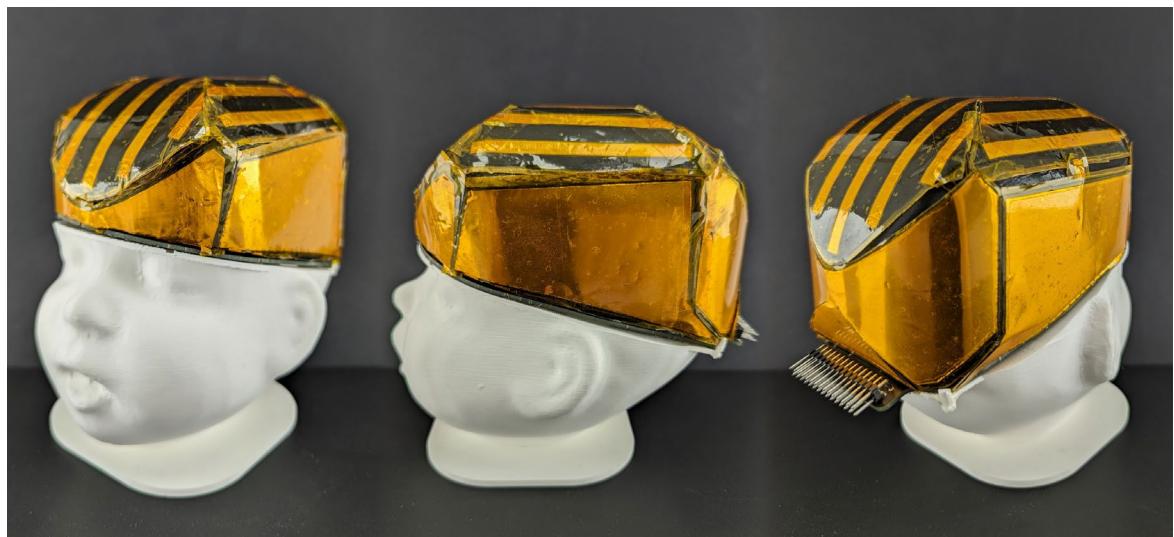


Masterarbeit

Entwicklung einer Sensormatrix zur Aufnahme von Druckverteilungen durch impulsähnliche Ereignisse auf gekrümmten Oberflächen

**Development of a Sensor Matrix for Recording
Pressure Distributions Caused by Pulse-Like
Events on Curved Surfaces**

Victor Leon Mas, B.Sc.



Betreuer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen
Co-Betreuer: Dr.-Ing. Andreas Lindenmann

Nr.: 4693

Karlsruhe, Oktober 2023

Masterarbeit

Aufgabenstellung
für
Herr Victor Leon Mas, B.Sc.

Die Messung wirkender Kräfte ist in der ingenieurmäßigen Praxis ein häufig eingesetztes Mittel zur Beobachtung technischer Systeme und deren mechanischen Verhalten. Eine Herausforderung ist hierbei unter Anderem die Erfassung von Kräften in technischen Systemen, die erst nachträglich mit Kraftsensorik ausgestattet werden sollen. Die Schwierigkeit liegt hier in der bauraumneutralen Integration, ohne das eigentliche technische System grundlegend zu verändern. Eine technische Lösung zu diesem Problem sind sogenannte Kraftmessfolien, welche als dünnes Sensorelement auf Oberflächen des technischen Systems appliziert werden können, um zeit- und ortsaufgelöst Kräfte zu messen. Eine Herausforderung im Umfeld der Kraftmessfolien ist die Applikation auf gekrümmten Oberflächen, da hier je nach Biegeradius Faltenwurf eine Integration erschweren kann. Die Aufgabe dieser Arbeit ist daher die Erarbeitung eines Vorgehens zur Applikation von Kraftmessfolien auf gekrümmten Oberflächen. Um eine praktikable Anwendung in unterschiedlichen Anwendungsgebieten zu ermöglichen, soll der Fokus dieser Arbeit weiterhin auf der Entwicklung einer günstigen und individualisierbaren Lösung liegen. Die entwickelte Kraftmessfolie soll hinsichtlich ihrer Fähigkeit Kraftereignisse orts- und zeitaufgelöst zu erfassen experimentell untersucht und beurteilt werden. Als konkretes Anwendungsbeispiel dient in dieser Arbeit die Thematik des Abusive-Head-Trauma bei Kleinkindern. Ziel ist es eine individualisierte Kraftmessfolie für die Applikation auf die Außenseite einer vorgegebenen Dummy-Schädelgeometrie zu entwickeln. Hierdurch soll diese Arbeit einen direkten Beitrag zur forensischen Untersuchung von Abusive Head Trauma Fällen in Ersatzversuchen ermöglichen.

Betreuer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen
Co-Betreuer: Dr.-Ing. Andreas Lindenmann

Kurzfassung

Eine schwere Form des Kindesmissbrauchs ist das durch Misshandlung verursachte Kopftrauma (abusive head trauma; AHT). Da die genauen Mechanismen von AHT nicht vollständig verstanden sind, kommt es in der Literatur immer wieder zu Diskussionen und Kontroversen. Daher werden weitere Daten für die AHT-Forschung benötigt. Für die Durchführung realitätsnaher Experimente ist die Verwendung eines Ersatzmodells des kindlichen Schädelns erforderlich. Ein wichtiger Aspekt ist hierfür die Kraftmessung an der Schädeloberfläche, wofür Kraftmessfolien ein geeignetes Instrument sein können.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer individualisierbaren Kraftmessfolie, die auf gekrümmten Oberflächen anwendbar ist und Kraftimpulse sowohl zeitlich als auch in der Amplitude auflösen kann. Dazu werden die Eigenschaften des kraftsensitiven Materials Velostat analysiert und dessen Eignung für Kraftmessfolien bewertet. Anschließend werden zwei unterschiedliche Prototypen hergestellt und getestet. Die entwickelten Prototypen können Kraftimpulse zeitlich und in der Amplitude auflösen, sind dünn, kostengünstig und robust.

Neben der Anwendung bei AHT-Dummys, ermöglicht der vorgestellte Ansatz die Entwicklung von Kraftmessfolien für weitere Anwendungen, wie zum Beispiel zur Erfassung von Druckverläufen an Griffen oder als „elektronische Haut“ in der Robotik.

Schlagwörter: Kraftmessfolie, Velostat, Säuglingsdummy, Dummy, AHT Dummy, AHT-Forschung, Impulsmessung

Abstract

A severe form of child abuse is abusive head trauma (AHT). Since the exact mechanisms of AHT are not yet fully understood, debate and controversy continue to arise in literature. Therefore, more data is needed for further AHT research. The use of a model of the infant skull is required to perform realistic experiments. An important aspect for this is the force measurement on the skulls surface, for which force measurement foils can be a suitable tool.

The aim of this work is to develop a customizable force sensor array that can be applied to curved surfaces and resolve impulses in both time and amplitude. For this purpose, the properties of the force-sensitive material Velostat are analyzed and its suitability for flexible force sensors is evaluated. Subsequently, two different prototypes are fabricated and tested. The developed prototypes can resolve impulses in time and amplitude, are thin, inexpensive and robust.

In addition to the application in AHT dummies, the presented approach enables the development of force sensing arrays for other applications, such as the detection of pressure gradients on handles or as an "electronic skin" in robotics.

Keywords: force sensor array, pressure sensor array, Velostat, infant dummy, dummy, AHT research, impulse measurement.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	xi
Abkürzungsverzeichnis	xii
1 Einleitung	1
2 Grundlagen & Stand der Forschung	3
2.1 Kraftsensoren	3
2.1.1 Kraft-Sensor-Messprinzipien	3
2.1.2 Formen resistiver, flexibler Kraftsensoren	11
2.1.3 Materialien resistiver Kraftsensoren	12
2.2 Auslesestrategien für resistive Sensorarrays	16
2.3 Gekrümmte Kraftmessfolien	19
2.4 Missbräuchliches Kopftrauma (AHT)	20
3 Motivation und Zielsetzung	23
3.1 Motivation	23
3.2 Zielsetzung	24
4 Untersuchungsmethoden	25
4.1 Eigenschaftsuntersuchungen Velostat	25
4.1.1 Versuchsaufbau	26
4.1.2 Versuchsablauf	29
4.1.3 Auswertung	31
4.2 Entwurf Sensormatrix	32
4.2.1 Schnittmuster Velostat	35
4.2.2 Leiterbahnen-Layout	38
4.3 Fertigung Sensormatrix	39
4.3.1 Direkte Applikation der Sensormatrix	39
4.3.2 Indirekte Applikation der Sensormatrix	41
4.3.3 Verkabelung	44
4.4 Messelektronik und Software	45

4.4.1 Messelektronik – Konzeptionierung	45
4.4.2 Messelektronik Design und Fertigung	50
4.4.3 Code	52
4.5 Validierung Prototypen	54
4.5.1 Aufbau und Ablauf	54
4.5.2 Auswertung	57
5 Ergebnisse	60
5.1 Versuchsergebnisse Eigenschaften Velostat	60
5.1.1 Impulsauflösung & Wiederholbarkeit	60
5.1.2 Kraft-Spannungs-Zusammenhang	73
5.1.3 Kraft-Amplituden-Differenzierung	78
5.2 Ergebnisse Prototypen	83
5.2.1 Funktionsüberprüfung	83
5.2.2 Formerkennung	87
5.2.3 Impulsauflösung	91
6 Diskussion	98
6.1 Eigenschaften Velostat	98
6.2 Prototypen	104
6.2.1 Zusammenfassung unerklärter, beobachteter Effekte und deren Hypothesen	109
7 Zusammenfassung und Ausblick	111
7.1 Zusammenfassung	111
7.2 Ausblick	112
8 Literaturverzeichnis	I
9 Anhang	V
9.1 Ausleseelektronik – Messplatine	V
9.2 Ausleseelektronik – Netzteil	VII
9.3 MultiHit Velostat	VIII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Übersicht Kraft-Messmethoden	4
Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Dehnmessstreifens	5
Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der Perkolation am Beispiel eines Graphen/Graphit-Verbundwerkstoff [4]	5
Abbildung 2.4: Schematische Darstellung des Tunneleffekts (Abbildung nach [46])	6
Abbildung 2.5: Schematische Darstellung des piezoresistiven Effektes	7
Abbildung 2.6: Schematische Darstellung des Oberflächeneffektes	7
Abbildung 2.7: Aufbau und Funktionsweise eines kapazitiven Kraftsensors	8
Abbildung 2.8: Aufbau und die Funktionsweise eines piezoelektrischen Kraftsensors (Abbildung nach [5])	8
Abbildung 2.9: Beispiel für einen optischen Kraftsensor [9]	9
Abbildung 2.10: Beispiel für einen magnetischen Kraftsensor [18]	9
Abbildung 2.11: Beispiel für einen barometrischen Kraftsensor; schematischer Querschnitt der Sensoreinheit entwickelt von R. Haug [17]	10
Abbildung 2.12: Beispiel für einen mechanischen Kraftsensor (Abbildung aus [39])	11
Abbildung 2.13: Verbreitete Bauformen von resistiven Kraftsensoren;	12
Abbildung 2.14: Verschiedene Materialien resistiver Kraftsensoren:	13
Abbildung 2.15: Spannungsteiler zum Messen von Widerständen	16
Abbildung 2.16: Grundstruktur zum Auslesen eines Rasters aus MxN Sensorelementen (Abbildung nach [19])	17
Abbildung 2.17: Schaltungen auf (a) Basis von Erdung und (b) auf Basis von Feedback-Loops [7]	18
Abbildung 2.18: Sensormatrix zur Messung von Kräften am menschlichen Kopf, vorgestellt von Niu et al. [32]	19
Abbildung 2.19: TactileHead von PPS [37]	20
Abbildung 4.1: Schematischer (links) und realer (rechts) Versuchsaufbau zur Untersuchung der Eigenschaften von Velostat-Sensoren	26
Abbildung 4.2: Aufbau eines Testsensors in Sandwichbauweise. Von innen nach außen: ein bis drei Lagen Velostat, Kupfer, Kapton-Tape	27
Abbildung 4.3: Herstellungsprozess am Beispiel eines einlagigen Sensorelements.	28

Abbildung 4.4: Positionierung Testsensor	30
Abbildung 4.5: Sequenz des einfachen Impulsstoß-Versuchs.	30
Abbildung 4.6: Ableitung des Grundkörpers aus einem Schädelscan einer Säuglingspuppe	33
Abbildung 4.7: Stereographische Projektion eines 2D-Rasters auf den Grundkörper	34
Abbildung 4.8: 3D Sensor-Raster mit Verkabelungspfaden	34
Abbildung 4.9: Abwicklung des vereinfachten Schädelmodells	35
Abbildung 4.10: Abwicklung des verrundeten Schädelmodells	36
Abbildung 4.11: Vergleich einfaches (transparent in rot) und verrundetes (grau) Schädelmodell	37
Abbildung 4.12: Vergleich der Abwicklung des einfachen Schädelmodells (rot) mit der finalen Abwicklung des verrundeten Schädelmodells (schwarz)	37
Abbildung 4.13: Finales Sensor-Layout (3D-Ansicht)	39
Abbildung 4.14: Methode der direkten Applikation der Sensormatrix	40
Abbildung 4.15: Prototyp – direkte Applikation	40
Abbildung 4.16: Schnittmuster für die Velostat- und Kupferstreifen und -flächen der indirekten Applikation	42
Abbildung 4.17: Gesamter Herstellungsprozess der indirekten Applikation	43
Abbildung 4.18: Prototyp – indirekte Applikation	44
Abbildung 4.19: Platine zur Verkabelung der Sensorelemente	45
Abbildung 4.20: Konzept „Type B“ aus Hidalgo-Lopez et al. [19] mit den in Rot dargestellten Kalibrierwiderständen	46
Abbildung 4.21: Schaltplan der Messelektronik zur Auswertung der Sensormatrix	47
Abbildung 4.22: Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines einzelnen Sensorelements (R_{ij})	49
Abbildung 4.23: Finales Design der Ausleseelektronik-Platine, Vor- und Rückseite	51
Abbildung 4.24: Finales Design des Netzteils mit Spannungswandlungs-Diagramm	52
Abbildung 4.25: Visualisierung des Mikrocontroller-Codes (stark vereinfacht)	53
Abbildung 4.26: Funktionstest Prototypen - (a) Elementweises abtasten des Prototyps; (b) Visualisierung der gemessenen Spannungen	56
Abbildung 4.27: Statischer Versuch der Prototypen - Formerkennung	57
Abbildung 4.28: Bildsequenz des Impulsversuchs der Prototypen	57
Abbildung 4.29: Ablaufdiagramm des MATLAB-Skripts zur Auswertung der Prototypenversuche	59

Abbildung 5.1: Zeitlicher Impulsverlauf Velo_Nr01 – 03 (einlagig)	61
Abbildung 5.2: Mittlere Spannung (a) vor und (b) nach dem Impuls (VeloNr_01 - 03).	62
Abbildung 5.3: Stärke des Krafteintrags des Modalhammers über die Anzahl der Durchführungen (VeloNr_01 - 03)	63
Abbildung 5.4: Zeitlicher Impulsverlauf Velo_Nr04 – 06 (zweilagig)	63
Abbildung 5.5: Mittlere Spannung (a) vor und (b) nach dem Impuls (VeloNr_04 - 06).	64
Abbildung 5.6: Stärke des Krafteintrags des Modalhammers über die Anzahl der Durchführungen (VeloNr_04 - 06)	65
Abbildung 5.7: Zeitlicher Impulsverlauf Velo_Nr07 – 09 (dreilagig)	65
Abbildung 5.8: Mittlere Spannung (a) vor und (b) nach dem Impuls (VeloNr_07-09).	66
Abbildung 5.9: Stärke des Krafteintrags des Modalhammers über die Anzahl der Durchführungen (VeloNr_07-09)	67
Abbildung 5.10: Zeitlicher Impulsverlauf Velo_Nr10 – 12 (zweilagig und gepresst)	68
Abbildung 5.11: Mittlere Spannung (a) vor und (b) nach dem Impuls (VeloNr_10-12).	69
Abbildung 5.12: Stärke des Krafteintrags des Modalhammers über die Anzahl der Durchführungen (VeloNr_10 - 12)	69
Abbildung 5.13: Zeitlicher Impulsverlauf Velo_Nr13 – 15 (zweilagig und erhitzt)	70
Abbildung 5.14: Mittlere Spannung (a) vor und (b) nach dem Impuls (VeloNr_13 - 15).	71
Abbildung 5.15: Stärke des Krafteintrags des Modalhammers über die Anzahl der Durchführungen (VeloNr_13 - 15)	71
Abbildung 5.16: Zeitlicher Impulsverlauf FlexiForce_01 - 02	72
Abbildung 5.17: Mittlere Spannung (a) vor und (b) nach dem Impuls (FlexiForce_01 - 02).	73
Abbildung 5.18: Stärke des Krafteintrags des Modalhammers über die Anzahl der Durchführungen (FlexiForce_01 - 02)	73
Abbildung 5.19: Kraft-Spannungs-Zusammenhang der Velostat basierten Sensoren.	75
Abbildung 5.20: Kraft-Spannungs-Zusammenhang der FlexiForce-Sensoren	77
Abbildung 5.21: Kraft- und Spannungsverlauf verschiedener Stoßintensitäten;	78
Abbildung 5.22: Maximale Kraft- und minimale Spannungswerte des Velostat basierten Kraftsensoren - Velo_Nr01 - 15. Je Bautyp ein Diagramm.	80
Abbildung 5.23: Kraft- und Spannungsverlauf verschiedener Stoßintensitäten - (a) FlexiForce_01, (b) FlexiForce_02	81

Abbildung 5.24: Maximale Kraft- und minimale Spannungswerte der FlexiForce Kraftsensoren - FlexiForce_01 - 02	82
Abbildung 5.25: Einzelbilder aus dem Funktionstest des Prototyps mit indirekt applizierter (2D) Kraftmessfolie;	84
Abbildung 5.26: Einzelbilder aus dem Funktionstest des Prototyps mit direkt applizierter (3D) Kraftmessfolie	85
Abbildung 5.27: Vergleich Spannungsanstieg einzelner Sensorelemente der Prototypen mit dem eines einzelnen, alleinstehenden Sensorelement	86
Abbildung 5.28: Spannungswerte mit Mittelwertkorrektur aus dem Formerkennungstest – indirekte Applikation	88
Abbildung 5.29: Widerstandswerte aus dem Formerkennungstest – indirekte Applikation	89
Abbildung 5.30: Spannungswerte mit Mittelwertkorrektur aus dem Formerkennungstest – direkte Applikation	90
Abbildung 5.31: Widerstandswerte aus dem Formerkennungstest – direkte Applikation	91
Abbildung 5.32: Bildsequenz Impulsversuch indirekte Applikation und Spannungsverlauf mit Mittelwertkorrektur des getroffenen Sensorelements.	92
Abbildung 5.33: Spannungs- und Widerstandsverlauf des getroffenen Sensorelements – indirekte Applikation	94
Abbildung 5.34: Bildsequenz Impulsversuch direkte Applikation und Spannungsverlauf mit Mittelwertkorrektur des getroffenen Sensorelements.	95
Abbildung 5.35: Spannungs- und Widerstandsverlauf des getroffenen Sensorelements – direkte Applikation	97
Abbildung 6.1: AFM Bild der Oberflächenrauigkeit von: (A) neuem Velostat und (B) benutzen Velostat [10]	102
Abbildung 9.1: Schaltplan Messplatine	VI
Abbildung 9.2: Schaltplan Netzteil	VII
Abbildung 9.3: Ergebnisse mehrfacher Impulsstoß, verschiedener Stärken - Velostat XI	

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Übersicht der getesteten Sensoren	29
Tabelle 5.1: Zusammenfassung Funktionstest	87
Tabelle 6.1: Zusammenfassung Streuwerte der Eigenschaftsuntersuchung von Velostat	102
Tabelle 6.2: Gemessene Widerstandswerte Element Nr. 54 der indirekten und direkten Applikation und eines alleinstehenden Sensorelementes	107
Tabelle 6.3: Zusammenfassung Vergleich zwischen indirekter und direkter Applikation. Erfüllung von zwei Kriterien von sehr gut (++) bis sehr schlecht (--)	108
Tabelle 6.4: Zusammenfassung unerklärte Effekte der Prototypentests und ihre Hypothesen. Jeder Hypothese wird ein mögliches weiteres Vorgehen zur Bestätigung dieser angehängt.	109

Abkürzungsverzeichnis

ADC	–	Analog-Digital-Converter (deutsch: Analog-Digital-Wandler)
AFM	–	Rasterkraftmikroskopie (engl. Atomic Force Microscopy)
AHT	–	Abusive Head Trauma / Missbräuchliches Kopftrauma
FSR	–	Force Sensing Resistor
OPV	–	Operationsverstärker
PVDF	–	Polyvinylidenfluorid

1 Einleitung

AHT (abusive head trauma) beschreibt ein durch Misshandlung verursachtes Kopftrauma und betrifft vor allem Säuglinge und Kleinkinder in den ersten beiden Lebensjahren. Das sogenannte Shaken Baby Syndrom (SBS) gilt als die verbreitetste Form von AHT und ist zusätzlich die häufigste nichtnatürliche Todesursache von Kindern unter zwei Jahren. In der westlichen Welt liegt die Inzidenz jährlich zwischen 15 und 30 von 100.000. [28]

Aufgrund der sehr begrenzten Datenbasis von eindeutig identifizierten AHT bei Säuglingen und Kleinkindern sind die genauen Mechanismen von AHT nicht vollständig verstanden. Daher ist die Ermittlung des eindeutigen Verletzungshergangs in vielen Fällen problematisch und führt sowohl in der Literatur als auch vor Gericht immer wieder zu Kontroversen und Diskussionen. [14, 30]

Für die weitere Forschung werden eindeutig zuordenbare Datensätze von AHT-Fällen benötigt. Da aus ethischen Gründen auf Realexperimente verzichtet werden muss, sind andere Methoden der Datenerhebung erforderlich. Simulationen bieten oft eine gute Möglichkeit zur Datenerhebung. Da jedoch die Interaktionen mit einem Täter oder einer Täterin und der Umgebung sehr vielschichtig und variabel sind, werden Simulationen schnell aufwändig und teuer, um einen Verletzungsverlauf vollständig abzubilden. Eine weitere mögliche Option der Datenerhebung für die AHT-Forschung bieten somit Versuche mit realitätsnahen Ersatzmodellen des kindlichen Schädels. Dabei ist ein wichtiger Aspekt die Kraftmessung an der Schädeloberfläche, wofür Kraftmessfolien ein geeignetes Instrument sein können. [13]

Bisherige Kraftmessfolien weisen Mängel hinsichtlich der Zuverlässigkeit auf gekrümmten Oberflächen auf und kommen für das Forschungsvorhaben nicht in Frage [32]. Wenn sie dennoch anwendbar sind, handelt es sich oft um wenig anpassungsfähige und teure kommerzielle Lösungen. Zudem sind sie vergleichsweise dick und beeinträchtigen die Haptik und die Eigenschaften der Oberfläche. Dieser Forschungsbedarf geht weit über die Anwendung im Bereich der AHT-Forschung hinaus, da der Einsatz einer solchen Sensorfolie auch in anderen Anwendungsbereichen, wie z.B. zur Erfassung von Druckverläufen an Griffen [25, 42] oder anderen gekrümmten Oberflächen sowie als Bestandteil einer „elektronischen Haut“ [5, 31, 41] in der Robotik, großes Potenzial besitzt.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Sensormatrix, die in der Lage ist, die zeitliche Druckverteilung von impulsartigen Ereignissen auf gekrümmten Oberflächen präzise aufzuzeichnen. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Anwendung dieser Technologie an einem Halbschalenprototypen, um die technische Anwendbarkeit auf einem Schädelmodell zu demonstrieren. Diese Forschung trägt dazu bei, das Verständnis von AHT zu vertiefen und gleichzeitig eine vielversprechende Technologie für weitere Anwendungsbereiche zu entwickeln.

