

Doctoral thesis / *Dissertation*

for the doctoral degree / *zur Erlangung des Doktorgrads*

Doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)

Concepts, Materials and Processes for Multimodal and Highly
Integrated Elastomer Sensors

*Konzepte, Materialien und Verfahren für multimodale und
hochintegrierte Elastomersensorik*



Submitted by / *Vorgelegt von*

Simon Stier

from / aus

Würzburg

Würzburg, 2021

Submitted on / *Eingereicht am*: 08.09.2021

Members of thesis committee / *Mitglieder des Promotionskomitees*

Chairperson / Vorsitz: Prof. Dr. Katrin Heinze

1. Reviewer and Examiner / 1. Gutachter und Prüfer: Prof. Dr. Gerhard Sextl

2. Reviewer and Examiner / 2. Gutachter und Prüfer: Prof. Dr. Klaus Schilling

3. Reviewer and Examiner / 3. Gutachter und Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Sven Wießner

Additional Examiners / Weitere Prüfer: Prof. Dr. Robert Luxenhofer

Day of thesis defense / *Tag des Promotionskolloquiums*: 10.03.2022

Affidavit

I hereby confirm that my thesis entitled *Concepts, Materials and Processes for Multimodal and Highly Integrated Elastomer Sensors* is the result of my own work. I did not receive any help or support from commercial consultants. All sources and / or materials applied are listed and specified in the thesis.

Furthermore, I confirm that this thesis has not yet been submitted as part of another examination process neither in identical nor in similar form.

Place, Date

Signature

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, die Dissertation *Konzepte, Materialien und Verfahren für multimodale und hochintegrierte Elastomersensorik* eigenständig, d.h. insbesondere selbständig und ohne Hilfe eines kommerziellen Promotionsberaters, angefertigt und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben.

Ich erkläre außerdem, dass die Dissertation weder in gleicher noch in ähnlicher Form bereits in einem anderen Prüfungsverfahren vorgelegen hat.

Ort, Datum

Unterschrift

Vorab veröffentlichte Inhalte

Teilergebnisse der vorliegenden Arbeit wurden in den in [Tabelle 0.1](#) genannten Veröffentlichungen vorab publiziert. Dabei werden auch Details zu übernommenen, abgeänderten und erweiterten Inhalten aufgeführt. In den Veröffentlichungen fand keine exklusive Rechteabtretung an eine dritte Partei statt, so dass die Einholung entsprechender Nutzungserlaubnisse entfällt.

Tab. 0.1: Vorab veröffentlichte Inhalte

Veröffentlichung	Details/Inhalte	Thesis
Artikel im <i>Journal of Applied Polymer Science</i> ^[1]	Text und Abbildung reproduziert, verändert, ergänzt	Abschnitt 3.3
Artikel in <i>Micromachines</i> ^[2]	Text und Abbildung reproduziert, verändert, ergänzt	Kapitel 4
Patent EP3608922A1 ^[3]	Text reproduziert, verändert, ergänzt	Abschnitt 4.2.1
Patent EP3736541A1 ^[4]	Text und Abbildung reproduziert, verändert, ergänzt	Kapitel 2, Abschnitt 5.4 (Konzepte)
<i>EuroEAP</i> -Konferenz 2019 ^[5,6]	Abbildungen modifiziert	Abschnitt 5.4.5
<i>4SMARTS</i> -Konferenz 2019 ^[7]	Text und Abbildung reproduziert, verändert, ergänzt	Abschnitt 2.3.1.4
<i>nanoFIS</i> -Konferenz 2020 ^[8]	Abbildungen modifiziert	Kapitel 4

Danksagung

Mein Dank geht an den Kreis meiner Betreuer, bestehend aus Prof. Dr. Gerhard Sextl, Prof. Dr. Klaus Schilling und Prof. Dr. Robert Luxenhofer, durch dessen interdisziplinäre Zusammensetzung und Bereitschaft zur fachübergreifenden Betreuung diese Arbeit erst ermöglicht wurde.

Dr. Holger Böse danke ich für die langjährige fachliche Betreuung, sein hohes Engagement und unermüdliche Bereitschaft neue Erkenntnisse gemeinsam zu diskutieren und weiter zu entwickeln.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Fraunhofer ISC, insbesondere Detlev Uhl, Johannes Ehrlich, Peter Löschke, Werner Stracke, Adelheid Martin, Prof. Dr. Peer Löbmann, Dr. Sönke Steenhusen und Gerhard Domann danke ich für die enge Zusammenarbeit, bereitwillige Unterstützung und tiefgehende wissenschaftliche Debatte.

Lukas Gold und Andreas Räder danke ich für die enge Zusammenarbeit im Bereich Digitale Forschung und deren Fortsetzung über diese Arbeit hinaus.

Dr.-Ing. Christian Vedder und Carsten Johnigk vom Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT danke ich für die Bereitstellung spektroskopischer Daten und deren gemeinsame Diskussion.

Dominik Müller vom Lehrstuhl für Röntgenmikroskopie der Universität Würzburg danke ich für die fruchtbare Kooperation im Bereich der nanoskaligen Computertomographie und den darüber hinausgehenden gegenseitigen Austausch.

In meinem persönlichem Umfeld gilt mein Dank der Fürsorge und Unterstützung meiner Eltern Fredi und Monika Stier und insbesondere meiner Partnerin Tamara Thauer, die mich gleichsam als Anker im Sturm und Sonne am Horizont auch durch diese Phase meines Lebens begleitet hat.

Allgemeine Zusammenfassung

Dielektrische Elastomersensoren sind aus Elastomermaterialien aufgebaute Sensoren mit einem kapazitiven Messprinzip. In ihrer einfachsten Form bestehen sie aus einer dehnbaren Elastomerfolie als Dielektrikum, die beidseitig mit leitfähigen und ebenfalls dehnbaren Schichten als Elektroden bedeckt ist. Damit entsteht ein mechanisch verformbarer elektrischer Kondensator, dessen Kapazität mit der Dehnung der Elastomerfolie stetig ansteigt. Neben solchen Dehnungssensoren lassen sich mit einem geeigneten geometrischen Aufbau auch dielektrische Elastomersensoren realisieren, bei denen eine elektrische Kapazität mit einem angelegten Druck bzw. einer Kraft auf die Oberfläche, mit einer Scherkraft oder mit der Annäherung eines elektrisch leitfähigen oder polarisierbaren Körpers wie z. B. der menschlichen Hand messbar ansteigt. Durch ihre vielfältige Funktion, intrinsische Verformbarkeit und flächige Ausgestaltung weisen Dielektrische Elastomersensoren erhebliches Potential in der Schaffung smarter, sensitiver Oberflächen auf. Dabei sind weitgehende und individuelle Adaptionen auf den jeweiligen Anwendungszweck durch Abstimmung geometrischer, mechanischer und elektrischer Eigenschaften möglich. Die bisherige Forschung beschränkt sich jedoch auf die Analyse und Optimierung einzelner Aspekte ohne das Potential einer übergreifenden systemischen Perspektive zu nutzen.

Diese Arbeit widmet sich daher der Betrachtung der Sensorik als Gesamtsystem, sowohl horizontal - von abstrakten Modellen bis zur Fertigung und prototypischen Anwendung - als auch vertikal über die Komponenten Material, Struktur und Elektronik. Hierbei wurden in mehreren Teilgebieten eigenständige neue Erkenntnisse und Verbesserungen erzielt, die anschließend in die übergreifende Betrachtung des Gesamtsystems integriert wurden. So wurden in den theoretischen Vorarbeiten neue Konzepte zur orts aufgelösten Erfassung mehrerer physikalischer Größen und zur elektrischen und mechanischen Modellierung entwickelt. Die abgeleiteten Materialanforderungen wurden in eine tiefgehende Charakterisierung der verwendeten Elastomer-Kompositwerkstoffe überführt, in der neuartige analytische Methoden in Form von dynamischer elektromechanischer Testung und nanoskaliger Computertomographie zur Aufklärung der inneren Wechselwirkungen zum Einsatz kamen. Im Bereich der automatisierten Prozessierung wurde ein für die komplexen mehrschichtigen Elek-

trodenstrukturen geeigneter neuer lasergestützter subtraktiver Fertigungsprozess etabliert, der zudem die Brücke zu elastischer Elektronik schlägt. In der abschließenden Anwendungsevaluierung wurden mehrere orts aufgelöste und multimodale Gesamtsysteme aufgebaut und geeignete Messelektronik und Software entwickelt. Abschließend wurden die Systeme mit einem eigens entwickelten robotischen Testsystem charakterisiert und zudem das Potential der Auswertung mittels maschinellem Lernen aufgezeigt.

Abstract

Dielectric elastomer sensors are sensors constructed from elastomer materials with a capacitive measuring principle. In their simplest form, they consist of a stretchable elastomer film as dielectric, which is covered on both sides with conductive and also stretchable layers as electrodes. This creates a mechanically deformable electrical capacitor whose capacitance increases steadily with the stretching of the elastomer film. In addition to such strain sensors, with a suitable geometric design it is also possible to realize dielectric elastomer sensors in which an electrical capacitance increases measurably with an applied pressure or force on the surface, with a shear force or with the approach of an electrically conductive or polarizable body such as the human hand. Due to their versatile function, intrinsic deformability and flat design, dielectric elastomer sensors have considerable potential in the creation of smart, sensitive surfaces. Extensive and individual adaptations to the respective application purpose are possible by matching geometric, mechanical and electrical properties. However, research to date has been limited to the analysis and optimization of individual aspects without exploiting the potential of an overarching systemic perspective.

This work is therefore certainly dedicated to the consideration of sensor technology as an overall system, both horizontally - from abstract modeling to manufacturing and prototypical application - and vertically via the components material, structure and electronics. In this context, individual new findings and improvements were achieved in several sub-areas, which were subsequently integrated into the overall consideration of the entire system. Thus, in the preliminary theoretical work, new concepts were developed for the spatially resolved measurement of multiple physical quantities and for electrical and mechanical modeling. The derived material requirements were transferred into an in-depth characterization of the elastomer composite materials used, in which novel analytical methods in the form of dynamic electro-mechanical testing and nanoscale computer tomography were applied to elucidate the internal mechanisms of interaction. In the area of automated processing, a new laser-based subtractive manufacturing process suitable for the complex multilayer electrode structures was established, which also bridges the gap to stretchable electronics. In the final application evaluation, several spatially resolved and multimodal sensor systems

were built and suitable measurement electronics and software were developed. Finally, the systems were characterized with a specially developed robotic test system and, in addition, the potential of evaluation by means of machine learning was demonstrated.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Sensortechnologie	3
2.1	Einleitung	3
2.2	Stand der Wissenschaft und Technik	4
2.3	Erweiterte Konzepte	6
2.3.1	Grundlagen	6
2.3.1.1	Elektroden	6
2.3.1.2	Dielektrika	8
2.3.1.3	Messprinzip	8
2.3.1.4	Einzelmodalität	9
2.3.1.5	Messelektronik	11
2.3.2	Ortsauflösung	13
2.3.3	Multimodalität	14
2.4	Modellierung	15
2.4.1	Mechanische Modellierung	16
2.4.1.1	Grundlegende Modelle	16
2.4.1.2	Burgers-Modell	17
2.4.2	Elektrische Modellierung	18
2.4.2.1	Ersatzschaltbild	19
2.4.2.2	Erweitertes Ersatzschaltbild	19
2.4.2.3	Simulation in LTspice	19
2.4.2.4	Tiefpassverhalten	21
2.4.2.5	Messbereich	21
2.5	Zusammenfassung und Fazit	22
3	Sensormaterialien	24
3.1	Einleitung	24
3.2	Viskoelastische Materialeigenschaften dielektrischer Schichten	25
3.2.1	Einführung und Stand der Wissenschaft und Technik	25

3.2.2	Material und Methoden	28
3.2.2.1	Silicone	28
3.2.2.2	Oszillativer Scherspaltversuch	29
3.2.2.3	Druckkriechversuch	30
3.2.2.4	Dehnungsrelaxationsversuch	31
3.2.2.5	Kombinierte Belastung in einem Sensor	32
3.2.2.6	Hysterese- und Kriechwert	32
3.2.3	Ergebnisse und Diskussion	33
3.2.3.1	Oszillativer Scherspaltversuch	33
3.2.3.2	Druckversuch	35
3.2.3.3	Dehnungsversuch	38
3.2.3.4	Kombinierte Belastung in einem Sensor	38
3.2.4	Fazit	41
3.3	Dynamische elektromechanische Analyse	41
3.3.1	Einführung	41
3.3.2	Stand der Wissenschaft und Technik	42
3.3.3	Material und Methoden	44
3.3.3.1	Siliconkomposite	44
3.3.3.2	Probenherstellung	44
3.3.3.3	Mechanische Analyse	45
3.3.3.4	Dynamische elektromechanische Analyse (DEMA)	47
3.3.3.5	Elektrische Leitfähigkeit unter Dehnung	50
3.3.3.6	Rasterelektronenmikroskop (REM)	51
3.3.3.7	Nanoskalige Computertomographie (nanoCT)	52
3.3.3.8	Tragbarer Textil-Elektronik Demonstrator	57
3.3.4	Ergebnisse und Diskussion	58
3.3.4.1	Mikroskopische Eigenschaften der Partikelkomposite	58
3.3.4.2	Mechanische Eigenschaften der Matrix-Silicone	59
3.3.4.3	Elektrische Eigenschaften	59
3.3.4.4	Einfluss der Siliconmatrix	63
3.3.4.5	nanoCT	65
3.3.4.6	Anwendungsevaluierung	68
3.3.5	Fazit	69
3.4	Zusammenfassung	70
4	Galvanisierung und Laserbearbeitung	72
4.1	Einleitung	72

4.2	Stand der Wissenschaft und Technik	72
4.2.1	Metallisierte Elastomere	72
4.2.2	Laserbearbeitung	74
4.3	Material und Methoden	76
4.3.1	Galvanisierungsprobe	76
4.3.2	Ablative Laserstrukturierung	77
4.3.3	Beschichtung für die Laserstrukturierung	78
4.3.4	Spektroskopie	79
4.3.5	Lasergestützte Schaltungsträgerfertigung	79
4.3.6	Lasergestützte Sensorfertigung	82
4.3.7	Sensor Charakterisierung	84
4.4	Ergebnisse und Diskussion	84
4.4.1	Galvanisierung	84
4.4.2	Optische Spektren	85
4.4.3	Schaltungsträger	87
4.4.4	Elektromechanische Charakterisierung	88
4.4.5	Sensorstruktur und -kennlinie	90
4.5	Zusammenfassung und Fazit	92
5	Anwendungsevaluierung	95
5.1	Einführung	95
5.2	Stand der Wissenschaft und Technik	95
5.3	Material und Methoden	97
5.3.1	Robotik-System	97
5.3.1.1	Franka Emika Panda	97
5.3.1.2	Workstation	98
5.3.1.3	Software	99
5.3.1.4	Messaufsätze	99
5.3.2	Messelektroniksysteme	100
5.3.2.1	Verwendete integrierte Bauteile	100
5.3.2.2	MKL26Z-Plattform	101
5.3.2.3	PSoC4000S-Plattform	101
5.3.2.4	PSoC4200L-Plattform	102
5.3.2.5	PSoC4200BL-Miniatur-Plattform	103
5.4	Ergebnisse und Diskussion	103
5.4.1	Kombinierter Näherungs-, Druck und Dehnungssensor	104
5.4.1.1	Konzept	104

5.4.1.2	Aufbau	105
5.4.1.3	Charakterisierung	106
5.4.2	Ortsaufgelöster, kombinierter Druck- und Dehnungssensor . . .	108
5.4.2.1	Konzept	108
5.4.2.2	Aufbau	109
5.4.2.3	Charakterisierung	110
5.4.3	Kombinierter 3D-Kraft- und 3D-Näherungssensor	112
5.4.3.1	Konzept	112
5.4.3.2	Aufbau	113
5.4.3.3	Charakterisierung	113
5.4.4	Roboter-Sensorhaut	117
5.4.4.1	Aufbau	118
5.4.4.2	Charakterisierung	121
5.4.5	Ortsaufgelöster KI-Robotergreifer	124
5.4.5.1	Aufbau	124
5.4.5.2	Datenauswertung und Charakterisierung	126
5.5	Zusammenfassung und Fazit	129
6	Zusammenfassung und Ausblick	130
A	Verwendete Materialien	135
A.1	Partikel	135
A.2	Siliconeducte	135
A.3	Siliconrezepturen	135
	Materialglossar	137
	Glossar	138
	Akronyme	145
	Symbolverzeichnis	148
	Abbildungsverzeichnis	150
	Tabellenverzeichnis	153
	Literaturverzeichnis	154

Kapitel 1

Einführung

In vielen Bereichen, darunter der Maschinen- und Anlagenbau sowie Fahrzeug- und Medizintechnik, ist die Messung von Druck- und Scherkräften sowie Abstand eines Objektes zur Umgebungscharakterisierung eines technischen Systems relevant. Konventionelle Sensoren, zumeist auf Halbleiterbasis, sind dabei aus starren Materialien gefertigt und erlauben daher lediglich die Anwendung auf definiert geformten, unbeweglichen Oberflächen. Folienbasierte Sensoren sind hingegen flexibel und können zumindest auf eindimensional verformbare bzw. eindimensional gekrümmten Oberflächen verwendet werden. Für zweidimensional verformbaren bzw. zweidimensional gekrümmte Oberflächen, wie beispielsweise ein Textilgewebe oder menschliche Haut, kommen hingegen nur dehnbare Sensoren in Frage, insbesondere Elastomersensoren. Zudem gewinnt auch die Überwachung bestehender Elastomerbauteile an Bedeutung, beispielsweise Motorlager oder Riemen, deren mechanische Eigenschaften durch Hinzufügen einer sensorischen Funktion nicht beeinträchtigt werden dürfen. Neben der elastischen Deformation während der Anwendung kann aber die Elastizität der Sensoren auch für die einmalige Installation auf einer unregelmäßigen aber starren Oberfläche genutzt werden. So können insbesondere großflächige Sensorelemente aufgezogen werden ohne dass diese exakt maßgefertigt werden müssen.

Elastomersensoren sind teilweise oder ganz aus Elastomermaterialien bestehende Systeme, die die Verformung durch eine externe mechanische Einwirkung auf eine einfach messbare Ausgangsgröße umformen. In den meisten Fällen handelt es sich bei der Ausgangsgröße um eine elektrische Kapazität (kapazitive bzw. dielektrische Sensoren) oder einen elektrischen Widerstand (resistive Sensoren). Im Allgemeinen weisen dielektrische Sensoren gegenüber resistiven Sensoren eine höhere Sensitivität, eine höhere Temperaturstabilität, einen geringeren Energieverbrauch und ein breiteres Anwendungsspektrum auf^[9,10], weshalb sich diese Arbeit auf [Dielektrische Elastomer Sensoren \(DES\)](#) konzentriert. Die Auswahl des konkreten Elastomers basiert dabei nicht nur auf seinen mechanischen Eigenschaften, sondern auch auf dessen Verarbeit-

barkeit und Stabilität gegenüber Umwelteinflüssen. Silicone zeichnen sich hierbei u.a. durch weitreichende Modifizierbarkeit und gute Verarbeitbarkeit sowie hohe Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen aus^[11], weshalb sie in dieser Arbeit als Material bevorzugt wurden. Je nach Anforderungen kommen jedoch auch weitere Vertreter wie z.B. thermoplastische Polyurethane oder Naturkautschuk in Frage.

Auch wenn das grundlegende Prinzip eines DES auf Basis des Modells einen Plattenkondensator umfassend untersucht und auch bereits in kommerzielle Anwendungen^[12-14] gebracht wurde, bieten sich durch Mehrelektrodensysteme, selektive Beschaltung und spezifisch angepasste dielektrische Schichten eine Vielzahl deutlich darüber hinausgehender Ausgestaltungsmöglichkeiten. Weiterhin mangelt es noch an automatisierten und skalierbaren Fertigungsverfahren, die die Technologie aus dem Labor in eine breite industrielle Anwendung bringen können. Für die Anwendung ist wiederum der Blick auf das Gesamtsystem von großer Bedeutung, das neben dem Sensor selbst auch geeignete Messelektronik, Auswertalgorithmen und Integrationschnittstellen in übergeordnete Systeme erfordert. Übergreifendes Ziel der Arbeit ist es daher, die wesentlichen Grenzen und Schwächen der Technologie in ihrer Breite darzulegen und gangbare Wege zu deren Überwindung aufzuzeigen.

In Kapitel 2 soll hierzu auf die grundlegende Technologie und deren Erweiterung zu orts aufgelösten und multimodalen Systemen eingegangen werden. Während zu Beginn der Kapitel die Elektroden zunächst noch als ideale elektrische Leiter und die dielektrischen Schichten als ideal-elastisch angenommen werden, widmet sich das Kapitel im weiteren Verlauf auch den realen Materialeigenschaften und deren Einfluss auf die Kenngrößen des Sensorsystems.

Um die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Materialien mit Hinblick auf ihre Verwendung in DES zu optimieren, wird in Kapitel 3 der Blick auf die inneren chemischen und physikalischen Wechselwirkungen der Siliconkomposite gerichtet. Neben der Anpassung der Materialzusammensetzung spielt für die Weiterentwicklung der DES die Etablierung neuer Herstellungs- und Integrationsprozesse eine bedeutende Rolle. Kapitel 4 transferiert hierzu Konzepte aus der konventionellen Leiterplattentechnik in Form von galvanischer Metallisierung und Laserstrukturierung auf mehrschichtige Folienaufbauten aus Silicon.

In der Anwendung bestehen Sensorsysteme stets neben dem eigentlichen Sensor auch aus Hard- und Software zur Messung, Auswertung und Interpretation der Signale. Gerade bei komplexen, mehrdimensionalen Systemen sind zudem robotische Systeme und fortschrittliche Algorithmen aus dem Bereich des Maschinellen Lernens eine sinnvolle Erweiterung. Hierzu werden in Kapitel 5 verschiedene Ausführungsbeispiele beschrieben und deren robotergestützte Charakterisierung durchgeführt.

Kapitel 2

Sensortechnologie

2.1 Einleitung

Dielektrische Elastomer Sensoren (DES) sind flexible und auch dehnbare Sensoren mit einem kapazitiven Messprinzip. In ihrer einfachsten Form bestehen sie aus einer dehnbaren Elastomerfolie als Dielektrikum, die beidseitig mit leitfähigen und ebenfalls dehnbaren Schichten als Elektroden bedeckt ist. Damit entsteht ein mechanisch verformbarer elektrischer Kondensator, dessen Kapazität mit der Dehnung der Elastomerfolie stetig ansteigt. Neben solchen Dehnungssensoren lassen sich mit einem geeigneten geometrischen Aufbau von Elastomer-Dielektrika- und Elektroden-schichten auch dielektrische Elastomersensoren realisieren, bei denen eine elektrische Kapazität mit einem angelegten Druck bzw. einer Kraft auf die Oberfläche, mit einer Scherkraft oder mit der Annäherung eines elektrisch leitfähigen oder polarisierbaren Körpers wie z. B. der menschlichen Hand messbar ansteigt. Solche dielektrischen Elastomersensoren gehören zum Stand der Technik^[15–19].

Im Kontext dieser Arbeit bezeichnet **Multimodalität** die Eigenschaft eines Sensors, mehrere **Modalitäten** wie Druck, Scherung, Näherung oder Dehnung separat voneinander erfassen zu können. **Ortsauflösung** bezeichnet hingegen die Eigenschaft eines Sensors, eine Aussage über den Verlauf einer oder mehrerer Modalitäten innerhalb eines Volumens, einer Fläche oder entlang einer Linie treffen zu können. Wie grundsätzlich bei allen Sensorprinzipien möglich, kann auch bei dielektrischen Elastomersensoren eine **ortsaufgelöste** und **multimodale** Messung durch eine Verteilung mehrerer einzelner Sensorelemente verschiedenen Typs auf einer Oberfläche bzw. in einem Volumen erfolgen. Dieses Vorgehen zieht jedoch eine erhebliche Fertigungskomplexität nach sich, da jede Instanz separat hergestellt, befestigt und kontaktiert werden muss und zudem Detektionslücken (bei Anordnung verschiedener Sensortypen nebeneinander) oder Signalverfälschungen (bei Anordnung verschiedener Sensortypen

übereinander) auftreten. Weiterhin kann bei herkömmlichen Sensorsystemen das von der Messung erfasste Volumen nicht optimal eingegrenzt werden, so gehen beispielsweise auch Zuleitungen oder Randbereiche in die Messung ein.

In diesem Kapitel soll daher dargelegt werden, wie durch eine geeignete Anordnung der Elektroden, die Abstimmung der mechanischen Eigenschaften der verschiedenen dielektrischen Schichten und die selektive elektrische Ansteuerung der Elektroden die **Ortsauflösung** und **Multimodalität** für **DES** ermöglicht werden kann. Im Detail sollen die Lösungswege für diese Aufgabe in diesem Kapitel in der Theorie dargelegt werden, während sie in **Kapitel 5** schließlich zur Anwendung kommen. Zudem soll auf die Abweichung des realen Materialverhaltens vom Ideal bezüglich Mechanik und elektrischer Leitfähigkeit eingegangen werden, deren innere Ursachen anschließend in **Kapitel 3** behandelt werden.

2.2 Stand der Wissenschaft und Technik

Zur (ortsaufgelösten) Detektion von Druck, Scherung, Dehnung und Näherung existieren bereits eine Vielzahl von Konzepten, die jedoch auf der teilweisen Verwendung von unelastischen Komponenten basieren. Dazu zählen Folien-Elektroden aus Metall, metallisierten Polymeren oder intrinsisch leitfähigen Polymeren sowie starre Leiterplatten und Halbleiterstrukturen. Gerade wegen der unelastischen Natur der üblicherweise verwendeten Elektrodenmaterialien sind multimodale, übereinander gelagerte Systeme bisher kaum beschrieben worden, da beispielsweise eine unelastische Schicht zur Näherungsdetektion die lokale Verformung einer darunterliegenden drucksensitiven Schicht behindern würde. Zudem erhöht das bloße Aufeinanderstapeln von Sensorschichten erheblich die Dicke des Gesamtaufbaus sowie die Komplexität der Fertigung. Eine multimodale Messung von Näherung und Kraft ohne Ortsauflösung unter Verwendung starrer Materialien ist etwa in WO2018012329A1^[20] beschrieben. Um die Zuleitung von der Messung auszuschließen, ist sie in der Regel aus unelastischen Materialien gefertigt (z.B. Koaxial-Kabel oder Platinen) und mit einer Masse-Schirmung versehen. Dies erschwert jedoch die zweckmäßige Verwendung des Elastomersensors erheblich, da die Zuleitung einer Dehnungsbeanspruchung nicht folgen kann. Alternativ ist die Sensorzuleitung ungeschirmt, was jedoch insbesondere bei kleinen Sensorkapazitäten durch Einkopplung von Störfeldern oder Änderungen in der dielektrischen Umgebung zu einem schlechten Signal-Rausch-Verhältnis führt. Zur Ortsauflösung ist eine Matrix-Anordnung der Elektroden etabliert, z.B. für die Druckmessung beschrieben in EP2899521B1^[17]. Jedoch eignet sich die bloße Anord-

nung der Elektroden in dieser Form und die Messung der Kapazität zwischen den einzelnen Elektroden nur für eine grobe, qualitative Erfassung der Eingangsgröße und deren Flächenverteilung, da es ohne zusätzliche technische Maßnahmen zu einer Einkopplung der Kapazitäten zwischen den übrigen Elektroden in die zu messende Kapazität kommt. Essentiell für eine präzise quantitative Erfassung ist die gleichzeitige vollständige Ausblendung der übrigen Kapazitäten durch Neutral-Schaltung der übrigen Elektroden.

Im Falle eines elastischen Sensors mit Matrixanordnung ist zudem unklar, wie die Kapazitätsänderung durch Änderung der eigentlichen Messgröße (z.B. Druck) von der Beeinflussung durch Dehnung des Sensors (z.B. durch Applikation auf einem Polster) unterschieden werden kann. Selbiges gilt auch für den in US2014210490A1^[21] beschriebenen kombinierten, orts aufgelösten Näherungs- und Drucksensor. Dieser Aufbau stellt zudem eine bloße Überlagerung von bekannten Sensorprinzipien ohne Ausnutzung von Synergien bzw. ohne die Vermeidung von Redundanz zur Platz- und Kosteneinsparung dar. WO2015198208A1^[22] zeigt wiederum einen Aufbau mit einer zweilagigen Matrix, die gleichzeitig Näherung und Druck orts aufgelöst erfassen soll. Die Anforderung der (auf dem Prinzip der Gegenkapazität beruhenden) Näherungsmessung, den Überlappingsgrad zwischen den Elektroden möglichst gering zu halten, kollidiert dabei jedoch direkt mit der Anforderung der Druckmessung, den Überlappingsgrad möglichst groß zu halten. In der dargestellten Form ist von der Näherungsmessung und/oder Druckmessung nur ein geringes Signal-Rausch-Verhältnis zu erwarten.

Die Neutral-Schaltung von Elektroden (Ausblenden ihrer Kapazität in der Messung) zur Limitierung des räumlichen Messbereichs ist zwar in der konventionellen Leiterplattentechnik bekannt, jedoch wurde das Potential für Elastomersensoren bislang noch nicht erkannt. Neutrale Schirmungen für kapazitive Touch-Eingabefelder wurden u.a. bereits in US20120074961A1^[23] beschrieben, finden dort jedoch nur auf starren Leiterplatten bzw. flexiblen Folienleitern Anwendung. Zudem wird die spezifische Beschaltung der Elektroden nur zur Verringerung der Gesamtkapazität und des Systemrauschens eingesetzt, nicht aber zur Orts- oder Modalitätsselektion. In US20180073942A1^[24] wird eine Neutralschaltung zur Kraft- und Drehmomentmessung eingesetzt, es handelt sich jedoch um einen starren Aufbau, in dem lediglich Zwischenschichten aus einem Elastomer bestehen. Selbiges gilt für den Aufbau von Huang et al.^[25] und Zhang et al.^[26]. Im von Yip et al.^[27] beschriebenen orts aufgelösten Drucksensor wird die Neutralschaltung in einer Matrix angewendet, jedoch enthält der Sensor hystereseanfällige Textilien statt kompressibler Elastomerstrukturen, ist einseitig ungeschirmt und nicht dehnbar.

Auch wenn in vielen Veröffentlichungen ein elektromechanisches Modell entwickelt wird, das externe Kräfte mit einer Kapazitätsänderung in Verbindung setzt, wird in der Regel keine Betrachtung der Messstrecke vorgenommen, mit der diese Kapazität gemessen wird. Untersuchungen zum Frequenzverhalten wurden von Xu et al. [28] vorgenommen, allerdings wurden dabei der Widerstand der Masselektrode nicht einbezogen und keine Fehlerbetrachtung vorgenommen. Auch die dielektrischen Schichten werden in der Regel als ideal-elastisch angenommen ohne auf viskose Anteile einzugehen [29-31].

Zusammengefasst sind bestehende Sensoren entweder nicht flexibel und dehnbar oder aber durch Materialbeschaffenheit, Geometrie und elektrische Beschaltung nicht zur präzisen ortsselektiven und/oder multimodalen Messung geeignet. Zudem wird das reale Materialverhalten bei der Systembetrachtung nicht berücksichtigt. Ausgehend hiervon war es Ziel der vorliegenden Arbeit die beschriebenen Nachteile des gegenwärtigen Standes der Technik zu überwinden und ein Sensorsystem zu entwickeln, das zum einen eine ortsselektive oder multimodale Messung erlaubt und zum anderen flexibel und bei Bedarf sogar dehnbar, zum Beispiel als Folie, aufgebaut ist. Die Fähigkeit des elastomeren Sensorsystems zur multimodalen und/oder ortsaufgelösten Messung bei gleichzeitig geringer Fertigungskomplexität ist nur durch ein eng verzahntes Zusammenspiel aus Sensormaterialien, Sensorgeometrien und elektrischer Ansteuerung möglich, so dass diese Aspekte im Folgenden gemeinsam betrachtet werden.

2.3 Erweiterte Konzepte

2.3.1 Grundlagen

2.3.1.1 Elektroden

Grundsätzlich ist bei der Kapazitätsmessung zwischen der **Eigenkapazität** einer **Elektrode** und der **Gegenkapazität** zu unterscheiden.

Die **Eigenkapazität** ist die Kapazität eines Leiters (Messleiter) bezüglich eines weiteren Leiters (Referenzleiter) mit konstantem Potential, in der Regel Massepotential, wobei sich der weitere Leiter auch im unendlichen Abstand befinden kann. Zur Eigenkapazitätsmessung wird i.d.R. das Potential des Messleiters zeitlich variiert und die daraus resultierende Ladungsverschiebung am Messleiter selbst betrachtet.

Die **Gegenkapazität** ist die Kapazität eines Leiters (Messleiter) bezüglich eines weiteren Leiters (Referenzleiter) mit zeitlich variierendem Potential. Zur Gegenkapazi-

tätsmessung wird i.d.R. der Potentialverlauf des Referenzleiters vorgegeben und die resultierende Ladungsverschiebung am Messleiter betrachtet. Der Referenzleiter wird daher auch als Sender und der Messleiter als Empfänger bezeichnet.

Eine **Elektrode** ist in diesem Kontext ein elektrischer Leiter innerhalb oder auf dem dielektrischen Körper, also dem Materialvolumen, das vom elektrischen Feld der Leiter durchsetzt ist (**Dielektrikum**).

In den zugehörigen Messverfahren, der Eigenkapazitäts- und der Gegenkapazitätsmessung existieren jeweils eine oder mehrere Elektroden folgender Klassen:

- **Messelektrode**
- **Referenzelektrode**
- **Neutralelektrode**

Messelektrode Eine oder mehrere Elektroden, deren Kapazität gegenüber einer oder mehreren Referenzelektroden Gegenstand der Messung ist. Bei einer Eigenkapazitätsmessung kann statt einer Referenzelektrode auch ein Referenzleiter in der Umgebung des Sensors (unendlich entferntes Massepotential oder elektrisch leitfähige Körper) herangezogen werden. Bei einer Eigenkapazitätsmessung wird das Potential der Messelektroden i.d.R. durch eine niederohmige Spannungsquelle zeitlich variiert und aktiv betrieben. Bei einer Gegenkapazitätsmessung werden die Messelektroden i.d.R. passiv, d.h. an einem hochohmigen Anschluss betrieben.

Referenzelektrode Eine oder mehrere Elektroden, gegenüber denen die Kapazität der Messelektroden erfasst wird. Bei einer Eigenkapazitätsmessung liegt deren Potential i.d.R. zeitlich konstant auf Massepotential. Bei einer Gegenkapazitätsmessung ist deren Potential zeitlich variabel und durch eine niederohmige Spannungsquelle definiert.

Neutralelektrode Eine oder mehrere Elektroden, deren Potential bzw. zeitlicher Potentialverlauf derart beschaffen ist, dass sie explizit keine Referenzelektroden darstellen. Bei einer Eigenkapazitätsmessung befinden sich diese i.d.R. auf dem (annähernd) gleichen Potential wie die Messelektroden, wodurch zwischen beiden keine Ladungsverschiebung auftritt. Bei einer Gegenkapazitätsmessung befinden sich diese i.d.R. auf einem zeitlich konstanten Potential, so dass die damit verbundene konstante Ladungsverschiebung auf den Messelektroden von der zeitlich veränderlichen Ladungsverschiebung durch die Referenzelektroden unterscheidbar bleibt. Unterliegt

die Kapazität zwischen Neutral- und Messelektroden ebenfalls zeitlichen Änderungen, so bleibt die Unterscheidbarkeit der Ladungsverschiebung auf den Messelektroden noch durch eine i.d.R. um Größenordnungen schnellere Potentialänderung auf den Referenzelektroden gegeben.

2.3.1.2 Dielektrika

Das Volumen zwischen den Elektroden ([Dielektrikum](#)) und ggf. die Elektroden selbst sind bei [DES](#) aus elastischen Strukturen aufgebaut. Ihr Verhalten bei Beanspruchung durch externe Kräfte lässt sich in folgende Klassen aufteilen:

- [elastisches, volumeninkompressibles Dielektrikum](#)
- [elastisches, isotrop-volumenkompressibles Dielektrikum](#)
- [elastisches, anisotrop-volumenkompressibles Dielektrikum](#)

Für ein [elastisches, volumeninkompressibles Dielektrikum](#) genügt bereits eine einfache durchgängige Elastomerschicht bzw. ein Elastomervollvolumen mit Poissonzahl $\nu \approx 0,5$. Für ein [elastisches, isotrop-volumenkompressibles Dielektrikum](#) muss hingegen in irgendeiner Form (isotrope) Porosität geschaffen werden. Dies ist beispielsweise durch Aufschäumen oder Strukturieren des Elastomers möglich. Kurze Noppenprofile sind zwar nicht streng isotrop, werden der in dieser Arbeit der Übersicht wegen dennoch den isotrop-volumenkompressiblen Dielektrika zugeordnet. Das Elastomer selbst bleibt zwar inkompressibel, jedoch kann das Gas in den gebildeten Hohlräumen (in der Regel Luft) entweder komprimiert werden oder entweichen. Wenn die Gasvolumina selbst bzw. die verbliebenen Elastomerstrukturen stark anisotrop ausgebildet sind, kann ein anisotroper Verformungswiderstand für ein [elastisches, anisotrop-volumenkompressibles Dielektrikum](#) erzeugt werden. Hierzu sind beispielsweise längliche Noppen oder Lamellen geeignet, die sich gegenüber einer vertikalen Kraft relativ starr verhalten, gegenüber einer seitlich angreifenden Kraft jedoch leicht nachgeben.

2.3.1.3 Messprinzip

Das Konzept der [DES](#) ermöglicht es, eine Vielzahl von mechanischen und geometrischen Größen zu messen. Allen Varianten ist dabei gemein, dass sie mindesten eine der Eingangsgrößen der Sensorkapazität beeinflussen: Elektrodenabstand Δd , Elektrodenfläche ΔA und Permittivität des Dielektrikums $\Delta \epsilon_r$. Eine grobe Abschätzung des Zusammenhangs zwischen den genannten Größen und der Sensorkapazität C_s

bietet die Berechnungsformel für die Kapazität eines Plattenkondensators mit zwei parallelen Elektroden mit der Fläche A und dem Abstand d mit einem dazwischen liegenden Dielektrikum mit der relativen Permittivität ϵ_r sowie ϵ_0 als Permittivität des Vakuums:

$$C_s = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (2.1)$$

Die gemessene Kapazitätsänderung kann dabei durch eine Verformung des dielektrischen Körpers durch Druckkraft/-spannung, Scherkraft/-spannung, Zugkraft/-spannung oder durch die Annäherung eines elektrisch leitfähigen oder polarisierbaren Körpers an das Sensorsystem erzeugt werden. Somit können unterschiedliche Messgrößen mit dem selben Grundaufbau erfasst werden, indem sie mindestens eine der folgenden Änderungen verursachen:

- Reale Flächenänderung ΔA : Änderung der Gesamtoberfläche einer oder mehrerer Elektroden
- Effektive Flächenänderung ΔA_{eff} : Änderung der Überlappungsfläche oder der Orthogonalprojektion der Fläche einer Elektrode auf die Fläche einer anderen Elektrode
- Abstandsänderung Δd : Änderung des Abstandes zwischen zwei Elektroden
- Dielektrische Änderung $\Delta \epsilon_r$: Änderung der Permittivität des Dielektrikums

2.3.1.4 Einzelmodalität

Näherung Zur Erfassung eines sich nähernden Objekts genügt bereits die Verwendung einer einzelnen Elektrode, da die entsprechende Gegenelektrode von der Umgebung gebildet wird (vgl. [Abbildung 2.1a](#)). Stark vereinfacht verursacht eine Änderung der Entfernung des Objekts je nach elektrischen Eigenschaften eine Veränderung der Permittivität ($\Delta \epsilon_r$) des von der Elektrode erfassten Volumens (nichtleitfähige Materialien mit $\epsilon_r > 1$) oder eine Verringerung des effektiven Elektrodenabstands (Δd , leitfähiges und geerdetes Material).

Dehnung Ein Dehnungssensor besteht hingegen aus zwei Elektroden und einem dazwischenliegenden [elastischen, volumeninkompressiblen Dielektrikum](#) (vgl. [Abbildung 2.1b](#)). Dieses besteht in der Regel aus einer durchgängigen Elastomerschicht. Die Kapazität des damit gebildeten Plattenkondensators ist gemäß [Gleichung 2.1](#)

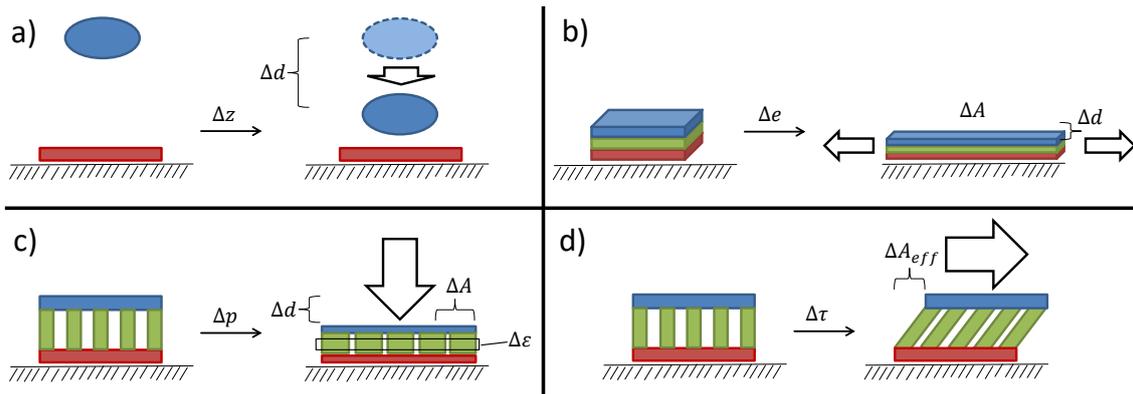


Abb. 2.1: Sensorprinzipien für die Modalitäten Objektabstand Δz (a), Dehnung $\Delta \epsilon$ (b), Druck Δp (c) und Scherung $\Delta \tau$ (d), die jeweils eine oder mehrere Eingangsgrößen der Sensorkapazität beeinflussen (Elektrodenabstand Δd , Elektrodenfläche ΔA bzw. effektive Flächenänderung ΔA_{eff} und Permittivität des Dielektrikums $\Delta \epsilon_r$).^[7]

durch den Abstand und die Fläche der Elektroden sowie die Permittivität des dazwischen liegenden Dielektrikums definiert. Die Dehnung des Gesamtaufbaus verringert den Abstand der Elektroden (Δd) bei Erhalt oder zusätzlicher Vergrößerung der Elektrodenfläche (ΔA) und erhöht damit die Kapazität.

Druck Im Gegensatz zum Dehnungssensor besteht ein dielektrischer Drucksensor aus zwei Elektroden mit einem kompressiblen Dielektrikum, vorzugsweise ein **elastisches, isotrop-volumenkompressibles Dielektrikum**. Hierzu kann das Dielektrikum eine Porosität oder eine Hohlstruktur wie etwa ein Noppenprofil aufweisen. In letzterem Fall führt ein auf die Oberfläche des Sensors ausgeübter Druck zu einer Änderung aller für die Kapazität relevanten Größen (vgl. [Abbildung 2.1c](#)). Zum einen vergrößert sich die Elektrodenfläche geringfügig (ΔA) bei gleichzeitiger deutlicher Verringerung des Abstandes (Δd), zum anderen wird der Luftanteil des Volumens des Dielektrikums durch Verdrängung verringert, was zur einer erhöhten Permittivität ($\Delta \epsilon_r$) führt. Dabei führt jede einzelne Änderung zu einer Erhöhung der Kapazität. Sie steigt also stetig mit dem Druck ungeachtet der Gewichtung der Größenänderungen untereinander. Die Empfindlichkeit des Aufbaus ist maßgeblich über die mechanischen Eigenschaften des Elastomers und die Strukturierung des Dielektrikums einstellbar. Spezielle Aufbauten des Dielektrikums können die Druckwirkung zusätzlich zum Teil in Dehnungswirkung umformen und damit die Empfindlichkeit nochmals deutlich steigern.^[16,15]

Scherung Wird der zuvor beschriebene Drucksensor-Aufbau, statt in Richtung der Flächennormalen gestaucht, parallel zur Fläche geschert, tritt ebenfalls eine Kapazitätsänderung auf. Diese beruht auf der Verringerung der Überlappungsfläche der beiden Elektroden (ΔA_{eff}). Es kann also von einer kleineren effektiven Elektrodenfläche gesprochen werden (s. [Abbildung 2.1d](#)). Zur Erhöhung der Empfindlichkeit sollte das Dielektrikum ein [elastisches, anisotrop-volumenkompressibles Dielektrikum](#) mit derartiger Strukturierung sein, dass eine Verformung parallel zur Ebene möglichst leichtgänglich erfolgen kann.

2.3.1.5 Messelektronik

Neben dem eigentlichen Sensor beinhaltet das Sensorsystem auch eine [Kapazitive Messeinheit](#), in der Regel ein [Integrierter Schaltkreis \(IC\)](#) oder Mikrocontroller, wobei verschiedene Implementierungen kapazitiver Messverfahren existieren.

Grundlegende Verfahren Bei einer Kapazitätsmessung mittels Konstantstromquelle, wie sie in den Mikrocontrollern der Kinetis[®]-Familie des Herstellers NXP integriert ist, wird die Kapazität des Sensors C_s durch Messen der Ladezeit t_l bei konstantem Lade- und Entladestrom I_l im Spannungsfenster $\Delta U = U_2 - U_1$ zwischen einer unteren Schwellspannung U_1 und einer oberen Schwellspannung U_2 ermittelt^[32].

$$C_s = \frac{t_l \cdot I_l}{\Delta U} \quad (2.2)$$

Wird die Sensorkapazität C_s kontinuierlich zwischen den Schwellspannungen geladen und entladen, so ergibt sich die Messfrequenz f_m der resultierenden Sägezahnspannung gemäß [Gleichung 2.3](#).

$$f_m = \frac{1}{2t_l} = \frac{\Delta U C_s}{2I_l} \quad (2.3)$$

Die PSoC[®]-Reihe von Cypress sowie die dedizierten ICs von Analog Devices weisen einen Sigma-Delta-Modulator zur Kapazitätsmessung auf^[33,34]. Hierbei wird die Sensorkapazität hochfrequent abwechselnd mit einer Konstantstromquelle und mit einem Bezugspotential (Masse) verbunden. Hierbei stellt sich ein von der Schaltfrequenz und der Sensorkapazität abhängiger Strom ein. Die Stromquelle wird so modelliert, dass sie den abfließenden Strom gerade ausgleicht. In diesem Fall berechnet sich die gemessene Kapazität wie folgt aus dem effektiven modulierten Ladestrom I_{eff} , der

vorgegebenen Referenzspannung V_{ref} und der eingestellten Messfrequenz f_m :

$$C_s = \frac{I_{eff}}{V_{ref} \cdot f_m} \quad (2.4)$$

Bei beiden Implementierungen besteht grundsätzlich keine direkte Abhängigkeit vom elektrischen Widerstand der Elektroden, da die verwendeten Konstantstromquellen Schwankungen im Widerstand innerhalb ihrer technischen Grenzen ausgleichen. Daneben existieren jedoch noch weitere Messverfahren anderer Hersteller, bei denen der Widerstand teilweise direkt in die Messung eingeht. Da der Widerstand der elastischen Elektroden jedoch nicht als konstant angesehen werden kann und damit die Messung inhärent verfälscht, wird hier nicht weiter auf diese Verfahren eingegangen.

Auflösung und Genauigkeit Die Auflösung der Kapazitätsmessung der genannten Mikrocontroller hat zwar eine absolute Untergrenze, ist ansonsten aber stets relativ zum Messbereichsende. In der Regel beträgt die digitale Auflösung 16 bit, also $\frac{1}{2^{16}} \approx 0,0015\%$ vom Messbereichsende. Der Vorteil eines Sensors mit höherer Empfindlichkeit und damit in der Regel auch höheren Kapazitätsbereich relativiert sich daher weitgehend. Begrenzt ist dieser Effekt jedoch durch das statische Systemrauschen bzw. Umgebungsruschen wodurch das Signal-Rausch-Verhältnis für sehr kleine Kapazitäten deutlich ansteigt.

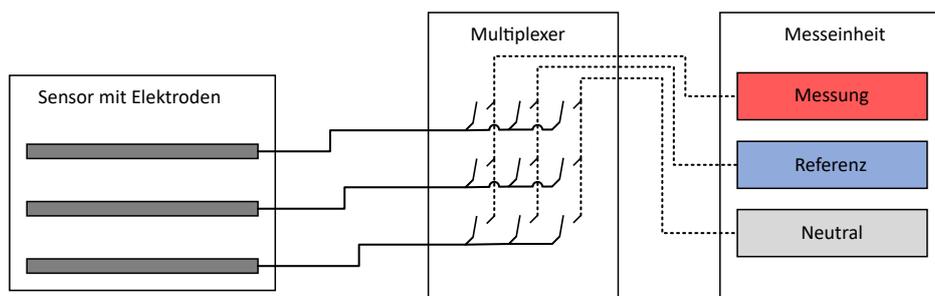


Abb. 2.2: Schematischer Aufbau einer Messelektronik für multimodale oder orts aufgelöste Sensoren mit mehreren separat angeschlossenen Elektroden bestehend aus einer Messeinheit mit Mess-, Referenz- und Neutralanschluss sowie einer Multiplexerschaltung zur variablen Zuordnung der Elektroden zu den Signalanschlüssen.

Multiplexing Neben der eigentlichen Messfunktion verfügt die [kapazitive Messeinheit](#) über Anschlüsse für die [Messelektrode](#), [Referenzelektrode](#) und [Neutralelektrode](#).

de (vgl. [Abbildung 2.2](#)). Hierzu wurden in dieser Arbeit aufbauend auf den Stand der Technik spezifische Schaltungen entworfen und Programmabläufe implementiert. Die eigentliche Zuordnung der Elektroden zu den Signalanschlüssen der Messeinheit erfolgt über eine elektrische Matrixschaltung ([Multiplexer](#)). Durch eine zeitlich variable Zuordnung der Elektroden zu den Signalanschlüssen der Messeinheit können nacheinander gleiche Messgrößen an unterschiedlichen Orten des Sensorsystems als [Ortsauflösung](#) oder unterschiedliche Messgrößen am gleichen Ort des Sensorsystems als [Multimodalität](#) aufgenommen werden.

2.3.2 Ortsauflösung

Bei einer ortsaufgelösten Messung erfolgt eine Variation der wirksamen Elektrodenfläche zur Lokalisierung der Einwirkzonen externer Einflüsse, beispielsweise der Bereich des Sensors, der durch einen extern ausgeübten Druck verformt wird. Mindestens eine der Elektroden muss dafür lateral in zumindest zwei voneinander isolierte Abschnitte unterteilt werden. In der Regel erfolgt die Umsetzung über eine sog. Matrix-Anordnung, in der mehrere parallele, streifenförmige Elektroden in einer Ebene um 90° zu der gleichen Anordnung in einer anderen, dazu parallel ausgerichteten Ebene angeordnet sind (vgl. [Abbildung 2.3](#)).

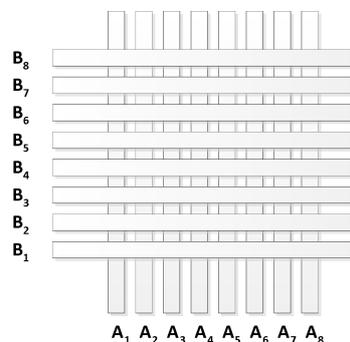


Abb. 2.3: Schematische Skizze des ortsaufgelösten Matrix-Sensors mit Mess-/Neutralelektroden A und Referenz-/Neutralelektroden B ^[19]

Die Überlappung von je zwei der Elektroden aus unterschiedlichen Lagen stellt eine weitgehend unabhängige Messeinheit dar und entspricht einem Pixel in einem optischen Display. Entsprechend kann diese Überlappungsfläche auch als Messpixel oder Messelement bezeichnet werden. So kann ein einfacher, nur aus einem Kondensator bestehender Sensor auf eine Matrix aus n [Messelektroden](#) und m [Referenzelektroden](#) erweitert werden. Daraus ergeben sich insgesamt $n \cdot m$ Kondensatoren an den Kreuzungspunkten, die jeweils lokal eine Modalität erfassen können. Statt $n \cdot m$ sind hierzu jedoch nur $n + m$ Anschlüsse notwendig. Zur messtechnischen Separierung

einer einzelnen Kapazität ist es jedoch nötig, immer nur genau eine **Messelektrode** und eine **Referenzelektrode** aktiv zu schalten und alle anderen Kapazitäten dabei auszublenden. Hierzu sind die Elektroden A_i zwischen dem **Messsignalanschluss** und dem **Neutralsignalanschluss** und die Elektroden B_j zwischen **Referenzsignalanschluss** und dem **Neutralsignalanschluss** der **kapazitiven Messeinheit** schaltbar (vgl. **Abbildung 2.3**). Zur Messung der Kapazität C_{ij} des Messelements zwischen A_i und B_j wird also A_i auf das **Messsignal** und B_j auf das **Referenzsignal** geschaltet. Alle verbliebenen Elektroden werden jeweils mit dem **Neutralsignal** verbunden und gehen damit nicht in die Kapazitätsmessung ein.

2.3.3 Multimodalität

Für eine multimodale Messung wurde in dieser Arbeit eine Variation der wirksamen Elektrodenfläche zur Unterscheidung zwischen externen Einflüssen implementiert. Als einfaches Beispiel für einen multimodalen Sensor kann ein Aufbau aus drei Elektroden (oben, unten, Mitte) und zwei Dielektrika (oben, unten) betrachtet werden (vgl. **Abbildung 2.4**, oben Mitte).

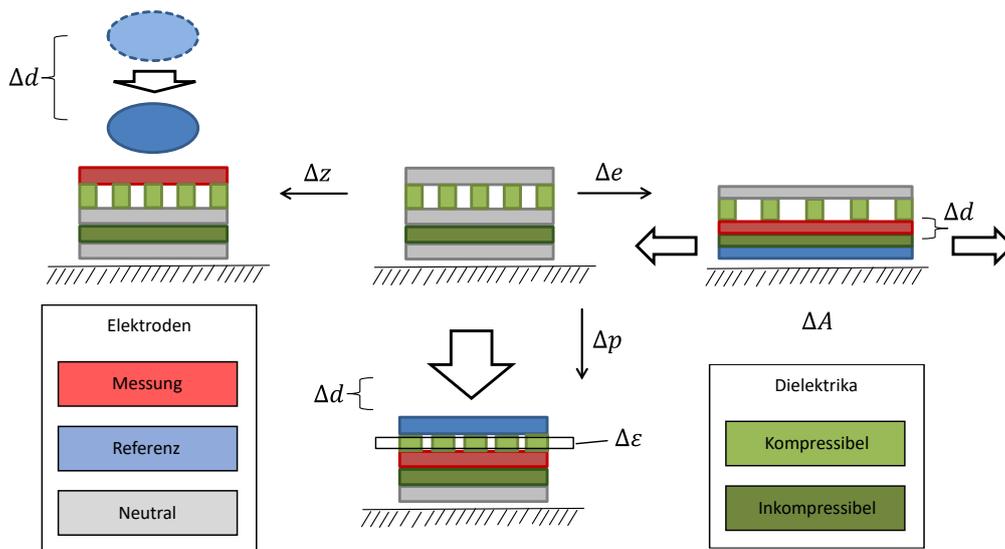


Abb. 2.4: Sensorprinzipien für multimodale Messung: Näherungsmessung (links), Dehnungsmessung (rechts) und Druckmessung (unten)

Das obere Dielektrikum ist dabei als **elastisches, isotrop-volumenkompressibles Dielektrikum**, das untere als **elastisches, volumeninkompressibles Dielektrikum** ausgeführt. Um eine Objektannäherung (z) zu detektieren wird die obere Elektrode als **Messelektrode** (rot) geschaltet, die übrigen als **Neutralelektroden** (grau) (vgl. **Abbildung 2.4**, oben links). Damit wird der untere Teil des Sensors abgeschirmt (die

Kapazität zwischen der oberen und der mittleren Elektrode geht nicht in die Messung mit ein) und die Messung auf den Bereich oberhalb des Sensors fokussiert.

Zur Messung einer Dehnung des Sensors (Δl) wird die obere Elektrode als **Neutralelektrode** (grau), die mittlere Elektrode als **Messelektrode** (rot) und die untere Elektrode als **Referenzelektrode** (blau) geschaltet (vgl. [Abbildung 2.4](#), oben rechts). Damit geht nur die Kapazität zwischen der mittleren und der unteren Elektrode in die Messung ein. Da die dazwischenliegende Schicht ein **elastisches, volumeninkompressibles Dielektrikum** ist, verformt sich dieses überwiegend unter Dehnung, jedoch kaum unter Druckbeanspruchung.

Zur Messung der Druckbelastung des Sensors (Δp) wird die obere Elektrode als **Referenzelektrode** (blau), die mittlere Elektrode als **Messelektrode** (rot) und die untere Elektrode als **Neutralelektrode** (grau) geschaltet (vgl. [Abbildung 2.4](#), unten). Damit geht nur die Kapazität zwischen der mittleren und der oberen Elektrode in die Messung ein. Da die dazwischenliegende Schicht ein **elastisches, isotrop-volumenkompressibles Dielektrikum** ist, verformt sich dieses leicht unter Druckbeanspruchung, jedoch auch unter Dehnungsbeanspruchung. Da die Dehnung jedoch separat und weitgehend unabhängig erfasst werden kann, kann die Querbeeinflussung entsprechend korrigiert werden.

2.4 Modellierung

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde zunächst von idealen Bedingungen ausgegangen, wie beispielsweise, dass die Verformung des **Dielektrikum** unmittelbar vollständig nach dem Anlegen einer externen Kraft erfolgt und der elektrische Widerstand der **Elektroden** auch im gedehnten Zustand gegen Null geht. Tatsächlich weisen jedoch alle Elastomere neben dem elastischen auch ein mehr oder minder ausgeprägtes viskoses Verhalten auf, das die Verformungsantwort verzögert. Die elektrische Leitfähigkeit von Siliconkompositen liegt um mehrere Größenordnungen unter den Werten von metallischen Leiterwerkstoffen (Kupfer, Silber, Aluminium, etc.) und muss bei der elektrischen Auslegung stets berücksichtigt werden. Zudem kann die Leitfähigkeit eines elastischen Leiters nicht als konstant angenommen werden, sondern ist abhängig von der Dehnung und Dehnungshistorie. In diesem Abschnitt sollen daher die Auswirkungen der nicht-idealen Materialeigenschaften auf die Kenngrößen des Sensors betrachtet werden.



Abb. 2.5: Schema der mechanischen Modellierung

2.4.1 Mechanische Modellierung

Die mechanische Modellierung befasst sich mit der Fragestellung, wie der genaue Zusammenhang zwischen externen Kräften und der hervorgerufenen Verformungsantwort eines Material-Systems ausgestaltet ist (vgl. [Abbildung 2.5](#)). Hierzu existieren unterschiedlich komplexe Modelle für verschiedene Materialklassen.

2.4.1.1 Grundlegende Modelle

Generell ist für Festkörper als das einfachste mögliche Modell das eines Hookschen Federelements (vgl. [Abbildung 2.6a](#)) als ideal-elastisches Modell zu nennen, gemäß dem die mechanische Spannung σ_{mech} linear mit der Proportionalitätskonstante E (E-Modul) von der Verformung ϵ abhängt:

$$\sigma_{mech} = E \cdot \epsilon \quad (2.5)$$

Auf der anderen Seite besteht für Flüssigkeiten das Newton-Modell (vgl. [Abbildung 2.6b](#)) für ideal-viskoses Verhalten, bei dem die mechanische Spannung σ_{mech} linear mit der Proportionalitätskonstante η (Viskosität) von der Verformungsgeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$ abhängt:

$$\sigma_{mech} = \eta \cdot \dot{\epsilon} \quad (2.6)$$

Das Hooksche Element folgt also einer sprunghaft angelegten Spannung unmittelbar und nimmt einen konstanten Deformationszustand ein. Das Newtonsche Element folgt hingegen der Anregung verzögert und nimmt eine konstante Deformationsgeschwindigkeit an. Die Deformation ist folglich fortwährend und erreicht zu keinem Zeitpunkt einen stabilen Endzustand. Auch wenn oftmals einzelne Elemente im Verhalten dominieren, stellen reale Materialien fast immer eine Überlagerung mehrerer

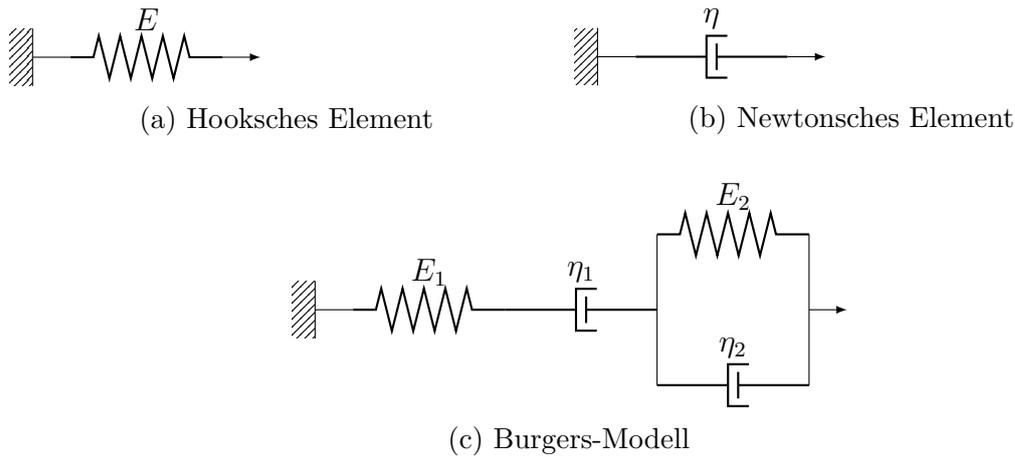


Abb. 2.6: Rheologische Modelle für das Verformungsverhalten von Elastomeren

rheologischer Elemente dar.

2.4.1.2 Burgers-Modell

Ein solches etabliertes Überlagerungsmodell zur Beschreibung der Verformungsantwort von Elastomeren stellt das Burgers-Modell dar^[35-37], welches mehrere rheologische Elemente miteinander kombiniert (s [Abbildung 2.6c](#)): Ein Hooksches Element repräsentiert die direkte elastische Verformung, ein in Serie dazu geschaltetes Newtonsches Element vertritt den viskosen Anteil, während eine in Serie dazu geschaltete Parallelschaltung eines Newtonschen und eines Hookschen Elements dem viskoelastischen Verhalten Rechnung trägt.

Durch die Serienschaltung der Elemente setzt sich die Gesamtverformung ϵ gemäß [Gleichung 2.7](#) aus der elastischen Verformung ϵ_{elast} , der viskosen Verformung ϵ_{viskos} und der viskoelastischen Verformung $\epsilon_{viskoelast}$ zusammen.

$$\epsilon = \epsilon_{elast} + \epsilon_{viskos} + \epsilon_{viskoelast} \quad (2.7)$$

Durch Lösen der resultierenden Differentialgleichung ergibt sich für die Zeitabhängigkeit der Verformung bei einer vorgegebenen Spannung σ_{mech} folgender Zusammenhang:

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_{mech}}{E_1} + \frac{\sigma_{mech} \cdot t}{\eta_1} + \frac{\sigma_{mech}}{E_2} \cdot (1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} \cdot t}) \quad (2.8)$$

Auch wenn das mechanische Verhalten von Siliconelastomeren in erster Näherung dem elastischen Term 1, also dem Hookschen Modell entspricht, weisen sie stets auch mehr oder minder große Newtonsche Anteile in ihrem Verhalten auf (Term 2 und 3). Genau diese Anteile sind es jedoch, die verhindern, dass der elastomere Körper

seinen endgültigen Verformungszustand sofort einnimmt. Dies zieht eine Reihe von nachteiligen Effekten für die Anwendung als Sensor nach sich.

Anhand des viskoelastischen und des viskosen Terms lassen sich diese wichtigen Zeiteffekte bei der Verformung von Elastomeren erklären. So kommt es zur fortgesetzten Verformung des Materials unter konstanter mechanischer Spannung (**Kriechen**) für eine endliche Zeitdauer durch den viskoelastischen Term und unbegrenzt lange durch den viskosen Term. Wird umgekehrt eine konstante Verformung vorgegeben, kommt es zu einer fortgesetzten Änderung der mechanischen Spannung (**Relaxation**).

Findet das Anlegen der mechanischen Spannung bzw. der Verformung (externe Vorgabe) nicht sprunghaft, sondern über einen ausgedehnten Zeitabschnitt statt, findet der Kriech- bzw. Relaxationsprozess bereits während des Etablierens der externen Vorgabe statt. Wird die externe Vorgabe nun wieder zurückgenommen befindet sich das Material bereits in einem veränderten Zustand wodurch die Rückverformungskurve von der ursprünglichen Verformungskurve abweicht (**Hysterese**).

Für die Materialien in einem **DES** ist es daher wichtig, die viskosen Materialeigenschaften so weit wie möglich zu minimieren (s. a. **Abschnitt 3.2**) und für die unvermeidbaren Anteile den Einfluss auf das Verhalten des Gesamtsystems abzuschätzen.

2.4.2 Elektrische Modellierung

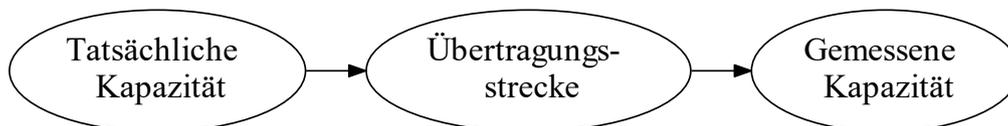


Abb. 2.7: Schema der elektrischen Modellierung

Die elektrische Modellierung befasst sich mit der Fragestellung, welche Abweichungen zwischen der gemessenen und der tatsächliche Kapazität einer Elektrodenanordnung durch die Übertragungsstrecke, also die elektrischen Eigenschaften der Elektrode selbst sowie der Kontaktierung und Zuleitung, verursacht werden (vgl. **Abbildung 2.7**).

