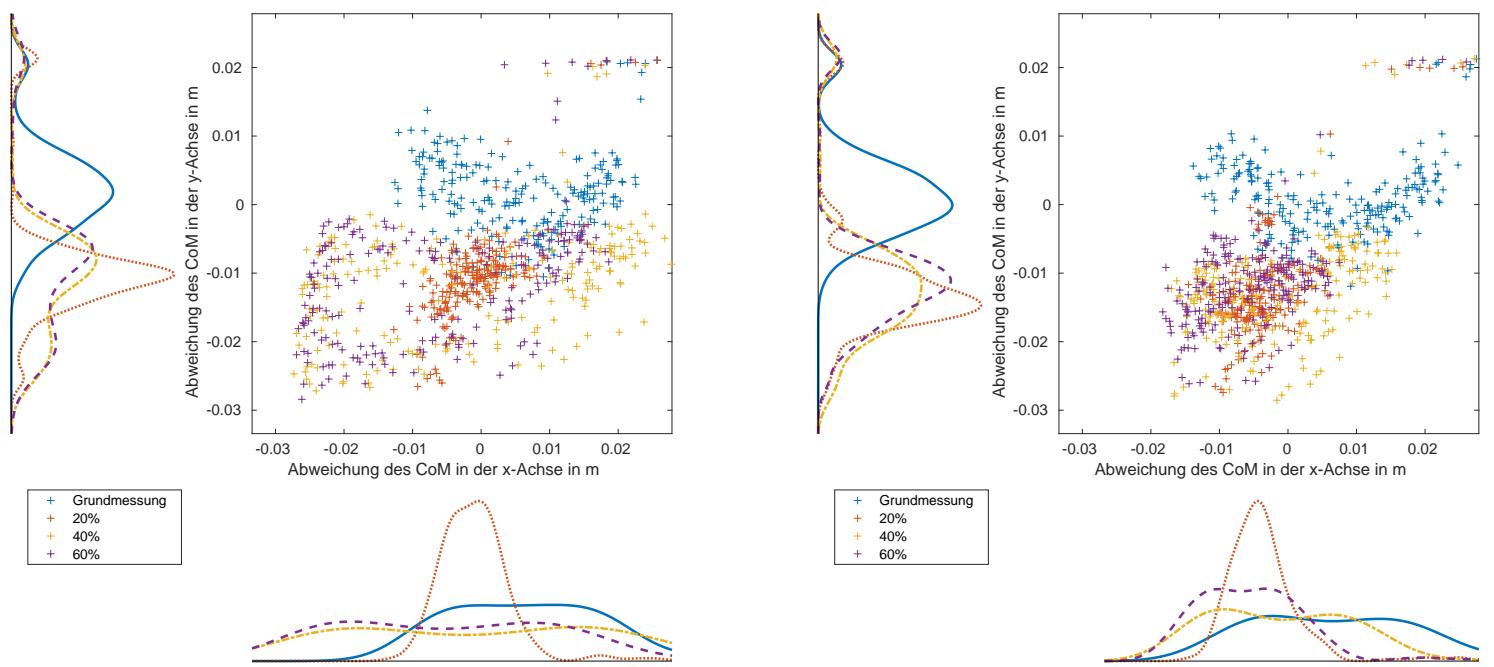
**Abb. 13.** Ausgabe des Beschleunigungssensors, x-Achse auf y-Achse aufgetragen, links ohne Magneten, rechts mit Magneten