2 Grundlagen & Stand der Forschung

Dieses Kapitel stellt die grundlegenden Konzepte und Prinzipien vor, die für das Verständnis von Kraft-Sensoren notwendig sind. Zusammen mit dem Stand der Forschung legt dieses Kapitel den theoretischen Rahmen fest, auf dem die Entwicklung einer Sensormatrix zur Aufnahme von Druckverteilungen durch impulsähnliche Ereignisse auf gekrümmten Oberflächen aufbaut.

2.1 Kraftsensoren

Kraftsensoren sind Instrumente zur Erfassung und Messung von Kräften, die auf Objekte einwirken. Diese Arbeit befasst sich mit verschiedenen Aspekten von Kraftsensoren, einschließlich ihrer Messprinzipien, Formen und Materialien. Insbesondere bei den Formen und Materialien, die für Kraftsensoren verwendet werden, gibt es eine sehr große Variationsbreite. Da sich diese Arbeit mit der Kraftmessung an gekrümmten Oberflächen beschäftigt, beschränkt sich die Beschreibung der Formen (Kapitel 2.1.2, S. 11 f.) und Materialien (Kapitel 2.1.3, S. 12 ff.) auf flexible Kraftsensoren.

2.1.1 Kraft-Sensor-Messprinzipien

Sowohl in der Forschung als auch in der Industrie werden viele verschiedene Wirkprinzipien verwendet, um eine Kraft zu messen. Diese Lösungen sind so vielfältig, dass eine detaillierte Untersuchung, auf Grundlage von Aufgabe, Einsatzort, Wandlungsmethode und mechanischen Eigenschaften des Sensors, notwendig ist, um eine vollständige Klassifizierung erstellen zu können [46]. Da Aufgabe, Einsatzort und mechanische Eigenschaften der Kraftsensoren hier durch die Aufgabenstellung dieser Arbeit definiert sind, wird eine Kategorisierung basierend auf den physikalischen Eigenschaften, welche zur Quantifizierung der Kraft genutzt werden, vorgenommen. Diese Art von Kategorisierung findet sich auch in der Literatur, wie es zum Beispiel Giovanelli et al. [16], Robers et al. [41] und Stassi et al. [46] präsentieren, immer wieder.

So gibt es Kraftsensoren (Abbildung 2.1), welche ihre elektrischen Eigenschaften verändern (Widerstand, Kapazität oder allgemeine Impedanz), andere, die eine Ladungsverschiebung im Sensormaterial erzeugen (Piezoelektrizität) und Sensoren, die

zur Messung der Kraft unterschiedliche andere physikalische Größen verwenden (optisch, magnetisch, barometrisch, Ultraschall, mechanisch).[16]

Diese Wirkprinzipien werden in den folgenden Unterkapiteln näher beschrieben.

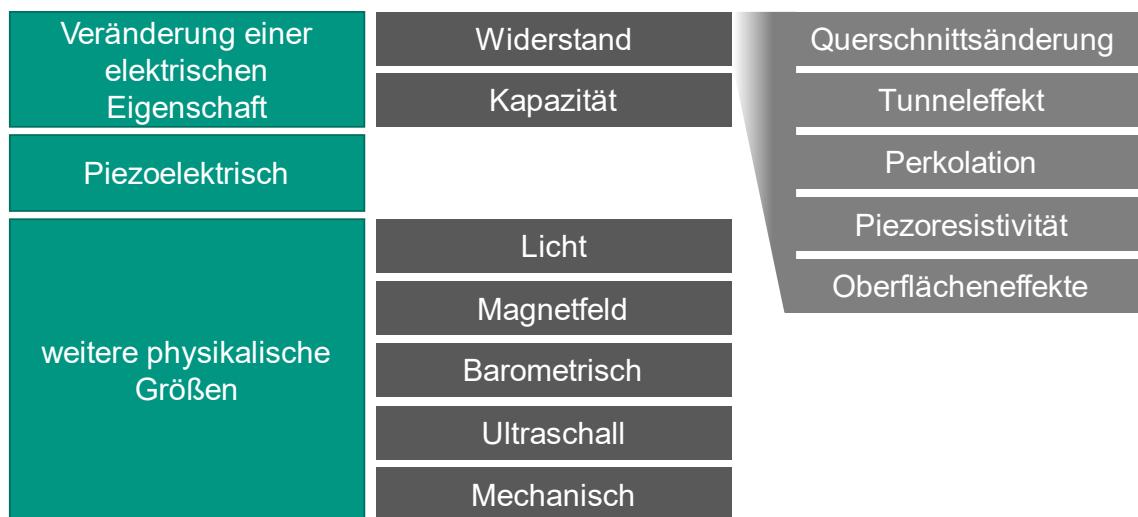


Abbildung 2.1: Übersicht Kraft-Messmethoden

2.1.1.1 Veränderung einer elektrischen Eigenschaft

Kraftsensoren, die die Veränderung ihrer eigenen elektrischen Eigenschaften nutzen, basieren im Wesentlichen auf der Verformung des Materials durch eine aufgebrachte Kraft, was zu einer Änderung des elektrischen Widerstands oder der Kapazität im Sensor führt.

Kraftsensoren dieser Kategorie haben oft einen großen Messbereich, sind kostengünstig und verbrauchen wenig Strom. Zusätzlich reicht eine vergleichsweise einfache Ausleseelektronik zur Auswertung dieser Sensoren. Deshalb sind diese Art von Sensoren, die am meisten untersuchten und kommerziell am weitesten verbreiteten Kraftsensortypen. Diese Sensortypen weisen bedeutende Einschränkungen hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit und der Reproduzierbarkeit einer Messung auf. Insbesondere sind Hysteresephänomene und ein ausgeprägter Zeit-Drift als Hauptursachen für diese Einschränkungen anzuführen. [31, 46]

2.1.1.1 Resistiv

Der resistive Kraftsensor, auch bezeichnet als Force Sensing Resistor (FSR), basiert auf der Änderung eines elektrischen Widerstands bei Krafteinwirkung. Diese Widerstandsänderung kann gemessen und daraus Rückschlüsse auf die einwirkende

Kraft gezogen werden. Die Widerstandsänderung lässt sich durch verschiedene physikalische Phänomene beschreiben [16, 46]:

Querschnittsänderung: Ein Stecken des Leiters (Abbildung 2.2) führt zu dessen Querschnittsänderung und somit zur Änderung des elektrischen Widerstands. Dieses Messprinzip wird in sogenannten Dehnungsmessstreifen eingesetzt, welche zur Erfassung von Oberflächendehnungen an mechanisch beanspruchten Bauteilen dient. [16]

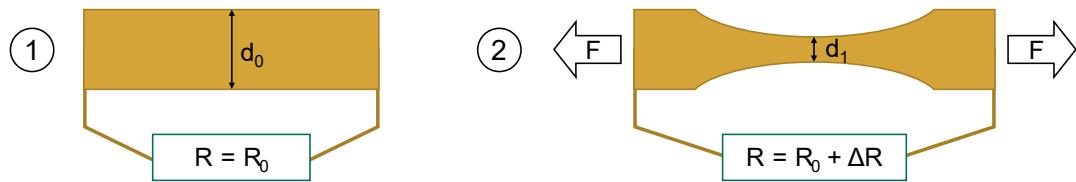


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Dehmessstreifens

Perkolation: Der Übergang von einem leitenden zu einem isolierenden Zustand erfolgt abhängig von der Menge des leitfähigen Füllstoffs, der in der Werkstoffmatrix verteilt ist. Dieser Füllstoff (Partikel mit hohem Längenverhältnis, z. B. Carbon-Nanotubes) berührt sich im Ausgangszustand und bildet somit leitfähige Wege durch das Material. Mit der Verformung der Materialmatrix verschieben und verformen sich diese Partikel, sodass leitfähige Wege verschwinden. Es kommt zu einem Übergang zwischen leitendem und isolierendem Zustand (Abbildung 2.3). [4]



Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der Perkolation am Beispiel eines Graphen/Graphit-Verbundwerkstoff [4]

Je nach Seitenverhältnis der Partikel kann es bei einer Belastung auch zu einer Reduktion (Partikel mit geringem Längenverhältnis, z. B. Metallpulver) des elektrischen Widerstandes kommen. Dieses Verhalten entsteht aus einer Kombination aus der Perkolation und dem Quanten-Tunneleffekt.

Quanten-Tunneleffekt: Der Tunneleffekt ist ein weiterer Mechanismus, der für die Leitfähigkeit in einer Polymermatrix mit leitfähigem Füllstoff verantwortlich ist. Hierbei werden leitfähige Partikel (z. B. spritziges, feines Metallpartikel) dicht beieinander in der Polymermatrix verteilt, bleiben aber vollständig von einer Polymerschicht beschichtet. Der Hauptunterschied zur Perkolation besteht also darin, dass die Partikel dauerhaft durch eine dünne isolierende Polymerschicht voneinander getrennt sind, die die Tunnelbarriere bildet. Wird auf diese Polymermatrix eine Kraft ausgeübt, verändern sich die Abstände zwischen den leitenden Partikeln in der Matrix (Abbildung 2.4). Die ausgeübte Kraft verringert die Dicke des Polymers zwischen den Spitzen der Partikel und reduziert somit die Tunnelbarriere. Der Gesamtwiderstand des Materials sinkt. [46]

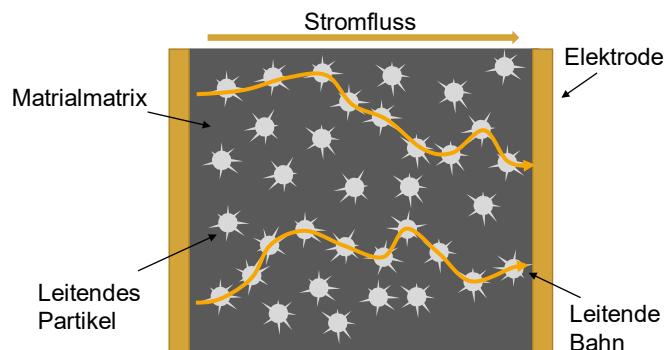


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung des Tunneleffekts (Abbildung nach [46])

Piezoresistivität: Der Widerstand des Materials ändert sich im Verhältnis zum angelegten Druck. Der anliegende Druck wirkt sich auf die Abstände zwischen den Atomen und somit die Bandlücken¹ aus (Abbildung 2.5). Dadurch ändert sich die Mobilität der Ladungsträger (Elektronen) im Material und es wird für die Elektronen leichter (bei geringerem Abstand zwischen den Atomen), beziehungsweise schwieriger (bei größerem Abstand), in das Valenzband² / Leitungsband³ zu gelangen. [44]

¹ Bandlücke: Energetischer Abstand zwischen Valenzband und Leitungsband im Festkörper [22].

² Valenzband: Höchstes voll besetztes Elektronenenergieband [22].

³ Leitungsband: Energieband, welches über dem Valenzband sitzt [22].

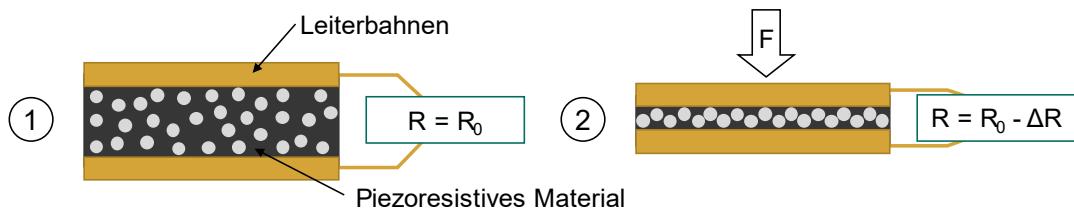


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung des piezoresistiven Effektes

Oberflächeneffekte: Bei vielen Materialien können Mikro- oder Nanostrukturen auf der Oberfläche eine bedeutende Rolle für den Gesamtwiderstand des Systems spielen. Wird keine Kraft auf das Material (in den meisten Fällen ein Polymer) ausgeübt, besteht nur ein zufälliger und vernachlässigbarer kleiner Kontakt zwischen den Leiterbahnen und dem resistivem Polymer. Wird nun eine Kraft auf das System ausgeübt, so vergrößert sich die Kontaktfläche zwischen dem Polymer und den Leiterbahnen auf mikroskopischer Ebene (Abbildung 2.7). Das hat zur Folge, dass mit zunehmender äußerer Belastung der elektrische Widerstand entsprechend abnimmt. [8]

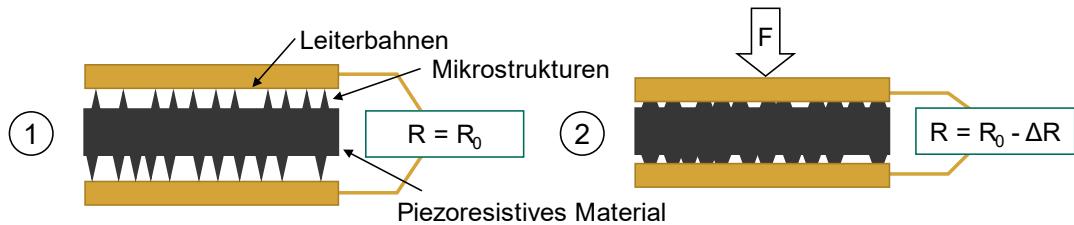


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung des Oberflächeneffektes

2.1.1.2 Kapazitiv

Kapazitive Sensoren bestehen in der Regel aus zwei leitfähigen Platten, die durch ein Dielektrikum voneinander isoliert sind. Wirkt eine Kraft auf den Sensor, ändert sich der Abstand zwischen den Kondensatorplatten und somit auch die Kapazität des Sensors (Abbildung 2.7). Aus der Messung dieser Kapazitätsänderung kann auf die einwirkende Kraft geschlossen werden. [6]

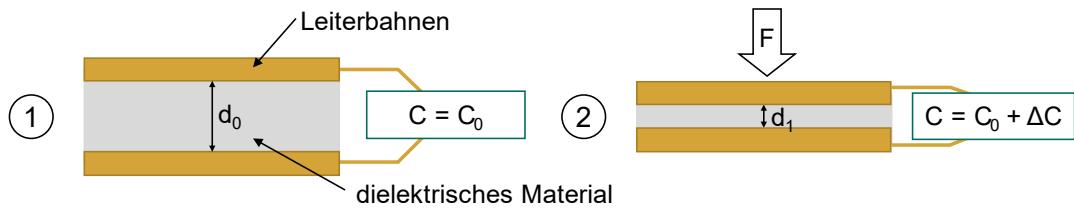


Abbildung 2.7: Aufbau und Funktionsweise eines kapazitiven Kraftsensors

2.1.1.2 Piezoelektrisch

Diese Kraftsensoren nutzen den piezoelektrischen Effekt, um Kräfte in elektrische Signale umzuwandeln. Durch die Polarisierung der internen Ladungen verteilen sich diese bei mechanischer Verformung auf die gegenüberliegenden Oberflächen des Materials (Abbildung 2.8). Durch Messung der dabei entstehenden Spannung kann die einwirkende Kraft bestimmt werden. Sobald die äußere Kraft entfernt wird, kehrt das Material in seinen ursprünglichen ungeladenen Zustand zurück. [5]



Abbildung 2.8: Aufbau und die Funktionsweise eines piezoelektrischen Kraftsensors (Abbildung nach [5])

2.1.1.3 Weitere physikalische Größen

Neben der direkten Manipulation von elektrischen Eigenschaften kann auch auf andere Wirkprinzipien zurückgegriffen werden, um eine Kraft zu messen. So ist es unter anderem auch möglich optisch, magnetisch, barometrisch, per Ultraschall oder über mechanische Prinzipien Kräfte zu erfassen.

Sensoren, die auf diesen Wirkprinzipien basieren, zeichnen sich häufig durch eine hohe Empfindlichkeit und räumliche Auflösung aus. Andererseits sind sie weniger flexibel, teuer, aufwändig in der Herstellung und schwer zu reproduzieren. [46]

2.1.1.3.1 Optisch

Um eine Kraft optisch zu bestimmen, werden Intensitätsänderungen des Lichtes, welches das Material durchstrahlt, gemessen. Eine Deformation führt dazu, dass Teile der Lichtquelle abgeschirmt werden und die Intensität des Lichtes an einem lichtempfindlichen Element (zum Beispiel eine Fotodiode) abnimmt. Dieses Prinzip wird in Abbildung 2.9 veranschaulicht. [9]

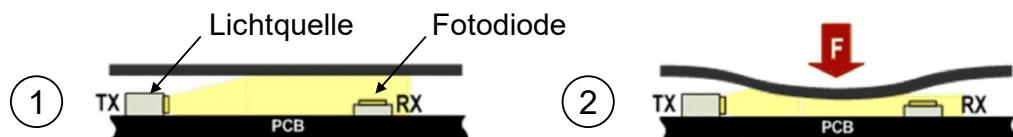


Abbildung 2.9: Beispiel für einen optischen Kraftsensor [9]

2.1.1.3.2 Magnetisch

Magnetische Sensoren können zur Detektion von Kräften eingesetzt werden, indem die Änderung eines angelegten Magnetfeldes gemessen wird. Wird auf ein mit magnetisierbaren Mikropartikeln gefülltes Elastomer eine Kraft ausgeübt, so ändert sich das innere Magnetfeld der Materialmatrix. Diese Änderung kann mit einem Magnetometer erfasst werden, das entweder direkt im Elastomer oder in unmittelbarer Nähe angebracht wird. Auf diese Weise kann indirekt die einwirkende Kraft beziehungsweise die Verformung des Elastomers bestimmt werden. Abbildung 2.10 veranschaulicht den Einsatz von magnetischen Sensoren zur Kraftmessung. [41]

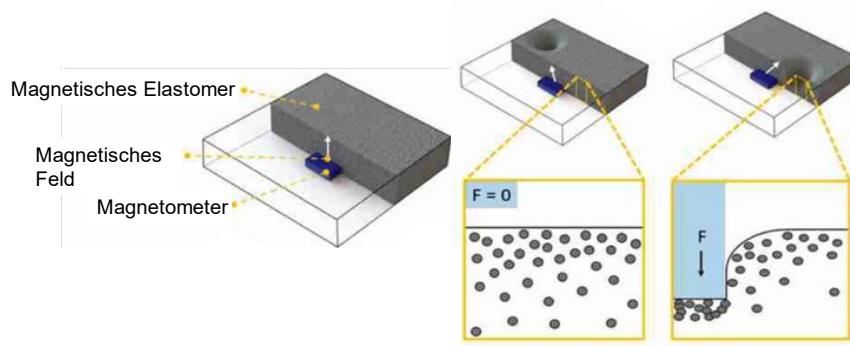


Abbildung 2.10: Beispiel für einen magnetischen Kraftsensor [18]

2.1.1.3.3 Barometrisch

Durch den direkten Zusammenhang zwischen Kraft und Druck über die Größe der belasteten Fläche können Barometer auch zur Kraftmessung eingesetzt werden. Wird

ein Barometer zum Beispiel in einer elastischen Druckkammer eingeschlossen und eine Kraft auf diese ausgeübt, so kann der resultierende Druckunterschied auf die einwirkende Kraft zurückgerechnet werden. [41]

Abbildung 2.11 zeigt einen solchen barometrischen Kraftsensor.

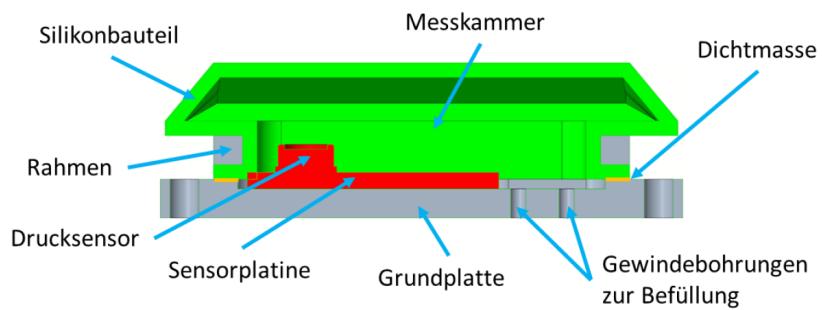


Abbildung 2.11: Beispiel für einen barometrischen Kraftsensor; schematischer Querschnitt der Sensoreinheit entwickelt von R. Haug [17]⁴

2.1.1.3.4 Schwingungen / Ultraschall

Wird ein piezoelektrisches Material mit einer mechanischen Schwingung angeregt, die gleich der mechanischen Resonanzfrequenz ist, so befindet sich das Material in piezoelektrischer Resonanz. Geeignete Oszillatorschaltungen erzeugen eine Ausgangsfrequenz, die der mechanischen Resonanzfrequenz des Materials entspricht. Wirkt nun eine Kraft auf das Material, verändert sich die mechanische Resonanzfrequenz des Materials und damit auch die erzeugte Ausgangsfrequenz. Die Frequenzänderung ist somit direkt proportional zur einwirkenden Kraft und kann zu deren Messung verwendet werden. [29]

Ähnlich gibt es Kraftsensoren, die die Änderung von Oberflächenschwingungen oder die durch Berührung erzeugte Schwingungen messen, um daraus Rückschlüsse auf die einwirkende Kraft zu ziehen [1, 2].