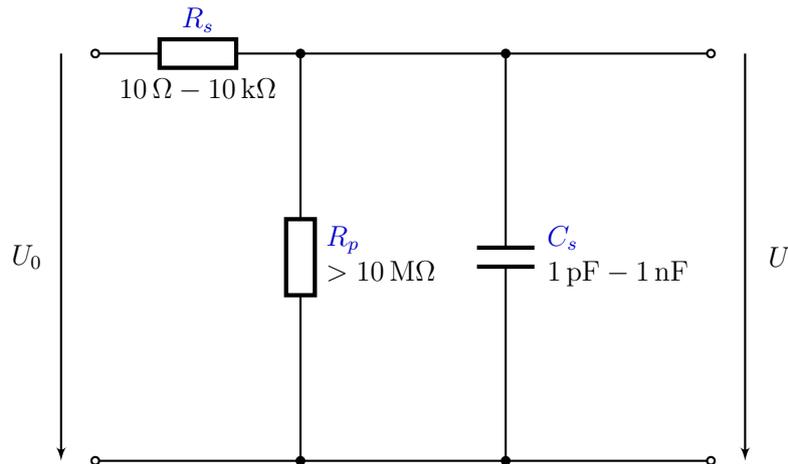


Abb. 2.8: Einfaches elektrisches Sensor-Ersatzschaltbild mit Sensorkapazität C_s , Zuleitungswiderstand R_s , Isolationswiderstand R_p , Ausgangsspannung der Messelektronik U_0 und an der Sensorkapazität anliegender Spannung U

2.4.2.1 Ersatzschaltbild

Um eine Abschätzung durch den Sensoraufbau verursachte systematische Fehler zu ermöglichen, ist es erforderlich, ein adäquates Ersatzschaltbild zu entwickeln. Im einfachsten Fall wird von einer punktuellen Sensorkapazität C_s ausgegangen, wobei die **Elektrode** einen Zuleitungswiderstand R_s und einen Isolationswiderstand R_p aufweist (vgl. [Abbildung 2.8](#)). Die Sensorkapazität bewegt sich in der Regel im Bereich zwischen $1\ \text{pF}$ und $1\ \text{nF}$. Der Isolationswiderstand liegt üblicherweise oberhalb von $10\ \text{M}\Omega$ während sich der Zuleitungswiderstand im Bereich $10\ \Omega - 10\ \text{k}\Omega$ bewegt. Da R_p generell sehr groß ist und zudem um einige Größenordnungen über R_s liegt, kann R_p in der weiteren Betrachtung vernachlässigt werden.

2.4.2.2 Erweitertes Ersatzschaltbild

Tatsächlich liegt die Sensorkapazität jedoch nicht punktuell, sondern kontinuierlich über die Elektrodenlänge in infinitesimal kleine Elemente verteilt vor, jeweils separiert durch ebenfalls infinitesimal kleine Widerstandselemente. [Abbildung 2.9](#) zeigt diese Verteilung schematisch vereinfacht mit jeweils 5 Kapazitäts- und 5 Widerstandselementen.

2.4.2.3 Simulation in LTspice

Um abzuschätzen, in wie weit das korrekte, aber komplexe $(RCR)_n$ -Modell durch das einfachere RC - und RCR -Modell ersetzt werden kann, wurden alle drei Modelle in

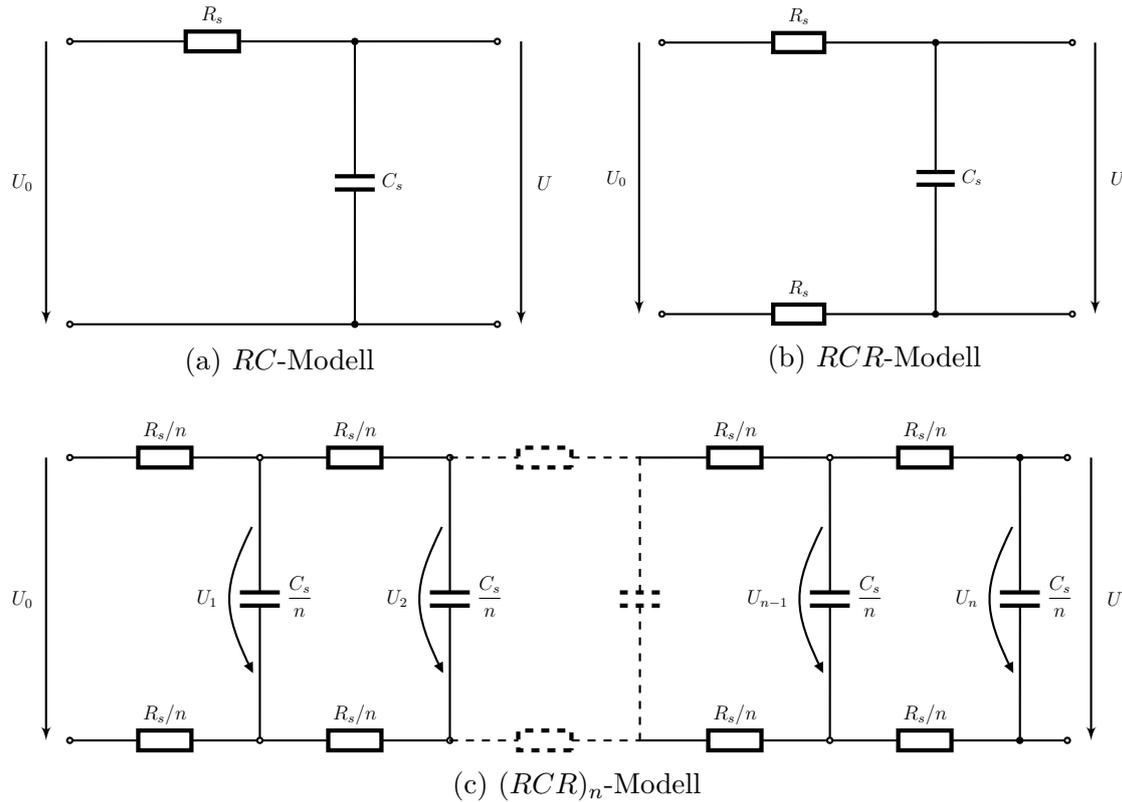
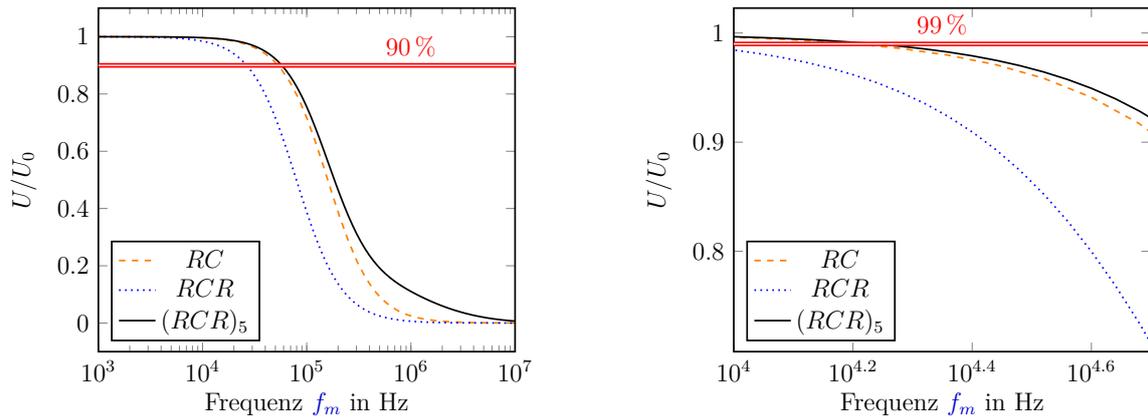


Abb. 2.9: Verschiedene elektrische Sensor-Ersatzschaltbilder mit Sensorkapazität C_s , Zuleitungswiderstand R_s , Ausgangsspannung der Messelektronik U_0 und an der Sensorkapazität anliegende Spannung U : Das RC -Modell (a) entspricht einem Tiefpass erster Ordnung. Das RCR -Modell (b) berücksichtigt den Widerstand beider Elektroden. Das erweiterte $(RCR)_n$ -Modell teilt die Sensorkapazität C_s und den Zuleitungswiderstand R_s zusätzlich entlang der Elektrodenlänge auf.

LTspice^[38] bezüglich ihres Frequenzverhaltens simuliert (s. [Abbildung 2.10](#)). Dabei wurde $R_s = 10 \text{ k}\Omega$, $C_s = 100 \text{ pF}$ und $n = 5$ festgelegt. Beim RC -Modell wird die Masseelektrode als ideal, also mit $R = 0$ angenommen. Für das $(RCR)_5$ -Modell wurden die Einzelspannungen wie folgt gemittelt:

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n (U_i)}{n} \quad (2.9)$$

Die Ergebnisse zeigen, dass das RC -Modell vor allem im relevanten Bereich niedriger Dämpfung d.h. im Bereich mit U/U_0 nahe 1 ($f_m < 10^5 \text{ Hz}$) weit weniger vom $(RCR)_n$ -Modell abweicht als das RCR -Modell. Die Dämpfung und damit der systematische Fehler ist beim RC -Modell dennoch geringfügig größer als beim $(RCR)_n$ -Modell, was die Abschätzung einer oberen Fehlergrenze durch das RC -Modell erlaubt.



(a) Gesamter Frequenzbereich mit Fehlerbereich 10 %

(b) Detailansicht bei 10 kHz mit Fehlerbereich 1 %

Abb. 2.10: Simulationsergebnisse der in [Abbildung 2.9](#) gezeigten Modelle mit $R_s = 10 \text{ k}\Omega$, $C_s = 100 \text{ pF}$ und $n = 5$. Dabei ist das Spannungsverhältnis U/U_0 über den üblichen Frequenzbereich der kapazitiven Messung (a) und in der Detailansicht nahe 10 kHz dargestellt. Zudem sind in rot die Fehlergrenzen 10 % ($U/U_0 > 0.90$) und 1 % ($U/U_0 > 0.99$) eingezeichnet.

2.4.2.4 Tiefpassverhalten

Für das RC -Modell gilt die analytische Lösung in [Gleichung 2.10](#), mit der das Frequenzverhalten (Abhängigkeit von der Messfrequenz f_m) für beliebige Kombinationen aus R_s und C_s berechnet werden kann.

$$\frac{U}{U_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f_m C_s R_s)^2}} \quad (2.10)$$

Für einen vorgegebenen Fehlergrenzwert U/U_0 lässt sich damit eine obere Grenze für die Messfrequenz f_m definieren:

$$f_m = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_0}{U}\right)^2 - 1}}{2\pi C_s R_s} \quad (2.11)$$

2.4.2.5 Messbereich

Da die Messfrequenz f_m der zur Messung verwendeten Mikrocontroller nach unten hin begrenzt ist, lässt sich damit bei einer gegebenen Fehlergrenze ein maximal tolerierbarer Wert für den Elektrodenwiderstand R_s ermitteln. In [Abbildung 2.11](#) sind die Kennlinien für eine Fehlergrenze von 10 %, d.h. $U \geq 0.9 \cdot U_0$ für die Sensorkapazitäten 1 pF, 10 pF, 100 pF und 1000 pF sowie die minimalen Messfrequenzen der Mikrocontrollerfamilien *PSoc*[®] und *Kinetis*[®] eingezeichnet.

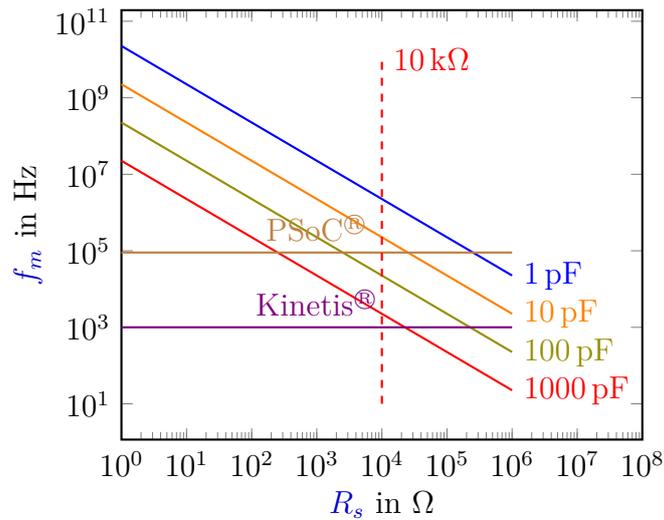


Abb. 2.11: Messbereich der Kinetis[®]- und PSoC[®]-Mikrocontroller-Familie mit ihren minimalen Messfrequenzen und der Fehlergrenze 10% gemäß Gleichung 2.11. Dabei ist für verschiedene Sensorkapazitäten C_s (1 pF, 10 pF, 100 pF und 1000 pF) dargestellt, welche maximale Frequenz f_m bei gegebenem Elektrodenwiderstand R_s noch innerhalb der Fehlergrenze liegt.

Für eine gegebene Messfrequenz kann damit der maximale Elektrodenwiderstand abgelesen werden und umgekehrt. Beispielsweise können bei einem Elektrodenwiderstand von $R_s = 10 \text{ k}\Omega$ mit der PSoC[®]-Familie Kapazitäten bis etwa 10 pF und mit der Kinetis[®]-Familie bis etwa 1000 pF gemessen werden.

2.5 Zusammenfassung und Fazit

Durch eine geschickte Anordnung der Elektroden, die Abstimmung der mechanischen Eigenschaften der verschiedenen dielektrischen Schichten und eine selektive elektrische Ansteuerung der Elektroden kann die Erfassung und Lokalisierung mehrerer Modalitäten wie Kräfte, Verformungen und Objekt-Näherung bei gleichzeitiger Separation des Einflusses verschiedener externer Größen auf die gemessene(n) Kapazität(en) erfolgen.

Die wesentlichen Vorteile der multimodalen und orts aufgelösten DES liegen in der Differenzierung und Lokalisierung mehrerer externer Einflüsse durch ein einzelnes Sensorbauteil bei gleichzeitig minimaler Komplexität des Sensors aufgrund der geringen Anzahl von Elektroden und Schichten. Trotz der Komplexität bleiben dabei die elastischen Eigenschaften des Sensorsystems erhalten. Damit können gegenüber getrennten Sensoren sowohl Bauraum als auch Kosten in der Herstellung eingespart und gegenüber starren Systemen wesentlich mehr Anwendungsszenarien bedient werden.

Gleichzeitig kann durch die dynamische Beschaltung der Elektroden der konkrete Messmodus, d.h. die Auswahl der zu detektierenden externen Größe und die Auswahl des aktiven Messbereichs, vom geometrischen, nicht variierbaren Aufbau in die Software des Messsystems verlagert werden und zeitlich flexibel variiert werden. So kann z.B. ein kombinierter Druck-Näherungssensor zunächst mit hoher Abtastung eine reine Näherungsmessung durchführen, bei detektiertem Kontakt jedoch auf eine reine Druckmessung umschalten. Ebenso kann in einem orts aufgelösten System dynamisch ein ROI-Bereich (engl. *Region of Interest*, ROI) definiert werden, der schneller oder genauer als die übrigen Bereiche abgetastet wird.

Für die Abweichung der Materialeigenschaften der Dielektrika und Elektroden vom Ideal aufgrund viskoser Anteile und eines nicht vernachlässigbaren elektrischen Widerstandes wurden wichtige Auswirkungen auf die Eigenschaften des Sensorsystems diskutiert. Diese Auswirkungen sind Grundlage für die Betrachtung der inneren Ursachen und Optimierungspotentiale im folgenden Kapitel.

Kapitel 3

Sensormaterialien

3.1 Einleitung

Für die Funktion eines [DES](#) sind maßgeblich Dielektrikums- und Elektrodenschichten relevant. Die Eigenschaften der dafür verwendeten Materialien sind daher entscheidend für die Eigenschaften des Sensors. Im Fall der dielektrischen Schichten definieren maßgeblich die viskoelastischen Materialeigenschaften die Verformungsantwort des Sensors. Bei den Elektrodenschichten sind die elektromechanischen Eigenschaften des verwendeten Materials für das elektrische Verhalten des Sensoraufbaus unter Verformung verantwortlich. Unabhängig von der konkreten Ausgestaltung des Sensors sind besonders zwei Materialeigenschaften der Schichten entscheidend für die Güte des Sensors. Einerseits sollen die dielektrischen Schichten ein möglichst wenig ausgeprägtes viskoses Verhalten aufweisen, da dies die Kriechneigung und Hysterese des Sensors erhöht, die Wiederholgenauigkeit verschlechtert und die Dynamik des Sensors beschränkt (vgl. [Abschnitt 2.4.1](#)). Andererseits sollten die Elektrodenschichten einen möglichst geringen elektrischen Widerstand aufweisen, da ein zu hoher Widerstand die Messung der Kapazität verfälscht bzw. die Messrate des Sensors beschränkt (vgl. [Abschnitt 2.4.2](#)). Im Folgenden wurden daher Untersuchungen mit dem Ziel durchgeführt, diese Eigenschaften im Hinblick auf Silicone bzw. Siliconkomposite durch die Materialzusammensetzung zu optimieren.

3.2 Viskoelastische Materialeigenschaften dielektrischer Schichten

3.2.1 Einführung und Stand der Wissenschaft und Technik

Grundpolymere Siliconelastomere bestehen aus linearen Polysiloxanketten, die durch endständig oder entlang der Molekülkette lokalisierte reaktive Gruppen miteinander vernetzt werden. Bei den in dieser Arbeit verwendeten Siliconen handelt es sich um vinyl-terminierte Polydimethylsiloxan (PDMS)-Ketten (**1a**), die über SiH-funktionale Vernetzer (**1b**) miteinander verbunden werden (s. [Abbildung 3.1](#)). Optional können die vinyl-terminierten PDMS-Ketten linear mit SiH-terminierten PDMS (**1c**) verlängert werden.

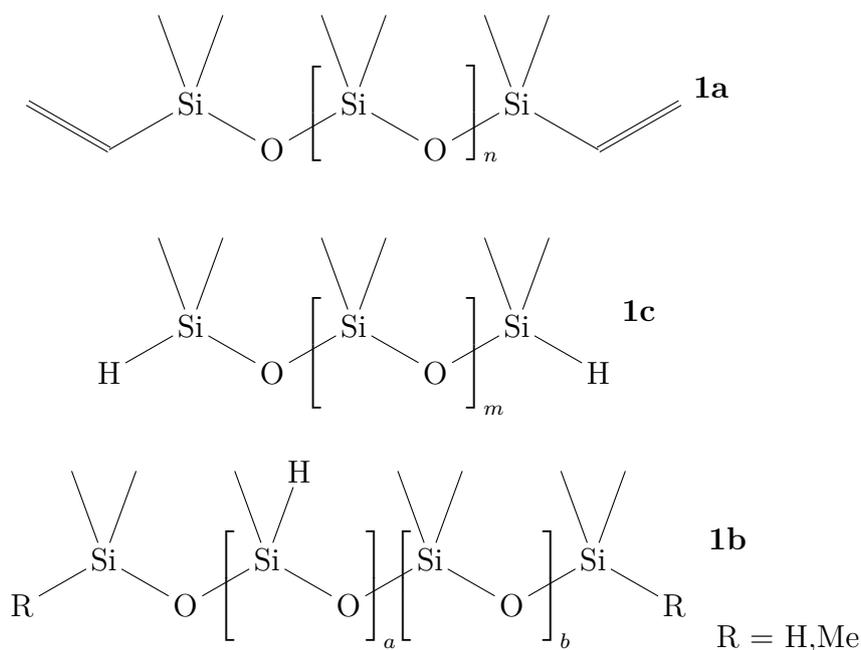


Abb. 3.1: Strukturformel von vinyl-terminiertem PDMS (**1a**)^[39], Kettenverlängerer (**1c**)^[40] und Vernetzer (**1b**)^[41]. Im Allgemeinen gilt $n, m \gg a, b$.

Katalysatoren Für die additive Vernetzung von Polysiloxanen kommen vor allem Platinkatalysatoren zum Einsatz. Dazu gehören der thermisch triggerbare *Platin-Divinyl-tetramethyldisiloxan-Komplex* (Karstedt-Katalysator) sowie die UV-aktivierbaren Komplexe *1-Methyl-1,2,3,4,5-cyclopentanpentayl-trimethylplatin* (CpPt-Me) und *Platin(2+)-bis[(2Z)-4-oxo-2-penten-2-olat]* (PtAcAc). Die Strukturformeln der genannten Verbindungen sind in [Abbildung 3.2](#) dargestellt. Inhibitoren treten in

konkurrierende Wechselwirkung mit den Platinkatalysatoren und können daher die Vernetzung bis zu ihrer Zersetzung oder ihrem Übergang in die Gasphase verzögern. Dazu gehören die Isomere *Dimethylfumarat* (DMF) und *Dimethylmaleat* (DMM), deren Strukturformeln in [Abbildung 3.3](#) dargestellt sind. Grundsätzlich können sich die Wahl und die Dosierung des Katalysators auch auf die mechanischen Eigenschaften des Silicons auswirken. Üblicherweise werden, sowie auch in dieser Arbeit, jedoch Dosierung und Reaktionsbedingungen (Zeit, Temperatur) so gewählt, dass eine nahezu vollständige Vernetzung sichergestellt ist. Inhibitoren werden nur insoweit eingesetzt, wie sie für die Handhabung unbedingt notwendig sind.

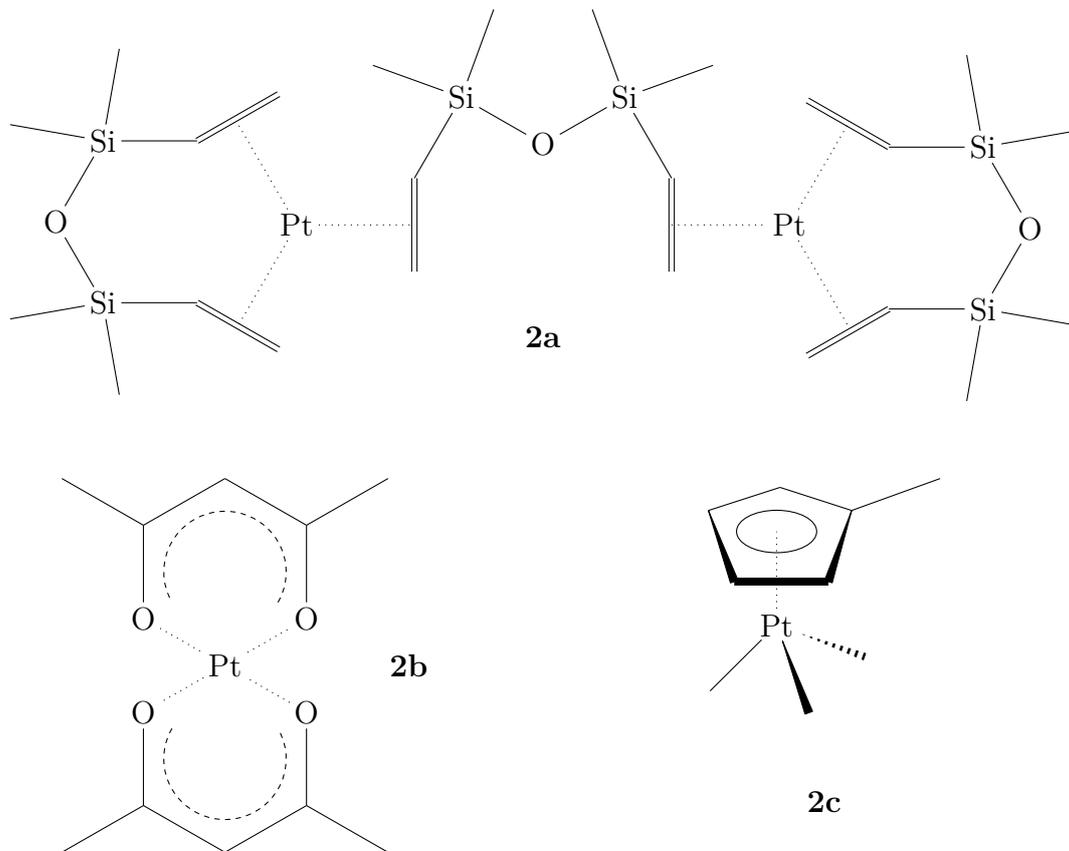


Abb. 3.2: Valenzformeln von [Karstedt-Katalysator](#) (2a), [PtAcAc](#) (2b) und [CpPtMe](#) (2c)

Füllstoffe Reine Siliconelastomere haben relativ schlechte mechanische Eigenschaften wie etwa eine geringe Reißdehnung und einen geringen Weiterreißwiderstand. Diese Eigenschaften können durch Zuschlagsstoffe wie [pyrogenes Siliciumdioxid](#) (pyrog. SiO_2) und [VQM-Harz](#) jedoch deutlich verbessert werden (s. [Abbildung 3.4](#)).

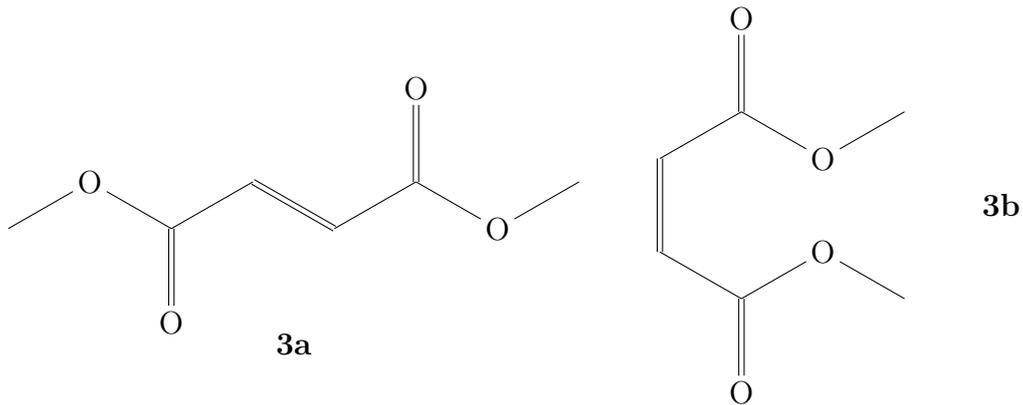


Abb. 3.3: Strukturformel von DMF (3a) und DMM (3b)

Bei *pyrog.* SiO_2 (4a) handelt es sich um amorphe Siliciumdioxid-Primärpartikel (SiO_2), die zu dreidimensionalen, kettenförmig verzweigten Sekundärpartikeln **aggregiert** sind. Diese bilden wiederum hoch poröse **Agglomerate** (Tertiärpartikel). An der Oberfläche weisen die Partikel verbrückte O-Atome und SiOH-Gruppen auf und sind daher hydrophil^[42]. Durch entsprechende Oberflächenmodifikation können jedoch andere Eigenschaften, wie etwa Hydrophobie erreicht werden. Bei **VQM-Harz** (4b) handelt es sich um vinyl-funktionalisierte Polysiloxane. Diese bestehen aus dreidimensional verknüpften SiO_4^{4-} -Einheiten (auch als *Q* bezeichnet) mit peripheren Me_3SiO^- (auch als *M* bezeichnet) und Vinyl- Me_2SiO^- -Einheiten (auch als *V* bezeichnet)^[11]. In beiden Fällen basiert die verstärkende Wirkung auf einer Erhöhung der Vernetzungsdichte des Silicons, wobei diese bei *pyrog.* SiO_2 auf Adsorption der Siliconpolymerstränge an der Partikeloberfläche und bei **VQM-Harz** auf kovalenten Bindungen über die Vinylgruppen basiert. Dennoch ist die Verstärkungswirkung von *pyrog.* SiO_2 im Allgemeinen größer als die von **VQM-Harz**, da durch die höhere Strukturgröße der *pyrog.* SiO_2 wesentlich mehr Siliconpolymerstränge miteinander verknüpft werden. Zudem kann durch die reversible Adsorption der Siliconpolymerstränge und die ebenfalls reversible **Agglomeration** der Sekundärpartikel Rissenergie besser dissipiert werden. Ein Argument, dennoch **VQM-Harz** einzusetzen ist u. a. die geringere Viskositätserhöhung des noch unvernetzten Silicons, wodurch dessen Verarbeitung erleichtert wird.

Generell erhöhen Füllstoffe wie **VQM-Harz**^[45–47] und *pyrog.* SiO_2 ^[42,48] sowie freie, kovalent nicht angebundene Ketten und lose, nur einseitig kovalent gebundene Kettenenden des Silicons^[49,50] den viskosen Anteil des Schubmoduls und erzeugen eine nichtlineare Verformungsantwort^[47,51], die deutlich vom idealen Hookschen Modell (vgl. **Gleichung 2.5**) abweicht. Freie Polymerketten bzw. lose Polymerkettenenden können sowohl durch unvollständige Vernetzung als auch durch unfunktionalisierte

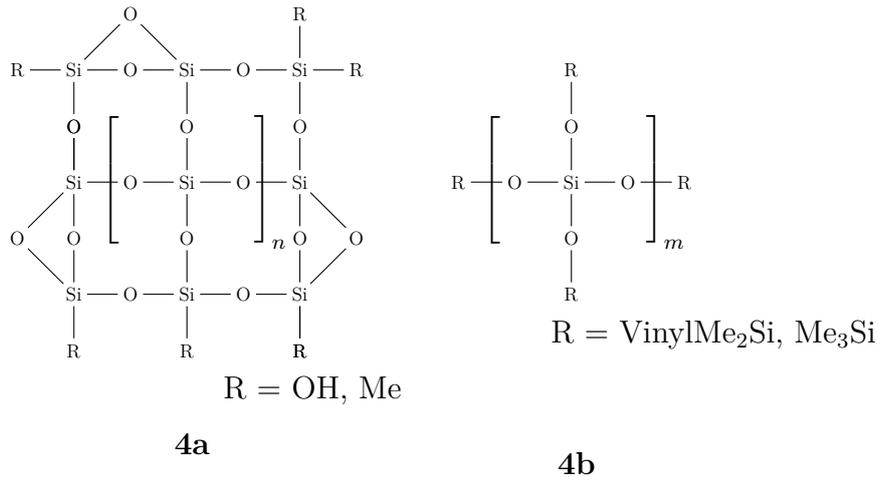


Abb. 3.4: Strukturformel von **pyrog. SiO_2** (**4a**)^[43] und **VQM-Harz** (**4b**)^[44]. Im Allgemeinen gilt $n \gg m$.

bzw. lediglich mono-funktionalisierte Ausgangspolymere erzeugt werden und weisen eine deutlich höhere Beweglichkeit als vollständig angebundene Ketten auf.

Die genannten Veröffentlichungen behandeln jedoch überwiegend grundlegende Untersuchungen wie z. B. zum komplexen Schubmodul. Die Übertragung der Erkenntnisse auf das Anwendungsszenario eines **DES** ist im Gegensatz zu **Dielektrischen Elastomer Aktoren (DEA)** ^[51,50,52] nicht im vergleichbaren Umfang erfolgt. Für **DEAs** wurde unter anderem der Einfluss von Variationen in der Stöchiometrie ^[51] und von Füllstoffen ^[52] auf die mechanischen Eigenschaften des Aktors untersucht.

Ausgehend von Messungen des komplexen Schubmoduls unterschiedlich verstärkter Siliconmaterialien soll im Folgenden daher dessen Bedeutung für das Verhalten repräsentativer Elemente (Folie, zylindrische Noppe) eines **DES** unter Scher-, Druck- und Dehnungsbelastung sowie für einen vollständigen Sensor untersucht werden.

3.2.2 Material und Methoden

3.2.2.1 Silicone

Zur Bestimmung des Einflusses der verschiedenen Verstärkungsmechanismen auf die viskoelastischen Materialeigenschaften wurden drei unterschiedliche Silicone verwendet: Ein **pyrog. SiO_2** -verstärktes Silicon (**S5**), ein **VQM-Harz**-verstärktes Silicon (**S4**) und ein unverstärktes Silicon (**S2**) als Referenz. Die genaue Zusammensetzung der Silicone findet sich in **Abschnitt A.3**.

3.2.2.2 Oszillativer Scherspaltversuch

Zur Untersuchung des komplexen Schubmoduls der ausgewählten Silicone wurden jeweils zylindrische Probekörper mit Durchmesser 20 mm und Dicke 1 mm hergestellt (vgl. [Abbildung 3.5a](#)). Diese wurden im Rheometer (*MCR 502, Anton Paar, Österreich*) im oszillativen Scherspaltversuch mit variabler Amplitude von 0,01-10 % Scherdeformation und mit einer Frequenz von 1 Hz durchgeführt (vgl. [Abbildung 3.6a](#)). Der dabei ermittelte komplexe Schubmodul G^* setzt sich gemäß [Gleichung 3.1](#) als komplexe Zahl aus dem Speichermodul G' (elastischer Anteil) und dem Verlustmodul G'' (viskoser Anteil) zusammen.

$$G^* = G' + i \cdot G'' \quad (3.1)$$

Das Verhältnis zwischen Speicher- und Verlustmodul wird durch den Verlustfaktor $\tan\delta$ wie folgt beschrieben.

$$\tan\delta = \frac{G''}{G'} \quad (3.2)$$

Für einen ideal elastischen Körper gilt demnach $\tan\delta \rightarrow 0$ und für einen ideal viskosen Körper $\tan\delta \rightarrow \infty$. Entsprechend sollte auch für Sensormaterialien $\tan\delta$ möglichst klein sein um Kriechneigung und Hysterese zu minimieren. Allgemein gilt folgender Zusammenhang zwischen [Elastizitätsmodul \(Realteil des komplexen Elastizitätsmoduls\) \(E-Modul\) \$E\$](#) , Speichermodul G' (Realteil des komplexen Schubmoduls G^*), Kompressionsmodul K und Poissonzahl ν :

$$E = 2(1 + \nu)G' = 3(1 - 2\nu)K \quad (3.3)$$

Für Siliconelastomere wird zur Vereinfachung für die folgenden Betrachtungen eine Poisson-Zahl von annähernd 0,5 angenommen ($\nu \rightarrow 0,5$). Für diesen Fall gilt näherungsweise:

$$\begin{aligned} E &\approx 3G' \\ K &\rightarrow \infty \end{aligned} \quad (3.4)$$

Das [E-Modul \$E\$](#) beträgt etwa den dreifachen Wert des Speichermoduls G' , während nahezu volumetrische Inkompressibilität vorliegt. Der elastische Körper ist also bezüglich seiner Abmessungen verformbar (z. B. Stauchung oder Dehnung), sein Volumen wird dabei jedoch als konstant angenommen.

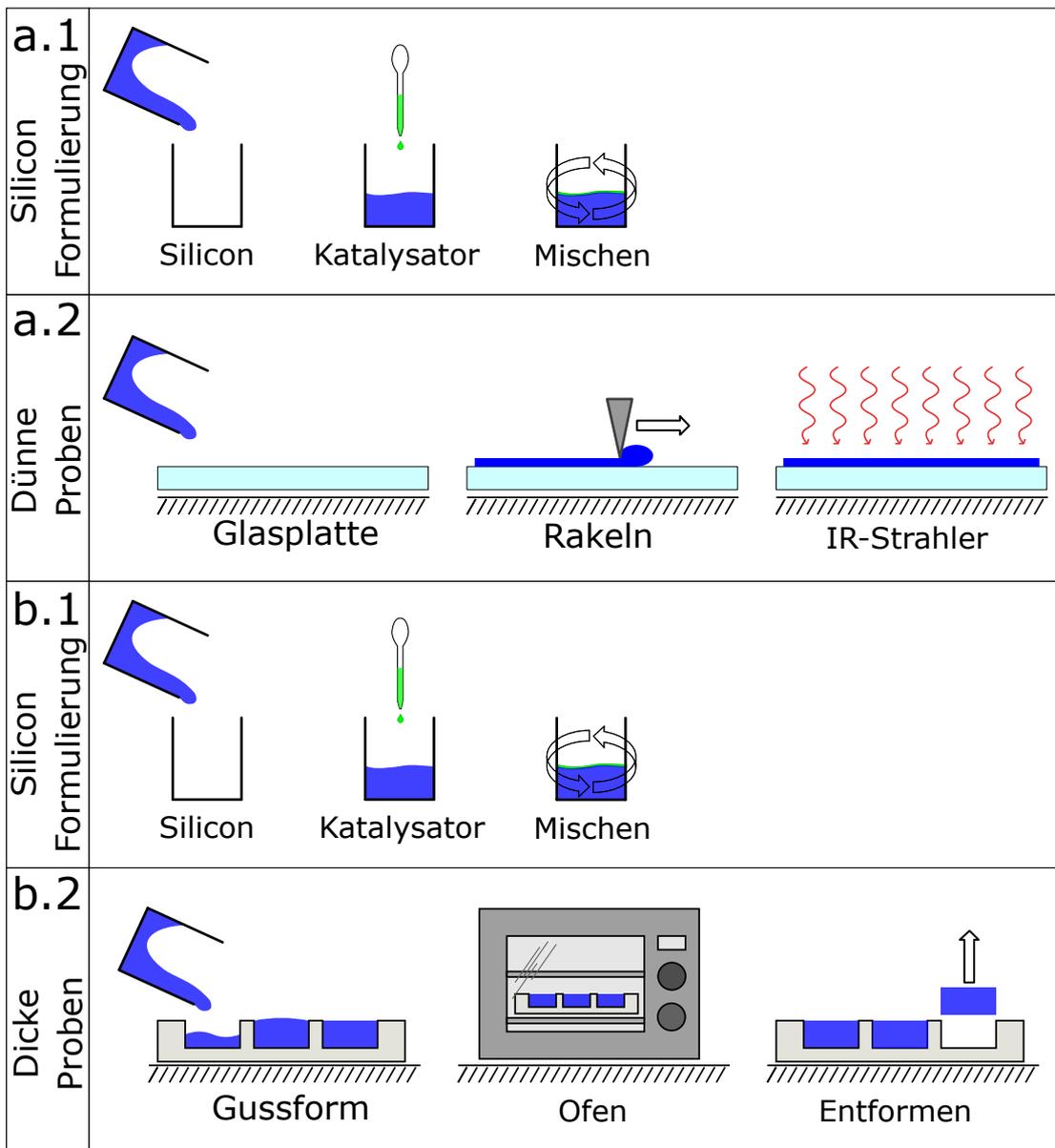


Abb. 3.5: Schema der Probenherstellung von dünnen zylindrischen Prüfkörpern zur Messung des komplexen Schubmoduls bzw. von streifenförmigen Proben für den Dehnungskriechversuch (a) und von dicken zylindrischen Prüfkörpern für den Druckkriechversuch (b).

3.2.2.3 Druckkriechversuch

Für die Druckkriechversuche wurden zylindrische Probekörper mit einem Durchmesser von 20 mm und einer Dicke von etwa 6 mm abgossen (vgl. [Abbildung 3.5b](#)). Diese wurden in das [Rheometer MCR 502](#) eingelegt und zunächst fünf mal mit 160 kPa belastet und wieder entlastet, um initiale Effekte im Materialverhalten zu umgehen.

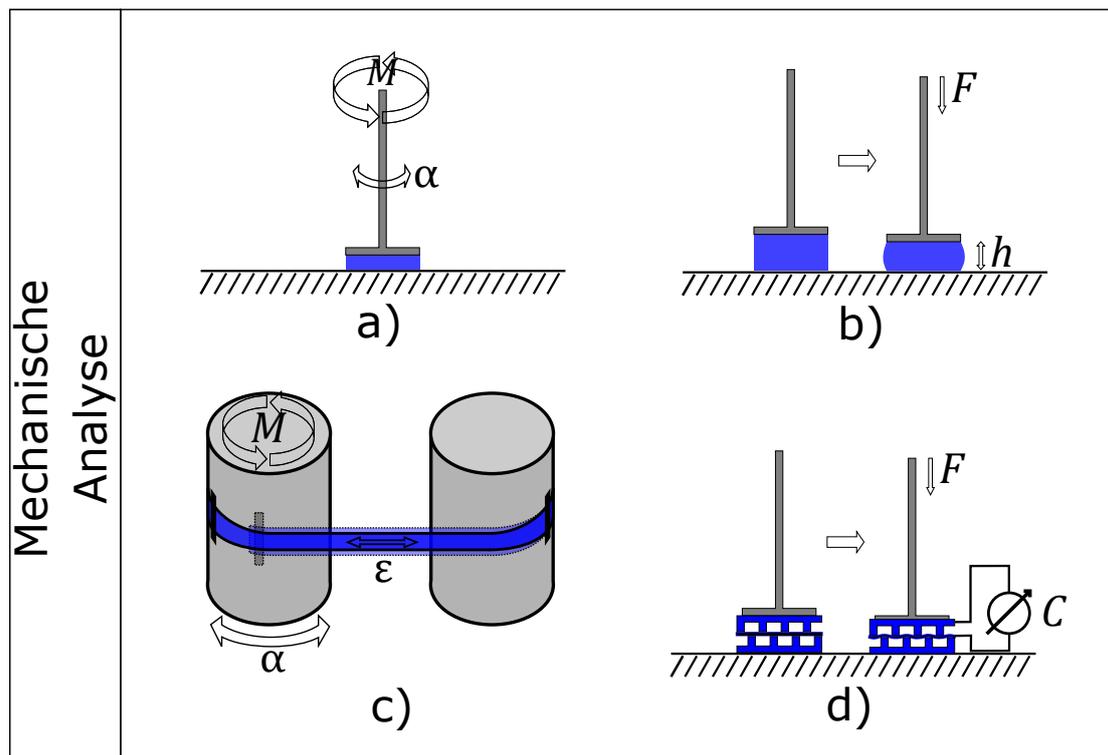


Abb. 3.6: Schematische Darstellung der Messung des komplexen Schubmoduls (a), des Druckkriechversuches (b), des Dehnungskriechversuches (c) und des Druckkriechversuches mit einem Sensor (d)

Anschließend wurden die Proben ansteigenden Druckbelastungen von 32-160 kPa ausgesetzt (vgl. [Abbildung 3.6b](#)), wobei zwischen jeder Belastung und Entlastung eine Haltezeit von 5 min eingehalten wurde. Dabei wurde die Probendicke aufgezeichnet um den Hysterese- und Kriechwert des Materials gemäß [Abschnitt 3.2.2.6](#) zu ermitteln.

3.2.2.4 Dehnungsrelaxationsversuch

Für die Dehnungsrelaxationsversuche wurden etwa 200 μm dicke Folien gerakelt (vgl. [Abbildung 3.5a](#)) und daraus 4 mm breite und ca. 40 mm lange Streifen ausgeschnitten. Diese wurden in das [Rheometer MCR 502](#) mit ausgerüstetem [Dehnaufsatz \(UXF12/EXT\)](#) eingespannt und in mehreren aufeinander folgenden Zyklen gedehnt (vgl. [Abbildung 3.6c](#)). Währenddessen wurde die (technische) mechanische Spannung σ_{mech} aufgezeichnet, um den [Hysterese](#)- und [Relaxationswert](#) des Materials gemäß [Abschnitt 3.2.2.6](#) zu quantifizieren. Ausgewertet wurde jedoch erst der sechste Dehnungszyklus, um initiale Effekte im Materialverhalten zu umgehen. Dieser besteht dabei aus 4 Abschnitten: Dehnen (10 % \rightarrow 110 %), Halten (5 min), Entspannen

(110 % \rightarrow 10 %) und nochmaligem Halten (5 min). Die untere Dehnungsgrenze von 10 % wurde gewählt, um das Relaxationsverhalten auch im nahezu vollständig entspannten Zustand zu untersuchen. Bei einer Entspannung bis auf 0 % würden die Proben durch ihr viskoelastisches Verhalten potentiell durchhängen und eine Materialspannung wäre nicht mehr messbar. Die obere Grenze von 110 % wurde gewählt, um ein Dehnungsintervall von 100 % zu erhalten.

3.2.2.5 Kombinierte Belastung in einem Sensor

Um die unmittelbare Auswirkung der viskoelastischen Materialeigenschaften auf die Sensorcharakteristik zu ermitteln, wurden aus dem pyrog. SiO_2 - (S5) und dem VQM-Harz-verstärkten Silicon (S4) jeweils dielektrische Drucksensoren hergestellt. Das unverstärkte Silicon (S2) konnte aufgrund seiner zu geringen mechanischen Stabilität nicht für die Herstellung eines Sensors verwendet werden. Zur Herstellung der Sensoren wurden analog zum in [Abbildung 3.5b](#) dargestellten Prozess Noppenprofile aus dem jeweiligen Silicon abgegossen. Die zylindrischen Noppen haben dabei einen Durchmesser von 1 mm und eine Höhe von 0,5 mm und sind in einem quadratischen 4 mm \times 4 mm Raster auf einer 0,5 mm dicken Trägerfolie angeordnet. Die Noppenseite der Profile wurde jeweils mit einem leitfähigen Ruß-Komposit besprüht. Zwei dieser Noppenprofile wurden jeweils zueinander versetzt mit der Stirnfläche der Noppen auf die Unter- bzw. Oberseite einer Zwischenfolie geklebt. Die Zwischenfolie besteht aus drei analog zu [Abbildung 3.5a](#) aufeinander gerakelten Schichten, wobei die untere und obere Schicht aus dem jeweiligen Silicon und die mittlere Schicht wiederum aus einem leitfähigen Ruß-Komposit besteht. Die Gesamtabmessungen der Sensoren betragen 20 mm \times 20 mm \times 2 mm. Die Sensoren wurden analog zu den dicken zylindrischen Proben einem Druckkriechversuch unterzogen, wobei anstatt der Probendicke die Kapazität zwischen den beiden Profilen und der Zwischenfolie erfasst wurde, um den Hysterese- und Kriechwert des Sensors gemäß [Abschnitt 3.2.2.6](#) zu ermitteln (vgl. [Abbildung 3.6d](#)).

3.2.2.6 Hysterese- und Kriechwert

Für die zuvor beschriebenen Versuche ist eine genaue Definition des Hysterese- und Kriechwertes für Druck- und Dehnungsversuche erforderlich, um einen quantitativen Wert für die [Hysterese](#) und das [Kriechen](#) der Proben zu erhalten. Dabei ist der Hysteresewert H als über N Messpunkte mit Auslenkung a_i gemittelte Summe der Wurzeln der Quadrate der Differenzen zwischen der Belastungskurve $f_{0 \rightarrow a_{max}}$ und der Entlastungskurve $f_{a_{max} \rightarrow 0}$ in Abhängigkeit von der maximalen Spannung σ_{max}

definiert:

$$H_{abs}(a_{max}) = \frac{\sum_{i=1}^N (\sqrt{(f_{0 \rightarrow a_{max}}(a_i) - f_{a_{max} \rightarrow 0}(a_i))^2})}{N} \quad (3.5)$$

Ein relativer Wert kann durch den Bezug auf den jeweiligen absoluten Wert der Belastungskurve $f_{0 \rightarrow a_{max}}(a_i)$ erfolgen:

$$H_{rel}(a_{max}) = \frac{\sum_{i=1}^N (\frac{\sqrt{(f_{0 \rightarrow a_{max}}(a_i) - f_{a_{max} \rightarrow 0}(a_i))^2}}{f_{0 \rightarrow a_{max}}(a_i)})}{N} \quad (3.6)$$

Bei einem Druckversuch entspricht die Auslenkung a der angelegten Druckspannung und die Be- und Entlastungskurve der Dicke-Spannungs-Messkurve, während beim Belastungsversuch für den Sensor die Be- und Entlastungskurve der Kapazitäts-Spannungs-Messkurve entspricht. Bei einem Dehnungsversuch entspricht die Auslenkung a der angelegten Dehnung und die Be- und Entlastungskurve der Spannungs-Dehnungs-Messkurve.

Für die Ermittlung des Kriech- bzw. Relaxationswertes K wurde die Dicken- (\rightarrow [Kriechen](#)) bzw. Dehnungsspannungsänderung (\rightarrow [Relaxation](#)) bei konstanter Auslenkung a_{max} über 5 min ermittelt. Formal berechnet sich diese aus der Differenz zwischen dem Endwert der Belastungskurve $f_{0 \rightarrow a_{max}}$ und dem Anfangswert Entlastungskurve $f_{a_{max} \rightarrow 0}$:

$$K_{abs}(a_{max}) = f_{0 \rightarrow a_{max}}(a_{max}) - f_{a_{max} \rightarrow 0}(a_{max}) \quad (3.7)$$

Der relative Wert kann wiederum durch den Bezug auf die anfängliche Dicke bzw. Maximalspannung ermittelt werden:

$$K_{rel}(a_{max}) = \frac{f_{0 \rightarrow a_{max}}(a_{max}) - f_{a_{max} \rightarrow 0}(a_{max})}{f_{0 \rightarrow a_{max}}(a_{max})} \quad (3.8)$$

3.2.3 Ergebnisse und Diskussion

3.2.3.1 Oszillativer Scherspaltversuch

Die Werte des Speichermoduls der untersuchten Silicone sind weitgehend vergleichbar (s. [Abbildung 3.7](#)) und liegen im Bereich von etwa 200-300 kPa.

Bei hohen Scherdeformationen nimmt das Speichermodul aller Materialien geringfügig ab. Beim Verlustmodul ergeben sich jedoch signifikante Unterschiede. Das verstärkte Silicon weist das geringste Verlustmodul über den gesamten Amplitudenbereich auf, während die entsprechenden Werte der verstärkten Silicone um ein Viel-

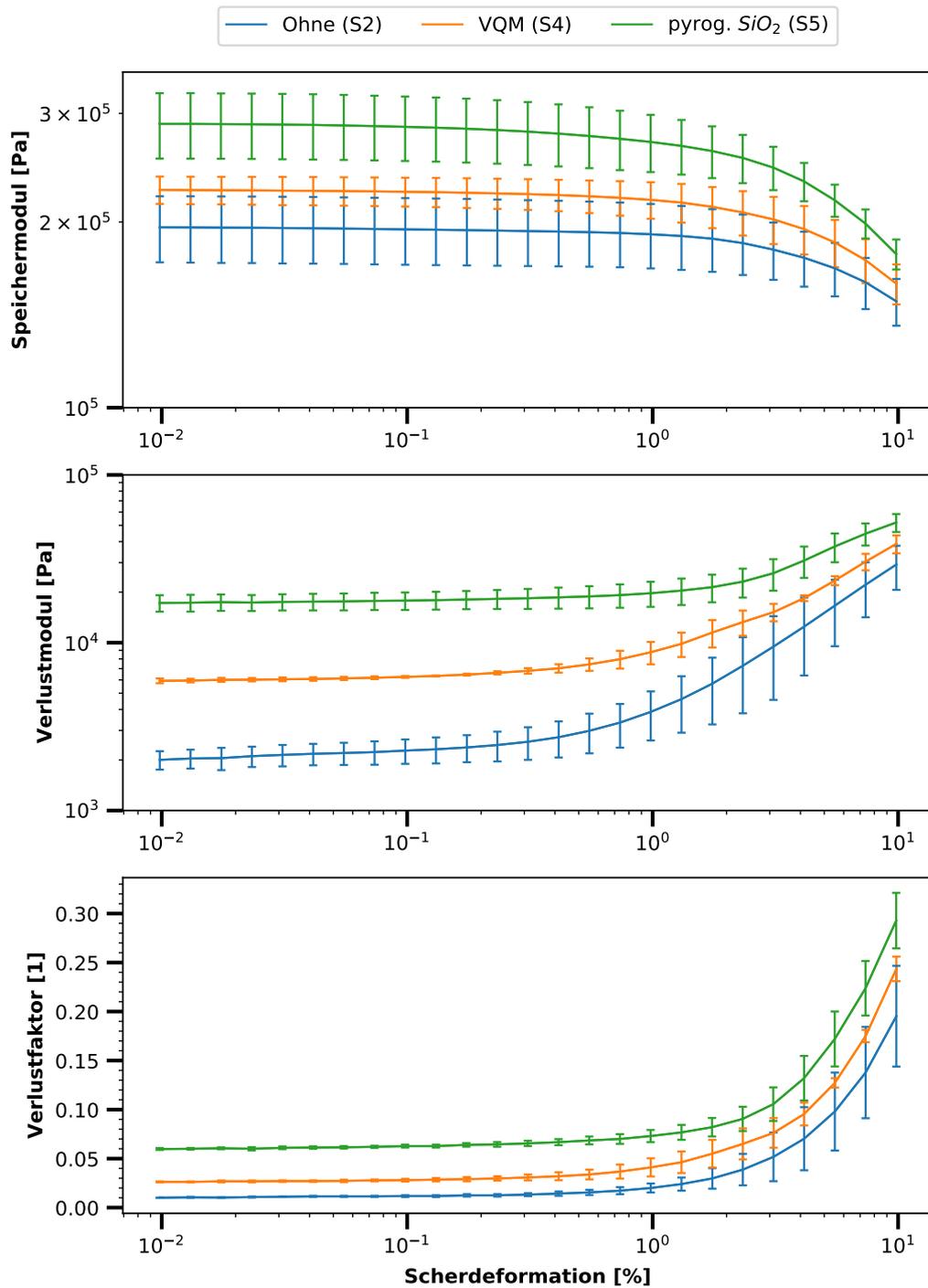


Abb. 3.7: Komplexes Schubmodul und Verlustfaktor (vgl. Gleichung 3.1 und Gleichung 3.2) von Siliconen mit unterschiedlichen Verstärkungsfüllstoffen (Frequenz 1 Hz)

faches darüber liegen. Bei hohen Scherdeformationen nimmt das Verlustmodul aller Materialien deutlich zu. Entsprechend ergeben sich ebenfalls deutliche Unterschiede beim Verlustfaktor gemäß [Gleichung 3.2](#). Dieser liegt beim [pyrog. \$SiO_2\$ -verstärkten Silicon \(S5\)](#) am höchsten, beim [VQM-Harz-verstärkten Silicon \(S4\)](#) und beim unverstärkten Silicon ([S2](#)) liegt er deutlich darunter. Bei hohen Scherdeformationen steigt der Verlustfaktor bei allen Kompositen deutlich an. Dies kann damit erklärt werden, dass bei geringen Verformungen diese noch durch die Auffaltung bzw. leichte Drehung von den Molekülketten des Silicons aufgenommen werden können. Bei höheren Deformationen liegen jedoch zunehmend reibungsbehaftete und geschwindigkeitsabhängige Mechanismen wie das aneinander Vorbeigleiten von Molekülketten vor. Beim [pyrog. \$SiO_2\$](#) kann es zudem zu einem Ablösen von an den Partikeln adsorbierten Molekülketten kommen sowie zu einem Aufbrechen des [Perkolationsnetzwerkes](#) aus [agglomerierten](#) Sekundärpartikeln (Tertiärstruktur) und einem anschließenden Abgleiten der Partikel aneinander. Während der absolute Unterschied im Verlustmodul bei zunehmender Verformung in etwa gleich bleibt, werden die relativen Unterschiede deutlich kleiner. So liegt der Wert des [VQM-Harz-verstärkten Silicons \(S4\)](#) und des [pyrog. \$SiO_2\$ -verstärkten Silicons \(S5\)](#) bei 0,01 % Deformation 160 % bzw. 500 % über dem Wert des unverstärkten Silicons ([S2](#)), bei 10 % Deformation jedoch nur noch bei 25 % bzw. 50 %. Die Ergebnisse decken sich mit vergleichbaren Untersuchungen aus der Literatur^[45,47,42,48].

3.2.3.2 Druckversuch

Bei der Analyse der Hysterese und des Kriechens der zylindrischen Proben unter Druckbelastung zeigt sich ein uneinheitliches Bild. In [Abbildung 3.8](#) sind je 5 Druckbelastungszyklen mit unterschiedlicher maximaler Spannung gezeigt, in [Abbildung 3.9](#) die zugehörige Hysterese und Kriechauswertung.

Bei geringen Belastungen ist der Vorteil des unverstärkten ([S2](#)) und [VQM-Harz-verstärkten Silicons \(S4\)](#) gegenüber dem [pyrog. \$SiO_2\$ -verstärkten Silicon](#) durch eine niedrigere Hysterese- und Kriechwert deutlich zu erkennen. Bei der Maximalbelastung von 160 kPa übertreffen Hysterese- und Kriechwert des unverstärkten ([S2](#)) und [VQM-Harz-verstärkten Silicons \(S4\)](#) jedoch den des [pyrog. \$SiO_2\$ -verstärkten Silicons \(S5\)](#). Grundsätzlich nähert sich das durch den viskosen Anteil des Schubmoduls G'' hervorgerufene Hysterese- und Kriechverhalten der drei Siliconmaterialien mit zunehmender Verformung bzw. Spannung in Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus [Abbildung 3.7](#) aneinander an. Dies deckt sich mit den zuvor ermittelten Verlustfaktoren, die sich bei allen Materialien mit zunehmender Dehnungsverformung

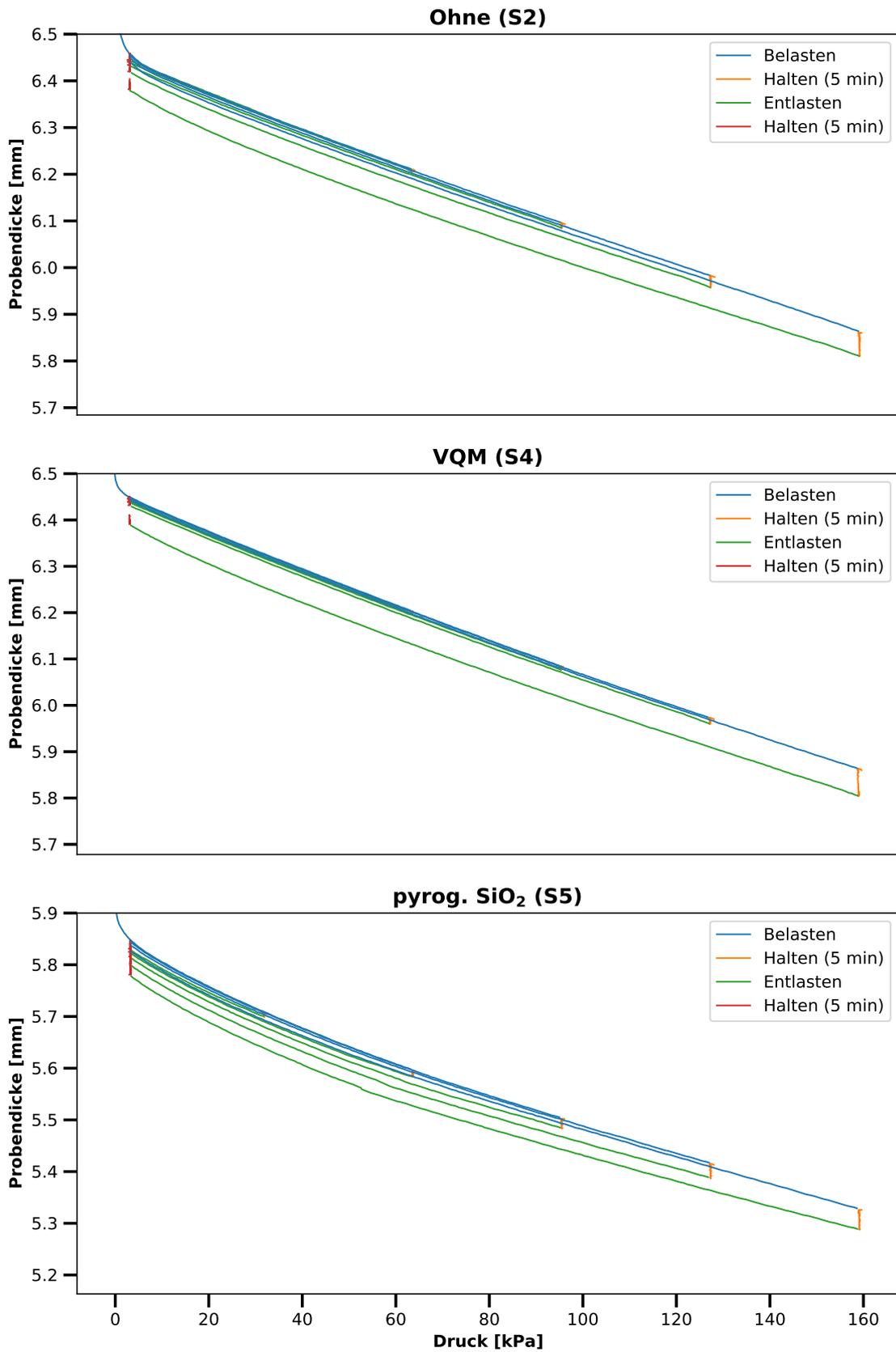


Abb. 3.8: Druckversuche der unterschiedlichen Silicone

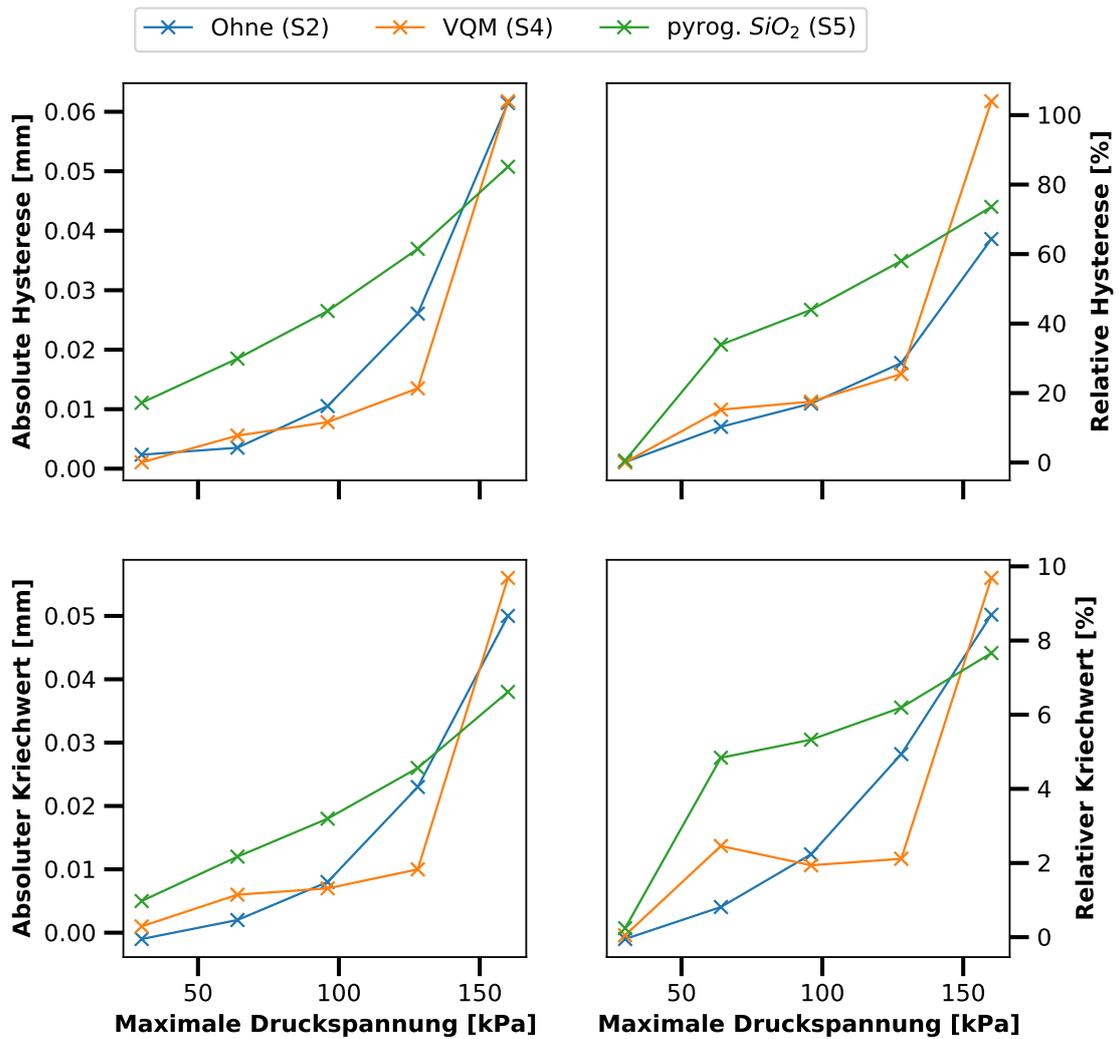


Abb. 3.9: Auswertung der Druckversuche: Hysterese H gemäß Gleichung 3.5 und Gleichung 3.6 sowie Kriechwert K gemäß Gleichung 3.7 und Gleichung 3.8

aneinander annähern.

3.2.3.3 Dehnungsversuch

Auch im Dehnungsversuch spiegeln sich die unterschiedlichen viskoelastischen Materialeigenschaften wieder. In [Abbildung 3.10](#) ist je ein Dehnungszyklus der hergestellten Folien gezeigt. Ein Zyklus besteht dabei aus 4 Abschnitten: Dehnen (10 % → 110 %), Halten (5 min), Entspannen (110 % → 10 %) und nochmaligem Halten (5 min).

Die Materialien zeigen ein vergleichbares [E-Modul](#) von etwa 400 kPa. Dagegen zeigen sich deutliche Unterschiede in der Dehnungshysterese (Abweichung zwischen Belastungs- und Entlastungskurve gemäß [Gleichung 3.5](#) und [3.6](#)) und der Relaxationsneigung (Spannungsverlust bei konstanter Dehnung im Halteabschnitt gemäß [Gleichung 3.7](#) und [3.8](#)). Um diese genauer zu vergleichen, wurden die durchschnittliche Hysteresebreite und die Differenz der mechanischen Spannung σ_{mech} zwischen Anfang und Ende des Halteabschnittes bei 110 % Dehnung berechnet. Dabei wurde sowohl der absolute Wert (in kPa) und der relative, d.h. auf den Spannungswert der Belastungskurve normierte Wert in % ermittelt (s. [Abbildung 3.11](#)). Dabei zeigt sich, dass die Kriech- und Hysteresewerte erwartungsgemäß im direkten Zusammenhang mit dem zuvor ermittelten viskosen Materialverhalten stehen: Während sich Hysterese- und Kriechwert des [VQM-Harz-verstärkten Silicons](#) im Mittelfeld einordnen, liegen die Werte des [pyrog. SiO₂-verstärkten Silicons](#) darüber und die des unverstärkten Silicons ([S2](#)) deutlich darunter. Insgesamt ordnen sich die Materialien also entsprechend ihrem Verlustfaktor an.