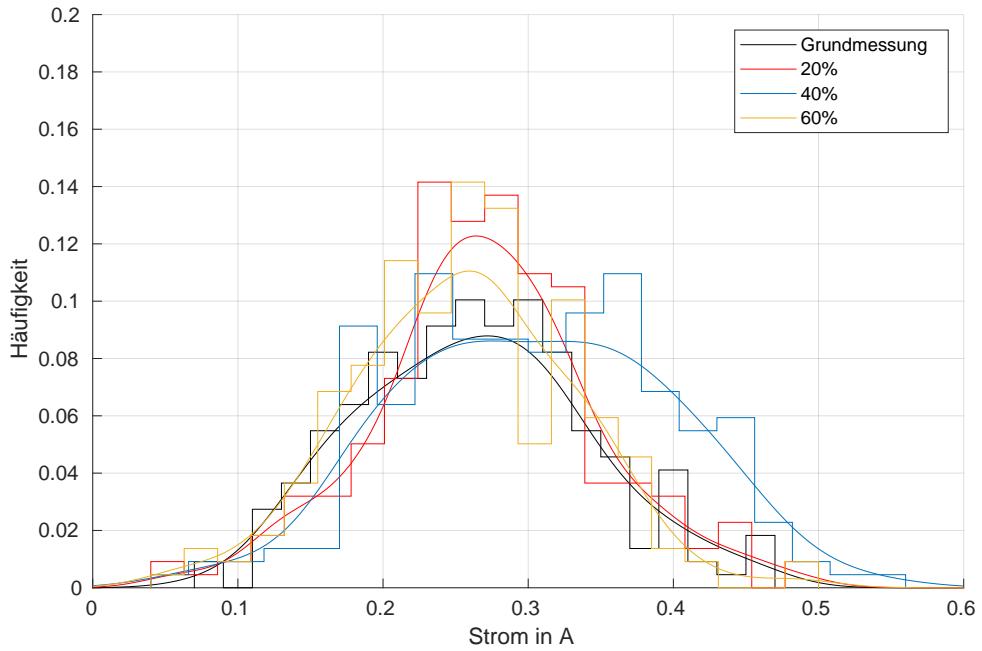
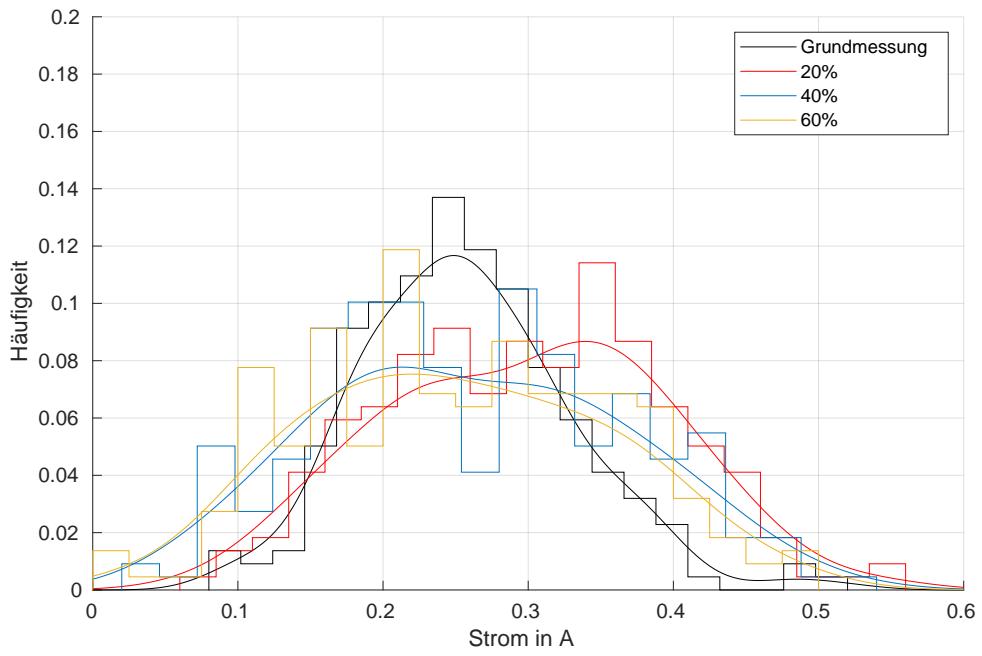
**Abb. 14.** Echtzeit errechneter Winkel, x-Achse auf y-Achse aufgetragen, links ohne Magneten, rechts mit Magneten