All diese Sensoren nutzen die durch die Wechselwirkung mit dem Sensor hervorgerufenen Schwingungsänderungen, um eine Kraft zu messen.

⁴ Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

2.1.1.3.5 Mechanisch

In einer Kombination aus mechanischen und elektrischen Komponenten können auch Verfahren der klassischen Wegmessung verwendet werden, um Kräfte in ihrer Lage und Amplitude zu messen. Wird beispielsweise ein nachgiebiges Material mit bekannten elastischen Eigenschaften passend geformt, so verschieben sich Teile der Struktur proportional zur Größe der Belastung (Abbildung 2.12). Durch Messung dieser Verschiebung mit einem linearen, optischen oder kapazitiven Potentiometer kann auf den Betrag der zu messenden Kraft geschlossen werden. [23, 38, 39]

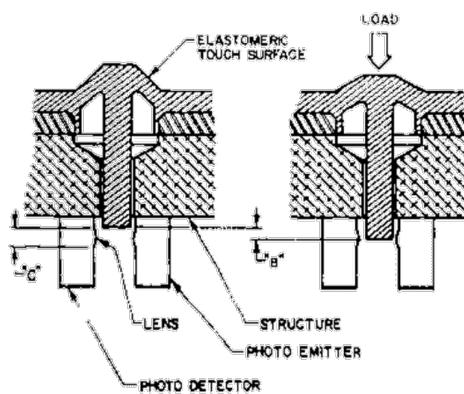


Abbildung 2.12: Beispiel für einen mechanischen Kraftsensor (Abbildung aus [39])

2.1.2 Formen resistiver, flexibler Kraftsensoren

Aufgrund des einfachen Aufbaus, der einfachen Herstellung, der geringen Kosten, der hohen Widerstandsfähigkeit und der hohen Gestaltungsfreiheit, sind als flexible Kraftsensoren vor allem resistive Sensoren verbreitet. [12, 56]

Bei diesen Sensoren wird der Widerstand des verwendeten resistiven Werkstoffs mit Hilfe von Leiterbahnen gemessen, die in direktem Kontakt mit diesem Material stehen. Die Leiterbahnen können dafür in das Material eingebettet, auf das Material aufgeklebt oder nur auf das Material aufgelegt werden. [16]

Des Weiteren können resistive Kraftsensoren in zwei Hauptkategorien eingeteilt werden: Einzelpunktsensoren und Matrixsensoren. Einzelpunktsensoren sind Sensoren, die Kräfte ausschließlich in einem Bereich messen können. Dieser Bereich kann von sehr kleinen Punkten bis zu sehr großen Flächen reichen. Diese Art von Sensoren bieten keine Information darüber, wo in diesem Bereich der Krafteintrag stattgefunden hat. [16]

Weit verbreitet ist die Sandwichstruktur (Abbildung 2.13 (a)), bei der die Elektroden beide Seiten des resistiven Materials vollständig bedecken. Alternativ können auch beide Leiterbahnen nebeneinander (oder mit einer Interdigitalstruktur⁵) auf derselben Seite des Sensormaterials angebracht werden (Abbildung 2.13 (b)). Eine dritte Variante stellt der Einzelpunktsensor mit Randelektroden dar (Abbildung 2.13 (c)). Hier sind die Elektroden wie zuvor in Kontakt mit dem resistiven Material, werden jedoch nur an den Rändern der Sensoroberfläche platziert.

Im Gegensatz zu Einzelpunktsensoren bieten Sensormatrizen die Möglichkeit, Aussagen über den genauen Ort der Krafteinleitung zu machen, ohne dass jeder Sensorpunkt mit zwei Kabeln angesteuert werden muss. Die einfachste Struktur basiert auf horizontalen und vertikalen Leiterbahnen, die auf beiden Seiten eines kraftempfindlichen Polymermaterials angebracht sind (Abbildung 2.13 (d)). [16]

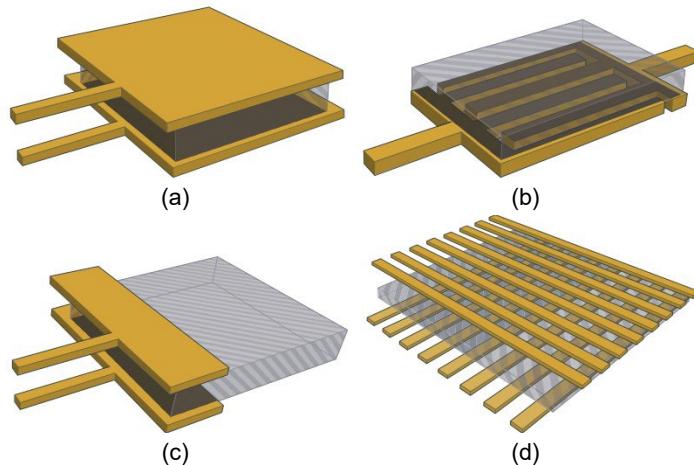


Abbildung 2.13: Verbreitete Bauformen von resistiven Kraftsensoren; Elektroden sind in Gelb dargestellt, das resistive Material in Grau: (a) Einzelpunktsensor - Sandwichstruktur, (b) Einzelpunktsensor mit Interdigitalstruktur, (c) Einzelpunktsensor mit Randelektroden, (d) Sensor-Matrix [16]

2.1.3 Materialien resistiver Kraftsensoren

Resistive Kraftsensoren können neben unterschiedlichen Bauformen auch verschiedenste Materialien verwenden, um ihre Funktion als Kraftsensor zu erfüllen.

Dazu gehören unter anderem piezoresistive Folien (Abbildung 2.14 (a)), piezoresistive Tinten (Abbildung 2.14 (b)), leitfähige Flüssigkeiten in weichen Kanälen (Abbildung

⁵ Interdigitalstruktur: Kammförmige, ineinander verzahnte, fingerartige Struktur [27].

2.14 (c)) und Materialien mit speziell entwickelten Mikrostrukturen (Abbildung 2.14 (d)). Allen Materialien ist gemeinsam, dass sie ihren Widerstand bei Krafteinwirkung ändern.

Bei den in den Veröffentlichungen vorgestellten Kraftsensoren kommen in vielen Fällen **piezoresistive Folien** zum Einsatz. Diese bestehen meist aus Polyvinylidenfluorid (PVDF) oder anderen Polymeren, welche bei Krafteinwirkung ihren elektrischen Widerstand ändern. Aufgrund der geringen Kosten und der breiten Verfügbarkeit, wird in der Literatur häufig das Material Velostat (3M Corporation, Maplewood, MN, USA) erwähnt. [3, 8, 10, 11, 24, 47, 48, 51, 52, 56]

In kommerziellen Lösungen kommen vor allem **piezoresistive Tinten** zum Einsatz. Wie bei den piezoresistiven Folien ändert sich auch hier der Widerstand mit Krafteinwirkung. Ein Beispiel für einen kommerziellen Kraftsensor ist der FlexiForce™ A201 (Tekscan Inc, Norwood, MA, United States) [49].

Eine weitere Möglichkeit, resistive Kraftsensoren herzustellen, bieten **leitfähige Flüssigkeiten in weichen Kanälen**. Durch das Aufbringen einer Kraft reduziert sich der Durchmesser der Kanäle und die Flüssigkeit entweicht. Dadurch erhöht sich der Gesamtwiderstand. [36]

Darüber hinaus kann durch unterschiedliche **Mikrostrukturen auf den Oberflächen** der Grundwerkstoffe beeinflusst werden, wie sich die Kontaktfläche zum Leiter mit zunehmender Kraft verändert. Damit ändert sich auch der Gesamtwiderstand in Abhängigkeit von der Kraftamplitude. [34]

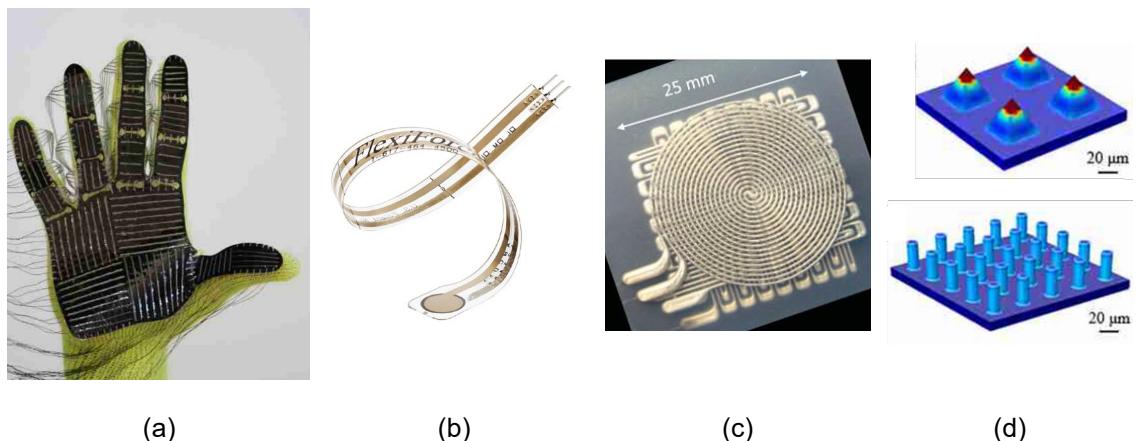


Abbildung 2.14: Verschiedene Materialien resistiver Kraftsensoren:
 (a) piezoresistive Folien [47], (b) piezoresistive Tinten [49], (c) leitfähige Flüssigkeiten in weichen Kanälen [35] und (d) Materialien mit speziell entwickelten Mikrostrukturen [34]

2.1.3.1 Velostat

Besonders hervorzuheben ist das Material Velostat. Das Funktionsprinzips von Velostat ist in der Literatur nicht eindeutig beschrieben. So behaupten Del Prete et al. [8], dass die Widerstandsänderung von Velostat auf einer Änderung des Kontaktwiderstands zwischen dem resistiven Polymer und den Leiterbahnen, also auf Oberflächeneffekten, beruht. Vehc und Livovsky [52] wiederum beschreiben das Verhalten von Velostat mit dem Quanten-Tunneleffekt und der Perkolation (Partikelverschiebungen in der Materialmatrix). Kalantari et al. modellieren das Material durch eine Kombination beider Beschreibungen (Oberflächeneffekte + Partikelverschiebungen) [24].

Velostat findet aufgrund seiner geringen Kosten und breiten Verfügbarkeit in vielen Anwendungen für resistive Kraftsensoren Verwendung. Es zeichnet sich durch eine geringe Dicke von circa 0,1 mm und einer hohen Flexibilität aus, wodurch es leicht zu verarbeiten ist und sich für die Herstellung von Sensoren in verschiedenen Formen und Ausführungen eignet. [10, 12]

Darüber hinaus zeichnet sich Velostat durch eine hohe Sensibilität aus, die es ermöglicht, feine Kraftänderungen effektiv zu erfassen. Zudem ist der Bereich der messbaren Kräfte sehr groß und die erforderliche Ausleseelektronik vergleichsweise einfach [8, 10, 12].

In der Literatur wird vor allem die mangelnde Genauigkeit und Präzision von Velostat als wesentlicher Nachteil genannt. Dazu gehören die eingeschränkte Wiederholbarkeit der Messungen, der zeitliche und zyklischen Drift und die Hystereseneffekte. [8, 21, 51, 52]

Es gibt jedoch auch widersprüchliche Aussagen zu verschiedenen Eigenschaften, wie zum Beispiel zur Reaktionsgeschwindigkeit von Velostat. Del Prete et al. [8] und Dumnić et al. [50] kommen zu dem Schluss, dass Velostat-Druck-Sensoren nahezu verzögerungsfrei reagieren, wohingegen Fatema et al. [12] eine vergleichsweise lange Reaktionszeit von ungefähr 0,3 s gemessen haben. Aufgrund dieser Aussagen ist unklar, ob das eingangs formulierte Ziel der Impulsauflösung mit Velostat-Sensoren erreichbar ist, weshalb weitere Untersuchungen notwendig sind (Kapitel 4.1, S. 25 ff.).

Viele dieser Ergebnisse sind schwer vergleichbar und übertragbar, da die Widerstandsänderung von Velostat von vielen Faktoren abhängt, wie zum Beispiel der Größe der Kontaktfläche zwischen Velostat und Elektrode, der angewendeten Kraft und Zeit sowie den Materialeigenschaften der Velostat-Folie selbst [56]. Darüber hinaus spielen auch die Krümmung [11], in der die Folie aufgebracht wird, sowie die

verwendeten Materialien (Leiterbahn und Trägermaterialien) [52] eine Rolle für das Widerstandsverhalten von Velostat.

2.2 Auslesestrategien für resistive Sensorarrays

In der Sensortechnik ist die Wahl einer geeigneten Auslesestrategie eine zentrale Herausforderung. Dieses Kapitel behandelt Auslesestrategien für resistive Sensorarrays.

Eine grundlegende Messmethode ist die Bestimmung des Spannungsabfalls über einen zu messenden Widerstand mit Hilfe eines einfachen Spannungsteilers (Abbildung 2.15). Dieser Ansatz basiert auf den Prinzipien des Ohm'schen Gesetzes und der Kirchhoff'schen Regeln, die es ermöglichen, die Spannung über dem zu messenden Widerstand (R_2) mit Formel 2.1 zu bestimmen.

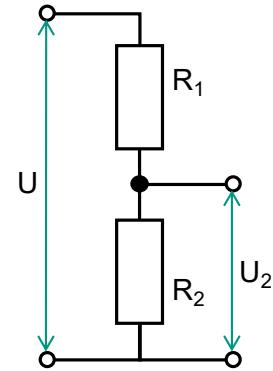


Abbildung 2.15: Spannungsteiler zum Messen von Widerständen

$$U_2 = \frac{U}{R_1 + R_2} * R_2 \quad 2.1$$

Durch Umstellen dieser Gleichung nach R_2 kann der Widerstand R_2 mithilfe der gemessenen Spannung U_2 ermittelt werden, vorausgesetzt, die Spannung U und der Widerstand R_1 sind bekannt (Formel 2.2). Zur Umwandlung der analogen Spannung in ein digitales Signal kommen Analog-Digital-Wandler (ADC) zum Einsatz.

$$R_2 = \frac{R_1 U}{U - U_2} \quad 2.2$$

Sollen nun mehrere Sensorelemente mit identischem Verhalten im Raster im Format $M \times N$ ausgelesen werden, so sind nach dem oben beschriebenen Prinzip je Element zwei Anschlussleiterbahnen, also insgesamt $2 \times M \times N$, erforderlich. [26]

Werden nun zwei Sätze von Anschlusselektroden in Reihen-Spalten-Anordnung verwendet, wobei alle Sensorelemente mit einem Ende an eine Spaltenelektrode und mit dem anderen Ende an eine Reihenelektrode angeschlossen sind, so reduziert sich die Anzahl der benötigten Anschlusselektroden von $2 \times M \times N$ auf $N + M$ (Abbildung 2.16). Um ein Sensorelement mit dem Widerstand R_{ij} ($\forall i, j \in \mathbb{N}; i \in [0, M], j \in [0, N]$) auszulesen, wird die i -te Reihe auf das Messpotential gezogen und alle anderen auf Masse. Durch das Auslesen über den Ausleseschaltkreis „j“ kann damit der Widerstandswert von R_{ij} innerhalb der Reihen-Spalten-Anordnung bestimmt werden. [26]

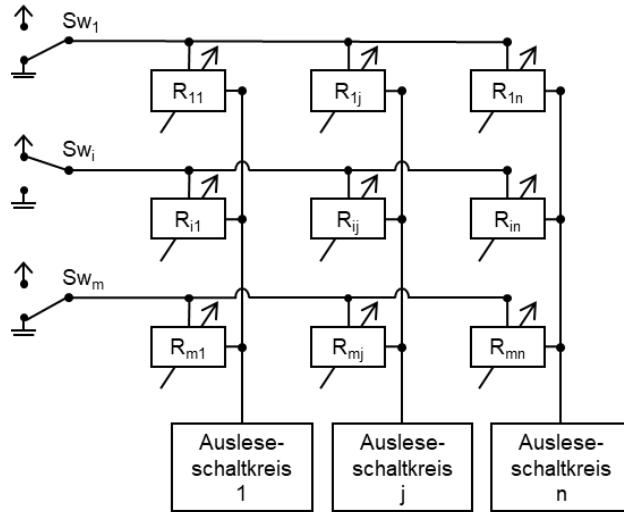


Abbildung 2.16: Grundstruktur zum Auslesen eines Rasters aus $M \times N$ Sensorelementen (Abbildung nach [19])

Diese Anordnung verringert zwar die Komplexität des Systems, kommt jedoch mit dem Problem des Übersprechens (Crosstalk) einher. Das Übersprechen ist auf das Vorhandensein von parasitären parallelen Pfaden zurückzuführen, die den Wert des gemessenen Widerstands ändern, wenn versucht wird, die Spannung eines Sensorelements auszulesen. [7]

Dieser Aspekt ist auch Gegenstand der Literatur und es werden eine Reihe von Lösungsvorschlägen zu diesem Problem unterbreitet. Die vorgestellten Schaltungen lassen sich grundsätzlich in zwei Kategorien einteilen: Schaltungen auf Basis von Erdung (Abbildung 2.17 (a)) und Schaltungen auf Basis von Feedback-Loops (Abbildung 2.17 (b)).[7]

Auf Erdung basierende Schaltungen eliminieren das Übersprechen durch Nutzen von Operationsverstärker in jeder Spalte, welche als virtuelle Massen fungieren. Durch die Verwendung von virtuellen Massen sind so alle Spalten elektrisch voneinander entkoppelt, und die nicht aktiven Spalten sind dennoch geerdet. Zusätzlich wird darauf geachtet, dass nicht aktive Reihen ebenfalls geerdet sind. Durch die Erdung und das Entkoppeln der Spalten wird ein Übersprechen verhindert. [7]

Schaltungen, welche auf Feedback-Loops basieren, nutzen verschiedene Schaltungen, um alle Elemente, auch die, die nicht ausgelesen werden, auf das Spannungsniveau des aktuell auszulesenden Elementes zu heben. Somit liegen alle Elemente auf einem

Spannungsniveau und es kommt zu keinen (unter idealen Bedingungen) parasitären Strömen zwischen den Elementen.

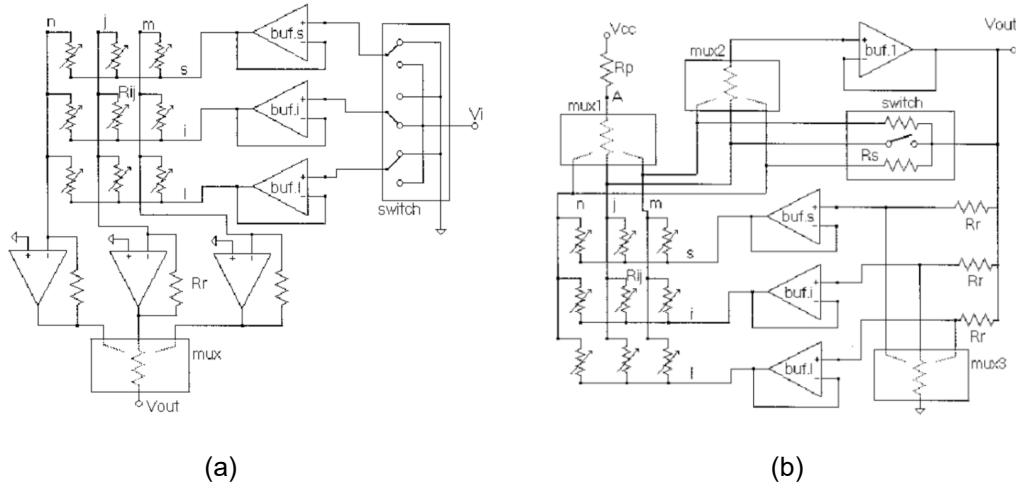


Abbildung 2.17: Schaltungen auf (a) Basis von Erdung und (b) auf Basis von Feedback-Loops [7]

Des Weiteren wurden weitere Ansätze, zur Verbesserung der Auslesegüte entwickelt. Beispielsweise durch Kalibrierwiderstände [19], alternative Messabläufe mit zweifacher Messung [55], oder kapazitive Rückkopplung [33]. Wu et al. [54] fassen eine Vielzahl an verschiedenen Ausleseschaltungen zusammen.

Neben den klassischen Methoden sind auch die „Direct Interface Circuits“ zu erwähnen. Hier wird auf das Auslesen der Spannung mittels Analog-Digital-Wandler verzichtet. [40]

2.3 Gekrümmte Kraftmessfolien

Kraftmessfolien bestehen aus einer Vielzahl von Einzelsensoren, die zusammen über größere Flächen Kräfte messen können. Sie werden in vielen Bereichen wie der Industrie, der Medizin oder der Robotik eingesetzt [8]. Die meisten Kraftmessfolien sind jedoch flach und nur begrenzt dehnbar, sodass ihr Einsatz auf gekrümmten Oberflächen begrenzt möglich ist. Der Versuch, eine flache, nicht dehbare Folie auf eine komplexere Geometrie aufzubringen, führt zur Faltenbildung oder Beschädigung der Folie. Werden konventionelle Kraftmessfolien dennoch auf eine gekrümmte Oberfläche aufgebracht, leidet häufig die Messqualität [32].

Um dieses Problem zu lösen, gibt es nur wenige Ansätze, um gekrümmte Kraftmessfolien zu entwickeln. Ein Beispiel ist die Arbeit von Niu et al. [32]. Niu et al. verwenden mehrere kommerziell erhältliche Einzelpunkt-Krafaufnehmer, die über eine gekrümmte Fläche verteilt und miteinander verbunden sind (Abbildung 2.18). Die Untersuchung zeigt, dass die verwendeten flexiblen Sensoren zwar nicht für die Messung des Flächendrucks auf stark gekrümmten Oberflächen geeignet sind, der Oberflächendruck auf einem Kopf jedoch mit den Sensoren gut gemessen werden kann. Dies liegt daran, dass die Regelmäßigkeit des menschlichen Kopfes und die Anordnungsdichte der flexiblen Sensoren ausreichend groß sind und die Sensoren nur geringfügig verformt werden.