3.2.3.4 Kombinierte Belastung in einem Sensor

Bedingt durch den Aufbau treten in einem [DES](#) mit Noppenprofil und Zwischenfolie sowohl Dehnungen (Zwischenfolie) als auch Stauchungen (Noppen) auf. Insofern sollten sich die Ergebnisse der zuvor durchgeführten Einzelversuche zu Dehn- und Druckverhalten auch im Gesamtverhalten eines aus dem jeweiligen Material aufgebauten Sensors widerspiegeln. Tatsächlich zeigt der aus dem [VQM-Harz-verstärkten Silicon](#) hergestellte Sensor gegenüber dem aus [pyrog. SiO₂-verstärktem Silicon](#) hergestellten Sensor einen etwa um die Hälfte geringeren relativen Hysterese- und Kriechwert (s. [Abbildung 3.12](#)). Das unverstärkte Silicon ([S2](#)) konnte aufgrund seiner zu geringen mechanischen Stabilität nicht für die Herstellung eines Sensors verwendet werden. Die geringere Hysterese und Relaxation des [VQM-Harz-verstärkten Silicons](#) gegenüber dem [pyrog. SiO₂-verstärkten Silicon](#) im Dehnungsszenario und die zumindest bei kleinen mechanischen Spannungen ebenfalls geringere Hysterese und Kriechnei-

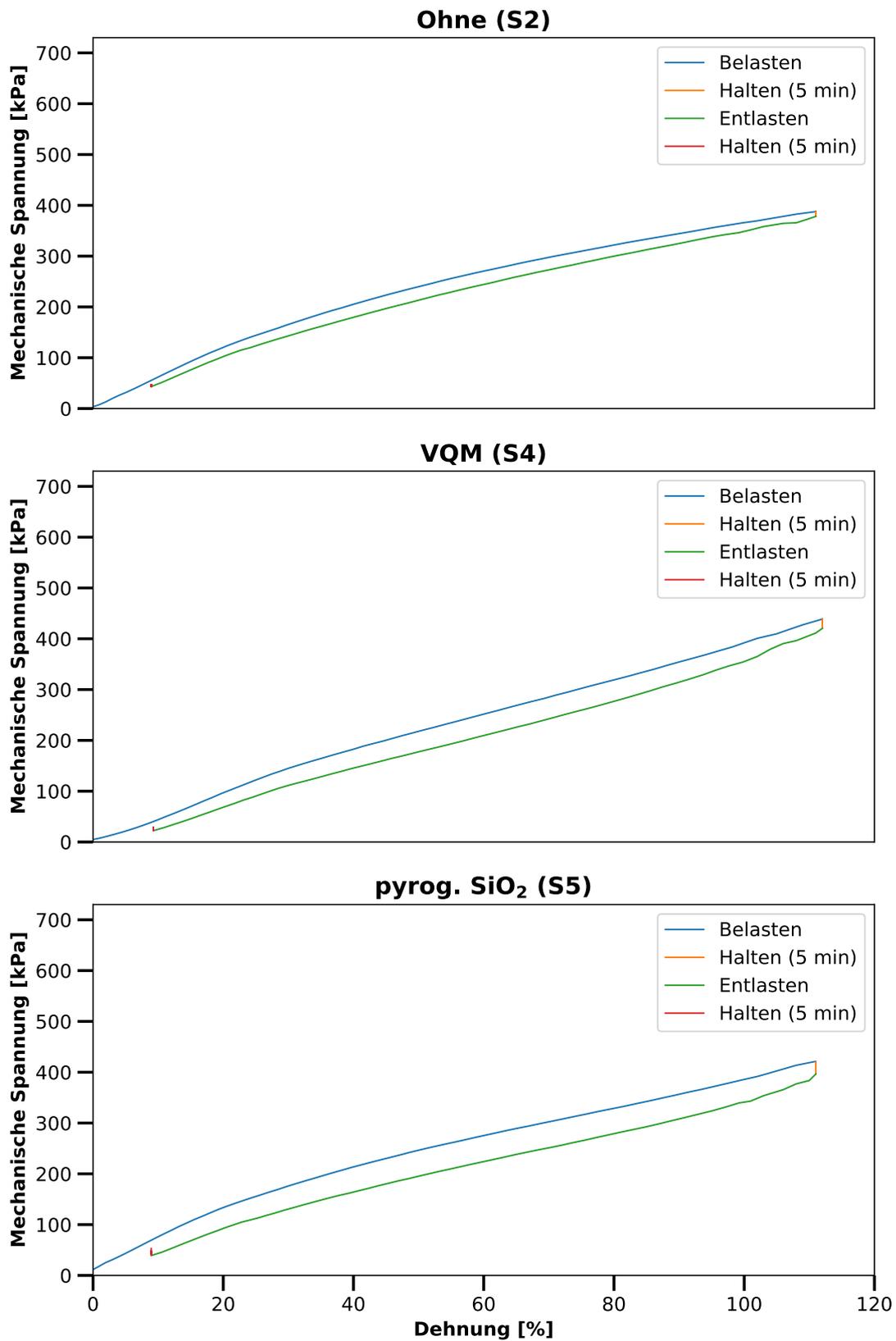


Abb. 3.10: Dehnungs-Spannungs-Kurven des unverstärkten (S2), VQM-Harz-verstärkten (S4) und des pyrog. SiO₂-verstärkten Silicons (S5)

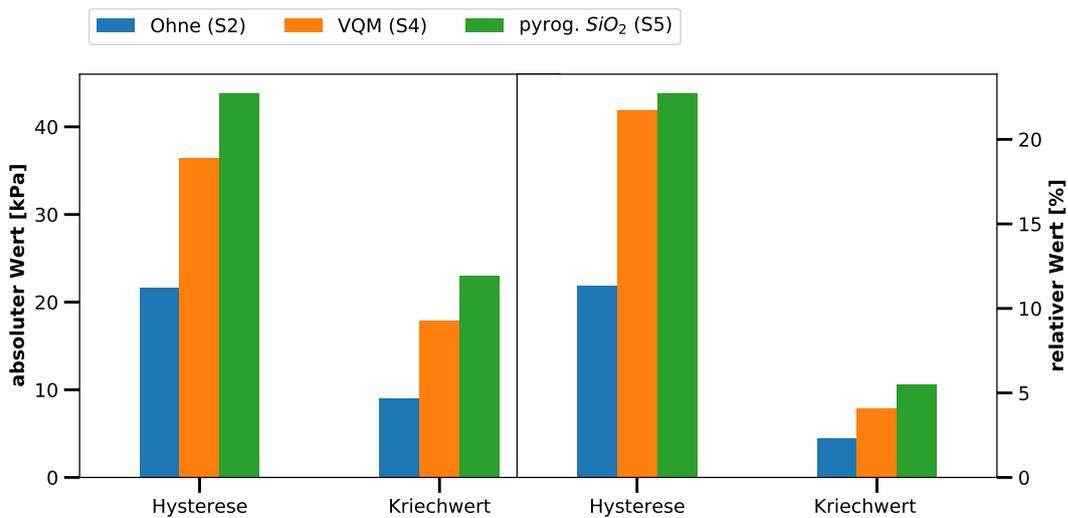


Abb. 3.11: Auswertung der Dehnungs-Spannungs-Kurven: Absolute (vgl. Gleichung 3.5) und relative Hysteresis (vgl. Gleichung 3.6) sowie absoluter (vgl. Gleichung 3.7) und relativer Relaxationswert (vgl. Gleichung 3.8)

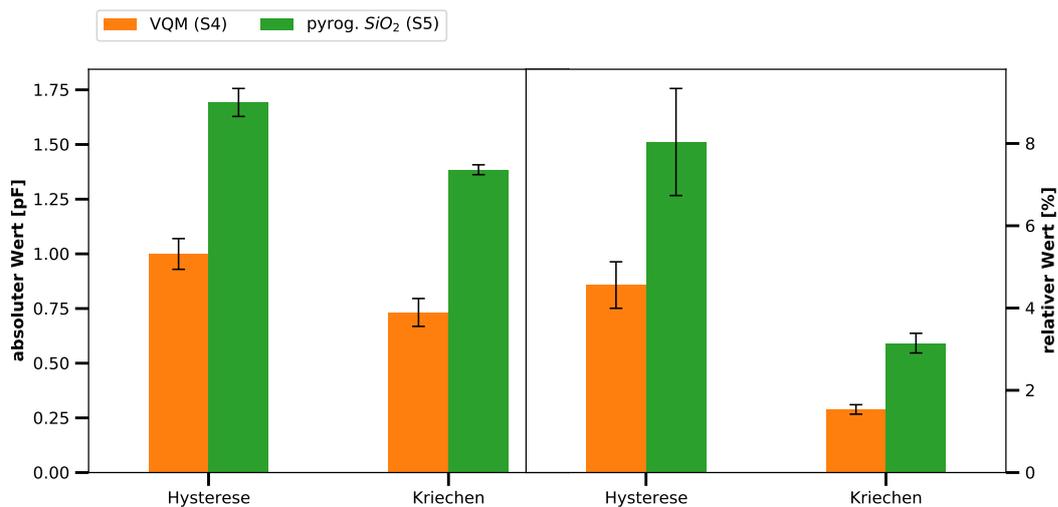


Abb. 3.12: Auswertung der Sensorkennlinien: Absolute (vgl. Gleichung 3.5) und relative Hysteresis (vgl. Gleichung 3.6) sowie absoluter (vgl. Gleichung 3.7) und relativer Kriechwert (vgl. Gleichung 3.8)

gung im Druckszenario sind also auf das überlagerte Szenario im Sensoraufbau übertragbar. Die zuvor aufgefundenen Unterschiede im viskosen Anteil des Schubmoduls lassen sich folglich bis in die Applikation der Materialien als Sensoren nachverfolgen.

3.2.4 Fazit

Siliconelastomere bieten durch ihre hochgradig modulare Netzwerkarchitektur eine umfassende Beeinflussbarkeit ihrer mechanischen Eigenschaften. Eine herausragende Rolle kommt dabei Verstärkungsfüllstoffen zu, die die Stabilität der Elastomere unter Dehnung entscheidend verbessern können. Abseits dieser klassischen Performance-Parameter für Elastomermaterialien beeinflussen diese Verstärkungszuschläge die für eine sensorische Anwendung der Materialien maßgeblich relevante Hysterese und Kriech- bzw. Relaxationsneigung jedoch negativ. So konnte der Vorteil eines unverstärkten bzw. eines mit [VQM-Harz](#) verstärkten Silicons gegenüber einem mit [pyrog. SiO₂](#) verstärkten Silicon nicht nur in abstrakten, materialbezogenen Messungen des komplexen Schubmoduls, sondern auch an konkreten, anwendungsbezogenen Szenarien wie dem Druck- und Dehnversuch bis hin zu einem vollständig daraus aufgebauten Sensor nachgewiesen werden.

3.3 Dynamische elektromechanische Analyse

3.3.1 Einführung

Die Verfügbarkeit dehnbarer leitfähiger Materialien ist nicht nur für die Technologie der [DES](#) von Bedeutung, sondern auch eine Schlüsselvoraussetzung für die Weiterentwicklung von weicher und tragbarer Elektronik. Obwohl es zahlreiche vielversprechende Materialien gibt, wird die Charakterisierung dieser Materialien unter realistischen Bedingungen oft nur unzureichend durchgeführt, da sie relativ komplex ist. Für eine realitätsnahe Messung ist es erforderlich, den elastischen Leiter nicht nur im statischen ungedehnten und gedehnten Zustand zu charakterisieren, sondern auch über mehrere Zyklen hinweg und während der Dehnung die Leitfähigkeit zu erfassen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde daher ein umfangreiches Protokoll zur praxisnahen dynamischen elektromechanischen Analyse von dehnbaren Schichten aus leitfähigen Partikel-Elastomer-Kompositen entwickelt. Dieses zielt neben der Dehnungsabhängigkeit und Dauerfestigkeit insbesondere auf die Aufklärung des Einflusses der Dehngeschwindigkeit auf die Leitfähigkeit ab. Die Untersuchungen wurden auf Proben mit den häufig verwendeten Füllstoff-Vertretern Ruß und versilberte Kupfer-Flakes mit jeweils 20 vol% angewendet. Als Matrix wurden dabei unterschiedlich harte Siliconelastomere verwendet. Zur Erklärung der auftretenden Effekte wurde ein mikroskopisches Modell herangezogen, welches durch [Nanoskalige Computertomographie \(nanoCT\)](#) validiert wurde.

3.3.2 Stand der Wissenschaft und Technik

Aus historischer Perspektive spielten unter den Elastomerkompositen zunächst rußgefüllte Elastomere eine große Rolle. Ausgehend von der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften etwa für Reifen kam später auch die elektrische Leitfähigkeit für Anti-Statik-Bauteile zum Tragen^[53]. Im Allgemeinen ist auf Grund der großen wirtschaftlichen Bedeutung das Materialsystem rußgefüllter Elastomere sehr gründlich untersucht worden. So haben u. a. Busfield et al.^[54] und Yamaguchi et al.^[55] das Verhalten rußgefüllter leitfähiger Elastomere unter Dehnung und Druckverformung untersucht. Der dabei auftretende piezoresistive Effekt wurde mit der Vergrößerung der Partikel-Abstände als verringernder und ein Ausrichten der Partikel entlang der Zugrichtung als vergrößernder Effekt auf die Leitfähigkeit erklärt, wobei im Falle von Rußagglomeraten der vergrößernde Effekt dominiert. Mit der Entwicklung von druck- und tragbarer Elektronik kam der Bedarf nach elastischen Leitern auf, die deutlich über die Leitfähigkeit von rußgefüllten Systemen hinausgingen und in der Regel auch relativ große Dehnungen tolerieren sollen^[56]. Hierzu wurde ein breites Spektrum hochleitfähiger Kohlenstoffmodifikationen (Kohlenstoffnanoröhren^[57,58], Graphen^[59]) und metallischer bzw. metallisierter Partikel, wie etwa versilberte Glasfasern, -flakes^[60] und -kugeln^[61,62], sowie Nanodrähte^[59,63,64], Flakes^[60,65,66], Mikro- und Nanopulver^[67,68,66] aus Gold, Silber oder Kupfer untersucht. Auch wenn es zahlreiche Veröffentlichungen zu vielversprechenden hochleitfähigen und hochdehnbaren (mit unter auch transparenten) Elektrodenmaterialien gibt, wurden nur selten dynamische elektromechanische Untersuchungen durchgeführt, um das Vorhandensein und das Ausmaß von piezoresistiven bzw. dynamischen elektromechanischen Effekten zu prüfen.

Vielversprechende Arbeiten von Matsuhisa et al.^[66] mit Kompositen aus Silber-Flakes (Ag-Fl) und Silbernanopartikeln (Ag-NP) erreichen eine spezifische Leitfähigkeit von $6,2 \cdot 10^5 \text{ S/m}$ im ungedehnten Zustand und etwa $2,0 \cdot 10^5 \text{ S/m}$ bei 100 % Dehnung. Die durchgeführte zyklische Prüfung lässt erahnen, dass der Abfall der Leitfähigkeit bei hohen Dehngeschwindigkeiten noch einmal deutlich höher ist, wobei sich die genauen Auswirkungen auf Grund fehlender Angaben zum genauen Messprotokoll nicht beziffern lässt. Lee et al.^[59] erreichen für ihre transparenten Elektroden aus Silbernanodrähten (Ag-NW) und Graphen eine praktisch dehnungsinvariante Leitfähigkeit (bis 100 Prozent) von $1,5 \cdot 10^4 \text{ S m}^{-1}$, diese wurde jedoch nur statisch, d.h. mit langsamer Dehnung und Wartezeit zwischen Erreichen der Zieldehnung und der tatsächlichen Messung gemessen. Die Kombination von AgFl mit ionischen Flüssigkeiten von Sun et al.^[65] wurde bei zyklischer Dehnung bis 100 % zwar einer Analyse einzelner Zyklen

unterzogen, die Dehngeschwindigkeit betrug jedoch nur $0,3 \text{ mm s}^{-1}$ und wurde nicht variiert. Dabei wäre es hierbei besonders interessant, in wie weit die leitfähige Flüssigkeit den Kontaktverlust zwischen Partikeln auch bei hohen Dehngeschwindigkeiten verhindern kann.

Dieser Umstand der stark unterschiedlichen Messbedingungen bzw. unvollständigen Charakterisierung erschwert den direkten Vergleich von Materialsystemen erheblich, Übersichtsarbeiten beschränken sich daher in der Regel auf einen Vergleich der statischen Leitfähigkeit (gedehnt/ungedehnt) vor und nach einer zyklischen Dehnung^[69,70] oder sogar lediglich auf den Vergleich der Leitfähigkeit im ungedehnten Zustand und der maximalen Dehnung beim Versagen^[71,56], was für eine praxisnahe Bewertung wenig hilfreich ist. Die Relevanz des Zeitverhaltens hängt zwar vom konkreten Anwendungsfall ab, bei den populärsten, oft geschilderten Verwendungen elastischer Leiter für tragbare Sensoren^[72,66] und **Leuchtdioden (LEDs)**^[65] ist jedoch z. B. durch ruckartige Bewegungen des menschlichen Körpers mit hohen Dehnungsgeschwindigkeiten zu rechnen. Falls dann eine kurzzeitige signifikante Erhöhung des elektrischen Widerstandes auftritt, kann es zu einem Messartefakt im Sensorsignal bzw. einem Flackern der **LEDs** kommen.

Für die mikroskopische Charakterisierung leitfähiger Komposite kommen in der Regel, wie auch in dieser Arbeit, **Rasterelektronenmikroskop (REM)**-Schnittansichten zum Einsatz. Für die auf einer 3D-Perkolation beruhende Volumenleitfähigkeit der Komposite stellen diese jedoch nur eine Stichprobe der tatsächlichen Perkolationsstruktur dar. Für eine repräsentative Charakterisierung sind daher 3D-bildgebende Verfahren wesentlich besser geeignet. Zu den etablierten Verfahren gehört Focused-Ion-Beam Rasterelektronenmikroskopie (FIB-REM)^[73], bei der einhergehend mit einer schrittweisen Abtragung der Oberfläche sequenzielle **REM**-Aufnahmen der Oberfläche angefertigt werden. Das Verfahren ist jedoch aufwendig und arbeitet nicht zerstörungsfrei. Elektronentomographie^[74] kann hingegen sehr kleine Probenvolumen zerstörungsfrei analysieren, unterliegt jedoch einem erheblichen präparativem Aufwand. Konventionelle Computertomographie erreicht hingegen nicht die erforderliche Auflösung, um Mikropartikel mit ausreichendem Detailgrad abzubilden. In dieser Arbeit wurde daher in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer EZRT ein neues Verfahren der **nanoCT**^[75,76] angewendet, bei dem die Röntgenquelle einen wesentlich feiner fokussierten Strahl erzeugt. Das selbst noch in der Entwicklung befindliche Verfahren wurde bereits für Ag-Nanowire-Komposite angewendet^[77], jedoch nicht für die hier verwendeten Partikel-Elastomer-Komposite.

Im Folgenden soll daher aufgezeigt werden, wie das dynamische elektromechanische Verhalten von Partikel-Elastomer-Kompositen systematisch untersucht und vor allem

der Einfluss des verwendeten Elastomers herausgestellt werden kann. Zudem soll hierzu ein Erklärungsmodell unter mikroskopischer Validierung entwickelt werden.

3.3.3 Material und Methoden

3.3.3.1 Siliconkomposite

Als Matrix für die Kompositschichten wurden drei unterschiedlich harte Eigenformulierungen hergestellt. Die Zusammensetzung der Silicone **S1** (weich), **S2** (mittelhart) und **S3** (hart) ist in Tabelle 3.1 aufgeführt, weitere Details sind in Abschnitt A.3 zu finden. Sie unterscheiden sich durch folgende, die Härte des Polymers maßgeblich bestimmende Parameter: Molekülkettenlänge und Gehalt des Basispolymers (Divinyl-term. PDMS), Gehalt an Kettenverlängerern (SiH-term. PDMS) und die Anwesenheit von nur einseitig angebundenen Ketten (Monovinyl-term. PDMS) und Kamm-Vinylgruppen (zusätzliche Vinylgruppen entlang der SiO_2 -Kette). **S1** weist im Vergleich zu **S2** ein längerkettiges Hauptpolymer (Divinyl-term. PDMS) und zusätzlich einen hohen Anteil von Monovinyl-term. PDMS auf. **S3** weist im Vergleich zu **S2** aufgrund der Verwendung eines Kamm-Vinyls ein Hauptpolymer mit effektiv kürzeren Ketten auf. Als Substrat für die Kompositschichten wurde, auf Grund seiner robusten mechanischen Eigenschaften, das kommerzielle Silicon **S5** (RT 625, Wacker Chemie AG, München, Deutschland) verwendet. Als leitfähige Partikel für die Kompositschichten wurden kommerzielle Produkte in Form von versilberten Kupfer-Flakes (*eConduct 044000, ECKART GmbH, Hartenstein, Deutschland*) und Ruß (*Ensaco[®] 250 P, Imerys Graphite & Carbon Belgium SA, Willebroek, Belgien*) bezogen.

3.3.3.2 Probenherstellung

Die Probenherstellung erfolgte nach üblichen Laborprozeduren zur Verarbeitung von Siliconmaterialien (vgl. Abbildung 3.13) Zur Herstellung der Silicon-Proben wurde jeweils eine einzelne Folie aus den verschiedenen Siliconrezepturen hergestellt. Hierzu wurde 16 mg Katalysator (*Karstedt-Katalysator* mit Platingehalt 0,3%) und 1 g Silicon abgewogen und für 30 s bei 2500 min^{-1} in einem dual-asymmetrischen Mischer (*Speedmixer, Hauschild, Hamm, Deutschland*) vermischt. Anschließend wurde die Masse mit einer Tischrakel mit Spaltbreite $330 \mu\text{m}$ und Geschwindigkeit 15 mm s^{-1} auf einer Glasplatte aufgebracht. Nach dem Aushärten für 10 min unter dem IR-Strahler (ca. 100°C) betrug die Schichtdicke etwa $200 \mu\text{m}$. Für die weitere Untersuchung wurden aus den fertigen Folien 5 mm breite und etwa 40 mm lange Streifen

Tab. 3.1: Silicon Formulierungen

Komponente		S1 (weich)	S2 (mittel)	S3 (hart)
Divinyl-term. PDMS	Anteil [wt%]	33	87	54,5
	Viskosität [mPa s]	100 000	2000	3000
	c(Vinyl) [mmol g ⁻¹]	0,02	0,09	0,4 ^a
Monovinyl-term. PDMS	Anteil [wt%]	46	-	-
	Viskosität [mPa s]	2000	-	-
	c(Vinyl) [mmol g ⁻¹]	0,06	-	-
SiH-term. PDMS	Anteil [wt%]	18	6	19,5
	Viskosität [mPa s]	500	500	500
	c(SiH) [mmol g ⁻¹]	0,16	0,16	0,16
SiH-Crosslinker	Anteil [wt%]	3	7	26,0
	Viskosität [mPa s]	500	500	500
	c(SiH) [mmol g ⁻¹]	1,1	1,1	1,1

^a Zusätzliche Kamm-Vinylgruppen (nicht-terminale Vinylgruppen)

geschnitten.

Die Komposit-Proben bestehen aus einer zweischichtigen Folie, einem untenliegenden Substrat und einer darüber befindlichen leitfähigen Schicht. Dies ist notwendig, da die hochgefüllten leitfähigen Schichten für sich alleine oft nur eine unzureichende mechanische Festigkeit für die Dehnversuche haben. Zur Herstellung der Komposit-Proben wurde jeweils eine Substratfolie aus S5 analog zu den Siliconproben hergestellt. Basierend auf 1 g Silicon wurden 0,6 g Ruß oder 2,4 g Metall-Flakes hinzugefügt um ein Komposit mit 20 vol% Partikeln zu erhalten. Eine ausreichende Menge Lösungsmittel (Butylacetat) wurde hinzugefügt um eine zähfließende Konsistenz zu erreichen (10 g für Ruß, 1-2 g für Metall-Flakes basierend auf 1 g Silicon). Die Mischung wurden mit 3500 min⁻¹ für 30 s (Metall-Flakes) bzw. 5 min (Ruß) vermengt. Anschließend wurde 16 mg Katalysator hinzugefügt, gefolgt von einem erneuten kurzen Durchmischen für 15 s bei 3500 min⁻¹. Die Mischungen wurde mit Spaltbreite 330 µm auf dem zuvor hergestellten Substrat aufgebracht und ebenfalls für 10 min unter dem IR-Strahler (ca. 100 °C) ausgehärtet, wobei das Lösungsmittel abdampft. Nach dem Aushärten betrug die Schichtdicke je nach Kompositrezeptur zwischen 30 µm und 70 µm. Für die weitere Untersuchung wurden aus den fertigen Folien wiederum 5 mm breite und etwa 40 mm lange Streifen geschnitten.

3.3.3.3 Mechanische Analyse

Zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der in Tabelle 3.1 genannten Silicone wurden die daraus hergestellten Proben in einem Rheometer (*MCR 502, Anton Paar, Österreich*) mit Dehnaufsatz (*UXF12/EXT*) eingespannt und von 0 % bis

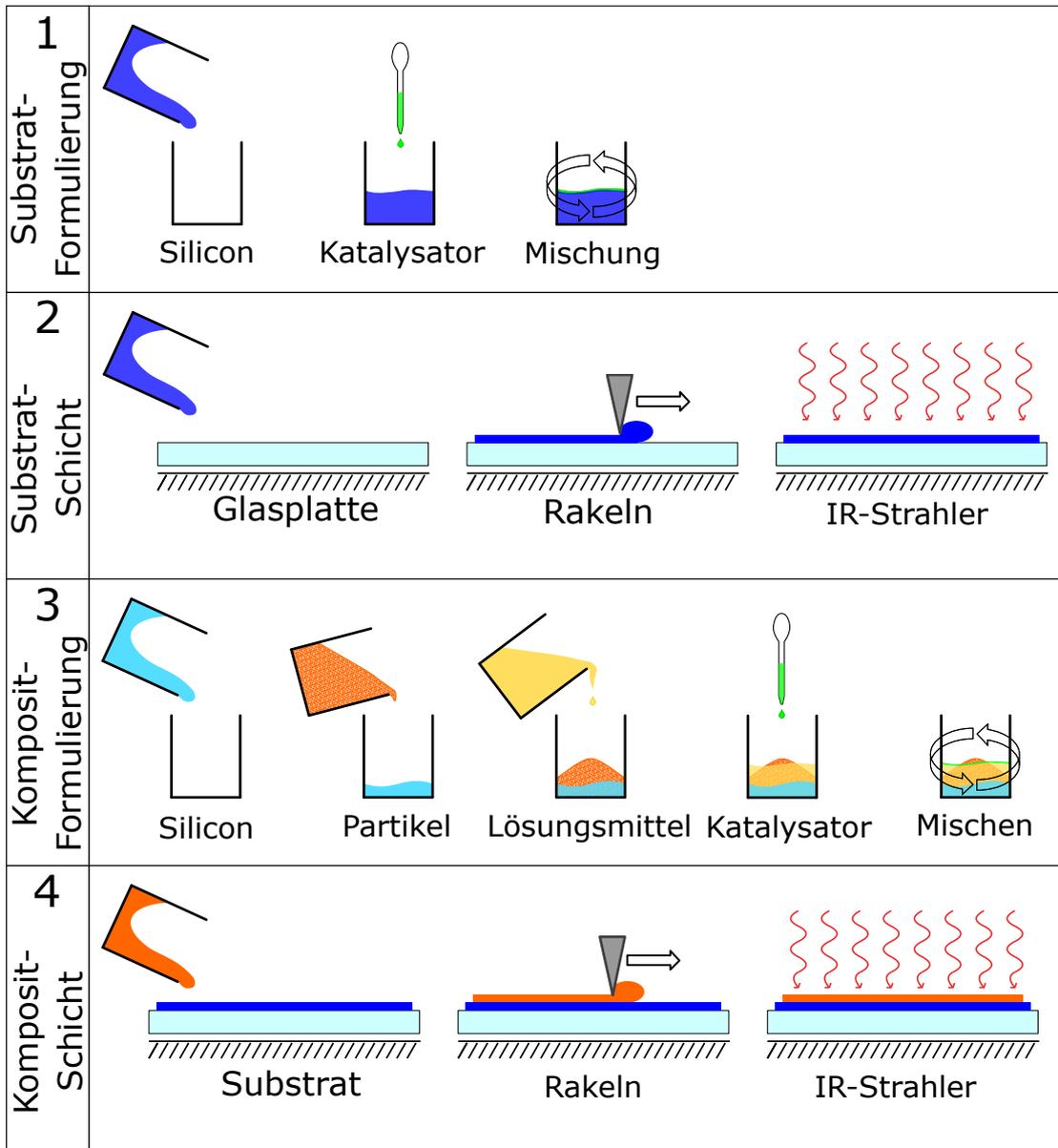


Abb. 3.13: Schematische Darstellung der Herstellung der Substrate und der Kompositsschichten bestehend aus Anmischen des Substrat-Silicons (1), Aufrakeln und Vernetzen der Substratschicht (2), Anmischen des Siliconkomposits (3) sowie Aufrakeln und Vernetzen der Kompositschicht (4).

100 % gedehnt. Das **E-Modul** wurde durch Fitten des Hookschen Gesetzes bestimmt, gemäß dem die mechanische Spannung σ_{mech} linear mit der Proportionalitätskonstante E (E-Modul) von der Dehnung ϵ abhängt (vgl. **Gleichung 2.5**), so lange die Dehngrenze nicht erreicht ist.

3.3.3.4 Dynamische elektromechanische Analyse (DEMA)

Zur dynamischen Erzeugung von Dehnungsverformungen mit teils hohen Geschwindigkeiten sind lineare Versuchsaufbauten auf Grund der hohen bewegten Massen und dem Konflikt zwischen Geschwindigkeit und Präzision bei Linearantrieben wie z. B. Spindelantrieben schlecht geeignet. Daher wurde zur Untersuchung ein Rotationsaufbau gewählt (s. **Abbildung 3.14**).

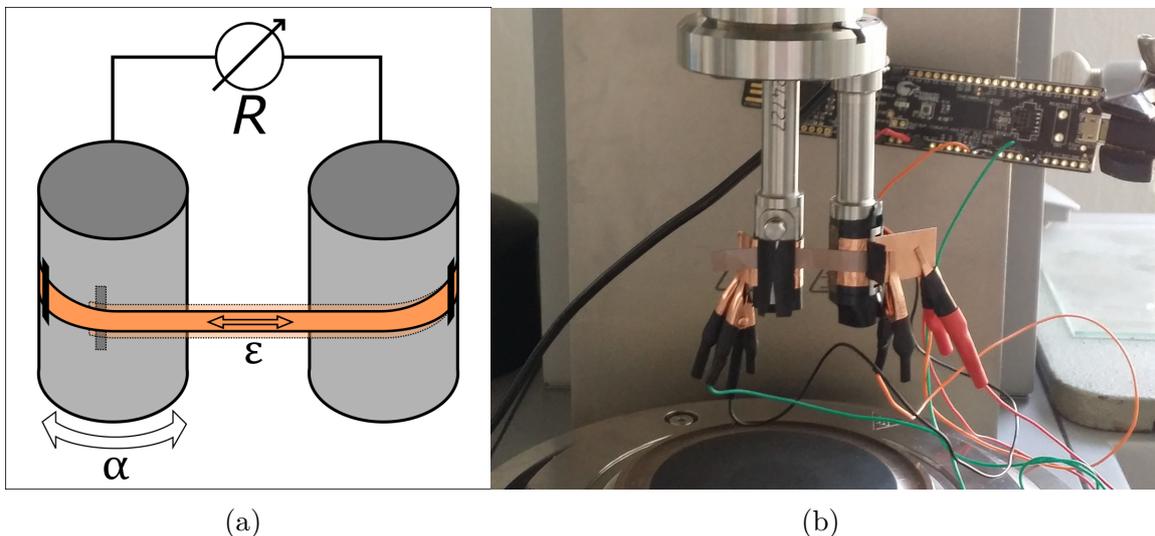


Abb. 3.14: Schematischer Aufbau der Rotationsdehnung bestehend aus streifenförmiger Probe (orange), starrem (rechts) und beweglichem Rundstab (links) mit Auslenkwinkel α , Dehnung ϵ und Widerstandsmessung R links (a) und Foto des Aufbaus rechts (b).

Dabei wird ein 5 mm breiter und ca. 40 mm langer Streifen der Probe zwischen zwei Rundstäbe (Radius $r = 6$ mm, Mittelpunktsabstand $l_0 = 19$ mm) eingespannt, von denen einer durch den Servomotor eines Rheometers (*MCR 502, Anton Paar, Österreich*) ausgelenkt wird. Die Probe wird dabei mit ihrer aktuellen Dehnung um den rotierenden Stab gewickelt, während der freie Abschnitt zwischen den Mittelpunkten der Stäbe weiter gedehnt wird. Durch eine hohe Haftreibung zwischen Probe und rotierendem Stab wird ein Abgleiten verhindert. Die notwendige durch Rotation erzeugte Bogenlänge, um beispielsweise im freien Abschnitt zwischen den Stäben eine Dehnung von 100 % zu erzeugen, ist daher kleiner als der Verfahrensweg in einem linea-

ren Dehnversuch. Die Dehnung ergibt sich gemäß [Gleichung 3.9](#) aus dem Drehwinkel α des angetriebenen Stabes.

$$\epsilon = e^{\frac{\alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot r}{360 \cdot l_0}} - 1 \quad (3.9)$$

Die angegebene Dehnung bezieht sich dabei auf den Teil der Probe, der sich zwischen den Stäben befindet. Da die Probe während der Dehnung kontinuierlich aufgewickelt wird, ergibt sich ein nicht-linearer, in diesem Fall exponentieller Zusammenhang.

[Abbildung 3.15](#) zeigt den Versuchsablauf einer [dynamischen elektromechanischen Analyse \(DEMA\)](#) und Zyklisierung der Proben. Dieser wurde entworfen, um die wichtigsten Effekte in den Materialproben aufzuzeigen. Dabei werden fünf Dehnungszyklen mit steigender Dehnungsgeschwindigkeit (1 %, 5 %, 10 %, 50 % und 100 %) durchgeführt. Nach jeder Verformung (Dehnung oder Entspannung) wird eine Haltezeit von 30 s bei der jeweiligen erreichten Dehnung eingelegt. Bis auf den ersten Zyklus, der bei 0 % Dehnung beginnt, beginnen und enden alle Zyklen bei 10 %. Dies dient dazu sicherzustellen, dass die Probe zu keiner Zeit (auch bei starker Viskoelastizität) durchhängt und immer eine minimale Spannung aufweist. Das ist insbesondere dann relevant, wenn die mechanische Spannung der Probe im Verlauf der Dehnung mit ausgewertet werden soll, was in dieser Arbeit jedoch noch nicht stattgefunden hat. Die maximale Dehnung beträgt daher jeweils 110 %, um dennoch eine Dehnungsdifferenz von 100 % zu erzeugen.

Nach der [DEMA](#) erfolgt eine Zyklisierung der Probe. Dabei werden insgesamt 10 000 Zyklen zwischen 10 % und 110 % bei $100 \% \text{ s}^{-1}$ (entspricht 0,5 Hz) durchgeführt. Nach Abschluss der Zyklisierung wird die zuvor beschriebene [DEMA](#) noch einmal wiederholt.

Die elektrische Leitfähigkeit wird während der [DEMA](#) kontinuierlich erfasst. Um eine bessere Vergleichbarkeit der Messungen zu ermöglichen, wird der Fokus jedoch auf einige ausgewählte charakteristische Leitfähigkeitswerte gelegt ($\sigma_1 - \sigma_6$). Die Definition dieser charakteristischen Werte ist in [Tabelle 3.2](#) dargelegt.

Messung der spezifischen Leitfähigkeit Der elektrische Widerstand R des Folienstreifens kann nicht vom Rheometer selbst gemessen werden. Hierzu wurde stattdessen ein Mikrocontroller ([CY8C5888LTI-LP097](#), *Cypress Semiconductor Corp., San Jose, USA*) mit Referenzspannungsquelle (Spannung U_{ref}), Konstantstromquelle bzw. -senke und Analog-Digital-Wandler eingesetzt. Durch geeignete Festlegung des durch die Probe fließenden Stroms und Messen der abfallenden Spannung können Widerstände über mehrere Größenordnungen besser gemessen werden als etwa mit einem

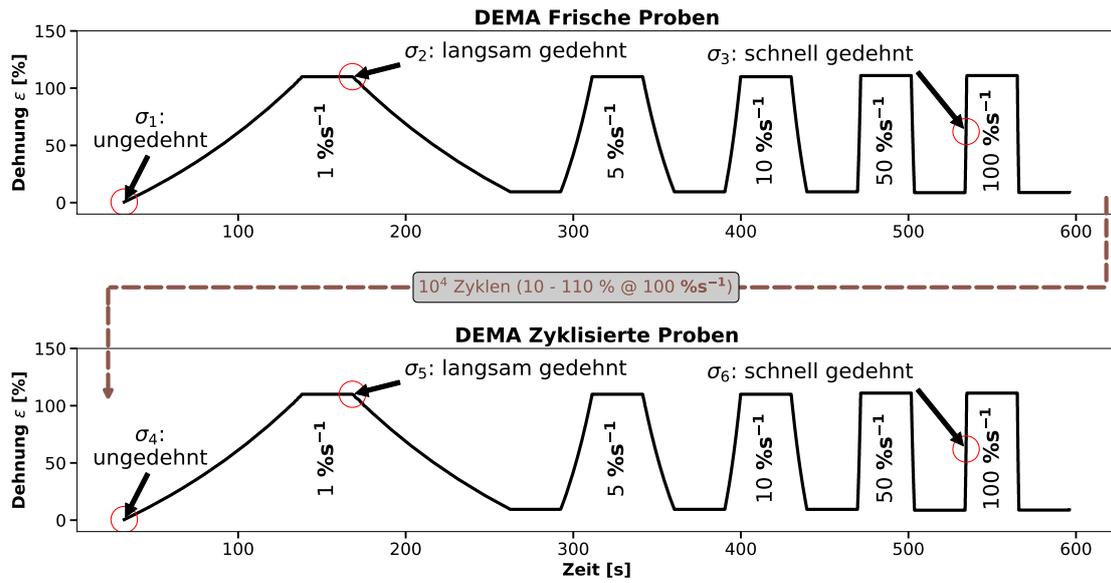


Abb. 3.15: Messprotokoll der Charakterisierung bestehend aus der dynamischen elektromechanischen Analyse der frisch hergestellten Probe im ungedehnten Zustand (σ_1), nach langsamer Dehnung (σ_2) und im schnell gedehnten Zustand (σ_3), einer nachfolgenden zyklischen Dehnung der Probe und einer abschließend an der zyklisierten Probe wiederholten dynamischen elektromechanischen Analyse ($\sigma_4, \sigma_5, \sigma_6$).

Tab. 3.2: Charakteristische spezifische Leitfähigkeiten

Symb.	Beschreibung	Vergleichbare Messwerte in der Literatur
σ_1	Spezifische Leitfähigkeit einer frischen Probe bei 0 % Dehnung	immer [61,62,65,63,57,68,67,59,58,66,78,64,60]
σ_2	Spezifische Leitfähigkeit einer frischen Probe bei 110 % Dehnung nach zuvorgehender Dehnung mit Dehnungsrate $1 \% s^{-1}$ und einer Haltezeit von 30 s bei einer konstanten Dehnung von 110 %	meistens [61,62,65,63,57,68,67,59,58,66,78,64,60]
σ_3	Minimale spezifische Leitfähigkeit einer frischen Probe während der Dehnung mit Rate $100 \% s^{-1}$. Dies ist bei allen untersuchten Proben die geringste Leitfähigkeit (Härtefall-Szenario)	fast nie ^[62]
σ_4	Wie σ_1 , jedoch nach 10 000 absolvierten Dehnungszyklen zwischen 10 % und 100 % mit einer Rate von $100 \% s^{-1}$	oft ^[62,65,63,68,67,59,58,66,64]
σ_5	Wie σ_2 , jedoch nach 10 000 absolvierten Dehnungszyklen zwischen 10 % und 100 % mit einer Rate von $100 \% s^{-1}$	selten ^[62,65,63,68,66]
σ_6	Wie σ_3 , jedoch nach 10 000 absolvierten Dehnungszyklen zwischen 10 % und 100 % mit einer Rate von $100 \% s^{-1}$	fast nie

Widerstandsteiler. Zusätzlich konnte eine ausreichend hohe Messrate (1000 Hz) erreicht werden. Da das Rheometer über keine digitale Schnittstelle verfügt, wurde der Messwert über den ebenfalls vorhandenen 8-Bit Digital-Analog-Wandler mit der Ausgabespannung U_a und Referenzspannung U_{ref} an den Analogeingang des Rheometers übermittelt (s. Gleichung 3.10) und dort mit 100 Hz eingelesen. Um die geringe Auflösung des Digital-Analog-Wandlers zu kompensieren wurde statt einer linearen Übertragungsfunktion eine logarithmische gewählt und der Messbereich jeweils mit Hilfe des Skalierungsfaktors f_s auf die Probe abgestimmt. Die Genauigkeit der Messung (feine Auflösung bei kleinen Widerständen, grobe Auflösung bei hohen Widerständen) war für die hier vornehmlich qualitative und auf hohe Leitfähigkeiten fokussierte Analyse insgesamt ausreichend.

$$U_a = \frac{U_{ref}}{4} \cdot \log_{10}\left(f_s \cdot \frac{R}{1\Omega} + 1\right) \quad (3.10)$$

Zur Angabe einer geometrie-normierten elektrischen Leitfähigkeit eines Materials kann dessen spezifische Leitfähigkeit σ gemäß Gleichung 3.11 aus dem gemessenen ohmschen Widerstand R der Kompositschicht mit Länge l_0 , Breite b_0 und Dicke h_0 berechnet werden.

$$\sigma = \frac{l_0}{R \cdot b_0 \cdot h_0} \quad (3.11)$$

Die SI-Einheit der spezifischen Leitfähigkeit ist $\Omega^{-1}m^{-1}$ bzw. $S m^{-1}$, oftmals findet sich in der Literatur jedoch auch $\Omega^{-1}cm^{-1} = 100 \cdot \Omega^{-1}m^{-1}$. Eine andere Darstellungsform der elektrischen Leitfähigkeit ist der spezifische Widerstand ρ als Kehrwert der spezifischen Leitfähigkeit σ gemäß Gleichung 3.12 mit Einheit Ωm bzw. $1\Omega cm = 0,01\Omega m$.

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{R \cdot b_0 \cdot h_0}{l_0} \quad (3.12)$$

Ebenso finden sich auch Angaben als Flächenwiderstand einer Schicht der Dicke h_0 als $R_{\square} = \rho \cdot h_0^{-1}$ mit Einheit Ω bzw. indizierte Einheit Ω/\square sowie Angaben als Längenwiderstand eines Leiters mit Querschnitt A_{q_0} als $R_L = \rho/A_{q_0}$ mit Einheit Ωm^{-1} bzw. $1\Omega cm^{-1} = 100\Omega m^{-1}$.

3.3.3.5 Elektrische Leitfähigkeit unter Dehnung

Erfährt ein elastischer Leiter mit Grundlänge l_0 durch Dehnung auf die Länge l eine absolute Längenänderung Δl so beträgt die relative Längenänderung $\epsilon = \Delta l/l_0$. Für hyperelastische Materialien wie Silicon mit einer angenommenen Inkompressibilität

(s. Gleichung 3.4) gilt für die Breite b und Dicke h

$$b \cdot h = b_0 / \sqrt{(1 + \epsilon)} \cdot h_0 / \sqrt{(1 + \epsilon)} \quad (3.13)$$

mit Grundbreite b_0 und Grunddicke h_0 und damit gemäß Gleichung 3.14 Volumenkonstanz, d.h. das Volumen V ist stets gleich dem Grundvolumen V_0 .

$$V = l \cdot b \cdot h = l_0 \cdot (1 + \epsilon) \cdot \frac{b_0}{\sqrt{1 + \epsilon}} \cdot \frac{h_0}{\sqrt{1 + \epsilon}} = l_0 \cdot b_0 \cdot h_0 = V_0 \quad (3.14)$$

Es kann also eine auf den ursprünglichen Querschnitt A_{q_0} bezogenen technische spezifische Leitfähigkeit mit

$$\sigma_{tech}(\epsilon) = \frac{l_0}{R(\epsilon) \cdot b_0 \cdot h_0} [\Omega^{-1} m^{-1}] \quad (3.15)$$

und eine auf die tatsächliche Querschnittsfläche A_q bezogenen physikalische spezifische Leitfähigkeit mit

$$\sigma_{phy}(\epsilon) = \frac{l_0 \cdot (1 + \epsilon)}{R(\epsilon) \cdot b_0 \cdot h_0 / (1 + \epsilon)} = \frac{l_0 \cdot (1 + \epsilon)^2}{R(\epsilon) \cdot b_0 \cdot h_0} [\Omega^{-1} m^{-1}] \quad (3.16)$$

definiert werden. Die physikalische spezifische Leitfähigkeit ist geeigneter, um das Verhalten verschiedener Materialien unter Dehnung vergleichen zu können. In dieser Arbeit wird daher stets die physikalische spezifische Leitfähigkeit angegeben, es wird also $\sigma := \sigma_{phy}$ definiert.

3.3.3.6 Rasterelektronenmikroskop (REM)

Um zumindest in einer Schnittansicht einen hochauflösten Einblick in die Verteilung und Orientierung der Ruß- und Metall-Flake-Partikel zu erhalten, wurden stellvertretend von den unzyklisierten Proben mit weicher Matrix REM-Aufnahmen (*ZEISS AURIGA 60, Carl Zeiss Microscopy GmbH, Oberkochen, Germany*; 2 kV Beschleunigungsspannung, Sekundärelektronendetektor) erstellt. Dazu wurden 5 mm breite und 10 mm lange Streifen aus den hergestellten Folien geschnitten. Nach dem Einbetten in Epoxidharz wurden diese entlang der Längsachse geschnitten und anschließend geschliffen und poliert um eine Seitenansicht auf die Substrat- und Kompositschicht normal zur Rakelrichtung zu erhalten. Die Schnittfläche wurde einer Ionenstrahlätzung unterzogen, um eine artefaktfreie Untersuchung zu ermöglichen. Zudem wurde eine einige wenige Nanometer dicke Kohlenstoffschicht aufgesputtert, um Aufladungseffekte zu vermeiden.

3.3.3.7 Nanoskalige Computertomographie (nanoCT)

Zur Ermittlung von Indizien für die Ursache der auftretenden Effekte wurden von der weichen und der mittelharten Siliconkompositschicht mit Metall-Flakes nanoCT-Aufnahmen jeweils im frischen und im zyklisierten Zustand erstellt. Diese bieten im Gegensatz zu den REM-Aufnahmen die Möglichkeit, nicht nur eine einzelne Schnittebene, sondern das gesamte Probenvolumen auszuwerten.

Probenpräparation Auch wenn die nanoCT eine zerstörungsfreie Analysemethode ist, sollte der Probenquerschnitt idealerweise genauso groß wie das Sichtfeld sein, um eine möglichst hohe Abbildungsqualität zu erreichen. Steht die Probe über das Sichtfeld hinaus kann es zu Artefakten bei der Rekonstruktion kommen. Das Sichtfeld muss wiederum für eine möglichst hohe Auflösung möglichst klein sein. Von den zuvor hergestellten Kompositproben (versilberte Kupfer-Flakes in weicher und mittelharter Siliconmatrix) wurden daher Würfel mit einer Kantenlänge von ca. 100 μm unter dem Mikroskop mit dem Skalpell präpariert und auf eine Messingspitze geklebt.

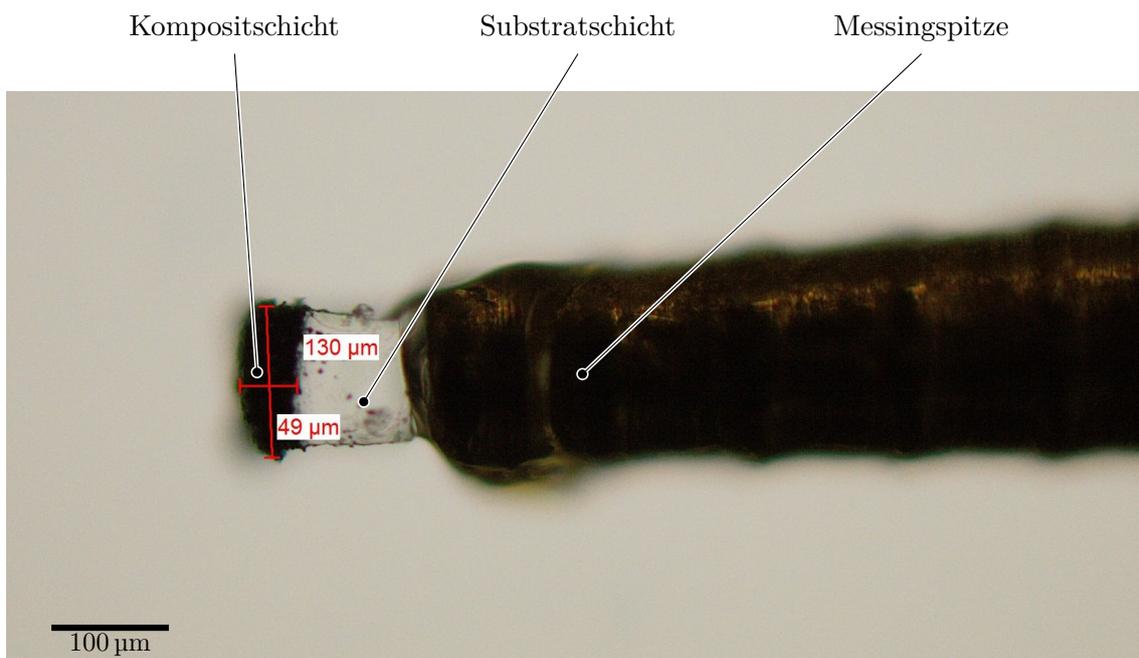


Abb. 3.16: Lichtmikroskopaufnahme einer auf einer Messingspitze präparierten Probe für die nanoCT bestehend aus der Substratschicht (transparent, ca. 200 μm dick) und der leitfähigen Kompositschicht (opak, ca. 50 μm dick)

Durchführung Ein nanoCT-Scan funktioniert grundsätzlich wie ein herkömmlicher microCT-Scan (vgl. [Abbildung 3.17](#)). Im Unterschied dazu ist die Röntgenquelle bei

einer **nanoCT** wesentlich stärker fokussiert. Die feine Auflösung erfordert eine wesentlich präzisere Mechanik sowie die Auskopplung von Störeinflüssen durch Schwingungsdämpfung.

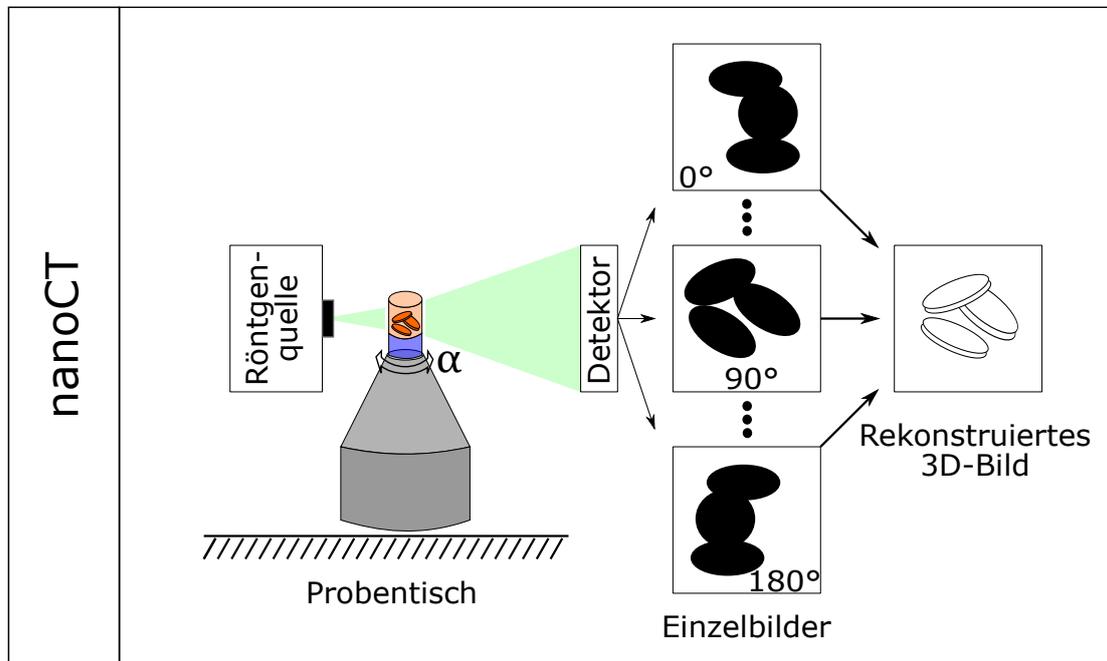


Abb. 3.17: Schematische Darstellung der Durchführung einer **nanoCT**-Aufnahme

Zur Aufnahme eines einzelnen Durchstrahlungsbildes wird die Probe in den Strahlengang der Röntgenquelle gebracht und das Schattenbild von einem Detektor aufgezeichnet. Die am Detektor gemessene Intensität ist dabei abhängig vom durchstrahlten Volumen und dessen materialabhängigem Absorptionskoeffizienten. In erster Näherung ist dieser proportional zur (mittleren) Kernladungszahl des Materials (Materialkontrast). Schwere Elemente wie das in den Partikeln vorliegende Silber und Kupfer absorbieren daher weit mehr Photonen als die elementaren Bestandteile der Siliconmatrix (Silicium, Sauerstoff, Kohlenstoff, Wasserstoff). Im Schattenbild erscheinen daher die Partikel dunkel und die Matrix hell. Die Integrationszeit (Zeitdauer, über die das Detektorsignal zu einem Einzelbild gemittelt wird) muss an die Signalqualität und geforderte Bildqualität angepasst werden. Lange Integrationszeiten erhöhen die Bildqualität und damit die Chance, auch geringfügige Materialkontraste zu erkennen. Gleichzeitig steigt jedoch auch der Zeitaufwand für die Messung und das Risiko von Artefakten durch Drifts, etwa auf Grund von Erwärmung oder Verformung der Probe bzw. eines Drifts des Gesamtsystems. Nachdem ein einzelnes Durchstrahlungsbild aufgenommen wurde, wird die Probe geringfügig um die Z-Achse gedreht und ein weiteres Bild aufgenommen. Üblicherweise werden Bilder mit einem Drehwinkel α

Tab. 3.3: Absolute und angenommene relative Stoffdichten für die nanoCT

Material	absolute Dichte in g cm^{-3}	relative Dichte ρ_r bezogen auf ρ_p^a
Vakuum	0,0	0,0
Reines Silicon	1,0	0,10
Komposit	2,7	0,28
Partikel	9,6	1,0

^a entspricht der normierten Intensität

zwischen $0-360^\circ$ aufgenommen. Ein kleines Inkrement des Drehwinkels $\Delta\alpha$ ermöglicht später eine genauere Rekonstruktion aus den Einzelbildern, ebenso wird jedoch auch die Messzeit erhöht. Anschließend werden alle Durchstrahlungsbilder durch einen Rekonstruktionsalgorithmus zu einem 3D-Bild der Probe zusammengesetzt. Dieser Algorithmus löst also das inverse Problem, welche tatsächliche Dichteverteilung in der Probe in der Lage ist, die vorliegende Serie von Durchstrahlungsbildern zu erzeugen.

Normierung Da die Photonenabsorption in erster Näherung linear mit der Kernladungszahl und diese wiederum in erster Näherung linear mit der Materialdichte zusammenhängt wurde eine Normierung der gemessenen Intensität auf die Intensität der größten auftretenden (lokalen) Dichte vorgenommen. Da die Silberbeschichtung und der Kupferkern der Partikel durch die Auflösungsgrenze des Verfahrens nicht von einander unterschieden werden können, wurde hierzu die mittlere Partikeldichte herangezogen. Diese berechnet sich aus dem Kupfervolumenanteil $V_{rel,Cu} = 60 \text{ vol}\%$, dem Silbervolumenanteil $V_{rel,Ag} = 40 \text{ vol}\%$, der Kupferdichte $\rho_{Cu} = 8,9 \text{ g cm}^{-3}$ und Silberdichte $\rho_{Ag} = 10,5 \text{ g cm}^{-3}$ wie folgt:

$$\rho_p = V_{rel,Cu} \cdot \rho_{Cu} + V_{rel,Ag} \cdot \rho_{Ag} = 9,5 \text{ g cm}^{-3} \quad (3.17)$$

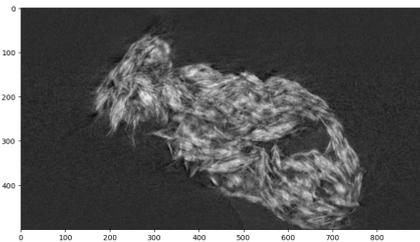
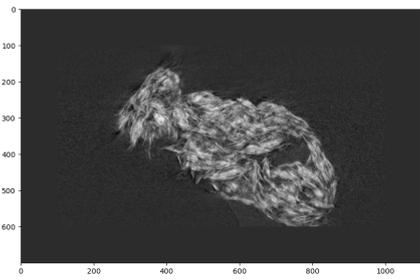
Analog ergibt sich die (mittlere) Dichte der Probe ρ_s aus dem Volumenanteil der Siliconmatrix $V_{rel,m} = 80 \text{ vol}\%$ mit Dichte $\rho_m = 1,0 \text{ g cm}^{-3}$ und dem Volumenanteil der Partikel $V_{rel,p} = 20 \text{ vol}\%$ mit der Dichte ρ_p wie folgt:

$$\rho_s = V_{rel,m} \cdot \rho_m + V_{rel,p} \cdot \rho_p = 2,7 \text{ g cm}^{-3} = 0,28 \cdot \rho_p \quad (3.18)$$

Die Intensität der Messung wurde folglich so skaliert, dass die mittlere Intensität innerhalb des Probenvolumens 0,28 beträgt. Insgesamt ergeben sich damit für die in der Probe enthaltenen Stoffvolumina die in [Tabelle 3.3](#) aufgelisteten absoluten und angenommenen relativen Werte.

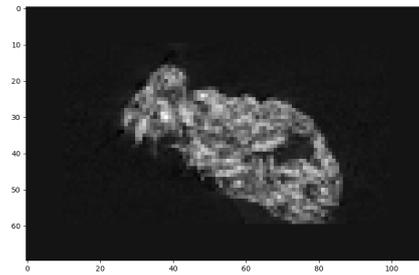
Auswertung Bei den erhaltenen 3D-Datensätzen ist es schwer, händisch quantitative Unterschiede zwischen den Proben festzustellen, zumal jeder Datensatz aus mehreren hundert Schichtbildern besteht. Da die Partikeldichteverteilung eine mögliche Unterscheidung bieten kann, soll diese in den Rekonstruktionsdaten ermittelt werden. Diese Unterscheidung soll jedoch nicht auf Einzelvoxel-Ebene, sondern auf Basis von kubischen Volumenelementen, die jeweils mehrere Voxel enthalten, vorgenommen werden. Die Größe dieser Volumenelemente ist innerhalb eines Durchganges einheitlich, wird für verschiedene Durchgänge jedoch variiert: Kantenlänge je nach Auflösung der Daten etwa 0,2 μm , 0,5 μm , 1,0 μm , 1,5 μm , 2,0 μm , 3,0 μm , 4,0 μm und 5,0 μm . In jedem Durchgang wird die mittlere Materialdichte in jedem Volumenelement berechnet und anschließend die Verteilung der Dichte aller Volumenelemente bestimmt. Hierzu ist es jedoch zwingend notwendig, alle Volumenelemente, die sich nicht vollständig im Probenvolumen befinden, von der Auswertung auszuschließen, da die Mittelwerte ansonsten durch die Umgebungsdichte (Vakuum = 0) verfälscht würden.

Die gesamte Auswertung wurde automatisiert mittels eines selbstständig entwickelten Python-Scriptes durchgeführt, das mehrere Bildverarbeitungsalgorithmen der Bibliotheken *skimage*, *scipy*, *numpy* einsetzt. Die einzelnen Schritte der Verarbeitung und die Zwischenergebnisse sind in [Tabelle 3.4](#) dargestellt. Da die Abbildungen nur beispielhaft sind, ist an dieser Stelle kein Maßstab hinzugefügt worden.

Name	Beschreibung	Beispielergebnis
1 Ursprungsbild	Rohbild aus der nanoCT -Rekonstruktion einlesen	
2 Einrahmung	Umgeben des Ursprungsbildes mit einem 100 Pixel breiten schwarzem Rahmen so dass der Probenbereich den Rand nicht berührt	

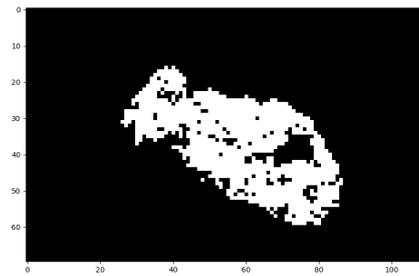
3 Skalierung

Reduzierung der Auflösung um den Faktor 10 mittels Mittelwertbildung um Rechenzeit einzusparen



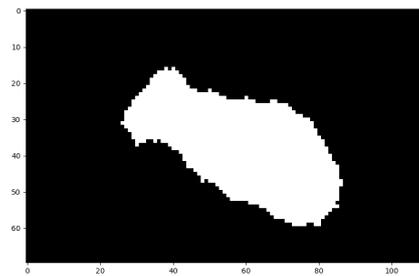
4 Binärisierung

Binärisierung anhand des nach Otsu^[79] bestimmten Schwellwertes



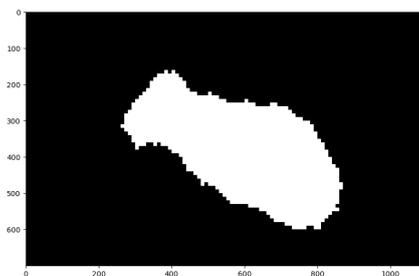
5 Schließen

Morphologisches Schließen (Dilation gefolgt von Erosion) der Poren um eine geschlossene Fläche mit glattem Rand zu erhalten



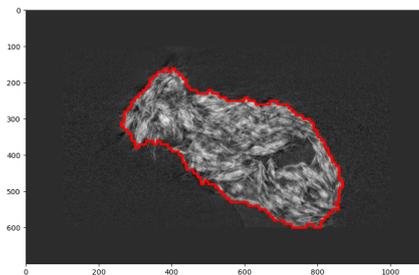
6 Reskalierung

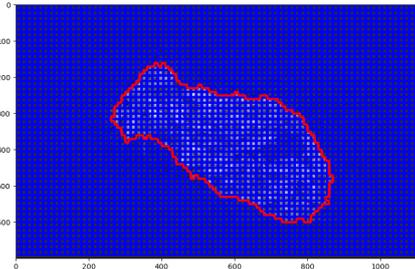
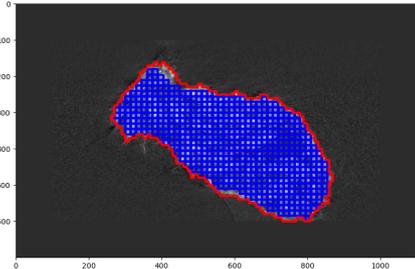
Reskalierung auf ursprüngliche Auflösung



7 Kontur

Bestimmung der Kontur der weißen Fläche nach Canny^[80] um die Probe vom Hintergrund abzugrenzen



8 Gittergenerierung	Generierung eines 3D-Auswertungsgitters mit einer vorgegebenen Kantenlänge der Elemente (Voxel)	
9 Auswertungsgitter	Entfernung aller Voxel außerhalb des Probenvolumens	
10 Auswertung	Berechnungen der Verteilung der mittleren Intensität der Voxel	

Tab. 3.4: Bildverarbeitungsschritte für die Auswertung der nanoCT

3.3.3.8 Tragbarer Textil-Elektronik Demonstrator

Für den Textil-Elektronik Demonstrator wurden konventionelle als **oberflächenmontiertes Bauelement (SMD)** ausgeführte LEDs (150120VS75000, Würth Elektronik, Deutschland) und Lithium-Polymer-Akkus (3,7 V, 200 mAh) erworben. Aus den zuvor hergestellten Metall-Flake-Komposit-Folien mit weicher (S1) und mittelharter Matrix (S2) wurden je zwei Leiterbahn-Streifen mit etwa 5 mm Breite und 100 mm Länge geschnitten. Diese wurden an ihren Enden mit metallischen aufgeräumten Aderendhülsen versehen. Mit den zwei weichen und den zwei mittelharten Kompositen wurde jeweils eine Leiteranordnung in der Form *Kabel - elastische Leiterbahn - LED - elastische Leiterbahn - Kabel* erstellt. Kabel und LED-Kontakte wurden jeweils auf die Aderendhülse gelötet. Beide Leiteranordnungen wurden anschließend nebeneinander auf ein dehnbares Textil genäht und über die Kabel mit je einem Akku verbunden. Das System konnte nun von einer Versuchsperson in Anlehnung an eine Sicherheitsfunktionskleidung als Bandage um den Ellenbogen getragen werden. Zur Evaluierung führte die Testperson mit angelegter Bandage und eingeschalteten LEDs eine schnelle

Beugung des Ellenbogens durch. Dabei wurde die Bewegung und Helligkeit der LEDs mit einer Videoaufnahme festgehalten.