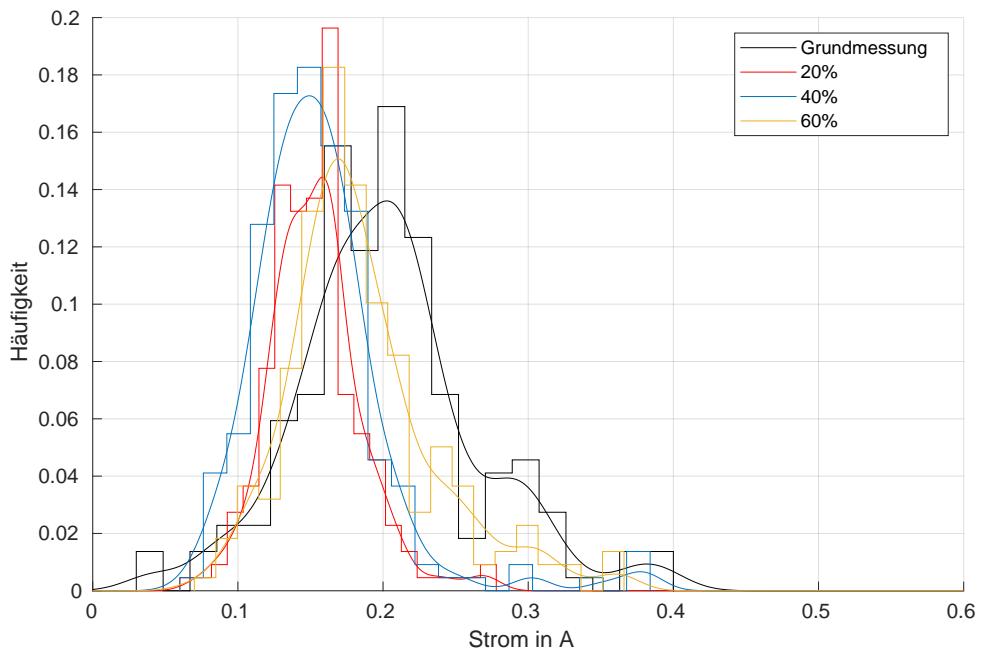
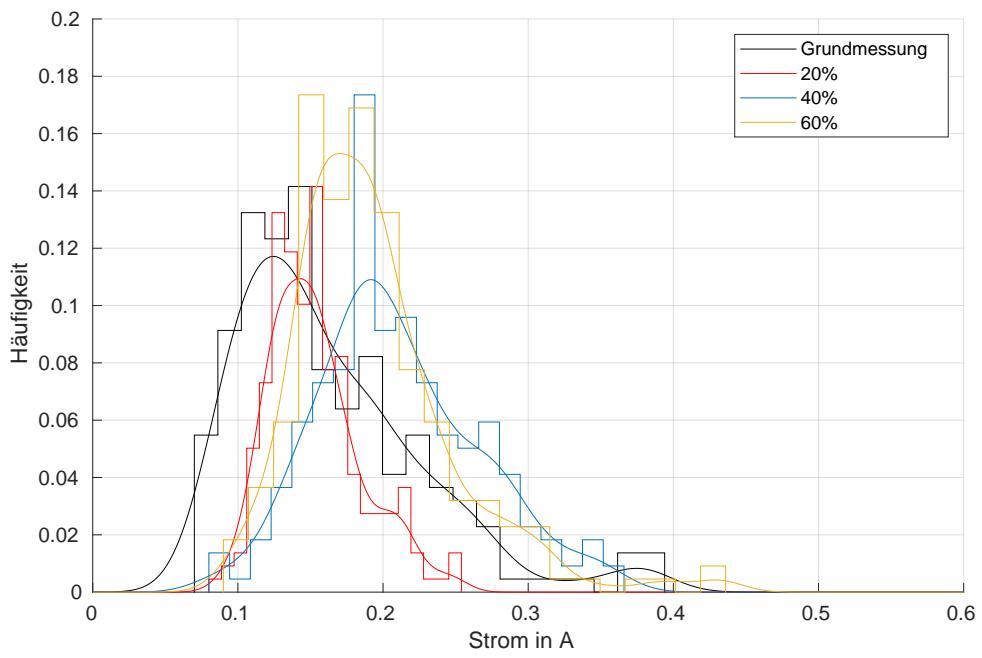
**Abb. 15.** Linker errechneter Massenschwerpunkt aufgenommen durch die FSR, x-Achse auf y-Achse aufgetragen, links ohne Magneten, rechts mit Magneten



