

Einsatz funktioneller Materialien zur Realisierung inhärenter Sensorik bei elastischen Strukturen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt der

Fakultät für Maschinenbau der

Technische Universität Ilmenau

von Frau

Mirna Issa

1. Gutachter: apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Lena Zentner
(Technische Universität Ilmenau)
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Nenad D. Pavlović
(Universität Niš)
3. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Detlef Riemer
(Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur, Leipzig)

Tag der Einreichung: 13. 06. 2016

Tag der Verteidigung: 18. 01. 2017

URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2017000071

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand am Fachgebiet Mechanismentechnik der Fakultät für Maschinenbau an der Technischen Universität Ilmenau. Ein Teil davon wurde in Zusammenarbeit mit der Universität Niš in Serbien im Rahmen des Forschungsförderungsprogramms Projektbezogener Personenaustausch mit Serbien (PPP Serbien-2010) erarbeitet.

An dieser Stelle möchte ich Frau apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Lena Zentner für die Vergabe des interessanten Promotionsthemas und für die zielgerichtete Betreuung der Arbeit durch ihre Hinweise, Ideen und Diskussionen herzlich danken. Weiterhin möchte ich mich für die Übernahme der Gutachten bei allen Beteiligten bedanken.

Ferner danke ich Herrn Dr.-Ing. Dalibor Petkovic von der Universität Niš für die gute Zusammenarbeit während seines Aufenthalts an der Technischen Universität Ilmenau. Ich möchte mich auch bei allen Kollegen bedanken, die mir durch ihre Ratschläge und zahlreichen kritischen Anmerkungen behilflich waren. Ein großer Dank geht an Herrn Dipl.-Ing. Martin Feierabend für die unterstützenden Gespräche und Hinweise. Frau Dipl.-Ing. Alexandra Chaykina möchte ich für die Zusammenarbeit am Ansatz der Materialuntersuchung danken. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Stephan Husung für die hilfreichen Hinweise sowie die Korrekturen zum Manuskript.

Frau Marion Walther danke ich herzlich für die sprachlichen Korrekturen zum Manuskript. Jederzeit war sie geduldig und freundlich bereit meine Arbeit gegenzulesen.

Meinen Eltern, meinen Geschwistern und meinen Verwandten danke ich recht herzlich für ihre fortwährende Unterstützung. Ganz großer Dank geht an meine Tochter Zena Mayya, die mich durch ihr Lächeln immer hoch motiviert hat. Meinem Ehemann Iyead Mayya danke ich aus ganzem Herzen für die Ausdauer, Ruhe und Geduld, mit der er mir stets zur Seite stand und mich immer wieder aufgemuntert hat.

In besonderer Weise danke ich der Tischrin Universität (Syrien) für die Unterstützung während meiner Promotion. Weiterhin danke ich der Technischen Universität Ilmenau für die Vergabe der Thüringer Graduiertenförderung. Mein Dank gilt ebenso dem Fachgebiet Mechanismentechnik und dem Gleichstellungsrat der Technischen Universität Ilmenau für die finanzielle Unterstützung während meines Promotionsstudiums.

Ilmenau, im März 2017

Mirna Issa

Kurzfassung

Sensorisierung der technischen Systeme hat in vielen Forschungsbereichen der Robotik zunehmend an Bedeutung gewonnen. Insbesondere für Mensch-Maschine-Schnittstellen sind sensorisierte und nachgiebige Systeme von Interesse. Die Nachgiebigkeit eines Systems kann zum Beispiel durch die Materialeigenschaften sowie durch die geometrische Gestaltung gewährleistet werden.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Möglichkeit zur Sensorisierung nachgiebiger Systeme, die für den Bereich der Robotik von Interesse sind, beschrieben. Dafür wird ein elektrisch leitfähiger Silikonkautschuk eingesetzt. Der Vorteil der Anwendung des leitfähigen Silikonkautschuks ist, dass die Nachgiebigkeit solcher Systeme weiterhin erhalten bleibt bzw. sich verbessert. Unter Nutzung experimenteller Untersuchungen von den leitfähigen Silikonkautschuken ELASTOSIL R 570/50 MH C1 und POWERSIL® 466 A/B VP konnte das elektrische Verhalten dieser Materialien unter den mechanischen Beanspruchungen charakterisiert werden.

Die Einsatzmöglichkeiten des leitfähigen Silikonkautschuks als Sensorelemente werden am Beispiel von drei nachgiebigen Systemen aufgezeigt. Die hier verwendeten Sensorelemente beruhen auf dem Prinzip der elektrischen Widerstandsänderung unter den mechanischen Beanspruchungen.

Das erste System ist eine taktile Struktur und hat eine einfache Gestalt. Mit dem ersten System wird die Anwendbarkeit von dem Material ELASTOSIL R 570/50 MH C1 als Sensorelement aufgezeigt. Verschiedene Tests werden an der taktilen Struktur zur Ermittlung der Kontaktstellen durchgeführt. Die Messergebnisse werden dargestellt und diskutiert. Bei dem zweiten System handelt es sich um einen nachgiebigen Greifer. Der Greifer kann sich an verschiedene Objekte beim Greifvorgang anpassen. Des Weiteren können durch die inhärente nachgiebige Sensorik Informationen über das gegriffene Objekt beim Greifvorgang geliefert werden. Im letzten Teil der Arbeit wird das dritte System, eine nachgiebige Gelenkverbindung mit inhärenter Sensorik, diskutiert. Die Sensorelemente des Systems können dank der Materialeigenschaften des Silikonkautschuks zusätzlich die Funktionen einer Feder und eines Dämpfers übernehmen. Dies ermöglicht einen kompakten Aufbau des Systems mit einer Steuerungsmöglichkeit der Drehrichtung mithilfe der gelieferten Sensorsignale bei einem Kollisionsfall.

Abstract

Sensorization of technical systems has become increasingly important in many research fields of robotics. The sensorized and compliant systems are especially of interest for human-machine interfaces. The compliance of a system can be, for example, achieved by the material properties as well as by the geometrical design.

In the presented thesis, a possibility of the sensorization of compliant systems is described, that are of interest for robotics. In order to do this, an electrical conductive silicone rubber is used. The advantage of this material is that the compliance of the system remains available or can be even improved. Based on experimental investigations of the conductive silicone rubber ELASTOSIL R 570/50 MH C1 and POWERSIL® 466 A/B VP, the electrical behavior of these materials could be characterized in dependence on the mechanical loads.

The application possibilities of the conductive silicone rubber as sensor elements are shown by using the examples of three compliant systems. The sensor elements made of the conductive silicone rubber are based on the principle of the change in the electrical resistance under the mechanical loads.

The first system is a tactile structure with a simple design. By using the first system, the applicability of the material ELASTOSIL R 570/50 MH C1 as a sensor element is shown. Several tests are performed on the tactile structure to determine the contact points. The measurement results are presented and discussed. The second system is a compliant gripper. This gripper can accommodate to different grasped objects during the gripping process. Furthermore, informations about the grasped object can be provided by the inherent compliant sensor elements during the gripping process. In the last part of this thesis, the third system is discussed, which is a compliant joining structure with embedded sensor elements. Thanks to the material properties of the silicone rubber, the sensor elements of the system can additionally take the tasks of a spring and a damper. This allows a compact construction of the system and a control possibility of the rotation direction with the help of the sensor signals, which will be provided during the collision.

Inhaltsverzeichnis

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung	2
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Einführung in nachgiebige Mechanismen, funktionelle Materialien und elektrisch leitfähige Elastomere	5
2.1 Nachgiebige Mechanismen	5
2.2 Funktionelle Materialien	8
2.2.1 Piezoelektrischer Effekt	9
2.2.2 Magnetostriktiver Effekt	10
2.2.3 Piezoresistiver Effekt	11
2.2.4 Auswahlkriterien für geeignete Sensormaterialien	11
2.3 Allgemeine Beschreibung der Polymere	13
2.3.1 Kettenstruktur	13
2.3.2 Einteilung der Polymere	14
2.3.3 Silikonkautschuk	16
2.4 Elektrische Eigenschaften von elektrisch leitfähigen Elastomeren	21
3 Stand der Technik	29
3.1 Stand der Technik der taktilen Strukturen	29
3.1.1 Taktile Strukturen mit Sensoren für Aktion	30
3.1.2 Taktile Strukturen mit Sensoren für Perzeption	32
3.2 Stand der Technik der Greifsysteme	33
3.2.1 Greifer mit Sensoren zum Durchführen des Greifvorgangs	34
3.2.2 Greifer mit Sensoren für Perzeption	37
3.2.3 Nachgiebige Greifer ohne Sensorik	38

3.3	Stand der Technik der Gelenkverbindungen	38
3.3.1	Gelenkverbindungen mit elastischen Elementen	39
3.3.2	Gelenkverbindungen mit Sensoren	40
3.3.3	Gelenkverbindungen mit Sensoren und elastischen Elementen . .	40
4	Untersuchung der Eigenschaften des elektrisch leitfähigen Silikonkautschuks	43
4.1	Messverfahren	43
4.2	Untersuchung der Eigenschaften des elektrisch leitfähigen Silikonkautschuks in Abhängigkeit von der Zugbelastung	45
4.2.1	Fertigung der Sensor-Proben	46
4.2.2	Experimentelle Untersuchungen zum ELASTOSIL R 570/50 MH C1	50
4.2.3	Experimentelle Untersuchungen zum POWERSIL® 466 A/B VP	58
4.3	Untersuchung der Eigenschaften des elektrisch leitfähigen Silikonkautschuks in Abhängigkeit von der Druckbelastung	60
4.3.1	Fertigung der Sensor-Proben	60
4.3.2	Experimentelle Untersuchungen zum ELASTOSIL R 570/50 MH C1	61
4.3.3	Experimentelle Untersuchungen zum POWERSIL® 466 A/B VP	63
4.4	Zusammenfassung der Messergebnisse	65
5	Anwendung des elektrisch leitfähigen Silikonkautschuks	69
5.1	Taktile Struktur	69
5.1.1	Aufbau der taktilen Struktur	69
5.1.2	Überprüfung der Funktionalität	71
5.2	Nachgiebiger Greifer mit inhärenter Sensorik	75
5.2.1	Entwicklung der Sensorelemente für den nachgiebigen Greifer . .	75
5.2.2	Fertigung des nachgiebigen Greifers mit den Sensorelementen . .	85
5.2.3	Überprüfung der Funktionalität	86
5.3	Nachgiebige Gelenkverbindung mit inhärenter Sensorik	102
5.3.1	Entwicklung und Aufbau der nachgiebigen Gelenkverbindung mit der inhärenten Sensorik	102
5.3.2	Prinzip der Richtungsermittlung der nachgiebigen Gelenkverbin- dung mit der inhärenten Sensorik	107

5.3.3	Überprüfung der Funktionalität	109
6	Zusammenfassung und Ausblick	115
A	Geometrische Abmessungen	121
A.1	Abmessungen der Sensor-Probe für die Untersuchungen unter der Zugbelastung	121
A.2	Die wichtigen Abmessungen des entwickelten Greifers und der Sensorelemente	122
A.3	Die wichtigen Abmessungen der Hauptteile von der Gelenkverbindung .	123
	Literaturverzeichnis	125
	Abbildungsverzeichnis	137
	Tabellenverzeichnis	143

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Δb	Breitenänderung
Δd	Dickenänderung
ΔR	elektrische Widerstandsänderung
$\Delta\rho_{sp}$	Änderung des spezifischen Widerstands
$-\text{C}_6\text{H}_5$	Phenylgruppe
$-\text{CH} = \text{CH}_2$	Vinylgruppe
$-\text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CF}_3$	Fluorgruppe
$-\text{CH}_3$	Methylgruppe
H	Wasserstoff
O	Sauerstoff
Si	Silicium
μ	Poissonzahl
ρ_{sp}	spezifischer Widerstand
σ	mechanische Spannung
ε_r	Dielektrizitätszahl des Dielektrikums
A	Querschnittfläche
b	Breite
D	Durchmesser
d	Dicke
F	Kraft
h	Abstand des Mittelpunkts des Objektquerschnitts vom Ansatz des Greiferfingers
I	elektrischer Strom
K	piezoresistiver k -Faktor
l	Länge

R, r	elektrischer Widerstand
R_{ref}	Referenzwiderstand
R_S	elektrischer Widerstand von der Sensor-Probe
R_0	elektrischer Widerstand von dem vorkomprimierten Sensorelement
t	Zeit
t_1, t_2	Zeitpunkte der Kollision
U	elektrische Spannung
$U'_{\text{th}}, U''_{\text{th}}$	Schwellwerte der Spannung
U_0	Anfangswert des Spannungsabfalls
U_{in}	elektrische Eingangsspannung
U_n	aktuell erfasster Wert des Spannungsabfalls
U_S	elektrische Ausgangsspannung
V	Volumen
Δl	Längenänderung
3D	dreidimensional
CAD	<i>Computer-aided design</i>
CPC	<i>Conductive polymer composites</i>
CS	<i>Cushion support</i>
CSC	<i>Cylinder-shaped cushion</i>
E-Modul	Elastizitätsmodul
EP	Epoxidharze
FEM	Finite-Elemente-Methode
FMQ	Fluor- methylgruppenhaltiges Silikonpolymer
FRH	pneumatische Roboterhand
FSR	<i>Force sensing sensor</i>
FVMQ	Fluor- vinyl- methylgruppenhaltiges Silikonpolymer
HRP	<i>Humanoid robotics projekt</i>
HTV	hochtemperaturvernetzende Kautschuke
IFTToMM	<i>International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science</i>

ISAF	.....	<i>Intermediate Super Abrasion Furnace</i> (Bezeichnung eines Rußes)
IUPAC	.....	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>
JTS	.....	<i>Joint torque sensor</i>
LabVIEW	.....	<i>Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench</i>
LR	.....	<i>Liquid rubber</i>
LSR	.....	<i>Liquid silicone rubber</i>
MQ	.....	Polydimethylsiloxan
NR	.....	Naturkautschuk
PA	.....	Polyamide
PDMS	.....	Polydimethylsiloxan
PE	.....	Polyethylen
PET	.....	Polyethylenterephthalat
PMQ	.....	Phenyl- methylgruppenhaltiges Silikonpolymer
PTFE	.....	Polytetrafluorethylen
PVAC	.....	Polyvinylacetat
PVC	.....	Polyvinylchlorid
PVDF	.....	Polyvinylidenfluorid
PVMQ	.....	Phenyl- vinyl- methylgruppenhaltiges Silikonpolymer
PZT	.....	Blei-Zirkonat-Titnat
Q	.....	quaternäre Gruppe
RBO	.....	<i>Robotics and Biology Laboratory of the University of Berlin</i>
RTV-1	.....	raumtemperaturvernetzende Silikonkautschuke
RTV-2	.....	raumtemperaturvernetzende, 2-Komponenten-Silikonkautschuke
SDM	.....	<i>Shape deposition manufacturing</i>
SIR	.....	Silikonkautschuk
SRC	.....	<i>Silicone rubber cushion</i>
UP	.....	Polyesterharze
VMQ	.....	vinyl- methylgruppenhaltiges Silikonpolymer
Å	.....	Ångström

1 Einleitung

In vielen Bereichen der Technik, wo große Verformungen und Einstellung des gewünschten Verformungs- und Bewegungsverhaltens erforderlich sind, ist der Einsatz von technischen Systemen mit großer Nachgiebigkeit und inhärenter Sensorik eine Grundvoraussetzung. Solche Systeme können aus elastischen Polymeren hergestellt werden. Insbesondere sind die elastischen Polymere von Interesse, wenn sie sensorische Eigenschaften aufweisen können. Dadurch lassen sich kostengünstige, kompakte und einfache technische Systeme herstellen. Dies ist von besonderer Bedeutung beispielsweise für den Bereich der Robotik. So können sich die nachgiebigen Greifsysteme aus den elastischen Polymeren an verschiedene Objekte anpassen. Weiterhin erlauben die sensorischen Eigenschaften dem Greifsystem, den Greifvorgang erfolgreich abschließen zu können. Ein anderes Beispiel sind die Roboter, die kollaborativ mit Menschen betrieben werden oder die Dienstleistungen für die Menschen erbringen sollen (wie zum Beispiel der Serviceroboter). Hier werden die Möglichkeiten zum Erhalten eines nachgiebigen sensorisierten Systems gezielt erforscht. Während die Nachgiebigkeit solcher Systeme einen sanften Stoß mit den Menschen bei einer plötzlich eintretenden Kollision ermöglicht, erlauben die sensorischen Eigenschaften, dass diese Gefahr entdeckt und so schnell wie möglich beseitigt wird. Der elektrisch leitfähige Silikonkautschuk gestattet, dass diese zwei wichtigen Eigenschaften, die Elastizität und die Sensorik basierend auf der elektrischen Widerstandsänderung, in einem Material integriert werden können. Aus diesem Grund hat das Material in den letzten Jahrzehnten enorm an Bedeutung gewonnen.

In der Literatur wurde das Verhalten des leitfähigen Silikonkautschuks unter der mechanischen Beanspruchung untersucht und überwiegend im Bereich der taktilen Sensorsysteme verwendet. Verschiedene Arten von Silikonkautschuk haben unterschiedliche sensorische Eigenschaften gezeigt. Um die sensorischen Eigenschaften des elektrisch leitfähigen Silikonkautschuks umfassend zu studieren und den Silikonkautschuk in verschiedenen Anwendungen einsetzen zu können, ist es notwendig, diese Literatur

aufzugreifen und durch neue Untersuchungen systematisch zu ergänzen. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den notwendigen Untersuchungen. Basierend auf den Ergebnissen konnten mehrere sensorisierte Systeme als Demonstratoren aufgebaut werden.

1.1 Zielsetzung

Das grundsätzliche Ziel der vorliegenden Arbeit ist, das elektrische Verhalten der leitfähigen Silikonkautschuke unter den mechanischen Beanspruchungen zu erläutern und die Anwendungsmöglichkeiten der Silikonkautschuke als Sensorelemente in unterschiedlichen nachgiebigen Systemen, die im Bereich der Robotik von Interesse sind, aufzuzeigen. Die Sensorisierung stellt eine Herausforderung dar, da durch die Sensorisierung die Nachgiebigkeit der Systeme nicht beeinflusst werden soll. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen am Beispiel von drei für den Roboter bedeutenden Systemen, einer taktilen Struktur, einem Greifer und einer Gelenkverbindung, die Einsatzmöglichkeiten des genannten Materials, dessen Vorteile und Nachteile sowie die Grenzen beim Einsatz derartiger Sensoren aufgezeigt werden.

Die oben aufgeführten Erläuterungen führen zu folgenden Forschungsfragen, die im Rahmen der Dissertation beantwortet werden sollen:

- Wie ändert sich der elektrische Widerstand der leitfähigen Silikonkautschuke unter mechanischen Belastungen?
- Für welche Anwendungen sind die Sensorelemente aus den Silikonkautschuken geeignet?
- Ist die Widerstandsänderung der leitfähigen Silikonkautschuke unter den mechanischen Belastungen hinreichend reproduzierbar, sodass diese in den Systemen, welche für den Bereich der Robotik interessant sind, wie taktile Struktur, Greifer und Gelenkverbindung, gut anwendbar sind?
- Lassen sich leitfähige Silikonkautschuke als inhärente Teile der Struktur in Greifsystem für die Erkennung des Vorhandenseins und für die Identifikation von unbekanntem Objekten einsetzen?
- Welche Informationen über den Systemzustand können mithilfe der Sensorelemente aus den Silikonkautschuken geliefert werden?

1.2 Aufbau der Arbeit

Um die Lesbarkeit der Arbeit zu verbessern, wird der grundsätzliche Aufbau schematisch in Abbildung 1.1 dargestellt.

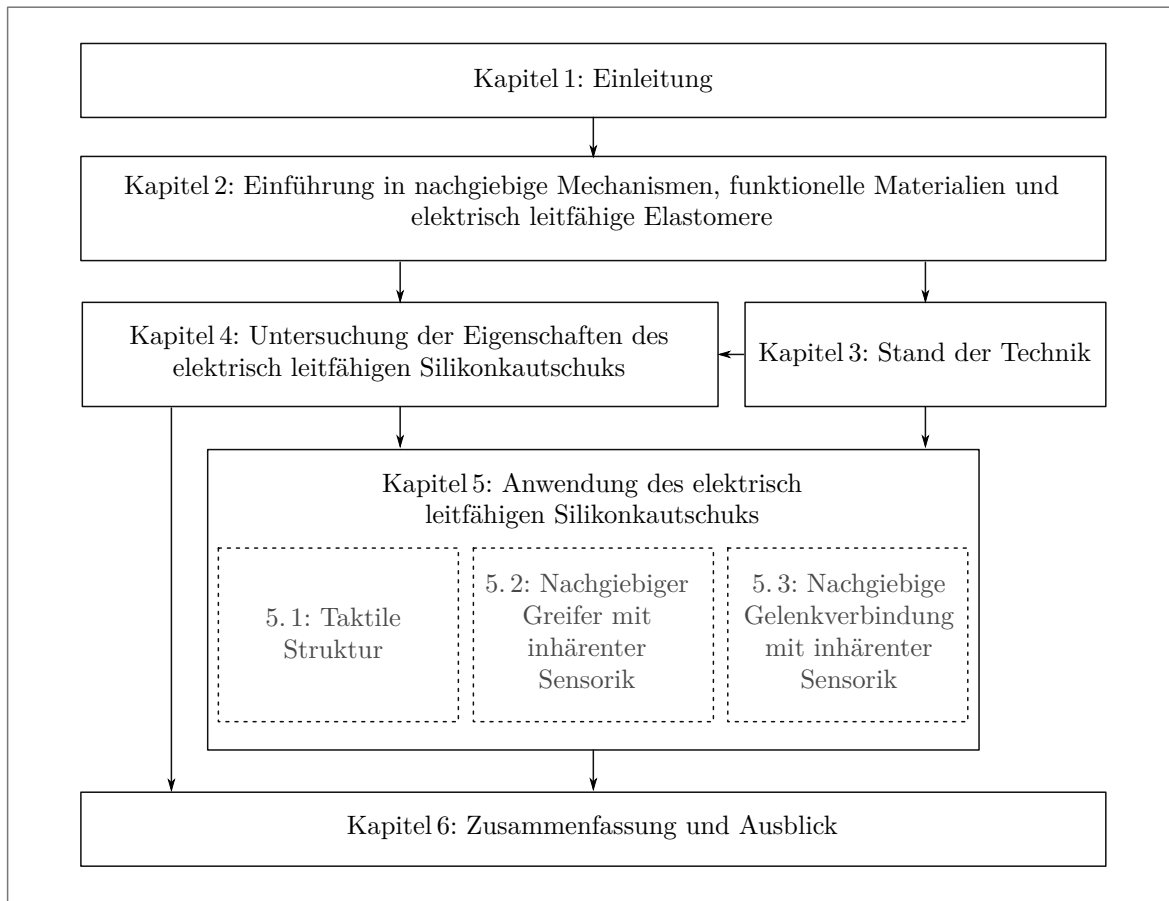


Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit

Beginnend im zweiten Kapitel wird zunächst eine kurze Einführung in den Wissenschaftsbereich der nachgiebigen Mechanismen und in die funktionale Materialien vorgenommen. Zudem werden die Polymere allgemein beschrieben. Danach schließt sich die Vorstellung der elektrischen Eigenschaften von den leitfähigen Elastomeren an.

Im dritten Kapitel wird der bisherige Stand der Technik im Bereich der Robotik zunächst zu den taktilen Strukturen dargestellt. Dies wird auf den Anwendungsbereich des leitfähigen Silikonkautschuks begrenzt. Im weiteren Verlauf des Kapitels wird der Stand der Technik zu den Greifsystemen sowie zu den Gelenkverbindungen aufgezeigt.

Das vierte Kapitel befasst sich mit der Untersuchung der Eigenschaften des elektrisch leitfähigen Silikonkautschuks. Hier werden die zwei Materialien ELASTOSIL R 570/50 MH C1 und POWERSIL® 466 A/B VP in Betracht gezogen. Das elektrische Verhalten jedes Material wird unter der Druck- bzw. Zugbelastung dargestellt. Weiterhin wird der Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Widerstandsänderung des Materials gezeigt. Die Untersuchungsergebnisse beider Materialien werden verglichen und anschließend zusammengefasst.

Danach wird im fünften Kapitel zunächst ein ganz einfaches System als taktile Struktur entwickelt, realisiert und durch praktische Experimente überprüft. Mit dem System soll aufgezeigt werden, dass das Material ELASTOSIL R 570/50 MH C1 trotz seiner nicht optimalen sensorischen Eigenschaften als Sensorelemente eingesetzt werden kann. Verschiedene Tests werden an dem System zur Bestimmung der unterschiedlichen Kontaktstellen durchgeführt und gezeigt. Weiterhin wird im fünften Kapitel eine weitere Anwendung des leitfähigen Silikonkautschuks als Sensorelement für einen nachgiebigen Greifer dargestellt. Hier werden Teile der Greiferstruktur, welche die höchste Änderung der mechanischen Spannung während der Greifvorgänge aufweisen, als Sensorelemente verwendet. Da die Konstruktion des Greifers kompliziert ist und der Spannungsunterschied in den Teilen dieses Systems nur unter enormem Aufwand analytisch ermittelt werden kann, wird hier zur Ermittlung der als Sensorelemente geeigneten Teile die softwaregestützte Finite-Elemente-Methode (FEM) angewendet. Danach wird die Position des ausgesuchten Teils konkreter untersucht. Dabei werden drei mögliche Formen des Sensorelements an dieser Position in Betracht gezogen. Die Greifer mit den drei unterschiedlichen Sensorelementen werden hergestellt, um einen experimentellen Nachweis ihrer Funktionsweise zu liefern. Des Weiteren wird im Kapitel fünf die dritte Anwendung des leitfähigen Silikonkautschuks für eine Gelenkverbindung betrachtet. Ein System mit einer inhärenten Sensorik wird entwickelt und hergestellt. Das Material ELASTOSIL R 570/50 MH C1 sowie POWERSIL® 466 A/B VP werden für die Fertigung der Sensorelemente verwendet, um die Funktionalität des Systems mit den beiden unterschiedlichen Sensorelementen getrennt zu überprüfen. Zuletzt wird das System messtechnisch untersucht und die Messergebnisse werden dargestellt und diskutiert.

Die Arbeit schließt im sechsten Kapitel mit einer Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten und der erreichten Ergebnisse sowie einem Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten ab.

2 Einführung in nachgiebige Mechanismen, funktionelle Materialien und elektrisch leitfähige Elastomere

2.1 Nachgiebige Mechanismen

Der folgende Abschnitt soll einen kurzen Überblick über die Nachgiebigkeit, nachgiebige Mechanismen und deren Eigenschaften geben.

Nachgiebigkeit

Die Nachgiebigkeit ist laut der IFToMM-Definition [1] ein Maß für die Fähigkeit eines Körpers oder eines Systems zur Deformation unter der Wirkung von äußeren Belastungen. Die im System vorhandene Nachgiebigkeit kann in konzentrierter und verteilter Nachgiebigkeit aufgeteilt werden. Abbildung 2.1 stellt schematisch den Unterschied zwischen der verteilten und der konzentrierten Nachgiebigkeit nach [2] dar. Die Einteilung der Nachgiebigkeit basiert auf der Dimension des nachgiebigen Strukturabschnitts, welcher als Gelenk betrachtet werden kann, im Vergleich zu der des Systems. Dazu dient eine grobe Vergleichsgröße von 10^1 . Bei der konzentrierten Nachgiebigkeit ist die Abmessung des Gelenkes zehn und mehr Mal kleiner als eine maximale Abmessung des Systems. Wenn aber die Abmessung des Gelenkes vergleichbar mit den maximalen Abmessungen des Systems ist, wird die Nachgiebigkeit als verteilte Nachgiebigkeit bezeichnet [2].

Die Nachgiebigkeit eines Systems kann sowohl durch die geometrische Gestaltung als auch durch die Werkstoffeigenschaften erzeugt werden [2]. Abbildung 2.2 zeigt die

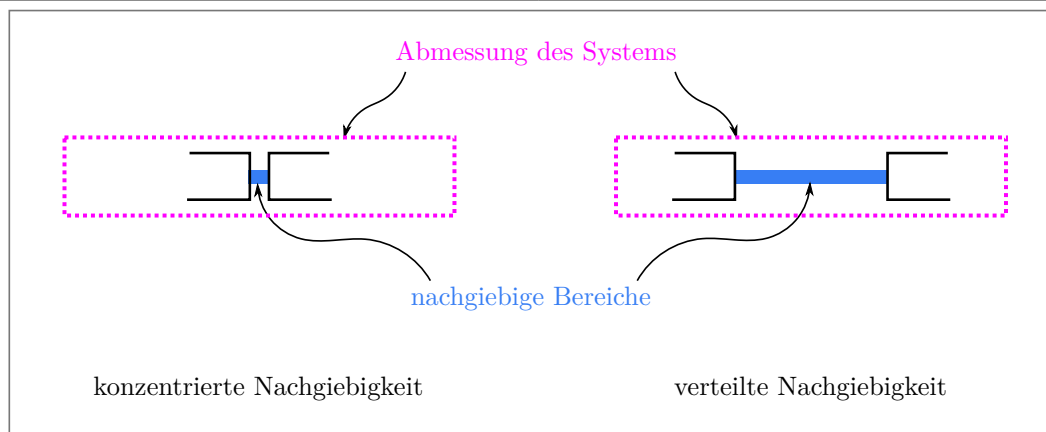


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Unterschieds zwischen der verteilten und der konzentrierten Nachgiebigkeit, nach [2]

nachgiebigen Strukturabschnitte eines Systems unterteilt nach der Ursache der Nachgiebigkeit. Eine Erhöhung der Nachgiebigkeit kann durch geometrische Verjüngung eines lokalen Bereichs im System erreicht werden (siehe Abbildung 2.2(a)). Weiterhin erhöht die Einführung eines anderen Materials ins System, welches eine höhere Nachgiebigkeit hat, die Nachgiebigkeit des Systems (siehe Abbildung 2.2(b)). Eine andere Möglichkeit zur Erhöhung der Nachgiebigkeit besteht durch eine kombinierte Variante, wobei ein nachgiebiger Strukturabschnitt anhand der geometrischen Verjüngung und Anwendung anderes Materials mit höherer Nachgiebigkeit ausgeführt wird.

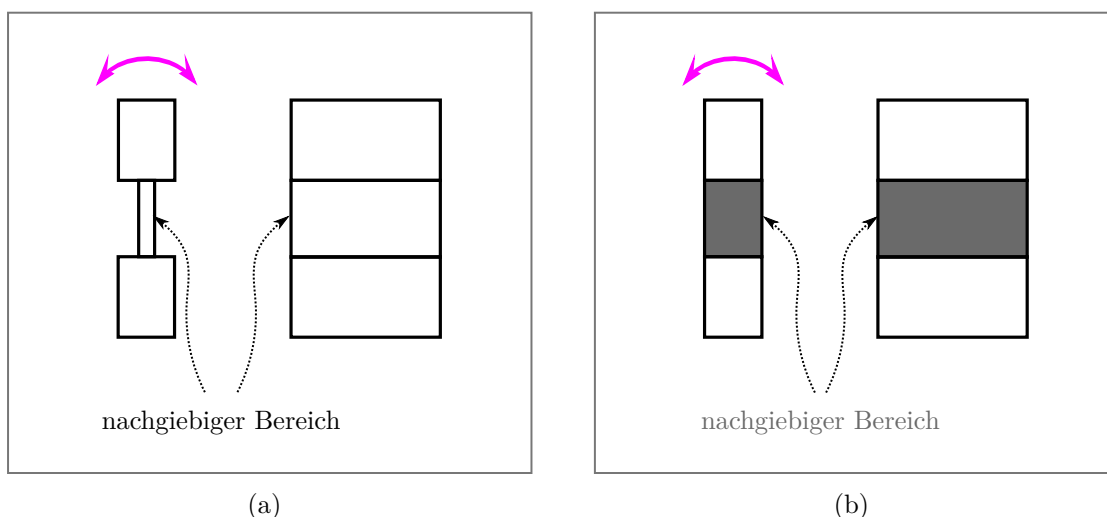


Abbildung 2.2: Die nachgiebigen Strukturabschnitte eines Systems in zwei Ansichten, aufgeteilt nach der Ursache der Nachgiebigkeit: (a) geometrische Gestaltung, (b) Material mit höherer Nachgiebigkeit, nach [2]

Begriffsbestimmung, Eigenschaften und Arten nachgiebiger Mechanismen

Ein Mechanismus kann entweder ein Starrkörpermechanismus oder ein nachgiebiger Mechanismus sein. Bei einem Starrkörpermechanismus handelt es sich um einen Mechanismus, der seine Beweglichkeit ausschließlich durch die relative Lageänderung von vier oder mehr starren, gelenkig miteinander verbundenen Gliedern erhält [3]. Demnach weist ein Starrkörpermechanismus kraft- oder formgekoppelte Gelenke auf [4]. Demgegenüber wird die Beweglichkeit eines nachgiebigen Mechanismus ausschließlich oder vorrangig durch die Nachgiebigkeit seiner Strukturabschnitte bestimmt [2]. Wie bereits erwähnt, können diese nachgiebigen Strukturabschnitte als Gelenke des nachgiebigen Mechanismus betrachtet werden. Solche Gelenke werden nach [1] als stoffschlüssige Gelenke bezeichnet und wie folgt definiert:

“Gelenk, in dem zwei benachbarte Glieder bzw. Gliedsegmente stofflich miteinander verbunden sind und ihre relative Beweglichkeit durch Nachgiebigkeit der Verbindung ermöglicht wird.”

Neben dieser Bezeichnung sind zahlreiche synonyme Begriffe wie zum Beispiel stoffkohärentes Gelenk [5], stoffpaariges Gelenk [6] oder Festkörpergelenk [7] gebräuchlich.

Die nachgiebigen Mechanismen (*compliant mechanisms*) gewinnen seit ihrem Eingang in die Grundlagenforschung Anfang der 90iger Jahre immer mehr an Bedeutung [8, 9, 10, 11]. Sie ersetzen oder ergänzen zunehmend die konventionellen Starrkörpermechanismen bei vielen Aufgaben für die Bewegungs- bzw. Kraftübertragung in klassischen Zweigen des Maschinenbaus wie zum Beispiel in der Greifertechnik, erfolgreich [11, 12]. Dadurch können verschiedene Nachteile der Starrkörpermechanismen wie zum Beispiel Reibung, Verschleiß und Geräuschanregung verbessert bzw. vermieden werden. Außerdem können weitere Vorteile wie zum Beispiel die Miniaturisierungsmöglichkeiten, die einfache und kompakte Bauweise, der geringe oder gar nicht erforderliche Montageaufwand sowie geringe Kosten durch den Einsatz der nachgiebigen Mechanismen erzielt werden. Weiterhin ist durch ihre elastische Rückstellkraft kein zusätzliches Bauteil wie zum Beispiel eine Feder mehr nötig, um zu ihrem Ausgangszustand zurückzukehren [12, 13, 14]. Aufgrund der eingeführten Vorteile bieten nachgiebige Mechanismen eine große Basis bei der Entwicklung und Verbesserung von Lösungen für die mechanische Konstruktion [15], besonders in den Bereichen der Technik, wo eine spezifische Nachgiebigkeit des Systems oft eine dringende Voraussetzung ist [16], wie zum Beispiel in der Robotik (Mensch-Maschine Interaktion, Manipulations- bzw. Lokomotionstechnik).

Schließlich werden bei dem Einsatz von nachgiebigen Mechanismen einige Nachteile in Kauf genommen. Beispielsweise ist die Beschreibung der nachgiebigen Mechanismen mit analytischen Methoden kompliziert und sehr aufwendig. Außerdem ist bei einem Defekt ein Komplettaustausch des Mechanismus wegen der fehlenden Wartungsmöglichkeiten erforderlich [13].

Die nachgiebigen Mechanismen lassen sich in hybride und vollständige nachgiebige Mechanismen einteilen.

Hybride nachgiebige Mechanismen besitzen stoffgekoppelte Gelenke und auch andere Elementpaarungen. Deswegen erhalten solche Mechanismen ihre Beweglichkeit sowohl durch die Nachgiebigkeit ihrer Strukturabschnitte als auch durch die Starrkörpergelenkelemente [2].

Vollständige nachgiebige Mechanismen können aus einem einzigen nachgiebigen Körper bestehen (Einkörpermechanismus), dementsprechend werden sie als monolithische nachgiebige Mechanismen bezeichnet [17]. Diese Mechanismen erhalten ihre Beweglichkeit ausschließlich durch die Verformung ihrer nachgiebigen Strukturabschnitte [2] (weitere Details hierzu siehe [2, 4]).

Wie bereits erwähnt, weisen nachgiebige Mechanismen viele Vorteile auf. Um diese Vorteile zu verstärken und dementsprechend den Einsatz der nachgiebigen Mechanismen in vielen technischen Bereichen zu erweitern, werden sie mit Sensorik ausgestattet. Deswegen wird im weiteren Verlauf des Kapitels eine kurze Beschreibung der funktionellen Materialien gegeben.

2.2 Funktionelle Materialien

Mitte der achtziger Jahre ist der Begriff *smart materials* in den USA und Japan entstanden [18]. *Smart materials* werden auch als funktionelle Materialien oder intelligente Materialien bezeichnet. Sie besitzen spezielle Wandlereigenschaften, die als Grundlage für eine Energie- oder Signalwandlung dienen können. Dies bedeutet, dass aufgrund spezieller Eigenschaften ein geeigneter nutzbarer Effekt bei einer äußeren Einwirkung auf den Werkstoff entsteht [19]. Somit können die funktionellen Materialien zum Beispiel die Aufgabe eines Sensors und/oder Aktuators übernehmen. Aus diesem Grund

werden sie manchmal multifunktionale Materialien genannt [20]. Die Multifunktionalität dieser Materialien bringt verschiedene Vorteile mit sich, von denen besonderes die Reduzierung der Masse und des Energieverbrauches sowie Verringerung der Komplexität bei steigender funktioneller Dichte und steigender ökonomischer Effizienz zu nennen sind [21, 20].

Die funktionellen Materialien mit aktorischen Eigenschaften erlauben das Umsetzen der elektrischen Energie in mechanische Bewegung oder in andere physikalische Größen. Demgegenüber können die funktionellen Materialien mit sensorischen Eigenschaften nichtelektrische Einwirkungen bzw. Messgrößen in ein verwertbares elektrisches Signal umsetzen. Die nichtelektrischen Messgrößen können zum Beispiel magnetischen, thermischen, mechanischen, optischen oder chemischen Charakter haben [19]. Diese Messgrößen werden in der Technik von zahlreichen Sensoren erfasst. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind die funktionellen Materialien, welche sensorische Eigenschaften für die Wandlung mechanischer Einwirkung in elektrisches Signal aufweisen, von Bedeutung. Solche Materialien basieren beispielsweise auf dem piezoelektrischen, inversen magnetostriktiven, oder piezoresistiven Effekt. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über diese Effekte gegeben.

2.2.1 Piezoelektrischer Effekt

Der piezoelektrische Effekt tritt in nicht leitenden Materialien auf, die als Dielektrika bezeichnet werden. Diese Materialien enthalten keine freien Ladungsträger. Bestimmte Kristalle, wie Quarz, weisen einen physikalischen Zusammenhang zwischen mechanischer Kraft und elektrischer Ladung auf. Wenn ein Kristallgitter aufgrund einer äußeren Kraft elastisch deformiert wird, treten eine hierzu proportionale Änderung der elektrischen Polarisierung¹ und eine entsprechende Ladungsverschiebung auf der Oberfläche auf [19, 20, 23]. Das heißt, bei einer mechanischen Deformation des Kristalls wird eine elektrische Spannung erzeugt. Dieser Effekt bildet die Grundlage für Piezosensoren.

Der piezoelektrische Effekt ist umkehrbar und wird dann reziproker oder inverser piezoelektrischer Effekt genannt. Wenn ein äußeres elektrisches Feld einwirkt, führt die

¹Polarisation ist eine elektrische Feldgröße und beschreibt den Zustand gebundener Ladungsträger im Material [22].

erzeugte oder geänderte Ladungspolarisation zu einem Deformationszustand [19]. Daher können die piezoelektrischen Materialien sowohl in der Sensorik als auch in der Aktorik eingesetzt werden.

Als Beispiele für die piezoelektrischen Materialien sind Quarz, Polyvinylidenfluorid (PVDF) oder Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) zu nennen [20]. Der Elastizitätsmodul solcher Materialien ist nicht gering genug, um sie für die Sensorisierung nachgiebiger Systeme ohne Beeinflussung der Nachgiebigkeit einzusetzen. Dieser kann einen Wert bis 2600 MPa bei PVDF haben [24].

2.2.2 Magnetostriktiver Effekt

Unter dem Begriff Magnetostriktion wird im Allgemeinen die Verformung eines Körpers infolge einer Änderung in der Magnetisierung² verstanden. Die Änderung der Magnetisierung kann durch die Änderung der Temperatur oder durch die Anwendung eines Magnetfeldes entstehen [25]. Durch die Magnetostriktion werden verschiedene Effekte hervorgerufen [26, 22]. Der meist genutzte Effekt ist Joule-Effekt. Der inverse Joule-Effekt wird Villari-Effekt benannt.

Joule-Effekt beschreibt die Expansion (positive Magnetostriktion) oder die Kontraktion (negative Magnetostriktion) eines magnetischen, meist zylindrisch geformten Stabs infolge eines angelegten Magnetfeldes [20]. Das Volumen des Stabs bleibt dabei konstant [22, 27].

Villari-Effekt wird auch magnetoelastischer Effekt genannt. Dieser Effekt wird als die Änderung der Magnetisierung eines Körpers aufgrund einer mechanischen Einwirkung (Druck oder Zug) definiert [28]. Durch die mechanischen Einwirkungen ist es allerdings nicht möglich ein magnetisches Feld zu erzeugen [22].

Die magnetostriktiven Materialien können aufgrund der Umkehrbarkeit des Effektes in der Sensorik und der Aktorik eingesetzt werden [22]. Die meisten Materialien, die Magnetostriktion aufweisen können, sind ferromagnetische Materialien wie Eisen, Nickel, Kobalt und deren Legierungen. Der Elastizitätsmodul solcher Materialien ist sehr hoch. Er hat zum Beispiel bei Eisen einen Wert von 215000 MPa [29].

²Magnetisierung wird durch den magnetischen Moment pro Volumeneinheit definiert [25].

2.2.3 Piezoresistiver Effekt

Unter piezoresistivem Effekt wird die Änderung des elektrischen Widerstands unter dem Einfluss der zu messenden physikalischen Größe wie zum Beispiel der äußeren mechanischen Kräfte verstanden [19, 24, 30]. Wird ein Quader mit dem Volumen $V = \text{Breite} \times \text{Dicke} \times \text{Länge} = b \times d \times l$ durch uniaxiale Kompression verformt, ergibt sich der Zusammenhang zwischen der relativen Widerstandsänderung ($\frac{\Delta R}{R}$) und der relativen Längenänderung ($\frac{\Delta l}{l}$) nach [31, 32] durch den piezoresistiven k -Faktor wie folgt:

$$k = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} = 1 + 2\mu + \frac{\frac{\Delta \rho_{\text{sp}}}{\rho_{\text{sp}}}}{\frac{\Delta l}{l}} \quad (2.1)$$

wobei μ die Poissonzahl und ρ_{sp} der spezifische Widerstand sind. Der k -Faktor ergibt damit die Empfindlichkeit eines Sensors. Abhängig vom Werkstoff kann der k -Faktor unterschiedliche Werte annehmen. Bei Metallen wie zum Beispiel bei Konstantan kann der k -Faktor einen Wert von circa zwei erreichen. Demgegenüber kann er bei Halbleitern wie zum Beispiel bei Silizium größere Werte bis zu 175 erreichen [30]. Schließlich ist es zu erwähnen, dass der piezoresistive Effekt nicht umkehrbar und nur für sensorische Aufgaben geeignet ist [19].

2.2.4 Auswahlkriterien für geeignete Sensormaterialien

Im Rahmen dieser Arbeit werden Systeme, die von Bedeutung für den Bereich der Robotik sind, betrachtet. Um große Verformungen und unterschiedliche Bewegungsmöglichkeiten zu erreichen, soll das elastische Polymer in den hier zu entwickelnden Systemen eingesetzt werden. Damit werden diese Systeme die meisten Vorteile der nachgiebigen Mechanismen (siehe Abschnitt 2.1) gewinnen. Zur Erweiterung ihrer Funktionalitäten bzw. ihres Einsatzbereiches werden sie mit Sensorik ausgestattet. Am Beispiel von einer taktilen Struktur, einem Greifer und einer Gelenkverbindung soll die Anwendung der erwünschten Sensorelemente aufgezeigt werden. Diese Sensorelemente sollen in das System integriert werden, um ein kompaktes Volumen aufzuweisen. Außerdem sollen sie nicht weniger Nachgiebigkeit als das System selbst besitzen. Daraus ergeben sich die folgenden Anforderungen an die Sensorelemente:

- Das Sensorelement muss eine hohe Nachgiebigkeit aufweisen,

- Das Sensorelement muss in die elastischen Polymere gut integrierbar sein,
- Das Sensorelement muss die mechanischen Belastungen (wie Druck- und Zugbelastungen) in ein auswertbares, elektrisches Signal umwandeln,
- Das Sensorelement muss einen einfachen Aufbau haben,
- Es ist wünschenswert, wenn das Sensorelement ein inhärentes Teil vom System sein kann.

Um die geeigneten Sensorelemente auszuwählen, werden die Sensorprinzipien, die auf den bereits vorgestellten Effekten beruhen, in der Tabelle 2.1 nach den Anforderungen an das Sensorelement bewertet.

Tabelle 2.1: Bewertung der Sensorprinzipien. Bewertungsmaßstab (0): nicht bzw. sehr schwer umsetzbar, (1): umsetzbar, (2) gut umsetzbar

Anforderung an das Sensorelement	piezoelektrisch	magnetostruktiv	piezoresistiv
hohe Nachgiebigkeit	0	0	2
integrierbar in elastische Polymere	1	1	2
Detektieren der mechanischen Einwirkungen möglich	2	2	2
einfacher Aufbau	2	0	2
Einbetten als inhärentes Teil möglich	0	0	2

In dem Fall, wo große Dehnungen der Sensorelemente erforderlich sind, kommen nur die elektrisch leitfähigen Elastomere in Frage (siehe Abschnitt 2.3). Ein aus diesem Material bestehendes Sensorelement, welches eine hohe Nachgiebigkeit aufweist, kann laut der Tabelle 2.1 ein piezoresistives Sensorelement sein. Die piezoresistiven Sensorelemente aus dem elektrisch leitfähigen Elastomer zeigen einen einfachen Aufbau. Außerdem sind sie als inhärente Teile der Struktur gut umsetzbar. Aus diesen Gründen soll für die vorliegende Arbeit ein piezoresistives Sensorelement aus dem elektrisch leitfähigen Elastomer verwendet werden. Allerdings muss zuerst die geringe Messgenauigkeit

dieses Materials akzeptiert werden. Trotz dieser ist es zu erwarten, dass durch Nutzung dieses Materials wertvolle Informationen über die zu erfassenden physikalischen Größen durch die Signalauswertung geliefert werden können.

Die andere Funktionelle Materialien und deren bereits vorgestellte Effekte werden hier nicht weiter betrachtet. Demgegenüber werden die elektrisch leitfähigen Elastomere ein Kernstück dieser Arbeit sein. Deshalb werden sie im weiteren Verlauf dieses Abschnitts nach einer allgemeinen Beschreibung der Polymere ausführlich beschrieben.

2.3 Allgemeine Beschreibung der Polymere

Polymere werden nach IUPAC³ als Substanzen, die aus unterschiedlich großen Makromolekülen bestehen, bezeichnet. Die Makromoleküle sind lange Molekülketten, die aus einer großen Anzahl von Monomeren⁴ aufgebaut sind. Ein Polymer kann einen Monomertyp oder mehrere Monomere enthalten, daher wird zwischen Homopolymeren (wie zum Beispiel Polystyrol) und Copolymeren (wie zum Beispiel Acrylnitril-ButadienStyrol) unterschieden [33].

2.3.1 Kettenstruktur

Durch die chemische Bindung zwischen den kleinen Molekülen (Monomeren) entstehen die langen Molekülketten, welche, wie bereits erwähnt, als Makromoleküle bezeichnet werden. Diese Ketten können linear, verzweigt oder vernetzt sein. Die Struktur der Makromoleküle hängt von den Eigenschaften der Monomere ab. Besitzt ein Monomer zwei Funktionen⁵ zur Bindungsbildung (bifunktionelles Monomer), entstehen lineare Makromoleküle. Bei einem Monomer mit mehr als zwei Funktionen (trifunktionelles oder polyfunktionelles Monomer) entstehen verzweigte oder vernetzte Makromoleküle [33].

Wie in der Abbildung 2.3 zu sehen ist, sind die linearen Polymere fadenförmige, unverzweigte kettenförmige Moleküle. Hier werden die Ausgangsmoleküle miteinander

³IUPAC ist die Internationale Union für reine und angewandte Chemie (*International Union of Pure and Applied Chemistry*).

⁴Monomer ist nach IUPAC die Substanz, die aus Monomermolekülen besteht, welche eine Polymerisation eingehen können.

⁵Unter Funktionalität eines Monomers wird laut IUPAC die Zahl der Bindungen, die ein Monomer bzw. dessen Wiederholeinheit in einem Polymer mit anderen Monomeren eingeht, verstanden.

wie einzelne Kettenglieder zu einer Kette verbunden. Die verzweigten Polymere sind verzweigte Molekülketten. Hier gehen kurze Seitenketten von den einzelnen Gliedern solcher sogenannter Hauptkette aus. Die Seitenketten sind mit den Gliedern der Hauptkette fest verbunden. Die dritte Möglichkeit sind die vernetzten Polymere. Dabei sind alle Ausgangsmoleküle räumlich miteinander vernetzt. Demzufolge entstehen dreidimensionale Molekülnetzwerke [34, 35].

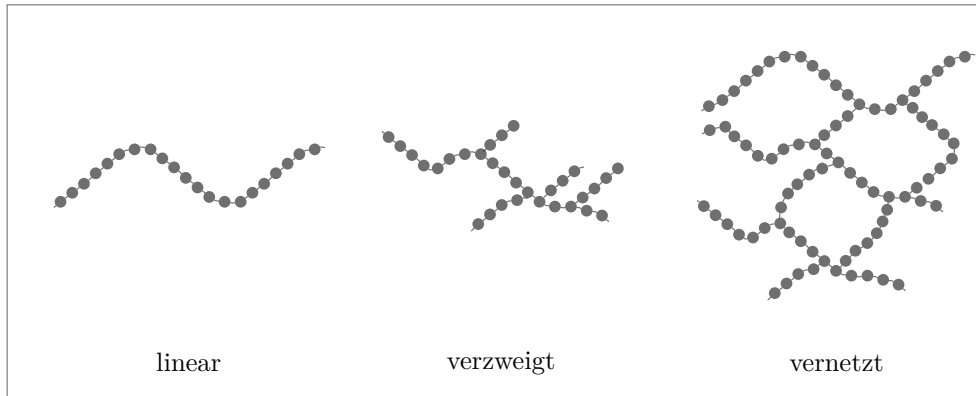


Abbildung 2.3: Lineare, verzweigte und vernetzte Makromoleküle, nach [35]

2.3.2 Einteilung der Polymere

In der Fachliteratur sind Polymere häufig strukturell in drei Hauptgruppen eingeteilt: Thermoplaste, Elastomere und Duromere (siehe Abbildung 2.4). Diese Einteilung ist eine Folge der unterschiedlichen Anordnung bzw. Vernetzung⁶ von den Makromolekülen des Polymers [33].