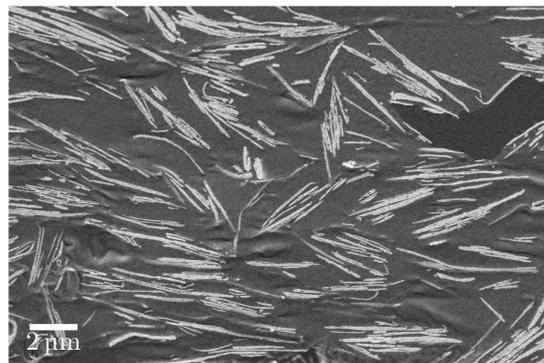
3.3.4 Ergebnisse und Diskussion

3.3.4.1 Mikroskopische Eigenschaften der Partikelkomposite

Der verwendete Leitruß besteht aus runden Primärpartikeln in der Größenordnung von 100 nm. Diese sind zu verzweigten und damit rauen kettenförmigen [Agglomeraten](#) von einigen 100 nm Länge zusammengelagert, die weitgehend homogen in der Matrix verteilt sind (vgl. [Abbildung 3.18a](#)). An einigen Stellen kommen sich die Ketten sehr nahe (unter 10 nm). Eine Vorzugsrichtung der Ketten ist nicht auszumachen, jedoch sind die Übergänge zwischen den einzelnen Ketten auf Grund des geringen Kontrastes zur Matrix grundsätzlich nur schwer zu erkennen.



(a) Ruß-Komposit mit schemenhaften dunklen Partikelumrissen auf einer helleren Siliconmatrix



(b) Metall-Flake-Komposit mit scharf abgegrenzten hellen Partikeln auf dunklerer Siliconmatrix sowie einer dunklen Pore oben rechts

Abb. 3.18: REM-Aufnahmen des Ruß-Komposits (a) und des Metall-Flake-Komposits (b) mit weicher Siliconmatrix ([S1](#))

Die Metall-Flakes haben eine Dicke von ebenfalls etwa 100 nm, der Flächendurchmesser beträgt jedoch etwa 4 µm (vgl. [Abbildung 3.18b](#)). Die meisten Flakes sind in etwa in Rakelrichtung ausgerichtet, auch wenn einige quer zu dieser Ebene verkeilt vorliegen. Die Flakes sind zudem in Stapeln angeordnet zwischen denen sich nur wenige einzelne Flakes befinden. Innerhalb dieser Stapel liegen die Partikel sehr nahe aneinander, zwischen den Stapeln sind die Abstände jedoch weit größer. Insgesamt unterscheiden sich Ruß- und Metall-Flake-Komposite auf der mikroskopischen Ebene sowohl in Größe und Form als auch in der Oberflächenbeschaffenheit. Diese Beobachtungen stellen die Grundlage für das Erklärungsmodell (vgl. [Abbildung 3.21](#)) für die

nachfolgenden Ergebnisse dar.

3.3.4.2 Mechanische Eigenschaften der Matrix-Silicone

In Abbildung 3.19 sind die Messkurven der mechanischen Analyse der drei Matrix-Silicone dargestellt. Durch die sehr unterschiedliche Zusammensetzung und die daraus resultierenden unterschiedlichen Elastomernetzwerke weisen die Silicone erhebliche Unterschiede in ihrer Härte auf. Die per Fit mit Gleichung 2.5 ermittelten E-Moduli sind in Tabelle 3.5 aufgeführt. Der Fit wurde dabei jeweils über den gesamten Dehnungsbereich ausgeführt um einen mittleren Wert für das E-Modul zu bestimmen. Insgesamt wird ein E-Modul-Bereich von etwa 100-1300 kPa abgedeckt.

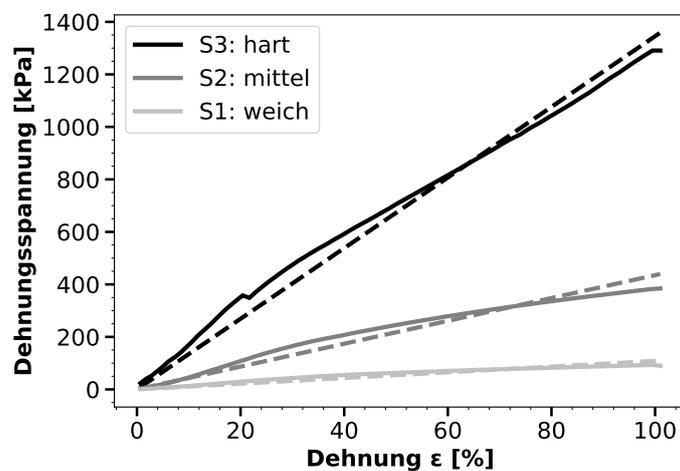


Abb. 3.19: Spannungs-Dehnungs-Kurven (durchgezogen) und deren linearer Fit (gestrichelt) der untersuchten Silicone mit einem E-Modul von 100 kPa (S1, weich), 440 kPa (S2, mittelhart) und 1300 kPa (S3, hart).

Tab. 3.5: E-Moduli der Siliconformulierungen

	S1 (weich)	S2 (mittel)	S3 (hart)
E-Modul E [Pa]	$(1,0 \pm 0,1) \cdot 10^5$	$(4,4 \pm 0,4) \cdot 10^5$	$(13 \pm 1) \cdot 10^5$

3.3.4.3 Elektrische Eigenschaften

Vergleich zwischen Ruß und metallischen Flakes Abbildung 3.20 zeigt die Messergebnisse der dynamischen elektromechanischen Analyse (vgl. Abbildung 3.15) des Ruß- (blau) und Metall-Flake-Komposits (rot), sowohl für die frischen (hell, gestrichelt) als auch für die zyklisierten Proben (dunkel, durchgezogen). Als Matrix wurde das mittelharte Silicon (S2) gewählt.

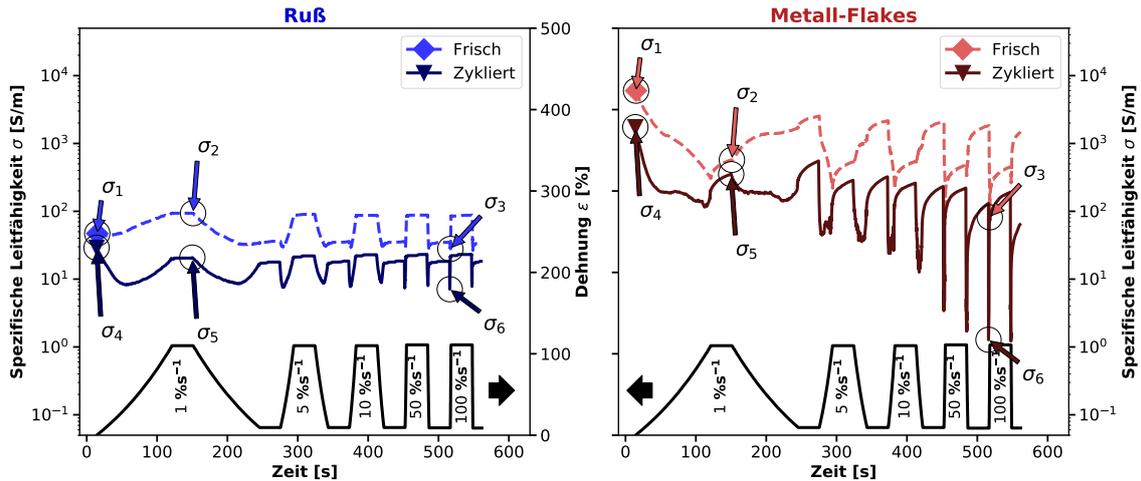


Abb. 3.20: Spezifische Leitfähigkeit eines Ruß-Komposits (links, blau) und eines Metall-Flake-Komposits (rechts, rot) mit der mittelharten Siliconmatrix (S2), sowohl frisch hergestellt (hell, gestrichelt) als auch nach 10 000 Dehnungszyklen (dunkel, durchgezogen) bei unterschiedlichen Dehnungen und Dehnungsraten.

Dynamisches Verhalten Die frisch hergestellte Ruß-Kompositschicht zeigt eine initiale Leitfähigkeit im ungedehnten Zustand (σ_1) von etwa $6 \cdot 10^1 \text{ S m}^{-1}$. Bei Dehnung der Probe nimmt die Leitfähigkeit deutlich zu. Die Leitfähigkeit im gedehnten Zustand nach langsamer Dehnung (σ_2) ist damit fast doppelt so groß wie σ_1 . Bei schnellerer Dehnung der Probe ($5\text{-}100 \text{ \% s}^{-1}$) nimmt die Leitfähigkeit zunächst ab, um anschließend wieder auf das Ausgangsniveau anzusteigen. Diese Beobachtung deckt sich mit der Literatur^[54,55], die eine Vergrößerung der Partikel-Partikel-Abstände als verringernden und ein Ausrichten der Partikel entlang der Zugrichtung als vergrößernden Effekt auf die Leitfähigkeit beschreiben. Dass ersterer Effekt sofort eintritt, während letzterer durch Dämpfung der Partikelrotation in der Elastomermatrix verzögert auftritt, erklärt die kurzfristige Abnahme und anschließende Zunahme der Leitfähigkeit. Die Rußpartikel sind an sich zwar sehr rau, aber nur geringfügig anisotrop. Der dennoch deutliche Effekt der Partikelausrichtung lässt darauf schließen, dass nicht einzelne Partikel, sondern kurze Fragmente des zufällig gebildeten Perkolationsnetzwerkes die eigentlichen Akteure sind.

Bei der Probe mit metallischen Flakes überwiegt die Verringerung der Leitfähigkeit unter Dehnung deutlich. So ist hier σ_2 etwa eine Größenordnung kleiner als σ_1 , wobei beim Halten der Kompositschicht im gedehnten Zustand nur eine leichte Erholung eintritt. Mit zunehmender Dehngeschwindigkeit nimmt das kurzfristige Minimum der Leitfähigkeit weiter ab, die minimale Leitfähigkeit bei schneller Dehnung (σ_3) ist also noch einmal deutlich geringer als bei langsamer Dehnung und gelangt damit in die

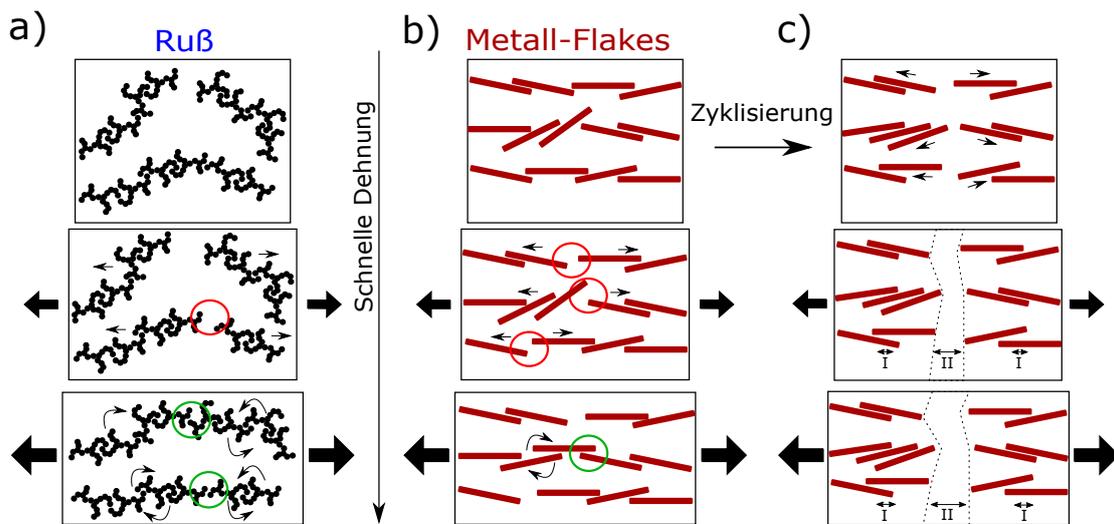


Abb. 3.21: Erklärungsmodell für das unterschiedliche Verhalten von Ruß- und Metall-Flake-Komposit. Einige Rußpartikelketten (a) reißen bei schneller Dehnung (rote Markierung) womit sich die Leitfähigkeit kurzzeitig verringert. Nachdem sich die Kettenfragmente jedoch in der Zugrichtung ausgerichtet haben, können diese Verbindungen wiederhergestellt und zusätzliche neue Verknüpfungen gebildet werden (grüne Markierung). Bei Metall-Flake-Ketten (b) kommt es hingegen zu wesentlich mehr Unterbrechungen, da die Partikel kaum oder gar nicht ineinander verzahnt sind. Weil die Partikel zudem bereits stark ausgerichtet sind, kommt es nur zu wenigen wiederhergestellten Verbindungen. Bei einer andauernden zyklischen Belastung (c) der Proben könnten sich die Flakes zudem teilweise zu Stapeln verdichten (Zone I) und besonders dehnungsempfindliche Verarmungszonen (Zone II) schaffen, die den größeren Anteil der Dehnung aufnehmen und damit die Verdichtungszone noch weiter voneinander entfernen.

Leitfähigkeitsregion der Ruß-Kompositschicht. Dies ist bei der Ruß-Kompositschicht nicht der Fall, hier ist das kurzzeitige Minimum der Leitfähigkeit unabhängig von der Dehngeschwindigkeit. Obwohl σ_1 des Metall-Flake-Komposits zwei Größenordnungen größer als σ_1 des Ruß-Komposits ist, gleichen sich die Leitfähigkeiten im Worst-Case-Szenario σ_3 ($100\% \text{ s}^{-1}$) bereits aneinander an.

Die Metall-Flake-Komposite zeigen also einen geringeren Widerstand gegen das Auseinanderziehen der Partikel als die Ruß-Komposite. In der Folge wird das Perkolationsnetzwerk unter Dehnung an vielen Stellen durchbrochen (vgl. [Abbildung 3.21b](#)). Dies lässt sich damit erklären, dass die glatten und flachen Flakes keine Möglichkeit der Verhakung untereinander bieten, während die Rußpartikel auf Grund ihrer rauen [Agglomerat](#)form gut ineinander greifen können. Durch die Herstellung der Kompositschichten als gerakelte Folien sind die Metall-Flakes zudem schon weitgehend in

Zugrichtung ausgerichtet, so dass von einer zusätzlichen Ausrichtung in Zugrichtung kein signifikanter Effekt zu erwarten ist. Der Vorteil der höheren Leitfähigkeit der Metallpartikel ist damit in der detaillierten Betrachtung nahezu aufgebraucht. Auch wenn die Dauer des Leitfähigkeitseinbruchs nur sehr kurz ist, genügt dieser dennoch, um etwa eine LED flackern zu lassen oder ein Artefakt im Signal eines dielektrischen Elastomersensors zu erzeugen.

Zyklusstabilität Bei den zyklisierten Proben kommen die Unterschiede zwischen den Kompositen mit unterschiedlichen leitfähigen Partikeln noch deutlicher zum Tragen. Die Ruß-Kompositschicht zeigt eine geringe, in allen Dehnungszuständen in etwa vergleichbare Verringerung der Leitfähigkeit der zyklisierten gegenüber der frischen Probe. Die Metall-Flake-Kompositschichten zeigen zwar vergleichbare Einbußen zwischen der Leitfähigkeit der frischen Probe im ungedehnten Zustand (σ_1) und der Leitfähigkeit der zyklisierten Probe im ungedehnten Zustand (σ_4). Die minimalen Leitfähigkeiten der zyklisierten Probe während der Verformung sind jedoch deutlich (um mehr als eine Größenordnung) geringer als bei der frischen Probe. Besonders deutlich ist dies beim Vergleich der Leitfähigkeit unter schneller Dehnung zwischen der frischen (σ_3) und der zyklisierten Probe (σ_6) zu erkennen. Vor allem aber liegen die Leitfähigkeiten der zyklisierten Metall-Flake-Kompositschicht im gedehnten Zustand durchgängig unterhalb der entsprechenden Werte der Ruß-Kompositschicht. Damit weist das hochleitfähige Komposit mit metallischen Partikeln auch im Dauertest eine geringere Stabilität als das Ruß-Komposit auf. Das Perkolationsnetzwerk der Rußpartikel scheint im Gegensatz zu dem der metallischen Flakes also keiner bzw. nur einer vernachlässigbar kleinen Degeneration zu unterliegen. Dies lässt sich damit erklären, dass die Rußpartikel auf Grund ihrer Porosität und ihrer Verzahnung untereinander sowie mit der Elastomermatrix kein Bestreben zu einer lokalen Verdichtung aufweisen. Die Flakes weisen hingegen durch ihre glatte Struktur und geringe Wechselwirkung mit der Matrix eine höhere Mobilität auf und könnten sich durch die zyklische Deformation langsam zu Stapeln anhäufen (vgl. [Abbildung 3.21c](#)). Diese wären in sich zwar elektrisch hoch leitend, untereinander jedoch nur schwach über Verarmungszonen verbunden. Da diese Verarmungszonen zudem weicher als die verdichteten Zonen wären, würden sie einen Großteil der Dehnung aufnehmen und die Flake Stapel effektiv voneinander elektrisch isolieren. Eine kovalente Anbindung der Partikel an die Matrix, etwa durch Oberflächenfunktionalisierung, könnte die Zyklusstabilität verbessern. Umgekehrt ist in diesem Fall jedoch auch mit einer Verschlechterung des dynamischen Verhaltens zu rechnen, da die Reorganisation des Perkolationsnetzwerkes durch die starke Matrixanbindung verhindert wird.

3.3.4.4 Einfluss der Siliconmatrix

Um einen potentiellen Einfluss der Siliconmatrix zu untersuchen, wurde diese bei ansonsten unveränderten Parametern variiert. In Abbildung 3.22 ist ein Vergleich der Ruß- und Metall-Flake-Kompositschichten mit unterschiedlich harten Siliconmatrizen (S1: weich, S2: mittel, S3: hart) anhand der Parameter $\sigma_1 - \sigma_6$ (vgl. Abbildung 3.15) gezeigt. Auch wenn keines der Metall-Flake-Kompositmaterialien als dauerhaft anzusehen ist ($\sigma_6 \ll \sigma_1$), nehmen die übrigen Leitfähigkeiten $\sigma_1 - \sigma_5$ sowohl für die Ruß- als auch für die Metall-Flake-Komposite mit abnehmender Härte der Silicone signifikant zu. Eine weichere Matrix begünstigt also die elektrischen Eigenschaften sowohl im statischen als auch im dynamischen Belastungsfall. Dies lässt sich damit erklären, dass die weichere Siliconmatrix mit einer geringeren Vernetzungsdichte die Perkolationsnetzwerke beim Dehnvorgang weniger stark auseinanderreißt und deren Reorganisation im Anschluss ebenfalls weniger stark behindert.

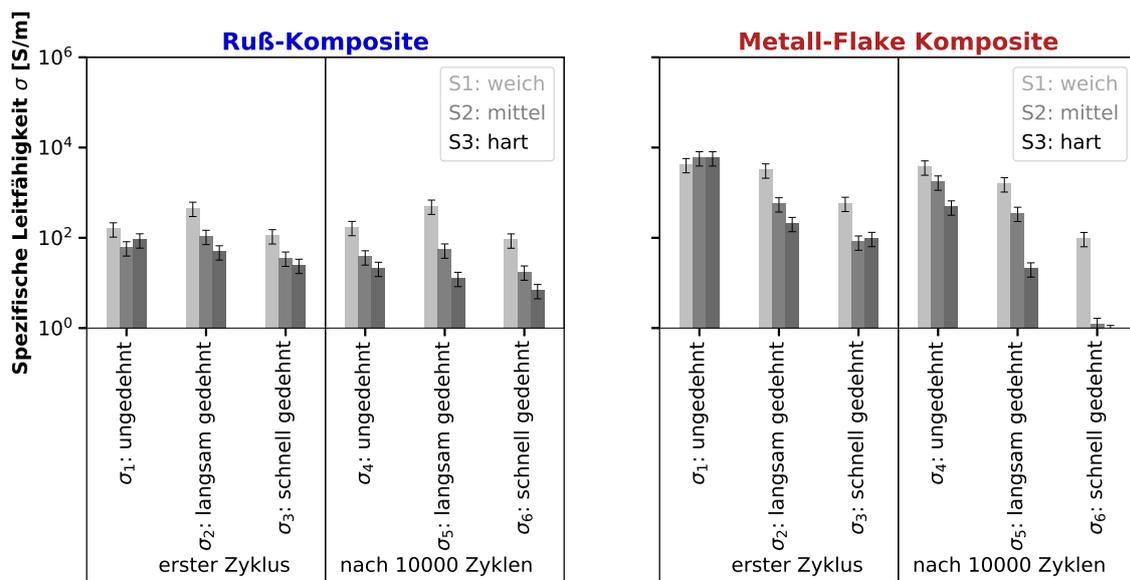


Abb. 3.22: Vergleich des Einflusses der zunehmenden Härte der Siliconmatrix (Graustufen hell zu dunkel) auf die elektromechanischen Eigenschaften der Ruß-Kompositschichten (links) und der Metall-Flake-Kompositschichten (rechts). Die Fehlerbalken zeigen die typische Streuung der gemessenen spezifischen Leitfähigkeit von Proben mit gleicher Zusammensetzung. σ_6 des Metall-Flake-Komposits mit harter Siliconmatrix (S3) war außerhalb des Messbereichs ($R > 1 \text{ M}\Omega$)

Da die Komposite mit weicher Siliconmatrix (S1) im vorhergehenden Vergleich die besten Ergebnisse erzielt haben, soll das dynamische elektromechanische Verhalten der daraus hergestellten Proben mit versilberten Kupfer-Flakes und Ruß im Detail betrachtet und mit der mittelharten Matrix (S2) verglichen werden (s. Abbildung 3.23).

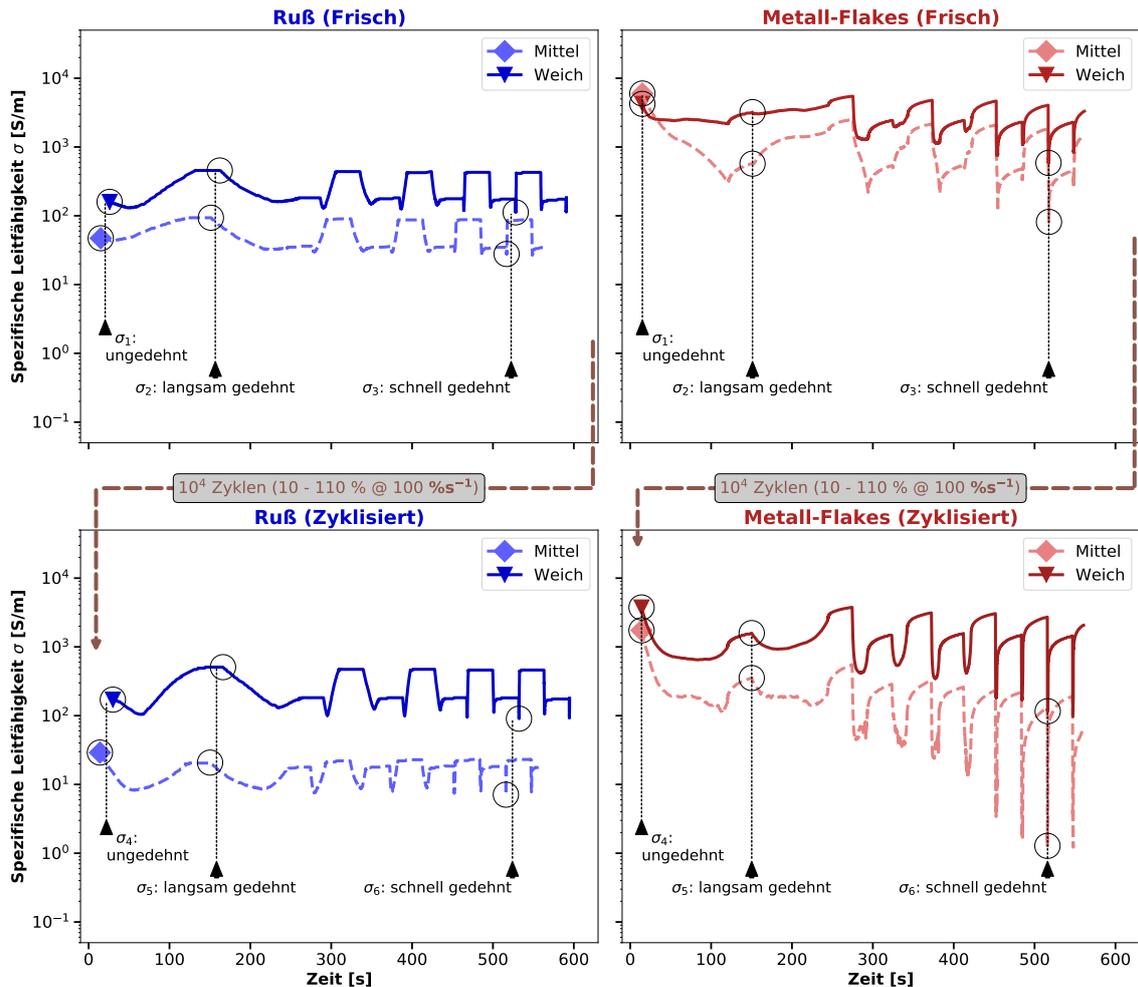


Abb. 3.23: Abhängigkeit der Leitfähigkeit von Dehnung und Dehngeschwindigkeit für Ruß-Kompositschichten (links, blau) und Metall-Flake-Kompositschichten (rechts, rot) mit jeweils einer weichen (dunkel, durchgezogen) und mittelharten Siliconmatrix (hell, gestrichelt), sowohl im frisch hergestellten Zustand (oben) als auch nach der Zyklisierung (unten).

Bei der spezifischen Leitfähigkeit im ungedehnten Zustand (σ_1) zeigen die weiche und die mittelharte Matrix mit Metall-Flakes keinen signifikanten Unterschied, jedoch ist die Leitfähigkeit mit der mittelharten Matrix in fast allen Dehnungszuständen deutlich (bis zu einer Größenordnung) geringer. Die zyklische Belastung zeigt auch bei der weichen Matrix eine starke Verringerung der Leitfähigkeit, insgesamt ist der Effekt jedoch geringer als bei der mittelharten Matrix.

Der positive Effekt der weichen Siliconmatrix (S2) äußert sich auch bei der Verwendung von Ruß als leitfähigen Füllstoff. Im qualitativen Verhalten zeigt sich bei den frischen Proben kein signifikanter Unterschied, jedoch ist die Grundleitfähigkeit σ_1 des Komposits mit weicher Siliconmatrix etwa vier mal so groß wie die des Komposi-

tes mit mittelharter Matrix. Zudem sind bei der weichen Matrix kaum Einbußen in der Leitfähigkeit nach der Zyklisierung zu erkennen ($\sigma_1 \approx \sigma_4$).

Eine weichere Matrix verbessert somit die elektrischen Eigenschaften sowohl unter statischer als auch dynamischer Belastung. Dies lässt sich dadurch erklären, dass in der weicheren Siliconmatrix mit geringerer Vernetzungsdichte die Perkolationsnetzwerke während des Dehnungsvorgangs weniger beeinträchtigt werden und sich danach auch schneller neu organisieren. Weiterhin scheint sich der elektrische Kontakt zwischen den Partikeln auch im statischen Zustand durch das weitmaschigere Elastomernetzwerk zu verbessern.

3.3.4.5 nanoCT

Die erstellten nanoCT-Aufnahmen (s. [Abbildung 3.24](#)) zeigen deutlich, dass die metallischen Flakes bevorzugt in Stapeln angeordnet sind. Die Orientierung dieser Stapel ist uneinheitlich, entspricht augenscheinlich im Mittel jedoch in etwa der Schichtebene der Siliconmatrix. Die Packungsdichte der Stapel bzw. die Lücken zwischen den Stapeln scheinen bei der mittelharten Siliconmatrix größer zu sein. Zwischen den frischen und den zyklisierten Proben ist in der direkten Betrachtung jedoch kein wesentlicher Unterschied zu erkennen.

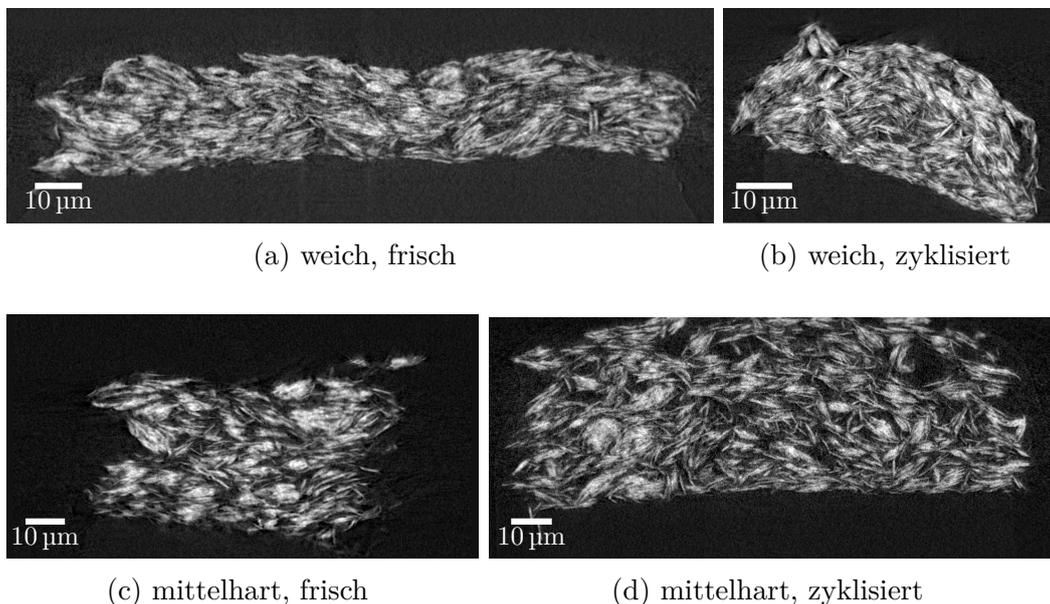


Abb. 3.24: Ausschnitte aus den dreidimensionalen nanoCT-Aufnahmen der Metall-Flake-Komposite mit weicher Siliconmatrix im frischen (a) und zyklisierten Zustand (b) sowie mit mittelharter Matrix im frischen (c) und zyklisierten Zustand (d).

Bei der in [Abbildung 3.25](#) gezeigten Dichteverteilung der Proben mit einer Voxelgröße von $1 \mu\text{m}^3$ sind hingegen signifikante Unterschiede zwischen allen Proben erkennbar.

Die Dichte ist dabei auf die Dichte der Partikel normiert ($1,0 \hat{=} 9,6 \text{ g cm}^{-3}$, vgl. [Tabelle 3.3](#)). Bei einem idealen Komposit würde die Dichteverteilung auch für kleine Analysevolumina, die aber noch deutlich oberhalb der Partikelgröße liegen, sehr eng und symmetrisch um die mittlere Dichte der Probe liegen (in diesem Fall $0,28 \hat{=} 2,7 \text{ g cm}^{-3}$, vgl. [Tabelle 3.3](#)).

Die Partikel der Proben mit einer mittelharten Siliconmatrix sind unabhängig vom Analysevolumen inhomogener verteilt als in den Proben mit weicher Siliconmatrix. Grundsätzlich liegen also mehr Verdichtungszone mit hoher Dichte und Verarmungszone mit geringer Dichte vor. Das bietet eine plausible Erklärung für die ebenfalls niedrigere elektrische Leitfähigkeit der mittelharten Komposite. Insbesondere bei kleinen Analysevolumen zeigt die Dichteverteilung der mittelharten Komposite eine ausgeprägte Asymmetrie: Die Verteilung ist zulasten mittlerer Dichten in Richtung geringer und hoher Dichten verschoben. Um wenige hochdichte Bereiche zu schaffen sind auf Grund der Konstanz der Gesamtdichte viele Verarmungszone entstanden. Gemäß der [DEMA](#) hat dies im ungedehnten Zustand noch keine Auswirkung, die Verdichtungszone stehen also noch in gutem elektrischen Kontakt zueinander. Unter Dehnung tritt dann jedoch der in [Abbildung 3.21c](#) gezeigte Effekt zu Tage, bei dem die Verarmungszone auf Grund ihres geringeren E-Moduls stärker als die Verdichtungszone gedehnt werden und diese daher den Kontakt zueinander verlieren. Bei zyklisierten Proben mit mittelharter Siliconmatrix ist die Verteilung noch weiter verschoben, es sind also im Vergleich zur frischen Probe mehr Verdichtungszone und entsprechend auch Verarmungszone vorhanden. Besonders deutlich ist dies bei einem Analysevolumen von $1,0 \mu\text{m}^3$ zu erkennen. Das erklärt die geringere Leitfähigkeit des mittelharten Komposits nach der Zyklisierung sowohl im gedehnten als auch im ungedehnten Zustand. Beim Komposit mit weicher Siliconmatrix ist die Verteilung im frischen Zustand weitgehend symmetrisch und wird auch nach der Zyklisierung nicht zu den Rändern hin verschoben. Wenn überhaupt, ist eine leichte Verjüngung der Verteilung erkennbar. Ausgenommen davon ist das insbesondere bei einem Analysevolumen mit einer Kantenlänge von $1,0 \mu\text{m}$ und $2,0 \mu\text{m}$ bei beiden zyklisierten Proben sichtbare Nebenmaximum nahe einer Dichte von 0, was auf vorhandene Löcher und Spalte hindeutet, die für die schlechtere elektrische Performance unter Dehnung verantwortlich sein könnten. Insgesamt steht die Auswertung der [nanoCT](#)-Aufnahmen damit im Einklang mit den Ergebnissen der [DEMA](#) und stützt das in [Abbildung 3.21](#) skizzierte Erklärungsmodell.

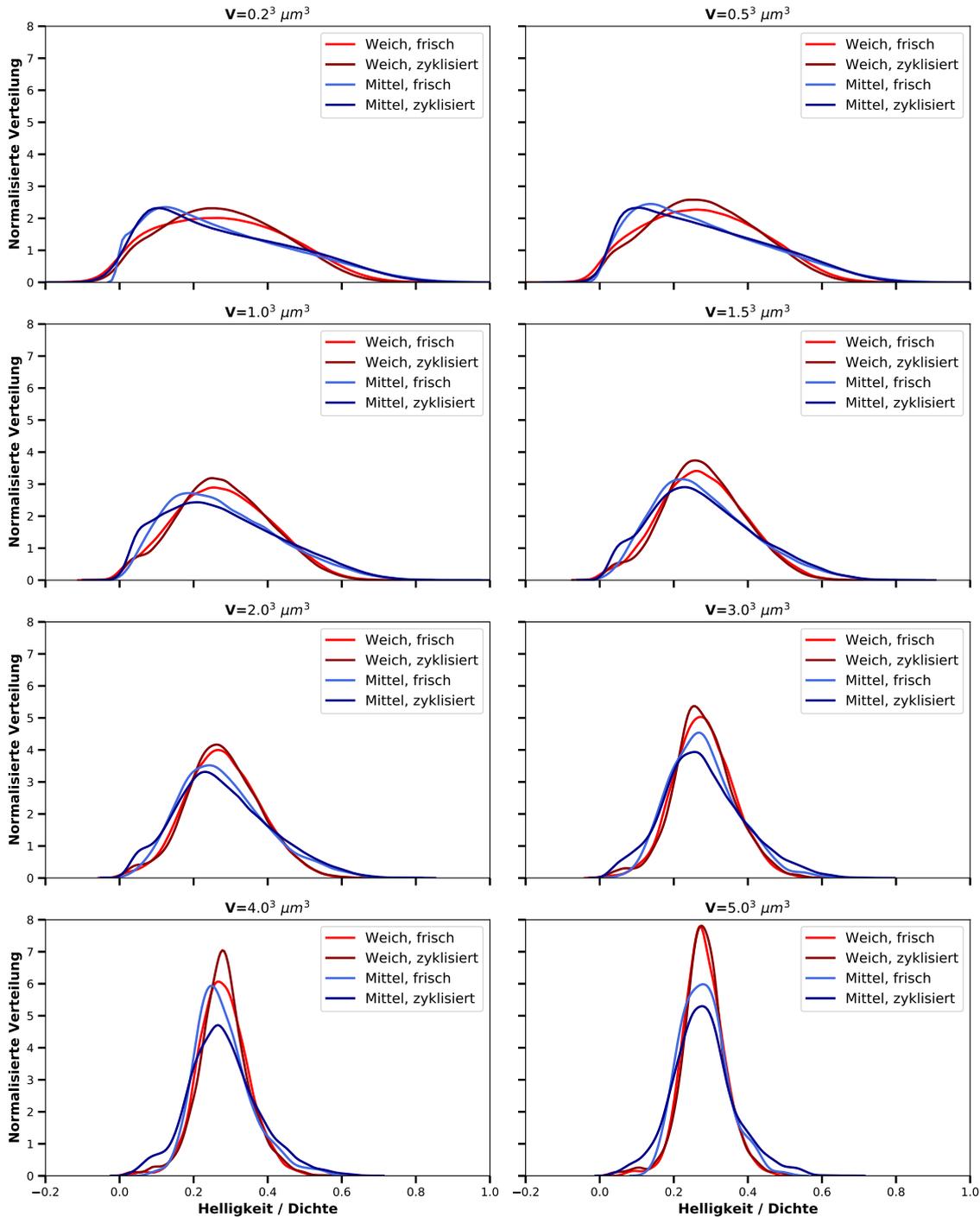


Abb. 3.25: Dichteverteilung der Proben mit weicher und mittelharter Siliconmatrix (jeweils im frischen und zyklisierten Zustand) mit verschiedenen Analysevolumenelementen mit Kantenlänge zwischen $0,2\mu\text{m}$ und $5,0\mu\text{m}$. Die Dichte ist dabei auf die Dichte der Partikel normiert ($1,0 \cong 9,6 \text{ g cm}^3$, vgl. [Tabelle 3.3](#)).

3.3.4.6 Anwendungsevaluierung

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, sind tragbare elektronische Systeme eine wichtige Anwendung leitfähiger Elastomerkomposite. Um die Bedeutung der Leitfähigkeitseinbußen bei hohen Deformationsraten zu demonstrieren, wurde ein exemplarisches textiles Beleuchtungssystem erstellt. Hierfür wurden elastische Leiterbahnen aus der weichen Siliconmatrix (S1) und der mittelharten Siliconmatrix (S2), jeweils mit Metall-Flakes, verwendet. Diese wurden auf ein elastisches Textil genäht, welches von einer Versuchsperson als Bandage am Ellenbogen getragen wurde (s. Abbildung 3.26).



Abb. 3.26: Tragbarer Textil-Elektronik Demonstrator, bestehend aus konventionellen LEDs und dehnbaren Metall-Flake-Kompositen als Leiter. Die Leiter sind mit metallischen Aderendhülsen versehen und auf ein dehnbares Textilsubstrat aufgenäht.

Der Gesamtwiderstand der Leiterbahnen im ungedehnten Zustand betrug jeweils ca. $100\ \Omega$. Die Stromversorgung erfolgte unabhängig aus zwei Lithium-Polymer-Akkus. Bei der Beugung des Ellenbogens von der gestreckten (0°) in die angewinkelte Position (135°) trat eine Dehnung der Leiterbahnen um ca. 50% auf. Bei Betrachtung der Einzelbilder einer Videoaufnahme des Vorgangs kann die Helligkeit der LED gut beobachtet werden (s. Abbildung 3.27).

Es ist klar erkennbar, dass während des Dehnvorgangs die Helligkeit beider LEDs abnimmt. Bei der LED mit Leiterbahnen aus dem mittelharten Silicon (S2) ist die Abnahme jedoch deutlich größer, soweit dass die LED im Zustand maximaler Dehnung für etwa 200 ms erlischt. Lediglich am Umkehrpunkt, an dem die Bewegung kurz zum Stillstand kommt, ist ein Wiederaufleuchten zu erkennen. Dies ist durch die zuvor beschriebenen signifikanten Unterschiede (siehe Abbildung 3.23) zwischen den Leitfähigkeiten der verschiedenen Komposite erklärbar. Beim Komposit mit der mittelharten Matrix (S2) fällt die Leitfähigkeit während der schnellen Bewegung so weit ab, dass die Spannung an der LED unterhalb der Durchlassspannung liegt und die LED somit erlischt. Am Umkehrpunkt kann sich das Perkolationsnetzwerk jedoch kurz erholen, bevor die Bewegung in die entgegengesetzte Richtung fortgesetzt wird. Beim Komposit mit weicher Matrix (S1) fällt die Leitfähigkeit weniger stark ab, so dass die Spannung an der LED oberhalb der Durchlassspannung verbleibt. Die aufgezeigten Vorteile einer weicheren Matrix lassen sich somit bis in die Applikation nachverfolgen. Die LEDs sind hierbei jedoch nur als einfaches und exemplarisches

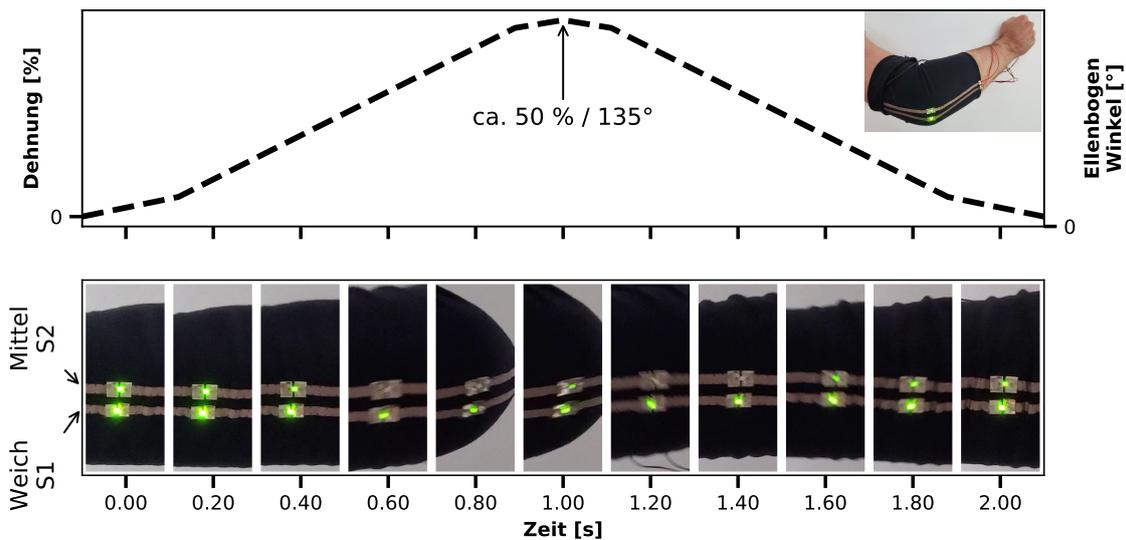


Abb. 3.27: Videoaufnahme einer schnellen Beugung des Ellenbogens mit angelegter Elektronik in Einzelbildern (unten) sowie der dazugehörige Winkel und die ungefähre Dehnung der Leiter über die Zeit (oben)

Beispiel für ein Elektroniksystem zu sehen. Grundsätzlich lassen sich die Ergebnisse jedoch auch auf die Kontaktierung komplexerer Systeme wie Mikrocontroller-Module, Sensoren oder Antennen übertragen.

3.3.5 Fazit

Zur praxisnahen, dynamischen elektro-mechanischen Analyse von dehnbaren und elektrisch leitfähigen Schichten aus Partikel-Elastomer-Kompositen wurde ein umfangreiches Charakterisierungsprotokoll entwickelt und dieses auf Ruß- und Metall-Flake-Kompositschichten mit unterschiedlich harten Siliconmatrizen angewendet. Dabei zeigte sich, dass es sowohl erhebliche qualitative und quantitative Unterschiede zwischen den verwendeten Partikeln als auch zwischen den verwendeten Siliconmatrizen gibt. Die Ruß-Kompositschichten zeigten sich dauerfest und wiesen eine weitgehend von der Dehngeschwindigkeit unabhängige und mit der Dehnung geringfügig zunehmende Leitfähigkeit auf. Kompositschichten mit Metall-Flakes zeigen eine weit höhere Leitfähigkeit, die sich jedoch mit steigender Zyklenzahl und Dehngeschwindigkeit erheblich verringert. Bei hohen Dehngeschwindigkeiten und hohen Zyklenzahlen büßen die Metall-Flakes den Vorteil ihrer höheren Leitfähigkeit sogar vollständig ein. Gleichzeitig konnte eine Verbesserung aller genannten Charakteristiken durch die Verwendung weicherer Silicone als Matrix festgestellt werden. Die Effekte konnten nicht nur in den analytischen Messungen, sondern auch beispielhaft in einem tragba-

ren elektronischen System beobachtet werden. Dies kann damit erklärt werden, dass die rauen Rußpartikel ein wesentlich stabileres Perkolationsnetzwerk als die flachen und glatten Metall-Flakes bilden. Eine weichere Matrix scheint zudem die Reorganisation des Perkolationsnetzwerkes während der Deformation weniger stark zu behindern. Die Ergebnisse zeigen, dass es für die Entwicklung anwendungstauglicher hochleitfähiger und hochdehnbarer Materialien erforderlich ist, die komplexen Wechselwirkungen zwischen den Partikeln und zwischen Partikel und Matrix detailliert zu betrachten und abzustimmen. In dieser Arbeit wurden diese Betrachtungen aus einer makroskopischen Perspektive über die Analyse der dynamischen elektromechanischen Eigenschaften vorgenommen, die deutlich über die üblichen statischen Versuchsanordnungen hinaus ging. Zudem konnten wesentliche Aspekte des Erklärungsmodells auch auf der mikroskopischen Ebene durch REM- und nanoCT-Aufnahmen bestätigt werden.

3.4 Zusammenfassung

Die in diesem Kapitel behandelten Zusammenhänge zwischen der Materialzusammensetzung und den Materialeigenschaften schließen sich an die im vorherigen Kapitel abgeleiteten Anforderungen an. Diese Anforderungen sind zum einen eine geringe Kriechneigung der dielektrischen Schichten und zum andern eine Erhaltung der elektrischen Leitfähigkeit auch während und nach wiederholter Dehnung der Kompositmaterialien. Für beide Materialeigenschaften konnten Ursachen und Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt werden. Für pyrog. SiO_2 -verstärktes Silicon konnte im Vergleich zu einem VQM-Harz-verstärkten und einem unverstärkten Silicon eine erhöhte Kriechneigung festgestellt werden. Umgekehrt weist ein aus VQM-Harz-verstärktem Silicon hergestellter DES gegenüber einem aus pyrog. SiO_2 -verstärktem Silicon hergestellten Sensor eine geringere Hysterese auf. Die Reproduzierbarkeit eines DES kann folglich durch die Wahl eines Silicons ohne pyrog. SiO_2 für die dielektrischen Schichten verbessert werden, sofern die auf Grund der fehlenden Verstärkungswirkung des pyrog. SiO_2 verminderte Festigkeit akzeptabel ist. Für die Verbesserung der Gesamtstabilität kann jedoch in einer außenliegenden Schutzschicht, die nicht als Dielektrikum wirkt, weiterhin pyrog. SiO_2 -verstärktes Silicon verwendet werden. Für die Herstellung leitfähiger Siliconkomposite mit Ruß oder metallischen Flakes wurde im Vorhinein auf verstärkende Bestandteile verzichtet, da die selbst nicht leitfähigen Zuschläge einer hohen Leitfähigkeit entgegenstehen. Hierbei wurde ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den dynamischen elektromechanischen Eigenschaften des

Komposits und der Steifheit der Siliconmatrix gefunden. Komposite mit weicherer Matrix wiesen im Vergleich zu Kompositen mit steiferer Matrix geringere Einbrüche der Leitfähigkeit während schneller Dehnung und nach einer Zyklisierung (10 000 Zyklen) auf. Die hochleitfähigen Metall-Flake-komposite können also durch die Wahl eines weichen Matrix-Silicons entscheidend verbessert werden. Dennoch erreichen diese nicht die Dauerfestigkeit der Ruß-Komposite. Für Anwendungen, bei denen die geringere Leitfähigkeit der Ruß-Komposite vertretbar ist, sind diese daher nach wie vor das Mittel der Wahl.

Kapitel 4

Galvanisierung und Laserbearbeitung

4.1 Einleitung

Wie in [Kapitel 2](#) dargestellt, sind die Ausgestaltungsmöglichkeiten der [DES](#) vielfältig hinsichtlich der erfassbaren Eingangsgrößen und der Ortsauflösung. Gerade multimodale Konzepte führen zu einem komplexen Schichtaufbau, während Sensorsysteme mit hoher Ortsauflösung vor allem feine Strukturen erfordern. Solche komplexen und feinen Schichtstrukturen müssen jedoch zur Realisierung der Konzepte grundsätzlich herstellbar sein, und nach Möglichkeit sollten die dafür in Frage kommenden Prozesse für eine spätere kommerzielle Umsetzung auch skalierbar sein. Dabei erstrecken sich die Anforderungen nicht nur auf den Sensor selbst, sondern auch auf die Realisierung der elektrischen Verbindung mit der Auswertungs Elektronik. Die Herausforderung liegt hier in der geometrischen Kompaktheit in Kombination mit der elektromechanischen Zuverlässigkeit der Kontaktierung. In diesem Kapitel sollen daher die Möglichkeit der elektrischen Kontaktierung über die galvanische Metallisierung von Siliconkompositen und die Herstellung mehrschichtiger Aufbauten mittels ablativer Laserstrukturierung diskutiert werden. Demonstriert wird dies anhand eines elastischen Schaltungsträgers und eines dielektrischen Drucksensors.

4.2 Stand der Wissenschaft und Technik

4.2.1 Metallisierte Elastomere

Zur Erhöhung der Leitfähigkeit und Verbesserung der Lötbarkeit verwenden aktuelle wissenschaftliche Veröffentlichungen physikalische Gasphasenabscheidung (PVD) um nicht leitfähige Polymere mit leitfähigem Material zu beschichten^[81]. Dies dient u.a. als Grundlage für eine anschließende Galvanisierung^[82]. Die mangelhafte Festigkeit

der über PVD abgeschiedenen Schicht wird nur indirekt über mechanische Verzahnung der aufgalvanisierten Schicht mit einem porösen Substrat ausgeglichen^[83]. Alternativ existieren seit längerem chemische Verfahren, um elektrisch nicht leitfähige Polymere zu metallisieren.^[84] Hierfür ist jedoch ein aufwendiger, mehrstufiger Prozess, teilweise unter Verwendung umwelt- und gesundheitsschädlicher Chemikalien, notwendig. Ein bereits leitfähiges, gefülltes Polymer wird bei keinem der genannten Verfahren als Substrat verwendet. Die durch Gasphasenabscheidung aufgebrachte Schicht unterliegt zudem einem hohen apparativen Aufwand und haftet nur unzureichend auf dem Substrat. Eine Verbesserung der Haftung ist zudem nur mit zusätzlichem Strukturierungsaufwand des Substrates erreichbar, etwa durch Erzeugen einer Oberflächenporosität. Die chemische Metallisierung ist ebenfalls mit hohem Prozessaufwand verbunden und nur bei bestimmten Polymeren, insbesondere Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS), anwendbar.^[84]

Auch in der Patentliteratur finden sich bisher nur wenige Einträge über Komposite aus Elastomeren und metallischen Schichten. So beschreibt EP3228732A1^[85] einen Überzug aus einem leitfähigen, partikelgefüllten Elastomer für additiv gefertigte Kunststoffteile, der nach anschließender Galvanisierung eine mechanisch robuste Oberfläche bildet. Leitfähigkeit, Dehnbarkeit, Lötbarkeit sowie Strukturierbarkeit spielen hierbei jedoch keine Rolle. EP1899414A2^[86] beschreibt die stromlose Metallisierung thermoplastischer Elastomere auf Styrol-Basis, die mit Metallen unedler als Silber gefüllt sind. Die Nutzung bzw. der Erhalt der elastischen Eigenschaften des Polymers wird nicht weiter behandelt. Ebenso wird die direkte, strombehaftete Metallisierung des Polymers nicht beschrieben.

Andere Ansätze nutzen Verfahren der konventionellen Leiterplattentechnologie, in denen die übliche starre Epoxid- oder lediglich flexible Polyimid-Matrix mit einem thermoplastischen Elastomer wie thermoplastisches Polyurethan (TPU) ersetzt wird und die Leiterbahnen nicht geradlinig, sondern mäanderförmig ausgeführt sind (vgl. US2008257589A1^[87]). Die zyklensfeste Dehnbarkeit solcher Leiterplatten ist jedoch auf geringe Dehnungen begrenzt. Schreivogel et al.^[88] geben etwa 10 000 Zyklen bei 5 % Dehnung und etwa 100 Zyklen bei 20 % Dehnung an. Gutruf et al.^[89] berichten von über 100 000 Zyklen bei 12 % Dehnung. In weiteren Veröffentlichungen^[90,91] konnten über 100 % erreicht werden, allerdings nur für einige wenige Zyklen. Das grundsätzliche Problem liegt dabei in der hohen Sprödigkeit des Kupfers (im Vergleich zu Polymeren) und in dem geringen Weiterreißwiderstand, wodurch es unter zyklischer Belastung jederzeit zu einem Totalversagen kommen kann. Zudem weisen die verwendeten thermoplastischen Elastomere in der Regel höhere E-Module und geringere Temperaturbeständigkeiten als beispielsweise Siliconkautschuk auf.

Als Alternative zu den genannten Verfahren soll in diesem Kapitel die direkte galvanische Metallisierung einer Elastomerelektrode aufgezeigt werden. Hierfür kommen bereits seit langem etablierte Verfahren sowohl in der Fläche (Tauchbad) als auch punktuell (vgl. „Handgalvanisieren“ bzw. Tampongalvanik) mit gängigen Metallen (Cu, Ag, Au, Zn) und den entsprechenden Elektrolyten in Frage. Ebenso ist die vollflächige Metallisierung einer durchgehenden Elastomerelektrode mit nachträglicher Strukturierung mit Hilfe geeigneter subtraktiver Methoden wie z.B. Laserbearbeitung möglich. Auf diesem Weg sind auch mehrlagige Aufbauten mit Durchkontaktierungen denkbar.

4.2.2 Laserbearbeitung

Konventionelle Verfahren Konventionelle Bearbeitungs- und Strukturierungsverfahren zur Verarbeitung flüssiger Ausgangsmaterialien für Siliconcomposite sind mit deutlichen Nachteilen verbunden. Die im Labormaßstab wie auch in dieser Arbeit häufig angewendete Strukturierung durch Folienmasken in Kombination mit Rakel- oder Sprühbeschichtung ist sehr arbeitsintensiv, schwierig zu automatisieren und weist eine geringe Reproduzierbarkeit auf. Gleichzeitig ist sie in technischer Hinsicht bezüglich minimaler Strukturgrößen (nicht unter 0,5 mm) und Komplexität der Schichtaufbauten (vor allem in Bezug auf Durchkontaktierungen) limitiert.

Industrieprozesse wie Siebdruck bzw. Rolle-zu-Rolle-Prozesse erfordern hingegen für jeden spezifischen Strukturierungsschritt teure Spezialwerkzeuge. Die genaue Ausgestaltung und Parametrisierung des Prozesses hängt zudem stark von den Materialeigenschaften ab und erfordert eine aufwändige Justierung.

Additive Fertigungsverfahren Als Alternative haben sich daher additive Fertigungsverfahren (3D-Druck) etabliert. Hierdurch entfällt die teure Herstellung von Werkzeugen und die Fertigung gelingt automatisiert. Bestehen bleibt jedoch die große Abhängigkeit des konkreten (additiven) Fertigungsverfahrens von der Beschaffenheit des Materials. Gängige Verfahren sind u.a.:

- **Selektives Lasersintern (SLS)** für pulverförmige thermoplastische Polymere und Metalle
- **Schmelzschichtung (FFF)**, engl. *fused filament fabrication*, für thermoplastische Polymere in Drahtform
- **Stereolithografie (SL)** für flüssige Harze

- **Tintenstrahldruck (Inkjet)** für niederviskose Polymerlösungen bzw. -suspensionen

Speziell für die in dieser Arbeit behandelten dielektrischen Elastomere (Aufbau aus mehreren alternierend beschaffenen ca. 100 µm dicken Elastomerfolien, hergestellt aus verschiedenartigen flüssigen Siliconverbindungen) existiert kein geeignetes additives Fertigungsverfahren, das flüssige, teils intransparente Ausgangsstoffe, Mehrkomponentendruck und sehr feine Schichtdicken auf sich vereint. SLS kommt hierfür nicht in Frage, da Silicone weder schmelz- noch sinterbar sind. Für Extrudieren via FFF kommen die gleichen Einschränkungen zum Tragen. Die Kombination aus Extrudieren und thermischer bzw. UV-induzierter Aushärtung, wie sie von der *Wacker Chemie AG*^[92] entwickelt wurde, kommt prinzipiell in Frage, da ein Mehrkomponentendruck durch mehrere parallele Druckköpfe realisiert werden kann. Allerdings beträgt die Auflösung derzeit lediglich 0,4 mm und die Strukturgrößen sind auf > 1 mm beschränkt^[93]. Damit sind die geforderten homogenen Schichtdicken von 100 µm und darunter nicht realisierbar. Für SL-Prozesse sind zwar die Schichtdicken realisierbar, jedoch können Mehrkomponentendrucke nur unter erheblichem Aufwand mit wechselnden Harzbädern erfolgen, was der Zielsetzung des 3D-Drucks entgegensteht. Inkjet-Verfahren scheitern hingegen vor allem an den hohen Viskositäten (> 1000 mPa s) der Siliconpolymere sowie an den relativ großen Füllstoffpartikeln (> 1 µm) der elektrisch leitfähigen Komposite.

Ablative Laserstrukturierung Um dennoch eine weitgehend automatisierte, computergestützte Fertigung zu ermöglichen, soll das Konzept einer ablativen lasergestützten Fertigung evaluiert werden. Dabei werden die Schichten (leitfähige und nicht leitfähige Elastomere sowie Metallschichten zur Kontaktierung) zunächst vollflächig aufgetragen (z.B. Sprüh-, Tauch- oder Rakelbeschichtung, bzw. galvanische Beschichtung) und anschließend mit einem Laser selektiv abgetragen. Diese Schritte werden mehrfach wiederholt, um zu einem mehrschichtigen strukturierten Aufbau zu gelangen. Dabei sind nicht nur die Nachstellung und Verbesserung der bisher manuell durchgeführten Arbeiten möglich, sondern auch vollkommen neue Konzepte wie feine Durchkontaktierungen zwischen den Schichten, um wesentlich kompaktere Aufbauten zu ermöglichen. Der Beschichtungsprozess wird zudem vollständig vom Strukturierungsprozess getrennt, da die Laserbearbeitung stets am bereits ausgehärteten Material erfolgt. Damit wäre auch die Übertragbarkeit auf andere Materialklassen wie etwa Festsilicone gewährleistet.

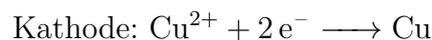
Laserstrukturieren wurde bereits zur Herstellung von einschichtigen Sensoren, Akto-

ren und Schaltungsträgern eingesetzt^[94,95]. In der Regel waren hierzu jedoch zusätzliche Arbeitsschritte^[95] wie etwa Ätzen, Kleben und Transferieren involviert. Mehrschichtige Strukturierungsprozesse für elastische Sensoren und Schaltungsträger in Kombination mit galvanischer Metallisierung, bei denen außer dem Beschichten und dem Laserstrukturieren keine zusätzlichen Bearbeitungsschritte benötigt werden, sind hingegen noch nicht bekannt.

4.3 Material und Methoden

4.3.1 Galvanisierungsprobe

Zur Evaluierung der Galvanisierbarkeit von Silicon-Metall-Kompositen wurde ein zweischichtiger Aufbau mit **S5** (*RT 625, Wacker Chemie AG, München, Deutschland*) als Substrat und einer leitfähigen Beschichtung aus einem mittelharten, unverstärkten Silicon (**S2**) mit 20 vol% versilberte Kupfer-Flakes (*eConduct 044000, ECKART GmbH, Hartenstein, Deutschland*) hergestellt. Die Herstellung erfolgte analog zu dem in [Abschnitt 3.3.3.2](#) beschriebenen Verfahren (vgl. [Abbildung 3.13](#)). Die zu metallisierende leitfähige Elastomerelektrode wurde an den Minuspol (Kathode) einer Gleichspannungsquelle angeschlossen und in Kontakt mit einem kommerziellen sauren Kupferelektrolyten (wässrige und schwefelsaure Kupfersulfat-Lösung, *Conrad Electronic SE, Hirschau, Deutschland*) gebracht. Innerhalb dieses Elektrolyten befand sich der Pluspol (Anode) in Form eines Kupferbleches. Ab einer angelegten Spannung von etwa 0,7 V läuft in einem derartigen Aufbau die folgende Redox-Reaktion ab:



Dabei gehen Kupferionen von der Kupferblech-Anode in Lösung, während metallisches Kupfer auf der Elastomer-Kathode abgeschieden wird. Für die abgeschiedene Kupfermasse m_{Cu} besteht folgender Zusammenhang mit der über einen Zeitraum t angelegten Stromstärke I , der molaren Masse M_{Cu} , der Elementarladung e und der Avogadro-Konstante N_A .

$$m_{Cu} = \frac{I \cdot t \cdot M_{Cu}}{2 \cdot e \cdot N_A} \quad (4.1)$$

Die Dicke d_{Cu} der abgeschiedenen Schicht ergibt sich aus der Masse und der beschichteten Fläche A .

$$d_{Cu} = \frac{m_{Cu}}{\rho_{Cu} \cdot A} = \frac{I \cdot t \cdot M_{Cu}}{2 \cdot e \cdot N_A \cdot \rho_{Cu} \cdot A} = k_{galv,Cu} \cdot \frac{I \cdot t}{A} \quad (4.2)$$

Für Kupfer ergibt sich $k_{gal,Cu} = 0,0369 \text{ mm}^3 \text{ A}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

Zur Evaluierung der Schichtanhaftung wurde die Galvanisierungsprobe mit einer Stromdichte von $0,01 \text{ A cm}^{-2}$ für 10 min beschichtet. Die erwartete Schichtdicke beträgt nach [Gleichung 4.2](#) etwa $2 \mu\text{m}$.

Von den beschichteten Proben wurden anschließend [REM](#)-Aufnahmen (*ZEISS AURIGA 60, Carl Zeiss Microscopy GmbH, Oberkochen, Germany*; 5 kV Beschleunigungsspannung, Sekundär- und Rückstreuelektronendetektor) angefertigt. Hierzu wurde die Probe in Harz eingebettet, geschnitten, poliert, einer Ionenböschung unterzogen und mit Kohlenstoff beschichtet (vgl. [Abschnitt 3.3.3.6](#)).

4.3.2 Ablative Laserstrukturierung

Zur Evaluierung der Einsatzmöglichkeiten von ablativer Laserstrukturierung wurde das kommerzielles Dual-Laser-System (*Epilog Fusion Pro 32, Epilog Laser, Golden, USA*) verwendet. Die technischen Daten sind in [Tabelle 4.1](#) dargestellt. Das Gerät verfügt sowohl über einen [CO₂-Laser](#) als auch einen [Faserlaser](#). Der [CO₂-Laser](#) kann laut Herstellerangabe^[96] mit einer Wellenlänge von $10\,640 \text{ nm}$ alle Materialien außer Metalle, Glas und Keramik schneiden und abtragen. Darunter fallen die in dieser Arbeit verwendeten Materialklassen der transparenten Silicone und Siliconschäume sowie der opaken Siliconkomposite. Metallische Schichten können jedoch auf Grund der Reflexion im IR-Bereich nicht bearbeitet werden. Dies ist jedoch mit dem [Faserlaser](#) mit einer Wellenlänge von 1062 nm möglich. Daneben können auch mit diesem Laser die opaken Kompositschichten bearbeitet werden, nicht jedoch transparente und keramische Materialien.

Gemäß Herstellerangaben ergibt sich für die 2- und 5-Zoll-Linse eine Fokusbreite von $80 \mu\text{m}$ ([CO₂-Laser](#)) bzw. $8,9 \mu\text{m}$ ([Faserlaser](#)). Für diese Arbeit wurde jedoch eine für beide Laserwellenlängen gleichermaßen geeignete 3-Zoll-Linse verwendet, für die keine gesonderten Angaben vorliegen. Grundsätzlich gibt der Hersteller eine Verringerung der Fokusbreite für kleiner Linsendurchmesser an. Unabhängig von der Fokusbreite sind durch die Gaußform der Intensitätsverteilung der Strahlen keine scharfkantigen, sondern abgerundet verlaufende Bearbeitungsränder zu erwarten, sofern kein ausgeprägter Schwellwert des Leistungseintrags für den Materialabtrag vorliegt.

Tab. 4.1: Technische Daten des verwendeten Schneid- und Gravurlasers *Epilog Fusion Pro 32* [96,97]

Parameter	CO ₂ -Laser	Faserlaser
Wellenlänge	10 640 nm	1062 nm
Technologie	CO ₂ -Gasröhrenlaser	Ytterbium-Festkörperlaser
Taktung	10 Hz - 5 kHz	20 kHz - 80 kHz
Leistung	80 W	30 W
Linse		3 Zoll
Fokusbreite ^a	80 µm (2 Zoll Linse)	8,9 µm (5 Zoll Linse)
Strahlprofil	Gauß	Gauß
Verfahrgeschwindigkeit (max.)		4,2 m s ⁻¹
Wiederholgenauigkeit		0,0127 mm
Auflösung der Software (max.)		1200 dpi entspr. 21,2 µm
Arbeitsbereich		813 mm x 508 mm

^a Herstellerangabe für die angegebenen Linsengrößen. Für die verwendete 3-Zoll-Linse liegen keine Herstellerangaben vor.