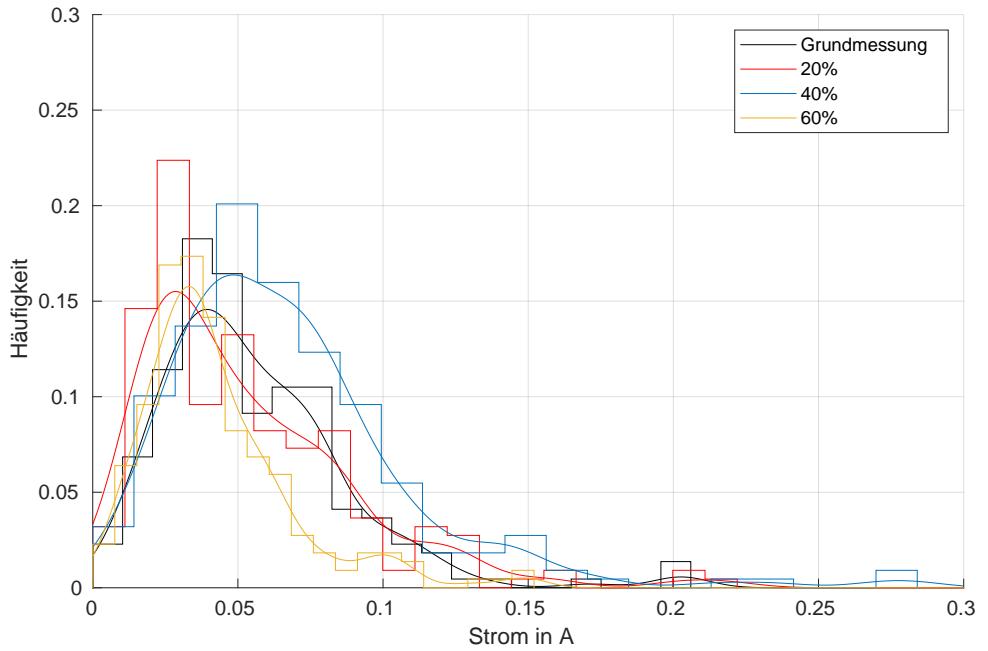
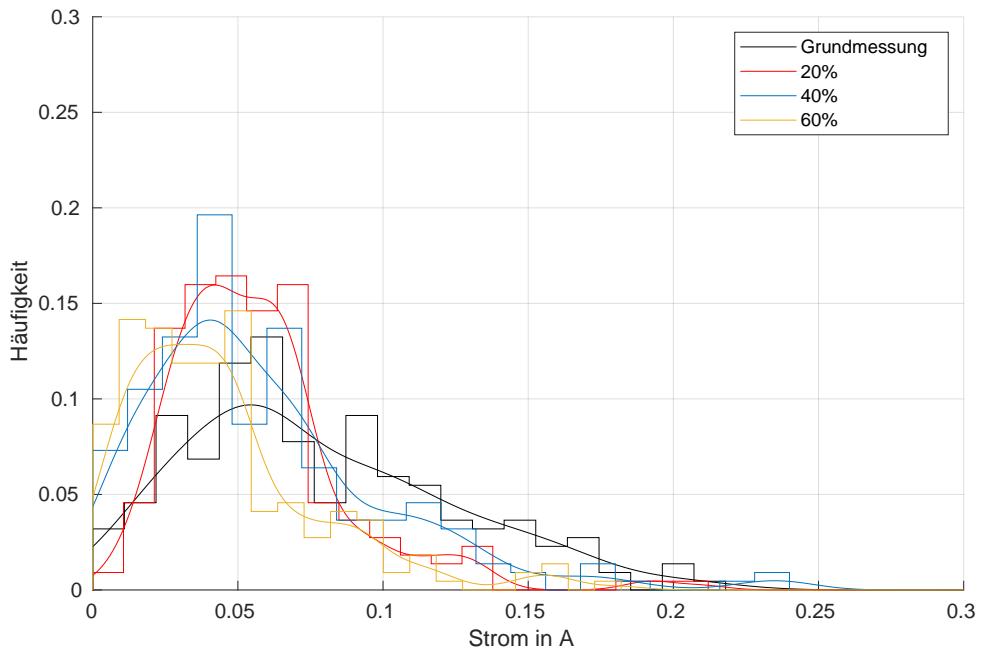
**Abb. 16.** Rechter errechneter Massenschwerpunkt aufgenommen durch die FSR, x-Achse auf y-Achse aufgetragen, links ohne Magneten, rechts mit Magneten