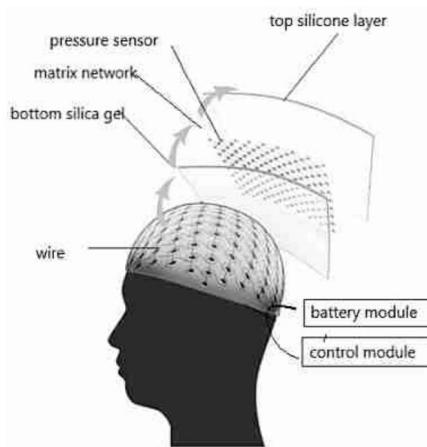


Abbildung 2.18: Sensormatrix zur Messung von Kräften am menschlichen Kopf, vorgestellt von Niu et al. [32]

Ein weiteres Beispiel ist das Produkt „TactileHead“ [37] von PPS (PPS UK Limited - Medical Tactile, Inc.) (Abbildung 2.19). Dieses und ähnliche Produkte von PPS bieten

die Möglichkeit, Druckverteilungen auf der Kopfoberfläche zu messen. Allerdings ist das Produkt, wie auch andere derartige Produkte, teuer und vergleichsweise dick, was die Haptik und Oberflächenbeschaffenheit verändern kann.



Abbildung 2.19: TactileHead von PPS [37]

2.4 Missbräuchliches Kopftrauma (AHT)

Eine schwere Form der Kindesmisshandlung ist das „missbräuchliche Kopftrauma“ (abusive head trauma; AHT), auch bekannt als "Shaken Baby Syndrome" oder "Schütteltrauma". Durch äußere Gewalteinwirkung (vor allem heftiges Schütteln) auf den Säugling oder das Kleinkind kommt es zu schweren Kopf- und Gehirnverletzungen. Diese traumatischen Ereignisse treten hauptsächlich in den ersten beiden Lebensjahren auf und können zu bleibenden Schäden oder sogar zum Tod des Kindes führen. Die wissenschaftliche Forschung zu diesem Thema befasst sich mit den Ursachen und Folgen von Schädel-Hirn-Verletzungen sowie mit Präventionsmöglichkeiten und rechtlichen Fragen. [13, 28]

In der westlichen Welt tritt das Schütteltrauma bei 15 bis 30 von 100.000 Kindern unter einem Jahr auf, wobei das Schütteltrauma-Syndrom (STS) als häufigste und schwerste Form beschrieben wird. Allein in Deutschland wird von 100 bis 200 Fällen pro Jahr ausgegangen. STS gilt zudem als die häufigste nichtnatürliche Todesursache bei Säuglingen und Kleinkindern. [28]

Da die genauen Mechanismen dieser Schädel-Hirn-Traumata nicht vollständig geklärt sind, gibt es in der Fachliteratur immer wieder Debatten und Kontroversen darüber, die

sich vor allem vor Gericht auswirken können. Im Mittelpunkt dieser Diskussion steht die Frage, ob die festgestellten Verletzungen auch durch einen Sturz aus geringer Höhe oder durch ein anderes Trauma (z.B. Anstoßen des Kopfes) verursacht worden sein können oder ob andere Faktoren, wie z.B. Vorerkrankungen, als Auslöser in Frage kommen. Das Hauptproblem besteht in der sehr begrenzten Datenlage zu eindeutig identifizierten AHT bei Säuglingen und Kleinkindern. [13, 14]

3 Motivation und Zielsetzung

3.1 Motivation

Aufgrund der sehr begrenzten Datenbasis von eindeutig identifizierten AHT bei Säuglingen und Kleinkindern sind die genauen Mechanismen von AHT bis heute nicht vollständig verstanden [13, 28]. Für die weitere Forschung auf diesem Gebiet werden daher realitätsnahe Dummys benötigt, um aussagekräftige Daten aus verschiedenen Experimenten zu sammeln. Unter anderem soll ein solcher Dummy eingesetzt werden, um den Krafteintrag bei Kopfverletzungen von Säuglingen und Kleinkindern, z.B. durch Stürze, aufzuzeichnen und zu analysieren. Zur Aufzeichnung dieser Kraftimpulse soll eine Kraftmessfolie verwendet werden.

Bisherige Kraftmessfolien sind auf gekrümmten Oberflächen oft nicht zuverlässig anwendbar [32]. Ist dies dennoch der Fall, handelt es sich meist um wenig individualisierbare und teure kommerzielle Lösungen, die zudem vergleichsweise dick sind und die Haptik und Beschaffenheit der Oberfläche verändern. Darüber hinaus besteht Unklarheit über die Genauigkeit bei der Erfassung und Analyse von Stoßkräften.

Um diese Defizite zu beheben, muss eine neue Kraftmessfolie entwickelt werden, die den Anforderungen der Kraftmessung an einem Ersatzmodell des kindlichen Schädelns gerecht wird.

Darüber hinaus ist der Einsatz einer solchen Sensorfolie in vielen weiteren Anwendungsbereichen denkbar. Zum Beispiel zur Erfassung von Druckverläufen an Griffen [25, 42], als „elektronische Haut“ [5, 31, 41] in der Robotertechnik oder auf beliebigen anderen gekrümmten Oberflächen.

3.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Sensormatrix, die in der Lage ist, zeitliche Druckverteilungen von impulsartigen Ereignissen auf gekrümmten Oberflächen aufzuzeichnen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Anwendung an einem Kugel- oder Halbschalenprototypen, um die technische Anwendbarkeit für den Kopfbereich eines Schädel-Dummys zu demonstrieren.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, soll die Sensormatrix aus einem flexiblen, dünnen Material bestehen, das mit einem Raster von Kraftsensoren variabler Elementgröße versehen ist. Diese Sensorfolie muss kostengünstig und robust sein, um den harten Bedingungen beim Einsatz an einem Dummy standzuhalten. Sie soll dünn genug sein, um die Form und die Eigenschaften des darunterliegenden Objekts nicht grundlegend zu verändern.

Teil der Arbeit ist die Recherche des aktuellen Forschungsstandes, die Erprobung und Auswahl eines geeigneten Sensors sowie die Entwicklung und Konstruktion der Sensorfolie. Dazu soll die Eignung des gewählten Sensorprinzips durch Versuche nachgewiesen und eine entsprechende Messelektronik entwickelt werden. Anschließend soll der Prototyp auf Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit getestet werden.

4 Untersuchungsmethoden

Dieses Kapitel konzentriert sich auf die Methoden und Verfahren, die im Laufe dieser Arbeit angewendet werden, um einen Demonstrator herzustellen. Es ist in mehrere Unterkapitel unterteilt, in denen die Schritte und Techniken, die bei der Untersuchung und Entwicklung der Prototypen angewandt wurden, detailliert beschrieben werden.

Das erste Unterkapitel 4.1 widmet sich den Voruntersuchungen. Es werden die physikalischen Eigenschaften und das Verhalten des Materials Velostat untersucht. Anschließend wird in Abschnitt 4.2 auf den Entwurf der Sensormatrix einschließlich ihrer Anordnung und Integration in das Gesamtsystem eingegangen. Kapitel 4.3 beschreibt die Herstellung und Montage der Sensormatrix auf dem Grundkörper detailliert beschrieben.

Die Abschnitte 4.4 und 4.5 befassen sich mit der Elektronik und der Software, die zur Datenerfassung und -verarbeitung in Verbindung mit der entworfenen Sensormatrix verwendet werden.

4.1 Eigenschaftsuntersuchungen Velostat

In diesem Kapitel werden die Eigenschaften von Velostat untersucht. Ziel der Untersuchungen ist es, zu quantifizieren, ob und in welcher Qualität Velostat als Basismaterial für einen Kraftsensor zur Aufnahme mechanischer Stöße geeignet ist. Die entworfenen Versuche zielt darauf ab, die folgenden Untersuchungsfragen zu beantworten:

1. Kann ein Kraftsensor, der Velostat als Basismaterial verwendet, **Impulse zeitlich auflösen**?
2. Können unterschiedliche **Amplituden des Kraftimpulses** gemessen werden?
3. **Wiederholbarkeit:**
 - a. Wie stark unterscheiden sich die Ergebnisse mehrerer Versuche desselben Testsensors?
 - b. Wie stark unterscheiden sich die Ergebnisse mehrerer Versuche baugleicher Testsensoren?

4.1.1 Versuchsaufbau

Der gesamte Versuchsaufbau wird in Abbildung 4.1 dargestellt. Ein Modalhammer (PCB086C03, PCB Piezotronics, Inc., NY, USA, mit der Spitze Nr. 084B04, Kunststoff) schwingt frei auf den zu untersuchenden Sensor, welcher auf einem harten Untergrund (Stahl) angebracht ist und erzeugt somit einen mechanischen Impuls. Wie bereits in Kapitel 2.1.3.1 (S. 14 f.) beschrieben, ändert sich durch das Aufbringen einer Kraft, der elektrische Widerstand des Velostat-basierten Sensors. Zum Quantifizieren dieser Widerstandsänderung wird ein Spannungsteiler eingesetzt. Durch das Messen des Spannungsabfalls V_{Mess} über den Sensor (Messwiderstand) können Rückschlüsse auf den sich ändernden Widerstand des Sensors gezogen werden (nach Formel 4.1).

$$R_{Mess} = \frac{V_{Mess} \cdot R_{Vor}}{V_{cc} - V_{Mess}}. \quad 4.1$$

Sowohl das Messignal des Modalhammers ($F_{Modalhammer}$) als auch das Messsignal des Sensors (V_{Mess}) werden durch das ADwin-System (ADwin-Pro II, Jäger Computergesteuerte Messtechnik GmbH, Lorsch, Deutschland) erfasst. Gemessen wird mit der Messkarte Pro II-MIO-4 (Jäger Computergesteuerte Messtechnik GmbH, Lorsch, Deutschland), mit einer Messfrequenz von 25 kHz.

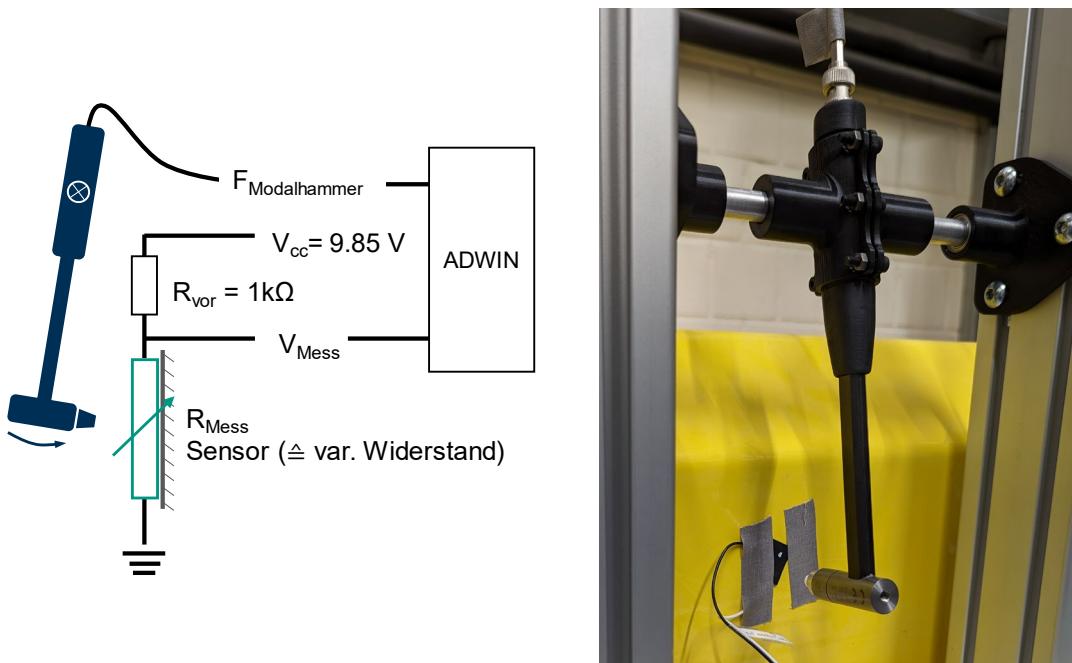


Abbildung 4.1: Schematischer (links) und realer (rechts) Versuchsaufbau zur Untersuchung der Eigenschaften von Velostat-Sensoren

4.1.1.1 Testsensoren

Der prinzipielle Aufbau der Testsensoren wird in Abbildung 4.2 dargestellt. Die äußerste Schicht bildet Kapton® Klebeband (DuPont Electronics & Industrial, Delaware, USA), das als klebende und stabilisierende Schicht dient. Darauf wird ein 5 mm breites Kupferband aufgebracht. Zwischen das Kupferband wird eine bis drei 10 mm x 10 mm große Velostat-Folie gelegt. Durch die elektrischen Eigenschaften von Velostat entsteht so ein kraftsensitiver elektrischer Widerstand. Der Messpunkt liegt dabei im Schnittpunkt der Kupferbahnen.

Dieser Aufbau ist mit Velostat-Kraft-Sensoren aus der Literatur, wie zum Beispiel in [3, 11, 12, 24, 47, 51], vergleichbar.

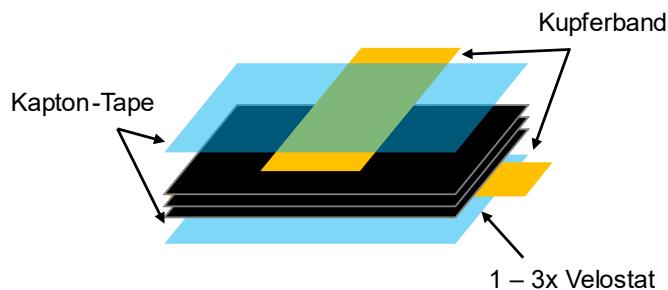


Abbildung 4.2: Aufbau eines Testsensors in Sandwichbauweise. Von innen nach außen: ein bis drei Lagen Velostat, Kupfer, Kapton-Tape

Wie in Kapitel 2.1.3.1 (S. 14 f.) erwähnt, wird Velostat in einigen Veröffentlichungen im Zusammenhang mit Kraftsensoren als „ungenau“ und „schlecht reproduzierbar“ beschrieben [12, 16, 48, 51]. Im Rahmen der Versuche soll unter anderem untersucht werden, ob sich das Verhalten des Sensors mit mehreren Velostat-Lagen verbessert.

In der Literatur werden unter anderem Oberflächeneffekte als die Hauptursache für den kraftabhängigen Widerstandswert von Velostat genannt (Kapitel 2.1.3.1, S. 14 f.). Die Annahme besteht darin, dass Materialfehler, insbesondere an der Oberfläche, zu den in den genannten Veröffentlichungen beschriebenen Unregelmäßigkeiten führen. Werden nun mehrere Schichten Velostat verwendet, ist davon auszugehen, dass die Summe aller Oberflächenübergänge im Mittel homogener wird.

Die Velostat-Schichten werden bei der Herstellung des Sensors direkt, wie es in Abbildung 4.2 erkennbar ist, übereinandergelegt. Hat eine Variante mehr als eine

Velostat-Schicht, so wird jede weitere Schicht, bezogen auf die benachbarte Schicht, um 90 Grad gedreht, um mögliche Richtungsabhängigkeiten auszugleichen.

Zur Herstellung der Testsensoren wird eine Montagehilfe (Abbildung 4.3) genutzt, um mögliche Einflüsse des Herstellprozesses, welche das Sensorverhalten beeinflussen, zu minimieren. Zudem wird jeder direkte Kontakt mit dem Kupfer und der Velostat-Folie vermieden, um eine Kontamination der Oberflächen zu vermeiden.

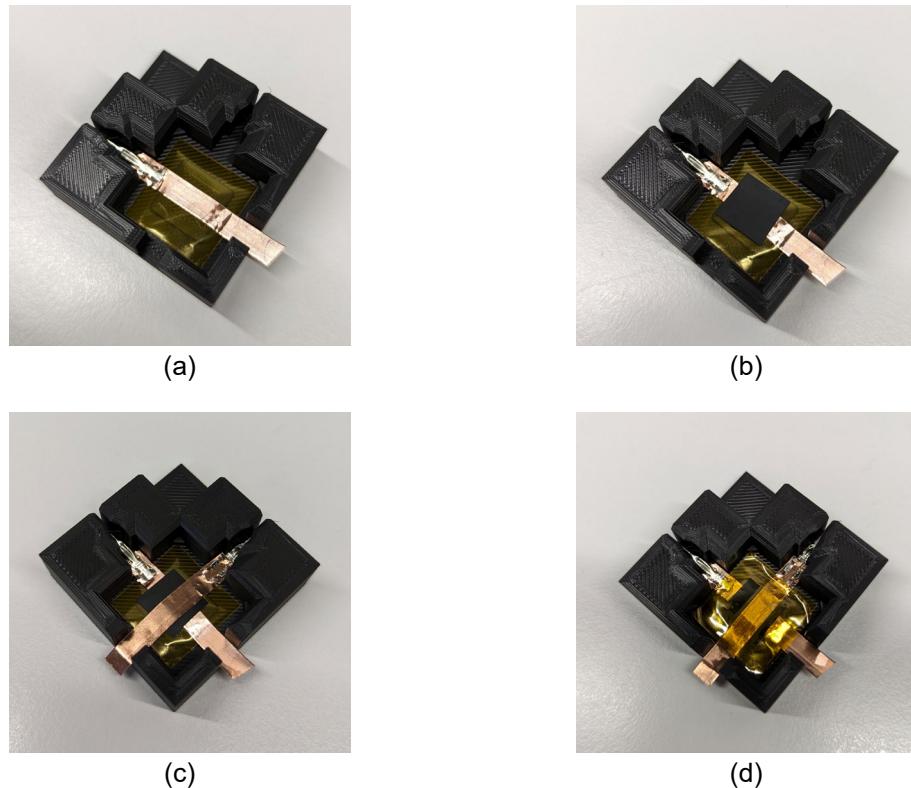


Abbildung 4.3: Herstellungsprozess am Beispiel eines einlagigen Sensorelements.
(a) Platzierung der unteren Schicht Kapton-Klebeband und Kupfer; (b) 10 mm x 10 mm Velostat Folie wird auf das Kupfer gelegt; (c) zweite Schicht Kupfer und (d) Kapton-Klebeband.

Zusätzlich werden einige Sensoren nachbehandelt. Eine Variante wird vor den Versuchen mit 500 N für 10 s gepresst, eine andere für 15 min auf 60 °C erhitzt. Beides dient dem Versuch, die Oberfläche der Velostat-Folie zu homogenisieren.

Tabelle 4.1 dient zur Übersicht der getesteten Sensoren. Jede Sensor-Variante wird in dreifacher Ausführung hergestellt, um diese auf ihre Wiederholbarkeit zu testen. Die Varianten unterscheiden sich sowohl in der Anzahl der Velostat-Schichten als auch in den weiteren Behandlungsschritten. Zum Vergleich werden kommerziell erhältliche

Kraftsensoren (FlexiForce™ A201 Sensor – 25 lbs, Tekscan, Inc., Norwood, MA, United States) getestet.

Tabelle 4.1: Übersicht der getesteten Sensoren

Variante Nr.	Bezeichnung	Anzahl Velostat Schichten	Besondere Behandlungen
1	Velo_Nr01-03	1	-
2	Velo_Nr04-06	2	Velostat jeweils um 90 Grad gedreht
3	Velo_Nr07-09	3	Velostat jeweils um 90 Grad gedreht
4	Velo_Nr10-12	2	Velostat jeweils um 90 Grad gedreht; vor Versuchen mit 500 N für 10 s gepresst
5	Velo_Nr13-15	2	Velostat jeweils um 90 Grad gedreht; vor Versuchen 15 min auf 60 °C erwärmt
	FlexiForce_01-02		FlexiForce™ A201 Sensor – 25 lbs, Tekscan, Inc.

4.1.2 Versuchsablauf

Alle beschriebenen Testsensoren werden zwei Tests unterzogen:

1. Einfacher Impulsstoß
2. Mehrere Impulsstöße unterschiedlicher Stärke

4.1.2.1 Einfacher Impulsstoß

Der experimentelle Ablauf beginnt mit der Positionierung (Abbildung 4.4) des zu untersuchenden Sensors an der vorgesehenen Aufprallstelle des Modalhammers. Der Modalhammer wird danach auf eine festgelegte Höhe angehoben und nach dem Beginn der Datenaufnahme fallen gelassen. Der Modalhammer schwingt frei und trifft dabei einmal auf den Sensor, wodurch ein impulsartiger Stoß erzeugt wird. Dieses Stoßereignis wird in einer Serie von zehn aufeinanderfolgenden Wiederholungen durchgeführt. Die Sequenz eines Versuches wird in Abbildung 4.5 dargestellt.

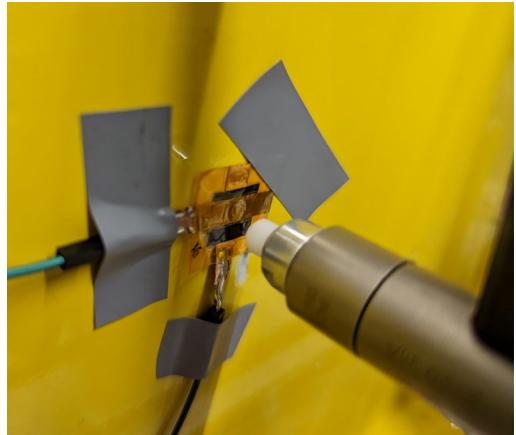


Abbildung 4.4: Positionierung Testsensor

Dieser Versuch ermöglicht es, das dynamische Verhalten der Sensoren zu untersuchen. Insbesondere wird die Reaktion auf den durch den Aufprall des Modalhammers übertragenen Impuls geprüft.