4.3.3 Beschichtung für die Laserstrukturierung

Siliconschichten, leitfähige Siliconkompositschichten und Siliconschaumschichten wurden analog zum in [Abschnitt 3.3.3.2](#) geschilderten Rakelverfahren (vgl. [Abbildung 3.13](#)) hergestellt. Als Silicon für die Substratschicht wurde **S5** (*RT 625, Wacker Chemie AG, München, Deutschland*) verwendet. Für die leitfähigen Siliconkompositschichten wurde **S2** als Matrix mit 20 vol% versilberten Kupfer-Flakes (*eConduct 044000, ECKART GmbH, Hartenstein, Deutschland*) verwendet. Der Siliconschaum besteht aus **S5** und expandierbaren Mikrohohlkugeln (*FN100-SS, Matsumoto Yushi-Seiyaku Co., Ltd, Japan*). Hierzu wurden die Mikrohohlkugeln zunächst in der A-Komponente des Silicons dispergiert und im Ofen bei 150 °C für 1 h expandiert. Anschließend wurde B-Komponente und Lösungsmittel (Butylacetat) hinzugegeben, um eine rakelfähige Masse zu erhalten. Die galvanische Kupferschicht wurde analog zur Galvanisierungsprobe mittels saurem Kupferelektrolyt (wässrige und schwefelsaure Kupfersulfat-Lösung, *Conrad Electronic SE, Hirschau, Deutschland*) und einem Kupferblech als Gegenelektrode hergestellt. Dazu wurde eine Stromdichte von 0,23 A cm⁻² über eine Dauer von 10 min angelegt. Gemäß [Gleichung 4.2](#) ergibt sich dabei eine Schichtdicke von etwa 10 µm.

4.3.4 Spektroskopie

Zur grundsätzlichen spektroskopischen Untersuchung verschiedener Siliconmaterialien und wissenschaftlichen Validierung der Herstellerempfehlungen^[96] (Faserlaser für metallische bzw. metallhaltige Werkstoffe, CO_2 -Laser für transparente Polymere) wurden zudem einzelne Folien aus den in 4.3.3 verwendeten Materialien hergestellt. Die Schichtdicken betragen 200 μm (Silicon), 500 μm (Siliconschaum), 25 μm (leitfähiges Siliconkomposit/Elektrode) und 10 μm (galvanische Kupferschicht). Da bei der metallischen Kupferschicht keine Transmission zu erwarten ist, wurde diese nicht als einzelne Schicht hergestellt, sondern auf einer leitfähigen Siliconkompositsschicht abgeschieden.

Die hergestellten Folien wurden am Fraunhofer ILT in Aachen mit einem UV-VIS-NIR- und einem IR-Spektrometer (*PerkinElmer, Waltham, USA*) im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 1200 nm und von 4000 bis 14 000 nm bezüglich ihres Reflexions- (G_R) und Transmissionsgrades (G_T) vermessen. Der für die Laserstrukturierung relevante Absorptionsgrad (G_A) wurde entsprechen folgender Gleichung berechnet:

$$G_A = 1 - G_R - G_T \quad (4.3)$$

4.3.5 Lasergestützte Schaltungsträgerfertigung

Als demonstratives Beispiel wurde die Laserstrukturierung eines einfachen elastischen Schaltungsträgers gewählt, der LEDs mittels einer Knopfzelle mit Strom versorgt. Die schematische Darstellung des Herstellungsprozesses ist in [Abbildung 4.1](#) gezeigt und die zugehörigen Fertigungsparameter in [Tabelle 4.2](#). Zur Herstellung einer einlagigen elastischen Platine kann der Schichtaufbau bereits vor der Strukturierung vollständig hergestellt werden (Schritt 1.1 - 1.3, s. [Abschnitt 4.3.3](#)). Dieser besteht aus einer nicht leitfähigen Siliconschicht (S5), einer partikelgefüllten leitfähigen Siliconschicht (S2 mit versilberten Kupfer-Flakes) und einer galvanisch abgeschiedenen Kupferschicht. Anschließend erfolgt die Laserbearbeitung in drei Schritten: Zunächst wird mit dem Faserlaser die Metallschicht an den Stellen entfernt, wo sich ein elastischer und leitfähiger Bereich befinden soll (Schritt 2.1). Im nächsten Schritt werden ebenfalls mit dem Faserlaser simultan die leitfähige Elastomerschicht und die Metallschicht entfernt, wo sich ein elastischer und elektrisch isolierender Bereich befinden bzw. eine Bohrung oder ein Schnitt erfolgen soll (Schritt 2.2). Die Entfernung der leitfähigen Elastomerschicht mit dem Faserlaser hat gegenüber dem CO_2 -Laser den Vorteil, dass die Abtragung auf Grund der fehlenden Absorption selbstständig am Übergang zwischen der intransparenten leitfähigen Elastomerschicht und der transpa-

renten Substratschicht limitiert wird. Jedoch wird dieser Bereich mit dem CO_2 -Laser mit geringer Leistung nachbehandelt, um eine vom Faserlaser zurückgelassene feine Restschicht zu entfernen (Schritt 2.3). Ebenfalls mit dem CO_2 -Laser werden eine Bohrung (Schritt 2.4) vorgenommen und die gesamte Platine ausgeschnitten (Schritt 2.5). Auf den verbliebenen metallisierten Flächen der fertigen Platine können nun elektronische Bauteile aufgelötet werden (Schritt 3.1). Die Parameter wurden durch eine einfache Vorversuchsreihe und visuelle Prüfung der Ergebnisse ermittelt.

Zur Demonstration wurde die Platine mit einer Anordnung, bestehend aus einem Vorwiderstand ($220\ \Omega$), einer LED und einem Miniaturschalter (alle als SMDs), in dreifacher Ausführung (LED blau, grün, rot) bestückt (s. [Abbildung 4.2](#)). Versorgt wird die Schaltung von einer Knopfzelle (3 V). Die Miniaturschalter verbinden jeweils den innen liegenden Pluspol der Batterie über eine der LEDs mit dem außen liegenden Masseanschluss.

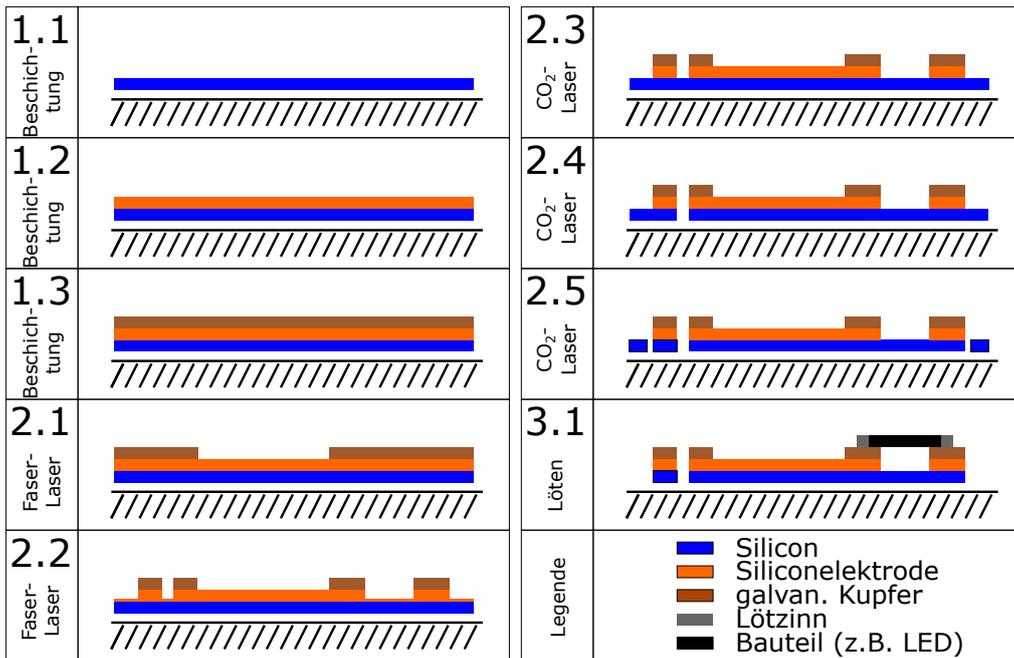
Tab. 4.2: Laser-Fertigungsparameter Schaltungsträger

Schritt	Bezeichnung	Modus	Laser	Auflösung in dpi	Geschwindigkeit in % ^a	Leistung in % ^a	Frequenz in % ^a	Wiederholungen
2.1	Kupfer entfernen	Gravieren	Faser	1200	100	50	1	1
2.2	Kupfer und Elektrode entfernen	Gravieren	Faser	1200	50	100	1	1
2.3	Reinigen	Gravieren	CO_2	600	100	2	- ^b	1
2.4	Bohren	Gravieren	CO_2	900	100	10	- ^b	1
2.5	Ausschneiden	Schneiden	CO_2	-	100	25	100	1

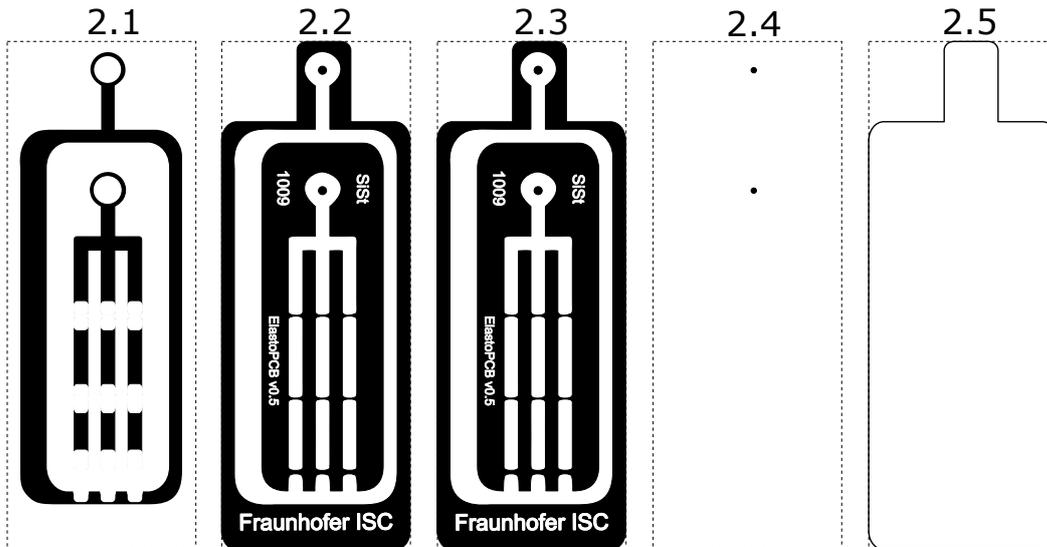
^a vom Maximalwert gemäß [Tabelle 4.1](#)

^b im CO_2 Graviermodus fest vorgegeben

Für eine elektromechanische Charakterisierung wurde ein weiterer Leiterbahnstreifen analog zu der Verbindung zwischen LED und Druckschalter hergestellt. Entsprechend weist dieser an beiden Enden eine metallische Kupferfläche auf. Anstelle der LED wurde ein Kabel auf der $2\text{ mm}^2 \times 2\text{ mm}^2$ großen Fläche aufgelötet. Der Leiterbahnstreifen mit Kabel wurde anschließend das [Rheometer MCR 502](#) mit ausgerüstetem Dehntool [UXF12/EXT](#) und Widerstandsmessgerät eingelegt (vgl. [Abschnitt 3.3.3.4](#)). Dabei wurde auf der einen Seite das Kabel und auf der anderen Seite die noch freie Kupferfläche eingespannt, so dass bei einer Dehnung die Lötverbindung belastet wurde.



(a) Vereinfachte Schematische Darstellung



(b) Bereiche (schwarz) der Laserabtragung in der Aufsicht

Abb. 4.1: Vereinfachte Schematische Darstellung der Beschichtungs- und Laserstrukturierungsschritte zur Herstellung eines einlagigen Schaltungsträgers (Zeichnung nicht maßstäblich)

Mit diesem Aufbau wurden mehrere Dehnungszyklen zwischen 0 und 50% Dehnung absolviert während der elektrische Widerstand erfasst wurde. Nach Abschluss der Zyklisierung wurde die Probe bis zum Versagen (Abreißen der Kupferschicht unterhalb

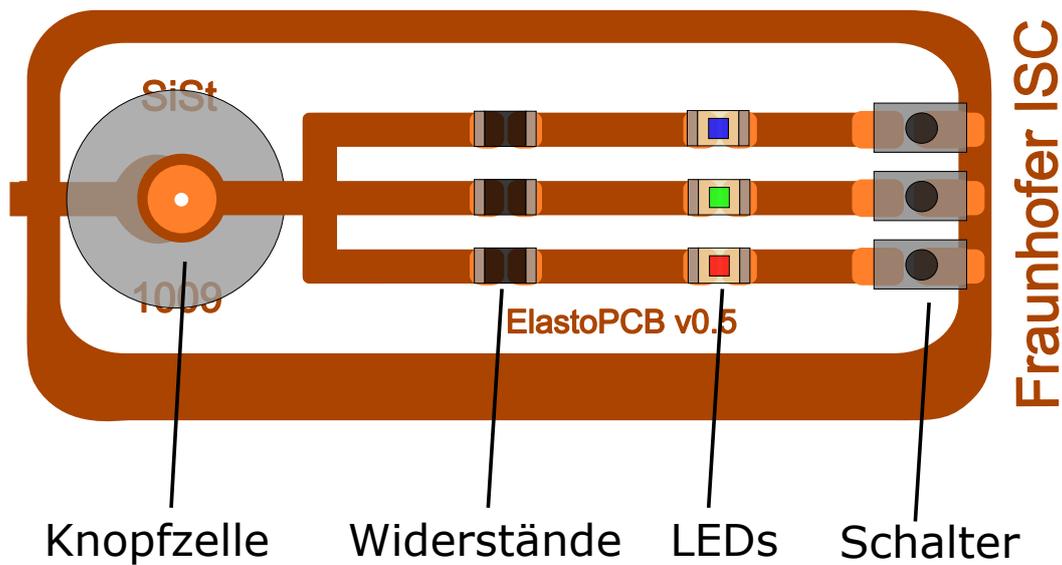


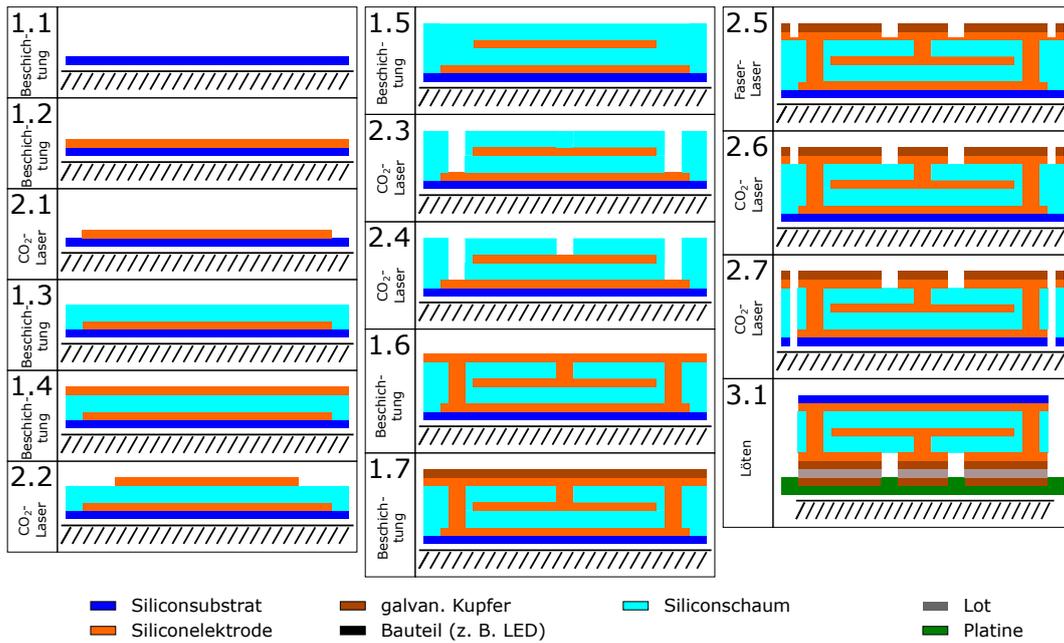
Abb. 4.2: Schematische Darstellung des Aufbaus und der Bestückung des einlagigen Schaltungsträgers

der Lötverbindung) gedehnt und die hierzu notwendige Kraft aufgezeichnet.

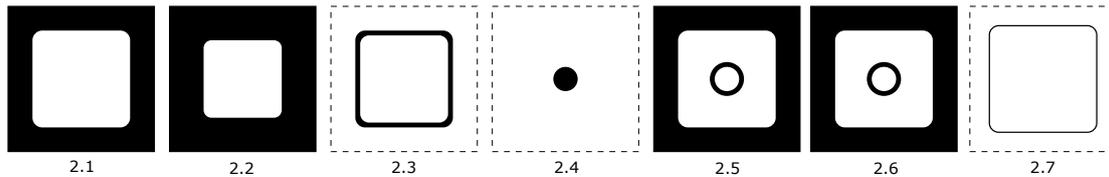
4.3.6 Lasergestützte Sensorfertigung

Als weiteres demonstratives Beispiel wurde die Laserstrukturierung eines einfachen dielektrischen Drucksensors mit metallisierten Kontaktierungsflächen gewählt. Die Herstellung erfolgte grundsätzlich mit ähnlichen Prozessschritten wie die Herstellung des Schaltungsträgers. Wesentlicher Unterschied ist die Verwendung eines kompressiblen Dielektrikums, in diesem Fall ein geschäumtes Silicon. Ein profiliertes Dielektrikum (etwa Noppenprofil) würde es hingegen nicht ohne weiteres erlauben, den Sensor ohne Klebeschritt herzustellen. Hierzu wurde ein Beschichtungsprozess (Schritte 1.x, s. [Abschnitt 4.3.3](#)) mit einem Laserstrukturierungsprozess (Schritte 2.x, Parameter s. [Tabelle 4.3](#)) verbunden (s. [Abbildung 4.3](#)), wobei neun Sensoren parallel hergestellt wurden.

Eine Substratschicht (1.1) wurde mit einer ersten Elektrodenschicht (1.2) versehen. Die erste Elektrodenschicht wurde mit dem CO_2 -Laser umlaufend abgetragen (2.1) und mit einer ersten dielektrischen Siliconschaumschicht (1.3) und einer zweiten Elektrodenschicht (1.4) überzogen. Die zweite Elektrodenschicht wurde ebenfalls umlaufend mit dem CO_2 -Laser abgetragen, so dass sie innerhalb der Normalprojektion der ersten Elektrodenschicht liegt (2.2), und anschließend mit einer zweiten dielektrischen Siliconschaumschicht überzogen (1.5). Um die nun innenliegende erste und



(a) Schnittansicht aller Prozessschritte



(b) Bereiche (schwarz) der Laserabtragung in der Aufsicht

Abb. 4.3: Schematische Darstellung der Beschichtungs- und Laserstrukturierungsschritte zur Herstellung eines dielektrischen Elastomer-Drucksensors (Zeichnung nicht maßstäblich)

zweite Elektrodenschicht zu kontaktieren, wurden mit dem *CO₂-Laser* jeweils Bohrungen durch die beiden dielektrischen Schaumschichten vorgenommen (2.3, 2.4). Die anschließend aufgetragene dritte Elektrodenschicht füllt die geschaffenen Hohlräume und ist daher zunächst sowohl mit der ersten als auch der zweiten Elektrodenschicht verbunden. Auf der dritten Elektrodenschicht wird nun eine vollflächige metallische Kupferschicht galvanisch abgeschieden (1.7). Die metallisierte dritte Elektrode wird mit dem *Faserlaser* (2.5) und einer anschließenden Nachbearbeitung mit dem *CO₂-Laser* (2.6) in zwei Abschnitte unterteilt: ein innerer Ring, der mit der inneren, zweiten Elektrode verbunden ist, und ein äußerer Ring, der mit der ersten Elektrode verbunden ist. Anschließend werden die Sensoren mit dem *CO₂-Laser* vereinzelt (2.7) und mit der metallisierten Seite per Lötverbindung kontaktiert (3.1).

Tab. 4.3: Laser-Fertigungsparameter Sensor

Schritt	Schicht	Modus	Laser	Auflösung in dpi	Geschwindigkeit in % ^a	Leistung in % ^a	Frequenz in % ^a	Wiederholungen
2.1	Elektrode 1	Gravieren	CO ₂	900	100	1	- ^b	1
2.2	Elektrode 2	Gravieren	CO ₂	900	100	1	- ^b	1
2.3	Dielektrikum 1 + 2	Gravieren	CO ₂	900	100	2	- ^b	5
2.4	Dielektrikum 2	Gravieren	CO ₂	900	100	1	- ^b	3
2.5	Elektrode 3 + Kupfer	Gravieren	Faser	-	100	100	50	1
2.6	Elektrode 3	Gravieren	CO ₂	600	100	2	- ^b	1
2.7	-Alle-	Schneiden	CO ₂	-	100	50	100	1

^a vom Maximalwert gemäß [Tabelle 4.1](#)

^b im CO₂ Graviermodus fest vorgegeben

4.3.7 Sensor Charakterisierung

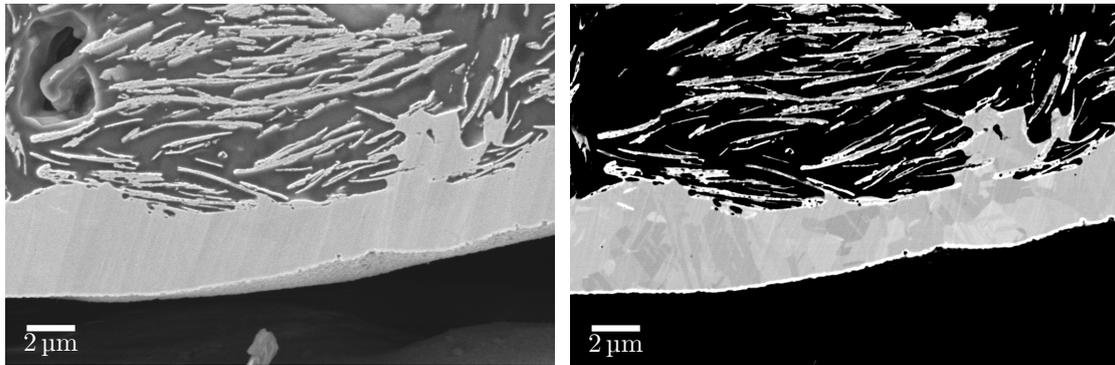
Zur Charakterisierung des hergestellten Sensors wurde eine Kraft- bzw. Druck-Kapazitäts-Kurve analog zu [Abschnitt 3.2.2.5](#) erstellt. Hierzu wurde der Sensor in das Rheometer eingelegt und einer steigenden Normalkraft bis etwa 8 N (entspricht 25 kPa) ausgesetzt (vgl. [Abbildung 3.6b](#)). Dabei wurde die Kapazität zwischen der äußeren und der inneren Elektrode kontinuierlich erfasst. Nach Erreichen der maximalen Kraft wurde eine Haltezeit von 30s eingelegt. Anschließend wurde der Sensor wieder entlastet und eine weitere Haltezeit von 30s eingelegt.

4.4 Ergebnisse und Diskussion

4.4.1 Galvanisierung

In der Schnittansicht der [REM](#)-Aufnahmen ist die Siliconelektrode mit den flachen Kupfer-Flakes (oben) und die etwa 2µm dicke metallische Kupferschicht (unten) gut zu erkennen (s. [Abbildung 4.4](#)). Die Kupferschicht ist dabei direkt auf die aus der Elektrodenoberfläche herausragenden Partikel angewachsen. Die oberflächennahe Porosität auf der rechten Seite ist zudem vollständig mit metallischem Kupfer

aufgefüllt. Insgesamt ergibt sich somit eine sehr gute mechanische Verzahnung der metallischen Schicht mit der Polymerschicht. Zudem entstehen durch die Wahl geeigneter Metalle (wie dem hier verwendeten Kupfer) glatte und sehr gut lötbare Oberflächen. Bei Verwendung hitzebeständiger Elastomere, wie z.B. Silicone, sind damit Lötprozesstemperaturen von über 200 °C ohne Degeneration der Materialien möglich.



(a) Sekundärelektronen-Bild mit Topologieabbildung (b) Rückstreuелеlektronen-Bild mit Materialkontrast

Abb. 4.4: REM-Aufnahmen der galvanisch verkupferten Silicon-Elektrode: Partikel-Silicon-Komposit mit Gaseinschluss (oben), metallische Kupferschicht (mittig), Einbettmittel (Epoxidharz, unten)

Im Falle einer Elastomer-Matrix ist deren Dehnbarkeit durch die abgeschiedene, lediglich flexible, aber nicht dehnbare Metallschicht eingeschränkt. Dies kann jedoch durch eine lokale Metallisierung (z.B. nur an den Kontaktflächen für oberflächenmontierte Bauteile) umgangen werden, da der Bereich zwischen den metallisierten Flächen dehnbar bleibt. Ebenso kann eine mäanderförmige Strukturierung dieser Bereiche angewendet werden. Zusätzlich kann die Metallisierung auf einer sich im gedehnten Zustand befindlichen Elastomermatrix erfolgen, wobei sich nach erfolgter Relaxation gewellte Strukturen in der Metallschicht ausbilden. Diese glätten sich bei erneuter Dehnung und ermöglichen so ein nach außen hin elastisches Verhalten der Metallschicht. Eine derartig metallisierte Elektrode hat bei Verwendung von reinen Metallen (Cu, Ag, Au) mit einer spezifischen Leitfähigkeit von etwa $1 \cdot 10^7 \text{ S m}^{-1}$ bei gleichem Elektrodenquerschnitt gegenüber einer partikelgefüllten Elastomermatrix eine um bis zu drei Größenordnungen höhere Leitfähigkeit.

4.4.2 Optische Spektren

Für die Bearbeitung mittels ablativer Laserstrukturierung müssen die Materialien bei den jeweiligen Wellenlängen 1062 nm ([Faserlaser](#)) und 10 640 nm ([CO₂-Laser](#)) einen

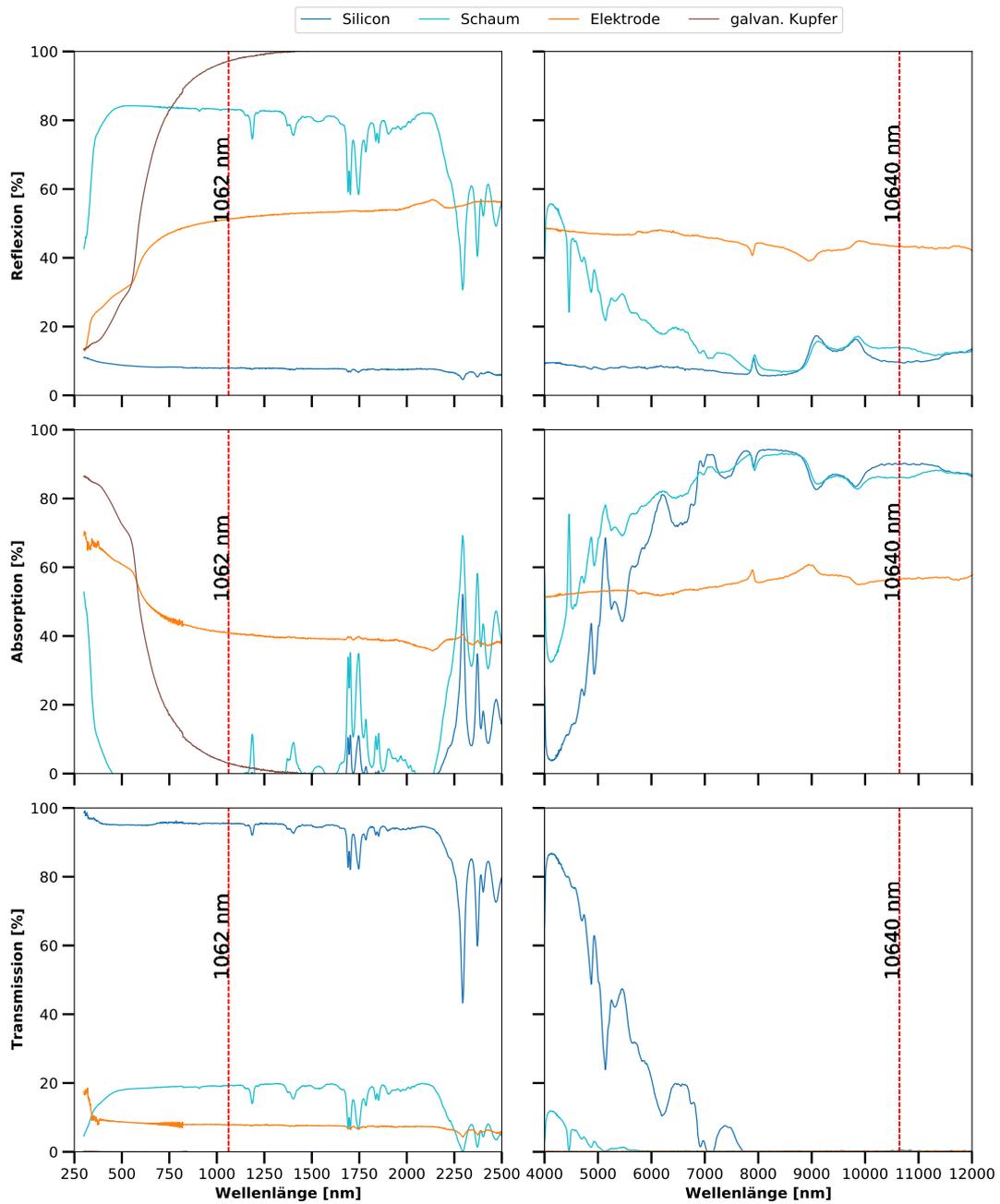


Abb. 4.5: Reflexions- Transmission- und Absorptionsspektren von Silicon, Siliconschaum und Siliconelektrode mit Markierung bei 1062 nm (Faserlaser) und 10 640 nm (CO_2 -Laser). Bei der galvanischen Kupferschicht und der Siliconelektrode oberhalb 4000 nm betrug der Transmissionsgrad 0 %.

möglichst hohen Absorptionsgrad aufweisen. Für das im sichtbaren Bereich transparente Silicon ist dies, abgesehen von einigen schmalen Peaks zwischen 2250-2500 nm,

nur bei Wellenlängen oberhalb 5000 nm der Fall (vgl. [Abbildung 4.5](#)). Reflexion tritt beim transparenten Silicon über das gesamte Spektrum nicht im nennenswerten Umfang auf. Die im sichtbaren Bereich opake Erscheinung des Siliconschaums beruht auf einer anteiligen Reflexion im Bereich unter 2500 nm. Im Bereich über 5000 nm wird hingegen der überwiegende Anteil des Lichtes absorbiert. Beide Materialien können folglich nur mit dem [CO₂-Laser](#) bei 10 640 nm effizient bearbeitet werden.

Die metallische Kupferschicht absorbiert hingegen nur unterhalb von 750 nm einen deutlichen Anteil des Lichtes, bei 1062 nm ([Faserlaser](#)) verbleiben lediglich etwa 5 % Absorption. Eine Bearbeitung mit dem Faserlaser ist daher schwierig, aber noch möglich, auch wenn (abhängig von der Laserleistung) nur dünne Schichten effizient bearbeitet werden können.

Die Siliconelektrode aus dem leitfähigen Partikelkomposit absorbiert hingegen über das gesamte Spektrum etwa 50 % des Lichtes. Der Unterschied zur rein metallischen Schicht kann durch die Streuung bzw. Dissipation des Lichtes im Materialvolumen an den unterschiedlich orientierten Partikeln erklärt werden. Grundsätzlich ist daher eine Bearbeitung mit beiden Laserarten möglich. Mit dem [Faserlaser](#) ist jedoch eine selektivere Bearbeitung möglich, beispielsweise wenn in einem zweischichtigen Aufbau nur die Elektrodenschicht, nicht aber die darunter liegende transparente Substratschicht entfernt werden soll.

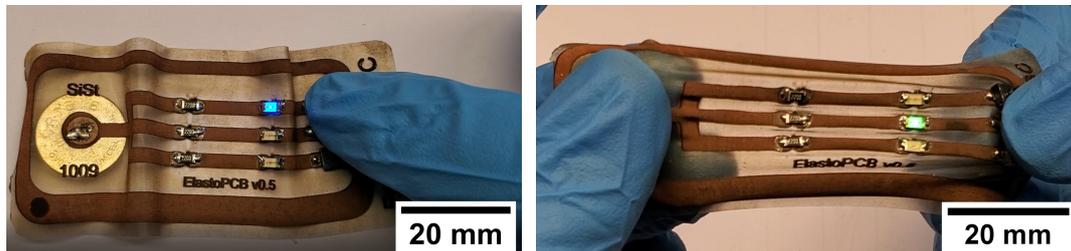
Die Ergebnisse stehen damit im Einklang mit der für die weitere Versuchsplanung herangezogenen Herstellerempfehlung, für transparente Materialien den [CO₂-Laser](#) und für metallische bzw. metallhaltige Materialien den [Faserlaser](#) zu wählen.

4.4.3 Schaltungsträger

Mit den festgelegten Fertigungsparametern konnte der elastische Schaltungsträger wie geplant hergestellt werden. Insbesondere ist es gelungen, die galvanische Kupferschicht in den dehnbaren Bereichen zu entfernen, ohne die darunter befindliche leitfähige Siliconschicht zu beschädigen. Zudem konnte in isolierenden Bereichen auch die leitfähige Siliconschicht entfernt werden, ohne die Substratschicht zu beschädigen. Ein auf dem Substrat verbleibender dünner Schleier aus den Verbrennungsrückständen stellt lediglich eine optische und keine funktionale Beeinträchtigung dar.

Dies ermöglicht es, beide Beschichtungen zunächst vollflächig auf der Substratschicht aufzutragen, um anschließend beliebig feine Details mit dem Laser herauszuarbeiten. Umgekehrt wäre es erheblich aufwändiger, mehrere einzelne Stellen direkt zu galvanisieren, da hierzu für jede Geometrie ein individuelles Werkzeug notwendig wäre. Eine chemische Ätzung der galvanischen Kupferschicht ist ebenfalls denkbar, wäre jedoch

mit zusätzlichen Arbeitsschritten verbunden (Aufbringen und Entfernen von Photolack), zudem könnte die leitfähige Siliconschicht nicht im gleichen Arbeitsschritt entfernt werden.



(a) im ungedehnten Zustand

(b) im gedehnten Zustand

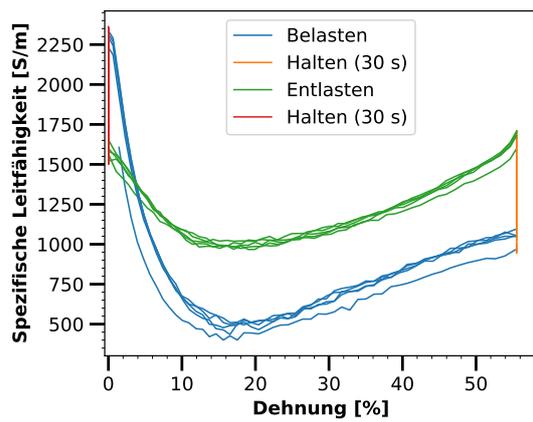
Abb. 4.6: Hergestellter und mit elektrischen Bauteilen bestückter Schaltungsträger im ungedehnten Zustand mit aktivierter blauer LED (a) und im gedehnten Zustand mit aktivierter grüner LED (b).

Nach Auflöten aller Bauteile (Knopfzelle, Widerstände, LEDs und Schalter) konnte die demonstrative Grundfunktion des Schaltungsträgers erfolgreich überprüft werden (s. [Abbildung 4.6a](#)). Auch im gedehnten Zustand waren die Haftung der Bauteile und die Leitfähigkeit der Leitbahnen ausreichend (s. [Abbildung 4.6b](#)).

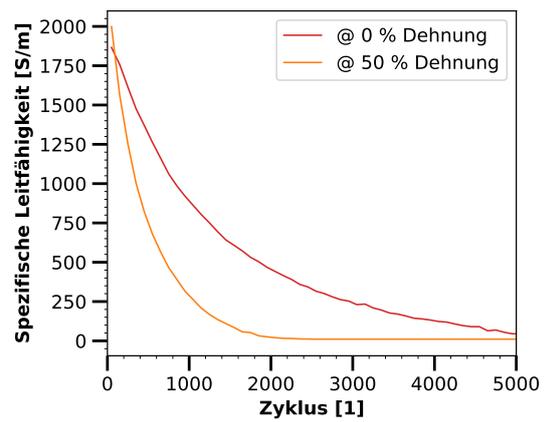
4.4.4 Elektromechanische Charakterisierung

Die elektromechanische Charakterisierung der lasergefertigten Leiterbahn ergibt eine initiale Leitfähigkeit von etwa 2250 S m^{-1} . Die Leitfähigkeit fällt während der Dehnung deutlich ab, erholt sich jedoch zu einem Gutteil wieder wenn die Dehnung in den Haltezeiten (30 s) konstant gehalten wird (s. [Abbildung 4.7a](#)). Im ersten Dehnungszyklus liegt die Leitfähigkeit noch etwas tiefer, in den folgenden Zyklen bleibt sie doch weitgehend unverändert. Im Verlauf des Dauertests nimmt die Leitfähigkeit deutlich ab (s. [Abbildung 4.7b](#)). Nach 100 Zyklen liegt der Wert der Leitfähigkeit im gedehnten Zustand über dem Wert im ungedehnten Zustand. Dies ist auf eventuelle Ausrichtungseffekte der Partikel zurückzuführen. Anschließend liegt der Wert im gedehnten Zustand jedoch unter dem Wert im ungedehnten Zustand und beide Werte nehmen weiter ab.

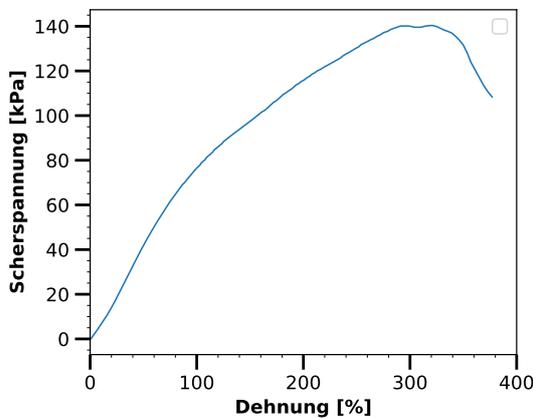
Dieses Verhalten ist nicht optimal, entspricht aber dem bereits zuvor berichteten Verhalten für das spezifische Metall-Flake-Silicon-Komposit (vgl. [Abschnitt 3.3.4.3](#)), das ohne Laserstrukturierung hergestellt wurde. Die Degeneration ist also weder auf die Laserstrukturierung noch auf eine eventuelle Ablösung der metallischen Kupferschicht zurückzuführen, sondern auf das elastische Komposit selbst. Um ein Ablösen



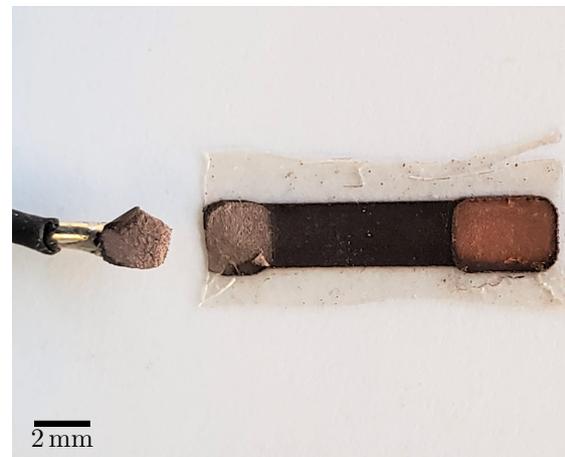
(a) Leitfähigkeits-Dehnungs-Kurve



(b) Dauertest



(c) Zugversuch



(d) Foto der abgerissenen Kupferschicht

Abb. 4.7: Elektromechanische Charakterisierung der lasergefertigten elastischen Leitbahn: Dehnungsabhängigkeit der Leitfähigkeit in fünf aufeinander folgenden Zyklen (a), Leitfähigkeit im gedehnten und im ungedehnten Zustand im Verlauf von 5000 Dehnungszyklen (b), Spannungs-Dehnungsdiagramm zur Ermittlung der Festigkeit der Anbindung der metallischen Kupferschicht (c) sowie Fotografie des (umgedrehten) angelöteten Kabels mit abgerissener Kupferschicht und anhaftender Restschicht der Silicon-Komposit-Elektrode (d). Schärfe und Helligkeit des Fotos wurden zur besseren Erkennbarkeit angepasst.

der Kupferschicht zu provozieren, wurde die Probe final bis zum Versagen gedehnt. Erst bei einer Dehnung des elastischen Teils der Probe um ca. 300% und einer zwischen Kupferschicht und Silicon-Komposit anliegenden Scherspannung von 140 kPa versagt die Verbindung (s. [Abbildung 4.7c](#)). Anhand der Fotografie der Bruchstelle (s. [Abbildung 4.7d](#)), die eine verbleibende Kompositschicht auf beiden Bruchhälften zeigt, ist erkennbar, dass das Versagen nicht direkt zwischen Metall und Komposit auftritt, sondern innerhalb des Komposits.

4.4.5 Sensorstruktur und -kennlinie

Aus der mehrlagigen Siliconkompositfolie wurden insgesamt neun Sensoren parallel hergestellt, von denen drei mit einer galvanischen Kupferschicht versehen wurden (s. [Abbildung 4.8](#)). Einer dieser Sensoren ist in [Abbildung 4.9](#) im Detail dargestellt.



Abb. 4.8: Laserstrukturierte Sensoren (3x3) innerhalb der mehrlagigen Siliconkompositfolie auf einem Glassubstrat (a) und nach Entfernen der überstehenden Siliconkompositfolie (b). Eine Galvanische Metallisierung fand nur bei den mittleren drei Sensoren statt.

Wie in der Aufsicht zu erkennen ist, ist die Anschlussseite des Sensors mit einer Kupferschicht versehen. Die innere und äußere Elektrode sind jedoch sauber voneinander getrennt. Durch die Wölbung des Sensors beim Ablösen vom Substrat ist die Kupferschicht leicht gewellt, jedoch an keiner Stelle abgelöst. In der Schnittansicht zeigt sich, dass die Schaum- und Elektrodenschichten weitgehend homogen sind. Der Isolationsring zwischen der inneren und der äußeren Elektrode ist in der Schnittansicht auf Grund des dahinter liegenden Elektrodenmaterials nicht zu erkennen. Die Durchkontaktierungen sind jedoch auf Grund des Volumenschwundes des Elektrodenmaterials nicht vollständig ausgefüllt. Auch wenn der elektrische Kontakt damit hergestellt ist, könnte die mechanische Stabilität davon beeinträchtigt sein. An dieser Stelle sollten in Zukunft lösungsmittelfreie Rezepturen verwendet werden, um nachteilige Schrumpfeffekte zu vermeiden. Mit einer Dicke von ca. 1 mm ist der Sensor relativ dünn. Zudem ist der Aufbau rundum geschlossen, sodass sich Vorteile in einer Umgebung mit flüssigem Wasser ergeben.

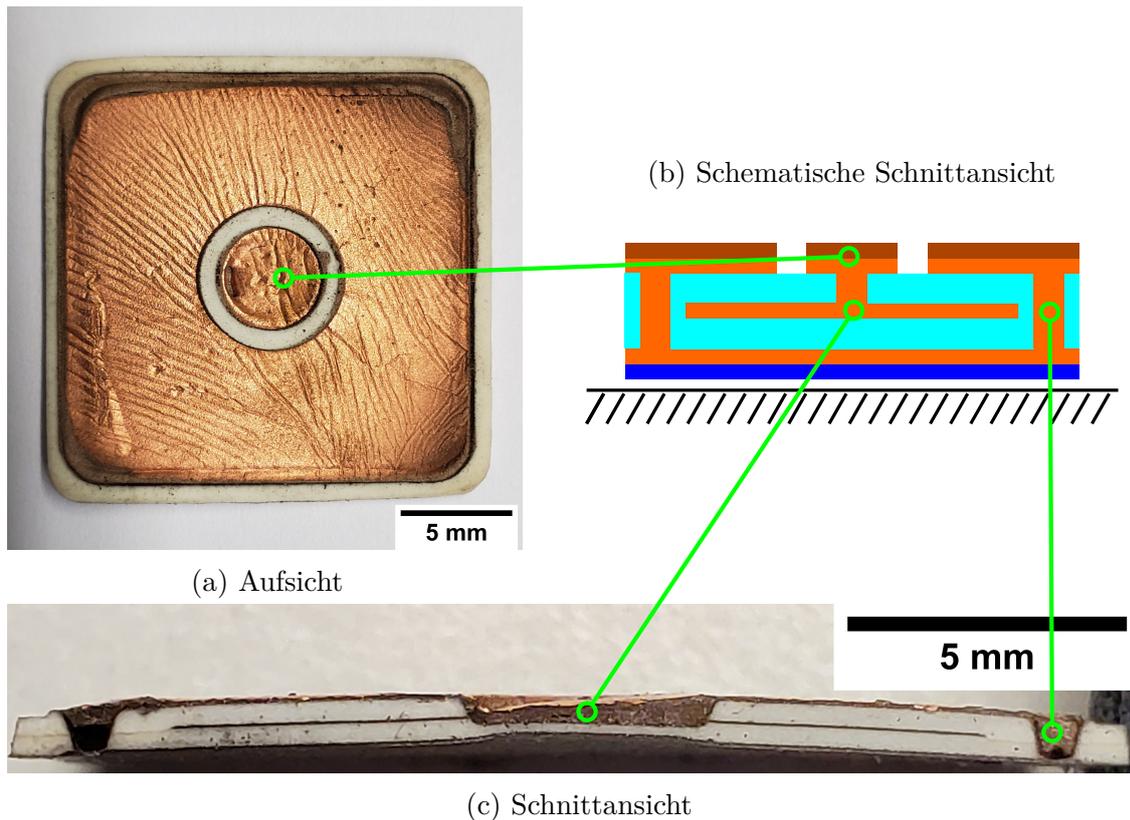


Abb. 4.9: Aufsicht (a), schematische Schnittansicht (b) und lichtmikroskopische Schnittansicht (c) des hergestellten Drucksensors. Der Isolationsring zwischen der inneren und der äußeren Elektrode ist in der Schnittansicht auf Grund des dahinter liegenden Elektrodenmaterials nicht zu erkennen.

Für die funktionelle Validierung des Sensors mit einer Gesamtfläche von 4 cm^2 wurde mit Hilfe eines Rheometers die Kraft-Kapazitätskurve ermittelt (s. [Abbildung 4.10](#)). Die Empfindlichkeit ist mit ca. $0,1 \text{ pF cm}^{-2} \text{ N}^{-1}$ relativ gering und die Hysterese mit ca. 20 % relative hoch. Konventionell hergestellte Noppenprofilsensoren erreichen hier deutlich bessere Kennwerte mit Empfindlichkeiten von ca. $250 \text{ pF cm}^{-2} \text{ N}^{-1}$ und Hysteresen im Bereich weniger Prozent^[16]. Für Anwendungen, in denen nicht eine hohe Sensorgüte, sondern eine einfache und skalierbare Fertigung im Vordergrund steht ist ein laserstrukturierter Schaumsensor dennoch geeignet, zumal durch den kleineren kapazitiven Messbereich ein Teil der geringen Empfindlichkeit durch eine genauere Messung seitens der Sensorelektronik ausgeglichen werden kann (s. [Abschnitt 2.3.1.5](#)).

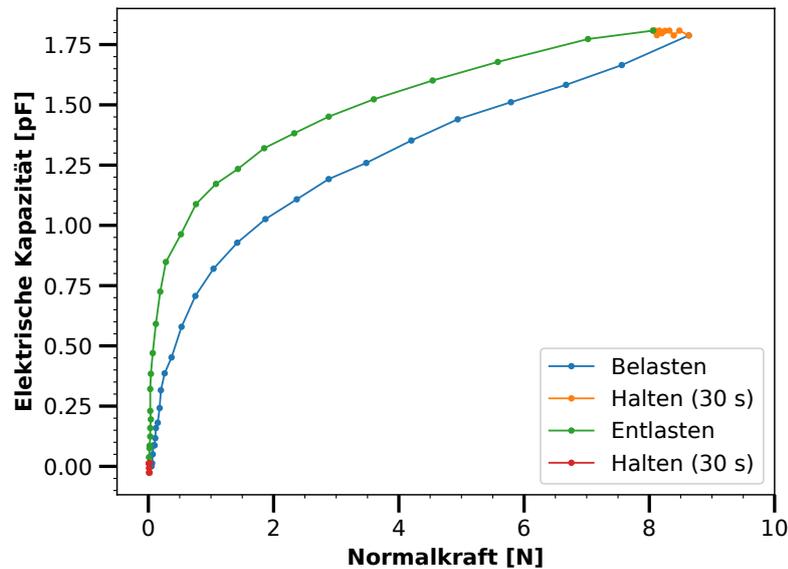


Abb. 4.10: Kennlinie des laserstrukturierten Drucksensors. Dargestellt ist die absolute Kapazitätsänderung gegenüber der Grundkapazität.

4.5 Zusammenfassung und Fazit

Der Vorteil des in dieser Arbeit beschriebenen Verfahrens der Galvanisierung ist die Kombination eines leitfähigen Partikel-Elastomer-Komposits mit einer hochleitfähigen, flexiblen sowie lötbaren Metallschicht. Hierfür können etablierte und kostengünstige Verfahren wie Galvanisierungsbäder oder Tampongalvanisierung eingesetzt und mit der Technologie elastischer Leiter verknüpft werden. Wie die erstellten REM-Aufnahmen zeigen, ist diese Metallschicht dabei fest mit der porösen Oberfläche des Komposits verwachsen. Durch das Verfahren wird also eine direkte mechanische und elektrische Schnittstelle zwischen elastischem Leiter und konventioneller Elektronik geschaffen.

Mit der hohen elektrischen Leitfähigkeit einer galvanisch abgeschiedenen flexiblen sowie lötbaren Metallschicht lassen sich unterschiedlichste Anwendungen realisieren. Durch zusätzliche, für andere Substrate bereits demonstrierte wellen-^[81] oder mäanderförmige^[87] Strukturierung können die Metallschichten auch dehnbar gestaltet werden. Die hohe elektrische Leitfähigkeit ermöglicht die Realisierung von flexibler und elastischer Leistungselektronik wie beispielsweise Heizelementen, Spulen, Antennen oder Leiterbahnen zur Versorgung energieintensiver Bauteile wie beispielsweise Funkmodule. Besonders relevant ist eine drahtlose Daten- und Energieübertragung,

z. B. für den Einsatz in am Körper tragbaren elektronischen Systemen, auf induktivem, etwa mittels [Low-Frequency Radio-Frequency Identification \(LF-RFID\)](#)/[High-Frequency Radio-Frequency Identification \(HF-RFID\)](#) bzw. [Near Field Communication \(NFC\)](#) oder elektromagnetischem Weg, etwa mittels [Ultra-High-Frequency Radio-Frequency Identification \(HF-RFID\)](#), .

Die gute mechanische Anbindung der metallischen Schicht und deren Benetzbarkeit durch Lötzinn ermöglichen, wie in dieser Arbeit demonstriert wurde, die Anbindung konventioneller oberflächenmontierter Bauelemente ([SMDs](#)) durch etablierte Lötverfahren. Neben der Lötbarkeit ermöglichen die metallisierten Abschnitte auch eine lokale Versteifung, die die Lötstellen im Falle einer Dehnung des Schaltungsträgers entlastet. Stattdessen wird die Dehnung durch die Abschnitte aufgenommen, in denen das elastische Partikel-Elastomer-Komposit nicht metallisiert ist. Insbesondere kann auf diesem Weg kapazitive oder resistive Elastomersensorik sowie Elastomeraktuatorik direkt mit der dafür notwendigen Ansteuerungs-, Auswertung- und Übertragungselektronik auf einem, ggf. elastischen, Schaltungsträger kombiniert werden. Zukünftig können jedoch auch kommerziell erhältliche Halbleitersensoren wie beispielsweise Temperatur-, Licht-, Feuchtigkeits-, Beschleunigungs- und Lagesensoren mit flexiblen und dehnbaren Leiterbahnen versehen werden, um sie auf textilen oder allgemein beweglichen Oberflächen (z.B. menschliche Haut, Robotergelenke) anzubringen.

Während das Partikel-Elastomer-Komposit und die Metallschicht zuverlässig miteinander verbunden sind, ist die Dauerfestigkeit der verwendeten Partikel-Elastomer-Komposite noch beschränkt. Insbesondere hohe Dehngeschwindigkeiten und mehrere tausend Dehnungszyklen verringern die Leitfähigkeit des Materials im gedehnten Zustand deutlich, wie in [Abschnitt 3.3.4.3](#) dargelegt wurde. Zusätzlich stellt das hier verwendete Partikel-Elastomer-Komposit auch die mechanische Schwachstelle dar, so dass ein Versagen nicht zwischen Komposit und Substrat oder Komposit und galvanischer Kupferschicht auftritt, sondern innerhalb der Kompositschicht. Ruß-Komposite sind zwar robuster, weisen jedoch eine geringere Leitfähigkeit auf und eignen sich nicht für die galvanische Metallisierung. Eine weitere Forschung an robusten, hochleitfähigen und elastischen metallischen Elastomerkompositen ist daher eine notwendige Basis für die Weiterentwicklung der hier dargestellten Technologie.

Die weiterhin in diesem Kapitel beschriebene Laserstrukturierung von dielektrischen, leitfähigen und metallisierten Elastomerschichten bietet erhebliche Vorteile gegenüber der bisher üblichen manuellen Strukturierung mittels Folienmasken oder ähnlichem, nicht zuletzt in Kombination mit der galvanischen Metallisierung. Da die Eigenschaften der verwendeten Materialien (Viskosität, Partikelgröße, Polymerchemie) nicht auf das Strukturierungsverfahren abgestimmt und keine Werkzeuge (Masken, Siebe, For-

men) gefertigt und positioniert werden müssen, können die Entwicklungs- und Herstellungszeiten erheblich verkürzt werden. Durch die nahtlose Übertragung digitaler Fertigungsdaten auf den digitalen Strukturierungsprozess kann der Prozessdigitalisierungsgrad erhöht und auf manuelle Zwischenschritte verzichtet werden.

Während fehlerhafte Materialanpassungen der flüssigen Vorstufen der Silicone bei der Strukturierung via Masken zu Fehlstellen (zu hohe Viskosität) oder zu einer Unterlaufung der Maske (zu niedrige Viskosität) führen können, ist die Qualität bei der Laserstrukturierung unabhängig von den Materialeigenschaften der Vorstufen. Durch das Abziehen der Maske hochstehende Beschichtungsränder können zu Kurzschlüssen zwischen den Elektrodenschichten und damit zu Ausschuss führen. Bei der Laserstrukturierung sind die Bearbeitungsränder hingegen abgerundet. Ungenauigkeiten bei der Positionierung der Maske sowie Verrutschen einzelner Maskenelemente beeinträchtigen zudem die Reproduzierbarkeit.

Darüber hinaus ermöglicht die Laserstrukturierung auch die Realisierung völlig neuer Konzepte, welche mit Maskenstrukturierung oder Drucktechnologie nicht umsetzbar sind. Dazu gehören insbesondere Durchkontaktierungen zwischen einzelnen Elektroden. Im Zusammenspiel mit kleineren Abmessungen und Abständen zwischen den Elektroden können damit wesentlich kompaktere Schichtaufbauten hergestellt werden. Damit können aufbauend auf den in dieser Arbeit demonstrierten einlagigen Schaltungsträger und einfachen Drucksensoren in Zukunft komplexe mehrlagige Schaltungsträger sowie orts aufgelöste und multimodale Elastomersensorsysteme (vgl. [Kapitel 5](#)) erstellt werden.

Verbesserungspotential besteht noch hinsichtlich der Strahlform: Das übliche Gauß-Profil schränkt die Präzision der Bearbeitung ein, da Bearbeitungskanten stets einen relativ großen Radius aufweisen. Ein weitgehend rechteckiges Strahlprofil (engl. *Top hat*) würde hingegen kleinere Radien und damit eine stufenförmige Bearbeitung ermöglichen. Ein weiterer Nachteil ist der Verbleib von Verbrennungsrückständen auf den bearbeiteten Oberflächen. Hier muss eine wirksame Aufreinigung, etwa durch Druckluft oder Abwaschen, geprüft werden. Zudem könnten höherenergetische Laser (etwa UV-Laser) Vorteile bieten.

Zusammengefasst dienen die beschriebenen neuartigen Verfahren der skalierbaren und automatisierten Fertigung flexibler und dehnbarer Elektronik mit direkt integrierten passiven und aktiven Bauteilen sowie dielektrischer Elastomersensorik. Potentiell sind die Konzepte auch auf weitere Elastomertechnologien wie magnetorheologische oder dielektrische Elastomeraktoren, dielektrische Elastomergeneratoren sowie resistive Elastomersensoren ausweitbar.

Kapitel 5

Anwendungsevaluierung

5.1 Einführung

Nachdem in den vorherigen Kapiteln die theoretischen Grundlagen, Materialien und Prozesse beschrieben wurden, soll in diesem Kapitel auf den Aufbau und die Evaluierung konkreter Sensorsysteme eingegangen werden. Ziel ist es dabei, darzustellen, wie relevante Kombinationen aus verschiedenen Modalitäten und Ortsauflösung als System aufgebaut werden und welche Performance diese Systeme erreichen. Gleichermaßen als Anwendungsszenario und Messinstrument wird dabei ein robotisches System eingesetzt. Die Kombination aus Ortsauflösung und Multimodalität erhöht dabei die Menge und Komplexität der erfassten Sensordaten. Daher sind Algorithmen notwendig, um die Sensordaten robust und präzise zu interpretieren. Neben der Adaption von konventionellen Algorithmen, darunter auch Bildverarbeitungsalgorithmen, zur Bearbeitung zwei- oder mehrdimensionaler Sensordaten sind hierzu insbesondere Verfahren des Maschinellen Lernens (ML) geeignet, auf die in diesem Kapitel ebenfalls eingegangen werden soll.

5.2 Stand der Wissenschaft und Technik

Im Bereich von taktiler Sensorik und Näherungssensorik sind bereits einige marktverfügbare Produkte entstanden. Eine Übersicht hierzu ist in [Tabelle 5.1](#) gegeben. Eine Reihe von Firmen (Pressure Profile Systems, Bando, StretchSense, LEAP Technology) bietet [DES](#) zur Messung von Druck oder Dehnung, jedoch nicht für Scherung oder Näherung an. Pressure Profile Systems bietet zudem ein ortsaufgelöstes Druckmesssystem an, dessen Dehnbarkeit jedoch auf 10% beschränkt ist. Von Tekscan, Interlink Electronics und Tacterion sind Sensoren zur Druckmessung auf piezoresistiver Basis und teilweise mit Ortsauflösung erhältlich. Daneben bieten Blue Danube

Tab. 5.1: Stand der Technik - Sensoren (kommerziell)

Firma	Technologie	Druck	Dehnung	Scherung	Näherung	Ortsaufgelöst	Multimodal	Elastisch	Verweis
Tekscan	piezores.	✓				✓			[98]
Interlink Electronics	piezores.	✓							[99]
Tacterion	piezores.	✓				✓		✓	[100]
Pressure Profile Systems	DES	✓				✓		10 %	[101]
Bando	DES		✓					✓	[12]
StretchSense	DES	✓	✓					✓	[13]
LEAP Technology	DES	✓	✓					✓	[14]
Blue Danube	Pneumatisch	✓							[102,103]
Bosch APAS	Kapazitiv				✓				[104]

und Bosch APAS Druck bzw. Näherungssensoren speziell als Sicherheitsausstattung von Robotern an.

Auch in der Literatur finden sich vielversprechende Ansätze zur Erfassung von Druck und weiteren Modalitäten (vgl. [Tabelle 5.2](#)). Zhang et al.^[26] beschreiben etwa ein ortsaufgelöstes und multimodales System, das sowohl Druck als auch Näherung erfasst. Bei diesem Aufbau ist jedoch nur das Dielektrikum elastisch während die Elektroden aus lediglich flexiblen Folien aufgebaut sind. Zudem fand keine umfassende robotergestützte Charakterisierung der Systeme statt. Ortsaufgelöste und multimodale Systeme, die zudem elastisch sind, sind folglich auch in der Literatur noch nicht bekannt. Die grundsätzliche Anwendung von Maschinellen Lernen auf Sensordaten ist bereits etabliert^[105–108], im Bereich der DES sind hierzu jedoch nur wenige Arbeiten^[109] veröffentlicht worden.

Im Folgenden sollen daher der Aufbau und die Charakterisierung elastischer ortsaufgelöster und multimodaler Systeme unter Verwendung eines robotischen Messsystems beschrieben werden und es soll auf das Potential von Technologien des Maschinellen Lernens im Bereich der [DES](#) eingegangen werden.

Tab. 5.2: Stand der Wissenschaft - Sensoren (Literatur)

Konzept	Technologie	Druck	Dehnung	Scherung	Näherung	Ortsaufgelöst	Multimodal	Elastisch	Verweis
Textil-Elektroden	Piezoresistiv	✓						✓	[110]
EIT ^a mit Textil-Elektroden	Piezoresistiv	✓				✓			[111–113]
Mikrostrukturiertes Elastomer	Piezoresistiv	✓							[114]
Kraftumformer ^b	Kapazitiv	✓		✓			✓		[25]
Folien mit elast. Dielektr.	Kapazitiv	✓				✓			[27]
Folien mit elast. Dielektr.	Kapazitiv	✓			✓	✓	✓		[26]
<i>Diese Arbeit</i>	DES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

^a Elektroimpedanztomographie, ein ortsaufgelöstes resistives Messverfahren

^b Aufbau, bei dem eine Scherkraft mechanisch in einen leichter messbaren Druck überführt wird

5.3 Material und Methoden

5.3.1 Robotik-System

Zur Charakterisierung und Evaluierung verschiedener Sensorprototypen wurde ein Robotik-System verwendet. Dieses besteht aus einem Leichtbauroboter, verschiedenen Messaufsätzen sowie selbstentwickelter Software zur Steuerung und Konfiguration des Systems.

5.3.1.1 Franka Emika Panda

Verwendet wurde der 7-Achsen Leichtbau-Roboter *Panda* der Firma *Franka Emika*^[115] mit den in [Tabelle 5.3](#) aufgeführten Spezifikationen.

Tab. 5.3: Kenndaten Franka Emika Panda^[116]

Bezeichnung	Wert
Anzahl der Achsen / Degrees of Freedom (DOF)	7
Traglast	3 kg
Maximale Reichweite	855 mm
Maximale Endeffektorgeschwindigkeit	2 m s ⁻¹
Wiederholgenauigkeit	0,1 mm

Als Besonderheit verfügt der Roboter über Drehmomentsensoren in jeder Achse, wodurch externe auf den Roboter einwirkende Drehmomente detektiert werden können. An definierten Positionen, etwa am Greifer, können daraus auch die externen Kräfte berechnet werden. Hierdurch kann der Roboter einerseits ohne Schutzumhausung betrieben und andererseits sehr leicht per Hand in bestimmte Positionen gezogen bzw. gedrückt werden, anstatt diese Position programmatisch anzusteuern (engl. *teaching*). Zudem kann die Steuerung des Roboters durch eine Echtzeit-Schnittstelle mit 1 kHz Taktrate durch einen externen, selbstimplementierten Controller erfolgen.

5.3.1.2 Workstation

Um die Taktrate von 1 kHz zu gewährleisten, erfolgt die Bewegungsgenerierung auf einem Workstation-PC mit echtzeitfähigem Unix-Betriebssystem (Ubuntu 16.04.3 mit Linux-Kernel^[117] *4.10.0-28-generic* und Echtzeitkernel-Patch^[117] *4.11.12-rt16*). Die Echtzeitfähigkeit wurde mit dem Toolset *RT-Tests*^[118] anhand der gemessenen Abweichung (Latenz) von einem fest programmierten Delay von 1 Millisekunde ermittelt. Im Vergleich zum Standard-Kernel (s. [Abbildung 5.1](#)) ist die Latenzverteilung, also die Streuung der einzelnen Latenzen der 1 000 000 Durchläufe, wesentlich enger und erreicht maximal nur 65 μ s während beim Standardkernel auch Latenzen von über 15 ms vorliegen. Die Steuerung des Roboters ist folglich nur mit Echtzeitkernel-Patch möglich.

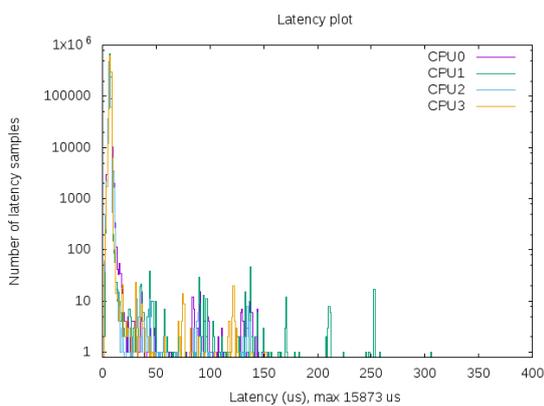


Abb. 5.1: Verteilung der Ausführungs-latenz eines periodischen 1-ms Threads im Standard-Kernel (4.10.0-28-generic).

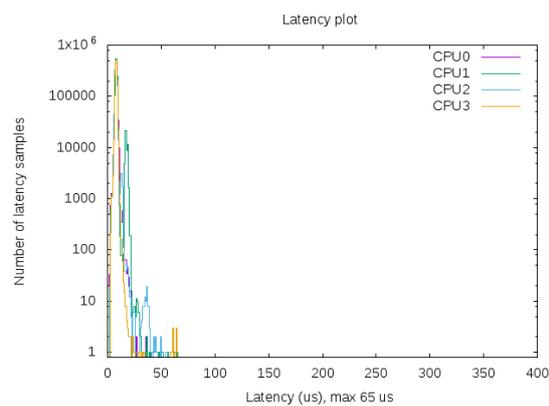


Abb. 5.2: Verteilung der Ausführungs-latenz eines periodischen 1-ms Threads im Echtzeit-Kernel (4.11.12-rt16).