Thermoplaste (Plastomere) sind unvernetzte kettenförmige Makromoleküle, die nur durch die Nebenvalenzkräfte⁷ verbunden sind [33, 34, 37]. Bei Raumtemperatur sind Thermoplaste hart und manchmal spröde [34, 38, 39]. Die Festigkeit der Thermoplaste nimmt mit steigender Temperatur ab. Demzufolge erweichen sie. Dies ist gekoppelt mit einer fast beliebigen Verformbarkeit. Nach der Abkühlung erstarren die Thermoplaste und behalten ihre Form [40]. Solange die so genannte thermische Zersetzung des Materials nicht durch Überhitzung einsetzt, kann der Thermoplast beliebig oft abgekühlt und wieder erwärmt werden.

⁶Unter Vernetzung wird eine Verknüpfung von benachbarten Ketten zum Beispiel durch kovalente Bindungen verstanden [33].

⁷Nebenvalenzkräfte sind unter anderem Van-der-Waals-Kräfte (zum Beispiel wie bei PE), Polare Kräfte (wie bei PVC) und Wasserstoffbrückenbindung (wie bei Polyamide (PA)) [37].

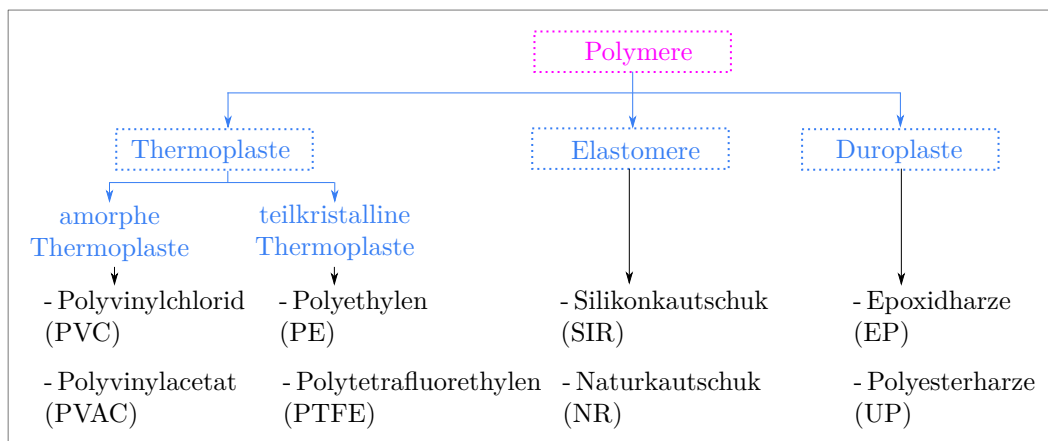


Abbildung 2.4: Einteilung der Polymere mit einigen Beispielen. Blau repräsentiert die Hauptgruppen, Schwarz repräsentiert Beispiele für jede Gruppe [33, 34, 36]

Die Thermoplaste lassen sich in zwei Gruppen unterteilen: amorphe und teilkristalline Thermoplaste. Bei teilkristalliner Struktur sind die Makromoleküle parallel nebeneinander gelagert. Demgegenüber sind die Makromoleküle der amorphen Struktur völlig regellos verknäult oder verschlauft. Schließlich sind Thermoplaste schmelzbar und plastisch verformbar, außerdem sind sie in geeigneten Lösemitteln löslich⁸ [35, 36]. Als Anwendungsbeispiele dieses Stoffs sind Haushaltswaren, Fahrzeugteile, Rollen, Verschlüsse und Lego-Steine zu nennen [41].

Elastomere entstehen durch geringe Vernetzung der Makromoleküle⁹ [33, 34]. Die Bindungsart zwischen den Makromolekülen sind die Hauptvalenzbindungen (Kovalente Bindungen) und die Nebenvaleanzbindungen [37]. Elastomere sind gummiartige Polymere, die bei Raumtemperatur hohe elastische Dehnung aufweisen können [38, 34]. Diese Elastizität bleibt bis zu hohen Temperaturen erhalten und verhindert dabei das Aufschmelzen des Elastomers [36]. Die Elastizität der Elastomere wird überwiegend damit begründet, dass die nur stellenweise verknüpften Makromoleküle sich unter Einwirkung äußerer Kräfte (Zugkraft) entknäulen, soweit es die Verknüpfungsstellen des Elastomers erlauben. Nach dem Wegfall der Krafteinwirkung kehren die Makromoleküle in ihre Ausgangslage zurück. Diese Verhaltensweise der Elastomere wird durch die hohe Temperatur aber vor ihrer chemischen Zersetzung nicht geändert. Weiterhin werden Elastomere durch Erwärmen weicher, aber aufgrund der chemischen Vernet-

⁸Abgesehen von Ausnahmen wie Polytetrafluorethylen (PTFE) [35].

⁹Ein neuer Polymertyp sind die thermoplastischen Elastomere, diese sind unvernetzt [35] und in bestimmten Temperaturbereichen sind sie thermoplastisch (plastisch verformbar).

zungen plastisch nicht verformbar [40]. Schließlich sind sie in Lösemitteln unlöslich aber quellbar [35]. Als Anwendungsbeispiele sind Gummiware, Kabel, Schläuche und Dichtungen zu nennen [41].

Duroplaste (Duromere) bestehen aus hochvernetzten Makromolekülen [33, 34]. Die Bindungen zwischen den Makromolekülen sind fast nur Hauptvalenzbindungen [37]. Daraus ergibt sich die hohe Steifigkeit, Festigkeit und Härte (Shore-Härte) dieses Stoffs [38, 34]. Weiterhin können sie bei Erhöhung der Temperatur kaum erweicht und nach ihrer Aushärtung nicht mehr verformt werden. Außerdem sind sie unlöslich, nicht schmelzbar und auch nicht quellbar [35, 41]. Als Anwendungsbeispiele sind Steckdosen, Schalter, Telefongehäuse und Spulenkörper zu nennen [41].

In der Tabelle 2.2 ist nun ein Überblick über den strukturellen Aufbau, Bindungsart, Eigenschaften und einige Anwendungen der Polymere gegeben.

Für die Entwicklung nachgiebiger sensorisierter Systeme, was ein Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist, sind die Elastomere aufgrund ihrer hohen Elastizität [38, 34] interessant. Eines der bekanntesten Elastomere ist der Silikonkautschuk. Dieser wird im nächsten Abschnitt näher betrachtet.

2.3.3 Silikonkautschuk

Silikonkautschuk gehört zu der Gruppe der Silikone, bei denen Siliciumatome über Sauerstoffatome verknüpft sind. Ein Hauptbestandteil der Silikone, nämlich das elementare Silicium, wird aus Quarzsand gewonnen. Die Herstellung der Silikone erfolgt nach der Muller-Rochow-Synthese¹⁰, welche hier nicht näher betrachtet wird.

Bestandteile des Silikonkautschuks

Wie in der Abbildung 2.5 zu sehen ist, besteht der Rohsilikonkautschuk in der Regel aus den reinen Silikonpolymeren und drei Typen von Zusatzstoffen: Vernetzer, Füllstoffe und Additive [43].

¹⁰Die Müller-Rochow-Synthese ist ein Verfahren für die Herstellung von Methylchlorsilanendie, welche die Zwischenprodukte bei der Herstellung von Silikonen sind, mehr dazu ist in [42] zu finden.

2.3 Allgemeine Beschreibung der Polymere

Tabelle 2.2: Überblick über den strukturellen Aufbau, Bindungsart, Eigenschaften und einige Anwendungsbeispiele der Polymere

	Thermoplaste	Elastomere	Duroplaste
struktureller Aufbau	unvernetzte kettenförmige Makromoleküle	weitmaschig vernetzte Makromoleküle	hochvernetzte (engmaschig vernetzte) Makromoleküle
Bindungsart zwischen den Makromolekülen	Nebenvalenzbindungen	Hauptvalenzbindungen und Nebenvalenzbindungen	fast nur Hauptvalenzbindungen
Eigenschaften	bei Raumtemperatur hart und manchmal spröde	bei Raumtemperatur sehr elastisch	bei Raumtemperatur zeigen sie hohe Steifigkeit, Festigkeit und Härte
	durch Erwärmen weicher und fast beliebig verformbar, außerdem können sie vor der thermischen Zersetzung beliebig oft abgekühlt und wieder erwärmt werden	durch Erwärmen weicher aber plastisch nicht verformbar, außerdem ändert sich das elastische Verhalten vor ihrer chemischen Zersetzung nicht	durch Erwärmen kaum erweichbar, und nach ihrer Aushärtung nicht mehr verformbar
	löslich, schmelzbar	unlöslich, nicht schmelzbar aber quellbar	unlöslich, nicht schmelzbar und auch nicht quellbar
Anwendungsbeispiele	Haushaltswaren, Fahrzeugteile, Rollen, Verschlüsse und Lego-Steine	Gummiware, Kabel, Schläuche und Dichtungen	Steckdosen, Schalter, Telefongehäuse und Spulenkörper

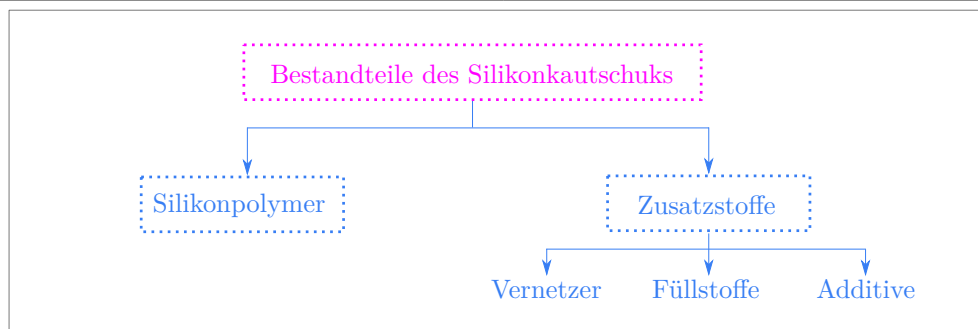


Abbildung 2.5: Überblick über die Bestandteile des Silikonkautschuks

I. Silikonpolymere sind lineare Polymerketten, die unterschiedliche Längen aufweisen können [43, 44]. Die Polymerketten des Silikonkautschuks enthalten alternierend Silicium und Sauerstoff¹¹. An das Silicium wird auch organischer Rest gebunden. Nach den organischen Resten, die Methyl-, Vinyl-, Phenyl- oder andere Gruppen sein können, wird zwischen verschiedenen Siliconpolymeren unterschieden. Beispiele hierfür sind:

- MQ¹² ist ein methylgruppenhaltiges Silikonpolymer und wird als Polydimethylsiloxan (PDMS) bezeichnet. Die Siliciumatome dieses Silikonpolymers sind mit zwei Methylgruppen ($-\text{CH}_3$) gebunden,
- VMQ ist ein vinyl- methylgruppenhaltiges Silikonpolymer¹³. Bei diesem Polymer tragen die Siliciumatome Methylgruppen ($-\text{CH}_3$) und zum Teil Vinylgruppen ($-\text{CH}=\text{CH}_2$),
- FMQ ist ein fluor- methylgruppenhaltiges Silikonpolymer, bei dem die Siliciumatome Methylgruppen ($-\text{CH}_3$) und zum Teil Fluorgruppen ($-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CF}_3$) tragen,
- PMQ ist ein phenyl- methylgruppenhaltiges Silikonpolymer, bei dem die Siliciumatome Methylgruppen ($-\text{CH}_3$) und zum Teil Phenylgruppen ($-\text{C}_6\text{H}_5$) tragen,
- PVMQ ist ein phenyl- vinyl- methylgruppenhaltiges Silikonpolymer, bei dem die Siliciumatome Methylgruppen ($-\text{CH}_3$) und zum Teil Vinylgruppen ($-\text{CH}=\text{CH}_2$) und Phenylgruppen ($-\text{C}_6\text{H}_5$) tragen,

¹¹Silicium-Sauerstoff-Hauptkette wird als Siloxangerüst bezeichnet [43].

¹²Da ein Silicium-Atom immer vier Bindungspartner hat, werden Silikonpolymere auch oft mit einem Q für „quaternäre Gruppe“ abgekürzt.

¹³VMQ wird auch Poly-Vinylmethyl-Dimethyl-Siloxan bezeichnet.

- FVMQ ist ein fluor- vinyl- methylgruppenhaltiges Silikonpolymer, bei dem die Siliciumatome Methylgruppen ($-\text{CH}_3$) und zum Teil Vinylgruppen ($-\text{CH}=\text{CH}_2$) und Fluorgruppen ($-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CF}_3$) tragen [43, 44, 45, 46].

Abbildung 2.6 stellt die Strukturformel des VMQ-Polymers als ein Beispiel von linearen Polymerketten für die Verwendung im Silikonkautschuk nach [44] dar.

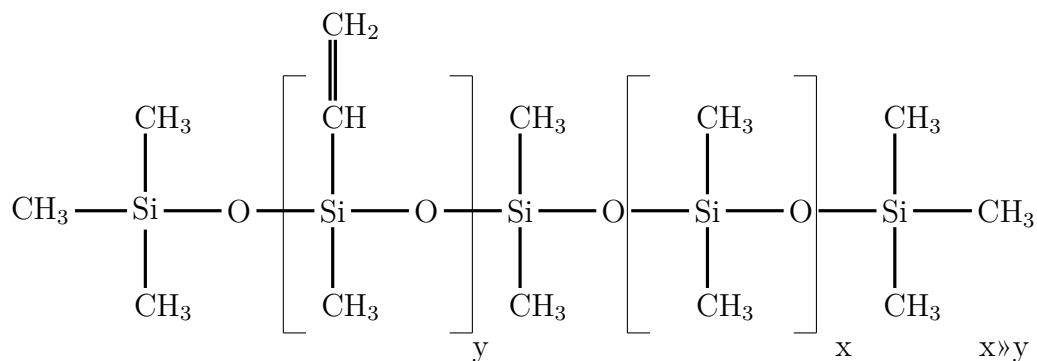


Abbildung 2.6: VMQ-Polymer als ein Beispiel von linearen Polymerketten für die Verwendung in Silikonkautschuk, nach [44]

II. Vernetzer sind Substanzen, die die Verbindung der linearen Molekülketten mit reaktionsfähigen Molekülgruppen ermöglichen und somit aus zweidimensionalen Strukturen dreidimensionale Strukturen bilden [47]. Der Vernetzer ist notwendig, um einen mechanisch stabilen vulkanisierten Silikonkautschuk aus dem Rohsilikonkautschuk zu schaffen. Abbildung 2.7 zeigt einen Si-H-Vernetzer, der zum Beispiel in Flüssigkautschuk (*liquid rubber* (LR)) eingesetzt wird [44].

III. Füllstoffe sind nach DIN 55943 unlösliche Substanzen, die zum Erhalten, Verbessern und/oder Beeinflussen technischer oder optischer Eigenschaften sowie zur Vergrößerung des Volumens eingesetzt werden. Füllstoffe werden dem Grundmaterial in wesentlich großen Mengen zugesetzt. Im Silikonkautschuk sind sie notwendig, um das elastische Netzwerk zu verstärken. Zugleich verringern die Füllstoffe den Anteil der teuren Polymermatrix in dem fertigen Produkt. Die Eigenschaften des Silikonkautschuks werden durch Art, Menge und Zusammensetzung der Füllstoffe entscheidend beeinflusst. Beispiele hierfür sind pyrogene Kieselsäuren und Ruße als verstärkende Füllstoffe [43, 48, 49].

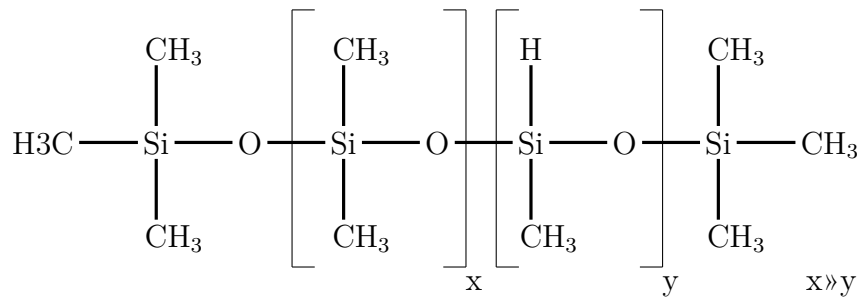


Abbildung 2.7: Si-H-Vernetzer als ein Beispiel für die Verwendung im Silikonkautschuk, nach [44]

IV. Additive sind Substanzen, die zum Erreichen oder Verbessern bestimmter Eigenschaften eingesetzt werden. Im Gegensatz zu den Füllstoffen haben die Additive im Material einen niedrigen Gehalt. Der Einsatz von Additiven zielt in erster Linie darauf ab, einen positiven Einfluss auf die Verarbeitung zu erreichen. Erst in zweiter Linie zielt er auf bessere Qualität des Endprodukts selbst ab [49]. Als Beispiele für die im Silikonkautschuk eingesetzten Additive sind Stabilisatoren, Mastizierhilfen, Farben und elektrisch leitfähige Partikel zu nennen [43]. Es ist zu beachten, dass einige Additive wie zum Beispiel leitfähiger Ruß, der zur Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit verwendet werden kann, gleichzeitig die Aufgabe der verstärkenden Füllstoffe übernehmen können.

Schließlich werden verschiedene Kautschukklassen unter anderem nach dem Vernetzungstyp und der Viskosität des Basispolymers unterschieden [44], wie zum Beispiel:

- raumtemperaturvernetzende Silikonkautschuke (RTV-1),
- raumtemperaturvernetzende, 2-Komponenten-Silikonkautschuke (RTV-2),
- hochtemperaturvernetzende Silikonkautschuke (HTV), auch Festsilikonkautschuke benannt,
- Flüssigsilikonkautschuke (*liquid silicone rubber* (LSR)).

Mehr Informationen über den Unterschied zwischen den verschiedenen Arten des Silikonkautschuks und die Vernetzungsmöglichkeiten sind in [43, 44, 50, 51] dargestellt.

2.4 Elektrische Eigenschaften von elektrisch leitfähigen Elastomeren

Polymere sind in der Regel ausgezeichnete elektrische Isolatoren. Zum Beispiel weisen die Silikonpolymere einen hohen spezifischen Durchgangswiderstand¹⁴ bis zu circa $10^{17} \Omega \text{ cm}$ und eine niedrige Dielektrizitätszahl ($\epsilon_r = 2, 7$) auf. Deshalb werden sie in zahlreichen Applikationen als elektrischer Isolator eingesetzt [50]. Allerdings können die elektrischen Eigenschaften wie die Leitfähigkeit der Polymere eingestellt werden. Dadurch können die Einsatzbereiche der Polymere erweitert werden.

Die elektrische Leitfähigkeit der Polymere kann verbessert werden, indem zum Beispiel elektrisch gut leitfähiges, meistens faserförmiges bzw. pulverförmiges Material wie Leitfähigkeitsruß, Graphit, Kupferteilchen oder Kohlenstofffasern mit dem Polymer gemischt wird. Die daraus resultierenden Polymere werden als gefüllte, elektrisch leitfähige Polymere bezeichnet. Für die vorliegende Arbeit sind die gefüllten, elektrisch leitfähigen Elastomere, von Bedeutung. Sie entstehen zum Beispiel durch die Mischung von dem nicht leitfähigen Silikonpolymer und den leitfähigen Partikeln (wie Ruße). Dabei fungiert das nicht leitfähige Silikonpolymer als Trägermaterial (Polymatrix) für die leitfähigen Partikel [53]. Als leitfähige Partikel wird der Ruß aus verschiedenen Gründen bevorzugt; einige davon sind seine geringe Dichte, das chemisch weitgehend inerte Verhalten, und damit die Vermeidung von Korrosionsschäden oder Lokalelementbildung bei Kontakt mit Metallen, seine Eigenschaft als mechanisch verstärkender Füllstoff. Außerdem ist er kostengünstig [50]. Die Ruße können im Silikonpolymer zumindest teilweise an der Stelle, wo die dispergierten, verstärkten Füllstoffe sind, auftreten. Allerdings kann ein leitfähiger Ruß erst ein leitfähiges Rußnetzwerk bilden, wenn die Mindestkonzentration der leitfähigen Partikel eine bestimmte Schwelle, die sogenannte Perkolationschwelle, überschreitet [44, 50].

Verschiede Faktoren können die elektrischen Eigenschaften der elektrisch leitfähigen Silikonkautschuke beeinflussen. Zu diesen Faktoren gehören die Zusammensetzung, Art der leitfähigen Partikel, Verarbeitungseinflüsse wie zum Beispiel Verteilung der leitfähigen Partikel und ihre Konzentrationen [50, 54, 55]. In [56] wird der Einfluss der unterschiedlichen elastischen Eigenschaften von verschiedenen Gemischen auf die elektrischen Eigenschaften des vulkanisierten leitfähigen Silikonkautschuks dargestellt.

¹⁴Unter dem Durchgangswiderstand wird der Widerstand, der aus der an den Elektroden angelegten Gleichspannung und dem zwischen ihnen durch das Innere des Isolierstoffs fließenden Strom berechnet wird, erfasst [52].

Es wird gezeigt, dass bei einem Gemisch mit höherem Elastizitätsmodul das Kriechen¹⁵ des elektrischen Widerstands weniger wird. Hinzu wirkt die Vernetzungsdichte¹⁶ (*crosslink density*) auf den spezifischen Widerstand ein. Die Wirkung der Vernetzungsdichte wurde in [54] untersucht. Hier wurde ermittelt, dass die Zunahme der Vernetzungsdichte bei einem Vulkanisat mit unvollständig gebildetem leitfähigem Netzwerk zur Abnahme des spezifischen Widerstands führt. Demgegenüber wird der spezifische Widerstand in einem Vulkanisat mit vollständig gebildetem leitfähigem Netzwerk bei der Zunahme der Vernetzungsdichte zuerst abnehmen und dann zunehmen.

Schließlich können auch die unterschiedlichen leitfähigen Additive wie zum Beispiel Ruße, Metallpulver und Kohlenstofffasern unter anderem durch ihre unterschiedlichen Merkmale die Leitfähigkeit beeinflussen [54]. In [53] wurde der Einfluss von unterschiedlichen Arten von Rußpartikeln wie Acetylenruß, Lampenruß und *Intermediate Super Abrasion Furnace* (ISAF (N-234)) auf die Leitfähigkeit ermittelt. Dabei ist zu sehen, dass der leitfähige Silikonkautschuk, der den Acetylenruß enthält, eine bessere elektrische Leitfähigkeit als die anderen zwei zeigt. Weiterhin wirkt die Partikelgröße auf die elektrischen Eigenschaften des Silikonkautschuks. Je größer die leitfähigen Partikel sind, desto besser wird die Piezoresistivität des Silikonkautschuks [57].

Aus den bereits gemachten Darlegungen wird deutlich, dass die elektrischen Eigenschaften des leitfähigen Elastomers durch verschiedene Faktoren beeinflusst werden können. Dabei ist zu beachten, dass die inhärenten mechanischen Vorteile des Elastomers trotz der Zumischung von den leitfähigen Additiven erhalten bleiben und die elektrischen Eigenschaften verbessert werden. Dies ermöglicht, ein neues Elastomer mit sensorischen Eigenschaften zu schaffen. Das heißt, bei der Verformung des Elastomers unter der mechanischen Einwirkung verändert sich sein elektrischer Widerstand. Diese Eigenschaften prädestinieren das leitfähige Elastomer für die Anwendung im Bereich der Sensortechnik wie zum Beispiel für die Anwendung als Verformungssensoren [59, 60, 61].

Elektronentransport in dem leitfähigen, gefüllten Elastomer

Um die Widerstandsänderung bzw. die sensorischen Eigenschaften des leitfähigen Elastomers in den weiteren Abschnitten dieser Arbeit umfassend verstehen und diskutie-

¹⁵Unter Kriechen des elektrischen Widerstands wird die Widerstandsänderung unter konstanter Last verstanden [57].

¹⁶Vernetzungsdichte wird als Quotient aus der Zahl der Monomerbausteine mit Vernetzungsstellen und der Zahl der insgesamt vorhandenen Monomerbausteine definiert [58].

ren zu können, sind die Kenntnisse über den Elektronentransport in dem leitfähigen, gefüllten Polymer unerlässlich. Prinzipiell bestimmen drei verschiedene physikalische Prozesse den Elektronentransport in dem elektrisch leitfähigen Polymer; dazu gehören Perkolation, quantenmechanisches Tunneln und die thermische Ausdehnung. Durch Perkolation wird beschrieben, wie sich ein Elektron über makroskopische Strecken in einem ungeordneten System ausbreitet. Damit gibt die Perkolation Informationen über die Geometrie dieser Strecken und über die Leitfähigkeit der Bestandteile des Gemischs. Andererseits wird die elektrische Leitung zwischen benachbarten leitfähigen Partikeln in der mikroskopischen Ebene durch das quantenmechanische Tunneln beschrieben. Schließlich wird durch die thermische Ausdehnung der Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem Volumenanteil des leitfähigen Partikels sowie den mikroskopischen Tunnellängen erklärt [62, 63].

Wie bereits am Anfang des Abschnitts 2.4 erwähnt, bildet sich eine makroskopische ununterbrochene Kette aus leitfähigen Partikeln wenn die Partikelkonzentration eine Perkolationsschwelle überschreitet. Es ist zu beachten, dass die Perkolationsschwelle nicht konstant und von vielen Faktoren abhängig ist. Zum Beispiel ist im Fall des leitfähigen Silikonkautschuks die Perkolationsschwelle von Größe, Seitenverhältnis, Struktur, Verteilung und Rauheit der Rußpartikel sowie von der Art des Silikonkautschuks abhängig [62, 54, 57, 64, 63].

In der Abbildung 2.8 wird der Widerstandsverlauf in Abhängigkeit von der Rußkonzentration gezeigt. Bei sehr niedrigem Rußgehalt ist der spezifische Widerstand des Gemischs sehr hoch, weil die leitenden Partikel sich nicht berühren und durch das Polymer isoliert vorliegen. Hier wird der Elektronentransport durch den Mechanismus des Tunneleffekts durchgeführt. Dies geschieht bei den Abständen $\leq 100 \text{ \AA}$ zwischen den leitfähigen Partikeln [62]. Je kleiner die Abstände sind, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, die Elektronen quantenmechanisch zu tunneln. Nach diesem Mechanismus können Elektronen durch dünne isolierende Filme in den Lücken zwischen benachbarten Rußpartikeln, Aggregate und Agglomerate passieren. Der Strom beim Tunneln von Elektronen wird durch eine Exponentialfunktion in Abhängigkeit von den Lückenbreiten beschrieben [54, 65], wodurch eine deutliche Abnahme des spezifischen Widerstands bei Zunahme von Rußkonzentration besteht.

Bei der Erhöhung des Rußgehalts wird die Perkolationsschwelle überschritten. Ab diesem Punkt beginnen sich leitende Pfade bzw. leitende Netzwerke durch die Berührungen der Partikel zu bilden. Diese Leiterbahnen erhöhen die Leitfähigkeit des Gemischs. Als Folge nimmt der spezifische Widerstand sprunghaft ab. Danach stabilisiert

sich der Widerstand und verringert sich nicht so wesentlich weiter mit der Erhöhung des Rußgehalts.

Der physikalische Prozess der thermischen Ausdehnung wird in Silikonkautschuken dadurch erklärt, dass sie hohe thermische Ausdehnungskoeffizienten besitzen, die in der Regel viel höher als bei den verwendeten leitenden Partikeln sind. Dementsprechend ändern sich der Volumenanteil des leitenden Partikels und der Abstand zwischen benachbarten einzelnen Partikeln mit der Temperaturänderung in entscheidender Weise [62, 63].

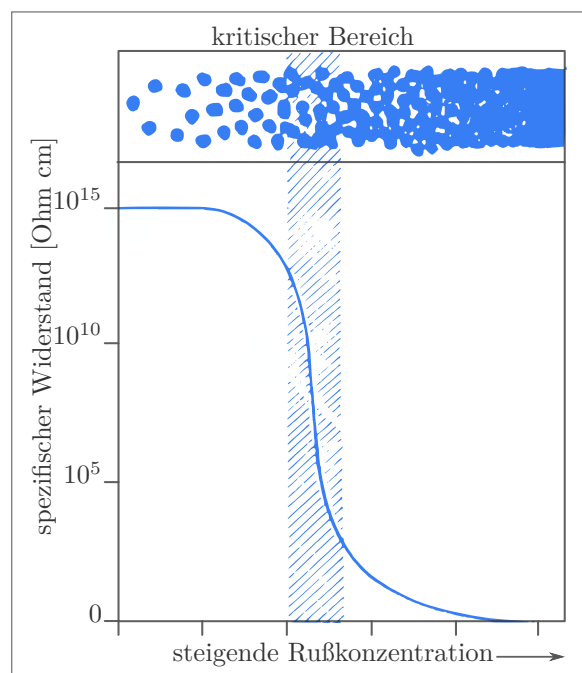


Abbildung 2.8: Widerstandsverlauf in Abhängigkeit vom Rußgehalt, nach [50, 63]

Piezoresistivität des leitfähigen, gefüllten Elastomers

Elektrisch leitfähiges, gefülltes Elastomer ist ein neuartiges funktionales Material, welches Nachgiebigkeit und Piezoresistivität aufweist. Das heißt, unter den mechanischen Belastungen verformt sich das Material und es verändert seinen elektrischen Widerstand. Nach dem Wegfall der mechanischen Belastungen kehrt das Material in die Ursprungsform und gleichzeitig auf den nahezu ursprünglichen Widerstandswert zurück. Die mechanische Verformung eines Materials wird unter anderem durch den Elastizitätsmodul beeinflusst, wobei sie mit steigendem Wert des Elastizitätsmoduls kleiner

wird [57]. Demgegenüber lässt sich die Piezoresistivität im leitenden, gefüllten Elastomer mit verschiedenen Theorien erklären. Diese Theorien werden im Laufe dieses Abschnitts vorgestellt.

Grundsätzlich zeigt der elektrische Widerstand des leitenden, gefüllten Elastomers für verschiedene Gemische bei der Zunahme der Verformung drei unterschiedliche Verhaltensweisen:

- I.) Der elektrische Widerstand nimmt ab [55, 57],
- II.) Der elektrische Widerstand nimmt zu [55, 66],
- III.) Der elektrische Widerstand nimmt zuerst ab, danach nimmt er zu [55, 67].

Bei der Erklärung des Verhaltens I, II und III betrachten die verschiedenen Theorien den Fall der Druckbelastung. Hier wird zwischen lokal leitenden Pfaden und effektiv leitenden Pfaden unterschieden (siehe Abbildung 2.9). Dabei wird der Pfad, der das isolierende Trägermaterial durchdringt, als effektiv leitender Pfad bezeichnet.

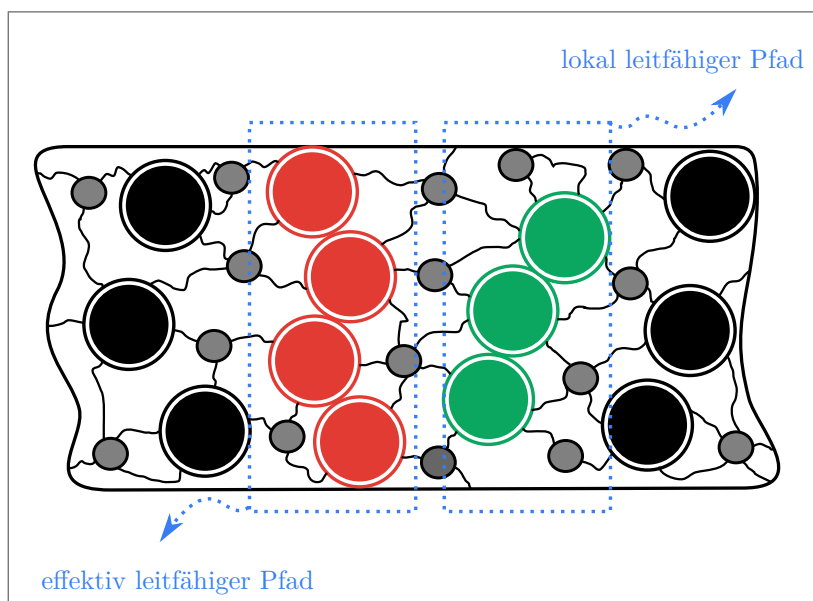


Abbildung 2.9: Der lokal leitende Pfad und der effektiv leitende Pfad, nach [55]

Abbildung 2.10 zeigt drei mögliche Gründe, die die Piezoresistivität bzw. das Verhalten des elektrischen Widerstands im leitenden, gefüllten Elastomer beeinflussen können. Im Folgenden werden diese drei Gründe dargelegt:

- a.) Änderungen in einem vorhandenen effektiv leitenden Pfad, Abbildung 2.10(a):
Unter der Druckbelastung verformt sich das Gemisch. Dabei verkleinert sich der

Abstand zwischen den leitenden Partikeln bzw. Rußpartikeln in dem effektiven Pfad [55, 68, 69]. Hier bleibt die Zahl der leitenden Partikel im effektiven Pfad konstant. Es ist auch möglich, dass der effektive Pfad neue Partikel in den Lücken zwischen seinen Partikeln aufnimmt [68], was zu der Veränderung der Abstände zwischen den Partikeln führt. Beide Effekte bewirken die Abnahme des elektrischen Widerstands vom Gemisch.

- b.) Bildung neuer effektiver Pfade, Abbildung 2.10(b): Wie bereits erwähnt, verkleinert sich der Abstand zwischen leitenden Partikeln unter der Druckbelastung. Ist dieser Abstand klein genug, dann kann der Tunneleffekt auftreten oder die Partikel können leicht in Kontakt miteinander kommen. In beiden Fällen kommt es zur Bildung von lokal leitenden Pfaden. Wenn der lokal leitende Pfad das isolierende Trägermaterial durchdringt, entsteht ein neuer effektiver Pfad [55, 57, 68, 69]. Dadurch nimmt der elektrische Widerstand des Gemischs ab.

Die Bildung neuer effektiver Pfade ist wahrscheinlicher, wenn die Konzentration der leitfähigen Partikel im Bereich der Perkolationschwelle liegt. Ein Grund dafür ist, dass es bei niedriger Konzentration schwieriger wird, die Partikel unter Druckbelastung in Kontakt miteinander zu bringen. Demgegenüber haben die meisten leitfähigen Partikel bei höherer Konzentration Kontakt miteinander [57]. Daraus folgt, dass der piezoresistive Effekt im Bereich der Perkolationschwelle ausgeprägter ist.

- c.) Zerstörung eines vorhandenen effektiv leitenden Pfads, Abbildung 2.10(c): Durch die uniaxiale Druckbelastung werden einige Rußpartikel aus ihrem effektiv leitenden Pfad herausgelöst, was zur Zerstörung des effektiv leitenden Pfads führt. Dadurch nimmt der elektrische Widerstand des Gemischs zu [55, 69, 68].

Mithilfe der beschriebenen Gründe für die Widerstandsänderung lassen sich die bereits eingeführten Verhaltensweisen I, II und III folgendermaßen erklären. Abhängig von:

- der Anzahl der neuen gebildeten effektiven Pfade,
- der Anzahl der zerstörten effektiven Pfade,
- und der Änderung der Widerstandswerte der effektiven Pfade, die durch die Breite und Anzahl der Lücken zwischen den leitfähigen Partikeln beeinflusst wird,

kann der gesamte Widerstand des Gemischs entweder abnehmen oder zunehmen [55]. Das heißt, die Abnahme des Widerstands im Verhalten I ist auf das Überwiegen der Gründe a.) und b.) bei der Druckbelastung zurückzuführen. Demgegenüber ist der

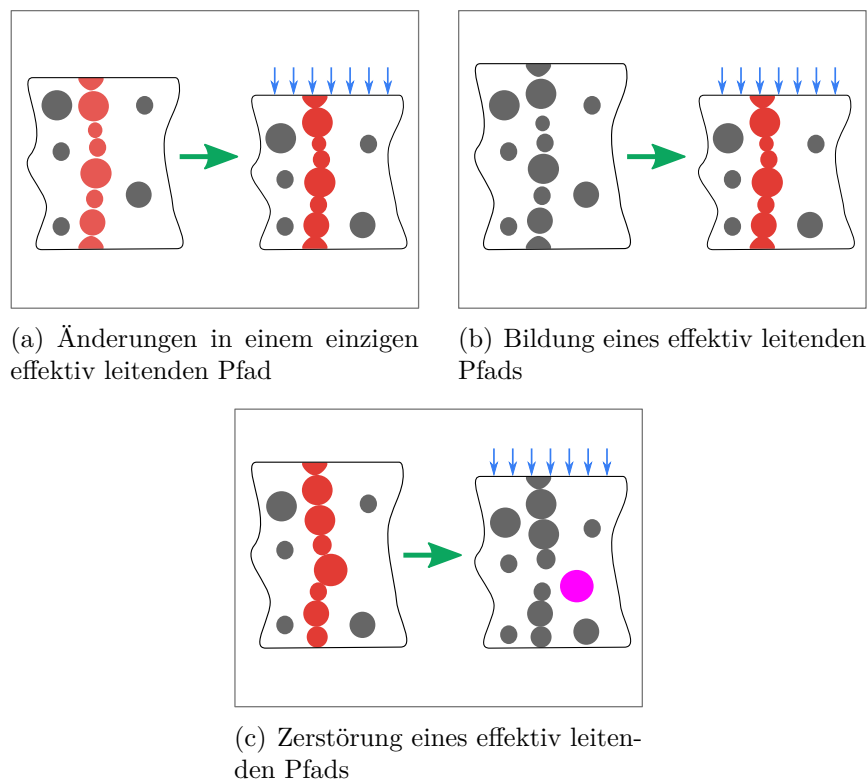


Abbildung 2.10: Änderung des effektiven Pfades unter Druckbelastung. Weiße Fläche: Isolierende Polymermatrix. Rote Kreise: Rußaggregate, die effektiv leitende Pfade gebildet haben. Graue Kreise: Rußaggregate, die keine effektiv leitende Pfade gebildet haben. Pinke Kreise: Rußaggregate, die aus effektiv leitenden Pfaden herausgedrückt wurden, nach [67, 69]

Grund c.) beim Verhalten II überwiegend, was zu der Zunahme des Widerstands führt. Das Verhalten III kann nach [67] wegen der Existenz einer kritischen Druckbelastung, deren Wert von dem leitfähigen Rußanteil abhängig ist, auftreten. Bei Druckerhöhung bis zur kritischen Druckbelastung überwiegen die Gründe a.) und b.), was die Abnahme des Widerstands vom Gemisch bewirkt. Beim Überschreiten des kritischen Punkts der Druckbelastung dominiert c.) als Grund für die Widerstandsänderung, was zu der Zunahme des Widerstands führt.

Ein weiteres Verhalten darf bei der Betrachtung der Piezoresistivität von den leitfähigen Elastomeren nicht vernachlässigt werden. Dieses Verhalten ist als Kriechverhalten bekannt. Es handelt sich dabei um die zeitliche Abhängigkeit des Widerstands unter einer unveränderlichen Belastung [56, 57, 68]. Das Kriechverhalten ist auf die Viskoelastizität der leitfähigen, gefüllten Elastomere zurückzuführen. Dies wird unter der Druckbelastung folgendermaßen erklärt. Die Druckbelastung ruft Molekularbewe-

gung des Trägermaterials (Polymermatrix) hervor. Demzufolge entsteht eine Kriechdehnung (Dehnung nimmt zu). Während des Prozesses nimmt das Volumen des gefüllten Polymers allmählich ab, was die Abnahme des Abstands zwischen benachbarten leitfähigen Partikeln verursacht. Gleichzeitig steigt die Wahrscheinlichkeit, dass mehrere benachbarte Partikel sich berühren. Demzufolge entstehen viele neue Strompfade nicht nur parallel, sondern auch senkrecht zur Richtung der Druckbelastung, was zur Bildung eines neuen leitfähigen Netzwerks innerhalb des Polymers führt. Dementsprechend nimmt der elektrische Widerstand mit der Zeit unter einer unveränderlichen Druckbelastung ab, was als Kriechverhalten des elektrischen Widerstands bezeichnet wird [57]. Das Kriechverhalten des Widerstands des Gemischs kann durch die Erhöhung des Elastizitätsmoduls verringert werden. Letzteres kann zum Beispiel durch die Zumischung von weißen Kieselsäurefüllstoffen erhöht werden [56]. Es ist zu beachten, dass die zeitliche Abhängigkeit der Piezoresistivität von den leitfähigen Elastomeren unter einer konstanten Dehnung als Relaxation des Widerstands bezeichnet wird. Dieses Verhalten wurde in [69], als eine Funktion der Zeit während der Kompression untersucht. Weiterhin ist die Piezoresistivität der leitfähigen Elastomere nicht reproduzierbar. Diese kann unter anderem durch die zyklische Belastung verbessert werden [70].

Schließlich weisen die piezoresistiven Elastomere Hysterese, und wie bereits erwähnt, Kriechverhalten und keine Reproduzierbarkeit auf. Ein wesentlicher Grund dafür kann die permanente Lageänderung der leitfähigen Partikel in dem Elastomer nach der Verformung sein. Viele Versuche zur Modellierung der piezoresistiven Eigenschaften des Elastomers in Bezug auf die Zusammensetzung und die Herstellungsverfahren wurden durchgeführt. Allerdings kann das Verhalten der leitfähigen Elastomere noch nicht vollständig erklärt werden. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die Elastomere trotz der nicht optimalen Sensoreigenschaften des Materials für zahlreiche Anwendungen, bei denen die Genauigkeit nicht von großer Bedeutung ist, erfolgreich verwendet wurden [71].

3 Stand der Technik

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, werden im Rahmen dieser Arbeit drei Systeme, die für den Bereich der Robotik von Bedeutung sind, taktile Struktur, Greifer und Gelenkverbindung, entwickelt. Viele Arbeiten wurden solchen Systemen in der Literatur gewidmet. Dieses Kapitel stellt den Stand der Technik zu den genannten Systemen und deren möglichen Sensorisierung dar.

3.1 Stand der Technik der taktilen Strukturen

Taktile Strukturen sind im Bereich der Robotik sehr wichtig, um die Erfassungsfähigkeit des Roboters zu sichern. Sie werden unter anderem in der Roboterhand oder im Roboterarm eingesetzt. Solche Strukturen beinhalten Sensoren, die in der Lage sind, Kontaktparameter in einer Kontaktfläche zu messen oder zu detektieren. Die Kontaktparameter können eine mechanische Stimulation (Kraft, Druck etc.), Temperatur, Feuchtigkeit usw. sein. Wie in der Abbildung 3.1 zu sehen ist, können die in der Literatur vorkommenden taktilen Sensoren unter anderem nach dem Messprinzip (wie piezoelektrisch, kapazitiv und piezoresistiv), dem mechanischen Charakter (wie steif und nachgiebig) oder nach der Aufgabe, die erfüllt sein muss, klassifiziert werden. Die letzte Kategorie kann in zwei Gruppen unterteilt werden, die "Sensoren für Aktion" und die "Sensoren für Perzeption". Die "Sensoren für Aktion" sind zum Beispiel Sensoren für das Durchführen des Greifvorgangs (Steuerung des Griffs, Detektion von Rutschgefahr) oder für andere Aktionen durch Ermittlung der Kontaktstelle. Unter den "Sensoren für Perzeption" werden beispielsweise Sensoren für Objekterkennung, Ermittlung der Steifigkeit oder Oberflächeneigenschaften und für das Detektieren der Temperatur verstanden (in Anlehnung an [72, 73]).

Da in dieser Arbeit nur nachgiebige und keine steifen Strukturen betrachtet werden, wird hier der Stand der Technik zu den taktilen Strukturen auf den Anwendungsbereich der nachgiebigen piezoresistiven Sensoren aus dem elektrisch leitfähigen Elastomer begrenzt. Deswegen werden hier die taktilen Sensoren nach ihrer Aufgabe wie folgt klassifiziert.

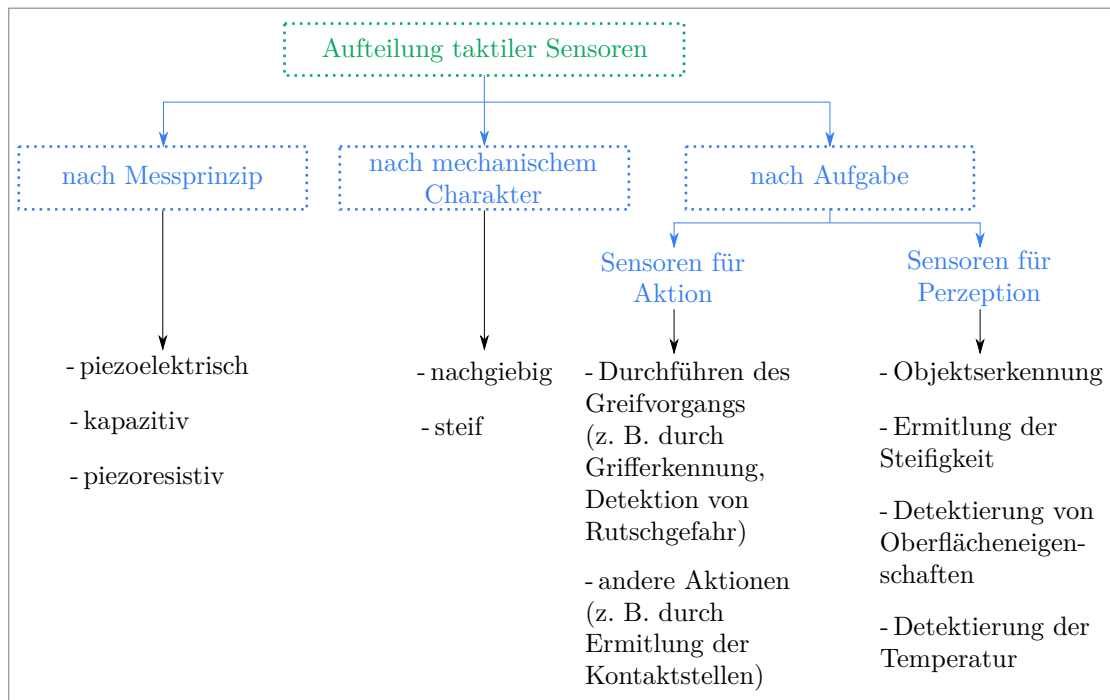


Abbildung 3.1: Grobeinteilung der taktilen Sensoren mit Beispielen, in Anlehnung an [72, 73]

3.1.1 Taktile Strukturen mit Sensoren für Aktion

Mithilfe des Signals solcher Sensoren wird eine Aktion zum Beispiel Durchführen des Greifvorgangs oder eine andere Aktion durch Ermittlung der Kontaktstellen (ein Beispiel hierfür ist die Steuerung der Gelenke an der Roboterhand oder am Roboterarm) erfolgt. Diese Sensoren sind zum Beispiel in folgenden Strukturen zu finden.

I. Taktile Strukturen mit Sensoren zum Durchführen des Greifvorgangs

Taktile Strukturen mit Sensoren zum Durchführen des Greifvorgangs haben eine große Bedeutung im Bereich der Greifertechnik. Mithilfe der Sensorsignale kann das Vorhandensein eines Objekt oder die Kontaktstellen des Griffs erkannt werden, was wiederum zu einem erfolgreichen Greifvorgang führen kann. In [74] wurde eine taktile Struktur aus elektrisch leitfähigem Elastomer an einem Vier-Finger-Greifer angebracht. Die Aufgabe dieser Struktur ist, den Kontakt mit dem Objekt sowie die Kontaktstellen zu detektieren. Diese Struktur besteht nur aus einer Schicht. Die Elektroden (Drähte) wurden durch das leitfähige Elastomer in der horizontalen sowie in der vertikalen Richtung vernäht. Dabei entsteht eine Matrix von mehreren Sensorelementen. Das Sensorelement befindet sich an der Kreuzung der horizontalen und vertikalen Elektro-

den. Trotz der Oszillationen und der Hysterese des Sensorsignals können der Kontakt mit dem Objekt und die Kontaktstellen durch die geschickte Bauweise der Struktur sowie die verwendete Messschaltung detektiert werden. Mithilfe dieser Informationen kann der Greifvorgang beeinflusst und erfolgreich abgeschlossen werden. Weitere taktile Strukturen, die für solche Aufgaben im Bereich der Greifertechnik eingesetzt werden, sind im Abschnitt 3.2 zu sehen.

II. Taktile Strukturen mit Sensoren für andere Aktionen durch Ermittlung von Kontaktstellen, Kraft oder Druck

Taktile Strukturen mit Sensoren zum Durchführen von Aktionen (wie Steuerung eines Gelenks) durch Ermittlung der Kontaktstelle, Kraft und/oder Druck sind in der Robotik (besonderes bei Mensch-Maschine-Schnittstellen) notwendig, um eine sichere Interaktion mit der Umgebung zu gewährleisten. Für diese Aufgaben wurden in der Literatur verschiedene taktile Strukturen diskutiert.

Lacasse [75] stellt eine taktile Struktur aus dem elektrisch leitfähigen Silikonkautschuk und einem leitfähigen Gewebe vor. Die Elektroden werden aus dem leitfähigen Gewebe in Form von Reihen und Spalten gebildet. Die Sensorelemente aus dem leitfähigen Silikonkautschuk werden zwischen den Elektroden in Form einer Matrix gefertigt. Um diese Sensorelemente zu isolieren, werden sie in einer nicht leitfähigen Silikonschicht eingebettet. Dabei entsteht die dargestellte Roboterhaut. Wegen der Nichtlinearitäten, des Kriechverhaltens und der langen Relaxationszeit von dem elektrisch leitfähigen Silikonkautschuk ist die Ermittlung der Druckbelastung eine sehr schwierige Aufgabe. Unter Nutzung dieser taktilen Struktur ist es jedoch trotzdem möglich Kontaktstellen zu detektieren.

Eine andere taktile Struktur wurde in Form einer Sensorfolie mit elektrisch leitfähigen Elastomerstreifen entwickelt [76]. Die Elastomerstreifen stellen die Sensorelemente in x sowie in y Richtung dar und liegen isoliert voneinander. Trotz der viskoelastischen Materialeigenschaften des elektrisch leitfähigen Silikonkautschuks, die nicht vernachlässigt werden können, kann die Position von Druckpunkten mithilfe der Sensorfolie und mithilfe eines geschickten Algorithmus für die Signalverarbeitung lokalisiert werden.

Weitere taktile Strukturen mit Sensoren für diese Aufgaben wurden mithilfe des elektrisch leitfähigen Elastomers entwickelt. Diese sind zum Beispiel in [77, 78, 79, 80] zu sehen.

3.1.2 Taktile Strukturen mit Sensoren für Perzeption

Mithilfe solcher taktiler Strukturen werden unter anderem Eigenschaften von dem in der Kontaktfläche vorhandenen Objekt ermittelt. Diese Strukturen sind zum Beispiel in den folgenden Arbeiten zu finden.

I. Taktile Strukturen mit Sensoren für Objekterkennung

Ein Objekt kann zum Beispiel durch seine Form erkannt werden. Für die Objekterkennung wurden in der Literatur zahlreiche taktile Strukturen eingesetzt. Eine flexible taktile Struktur, welche zum Erkennen der Form des Objektes eingesetzt werden kann, ist in [81] dargestellt. Die Struktur ist eine Doppelschicht- bzw. Sandwich-Struktur. Sie besteht aus einer Matrix von Sensorelementen aus elektrisch leitfähigem Silikonkautschuk, zwei äußeren Schichten aus Polyethylenterephthalat (PET-Folien) zum Schützen der inneren Struktur des Sensors und einer weiteren isolierenden Silikonkautschuk-schicht zwischen den beiden Außenschichten. Diese wird mit den äußeren Schichten durch Klebstoff verbunden. Die Elektroden sowie die leitende Bahn werden auf jede äußere Schicht mittels Siebdruckverfahren gedruckt. Die hier gelieferten Ergebnisse zeigen, dass das Sensorsignal jedes Sensorelements sich von den anderen ein wenig unterscheidet. Außerdem zeigen die wiederholten Messungen keinen identischen Verlauf der Widerstandsänderung. Allerdings wurde die Form eines u-förmigen Gewichts mithilfe der dadurch entstehenden externen Kraft und dementsprechend die entstehende Widerstandsänderung der Sensorelemente detektiert.