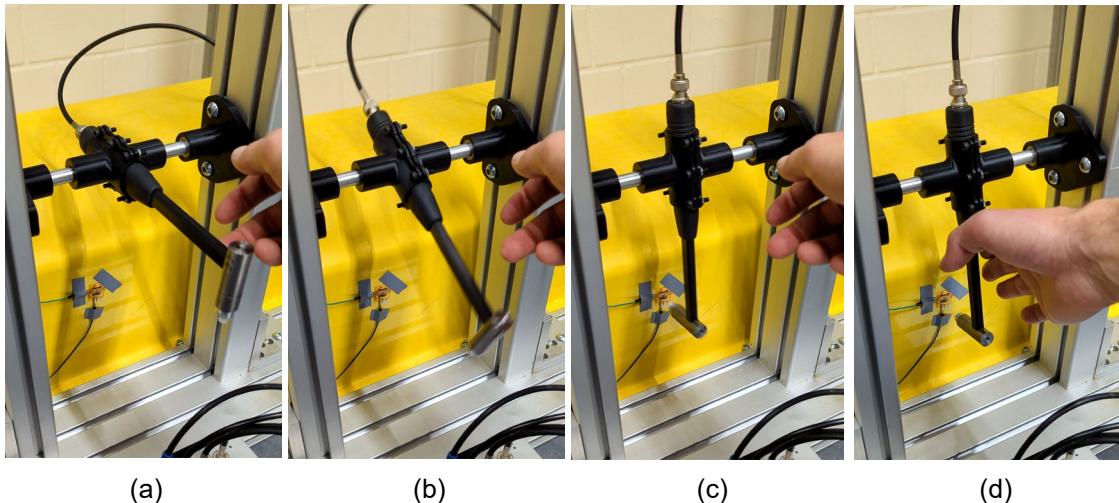


Abbildung 4.5: Sequenz des einfachen Impulsstoß-Versuchs.

- (a) Modalhammer auf festgelegte Höhe anheben
- (b) Freies Schwingen des Modalhammers
- (c) Zeitpunkt des Impulsstoßes
- (d) Modalhammer wird nach dem Stoß festgehalten, um einen zweiten Stoß zu verhindern

4.1.2.2 Mehrere Impulsstöße unterschiedlicher Stärke

Im zweiten Versuchsszenario wird der Modalhammer wiederholt aus verschiedenen, sukzessiv abnehmenden Höhen fallen gelassen, um eine Serie von Impulsstößen mit variabler Stärke zu erzeugen.

Der experimentelle Ablauf beginnt mit der Platzierung des Sensors. Anschließend wird der Modalhammer auf eine vorab bestimmte Ausgangshöhe angehoben. Nach dem Starten der Datenaufnahme wird der Hammer aus dieser Position freigelassen, wodurch ein erster Impulsstoß entsteht. Anschließend wird der Modalhammer erneut angehoben und aus einer geringeren Höhe fallen gelassen, wodurch ein zweiter Impulsstoß mit geringerer Intensität entsteht. Diese Schritte werden in einer fortlaufenden Abfolge wiederholt, wobei die Starthöhe des Modalhammers mit jedem Durchgang reduziert wird.

4.1.3 Auswertung

In den durchgeführten Versuchen werden sowohl die auf den Modalhammer wirkenden Kräfte als auch die Spannungswerte, die über den Sensor erfasst werden, gemessen. Zur Auswertung dieser Messdaten kommt ein eigens entwickeltes MATLAB-Skript (MATLAB R2022a, MathWorks, Inc., Natick, MA, USA) zum Einsatz.

Zur Klärung der in Kapitel 4.1 (S. 25 ff.) gestellten Untersuchungsfragen werden die folgenden Ergebnisse berechnet und ausgewertet:

- **Kraft-Spannungs-Verlauf:** Die auf den Modalhammer einwirkende Kraft wird über die gemessene Spannung am Sensor aufgetragen, um die Beziehung zwischen den applizierten Kräften und den entsprechenden Spannungswerten (und somit Widerstandswerten) zu analysieren. Dieser Zusammenhang ermöglicht es, von den gemessenen Spannungswerten auf die anliegende Kraft zu schließen. In dieser Arbeit wird darauf verzichtet, die gesamte Hysterese des Verlaufes zu analysieren. Von besonderem Interesse ist zunächst der Kraftanstieg und der damit verbundene Spannungsabfall. Daher werden für den Kraft-Spannungs-Verlauf ausschließlich die Daten der ersten Hälfte des Stoßes dargestellt.

Als Maß für die Streuung der Messdaten wird aus den Daten eine Hüllfunktion ermittelt, deren Fläche bestimmt wird. Zur Bestimmung der Hüllkurve werden die

lokalen Maxima und Minima berechnet und mit einem gleitenden Mittelwert über 5 Elemente geglättet.

- **Impulsverlauf – einzeln:** Der Impulsverlauf visualisiert den zeitlichen Verlauf der Kraft- und Spannungskurven der einzelnen Impulsstöße, um die Charakteristik der Sensorantwort auf einen Impuls zu analysieren. Dargestellt ist jeweils ein Zeitfenster von ± 2 ms um das Kraftmaximum herum.
- **Impulsverlauf – mehrfacher Impulsstoß:** Um festzustellen, ob die Amplituden der Kraftimpulse aufgelöst werden können, wird der zeitliche Verlauf der Spannungskurven bei mehreren Impulsen unterschiedlicher Intensität dargestellt. Dazu werden die einzelnen Impulse auf ein Zeitfenster von ± 2 ms um das Kraftmaximum herausgeschnitten und nebeneinander dargestellt.
- **Mittlere Spannung der Sensoren vor und nach den einfachen Impulsstößen:** Es werden die durchschnittlichen gemessenen elektrischen Spannungen der Sensoren vor und nach den einzelnen Impulsstößen berechnet und verglichen. Damit können die elektrischen Eigenschaften der Velostat-Kraftsensoren weiter beschrieben werden. Die Auswertung der Ergebnisse soll insbesondere Rückschlüsse auf die Reproduzierbarkeit dieser Sensoren ermöglichen.

Durch die Berechnung und Auswertung dieser Ergebnisse kann ein umfassendes Verständnis über das Verhalten der Sensoren unter Impulsbelastung gewonnen werden.

4.2 Entwurf Sensormatrix

Die Entwicklung von Prototypen ist ein kritischer Schritt im Entwicklungsprozess, da sie dazu dient, die Konzepte und Ideen in reale Modelle umzusetzen und deren Funktionalität zu überprüfen. Deshalb wird auch im Rahmen dieser Arbeit ein Prototyp hergestellt. Der finale Prototyp wird aus einer Sensormatrix, welche auf eine Dummy-Oberfläche aufgebracht wird und einer passend dafür entwickelten Auswertelektronik bestehen. Dieses Kapitel befasst sich mit dem Entwurf der Sensormatrix. Kapitel 4.4 (S. 45 ff.) mit der Entwicklung der Auswertelektronik.

Als Grundkörper, auf den die Sensormatrix appliziert werden soll, werden aus einem Schädelmodell zwei vereinfachte Schädelform abgeleitet (Abbildung 4.6). Die parametrisierte Form erleichtert in den folgenden Schritten die Erstellung der notwendigen Geometrien der Folien für die Applikation auf die gekrümmte Oberfläche.

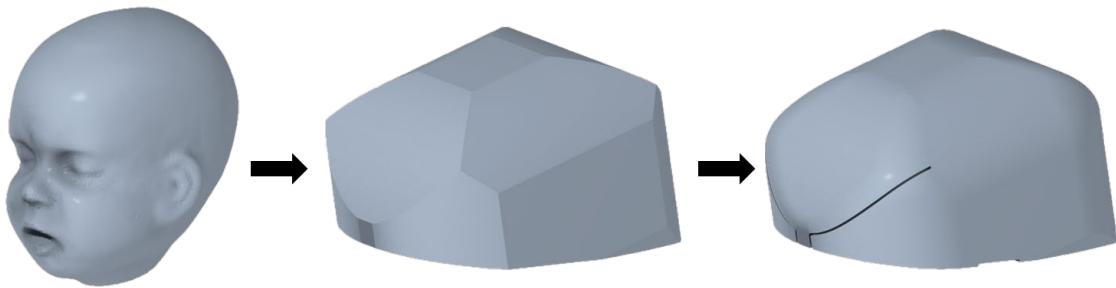


Abbildung 4.6: Ableitung des Grundkörpers aus einem Schädelscan einer Säuglingspuppe

Im ersten Schritt soll die Frage beantwortet werden, an welchen Stellen Sensorpunkte angebracht werden. Es ist zu klären, welche Größe diese haben und wie jeder einzelne Sensorpunkt von der Ausleseelektronik adressiert werden kann.

Wie bereits in Kapitel 2.1.2 (S. 11 f.) und 2.2 (S. 16 ff.) beschrieben, ist es eine bewährte Methode, eine Vielzahl von resistiven Sensoren in einem Raster anzuordnen. Durch diese Anordnung kann die Komplexität des Systems geringgehalten werden, da nicht jedes Sensorelement einzeln verkabelt werden muss.

Mithilfe der stereographischen Projektion ist es möglich, ein zweidimensionales Gitter (wie das der Sensormatrix) auf eine beliebige gekrümmte Fläche zu projizieren. Dadurch können einzelne Sensorelemente der 3D-Geometrie zugeordnet werden. Im ersten Schritt wird hierfür über dem Grundkörper ein Raster definiert und ein Fokus-Punkt festgelegt. Um zur Projektion zu gelangen, wird jeder Punkt des Gitters mit dem Fokus verbunden. Die Schnittpunkte mit der Oberfläche des Körpers stellt dabei die 3D-Projektion des Rasters auf besagte Oberfläche dar (Abbildung 4.7). Für den Prototypen liegt der Fokus im Ursprung [0,0,0]. Der Mittelpunkt des oberen Rechtecks des Grundkörpers liegt bei [0,0,135] und das Raster auf einer z-Höhe von 140 mm. Das Raster hat seinen Ursprung in [0,0,140] und eine Schrittweite von 15 mm in x- und y-Richtung.

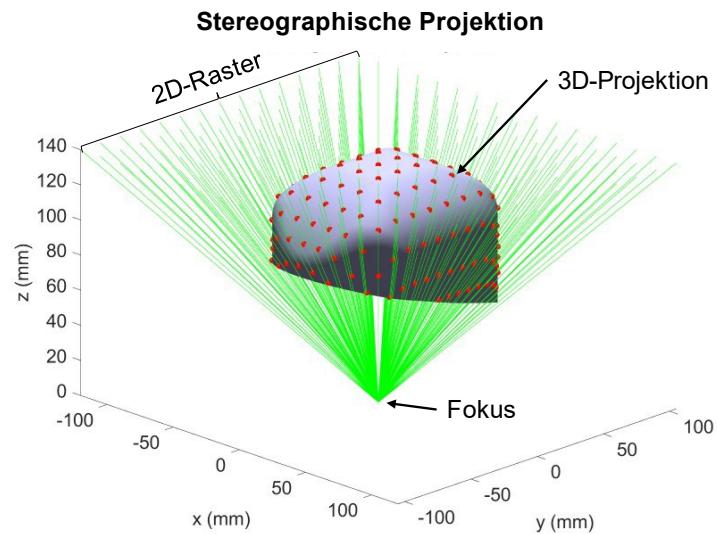


Abbildung 4.7: Stereographische Projektion eines 2D-Rasters auf den Grundkörper

Werden nun die einzelnen „Horizontalen“ und „Vertikalen“ der 3D-Rasters verbunden, ergibt sich das 3D Sensor-Raster auf dem Grundkörper mit den dazugehörigen Verkabelungspfaden (Abbildung 4.8).

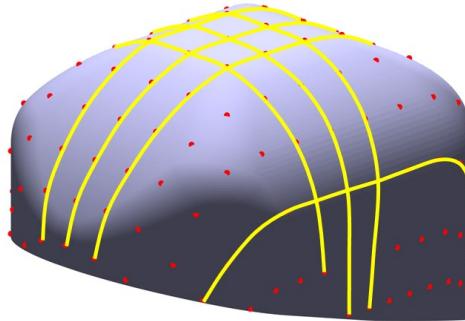


Abbildung 4.8: 3D Sensor-Raster mit Verkabelungspfaden

Eine weitere zentrale Frage bei der Entwicklung der Sensormatrix ist, wie die 2D-Schnittmuster der Velostat-Folie sowie der Leiterbahnen aussehen müssen. Da die verwendeten Velostat- und Kupferfolien weder gedehnt noch gestaucht werden können, sind geeignete Schnittmuster notwendig, um Faltenbildung oder Überlappungen beim Aufbringen der Folien auf den Grundkörper zu vermeiden. Um die sensorische Genauigkeit nicht zu beeinträchtigen, sollte dies vermieden werden. Diese Schnittmuster werden aus Abwicklungen der 3D-Grundkörper erstellt.

Ein besonderes Augenmerk wird auf die Gestaltung der Schnittmuster für die Velostat-Folie gelegt. Um die Eigenschaften der Velostat-Folie möglichst wenig zu verändern und den Herstellungsprozess sowie die Handhabung der Sensormatrix zu erleichtern, soll das endgültige Schnittmuster aus möglichst großen, zusammenhängenden Flächen bestehen. Im Gegensatz dazu sind die Kupferbahnen aufgrund ihrer schmalen und dünnen Beschaffenheit weniger anfällig bei Biegungen und Richtungsänderungen auf der Oberfläche des Grundkörpers.

Im Folgenden werden die Schnittmuster der Velostat-Folie und der Leiterbahnen vorgestellt.

4.2.1 Schnittmuster Velostat

Um eine Lösung für die Gestaltung der Schnittmuster zu finden, wird in der ersten Iteration das vereinfachte Schädelmodell (Abbildung 4.6 - Mitte) verwendet. Mit Hilfe des Programms Blender (Version 3.5, Blender Foundation, Amsterdam, Netherlands) und dem Add-On „Paper Model“ wird eine Abwicklung des Modells erstellt (Abbildung 4.9). Die einzelnen Teilflächen sind klar zu erkennen, bilden eine große zusammenhängende Fläche, es gibt keine Überschneidungen und die Abwicklung lässt sich in einem Stück auf die Oberfläche des Schädelmodells applizieren.

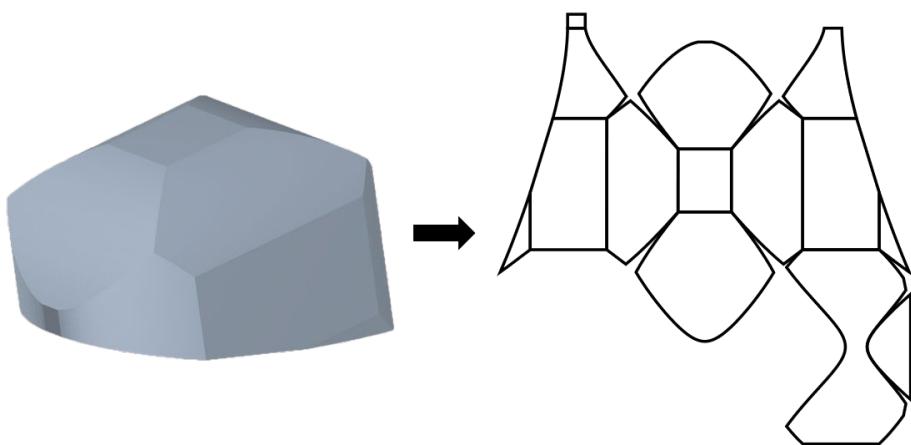


Abbildung 4.9: Abwicklung des vereinfachten Schädelmodells

In der nächsten Iteration wird das gleiche Verfahren mit dem verrundeten Schädelmodell (Abbildung 4.6 - Rechts) durchgeführt. Die Abwicklung dieses komplexeren Modells führt in Blender zu einer ebenso komplexeren Abwicklung (Abbildung 4.10). Die angefertigte Abwicklung weist im Vergleich zu der in Abbildung 4.9 gezeigten Abwicklung deutlich

mehr Schnitte und kleinere Teilflächen auf. Viele Schnitte und kleine Teilflächen führen dazu, dass die Wahrscheinlichkeit deutlich ansteigt, dass ein Schnitt direkt an einem Sensorpunkt liegt oder die Velostatfolie zwischen zwei Kupferkontakte geschnitten wird. Dies würde zu einem unzuverlässigen Sensorverhalten führen. Zudem kommt es an einigen Stellen zu Punktkontakten und Überschneidungen in der Abwicklung.

Aufgrund der erhöhten Anzahl von Flächen und den komplexen Rundungen des verrundeten Modells kann keine großflächige Abwicklung erstellt werden, ohne das Material zu stauchen oder zu dehnen. Dementsprechend ist diese Abwicklung für den Prototypenbau nicht geeignet.

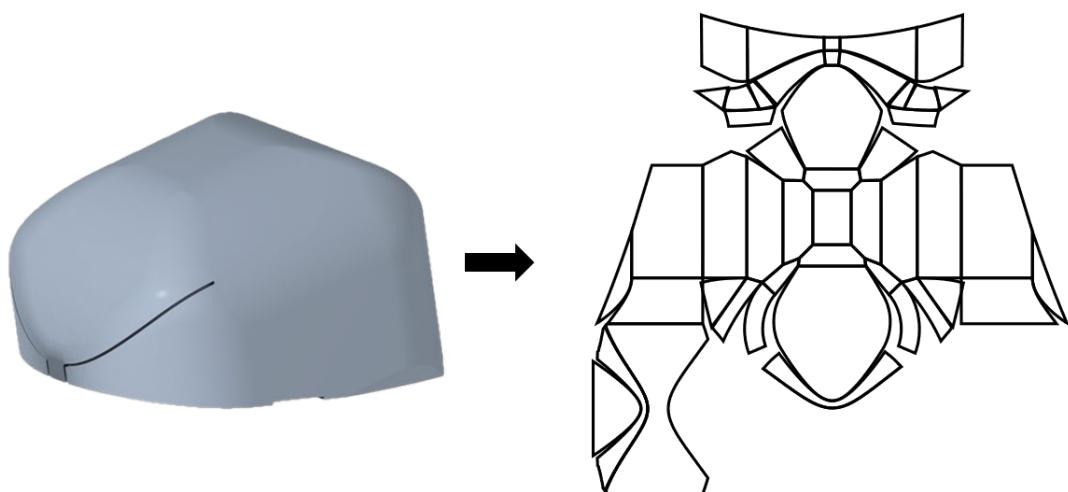


Abbildung 4.10: Abwicklung des verrundeten Schädelmodells

Wird das einfache mit dem verrundeten Schädelmodell verglichen (Abbildung 4.11), ist zu erkennen, dass das einfache Modell lediglich an den Verrundungen übersteht. Wenn auf eine vollständige Abdeckung des Schädelmodells, insbesondere an den Rundungen, verzichtet werden kann, ist es möglich, eine angepasste Abwicklung des einfachen Schädelmodells auf dem verrundeten Modell zu verwenden.

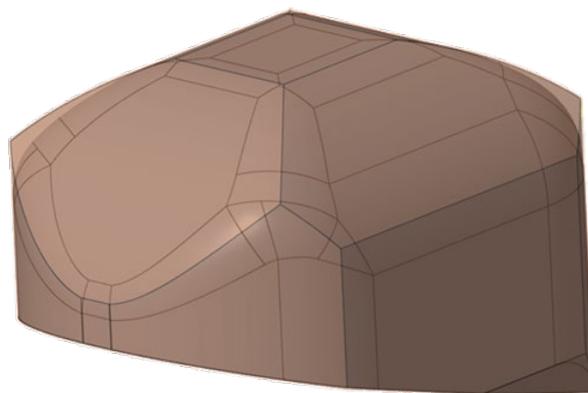


Abbildung 4.11: Vergleich einfaches (transparent in rot) und verrundetes (grau) Schädelmodell

Zur Anpassung der Abwicklung werden an den Stellen der Rundungen des verrundeten Schädelmodells iterative Änderungen am Schnittmuster vorgenommen. Durch diesen Prozess entsteht eine passende Abwicklung des verrundeten Schädelmodells. Zusätzlich werden kleine Einschnitte an einigen Ecken der Abwicklung vorgesehen, um eine Faltenbildung an diesen Stellen zu vermeiden. In Abbildung 4.12 wird der Vergleich zwischen dem einfachen und dem endgültigen Schnittmuster dargestellt, welches an das verrundete Schädelmodell angepasst ist.

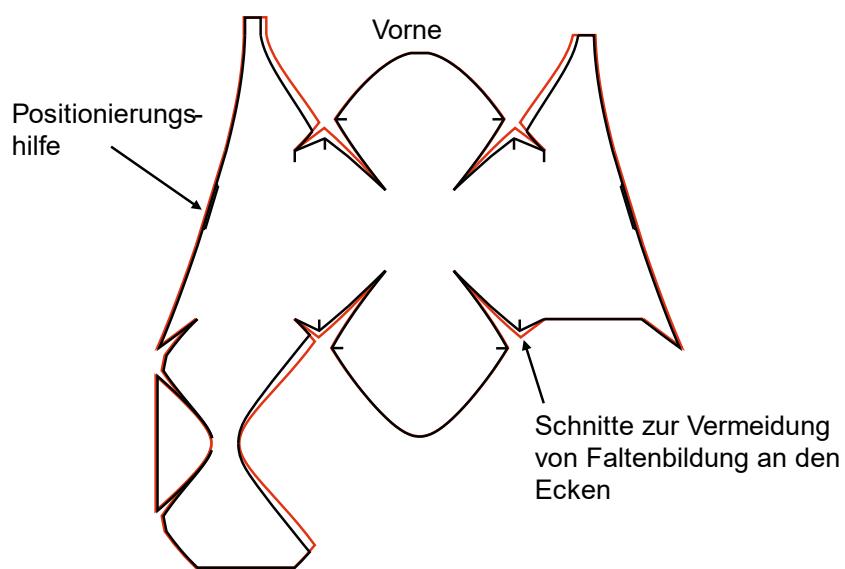


Abbildung 4.12: Vergleich der Abwicklung des einfachen Schädelmodells (rot) mit der finalen Abwicklung des verrundeten Schädelmodells (schwarz)

Dieser manuelle und iterative Prozess ermöglicht es, ein Schnittmuster zu erstellen, das sowohl den Anforderungen für eine gute Sensorgenaugkeit entspricht (große, zusammenhängende Flächen, wenig Schnitte), als auch der komplexeren Modellgeometrie gerecht wird.