5.3.1.3 Software

Die eigenentwickelte Steuerungssoftware wurde unter Einbindung der vom Hersteller des Roboters bereit gestellten Schnittstellen-Bibliothek *libfranka*^[119] in C++/Qt^[120] implementiert. Hierzu wurde eine Multi-Threading-Konfiguration genutzt, um zwischen zeitkritischen und zeitunkritischen Aufgaben zu trennen. Innerhalb eines ersten Threads wurde die Bewegungsberechnung, die kabelgebundene Kommunikation mit dem Roboter über das Netzwerkprotokoll **TCP/IP** und das Einlesen der Sensordaten implementiert während ein zweiter Thread ebenfalls über **TCP/IP** die Kommunikation mit der Konfigurationssoftware übernimmt.

Die eigenentwickelte Konfigurationssoftware wurde ebenfalls in C++/Qt implementiert und auf einem separaten Computersystem ausgeführt. Mit dieser Software können Versuchsabläufe bzw. Messprogramme erstellt werden und zur Steuerungssoftware übertragen werden. Die Konfigurationssoftware speichert dabei alle Positions- und Sensordaten, um eine spätere Offline-Analyse zu ermöglichen.

5.3.1.4 Messaufsätze

Der am Ende des Roboterarms anliegende Kraftvektor kann zwar über die integrierten Drehmomentsensoren berechnet werden, allerdings ist die Genauigkeit durch die lange Gelenkkette geringer als bei einer dedizierten Kraftmessung direkt am Ende des Arms. Zur Näherungs- und Druckkraftcharakterisierung von Sensorsystemen wurde der Roboter mit einer Kraftmesszelle (*1004-C3-1500g*, *Soemer Messtechnik, Lennestadt, Deutschland*) mit geeignetem 1-Kanal-Messverstärker (*DAD 141.1*, *Soemer Messtechnik, Lennestadt, Deutschland*) ausgestattet. An die Kraftmesszelle wurde als Prüfkörper ein ca. 40 cm langer Rundstab mit 20 mm Durchmesser und abgerundeter Spitze (Radius 10 mm) montiert (vgl. [Abbildung 5.3a](#)). Der Prüfkörper ist zudem mit einem Leitlack überzogen und geerdet. Somit können damit sowohl fein aufgelöste Druckmessungen als auch Näherungsmessungen durchgeführt werden. Aufgrund der Länge des Prüfkörpers sind die übrigen Teile des Roboters weit genug vom Sensor entfernt, so dass der Roboter die Näherungsmessung nicht beeinflusst. Sowohl in der Druckbelastung als auch im Näherungsversuch entspricht die Versuchsanordnung etwa einem äquivalenten Szenario mit einem menschlichen Daumen. Für eine Scherkraftcharakterisierung wurde stattdessen eine 3-Achsen-Kraftmesszelle (*K3D40 ±2 N*, *ME-Meßsysteme, Hennigsdorf, Deutschland*) mit geeignetem Mehrkanalmessverstärker (*TLB 4*, *LAUMAS Elettronica, Montechiarugolo, Italien*) verwendet. Die Ausgangsdaten wurden jeweils kabelgebunden via **TCP/IP** an die Robotersteuerungssoftware übermittelt und dort mit der Systemtelemetrie zusammengeführt.

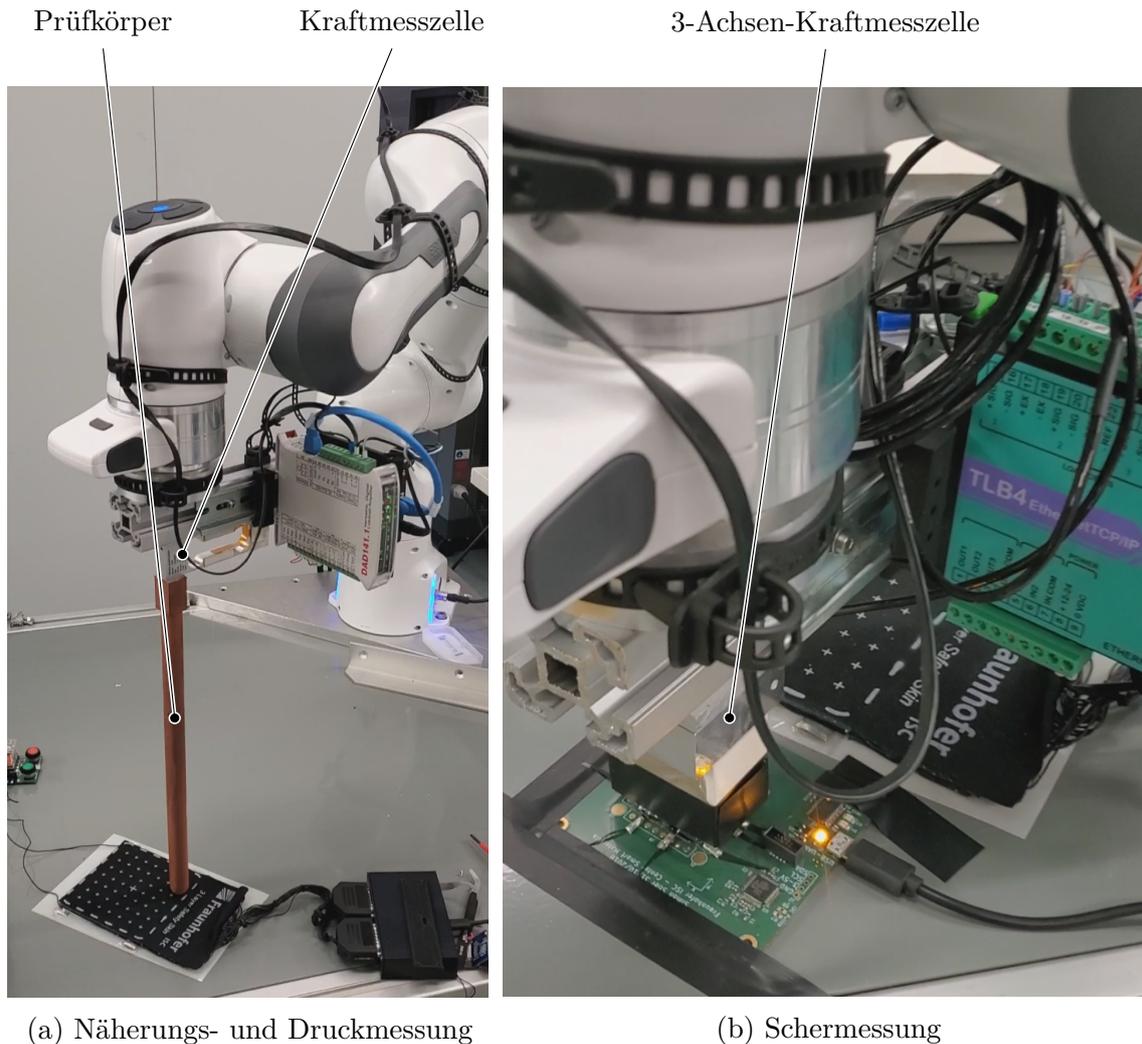


Abb. 5.3: Messaufsatz für die Näherungs- und Druckmessung (a), bestehend aus einem 40 cm langen geerdeten Rundstab und einer Kraftmesszelle mit zugehörigem Messverstärker und Messaufsatz für die Scherkraftmessung (b), bestehend aus einer 3-Achsen-Kraftmesszelle mit zugehörigem Mehrkanalmessverstärker.

5.3.2 Messelektroniksysteme

5.3.2.1 Verwendete integrierte Bauteile

Für die Auswertungs elektronik wurden verschiedene Mikrocontroller aus der Kinetis[®]-Familie des Herstellers NXP und der PSoC[®]-Familie des Herstellers Cypress verwendet. Diese unterscheiden sich hinsichtlich ihres kapazitiven Messsystems und des analogen Frontends (s. [Tabelle 5.4](#)). Während die Kinetis[®]-Familie niedrigere Messfrequenzen erreichen kann und damit höhere Elektrodenwiderstände toleriert (vgl. [Abschnitt 2.4.2.5](#)), verfügt die PSoC[®]-Familie über ein komplexes analoges Frontend, dass die freie Zuordnung (vgl. [Abschnitt 2.3.1.5](#)) von [Messelektrode](#),

Tab. 5.4: ICs zur Kapazitätsmessung^[121,33]

Bezeichnung	Verfahren	Eigenkap. ^a (Matrix ^c)	Gegenkap. ^b (Matrix ^c)	Kanäle
AD7147	Sigma-Delta	Ja (Nein)	Nein (Nein)	13
AD7142	Sigma-Delta	Nein (Nein)	Ja (Nein)	14
MKL26Z	Ladezeit	Ja (Nein)	Nein (Nein)	16
MK20DX	Ladezeit	Ja (Nein)	Nein (Nein)	16
MKL15Z	Ladezeit	Ja (Nein)	Ja (Ja)	25/36
CY8C4014	Sigma-Delta	Ja (Ja)	Ja (Ja)	19
CY8C4045	Sigma-Delta	Ja (Ja)	Ja (Ja)	35
CYBLE-214015	Sigma-Delta	Ja (Ja)	Ja (Ja)	24
CY8C4257	Sigma-Delta	Ja (Ja)	Ja (Ja)	54
CY8C4248	Sigma-Delta	Ja (Ja)	Ja (Ja)	97

^a Möglichkeit der Messung nach dem [Eigenkapazitäts](#)-Verfahren

^b Möglichkeit der Messung nach dem [Gegenkapazitäts](#)-Verfahren

^c Möglichkeit einer Matrix-Schaltung der Elektroden ohne externe Bauteile

[Referenzelektrode](#) und [Neutralelektrode](#) (vgl. [Abschnitt 2.3.1.1](#)) zu den einzelnen Elektrodenanschlüssen ohne zusätzliche externe Bauteile ermöglicht.

Aus beiden Mikrocontroller-Familien wurde innerhalb dieser Arbeit eigenständig mehrere anwendungsspezifische Messsysteme in Hard- und Software aufgebaut, auf die nachfolgend näher eingegangen wird.

5.3.2.2 MKL26Z-Plattform

Zentrales Element ist ein Mikrocontroller ([MKL26Z](#)) der Kinetis[®]-Familie mit kapazitiver Messeinheit (Eigenkapazität mittels Konstantstrom-Ladezeit). Der Mikrocontroller verfügt im Gegensatz zu den Controllern der PSoC[®]-Familie weder über ein Schirmungssignal noch über die erforderlichen Multiplexer, daher werden diese Funktionen über ein externes analoges Frontend bereitgestellt (vgl. [Abbildung 5.4](#)). Das Schirmungssignal wird mittels Operationsverstärker mit Verstärkungsfaktor 1 (Spannungsfolger) aus dem Messsignal erzeugt. Das Multiplexing wird über insgesamt acht 3-fach 1:2-Multiplexer ([DG4053](#)) realisiert.

5.3.2.3 PSoC4000S-Plattform

Die PSoC4000S-Plattform verwendet den [CY8C4045](#)-Mikrocontroller und einen externen USB-Controller (FTDI FT232RL). Die Eingangspins des Mikrocontrollers sind mit einem quadratischen Pad-Array verbunden, dessen Zentrum mit Perforationen versehen ist (vgl. [Abbildung 5.5a](#)). Damit ergibt sich die Möglichkeit, prototypische

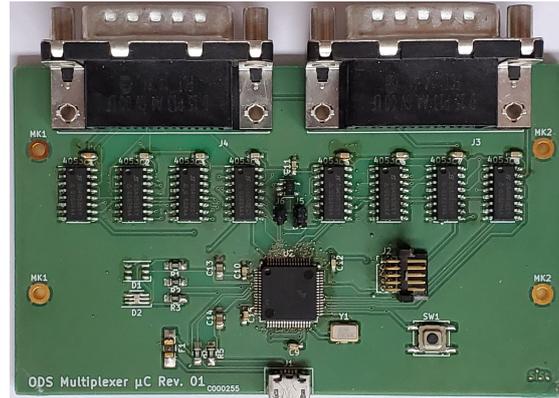
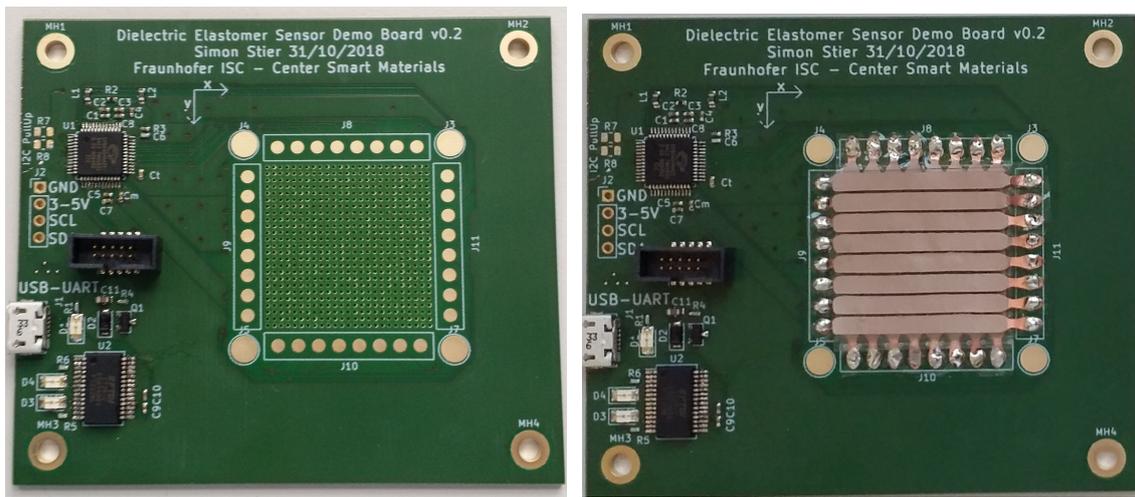


Abb. 5.4: MKL26Z-Plattform mit Mikrocontroller, externem analogem Frontend, [Universal Serial Bus \(USB\)](#)-Anschluss und D-Sub-Steckverbindern zum Anschluss eines Sensors (Abmessungen: 100 mm × 70 mm).

Sensoren direkt auf die Platine zu kleben und die Elektrodenkontakte zu verlöten.



(a) Grundzustand

(b) Mit aufgelötetem Sensor

Abb. 5.5: PSoC4000S-Plattform mit [USB](#)-Anschluss und Löt pads für die direkte Anbindung eines Sensors (Abmessungen: 80 mm × 70 mm).

5.3.2.4 PSoC4200L-Plattform

Für komplexe Sensorsysteme bzw. hohe Ortsauflösungen wurde im Rahmen dieser Arbeit die PSoC4200L-Plattform auf Basis des [CY8C4248](#)-Mikrocontrollers entwickelt. Der [CY8C4248](#) unterstützt bis zu 97 kapazitive Messkanäle, von denen auf dieser Platine jeweils 32 auf der Vorderseite und auf der Rückseite mit Löt pad-Kontaktierung ausgeführt sind (vgl. [Abbildung 5.6](#)).

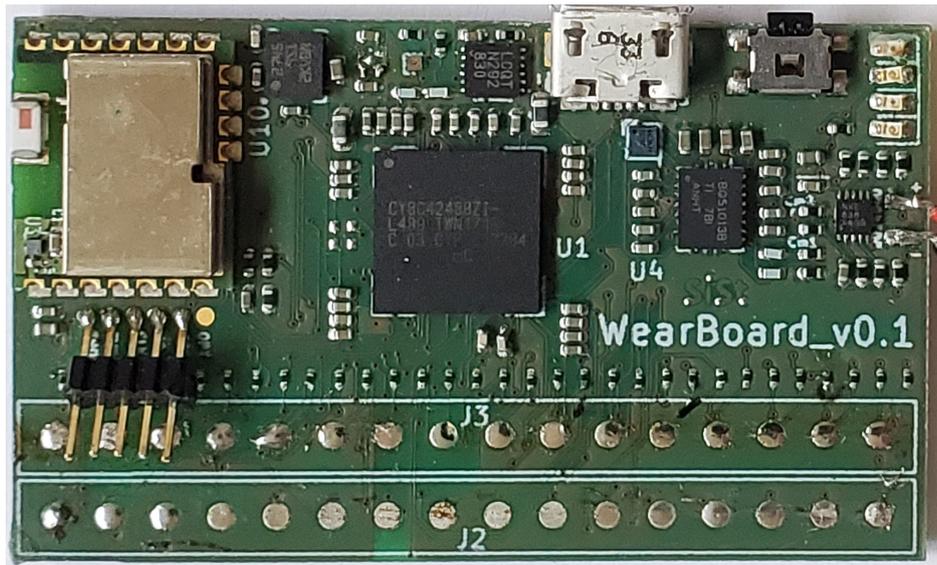


Abb. 5.6: PSoC4200L-Plattform mit [USB-Anschluss](#), [Bluetooth-Modul](#), drahtlosem Laderegler und Löt pads für die direkte Anbindung eines Sensors (Abmessungen: 50 mm × 30 mm).

Um bei Bedarf auch mobile Anwendungen zu ermöglichen, sind zusätzlich ein drahtloser Ladeanschluss (Qi-Standard) für einen Lithium-Polymer-Akku und ein [Bluetooth \(BT\)](#)-Modul (STM SPBT3.0DP2) mit hoher Übertragungsrate (bis zu $1,5 \text{ Mbit s}^{-1}$ via Serial Port Protocol) vorhanden. Alternativ können die Stromversorgung und Datenübertragung jedoch auch über einen [USB-Anschluss](#) erfolgen.

5.3.2.5 PSoC4200BL-Miniatur-Plattform

Die PSoC4200BL-Miniatur-Plattform ist eine auf Kompaktheit und Energieeffizienz ausgelegte Plattform, bei der neben dem [CYBLE-214015](#)-Modul lediglich ein Knopfzellenhalter vorgesehen ist (vgl. [Abbildung 5.7a](#)). Die Abmessungen betragen lediglich 27 mm × 12 mm. Auf den rückseitig ausgeführten Kontakt-Pads können Elektrodenkontakte direkt verlötet werden oder wahlweise Steckverbinder für Flachkabel bzw. für auf Folie geklebte Elektrodenkontakte angebracht werden (vgl. [Abbildung 5.7b](#)).

5.4 Ergebnisse und Diskussion

Um orts aufgelöste und/oder multimodale Sensorsysteme zu erstellen, ist es erforderlich, die in [Abschnitt 2.3](#) eingeführten Elektrodenfunktionen ([Messelektrode](#), [Referenzelektrode](#) und [Neutralelektrode](#)) in geeigneter Form mit den Dielektrikumsarten ([elastisches volumeninkompressibles Dielektrikum](#), [elastisches isotrop-](#)

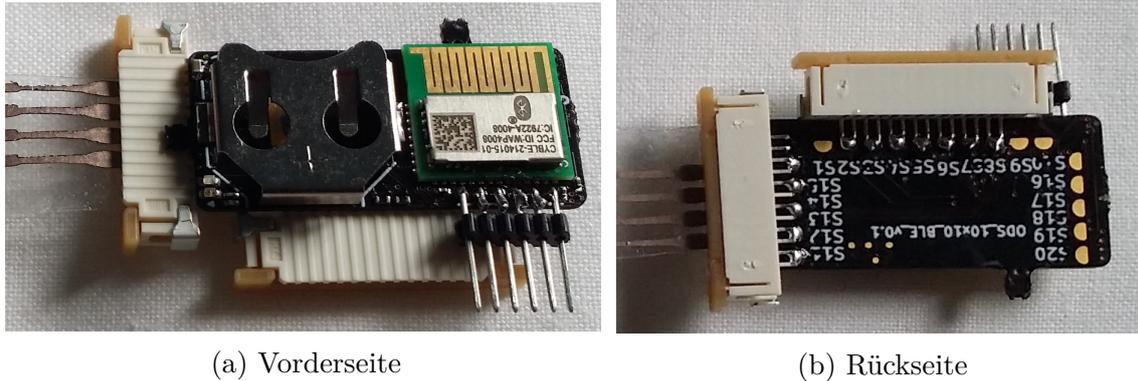


Abb. 5.7: PSoC4200BL-Miniatur-Plattform mit BLE (Bluetooth Low Energy)-Modul, Knopfzellenhalter und Steckverbinder für Flachbandkabel (Abmessungen ohne Stecker: 27 mm × 12 mm).

volumenkompressibles Dielektrikum und elastisches anisotrop-volumenkompressibles Dielektrikum) zu kombinieren. Nachfolgend ist die detaillierte Ausarbeitung und Evaluierung einiger der in dieser Arbeit entstandenen Konzepte, die auf den in [Abschnitt 2.3](#) genannten Grundlagen aufbauen, dargestellt.

5.4.1 Kombierter Näherungs-, Druck und Dehnungssensor

5.4.1.1 Konzept

Der in [Abbildung 5.8](#) gezeigte Aufbau besteht aus drei Elektrodenschichten (1, 3, 5) und zwei dielektrischen Schichten. Schicht 2 ist ein [elastisches, isotrop-volumenkompressibles Dielektrikum](#), Schicht 4 hingegen ein [elastisches, volumenin-kompressibles Dielektrikum](#). Die Elektroden sind für verschiedene Messmodi variabel beschaltbar (vgl. [Tabelle 5.5](#)).

Im Näherungsmodus werden Elektrode 1 als [Messelektrode](#), Elektrode 3 und 5 hingegen als [Neutralelektroden](#) geschaltet. Hierdurch geht keine der Kapazitäten zwischen den Elektroden in die Messung mit ein. Das Feld von Elektrode 1 reicht jedoch in das (Luft-) Volumen oberhalb des Sensors hinein und kann dort sich nähernde Objekte erfassen. Befindet sich ein Objekt zur Ausübung eines Druckes in Kontakt mit der Sensoroberfläche, wird die Näherungsmessung ebenfalls beeinflusst, da das Objekt hierzu zwingend in das Feld der Elektrode 1 eindringt. Auch wenn der Gesamtaufbau gedehnt wird, findet eine Beeinflussung der Näherungsmessung statt, sofern sich dabei die Fläche von Elektrode 1 verändert.

Im Druckmodus wird Elektrode 3 als [Messelektrode](#), Elektrode 1 als [Referenzelektrode](#) und Elektrode 5 als [Neutralelektrode](#) geschaltet. Somit befindet sich zwischen

Mess- und Referenzelektrode ein [elastisches, isotrop-volumenkompressibles Dielektrikum](#), wodurch die Kapazität zwischen den Elektroden bei einem an der Sensoroberseite anliegenden Druck oder einer Dehnung des Gesamtaufbaues erhöht wird. Die Kapazität zwischen Elektrode 3 und 5 geht hingegen nicht in die Messung ein.

Für die Dehnungsmessung wird Elektrode 3 ebenfalls als [Messelektrode](#) geschaltet, Elektrode 1 und Elektrode 5 tauschen jedoch die Rolle. In diesem Modus befindet sich zwischen Mess- (3) und Referenzelektrode (5) ein [elastisches, volumeninkompressibles Dielektrikum](#), wodurch die Kapazität zwischen den Elektroden nur bei einer Dehnung des Gesamtaufbaus signifikant erhöht wird. Die Kapazität zwischen Elektrode 3 und 1 geht hingegen nicht in die Messung ein.

Da keine zirkulären Abhängigkeiten zwischen den Modi bestehen, können diese in der Nachverarbeitung direkt voneinander getrennt werden: Die Dehnung des Gesamtaufbaues kann direkt aus der Messung ermittelt werden. Anschließend kann die Druck- und Näherungsmessung entsprechend einer Referenzkurve für die verschiedenen Dehnungszustände korrigiert werden.

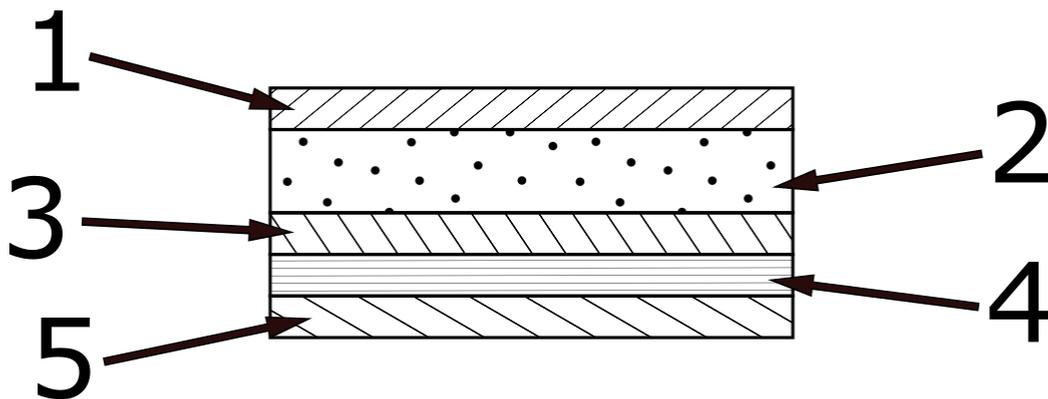


Abb. 5.8: Schematische Schnittdarstellung des Aufbaus eines kombinierten Näherungs-, Druck- und Dehnungssensor bestehend aus drei unabhängig ansteuerbaren Elektroden (1,3,5). Zwischen den Elektroden 1 und 3 befindet sich ein [elastisches, isotrop-volumenkompressibles Dielektrikum](#) (2), zwischen den Elektroden 3 und 5 hingegen ein [elastisches, volumeninkompressibles Dielektrikum](#) (5)

5.4.1.2 Aufbau

Für die Elektrodenschichten wurden jeweils einzelne Elektrodenfolien mit einer 100 µm dicken Substratschicht aus [S5](#) hergestellt und darauf eine 100 µm dicke Elektrodenschicht aus [S1](#) mit 10 vol% Ruß appliziert. Zwischen Elektrodenschicht 1 und 3 wurde als [elastisches, isotrop-volumenkompressibles Dielektrikum](#) (2) ein Noppenprofil aus [S5](#) mit 0,5 mm hohen und 0,5 mm breiten Noppen im Abstand von 2 mm

Tab. 5.5: Messkonfigurationen eines kombinierten Näherungs-, Druck und Dehnungssensors

Modus / Elektrode	1	3	5	Abhängigkeit
Dehnung	N	M	R	-
Druck	R	M	N	Dehnung
Näherung	M	N	N	Dehnung, Druck

M: Messelektrode
R: Referenzelektrode
N: Neutralelektrode



Abb. 5.9: Kombiniertes Näherungs- Druck- und Dehnungssensor mit Abmessungen 50 mm × 20 mm

geklebt. Elektrodenschicht 3 und 5 wurden hingegen direkt aufeinander geklebt, wobei die dann zwischen beiden Elektroden liegende Substratschicht von Elektrode 3 ein dünnes [elastisches, volumeninkompressibles Dielektrikum](#) (4) bildet. Die Elektrodenanschlüsse des Sensors wurden anschließend mit aufgerimpten Aderendhülsen versehen und mit den Kontaktpads eines Folienleiters verlötet, der wiederum per Steckverbindung mit der PSoC4200BL-Miniatur-Plattform (vgl. [Abschnitt 5.3.2.5](#)) verbunden wurde.

5.4.1.3 Charakterisierung

Da kein geeigneter Aufbau zur Verfügung stand, mit dem gleichzeitig eine quantitative Druck- und Dehnbeanspruchung des Sensors realisiert werden konnte, wurde die Charakterisierung stattdessen qualitativ-händisch durchgeführt. Hierzu näherte eine Versuchsperson zunächst ihre linke Hand von oben an den auf dem Tisch liegenden Sensor an und übte anschließend mit beiden Händen eine überlagerte Druck- und Dehnungsbelastung aus. Bei Erreichen der Sensoroberfläche übte sie auf einem Teilbereich des Sensors mit dem Zeigefinger Druck aus. Anschließend griff sie mit der

rechten Hand den rechten, insensitiven Randbereich und dehnte den Sensor. Nach einer kurzen Wartezeit wurde der Sensor wieder entspannt und entlastet.

Während der Annäherung ändert sich nur die Näherungskapazität, während Druck- und Dehnungskapazität unverändert bleiben (s. [Abbildung 5.10](#)). Sobald der Finger

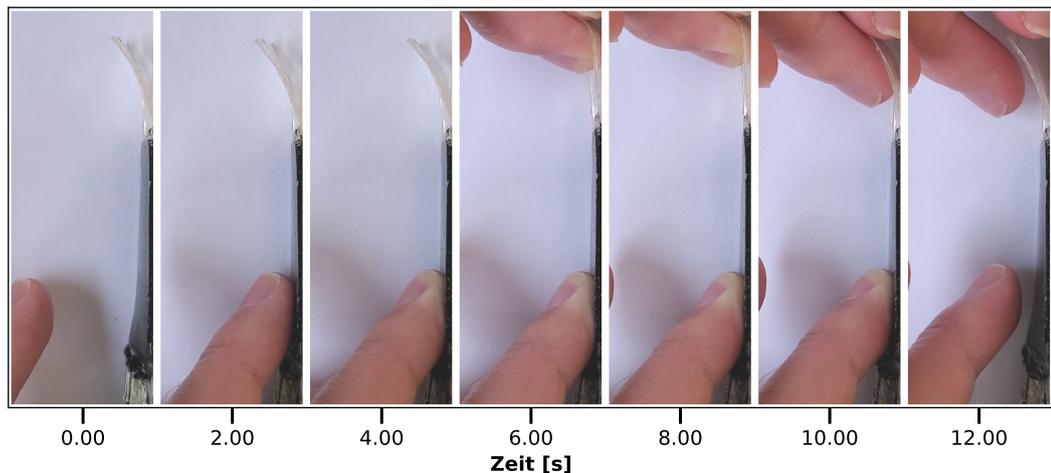
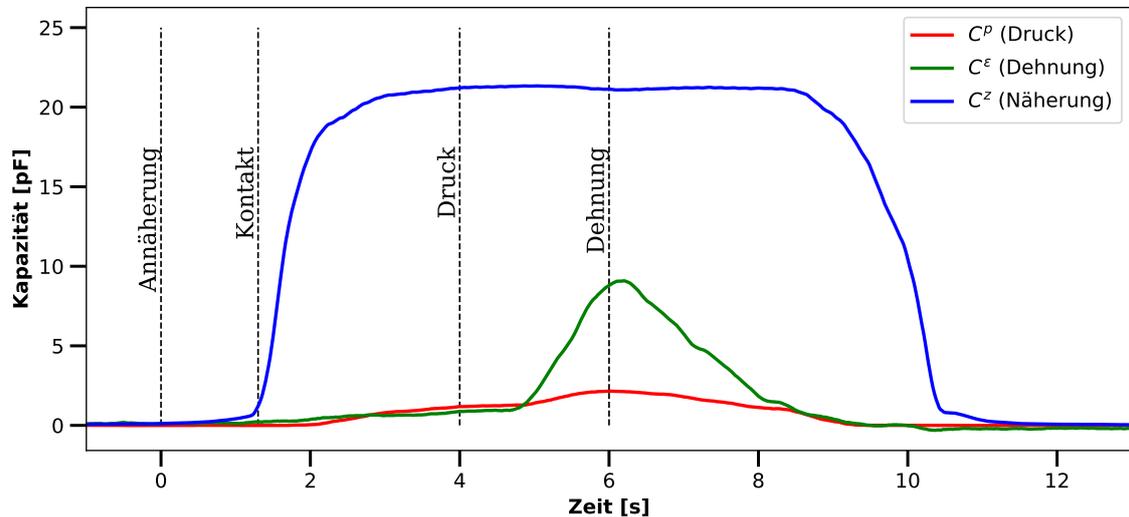


Abb. 5.10: Kapazitäts-Messkurven (Differenz zum Grundwert) des kombinierten Näherungs- Druck- und Dehnungssensors bei verschiedenen Fingeraktionen (Annäherung sowie Druck- und Dehnungsbelastung des Sensors).

Kontakt mit der Sensoroberfläche hat, erhöht sich die Näherungskapazität noch einmal deutlich, da der Abstand zwischen Finger und Elektrode nun nur noch der Dicke der Substratschicht (ca. 100 μm) entspricht. Die Druckkapazität bleibt jedoch noch unverändert. Erst wenn im weiteren Verlauf Druck mit dem Finger aufgebaut wird, steigt die Druckkapazität an. Die Dehnungskapazität bleibt weiterhin weitgehend unverändert und steigt erst bei einsetzender Dehnung deutlich an. Auch die Druckkapazität nimmt in dieser Phase noch einmal deutlich zu. Nach dem Entspannen und

Entlasten des Sensors gehen alle Kapazitäten wieder auf ihren Ursprungswert zurück. Der Versuch zeigt, dass wie erhofft Druck- und Dehnungskapazität nicht bereits auf die Annäherung und die Dehnungskapazität nicht bereits auf die Druckbelastung reagiert. Die Kopplung der Näherungskapazität mit der Druck- und Dehnungsbelastung ist unkritisch, da zu diesem Zeitpunkt bereits der Kontakt detektiert werden konnte und die Näherungsmessung damit überflüssig ist. Die verbleibende Quereinflussung der Druckmessung durch die Dehnung des Sensors kann mit einer geeigneten Kalibrierung kompensiert werden, in dem etwa der bekannte Dehnungswert mit einem Skalierungsfaktor multipliziert und vom gemessenen Druckwert abgezogen und damit der tatsächliche Druckwert ermittelt wird. Zudem kann eine Verringerung der Verformbarkeit des Dielektrikums der Dehnungsmessschicht die Querempfindlichkeit zur Druckmessung weiter verringern.

Sinnvoll ist ein derartiger Aufbau u. a. für tragbare medizinische Messsysteme, die mit möglichst kompakten und vor allem dünnen Sensoren mehrere Messfunktionen gleichzeitig erfüllen müssen. Unter anderem können die Dehnung von Gewebe und Druckbelastungen gleichzeitig erfasst werden. Die Näherungssensorik kann dabei Interaktionsmöglichkeiten für den Nutzer bieten.

5.4.2 Ortsaufgelöster, kombinierter Druck- und Dehnungssensor

5.4.2.1 Konzept

In [Abbildung 5.11](#) ist ein ortsaufgelöster, kombinierter Druck- und Dehnungssensor zur Übersicht als 4×4 -Matrix dargestellt. Dieser besteht aus den Elektroden-schichten (1a-d, 3a-d, 5a-d) sowie den dielektrischen Schichten. Schicht 2 ist dabei isotrop-volumenkompressibel, Schicht 4 hingegen volumeninkompressibel. Mit den in [Tabelle 5.6](#) dargestellten Elektrodenbeschaltungen lässt sich zwischen Druck- und Dehnungsmessung umschalten und zudem können die aktiven Elemente (Messpixel) des Sensors ausgewählt werden.

Wird beispielsweise 3b als [Messelektrode](#) und 1c als [Referenzelektrode](#) selektiert und alle verbliebenen Elektroden (1a, 1b, 1d, 3a, 3c, 3d, 5a-d) als [Neutralelektroden](#) geschaltet, wird nur der Druck im Überlappungsbereich zwischen 3b und 1c erfasst (ein aktives Drucksensor-Matrixelement). Werden 3b und 3c als [Messelektroden](#), 5b und 5c als [Referenzelektroden](#) und alle verbliebenen Elektroden (1a-d, 3a, 3d, 5a, 5d) als [Neutralelektroden](#) geschaltet, wird nur die Dehnung im Überlappungsbereich zwischen (3b, 3c) und (5b, 5c) erfasst (vier aktive Dehnungssensor-Matrixelemente). Sind hingegen 3a-d [Messelektroden](#) und 1a-d [Referenzelektroden](#) sowie 5a-d [Neutralelektroden](#), ist die gesamte Sensorfläche drucksensitiv (16 aktive Drucksensor-

Matrixelemente).

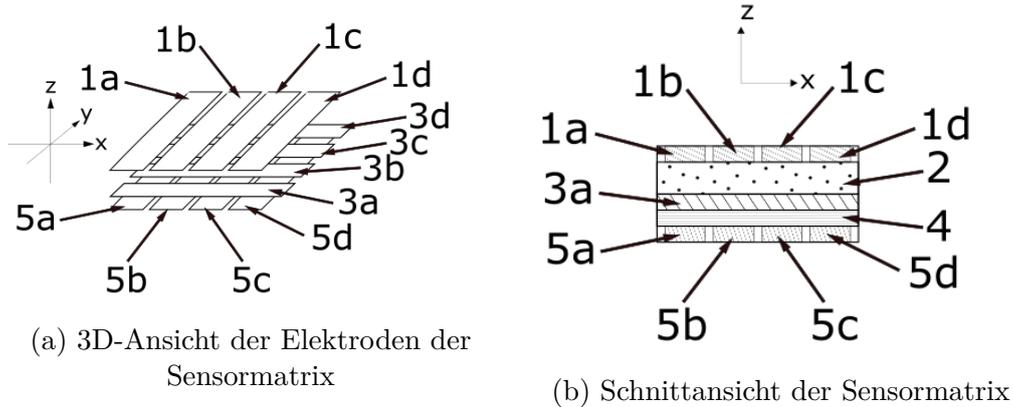


Abb. 5.11: Schematische Schnittdarstellung des Aufbaus eines orts aufgelösten kombinierten Druck- und Dehnungssensors bestehend aus drei unabhängig ansteuerbaren Elektrodenschichten (1,3,5) mit je vier Einzelelektroden. Zwischen Elektrodenschicht 1 und 3 befindet sich ein **elastisches, isotrop-volumenkompressibles Dielektrikum** (2), zwischen Elektrodenschicht 3 und 5 hingegen ein **elastisches, volumeninkompressibles Dielektrikum** (4).

Tab. 5.6: Messkonfigurationen eines orts aufgelösten, kombinierten Druck und Dehnungssensors

Modus / Elektrode	1 ^s	1 ⁿ	1 ^a	3 ^s	3 ⁿ	3 ^a	5 ^s	5 ⁿ	5 ^a
Dehnung	-	-	N	M	N	-	R	N	-
Druck	R	N	-	M	N	-	-	-	N

s: Für die aktuelle Messung selektierte Elektroden der betreffenden Schicht

n: Übrige, nicht selektierte Elektroden der betreffenden Schicht

a: Alle Elektroden der betreffenden Schicht

M: Messelektrode

R: Referenzelektrode

N: Neutralelektrode

5.4.2.2 Aufbau

Der Aufbau des Sensors folgt den obenstehend genannten theoretischen Überlegungen, weist jedoch eine größere 6x6-Elektrodenmatrix auf. Der Schichtaufbau an sich erfolgte analog zum zuvor beschriebenen kombinierten Näherungs-, Druck- und Dehnungssensor (s. [Abschnitt 5.4.1.2](#)). Folglich wurde für die Elektrodenfolien eine 100 µm

dicke Substratschicht aus dem Silicon S5 hergestellt, und darauf wurde eine 100 μm dicke Elektrodenschicht aus S1 mit 10 vol% Ruß appliziert. Zwischen Elektrodenschicht 1 und 3 wurde als *elastisches, isotrop-volumenkompressibles Dielektrikum* (2) ein Noppenprofil bestehend aus dem Silicon S5 mit 0,5 mm hohen und 0,5 mm breiten Noppen im Abstand von 2 mm geklebt. Elektrodenschicht 3 und 5 wurden hingegen direkt aufeinander geklebt, wobei die dann zwischen beiden Elektroden liegende Substratschicht von Elektrode 3 ein dünnes *elastisches, volumeninkompressibles Dielektrikum* (4) bildet. Die Elektrodenanschlüsse des Sensors wurden anschließend mit aufgerimpten Aderendhülsen versehen und mit Kabeln mit dem Steckverbinder der MKL26Z-Plattform (vgl. [Abschnitt 5.3.2.2](#)) verbunden.

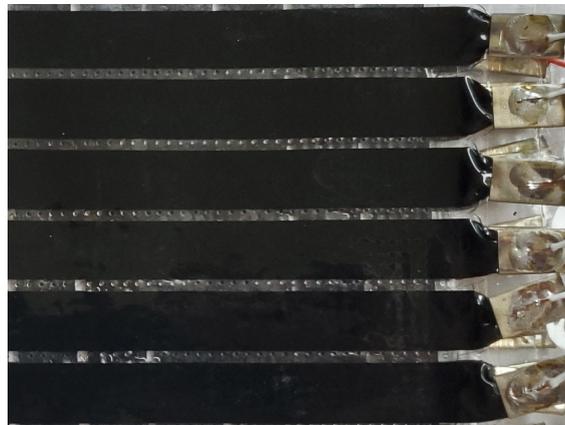


Abb. 5.12: Ortsaufgelöster kombinierter Druck- und Dehnungssensor mit Abmessungen 72 mm \times 72 mm

5.4.2.3 Charakterisierung

Beim ortsaufgelösten kombinierten Druck- und Dehnungssensor wurde die Charakterisierung ebenfalls qualitativ-händisch durchgeführt. Hierzu wurde der Sensor an der Position $i = 3, j = 1$ und $i = 5, j = 1$ gehalten und anschließend an der dazwischenliegenden Position $i = 4, j = 1$ gedehnt. i steht dabei für die Spalte und j für die Zeile der Elektrodenmatrix.

Der Verlauf der zugehörigen Kapazitätswerte an diesen Positionen für die Druckmessung ($C_{3,1}^p, C_{4,1}^p$ und $C_{5,1}^p$) und Dehnungsmessung ($C_{3,1}^\epsilon, C_{4,1}^\epsilon$ und $C_{5,1}^\epsilon$) ist in [Abbildung 5.13](#) dargestellt.

Das Versuchsergebnis zeigt, dass multimodale Aufbauten auch mit einer Ortsauflösung kombinierbar sind. Während es lateral, also zwischen den Drucksensor-Matrixelementen bzw. zwischen den Dehnungssensor-Matrixelementen, zu keinem signifikanten Übersprechen kommt, besteht modal, also zwischen der Druck- und

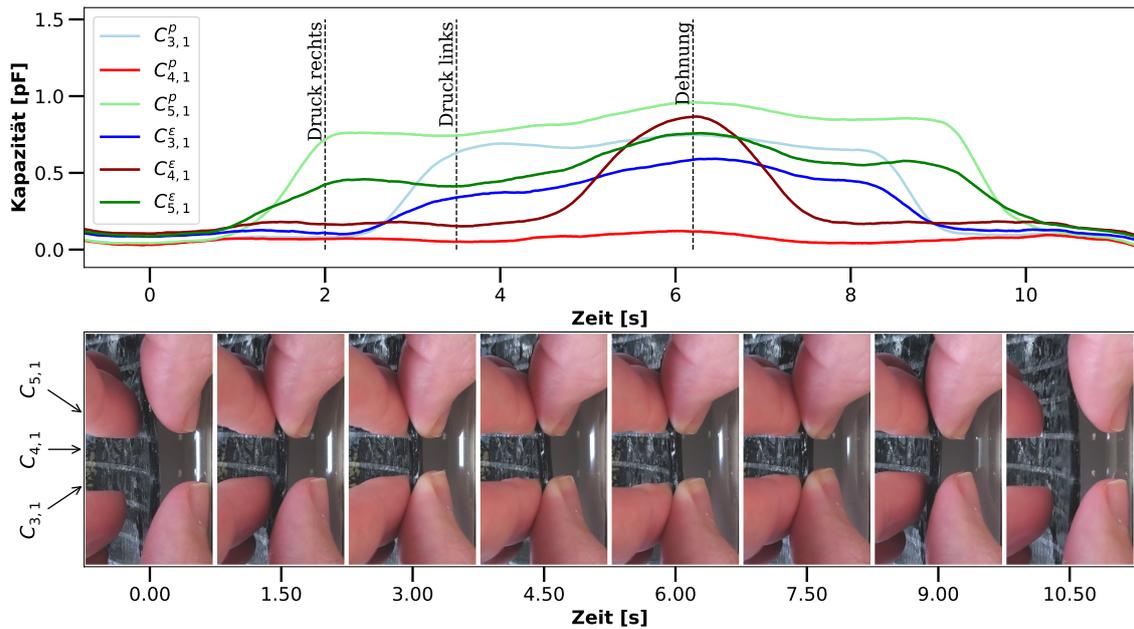


Abb. 5.13: Ausgewählte Kapazitätswerte (Differenz zum Grundwert) des orts aufgelösten, kombinierten Druck- und Dehnungssensors während einer lokalen Druck- und Dehnungsbelastung: Kapazitätswerte von drei nebeneinander liegenden Drucksensor-Matrixelementen $C_{3,1}^p$, $C_{4,1}^p$ und $C_{5,1}^p$ sowie die zugehörigen Dehnungskapazitäten $C_{3,1}^\epsilon$, $C_{4,1}^\epsilon$ und $C_{5,1}^\epsilon$.

der Dehnungskapazität, an der gleichen Position eine Querempfindlichkeit. Wie beim vorherigen Aufbau kann diese Querempfindlichkeit durch eine entsprechende Kalibrierkurve der einzelnen Matrixelemente sowie durch eine Verringerung der Verformbarkeit des Dielektrikums der Dehnungsmessschicht verringert werden. Sinnvoll ist ein derartiger Aufbau u. a. für Automobilsitze, bei denen die Sitzposition und -haltung der Insassen genau erfasst werden soll. Da der Sensor hierzu auf einem weichen Gewebe aufliegt, muss er zwingend auch dehnbar sein. Bei einem reinen Drucksensor würde die Dehnung jedoch die Druckmessung beeinflussen, so dass nicht zwischen einer reinen Dehnung und einer überlagerten Dehnungs- und Druckbelastung unterschieden werden kann. Mit dem hier gezeigten Aufbau kann hingegen die lokale Dehnung unabhängig vom Druck erfasst und die Druckmessung entsprechend kompensiert werden.

5.4.3 Kombiniertes 3D-Kraft- und 3D-Näherungssensor

5.4.3.1 Konzept

In [Abbildung 5.14](#) ist ein kombinierter 3D-Näherungs-, 3D-Kraftsensor mit Elektrodenschichten (1, 3, 5) und dielektrischen Schichten dargestellt. Schicht 4 ist dabei isotrop-volumenkompressibel, Schicht 2 hingegen anisotrop-volumenkompressibel. Durch die Unterteilung der Elektroden 1 in vier Segmente (prinzipiell genügen auch 3 Segmente) lässt sich die Position eines sich nähernden Objektes ermitteln (s. [Tabelle 5.7](#)). Im Falle eines 3D-Kraftvektors (7) wirkt sich dessen Z-Komponente (Normalkraft) vor allem auf die Kapazität $C_{3,5}$ aus, während die X-Komponente zu einer Asymmetrie der Elektrodenflachenuberlappung zwischen den Elektroden 1 und 3 bezüglich der Y-Achse und die Y-Komponente zu einer Asymmetrie bezüglich der X-Achse führt (Scherkraft, s. [Abbildung 5.14c](#)). Diese Komponenten bestimmen damit maageblich die Kapazitäten $C_{1x,3}$.

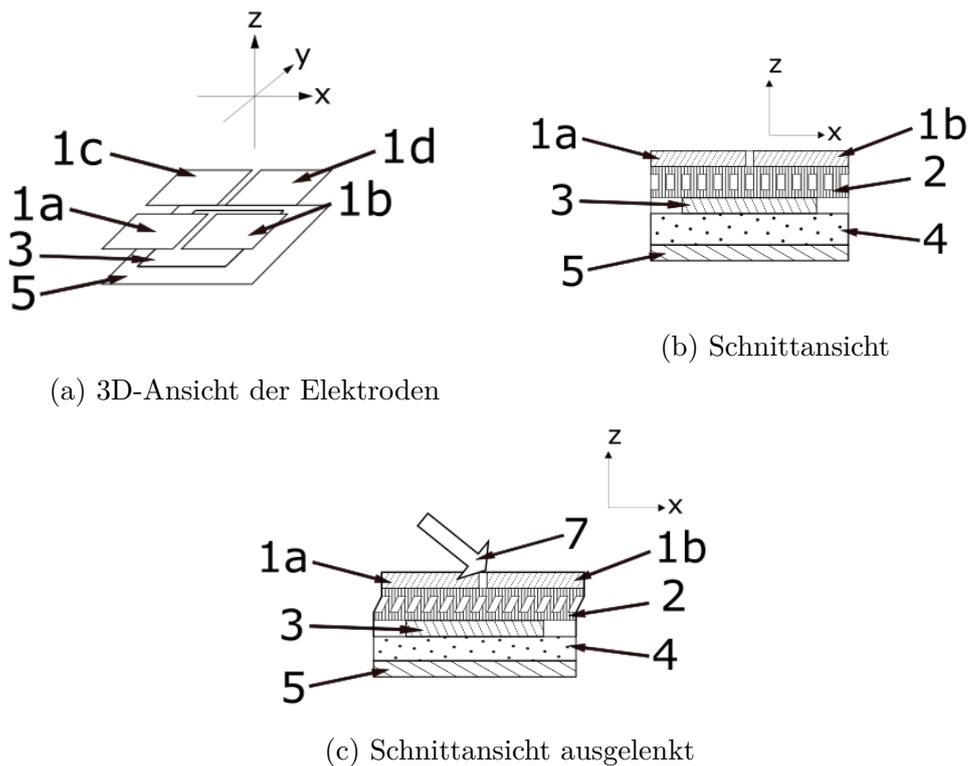


Abb. 5.14: Schematische Schnittdarstellung des Aufbaus eines kombinierten 3D-Kraft- und 3D-Näherungssensors, bestehend aus drei unabhängig ansteuerbaren Elektrodenschichten (1,3,5) wobei die oberste Elektrodenschicht in vier Einzelelektroden aufgeteilt ist (1a-d). Zwischen Elektrodenschicht 1 und 3 befindet sich ein [elastisches, anisotrop-volumenkompressibles Dielektrikum](#) (2), zwischen Elektrodenschicht 3 und 5 hingegen ein [elastisches, isotrop-volumenkompressibles Dielektrikum](#) (4).

Tab. 5.7: Messkonfigurationen eines kombinierten 3D-Kraft- und 3D-Näherungssensors

Modus / Elektrode	1a	1b	1c	1d	3	5	Abhängigkeit
Näherung C_{1a}	M	N	N	N	N	N	Kraft
Näherung C_{1b}	N	M	N	N	N	N	Kraft
Näherung C_{1c}	N	N	M	N	N	N	Kraft
Näherung C_{1d}	N	N	N	M	N	N	Kraft
Scherkraft $C_{1a,3}$	R	N	N	N	M	N	Normalkraft
Scherkraft $C_{1b,3}$	N	R	N	N	M	N	Normalkraft
Scherkraft $C_{1c,3}$	N	N	R	N	M	N	Normalkraft
Scherkraft $C_{1d,3}$	N	N	N	R	M	N	Normalkraft
Normalkraft $C_{3,5}$	N	N	N	N	M	R	-

M: Messelektrode
R: Referenzelektrode
N: Neutralelektrode

5.4.3.2 Aufbau

Der Aufbau des Sensors folgt den in [Abschnitt 5.4.3.1](#) beschriebenen theoretischen Überlegungen. Für die Elektrodenfolien wurde eine 100 µm dicke Substratschicht aus dem Silicon [S5](#) hergestellt und darauf eine 100 µm dicke Elektrodenschicht aus dem Silicon [S1](#) mit 10 vol% Ruß appliziert. Zwischen Elektrodenschicht 1 und 3 wurde als [elastisches, anisotrop-volumenkompressibles Dielektrikum](#) ein Noppenprofil aus dem Silicon [S5](#) mit 2 mm hohen und 0,6 mm breiten Noppen im Abstand von 1,8 mm geklebt. Zwischen Elektrodenschicht 3 und 5 wurde als [elastisches, isotrop-volumenkompressibles Dielektrikum](#) ein Noppenprofil aus dem Silicon [S5](#) mit 0,5 mm hohen und 0,5 mm breiten Noppen im Abstand von 2 mm geklebt. Die Elektrodenanschlüsse des Sensors wurden anschließend mit aufgedrimpten Aderendhülsen versehen und mit den Kontaktpads der PSoC4000S-Plattform (vgl. [Abschnitt 5.3.2.3](#)) verlötet.

5.4.3.3 Charakterisierung

Zur Charakterisierung der 3D-Näherungsfunktion des Systems wurde der Roboter mit dem Druck- und Näherungsmessaufsatz ausgestattet (s. [Abschnitt 5.3.1.4](#)). Zur Ermittlung des Näherungs-Wahrnehmungsbereiches des Sensors wurden diejenigen Positionen des Prüfkörpers (bezogen auf die Spitze) ermittelt, bei denen die Kapazitätsänderung der Summe aller vier Näherungselektroden gegenüber dem Grundzustand mindestens 0,15 pF bzw. einer einzelnen Elektrode mindestens 0,3 pF betrug und sich damit signifikant vom Grundrauschen absetzt. Zur Lokalisierung eines sich nähernden

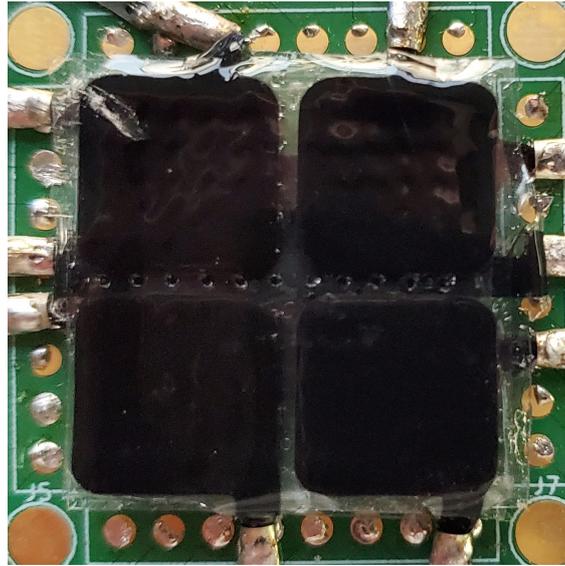


Abb. 5.15: Kombiniertes 3D-Kraft- und 3D-Näherungssensor mit Abmessungen $25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$

Objektes werden aus den Einzelkapazitäten $C_{1a}, C_{1b}, C_{1c}, C_{1d}$ der Näherungsmessung der obersten Elektrodenschicht (1) (vgl. [Abbildung 5.17a](#)) gemäß [Gleichung 5.1](#) die räumlichen Näherungs-Kapazitätskomponenten C_x, C_y, C_z berechnet.

$$\begin{aligned} C_x &= -C_{1a} + C_{1b} - C_{1c} + C_{1d} \\ C_y &= -C_{1a} - C_{1b} + C_{1c} + C_{1d} \\ C_z &= C_{1a} + C_{1b} + C_{1c} + C_{1d} \end{aligned} \quad (5.1)$$

Zur Bestimmung der Kraft-Kapazitätskomponenten $C_{F_x}, C_{F_y}, C_{F_z}$, die ein Maß für die Kraftkomponenten darstellen, wurden die Kapazitäten $C_{1a,3}, C_{1b,3}, C_{1c,3}, C_{1d,3}$ zwischen den vier Elektroden der obersten Elektrodenschicht (1a-d) und der mittleren Elektrodenschicht (3) sowie die Kapazität $C_{3,5}$ zwischen der mittleren Elektrodenschicht (3) und der unteren Elektrodenschicht (5) gemäß [Gleichung 5.2](#) herangezogen.

$$\begin{aligned} C_{F_x} &= C_{1a,3} - C_{1b,3} + C_{1c,3} - C_{1d,3} \\ C_{F_y} &= C_{1a,3} + C_{1b,3} - C_{1c,3} - C_{1d,3} \\ C_{F_z} &= C_{3,5} \end{aligned} \quad (5.2)$$

3D-Näherung Der Wahrnehmungsbereich aller vier Näherungselektroden beträgt im Zentrum des Sensors etwa 12 mm (Abstand zur Sensoroberfläche) und flacht zum

Rand hin ab (vgl. [Abbildung 5.16a](#)).

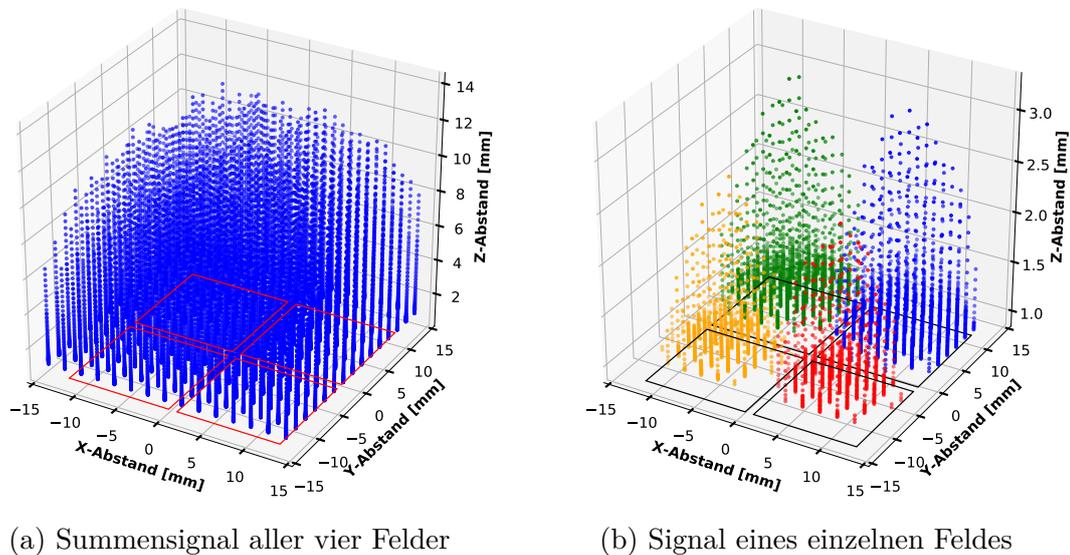


Abb. 5.16: Wahrnehmungsbereich bzw. Positionen des Prüfkörpers bei denen die Kapazitätsänderung der Summe aller vier Näherungselektroden gegenüber dem Grundzustand mindestens 0,15 pF (a) bzw. einer einzelnen Elektrode (links oben) mindestens 0,3 pF (b) betrug.

Der Wahrnehmungsbereich einer einzelnen Elektrode ist bei der gewählten relativ hohen Schwelle von 0,3 pF sehr klein, wurde jedoch gewählt, da unter diesen Bedingungen die Lokalisierung des Wahrnehmungsbereichs über den Elektroden sehr gut erkennbar ist (vgl. [Abbildung 5.21b](#)). Zur Lokalisierung eines sich nähernden Objektes wurden aus den Einzelkapazitäten C_{1a} , C_{1b} , C_{1c} , C_{1d} der Näherungsmessung (vgl. [Abbildung 5.17a](#)) gemäß [Gleichung 5.1](#) die räumlichen Kapazitätskomponenten C_x , C_y , C_z berechnet.

Zwischen C_x und dem X-Abstand des Prüfkörpers zum Sensormittelpunkt besteht bei einem Y-Abstand von 0 mm und einem Z-Abstand von 6 mm zwischen den Mittelpunkten der Elektroden (−5 mm und 5 mm) in etwa ein linearer Zusammenhang, während darüber hinaus der Betrag der Kapazität nicht weiter ansteigt bzw. wieder abfällt (s. [Abbildung 5.17b](#)). Selbiges gilt für C_y und dem y-Abstand des Prüfkörpers bei einem X-Abstand von 0 mm und einem Z-Abstand von 6 mm (s. [Abbildung 5.17c](#)). Der Zusammenhang zwischen C_z und dem Z-Abstand des Prüfkörpers bildet bei einem X-Abstand von 0 mm und einem Y-Abstand von 0 mm erwartungsgemäß (vgl. [Gleichung 2.1](#)) einen reziproken Zusammenhang (s. [Abbildung 5.17d](#)).

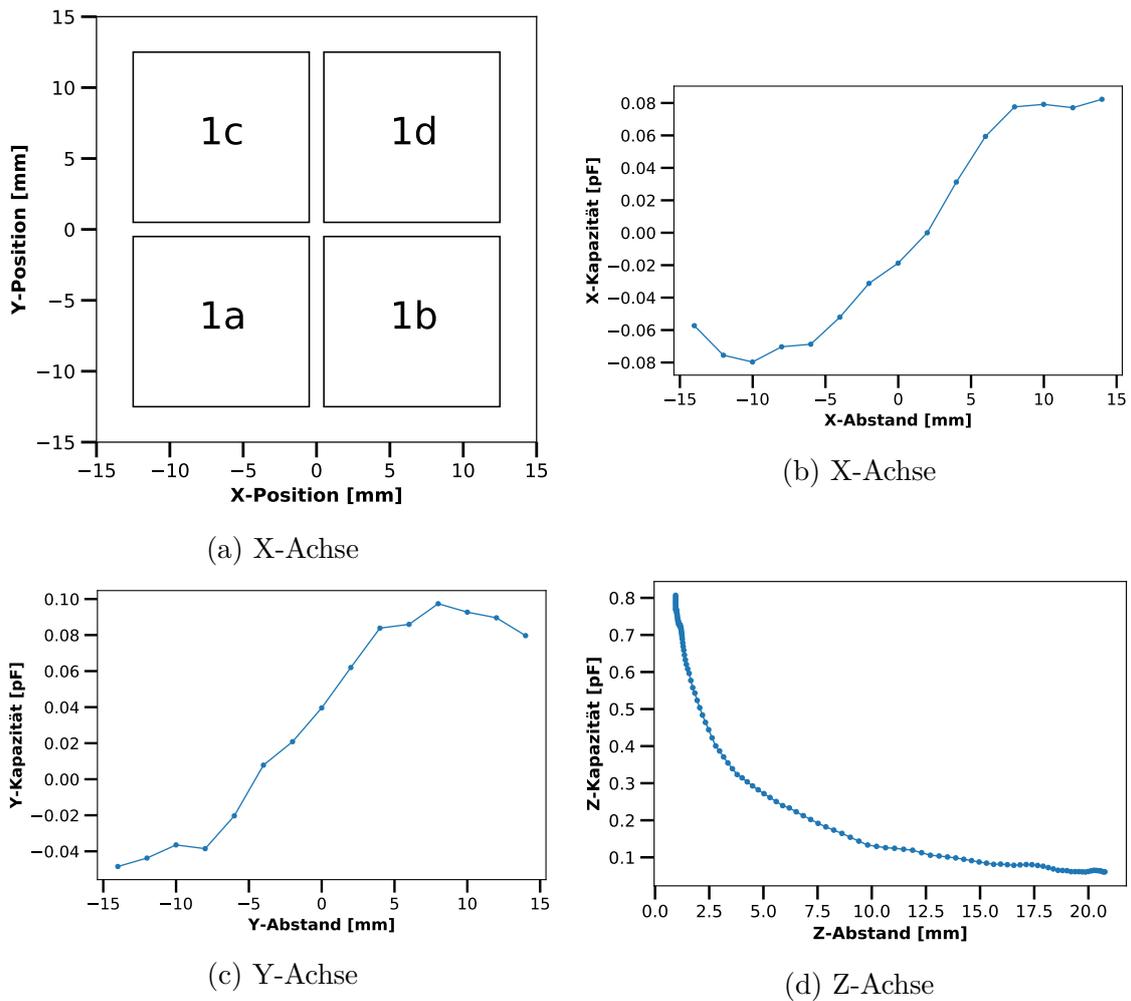


Abb. 5.17: Elektrodenanordnung (a) sowie Zusammenhang zwischen den Raumkoordinaten x, y, z der Prüfkörperspitze und den Kapazitätskomponenten C_x, C_y, C_z (s. Gleichung 5.1): $C_x(x, y = 0 \text{ mm}, z = 6 \text{ mm})$ (b), $C_y(y, x = 0 \text{ mm}, z = 6 \text{ mm})$ (c) und $C_z(z, y = 0 \text{ mm}, x = 0 \text{ mm})$ (d)

3D-Kraft Für die Charakterisierung der 3D-Kraftmessung des Sensors wurde der Zusammenhang zwischen den Kraftkomponenten F_x, F_y, F_z und den Kapazitätskomponenten $C_{F_x}, C_{F_y}, C_{F_z}$ gemäß Gleichung 5.2 betrachtet (s. Abbildung 5.18).

Dabei wurde C_{F_x} bei $F_y = 0 \text{ N}$ und $F_z = 1 \text{ N}$ und C_{F_z} umgekehrt bei $F_x = 0 \text{ N}$ und $F_z = 1 \text{ N}$ betrachtet. Unter diesen Bedingungen ergibt sich sowohl für die X- als auch für die Y-Achse ein linearer Zusammenhang zwischen der Kraft- und der Kapazitätskomponente. Durch die, im Gegensatz zur kontinuierlichen Y-Position stufenförmige Vorgabe der X-Position des Roboters sind die Messpunkte der X-Achse jedoch stärker geclustert. Auch für die Z-Achse ergibt sich unter den Bedingungen $F_x = 0 \text{ N}$ und $F_y = 0 \text{ N}$ ein linearer Zusammenhang. Bei allen Achsen sind die Kapazitätsänderun-

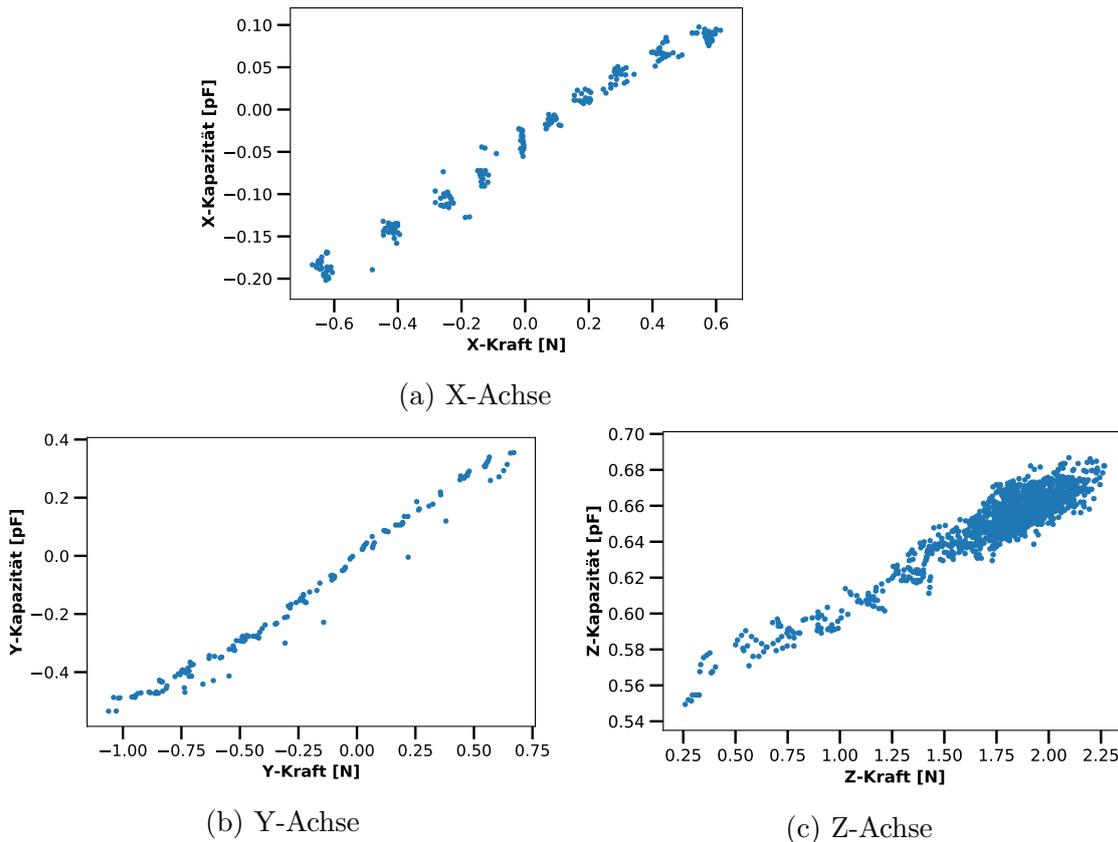


Abb. 5.18: Zusammenhang zwischen den gemessenen Kraftkomponenten F_x, F_y, F_z und den Kapazitätskomponenten $C_{F_x}, C_{F_y}, C_{F_z}$ (s. Gleichung 5.2): $C_x(F_x, F_y = 0 \text{ N}, F_z = 1 \text{ N})$ (a), $C_y(F_y, F_x = 0 \text{ N}, F_z = 1 \text{ N})$ (b) und $C_z(F_z, F_x = 0 \text{ N}, F_y = 0 \text{ N})$ (c)

gen jedoch sehr gering und die Signale entsprechend stark verrauscht.