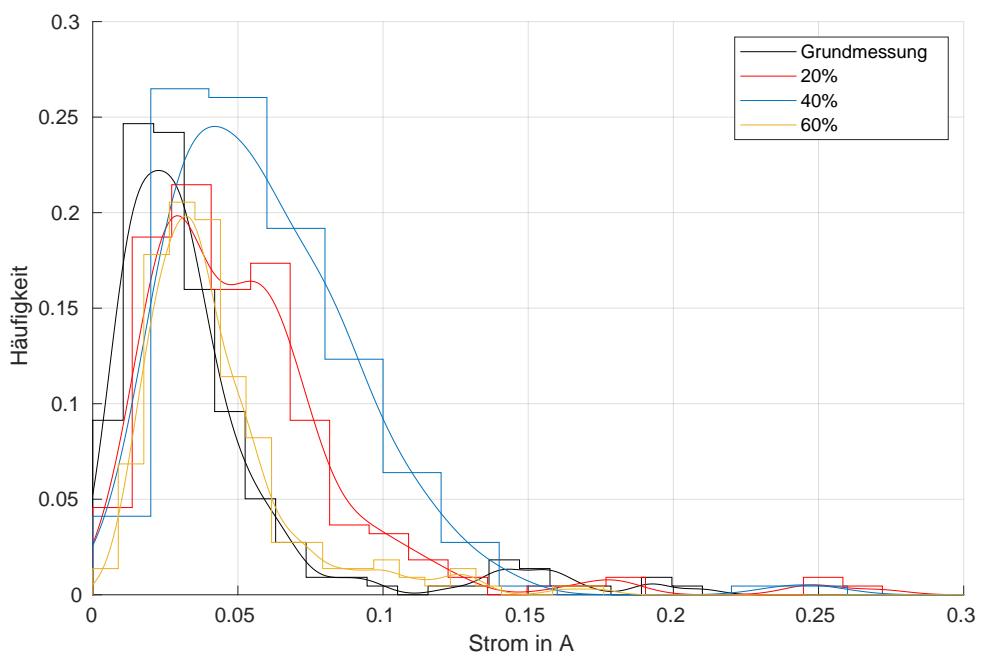
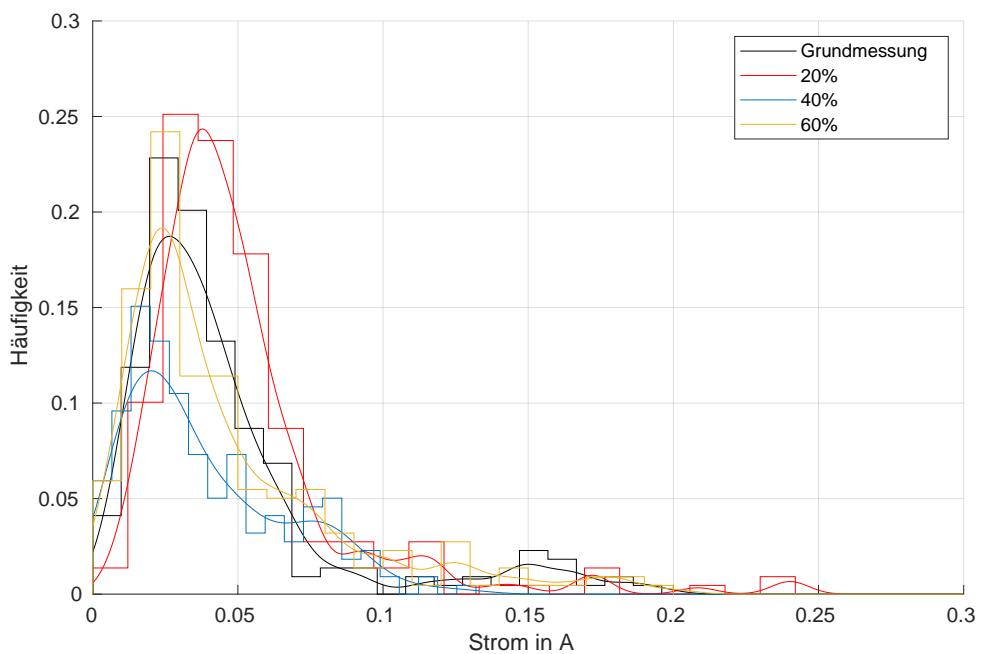
**Abb. 17.** AnklePitch gemessener Strom im linken Fuß, Strom in Ampère aufgetragen auf die Häufigkeit. Das Histogramm wurde ergänzt durch eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion. Der obere Graph sind die Aufnahmen ohne Magneten, der untere mit Magneten.