4.2.2 Leiterbahnen-Layout

Zur gleichmäßigen Bestückung der gesamten Grundkörperoberfläche kann das in Abbildung 4.8 dargestellte 3D-Raster direkt in ein Leiterbahnen-Layout überführt werden. Dabei stellt jeder Schnittpunkt der Rasterlinien ein Sensorelement dar. Dies führt bei der gewählten Rastergröße von 15 mm zur maximalen Anzahl von Sensorelementen. Je mehr Sensorelemente verbaut werden, desto langsamer wird die maximale Ausleserate des fertigen Prototyps. Um eine höhere Auslesegeschwindigkeit zu ermöglichen, werden einzelne Sensorelemente zu größeren Einheiten zusammengefasst.

Auf Basis der von Weber [53] erfassten Frakturstellen am Schädel verunglückter Säuglinge und den damit einhergehenden Auftrittswahrscheinlichkeiten, wird festgelegt, welche Sensorelemente zusammengefasst werden. So ist mit 82 % das Os parietale (Scheitelbein, obere-hintere Fläche am Schädel) am häufigsten von Frakturen betroffen. Die anderen Bereiche am Schädel machen lediglich 18 % der erfassten Frakturen aus. Aufgrund dieser Verteilung werden die Sensorelemente an den Seiten zu vier größeren Sensor-Bereichen zusammengefasst. Auf der Oberseite soll aufgrund der höheren Aufprallwahrscheinlichkeit weiterhin eine feinere räumliche Auflösung möglich sein, weshalb die Sensorelemente als einzelne 5 mm x 5 mm Quadrate in einem 15 mm Raster ausgeführt werden.

Zusätzlich ergeben sich weitere Rahmenbedingungen, durch die Form der Velostat-Schnittmuster (siehe Kapitel 4.3.2, S. 41 ff.). Um eine technische Umsetzung zu ermöglichen, werden daher weitere Sensorelemente in den Randbereichen zusammengefasst.

Das Finale Sensor-Layout ist in Abbildung 4.13 zu sehen.

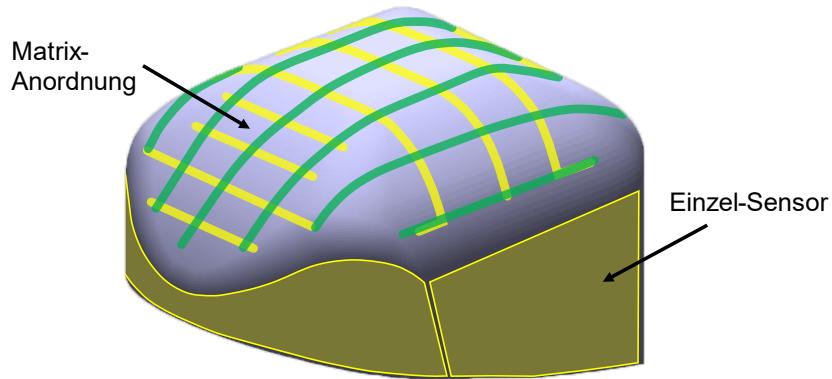


Abbildung 4.13: Finales Sensor-Layout (3D-Ansicht)

4.3 Fertigung Sensormatrix

In diesem Kapitel wird der Herstellungsprozess der Sensormatrix beschrieben. Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei unterschiedliche Prototypen hergestellt. Es wird zwischen direkter und indirekter Applikation unterschieden.

4.3.1 Direkte Applikation der Sensormatrix

Bei der direkten Applikation der Sensormatrix werden die Sensorelemente direkt Schicht für Schicht auf das Schädelmodell aufgebracht – die Sensormatrix entsteht in „3D“. Diese Vorgehensweise wird in Abbildung 4.14 dargestellt. Zunächst werden die Kupferstreifen und -flächen der untersten Schicht zugeschnitten, die benötigten Kabel angelötet und auf der Modelloberfläche befestigt (1.). Anschließend wird die zugeschnittene Velostat-Folie auf diese Schicht geklebt (2.). Dazu wird Klebstoff auf die Flächen zwischen den Kupferstreifen und an den Rändern der größeren Kupferflächen aufgetragen. Zur Befestigung der oberen Kupferschicht werden die zugeschnittenen und mit Kabeln vorbereiteten Kupferfolienstücke auf einen Streifen Kapton-Klebeband aufgebracht und anschließend auf die Velostat-Folie geklebt (3.). Auf diese Weise wird Streifen für Streifen die obere Kupferschicht auf die Velostat-Folie befestigt.

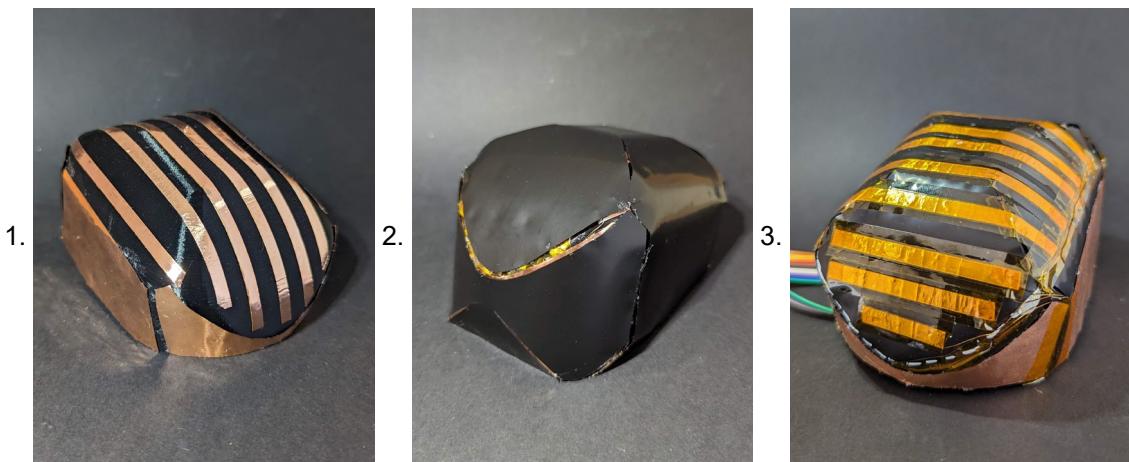


Abbildung 4.14: Methode der direkten Applikation der Sensormatrix

Dieses Verfahren führt zu einer insgesamt dünneren Sensormatrix als bei der indirekten Applikation (siehe Kapitel 4.3.2, S. 41 ff.). Bei einer Kupferdicke von 0,03 mm, einer Velostatdicke von 0,1 mm und einem Kapton-Klebeband mit einer Dicke von 0,07 mm ergibt sich eine theoretische minimale Gesamtdicke von 0,2 mm. Jedoch zeigte sich bei diesem Verfahren eine erhöhte Positionsungenauigkeit der Sensorelemente und ein erhöhter Zeitaufwand im Herstellungsprozess im Vergleich zur indirekten Applikation (siehe unten). Der fertige Prototyp der direkten Applikation ist in Abbildung 4.15 zu sehen.



Abbildung 4.15: Prototyp – direkte Applikation

4.3.2 Indirekte Applikation der Sensormatrix

Im Gegensatz dazu ermöglicht die indirekte Applikationsmethode die Herstellung der Sensormatrix auf der Ebene und die anschließende Applikation der kompletten Sensormatrix auf das Schädelmodell. Dazu wird die Sensormatrix wie in Kapitel 4.2.2 (S. 38 f.) beschrieben in zwei separate Teile zerlegt. Die Sensormatrix auf der Schädeloberseite und die vier Sensorelemente auf den Schädelseiten. Im ersten Schritt werden aus der Abwicklung des Schädelmodells und dem Leiterbahnlayout Schnittmuster abgeleitet (Abbildung 4.16). Dabei ist darauf zu achten, dass eventuelle Unterbrechungen in den Leiterbahnen überbrückt werden können. Außerdem wird die Größe und Form der einzelnen Zuschnitte durch die maximale Größe des Rohmaterials bestimmt, weshalb die Velostat-Zuschnitte einmal geteilt werden.

Die Schnittmuster der Kupferstreifen für die Folie der Kopfoberseite sind in Abbildung 4.16 (a) zu sehen. Die gelben Flächen stellen das Kupfer dar. Zur besseren räumlichen Einordnung ist im Hintergrund auch das entsprechende Velostat-Schnittmuster zu sehen. Weiterhin ist zwischen horizontalen und vertikalen Streifen zu unterscheiden. So befinden sich im montierten Zustand die horizontalen Streifen auf der einen Seite und die vertikalen Streifen auf der anderen Seite der Velostat-Folie. Es ist auch zu erkennen, dass zwei vertikale Streifen über die Grenzen der Velostat-Folie hinausgehen. Da die Folie und damit auch die Kupferstreifen an dieser Stelle durchtrennt wird, müssen diese Leiterbahnen nach dem Aufbringen der Folie auf den Grundkörper wieder verbunden werden. Abbildung 4.16 (b) stellt die Schnittmuster der seitlichen Kupferflächen dar. Es ist zu beachten, dass jede Kupferfolie mehrfach hergestellt werden muss (Vorder- und Rückseite je zweimal, Seitenflächen viermal), um die gesamte Seite des Schädelmodells auf beiden Seiten der Velostat-Folie abzudecken.

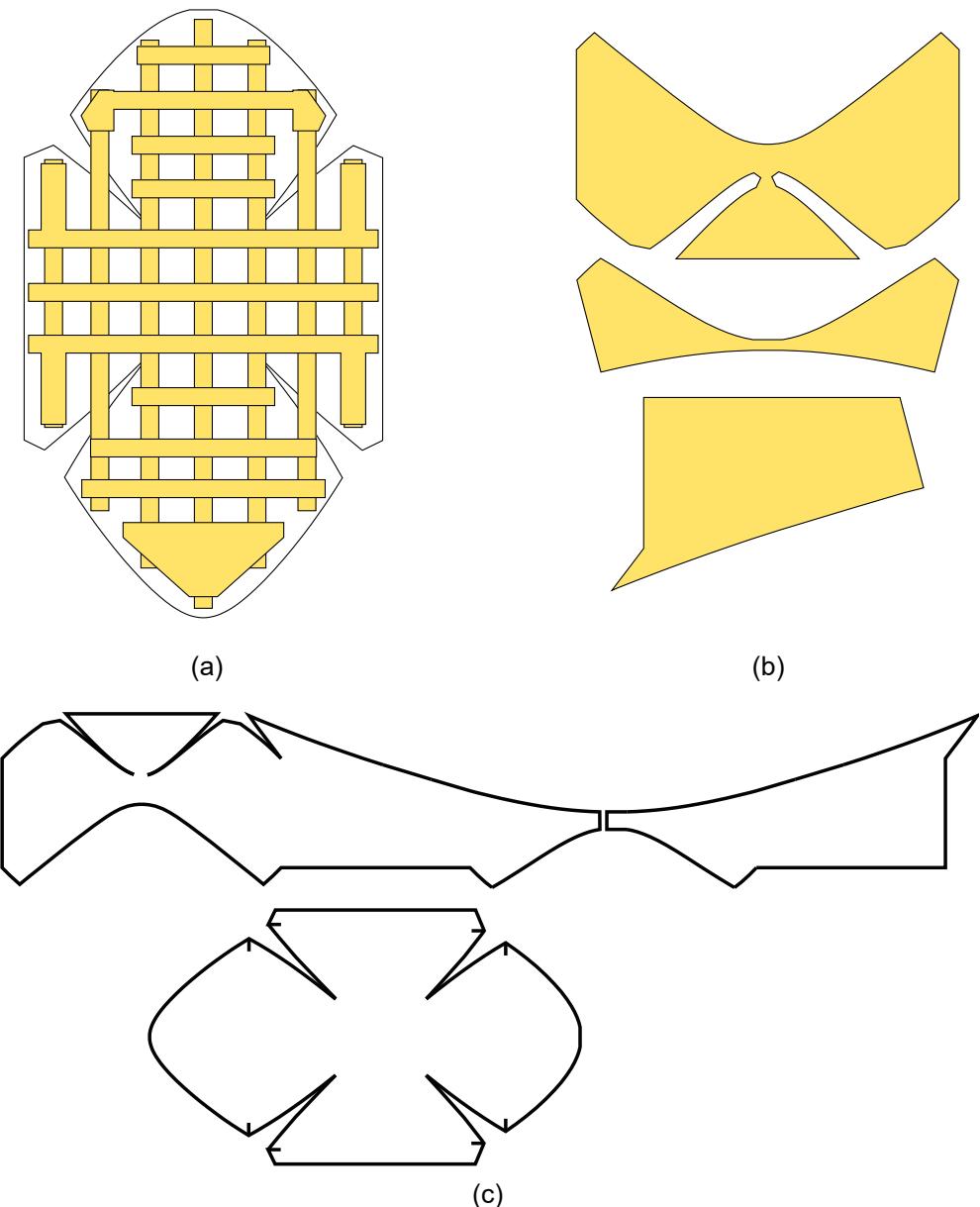


Abbildung 4.16: Schnittmuster für die Velostat- und Kupferstreifen und -flächen der indirekten Applikation

(a) Schnittmuster für die Kupferstreifen der oberen Sensormatrix, (b) Schnittmuster für die Kupferflächen der Seiten; Gelbe Flächen stellen das Kupfer dar, im Hintergrund ist das dazugehörige Velostat-Schnittmuster, (c) Schnittmuster für die Velostat-Folie

Abbildung 4.16 (c) zeigt die Schnittmuster der Velostat-Folie. Es ist zu erkennen, dass die Form des Zuschnitts direkt aus der in Abbildung 4.12 präsentierten Abwicklung abgeleitet ist. Aufgrund der Ausgangsgröße der Velostat-Folie muss das Schnittmuster für die seitlichen Sensorelemente in zwei Teile geteilt werden.

Der gesamte Herstellungsprozess ist in Abbildung 4.17 dargestellt.

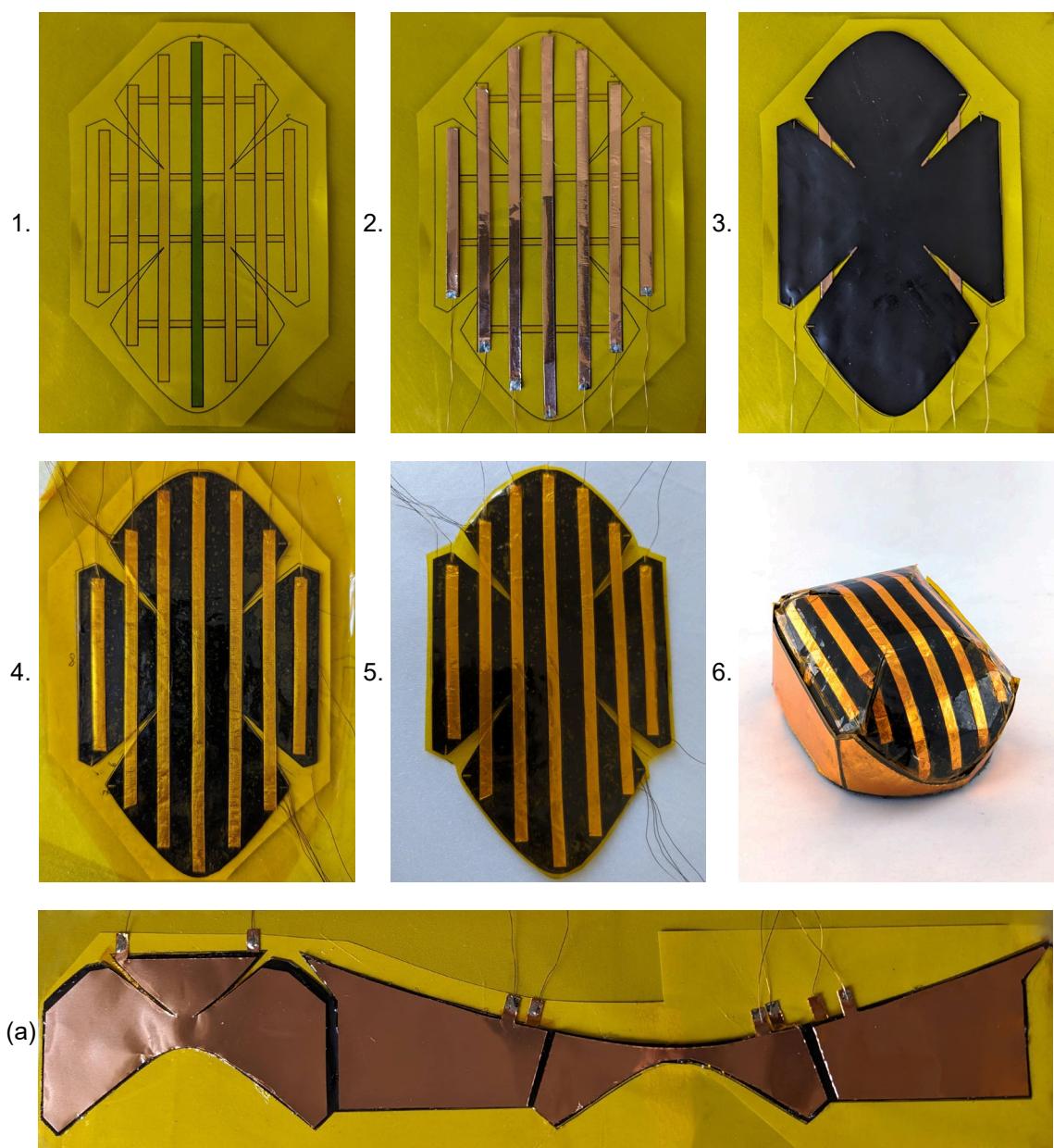


Abbildung 4.17: Gesamter Herstellungsprozess der indirekten Applikation

Zunächst werden die Schnittmuster zugeschnitten und die Kupferstreifen mit einem Draht versehen, damit sie später mit der Ausleseelektronik verbunden werden können. Anschließend (1.) wird das Kapton-Klebeband (mit der Klebeseite nach oben) auf das Positionierungsmuster positioniert. Nach und nach werden die ersten Kupferstreifen (2.) an die richtige Position gebracht. Dieser Vorgang wird für beide Kupferlagen wiederholt. Sind alle Kupferstreifen befestigt, wird die Velostat-Folie aufgelegt (3.) und die zweite Kupferschicht darüber geklebt (4.). Abschließend wird die Folie zugeschnitten (5.) und

auf das Schädelmodell geklebt (6.). Nach dem gleichen Prinzip wird auch die Folie für die seitlichen Sensorelemente hergestellt (Abbildung 4.17 (a)).

Aufgrund der Verwendung einer weiteren Schicht Kapton-Klebeband führt dieser Ansatz im Vergleich zur direkten Applikation zu einer dickeren Folie und wird dadurch weniger biegsam. Die indirekte Methode erweist sich als einfacher in der Fertigung, bietet ein hohes Potenzial zur Automatisierung des Herstellungsprozesses und zeigt eine erhöhte Robustheit aufgrund der zusätzlichen Stabilitätsschicht. Diese Methode bietet darüber hinaus eine höhere Flexibilität bei der Nachbehandlung, zum Beispiel beim Pressen oder Erwärmen der Folien.

Der fertige Prototyp der indirekten Applikation ist in Abbildung 4.18 zu sehen.



Abbildung 4.18: Prototyp – indirekte Applikation

4.3.3 Verkabelung

Zur einfacheren Verkabelung wurde eine Platine entworfen, auf der die losen Kabelenden der einzelnen Kupferstreifen und -flächen verlötet und mit einem Stecker verbunden werden können. Dies erleichtert einerseits die Verkabelung und macht andererseits den Prototypen wesentlich robuster, da die dünnen Kabel so kurz wie möglich gehalten werden (Abbildung 4.19).

Zusätzlich ist in der Grundform eine Nut für die Kabel vorgesehen, damit die Folie direkt auf der Oberfläche aufliegen kann und nicht durch die Kabel zusätzlich gewölbt wird.



Abbildung 4.19: Platine zur Verkabelung der Sensorelemente

4.4 Messelektronik und Software

4.4.1 Messelektronik – Konzeptionierung

Zum Auslesen der Sensormatrix muss das Messprinzip, welches für die Einzelversuche der Velostat-Sensoren (Kapitel 4.1, S. 25 ff.) verwendet wird, erweitert werden. Wie in Kapitel 2.2 (S. 16 ff.) beschrieben und in Kapitel 4.3 (S. 39 ff.) umgesetzt, ist es eine weit verbreitete Methode, eine Vielzahl von Sensorelementen mit zwei Sätzen von Anschlusselektroden in einer Zeilen-Spalten-Anordnung zu verbinden. Werden alle Sensorelemente mit einem Ende an eine Spaltenelektrode und mit dem anderen Ende an eine Zeilenelektrode angeschlossen, kann mit Hilfe einer geeigneten Ausleseelektronik jedes Sensorelement einzeln ausgelesen werden. Verschiedene Konzepte dieser Ausleseelektronik wurden bereits in Kapitel 2.2 (S. 16 ff.) thematisiert. Dieses Kapitel befasst sich mit den Anforderungen und dem Design der umgesetzten Ausleseelektronik.

Das in dieser Arbeit verwendete Design basiert auf dem von Hidalgo-Lopez et al. [19] vorgestellten Konzept „Type B“ (Abbildung 4.20). Ein wichtiger Aspekt dieses Konzepts, das wiederum auf dem Konzept der virtuellen Masse basiert, ist die Erweiterung des Messwiderstandsnetzwerks um Kalibrierwiderstände in jeder Zeile und Spalte. Diese werden für Referenzmessungen verwendet, die später mit den tatsächlichen

Messwerten verrechnet werden. Damit ist es theoretisch möglich, Auslesefehler aufgrund von Übersprechen und den realen Eigenschaften der Operationsverstärker und Multiplexer zu minimieren [19].