Der gezeigte Aufbau ist u. a. für einen Sensorhandschuh oder Robotergreifer geeignet, bei dem die genaue Wechselwirkung der Finger- bzw. Greiferspitze mit der Umgebung bzw. mit dem gegriffenen Objekt erfasst werden soll. Der Drucksensor erfasst hierzu die wirkende Normalkraft, während der Schersensor Scherkräfte parallel zur Oberfläche erfasst. Dies ist insbesondere relevant, wenn es um das sichere Greifen von Objekten geht (vgl. Stier^[18]). Die Näherungswahrnehmung kann Oberflächen und Gegenstände bereits vor dem Kontakt erkennen und lokalisieren. Im Anwendungsfall eines Sensorhandschuhes bieten sich zudem zusätzliche Interaktionsmöglichkeiten durch Gesten (vgl. Böse et al.^[72,122]).

5.4.4 Roboter-Sensorhaut

Die Roboter-Sensorhaut dient der sensorischen Erweiterung (ortsaufgelöste Näherungs- und Druckwahrnehmung) eines robotischen Systems, um dieses mit zusätzlichen

Interaktions- und Sicherheitsfunktionen auszustatten.

5.4.4.1 Aufbau

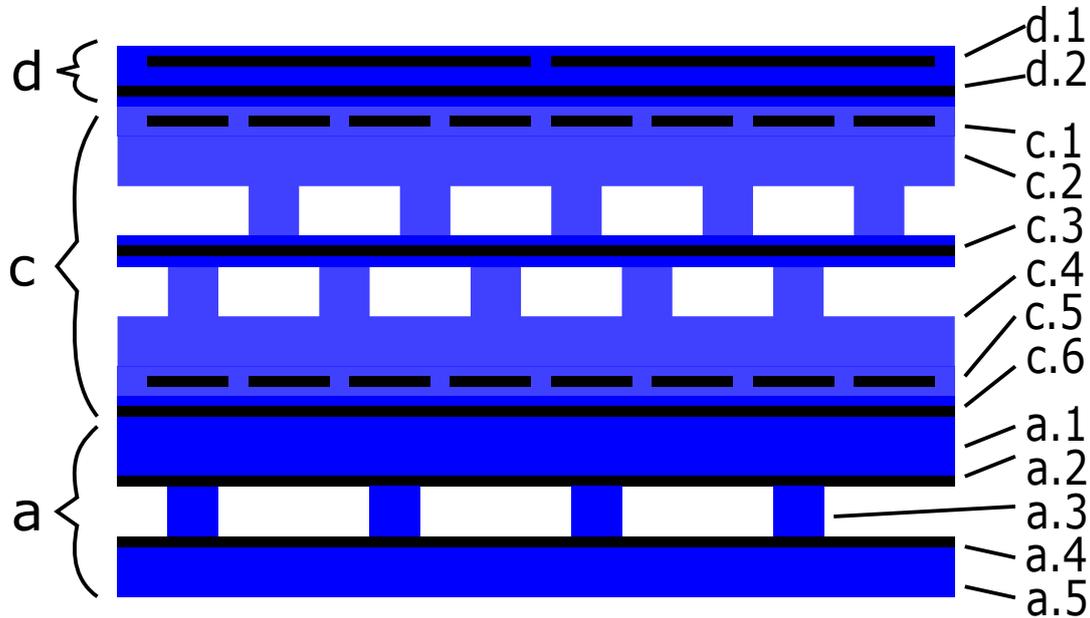


Abb. 5.19: Sensoraufbau (schematischer Querschnitt) der Roboter-Sensorhaut:

Der Sensor besteht insgesamt aus drei Sensorschichten (vgl. [Abbildung 5.19](#) sowie [Abbildung 5.20](#)). Die unterste Schicht (a) dient der binären Kontaktdetektion. Diese basiert zwar auf einem resistiven Prinzip (vgl. Müller^[123]), soll an dieser Stelle jedoch die leichte Kombinierbarkeit von resistiven und kapazitiven Konzepten demonstrieren. Zur Herstellung der Kontaktschicht wurden zwei Noppenprofile mit elektrisch isolierender Trägerfolie (a.1 und a.5), leitfähiger Beschichtung (a.2 und a.4) und elektrisch isolierenden Noppen (a.3) hergestellt. Hierzu wurden zunächst nur die Noppenbohrungen der Gussform mit einem elektrisch nicht leitfähigem Silicon gefüllt. Nachdem die Noppen (a.3) im Ofen ausgehärtet sind, wurde die Gussform im Airbrush-Verfahren mit einer dünnen Schicht aus elektrisch leitfähigem Ruß-Silicon-Komposit (a.2 bzw. a.4) versehen. Abschließend wurde die in der Gussform noch freiliegende Aussparung für die Trägerfolie (a.1 bzw. a.5) mit elektrisch nicht leitfähigem Silicon ausgefüllt, ausgehärtet und das gesamte Profil entformt. Zwischen den Noppen (a.3) und der Trägerfolie (a.1 und a.5) befindet sich folglich eine leitfähige Ruß-Komposit-Schicht (a.2 und a.4). Zwei dieser Profile wurden mit den Noppen zueinander gewendet verklebt. Sowohl das untere als auch das obere Profil wurden an je zwei gegenüberliegenden Ecken mit einer Aderendhülse versehen. Insgesamt weist

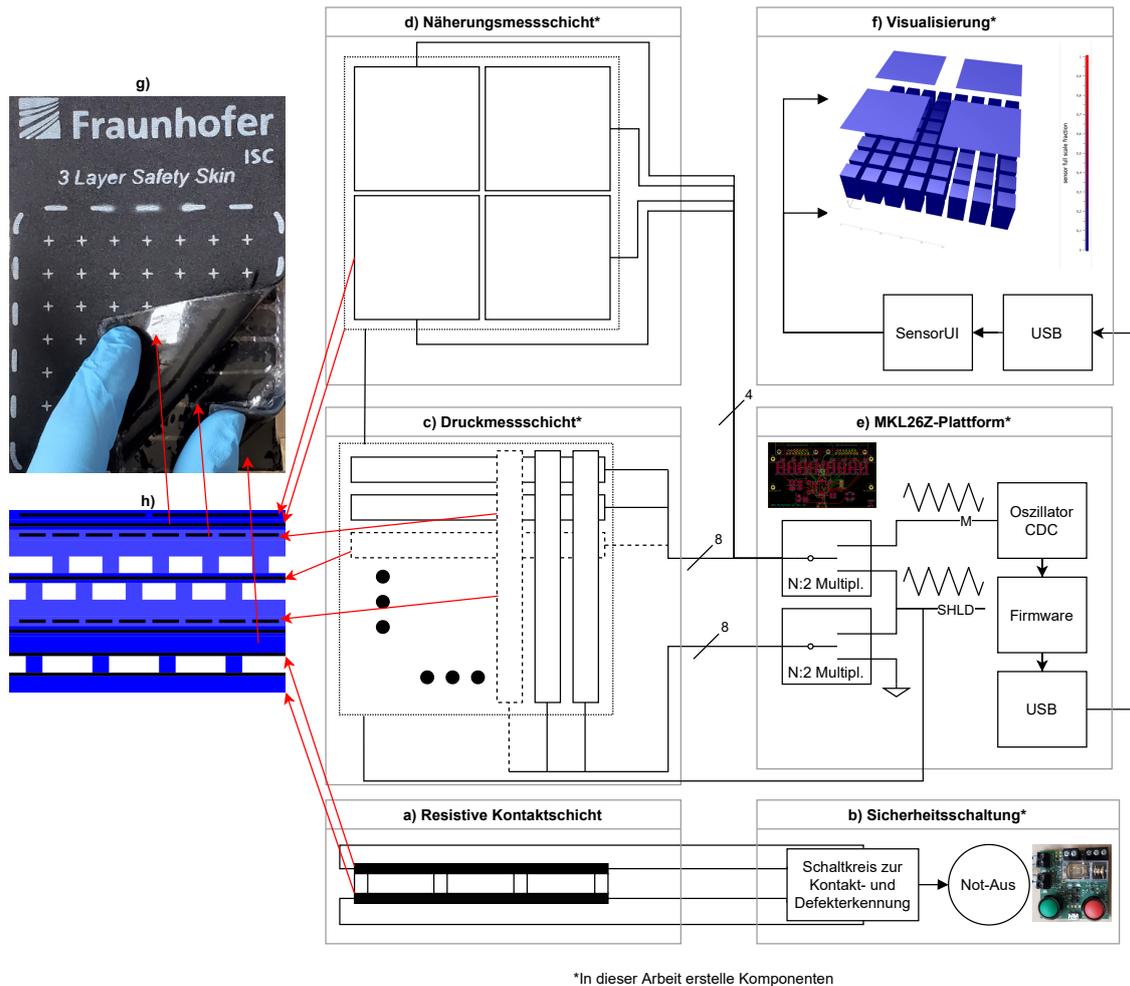


Abb. 5.20: Systemaufbau der Roboter-Sensorhaut: Foto (g) und schematischer Querschnitt des Sensors (h), Schema der Näherungs- (d), Druck- (c) und Kontaktschicht (a) sowie der Mess- (e) und Sicherheitselektronik (b) und Darstellung der Visualisierungssoftware (f).

der Aufbau somit vier Kontakte auf, die eine Messung des elektrischen Widerstandes quer durch die Profile als auch zwischen den Profilen ermöglichen.

Im Grundzustand sind die beiden Trägerfolien elektrisch voneinander isoliert (vgl. [Abbildung 5.20a](#)). Wird der Aufbau durch einen externen Druck jedoch stark genug komprimiert, kommt es zu einer Berührung und damit zu einem elektrischen Kontakt zwischen den beiden Trägerfolien.^[123] Dieser Kontakt kann durch eine einfache, rein in Hardware (ohne programmgesteuerte Bauteile wie etwa Mikrocontroller) aufgebaute Schaltung detektiert werden (vgl. [Abbildung 5.20b](#)). Zudem kann durch eine Überwachung des Durchgangswiderstandes der Trägerfolien auch ein Defekt wie etwa ein Riss in der Folie oder eine unterbrochene Zuleitung erkannt werden. Der Verzicht auf programmgesteuerte Bauteile hat grundsätzlich den Vorteil einer hohen

und leicht verifizierbaren Zuverlässigkeit sowie einer geringen Latenz. Der Ausgang der Schaltung kann beispielsweise direkt mit dem Not-Aus einer Maschine verbunden werden.

Die mittlere Schicht (c) dient der orts aufgelösten Druckmessung. Hierzu wurde eine Matrixanordnung mit je 8 Zeilen- (c.3) und Spaltenelektroden (c.1 und c.5) mit 10 mm Breite und 2 mm Abstand erstellt (vgl. [Abbildung 5.20c](#)). Die Zeilenelektroden (c.3) befinden sich in einer Folie, die zwischen zwei versetzt zueinander angeordneten Noppenprofilen (c.2 und c.4) verklebt ist. Die Spaltenelektroden (c.1 und c.5) befinden sich (in doppelter Ausführung) in Folien, die jeweils auf die Außenseiten der Noppenprofile geklebt sind. Die Zeilenelektroden (c.3) sind folglich sowohl auf der Oberseite als auch auf der Unterseite von den Spaltenelektroden (c.1 und c.5) bedeckt. Hierdurch gelingt eine bessere Abschirmung und eine Verdopplung der Kapazität im Vergleich zu einer einseitigen Anordnung. Die Anbringung der Spaltenelektroden (c.1 und c.5) auf der Innenseite der Profile wäre aus Sicht der Sensorcharakteristik vorteilhafter, da dabei der Abstand zu den Zeilenelektroden (c.3) geringer und damit die Sensorempfindlichkeit grundsätzlich höher wäre. Die dafür notwendige Strukturierung der Elektrodenfolie auf der Noppenseite der Profile ist jedoch fertigungstechnisch wesentlich aufwendiger. Mit dem in [Kapitel 4](#) beschriebenen lasergestützten Strukturierungsverfahren wäre es jedoch in Zukunft möglich, beschichtete Noppenprofile direkt zu strukturieren.

Zur Messung sind die Spaltenelektroden mit einem N:2-Multiplexer verbunden, der einer einzelnen Elektrode entweder das Massepotential (\rightarrow [Referenzelektrode](#)) oder das Shieldsignal (SHLD) (\rightarrow [Neutralelektrode](#)) zuweist. Den einzelnen Zeilenelektroden wird hingegen entweder das Messsignal (M) (\rightarrow [Messelektrode](#)) oder das Schildsignal (\rightarrow [Neutralelektrode](#)) zugewiesen. Damit wird sichergestellt, dass die Messung der kapazitiven Messeinheit (Oszillator CDC) nur die Kapazität zwischen den jeweils aktiven Mess- und Referenzelektroden erfasst. Für eine maximale Ortsauflösung wird nur eine der Zeilenelektroden als Messelektrode und nur ein übereinanderliegendes Paar von Spaltenelektroden als Referenzelektrode ausgewählt. Um die Druckmessschicht (c) von der Kontaktschicht (a) abzuschirmen befindet sich zwischen beiden eine permanente [Neutralelektrode](#) (c.6).

Die oberste Schicht (d) dient der orts aufgelösten Messung einer Objekt-Näherung, insbesondere die Näherung der menschlichen Hand. Hierzu ist die oberste Elektroden schicht (d.1) in vier Einzelfelder unterteilt (vgl. [Abbildung 5.20d](#)). Genau wie bei den Zeilenelektroden wird auch bei der Näherungsmessschicht reihum eine Elektrode als [Messelektrode](#) festgelegt und die übrigen Elektroden dienen jeweils als [Neutralelektroden](#). Zur Abschirmung ist die Näherungsmessschicht (d) ebenfalls durch eine

permanente Neutralelektrode (d.2) von der Druckmessschicht (c) abgeschirmt. Druckmessschicht (c) und Näherungsmessschicht (d) werden von der MKL26Z-Plattform (s. [Abschnitt 5.3.2.2](#)) ausgewertet (vgl. [Abbildung 5.20e](#)). Die Firmware des Mikrocontrollers tastet sequenziell die 64 Einzelkapazitäten der Druckmessschicht (c) und die 4 Einzelkapazitäten der Näherungsmessschicht (d) ab. Die Ergebnisse werden über einen via [USB](#) emulierten seriellen Port (vCOM) an die Visualisierungssoftware (vgl. [Abbildung 5.20f](#)) übertragen.

Die im Rahmen dieser Arbeit implementierte Visualisierungssoftware (SensorUI) dient einerseits der Aufzeichnung der Sensordaten und andererseits der Echtzeit-Betrachtung der Sensorsignale. Hierzu werden die Kapazitätswerte C_n gemäß

$$C_{n,norm} = \begin{cases} 0 & \text{für } \frac{C_n - C_{n,0}}{f_s \cdot C_{n,0}} < 0 \\ 1 & \text{für } \frac{C_n - C_{n,0}}{f_s \cdot C_{n,0}} > 1 \\ \frac{C_n - C_{n,0}}{f_s \cdot C_{n,0}} & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.3)$$

auf das Intervall $[0, \dots, 1]$ normiert, wobei $C_{n,norm}$ der normierte Wert, $C_{n,0}$ der Grundwert (Sensorkapazität im druckfreien Zustand bzw. ohne Objekt in der Messreichweite) und f_s ein Skalierungsfaktor ist. Für eine empfindliche Darstellung des Sensorsignals hat sich $f_s = 0.1$ als geeignet erwiesen. Die Druckmesswerte werden als Quader dargestellt, deren Höhe h_q aus ihrer Grundhöhe $h_{q,0}$ gemäß $h_q = C_{n,norm} \cdot h_{q,0}$ ermittelt wird (vgl. [Abbildung 5.20f](#)). Die Näherungsmesswerte werden als schwebende Quadrate visualisiert, deren Abstand z_q zu den Druckquader-Grundflächen analog aus dem Grundabstand $z_{q,0}$ gemäß $z_q = C_{n,norm} \cdot z_{q,0}$ berechnet wird.

5.4.4.2 Charakterisierung

Zur Charakterisierung des Systems wurde der Roboter mit dem Druck- und Näherungsmessaufsatz ausgestattet (s. [Abschnitt 5.3.1.4](#)).

Ortsaufgelöste Näherungsmessung Zur Ermittlung des Wahrnehmungsbereiches des Sensors für Näherung wurden diejenigen Positionen des Prüfkörpers (bezogen auf die Spitze) ermittelt, bei denen die Kapazitätsänderung der Summe aller vier Näherungselektroden gegenüber dem Grundzustand mindestens 0,15 pF bzw. einer einzelnen Elektrode mindestens 0,04 pF betrug. Hier wurde die niedrigste mögliche Schwelle für die einzelnen Elektroden gewählt, um deren maximalen Wahrnehmungsbereich darzustellen.

Der Wahrnehmungsbereich aller vier Näherungselektroden beträgt im Zentrum des Sensors etwa 50 mm und flacht zum Rand hin deutlich ab, wo er noch etwa 10 mm

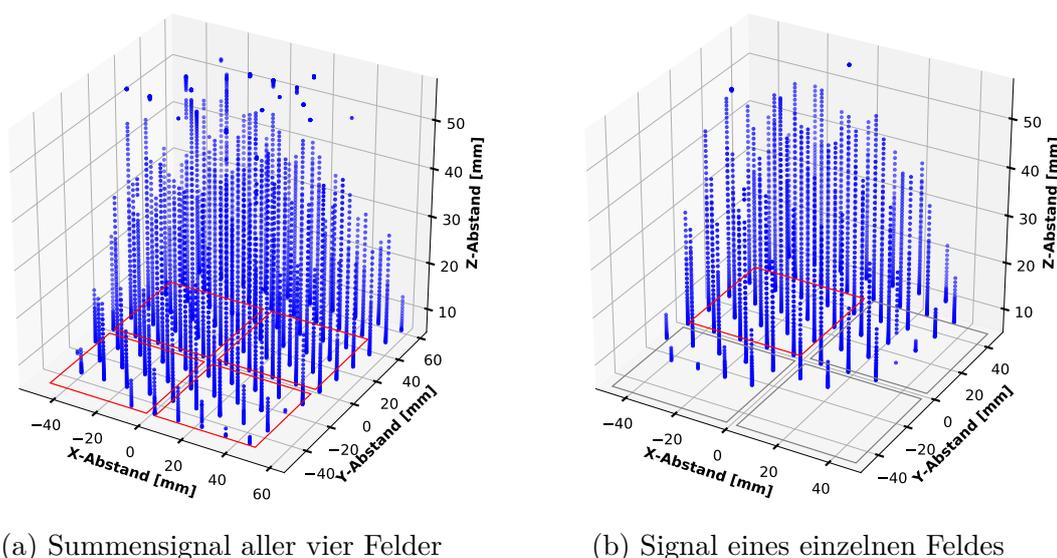


Abb. 5.21: Wahrnehmungsbereich bzw. Positionen des Prüfkörpers, bei denen die Kapazitätsänderung der Summe aller vier Näherungselektroden gegenüber dem Grundzustand mindestens $0,15\text{ pF}$ (a) bzw. einer einzelnen Elektrode (links oben) mindestens $0,04\text{ pF}$ (b) betrug. Die aktiven Näherungselektroden sind jeweils in rot, die inaktiven in grau eingezeichnet.

beträgt (vgl. [Abbildung 5.21a](#)). Für ein Anwendungsszenario wäre es daher wichtig, eine möglichst flächendeckende und etwas über die eigentliche Zielfläche hinausgehende Ausstattung vorzunehmen. Der Wahrnehmungsbereich einer einzelnen Elektrode ist ähnlich groß und geht über die eigentliche Fläche der Elektrode hinaus (vgl. [Abbildung 5.21b](#)). Dennoch kann über die Abflachung des Wahrnehmungsbereiches zum Rand hin eine Lokalisierung durch die Signale der Einzelelektroden erfolgen.

Zur Charakterisierung des Wahrnehmungsbereiches eines einzelnen Drucksensor-Matrixelements wurde eine feine Abtastung des Sensors in 1 mm Schritten entlang einer Linie von der Mitte des Matrixelements $C_{3,3}$ zur Mitte des Matrixelements $C_{5,3}$ mit einer Kraft von $2,5\text{ N}$ vorgenommen (vgl. [Abbildung 5.22a](#)).

Der Wahrnehmungsbereich des zentralen Matrixelements $C_{4,3}$ ist nicht scharf auf die geometrischen Abmessungen des Matrixelements begrenzt, sondern reicht auch etwas in die benachbarten Matrixelemente hinein (vgl. [Abbildung 5.22b](#)). Dies ist vor allem auf die mechanische Kopplung zurückzuführen, durch die der Deformationsradius größer als der Radius der eigentlichen Kontaktfläche zwischen Prüfkörper und Sensor ist. Das Maximum des Signals liegt jeweils in der Mitte der Matrixelemente während das Signal zwischen zwei Matrixelementen noch etwa 50% beträgt.

Die Signalsumme $C_{3,3} + C_{4,3} + C_{5,3}$ bleibt jedoch über den gesamten Abschnitt weit-

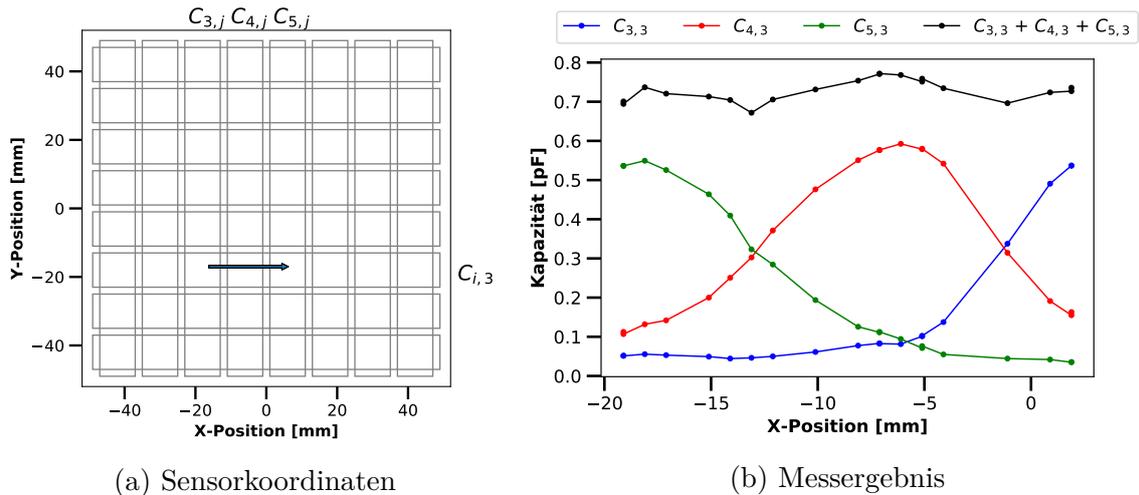


Abb. 5.22: Kapazitätswerte (Differenz zum Grundwert) einzelner Druckmatrixelemente (b) während Abtastung des Sensors mit 2,5 N in Schritten von 1 mm über drei Matrixelemente ($C_{3,3}$, $C_{4,3}$, $C_{5,3}$) hinweg in Pfeilrichtung im Sensorkoordinatensystem (a).

gehend konstant. Somit kann die Position eines Kontaktes zwischen den Matrixelementen durch das Verhältnis der Signale interpoliert werden. Dennoch sollte der Totbereich zwischen den Matrixelementen durch Minimierung der Elektrodenabstände möglichst klein gehalten werden, da damit auch die aktiv wirksame Elektrodenfläche und damit das Messsignal sowie die Abschirmwirkung der äußeren Elektroden maximiert werden.

Ortsaufgelöste Druck- bzw. Kraftmessung Zur Ermittlung der Homogenität der Empfindlichkeit des Sensors wurde jedes einzelne Matrixelement mit einer Kraft von 2,5 N abgetastet. Insgesamt liegt über die Fläche des Sensors verteilt gegenüber dem Mittelwert von 0,5 pF eine Abweichung von bis zu $\pm 50\%$ vor (vgl. [Abbildung 5.23](#)). Umgekehrt konnte auch die minimale detektierbare Kraft der einzelnen Matrixelemente bei einer Kapazitätsänderung von 0,15 pF gegenüber dem Grundwert ermittelt werden (s. [Abbildung 5.24](#)). Im überwiegenden Teil des Sensors liegt die Detektionsschwelle bei etwa 0,1 N.

Beide Darstellungen zeigen jedoch eine inhomogene Verteilung und deutliche Verringerung der Sensitivität am rechten Rand. Dies ist vor allem auf die manuelle Fertigung und Verklebung der einzelnen Teilkomponenten zurückzuführen, wobei relativ hohe Toleranzen auftreten. Durch eine Optimierung bzw. Automatisierung des Herstellungsprozesses sollte sich die Homogenität der Sensorempfindlichkeit daher noch deutlich verbessern lassen. Unabhängig davon können die Abweichungen auch durch

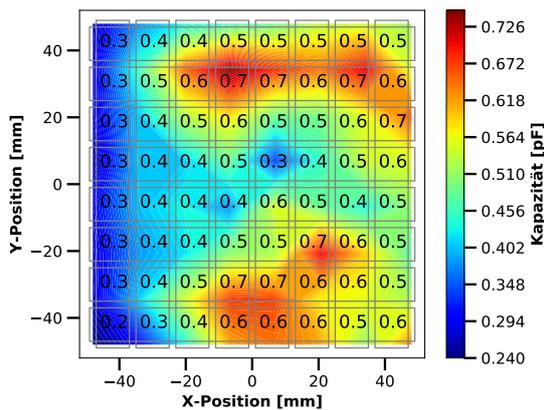


Abb. 5.23: Kapazität der einzelnen Drucksensor-Matrixelemente bei einer Druckkraft von 2,5 N.

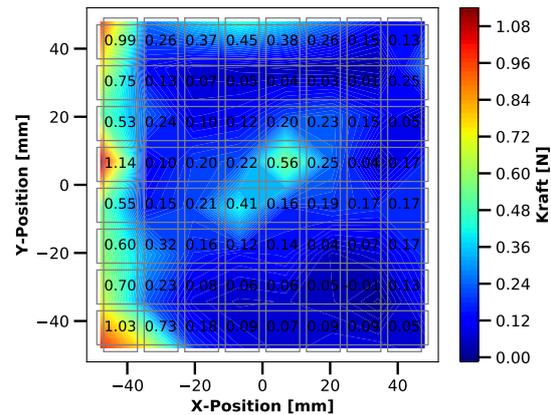


Abb. 5.24: Minimal detektierbare Kraft der einzelnen Drucksensor-Matrixelemente bei einem Schwellwert von 0,15 pF.

eine Kalibrierung softwareseitig ausgeglichen werden.

5.4.5 Ortsaufgelöster KI-Robotergrifer

Der ortsaufgelöster KI-Robotergrifer dient der sensorischen Erweiterung (ortsaufgelöste Druckwahrnehmung) eines robotischen Systems, um dieses mit einem Tastsinn auszustatten.

5.4.5.1 Aufbau

Sensor Der Aufbau des Sensors entspricht dem in [Abschnitt 5.4.2.1](#) gezeigten Konzept. Da jedoch wie in der mittleren Schicht der Roboter-Sensorhaut nur eine Druckmessung erforderlich ist, wurden zur Erhöhung der Empfindlichkeit beide dielektrischen Schichten als [elastisches, isotrop-volumenkompressibles Dielektrikum](#) ausgelegt. Für die Elektrodenfolien wurde eine 100 µm dicke Substratschicht aus Silicon [S5](#) hergestellt und darauf eine 50 µm dicke Elektrodenschicht aus Silicon [S1](#) mit 20 vol% versilberten Kupfer-Flakes appliziert. Jede Elektrodenschicht besteht dabei aus 16 parallelen Einzelelektroden mit einer Breite von 2,5 mm und einem Abstand von 0,5 mm. Ein Drucksensor-Matrixelement ist also 3 mm × 3 mm groß. Als dielektrische Schichten wurden Noppenprofile aus Silicon [S5](#) mit 0,5 mm hohen und 0,5 mm breiten Noppen im Abstand von 2 mm zwischen die Elektrodenfolien geklebt, wobei die Noppen jeweils zur mittleren Elektrodenschicht zeigen und versetzt zueinander angeordnet sind. Die Elektrodenanschlüsse des Sensors wurden anschließend mit ei-

ner galvanischen Kupferschicht versehen und mit den Kontaktpads der PSoC4200L-Plattform verlötet.

System Das Gesamt System besteht neben dem orts aufgelösten Drucksensor aus der der PSoC4200L-Plattform und Steuerungs- und Auswertungssoftware (vgl. [Abbildung 5.25](#)).

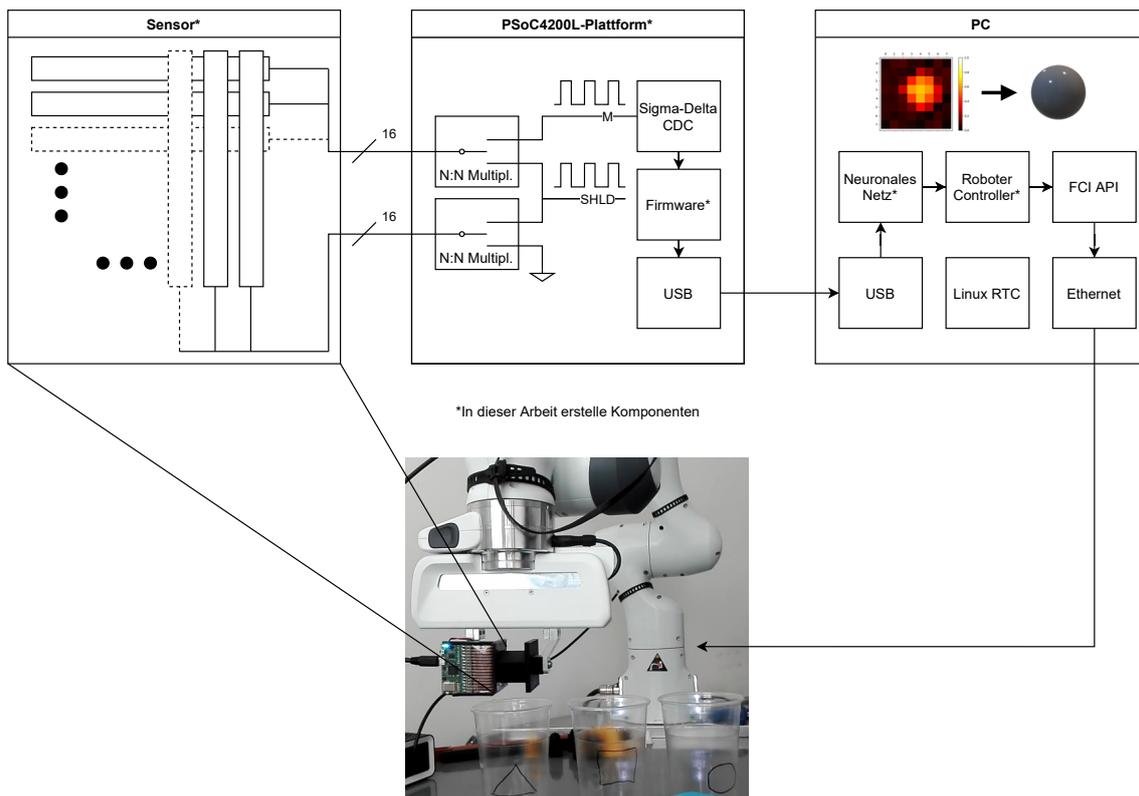


Abb. 5.25: KI-Greifer System bestehend aus dem orts aufgelösten Drucksensor (schematische Zeilen- und Spaltenelektroden rechts), der PSoC4200L-Plattform (Mitte, vgl. [Abschnitt 5.3.2.4](#)) sowie Steuerungs- und Auswertungssoftware (rechts).

Analog zur Druckmessschicht der Roboter-Sensorhaut erfasst der Mikrocontroller die Kapazität der insgesamt 256 Drucksensor-Matrixelemente (s. a. [Abschnitt 2.3.2](#)) und übermittelt die Messdaten an die Steuerungs- und Auswertungssoftware (vgl. [Abschnitt 5.3.1.3](#)). Von dieser Software werden die Sensordaten beim Greifen verschiedener Objekte interpretiert. In einem beispielhaften Anwendungsszenario sortiert der Roboter die Objekte, indem er abhängig vom erkannten Objekt eine definierte Position anfährt und das Objekt in einen dort bereitstehenden Behälter fallen lässt.

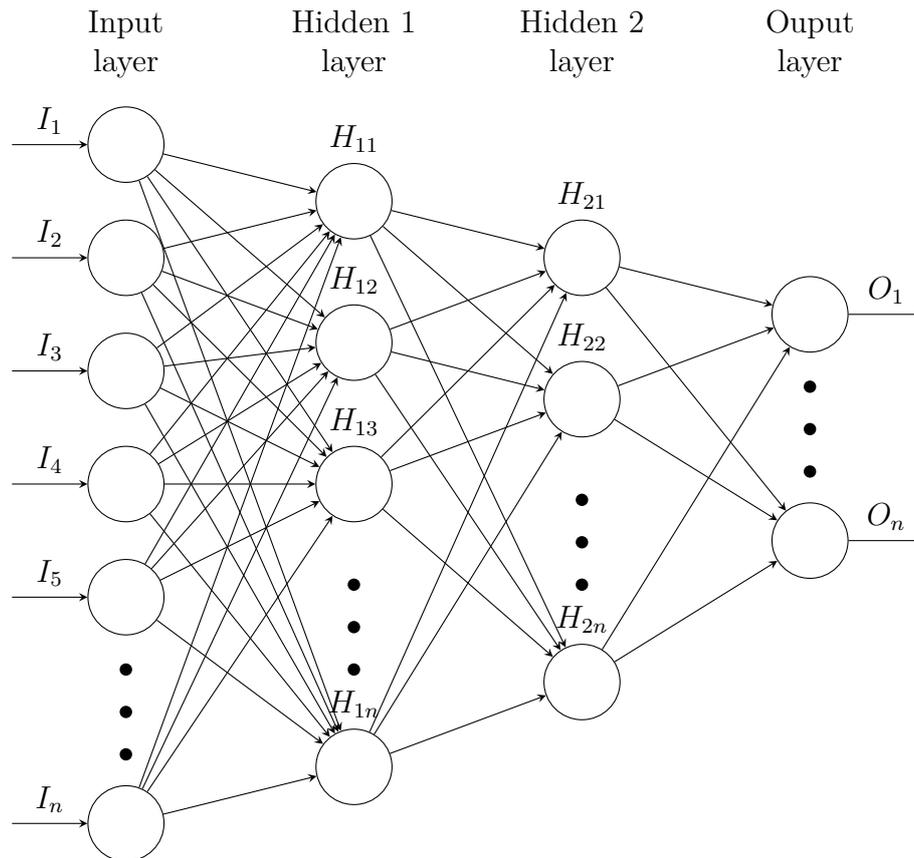


Abb. 5.26: Architektur des Neuronales Netzes mit der Eingabeschicht I ($n = 256$), wobei I_i dem normierten Wert eines einzelnen Drucksensor-Matrixelements entspricht, den inneren Schichten H_1 ($n = 173$) und H_2 ($n = 90$) und der Ausgabeschicht O ($n = 5$), wobei jeder O_i eine einzelne konkrete Geometrie bzw. die Abwesenheit einer konkreten Geometrie (Rauschen) repräsentiert.

5.4.5.2 Datenauswertung und Charakterisierung

Für die Interpretation wurde ein Neuronales Netz mit Hilfe des FANN-Tools^[124] erstellt. Das Neuronale Netz besteht aus insgesamt vier Schichten mit unterschiedlich vielen Neuronen: Eingabeschicht I , innere Schichten H_1 und H_2 und Ausgabeschicht O (vgl. [Abbildung 5.26](#)).

Die Eingabeschicht I besteht entsprechen der Anzahl der Drucksensor-Matrixelemente aus 256 Neuronen. Die inneren Schichten enthalten 173 (H_1) bzw. 90 (H_2) Neuronen. In der Ausgabeschicht O repräsentiert jedes Neuron eine spezifische Geometrie (Dreieck, Zylinder, Quadrat, Kugel) oder eine fehlende eindeutige Geometrie (Rauschen). Entsprechend sind 5 Neuronen vorhanden.

Als Versuchsobjekte wurden mit einem 3D-Drucker vier verschiedene Grundkörper erstellt (s. [Tabelle 5.8](#)). Zur Generierung von Trainingsdaten wurden die Probengeo-

Tab. 5.8: Trainingsobjekte für die KI-Greifer

Bezeichnung	Geometrie
Dreieck	Prisma, gleichseitiges Dreieck mit Kantenlänge 30 mm als Grundfläche
Quadrat	Würfel mit Kantenlänge 30 mm
Kreis	Zylinder mit Durchmesser 30 mm
Kugel	Kugel mit Durchmesser 100 mm

Tab. 5.9: Trainingsparameter und -ergebnisse des Neuronalen Netzes

Parameter	Wert
Trainingsmethode	RPROP
Aktivierungsfunktion	Sigmoid symmetrisch
Fehlerfunktion	\tanh
Bit Fehler Schwellwert ^a	0,35
Trainingsdurchgänge	3000
MSE Training ^b	0,000 270
<i>Bit Fail</i> Training	1
MSE Test ^b	0,001 25

^a Schwellwert für die Abweichung eines Neurons vom Sollwert ab dem es als *Bit Fail* gezählt wird

^b Mittlerer quadratischer Fehler (engl. *mean square error*)

metrien händisch mit ihrer Grundfläche gegen den montierten Drucksensor gedrückt, während das Messsignal des Sensors aufgezeichnet wurde. Dabei wurde sowohl die Position, als auch die Orientierung und der Anpressdruck variiert, um möglichst alle Greifszzenarien abzudecken. Insgesamt wurden 6060 Datensätze erzeugt. Diese wurden zufällig im Verhältnis 9:1 in einen Trainings- (5453) und Testdatensatz (607) aufgeteilt.

Als Fehlerfunktion für das Trainieren des Neuronalen Netzes wurde der *Tangens hyperbolicus tanh* gewählt, da deutliche Abweichungen vom Zielwert damit stärker gewichtet werden als bei einer linearen Fehlerfunktion. Weitere Parameter und die Ergebnisse des Trainings sind in [Tabelle 5.9](#) dargelegt.

Zur Evaluierung des Neuronalen Netzes wurden dem Roboter in einem Feldtest insgesamt 12 Objekte, 3 von jedem Typ, zur Klassifizierung in den Greifer gelegt. Jedes Objekt erzeugt dabei einen charakteristischen Abdruck im Signal des Drucksensors

(vgl. [Abbildung 5.27](#)). Die Software nutzt nun das Ergebnis der Auswertung, um das Objekt im richtigen Behälter abzuwerfen (s. a. Videobeitrag¹ zur *EuroEAP 2019 Challenge*^[6]).

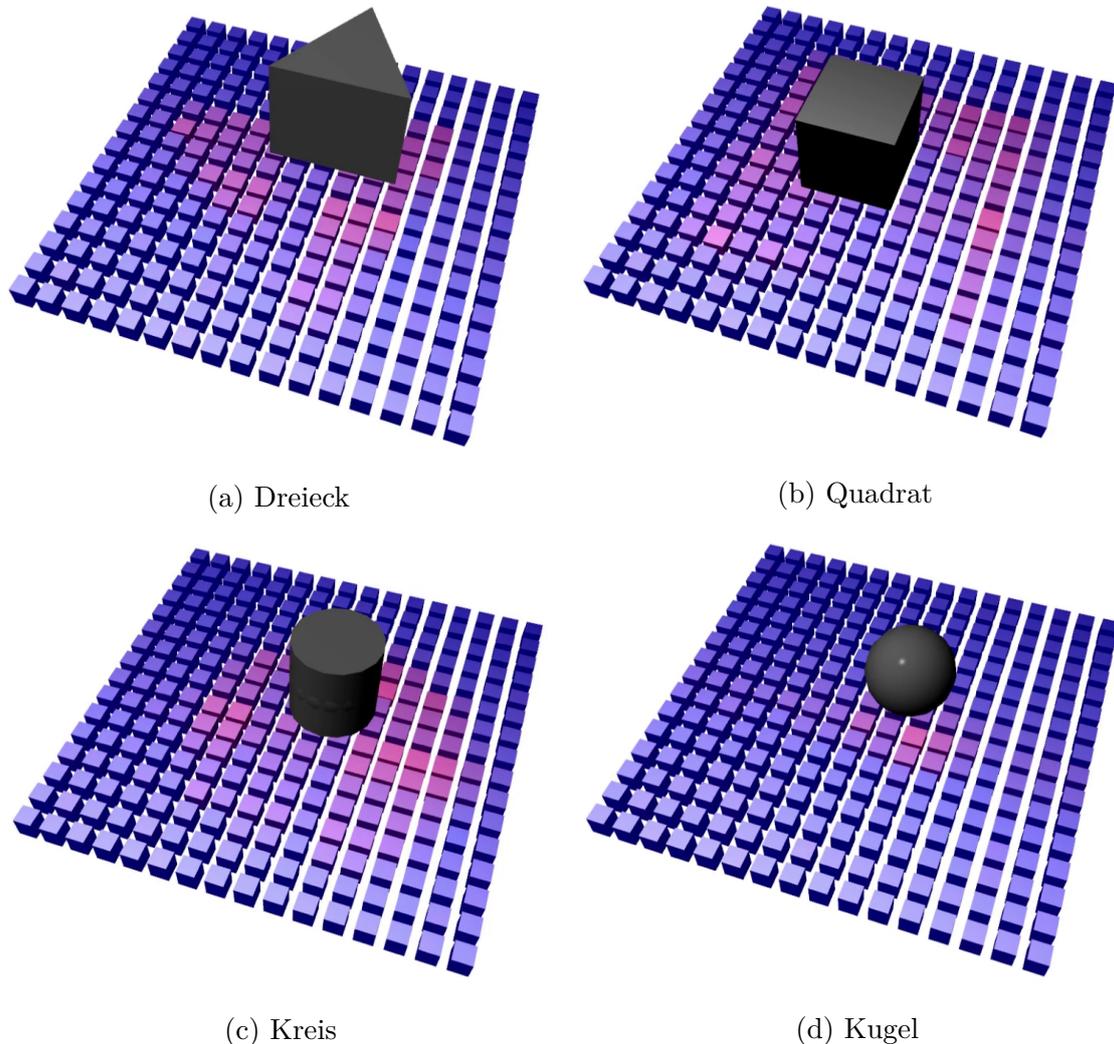


Abb. 5.27: Visualisierung des Signals (blaue Quadermatrix) des orts aufgelösten Drucksensors im Roboter greifer und vom Neuronalen Netz erkannte Objektgeometrien (schwarz): Dreiecksfläche (a), Quadratfläche (b), Kreisfläche (c), gewölbte Kugel­fläche (d). Es wurde nur die Art des Objektes ausgewertet, die Orientierung und Position wurde nicht berücksichtigt.

Die korrekte Klassifizierung gelang dabei in 11 von 12 Fällen, bei einem Objekt musste der Versuch wiederholt werden. Gerade für einfache zu detektierende Geometrien wäre die Verwendung klassischer Bildverarbeitungs­algorithmen ebenso denkbar, wenn nicht sogar wesentlich geeigneter gewesen. Perspektivisch bietet ein Neuronales

¹<https://www.youtube.com/watch?v=vpYzXsI1ojM>

Netz aber den Vorteil, dass die Implementierung des Neuronalen Netzes unabhängig von der Komplexität der zu erkennenden Geometrien ist, während der Aufwand mit klassischer Bildverarbeitung beständig ansteigt.

5.5 Zusammenfassung und Fazit

Es konnte gezeigt werden, wie mit einem einfachen Sensoraufbau mit drei Elektroden und zwei Dielektrikumsschichten durch eine variable Beschaltung der Elektroden eine multimodale Messung von Näherung, Druck und Dehnung erfolgen kann. Dehnungs- und Druckmessung sind zudem auch mit einer orts aufgelösten Messung kombinierbar. In beiden Fällen besteht noch Optimierungspotential durch eine Verringerung der Verformbarkeit des Dielektrikums der Dehnungsmessschicht, um die Querempfindlichkeit zur Druckmessung weiter zu verringern.

Durch drei zusätzliche Elektroden konnte zudem eine 3D-Näherungs- und eine 3D-Kraftmessung erfolgen, die es ermöglicht, Objekte über dem Sensor zu lokalisieren und neben der Normalkraft auch Scherkräfte zu erfassen. Insbesondere bei der Scherkraftmessung sind die Kapazitätsänderungen jedoch sehr gering, so dass sehr hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Messelektronik gestellt werden müssen.

Das Potential für neuartige Lösung für die Arbeitssicherheit konnte anhand einer dreischichtigen Sensorhaut gezeigt werden. Diese kann ein sich näherndes Referenzobjekt ab einer Entfernung von 50 mm erkennen und Kontaktkräfte bereits ab 0,1 N detektieren. Zudem gelang es mit einem Roboter, dessen Greifer mit einem orts aufgelösten Drucksensor ausgestattet wurde, verschiedene einfache Objektgeometrien mit Hilfe eines Neuronalen Netzes zu erkennen.

Auch wenn hierbei mit marktverfügbaren generischen Mikrocontrollern bereits gute Ergebnisse erzielt wurden, besteht noch ein deutliches Potential in der Nutzung von anwendungsspezifischen ICs (ASICs). So könnte etwa die Kinetis[®]-Familie des Herstellers NXP mit einem flexibleren analogen Frontend ausgestattet werden, um externe Schaltungen zu ersetzen. Umgekehrt könnte die PSoC[®]-Familie von Cypress beim Messfrequenzbereich besser an die vergleichsweise hohen Elektrodenwiderstände der DES angepasst werden. Eine zukünftige Marktreife der DES-Technologie würde für die Hardwarehersteller ggf. die notwendigen Anreize schaffen, um eine derartige Weiterentwicklung vorzunehmen.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Dielektrische Elastomersensoren ([DES](#)) basieren auf dem einfachen Prinzip eines elastisch verformbaren Kondensators. In dieser Arbeit wurde gezeigt, wie durch Erweiterung dieses einfachen Prinzips zu komplexen Mehrelektrodensystemen mit einer variablen Beschaltung durch die Messelektronik und die Verwendung von in ihrem Kompressionsverhalten angepassten dielektrischen Schichten multimodale und orts aufgelöste Systeme konstruiert werden können, die über eine Fläche verteilt Druck, Dehnung, Scherung und Näherung quantifizieren und lokalisieren können. Entsprechend wurde eine Betrachtung der Sensorik als Gesamtsystem, sowohl horizontal - vom abstrakten Modell bis zur Fertigung und prototypischen Anwendung - als auch vertikal über die Komponenten Material, Struktur und Elektronik vorgenommen. Dabei wurden in allen Teilbereichen neue Erkenntnisse und Verbesserungen erzielt.

Hierzu wurden eingehend die Grundlagen dielektrischer Sensoren und der Kapazitätsmessung erörtert. Anschließend wurde die allgemeine Vorgehensweise zur Realisierung von [Ortsauflösung](#) und [Multimodalität](#) erläutert und im Zuge dessen eine so bisher noch nicht bestehende Systematik für die Klassifizierung von dielektrischen Schichten und Elektroden(-anschlüssen) vorgenommen.

Im Bereich der Modellierung wurde zunächst die Relevanz nicht-idealen Materialverhaltens für die Sensorapplikation herausgearbeitet. Für die mechanischen Eigenschaften des Dielektrikums stellt dies das anteilig viskose Verhalten dar, das in der Konsequenz zu erhöhten [Kriech-](#) und [Hysteresewerten](#) führt. Für die elektrischen Eigenschaften ist dies vor allem der nicht vernachlässigbare elektrische Widerstand elastischer Elektroden. Durch Erstellung eines Ersatzschaltbildes und anschließender Simulation wurde der Zusammenhang zwischen Sensorkapazität, Messfrequenz und maximalem Elektrodenwiderstand ermittelt und ein Vorgehen zur Fehlerabschätzung etabliert.

Die abgeleiteten Anforderungen bezüglich viskosem Verhalten und elektrischer Leitfä-

higkeit wurden in eine detaillierte Materialcharakterisierung überführt. Hierzu wurde ein spezialisiertes dynamisches elektromechanisches Prüfverfahren für elastische Leiter entwickelt und erstmals die Analytikmethode der nanoskaligen Computertomographie ([nanoCT](#)) auf leitfähige Partikel-Elastomer-Komposite angewendet.

Siliconkomposite mit metallischen Partikeln bieten als Materialbasis für [DES](#) grundsätzlich deutliche Vorteile gegenüber Ruß-Kompositen. So erlaubt die höhere elektrische Leitfähigkeit kleinere Strukturen und/oder höhere Messfrequenzen bzw. -raten und die teilmetallischen Oberflächen eine galvanische Metallisierung und lotbasierte Verbindungstechnologie. In dieser Arbeit konnte jedoch aufgezeigt werden, dass die metallischen Komposite mit versilberten Kupfer-Flakes im Bezug auf Dehnungs- und Dauerfestigkeit den Ruß-Kompositen noch deutlich unterlegen sind. Gestützt durch bildgebende Verfahren wurde ein Erklärungsmodell auf Basis der Partikel-Partikel- und Partikel-Matrix-Wechselwirkung erstellt, das die bessere Performance der rauen Rußpartikel gegenüber den glatten Metall-Flakes erklärt. Insgesamt sind die untersuchten metallischen Komposite noch nicht für die Anwendung als hochleitfähige Elektroden geeignet. Die weitere Erforschung hochleitfähiger dehnungs- und dauerfester Komposite ist daher ein Schlüsselement, um sowohl die [DES](#)-Technologie als auch elastische Elektronik im Allgemeinen deutlich weiterzubringen. Es bedarf daher weiterer Untersuchungen von alternativen Partikelgeometrien und chemischer Modifizierung der Wechselwirkungen.

Bei der Verwendung von Siliconen als dielektrische Schichten wurde der Zusammenhang zwischen Verstärkungsfüllstoffen und dem viskosen Materialverhalten in Form von [Kriech-](#) und [Hystereseneigung](#) untersucht. Neben der Bestimmung des Verlustfaktors wurden hierzu auch Untersuchungen an repräsentativen Noppen- und Folienelementen sowie einem vollständigen Sensorsystem durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass [pyrog. SiO₂](#)-verstärktes Silicon einen höheren viskosen Anteil im Materialverhalten als [VQM-Harz](#)-verstärktes Silicon und unverstärktes Silicon den niedrigsten Wert aufweist. Potential ergibt sich folglich aus der Nutzung spezifisch auf die Verwendung als Dielektrikum zugeschnittener Silicone. Damit können nicht nur primäre, für die Charakteristik der Sensoren relevante Eigenschaften wie das [E-Modul](#), sondern auch sekundäre Eigenschaften wie der viskose Anteil im Materialverhalten angepasst werden, um u. a. [Kriechen](#) und [Hysterese](#) der Sensoren zu minimieren. Da hierbei die Vermeidung von Verstärkungsfüllstoffen eine gewichtige Rolle spielt, liegt die Herausforderung in der Sicherstellung einer noch ausreichend hohen mechanischen Stabilität der Materialien.

Zur Strukturierung und Kontaktierung der Sensorsysteme wurde eine neuartige syn-

ergetische Kombination aus galvanischer Metallisierung und Laserstrukturierung entwickelt. Für die Metallisierung wurde konventionelle Galvanotechnik auf hochleitfähige Metall-Flake-Siliconkomposite angewendet, was in einer hervorragenden mechanischen und elektrischen Verbindung mündete.

Das entwickelte Verfahren zur Strukturierung metallisierter Siliconkomposite und Herstellung komplexer Schichtaufbauten aus leitfähigen und isolierenden Siliconschichten mittels ablativer Laserstrukturierung bietet erhebliche Vorteile gegenüber den bisher etablierten Laborprozessen. Neben einer höheren Präzision und einer weitgehenden Unabhängigkeit von den Materialeigenschaften bietet dieses Verfahren einen hohen Automatisierungsgrad und die Möglichkeit der Skalierung für die Übertragung auf eine industrielle Fertigung. Neben der Herstellung von DES ergibt sich aus der Verbindung der Galvanisierung und Laserstrukturierung die Möglichkeit, Konzepte aus der konventionellen Elektronikfertigung auf elastische Leitermaterialien zu übertragen und damit dehnbare elektronische Systeme zu erstellen. Dies wurde bereits anhand von zwei Demonstratoren, einem verlötbaren dielektrischen Drucksensor und einem dehnbaren, mit konventionellen Elektronikbauteilen bestückten Schaltungsträger demonstriert.

Auch wenn mit der eingesetzten konventionellen Lasergravur- und -schneidanlage bereits gute Ergebnisse erzielt wurden, besteht noch Potential in der Anwendung spezifisch angepasster Anlagen die etwa über alternative Strahlformen zur Abbildung schärferer Konturen, eine engere Integration mit dem Beschichtungsprozess (vgl. Rolle-zu-Rolle-Verfahren) sowie höherenergetischere Laser oder integrierte Reinigungsfunktionen zur Vermeidung von Ablationsrückständen verfügen.

Die Realisierbarkeit der neuen Sensorkonzepte wurde anhand mehrerer neuartiger orts aufgelöster und/oder multimodaler Demonstratoren belegt, für die anwendungsspezifische Hard- und Softwarekomponenten erstellt wurden. Aufbauend auf den abstrakten, zu Beginn erörterten Grundlagen wurden zunächst konkrete Mehrelektrodensysteme mit mehreren Elektroden- und Dielektrikumsschichten entworfen. Die zeitlich variable Zuordnung der Elektroden zu den Anschlüssen der Messelektronik und die mechanischen Eigenschaften der dielektrischen Schichten wurden so aufeinander abgestimmt, dass eine eindeutige Auflösung der Einzelmodalitäten und ggf. ihrer Position möglich war. Auf diesem Weg wurde etwa ein kombinierter 3D-Kraft- und 3D-Näherungssensor, der die Richtung und den Abstand eines sich nähernden Objektes erfassen kann, und ein orts aufgelöster, kombinierter Druck- und Dehnungssensor, der die Druck- und Dehnungsverteilung über eine Fläche separat voneinander erfassen kann, entwickelt und in ihrer Funktion validiert.

Schwächen zeigten sich teilweise noch in der geringen Homogenität orts aufgelöster Systeme und in der Querempfindlichkeit multimodaler Systeme. In beiden Fällen ist dies jedoch vor allem auf den verwendeten manuellen Fertigungsprozess zurückzuführen, der bezüglich Präzision und Reproduzierbarkeit noch unzureichend ist. Diese Mängel können in Zukunft durch die konsequente Anwendung der dargelegten ablativen Laserstrukturierung zur Sensorherstellung beseitigt werden.

Zur Kapazitätsmessung kamen konventionelle Mikrocontroller mit entsprechenden Hardwarefunktionen zum Einsatz. Das für die zeitlich variable Beschaltung der Elektroden notwendige Multiplexing wurde durch ein zusätzliches analoges Frontend bzw. einer spezifischen Anpassung der Mikrocontroller-Firmware erreicht. Weiterhin wurde eine generische Visualisierungssoftware implementiert, die die kabelgebunden oder drahtlos übertragenen Messdaten anzeigt und aufzeichnet, sowie ein Echtzeitcontroller für einen Leichtbau-Roboter, der sowohl die automatisierte Testung der Sensoren als auch die direkte Nutzung der Sensordaten für die Bewegungssteuerung ermöglicht. Mit dem robotischen System konnten die Schaltschwellen einer multimodalen Roboter-Sicherheitshaut und die Interpretation von haptischen Informationen aus einem orts aufgelöst-drucksensitiven Greifer mit Hilfe eines Neuronalen Netzes demonstriert werden.

Bei Verwendung Neuronaler Netze zur Interpretation der Sensordaten muss stets kritisch geprüft werden, ob diese konventionellen Methoden, wie etwa Kantenerkennung mit expliziten Kriterien, im konkreten Anwendungsfall tatsächlich auch überlegen sind. Der in dieser Arbeit entwickelte Demonstrator zeigt jedoch, dass es mit einem Neuronalen Netz möglich ist, Objekte haptisch zu identifizieren, ohne explizite Kriterien festlegen zu müssen. In einer realen Umgebung mit hunderten oder gar tausenden Objekten bzw. Merkmalen wäre diese Umsetzung daher konventionellen Methoden überlegen.

Insgesamt müssen für die technologische Weiterentwicklung die in dieser Arbeit behandelten Einzelaspekte noch stärker verknüpft werden. Idealerweise würden so zukünftig auf Basis der erweiterten theoretischen Konzepte neue komplexe und anwendungsspezifische Sensorsysteme konstruiert und modelliert werden. Für diese Sensorsysteme würden maßgeschneiderte Materialien für die leitfähigen und die dielektrischen Schichten zum Einsatz kommen. Die Fertigung könnte präzise und weitgehend automatisiert durch die gezeigten Verfahren der ablativen Laserstrukturierung und Metallisierung erfolgen. Datenauswertung und Charakterisierung der Sensoren wären durch Maschinelles Lernen und robotische Systeme ebenfalls hochgradig automatisiert möglich. Die resultierenden, fein orts aufgelösten, multimodalen und elastischen

Foliensysteme wären damit ein wichtiger Bausteine zur sensorischen Oberflächenfunktionalisierung für zukünftige interaktive Maschinen, sensitive Roboter und neuartige Medizingeräte.

Anhang A

Verwendete Materialien

Tabelle A.1 führt die untersuchten Partikel auf, während die Silicon-Edukte und Verarbeitungshilfsmittel in Tabelle A.2 gelistet sind.

A.1 Partikel

Tab. A.1: Leitfähige Partikel

Kurzbezeichnung	Hersteller	Herstellerbezeichnung	Beschreibung	Massenanteile	Mittlere Größe
CuAgF1044000 ^[125]	Eckart	eConduct 044000	Versilberte Kupfer-Flakes	60 % Cu, 40 % Ag	4 µm x 100 nm
Cb250P ^[126]	Imerys	Ensaco [®] 250P	Leitruß	100 % C (Ruß)	2 µm

A.2 Siliconeducte

Tab. A.2: Silicon Edukte

Kurzbezeichnung	Hersteller	Herstellerbezeichnung	Beschreibung	Viskosität [mPas]	[mmol/g]
RT625A ^[127]	Wacker	Elastosil [®] RT625 A	Kommerzielles 2K Silicon	25 000	-
RT625B ^[127]	Wacker	Elastosil [®] RT625 B	Kommerzielles 2K Silicon	900	-
BRB2000 ^[128]	BRB	Vinyl Fluid 2000 cSt	Divinyl-PDMS	2000	0,11
RV5000 ^[129]	Evonik	Polymer RV 5000	Kamm-Vinyl-PDMS	5000	0,4
VS100000 ^[39]	Evonik	Polymer VS 2000	Divinyl-PDMS	100 000	0,02
MV2000 ^[130]	Evonik	MV2000	Monovinyl-PDMS	2000	0,06
MOD705 ^[40]	Evonik	Modifier 705	SiH-term.-PDMS	500	0,16
CL120 ^[41]	Evonik	Crosslinker 120	SiH-Crosslinker	500	1,1
TR50 ^[131]	Wacker	Powersil [®] Fluid TR 50	Silicon-Öl	40	-
AB134321 (RT) ^[132]	ABCR	AB 134321	Platin-Katalysator	-	-
RtKat	-	-	10 % AB134321 in TR50	-	-
InhDVS ^[130]	Evonik	Inhibitor DVS	Divinylsiloxan	4	10,7
ButAc	Kremer Pigmente	n-Butylacetat	Lösungsmittel	-	-

A.3 Siliconrezepturen

Tabelle A.3 listet alle verwendeten Silicone und deren mechanische Eigenschaften auf. Die mechanischen Eigenschaften wurden per Fit von Gleichung 2.5 (E-Modul) bzw.

Gleichung A.1 (Mooney-Rivlin c_1 und c_2) aus den Spannungs-Dehnungskurven (s. Abbildung 3.19) ermittelt.

Tab. A.3: Silicon Rezepturen

Kurzbezeichnung	Bestandteile (Massenanteile)	E-Modul [kPa]	c_1^a [kPa]	c_2^a [kPa]
S1 (WS2-6)	33,03 % VS100000 46,24 % MV2000 17,34 % MOD705 3,36 % CL120 0,04 % InhDVS	108 ± 2	$21,2 \pm 0,8$	11 ± 1
S2 (D2)	86,70 % BRB2000 5,70 % MOD705 7,60 % CL120	$435,0 \pm 0,6$	$109,6 \pm 0,3$	5 ± 5
S3 (D2H1)	54,45 % RV5000 19,52 % MOD705 26,03 % CL120	1345 ± 10	421 ± 6	-122 ± 9
S4 (S8-2)	64,75 % VQM906 25,06 % MOD705 10,19 % CL120	584 ± 2	227 ± 4	-128 ± 6
S5 (RT 625)	90 % RT625A 10 % RT625B	477 ± 8	83 ± 2	68 ± 3

^a Mooney-Rivlin Parameter gemäß Gleichung A.1;

$$\sigma = 2 \cdot (c_1 + c_2 \cdot \lambda^{-1}) \cdot (\lambda - \lambda^{-2}) \quad (\text{A.1})$$

Die Spannungs-Dehnungs-Kurven, aus denen auch die in Tabelle A.3 mechanisches Fit-Parameter stammen, sind in Abbildung 3.19 gezeigt.