II. Taktile Strukturen mit Sensoren zum Detektieren der Temperaturänderung

Taktile Strukturen zum Detektieren der Temperaturänderung sind in der Lage, die Temperaturänderung der Kontaktfläche zu erkennen. Außerdem ist es möglich mit solchen Strukturen, Objekte nach ihren thermischen Eigenschaften zu klassifizieren. In [82, 83] ist ein Beispiel dafür vorgestellt. Für diese Struktur wurde ein elektrisch leitfähiger Silikonkautschuk, welcher von Belastung und Temperatur abhängig ist, verwendet. Außerdem wurde ein Erhitzer eingesetzt, um eine bestimmte Temperatur an der taktilen Struktur zu erreichen. Die vorgestellte Struktur besteht aus vier Sensorelementen und kann die Kontaktkräfte, Temperaturänderungen und die unterschiedliche Zahl der Kontaktstellen mithilfe von zwei gleichzeitig erfassten Sensorsignalen R_1 und R_2 differenzieren. Aufgrund dieser Eigenschaften ist die taktile Struktur für verschiedene Aufgaben wie die Erkennung der thermischen Eigenschaften sowie der Oberflächenrauheit des Objektes geeignet.

III. Taktile Strukturen mit Sensoren zum Detektieren der Steifigkeit

Mithilfe dieser taktilen Strukturen können Objekte nach ihrer Steifigkeit identifiziert und klassifiziert werden. Ein Beispiel hierfür ist die in [84, 85] vorgestellte taktile Struktur. Sie besteht aus piezoresistivem Elastomer, welches zwischen zwei flexiblen Schichten liegt. Auf jede flexible Schicht werden Drähte parallel verlegt und befestigt. Diese zwei Schichten sind senkrecht zueinander platziert. Dabei entsteht eine taktile Struktur in Form einer Matrix. Diese taktile Struktur wurde in die Finger eines Greifers zur Klassifizierung der gegriffenen Objekte eingesetzt. Trotz des viskoelastischen Verhaltens des verwendeten Materials können mit der vorgestellten taktilen Struktur unbekannte Objekte nach ihrer Steifigkeit mit guter Wahrscheinlichkeit (oft) klassifiziert werden.

IV. Sonstige taktile Strukturen

Einige taktile Strukturen haben Sensoren, die in medizinischen Bereichen zum Beispiel für die Gangerkennung eingesetzt werden können [86]. Andere Strukturen werden beispielsweise zum Detektieren von unterschiedlichen Lösungsmitteln verwendet [87].

Schlussfolgerung

Aus der dargestellten Recherche ergibt sich, dass der Einsatz des Silikonkautschuks als Sensorelemente in den taktilen Strukturen mit unterschiedlicher Aufgabe, wie das Helfen bei der Durchführung von Aktionen oder für die Perzeption, vielversprechend ist. Demzufolge wird dieses Material in dieser Arbeit aufgegriffen, um verschiedene Systeme mit nachgiebigen Sensorelementen auszustatten. Dafür wurde im Abschnitt 5.1 dieser Arbeit eine taktile Struktur untersucht und gezeigt. Diese taktile Struktur bezweckt ausschließlich, dass der hier untersuchte, leitfähige Silikonkautschuk als Sensorelement eingesetzt werden kann. Trotz dieses eingeschränkten Ziels und der einfachen Konstruktion zeigt diese Struktur vergleichbare Ergebnisse mit den in diesem Abschnitt dargestellten taktilen Strukturen hinsichtlich der Ermittlung der Kontaktstellen.

3.2 Stand der Technik der Greifsysteme

In der Robotik ist das Greifen eine grundlegende Operation zum Erfassen und Halten von Objekten. Die Entwicklung eines universellen Greifers zum Greifen von unbekann-

ten Objekten mit unterschiedlichen Formen und Oberflächen eine sehr anspruchsvolle Aufgabe. Um diese Aufgabe zu erleichtern, werden verschiedene Sensoren eingesetzt. Dadurch kann zum Beispiel die Erkennung der Anwesenheit und der richtigen Lage des Greifobjektes ermöglicht werden. Außerdem kann zum Beispiel das gegriffene Objekt durch die Erkennung seiner Geometrie oder Eigenschaften identifiziert oder klassifiziert werden. Damit können die in einem Greifsystem eingesetzten Sensoren nach deren Aufgabe in zwei Gruppen eingeteilt werden (siehe Abbildung 3.2). Die erste Gruppe beinhaltet Sensoren zum Durchführen des Greifvorgangs. Um einen erfolgreichen Greifvorgang durchzuführen, sollen diese Sensoren bestimmte Aufgaben zum Beispiel beim Greifen des Objektes, bei der Griffstabilisierung (wie Greifkraftmessung, Erkennung der Rutschgefahr), bei der Bewegung des Greifers (Kollisionserkennung) oder beim Ablegen des Objektes erfüllen. Für solche Aufgaben können unter anderem Näherungssensoren, taktile und optische Sensoren [88, 89, 90] eingesetzt werden. In der zweiten Gruppe werden Sensoren für Perzeption, wie Sensoren zum Bestimmen von Objekteigenschaften (wie Steifigkeit, Form) oder für Objektvermessung (wie Messen des Durchmessers eines runden Objektes), eingeordnet. Beispiele hierfür sind unter anderem taktile und optische Sensoren [88, 89, 90].

Für die in der Literatur vorgestellten Greifsysteme werden meistens taktile Sensoren eingesetzt. Dadurch lassen sich die Minimierung bzw. Optimierung der Greifkraft und die Griffanpassung vor und beim Rutschen des Objektes verbessern [91]. Deswegen wird sich hier mehr auf die Greifer mit taktile Sensoren konzentriert. Es ist zu beachten, dass die Greifer mit verschiedenen Sensoren ausgerüstet werden können. Dies hängt von den Informationen ab, die die Sensoren eines Greifers liefern müssen.

3.2.1 Greifer mit Sensoren zum Durchführen des Greifvorgangs

Der Einsatz von Sensoren kann einen erfolgreichen Greifvorgang ermöglichen. In [92] wird ein Greifer mit taktilem Sensor aus elektrisch leitfähigem Elastomer, dessen elektrischer Widerstand sich unter Einwirkung der Druckbelastung ändert, dargestellt. Der Greifer hat zwei Klemmbacken mit einer zylindrischen Greiffläche, worauf die Sensorschicht angebracht wurde. Die Sensorschicht wurde an die elektrische Kontaktierung angeschlossen und mit einer isolierenden Schicht von beiden Seiten abgedeckt. Mithilfe des Sensorsignals und eines passenden Algorithmus kann die Anwesenheit des Objektes detektiert werden. Außerdem kann die Form des Objektes von einem anderen, zum Beispiel einem zylindrischen Objekt, unterschieden werden. Allerdings sind die Sen-

3.2 Stand der Technik der Greifsysteme

soren dieses Greifsystems nicht inhärente Teile von dessen Struktur, was den Aufbau aufwendiger macht.

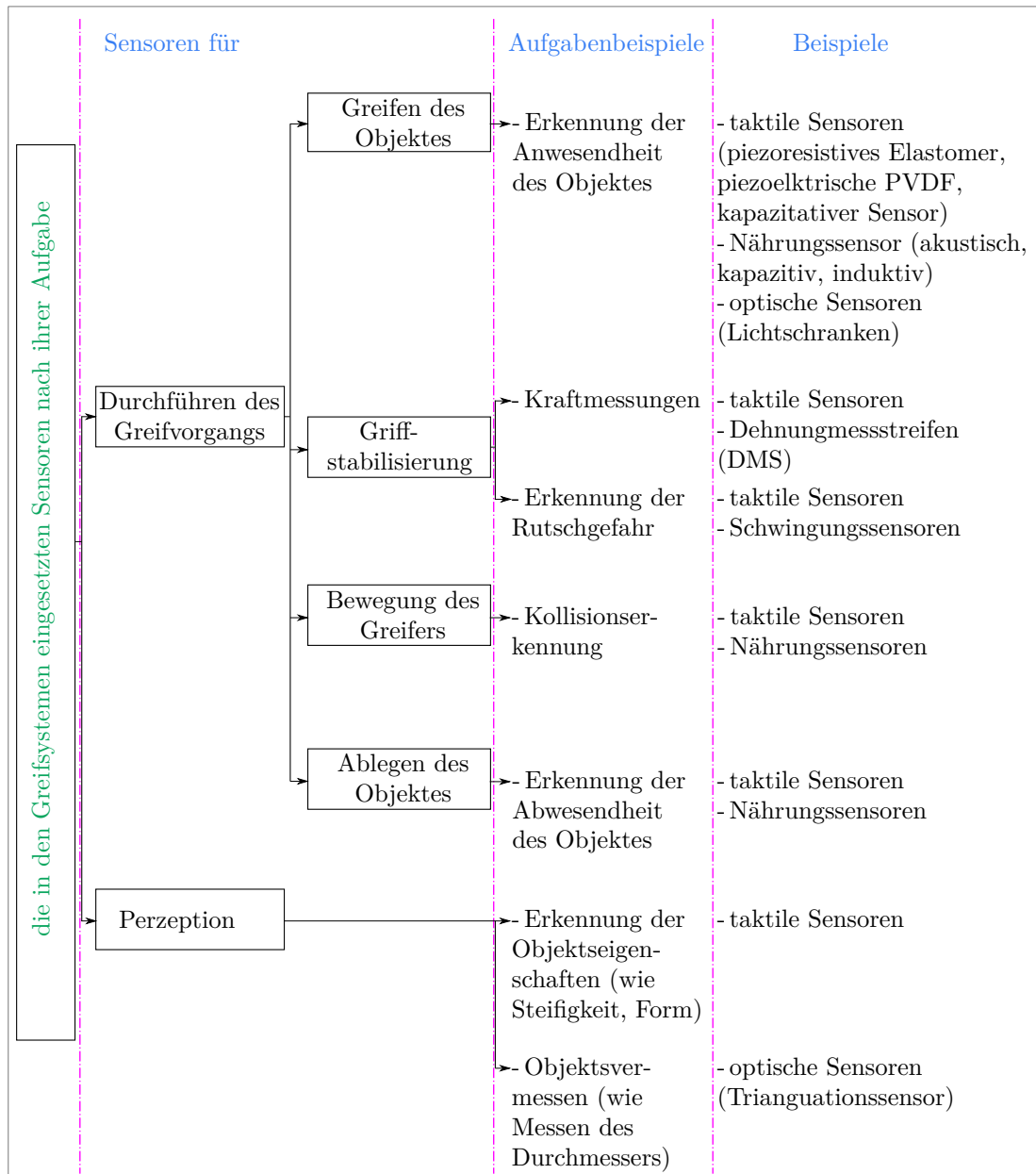


Abbildung 3.2: Grobeinteilung der in den Greifsystemen eingesetzten Sensoren nach ihrer Aufgabe

Ein weiteres Greifsystem mit anderen taktilen Sensoren ist in [93] dargestellt. Mit Hilfe dieses Greifsystems können verschiedene Objekte mit unterschiedlichen Massen, Abmessungen und Reibwerten gegriffen werden. Der Greifer besteht aus zwei flachen Fingern. Ein Finger ist fixiert und der andere kann sich parallel bewegen. Dadurch

kann sich der Greifer an kleine sowie große Objekte anpassen. Für dieses System wird nur ein Aktuator benötigt. Außerdem ist der Greifer mit einem *Force Sensing Resistor (FSR)*¹⁷ versehen, um die Greifkraft zu messen. Weiterhin wurde der Greifer mit einem kommerziell erhältlichen Sensor (piezoelektrischen Schwingungssensor)¹⁸ zum Erkennen der Rutschvorgänge ausgestattet. Basierend auf den durch die Sensoren gelieferten Informationen kann die Greifkraft mittels eines passenden Algorithmus beeinflusst werden, wobei die Rutsch- oder Quetschgefahr des Objektes minimiert werden kann. Jedoch sind die Finger des Greifers steif und können sich nicht an komplizierte Formen anpassen. Außerdem sind die Sensoren nicht inhärente Teile, was wiederum zu einem großen Volumen und Bauaufwand führt.

In [95] wird ein sensorisierter Mikrogreifer vorgestellt. Der Mikrogreifer hat zwei Finger und Sensoren aus dem piezoelektrischen Polymer PVDF. PVDF erzeugt elektrische Ladungssignale unter der mechanischen Beanspruchung. Der Sensor wird hier als rechteckige Schicht hergestellt. Mithilfe eines nichtleitenden Klebstoffs wird die Sensorschicht an den greifenden Fingern befestigt. Die Sensorschicht zeigt ein lineares Verhalten zwischen der angewendeten Kraft und dem Ausgangssignal. Außerdem kann sie eine Greifkraft von wenigen mN identifizieren. Diese Informationen werden verwendet, um die zerbrechlichen Objekte greifen zu können, ohne diese zu beschädigen. Der Greifer ist aber nur für sehr kleine Objekte geeignet und kann sich nicht an komplizierte Formen anpassen. Außerdem sind die Sensoren nicht inhärente Teile, was ein großes Volumen und einen Bauaufwand verursacht.

In [96] wird ein nachgiebiger pneumatischer Aktuator [97] bestehend aus einem hohlen, nachgiebigen Körper mit einem nicht axialsymmetrischen Querschnitt mit einem piezoelektrischen PVDF-Streifen sensorisiert. Der Aktuator wird durch Druckbeaufschlagung im Innenraum betätigt. Dabei ändert er seine Krümmung. Der Sensorstreifen wurde entlang des Aktuators verlegt und kann seine Form bei der Betätigung bis zu einer bestimmten Krümmung sowie den Kontakt mit Hindernissen detektieren. Der Aktuator kann als Ein-Finger-Greifer angewendet werden. Jedoch ist die Rutschgefahr des Objektes bei solch einem Greifer größer als bei den Zwei-Finger-Greifern.

Eine nachgiebige SDM-Hand (*Shape Deposition Manufactured*¹⁹ *Hand*) wird in [100]

¹⁷FSR ist ein Messgerät, welches unter Kraft- bzw. Druckbelastung seinen Widerstand ändern kann [94].

¹⁸Dieser Sensor liefert unterschiedliche elektrische Spannung in Abhängigkeit von unterschiedlichen Geschwindigkeiten des Objektes [93].

¹⁹Shape Deposition Manufacturing ist ein Herstellungsverfahren, welches die Teile in Schichten herstellt. Dabei werden getrennte Prozessschritte zur Ablagerung des Materials und zur Formgebung der Schicht verwendet [98, 99].

gezeigt. Für die Sensorisierung dieser Hand wird ein piezoelektrischer Polymerfilm als ein taktiler Sensor (Kontaktsensor) eingesetzt. Der Sensor kann auf die Veränderungen der Belastung beim Greifen und beim Manipulieren reagieren. Außerdem wird der Kontakt mittels des Sensorsignals erkannt. Mithilfe der gelieferten Informationen sowie eines geschickten Algorithmus kann der Griffbereich der Hand erweitert und die Kontaktkraft an dem Objekt minimiert werden. Allerdings ist mit hohen Kosten und einer hohen Komplexität bei diesem Greifsystem zu rechnen.

Ein weiteres Greifsystem, eine Handprothese *Otto Bock Michelangelo 2 (M2)*, wird in [91] vorgestellt. Diese Hand wird mit einem nachgiebigen taktilen Sensor [101] zum erfolgreichen Durchführen des Greifvorgangs versehen. Der Sensor besteht aus einem starren Kern, leitender Flüssigkeit, Elektroden und einer elastomerartigen schützenden Außenhaut. Die Elektroden sind auf dem Kern, der in Form eines Fingers ist und von der leitenden Flüssigkeit umschlossen wird, verteilt. Ein elektrisch leitender Pfad wird durch die leitende Flüssigkeit neben den Elektroden gebildet. Der Sensor basiert auf der Änderung des elektrischen Widerstands des Pfads unter der Verformung der Flüssigkeit während der Belastung. Mithilfe der Sensorsignale können Informationen über die Normal- und Scherkräfte an der Fingerspitze geliefert werden. Diese Informationen werden verwendet, um die Rutschgefahr des Objektes aus der Handprothese zu verhindern. Es sind aber hier ebenso hohe Kosten und eine hohe Komplexität zu erwarten.

3.2.2 Greifer mit Sensoren für Perzeption

Solche Greifer werden zum Beispiel zum Klassifizieren der Objekte, unter anderem nach ihrer Größe, Form oder Eigenschaften, benötigt. Für die Erfüllung dieser Aufgaben werden in den Greifsystemen unterschiedliche Sensoren eingesetzt. In der anthropomorphen pneumatischen Roboterhand (FRH-4) werden magnetische Drehgeber der Firma *Austriamicrosystems* in jedem Gelenk für die Winkelmessung verwendet [102]. Taktiler Sensoren der Firma *Interlink Electronics* werden ebenso an jedem Finger der Hand angebracht. Sie basieren auf dem resistiven Effekt und ermöglichen eine Rückkopplung über den Greifzustand und dementsprechend Explorationsaufgaben (wie Formerkennung).

In [103] wird ein nachgiebiger taktiler Sensor, der an den Greiferfingern montiert werden kann, vorgestellt. Mithilfe der Sensorsignale können Informationen zur Form des gehaltenen Objektes geliefert werden. Der Sensor besteht aus senkrecht zueinander

ausgerichteten Elektroden und einer dazwischen liegenden, elektrisch leitenden Flüssigkeit. Sein Prinzip beruht auf der Widerstandsänderung zwischen zwei Elektroden, die von der Dicke der leitenden Flüssigkeit abhängig ist. Dieser Sensor kann aber bei großen Kräften, die zu einem Kontakt zwischen den Elektroden führen, ausfallen.

3.2.3 Nachgiebige Greifer ohne Sensorik

Verschiedene Greifer wurden ohne Sensorik entwickelt [104, 105]. Sie zeichnen sich durch ihre Anpassungsfähigkeit an das gegriffene Objekt aus. Diese Anpassungsfähigkeit ist auf die Materialeigenschaften sowie auf die Struktur des Greifers zurückzuführen. Allerdings zeigen diese Greifer einen großen Fertigungsaufwand und aufgrund der fehlenden Sensorik einen begrenzten Arbeitsbereich.

Schlussfolgerung

Die bereits durchgeführte Recherche hat gezeigt, dass sich verschiedene Literaturen mit der Entwicklung eines nachgiebigen Greifers und dessen Sensorisierung befassen haben. Dabei konnten unterschiedliche physikalische Größen erfolgreich ermittelt werden. Allerdings wurde kein vollständiger nachgiebiger Greifer mit nachgiebigen Sensorelementen realisiert. Deshalb wurde die Sensorisierung eines nachgiebigen Greifers mit nachgiebigen Sensorelementen als ein Ziel dieser Arbeit gesetzt. Die Vorteile des entwickelten Greifers, wie zum Beispiel seine nachgiebige monolithische Struktur, die die nachgiebigen Sensorelemente beinhaltet, und die kompakte Bauweise, werden im Abschnitt 5.2 gezeigt.

3.3 Stand der Technik der Gelenkverbindungen

In letzter Zeit haben die Roboter, die sich mit den Menschen im selben Raum befinden, zunehmend an Bedeutung gewonnen. Um die notwendige Sicherheit zu garantieren, wurde die Kollisionserkennung sowie Kraftkontrolle des Roboterarms bzw. der Roboterhand intensiv untersucht [106, 107]. In diesem Abschnitt wird der Stand der Technik der Gelenkverbindungen, die bei der Kollisionen schützen sollen, dargestellt. Verschiedene Systeme wurden entwickelt, um die Sicherheit zwischen den Menschen und dem Roboter im Kollisionsfall zu gewährleisten. Wie in der Abbildung 3.3 zu sehen ist, kann

diese Sicherheit zum Beispiel durch das Vorhandensein elastischer Elemente (wie Feder oder Element aus elastischen Material) oder durch die Sensoren realisiert werden. Eine andere Möglichkeit besteht in einer kombinierten Variante, wobei Sensoren und elastische Elemente vorhanden sind.

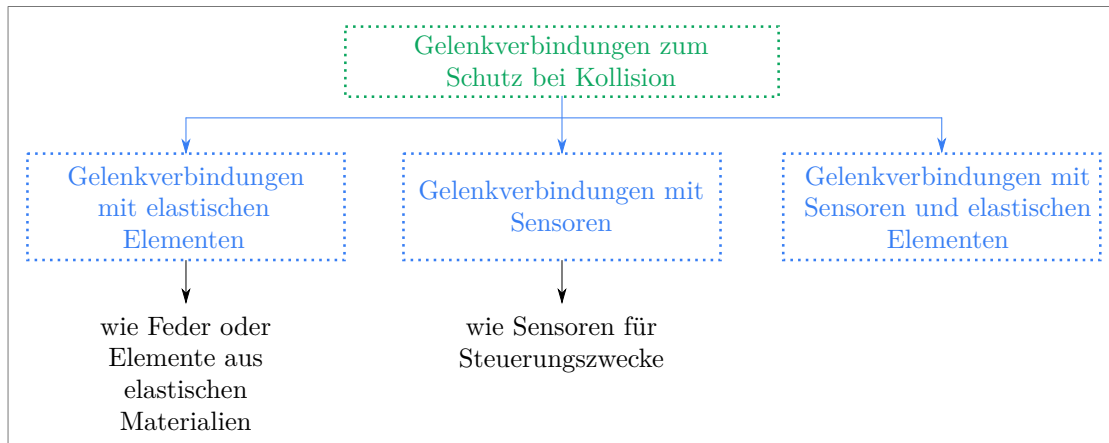


Abbildung 3.3: Grobeinteilung der Gelenkverbindungen, die zum Schutz bei Kollision eingesetzt werden können

3.3.1 Gelenkverbindungen mit elastischen Elementen

Die Systeme, die ihre Nachgiebigkeit nur durch elastische mechanische Elemente wie zum Beispiel eine Feder erhalten [108, 109, 110], werden oft in der Literatur als passive Systeme bezeichnet. Diese Systeme können zum Beispiel durch die integrierte Feder ihre nichtlineare Steifigkeit erhalten. Dadurch zeigen sie eine schnelle Reaktion auf den Kollisionsfall bei einer externen Kraft größer als ein bestimmter Schwellwert. Dieser Schwellwert kann mithilfe der Federkennlinie und der Vorspannung eingestellt werden. In [111, 112] wird ein passives System mit einem nachgiebigen elastomeren Teil dargestellt. Die Elastizität der hier gezeigten Gelenkverbindung wird durch das elastomere Teil gewährleistet. Die Systeme mit elastischen mechanischen Elementen haben einen einfachen Aufbau im Vergleich zu den aktiven Systemen (mit Sensorik und Aktorik). Das Problem bei den rein passiven Systeme ist, dass die Auslenkung nicht erfasst werden kann und damit nicht klar ist, bei welcher Auslenkung die Kollision stattgefunden hat.

3.3.2 Gelenkverbindungen mit Sensoren

Durch den Einsatz von Sensoren können unterschiedliche Informationen über die Umgebung gewonnen werden. Diese Informationen werden in einem passenden Algorithmus bearbeitet, um zum Beispiel der Kollisionen entgegenzuwirken. Verschiedene Anwendungen basieren auf der Messung des Drehmoments am Gelenk des Roboters zum Detektieren des Kollisionsfalls. Die Messung des Drehmoments erfolgt durch verschiedene Gelenk-Momentensensoren (*Joint Torque Sensor (JTS)*). Ein Beispiel dafür ist in [106] vorgestellt. Solche Systeme, die nur auf den Sensoren basieren und keine elastischen Elemente benutzen, sind aufgrund der hohen Anforderungen an die Sensoren (zum Beispiel eine hohe Genauigkeit) kostenintensiv.

3.3.3 Gelenkverbindungen mit Sensoren und elastischen Elementen

Während das elastische Element in solchen Gelenkverbindungen einen weichen Kollisionsfall garantiert, können zum Beispiel Bewegungen mithilfe der durch die Signale bestehenden Steuerungsmöglichkeit eingestellt werden. Folglich kann mit dem System der Kollision entgegengewirkt werden. Aufgrund der hohen Sicherheit, die solche Systeme realisieren können, bilden sie einen wichtigen Forschungsschwerpunkt in der Robotik.

In [113] wird eine nachgiebige Gelenkverbindung dargestellt. Zwei Polyurethanrohre werden zum Dämpfen der äußeren Kräfte verwendet. Die Gestaltung des Gelenks ermöglicht, dass ein Polyurethanrohr zwischen Abtriebsglied und der Riemenscheibe unter den äußeren Kräften zusammengedrückt wird. Währenddessen wird das andere Polyurethanrohr entlastet. Der Winkel des Gelenks bei der Drehung wird durch einen optischen Drehgeber erfasst. Die Auslenkung des nachgiebigen Elements kann somit als die Differenz der Motorposition und des Gelenkwinkels berechnet werden. Damit kann die äußere Kraft detektiert werden. Allerdings weist die hier beschriebene Gelenkverbindung einen aufwendigen Aufbau auf.

Ein Gelenk mit veränderlicher Steifigkeit (*variable Stiffness*) wird in [114] beschrieben. In dem Gelenk werden zwei Silikonkissen (*silicone rubber cushions*) (A-SRC) und (B-SRC), Drucksensoren und eine Stützwand (*cushion support wall*) (CS-Wall) eingesetzt, um die externen Kräfte zu ermitteln und die Gelenksteifigkeit einzustellen. A-SRC besteht aus vier geschlossenen zylinderförmigen Kissen (*cylinder-shaped cushions*)

(CSCs). Durch diese Kissen wird die Drehbewegung vom Antrieb auf das Abtriebsglied übertragen. Die auf dem Abtriebsglied aufgebrachtten Kräfte werden durch die elastischen Verformungen der CSCs minimiert. Außerdem werden Informationen über die Richtung und Größe dieser Kräfte mittels der Druckänderungen innerhalb jedes CSC geliefert. Die Druckänderungen werden durch die Drucksensoren ermittelt. Das B-SRC ist ein einfaches ringförmiges Kissen mit einem Hohlraum. Dieses wird pneumatisch betätigt, um die Gelenksteifigkeit einzustellen. Durch die Betätigung wird das Kissen gedehnt. Die Dehnung der B-SRC verschiebt die Stützwand. Dabei wirken von dieser Wand Kräfte auf jeden CSC. Diese Kräfte beeinflussen die Verformung der CSCs. Dadurch kann die Gelenksteifigkeit eingestellt werden. Jedoch ist die Gelenksteifigkeit laut der Messergebnisse nur an der höchsten oder niedrigsten Grenze einzustellen. Demgegenüber zeigt die Ermittlung der externen Kraft gute Ergebnisse. Allerdings zeigt diese Gelenkverbindung einen aufwendigen Aufbau durch die mehrteilige Konstruktion sowie die pneumatische Betätigung.

In [115] wird ein weiteres Gelenk mit veränderlicher Steifigkeit dargestellt. Hier werden zwei Federn als elastische Elemente eingesetzt. Zum Einstellen der Steifigkeit des Gelenks wird ein Antrieb mit geringer Leistung benötigt. Dies verlangt wiederum mehr Platz im Gelenk und erhöht außerdem die Kosten. Das Sensorsystem in dem Gelenk beinhaltet verschiedene Sensoren, wie zum Beispiel Positionssensor und Momentensensor.

Schlussfolgerung

Es zeigt sich, dass der Bereich nachgiebiger Gelenkverbindungen intensiv erforscht ist. Die passiven, nachgiebigen Gelenkverbindungen bieten einen einfachen Aufbau und garantieren einen weichen Kollisionsfall. Es ist aber aufgrund der fehlenden Sensorik nicht möglich, Informationen über die Kollision zu erhalten. Demgegenüber können bei den sensorisierten Systemen äußere Kräfte detektiert und den dadurch entstehenden Kollisionen entgegengewirkt werden. Dafür werden aber kostenintensive Sensoren benötigt. Ein wichtiger Forschungsschwerpunkt sind die nachgiebiger Gelenkverbindungen mit Sensoren und elastischen Elementen. Solche Systeme bieten eine hohe Sicherheit sowie die Möglichkeit zum Detektieren und zum Entgegenwirken der Kollision. Ein System, welches mit nur einem Teil die Elastizität, die Dämpfung sowie die sensorische Fähigkeit garantiert, konnte in der Literatur nicht gefunden werden. Deswegen wird in der vorliegenden Arbeit im Abschnitt 5.3 ein solches System untersucht. Ein Teil des

Systems wird aus dem elektrisch leitfähigen Silikonkautschuk hergestellt. Dieses Teil wird als Sensorelement verwendet. Außerdem werden die Elastizität und die Dämpfungseigenschaften durch dieses Teil gesichert. Dadurch weist das System im Vergleich zu den in diesem Kapitel dargestellten Systemen einen kompakten Aufbau auf.

4 Untersuchung der Eigenschaften des elektrisch leitfähigen Silikonkautschuks

In diesem Kapitel werden Materialuntersuchungen durchgeführt. Das Ziel dieser Untersuchungen ist die Grundlagen festzulegen, welche die Verwendung des leitfähigen Silikonkautschuks als Sensorelemente ermöglichen. Um diese umzusetzen, werden die elektrischen Eigenschaften des leitfähigen Silikonkautschuks in Abhängigkeit von verschiedenen Belastungen (Zug- bzw. Druckbelastung) ermittelt. Die Verformungen der Sensorelemente unter der mechanischen Belastung beeinflusst ihre elektrischen Eigenschaften. Diese Fähigkeit prädestiniert das Material für die Anwendung im Bereich der Sensortechnik.

4.1 Messverfahren

Die Sensorfähigkeit bzw. -eigenschaft des leitfähigen Silikonkautschuks ist durch seinen belastungsabhängigen elektrischen Widerstand charakterisiert. Die Widerstandsänderung kann mittels unterschiedlicher Schaltung über Veränderungen des Stroms bzw. der Spannung gemessen werden. Bei einer Belastung (Druck- bzw. Zugbelastung) ändert sich die Länge bzw. die Querschnittfläche der Silikonprobe, was eine zwangsläufige Änderung des elektrischen Widerstands nach Gleichungen 4.1 verursacht [24]:

$$R = \rho_{sp} \frac{l}{A} \quad (4.1)$$

Die relative Widerstandsänderung $\frac{\Delta R}{R}$ ergibt sich durch [24]:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho_{sp}}{\rho_{sp}} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta b}{b} - \frac{\Delta d}{d} \quad (4.2)$$

wobei ρ_{sp} der spezifische Widerstand ist, A , b , d und l die Querschnittfläche, Breite, Dicke bzw. Länge eines Leiters (hier Silikonprobe). Es ist hier wichtig für den Vergleich der Sensor-Probe, dass alle Proben die gleiche Länge bzw. Querschnittfläche besitzen. Dies wird durch das einheitliche Fertigungsverfahren (siehe Abschnitt 4.2.1 und 4.3.1) erhalten.

Zur Bestimmung der Widerstandsänderung der Silikonprobe bei veränderlicher Belastung müssen der im Widerstand fließende Strom I oder die über dem Widerstand fallende Spannung U erfasst werden. Der Widerstand kann dann nach dem ohmschen Gesetz in der Gleichung 4.3 berechnet werden.

$$R = \frac{U}{I} \quad (4.3)$$

Abbildung 4.1 zeigt das Spannungsteiler-Prinzip, welches für die Widerstandsmessung eingesetzt wurde. Es handelt sich um zwei in Reihe geschaltete Widerstände, wobei R_{S} der Widerstand der Sensor-Probe und R_{ref} der Referenzwiderstand sind. Als Wert wurde der Referenzwiderstand so ausgesucht, dass sich ein deutliches Ausgangssignal durch den Spannungsteiler ergibt. Die Eingangsspannung (U_{in}) muss während der Messung konstant bleiben. Der Spannungsteiler beschreibt das Verhältnis zwischen Eingangsspannung (U_{in}) und Ausgangsspannung (U_{S}), die über der Sensor-Probe abfällt, durch folgende Gleichung:

$$U_{\text{S}} = U_{\text{in}} \frac{R_{\text{S}}}{R_{\text{S}} + R_{\text{ref}}} \quad (4.4)$$

Die Spannung U_{S} ist in dieser Gleichung eine Funktion des R_{S} , der wiederum eine Funktion der Zug- bzw. Druckbelastung ist.

R_{S} ergibt sich durch das Umformen der Gleichung 4.4:

$$R_{\text{S}} = R_{\text{ref}} \frac{U_{\text{S}}}{U_{\text{in}} - U_{\text{S}}} \quad (4.5)$$

Das Spannungssignal auf die Silikonprobe wird in dieser Arbeit durch die in der Materialprüfmaschine²⁰ integrierten Schaltungen erfasst und im Rechner verarbeitet.

²⁰Materialprüfmaschine ist die ProLine Tisch-Prüfmaschine Z005 der Firma Zwick für Materialprüfung im Zug- und Druckversuch (siehe Abbildung 4.2).

4.2 Untersuchung der Eigenschaften des elektrisch leitfähigen Silikonkautschuks in Abhängigkeit von der Zugbelastung

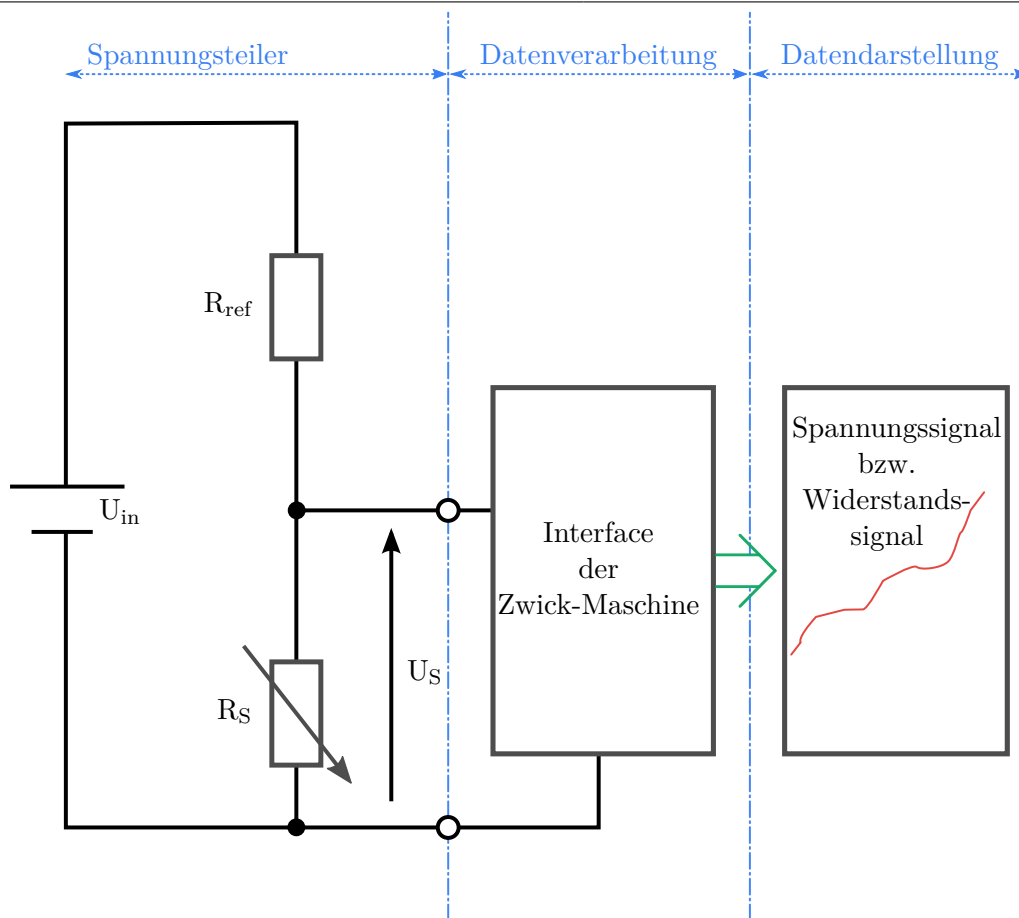


Abbildung 4.1: Messverfahren zum Messen des elektrischen Widerstands der Sensor-Probe

4.2 Untersuchung der Eigenschaften des elektrisch leitfähigen Silikonkautschuks in Abhängigkeit von der Zugbelastung

Die elektrischen Eigenschaften des leitfähigen Silikonkautschuks wurden mithilfe der ProLine Tisch-Prüfmaschine Z005 durchgeführt (siehe Abbildung 4.2).

Das Ziel der nachfolgenden Untersuchungen ist, das Verhalten der Sensor-Proben unter Zugbelastung anhand der Widerstandsänderung zu ermitteln. Hierzu werden die Bedingungen für die Vorkonditionierung und des Arbeitsbereichs vom elektrisch leitfähigen Silikonkautschuk festgelegt.

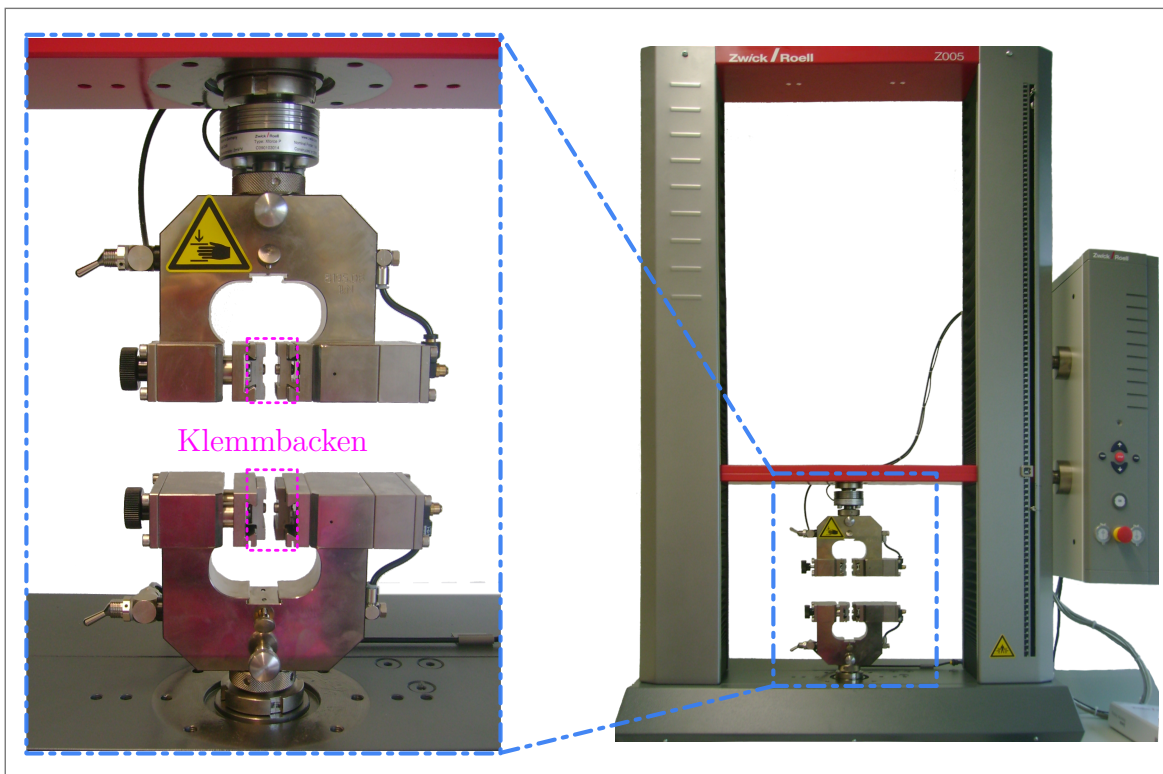


Abbildung 4.2: ProLine Tisch-Prüfmaschine Z005 der Firma Zwick zum Messen der elektrischen Eigenschaften des leitfähigen Silikonkautschuks

4.2.1 Fertigung der Sensor-Proben

Bei der uniaxialen Zugbelastung wird die Sensor-Probe zwischen den Klemmböden der Prüfmaschine eingespannt. Dies verursacht eine Druckkraft auf die Teile der Sensor-Probe, die von den Klemmböden gehalten werden. Demzufolge werden die Messergebnisse verfälscht. Um die ungewünschten Belastungen zu reduzieren, wurde eine Halterung aus PVC (nicht leitfähigem Kunststoff) gefertigt. Die Halterung wurde dann in die Klemmböden der Prüfmaschine eingespannt, wobei die Probe darin entlastet liegt. Um die Probe in der Halterung stabil zu halten, wurde die Sensor-Probe (aus elektrisch leitfähigem Silikonkautschuk) mit zusätzlichen Teilen aus dem nicht leitfähigen Silikonkautschuk versehen (siehe Abbildung 4.4(b)). Dadurch wird garantiert, dass die elektrischen Eigenschaften der Sensor-Probe durch das andere Material nicht beeinflusst werden.

Um das passende Verfahren für die Verbindung zwischen dem leitfähigen Silikonkautschuk und dem nicht leitfähigen Silikonkautschuk zu finden, wurden verschiedene Ver-

4.2 Untersuchung der Eigenschaften des elektrisch leitfähigen Silikonkautschuks in Abhängigkeit von der Zugbelastung

fahren untersucht. Die untersuchten Materialien sind der elektrisch leitfähige Silikonkautschuk (ELASTOSIL R 570/50 MH C1) [116] und der nicht leitfähige Silikonkautschuk (ELASTOSIL® R 420/70 MH C1) [117]. Bei der Auswahl dieser Materialien wurden die Shore-Härte und der Vernetzer betrachtet. Die Shore-Härte der für die Halterung verwendeten Teile sollte größer sein als die des sensiblen Teils, um mehr Steifigkeit und Stabilität in der Halterung zu gewährleisten. Außerdem wurden Materialien mit demselben Vernetzer ausgesucht. Diese Materialien sind leicht von Firma Wacker Chemie zu beschaffen. Für die Fertigung der Proben wurde eine Heiß-Press-Maschine verwendet. Die hier verwendete Probe soll aus diesen zwei Materialien bestehen. Die Probe hat im Längsschnitt die Abmessungen $60 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$. Das Teil aus dem leitfähigen Silikonkautschuk hat die Abmessung $60 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$.

Die untersuchten Verfahren zur Verbindung beider Materialien (siehe Abbildung 4.3) sind:

- Heißpressen des rohen leitfähigen Silikonkautschuks mit dem rohen, nicht leitfähigen Silikonkautschuk (Abbildung 4.3(a)),
- Heißpressen des vorgefertigten leitfähigen Silikonkautschuks mit dem vorgefertigten nicht leitfähigen Silikonkautschuk (Abbildung 4.3(b)),
- Heißpressen des rohen leitfähigen Silikonkautschuks mit dem vorgefertigten nicht leitfähigen Silikonkautschuk (Abbildung 4.3(c)),
- Heißpressen des vorgefertigten leitfähigen Silikonkautschuks mit dem rohen nicht leitfähigen Silikonkautschuk (Abbildung 4.3(d)).

Durch das erste Verfahren sind die Verbindungsflächen der beiden Materialien nicht flach (gerade), sondern die beiden Materialien fließen beim Heißpressen ineinander (siehe Abbildung 4.3(a)). Demgegenüber ergibt sich im zweiten Verfahren keine feste Verbindung bzw. Haftung zwischen den beiden Materialien, wie in der Abbildung 4.3(b) zu sehen ist. Um das zu überwinden, wurde im dritten Verfahren der nicht leitfähige Silikonkautschuk für das spätere Heißpressen vorgefertigt. Der leitfähige Silikonkautschuk ist dabei roh. Durch dieses Verfahren bilden die beiden Materialien bei der Verbindung annähernd eine gerade Fläche mit guter Haftung (siehe Abbildung 4.3(c)). Allerdings wird der nicht leitfähige Silikonkautschuk mit dem leitfähigen Silikonkautschuk geschmiert, und das kann die Messergebnisse wegen der nicht einheitlichen Querschnitte der Sensor-Proben beeinflussen. Im vierten Verfahren ist der nicht leitfähige Silikonkautschuk beim Heißpressen roh. Der leitfähige Silikonkautschuk wird für das Heißpressen vorgefertigt. Die Abbildung 4.3(d) zeigt, dass bei diesem Verfahren die beiden

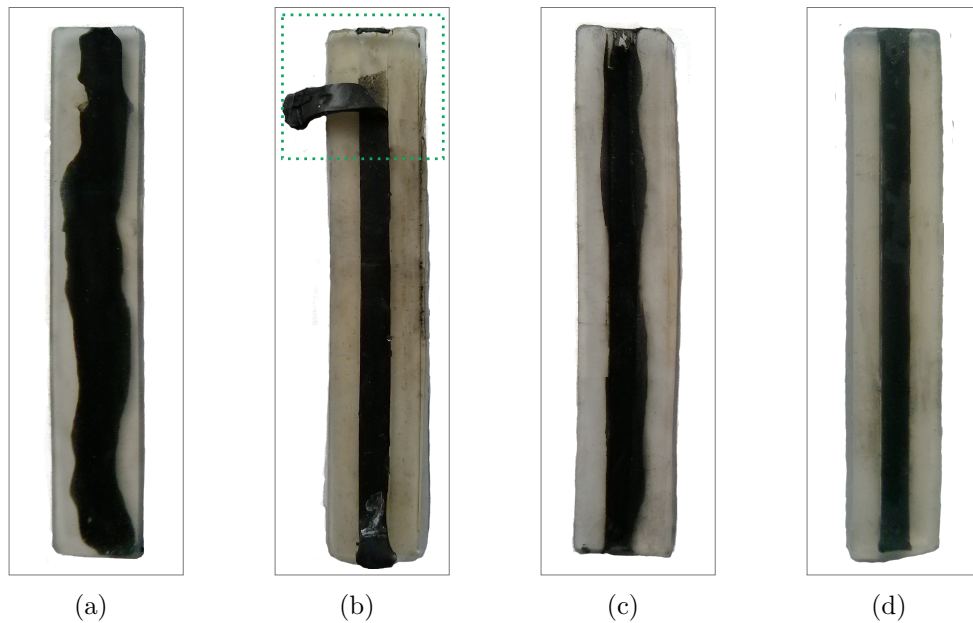


Abbildung 4.3: Fertigungsverfahren zur Verbindung beider Materialien; ELASTOSIL[®] R 570/50 MH C1 mit ELASTOSIL[®] R 420/70 MH C1

Materialien bei der Verbindung annähernd eine flache (gerade) Fläche mit einheitlichem Querschnitt der Sensor-Probe bilden. Außerdem ist die Haftung zwischen den beiden Materialien sehr gut. Deshalb wurde dieses Verfahren bei der Fertigung der Sensor-Proben für die Untersuchungen eingesetzt. Der Einfluss der Materialart des nicht leitfähigen Silikonkautschuks auf die Verbindung der Materialien wurde in dieser Arbeit nicht betrachtet, da der nicht leitfähige Silikonkautschuk nur als Hilfsmittel zur Benutzung der Halterung dient.

Der nächste Arbeitsschritt ist die Gestaltung der Sensor-Probe aus dem leitfähigen Silikonkautschuk mit den passenden elektrischen Kontakten, die für das Einspeisen des Stromes in den Sensor-Proben dienen. In der Literatur wurden dafür zahlreiche Verfahren verwendet. In [70] wurden für die Messungen an der Sensor-Probe unter Druck zwei Stahlplatten als Elektroden benutzt. Eine Platte ist eingespannt und die andere wird nach oben und unten bewegt. Die Fläche der Platte ist kleiner als die Fläche der Probe, um die Querschnittsfläche unveränderlich während der Kompression zu halten. Die Stahlplatten wurden in [55] nur als Elektroden und nicht als Druckstempel benutzt. In [118] wurden Messingelektroden mittels einer Silberpaste an jede Seite der Sensor-Probe geklebt. In [119] wurden für die elektrische Schaltung des Sensors zwei Edelstahl-Garne verwendet. Jedes Garn wird mit einer Seite des Sensors verbunden. Der Kontaktpunkt zwischen dem Sensor und dem Edelstahl-Garn wurde mit einem

4.2 Untersuchung der Eigenschaften des elektrisch leitfähigen Silikonkautschuks in Abhängigkeit von der Zugbelastung

kleinen Tropfen einer Lösung aus *Conductive Polymer Composites* (CPC-Lösung)²¹ bedeckt. Dadurch wird nach dem Trocknen ein guter elektrischer Kontakt gewährleistet. Ein anderes Verfahren wurde für die Befestigung der Elektroden an dem Sensorelement in [74] verwendet. Die Elektroden (Drähte) wurden in dem leitfähigen Silikonkautschuk des taktilen Sensors in der horizontalen und der vertikalen Richtung vernäht. Für den Drucksensor in [80] sind die Elektroden an den Polyimidfolien befestigt. Zwischen den Folien ist eine vulkanisierte Schicht aus dem leitfähigen Silikonkautschuk eingekapselt. Um eine bessere Verbindung zwischen den Elektroden und der Silikon-Schicht zu realisieren, wurde in [120] der Silikonkautschuk zwischen den beiden Polyimidfolien mit den Kupferelektroden vulkanisiert. Danach wurden die beiden Folien zusammengeklebt. Allerdings besteht bei diesen vorgestellten Verfahren keine Verbindung bzw. keine sichere Verbindung zwischen den Elektroden und der Sensor-Probe unter der mechanischen Belastungen. Der Grund ist die geringe Haftung zwischen den Elektroden und dem Silikonkautschuk. In [78] wurde ein leitfähiges Polymer für den Sensor sowie für die elektrische Verbindung benutzt. Dies garantiert eine sichere Verbindung an den Sensorpositionen, an denen hohe Belastungen vorliegen. Jedoch entsteht dabei ein Einfluss auf die Widerstandswerte. In [81] wurden Silberelektroden für einen taktilen Sensor verwendet. Die Elektroden und die leitende Schaltung wurden durch Siebdrucktechnologie auf zwei flexiblen Substraten realisiert. Auf die Schnittstellen zwischen den Elektroden und den Sensorelementen wurde eine Schicht aus Kohlenstoff aufgetragen, um eine chemische Reaktion zwischen dem leitfähigen Silikonkautschuk und den Silberelektroden zu verhindern. Erst nach dem Aufbau der gesamten Struktur wird der Silikonkautschuk vulkanisiert. Es ist aber hier mit hohen Kosten zu rechnen. Zwei andere Möglichkeiten sind in [75, 121] zu sehen. In [75] dient ein dehnbares leitfähiges Gewebe als Elektrode für einen Drucksensor in einer nachgiebigen Roboterhaut. Der leitfähige Silikonkautschuk wird zwischen zwei leitfähigen Geweben vulkanisiert, um eine gute Verbindung zu bilden. Im Vergleich dazu wird in [121] ein Kupfernetz, das mit einem Kupferdraht verlötet ist, als Elektroden verwendet.

Um eine bessere Verbindung zwischen dem Silikonkautschuk und den Elektroden zu gewährleisten und gleichzeitig kostengünstige Materialien bzw. Verfahren zu verwenden, wird in dieser Arbeit ein Kupfernetz eingesetzt. Der Silikonkautschuk kann beim Heißpressen durch das Kupfernetz im Vergleich zu dem leitfähigen Gewebe gut fließen. Dadurch kann eine gute Verbindung mit dem Kupfernetz nach der Vernetzung des Silikonkautschuks entstehen [121]. Die Außenseite von dem Kupfernetz wird mit dem

²¹Diese CPC-Lösung besteht aus Evopren, Ruß-Nanopartikel und Chloroform.