**Abb. 18.** AnklePitch gemessener Strom im rechter Fuß, Strom in Ampère aufgetragen auf die Häufigkeit. Das Histogramm wurde ergänzt durch eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion. Der obere Graph sind die Aufnahmen ohne Magneten, der untere mit Magneten.



**Abb. 19.** AnkleRoll gemessener Strom im linken Fuß, Strom in Ampère aufgetragen auf die Häufigkeit. Das Histogramm wurde ergänzt durch eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion. Der obere Graph sind die Aufnahmen ohne Magneten, der untere mit Magneten.



**Abb. 20.** AnkleRoll gemessener Strom im rechter Fuß, Strom in Ampère aufgetragen auf die Häufigkeit. Das Histogramm wurde ergänzt durch eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion. Der obere Graph sind die Aufnahmen ohne Magneten, der untere mit Magneten.

## 6 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, 230):
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         data.append(GyrX)
77         data.append(GyrY)
78
79         # Adding the summary of the FSR
80         LFsrTw = memory_service.getData("Device/
81             SubDeviceList/LFoot/FSR/TotalWeight/Sensor/Value"
82             )
83         RFsrTw = memory_service.getData("Device/
84             SubDeviceList/RFoot/FSR/TotalWeight/Sensor/Value"
85             )

```

```

81     LFcopX = memory_service.getData("Device/
82         SubDeviceList/LFoot/FSR/CenterOfPressure/X/Sensor
83             /Value")
84     LFcopY = memory_service.getData("Device/
85         SubDeviceList/LFoot/FSR/CenterOfPressure/Y/Sensor
86             /Value")
87     RFcopX = memory_service.getData("Device/
88         SubDeviceList/RFoot/FSR/CenterOfPressure/X/Sensor
89             /Value")
90     RFcopY = memory_service.getData("Device/
91         SubDeviceList/RFoot/FSR/CenterOfPressure/Y/Sensor
92             /Value")
93     data.append(LFsrTw)
94     data.append(RFsrTw)
95     data.append(LFcopX)
96     data.append(LFcopY)
97     data.append(RFcopX)
98     data.append(RFcopY)

99
100    # LeftAnkleRoll
101    PosAct = memory_service.getData("Device/
102        SubDeviceList/LAnkleRoll/Position/Actuator/Value"
103            )
104    PosSens = memory_service.getData("Device/
105        SubDeviceList/LAnkleRoll/Position/Sensor/Value")
106    ElectrSens = memory_service.getData("Device/
107        SubDeviceList/LAnkleRoll/ElectricCurrent/Sensor/
108            Value")
109    data.append(PosAct)
110    data.append(PosSens)
111    data.append(ElectrSens)

112
113    # RightAnkleRoll
114    PosAct = memory_service.getData("Device/
115        SubDeviceList/RAnkleRoll/Position/Actuator/Value"
116            )
117    PosSens = memory_service.getData("Device/
118        SubDeviceList/RAnkleRoll/Position/Sensor/Value")
119    ElectrSens = memory_service.getData("Device/
120        SubDeviceList/RAnkleRoll/ElectricCurrent/Sensor/
121            Value")
122    data.append(PosAct)
123    data.append(PosSens)
124    data.append(ElectrSens)