Materialglossar

- S1 Weiches, unverstärktes Silicon (s. a. [Tabelle A.3](#)) 44, 45, 57–59, 63, 68, 105, 110, 113, 124, 136
- S2 Mittelhartes, unverstärktes Silicon; Rezeptur ist in [Tabelle A.3](#) definiert 28, 32, 35, 38, 39, 44, 45, 57, 59, 60, 63, 64, 68, 76, 78, 79, 136
- S3 Hartes, unverstärktes Silicon (s. a. [Tabelle A.3](#)) 44, 45, 59, 63, 136
- S4 Mittelhartes, VQM-Harz-verstärktes Silicon (s. a. [Tabelle A.3](#)) 28, 32, 35, 39, 136
- S5 kommerzielles mittelhartes, pyrog. SiO_2 -verstärktes Silicon (s. a. [Tabelle A.3](#)) 28, 32, 35, 39, 44, 45, 76, 78, 79, 105, 110, 113, 124, 136

Glossar

***CO*₂-Laser**

Gaslaser mit *CO*₂ als Medium und einer Wellenlänge von 9,4 bis 10,6 μm [77](#), [79](#), [80](#), [82](#), [83](#), [85–87](#)

AD7142

Kapazität-Digital-Wandler [101](#)

AD7147

Kapazität-Digital-Wandler [101](#)

Agglomerat

Lockere, d.h. redispergierbare Zusammenlagerung von Primärteilchen zu einem größeren Verband, etwa durch Van-der-Waals-Kräfte oder mechanische Verhakung [27](#), [35](#), [58](#), [61](#)

Aggregate

Feste, d.h. nicht redispergierbare Zusammenlagerung von Primärteilchen zu einem größeren Verband, etwa durch kovalente Bindungen oder Verschmelzen [27](#)

BLE

Energiesparsame Variante von [BT](#) [104](#), [145](#)

Bluetooth

Funkübertragungsstandard für kurze Distanzen [103](#), [145](#)

CY8C4014

Mikrocontroller mit integriertem Kapazität-Digital-Wandler [101](#)

CY8C4045

Mikrocontroller mit integriertem Kapazität-Digital-Wandler [101](#)

CY8C4248

Mikrocontroller mit integriertem Kapazität-Digital-Wandler [101](#), [102](#)

CY8C4257

Mikrocontroller mit integriertem Kapazität-Digital-Wandler [101](#)

CY8C5888LTI-LP097

Mikrocontroller mit Analog-Frontend zur Widerstandsmessung [48](#)

CYBLE-214015

Bluetooth-Mikrocontroller mit integriertem Kapazität-Digital-Wandler [101](#), [103](#)

Degrees of Freedom

Anzahl der voneinander unabhängigen Bewegungsmöglichkeiten eines mechanischen Systems [97](#), [145](#)

DG4053

3-fach 1:2 Multiplexer mit geringer Kanalkapazität [101](#)

Dielektrikum

Volumen, das von einem elektrischen Feld durchsetzt ist. [7](#), [8](#), [15](#)

Eigenkapazität

Kapazität eines Leiters (Messleiter) bezüglich eines weiteren Leiters (Referenzleiter) mit konstantem Potential, in der Regel Massepotential, wobei sich der weitere Leiter auch im unendlichen Abstand befinden kann. Zur Messung wird i.d.R. das Potential des Messleiters zeitlich variiert und die daraus resultierende Ladungsverschiebung am Messleiter selbst betrachtet. [6](#), [101](#)

elastisches, anisotrop-volumenkompressibles Dielektrikum

Elastisches, volumenkompressibles Dielektrikum mit anisotropem Verformungswiderstand, z.B. durch gezielte Strukturierung wie längliche Noppen, dünne Lamellen, etc. [8](#), [11](#), [104](#), [112](#), [113](#)

elastisches, isotrop-volumenkompressibles Dielektrikum

Elastisches, volumenkompressibles Dielektrikum mit isotropem Verformungswiderstand, z.B. durch Gaseinschlüsse, Poren, Schaumstrukturen, kurze Noppen, Taschen etc. [8](#), [10](#), [14](#), [15](#), [103–105](#), [109](#), [110](#), [112](#), [113](#), [124](#)

elastisches, volumeninkompressibles Dielektrikum

Elastisches, volumeninkompressibles Dielektrikum, in der Regel eine durchgängige Elastomerschicht bzw. ein Elastomervollvolumen [8](#), [9](#), [14](#), [15](#), [103–106](#), [109](#), [110](#)

Elektrode

Elektrischer Leiter innerhalb oder auf dem dielektrischen Körper inklusive elektrischer Verbindung zum Multiplexer [6](#), [7](#), [15](#), [19](#)

Faserlaser

Festkörperlaser mit einer dottierten Glasfaser als Medium [77](#), [79](#), [83](#), [85–87](#)

Gegenkapazität

Kapazität eines Leiters (Messleiter) bezüglich eines weiteren Leiters (Referenzleiter) mit zeitlich variierendem Potential. Zur Messung wird i.d.R. der Potentialverlauf des Referenzleiters vorgegeben und die resultierende Ladungsverschiebung am Messleiter betrachtet. Der Referenzleiter wird daher auch als Sender und der Messleiter als Empfänger bezeichnet. [6](#), [101](#)

Hysterese

Abhängigkeit der Verformungsantwort eines Materials von der vorhergehenden Verformung [18](#), [31](#), [32](#), [131](#)

Kapazitive Messeinheit

Halbleiterschaltung, die der direkten oder indirekten Bestimmung einer elektrischen Kapazität dient, z. B. durch Messen einer Zeit, Spannung oder Ladungsmenge. Häufig genutzte Komponenten hierfür sind Konstantstromquellen, Analog-Digital-Wandler, Komparatoren, Operationsverstärker, Referenzkapazitäten, Schwingkreise und Taktsignale. [11](#), [12](#), [14](#), [141–143](#)

Kriechen

Irreversible Verformung eines Materials unter konstanter mechanischer Spannung [18](#), [32](#), [33](#), [130](#), [131](#)

MCR 502

Rheometer des Herstellers Anton Paar, Österreich [144](#), [146](#)

Messelektrode

Eine oder mehrere Elektroden, deren Kapazität gegenüber einer oder mehreren Referenzelektroden Gegenstand der Messung ist. Bei einer Eigenkapazitätsmessung kann statt einer Referenzelektrode auch ein Referenzleiter in der Umgebung des Sensors (unendlich entferntes Massepotential, elektrisch leitfähige Körper) herangezogen werden. Bei einer Eigenkapazitätsmessung wird das Potential der Messelektrode(n) i.d.R. durch eine niederohmige Spannungsquelle zeitlich variiert und aktiv betrieben. Bei einer Gegenkapazitätsmessung wird/werden die Messelektrode/Messelektroden i.d.R. passiv betrieben. [7](#), [12–15](#), [100](#), [103–106](#), [108](#), [109](#), [113](#), [120](#), [141](#)

Messkonfiguration

Konkrete Zuordnung jeder Elektrode des Sensors zu höchstens einem Elektrodentyp ausgewählt aus Messelektrode, Referenzelektrode und Neutralelektrode. [106](#), [109](#), [113](#), [153](#)

Messsignal

Potentialverlauf, der an der [Messelektrode](#) anliegt. [14](#), [141](#)

Messsignalanschluss

Anschluss der [kapazitiven Messeinheit](#) der das [Messsignal](#) ausgibt. [14](#)

MK20DX

Mikrocontroller mit integriertem Kapazität-Digital-Wandler [101](#)

MKL15Z

Mikrocontroller mit integriertem Kapazität-Digital-Wandler [101](#)

MKL26Z

Mikrocontroller mit integriertem Kapazität-Digital-Wandler [101](#)

Modalität

Externe vorgegebene Messgröße, die durch einen Sensor erfasst werden kann. Dazu zählen u.a. geometrische Größen (Abstände, Flächen, Verformungen), mechanische Größen (Kräfte, mech. Spannung, Druck), Temperatur und Wassergehalt [3](#)

Multimodalität

Eigenschaft eines Sensors, mehrere Modalitäten erfassen zu können [xi](#), [3](#), [4](#), [13](#), [14](#), [130](#)

Multiplexer

Schaltmechanismus, der im Gegensatz zu einer festen Verdrahtung eine veränderliche Zuordnung von einer Signalgruppe zu einer weiteren Signalgruppe ermöglicht, im konkreten Fall die Elektroden des Sensors mit den Signalanschlüssen der Messeinheit(en) [13](#)

Nanoskalige Computertomographie

Hochaufgelöstes Tomographieverfahren das Auflösungen im Bereich von 100 nm ermöglicht [xii](#), [41](#), [52](#), [146](#)

Neutralelektrode

Eine oder mehrere Elektroden, deren Potential bzw. zeitlicher Potentialverlauf derart beschaffen ist, dass sie explizit keine Referenzelektroden darstellen. Bei einer Eigenkapazitätsmessung befinden sich diese i.d.R. auf dem (annähernd) gleichen Potential wie die Messelektrode(n), wodurch zwischen beiden keine Ladungsverschiebung auftritt. Bei einer Gegenkapazitätsmessung befinden sich diese i.d.R. auf einem zeitlich konstanten Potential, so dass die damit verbundene konstante Ladungsverschiebung auf der/den Messelektrode/Messelektroden von der zeitlich veränderlichen Ladungsverschiebung durch die Referenzelektroden unterscheidbar bleibt. Unterliegt die Kapazität zwischen Neutral- und Messelektroden ebenfalls zeitlichen Änderungen, so bleibt die Unterscheidbarkeit der Ladungsverschiebung auf den Messelektroden noch durch eine i.d.R. um Größenordnungen schnellere Potentialänderung auf den Referenzelektroden gegeben. [7](#), [12](#), [14](#), [15](#), [101](#), [103](#), [104](#), [106](#), [108](#), [109](#), [113](#), [120](#), [142](#)

Neutralsignal

Potentialverlauf, der an der [Neutralelektrode](#) anliegt. [14](#), [142](#)

Neutralsignalanschluss

Anschluss der [kapazitiven Messeinheit](#) der das [Neutralsignal](#) ausgibt. [14](#)

Oberflächenmontage

Montagetechnik, bei der elektronische Bauelemente mittels lötfähiger Anschlussflächen direkt auf eine Leiterplatte gelötet werden (s.a. [Oberflächenmontiertes Bauelement](#)) 143

Oberflächenmontiertes Bauelement

Oberflächenmontiertes elektronisches Bauelement das mittels lötfähiger Anschlussflächen direkt auf eine Leiterplatte gelötet wird (s.a. [Oberflächenmontage](#)) 57, 143, 146

Ortsauflösung

Eigenschaft eines Sensors, eine Aussage über den Verlauf einer oder mehrerer Modalitäten innerhalb eines Volumens, einer Fläche oder entlang einer Linie treffen zu können [xi](#), 3, 4, 13, 130

Perkolationsnetzwerk

Anordnung von Partikeln in einer Matrix wodurch zumindest abschnittsweise längere durchgängige Partikelpfade gebildet werden. Diese Pfade können einen erheblichen Einfluss auf Compositeigenschaften wie Mechanik und Leitfähigkeit ausweisen. 35

Referenzelektrode

Eine oder mehrere Elektroden, gegenüber denen die Kapazität der Messelektroden erfasst wird. Bei einer Eigenkapazitätsmessung ist deren Potential i.d.R. zeitlich konstant auf Massepotential. Bei einer Gegenkapazitätsmessung ist deren Potential zeitlich variabel und durch eine niederohmige Spannungsquelle definiert. 7, 12–15, 101, 103, 104, 106, 108, 109, 113, 120, 143

Referenzsignal

Potentialverlauf, der an der [Referenzelektrode](#) anliegt. 14, 143

Referenzsignalanschluss

Anschluss der [kapazitiven Messeinheit](#) der das [Referenzsignal](#) ausgibt. 14

Relaxation

Änderung der mechanischer Spannung innerhalb eines Materials unter konstanter Verformung 18, 31, 33

Schmelzschtichtung

Additives Fertigungsverfahren, bei dem das Werkstück schichtweise aus einem Strang aus schmelzbarem Polymer oder Metall aufgebaut wird [74](#), [145](#)

Selektives Lasersintern

Additives Fertigungsverfahren, bei dem das Werkstück durch Sintern mit einem Laser schichtweise aus einem Pulverbett aus schmelzbarem Polymer oder Metall aufgebaut wird [74](#), [146](#)

Stereolithografie

Additives Fertigungsverfahren, bei dem das Werkstück durch lokales, lichtinduziertes Vernetzen aus einem flüssigen Polymer aufgebaut wird [74](#), [146](#)

TCP/IP

Sammlung von Netzwerkprotokollen zur Datenübertragung im Internet, häufig eingesetzt sind TCP und UDP in der Transport-, IP in der Vermittlungs- und Ethernet sowie WLAN in der Netzzugangsschicht [99](#)

Tintenstrahldruck

Additives Fertigungsverfahren, bei dem das Werkstück aus einzelnen Tröpfchen einer Polymerlösung bzw. -suspension hergestellt wird [75](#), [146](#)

USB

Serielles Bussystem zur Verbindung eines Computers mit externen Geräten [102](#), [146](#)

UXF12/EXT

Dehnaufsatz für das [MCR 502](#) [146](#)

Akronyme

Bluetooth Low Energy	BLE 104
BT	Bluetooth 103 , 138
CpPtMe	<i>1-Methyl-1,2,3,4,5-cyclopentanpentayl-trimethylplatin</i> 25 , 26 , 150
DEA	Dielektrische Elastomer Aktoren 28
DEMA	Dynamische elektromechanische Analyse 48 , 66
DES	Dielektrische Elastomer Sensoren 1–4 , 8 , 18 , 22 , 24 , 28 , 38 , 41 , 70 , 72 , 95–97 , 129–132
DMF	<i>Dimethylfumarat</i> 26 , 27 , 150
DMM	<i>Dimethylmaleat</i> 26 , 27 , 150
DOF	Degrees of Freedom 97
E-Modul	Elastizitätsmodul (Realteil des komplexen Elastitätsmoduls) 29 , 38 , 47 , 59 , 131 , 153
FFF	Schmelzschiichtung, von engl. <i>fused filament fabrication</i> 74 , 75
HF-RFID	Identifizierung mit Hilfe elektromagnetischer Wellen mit Kurzwellen-Frequenzen, von engl. <i>high-frequency radio-frequency identification</i> 93
HF-RFID	Identifizierung mit Hilfe elektromagnetischer Dezimeterwellen, von engl. <i>ultra-high-frequency radio-frequency identification</i> 93
IC	Integrierter Schaltkreis, von engl. <i>integrated circuit</i> 11 , 101 , 129 , 153

Inkjet	Tintenstrahldruck 75
Karstedt-Katalysator	<i>Platin-Divinyl-tetramethyldisiloxan-Komplex</i> 25 , 26 , 44 , 150
LED	Leuchtdiode, von engl. <i>light-emitting diode</i> 43 , 57 , 79 , 80 , 88
LF-RFID	Identifizierung mit Hilfe elektromagnetischer Wellen mit Langwellen-Frequenzen, von engl. <i>low-frequency radio-frequency identification</i> 93
nanoCT	Nanoskalige Computertomographie xii , 41 , 43 , 52–55 , 57 , 65 , 66 , 70 , 131 , 151 , 153
NFC	Nahfeldkommunikation, von engl. <i>near field commu- nication</i> 93
PDMS	Polydimethylsiloxan 25
PtAcAc	<i>Platin(2+)-bis[(2Z)-4-oxo-2-penten-2-olat]</i> 25 , 26 , 150
pyrog. SiO_2	pyrogenes Siliciumdioxid 26–28 , 32 , 35 , 38 , 39 , 41 , 70 , 131 , 137 , 150
REM	Rasterelektronenmikroskop xii , 43 , 51 , 52 , 58 , 70 , 77 , 84 , 92
Rheometer MCR 502	Rheometer, (s. a. MCR 502) 29–31 , 80
SL	Stereolithografie 74 , 75
SLS	Selektives Lasersintern, von engl. <i>selective laser sin- tering</i> 74 , 75
SMD	Oberflächenmontiertes Bauelement, von engl. <i>surface-mounted device</i> 57 , 80 , 93
USB	Universal Serial Bus 102 , 103 , 121
UXF12/EXT	Dehnaufsatz, (s. a. UXF12/EXT) 31 , 80

VQM-Harz vinyl-funktionalisiertes Polysiloxan bestehend aus SiO_4 - (Q) und Me_3SiO (M) Bausteinen [26–28](#), [32](#), [35](#), [38](#), [39](#), [41](#), [70](#), [131](#), [137](#), [150](#)

Symbolverzeichnis

A	Elektrodenfläche 9
a	Auslenkung 32, 33
ΔA	Änderung der Elektrodenfläche 8–10
ΔA_{eff}	Änderung der effektiven Elektrodenfläche 9–11
A_q	Querschnittsfläche 51
A_{q_0}	Grundquerschnittsfläche im unverformten Zustand 50, 51
b	Breite 51
b_0	Grundbreite im unverformten Zustand 50, 51
C_s	Sensorkapazität 8, 9, 11, 12, 19–22
K	Kriechwert 33
d	Elektrodenabstand 9
Δd	Änderung des Elektrodenabstandes 8–10
E	Elastizitätsmodul 16, 29, 47, 59
ϵ	Relative Dehnung 16, 17, 47, 48, 50, 51
$\Delta\epsilon$	Relative Dehnungsänderung 10
ϵ_0	Elektrische Feldkonstante 9
ϵ_r	Permittivität des Dielektrikums 9
$\Delta\epsilon_r$	Änderung des Permittivität des Dielektrikums 8–10
f_m	Messfrequenz 11, 12, 20–22
G'	Speichermodul 29
G''	Verlustmodul 29, 35
G^*	Komplexer Schubmodul 29

h	Dicke 51
h_0	Grunddicke im unverformten Zustand 50, 51
H	Hysteresewert 32
H_{abs}	Absoluter Hysteresewert 33
H_{rel}	Relativer Hysteresewert 33
K_{abs}	Absoluter Kriechwert 33
$f_{0 \rightarrow a_{max}}$	Belastungskurve 32, 33
K	Kompressionsmodul 29
K_{rel}	Relativer Kriechwert 33
$f_{a_{max} \rightarrow 0}$	Entlastungskurve 32, 33
l	Länge 50, 51
l_0	Grundlänge im unverformten Zustand 47, 48, 50, 51
Δl	absolute Längenänderung 15, 50
Δp	Druckänderung 10, 15
ν	Poissonzahl 8, 29
R	elektrischer Widerstand 20, 48, 50
R_p	Isolations- oder paralleler Widerstand 19
R_s	Anschluss- oder serieller Widerstand 19–22
ρ	spezifischer Widerstand 50
σ_{mech}	Mechanische Spannung 16, 17, 31, 38
σ	spezifische Leitfähigkeit 50, 51
$\tan \delta$	Verlustfaktor 29
$\Delta \tau$	Scherdeformationsänderung 10
V	Volumen 51
V_0	Grundvolumen im unverformten Zustand 51
z	Objektabstand 14
Δz	Objektabstandsänderung 10

Abbildungsverzeichnis

2.1	Sensorprinzipien für einzelne Modalitäten	10
2.2	Sensorprinzipien für multimodale Messung	12
2.3	Schematische Skizze eines orts aufgelösten Matrix-Sensors	13
2.4	Sensorprinzipien für multimodale Messung	14
2.5	Schema der mechanischen Modellierung	16
2.6	Rheologische Modelle	17
2.7	Schema der elektrischen Modellierung	18
2.8	Einfaches Sensor-Ersatzschaltbild	19
2.9	Ersatzschaltbilder für dielektrische Sensoren	20
2.10	Simulationsergebnisse der Modelle	21
2.11	Messbereich Mikrocontroller-Familien	22
3.1	Strukturformel von vinyl-terminiertem PDMS (1a) ^[39] , Kettenverlängerer (1c) ^[40] und Vernetzer (1b) ^[41]	25
3.2	Valenzformeln von Karstedt-Katalysator (2a), PtAcAc (2b) und CpPtMe (2c)	26
3.3	Strukturformel von DMF (3a) und DMM (3b)	27
3.4	Strukturformel von pyrog. SiO_2 (4a) ^[43] und VQM-Harz (4b) ^[133]	28
3.5	Siliconprobenherstellung	30
3.6	Methoden viskoelastische Materialeigenschaften	31
3.7	Komplexes Schubmodul und Verlustfaktor verschiedener Silicone	34
3.8	Druckversuche der unterschiedlichen Silicone	36
3.9	Auswertung der Druckversuche	37
3.10	Dehnungs-Spannungskurven der Silicone	39
3.11	Auswertung der Dehnungs-Spannungskurven	40
3.12	Auswertung der Sensorkennlinien	40
3.13	Schematische Darstellung der Herstellung der Substrate und der Kompositschichten	46
3.14	Schematischer Aufbau der Rotationsdehnung	47
3.15	Messprotokoll der Charakterisierung	49

3.16	Präparierte nanoCT Probe	52
3.17	Messmethode nanoCT	53
3.18	REM-Aufnahmen des Ruß-Komposits und des Metall-Flake-Komposits	58
3.19	Spannungs-Dehnungskurven der untersuchten Silicone	59
3.20	Spezifische Leitfähigkeit eines Ruß-Komposits und eines Metall-Flake-Komposits	60
3.21	Erklärungsmodell für das unterschiedliche Verhalten von Ruß- und Metall-Flake-Komposit	61
3.22	Vergleich des Einflusses der zunehmenden Härte der Siliconmatrix . .	63
3.23	Abhängigkeit der Leitfähigkeit von Dehnung und Dehngeschwindigkeit	64
3.24	Ausschnitte aus den dreidimensionalen nanoCT-Aufnahmen	65
3.25	Dichteverteilung der Proben	67
3.26	Tragbarer Textil-Elektronik Demonstrator	68
3.27	Videoaufnahme einer schnellen Beugung des Ellenbogens	69
4.1	Laserstrukturierung eines Schaltungsträgers	81
4.2	Laserstrukturierung eines Schaltungsträgers - Bestückung	82
4.3	Laserstrukturierung eines Sensors	83
4.4	REM-Aufnahmen der verkupferten Elektrode	85
4.5	Optische Materialspektren	86
4.6	Schaltungsträger	88
4.7	Elektromechanische Charakterisierung lasergefertigte elastischen Leitbahn	89
4.8	Laserstrukturierte Sensoren	90
4.9	Laserstrukturierter Drucksensor im Detail	91
4.10	Kenlinie des laserstrukturierten Drucksensors	92
5.1	Verteilung der Ausführungslatenz im Standard-Kernel	98
5.2	Verteilung der Ausführungslatenz im Echtzeit-Kernel	98
5.3	Roboter Messsysteme	100
5.4	MKL26Z-Plattform	102
5.5	PSoC4000S-Plattform	102
5.6	PSoC4200L-Plattform	103
5.7	PSoC4200BL-Miniatur-Plattform	104
5.8	kombinierter Näherungs-, Druck- und Dehnungssensor	105
5.9	Kombinierter Näherungs- Druck- und Dehnungssensor	106
5.10	Kombinierter Näherungs- Druck- und Dehnungssensor Messkurve . .	107

5.11 kombinierter Näherungs-, Druck- und Dehnungssensor	109
5.12 Ortsaufgelöster kombinierter Druck- und Dehnungssensor	110
5.13 Ortsaufgelöster, kombinierter Druck- und Dehnungssensor Messkurve	111
5.14 Kombiniertes 3D-Kraft- und 3D-Näherungssensor	112
5.15 Kombiniertes 3D-Kraft- und 3D-Näherungssensor	114
5.16 3DKraft-3DNäherung-Sensor Messergebnis Näherung	115
5.17 3DKraft-3DNäherung-Sensor Messergebnis 3D-Näherung	116
5.18 3DKraft-3DNäherung-Sensor Messergebnis 3D-Kraft	117
5.19 Sensoraufbau Roboter-Sensorhaut	118
5.20 Systemaufbau Roboter-Sensorhaut	119
5.21 3-Layer-Safety-Skin Messergebnis Näherung	122
5.22 3-Layer-Safety-Skin Messergebnis Druck	123
5.23 3-Layer-Safety-Skin Sensorhomogenität	124
5.24 3-Layer-Safety-Skin Sensorhomogenität minimale Kraft	124
5.25 KI-Greifer System	125
5.26 Architektur des Neuronalen Netzes	126
5.27 KI-Greifer Objekterkennung	128

Tabellenverzeichnis

0.1	Vorab veröffentlichte Inhalte	v
3.1	Silicon Formulierungen	45
3.2	Charakteristische spezifische Leitfähigkeiten	49
3.3	relative Dichten der nanoCT	54
3.4	nanoCT Bildverarbeitungsschritte	57
3.5	E-Moduli der Siliconformulierungen	59
4.1	Technische Daten Schneid- und Gravurlaser Epilog Fusion Pro 32 . .	78
4.2	Laser-Fertigungsparameter Schaltungsträger	80
4.3	Laser-Fertigungsparameter Sensor	84
5.1	Stand der Technik - Sensoren	96
5.2	Stand der Wissenschaft - Sensoren	97
5.3	Kenndaten Franka Emika Panda	97
5.4	ICs zur Kapazitätsmessung	101
5.5	Messkonfigurationen kombinierter Näherungs-, Druck und Dehnungs- sensor	106
5.6	Messkonfigurationen orts aufgelöster, kombinierter Druck und Deh- nungssensor	109
5.7	Messkonfigurationen Kombiniertes 3D-Kraft- und 3D-Näherungssensor	113
5.8	Trainingsobjekte für die KI-Greifer	127
5.9	Trainingsparameter und -ergebnisse des Neuronalen Netzes	127
A.1	Leitfähige Partikel	135
A.2	Silicon Edukte	135
A.3	Silicon Rezepturen	136

Literaturverzeichnis

- [1] STIER, Simon P. ; UHL, Detlev ; LÖBMANN, Peer ; BÖSE, Holger: Dynamic electro–mechanical analysis of highly conductive particle–elastomer composites. In: *Journal of Applied Polymer Science* (2020), S. 50377. <http://dx.doi.org/10.1002/app.50377>. – DOI 10.1002/app.50377. – ISSN 00218995
- [2] STIER, Simon P. ; BÖSE, Holger: Electroplating and Ablative Laser Structuring of Elastomer Composites for Stretchable Multi-Layer and Multi-Material Electronic and Sensor Systems. In: *Micromachines* 12 (2021), Nr. 3. <http://dx.doi.org/10.3390/mi12030255>. – DOI 10.3390/mi12030255. – ISSN 2072–666X
- [3] STIER, Simon: *Flexible and / or elastic component and method for the production thereof: Patentschrift EP3608922 (A1)*. 2020
- [4] STIER, Simon ; BÖSE, Holger: *Capacitive sensor system and method for multimodal and / or location-selective measurement of forces, deformations and / or object proximity: Patentschrift EP3736541 (A1)*. 2020
- [5] STIER, Simon: Multimodal and spatially resolved dielectric elastomer sensors and their application in robotics. In: EUROEAP SOCIETY (Hrsg.): *EuroEAP 2019*, 2019
- [6] STIER, Simon: EuroEAP 2019 Challenge: Robotic Sense of Touch. In: EURO-EAP SOCIETY (Hrsg.): *EuroEAP 2019*, 2019
- [7] SIMON STIER: Multimodale und integrierte Elastomersensorik. In: WIEDEMANN, Martin (Hrsg.) ; MELZ, Tobias (Hrsg.): *Smarte Strukturen und Systeme*. Düren : Shaker, 2019. – ISBN 3844064257, S. 117–128
- [8] STIER, Simon P. ; BÖSE, Holger: Ablative Laser Structuring for Stretchable Multilayer and Multi-Material Electronics and Sensor Systems. In: *Proceedings* 56 (2020), Nr. 1, S. 21. <http://dx.doi.org/10.3390/proceedings2020056021>. – DOI 10.3390/proceedings2020056021

- [9] DAHIYA, R. S. ; METTA, G. ; VALLE, M. ; SANDINI, G.: Tactile Sensing—From Humans to Humanoids. In: *IEEE Transactions on Robotics* 26 (2010), Nr. 1, S. 1–20. <http://dx.doi.org/10.1109/TRO.2009.2033627>. – DOI 10.1109/TRO.2009.2033627. – ISSN 1552–3098
- [10] MARTINEZ-HERNANDEZ, Uriel: Tactile Sensors. Version: 2016. http://dx.doi.org/10.2991/978-94-6239-133-8_{ }57. In: PRESCOTT, Tony (Hrsg.) ; AHISSAR, Ehud (Hrsg.) ; IZHIKEVICH, Eugene (Hrsg.): *Scholarpedia of Touch*. Paris : Atlantis Press, 2016. – DOI 10.2991/978-94-6239-133-8_57. – ISBN 978-94-6239-132-1, S. 783–796
- [11] SHIT, Subhas C. ; SHAH, Pathik: A Review on Silicone Rubber. In: *National Academy Science Letters* 36 (2013), Nr. 4, S. 355–365. <http://dx.doi.org/10.1007/s40009-013-0150-2>. – DOI 10.1007/s40009-013-0150-2
- [12] BANDO CHEMICAL INDUSTRIES: *Produktwebsite*. <https://www.bandogrp.com/c-stretch>. Version: 19.01.2021
- [13] STRETCHSENSE: *Fimenwebsite*. <https://stretchsense.com/>. Version: 08.02.2020
- [14] LEAP TECHNOLOGY: *Fimenwebsite*. <http://leaptechnology.com/>. Version: 08.02.2020
- [15] BÖSE, Holger ; FUSS, Eric: Novel dielectric elastomer sensors for compression load detection. In: BAR-COHEN, Yoseph (Hrsg.): *SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*. Bellingham, Washington, USA : SPIE, 2014 (SPIE Proceedings), S. 905614
- [16] BÖSE, Holger ; FUSS, Eric ; LUX, Philipp: Influence of design and material properties on the performance of dielectric elastomer compression sensors. In: BAR-COHEN, Yoseph (Hrsg.): *SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, SPIE, 2015 (SPIE Proceedings), S. 943029
- [17] BÖSE, Holger ; HASSEL, Till: *Volume-compressible capacitive flat flexible sensor mat for measuring pressure or pressure distributions and/or for measuring or detecting deformations: Patentschrift EP2899521 (A1)*. 2015
- [18] STIER, Simon: *Entwurf und Implementierung taktiler und näherungsbasierender Sensorkonzepte für interaktive Roboter*. Lehrstuhl für Informatik VII, Am Hubland, 97074 Würzburg, Julius Maximilian Universität, Masterthesis, 01.12.2016

- [19] STIER, Simon: *Entwicklung und Untersuchung von Druck-, Scherungs- und Näherungssensorik auf Basis dielektrischer Elastomere*. Würzburg, Lehrstuhl für Chemische Technologie der Materialsynthese, Röntgenring 11, 97070 Würzburg, Masterthesis, 28.11.2016
- [20] SCHMITZ, Alexander ; SOMLOR, SOPHON ; TOMO, TITO P. ; KRISTANTO, HARRIS ; HWANG, JINSUN ; SUGANO, SHIGEKI: *Proximity And Tactile Sensor: Patentschrift WO2018012329 (A1)*. 2018
- [21] HAYAKAWA, Tomonori ; UKAI, Hitoshi: *Hybrid Sensor: Patentschrift US2014210490 (A1)*. 2014
- [22] BAREL, Eliyahu: *Capacitive based digitizer sensor: Patentschrift WO2015198208 (A1)*. 2015
- [23] HERRMANN, Frederick P.: *Capacitive sensor with active shield electrode: Patentschrift US2012074961 (A1)*. 2012
- [24] WU, Xin A. ; ULMEN, John V. ; CUTKOSKY, Mark R.: *Capacitive Force/Torque Sensor: Patentschrift US2018073942 (A1)*. 2018
- [25] HUANG, Ying ; YUAN, Haitao ; KAN, Wenqing ; GUO, Xiaohui ; LIU, Caixia ; LIU, Ping: A flexible three-axial capacitive tactile sensor with multilayered dielectric for artificial skin applications. In: *Microsystem Technologies* (2016). <http://dx.doi.org/10.1007/s00542-016-2936-x>. – DOI 10.1007/s00542-016-2936-x. – ISSN 0946-7076
- [26] ZHANG, Bo ; XIANG, Zemin ; ZHU, Siwei ; HU, Qiyi ; CAO, Yuanzhi ; ZHONG, Junwen ; ZHONG, Qize ; WANG, Bo ; FANG, Yunsheng ; HU, Bin ; ZHOU, Jun ; WANG, Zhonglin: Dual functional transparent film for proximity and pressure sensing. In: *Nano Research* 7 (2014), Nr. 10, S. 1488–1496. <http://dx.doi.org/10.1007/s12274-014-0510-3>. – DOI 10.1007/s12274-014-0510-3. – ISSN 1998-0124
- [27] YIP, Marcus ; DA HE, David ; WINOKUR, Eric ; BALDERRAMA, Amanda G. ; SHERIDAN, Robert ; MA, Hongshen: A flexible pressure monitoring system for pressure ulcer prevention. In: *Conference proceedings : ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual Conference 2009* (2009), S. 1212–1215. <http://dx.doi.org/10.1109/IEMBS.2009.5333964>. – DOI 10.1109/IEMBS.2009.5333964. – ISSN 1557-170X

- [28] XU, Daniel ; TAIRYCH, Andreas ; ANDERSON, Iain A.: Where the rubber meets the hand: Unlocking the sensing potential of dielectric elastomers. In: *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics* 54 (2016), Nr. 4, S. 465–472. <http://dx.doi.org/10.1002/polb.23926>. – DOI 10.1002/polb.23926. – ISSN 0887–6266
- [29] CHU, Z. ; SARRO, P.M ; MIDDELHOEK, S.: Silicon three-axial tactile sensor. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 54 (1996), Nr. 1-3, S. 505–510. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247\(95\)01190-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247(95)01190-0). – DOI 10.1016/S0924-4247(95)01190-0. – ISSN 09244247
- [30] TSOUTI, Vasiliki ; MITRAKOS, Vasileios ; BROUTAS, Panagiotis ; CHATZANDROULIS, Stavros: Modeling and Development of a Flexible Carbon Black-Based Capacitive Strain Sensor. In: *IEEE Sensors Journal* 16 (2016), Nr. 9, S. 3059–3067. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2016.2524508>. – DOI 10.1109/JSEN.2016.2524508. – ISSN 1530–437X
- [31] ZHANG, Hongying ; WANG, Michael Y.: Multi-Axis Soft Sensors Based on Dielectric Elastomer. In: *Soft Robotics* 3 (2016), Nr. 1, S. 3–12. <http://dx.doi.org/10.1089/soro.2015.0017>. – DOI 10.1089/soro.2015.0017. – ISSN 2169–5172
- [32] FREESCALE SEMICONDUCTOR INC.: *Kinetis® KL26: 48MHz Cortex-M0+ 32-128KB Flash 32-64pin*. <http://www.nxp.com/assets/documents/data/en/data-sheets/KL26P64M48SF5.pdf>. Version: 25.02.2017
- [33] CYPRESS: *Design Guide PSoC®4 and PSoC®6 MCU CapSense®*. <https://www.cypress.com/file/46081/download>. Version: 14.04.2019
- [34] ANALOG DEVICES: *Datenblatt AD7147*. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad7147.pdf>. Version: 13.11.2020
- [35] LIU, Yafang ; WANG, Jidong ; TONG, Yan: Kinetic analysis of elastomeric lag damper for helicopter rotors. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 311 (2018), S. 012006. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/311/1/012006>. – DOI 10.1088/1757–899X/311/1/012006. – ISSN 1757–8981
- [36] SCHNEIDER, F. ; FELLNER, T. ; WILDE, J. ; WALLRABE, U.: Mechanical properties of silicones for MEMS. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 18 (2008), Nr. 6, S. 065008. <http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/18/6/065008>. – DOI 10.1088/0960–1317/18/6/065008. – ISSN 0960–1317

- [37] RUST, Wilhelm: *Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen: Kontakt, Geometrie, Material*. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 2011 (Studium). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-8148-9>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-8148-9>. – ISBN 9783834881489
- [38] ANALOG DEVICES: *LTspice: Herstellerwebsite*. <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>. Version: 05.01.2021
- [39] EVONIK HANSE GMBH: *Datenblatt Polymer VS*. <https://corporate.evonik.de/en/products/search-products/pages/product-details.aspx?productId=52171>. Version: 08.12.2020
- [40] EVONIK HANSE GMBH: *Datenblatt Modifier 700 Serie*. http://www.nano-and-silicone-technology.com/_layouts/websites/internet/SecuredLinksHandler.ashx?PropertyId=231&cpvid=18321. Version: 08.12.2016
- [41] EVONIK HANSE GMBH: *Datenblatt Crosslinker 100 / 200 Serie*. <https://corporate.evonik.de/en/products/search-products/pages/product-details.aspx?productId=54671>. Version: 08.12.2020
- [42] LIPÍŃSKA, Magdalena ; SOSZKA, Katarzyna: Viscoelastic Behavior, Curing and Reinforcement Mechanism of Various Silica and POSS Filled Methyl-Vinyl Polysiloxane MVQ Rubber. In: *Silicon* (2019). <http://dx.doi.org/10.1007/s12633-019-0081-8>. – DOI 10.1007/s12633-019-0081-8. – ISSN 1876-9918
- [43] EVONIC INDUSTRIES: *Datenblatt AEROSIL - Pyrogene Kieselsäure*. <http://www.aerosil.com/sites/lists/RE/DocumentsSI/AEROSIL-technical-overview-DE.pdf>. Version: 08.12.2016
- [44] EVONIK NUTRITION & CARE GMBH: *VQM 900 SERIE: Technisches Datenblatt*. 28.05.2018
- [45] PAN, Guirong ; MARK, James E. ; SCHAEFER, Dale W.: Synthesis and characterization of fillers of controlled structure based on polyhedral oligomeric silsesquioxane cages and their use in reinforcing siloxane elastomers. In: *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics* 41 (2003), Nr. 24, S. 3314–3323. <http://dx.doi.org/10.1002/polb.10695>. – DOI 10.1002/polb.10695. – ISSN 0887-6266

- [46] IYER, Subramanian ; ABU-ALI, Amjad ; DETWILER, Andrew ; SCHIRALDI, David A.: Transparent Polymer-Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane Composites. Version: 2007. <http://dx.doi.org/10.1021/bk-2007-0964.ch020>. In: CLARSON, Stephen J. (Hrsg.) ; FITZGERALD, John J. (Hrsg.): *Science and technology of silicones and silicone-modified materials* Bd. 964. Washington, DC : American Chemical Soc, 2007. – DOI 10.1021/bk-2007-0964.ch020. – ISBN 0-8412-3943-6, S. 313–325
- [47] PAUL, Donald R. ; MARK, James E.: Fillers for polysiloxane (“silicone”) elastomers. In: *Progress in Polymer Science* 35 (2010), Nr. 7, S. 893–901. <http://dx.doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.03.004>. – DOI 10.1016/j.progpolymsci.2010.03.004. – ISSN 00796700
- [48] MA, Tingting ; YANG, Ruiquan ; ZHENG, Zhong ; SONG, Yihu: Rheology of fumed silica/polydimethylsiloxane suspensions. In: *Journal of Rheology* 61 (2017), Nr. 2, S. 205–215. <http://dx.doi.org/10.1122/1.4973974>. – DOI 10.1122/1.4973974. – ISSN 0148-6055
- [49] DELEBECQ, Etienne ; HERMELINE, Nicolas ; FLERS, Alain ; GANACHAUD, Francois: Looking over liquid silicone rubbers: (2) mechanical properties vs network topology. In: *ACS applied materials & interfaces* 4 (2012), Nr. 7, S. 3353–3363. <http://dx.doi.org/10.1021/am300503j>. – DOI 10.1021/am300503j. – ISSN 1944-8244
- [50] OGLIANI, Elisa ; YU, Liyun ; MAZUREK, Piotr ; SKOV, Anne L.: Designing reliable silicone elastomers for high-temperature applications. In: *Polymer Degradation and Stability* 157 (2018), S. 175–180. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.10.012>. – DOI 10.1016/j.polymdegradstab.2018.10.012. – ISSN 01413910
- [51] MAZUREK, Piotr ; VUDAYAGIRI, Sindhu ; SKOV, Anne L.: How to tailor flexible silicone elastomers with mechanical integrity: A tutorial review. In: *Chemical Society Reviews* 48 (2019), Nr. 6, 1448–1464. <http://dx.doi.org/10.1039/C8CS00963E>. – DOI 10.1039/C8CS00963E. – ISSN 1460-4744
- [52] YU, Liyun ; SKOV, Anne L.: Silicone rubbers for dielectric elastomers with improved dielectric and mechanical properties as a result of substituting silica with titanium dioxide. In: *International Journal of Smart and Nano Materials* 6 (2016), Nr. 4, S. 268–289. <http://dx.doi.org/10.1080/19475411.2015.1119216>. – DOI 10.1080/19475411.2015.1119216. – ISSN 1947-5411

- [53] STRUMPLER, R. ; GLATZ-REICHENBACH, J.: FEATURE ARTICLE Conducting Polymer Composites. In: *Journal of Electroceramics* 3 (1999), Nr. 4, S. 329–346. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1009909812823>. – DOI 10.1023/A:1009909812823. – ISSN 1573–8663
- [54] BUSFIELD, J. J. C. ; THOMAS, A. G. ; YAMAGUCHI, K.: Electrical and mechanical behavior of filled rubber. III. Dynamic loading and the rate of recovery. In: *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics* 43 (2005), Nr. 13, S. 1649–1661. <http://dx.doi.org/10.1002/polb.20452>. – DOI 10.1002/polb.20452. – ISSN 0887–6266
- [55] YAMAGUCHI, K. ; BUSFIELD, J. J. C. ; THOMAS, A. G.: Electrical and mechanical behavior of filled elastomers. I. The effect of strain. In: *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics* 41 (2003), Nr. 17, S. 2079–2089. <http://dx.doi.org/10.1002/polb.10571>. – DOI 10.1002/polb.10571. – ISSN 0887–6266
- [56] FERNANDES, Daniel F. ; MAJIDI, Carmel ; TAVAKOLI, Mahmoud: Digitally printed stretchable electronics: A review. In: *Journal of Materials Chemistry C* 7 (2019), Nr. 45, S. 14035–14068. <http://dx.doi.org/10.1039/C9TC04246F>. – DOI 10.1039/C9TC04246F. – ISSN 2050–7526
- [57] DUAN, Lingyan ; FU, Sirui ; DENG, Hua ; ZHANG, Qin ; WANG, Ke ; CHEN, Feng ; FU, Qiang: The resistivity–strain behavior of conductive polymer composites: Stability and sensitivity. In: *Journal of Materials Chemistry A* 2 (2014), Nr. 40, 17085–17098. <http://dx.doi.org/10.1039/C4TA03645J>. – DOI 10.1039/C4TA03645J. – ISSN 2050–7488
- [58] LIPOMI, Darren J. ; VOSGUERITCHIAN, Michael ; TEE, Benjamin C-K. ; HELLSTROM, Sondra L. ; LEE, Jennifer A. ; FOX, Courtney H. ; BAO, Zhenan: Skin-like pressure and strain sensors based on transparent elastic films of carbon nanotubes. In: *Nature Nanotechnology* 6 (2011), Nr. 12, 788–792. <http://dx.doi.org/10.1038/nnano.2011.184>. – DOI 10.1038/nnano.2011.184. – ISSN 1748–3395
- [59] LEE, Mi-Sun ; KIM, Joohee ; PARK, Jihun ; PARK, Jang-Ung: Studies on the mechanical stretchability of transparent conductive film based on graphene-metal nanowire structures. In: *Nanoscale Research Letters* 10 (2015), Nr. 1, 1–9. <http://dx.doi.org/10.1186/s11671-015-0748-z>. – DOI 10.1186/s11671-015-0748-z

- [60] BÖSE, Holger ; UHL, Detlev: Dielectric elastomers with novel highly-conducting electrodes. In: BAR-COHEN, Yoseph (Hrsg.): *SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*. Bellingham, Washington, USA : SPIE, 2013 (SPIE Proceedings), S. 868720
- [61] HU, Yougen ; ZHAO, Tao ; ZHU, Pengli ; ZHU, Yu ; SHUAI, Xingtian ; LIANG, Xianwen ; SUN, Rong ; LU, Daoqiang D. ; WONG, Ching-Ping: Low cost and highly conductive elastic composites for flexible and printable electronics. In: *Journal of Materials Chemistry C* 4 (2016), Nr. 24, S. 5839–5848. <http://dx.doi.org/10.1039/C6TC01340F>. – DOI 10.1039/C6TC01340F. – ISSN 2050–7526
- [62] PAN, Chengfeng ; OHM, Yunsik ; WANG, Jingxian ; FORD, Michael J. ; KUMAR, Kitty ; KUMAR, Swarun ; MAJIDI, Carmel: Silver-Coated Poly(dimethylsiloxane) Beads for Soft, Stretchable, and Thermally Stable Conductive Elastomer Composites. In: *ACS applied materials & interfaces* 11 (2019), Nr. 45, S. 42561–42570. <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.9b13266>. – DOI 10.1021/acsami.9b13266. – ISSN 1944–8244
- [63] CHOI, Tae Y. ; HWANG, Byeong-Ung ; KIM, Bo-Yeong ; TRUNG, Tran Q. ; NAM, Yun H. ; KIM, Do-Nyun ; EOM, Kilho ; LEE, Nae-Eung: Stretchable, Transparent, and Stretch-Unresponsive Capacitive Touch Sensor Array with Selectively Patterned Silver Nanowires/Reduced Graphene Oxide Electrodes. In: *ACS applied materials & interfaces* 9 (2017), Nr. 21, S. 18022–18030. <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.6b16716>. – DOI 10.1021/acsami.6b16716. – ISSN 1944–8244
- [64] ZHANG, Bowen ; LI, Wanli ; YANG, Yang ; CHEN, Chuantong ; LI, Cai-Fu ; SUGANUMA, Katsuaki: Fully embedded CuNWs/PDMS conductor with high oxidation resistance and high conductivity for stretchable electronics. In: *Journal of Materials Science* 54 (2019), Nr. 8, S. 6381–6392. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-019-03333-x>. – DOI 10.1007/s10853-019-03333-x. – ISSN 0022–2461
- [65] SUN, Hongye ; HAN, Zongyou ; WILLENBACHER, Norbert: Ultrastretchable Conductive Elastomers with a Low Percolation Threshold for Printed Soft Electronics. In: *ACS applied materials & interfaces* 11 (2019), Nr. 41, S. 38092–38102. <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.9b11071>. – DOI 10.1021/acsami.9b11071. – ISSN 1944–8244

- [66] MATSUHISA, Naoji ; INOUE, Daishi ; ZALAR, Peter ; JIN, Hanbit ; MATSUBA, Yorishige ; ITOH, Akira ; YOKOTA, Tomoyuki ; HASHIZUME, Daisuke ; SOMEYA, Takao: Printable elastic conductors by in situ formation of silver nanoparticles from silver flakes. In: *Nature materials* 16 (2017), Nr. 8, 834. <http://dx.doi.org/10.1038/nmat4904>. – DOI 10.1038/nmat4904. – ISSN 1476–1122
- [67] KIM, Yoonseob ; ZHU, Jian ; YEOM, Bongjun ; DI PRIMA, Matthew ; SU, Xianli ; KIM, Jin-Gyu ; YOO, Seung J. ; UHER, Ctirad ; KOTOV, Nicholas A.: Stretchable nanoparticle conductors with self-organized conductive pathways. In: *Nature* 500 (2013), Nr. 7460, S. 59–63. <http://dx.doi.org/10.1038/nature12401>. – DOI 10.1038/nature12401. – ISSN 0028–0836
- [68] FENG, Pengdong ; JI, Hongjun ; ZHANG, Ling ; LUO, Xuan ; LENG, Xuesong ; HE, Peng ; FENG, Huanhuan ; ZHANG, Jiaheng ; MA, Xing ; ZHAO, Weiwei: Highly stretchable patternable conductive circuits and wearable strain sensors based on polydimethylsiloxane and silver nanoparticles. In: *Nanotechnology* 30 (2019), Nr. 18, 185501. <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6528/ab013b>. – DOI 10.1088/1361-6528/ab013b. – ISSN 0957–4484
- [69] CHEN, Zhi H. ; FANG, Rui ; LI, Wei ; GUAN, Jianguo: Stretchable Transparent Conductors: From Micro/Macromechanics to Applications. In: *Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.)* 31 (2019), Nr. 35, S. e1900756. <http://dx.doi.org/10.1002/adma.201900756>. – DOI 10.1002/adma.201900756. – ISSN 1521–4095
- [70] KIM, Kukjoo ; KIM, Joohee ; HYUN, Byung G. ; JI, Sangyoon ; KIM, So-Yun ; KIM, Sungwon ; AN, Byeong W. ; PARK, Jang-Ung: Stretchable and transparent electrodes based on in-plane structures. In: *Nanoscale* 7 (2015), Nr. 35, S. 14577–14594. <http://dx.doi.org/10.1039/c5nr04341g>. – DOI 10.1039/c5nr04341g. – ISSN 2040–3372
- [71] TRUNG, Tran Q. ; LEE, Nae-Eung: Recent Progress on Stretchable Electronic Devices with Intrinsically Stretchable Components. In: *Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.)* 29 (2017), Nr. 3, S. 1603167. <http://dx.doi.org/10.1002/adma.201603167>. – DOI 10.1002/adma.201603167. – ISSN 1521–4095
- [72] BÖSE, Holger ; THUY, Maximilian ; STIER, Simon: Wearable operation device with different types of dielectric elastomer sensors. In: BAR-COHEN, Yoseph (Hrsg.): *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XX*.

- Bellingham, Washington, USA : SPIE, 2018 (Proceedings of SPIE). – ISBN 9781510616844, 30
- [73] SHEIDAEI, A. ; BANIASSADI, M. ; BANU, M. ; ASKELAND, P. ; PAHLAVANPOUR, M. ; KUUTTILA, Nick ; POURBOGHRAT, F. ; DRZAL, L. T. ; GARMESTANI, H.: 3-D microstructure reconstruction of polymer nano-composite using FIB–SEM and statistical correlation function. In: *Composites Science and Technology* 80 (2013), 47–54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.03.001>. – DOI 10.1016/j.compscitech.2013.03.001. – ISSN 02663538
- [74] STANIEWICZ, Lech ; VAUDEY, Thomas ; DEGRANDCOURT, Christophe ; COUTY, Marc ; GABORIAUD, Fabien ; MIDGLEY, Paul: Electron tomography provides a direct link between the Payne effect and the inter-particle spacing of rubber composites. In: *Scientific reports* 4 (2014), S. 7389. <http://dx.doi.org/10.1038/srep07389>. – DOI 10.1038/srep07389. – ISSN 2045–2322
- [75] FELLA, Christian ; DITTMANN, Jonas ; MULLER, Dominik ; DONATH, Tilman ; MURER, David ; TUOHIMAA, Tomi ; SOFIENKO, Andrii ; ZABLER, Simon ; HANKE, Randolph: Implementation of a Computed Tomography System based on a laboratory-based nanofocus X-ray source. In: *Microscopy and Microanalysis* 24 (2018), Nr. S2, S. 236–237. <http://dx.doi.org/10.1017/S1431927618013521>. – DOI 10.1017/S1431927618013521. – ISSN 1431–9276
- [76] MÜLLER, Dominik ; GRAETZ, Jonas ; BALLE, Andreas ; STIER, Simon ; HANKE, Randolph ; FELLA, Christian: Laboratory-Based Nano-Computed Tomography and Examples of Its Application in the Field of Materials Research. In: *Crystals* 11 (2021), Nr. 6, S. 677. <http://dx.doi.org/10.3390/cryst11060677>. – DOI 10.3390/cryst11060677
- [77] ENGLISCH, Silvan ; WIRTH, Janis ; SCHRENKER, Nadine ; TAM, Kai C. ; EGEHAAF, Hans-Joachim ; BRABEC, Christoph J. ; SPIECKER, Erdmann: Mechanical Failure of Transparent Flexible Silver Nanowire Networks for Solar Cells using 3D X-Ray Nano Tomography and Electron Microscopy. In: *Microscopy and Microanalysis* 24 (2018), Nr. S2, S. 558–559. <http://dx.doi.org/10.1017/S1431927618014988>. – DOI 10.1017/S1431927618014988. – ISSN 1431–9276
- [78] MATSUHISA, Naoji ; KALTENBRUNNER, Martin ; YOKOTA, Tomoyuki ; JINNO, Hiroaki ; KURIBARA, Kazunori ; SEKITANI, Tsuyoshi ; SOMEYA, Ta-

- kao: Printable elastic conductors with a high conductivity for electronic textile applications. In: *Nature communications* 6 (2015), S. 7461. <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms8461>. – DOI 10.1038/ncomms8461. – ISSN 2041–1723
- [79] OTSU, Nobuyuki: A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 9 (1979), Nr. 1, S. 62–66. <http://dx.doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>. – DOI 10.1109/TSMC.1979.4310076. – ISSN 0018–9472
- [80] CANNY, John: A Computational Approach to Edge Detection. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* PAMI-8 (1986), Nr. 6, S. 679–698. <http://dx.doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851>. – DOI 10.1109/TPAMI.1986.4767851. – ISSN 0162–8828
- [81] MAJI, Debashis ; DAS, Debanjan ; WALA, Jyoti ; DAS, Soumen: Buckling assisted and lithographically micropatterned fully flexible sensors for conformal integration applications. In: *Scientific reports* 5 (2015), S. 17776. <http://dx.doi.org/10.1038/srep17776>. – DOI 10.1038/srep17776. – ISSN 2045–2322
- [82] JUNG, Sun N. ; KANG, Chang K. ; IM JUNG, Deok ; LEE, Sang M. ; JUNG, Phill G. ; KO, Jong S.: Fabrication of curved copper micromesh sheets using flexible PDMS molds. In: *Microsystem Technologies* 14 (2008), Nr. 6, 829–833. <http://dx.doi.org/10.1007/s00542-008-0599-y>. – DOI 10.1007/s00542-008-0599-y. – ISSN 0946–7076
- [83] JEONG, Gi S. ; BAEK, Dong-Hyun ; JUNG, Ha C. ; SONG, Ji H. ; MOON, Jin H. ; HONG, Suck W. ; KIM, In Y. ; LEE, Sang-Hoon: Solderable and electroplatable flexible electronic circuit on a porous stretchable elastomer. In: *Nature communications* 3 (2012), S. 977. <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms1980>. – DOI 10.1038/ncomms1980. – ISSN 2041–1723
- [84] RATHMANN, Dietrich: Kunststoffgalvanisierung. In: *Chemie in unserer Zeit* 15 (1981), Nr. 6, S. 201–207. <http://dx.doi.org/10.1002/ciuz.19810150606>. – DOI 10.1002/ciuz.19810150606. – ISSN 0009–2851
- [85] TSOTSIS, Thomas K.: *Tooling having a durable metallic surface over an additively formed polymer base and method of forming such tooling: Patentschrift EP3228732 (A1)*. 2017

- [86] SCHNEIDER, Norbert ; LIPPERT, Gerald ; LOCHTMAN, Rene ; MAAS, Heiko ; PFISTER, Juergen ; SOBOTKA, Bettina ; WAGNER, Norbert ; NIESSNER, Norbert ; SCHEIBITZ, Matthias ; DAHLKE, Michael ; WARZELHAN, Volker ; GUTTING, Wolfgang: *Plastic objects for metal-plating with improved shaping properties: Patentschrift EP1899414 (A2)*. 2008
- [87] OSTMANN, Andreas ; SECKEL, Manuel ; LOHER, Thomas ; MANESSIS, Dionysios ; PATZELT, Rainer ; LOEHER, Thomas: *Method for the production of expandable circuit carrier and expandable circuit carrier: Patentschrift US2008257589 (A1)*. 2008
- [88] SCHREIVOGEL, Alina ; KOSTELNIK, Jan: More than flexible – Stretchable Electronic Solutions. https://www.researchgate.net/publication/311088935_More_than_flexible_-_Stretchable_Electronic_Solutions. In: *be-flexible 2016 Munich*
- [89] GUTRUF, Philipp ; YIN, Rose T. ; LEE, K. B. ; AUSRA, Jokubas ; BRENNAN, Jaclyn A. ; QIAO, Yun ; XIE, Zhaoqian ; PERALTA, Roberto ; TALARICO, Olivia ; MURILLO, Alejandro ; CHEN, Sheena W. ; LESHOCK, John P. ; HANEY, Chad R. ; WATERS, Emily A. ; ZHANG, Changxing ; LUAN, Haiwen ; HUANG, Yonggang ; TRACHIOTIS, Gregory ; EFIMOV, Igor R. ; ROGERS, John A.: Wireless, battery-free, fully implantable multimodal and multisite pacemakers for applications in small animal models. In: *Nature communications* 10 (2019), Nr. 1, S. 5742. <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-019-13637-w>. – DOI 10.1038/s41467-019-13637-w. – ISSN 2041-1723
- [90] BURTON, Alex ; OBAID, Sofian N. ; VÁZQUEZ-GUARDADO, Abraham ; SCHMIT, Matthew B. ; STUART, Tucker ; LE CAI ; CHEN, Zhiyuan ; KANDELA, Irawati ; HANEY, Chad R. ; WATERS, Emily A. ; CAI, Haijiang ; ROGERS, John A. ; LU, Luyao ; GUTRUF, Philipp: Wireless, battery-free subdermally implantable photometry systems for chronic recording of neural dynamics. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 117 (2020), Nr. 6, S. 2835–2845. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1920073117>. – DOI 10.1073/pnas.1920073117. – ISSN 0027-8424
- [91] XU, Sheng ; ZHANG, Yihui ; CHO, Jiung ; LEE, Juhwan ; HUANG, Xian ; JIA, Lin ; FAN, Jonathan A. ; SU, Yewang ; SU, Jessica ; ZHANG, Huigang ; CHENG, Huanyu ; LU, Bingwei ; YU, Cunjiang ; CHUANG, Chi ; KIM, Tae-il ; SONG, Taeseup ; SHIGETA, Kazuyo ; KANG, Sen ; DAGDEVIREN, Canan ; PETROV,

- Ivan ; BRAUN, Paul V. ; HUANG, Yonggang ; PAIK, Ungyu ; ROGERS, John A.: Stretchable batteries with self-similar serpentine interconnects and integrated wireless recharging systems. In: *Nature communications* 4 (2013), S. 1543. <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms2553>. – DOI 10.1038/ncomms2553. – ISSN 2041–1723
- [92] ACEO: *Firmenwebsite*. <https://www.aceo3d.com>. Version: 16.11.2020
- [93] ACEO: *Design Guidelines*. <https://www.aceo3d.com/services>. Version: 06.12.2020
- [94] HAN, Tao ; NAG, Anindya ; AFSARIMANESH, Nasrin ; MUKHOPADHYAY, Subhas C. ; KUNDU, Sudip ; XU, Yongzhao: Laser-Assisted Printed Flexible Sensors: A Review. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 19 (2019), Nr. 6. <http://dx.doi.org/10.3390/s19061462>. – DOI 10.3390/s19061462. – ISSN 1424–8220
- [95] ARAROMI, Oluwaseun A. ; ROSSET, Samuel ; SHEA, Herbert R.: High-Resolution, Large-Area Fabrication of Compliant Electrodes via Laser Ablation for Robust, Stretchable Dielectric Elastomer Actuators and Sensors. In: *ACS applied materials & interfaces* 7 (2015), Nr. 32, S. 18046–18053. <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.5b04975>. – DOI 10.1021/acsami.5b04975. – ISSN 1944–8244
- [96] EPILOG LASER: *Epilog Fusion Pro 32 – Website des Herstellers*. <https://www.epiloglaser.de/Lasermaschinen/fusion-pro-laser-series.htm>. Version: 23.2.2020
- [97] CAMEO LASER: *Epilog Fusion Pro 32 - Website des Vertriebspartners*. <https://www.cameolaser.de/de/laser/co2-laser/epilog-fusion-pro-32/>. Version: 23.2.2020
- [98] TEKSCAN INC: *Produktwebsite*. <https://www.tekscan.com/force-sensors>. Version: 15.01.2020
- [99] INTERLINK ELECTRONICS: *Firmenwebsite*. <http://www.interlinkelectronics.com>. Version: 15.01.2020
- [100] TACTERION: *Firmenwebsite*. <https://www.tacterion.com/>. Version: 08.02.2020

- [101] PRESSURE PROFILE SYSTEMS: *Firmenwebsite*. <http://www.pressureprofile.com/>. Version: 14.01.2016
- [102] BLUE DANUBE ROBOTICS: *Firmenwebsite*. <https://www.bluedanuberobotics.com/>. Version: 08.02.2020
- [103] ZILLICH, Michael: *Schutzverfahren und Schutzvorrichtung für Handhabungsgerät: Patentschrift AT516097B1*. 2016
- [104] ROBERT BOSCH GMBH: *APAS – Intelligent Systems for Man-Machine Collaboration*. http://www.bosch-apas.com/en/apas/start/bosch_apas.html. Version: 30.11.2016
- [105] MORARU, Alexandra ; PESKO, Marko ; PORCIUS, Maria ; FORTUNA, Carolina ; MLADENIC, Dunja: Using Machine Learning on Sensor Data. In: *Journal of Computing and Information Technology* 18 (2010), Nr. 4, S. 341. <http://dx.doi.org/10.2498/cit.1001913>. – DOI 10.2498/cit.1001913. – ISSN 1330–1136
- [106] HÄNSCH, Ronny ; SCHULZ, Karsten ; SÖRGEL, Uwe: Machine learning methods for remote sensing applications: an overview. In: MICHEL, Ulrich (Hrsg.): *Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications IX*. Bellingham, WA, United States : SPIE, 2018. – ISBN 9781510621633, 1
- [107] WOODWARD, Kieran ; KANJO, Eiman ; OIKONOMOU, Andreas ; CHAMBERLAIN, Alan: LabelSens: enabling real-time sensor data labelling at the point of collection using an artificial intelligence-based approach. In: *Personal and Ubiquitous Computing* 24 (2020), Nr. 5, S. 709–722. <http://dx.doi.org/10.1007/s00779-020-01427-x>. – DOI 10.1007/s00779-020-01427-x. – ISSN 1617–4909
- [108] KRISHNAMURTHI, Rajalakshmi ; KUMAR, Adarsh ; GOPINATHAN, Dhanalekshmi ; NAYYAR, Anand ; QURESHI, Basit: An Overview of IoT Sensor Data Processing, Fusion, and Analysis Techniques. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 20 (2020), Nr. 21. <http://dx.doi.org/10.3390/s20216076>. – DOI 10.3390/s20216076. – ISSN 1424–8220
- [109] LARSON, Chris ; SPJUT, Josef ; KNEPPER, Ross ; SHEPHERD, Robert: A Deformable Interface for Human Touch Recognition Using Stretchable Carbon Nanotube Dielectric Elastomer Sensors and Deep Neural Networks. In: *Soft Robotics*

- 6 (2019), Nr. 5, S. 611–620. <http://dx.doi.org/10.1089/soro.2018.0086>.
– DOI 10.1089/soro.2018.0086. – ISSN 2169–5172
- [110] MAZZOCCHI, T. ; DIODATO, A. ; CIUTI, G. ; MICHELI, D. M. ; MENCIASSI, A.: Smart sensorized polymeric skin for safe robot collision and environmental interaction. In: *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, S. 837–843
- [111] ALIREZAEI, Hassan ; NAGAKUBO, Akihiko ; KUNIYOSHI, Yasuo: A tactile distribution sensor which enables stable measurement under high and dynamic stretch. In: IEEE (Hrsg.): *IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, 2009, S. 87–93
- [112] SILVERA TAWIL, D. ; RYE, D. ; VELONAKI, M.: Interpretation of the modality of touch on an artificial arm covered with an EIT-based sensitive skin. In: *The International Journal of Robotics Research* 31 (2012), Nr. 13, S. 1627–1641. <http://dx.doi.org/10.1177/0278364912455441>. – DOI 10.1177/0278364912455441. – ISSN 0278–3649
- [113] SILVERA-TAWIL, David ; RYE, David ; SOLEIMANI, Manuchehr ; VELONAKI, Mari: Electrical Impedance Tomography for Artificial Sensitive Robotic Skin: A Review. In: *IEEE Sensors Journal* 15 (2015), Nr. 4, S. 2001–2016. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2014.2375346>. – DOI 10.1109/JSEN.2014.2375346. – ISSN 1530–437X
- [114] PARK, Jonghwa ; LEE, Youngoh ; HONG, Jaehyung ; HA, Minjeong ; JUNG, Young-Do ; LIM, Hyuneui ; KIM, Sung Y. ; KO, Hyunhyub: Giant tunneling piezoresistance of composite elastomers with interlocked microdome arrays for ultrasensitive and multimodal electronic skins. In: *ACS nano* 8 (2014), Nr. 5, S. 4689–4697. <http://dx.doi.org/10.1021/nn500441k>. – DOI 10.1021/nn500441k. – ISSN 1936–086X
- [115] FRANKA EMIKA GMBH: *Firmenwebsite*. <https://www.franka.de/>.
Version: 18.05.2018
- [116] FRANKA EMIKA GMBH: *Panda Datasheet*. <https://s3-eu-central-1.amazonaws.com/franka-de-uploads-staging/uploads/2018/05/2018-05-datasheet-panda.pdf>.
Version: 11.06.2021
- [117] LINUX KERNEL ORGANIZATION: *The Linux Kernel Archives*. <https://www.kernel.org/>.
Version: 01.05.2018

- [118] LINUX FOUNDATION: *Linux Foundation Wiki: RT-Tests*. <https://wiki.linuxfoundation.org/realtime/documentation/howto/tools/rt-tests>.
Version: 02.05.2018
- [119] FRANKA EMIKA GMBH: *libfranka: C++ library for Franka Emika research robots*. <https://frankaemika.github.io/libfranka/>. Version: 22.02.2018
- [120] THE QT COMPANY: *Firmenwebsite*. <https://www.qt.io/>.
Version: 26.11.2020
- [121] NXP: *Kinetis KE1xZ64 Sub-Family Reference Manual*. <https://www.nxp.com/docs/en/reference-manual/KE1xZP48M48SF0RM.pdf>. Version: 14.04.2019
- [122] HOLGER BÖSE ; SIMON STIER ; STEFAN MUTH: *Glove with versatile operation tools based on dielectric elastomer sensors*, International Society for Optics and Photonics, 2019, 109661R
- [123] MÜLLER, Dominik: *Entwicklung und Aufbau von Ein- und Mehrdimensionalen Eingabegeräten auf Basis Smarterer Silikone*. Würzburg, Julius-Maximilians-Universität, Masterthesis, 2017
- [124] NISSEN, Steffen: *Implementation of a Fast Artificial Neural Network Library (FANN)*, Department of Computer Science, Diss., 31.10.2003. https://master.dl.sourceforge.net/project/fann/fann_doc/1.0/fann_doc_complete_1.0.pdf
- [125] ECKART: *Datenblatt eConduct Copper 044000*. http://www.eckart.de/uploads/tx_driveeckartproducts/ED-010360.pdf. Version: 17.11.2016
- [126] IMERYYS: *Datenblatt ENSACO 150/ 210/ 240 / 250/ 260/ 350*. http://www.imerys-graphite-and-carbon.com/wordpress/wp-app/uploads/2014/04/Polymer_compounds1.pdf. Version: 20.11.2020
- [127] WACKER CHEMIE AG: *Datenblatt ELASTOSIL® RT 625 A/B*. <https://www.wacker.com/cms/de/products/product/product.jsp?product=13307>.
Version: 06.11.2020
- [128] BRB: *Produktübersicht Silikone*. <http://www.brb-international.com/uploads/products/solutions-for-silicone-rtv-2-formulator.pdf>.
Version: 17.06.2019

- [129] EVONIK INDUSTRIES: *Datenblatt Polymer RV*. <https://solutions-for-adhesives.com/product/adhesive-solutions/en/product-search/pages/product-details.aspx?productId=75711>.
Version: 03.11.2020
- [130] EVONIC INDUSTRIES: *Produktübersicht Silicone*. <https://www.nano-and-silicone-technology.com/product/break-thru/downloads/dental-and-medical-applications-en-web.pdf>. Version: 17.06.2019
- [131] WACKER CHEMIE AG: *Datenblatt POWERSIL® FLUID TR 50*. <https://www.wacker.com/cms/de/products/product/product.jsp?product=10269>.
Version: 06.11.2020
- [132] ABCR: *Datenblatt Platinkatalysator AB 134321*. https://abcr.com/de_de/ab134321. Version: 01.05.2021
- [133] EVONIK INDUSTRIES: *Datenblatt VQM 900 Serie*. <https://solutions-for-adhesives.com/product/adhesive-solutions/en/products/reactive-adhesives-sealants/pages/product-details.aspx?valueId=23303&productId=75691&download=custpropfile>.
Version: 10.05.2020