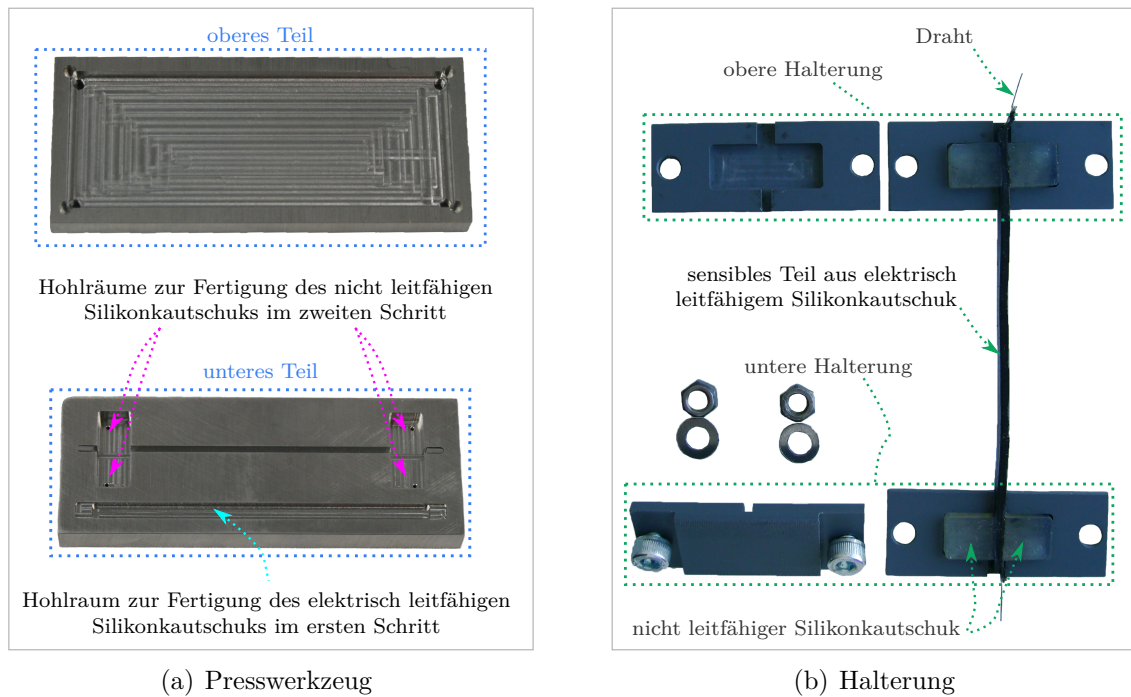
Lötzinn gefüllt, um später das Verlöten mit dem Draht und folglich eine Verbindung zum Messgerät zu ermöglichen.

In der vorliegenden Arbeit wird zur Herstellung der Sensor-Proben ein Presswerkzeug hergestellt (siehe Abbildung 4.4(a)). Der Fertigungsprozess der Sensor-Probe besteht aus zwei Schritten. Im ersten Schritt wird das sensible Teil aus dem elektrisch leitfähigen Silikonkautschuk mit den elektrischen Kontakten (Kupfernetz) an beiden Enden des Teils hergestellt. Das aus leitfähigem Silikonkautschuk vorgefertigte Teil hat die Abmessungen $100 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$. Dieses Teil wird im zweiten Schritt mit dem rohen, nicht leitfähigen Silikonkautschuk (ELASTOSIL® R 420/70 C1) gepresst, wobei noch vier Teile aus dem nicht leitfähigen Silikonkautschuk entstehen. Jedes Teil hat die Abmessungen $10 \text{ mm} \times 11,5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ (siehe Abbildung A.1 im Anhang A). Die Abmessungen des sensiblen Teils sind nach DIN 53504 2009 mit kleinen Änderungen, welche die Benutzung der Halterung ermöglichen, gefertigt. Es ist zu beachten, dass die Sensor-Probe nach der Fertigung zusammengezogen wurde. Demzufolge weist das Teil, welches gezogen werden muss, eine Länge von circa 75 mm auf. Die Abbildungen 4.4(b) und 4.4(c) zeigen die Halterung mit einer Sensor-Probe und den Versuchsaufbau, wo die Halterung mit der Sensor-Probe zwischen den Klemmbanken der Prüfmaschine eingespannt ist. Dieser Versuchsaufbau wurde bei der Untersuchungen der verschiedenen Sensor-Proben unter Zugbelastung eingesetzt. Zwei Materialien als elektrisch leitfähiger Silikonkautschuk (ELASTOSIL® R 570/50 MH C1) und (POWERSIL 466 A/B VP) wurden in dieser Arbeit für die Fertigung der Sensor-Proben verwendet und schließlich untersucht. Bei der Auswahl dieser Materialien wurde sich für die kleinste Shore-Härte bei dem HTV-Kautschuk und bei dem LSR entschieden, um mehr Elastizität in den erzielten Systemen zu erreichen.

4.2.2 Experimentelle Untersuchungen zum ELASTOSIL R 570/50 MH C1

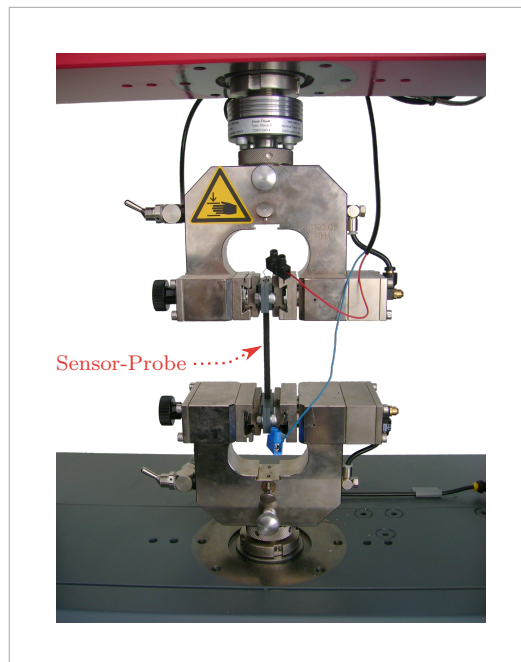
Das Material ELASTOSIL R 570/50 MH C1 ist ein elektrisch leitfähiger Silikonkautschuk für die Pressvulkanisation von der Firma Wacker Chemie. Der Silikonkautschuk hat eine Shore-Härte A von 50 und einen spezifischen Durchgangswiderstand von $5,2 \Omega \text{ cm}$ [116]. Verschiedene Versuche für mehrere Sensor-Proben mit unterschiedlichen Parametern wurden durchgeführt. Das Ziel war das elektrische Verhalten des Materials unter Zugbelastung zu ermitteln.

4.2 Untersuchung der Eigenschaften des elektrisch leitfähigen Silikonkautschuks in Abhängigkeit von der Zugbelastung



(a) Presswerkzeug

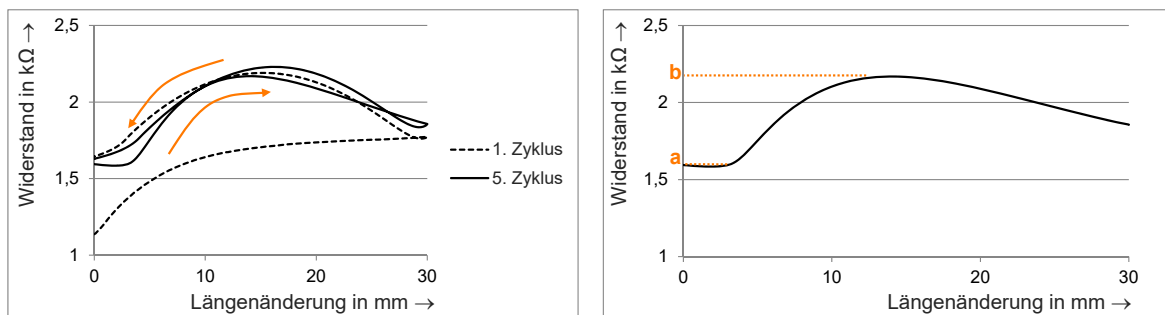
(b) Halterung



(c) Versuchsaufbau

Abbildung 4.4: Fertigung der Sensor-Proben für die Untersuchung der Eigenschaften des elektrisch leitfähigen Silikonkautschuks in Abhängigkeit von der Zugbelastung, und der Versuchsaufbau

Die Widerstandsänderung der Sensor-Probe unter der Zugbelastung ist in der Abbildung 4.5 veranschaulicht. Der durchgeführte Versuch besteht aus 5 Zyklen; Belastung bis zu einer Längenänderung von 30 mm (Dehnung von 38,46%) und Entlastung bis zu 0 mm. Während des Versuchs war die Prüfgeschwindigkeit 10 mm/min. Die aus dem Versuch entstehenden Kurven waren nach dem ersten Zyklus qualitativ ähnlich, deswegen wurden nur der erste und der letzte Zyklus dargestellt. Der Unterschied zwischen dem ersten Zyklus und den anderen verlangt eine Vorkonditionierung der Sensor-Probe vor dem Einsatz als Sensorelement.



(a) Zu sehen ist der Unterschied zwischen den Widerstandskurven bei dem ersten und dem fünften Zyklus

(b) Die Hinkurve des fünften Zyklus und der Arbeitsbereich für die Sensor-Probe

Abbildung 4.5: Verhalten der Sensor-Probe aus ELASTOSIL R 570/50 MH C1 unter Zugbelastung. Der Versuch besteht aus fünf Zyklen; Belastung bis zu einer Längenänderung von 30 mm und Entlastung bis zu 0 mm, Prüfgeschwindigkeiten von 10 mm/min

Es ist aus der Abbildung zu sehen, dass sich das Material ELASTOSIL R 570/50 MH C1 mit der steigenden Zugbelastung durch das Ansteigen des elektrischen Widerstands bis zu einem bestimmten Punkt auszeichnet. Nach diesem Punkt sinkt der Widerstand wieder ab. Das gleiche Verhalten ist bei der Entlastung zu sehen. Die Ergebnisse dieses Versuchs wurden durch fünf Sensor-Proben bestätigt.

Um das Material ELASTOSIL R 570/50 MH C1 als Sensorelement zu benutzen, ist es notwendig, einerseits den Arbeitsbereich [a, b] (siehe Abbildung 4.5(b)) zu bestimmen, in welchem der Widerstand mit der Dehnung stetig steigt. Damit trifft jeder gemessene Widerstandswert nur einen Dehnungswert. Andererseits muss das Sensorelement beim Einsatz mit einer Vorkraft belastet werden, da eine Restverformung nach mehreren Zyklen entsteht. Dadurch wird das Signal der Widerstandsänderung nur unter der Belastung erfasst. Die Vorkraft wurde für jeden Versuch experimentell festgelegt, indem keine Restverformung nach der Belastung beobachtet wurde.

4.2 Untersuchung der Eigenschaften des elektrisch leitfähigen Silikonkautschuks in Abhängigkeit von der Zugbelastung

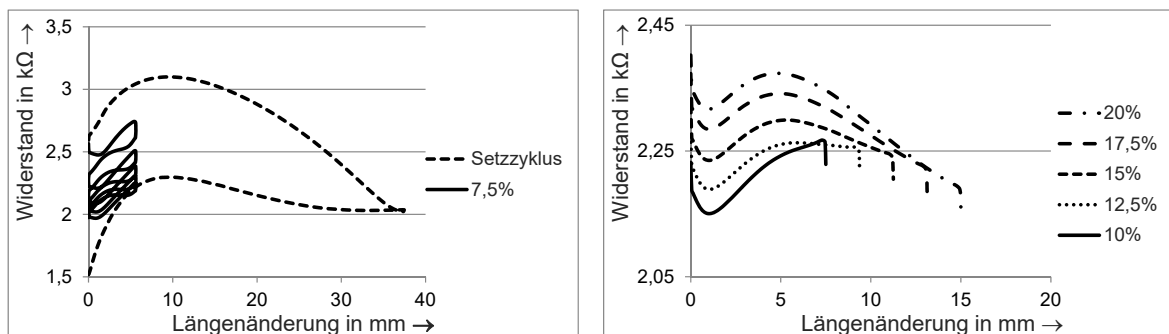
Bestimmung des Arbeitsbereiches [a, b] für die Widerstandsänderung gegenüber der Dehnung anhand verschiedener Zugbelastungen bei zwei unterschiedlichen Geschwindigkeiten

Sechs unterschiedliche Versuche wurden für fünf Sensor-Proben durchgeführt. Der erste Versuch besteht aus:

- Setzzyklus: Vorkraft von 0,5 N, Belastung bis zur Dehnung von 50%, Entlastung bis zu 0%,
- 5 Zyklen (Messphase): Belastung bis zur Dehnung von 7,5%, Entlastung bis zu 0%, Prüfgeschwindigkeit von 300 mm/min.

Die anderen fünf Versuche bestehen nur aus der oben genannten Messphase, die jedoch mit unterschiedlicher Dehnung 10%, 12,5%, 15%, 17,5%, 20% durchgeführt wurde.

Die Abbildung 4.6 zeigt als Beispiel die Ergebnisse der Versuche für eine Sensor-Probe. Eine kleine Restverformung wurde nach dem Setzzyklus beobachtet. Um diese Restverformung zu überwinden, soll die Vorkraft ebenso nach dem Setzzyklus angewendet werden. Außerdem sinkt der Widerstand am Anfang jedes Messzyklus. Dieses Verhalten kann von der Orientierung der Moleküle und damit die Verteilung der leitfähigen Partikel nach der Entlastung abhängen. Deswegen ist eine Wartezeit nach jedem Zyklus notwendig, damit sich die Moleküle neu ausrichten zu können. Bei der weiteren Untersuchungen (zyklischen Versuchen) wurde eine Wartezeit von 10 s eingehalten.



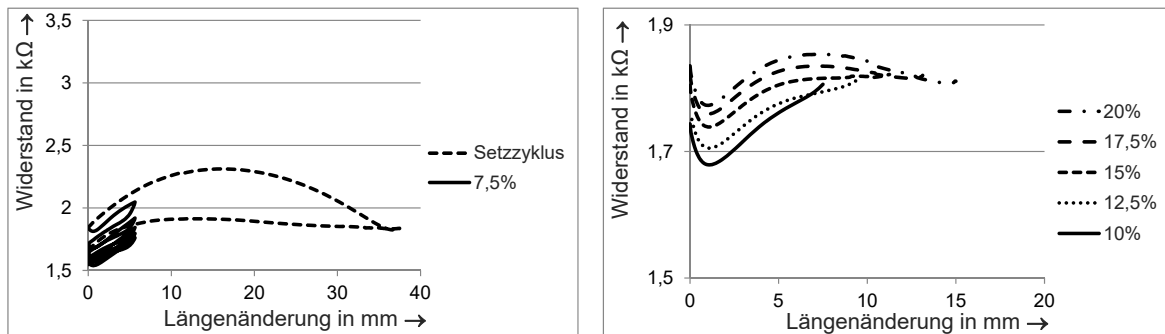
(a) Erster Versuch: Setzzyklus besteht aus Vorkraft 0,5 N, Belastung bis zur Dehnung von 50% und Entlastung bis zu 0%, hierzu ist eine Messphase aus 5 Zyklen, Belastung bis zur Dehnung von 7,5%, Entlastung bis zu 0% veranschaulicht

(b) Die letzten Hinkurven der fünf Versuche bei verschiedenen Zugbelastungen

Abbildung 4.6: Sechs unterschiedliche Versuche für eine Sensor-Probe aus ELASTOSIL R 570/50 MH C1 als Beispiel zur Bestimmung des Arbeitsbereiches mit einer Prüfgeschwindigkeit von 300 mm/min

Da der Arbeitsbereich [a, b] in jedem Versuch und sogar in jedem Zyklus unterschiedlich ist, wurde er bei dem letzten Zyklus von jedem Versuch und für jede Sensor-Probe bestimmt. Schließlich wurde der kleinste Bereich ermittelt. Der ermittelte Bereich entspricht einer Längenänderung von 1,05 mm bis 4,6 mm (Dehnung von 1,4% bis 6,13%).

Die gleichen Versuche wurden mit einer geringeren Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min durchgeführt. Die Abbildung 4.7 zeigt als Beispiel die Ergebnisse der Versuche für eine Sensor-Probe. Der Arbeitsbereich [a, b] wurde genauso wie für die andere Prüfgeschwindigkeit bestimmt. Der ermittelte Arbeitsbereich liegt zwischen einer Längenänderung von 1,12 mm und 5,855 mm (Dehnung von 1,49% bis 7,8%). Demzufolge ist der Arbeitsbereich [a, b] größer bei der geringeren Prüfgeschwindigkeit.



(a) Erster Versuch: Setzzyklus besteht aus Vorkraft 0,5 N, Belastung bis zur Dehnung von 50% und Entlastung bis zu 0%, hierzu ist eine Messphase aus 5 Zyklen, Belastung bis zur Dehnung von 7,5%, Entlastung bis zu 0% veranschaulicht

(b) Die letzten Hinkurven der fünf Versuche bei verschiedenen Zugbelastungen

Abbildung 4.7: Sechs unterschiedliche Versuche für eine Sensor-Probe aus ELASTOSIL R 570/50 MH C1 als Beispiel zur Bestimmung des Arbeitsbereiches mit einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min

Bestimmung der Zyklenzahl für die Vorkonditionierung der Sensor-Probe

Für die Bestimmung der Zyklenzahl wurden zyklische Versuche für fünf Sensor-Proben bei zwei unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchgeführt.

Der erste zyklische Versuch wurde mit einer Prüfgeschwindigkeit von 300 mm/min durchgeführt und besteht aus:

- Setzzyklus: Vorkraft von 0,5 N, Belastung bis zur Dehnung von 50%, Entlastung bis zu 0%,

4.2 Untersuchung der Eigenschaften des elektrisch leitfähigen Silikonkautschuks in Abhängigkeit von der Zugbelastung

- Messphase: zyklische Belastung mit
 - Vorkraft von 0,5 N,
 - 100 Zyklen, jeder Zyklus besteht aus Belastung bis zur Dehnung von 6,13% (Längenänderung von 4,6 mm), Entlastung bis zu 0%, Wartezeit von 10 s.

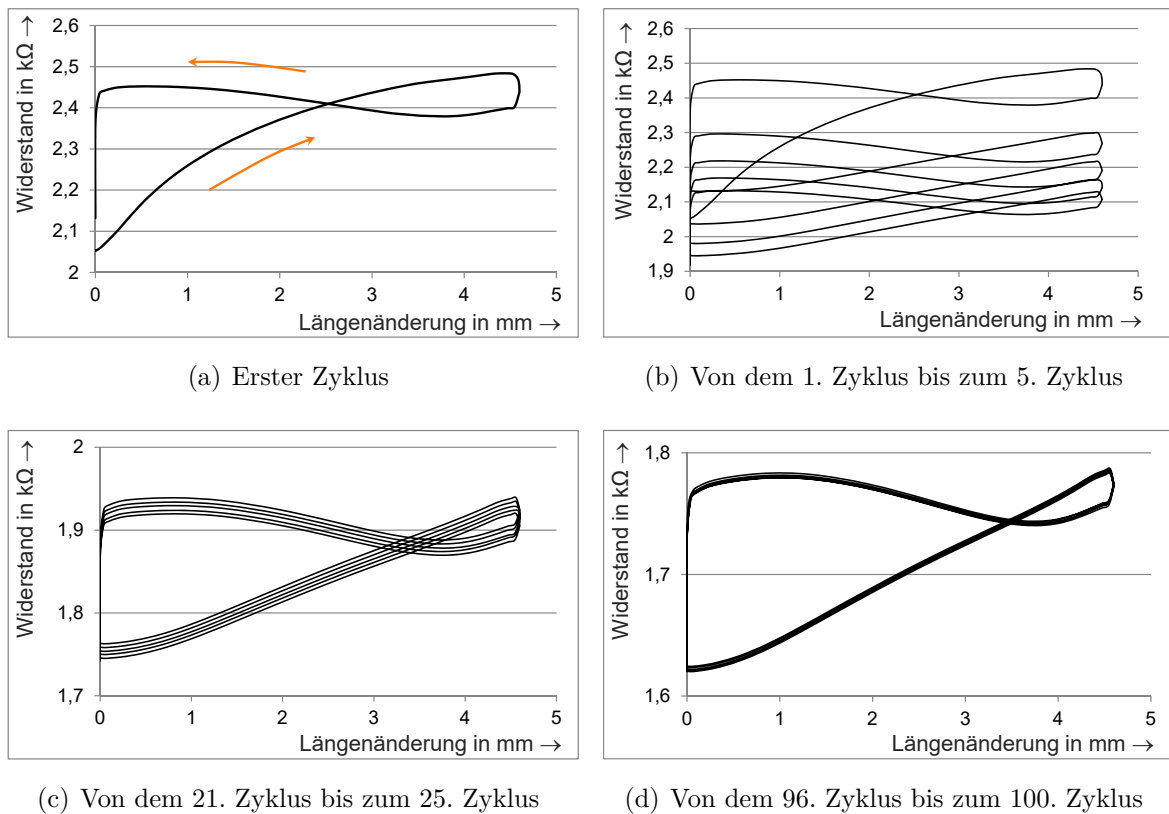
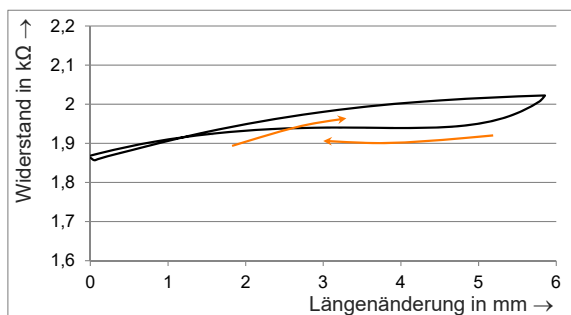


Abbildung 4.8: Uniaxialer zyklischer Versuch aus 100 Zyklen zur Bestimmung der Zyklenzahl für die Vorkonditionierung der Sensor-Probe aus ELASTOSIL R 570/50 MH C1; Belastung bis zu einer Längenänderung von 4,6 mm, Entlastung bis zu 0 mm und Wartezeit von 10 s, Prüfgeschwindigkeit von 300 mm/min

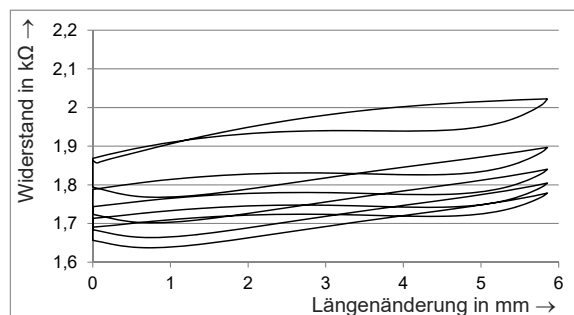
Die Abbildung 4.8 zeigt die Ergebnisse dieses Versuchs für eine Sensor-Probe. Es ist zu beobachten, dass der Widerstandswert mit der steigenden Zyklenzahl immer kleiner wird. Außerdem liegen die Kurven ab dem zwanzigsten Zyklus dichter beieinander. Dieses Verhalten setzt sich mit der steigenden Zyklenzahl weiter fort. Ab dem 96. Zyklus sind die Kurven fast identisch. Allerdings ist der Arbeitsbereich [a, b] bei dieser Geschwindigkeit kaum erkennbar, was einem sinnvollen praktischen Einsatz widerspricht. Die Versuche an den anderen Sensor-Proben haben Ergebnisse mit den gleichen Schlussfolgerungen geliefert.

Der zweite zyklische Versuch wurde mit einer geringeren Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min durchgeführt und besteht aus:

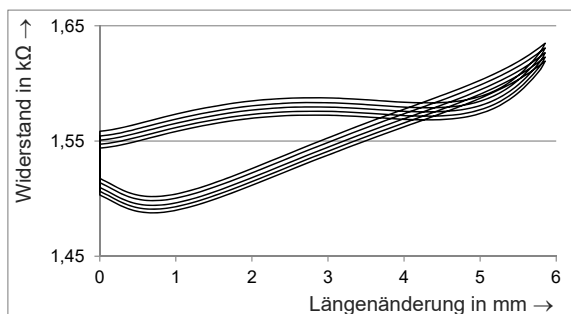
- Setzzyklus: Vorkraft von 0,5 N, Belastung bis zur Dehnung von 50%, Entlastung bis zu 0%,
- Messphase: zyklische Belastung mit
 - Vorkraft von 0,5 N,
 - 100 Zyklen, jeder Zyklus besteht aus Belastung bis zur Dehnung von 7,8% (Längenänderung von 5,855 mm), Entlastung bis zu 0%, Wartezeit von 10 s.



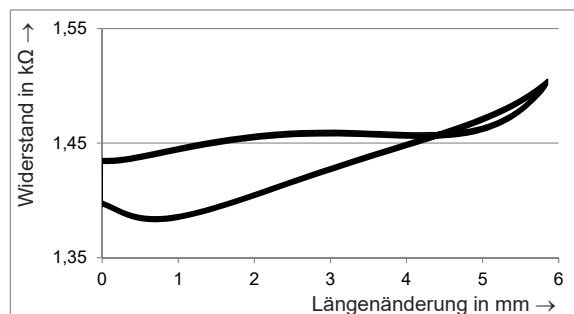
(a) Erster Zyklus



(b) Von dem 1. Zyklus bis zum 5. Zyklus



(c) Von dem 21. Zyklus bis zum 25. Zyklus



(d) Von dem 96. Zyklus bis zum 100. Zyklus

Abbildung 4.9: Uniaxialer zyklischer Versuch aus 100 Zyklen zur Bestimmung der Zyklenzahl für die Vorkonditionierung der Sensor-Probe aus ELASTOSIL R 570/50 MH C1; Belastung bis zu einer Längenänderung von 5,855 mm, Entlastung bis zu 0 mm und Wartezeit von 10 s, Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min

Die Ergebnisse dieses Versuchs sind in der Abbildung 4.9 für eine Sensor-Probe zu sehen. Die Sensor-Proben weisen ein ähnliches Verhalten wie bei hoher Geschwindigkeit bezüglich des Widerstandswerts und der Tendenz der Kurven auf. Das heißt, mit

4.2 Untersuchung der Eigenschaften des elektrisch leitfähigen Silikonkautschuks in Abhängigkeit von der Zugbelastung

steigender Zyklenzahl wird der Widerstandswert immer kleiner und die Kurven liegen dichter beieinander. Demgegenüber ist der Arbeitsbereich [a, b] hier im Gegensatz zu den Versuchen mit hoher Geschwindigkeit deutlicher zu erkennen. Weiterhin ist die Hysterese kleiner als bei höher Geschwindigkeit. Allerdings ist die Restverformung größer und somit wird eine größere Vorkraft benötigt. Diese Ergebnisse konnten durch die Versuche an den anderen Sensor-Proben bestätigt werden.

Relaxation der Sensor-Probe aus ELASTOSIL R 570/50 MH C1

Um das Relaxationsverhalten der Sensor-Probe zu ermitteln, wurde der Widerstand der Sensor-Probe bei konstanter Dehnung gemessen. Der Versuch wurde folgendermaßen durchgeführt:

- ein Setzzyklus mit Vorkraft von 0,5 N, Dehnung von 50%, und Entlastung bis zu 0%,
- eine Messphase, die aus einer Längenänderung von 5,855 mm (Dehnung von 7,8%) besteht, danach wird eine Haltezeit von 15 Stunden eingehalten und schließlich bis zu 0% entlastet. Die Prüfgeschwindigkeit betrug dabei 10 mm/min.

Abbildung 4.10 zeigt, dass der elektrische Widerstand bei konstanter Dehnung für 15 Stunden abnimmt. Die Abnahme beträgt 187,7% von der gesamten Widerstandsänderung während der Dehnung bis zu 7,8% (Längenänderung von 5,855 mm). Dieses Verhalten spiegelt die Spannungsrelaxation der viskoelastischen Materialien (Polymeren) wider. Die Umlagerungen der langen und verknäuelten Kettenmoleküle bewirken die Spannungsrelaxation der viskoelastischen Materialien [38]. Dies wiederum könnte einen Einfluss auf den elektrischen Widerstand haben.

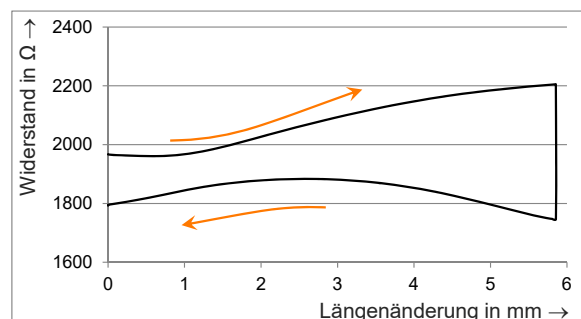
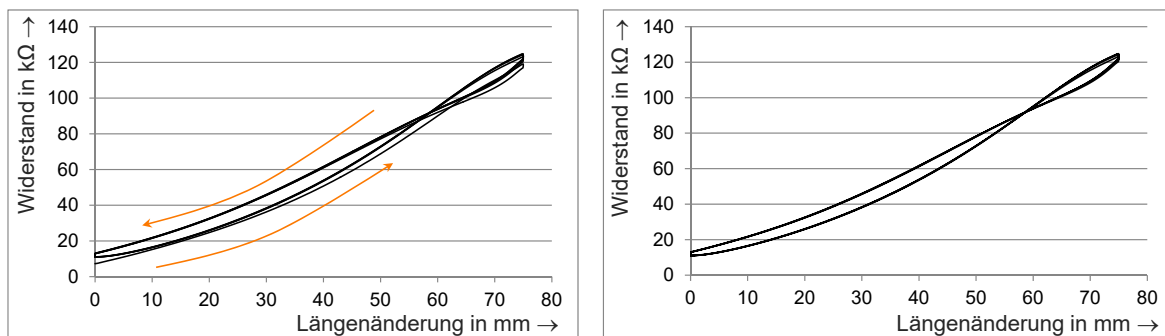


Abbildung 4.10: Widerstandsänderung bei der Relaxation der Sensor-Probe aus ELASTOSIL R 570/50 MH C1 für 15 Stunden

4.2.3 Experimentelle Untersuchungen zum POWERSIL® 466 A/B VP

Das Material POWERSIL® 466 A/B VP ist ein elektrisch leitfähiger Flüssigkautschuk der Firma Wacker Chemie. Dieser Silikonkautschuk hat eine Shore-Härte A von 37 und einen spezifischen Durchgangswiderstand (getempert) $< 50 \Omega \text{ cm}$ [122]. Um die Untersuchung des Verhaltens von POWERSIL® 466 A/B VP unter Zugbelastung zu ermitteln, wurden uniaxiale Zugversuche mit zwei unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten wie in Abschnitt 4.2.2 durchgeführt. Ebenso wurden fünf Sensor-Proben untersucht. Als erstes wurde der Arbeitsbereich [a, b] und die Zyklenzahl für die Vorkonditionierung unter Zugbelastung mit einer Prüfgeschwindigkeit von 300 mm/min gesucht. Der Versuch wurde folgendermaßen durchgeführt:

- eine Vorkraft von 1,3 N,
- eine Messphase besteht aus fünf Messzyklen, jeder Zyklus hat eine Dehnung von 100%, eine Entlastung bis zu 0% und anschließend eine Wartezeit von 10 s.



(a) Von dem 1. Zyklus bis zum 5. Zyklus

(b) Von dem 2. Zyklus bis zum 5. Zyklus

Abbildung 4.11: Uniaxialer Zugversuch bestehend aus fünf Zyklen bei einer Prüfgeschwindigkeit von 300 mm/min für eine Sensor-Probe aus POWERSIL® 466 A/B VP; Belastung bis zu einer Längenänderung von 75 mm, Entlastung bis zu 0 mm und Wartezeit von 10 s

Die Ergebnisse dieses Versuchs sind in Abbildung 4.11 dargestellt. Es ist zu sehen, dass der Widerstand bis zu einer Dehnung der Sensor-Probe von 100% stetig steigt. Außerdem liegen die Belastungs- und Entlastungskurve dicht beieinander bzw. die Hysterese ist klein. Weiterhin ähneln sich die Kurven ab dem zweiten Zyklus sehr stark. Insgesamt zeigt dieses Material bessere sensorische Eigenschaften als das in Abschnitt 4.2.2 untersuchte Material. Des Weiteren wird bei den Messungen festgestellt,

4.2 Untersuchung der Eigenschaften des elektrisch leitfähigen Silikonkautschuks in Abhängigkeit von der Zugbelastung

dass der Widerstand nach mehreren Zyklen immer kleiner wird (in der Abbildung nicht zu erkennen). Die Restverformung wird nach mehreren Zyklen größer. Dies muss vermieden werden, um ein Signal der Widerstandsänderung unter der Belastung zu erhalten. Dementsprechend sollten die Sensorelemente in einem System vorgespannt eingebaut werden.

In der Abbildung 4.12 sind die Ergebnisse des gleichen Versuchs aber mit einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass die Widerstandsänderung und die Hysterese kleiner sind als bei der höheren Prüfgeschwindigkeit. Die Versuche an den anderen Sensor-Proben haben Ergebnisse mit den gleichen Schlussfolgerungen geliefert.

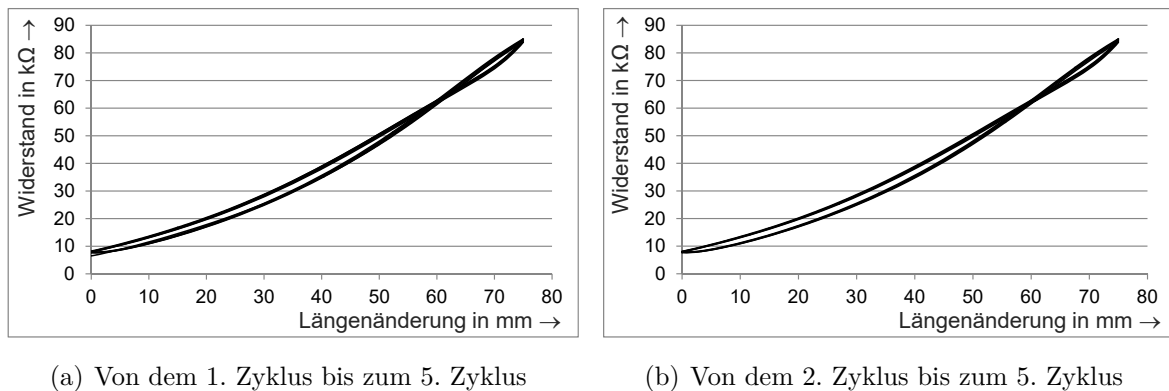


Abbildung 4.12: Uniaxialer Zugversuch bestehend aus fünf Zyklen bei einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min für eine Sensor-Probe aus POWERSIL® 466 A/B VP; Belastung bis zu einer Längenänderung von 75 mm, Entlastung bis zu 0 mm und Wartezeit von 10 s

Relaxation der Sensor-Probe aus POWERSIL® 466 A/B VP

Das Verhalten des leitfähigen Silikonkautschuks POWERSIL® 466 A/B VP wurde bei konstanter Dehnung untersucht. Der Versuch wurde folgendermaßen durchgeführt:

- ein Setzzyklus mit Vorkraft von 1,3 N, Dehnung von 100%, und Entlastung bis zu 0%,
- eine Messphase, die aus einer Längenänderung von 75 mm (Dehnung von 100%) besteht, danach wird die Haltezeit von 15 Stunden eingehalten und schließlich bis zu 0% entlastet. Die Prüfgeschwindigkeit betrug dabei 10 mm/min.

Wie es der Abbildung 4.13 zu entnehmen ist, nimmt der elektrische Widerstand bei konstanter Dehnung ab. Eine Haltezeit von 15 Stunden nach der Belastung ruft eine Widerstandsänderung (ΔR) von circa 15,87 k Ω (Verringerung) hervor. Das beträgt 22,02% der Widerstandsänderung während der Dehnung bis 100% (Längenänderung von 75 mm).

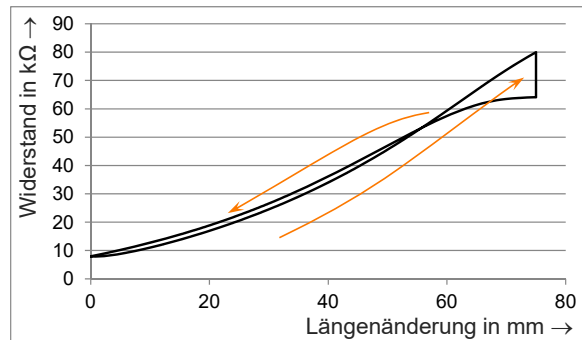


Abbildung 4.13: Widerstandsänderung bei der Relaxation der Sensor-Probe aus POWERSIL® 466 A/B VP für 15 Stunden

4.3 Untersuchung der Eigenschaften des elektrisch leitfähigen Silikonkautschuks in Abhängigkeit von der Druckbelastung

4.3.1 Fertigung der Sensor-Proben

Die Sensor-Probe hat die Form eines Quaders mit den Abmessungen von 9 mm Dicke, 9 mm Breite und 15 mm Länge. Die Auswahl der Form der Sensor-Probe ist entsprechend dem Anwendungszweck erfolgt (siehe Abschnitt 5.3). Für die Fertigung der Sensor-Probe wurde ein Presswerkzeug konstruiert und hergestellt (siehe Abbildung 4.14(a)). Es ist zu beachten, dass die Sensor-Probe sich nach der Fertigung zusammengezogen hat. Demzufolge weist die untersuchte Sensor-Probe eine Dicke von circa 8,8 mm auf. Um die elektrischen Eigenschaften des leitfähigen Silikonkautschuks mithilfe der ProLine Tisch-Prüfmaschine Z005 zu messen, wurde ein Druckstempel gefertigt und an der Maschine zwischen den Klemmbacken befestigt, wie es in der Abbildung 4.14(b) zu sehen ist.

4.3 Untersuchung der Eigenschaften des elektrisch leitfähigen Silikonkautschuks in Abhängigkeit von der Druckbelastung

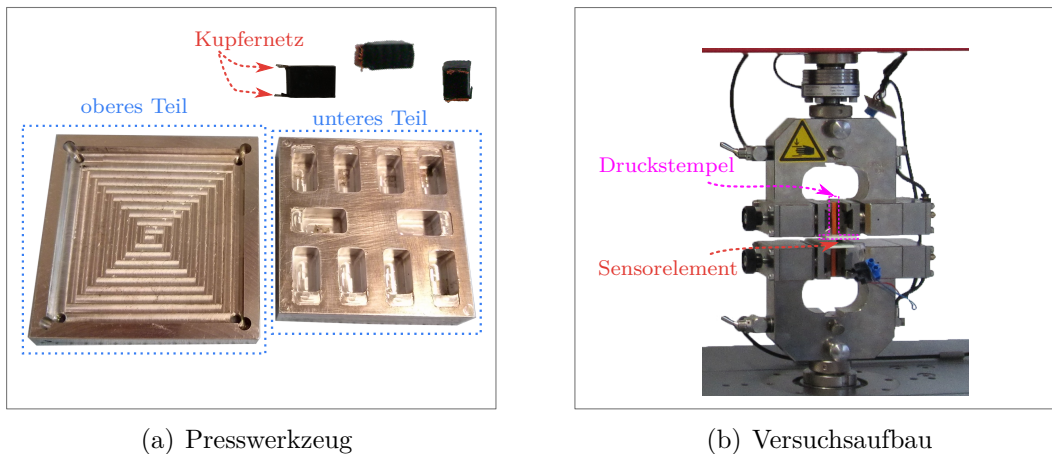


Abbildung 4.14: Sensor-Proben für die Untersuchung der Eigenschaften des elektrisch leitfähigen Silikonkautschuks in Abhängigkeit von der Druckbelastung mit dem Presswerkzeug und der Versuchsaufbau

Für die Erfassung der Widerstandsänderung der Sensor-Proben werden Kupfernetze an der unteren und oberen Seite jeder Sensor-Probe angebracht. Dabei wird das Kupfernetz von einer Seite mit dem Lötzinn gefüllt und später mit dem Draht verlötet.

4.3.2 Experimentelle Untersuchungen zum ELASTOSIL R 570/50 MH C1

Der folgende Versuch zeigt das Verhalten des ELASTOSIL R 570/50 MH C1 unter der uniaxialen Druckbelastung für fünf unterschiedliche Sensor-Proben und besteht aus:

- einer Vorkraft von 10 N,
- einer Messphase aus 25 Zyklen mit einer Prüfgeschwindigkeit von 300 mm/min. Jeder Zyklus besteht aus Belastung bis zur Dehnung von 50% (Längenänderung von 4,4 mm), Entlastung bis zu 0%, Wartezeit von 10 s.

Die Abbildung 4.15 zeigt die Ergebnisse dieses Versuchs für eine Sensor-Probe. Es ist zu sehen, dass der elektrische Widerstand von ELASTOSIL R 570/50 MH C1 unter der Druckbelastung abnimmt. Ein Unterschied in dem Ausgangssignal zwischen dem ersten Zyklus und den anderen Zyklen wurde beobachtet. Zudem wird der Widerstandswert mit der steigenden Zyklenzahl immer kleiner. Außerdem liegen die Kurven ab dem zwanzigsten Zyklus dichter beieinander. Dieses Verhalten setzt sich mit der steigenden Zyklenzahl weiter fort. Im Gegensatz zu dem dargestellten Messergebnis der ausgewählten Sensor-Probe, haben die weiteren Untersuchungen ergeben, dass nicht alle

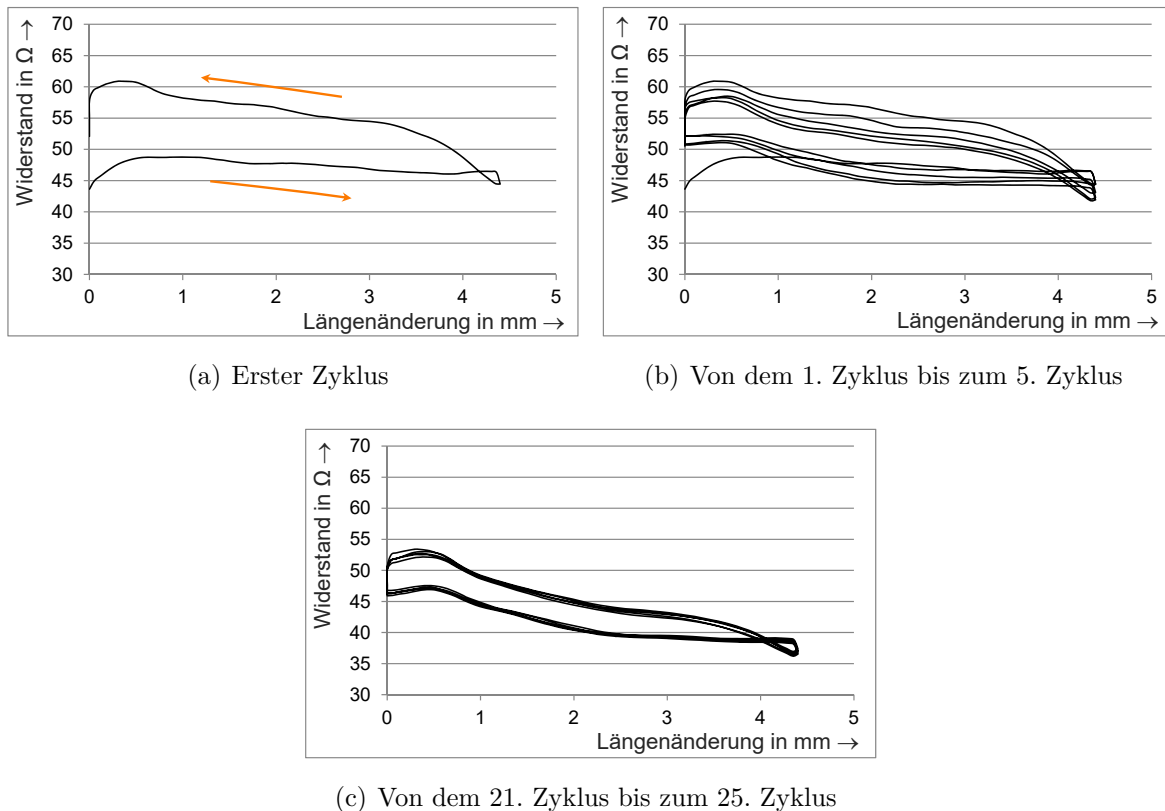
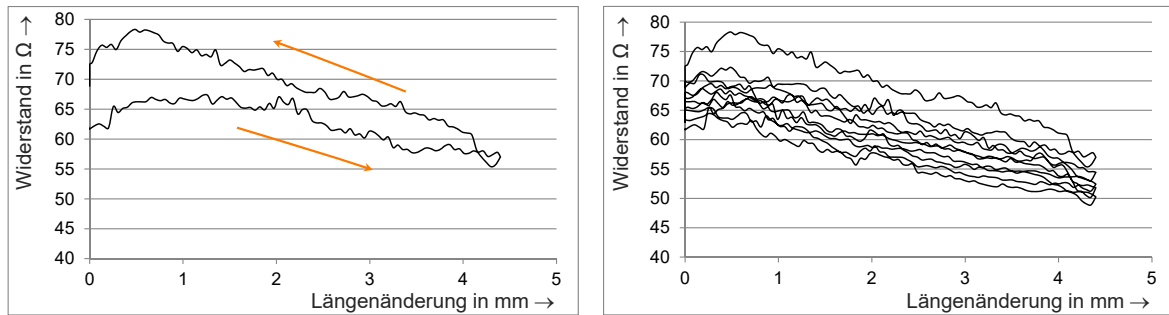


Abbildung 4.15: Uniaxialer Druckversuch für eine Sensor-Probe aus ELASTOSIL R 570/50 MH C1. Der Versuch besteht aus 25 Zyklen; Belastung bis zu einer Längenänderung von 4,4 mm, Entlastung bis zu 0 mm und Wartezeit von 10 s, Prüfgeschwindigkeit von 300 mm/min

Sensor-Proben bei einer Dehnung bis 50% immer einen abnehmenden Widerstand zeigen. Außerdem wird die Sensor-Probe nach mehreren Zyklen dünner. Dementsprechend ist eine Vorkraft größer als 10 N nötig, um diese Restverformung zu überwinden.

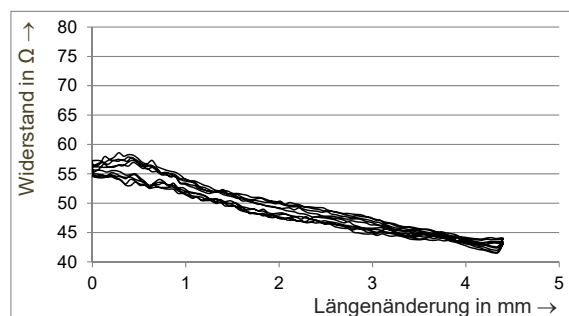
Der gleiche Versuch wurde mit einer geringeren Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min an den Sensor-Proben durchgeführt. In der Abbildung 4.16 sind die Ergebnisse des Versuchs für eine Sensor-Probe dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass die Hysterese kleiner ist als bei der höheren Prüfgeschwindigkeit. Die Widerstandsänderung ist in dem dargestellten Beispiel größer als bei der höheren Prüfgeschwindigkeit. Bei einigen durchgeführten Versuchen war die Widerstandsänderung fast gleich oder kleiner als bei der höheren Prüfgeschwindigkeit, deswegen konnte kein eindeutiger Einfluss von der Geschwindigkeit auf die Widerstandsänderung beobachtet werden. Es ist allerdings festzuhalten, dass das Oszillieren des Widerstandsverlaufs größer bei der geringeren Prüfgeschwindigkeit ist.

4.3 Untersuchung der Eigenschaften des elektrisch leitfähigen Silikonkautschuks in Abhängigkeit von der Druckbelastung



(a) Erster Zyklus

(b) Von dem 1. Zyklus bis zum 5. Zyklus



(c) Von dem 21. Zyklus bis zum 25. Zyklus

Abbildung 4.16: Uniaxialer Druckversuch für eine Sensor-Probe aus ELASTOSIL R 570/50 MH C1. Der Versuch besteht aus 25 Zyklen; Belastung bis zu einer Längenänderung von 4,4 mm, Entlastung bis zu 0 mm und Wartezeit von 10 s, Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min

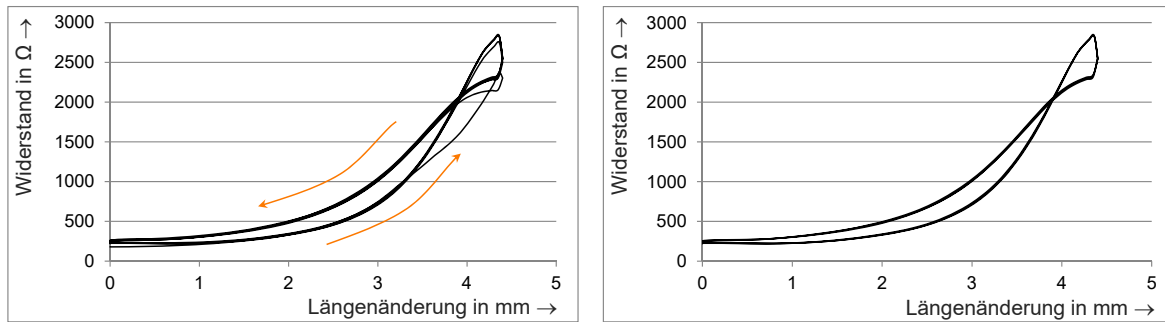
4.3.3 Experimentelle Untersuchungen zum POWERSIL® 466 A/B VP

Das elektrische Verhalten des POWERSIL® 466 A/B VP unter der Druckbelastung ist im folgenden Versuch dargelegt. Der Versuch besteht aus:

- einer Vorkraft von 10 N,
- einer Messphase aus 25 Zyklen mit einer Prüfgeschwindigkeit von 300 mm/min. Jeder Zyklus besteht aus Belastung bis zur Dehnung von 50% (Längenänderung von 4,4 mm), Entlastung bis zu 0%, Wartezeit von 10 s.

Die Abbildung 4.17 zeigt, dass der elektrische Widerstand der Sensor-Probe aus POWERSIL® 466 A/B VP unter der Druckbelastung im Gegensatz zu dem ELASTOSIL R 570/50 MH C1 zunimmt. Weiterhin liegen die Kurven ab dem dritten Zyklus dicht

beieinander. Bei den Messungen konnte festgestellt werden, dass der Widerstand nach mehreren Zyklen kleiner wird. Jedoch ist diese Verringerung sehr klein (in der Abbildung 4.17 nicht zu erkennen). Demzufolge ist dieses Material für Sensorelemente, bei denen die qualitative Auswertung ihrer Signale in der Anwendungen von Interesse sind, geeignet.

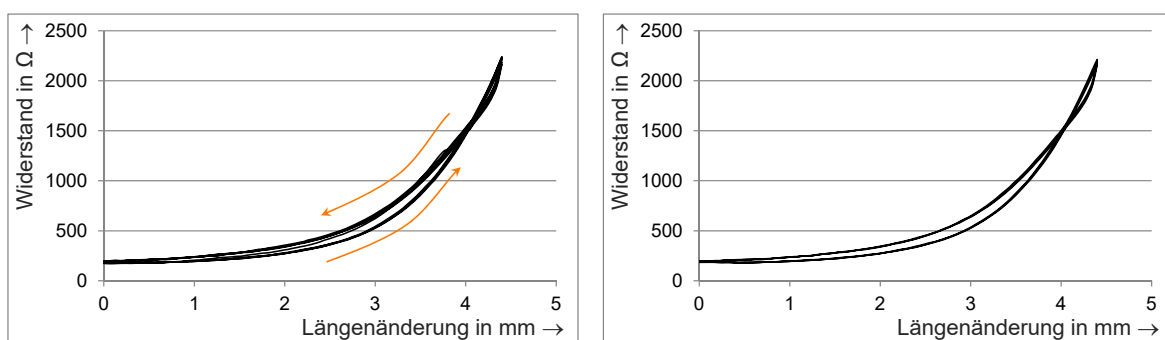


(a) Von dem 1. Zyklus bis zum 5. Zyklus

(b) Von dem 3. Zyklus bis zum 5. Zyklus

Abbildung 4.17: Uniaxialer Druckversuch für eine Sensor-Probe aus POWERSIL® 466 A/B VP. Der Versuch besteht aus 25 Zyklen; Belastung bis zu einer Längenänderung von 4,4 mm, Entlastung bis zu 0 mm und Wartezeit von 10 s, Prüfgeschwindigkeit von 300 mm/min

In der Abbildung 4.18 sind die Ergebnisse des gleichen Versuchs aber mit einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass die Widerstandsänderung und die Hysterese kleiner sind als bei der höheren Prüfgeschwindigkeit. Das



(a) Von dem 1. Zyklus bis zum 5. Zyklus

(b) Von dem 3. Zyklus bis zum 5. Zyklus

Abbildung 4.18: Uniaxialer Druckversuch für eine Sensor-Probe aus POWERSIL® 466 A/B VP. Der Versuch besteht aus 25 Zyklen; Belastung bis zu einer Längenänderung von 4,4 mm, Entlastung bis zu 0 mm und Wartezeit von 10 s, Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min

Verhalten des POWERSIL® 466 A/B VP ist bei fünf geprüften Sensor-Proben qualitativ gleich. Insgesamt ist das Verhalten des POWERSIL® 466 A/B VP als Sensorelement besser als das Verhalten des ELASTOSIL R 570/50 MH C1.