125
126    # LeftAnklePitch

```

```

109     PosAct = memory_service.getData("Device/
110         SubDeviceList/LAnklePitch/Position/Actuator/Value
111         ")
112     Possens = memory_service.getData("Device/
113         SubDeviceList/LAnklePitch/Position/Sensor/Value")
114     ElectrSens = memory_service.getData("Device/
115         SubDeviceList/LAnklePitch/ElectricCurrent/Sensor/
116         Value")
117     data.append(PosAct)
118     data.append(Possens)
119     data.append(ElectrSens)

120     # RightAnklePitch
121     PosAct = memory_service.getData("Device/
122         SubDeviceList/RAnklePitch/Position/Actuator/Value
123         ")
124     Possens = memory_service.getData("Device/
125         SubDeviceList/RAnklePitch/Position/Sensor/Value")
126     ElectrSens = memory_service.getData("Device/
127         SubDeviceList/RAnklePitch/ElectricCurrent/Sensor/
128         Value")
129     data.append(PosAct)
130     data.append(Possens)
131     data.append(ElectrSens)

132     data.append('platzhalter')
133     time.sleep(0.05)
134
135     return data

136
137
138
139
140

def count_files():
    counter = 1
    # 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

```

```

141
142     def create_file(filename):
143         with open(filename, "w") as f:
144             pass
145
146
147     def main(session):
148         """
149             This example uses the getData method to use FSR sensors
150             .
151             #
152             # Get the ALProxy ALMemory and ALMotion
153             from naoqi import ALProxy
154             memory_service = session.service("ALMemory")
155             motion = ALProxy("ALMotion", "nao.local", 9559)
156
157             # wake up nao
158             motion.wakeUp()
159
160             motion.moveInit()
161             motion.post.moveTo(0.85, -0.10, -0.25, [[
162                 "MaxStepFrequency", 0.0]])
163
164             data = recordData(memory_service)
165             filename = count_files()
166
167             output = os.path.abspath(filename)
168             with open(output, "wb") as file:
169                 writer = csv.writer(file, delimiter=',')
170                 writer.writerow(data)
171                 zeilen_aufteilen(output)
172                 print "Results written to", output
173                 # go back to crouch position and sleep
174                 motion.rest()
175
176
177     if __name__ == "__main__":
178         parser = argparse.ArgumentParser()
179         parser.add_argument("--ip", type=str, default="127.0.0.1",
180                             help="Robot IP address. On robot or Local Naoqi: use '127.0.0.1'.")
181         parser.add_argument("--port", type=int, default=9559,
182                             help="Naoqi port number")
183
184         args = parser.parse_args()

```

```

183     session = qi.Session()
184     try:
185         session.connect("tcp://" + args.ip + ":" + str(args
186             .port))
186     except RuntimeError:
187         print ("Can't connect to Naoqi at ip \'" + args.ip
188             + "\' on port " + str(args.port) + ".\n"
189             "Please check your script arguments. Run with -h
190             option for help.")
190         sys.exit(1)
190     main(session)

```

Der Programmcode 1 kann in mehrere Funktionen aufgeteilt betrachtet werden. Die Funktion `sed` ist aus [47] 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 durchaus 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](https://doi.org/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](https://doi.org/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-.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 and 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] M. Ruel. "STICTION : THE HIDDEN MENACE How to Recognize This Most Difficult Cause of Loop Cycling". In: 2014.
- [44] Gareth J Monkman u. a. "Smart Stiction". In: *Robot Autom Eng J* 4.4 (2019). ISSN: 555641. DOI: <10.19080/RAEJ.2019.04.555641>.
- [45] Christian Lutz u. a. *NAO Walking Down a Ramp Autonomously*.
- [46] 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).
- [47] URL: <https://stackoverflow.com/questions/12714415/python-equivalent-to-sed> (besucht am 08.03.2020).