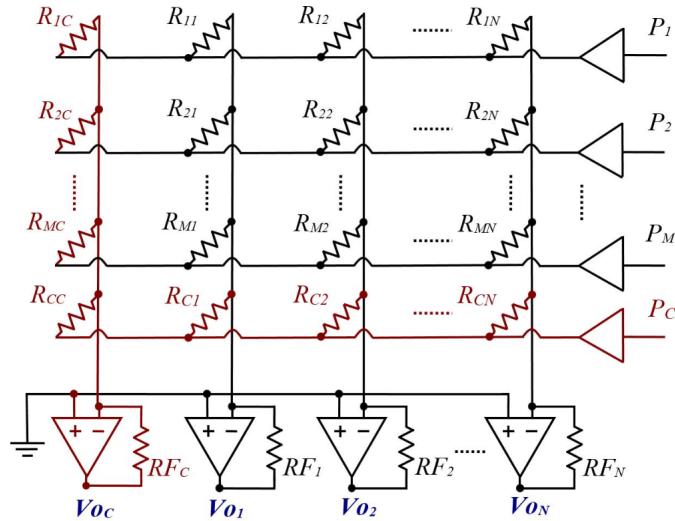


Abbildung 4.20: Konzept „Type B“ aus Hidalgo-Lopez et al. [19] mit den in Rot dargestellten Kalibrierwiderständen

Darüber hinaus kann das endgültige Layout durch einfaches Überbrücken einer Komponente in andere Konzepte überführt werden (z.B. „Type A“ aus Hidalgo-Lopez et al. [19]) oder durch den Austausch von Widerständen durch Kondensatoren ein völlig anderes Konzept realisiert werden (wie zum Beispiel das von Oballe-Peinado et al. [33] vorgestellte Konzept). Das hier gewählte Konzept erlaubt zudem alternative Methoden zur Berechnung der Mess-Widerstände, wie zum Beispiel die von Shu et al. [43] vorgestellte Methode.

Das in Abbildung 4.21 dargestellte Konzept vereint die oben beschriebenen Ideen mit den zusätzlichen Anforderungen, dass Impulse auf der Sensormatrix sowohl zeitlich als auch in ihrer Lage und Amplitude aufgelöst werden können. Jeder Spalte ist ein eigener Analog-Digital-Wandler zugeordnet, so dass bei gleichzeitiger Ansteuerung der Analog-Digital-Wandler eine komplette Zeile nahezu gleichzeitig ausgelesen werden kann. Den Operationsverstärkern der einzelnen Spalten ist ein weiterer Spannungsteiler in Reihe geschaltet. Dadurch ist es möglich, die maximale Spannung, die am Analog-Digital-Wandler anliegt, einzustellen.

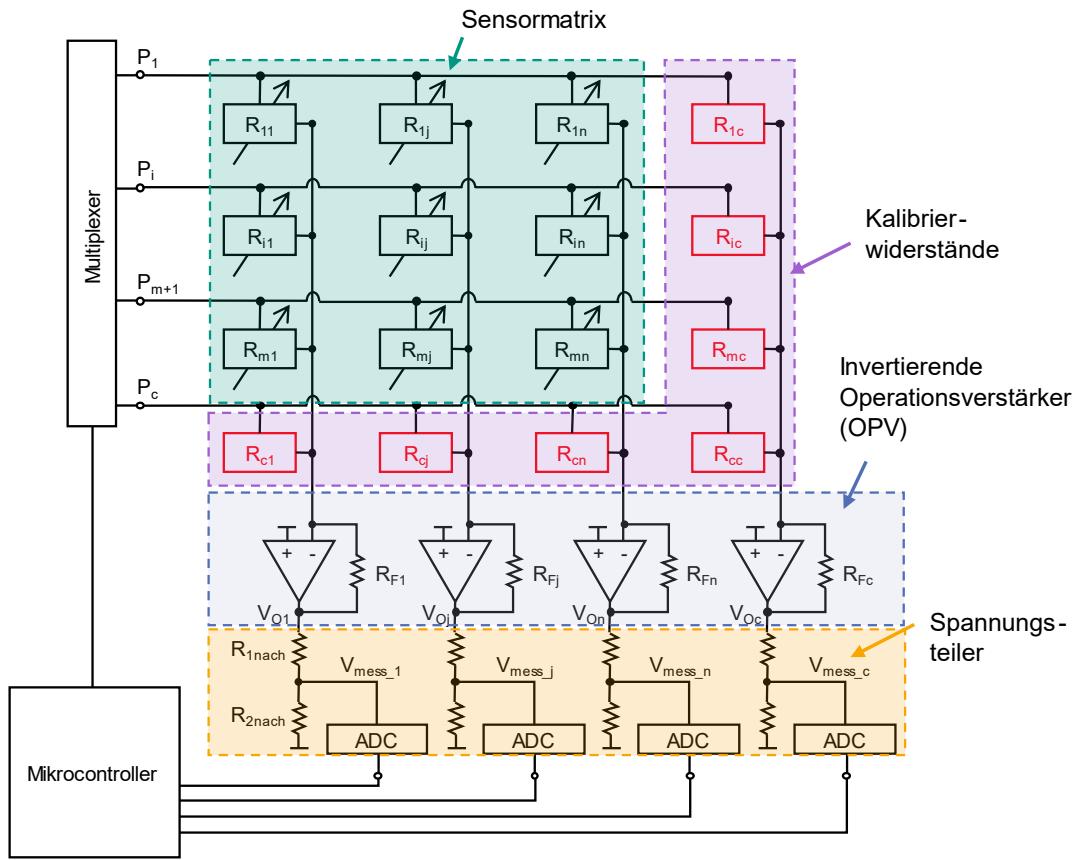


Abbildung 4.21: Schaltplan der Messelektronik zur Auswertung der Sensormatrix

Zum Auslesen der Widerstandswerte wird die auszulesende Zeile über den Mikrocontroller und die Multiplexer angesteuert. Die übrigen Zeilen, die nicht ausgelesen werden, liegen auf Masse. Die Analog-Digital-Wandler lesen nun nahezu gleichzeitig die Spalten aus und geben das gewandelte digitale Signal an den Mikrocontroller weiter, der die Daten wiederum an einen angeschlossenen Computer sendet. So kann Zeile für Zeile ausgewertet werden.

Die tatsächlich gemessene Größe ist dabei die Spannung, die am Analog-Digital-Wandler erfasst wird (V_{mess_j}). Diese Spannung muss anschließend in einen Widerstandswert umgerechnet werden. Im Gegensatz zum einfachen Spannungsteiler (siehe Kapitel 2.2, S. 16 ff.) steigt bei abnehmendem Widerstand R_{ij} die invertierte Spannung V_{mess_j} an, was auf die erweiterte Elektronik zurückzuführen ist.

Aufgrund der großen Datenmenge, die durch die große Anzahl an Sensorelementen und eine hohe Auslesefrequenz entsteht, werden die Daten zunächst gespeichert und erst nach dem Versuch weiterverarbeitet. Im Post-Processing am Computer werden die

Widerstandswerte nach „Type A“ (Formel 4.2) und „Type B“ (Formel 4.3) aus Hidalgo-Lopez et al. [19] berechnet.

$$R_{ij} = R_{ic} \frac{RF_j}{RF_c} \cdot \frac{V_{oc}(0) - V_{oc}(i)}{V_{oj}(0) - V_{oj}(i)} \quad 4.2$$

$$R_{ij} = \frac{R_{ic} R_{cj}}{R_{cc}} \cdot \frac{V_{oj}(0) - V_{oj}(c)}{V_{oj}(0) - V_{oj}(i)} \cdot \frac{V_{oc}(0) - V_{oc}(i)}{V_{oc}(0) - V_{oc}(c)} \quad 4.3$$

Beide Formeln beschreiben den Widerstandswert R_{ij} , der mit der in Abbildung 4.21 dargestellten Schaltung sowohl Ungenauigkeiten durch Crosstalk (Übersprechen) als auch durch die verwendeten, nicht idealen Operationsverstärker und Multiplexer berücksichtigt [19]. Dabei ist R_{ic} der i-te Kalibrierwiderstand der Kalibrierzeile, R_{cj} der j-te Kalibrierwiderstand der Kalibrierspalte und R_{cc} der Kalibrierwiderstand am Schnittpunkt von Kalibrierzeile und -spalte. V_{oj} steht für die Spannung, welche am Ausgang der Operationsverstärker anliegt.

Das Argument "0" wird verwendet, wenn keine Zeile aktiv und die Sensormatrix unbelastet ist. Diese Werte werden vor einem Versuch gemessen und für die Auswertung gespeichert. So beschreibt $V_{oj}(0)$ die Spannung der j-ten Spalte, bei unbelasteter Sensormatrix und ohne, dass eine Zeile aktiv ist. Ebenso ist $V_{oc}(0)$ der Spannungswert der Kalibrierspalte, ohne aktive Zeilen und Belastung.

Ein "i" wird als Argument verwendet, wenn die i-te Zeile aktiv ist. Die Variable $V_{oj}(i)$ ist somit die Spannung, welche in der j-ten Spalte gemessen wird, während die i-te Zeile aktiv ist. $V_{oc}(i)$ ist die gemessene Spannung der Kalibrierspalte bei aktiver Reihe i .

Das Argument "c" steht dafür, dass die Zeile c aktiv ist. Somit ist $V_{oj}(c)$ die Spannung der j-ten Spalte mit der Kalibrierzeile aktiv und $V_{oc}(c)$ die Spannung der Kalibrierspalte bei aktiver Kalibrierzeile.

Die Berechnung von R_{ij} geht davon aus, dass die gesamte Sensormatrix zeitgleich ausgelesen wird. Da dies in der Realität nicht der Fall ist, ist ein besonders schnelles Auslesen der Zeilen wichtig. Zusätzlich muss bei der Berechnung berücksichtigt werden, dass nach den Analog-Digital-Wandlern ein weiterer Spannungsteiler verbaut ist. Somit müssen die gemessenen Spannungen nach Formel 4.4 mit dem Faktor $\frac{R_{1nach} + R_{2nach}}{R_{2nach}}$ multipliziert werden.

$$V_{Oj} = V_{mess,j} \cdot \frac{R_{1nach} + R_{2nach}}{R_{2nach}} \quad 4.4$$

Alternativ kann der anliegende Widerstandswert R_{ij} auch aus dem vereinfachten Ersatzschaltbild für ein Sensorelement (also dem zu messenden Widerstand) berechnet werden.

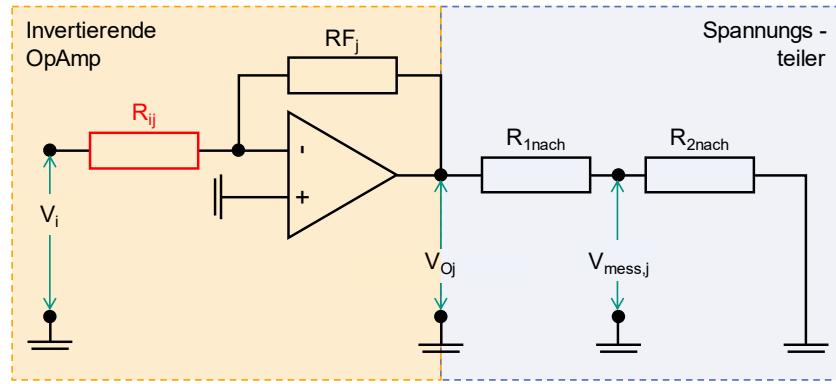


Abbildung 4.22: Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines einzelnen Sensorelements (R_{ij})

Wird das Schaltbild (Abbildung 4.22) eines einzelnen Sensorelements isoliert betrachtet, ist zu erkennen, dass sich dieses aus einem invertierenden Verstärker und einem einfachen Spannungsteiler zusammensetzt. Der invertierende Verstärker setzt sich aus R_{ij} , R_{Fj} und einem Operationsverstärker zusammen, und der Spannungsteiler aus R_{1nach} und R_{2nach} .

Für den invertierenden Verstärker gilt:

$$V_{Oj} = -\frac{R_{Fj}}{R_{ij}} \cdot V_i \quad 4.5$$

In Verbindung mit der Formel 4.4 für den Spannungsteiler ergibt sich:

$$V_{mess,j} \cdot \frac{R_{1nach} + R_{2nach}}{R_{2nach}} = -\frac{R_{Fj}}{R_{ij}} \cdot V_i \quad 4.6$$

Nach R_{ij} aufgelöst, lässt sich die Formel für den Messwiderstand ableiten. Da V_i, R_{Fj}, R_{1nach} und R_{2nach} bekannt und konstant sind, ist R_{ij} ausschließlich von V_{mess} abhängig.

$$R_{ij} = -\frac{V_i}{V_{mess,j}} \cdot \frac{R_{Fj} \cdot R_{2nach}}{R_{1nach} + R_{2nach}} \quad 4.7$$

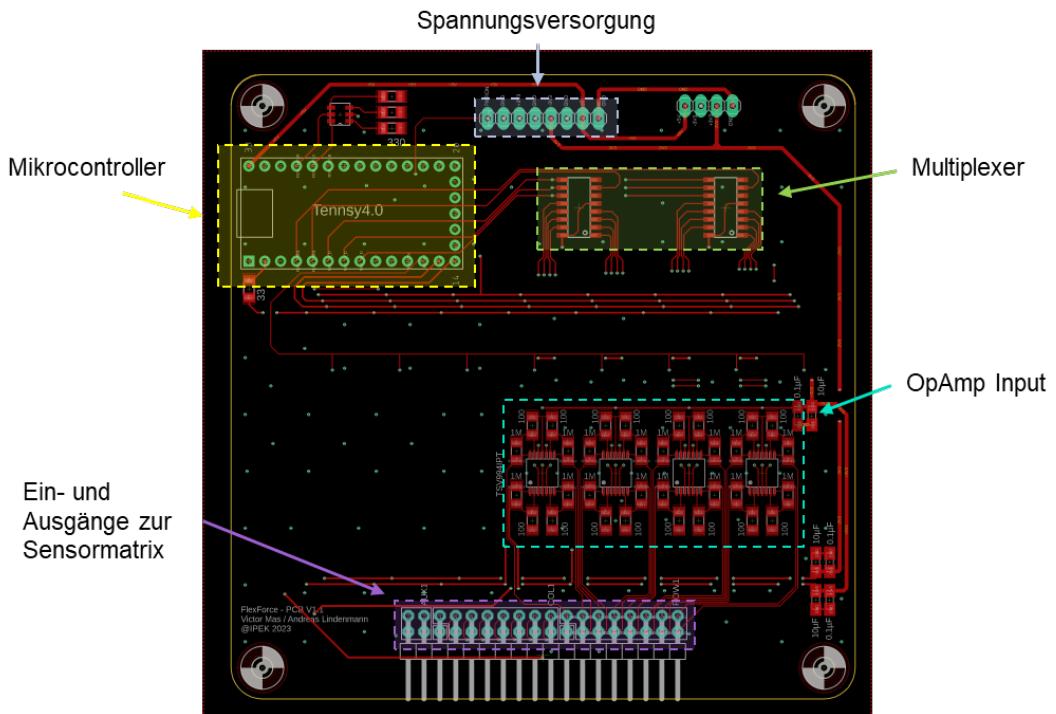
4.4.2 Messelektronik Design und Fertigung

In diesem Kapitel wird die konkrete Umsetzung der Messelektronik behandelt. Es wird beschrieben, welche Bauteile verwendet werden und die finalen Platinen gezeigt.

4.4.2.1 Messplatine

Die entwickelte Messplatine entspricht dem Konzept, welches in Kapitel 4.4.1 (S. 45 ff.) vorgestellt wird. Umgesetzt wird eine Platinenplatine, welche eine 15×15 Sensormatrix auslesen kann. Das Platinendesign ist in Abbildung 4.23 dargestellt. Das dazugehörige Schaltbild ist dem Anhang (9.1) zu entnehmen.

Aufgrund der geringen Größe, hohen Rechenleistung und einfachen Bedienung wird ein Teensy® 4.0 Development Board (PJRC, OR, USA) als Mikrocontroller verwendet. Als Analog-Digital-Wandler kommen acht MCP3911 zum Einsatz. Da jeder Analog-Digital-Wandler zwei Eingänge hat, stehen insgesamt 16 Eingänge zur Verfügung. Zu den 15 Eingängen aus der Sensormatrix wird der 16. Eingang für die Kalibrierwiderstände benötigt. Bei der Auswahl der Operationsverstärker wurde darauf geachtet, dass diese eine möglichst hohe Anstiegsrate, eine niedrige Offsetspannung, eine hohe Verstärkungsbandbreite, einen niedrigen Bias-Strom und eine hohe Eigenverstärkung haben. Die gesamte Elektronik wird mit $\pm 3,3$ V und der Teensy mit + 5 V versorgt.



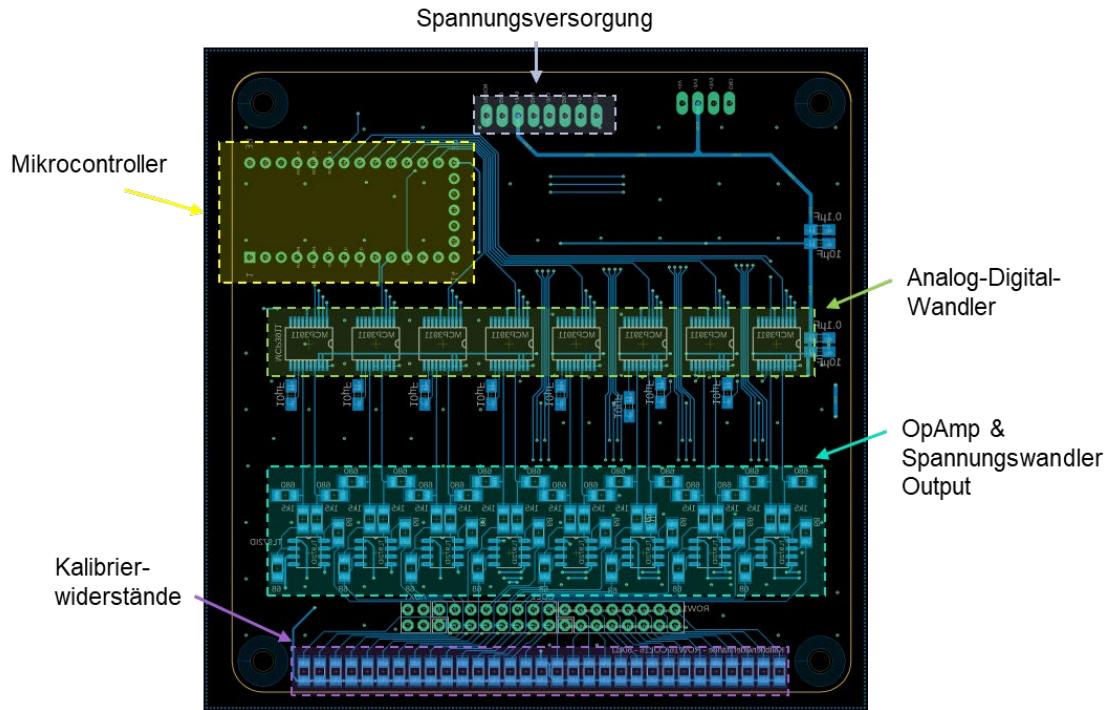


Abbildung 4.23: Finales Design der Ausleseelektronik-Platine, Vor- und Rückseite

4.4.2.2 Netzteil

Für die Spannungsversorgung wurde ein bereits bestehendes Design⁶ modifiziert und um eine zusätzliche Spannung erweitert. Das finale Netzteil liefert + 3,3 V und + 5 V mit einer maximalen Stromstärke von 1 A sowie - 3,3 V mit einer maximalen Stromstärke von 200 mA.

Das zugehörige Schaltbild kann dem Anhang (9.2) entnommen werden.

⁶ Entwickelt von Dr.-Ing. Andreas Lindenmann; nicht veröffentlicht

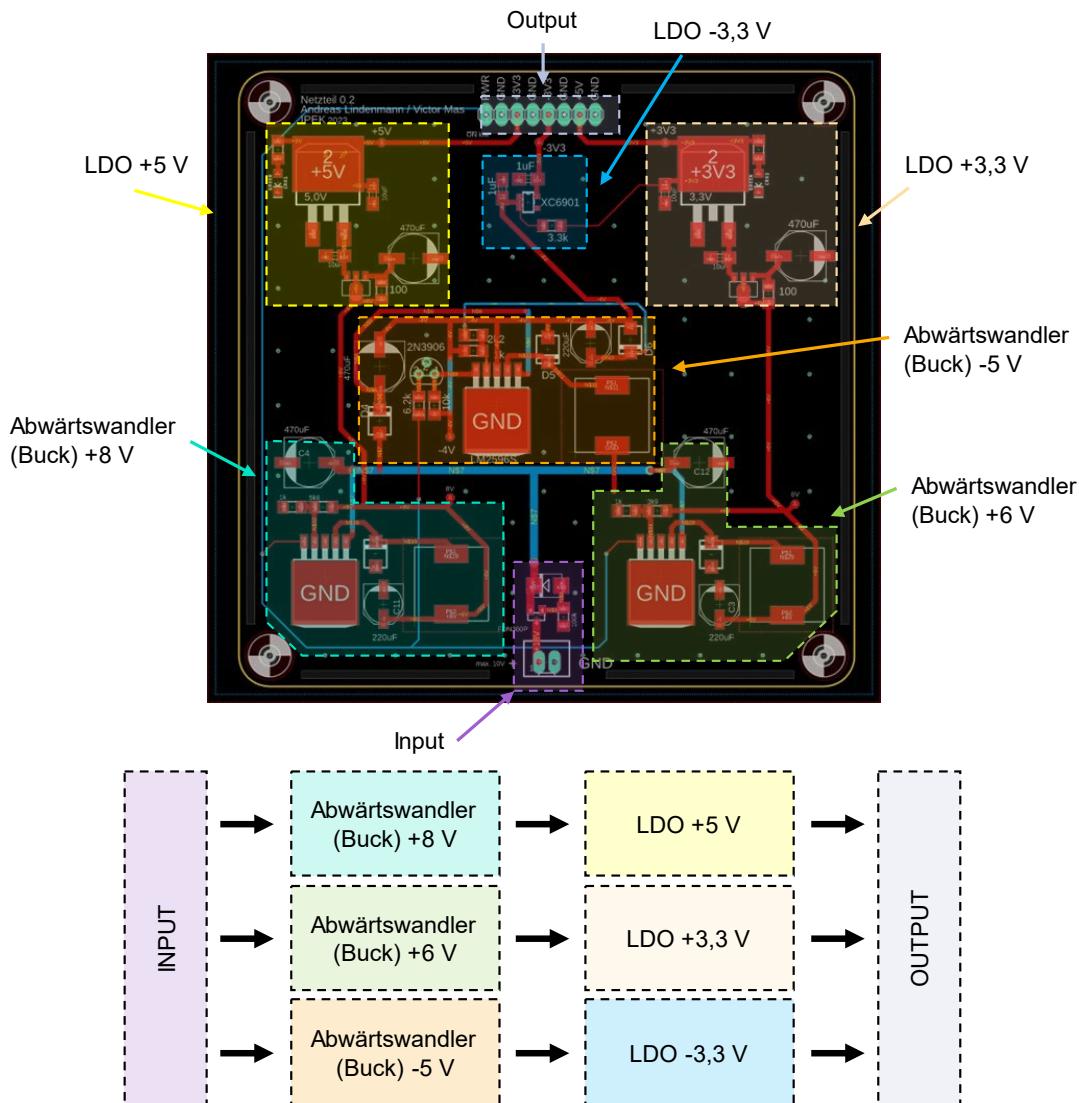


Abbildung 4.24: Finales Design des Netzteils mit Spannungswandlungs-Diagramm

4.4.3 Code

Für das Auslesen der Sensormatrix und zur Steuerung der gesamten Messelektronik ist eine Steuerlogik erforderlich, die von einem Mikrocontroller ausgeführt wird. Die grundsätzliche Funktionsweise dieser Logik wird hier in vereinfachter Form beschrieben, wobei Abbildung 4.25 die Struktur dieser Logik verdeutlicht.