4.4 Zusammenfassung der Messergebnisse

In der Tabelle 4.1 ist die Zusammenfassung der Messergebnisse aller durchgeführten Untersuchungen dargestellt. In der ersten Spalte werden die untersuchten Charakteristiken genannt. In den zweiten und dritten Spalten sind die Ergebnisse der Untersuchung (schwarz gekennzeichnet), die daraus bestehenden Regeln (rot gekennzeichnet) und das endgültige Ergebnis (fett gekennzeichnet) für die Anwendung als Sensorelemente aus POWERSIL® 466 A/B VP bzw. ELASTOSIL R 570/50 MH C1 dargelegt.

Tabelle 4.1: Überblick über die Untersuchungen mit ihren Ergebnissen (schwarz), die daraus entstehenden Regeln (rot) und das endgültige Ergebnis (fettgedruckt) für die Anwendung als Sensorelemente aus POWERSIL® 466 A/B VP bzw. ELASTOSIL R 570/50 MH C1

	POWERSIL® 466 A/B VP	ELASTOSIL R 570/50 MH C1
Vorkonditionierung	Betätigung von mind. 3 mal sind dafür notwendig	Betätigung von mind. 20 mal sind dafür notwendig
	für die Anwendungen ist sie erwünscht	für die Anwendungen ist sie erwünscht
Verhalten der Widerstandsände- rung bei der Zugbelastung	ansteigend mit großem Arbeitsbereich	ansteigend und dann absteigend mit kleinem Arbeitsbereich
	für Anwendungen unter großer Belastung	für Anwendungen unter kleiner Belastung
Verhalten der Widerstandsände- rung bei der Entlastung nach der Zugbelastung	absteigend mit großem Arbeitsbereich	ansteigend und dann absteigend mit kleinem Arbeitsbereich
	für Anwendungen unter großer Belastung	für Anwendungen unter kleiner Belastung

Tabelle 4.1: Überblick über die Untersuchungen mit ihren Ergebnissen (schwarz), die daraus entstehenden Regeln (rot) und das endgültige Ergebnis (fettgedruckt) für die Anwendung als Sensorelemente aus POWERSIL® 466 A/B VP bzw. ELASTOSIL R 570/50 MH C1

	POWERSIL® 466 A/B VP	ELASTOSIL R 570/50 MH C1
Verhalten der Widerstandsänderung bei der Druckbelastung	ansteigend mit großem Arbeitsbereich	absteigend mit eventuell großem Arbeitsbereich
	für Anwendungen unter großer Belastung	für Anwendungen unter eventuell großer Belastung
Verhalten der Widerstandsänderung bei der Entlastung nach der Druckbelastung	absteigend mit großem Arbeitsbereich	ansteigend mit eventuell großem Arbeitsbereich
	für Anwendungen unter großer Belastung	für Anwendungen unter eventuell großer Belastung
Einfluss der Prüfgeschwindigkeit bei Zugbelastung	je kleiner die Prüfgeschwindigkeit ist, desto geringer sind die Widerstandsänderung und die Hysterese	je kleiner die Prüfgeschwindigkeit ist, desto größer ist der Arbeitsbereich und geringer sind die Widerstandsänderung und die Hysterese
	geeignet für verschiedene Prüfgeschwindigkeiten	geeignet für niedrigen Prüfgeschwindigkeiten
Einfluss der Prüfgeschwindigkeit bei Druckbelastung	je kleiner die Prüfgeschwindigkeit ist, desto geringer sind die Widerstandsänderung und die Hysterese	je kleiner die Prüfgeschwindigkeit ist, desto geringer ist die Hysterese und größer ist das Oszillieren des Widerstandsverlaufs, keine deutliche Einwirkung auf die Widerstandsänderung
	geeignet für verschiedene Prüfgeschwindigkeiten	geeignet für verschiedene Prüfgeschwindigkeiten

Tabelle 4.1: Überblick über die Untersuchungen mit ihren Ergebnissen (schwarz), die daraus entstehenden Regeln (rot) und das endgültige Ergebnis (fettgedruckt) für die Anwendung als Sensorelemente aus POWERSIL® 466 A/B VP bzw. ELASTOSIL R 570/50 MH C1

	POWERSIL® 466 A/B VP	ELASTOSIL R 570/50 MH C1
Restverformung	nach der Belastung entsteht eine Restverformung ⇒ eine Vorkraft ist notwendig	nach der Belastung entsteht eine Restverformung ⇒ eine Vorkraft ist notwendig
	Einbau von vorgedehnten Sensorelementen	Einbau von vorgedehnten Sensorelementen
Relaxation	Abnahme des elektrischen Widerstands, circa 22,02% bei 15 Stunden	Abnahme des elektrischen Widerstands, circa 187,7% bei 15 Stunden
	für die Anwendungen ist sie nicht erwünscht	für die Anwendungen ist sie nicht erwünscht
	für die Anwendungen, bei denen qualitative Auswertung der Signale von Interesse ist	für die Anwendungen, bei denen qualitative Auswertung der Signale von Interesse ist

5 Anwendung des elektrisch leitfähigen Silikonkautschuks

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, werden in der vorliegenden Arbeit Systeme, die für den Bereich der Robotik von Interesse sind, betrachtet. Die ausgesuchten Systeme sind taktile Struktur, Greifer und Gelenkverbindung. Die taktile Struktur wird als erstes in diesem Kapitel beschrieben.

5.1 Taktile Struktur

Taktile Sensorsysteme können beim Kontakt mit den Gegenständen in ihrer Umgebung Kontaktparameter erkennen. In diesem Abschnitt wird der Einsatz des elektrisch leitfähigen Silikonkautschuks in einer taktilen Struktur zur Ermittlung der Kontaktstelle unter der Druckbelastung untersucht. Die hier untersuchte taktile Struktur beruht auf dem Prinzip der elektrischen Widerstandsänderung unter der Druckbelastung.

5.1.1 Aufbau der taktilen Struktur

Die Abbildung 5.1 zeigt die taktile Struktur, die bei den experimentellen Messungen eingesetzt wird. Die taktile Struktur besteht aus einer Glasscheibe, die als Auflagefläche verwendet wird. Auf der Glasscheibe liegen vier Sensorelemente bedeckt von elastischer, nicht elektrisch leitfähiger Silikonfolie. Die Sensorelemente wurden mit Hilfe von einem speziellen Presswerkzeug in zwei Formen zylindrisch und kubisch aus dem leitfähigen Silikonkautschuk (ELASTOSIL R 570/50 MH C1) gefertigt (siehe Abbildung 5.2). Die zylindrischen Sensorelemente haben einen Durchmesser von 6 mm und eine Höhe von 6 mm. Für die kubischen Sensorelemente beträgt die Kantenlänge 6 mm. Auf den oberen und unteren Oberflächen der Sensorelemente werden Kupfernetze während der Vulkanisation des Silikonkautschuks angebracht. An den Kupfernetzen werden später Drähte verlötet, um die Widerstandsänderung der Sensorelemente durch die Messgeräte zu erfassen.

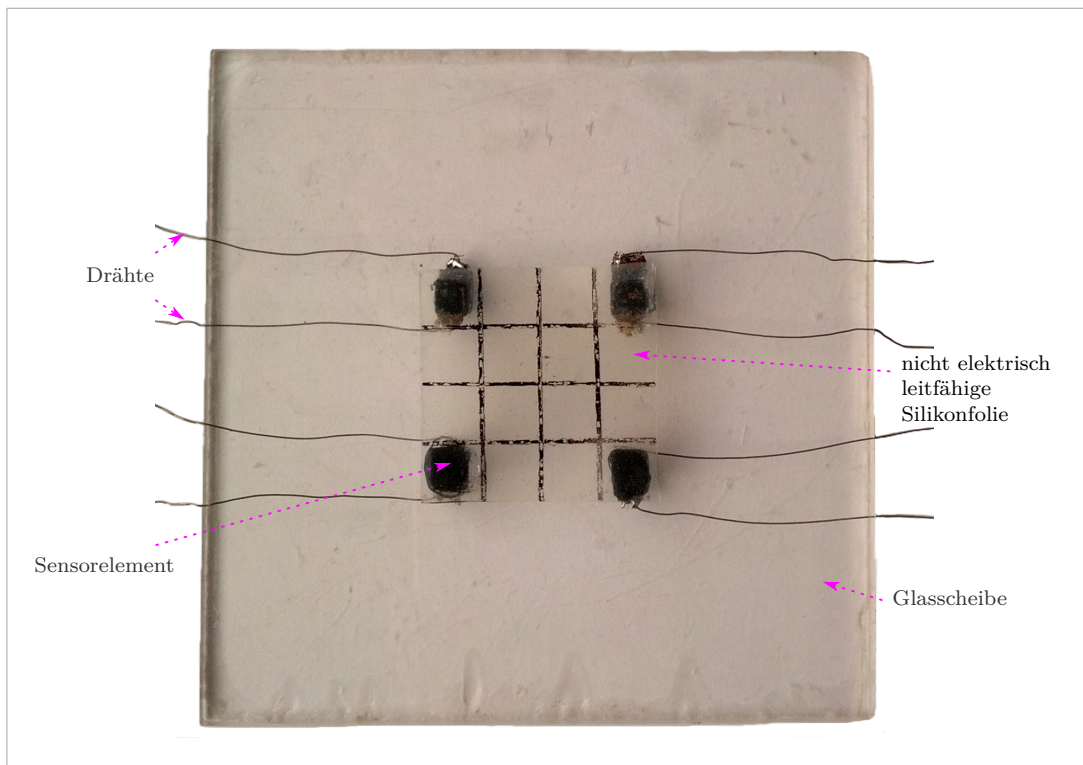
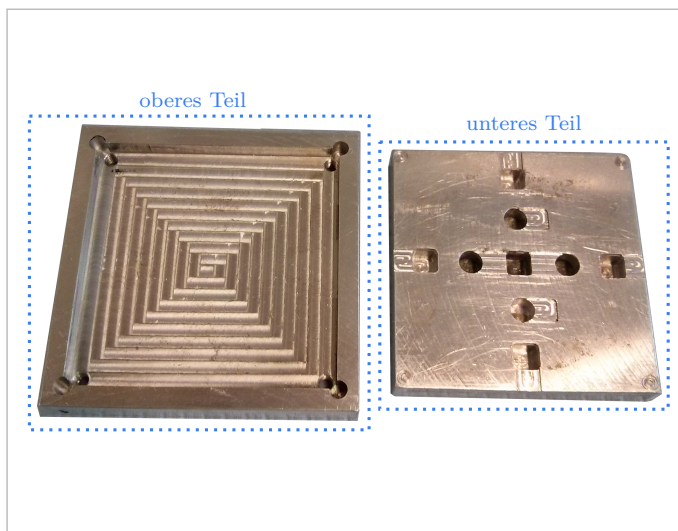


Abbildung 5.1: Die bei den experimentellen Messungen eingesetzte taktile Struktur



(a) Presswerkzeug



(b) Zylindrische und kubische Sensorelemente

Abbildung 5.2: Presswerkzeug und die Sensorelemente für die taktile Struktur

5.1.2 Überprüfung der Funktionalität

Die elektrischen Eigenschaften der Sensorelemente wurden experimentell mit Hilfe der Zwick ProLine-Material-Prüfmaschine Z005 untersucht. Bei den Untersuchungen konnte kein deutlicher Unterschied der Widerstandsänderungen zwischen den zylindrischen und den kubischen Sensorelementen unter Druckbelastungen beobachtet werden, da der leitfähige Silikonkautschuk keine reproduzierbaren Messergebnisse liefert. Die dafür durchgeführten Untersuchungen wurden hier nicht gezeigt, da sie keine neuen Erkenntnisse im Vergleich zu den Erläuterungen im Kapitel 4 bringen. Die zylindrischen und die kubischen Sensorelemente unterscheiden sich bei ihren Anfangswiderständen, wobei der Anfangswiderstand des zylindrischen Sensorelements größer ist als der Anfangswiderstand des kubischen Sensorelements. Dies ist auf die unterschiedlichen Querschnitte des Sensorelements zurückzuführen (siehe Gleichung 4.1).

Die Aufgabe der Sensorelemente in der taktilen Struktur ist die Bestimmung der Position der externen Kraft, die auf die elektrisch nicht leitfähige Silikonfolie wirkt. Um diese Funktion in einer einfachen Art und Weise zu überprüfen, wurde eine externe Kraft auf bestimmten Stellen der nicht leitfähigen Silikonfolie bzw. indirekt auf dem Sensorelement aufgebracht. Die einwirkende Kraft wurde für eine bestimmte Zeit gehalten, bevor sie entfernt wurde. Dieser Test wurde für jede bestimmte Kontaktstelle mehrmals wiederholt. Die gewonnenen Messsignale der vier Sensorelemente wurden mit Hilfe von einem dafür aufgebauten Spannungsteiler, der Multifunktions-Datenerfassungskarte (NI PCI-6221) und dem Programmiersystem *Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench* (LabVIEW) erfasst und ausgewertet.

Abbildung 5.3 zeigt die Widerstandsänderung gegenüber der Zeit bei der Einwirkung einer externen Kraft auf ein Sensorelement. In der Abbildung kann zwischen drei Phasen der Aktivierungsphase (a), der Belastungsphase (b) und der Entlastungsphase (c) unterschieden werden. Die Aktivierungsphase (a) repräsentiert das Verhalten des Sensorelements im Verlauf der ersten Betätigung. In der Belastungsphase (b) nimmt der elektrische Widerstand ab. Der Grund dafür ist die Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit unter Belastung wegen der neuen Verteilung der elektrisch leitfähigen Partikel. Demgegenüber nimmt der elektrische Widerstand in der Entlastungsphase (c) dramatisch zu, da die elektrisch leitfähigen Partikel wieder weit voneinander verteilt sind.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen der taktilen Struktur wurde die elastische Silikonfolie an unterschiedlichen Positionen eingedrückt. Das Ziel der Untersuchungen war die Position der Druckstelle je nach den Sensorsignalen zu ermitteln. Dafür wurde

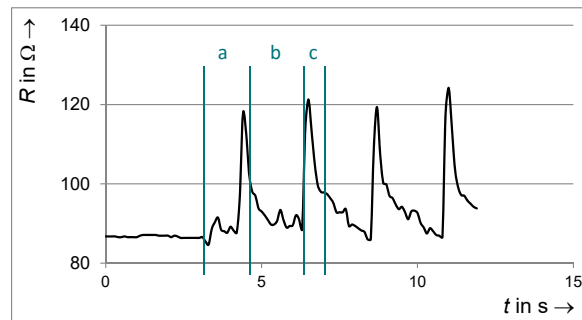


Abbildung 5.3: Elektrische Widerstandsänderung über der Zeit (t) bei einer äußeren Belastung, die auf ein Sensorelement einwirkt. Abschnitt a: Aktivierungsphase. Abschnitt b: Belastungsphase. Abschnitt c: Entlastungsphase

die gesamte Fläche von 40×40 mm der nicht leitfähigen Silikonfolie in 16 gleichgroße Teilflächen (10×10 mm) unterteilt (siehe Abbildung 5.4). Außerdem wurden die Sensorelemente von eins bis vier nummeriert, um zwischen ihren Signalen einfacher zu unterscheiden. Weiterhin werden die Sensorsignale für direktes Vergleichen normiert dargestellt.

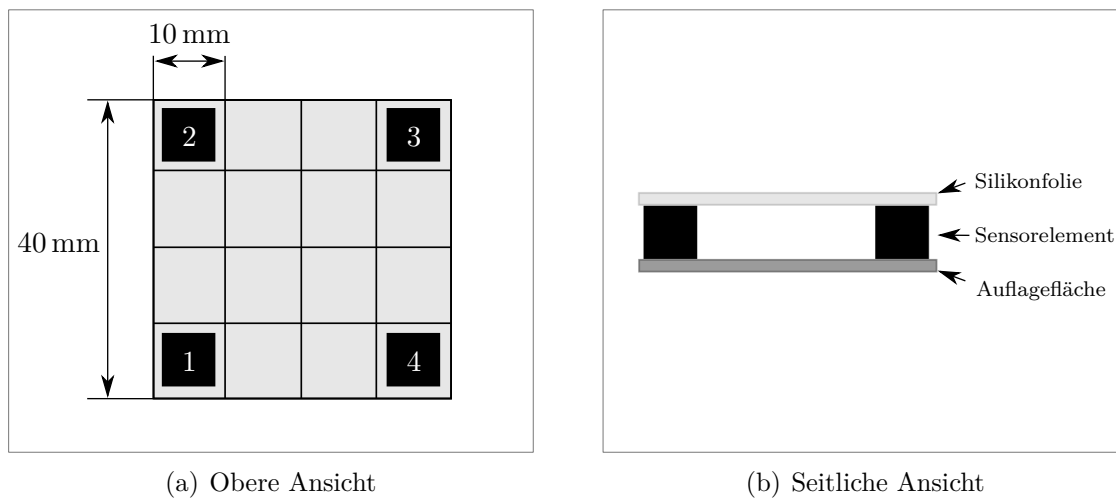


Abbildung 5.4: Schematische Darstellung der taktilen Struktur

Beim ersten Test wird das erste Sensorelement (siehe Abbildung 5.5(a)) mehrere Male eingedrückt. Die erfassten Signale der Sensorelemente sind in der Abbildung 5.5(b) zu sehen. Es ist ersichtlich, dass eine Widerstandsänderung nur im Signal des ersten Sensorelements erkennbar ist. Die Signalverläufe der anderen Sensorelemente sind nahezu konstant.

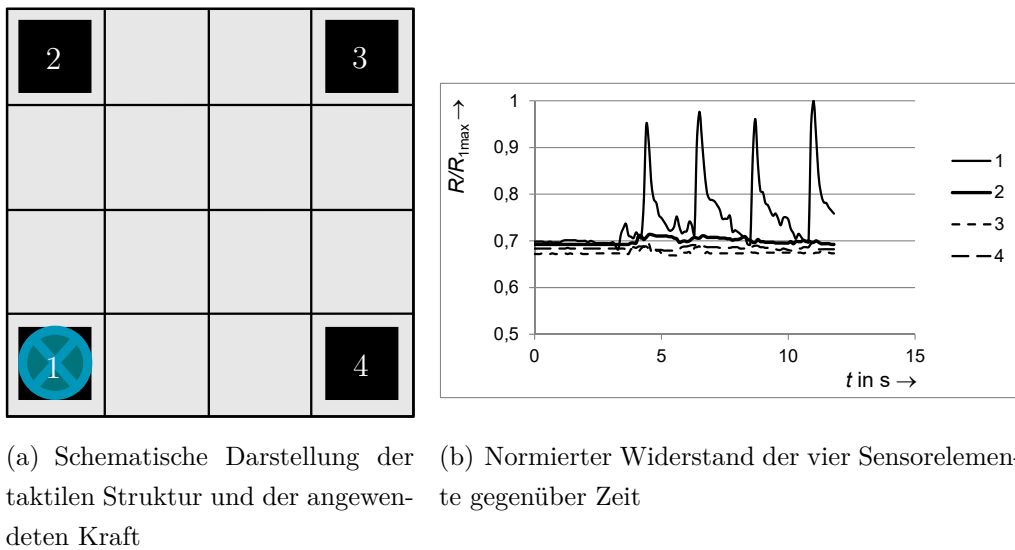


Abbildung 5.5: Elektrische Widerstandsänderung bei einer äußeren Belastung, die auf ein Sensorelement der taktilen Struktur einwirkt

Beim zweiten Test wird die Stelle zwischen den ersten und zweiten Sensorelementen (siehe Abbildung 5.6(a)) mehrere Male eingedrückt. Demzufolge verändert sich der Widerstand des ersten und zweiten Sensorelements. Demgegenüber bleiben die Signalverläufe des dritten und vierten Sensorelements nahezu konstant (siehe Abbildung 5.6(b)).

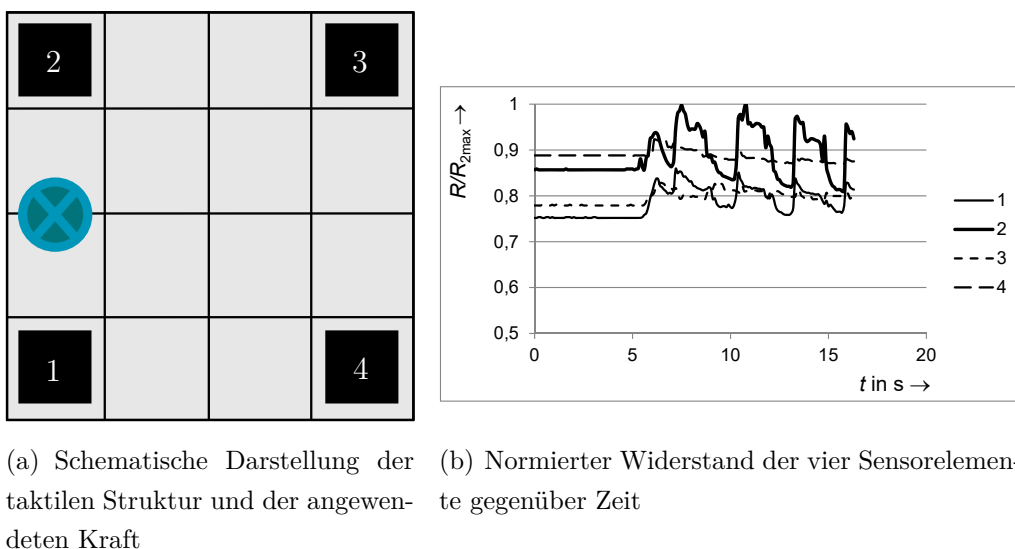
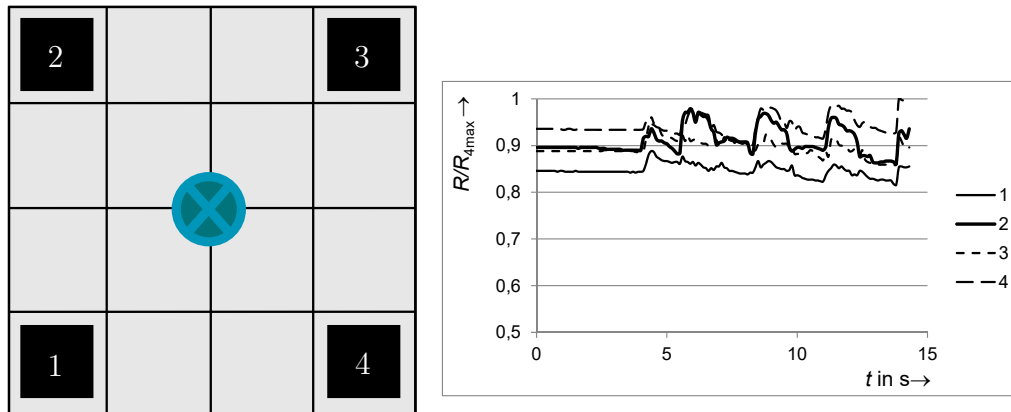


Abbildung 5.6: Elektrische Widerstandsänderung bei einer äußeren Belastung, die zwischen zwei Sensorelementen der taktilen Struktur einwirkt

Beim dritten Test wird die Stelle in der Mitte der taktilen Struktur (siehe Abbildung 5.7(a)) mehrere Male eingedrückt. In diesem Fall ist die Widerstandsänderung in den Signalen aller vier Sensorelemente zu sehen, wie in der Abbildung 5.7(b) dargestellt ist.



(a) Schematische Darstellung der taktilen Struktur und der angewendeten Kraft (b) Normierter Widerstand der vier Sensorelemente gegenüber Zeit

Abbildung 5.7: Elektrische Widerstandsänderung bei einer äußeren Belastung, die in der Mitte der taktilen Struktur einwirkt

Die dargelegten Tests zeigen, dass die Druckstelle durch die Auswertung der Sensorsignale erkannt werden kann. Die Widerstandsänderung spiegelt die Position der Druckstelle wider. Das heißt, je größer die Widerstandsänderung ist, desto näher ist die Position der Druckstelle an dem entsprechenden Sensorelement bzw. den Sensorelementen. Die dargestellten Ergebnisse heben den wichtigsten Vorteil der taktilen Struktur hervor, indem das Potenzial des Materials als Sensorelement in den Anwendungen, die keine quantitative Auswertung fordern, gezeigt wird. Die weiteren Vorteile liegen in der Verwendung von kostengünstigen Materialien, die ebenfalls einfach anzuwenden sind. Außerdem sind die Sensorelemente sowie die taktile Struktur gut miniaturisierbar.

Als Nachteile sind zu nennen, dass die Kontaktierung des leitfähigen Silikonkautschuks Einfluss auf die Nachgiebigkeit der Struktur hat, was durch die Nutzung von Streifen aus leitfähigem Silikonkautschuk als Drähte vermieden werden kann. Die Streifen werden außerhalb des Messfelds mit dem Kupfernetz verbunden und folglich wird das Kupfernetz mit den Drähten verlötet. Dieser Vorgang hat einen Einfluss auf die Messergebnisse. Dieser Einfluss kann in den Anwendungen, die nur eine qualitative Auswertung verlangen, vernachlässigt werden.

5.2 Nachgiebiger Greifer mit inhärenter Sensorik

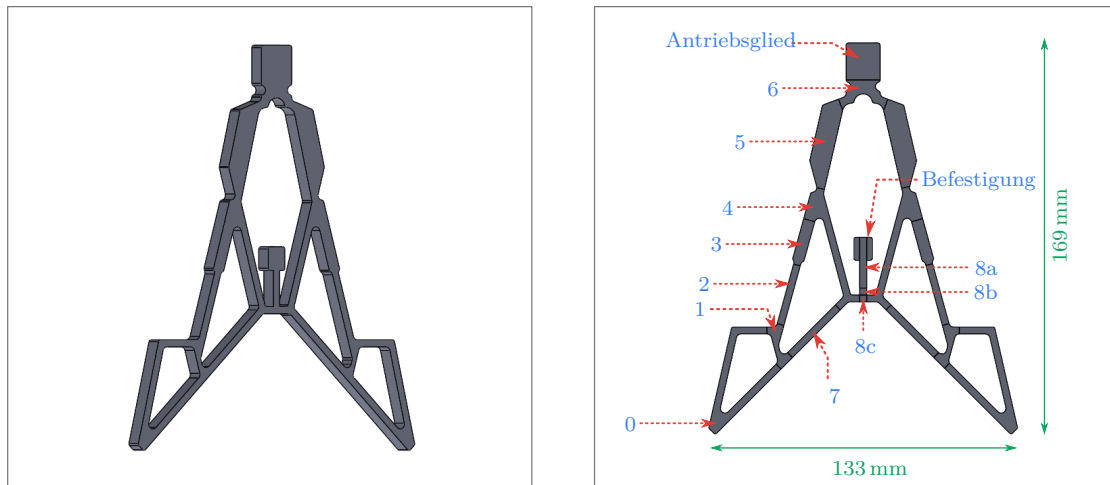
Greifen und Halten von Objekten sind sehr wichtige Aufgaben im Bereich der Robotik. Wie bereits erwähnt, ist die Entwicklung eines universellen Greifers, der die Objekte mit sehr unterschiedlichen Formen und Oberflächen sowie unregelmäßigen und empfindlichen Objekten greifen kann, eine große Herausforderung, da die Anpassung des Greifers an viele unterschiedliche Objekte die Steuerung einer Menge von Aktoren basierend auf Sensorsignalen erfordert. Durch die Nutzung von nachgiebigen Mechanismen mit verteilter Nachgiebigkeit kann die Flexibilität beim Greifen von Objekten erreicht werden. Außerdem kann die Fähigkeit des Greifers gehoben werden, da weniger Aktuatoren für die Ausrüstung seiner Finger als die Anzahl der Bewegungsmöglichkeiten benötigt werden. Dieser Abschnitt stellt einen neuen nachgiebigen Greifer mit verteilter Nachgiebigkeit und mit inhärenter Sensorik dar. Der Entwurf des nachgiebigen Greifers wurde in [123] untersucht und gezeigt. Abbildung 5.8(a) stellt die endgültige Struktur des Greifers als CAD-Modell (*Computer-aided design*) dar. Eine detaillierte Darstellung des Greifers mit den wichtigen Abmessungen ist im Anhang A (Abbildung A.2) zu sehen. Die weiteren Arbeiten zur Entwicklung der Sensorelemente, Fertigung der Greifer mit den Sensorelementen und die Messungen bilden einen Schwerpunkt in dieser Arbeit.

5.2.1 Entwicklung der Sensorelemente für den nachgiebigen Greifer

Für die Sensorisierung des Greifers gibt es zwei Möglichkeiten. Die Sensorelemente können entweder an der Kontaktfläche mit dem Objekt als externe Teile montiert oder in die Greiferstruktur eingebettet werden. In dieser Arbeit wurde sich für die zweite Möglichkeit entschieden. Dadurch sind die Sensorelemente Teile der Greiferstruktur und demzufolge kann eine kompakte Bauweise des Greifers entstehen.

Der erste Arbeitsschritt des Entwurfprozesses der Sensorelemente ist die als Sensorelemente geeigneten Teile zu ermitteln. Da der elektrisch leitfähige Silikonkautschuk zum Herstellen der Sensorelemente eingesetzt wird, sollen die gesuchten Teile die höchste Änderung der mechanischen Spannung während der Greifvorgänge aufweisen (zum Beispiel Greifbewegung ohne das Vorhandensein eines Objektes (Vorgang 1) und Greifen eines Objektes (Vorgang 2)). Das heißt, wenn der Vorgang 1 eine mechanische Spannung σ_1 im Teil hervorruft und der Vorgang 2 verursacht eine mechanische Spannung

σ_2 im Teil. Der Spannungsunterschied ($\sigma_2 - \sigma_1$) soll im gesuchten Teil am größten sein. Dies entspricht der höchsten Widerstandsänderung und dementsprechend einer hohen Empfindlichkeit der Sensorelemente. Zur Ermittlung der geeigneten Teile wurde als erstes das entstehende CAD-Modell der Greiferstruktur in unterschiedliche Teile mithilfe des 3D-CAD-Programms (SOLIDWORKS) aufgeteilt, wie in der Abbildung 5.8(b) zu sehen ist.



(a) Räumliche Ansicht, nach [123]

(b) Vorderansicht; der Greifer und dessen Teile für die Berechnung der mechanischen Spannung mithilfe der Simulationen

Abbildung 5.8: CAD-Modell der endgültigen Struktur des Greifers

Im Weiteren wurden zahlreiche FEM-Simulationen zur Ermittlung der gewünschten Teile durchgeführt. Mithilfe des FEM-Programmsystems Ansys Workbench® 14.5 wurde die Geometriedatei des aufgeteilten CAD-Modells zum Erstellen des FEM-Modells verwendet. Das Modell wurde mittels Tetraedern vernetzt. Die Elementgröße wurde entsprechend der kleinsten Abmessung des Greifers auf 2 mm festgelegt, um eine schnelle Simulation auszuführen und gleichzeitig gute Ergebnisse zu erreichen. Außerdem wurden die Elementmittelpunkte nicht beibehalten, um die Anzahl der Knoten zu minimieren und demzufolge schnelle Simulationen durchführen zu können. Danach wurden die erforderlichen Randbedingungen definiert, wie in der Abbildung 5.9 gezeigt wurde. Für die Aktuierung des Greifers wurde die Greiferstruktur mit zwei Teilen in Form eines Quaders versehen (siehe Abbildung 5.8). Die obere Fläche des unteren Quaders wurde mit einer fixierten Lagerung ausgestattet (alle Freiheiten wurden gesperrt). Eine Verschiebung von 45 mm wurde für die obere Fläche des oberen Quaders definiert. Für die Simulation des Greifers mit einem Objekt wurde das Objekt ebenso mit einer fixierten Lagerung versehen und automatisch vernetzt. Die Objektgröße ist 42 mm.

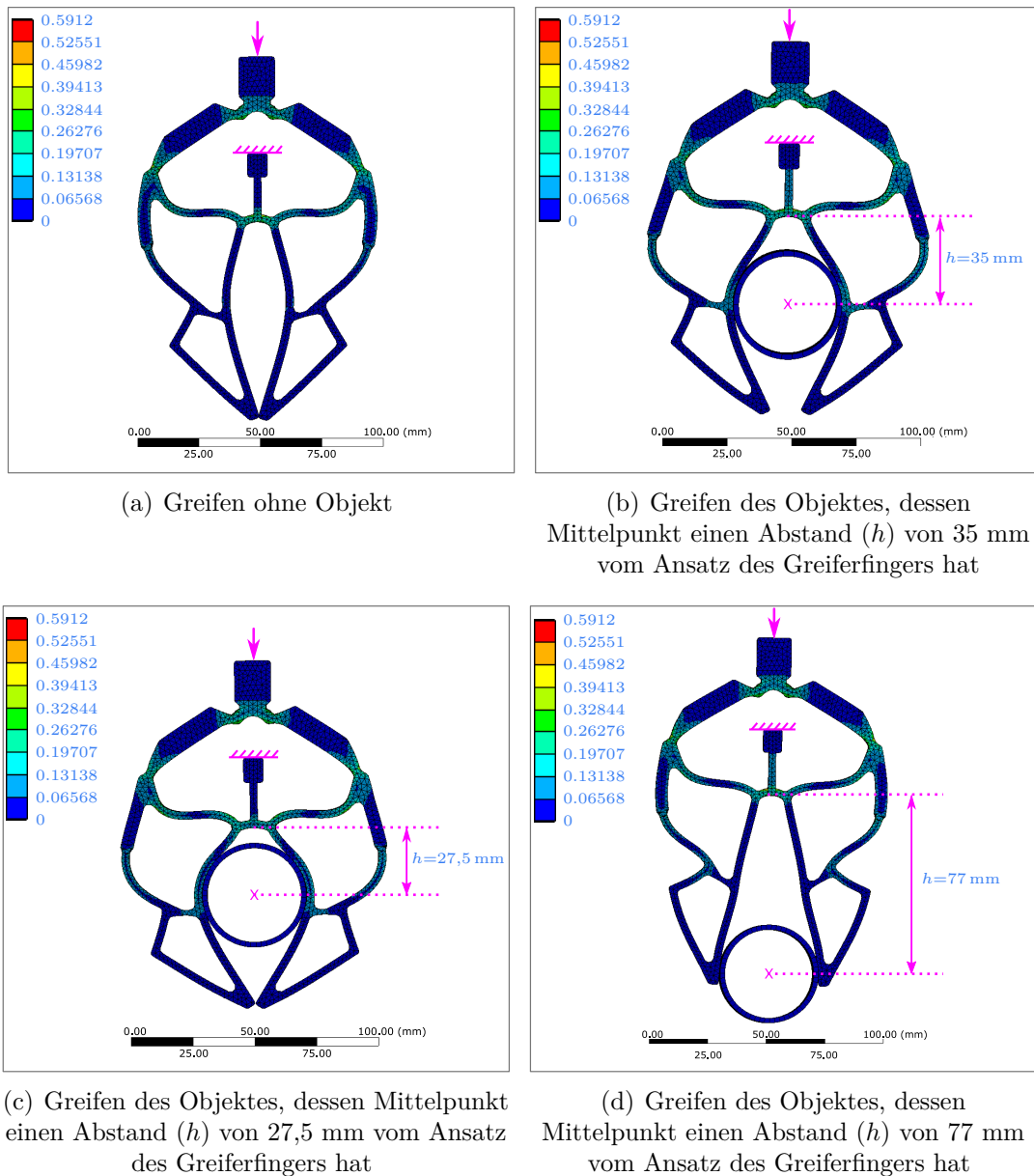


Abbildung 5.9: Simulierter Greifer mit der Spannungsverteilung bei unterschiedlichen Greifvorgängen, die maximale Vergleichsspannung von Mises in allen dargestellten Greifern ist circa 0,59 [MPa]

Der Mittelpunkt des Objektquerschnitts hat einen Abstand (h) von 35 mm vom Ansatz des Greiferfingers. Dies wird als Lage I bezeichnet. Die Simulationen wurden mit dem Modul statisch-mechanische Analyse durchgeführt.

Für die Berechnungen wird das Material ELASTOSIL R 420/70 C1 [117] der Firma Wacker Chemie verwendet. Ein uniaxialer Zugversuch wird für dieses Material mit einer Maximaldehnung von 100% durchgeführt und der Spannungs-Dehnungs-Zusammen-

hang der technischen Größen aufgestellt. Nach einer *Curve fitting*-Methode in Ansys® an verschiedenen Materialmodellen wird das Yeoh-Materialmodell dritter Ordnung bzw. mit drei Materialkonstanten für die Materialdefinition in dem FEM-Modell ausgedacht. Die Materialkonstanten sind in der Tabelle 5.1 aufgelistet.

Tabelle 5.1: Ermittelte Materialkonstanten für das Yeoh-Materialmodell dritter Ordnung von dem für die Simulationen verwendeten Silikonkautschuk

Materialkonstante	C10 [MPa]	C20 [MPa]	C30 [MPa]
ELASTOSIL R 420/70 C1	0,4857	-0,1344	0,072840

Die Simulation zeigt, dass bei der Greifbewegung unterschiedliche Druck-, Zug- und Biegespannungen auftreten. Für die Auswertung wird daher die Vergleichsspannung von Mises verwendet. Abbildung 5.9(a) zeigt den simulierten Greifer mit der Spannungsverteilung bei der Greifbewegung ohne Objekt. Beim Greifen des Objektes ist die Spannungsverteilung in der Abbildung 5.9(b) dargestellt. Mithilfe der Simulationsergebnisse wurde die maximale Vergleichsspannung von Mises für jedes Teil bei jedem Fall ermittelt und schließlich wurde der Spannungsunterschied zwischen den beiden Fällen berechnet (siehe Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2: Maximale Vergleichsspannung von Mises der Greiferteile bei der Greifbewegung ohne und mit Objekt von 42 mm Durchmesser

Teil	max. Vergleichsspannung von Mises [MPa]		Spannungsunterschied [MPa]
	Greifen ohne Objekt	Greifen mit Objekt	
0	0,041414	0,097099	0,055685
1	0,0877991	0,22708	0,139281
2	0,21513	0,25963	0,0445
3	0,22574	0,26622	0,04048
4	0,54712	0,54316	-0,00396
5	0,42802	0,39807	-0,02995
6	0,35532	0,3865	0,03118
7	0,117	0,25551	0,13851
8	0,50998	0,41884	-0,09114

Der Tabelle 5.2 ist zu entnehmen, dass das Teil mit der Nummer Eins den maximalen Betrag des Spannungsunterschieds aufweist. Das Teil mit der Nummer Acht (siehe Abbildung 5.8(b)) wird laut der Simulationsergebnisse mit der meisten Zugbelastung beansprucht. Abbildung 5.10 veranschaulicht, dass die maximale Spannung

im Hauptachsensystem viel größer ist als die mittlere Spannung. In diesem Fall kann die Vergleichsspannung von Mises für dieses Teil keine gute Übersicht über die entstehende Spannung geben. Aus diesem Grund wurde der Bereich des Teils, in dem die Zugspannungen entstehen (mit der Nummer 8a) neu nach der maximalen Spannung im Hauptachsensystem ausgewertet. Die anderen zwei Bereiche, in denen unterschiedliche Spannungen entstehen (8b, 8c), wurden wieder nach der Vergleichsspannung von Mises ausgewertet.

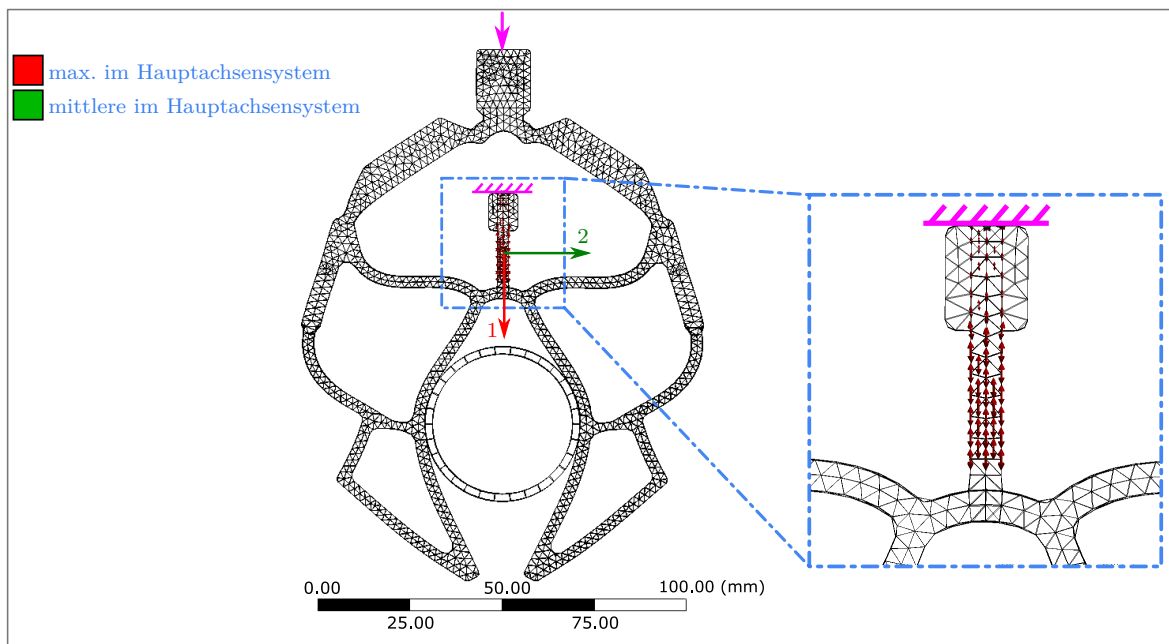


Abbildung 5.10: Hauptspannungsvektor des Teils 8a, wo meistens mit der Zugbelastung beansprucht wurde

Tabelle 5.3 zeigt die maximalen Spannungen des Teils mit der Nummer Acht. Es ist zu sehen, dass der Spannungsunterschied im Teil 8a nicht groß ist. In den Teilen 8b und 8c ist die Spannung beim Greifen eines Objekt kleiner als beim Greifen ohne Objekt. Das heißt, diese Teile werden beim Greifen ohne Objekt mehr beansprucht als beim Greifen eines Objektes.

Um den Einfluss der Lage des Objektes an den Greiferfingern auf die Spannungsverteilung und dementsprechend auf die auszusuchenden Teile für die Sensorelemente zu ermitteln, wurde der Greifer mit zwei weiteren unterschiedlichen Lagen des Objektes simuliert (siehe Abbildung 5.9(c) und 5.9(d)). In der ersten Lage hat der Mittelpunkt des Objektquerschnitts einen Abstand von 27,5 mm vom Ansatz des Greiferfingers.

Tabelle 5.3: Maximale Spannung im Hauptachsensystem und maximale Vergleichsspannung von Mises der entsprechenden Teile 8a, 8b und 8c bei der Greifbewegung ohne und mit Objekt von 42 mm Durchmesser

Teil	max. Spannung im Hauptachsensystem [MPa]		
	Greifen ohne Objekt	Greifen mit Objekt	Spannungsunterschied [MPa]
8a	0,070313	0,10127	0,030957
Teil	max. Vergleichsspannung von Mises [MPa]		
	Greifen ohne Objekt	Greifen mit Objekt	Spannungsunterschied [MPa]
8b	0,35643	0,32414	-0,03229
8c	0,50998	0,41884	-0,09114

In der zweiten Lage hat der Mittelpunkt des Objektquerschnitts einen Abstand von 77 mm. Die Lagen werden mit Lage II bzw. III bezeichnet.

Tabelle 5.4 zeigt die maximale Vergleichsspannung von Mises der unterschiedlichen Greiferteile beim Greifen des Objektes an den Lagen II und III anhand der Simulationsergebnisse. Außerdem sind die Spannungsunterschiede zur Greifbewegung ohne Vorhandensein eines Objektes (siehe Tabelle 5.2) in dieser Tabelle dargestellt. Der maximale Spannungsunterschied hängt von der Lage des Objektes an den Greiferfinger ab. Laut der Simulationsergebnisse weisen die Teile, die einen direkten Kontakt mit dem Objekt haben, den größten Spannungsunterschied für alle drei Lagen I, II und III auf. Dies entspricht den Teilen 0, 1 und 7. Im Gegensatz zu den Teilen 0 und 7 wird das Teil 1 beim Greifen des Objektes bei allen unterschiedlichen Lagen ausreichend beansprucht. Dies ist auf seine Position in der Nähe der entstehenden Druckstelle zurückzuführen. Dementsprechend ist dieses Teil als Sensorelement geeignet.

Die Position des Teils 1 wurde anschließend konkreter untersucht. Unterschiedliche Formen des Sensorelements, welches sich an dieser Position befindet, wurden aufgegriffen. Diese Untersuchungen zielen darauf ab, die Form des Sensorelements zu ermitteln, die bei den Greifvorgängen einen hohen Spannungsunterschied ermöglicht. Abbildung 5.11 zeigt die geplanten Formen der Sensorelemente. Sie werden in die beiden Seiten des Greifers integriert, um die Symmetrie des Greifers beizubehalten. Diese zwei Teile werden als seitliche Teile bezeichnet. Um die Sensorisierung des Greifers durch Einsetzen eines einzigen Sensorelements zu vereinfachen, wird die Möglichkeit mit dem Teil 8 als Sensorelement ebenso in Betracht gezogen. Dieses Sensorelement wird oberes Sensorelement genannt und es hat eine rechteckige Form.

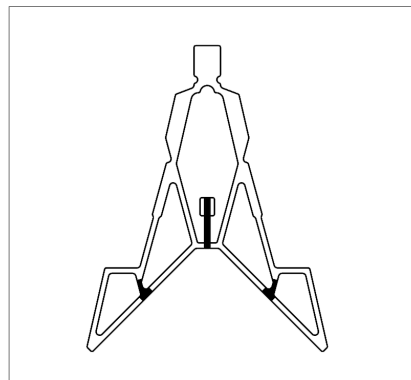
Tabelle 5.4: Maximale Vergleichsspannung von Mises der Greiferteile beim Greifen des Objektes an der Lage II und III, Durchmesser des Objektes ist $D = 42$ mm

Teil	max. Vergleichsspannung von Mises [MPa]			
	Lage II; $h=27,5$ mm		Lage III; $h=77$ mm	
	Greifen mit Objekt [MPa]	Spannungsunterschied [MPa]	Greifen mit Objekt [MPa]	Spannungsunterschied [MPa]
0	0,059057	0,017643	0,17213	0,130716
1	0,20066	<i>0,112861</i>	0,20448	<i>0,116681</i>
2	0,23312	0,01799	0,30706	0,09193
3	0,24606	0,02032	0,34671	0,12097
4	0,44151	-0,10561	0,5912	0,04408
5	0,41077	-0,01725	0,38726	-0,04076
6	0,38536	0,03004	0,39543	0,04011
7	0,23275	0,11575	0,057016	-0,059984

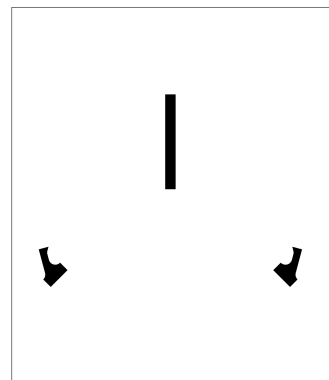
Verschiedene FEM-Simulationen wurden für jedes Sensorelement durchgeführt. Ziel dieser Simulationen war, die maximale Spannung jedes Sensorelements (von den drei Formen) bei der Greifbewegung ohne und mit Objekt zu ermitteln und anschließend den Spannungsunterschied zu berechnen. Das Material POWERSIL® 466 A/B VP wurde für die Sensorelemente in den Simulationen verwendet. Für die Materialdefinition wurde das Ogden-Materialmodell dritter Ordnung in dem FEM-Modell ausgesucht. Die dafür in der Tabelle 5.5 aufgelisteten Materialkonstanten wurden nach der gleichen Methode wie für das Material ELASTOSIL R 420/70 C1 ermittelt. Der restlichen Greiferstruktur wurde das Material ELASTOSIL R 420/70 C1 zugewiesen. Das FEM-Modell wurde hier ebenso mittels Tetraedern vernetzt und dabei war die Elementgröße 0,5 mm für die seitlichen Sensorelemente und 2 mm für die restliche Greiferstruktur. Die Elementmittelknoten wurden hier ebenso nicht beibehalten, um schnelle Simulationen durchführen zu können.

Tabelle 5.5: Ermittelte Materialkonstanten für das Ogden-Materialmodell dritter Ordnung von dem für die Simulationen verwendeten Silikonkautschuk

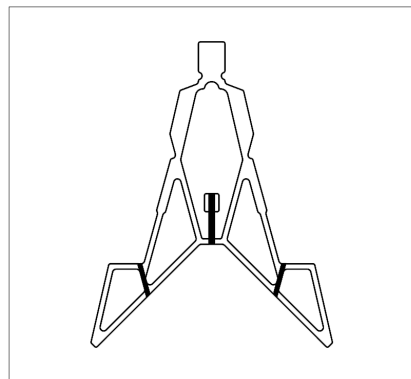
Materialkonstante	μ_1 [MPa]	α_1	μ_2 [MPa]	α_2	μ_3 [Mpa]	α_3
POWERSIL® 466 A/B VP	-7956,1	0,021199	0,0042957	7,8955	26045	0,0065175



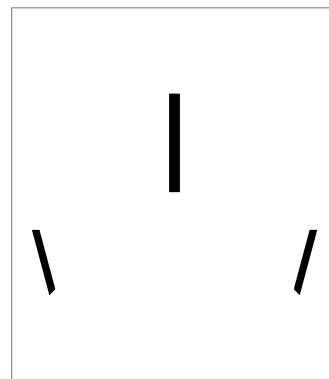
(a) Greifer mit dem oberen Sensorelement und den seitlichen Sensorelementen erster Form; kleine Sensorelemente



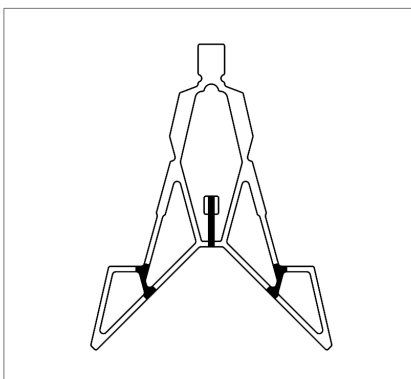
(b) Das obere und die kleinen Sensorelemente



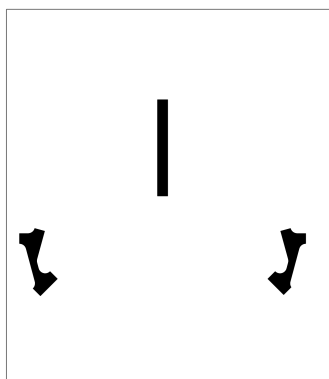
(c) Greifer mit dem oberen Sensorelement und den seitlichen Sensorelementen zweiter Form; mittelgroße Sensorelemente



(d) Das obere und die mittelgroßen Sensorelemente



(e) Greifer mit dem oberen Sensorelement und den seitlichen Sensorelementen dritter Form; große Sensorelemente



(f) Das obere und die großen Sensorelemente

Abbildung 5.11: CAD-Modell des Greifers und der verwendeten Sensorelemente mit den verschiedenen Formen

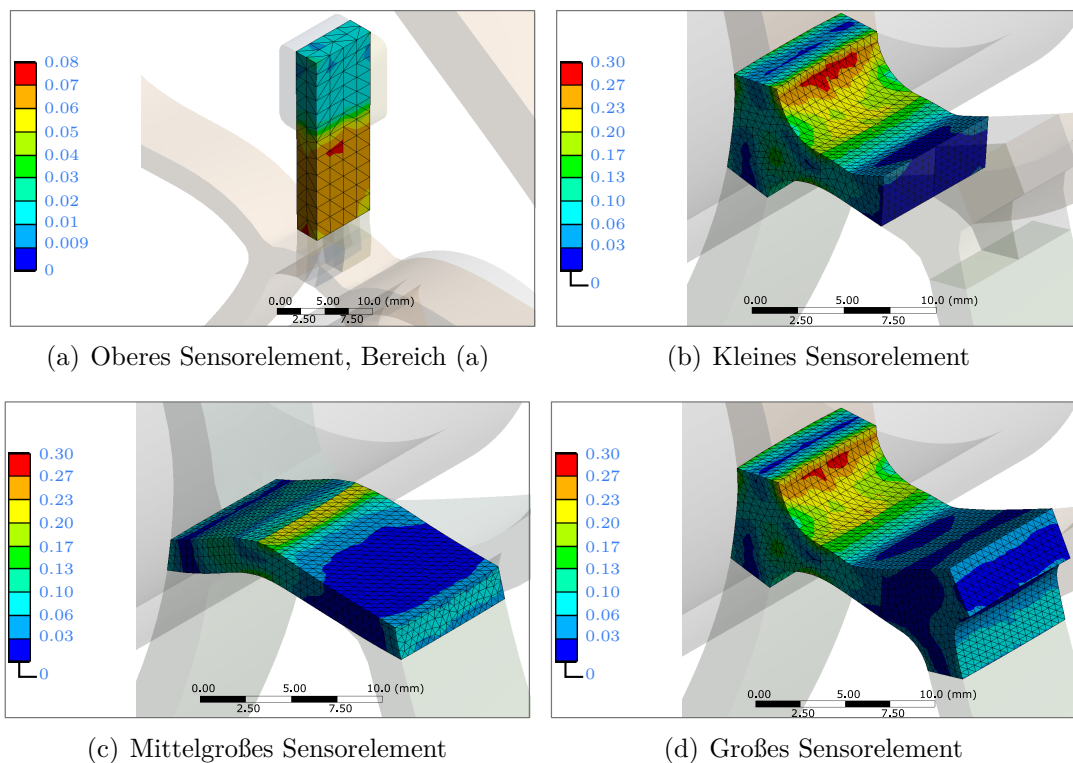
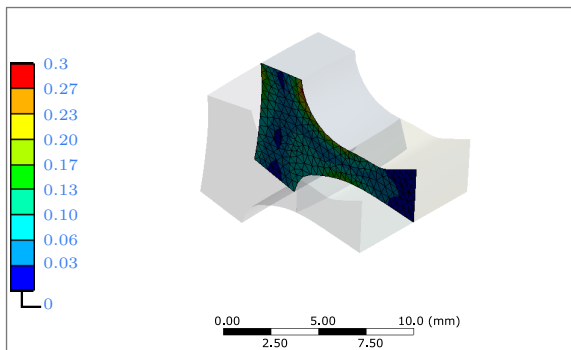


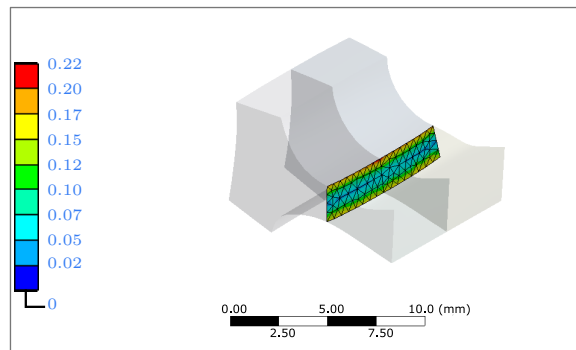
Abbildung 5.12: Die Spannungsverteilung in jedem Sensorelement bei der Greifbewegung: (a) max. Spannung im Hauptachsensystem (max. Wert ist circa 0,08 MPa), (b), (c), (d) Vergleichsspannung von Mises, max. Wert ist circa 0,30 MPa

Wie bereits erwähnt, treten bei der Greifbewegung unterschiedliche Spannungen in der Greiferstruktur auf. Zum Beispiel wurde der Teil 1 meistens mit Biegespannungen beansprucht. Außerdem zeigen die Simulationsergebnisse, dass in einigen Knoten die drei Hauptspannungen auftreten. Aus diesen Gründen wurde hier auch die Vergleichsspannung von Mises zum Auswerten der Ergebnisse verwendet. Abbildung 5.12 zeigt die simulierten Sensorelemente. In der Abbildung 5.12(a) zeigt die Simulation, dass der Greifvorgang zu einer Spannung in dem oberen Sensorelement führt. In den anderen Abbildungen 5.12(b), 5.12(c) und 5.12(d) ist zu erkennen, dass die maximale Vergleichsspannung von Mises in dem kleinen und dem großen Sensorelement an der Seite auftritt. Jedoch sind die Werte der Vergleichsspannung von Mises aller Sensorelemente in der Mitte fast gleich groß. Um diese Ergebnisse zu bestätigen, wurde die Vergleichsspannung von Mises im Längs- und Querschnitt des Sensorelements der verschiedenen Formen ausgewertet. Abbildung 5.13 zeigt die Simulationsergebnisse der Längs- bzw. Querschnitte jedes Sensorelements. In den Abbildungen 5.13(a), 5.13(c) und 5.13(e) ist zu sehen, dass die maximale Vergleichsspannung in dem kleinen und dem großen Sensorelement am Rand der Längsschnitt entsteht. Die maximalen Spannungswerte in

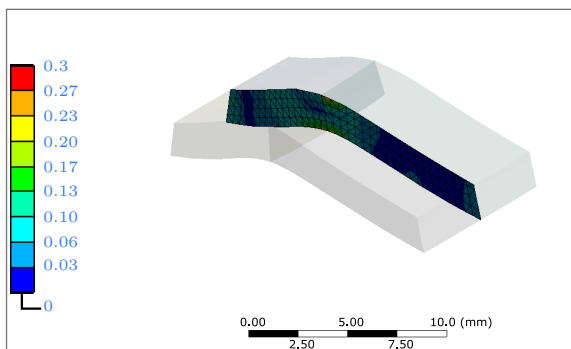
den Querschnitten aller Sensorelemente sind fast gleich, jedoch ist die Verteilung der Spannung in den Sensorelementen unterschiedlich. Die Abbildung 5.13(b) und 5.13(f) zeigen, dass die maximale Vergleichsspannung in dem kleinen und dem großen Sensorelement am oberen Rand des Querschnitts liegt. Demgegenüber befindet sich die maximale Spannung in dem mittelgroßen Sensorelement am unteren Rand des Querschnitts (siehe Abbildungen 5.13(d)).



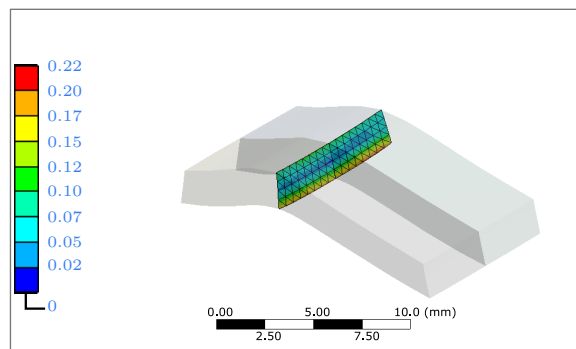
(a) Längsschnitt des kleinen Sensorelements



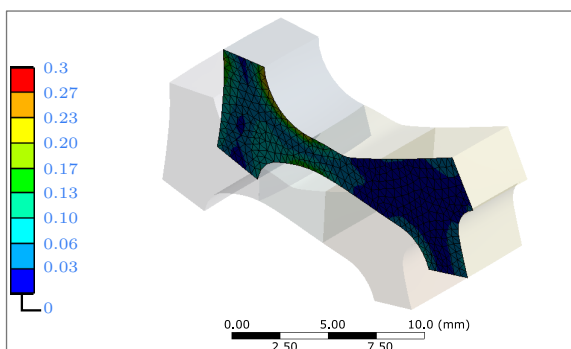
(b) Querschnitt des kleinen Sensorelements



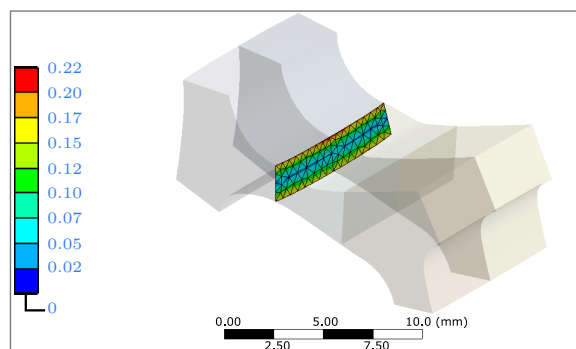
(c) Längsschnitt des mittelgroßen Sensorelements



(d) Querschnitt des mittelgroßen Sensorelements



(e) Längsschnitt des großen Sensorelements



(f) Querschnitt des großen Sensorelements

Abbildung 5.13: Die maximale Vergleichsspannung von Mises [MPa] in vertikalen Längsschnitten bzw. Querschnitten des Sensorelements aller Form-Varianten

Die maximale Vergleichsspannung von Mises für jedes Sensorelement bei der Greifbewegung ohne und mit Objekt sowie die Spannungsunterschiede sind in der Tabelle 5.6 eingetragen. Die Tabelle zeigt, dass das kleine und das große Sensorelement fast dieselbe maximale Spannung erreichen und den maximalen Betrag des Spannungsunterschieds besitzen.

Tabelle 5.6: Maximale Vergleichsspannung von Mises der seitlichen Sensorelemente (alle Form-Varianten) und der Teile des oberen Sensorelements (8b, 8c), max. Spannung im Hauptachsensystem des Sensorelements 8a und die maximalen Spannungsunterschiede beim Greifen ohne und mit einem Objekt von 42 mm Durchmesser

Sensorelement	max. Vergleichsspannung von Mises [MPa]		Spannungsunterschied [MPa]
	Greifen ohne Objekt	Greifen mit Objekt	
kleines Sensorelement	0,14735	0,30733	0,15998
mittelgroßes Sensorelement	0,12895	0,24376	0,11481
großes Sensorelement	0,13707	0,29087	0,1538
oberes Sensorelement 8b	0,28863	0,24092	-0,04771
oberes Sensorelement 8c	0,44914	0,32963	-0.11951
Sensorelement	max. Spannung im Hauptachsensystem [MPa]		Spannungsunterschied [MPa]
	Greifen ohne Objekt	Greifen mit Objekt	
oberes Sensorelement 8a	0,069995	0,086813	0,016818

5.2.2 Fertigung des nachgiebigen Greifers mit den Sensorelementen

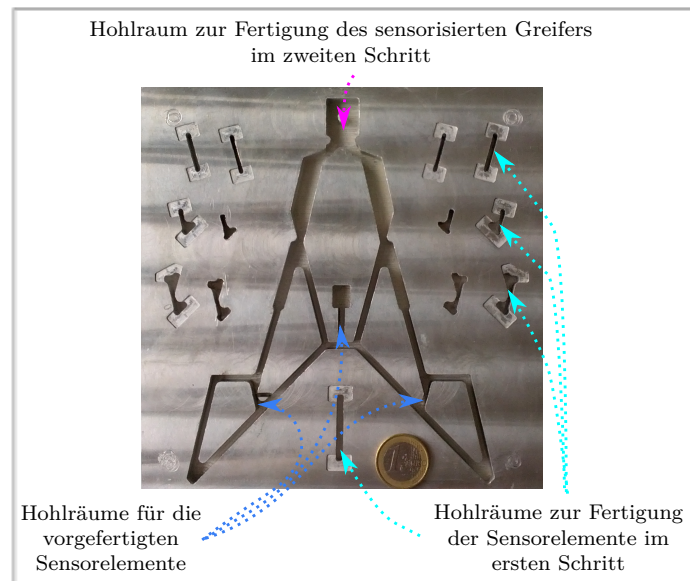
Der sensorisierte Greifer wurde mithilfe des Heißpressverfahrens gefertigt. Dafür wurde das gleiche Verfahren wie im Abschnitt 4.2.1 verwendet. Abbildung 5.14(a) stellt das Presswerkzeug für die Fertigung des sensorisierten Greifers dar. Die Fertigung besteht aus zwei Schritten. Im ersten Schritt wurden die Sensorelemente aus dem

elektrisch leitfähigen Silikonkautschuk POWERSIL® 466 A/B VP im Presswerkzeug heiß gepresst. Für die Verbindung zwischen dem leitfähigen Silikonkautschuk und den Elektroden wurde ein Kupfernetz verwendet. Um die elektrischen Kontakte so wenig wie möglich bei der Greifbewegung zu belasten, wurden sie an den Sensorelementen an dem wenig belasteten Rand angebracht (siehe Abbildung 5.12 und 5.15). Im zweiten Schritt wurde der sensorisierte Greifer aus dem nicht leitfähigen Silikonkautschuk ELASTOSIL R 420/70 C1 gefertigt. Dabei wurden die hergestellten Sensorelemente in dem Presswerkzeug für die Greiferstruktur positioniert. Danach wurden die leeren Räume des Presswerkzeugs mit dem nicht leitfähigen Silikonkautschuk gefüllt (siehe Abbildung 5.14(b)). Anschließend wurden die beiden Materialien in der Heizpresse zusammenvulkanisiert. Der sensorisierte Greifer mit den entsprechenden Sensorelementen ist in der Abbildung 5.15 dargestellt.

Der sensorisierte, gefertigte Greifer zeichnet sich durch die monolithische Struktur mit inhärenten, nachgiebigen Sensorelemente und die verteilte Nachgiebigkeit aus. Dank dieser Merkmale kann der gefertigte Greifer als Außen- oder Zwischengreifer angewendet werden und sich an verschiedene Objekte anpassen (siehe Abbildung 5.16).

5.2.3 Überprüfung der Funktionalität

Die Messungen an dem sensorisierten Greifer wurden mithilfe der Materialprüfmaschine (ProLine Tisch-Prüfmaschine Z005) durchgeführt. Abbildung 5.17 zeigt den zum Messen verwendeten Versuchsaufbau. Der hier vorgestellte, sensorisierte Greifer benötigt nur einen Antrieb zum Gewährleisten der Eingangsverschiebung, um den Greifvorgang vollständig abzuschließen. Für die Befestigung des unteren Quaders, der mit dem oberen Sensorelement verbunden ist, wurde ein zusätzliches Teil gefertigt. In dem liegt das obere Sensorelement entlastet, sodass keine Druckkraft verursacht durch die Befestigung auf das Sensorelement wirkt. Während der Betätigung des Greifers wurden in Abhängigkeit vom verwendeten Objekt eine Eingangsverschiebung von 45 bzw. 50 mm und eine Bewegungsgeschwindigkeit von 300 mm/min verwendet. Die Eingangsverschiebung wurde experimentell bestimmt, indem sich die Greiferfinger bei der Greifbewegung ohne Objekt nicht bzw. so wenig wie möglich kontaktieren. Dabei wird keine zusätzliche Kraft auf die Sensorelemente ausgeübt. Gleichzeitig kann diese Eingangsverschiebung den Greifvorgang mit einem Objekt erfolgreich abschließen. Wenn die Eingangsverschiebung ausgeübt wird, werden sich die nachgiebigen Greiferfinger an das Objekt anpassen. Dabei werden die Sensorelemente verformt und dementsprechend elektrische Signale liefern.

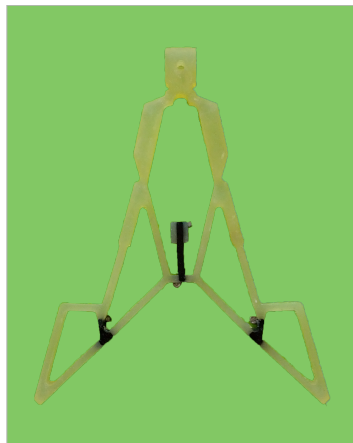


(a) Presswerkzeug für die Fertigung des sensorisierten Greifers

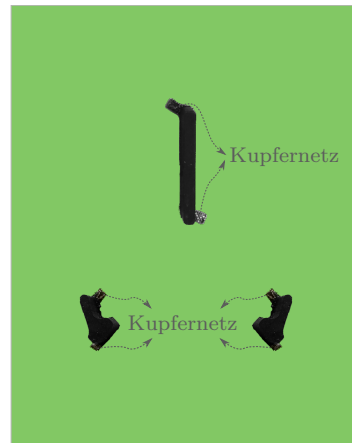


(b) Das mit dem nicht leitfähigen Silikonkautschuk und den
vorgefertigten Sensorelementen gefüllte Presswerkzeug

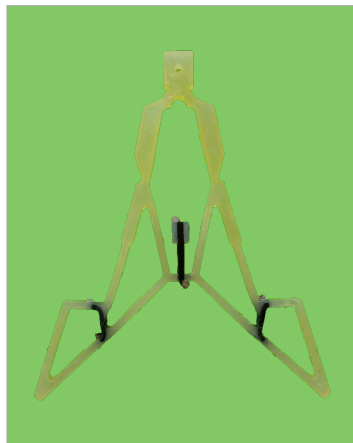
Abbildung 5.14: Fertigungswerkzeug und Fertigungsschritte des sensorisierten Greifers



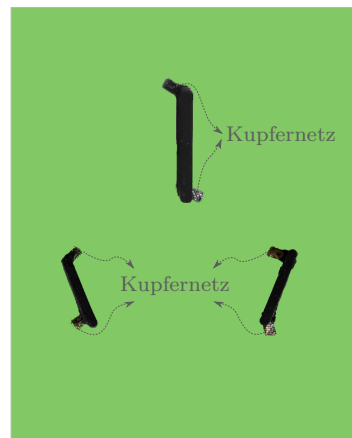
(a) Der sensorisierte Greifer mit dem oberen und den kleinen Sensorelementen



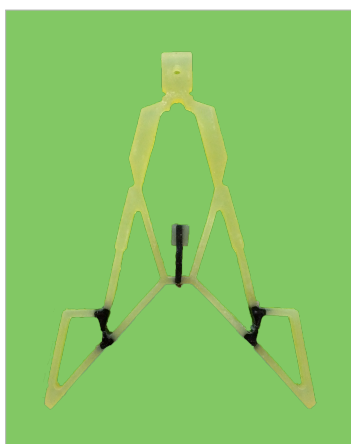
(b) Das obere und die kleinen Sensorelemente



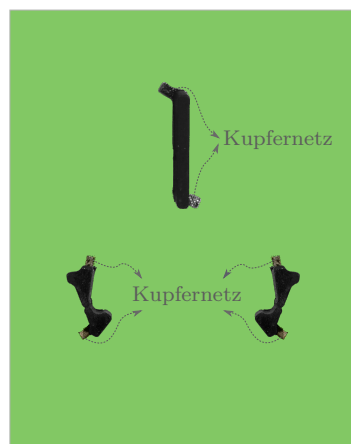
(c) Der sensorisierte Greifer mit dem oberen und den mittelgroßen Sensorelement



(d) Das obere und die mittelgroßen Sensorelemente



(e) Der sensorisierte Greifer mit dem oberen und den großen Sensorelementen

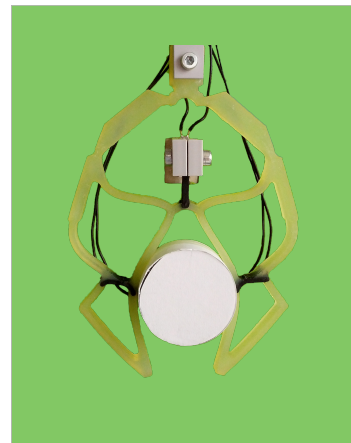


(f) Das obere und die großen Sensorelemente

Abbildung 5.15: Der sensorisierte Greifer mit den entsprechenden Sensorelementen



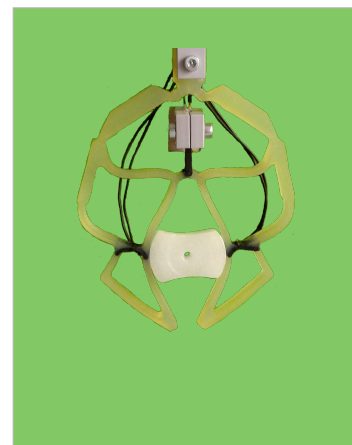
(a) Greifen vom Objekt mit viereckigem Querschnitt



(b) Greifen vom Objekt mit rundem Querschnitt



(c) Greifen vom Objekt mit verschiedenen Seitenlängen an der schmalen Seite



(d) Greifen vom Objekt mit verschiedenen Seitenlängen an der breiten Seite

Abbildung 5.16: Der sensorisierte Greifer beim Greifen von verschiedenen Objekten

Für die Untersuchungen wurden sechs Exemplare des Greifers gefertigt. Dabei sind alle Exemplare mit dem gleichen oberen Sensorelement versehen. Je zwei Exemplare haben die gleichen seitlichen Sensorelemente. Somit konnten alle Form-Varianten (entsprechend Abbildung 5.15) untersucht werden.

Zum Überprüfen der Funktionalität der Sensorelemente wurden unterschiedliche Fälle betrachtet. Zunächst wurde der sensorisierte Greifer bei der Greifbewegungen ohne und mit Objekt untersucht. Danach wurden Untersuchungen zum Greifen von Objekten mit unterschiedlichen Größen, auch noch von einem Objekt mit zwei unterschiedlichen Seitenlängen durchgeführt (siehe Abbildung 5.16(c) und 5.16(d)). Die daraus resultierenden Signale der Sensorelemente wurden mithilfe der Schaltung (Abbildung 4.1)

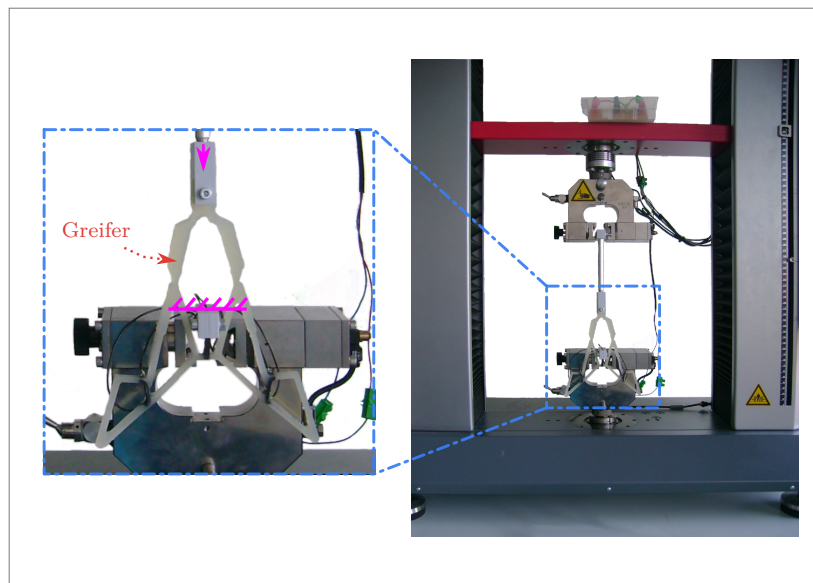


Abbildung 5.17: Der Versuchsaufbau für den sensorisierten Greifer und das Funktionsprinzip

aufgenommen und später ausgewertet. Da nur ein elektrisches Signal durch die Materialprüfmaschine erfasst werden kann, muss der Greifprozess drei mal wiederholt werden, um die Signale der drei Sensorelemente des Greifers aufzunehmen.

Erkennen des Vorhandenseins eines Objektes

Für diese Untersuchungen wurde ein Objekt mit einem Durchmesser von 42 mm verwendet (siehe Abbildung 5.16(b)). Der Test an jedem Sensorelement bestand aus zwei Schritten. Beim ersten Schritt wurde der sensorisierte Greifer ohne das Vorhandensein eines Objektes mit einer Eingangsverschiebung von 45 mm betätigt. In dem zweiten Schritt wurde das oben erwähnte Objekt während der nächsten Betätigung des Greifers gegriffen. Der Test wurde dreimal für jedes Sensorelement durchgeführt, um die Ergebnisse zu vergleichen.

Die Abbildung 5.18 zeigt als Beispiel die Widerstandsänderung des oberen Sensorelements sowie der linken seitlichen Sensorelemente der verschiedenen Formen. In der Abbildung 5.18(a) ist das Signal des oberen Sensorelements dargestellt. Es ist hier zu sehen, dass sich der elektrische Widerstand des Sensorelements in beiden Greifvorgängen ohne und mit dem Objekt von Anfang an ändert. Der Greifpunkt während der Greifbewegung mit dem Objekt ist bei einer Eingangsverschiebung von circa 22 mm nur schwer zu erkennen. Allerdings ist die Unterscheidung zwischen den beiden Greifvorgängen nur ab einer Eingangsverschiebung von circa 35 mm möglich. Außerdem war

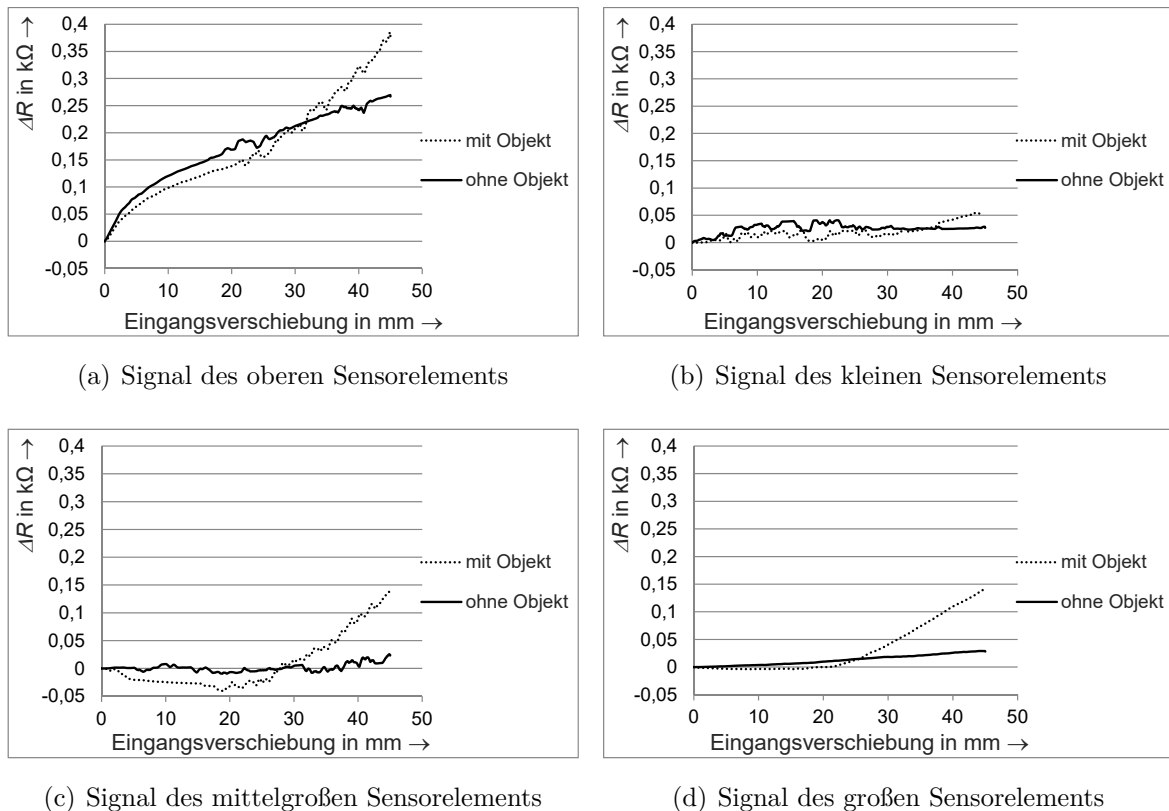


Abbildung 5.18: Widerstandsänderung eines Sensorelements jeder Form bei der Greifbewegung ohne und mit einem Objekt von 42 mm Durchmesser als Beispiel zum Erkennung des Vorhandenseins eines Objektes, die Eingangsverschiebung ist 45 mm bei jedem Greifvorgang

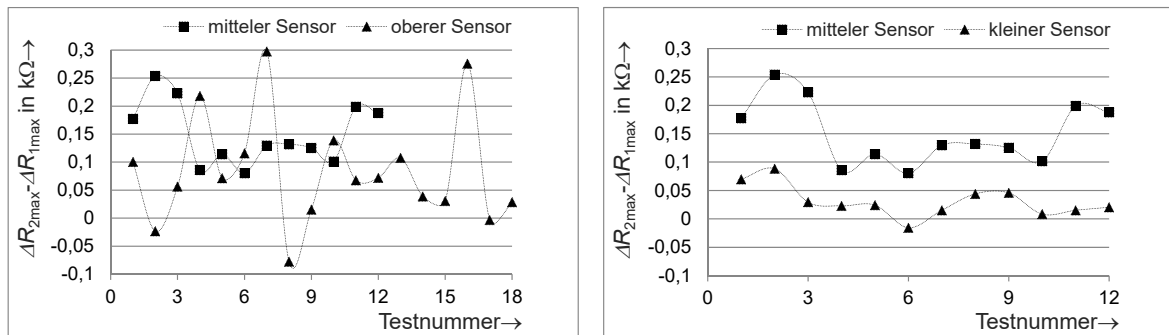
die maximale Widerstandsänderung während der meisten durchgeführten Tests an der verwendeten Eingangsverschiebung bei der Greifbewegung mit dem Objekt größer als bei der Greifbewegung ohne Objekt. Abbildung 5.18(b) zeigt, dass die Widerstandsänderung des kleinen Sensorelements bei der Greifbewegung ohne und mit Objekt klein ist. Des Weiteren ist der Unterschied der maximalen Widerstandsänderung zwischen den beiden Greifvorgängen sehr klein. Dies spiegelt eine geringe Empfindlichkeit des Sensorelements im Vergleich zu den anderen Sensorelementen wider. Zudem ist die Unterscheidung zwischen den beiden Greifvorgängen nur ab einer Eingangsverschiebung von circa 38 mm erkennbar. Der Greifpunkt ist hier wegen der Schwingungen des Signals nicht zu erkennen. Die Abbildung 5.18(c) zeigt, dass das mittelgroße Sensorelement ein besseres Signal als das kleine Sensorelement liefert. Es ist hier auch zu sehen, dass die maximale Widerstandsänderung des Sensorelements beim Greifen des Objektes größer als bei der Greifbewegung ohne Objekt ist. Allerdings ist der Greifpunkt

bei einer Eingangsverschiebung von circa 22 mm nur schwer zu erkennen. Weiterhin ist die Unterscheidung zwischen den beiden Greifvorgängen bei einer kleineren Eingangsverschiebung von weniger als 30 mm möglich. Im Gegensatz zu den anderen Sensorelementen liefert das große Sensorelement ein schwingungsfreies Signal mit einem erkennbaren Greifpunkt bei einer Eingangsverschiebung von circa 22 mm (siehe Abbildung 5.18(d)). Allerdings ist die Unterscheidung zwischen den beiden Greifvorgängen erst ab einer Eingangsverschiebung von circa 25 mm möglich.

Es lässt sich zusammenfassen, dass die maximale Widerstandsänderung beim Erreichen der verwendeten Eingangsverschiebung für alle untersuchten Sensorelemente während der Greifbewegung mit dem Objekt größer als bei der Greifbewegung ohne Objekt ist. Dadurch ist die Erkennung des Vorhandenseins eines Objektes anhand der Signale von einem der vier Sensorelemente möglich. Es ist dabei zu beachten, dass die Eingangsverschiebung der Größe des Objektes angepasst sein soll. Außerdem gilt, je größer die Eingangsverschiebung ist, desto besser ist die Unterscheidung zwischen den beiden Greifvorgängen, jedoch gibt es größere mechanische Belastungen auf das gegriffene Objekt. Das heißt, das Objekt wird im Fall der Abbildung 5.18(b) mehr belastet als im Fall der Abbildung 5.18(c), bevor es erkannt wird.

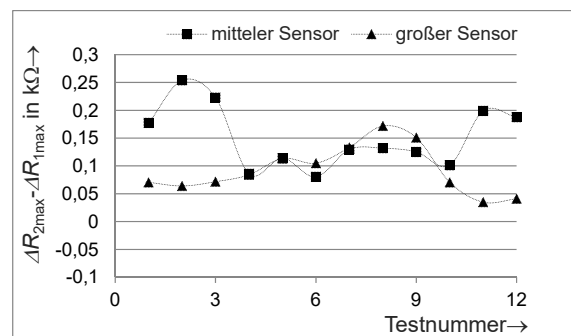
Um eine Bewertung der Varianten der Sensorelemente durchzuführen, wurden die Widerstandsänderungen aller Sensorelemente einzeln ermittelt und untereinander verglichen. Die Abbildung 5.19 zeigt einen Vergleich zwischen dem mittelgroßen Sensorelement und den anderen Sensorelementen. Die dargestellten Punkte spiegeln den Unterschied zwischen den maximalen erreichten Widerstandsänderungen während der Greifbewegung mit dem Objekt ($D=42$ mm) $\Delta R_{2\max}$ und während der Greifbewegung ohne das Vorhandensein des Objektes $\Delta R_{1\max}$ für jedes Sensorelement bei jedem durchgeführten Test wider. Durch die negativen Werte werden die nicht erfolgreichen Messergebnisse erkannt.

Die Abbildung 5.19 zeigt, dass das Sensorsignal des mittelgroßen Sensorelements deutlicher als das von den anderen Sensorelementen ist. Der Grund dafür kann die Position der elektrischen Kontaktierungen sein. Sie befinden sich weit entfernt von dem Bereich, wo die maximale Vergleichsspannung bei der Greifbewegung in dem kleinen bzw. großen Sensorelement entsteht. Außerhalb dieses Bereichs ist die maximale Vergleichsspannung bei allen Sensorelementen fast gleich. Außerdem hängt das Sensorsignal ab von allen entstehenden Spannungen, den dazu gehörigen Spannungswerten, die Spannungsverteilungen im ganzen Körper des Sensorelements und nicht nur mit dem maximalen Wert der Vergleichsspannung zusammen. Zusätzlich kann die Geometrie des Sensorelements das Sensorsignal ebenso beeinflussen.



(a) Vergleich zwischen dem mittelgroßen Sensorelement und dem oberen

(b) Vergleich zwischen dem mittelgroßen Sensorelement und dem kleinen



(c) Vergleich zwischen dem mittelgroßen Sensorelement und dem großen

Abbildung 5.19: Der Unterschied zwischen den maximalen erreichten Widerstandsänderungen; $\Delta R_{2\max}$ (beim Greifen des Objektes mit $D=42$ mm) und $\Delta R_{1\max}$ (bei der Greifbewegung ohne Objekt) für alle Sensorelemente bei jedem durchgeführten Test

Die sechs Exemplare des Greifers wurden mit einem kleineren zylindrischen Objekt ähnlich dem Objekt in der Abbildung 5.16(b) weiter untersucht. Das Objekt hat einen Durchmesser von 26 mm. Jedes Sensorelement wurde dreimal getestet. Die Eingangsverschiebung betrug dabei 45 mm.

Die Tabelle 5.7 zeigt eine Statistik der erfolgreichen Ergebnisse zum Erkennen des Vorhandenseins eines Objektes mit zwei unterschiedlichen Durchmessern ($D=42$ mm, $D=26$ mm) anhand der maximalen Widerstandsänderung. Wie es der Tabelle zu entnehmen ist, waren alle Ergebnisse der mittelgroßen und großen Sensorelemente zum Erkennen des Vorhandenseins des Objektes von 42 mm Durchmesser erfolgreich. Allerdings ist die Wahrscheinlichkeit zum Erkennen des Objektes mit dem Durchmesser von 26 mm bei derselben verwendeten Eingangsverschiebung geringer. Das heißt, bei der Greifbewegung mit einem kleinen Objekt muss die verwendete Eingangsverschiebung

größer sein. Außerdem zeigt die Tabelle, dass die Ergebnisse des kleinen Sensorelements und des oberen Sensorelements nicht alle erfolgreich für das Objekt mit dem Durchmesser von 42 mm sind. Der Grund dafür ist die Schwingung des Sensorsignals während der Greifvorgänge. Der Signalverlauf schwingt in einem Bereich, welcher größer als der der Widerstandsänderung sein kann, was auf die geringe Empfindlichkeit dieser Sensorelemente im Vergleich zu dem mittelgroßen Sensorelement zurückzuführen ist. Außerdem zeigt die Tabelle, dass die erfolgreichen Ergebnisse dieser zwei Sensorelemente bei einem kleinen Objekt von 26 mm Durchmesser wegen der beschränkten Eingangsverschiebung ebenso geringer sind.

Tabelle 5.7: Statistik der erfolgreichen Ergebnisse zum Erkennen des Vorhandenseins des Objektes mit zwei unterschiedlichen Durchmessern

Sensorelement	Anzahl der Tests	mit Objekt $D=42$ mm		mit Objekt $D=26$ mm	
		erfolgreiche Tests	in Prozent	erfolgreiche Tests	in Prozent
kleines Sensorelement	12	11	92%	6	50%
mittelgroßes Sensorelement	12	12	100%	10	83%
großes Sensorelement	12	12	100%	10	83%
oberes Sensorelement	18	15	83%	7	39%

Ein Grund für die Schwingung der Sensorsignale kann die elektrische Kontaktierung sein, da sie sich in einer belasteten Position befinden. Dies erfordert eine nachgiebige Kontaktierung, was das Kupfernetz nicht erfüllen kann. Folglich wird das Sensorelement und dementsprechend sein Signal beeinflusst (Schwingungen). Es ist zu beachten, dass dieser Einfluss auf die Sensorelemente unterschiedlich sein kann.

Die Schlussfolgerungen aus den durchgeführten Untersuchungen sind, dass der sensorisierte Greifer das Vorhandensein eines Objektes detektieren kann. Außerdem ist es günstiger bei der Betätigung des Greifers mit einer Eingangsverschiebung von 45 mm, ein Objekt mit einem Durchmesser größer als 26 mm zu verwenden.

Erkennung von Objekten mit unterschiedlichen Durchmessern

In diesem Abschnitt wurden die sechs Exemplare des Greifers mit vier unterschiedlichen zylindrischen Objekten (siehe Abbildung 5.16(b)) untersucht. Die verwendeten Objekte haben die Durchmesser 26 mm, 31 mm, 35 mm und 42 mm. Die Sensorelemente wurden einzeln getestet. Jeder Test besteht aus fünf Schritten. Im ersten Schritt wurde der sensorisierte Greifer ohne das Vorhandensein eines Objektes betätigt. Dabei betrug die Eingangsverschiebung 45 mm. In den anderen Schritten wurden die vier unterschiedlichen Objekte einzeln nacheinander gegriffen. Der Test wurde mehrmals durchgeführt, um die Ergebnisse zu vergleichen.

Die Abbildung 5.20 stellt als Beispiel die Widerstandsänderung des oberen Sensorelements sowie der verschiedenen Formen der rechten seitlichen Sensorelemente dar. In der Abbildung 5.20(a) ist das Signal des oberen Sensorelements dargestellt. Es ist hier zu sehen, dass die Widerstandsänderung bei allen Greifvorgängen vorhanden ist. Allerdings ist es anhand der resultierenden Signale schwer zu erkennen, welches Verhältnis zwischen der maximalen Widerstandsänderung und dem Durchmesser des Objektes besteht. Es ist aber durch den maximalen Wert der Widerstandsänderung jedes Vorganges zu erkennen, dass, je größer der Durchmesser des gegriffenen Objektes ist, desto größer ist die maximale Widerstandsänderung. Abbildung 5.20(b) zeigt, dass die Widerstandsänderung des kleinen Sensorelements bei den Greifvorgängen gering ist. Außerdem ist der Unterschied zwischen den maximalen Widerstandsänderungen zwischen allen Greifvorgängen sehr klein, aber noch erkennbar. In der Abbildung 5.20(c) sind die Signale des mittelgroßen Sensorelements gezeigt. Es ist hier auch zu sehen, dass je größer der Durchmesser des gegriffenen Objektes ist, desto größer ist die maximale Widerstandsänderung. Die Abbildung 5.20(d) veranschaulicht die Signale des großen Sensorelements. Es handelt sich dabei um schwingungsfreie Signale. Weiterhin ist der Greifpunkt für jeden Greifvorgang erkennbar, was bei anderen Sensorelementen schwer zu erkennen war.

Allgemein ist der Abbildung 5.20 auch zu entnehmen, dass sich der elektrische Widerstand bei der Greifbewegung ohne Objekt am wenigsten ändert. Des Weiteren ist die maximale Widerstandsänderung beim Greifvorgang proportional zu dem Durchmesser des gegriffenen Objektes.

Eine Statistik der Tests zur Erkennung der Objekte mit den unterschiedlichen Durchmessern ist in der Tabelle 5.8 dargestellt. Dabei wurde der Test an jedem Sensorelement von jedem Exemplar des Greifers dreimal durchgeführt. Diese Tabelle zeigt drei verschiedene Vergleichsmöglichkeiten. Im ersten wurden die Greifvorgänge mit allen

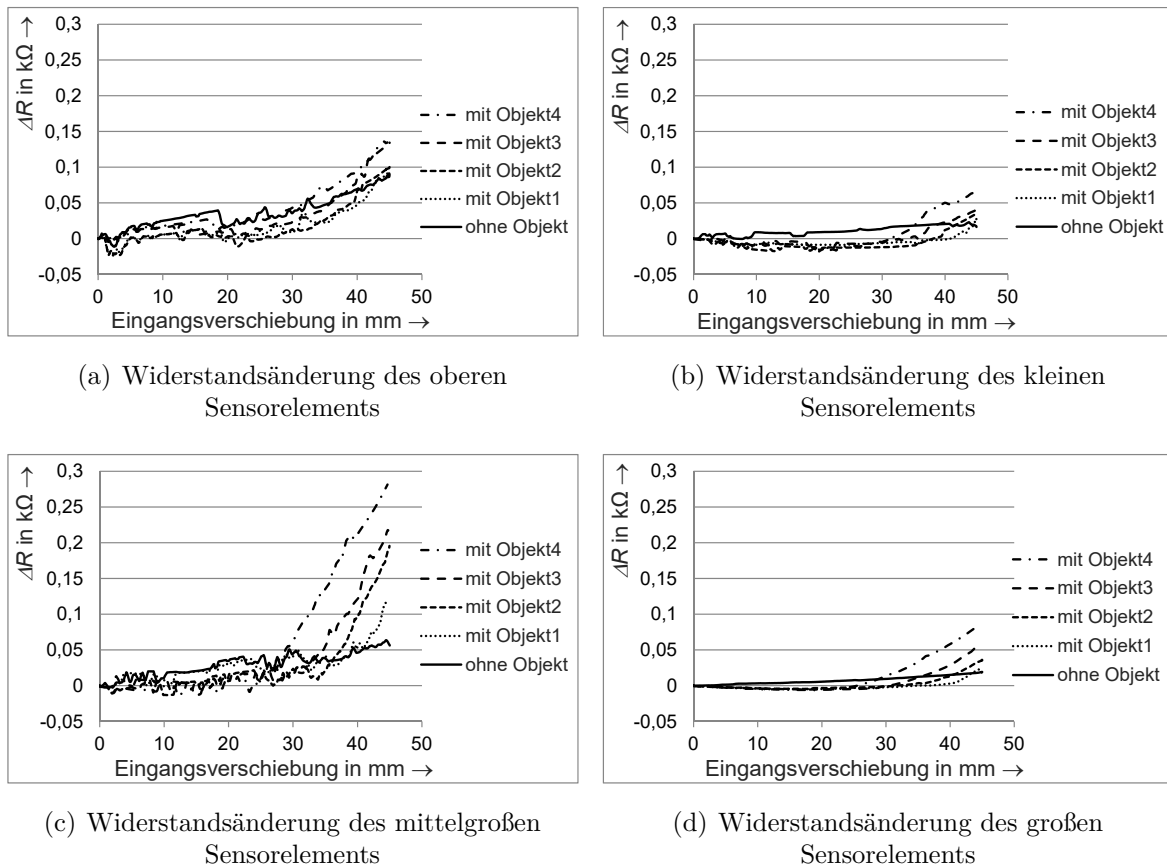


Abbildung 5.20: Widerstandsänderung eines Sensorelement jeder Form beim Greifen verschiedener Objekte mit unterschiedlichen Durchmesser; 26 mm, 31 mm, 35 mm und 42 mm, als Beispiel zur Erkennung von Objekten mit unterschiedlichen Durchmessern, die Eingangsverschiebung ist 45 mm bei jedem Greifvorgang

unterschiedlichen Objekten verglichen. Im zweiten und dritten wurden nur zwei Greifvorgänge mit zwei unterschiedlichen Objekten betrachtet. Dabei war der Unterschied der Durchmesser von den verwendeten Objekten 11 mm bzw. 5 mm. Wie es in der Tabelle zu sehen ist, waren nicht alle Tests erfolgreich. Wenn die Sensorsignale bei der Greifbewegung mit allen verwendeten Objekten verglichen werden, liefert das große Sensorelement die besten Ergebnisse mit 92%. Das heißt, in 92% der durchgeführten Tests können alle Greifvorgänge durch die maximale Widerstandsänderung unterschieden werden. Demgegenüber werden nur 39% erfolgreiche Tests von den oberen Sensorelementen geliefert. Es ist zu beachten, dass das mittelgroße Sensorelement trotz seiner hohen Empfindlichkeit im Vergleich zu den anderen Sensorelementen weniger erfolgreiche Tests als das große Sensorelement hat. Dies ist auf die Schwingungen im Signal

des mittelgroßen Sensorelements zurückzuführen. Zusätzlich zeigt die Tabelle 5.8, dass das große und mittelgroße Sensorelement 100% erfolgreiche Ergebnisse zur Erkennung der zwei unterschiedlichen Objekte mit dem Durchmesserunterschied von 11 mm sowie von 5 mm liefern. Demgegenüber ist die Wahrscheinlichkeit zur Unterscheidung der Objekte anhand des kleinen und oberen Sensorelements wegen der Schwingungen ihres Signals geringer.

Tabelle 5.8: Statistik der erfolgreichen Ergebnisse zur Erkennung von Objekten mit unterschiedlichen Durchmessern

Sensor- element	Anzahl der Tests	alle Objekte		zwei Objekte mit Durchmesserunterschied			
		erfolgreiche Tests	in Pro- zent	11 mm		5 mm	
				erfolgreiche Tests	in Pro- zent	erfolgreiche Tests	in Pro- zent
kleines Sensorele- ment	12	7	58%	10	83%	10	83%
mittelgroßes Sensorele- ment	12	8	67%	12	100%	12	100%
großes Sen- sorelement	12	11	92%	12	100%	12	100%
oberes Sen- sorelement	18	7	39%	17	94%	12	67%

Des Weiteren wurden die Messergebnisse anhand des mittelgroßen und großen Sensorelements für Objekte mit Durchmesserunterschied von 4 mm ausgewertet. Die Wahrscheinlichkeit zum Unterscheiden dieser Objekte sinkt bis auf 75% bzw. 92%. Die Schlussfolgerung aus den durchgeführten Untersuchungen ist, dass der sensorisierte Greifer anhand der Signale des mittelgroßen bzw. großen Sensorelements Objekte mit mindestens 5 mm Durchmesserunterschied unterscheiden kann.

Erkennung der Orientierung des Objektes mit unterschiedlichen Seitenlängen

Im vorliegenden Abschnitt wird der Greifer beim Greifen eines Objektes mit zwei unterschiedlichen Seitenlängen untersucht. Das Objekt ist in der Abbildung 5.21 dargestellt.

Die schmale Seite des Objektes hat eine maximale Abmessung von 25 mm. Dies bedeutet für den Greifvorgang, dass die Sensorelemente des Greifers sich ähnlich wie beim Greifen des Objektes mit dem kleinen Durchmesser verhalten. Demzufolge sind für die

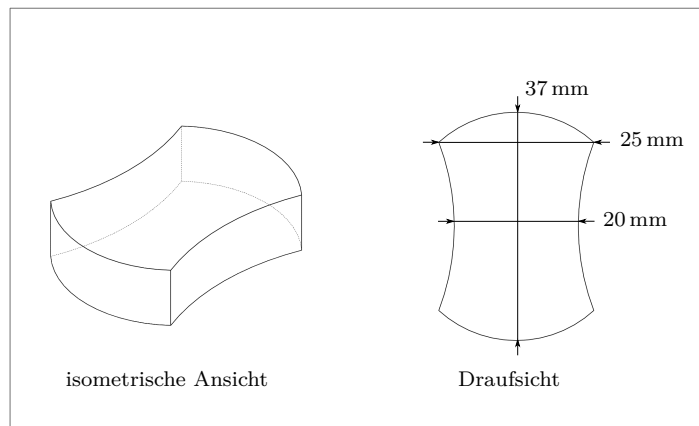


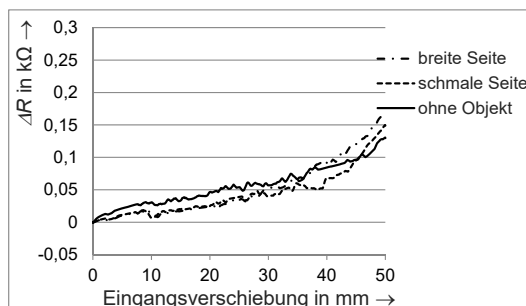
Abbildung 5.21: Form und Abmessungen des verwendeten Objektes mit unterschiedlichen Seitenlängen

eingestellte Eingangsverschiebung von 45 mm weniger erfolgreiche Tests bei der Erkennung zu erwarten. Dies wurde durch die Messergebnisse bestätigt. Deshalb wurde die Eingangsverschiebung auf 50 mm erhöht.

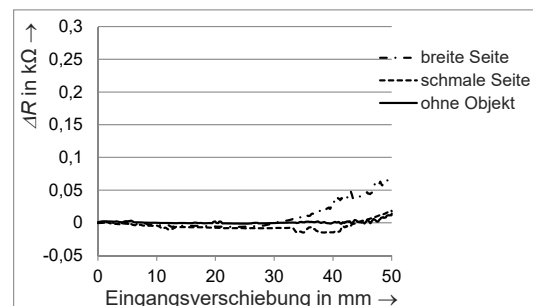
Der Test an dem sensorisierten Greifer besteht aus drei Schritten. Im ersten Schritt wurde der Greifer ohne das Vorhandensein des Objektes betätigt. In dem zweiten Schritt wurde das Objekt an der schmalen Seite gegriffen. Dann wurde es in dem letzten Schritt an der breiten Seite gegriffen. Dies wird in der Abbildung 5.16(c) und 5.16(d) dargestellt. Drei Exemplare des Greifers wurden untersucht. Der Test wurde dreimal für jedes Sensorelement durchgeführt, um die Ergebnisse zu vergleichen.

Abbildung 5.22 zeigt als Beispiel die Widerstandsänderung des oberen Sensorelements sowie der verschiedenen Formen der linken seitlichen Sensorelemente von den drei Exemplaren des Greifers. In der Abbildung 5.22(a) ist das Signal des oberen Sensorelements dargestellt. Es ist hier zu sehen, dass sich der elektrische Widerstand im Verlauf aller drei Greifvorgänge (Greifbewegung ohne Objekt, Greifen des Objektes an der schmalen Seite und Greifen des Objektes an der breiten Seite) gleich nach dem Beginn der Messung ändert. Außerdem ist die maximale Widerstandsänderungen während aller durchgeführten Tests beim Greifen des Objektes an der breiten Seite größer als beim Greifen an der schmalen Seite. Der Unterschied ist sehr gering. Abbildung 5.22(b) zeigt, dass die maximale Widerstandsänderung des kleinen Sensorelements während aller Greifvorgänge klein ist. Es ist jedoch zu erkennen, dass beim Greifen des Objektes an der breiten Seite die maximale Widerstandsänderung größer ist als beim Greifen an der schmalen Seite. Außerdem ist der Unterschied der maximalen Widerstandsänderungen zwischen den Greifvorgängen, dem Greifen an der schmalen Seite und

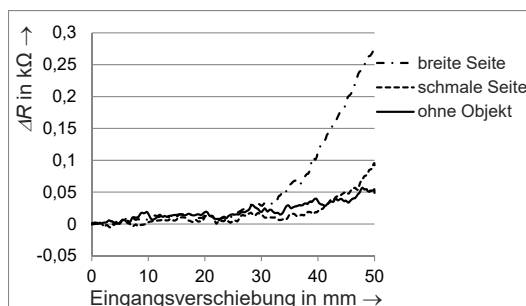
der Greifbewegung ohne Objekt sehr klein, aber erkennbar. In der Abbildung 5.22(c) zeigt das mittelgroße Sensorelement ein besseres Signal im Vergleich mit den anderen Sensorelementen. Der Unterschied der maximalen Widerstandsänderungen zwischen den drei Greifvorgängen ist hier deutlicher zu sehen. In der Abbildung 5.22(d) ist das Signal des großen Sensorelements veranschaulicht. Der Unterschied der maximalen Widerstandsänderungen aller drei Greifvorgänge ist hier auch deutlicher als beim kleinen und oberen, nicht aber beim mittelgroßen Sensorelement. Der Greifpunkt war bei allen Sensorelementen schwer zu erkennen.



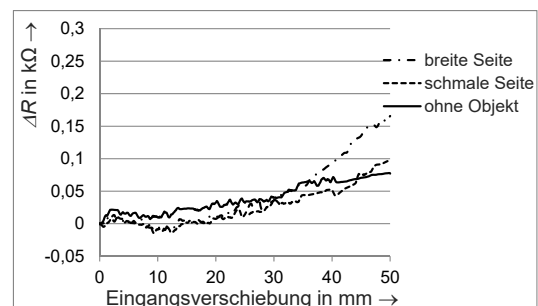
(a) Signal des oberen Sensorelements



(b) Signal des kleinen Sensorelements



(c) Signal des mittelgroßen Sensorelements



(d) Signal des großen Sensorelements

Abbildung 5.22: Widerstandsänderung eines Sensorelements jeder Form bei einem Test, der aus drei Schritten besteht; Greifbewegung ohne Objekt, Greifen des Objektes an der schmalen Seite und Greifen des Objektes an der breiten Seite, die Eingangsverschiebung ist 50 mm bei jedem Greifvorgang

Eine Statistik der erfolgreichen Ergebnisse zur Erkennung der Orientierung des Objektes mit unterschiedlichen Seitenlängen ist in der Tabelle 5.9 dargestellt. Diese Tabelle zeigt zwei verschiedene Vergleichsmöglichkeiten. Zum einen wurden die zwei Greifvorgänge mit dem Objekt an den beiden Seiten verglichen. Zum anderen wurde die

Greifbewegung ohne das Vorhandensein des Objektes zusätzlich zu den anderen zwei Greifvorgängen mitbetrachtet. Wie es in der Tabelle zu sehen ist, waren alle Ergebnisse zur Erkennung der Orientierung des Objektes erfolgreich. Wenn aber das Greifen ohne das Vorhandensein des Objektes beim Auswerten der Ergebnisse mitbetrachtet wurde, waren die Greifbewegungen ohne und mit dem Objekt an der schmalen Seite des Objektes nicht immer zu unterscheiden. Die Gründe dafür sind, nicht nur die Schwingungen des Signals, sondern auch die Kontaktfläche zwischen dem Objekt und dem Greiferfinger. Das Objekt lag nicht direkt an dem Sensorelement, was zu einem kleinen Spannungsunterschied zwischen den beiden Fällen (ohne und mit Objekt) führen kann und dementsprechend zu einem schwachen Signal (kein großer Unterschied der Widerstandsänderungen). Außerdem war die Eingangsverschiebung in Bezug auf den Greifvorgang ohne das Vorhandensein des Objektes ein bisschen zu groß. Dies führte dazu, dass die beiden Greiferfinger am Ende des Greifvorgangs zusammen gedrückt wurden, was wiederum eine Kraft auf die Sensorelemente ausüben und ein Signal der Widerstandsänderung liefern kann.

Tabelle 5.9: Statistik der erfolgreichen Messergebnisse zur Erkennung der Orientierung des Objektes mit unterschiedlichen Seitenlängen

Sensorelement	Anzahl der Tests	Erkennung nur der Orientierung		Erkennung des Vorhandenseins des an der schmalen Seite gegriffenen Objektes	
		erfolgreiche Tests	in Prozent	erfolgreiche Tests	in Prozent
kleines Sensorelement	6	6	100%	2	33%
mittelgroßes Sensorelement	6	6	100%	4	67%
großes Sensorelement	6	6	100%	2	33%
oberes Sensorelement	6	6	100%	1	17%

Als Schlussfolgerung muss die kleine Seitenlänge des Objektes größer sein, damit die Sensorelemente im Vergleich zum Greifen ohne Objekt bessere Signale liefern. Außerdem war das Verhältnis zwischen den beiden Seitenlängen groß genug, um den Unterschied zwischen dem Greifen an der schmalen Seite und an der breiten Seite einfach zu erkennen.

Weitere Untersuchungen

Drei Exemplare des Greifers wurden weiter untersucht, um den Einfluss der Lage des Objektes an den Greiferfingern auf die Sensorsignale zu ermitteln. Der Test besteht aus drei Schritten. Beim ersten Schritt wurde der sensorisierte Greifer ohne das Vorhandensein eines Objektes mit einer Eingangsverschiebung von 35 mm betätigt. Im zweiten Schritt wurde das Objekt mit dem Durchmesser von 35 mm an den Greifer-Fingerspitzen gegriffen. Anschließend wurde das Objekt an den seitlichen Sensorelementen gegriffen.

Da die Eingangsverschiebung ziemlich gering war, liegt das Objekt instabil zwischen den Greifer-Fingerspitzen. Eine größere Eingangsverschiebung führt zum Kippen der Greiferfinger und demzufolge zum Rutschen des Objektes. Aus diesen Gründen war der Greifvorgang beim zweiten Schritt oft erfolglos. Die Messergebnisse der erfolgreichen Greifvorgänge zeigen, dass die maximale Widerstandsänderung beim Greifen des Objektes an den seitlichen Sensorelementen größer als die beim Greifen des Objektes an den Fingerspitzen war. Diese Ergebnisse wurden anhand der Sensorsignale der großen sowie der mittelgroßen Sensorelemente geliefert. Im Gegensatz dazu weisen das kleine und das obere Sensorelement Unregelmäßigkeiten beim Vergleich der maximalen Widerstandsänderungen im Laufe der genannten Greifvorgänge auf. Außerdem zeigen die Messergebnisse, dass bei den meisten Tests ein ganz kleiner Unterschied zwischen der maximalen Widerstandsänderung beim Greifen des Objektes an den Greifer-Fingerspitzen und der beim Greifvorgang ohne Vorhandensein des Objektes besteht.

Die Schlussfolgerung ist, dass es besser ist, das Objekt an den seitlichen Sensorelementen zu greifen. Damit liegt das Objekt stabil zwischen den Greiferfingern und die Sensorelemente können durch eine größere Eingangsverschiebung mehr beeinflusst werden.

Schließlich wird ein Ausblick auf die Verbesserungsmöglichkeiten der Sensorelemente gegeben. Um bessere Ergebnisse durch das Sensorelement zu erhalten, soll sich die Kontaktierung des Sensorelements an einer Stelle, wo keine großen Belastungen entstehen, befinden. Dies kann die Schwingungen des Signals der Sensorelemente minimieren. Außerdem soll das Ansprechverhalten des Sensorelements auf den mechanischen Spannungsunterschied zwischen zwei unterschiedlichen Greifvorgängen ausreichend hoch sein. Aus diesen Gründen kann ein Sensorelement, welches die Teile mit der Nummer Eins, Acht und Sieben ersetzt, bessere Ergebnisse liefern. Die erste Kontaktstelle befindet sich an einer Seite des großen Sensorelements und die andere an der Seite des oberen Sensorelements, wo laut der Simulationsergebnisse die Spannungen klein sind

(siehe Abbildung 5.12). Eine andere Möglichkeit ist die Benutzung von einer nachgiebigen Kontaktierung, wie zum Beispiel nachgiebige Streifen aus dem leitfähigen Silikonkautschuk. Die nachgiebigen Streifen sollten außerhalb der Greiferstruktur mit dem Kupfernetz verbunden werden, um die Schwingung des Sensorsignals von den Sensorelementen zu minimieren und dementsprechend bessere Signale zu liefern.

5.3 Nachgiebige Gelenkverbindung mit inhärenter Sensorik

Die meisten Roboter besitzen Gelenke, die eine geringe Nachgiebigkeit aufweisen, um eine hohe Genauigkeit zu gewährleisten. Wenn es sich um die Mensch-Maschine-Schnittstelle oder Assistenzsysteme handelt, dann es ist wichtig, nachgiebige Gelenke zu verwenden. Dadurch kann die Kollisions- oder Verletzungsgefahr vermieden werden. Wenn eine solche Verbindung die Fähigkeit hat, Drehrichtung der Glieder während der Kollision zu bestimmen, wird es möglich, diese Kollision zu stoppen oder zumindest zu minimieren. Hier ist die Sensorik notwendig. Für die Realisierung können leitende Silikonkautschuke verwendet werden. Mithilfe von solchen Materialien können elastische und sensorische Eigenschaften in einem Element vereinigt werden. In dieser Arbeit wird eine nachgiebige Gelenkverbindung mit inhärenter Sensorik dargestellt. Die Sensorelemente bestehen aus elektrisch leitfähigem Silikonkautschuk und werden dank ihrer Eigenschaften anstelle von der Feder und dem Dämpfer eingesetzt. Da zwei Eigenschaften in einem Element integriert sind, wird das System zusätzlich zu seiner sensorischen Fähigkeit einen kompakten Aufbau aufweisen.

5.3.1 Entwicklung und Aufbau der nachgiebigen Gelenkverbindung mit der inhärenten Sensorik

Die eingeplante Gelenkverbindung soll eine Drehbewegung von einem Bauteil zum anderen ermöglichen. Um ihre Funktion geschickt zu erfüllen, muss sie einen speziellen Aufbau besitzen, welcher die elastischen Sensorelemente beinhaltet.

Die Abbildung 5.23 zeigt den Querschnitt der Gelenkverbindung für verschiedene mögliche Entwürfe. Die Variante (a) stellt eine Gelenkverbindung mit zwei Bauteilen, Innenteil (orange) und Außenteil (grün) dar. Zwischen diesen Teilen befinden sich sechs

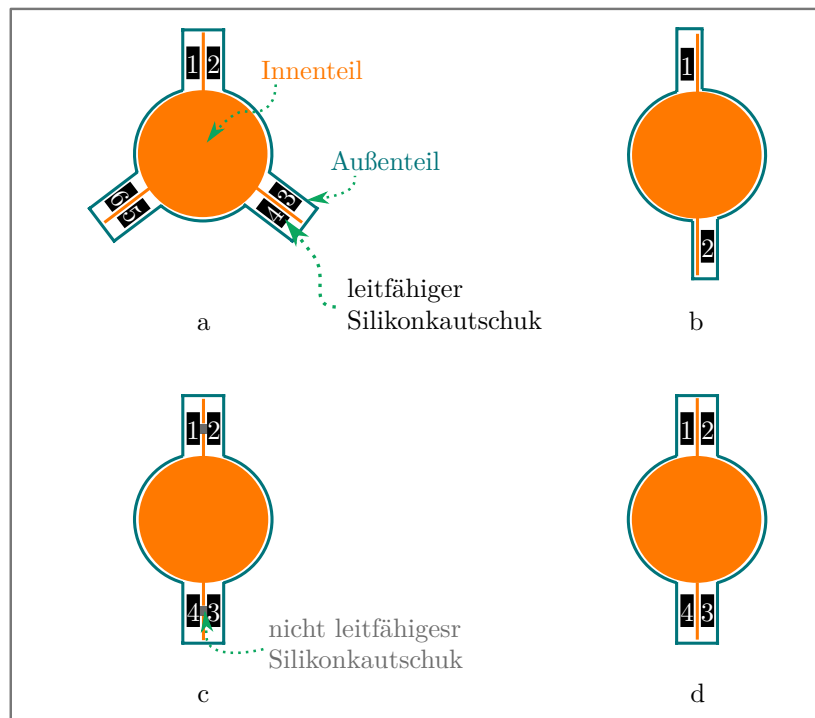


Abbildung 5.23: Querschnitt der Gelenkverbindung für verschiedene mögliche Entwürfe bestehend aus zwei Teilen, (a) mit sechs einzelnen Sensorelementen, (b) mit zwei Sensorelementen, (c) mit vier Sensorelementen, je zwei sind durch nicht leitfähigen Silikonkautschuk miteinander verbunden, (d) mit vier einzelnen Sensorelementen

elastische Sensorelemente. Durch Drehen des Innenteils im Uhrzeigersinn oder entgegen dem Uhrzeigersinn wird die Drehbewegung anhand der Sensorelemente zum Außenteil übertragen. Schließlich werden sich alle Teile in der gleichen Richtung drehen. Bei der Kollision wird die Drehung des Außenteils gesperrt. Währenddessen versucht sich das Innenteil weiter zu drehen. Dabei werden die Sensoren 1, 3, 5 oder 2, 4, 6 (richtungsabhängig) gedrückt. Als Folge wird die Stoßbewegung durch die elastischen Sensorelemente abgemildert und gleichzeitig liefern die Sensorelemente elektrische Signale. Die Verarbeitung dieser Signale ermöglicht, die Drehrichtung zu ermitteln und letztendlich die weitere Bewegung in der Stoßrichtung zu verhindern. Es ist jedoch bei dieser Variante zu beachten, dass sechs Sensorelemente erforderlich sind, um die Funktion der Gelenkverbindung zu erfüllen. Die Variante (b) stellt einen anderen Aufbau des Innenteils und des Außenteils dar. Außerdem werden hier nur zwei Sensorelemente 1, 2 verwendet. Allerdings kann hier die Gelenkverbindung nur beim Drehen des Innenteils entgegen dem Uhrzeigersinn ihre Funktion erfüllen. Die Varianten (c) und (d) zeigen einen anderen Entwurf der Gelenkverbindung, der vier Sensorelemente beinhaltet. Bei

diesen beiden Varianten ist die Funktion der Gelenkverbindung mit den Sensorelementen erfüllbar. In der Variante (c) sind je zwei Sensorelemente miteinander durch nicht leitfähigen Silikonkautschuk, welcher entlang einer Nut im Innenteil verläuft, verbunden. Dadurch werden die Sensorelemente besser positioniert und stabilisiert. Da das Sensorelement hier in der Mitte nicht gedrückt wird, ist es nicht auszuschließen, dass die Sensorsignale undeutlich sein können. Außerdem werden die Sensorelemente in zwei Schritten hergestellt, was den Fertigungsprozess aufwändiger macht. Aus diesen Gründen wurde sich für die einfachste Variante (d) mit den vier einzelnen Sensorelementen entschieden.

Entwurf und Fertigung der nachgiebigen Gelenkverbindung

Für die experimentellen Versuche und die Messungen an den Sensorelementen wurde ein System, das die nachgiebige Gelenkverbindung mit der inhärenten Sensorik enthält, entwickelt. Mithilfe des 3D-CAD-Programms (SOLIDWORKS) wurde das System mit der nachgiebigen Gelenkverbindung entworfen. Die Abbildung 5.24 zeigt die zwei hauptsächlichen Teile: Innenteil, Außenteil und dazwischen vier liegende Sensorelemente. Eine detaillierte Darstellung der Hauptteile mit ihren Abmessungen ist in der Abbildung A.3 und Abbildung A.4 im Anhang A zu sehen. Das gesamte System ist in der Abbildung 5.25 dargestellt. Hier wird das System im demontierten und montierten Zustand gezeigt. Dieses System besteht aus zwei Halterungen (1), um die Teile in einer Position zu halten, Innenteil (2) und Außenteil (3), Hebel zum Drehen des Innenteils (4), einer Unterlegscheibe (5), vier eingebetteten Sensorelementen (6), einer Nadel für die Bestimmung des Drehwinkels (7), einem Winkelmesser (8) und zwei Sicherungsringen zur axialen Lagesicherung der Achse des Innenteils (9). Das System wurde gefertigt und anschließend aufgebaut. Ein Bild des Systems im demontierten und montierten Zustand ist in der Abbildung 5.26 gezeigt. Die meisten Teile, zum Beispiel das Innenteil und das Außenteil der Gelenkverbindung, bestehen aus PVC. Dieses Material wurde ausgesucht, um die Sensorelemente voneinander elektrisch zu isolieren. Das ist wichtig für die richtige Erfassung der Signale von den Sensorelementen.

Die Drehbewegung der Gelenkverbindung kann durch einen Antrieb oder einfach durch einen Hebel, der mit dem Innenteil verbunden ist, gewährleistet werden. Das Außenteil wird mit Schrauben befestigt, um den Kollisionsfall zu simulieren. Im normalen Fall kann dieses Außenteil mit einem Antrieb (zum Beispiel ein Roboterarm) verbunden werden.

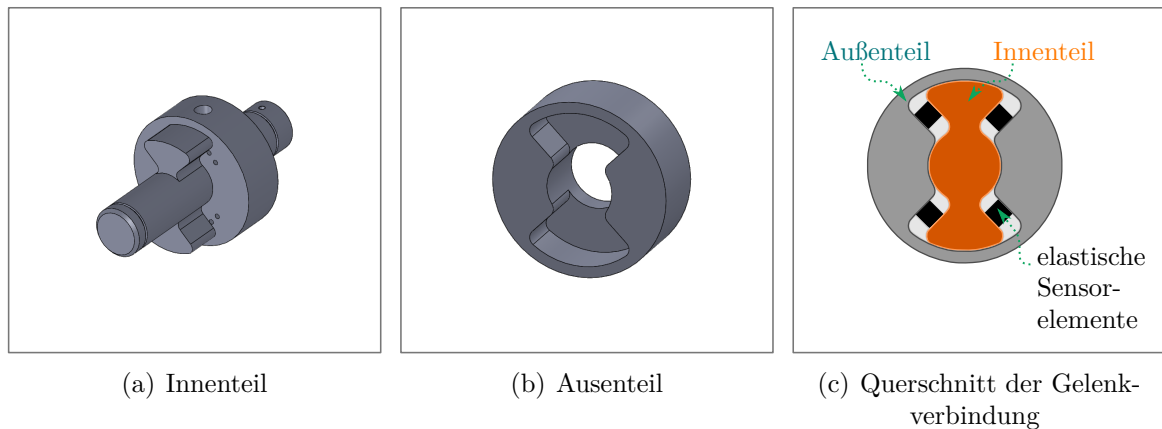


Abbildung 5.24: CAD-Modell von den Hauptteilen der nachgiebigen Gelenkverbindung

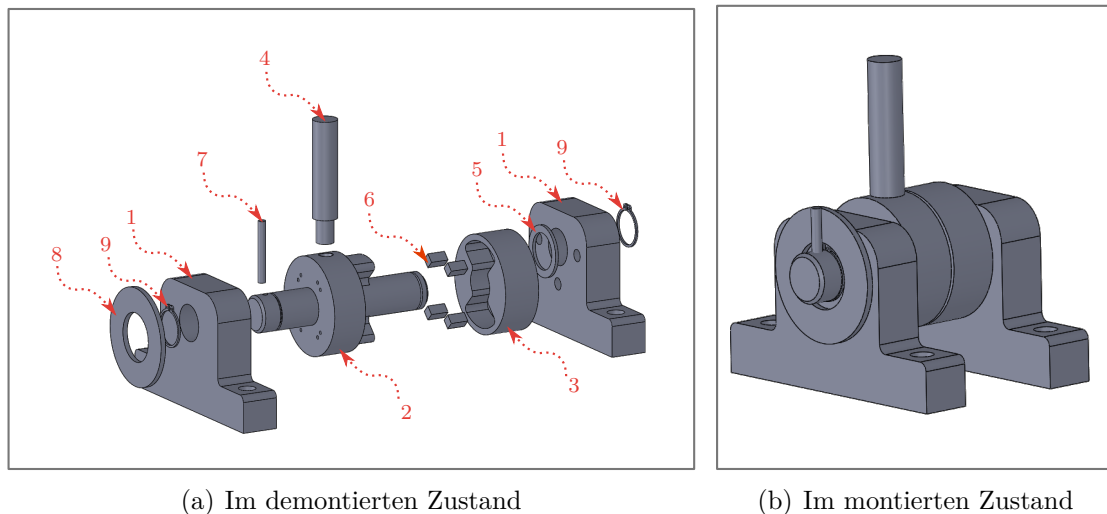


Abbildung 5.25: CAD-Modell der nachgiebigen Gelenkverbindung

Fertigung der elastischen Sensorelemente

Um eine einfache Konstruktion und einfache Fertigungsprozess der Sensorelemente zu erreichen, werden die Sensorelemente in Form eines Quaders hergestellt. Die Abmessungen von den Sensorelementen und der Gelenkverbindung wurden zusammen ausgesucht, indem die Sensorelemente vorkomprimiert in ihrer Position liegen. Der Grund für diese Bauweise ist die möglich resultierenden Restverformung nach einer Betätigung der Gelenkverbindung im Kollisionsfall, wie die Untersuchungen im Kapitel 4 gezeigt haben. Gleichzeitig sollen die Sensorelemente genügend Platz in der Gelenkverbindung für ihre weitere Dehnung in der Querrichtung unter der später entstehenden Kollisionskraft haben. Die Abmessungen der Sensorelemente sind folgende:

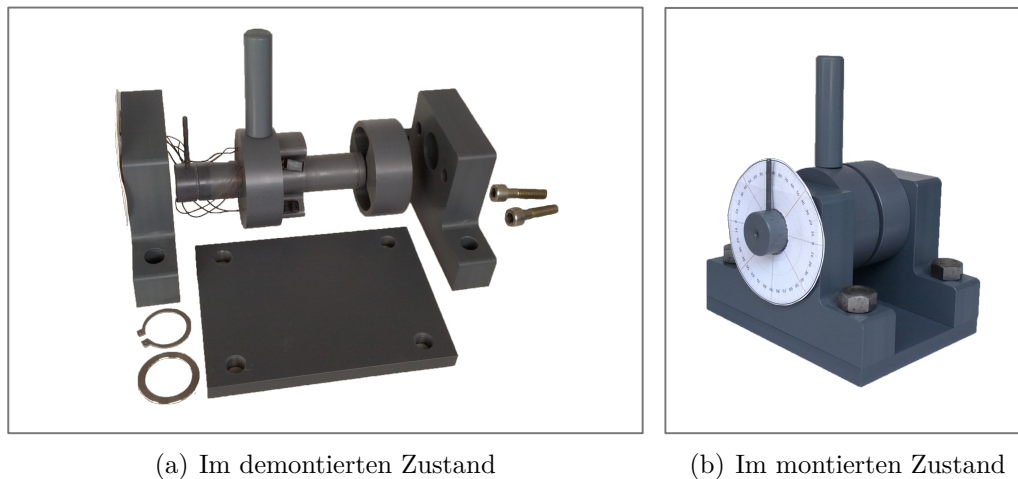


Abbildung 5.26: Das System mit der Gelenkverbindung

9 mm × 15 mm × 9 mm. Die leere Stelle in der Gelenkverbindung, wo die Sensorelemente angebracht werden sollen, hat die Abmessung von circa 12 mm × 20 mm × 8 mm. Wie hier zu sehen ist, werden die Sensorelemente in ihrem eingebauten Zustand um 1 mm zusammengedrückt.

Der Fertigungsprozess der Sensorelemente ist im Abschnitt 4.3.1 beschrieben. Für die Fertigung der Sensorelemente wurde ein Formwerkzeug konstruiert und hergestellt (siehe Abbildung 4.14). Das Material ELASTOSIL R 570/50 MH C1 sowie POWERSIL® 466 A/B VP wurde für die Fertigung der Sensorelemente verwendet, um die Funktionalität des Systems mit den beiden unterschiedlichen Sensorelementen (aus unterschiedlichen Materialien) getrennt zu überprüfen.

Aufbau der nachgiebigen Gelenkverbindung mit den Sensorelementen

Das Aufbauen der nachgiebigen Gelenkverbindung mit den Sensorelementen ist ziemlich einfach. Abbildung 5.27 zeigt den Aufbau des Systems mit einer seitlichen Ansicht. Als Erstes werden die Sensorelemente an ihre Position im Innenteil des Systems angebracht. Um die Sensorelemente in ihrer Position zu halten, werden sie auf dieses Teil angeklebt. Die Drähte werden durch die im Teil vorhandenen Bohrungen verlegt (siehe Abbildung 5.27(a)). Danach werden das Innenteil, das Außenteil und die dazwischen vorkomprimiert liegenden Sensorelemente zusammengebaut (siehe Abbildung 5.27(b)). Als nächstes wird die Gelenkverbindung mit einer Halterung befestigt (siehe Abbildung 5.27(c)). Schließlich werden alle zusätzlichen Teile in ihre Positionen angebracht. Abbildungen 5.27(d) zeigt die vollständig zusammengebaute, nachgiebige Gelenkverbindung mit den Sensorelementen in einer seitlichen Ansicht.

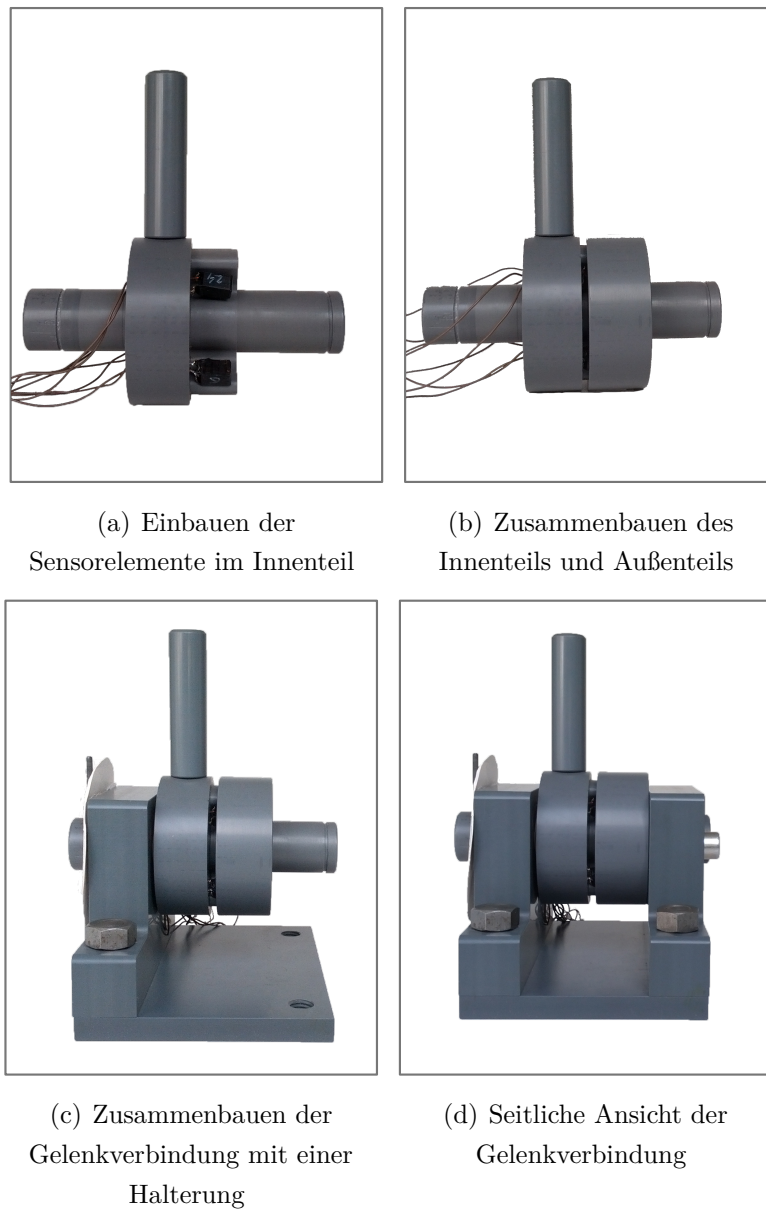


Abbildung 5.27: Aufbau der nachgiebigen Gelenkverbindung mit den Sensorelementen

5.3.2 Prinzip der Richtungsermittlung der nachgiebigen Gelenkverbindung mit der inhärenten Sensorik

Die elastischen Sensorelemente können die Drehrichtung der Gelenkverbindung bei der Kollision ermitteln. Um das Funktionsprinzip des Systems in einer einfachen Art und Weise darzustellen, wurde das Außenteil mit der Halterung zusammengeschraubt, sodass der Kollisionsfall simuliert werden konnte. Das Funktionsprinzip der Gelenk-

verbindung ist in der Abbildung 5.28 veranschaulicht. Der elektrische Widerstand der elastischen Sensorelemente ändert sich in Abhängigkeit von der mechanischen Beanspruchung (zum Beispiel, eine Kraft (F)). Im Fall des Silikonkautschuks ELASTOSIL R 570/50 MH C1 nimmt der elektrische Widerstand bei der Stauchung ab und steigt bei der Entlastung. Wie bereits erwähnt, werden die Sensorelemente im komprimierten Zustand eingebaut. Das heißt, wenn das Innenteil des Systems in eine Richtung gedreht wird und das Außenteil fixiert ist, werden zwei eingebettete Sensorelemente weiter komprimiert und die beiden anderen Sensorelemente entlastet. Die zwei belasteten Sensorelemente werden einen geringeren Widerstand als die anderen beiden entlasteten Sensorelemente aufweisen. Da die Position der Sensorelemente bekannt ist, kann die Drehrichtung der Gelenkverbindung mit einem Vergleich der Widerstandsänderung aller Sensorelemente ermittelt werden.

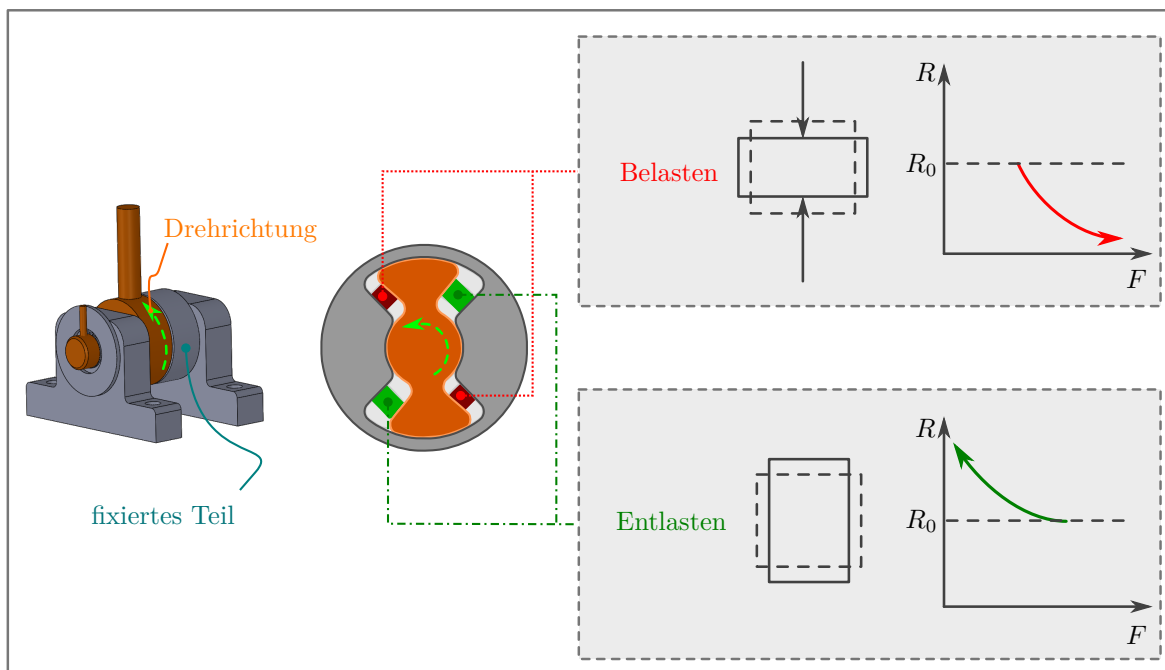


Abbildung 5.28: Funktionsprinzip der nachgiebigen Gelenkverbindung mit der inhärenten Sensorik im Fall das Material ELASTOSIL R 570/50 MH C1, R_0 ist der Widerstand des vorkomprimierten Sensorelements

Im Fall des Silikonkautschuks POWERSIL® 466 A/B VP wird das gleiche Prinzip verwendet. Der Unterschied ist hier das Verhalten der Sensorelemente unter der Druckbelastung. Wie es in dem Abschnitt 4.3.3 gezeigt wurde, nimmt der elektrische Widerstand der Sensorelemente aus POWERSIL® 466 A/B VP unter der Druckbelastung

im Gegensatz zu dem ELASTOSIL R 570/50 MH C1 zu und bei der Entlastung nimmt er ab. Deswegen ist der Verlauf der elektrischen Signale von diesen Sensorelementen umgekehrt zu erwarten.

5.3.3 Überprüfung der Funktionalität

Die elastischen Sensorelemente aus dem leitfähigen Silikonkautschuk wurden nur für Ermittlung der Drehrichtung der Gelenkverbindung bei der Kollision, verwendet. Da keine reproduzierbaren Signale anhand dieses Materials geliefert werden können (siehe Kapitel 4), ist die Kraftmessung nicht möglich.

Die aufgebaute Gelenkverbindung wurde experimentell überprüft. Dafür wurden die Spannungsabfälle an den vier Sensorelementen mithilfe eines selbst aufgebauten Spannungsteilers und der Multifunktions-Datenerfassungskarte (NI PCI-6221) erfasst. Für die Auswertung der erfassten Signale wurde ein Programm im Programmiersystem LabVIEW entwickelt. Mithilfe des entwickelten Programms können die belasteten Sensorelemente erkannt werden. Demzufolge wird die Drehrichtung der Gelenkverbindung ermittelt. Dafür ist folgender Algorithmus eingesetzt:

Vor dem Beginn der Datenerfassung werden Schwellwerte U'_{th} und U''_{th} festgelegt, wobei $U'_{th} > 0$ im Fall der Nutzung von POWERSIL® 466 A/B VP als Material der Sensorelemente und $U''_{th} < 0$ im Fall der Nutzung von ELASTOSIL R 570/50 MH C1 als Material der Sensorelemente sind. Die Schwellwerte sind von der Sensorempfindlichkeit abhängig.

Zu Beginn der Datenerfassung wird bei jedem neuen Test der Anfangswert des Spannungsabfalls (U_0) vor der Belastung neu gespeichert. Dies ist aufgrund des schwankenden Anfangswiderstands des Sensorelements und der unterschiedlichen Anfangswiderstände der Sensorelemente wichtig. Dann wird der Spannungsunterschied ($U_n - U_0$) zwischen dem aktuell erfassten Wert U_n und dem gespeicherten Anfangswert berechnet. Ist dieser Unterschied je nach Material größer als U'_{th} oder kleiner als U''_{th} , wird das Sensorelement als belastetes Sensorelement erkannt. Durch den Vergleich der Signale aller Sensorelemente in jedem Zeitpunkt mit der Vorkenntnis der Lage aller Sensorelemente wird die Drehrichtung der Gelenkverbindung beim Kollisionsfall ermittelt bzw. gezeigt.

Bei der experimentellen Untersuchungen wurde die Gelenkverbindung zunächst mit den Sensorelementen aus ELASTOSIL R 570/ 50 MH C1 getestet. Der durchgeführte

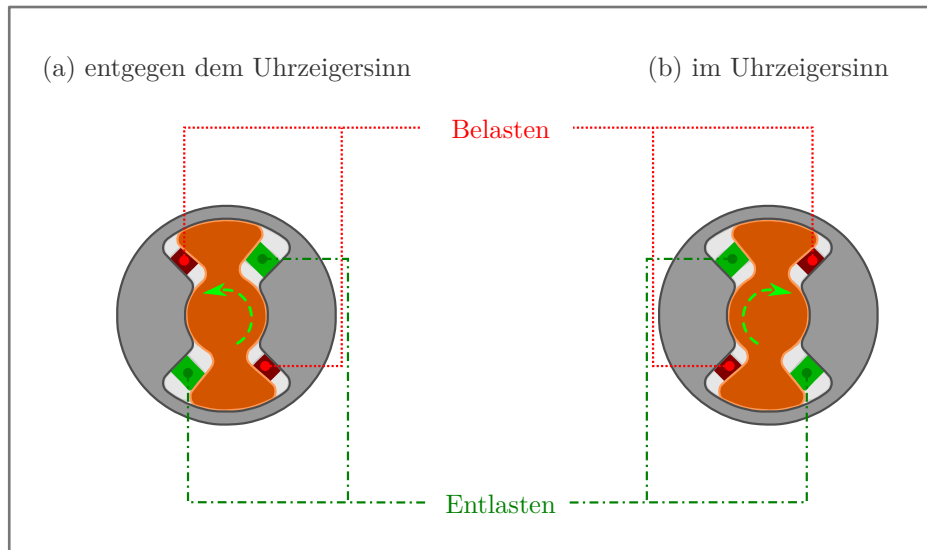
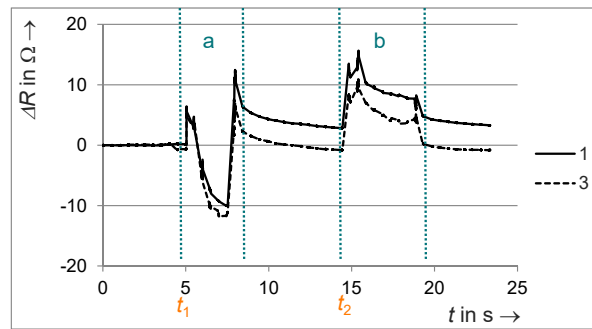


Abbildung 5.29: Schematische Darstellung eines Querschnitts der Gelenkverbindung in der Phase (a) und der Phase (b)

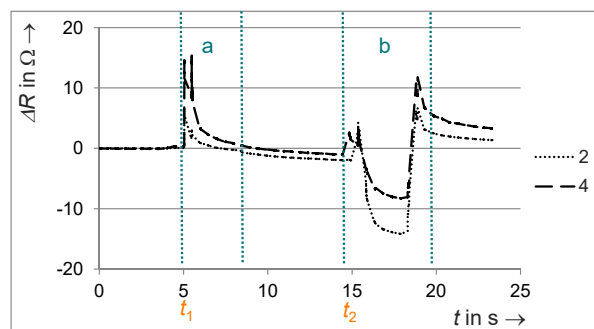
Test besteht aus zwei Phasen (a) und (b). Während das Innenteil der Gelenkverbindung in der Phase (a) entgegen dem Uhrzeigersinn gedreht wird, wird er in der Phase (b) im Uhrzeigersinn gedreht (siehe Abbildung 5.29). Der Kollisionsfall wird dabei durch die Fixierung des Außenteils der Gelenkverbindung simuliert, was die Rotation der Gelenkverbindung verhindert und gleichzeitig mehr Belastung auf die zu diesem Zeitpunkt unter Belastung stehenden Sensorelemente verursacht. Abbildung 5.30 zeigt den Verlauf des Tests und die dabei resultierenden Ergebnisse.

Wie es in der Abbildung 5.30(a) zu sehen ist, findet eine Kollision in der Phase (a) zum Zeitpunkt t_1 statt, dort werden die Sensorelemente 1 und 3 zunehmend belastet und ihre Widerstände nehmen nach einem kurzen Sprung ab. Gleichzeitig werden die Sensorelemente 2 und 4 entlastet. Dementsprechend nehmen ihre Widerstände zu (siehe Abbildung 5.30(b)). Nach dem Wegfall der Kollision kehren die Werte der Widerstände aller Sensorelemente zu annähernd gleichem Anfangswert zurück.

In der Phase (b) verhalten sich die vier Sensorelemente entgegengesetzt zum Verhalten in der Phase (a). Das heißt, bei der Kollision zum Zeitpunkt t_2 werden die Sensorelemente 1 und 3 entlastet und die Sensorelemente 2 und 4 belastet. Dementsprechend nehmen die Widerstände der ersten beiden Sensorelemente zu und der zweiten beiden Sensorelemente ab. Durch Auswertung der Sensorsignale mit dem bereits beschriebenen Algorithmus kann die Drehrichtung der Gelenkverbindung ermittelt werden (siehe Abbildung 5.31).



(a) Widerstandsänderung des ersten und dritten Sensorelements während des Tests



(b) Widerstandsänderung des zweiten und vierten Sensorelements während des Tests

Abbildung 5.30: Widerstandsänderung der Sensorelemente aus ELASTOSIL R 570/ 50 MH C1 beim Testen der Gelenkverbindung. Phase (a) des Tests: Drehung des Innenteils entgegen dem Uhrzeigersinn bei Fixierung des Außenteils, Haltezeit von ca. 5 s, dann Zurückbringen des Systems an die Ausgangsposition. Phase (b) des Tests: Drehung des Innenteils im Uhrzeigersinn, Haltezeit von ca. 5 s, dann Zurückbringen des Systems an die Ausgangsposition

Die Gelenkverbindung mit den Sensorelementen aus POWERSIL® 466 A/B VP wurde ebenso getestet. Die Messergebnisse sind in der Abbildung 5.32 dargestellt. Wie in der Abbildung 5.32(a) zu sehen ist, werden die Sensorelemente 1 und 3 in der Phase (a) bei der Kollision zum Zeitpunkt t_1 zunehmend belastet. Dementsprechend nehmen ihre Widerstände zu. Gleichzeitig werden die Sensorelemente 2 und 4 in der Phase (a) entlastet. Anders als erwartet nehmen ihre Widerstände im Gegensatz zu den Messergebnissen im Abschnitt 4.3.3 auch etwas zu (siehe Abbildung 5.32(b)). Nach dem Wegfall der Kollision kehren die Werte der Widerstände aller Sensorelemente zu annähernd gleichem Anfangswert zurück.

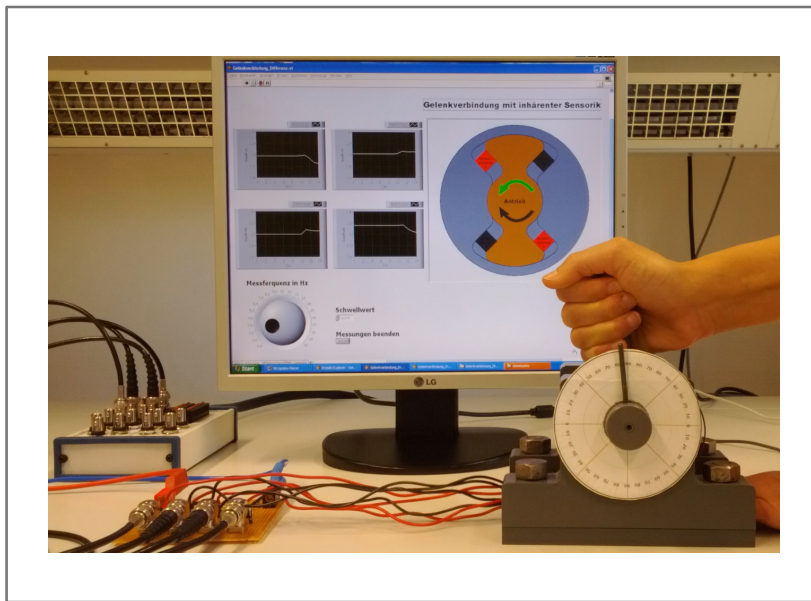
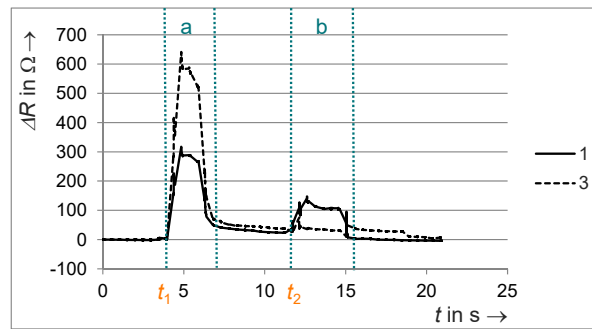


Abbildung 5.31: Test der Gelenkverbindung: Drehung der Gelenkverbindung entgegen dem Uhrzeigersinn bei der Fixierung des Außenteils. Auswertung der Sensorsignale zeigt die belasteten Sensorelemente aus ELASTOSIL R 570/ 50 MH C1 (rot) und die Drehrichtung (grün)

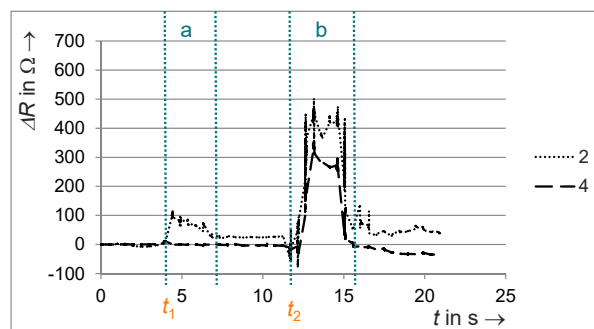
In der Phase (b) werden die Sensorelemente 1 und 3 entlastet und die Sensorelemente 2 und 4 belastet. Dabei verhalten sich die vier Sensorelemente entgegengesetzt zum Verhalten in der Phase (a). Die Drehrichtung der Gelenkverbindung kann durch die Auswertung der Sensorsignale mit dem bereits beschriebenen Algorithmus ermittelt werden.

Die entwickelte Gelenkverbindung hat einige Nachteile wie die geringe Nachgiebigkeit aufgrund der vorkomprimierten Sensorelemente gezeigt. Außerdem sinkt der Widerstand der vorkomprimierten Sensorelemente unter langdauernder Belastung ab, was die Festlegung des Schwellwerts im Fall des Materials ELASTOSIL R 570/ 50 MH C1 erschwert. Hinzu zeigt die Entlastungsphase der Sensorelemente eine Schwierigkeit bei der Definition des Schwellwerts im Fall des Materials POWERSIL® 466 A/B VP, da der elektrische Widerstand bei der Entlastung sowie bei der Belastung der Sensorelemente steigt.

Schließlich wird ein Ausblick auf die Verbesserungsmöglichkeiten der nachgiebigen Gelenkverbindung gegeben. Da nur die Signale der belasteten Sensorelemente zur Ermittlung der Drehrichtung ausreichen und um gleichzeitig die bereits genannten Nachteile zu beheben, ist es zu empfehlen, die Sensorelemente entlastet in die Gelenkverbindung einzubauen. Außerdem kann eine neue Form des Sensorelements wie zum Beispiel ein



(a) Widerstandsänderung des ersten und dritten Sensorelements während des Tests



(b) Widerstandsänderung des zweiten und vierten Sensorelements während des Tests

Abbildung 5.32: Widerstandsänderung der Sensorelemente aus POWERSIL® 466 A/B VP beim Testen der Gelenkverbindung. Phase (a) des Tests: Drehung des Innenteils entgegen dem Uhrzeigersinn bei Fixierung des Außenteils, Haltezeit von ca. 5 s, dann Zurückbringen des Systems an die Ausgangsposition. Phase (b) des Tests: Drehung des Innenteils im Uhrzeigersinn, Haltezeit von ca. 5 s, dann Zurückbringen des Systems an die Ausgangsposition

Quader mit einem zylindrischen Hohlraum die Nachgiebigkeit des Systems verbessern. Es ist mit solchen Sensorelementen zu erwarten, dass sich die innere zylindrische Wandung des Sensorelements unter Belastung kontaktiert. Dabei kann das Sensorelement eine deutliche elektrische Widerstandsänderung liefern. Des Weiteren wird eine Möglichkeit zur Vereinfachung der Gelenkverbindung gegeben, nämlich eine Gelenkverbindung mit zwei Teilen, Außenteil und Innenteil, und mit nur zwei Sensorelementen. Dies vereinfacht das Miniaturisieren des Systems und gleichzeitig das Auswerteprogramm, da nur zwei Signale der Sensorelemente erfasst und verarbeitet werden müssen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Neben der Untersuchung der sensorischen Eigenschaften der elektrisch leitfähigen Silikonkautschuke war die Erforschung der Einsatzmöglichkeiten genannter Materialien am Beispiel von nachgiebigen Systemen, die im Bereich der Robotik von Interesse sind, das Hauptziel der vorliegenden Arbeit. Zum Erreichen dieses Ziels war es nötig, das Verhalten des leitfähigen Silikonkautschuks unter den mechanischen Beanspruchungen zu ermitteln, die Lösungen zur Realisierung der sensorisierten nachgiebigen Systeme zu diskutieren und anschließend zu überprüfen. Die durchgeführten Arbeiten sowie die daraus gewonnen Untersuchungsergebnisse sind hier zusammengefasst.

In dieser Arbeit wurden verschiedene Sensor-Proben aus den elektrisch leitfähigen Materialien ELASTOSIL R 570/50 MH C1 sowie POWERSIL® 466 A/B VP unter Zug- und Druckbelastung untersucht. Dabei wurden die Materialien verschiedenen Belastungen mit zwei unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten ausgesetzt. Dadurch konnte das elektrische Verhalten dieser Materialien unter diesen mechanischen Beanspruchungen charakterisiert werden. Mithilfe dieser Untersuchungen konnten folgende Ergebnisse erzielt werden:

- Bei der steigenden Zugbelastung zeichnet sich das Material ELASTOSIL R 570/50 MH C1 durch das Ansteigen des elektrischen Widerstands bis zu einem bestimmten Punkt aus. Danach nimmt der Widerstand wieder ab. **Im Unterschied zu dem ELASTOSIL R 570/50 MH C1 nimmt der Widerstand des Materials POWERSIL® 466 A/B VP mit der steigenden Zugbelastung stetig zu.**
- Der Arbeitsbereich des Materials ELASTOSIL R 570/50 MH C1 für die Dehnung, wo der Widerstand unter Zugbelastung immer weiter steigt, ist kleiner als der Arbeitsbereich des Materials POWERSIL® 466 A/B VP.
- Bei der Zugbelastung steigt der Arbeitsbereich des Materials ELASTOSIL R 570/50 MH C1 mit der Abnahme der Prüfgeschwindigkeit.

- **Je kleiner die Prüfgeschwindigkeit bei der Zugbelastung ist, desto geringer sind die Widerstandsänderung und die Hysterese.**
- Mit steigender Zyklenzahl wird der Widerstandswert des Materials ELASTOSIL R 570/50 MH C1 für alle Prüfgeschwindigkeiten immer kleiner und die Kurven liegen dichter beieinander.
- Eine Restverformung wurde nach der Belastung der beiden Materialien ELASTOSIL R 570/50 MH C1 und POWERSIL® 466 A/B VP beobachtet, daher ist die Verwendung der Sensorelemente im vorgespannten Zustand wichtig.
- Unter der Druckbelastung sinkt der Widerstand des Materials ELASTOSIL R 570/50 MH C1 ab. **Im Gegensatz dazu zeichnet sich das Material POWERSIL® 466 A/B VP bei der Druckbelastung durch einen steigenden elektrischen Widerstand aus.**
- **Je kleiner die Prüfgeschwindigkeit bei der Druckbelastung ist, desto geringer sind die Widerstandsänderung und die Hysterese im Fall des Materials POWERSIL® 466 A/B VP.** Es besteht aber keine deutliche Einwirkung von der Prüfgeschwindigkeit auf die Widerstandsänderung im Fall des Materials ELASTOSIL R 570/50 MH C1.
- Unter der Druckbelastung weisen die beiden Materialien einen großen Arbeitsbereich auf.
- **Die beiden Materialien sind für die Anwendung, bei der die qualitative Auswertung der Signale von Interesse sind, geeignet.**

Nach Abschluss der Materialuntersuchungen wurden insgesamt drei nachgiebige Systeme mit sensorischer Fähigkeit entwickelt, hergestellt und getestet. Zuerst wurde eine einfache taktile Struktur entwickelt. Dieses System zielt darauf, dass die Einsatzmöglichkeit des Materials ELASTOSIL R 570/50 MH C1 als Sensorelement bewiesen werden kann. Unterschiedliche Messungen wurden an dem System durchgeführt. **Durch die Auswertung der Sensorsignale wurde das Potenzial des Materials als Sensorelement zur groben Bestimmung der Druckstelle belegt.**

Ein weiterer Abschnitt der vorliegenden Arbeit stellt einen nachgiebigen Greifer mit dessen Sensorisierung dar. **In der Greiferstruktur soll das Sensorelement an dem Bauteil, bei dem der Spannungsunterschied zwischen zwei zu unterscheidenden Vorgängen am größten ist, integriert werden.** Verschiedene Teile

der Greiferstruktur wurden für die Sensorisierung des Greifers mithilfe der zahlreichen FEM-Simulationen untersucht. Die Auswertung der Simulationen zeigt, dass die Teile, die einen direkten Kontakt mit dem Objekt haben, den größten Spannungsunterschied aufweisen. Das Teil, welches sich in der Mitte des Greiferfingers befindet, wurde beim Greifen des Objektes bei unterschiedlichen Lagen ausreichend beansprucht. Dies ist auf seine Position in der Nähe der entstehenden Druckstelle zurückzuführen. Danach wurden die Greifer mit unterschiedlichen Sensorelementen hergestellt, um das reale Verhalten testen zu können. Die Sensorelemente wurden aus POWERSIL® 466 A/B VP gefertigt. Die an den Greifern durchgeführten Tests und deren Auswertung ergeben:

- **Erkennung des Vorhandenseins eines Objektes ist möglich:**
 - ab einer bestimmten Objektgröße,
 - unter gleichen Bedingungen bei allen Vorgängen (Greifen mit und ohne Objekt).
- **Erkennung der Form oder der Größe von Objekten ist möglich:**
 - unter gleichen Bedingungen bei allen Vorgängen (Greifen verschiedener Objekte mit unterschiedlichen Formen bzw. Größen),
 - bei einem bestimmtem Größenunterschied zwischen den Objekten,
 - mit bekannten Objekten.
- Die Sensorisierung des Greifers kann durch ein Sensorelement oder zwei symmetrisch liegende Sensorelemente realisiert werden.
- Der Greifer kann als Außen- oder Zwischengreifer angewendet werden.

Der sensorisierte nachgiebige Greifer weist dank der Multifunktionalität der hier eingesetzten, nachgiebigen Sensorelemente einen kompakten Aufbau auf. Diese Multifunktionalität zeichnet sich dadurch aus, dass die eingebetteten, nachgiebigen Sensorelemente gleichzeitig Teile der Struktur sind und Informationen über den Greifprozess liefern können. **Außerdem wurde anhand des Greifers gezeigt, dass ein vollständiges, nachgiebiges System mit nachgiebigen Sensorelementen realisiert werden kann.**

Im Nachgang wurde eine nachgiebige Gelenkverbindung mit inhärenter Sensorik ausgelegt. Die Sensorelemente der Gelenkverbindung wurden aus den zwei leitfähigen Materialien ELASTOSIL R 570/50 MH C1 sowie POWERSIL® 466 A/B VP hergestellt

und in dem System eingesetzt. Schließlich wurde die Gelenkverbindung getestet und die Sensorsignale ausgewertet. Dadurch konnte gezeigt werden:

- **Die Sensorelemente können dank der Materialeigenschaften des Silikonkautschuks zusätzlich die Aufgaben einer Feder und eines Dämpfers übernehmen.**
- **Durch die geeignete Anordnung der Sensorelemente in der Gelenkverbindung ist das Detektieren der Drehrichtung bei einem Kollisionsfall möglich.**

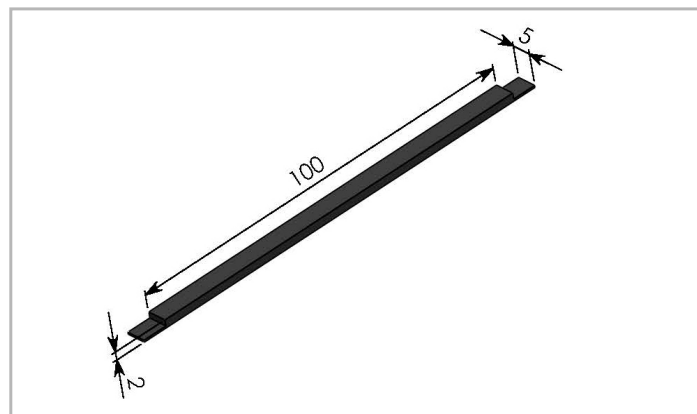
Es gibt jedoch ein Verbesserungspotenzial für die hier vorgestellten Systeme, welches durch weitere Forschungsarbeiten erschlossen werden kann. Diese Forschungsarbeiten werden im Folgenden aufgezeigt:

- Systematische Untersuchung des Einflusses der elektrischen Kontaktierung auf den Verlauf des Sensorsignals.
- Untersuchung neuer Sensorelemente mit Berücksichtigung der elektrischen Kontaktierung für den nachgiebigen Greifer.
- Betrachtung neuer Formen der Sensorelemente für die Gelenkverbindung.
- Untersuchung der Gelenkverbindung mit Sensorelementen unterschiedlicher Shore-Härte.

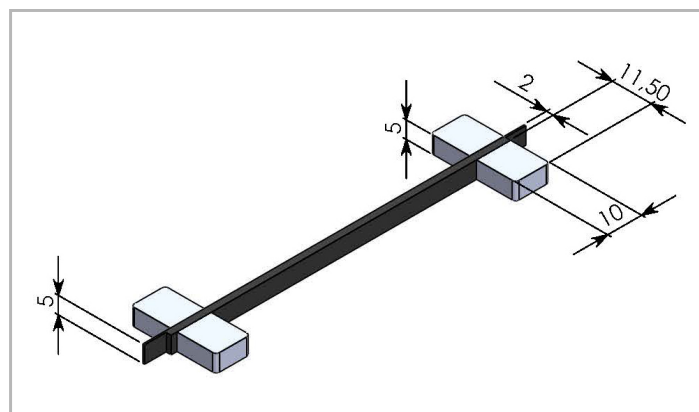
Anhang

A Geometrische Abmessungen

A.1 Abmessungen der Sensor-Probe für die Untersuchungen unter der Zugbelastung



(a) Abmessungen des sensiblen Teils



(b) Abmessungen des sensiblen Teils und eines Teils für die Halterung

Abbildung A.1: Abmessungen der Sensor-Probe für die durchgeführten Zugversuche, die Abmessungen sind in [mm]

A.2 Die wichtigen Abmessungen des entwickelten Greifers und der Sensorelemente

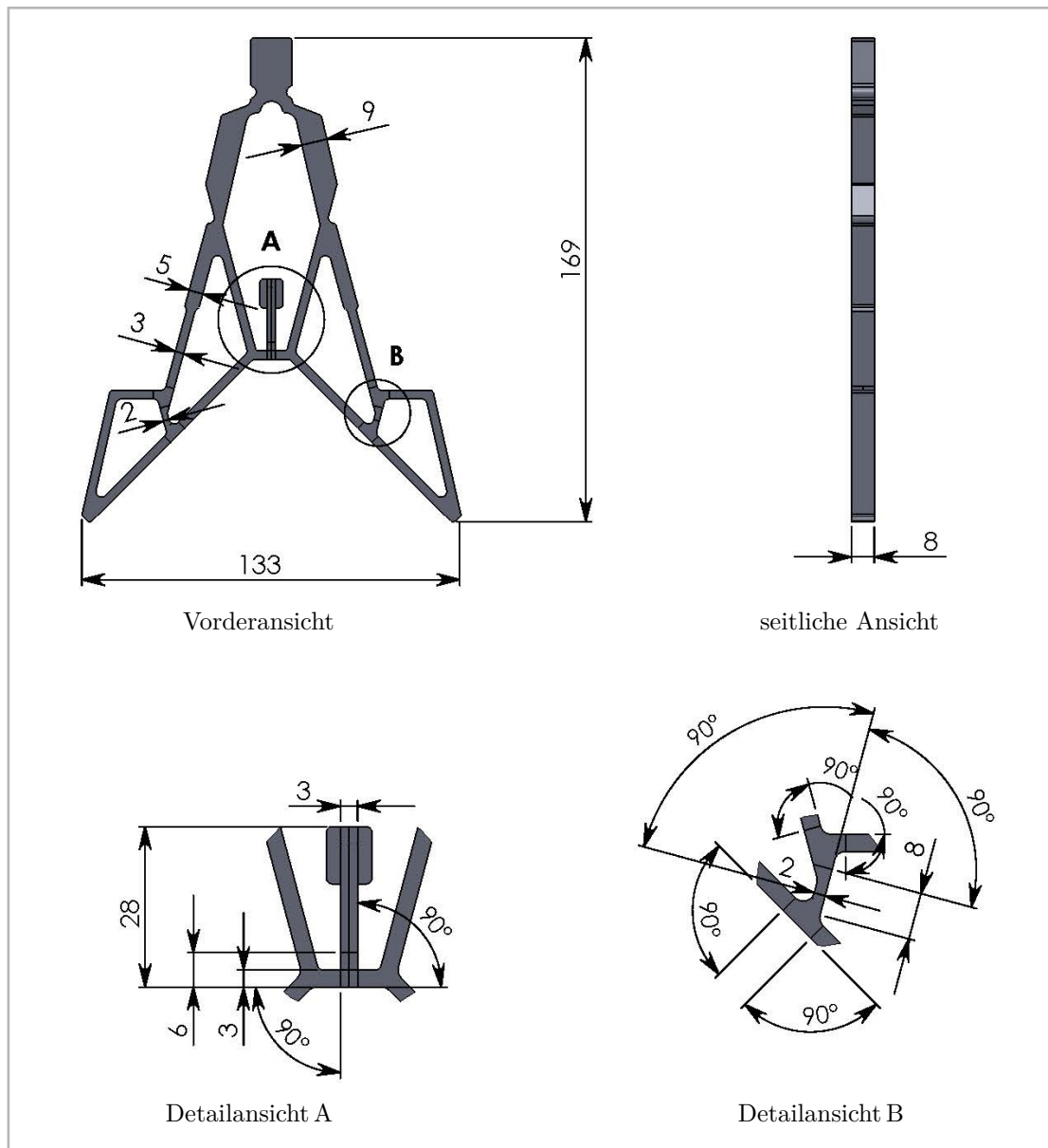


Abbildung A.2: Die wichtigen Abmessungen des Greifers [123] und der Sensorelemente, die Abmessungen sind in [mm]

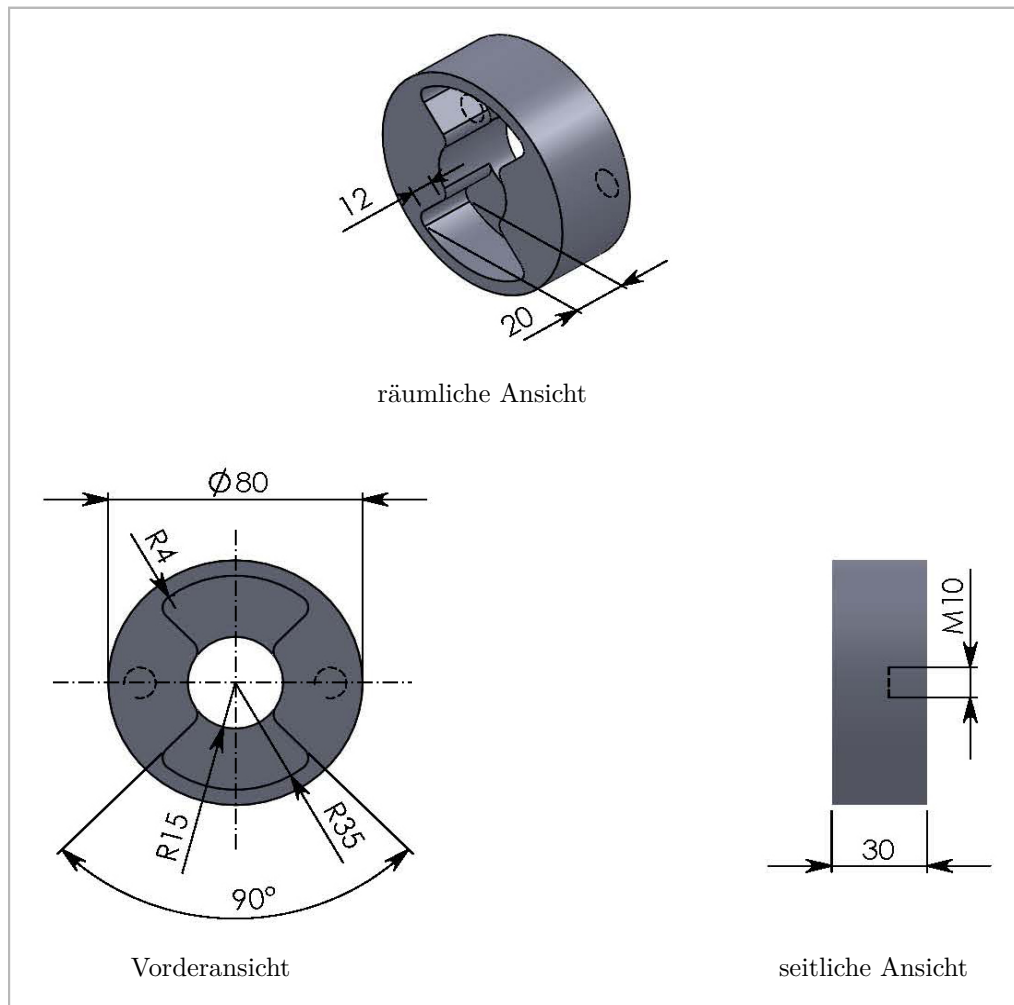


Abbildung A.4: Die wichtigen Abmessungen des Außenteils der Gelenkverbindung, die Abmessungen sind in [mm]

Literaturverzeichnis

- [1] *IFToMM dictionaries*. @ONLINE, <http://iftomm.3me.tudelft.nl/1031/03.html>, Abruf: Januar 2016.
- [2] L. Zentner. *Nachgiebige Mechanismen*. De Gruyter Oldenbourg, 2014.
- [3] J. Volmer. *Getriebetechnik: koppelgetriebe*. Verlag Technik, 1979.
- [4] S. Linß. *Ein Beitrag zur geometrischen Gestaltung und Optimierung prismatischer Festkörpergelenke in nachgiebigen Koppelmechanismen*. PhD thesis, Technische Universität Ilmenau, 2015.
- [5] G. Bögelsack. Nachgiebige mechanismen in miniaturisierten bewegung. In *Ninth World Congress on the Theory of Machines and Meechanisms, IFToMM*, Italy, 1995.
- [6] A. Fricke. *Stoffpaariges Gelenk für Drehbewegungen mit kleiner Amplitude*. PhD thesis, Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt, 1986.
- [7] M. Voit, T. Schary, and H.F. Schlaak. Kräfte fein dosiert - dimensionierung einer parallelführung mit festkörpergelenken und optimaler krafteinleitung der aktoren. *F-Ö-M-Mechatronik*, 111:26–29, 2003.
- [8] A. Midha, T.W. Norton, and L.L. Howell. On the momenclature and classification of compliant mechanisms: The components of mechanisms. *ASME, Journal of Mechanical Design*, 116(1):270–279, 1994.
- [9] G. Bögelsack. Complaint mechanisms-structures for miniaturization and terminologie. In *Proc.Fac.Colloquium on Theory of Machines and Mechanisms*, pages 47–52, 1994.
- [10] Larry L Howell and Ashok Midha. Parametric deflection approximations for end-loaded, large-deflection beams in compliant mechanisms. *ASME, Journal of Mechanical Design*, 117(1):156–165, 1995.

- [11] L. Zentner. Untersuchung und entwicklung nachgiebiger strukturen basierend auf innendruckbelasteten röhren mit stoffschlüssigen gelenken. Habilitationsschrift, Technische Universität Ilmenau, 2002.
- [12] L. Zentner. Klassifizierung nachgiebiger mechanismen und aktuatoren. In *Mechanismentechnik in Ilmenau, Budapest und Niš*, pages 3–12, 2012.
- [13] L. Zentner. Nachgiebige mechanismen. Lehrunterlagen; TU Ilmenau, Fachgebiet Mechanismentechnik, 2012.
- [14] V. Parlaktaş and E. Tanık. Partially compliant spatial slider–crank (RSSP) mechanism. *Mechanism and Machine Theory*, 46(11):1707–1718, 2011.
- [15] L.L. Howell. *Compliant mechanisms*. John Wiley & Sons. INC, 2001.
- [16] L. Zentner, V. Böhm, K. Zimmerman, and A. Huba. Ein beitrag zu nichtkonventionellen fluidisch angetriebenen monolithischen nachgiebigen aktoren. In *Mechanical engineering from macro to nano : 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium*, pages 375–376, 2005.
- [17] G. Christen and H. Pfefferkorn. Nachgiebige mechanismen - aufbau, gestaltung, dimensionierung und experimentelle untersuchung. In *VDI-Getriebetagung: Kurvengetriebe, Koppelgetriebe, gesteuerte Antriebe*, 1998.
- [18] http://www.mechatronik-portal.de/mechatronik_definition.php, Abruf: November 2012.
- [19] J. Frühauf. *Werkstoffe der Mikrotechnik lehrbuch für ingenieure*. Carl Hanser, 2005.
- [20] H. Janocha. *Adaptronics and Smart Structures; Basics, Materials, Design and Applications*. Springer, Berlin Heidelberg, 2007.
- [21] S. Griebel. Numerische analyse der belastungen des humanen knieknorpels und bewertung adaptronischer bauelemente hinsichtlich mechanischer stimulierung des knorpels. Praktikumsbericht, 2006.
- [22] K. Linnemann. *Magnetostriktive und piezoelektrische Materialien: konstitutive Modellierung und Finite-Elemente-Formulierung*. PhD thesis, Universität Karlsruhe, 2008.
- [23] A.J Schmidt. 6.2 Piezoprodukte – ein kleiner effekt mit großer wirkung. In *Technische Keramik in der Praxis; Seminarreihe*, pages 481–521. 2003.

- [24] H. Schaumburg. *Sensoren. (Reihe "Werkstoffe und Bauelemente der Elektrotechnik")*. B.G. Teubner Stuttgart, 1992.
- [25] I.D. Mayergoyz and G. Engdahl. *Handbook of giant magnetostrictive materials*. Elsevier, 1999.
- [26] E. Du Tremolet de Lacheisserie. *Magnetostriction: theory and applications of magnetoelasticity*. CRC Press, Boca Raton Florida, 1993.
- [27] H. Janocha. Application potential of magnetic field driven new actuators. *Sensors and Actuators A: Physical*, 91(1):126–132, 2001.
- [28] E. Villari. Ueber die aenderungen des magnetischen moments, welche der zug und das hindurchleiten eines galvanischen stroms in einem stabe von stahl oder eisen hervorbringen. *Annalen der Physik*, 202(9):87–122, 1865.
- [29] E. Hornbogen. *Werkstoffe: Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen*. Springer-Verlag, 2007.
- [30] E. Schiessle. *Sensortechnik und Meßwertaufnahme*. Vogel, 1992.
- [31] P. Hauptmann. *Sensors : principles and applications*. Carl Hanser, 1993.
- [32] H.R. Tränkler. *Taschenbuch der Meßtechnik: mit Schwerpunkt Sensortechnik*. R. Oldenbourg Verlag GmbH, Münschen, 1996.
- [33] H. Schaumburg. *Polymere. (Reihe "Werkstoffe und Bauelemente der Elektrotechnik")*. B.G. Teubner Stuttgart, 1996.
- [34] H.J. Bargel and G. Schulze. *Werkstoffkunde*. VDI Verlag, 1994.
- [35] T. Brock, M. Groteklaes, and P. Mischke. *Lehrbuch der Lacktechnologie*. Vincentz, 1998.
- [36] B. Heine. *Einführung in die Polymertechnik: Leitfaden für Studium und Praxis*. expert verlag, 1998.
- [37] R. P. Gieler and A. Dimmig-Osburg. *Kunststoffe für den Bautenschutz und die Betoninstandsetzung*. Springer, 2006.
- [38] G.W. Ehrenstein. *Polymer Werkstoffe : Struktur - Eigenschaften - Anwendung*. Carl Hanser, 1999.
- [39] G.W. Ehrenstein. *Polymer-Werkstoffe*. Carl Hanser, 1978.

- [40] K. Bergmeister. *Kohlenstofffasern im konstruktiven Ingenieurbau*. Ernst & Sohn, 2003.
- [41] H. Engel and C.A. Kestner. *Metallfachkunde 1*. B.G. Teubner Stuttgart, 1990.
- [42] H. Domininghaus, P. Elsner, P. Eyerer, and T. Hirth. *Kunststoffe Eigenschaften und Anwendungen*. Springer, 2008.
- [43] Wacker. *Fest- und Flüssigsilikonkautschuk der Leitfaden für die Praxis*, 2015. @ONLINE, http://www.wacker.com/cms/media/publications/downloads/6709_DE.pdf, Abruf: September 2015.
- [44] H.J. Winter and W. Straßberger. Silikonelastomere in der mittel-und hochspannungstechnik. In *Silikonelastomere : innovative Isolierwerkstoffe für Betriebsmittel der elektrischen Energietechnik*. VDE Verlag, 1997.
- [45] W. Gohl and K.H. Spies. *Elastomere-Dicht-und Konstruktionswerkstoffe: Gummitchnik, Richtlinien und Anwendungsbeispiele für Konstruktion und Praxis*. expert Verlag, 2003.
- [46] M. Siegmantel. Silikonkautschuk und dessen Verklebung, 2011. Diplomarbeit, Technische Universität München, 2011.
- [47] G. Habenicht. *Kleben: Grundlagen, Technologie, Anwendungen*. Springer, 1986.
- [48] M. Müller. *Einflußgrößen der Verstärkung elastomerer Werkstoffe durch polymere und klassische Füllstoffe*. PhD thesis, Universität Hannover, 2002.
- [49] Herausgegeben von AVK-Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*. Springer Vieweg, 2014.
- [50] H.J. Mair and S. Roth. *Elektrisch leitende Kunststoffe, 2. Ausgabe*. Carl Hanser, 1989.
- [51] A. Tomanek. *Silicone und Technik : ein Kompendium für Praxis, Lehre und Selbststudium*. Hanser, 1990.
- [52] W. Oburger. *Die Isolierstoffe der Elektrotechnik*. Springer, 1957.
- [53] K.G. Princy, R. Joseph, and C.S. Kartha. Studies on conductive silicone rubber compounds. *Journal of applied polymer science*, 69(5):1043–1050, 1998.

- [54] J. Zhang and S. Feng. Effect of crosslinking on the conductivity of conductive silicone rubber. *Journal of applied polymer science*, 89(13):3471–3475, 2003.
- [55] Wang Luheng, Ding Tianhuai, and Wang Peng. Influence of carbon black concentration on piezoresistivity for carbon-black-filled silicone rubber composite. *Carbon*, 47(14):3151–3157, 2009.
- [56] Peng Wang and Tianhuai Ding. Creep of electrical resistance under uniaxial pressures for carbon black–silicone rubber composite. *Journal of materials science*, 45(13):3595–3601, 2010.
- [57] Peng Wang and Tianhuai Ding. Conductivity and piezoresistivity of conductive carbon black filled polymer composite. *Journal of Applied Polymer Science*, 116(4):2035–2039, 2010.
- [58] D. Braun. Chemische methoden zur analyse von netzwerken. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, 76(1):351–371, 1979.
- [59] A. Bojtos and L. Valenta. Mechanical and electrical testing of electrically conductive silicone rubber. In *Materials Science Forum: Materials Science, Testing and Informatics IV*, volume 589, pages 179–184. Trans Tech Publ, 2008.
- [60] M. Issa, D. Petković, N.D. Pavlović, and L. Zentner. Embedded-sensing elements made of conductive silicone rubber for compliant robotic joint. In *56th Internationales Wissenschaftliches Kolloquium TU Ilmenau*, 2011.
- [61] M. Issa, D. Petković, N.D. Pavlović, and L. Zentner. New sensing tactile structure based on conductive silicone rubber. In the International Conference on Microactuators and Micromechanisms MAMM, 2012.
- [62] R. D. Sherman, L. M. Middleman, and S. M. Jacobs. Electron transport processes in conductor-filled polymers. *Polymer Engineering & Science*, 23(1):36–46, 1983.
- [63] A. Napierala. Electrical behaviour of current conducting silicon rubber. In *8th IEEEIC International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 2009.
- [64] Y. Ishigure, S. Iijima, H. Ito, T. Ota, H. Unuma, M. Takahashi, Y. Hikichi, and H. Suzuki. Electrical and elastic properties of conductor-polymer composites. *Journal of Materials science*, 34(12):2979–2985, 1999.
- [65] J. Frenkel. On the electrical resistance of contacts between solid conductors. *Physical Review*, 36(11):1604–1618, 1930.

- [66] M. Issa and L. Zentner. Sensorelemente aus leitfähigem silikon für einen nachgiebigen greifer. In *Mechanismentechnik in Ilmenau, Budapest und Niš*, 2012.
- [67] Wang Luheng, Ding Tianhuai, and Wang Peng. Effects of conductive phase content on critical pressure of carbon black filled silicone rubber composite. *Sensors and Actuators A: Physical*, 135(2):587–592, 2007.
- [68] Luheng Wang, Fangfang Ma, Qianshu Shi, Huanghai Liu, and Xueting Wang. Study on compressive resistance creep and recovery of flexible pressure sensitive material based on carbon black filled silicone rubber composite. *Sensors and Actuators A: Physical*, 165(2):207–215, 2011.
- [69] Tianhuai Ding, Luheng Wang, and Peng Wang. Changes in electrical resistance of carbon-black-filled silicone rubber composite during compression. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 45(19):2700–2706, 2007.
- [70] Luheng Wang, Tianhuai Ding, and Peng Wang. Effects of compression cycles and precompression pressure on the repeatability of piezoresistivity for carbon black-filled silicone rubber composite. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 46(11):1050–1061, 2008.
- [71] P.P.L. Regtien. *Sensors for Mechatronics*. Elsevier, 2012.
- [72] R.S. Dahiya, G. Metta, M. Valle, and G. Sandini. Tactile sensing from humans to humanoids. *IEEE Transactions on Robotics*, 26(1):1–20, 2010.
- [73] R.S. Dahiya and M. Valle. Tactile sensing: Definitions and classification. In *Robotic Tactile Sensing*, pages 13–17. Springer, 2013.
- [74] M. Shimojo, A. Namiki, M. Ishikawa, R. Makino, and K. Mabuchi. A tactile sensor sheet using pressure conductive rubber with electrical-wires stitched method. *Sensors Journal, IEEE*, 4(5):589–596, 2004.
- [75] M.-A. Lacasse, V. Duchaine, and C. Gosselin. Characterization of the electrical resistance of carbon-black-filled silicone: Application to a flexible and stretchable robot skin. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation 2010, (ICRA 2010)*, pages 4842–4848, 2010.
- [76] C. Spielmann. Entwicklung eines sensors für einen ferrofluidischen flächenaktor. Diplomarbeit, Technische Universität Ilmenau, 2006.

- [77] Wang Peng, Ding Tianhuai, and Xu Feng. A novel flexible sensor for compression stress relaxation. In *Sensors, 2003. Proceedings of IEEE*, volume 1, pages 265–268, 2003.
- [78] R.A. Russell. Compliant-skin tactile sensor. In *Proceedings, IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 4, pages 1645–1648, 1987.
- [79] L. Ventrelli, L. Beccai, V. Mattoli, A. Menciassi, and P. Dario. Development of a stretchable skin-like tactile sensor based on polymeric composites. In *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics 2009, (ROBIO 2009)*, pages 123–128, 2009.
- [80] Luheng Wang, Tianhuai Ding, and Peng Wang. Thin flexible pressure sensor array based on carbon black/silicone rubber nanocomposite. *IEEE Sensors Journal*, 9(9):1130–1135, 2009.
- [81] Xuefeng Zhang, Yulong Zhao, and Xuelei Zhang. Design and fabrication of a thin and soft tactile force sensor array based on conductive rubber. *Sensor Review*, 32(4):273–279, 2012.
- [82] K. Shida and J. Yuji. Discrimination of material property by pressure-conductive rubber sheet sensor with multi-sensing function. In *Proceedings, IEEE International Symposium on Industrial Electronics 1996, (ISIE 1996)*, volume 1, pages 54–59, 1996.
- [83] J.-i. Yuji and K. Shida. A new multi-functional tactile sensing technique for simultaneous discrimination of material properties. In *Proceedings, Instrumentation and Measurement Technology Conference IEEE 1998, (IMTC 1998)*, volume 2, pages 1029–1032, 1998.
- [84] A. Drimus, G. Kootstra, A. Bilberg, and D. Kragic. Classification of rigid and deformable objects using a novel tactile sensor. In *2011 15th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, pages 427–434, 2011.
- [85] A. Drimus, G. Kootstra, A. Bilberg, and D. Kragic. Design of a flexible tactile sensor for classification of rigid and deformable objects. *Robotics and Autonomous Systems*, 62(1):3–15, 2014.
- [86] T. Liu, Y. Inoue, and K. Shibata. A small and low-cost 3-d tactile sensor for a wearable force plate. *IEEE Sensors Journal*, 9(9):1103–1110, 2009.

- [87] J. Lee, J. Choi, J. Hong, D. Jung, and S.E. Shim. Conductive silicone/acetylene black composite film as a chemical vapor sensor. *Synthetic Metals*, 160(9):1030–1035, 2010.
- [88] S. Hesse and I. Naumann. *Robotics-a course manual: Roboter-Englisch für Ingenieure*. expert-Verlag, 1992.
- [89] S. Hesse. *Greifertechnik: Effektoren für Roboter und Automaten*. Hanser, 2011.
- [90] H.J. Warnecke and R.D. Schraft. *Industrieroboter Handbuch für Industrie und Wissenschaft*. Springer, 1990.
- [91] N. Wettels, A.R. Parnandi, J.H. Moon, G.E. Loeb, and G.S. Sukhatme. Grip control using biomimetic tactile sensing systems. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 14(6):718–723, 2009.
- [92] D. Lazzaroni. A gripper device with tactile sensitivity particularly for a robot. EP Patent Application, Publication number: EP0582731A1, 1994.
- [93] A.M. Zaki, A.M. Soliman, O.A. Mahgoub, and A.M. El-Shafei. Design and implementation of efficient intelligent robotic gripper. In *Proceedings of the 2010 International Conference on Modelling, Identification and Control*, pages 710–716, 2010.
- [94] S. I. Yaniger and M. C. Pickett. Force-sensing pointing device. US Patent, Publication number: 5828363A, 1998.
- [95] D.-H. Kim, B. Kim, and H. Kang. Development of a piezoelectric polymer-based sensorized microgripper for microassembly and micromanipulation. *Microsystem Technologies*, 10(4):275–280, 2004.
- [96] Y. Shapiro, A. Wolf, and G. Kósa. Compliant bi-bellows actuator with PVDF force-shape sensing. In *4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics 2012, (BioRob 2012)*, pages 1602–1606, 2012.
- [97] Y. Shapiro, A. Wolf, and K. Gabor. Bi-bellows: Pneumatic bending actuator. *Sensors and Actuators A: Physical*, 167(2):484 – 494, 2011.
- [98] A.M. Dollar and R.D.Howe. A robust compliant grasper via shape deposition manufacturing. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 11(2):154–161, 2006.

- [99] R. Merz. *Shape deposition manufacturing*. PhD thesis, The Vienna University of Technology, 1994.
- [100] A.M Dollar, L.P Jentoft, J.H Gao, and R.D Howe. Contact sensing and grasping performance of compliant hands. *Autonomous Robots*, 28(1):65–75, 2010.
- [101] N. Wettels, V.J. Santos, R.S. Johansson, and G.E. Loeb. Biomimetic tactile sensor array. *Advanced Robotics*, 22(8):829–849, 2008.
- [102] I. Gaiser, S. Schulz, A. Kargov, H. Klosek, A. Bierbaum, C. Pylatiuk, R. Oberle, T. Werner, T. Asfour, G. Bretthauer, and R. Dillmann. A new anthropomorphic robotic hand. In *8th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots.*, pages 418–422, 2008.
- [103] R.A. Russell and S. Parkinson. Sensing surface shape by touch. In *Proceedings, IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 423–428, 1993.
- [104] M.E. Giannaccini, I. Georgilas, I. Horsfield, B.H.P.M. Peiris, A. Lenz, A.G. Pipe, and S. Dogramadzi. A variable compliance, soft gripper. *Autonomous Robots*, 36(1-2):93–107, 2014.
- [105] R. Deimel and O. Brock. A compliant hand based on a novel pneumatic actuator. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation 2013, (ICRA 2013)*, pages 2047–2053, 2013.
- [106] J. Min, H.S. Yu, K.H. Ahn, and J.B. Song. Robot joint module equipped with joint torque sensor with disk-type coupling for torque error reduction. In *Intelligent Robotics and Applications*, pages 371–378. 2015.
- [107] K. Kaneko, F. Kanehiro, S. Kajita, H. Hirukawa, T. Kawasaki, M. Hirata, K. Akachi, and T. Isozumi. Humanoid robot HRP-2. In *Proceedings, IEEE International Conference on Robotics and Automation 2004, (ICRA 2004)*, volume 2, pages 1083–1090, 2004.
- [108] J.J. Park, B.S. Kim, J.B. Song, and H.S. Kim. Safe link mechanism based on passive compliance for safe human-robot collision. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1152–1157, 2007.
- [109] J.J. Park, J.B. Song, and H.S. Kim. Safe joint mechanism based on passive compliance for collision safety. In *Recent Progress in Robotics: Viable Robotic Service to Human*, pages 49–61, 2008.

- [110] J.J. Park, H.S. Kim, and J.B. Song. Safe robot arm with safe joint mechanism using nonlinear spring system for collision safety. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation 2009, (ICRA 2009)*, pages 3371–3376, 2009.
- [111] F. Meyer, A. Sprowitz, M. Lungarella, and L. Berthouze. Simple and low-cost compliant leg-foot system. In *Proceedings, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2004, (IROS 2004)*, volume 1, pages 515–520, 2004.
- [112] F. Meyer, A. Sprowitz, and L. Berthouze. Passive compliance for a RC servo-controlled bouncing robot. *Advanced Robotics*, 20(8):953–961, 2006.
- [113] M. Quigley, A. Asbeck, and A. Ng. A low-cost compliant 7-dof robotic manipulator. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation 2011, (ICRA 2011)*, pages 6051–6058, 2011.
- [114] S. Kajikawa and A. Suzuki. Compact variable stiffness joint with force sensing ability-application to classify contact surfaces. *Journal of Automation and Control Engineering*, 3(3), 2015.
- [115] A. Jafari, N.G. Tsagarakis, B. Vanderborght, and D.G. Caldwell. A novel actuator with adjustable stiffness (AwAS). In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2010, (IROS 2010)*, pages 4201–4206, 2010.
- [116] *ELASTOSIL® R 570/50 MH, Technisches Datenblatt*. Wacker Chemie AG, München, Deutschland, 2008.
- [117] *ELASTOSIL® R 420, Technisches Datenblatt*. Wacker Chemie AG, München, Deutschland, 2005.
- [118] X.W. Zhang, Y. Pan, O. Zheng, and X.S.Yi. Time dependence of piezoresistance for the conductor-filled polymer composites. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 38(21):2739–2749, 2000.
- [119] C. Cochrane, V. Koncar, M. Lewandowski, and C. Dufour. Design and development of a flexible strain sensor for textile structures based on a conductive polymer composite. *Sensors*, 7(4):473–492, 2007.
- [120] Luheng Wang, Yanyan Han, Changjun Wu, and Yannan Huang. A solution to reduce the time dependence of the output resistance of a viscoelastic and piezoresistive element. *Smart Materials and Structures*, 22(7), 2013.

- [121] U. Risto. *Zur Charakterisierung und Anwendung des Durchschlagverhaltens von nachgiebigen rotationssymmetrischen Strukturen*. PhD thesis, Technische Universität Ilmenau, 2013.
- [122] *POWERSIL® 466 A/B VP, Technisches Datenblatt*. Wacker Chemie AG, München, Deutschland, 2004.
- [123] D. Petković, M. Issa, N.D. Pavlović, and L. Zentner. Passively adaptive compliant gripper. In *Applied Mechanics and Materials: Mechanisms, Mechanical Transmissions and Robotics*, volume 162, pages 316–325, 2012.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau der Arbeit	3
2.1	Schematische Darstellung des Unterschieds zwischen der verteilten und der konzentrierten Nachgiebigkeit, nach [2]	6
2.2	Die nachgiebigen Strukturabschnitte eines Systems in zwei Ansichten, aufgeteilt nach der Ursache der Nachgiebigkeit: (a) geometrische Gestaltung, (b) Material mit höherer Nachgiebigkeit, nach [2]	6
2.3	Lineare, verzweigte und vernetzte Makromoleküle, nach [35]	14
2.4	Einteilung der Polymere mit einigen Beispielen. Blau repräsentiert die Hauptgruppen, Schwarz repräsentiert Beispiele für jede Gruppe [33, 34, 36]	15
2.5	Überblick über die Bestandteile des Silikonkautschuks	18
2.6	VMQ-Polymer als ein Beispiel von linearen Polymerketten für die Verwendung in Silikonkautschuk, nach [44]	19
2.7	Si-H-Vernetzer als ein Beispiel für die Verwendung im Silikonkautschuk, nach [44]	20
2.8	Widerstandsverlauf in Abhängigkeit vom Rußgehalt, nach [50, 63]	24
2.9	Der lokal leitende Pfad und der effektiv leitende Pfad, nach [55]	25
2.10	Änderung des effektiven Pfads unter Druckbelastung. Weiße Fläche: Isolierende Polymermatrix. Rote Kreise: Rußaggregate, die effektiv leitende Pfade gebildet haben. Graue Kreise: Rußaggregate, die keine effektiv leitende Pfade gebildet haben. Pinke Kreise: Rußaggregate, die aus effektiv leitenden Pfaden herausgedrückt wurden, nach [67, 69]	27
3.1	Grobeinteilung der taktilen Sensoren mit Beispielen, in Anlehnung an [72, 73]	30
3.2	Grobeinteilung der in den Greifsystemen eingesetzten Sensoren nach ihrer Aufgabe	35
3.3	Grobeinteilung der Gelenkverbindungen, die zum Schutz bei Kollision eingesetzt werden können	39

4.1	Messverfahren zum Messen des elektrischen Widerstands der Sensor-Probe	45
4.2	ProLine Tisch-Prüfmaschine Z005 der Firma Zwick zum Messen der elektrischen Eigenschaften des leitfähigen Silikonkautschuks	46
4.3	Fertigungsverfahren zur Verbindung beider Materialien; ELASTOSIL® R 570/50 MH C1 mit ELASTOSIL® R 420/70 MH C1	48
4.4	Fertigung der Sensor-Proben für die Untersuchung der Eigenschaften des elektrisch leitfähigen Silikonkautschuks in Abhängigkeit von der Zugbelastung, und der Versuchsaufbau	51
4.5	Verhalten der Sensor-Probe aus ELASTOSIL R 570/50 MH C1 unter Zugbelastung. Der Versuch besteht aus fünf Zyklen; Belastung bis zu einer Längenänderung von 30 mm und Entlastung bis zu 0 mm, Prüfgeschwindigkeiten von 10 mm/min	52
4.6	Sechs unterschiedliche Versuche für eine Sensor-Probe aus ELASTOSIL R 570/50 MH C1 als Beispiel zur Bestimmung des Arbeitsbereiches mit einer Prüfgeschwindigkeit von 300 mm/min	53
4.7	Sechs unterschiedliche Versuche für eine Sensor-Probe aus ELASTOSIL R 570/50 MH C1 als Beispiel zur Bestimmung des Arbeitsbereiches mit einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min	54
4.8	Uniaxialer zyklischer Versuch aus 100 Zyklen zur Bestimmung der Zyklenzahl für die Vorkonditionierung der Sensor-Probe aus ELASTOSIL R 570/50 MH C1; Belastung bis zu einer Längenänderung von 4,6 mm, Entlastung bis zu 0 mm und Wartezeit von 10 s, Prüfgeschwindigkeit von 300 mm/min	55
4.9	Uniaxialer zyklischer Versuch aus 100 Zyklen zur Bestimmung der Zyklenzahl für die Vorkonditionierung der Sensor-Probe aus ELASTOSIL R 570/50 MH C1; Belastung bis zu einer Längenänderung von 5,855 mm, Entlastung bis zu 0 mm und Wartezeit von 10 s, Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min	56
4.10	Widerstandsänderung bei der Relaxation der Sensor-Probe aus ELASTOSIL R 570/50 MH C1 für 15 Stunden	57
4.11	Uniaxialer Zugversuch bestehend aus fünf Zyklen bei einer Prüfgeschwindigkeit von 300 mm/min für eine Sensor-Probe aus POWERSIL® 466 A/B VP; Belastung bis zu einer Längenänderung von 75 mm, Entlastung bis zu 0 mm und Wartezeit von 10 s	58

4.12	Uniaxialer Zugversuch bestehend aus fünf Zyklen bei einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min für eine Sensor-Probe aus POWERSIL® 466 A/B VP; Belastung bis zu einer Längenänderung von 75 mm, Entlastung bis zu 0 mm und Wartezeit von 10 s	59
4.13	Widerstandsänderung bei der Relaxation der Sensor-Probe aus POWERSIL® 466 A/B VP für 15 Stunden	60
4.14	Sensor-Proben für die Untersuchung der Eigenschaften des elektrisch leitfähigen Silikonkautschuks in Abhängigkeit von der Druckbelastung mit dem Presswerkzeug und der Versuchsaufbau	61
4.15	Uniaxialer Druckversuch für eine Sensor-Probe aus ELASTOSIL R 570/50 MH C1. Der Versuch besteht aus 25 Zyklen; Belastung bis zu einer Längenänderung von 4,4 mm, Entlastung bis zu 0 mm und Wartezeit von 10 s, Prüfgeschwindigkeit von 300 mm/min	62
4.16	Uniaxialer Druckversuch für eine Sensor-Probe aus ELASTOSIL R 570/50 MH C1. Der Versuch besteht aus 25 Zyklen; Belastung bis zu einer Längenänderung von 4,4 mm, Entlastung bis zu 0 mm und Wartezeit von 10 s, Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min	63
4.17	Uniaxialer Druckversuch für eine Sensor-Probe aus POWERSIL® 466 A/B VP. Der Versuch besteht aus 25 Zyklen; Belastung bis zu einer Längenänderung von 4,4 mm, Entlastung bis zu 0 mm und Wartezeit von 10 s, Prüfgeschwindigkeit von 300 mm/min	64
4.18	Uniaxialer Druckversuch für eine Sensor-Probe aus POWERSIL® 466 A/B VP. Der Versuch besteht aus 25 Zyklen; Belastung bis zu einer Längenänderung von 4,4 mm, Entlastung bis zu 0 mm und Wartezeit von 10 s, Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min	64
5.1	Die bei den experimentellen Messungen eingesetzte taktile Struktur . .	70
5.2	Presswerkzeug und die Sensorelemente für die taktile Struktur	70
5.3	Elektrische Widerstandsänderung über der Zeit (t) bei einer äußeren Belastung, die auf ein Sensorelement einwirkt. Abschnitt a: Aktivierungsphase. Abschnitt b: Belastungsphase. Abschnitt c: Entlastungsphase . .	72
5.4	Schematische Darstellung der taktilen Struktur	72
5.5	Elektrische Widerstandsänderung bei einer äußeren Belastung, die auf ein Sensorelement der taktilen Struktur einwirkt	73
5.6	Elektrische Widerstandsänderung bei einer äußeren Belastung, die zwischen zwei Sensorelementen der taktilen Struktur einwirkt	73

5.7	Elektrische Widerstandsänderung bei einer äußeren Belastung, die in der Mitte der taktilen Struktur einwirkt	74
5.8	CAD-Modell der endgültigen Struktur des Greifers	76
5.9	Simulierter Greifer mit der Spannungsverteilung bei unterschiedlichen Greifvorgängen, die maximale Vergleichsspannung von Mises in allen dargestellten Greifern ist circa 0,59 [MPa]	77
5.10	Hauptspannungsvektor des Teils 8a, wo meistens mit der Zugbelastung beansprucht wurde	79
5.11	CAD-Modell des Greifers und der verwendeten Sensorelemente mit den verschiedenen Formen	82
5.12	Die Spannungsverteilung in jedem Sensorelement bei der Greifbewegung: (a) max. Spannung im Hauptachsensystem (max. Wert ist circa 0,08 MPa), (b), (c), (d) Vergleichsspannung von Mises, max. Wert ist circa 0,30 MPa	83
5.13	Die maximale Vergleichsspannung von Mises [MPa] in vertikalen Längsschnitten bzw. Querschnitten des Sensorelements aller Form-Varianten	84
5.14	Fertigungswerkzeug und Fertigungsschritte des sensorisierten Greifers	87
5.15	Der sensorisierte Greifer mit den entsprechenden Sensorelementen	88
5.16	Der sensorisierte Greifer beim Greifen von verschiedenen Objekten	89
5.17	Der Versuchsaufbau für den sensorisierten Greifer und das Funktionsprinzip	90
5.18	Widerstandsänderung eines Sensorelements jeder Form bei der Greifbewegung ohne und mit einem Objekt von 42 mm Durchmesser als Beispiel zum Erkennung des Vorhandenseins eines Objektes, die Eingangsverschiebung ist 45 mm bei jedem Greifvorgang	91
5.19	Der Unterschied zwischen den maximalen erreichten Widerstandsänderungen; $\Delta R_{2\max}$ (beim Greifen des Objektes mit $D = 42$ mm) und $\Delta R_{1\max}$ (bei der Greifbewegung ohne Objekt) für alle Sensorelemente bei jedem durchgeführten Test	93
5.20	Widerstandsänderung eines Sensorelement jeder Form beim Greifen verschiedener Objekte mit unterschiedlichen Durchmesser; 26 mm, 31 mm, 35 mm und 42 mm, als Beispiel zur Erkennung von Objekten mit unterschiedlichen Durchmessern, die Eingangsverschiebung ist 45 mm bei jedem Greifvorgang	96
5.21	Form und Abmessungen des verwendeten Objektes mit unterschiedlichen Seitenlängen	98

5.22	Widerstandsänderung eines Sensorelements jeder Form bei einem Test, der aus drei Schritten besteht; Greifbewegung ohne Objekt, Greifen des Objektes an der schmalen Seite und Greifen des Objektes an der breiten Seite, die Eingangsverschiebung ist 50 mm bei jedem Greifvorgang . . .	99
5.23	Querschnitt der Gelenkverbindung für verschiedene mögliche Entwürfe bestehend aus zwei Teilen, (a) mit sechs einzelnen Sensorelementen, (b) mit zwei Sensorelementen, (c) mit vier Sensorelementen, je zwei sind durch nicht leitfähigen Silikonkautschuk miteinander verbunden, (d) mit vier einzelnen Sensorelementen	103
5.24	CAD-Modell von den Hauptteilen der nachgiebigen Gelenkverbindung .	105
5.25	CAD-Modell der nachgiebigen Gelenkverbindung	105
5.26	Das System mit der Gelenkverbindung	106
5.27	Aufbau der nachgiebigen Gelenkverbindung mit den Sensorelementen .	107
5.28	Funktionsprinzip der nachgiebigen Gelenkverbindung mit der inhärenten Sensorik im Fall das Material ELASTOSIL R 570/50 MH C1, R_0 ist der Widerstand des vorkomprimierten Sensorelements	108
5.29	Schematische Darstellung eines Querschnitts der Gelenkverbindung in der Phase (a) und der Phase (b)	110
5.30	Widerstandsänderung der Sensorelemente aus ELASTOSIL R 570/ 50 MHC1 beim Testen der Gelenkverbindung. Phase (a) des Tests: Drehung des Innenteils entgegen dem Uhrzeigersinn bei Fixierung des Außenteils, Haltezeit von ca. 5 s, dann Zurückbringen des Systems an die Ausgangsposition. Phase (b) des Tests: Drehung des Innenteils im Uhrzeigersinn, Haltezeit von ca. 5 s, dann Zurückbringen des Systems an die Ausgangsposition	111
5.31	Test der Gelenkverbindung: Drehung der Gelenkverbindung entgegen dem Uhrzeigersinn bei der Fixierung des Außenteils. Auswertung der Sensorsignale zeigt die belasteten Sensorelemente aus ELASTOSIL R 570/ 50 MHC1 (rot) und die Drehrichtung (grün)	112
5.32	Widerstandsänderung der Sensorelemente aus POWERSIL® 466 A/B VP beim Testen der Gelenkverbindung. Phase (a) des Tests: Drehung des Innenteils entgegen dem Uhrzeigersinn bei Fixierung des Außenteils, Haltezeit von ca. 5 s, dann Zurückbringen des Systems an die Ausgangsposition. Phase (b) des Tests: Drehung des Innenteils im Uhrzeigersinn, Haltezeit von ca. 5 s, dann Zurückbringen des Systems an die Ausgangsposition	113

A.1	Abmessungen der Sensor-Probe für die durchgeführten Zugversuche, die Abmessungen sind in [mm]	121
A.2	Die wichtigen Abmessungen des Greifers [123] und der Sensorelemente, die Abmessungen sind in [mm]	122
A.3	Die wichtigen Abmessungen des Innenteils der Gelenkverbindung, die Abmessungen sind in [mm]	123
A.4	Die wichtigen Abmessungen des Außenteils der Gelenkverbindung, die Abmessungen sind in [mm]	124

Tabellenverzeichnis

2.1	Bewertung der Sensorprinzipien. Bewertungsmaßstab (0): nicht bzw. sehr schwer umsetzbar, (1): umsetzbar, (2) gut umsetzbar	12
2.2	Überblick über den strukturellen Aufbau, Bindungsart, Eigenschaften und einige Anwendungsbeispiele der Polymere	17
4.1	Überblick über die Untersuchungen mit ihren Ergebnissen (schwarz), die daraus entstehenden Regeln (rot) und das endgültige Ergebnis (fettgedruckt) für die Anwendung als Sensorelemente aus POWERSIL® 466 A/B VP bzw. ELASTOSIL R 570/50 MH C1	65
4.1	Überblick über die Untersuchungen mit ihren Ergebnissen (schwarz), die daraus entstehenden Regeln (rot) und das endgültige Ergebnis (fettgedruckt) für die Anwendung als Sensorelemente aus POWERSIL® 466 A/B VP bzw. ELASTOSIL R 570/50 MH C1	66
4.1	Überblick über die Untersuchungen mit ihren Ergebnissen (schwarz), die daraus entstehenden Regeln (rot) und das endgültige Ergebnis (fettgedruckt) für die Anwendung als Sensorelemente aus POWERSIL® 466 A/B VP bzw. ELASTOSIL R 570/50 MH C1	67
5.1	Ermittelte Materialkonstanten für das Yeoh-Materialmodell dritter Ordnung von dem für die Simulationen verwendeten Silikonkautschuk	78
5.2	Maximale Vergleichsspannung von Mises der Greiferteile bei der Greifbewegung ohne und mit Objekt von 42 mm Durchmesser	78
5.3	Maximale Spannung im Hauptachsensystem und maximale Vergleichsspannung von Mises der entsprechenden Teile 8a, 8b und 8c bei der Greifbewegung ohne und mit Objekt von 42 mm Durchmesser	80
5.4	Maximale Vergleichsspannung von Mises der Greiferteile beim Greifen des Objektes an der Lage II und III, Durchmesser des Objektes ist $D = 42$ mm	81

5.5	Ermittelte Materialkonstanten für das Ogden-Materialmodell dritter Ordnung von dem für die Simulationen verwendeten Silikonkautschuk	81
5.6	Maximale Vergleichsspannung von Mises der seitlichen Sensorelemente (alle Form-Varianten) und der Teile des oberen Sensorelements (8b, 8c), max. Spannung im Hauptachsensystem des Sensorelements 8a und die maximalen Spannungsunterschiede beim Greifen ohne und mit einem Objekt von 42 mm Durchmesser	85
5.7	Statistik der erfolgreichen Ergebnisse zum Erkennen des Vorhandenseins des Objektes mit zwei unterschiedlichen Durchmessern	94
5.8	Statistik der erfolgreichen Ergebnisse zur Erkennung von Objekten mit unterschiedlichen Durchmessern	97
5.9	Statistik der erfolgreichen Messergebnisse zur Erkennung der Orientierung des Objektes mit unterschiedlichen Seitenlängen	100