Im ersten Schritt werden die Elektronikbausteine der Ausleseelektronik initialisiert (init()) und konfiguriert (configADC()). Nach der erfolgreichen Initialisierung startet das Programm in die Hauptschleife. In dieser Schleife wird die serielle Schnittstelle

immer wieder ausgelesen, bis ein Befehl aus dem MATLAB-Skript (siehe Kapitel 4.5.2, S. 57 ff.) erscheint. Je nach Befehl werden verschiedenen Modi ausgeführt. Eine „1“ führt zum Auslesen der Sensormatrix über 200 Zeitschritte und dem Speichern der Ergebnisse auf dem Mikrocontroller. Erst nach abgeschlossenem Auslesen werden die Daten an die serielle Schnittstelle übertragen.

Wird über das MATLAB-Skript eine „2“ gesendet, wird die Sensormatrix einmalig ausgelesen und die Ergebnisse werden direkt übertragen. Im letzten Fall („3“) werden die Spannungswerte ohne aktive Zeile ausgelesen und übertragen.

Zusammengefasst dient Modus „1“ der Durchführung der Experimente. Die beiden anderen Modi „2“ und „3“ dienen dem Testen und der Vorbereitung/Einrichtung der Experimente.

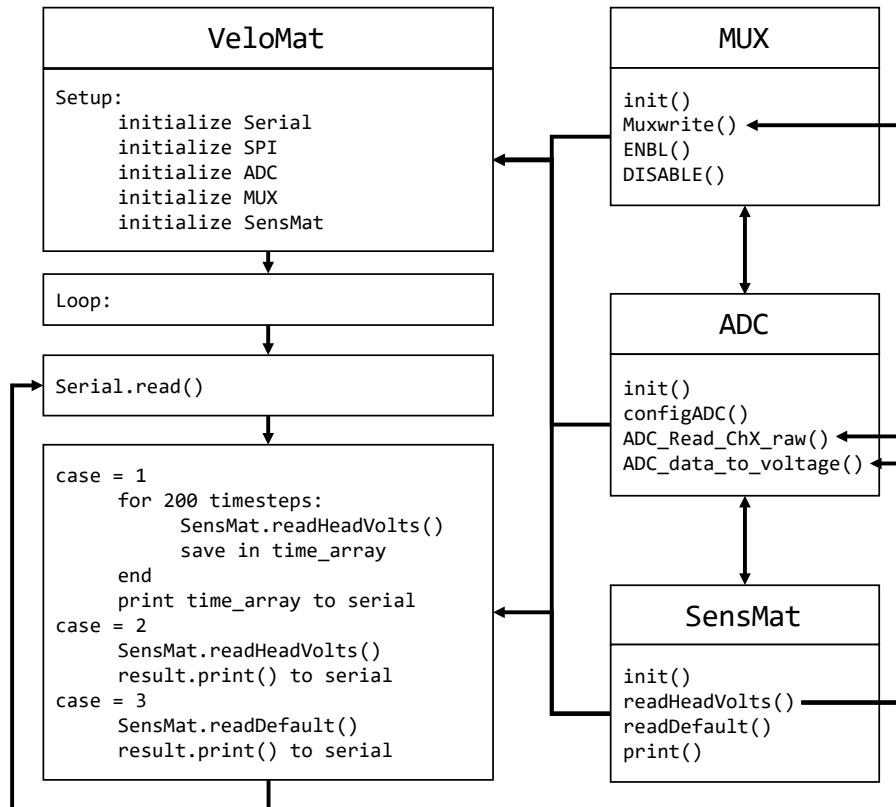


Abbildung 4.25: Visualisierung des Mikrocontroller-Codes (stark vereinfacht)

Diese Modi greifen jeweils auf verschiedene Methoden der Objekte MUX, ADC und SensMat zu. Soll die Sensormatrix ausgelesen werden, wird im ersten Schritt die erste Zeile über den Multiplexer ausgewählt (Muxwrite()). Anschließend werden die Rohdaten der Analog-Digital-Wandler (ADC) erfasst (ADC_Read_ChX_raw()) und in Volt

umgerechnet (ADC_data_to_voltage()). Die Zeile wird deaktiviert, die nächste Zeile wird aktiv geschaltet und die Spannungen werden auf die gleiche Weise ausgelesen. So werden nacheinander alle Zeilen ausgelesen. Wurden alle Zeilen erfasst, können die Daten an SensMat übergeben und gegebenenfalls an die serielle Schnittstelle übertragen werden.

In Abbildung 4.25 sind die wichtigsten Aspekte des Codes dargestellt und ist somit stark vereinfacht.

4.5 Validierung Prototypen

Um die Funktionalität der vorgestellten Prototypen zu überprüfen, sind verschiedene Versuche notwendig. Dieses Kapitel widmet sich den Details dieser Versuche. Es werden deren Aufbau und Ablauf sowie die vorgesehenen Auswertemethoden vorgestellt.

Die Validierung der Prototypen beinhaltet den Einsatz von Tests, die auf beide Prototypen gleichermaßen angewendet werden, um sicherzustellen, dass sie die definierten Anforderungen erfüllen.

Dieses Kapitel gliedert sich in mehrere Abschnitte, beginnend mit einem einfachen Funktionstest, gefolgt von einer Analyse der Formerkennungseigenschaften der Prototypen. Diese Analyse zeigt, ob die Prototypen in der Lage sind, mehrere Sensorelemente gleichzeitig auszulesen. Des Weiteren wird das dynamische Verhalten der Prototypen durch Impuls-Erfassungstests überprüft.

Die Untersuchungen sollen eine erste Validierung der Eigenschaften der Prototypen darstellen. Ziel ist es zu überprüfen, ob eine Bauweise der anderen vorzuziehen ist (indirekte vs. direkte Applikation) und ob der Einsatz der Velostat-Folie als Sensormaterial für die Impulsaufnahme auf einer gekrümmten Oberfläche geeignet ist. Eine vollständige Untersuchung ist nicht Bestandteil dieser Arbeit.

4.5.1 Aufbau und Ablauf

Das folgende Kapitel beschreibt den Aufbau und Ablauf der durchgeführten Experimente.

4.5.1.1 Funktionstest

Der Funktionstest dient der ersten Bewertung der grundlegenden Funktionalität der Prototypen. Dabei werden mehrere kritische Aspekte überprüft, um die korrekte Funktion des Systems zu gewährleisten. Folgende Aspekte sind zu prüfen:

- **Kabelanschlüsse / allgemeine Konstruktion:** Es soll festgestellt werden, ob alle Kabel korrekt angeschlossen sind, so dass ein korrekter Daten- und Stromfluss innerhalb des Prototypensystems gewährleistet wird. Darüber hinaus ist zu prüfen, ob die Folie korrekt aufgebaut und appliziert wurde.
- **Code-Funktionalität:** Überprüfung der Funktionalität des zugrundeliegenden Codes, um sicherzustellen, dass er wie vorgesehen funktioniert und dass die Sensorelemente richtig zugeordnet sind.
- **Allgemeiner Systembetrieb:** Bestätigung, dass das Prototypensystem funktionsfähig und reaktionsfähig ist und dass die erzielten Ergebnisse angezeigt werden können. Dadurch kann die Gesamtfunktionalität des Prototyps bestätigt werden.

Zur Überprüfung der genannten Aspekte werden die ausgelesenen Spannungswerte der Prototypen in einem MATLAB-Skript aufbereitet und visualisiert. Anhand dieser Visualisierung kann festgestellt werden, ob die Folie korrekt aufgebaut und angeschlossen ist und ob der zugrundeliegende Code des Mikrocontrollers fehlerfrei implementiert ist.

Dazu wird die Folie elementweise abgetastet (Abbildung 4.26 (a)) und mit der MATLAB-Visualisierung verglichen (Abbildung 4.26 (b)). So kann mit einem einzigen Test die Gesamtfunktion des Systems überprüft werden.

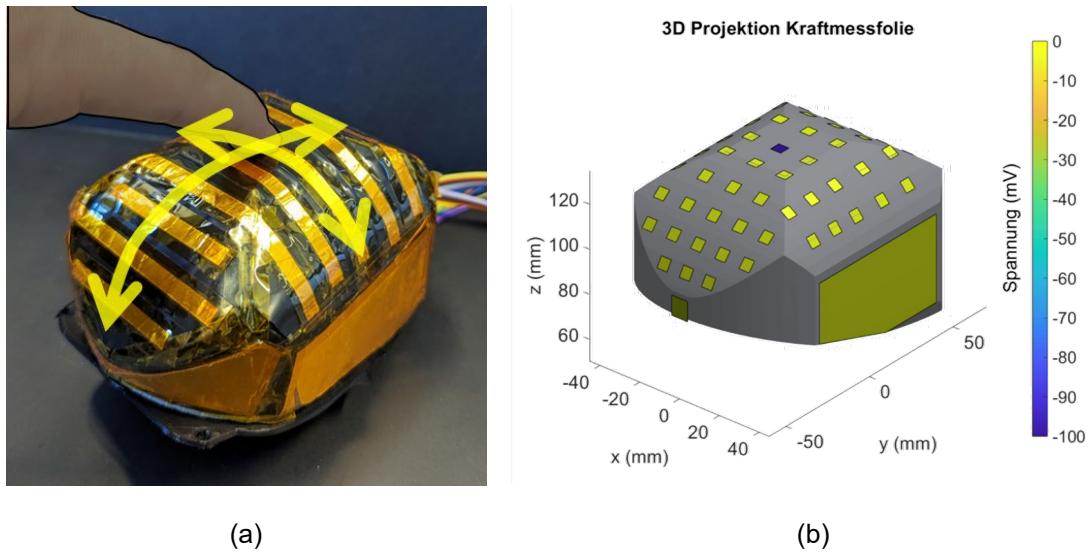


Abbildung 4.26: Funktionstest Prototypen - (a) Elementweises abtasten des Prototyps; (b) Visualisierung der gemessenen Spannungen

4.5.1.2 Formerkennung

Der Formerkennungstest wird durchgeführt, um zu prüfen, ob es möglich ist, mehrere Sensorelemente (nahezu) gleichzeitig zu messen und auszuwerten. Diese Fähigkeit ist notwendig, um neben Einzelpunktmessungen ganze Druckverteilungen aufnehmen zu können.

Dazu wird ein eigens angefertigter Silikonring auf den Prototypen gelegt und darauf eine dünne Platte sowie ein Gewicht platziert (Abbildung 4.27). Der Ring und die Platte sorgen für eine gleichmäßige Gewichtsverteilung auf die einzelnen Sensorelemente.

Anschließend werden die gemessenen Spannungen und die daraus berechneten Widerstandswerte analysiert und miteinander verglichen.

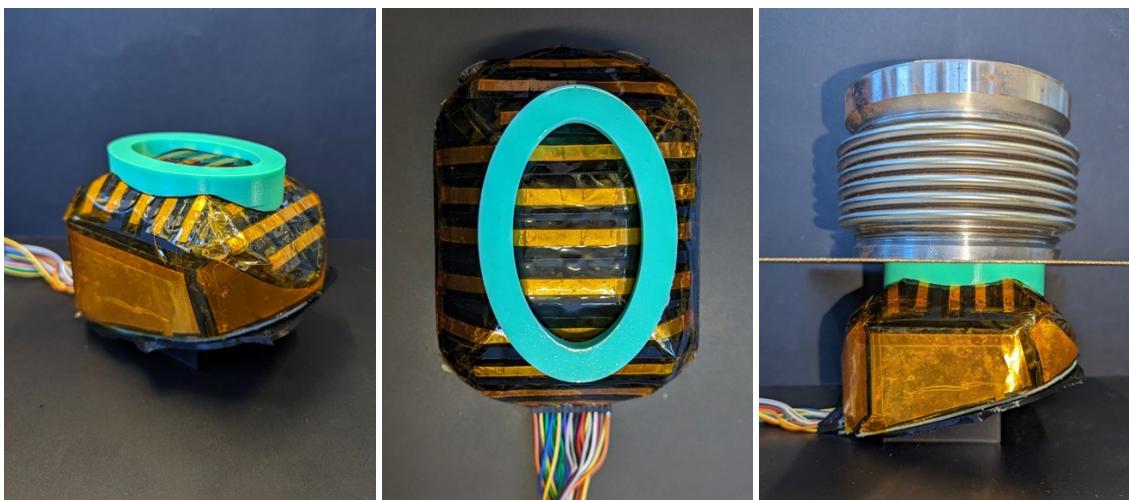


Abbildung 4.27: Statischer Versuch der Prototypen - Formerkennung

4.5.1.3 Impulsauflösung

Zur Untersuchung der dynamischen Eigenschaften der Prototypen wird überprüft, ob ein Kraftimpuls erfasst werden kann. Hierzu wird ein Ball aus zwei verschiedenen Höhen nacheinander fallen gelassen (Abbildung 4.28). Es wird nicht untersucht, ob die Fähigkeit besteht, mehrere Impulsstöße an verschiedenen Punkten zu messen.

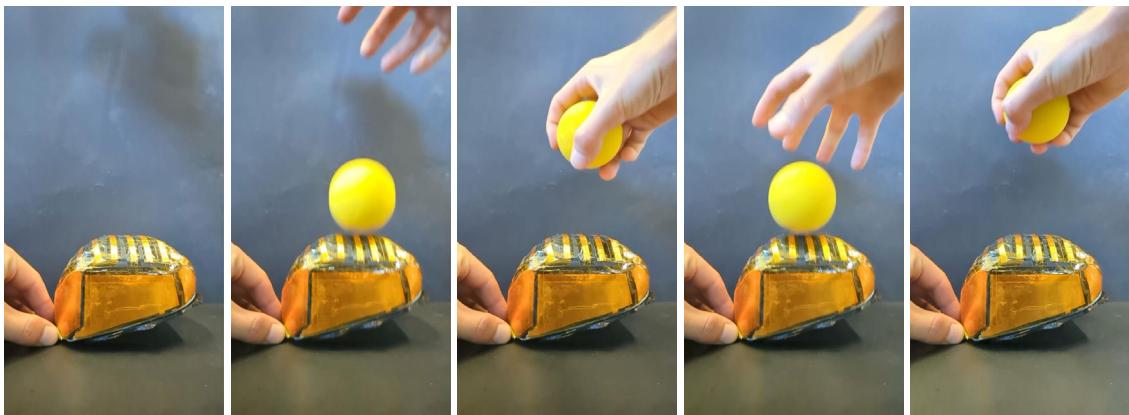


Abbildung 4.28: Bildsequenz des Impulsversuchs der Prototypen

4.5.2 Auswertung

Zur Auswertung der gemessenen Spannungswerte wird ein eigens entwickeltes MATLAB-Skript verwendet. Dieses Skript dient zur Kommunikation mit dem Mikrocontroller, zur Umrechnung der Spannungswerte in Widerstandswerte und zur

Darstellung der Daten. Das Zusammenspiel des Codes auf dem Mikrocontroller mit dem MATLAB-Skript wird in Abbildung 4.29 dargestellt.

Im ersten Schritt wird die serielle Schnittstelle geöffnet, wodurch die Startroutine des Mikrocontrollers gestartet wird. Ist der Mikrocontroller bereit, werden die Kalibrierwerte $V_{0j}(0)$ (Spannungswerte ohne aktive Zeile und ohne Belastung) ausgelesen und gespeichert. Danach wird die Mittelwertkorrektur der Sensormatrix ermittelt. Dazu wird die unbelastete Sensormatrix zwei Sekunden lang ausgelesen und über die Werte gemittelt. Die Normierung der Sensorfolie erfolgt durch Subtraktion der so ermittelten Ruhespannungswerte von den während der eigentlichen Durchführung des Experiments gemessenen Werten. Diese Korrektur setzt den Grundzustand der Sensormatrix auf „Null“.

Da in der verwendeten Schaltung durch den Zusammenhang $R \sim \frac{1}{U}$ der Spannungswert „Null“ einem unendlich großen Widerstand entspricht (beziehungsweise einem „nicht angeschlossen sein“) und der durch die Mittelwertkorrektur ermittelte Spannungswert nahe null liegt, führt eine Mittelwertkorrektur mit anschließender Widerstandsberechnung zu hohen Widerstandswerten im unbelasteten Zustand. Aus diesem Grund wird der korrespondierende Widerstand aus den gemessenen Spannungen ohne Mittelwertkorrektur berechnet.

Die Widerstandsberechnung wird nach drei verschiedenen Modellen berechnet. Einmal nach dem Ersatzschaubild, präsentiert in Abbildung 4.22 mit Formel 4.7 und zudem nach „Type A“ (Formel 4.2) und „Type B“ (Formel 4.3) aus Hidalgo-Lopez et al. [19].

Abhängig vom Auslesemodus wird die Sensormatrix („Fast Mode“) für 200 Zeitschritte ausgelesen, die Messdaten auf dem Mikrocontroller gespeichert und anschließend über die serielle Schnittstelle an MATLAB übergeben. Alternativ („Live Mode“) wird nach jedem Auslesen der Sensormatrix direkt die Visualisierung generiert. Der „Fast Mode“ hat den Vorteil, dass dieser mit ca. 100 Hz Auslesegeschwindigkeit wesentlich schneller ist als der „Live Mode“ mit ca. 50 Hz - 60 Hz. Der „Live Mode“ bietet durch die direkte Visualisierung ein zeitnahe Feedback über die Sensorwerte. Die Umrechnung der Spannungswerte in Widerstandswerte ist in beiden Modi möglich.

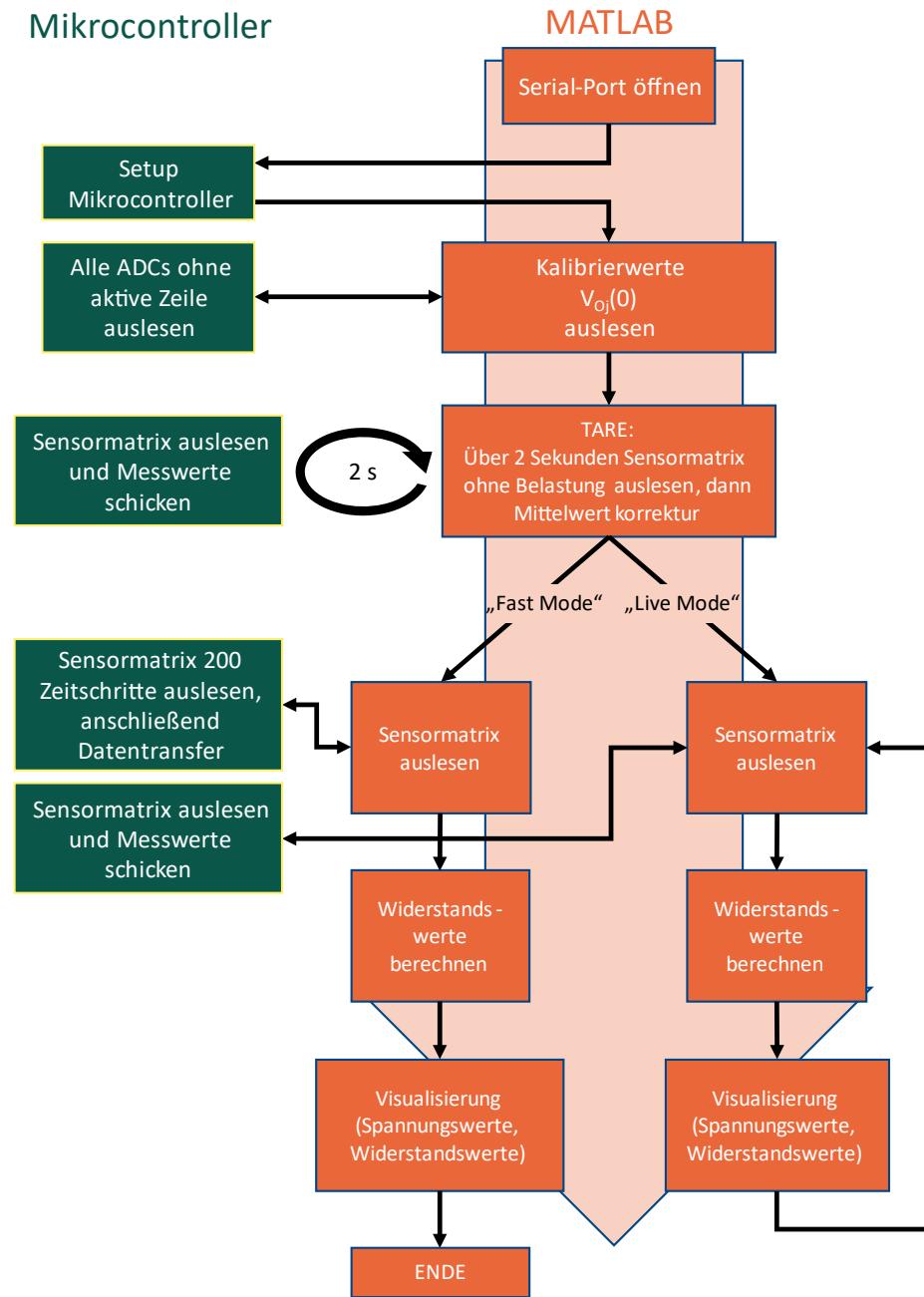


Abbildung 4.29: Ablaufdiagramm des MATLAB-Skripts zur Auswertung der Prototypenversuche

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der zuvor beschriebenen Versuche präsentiert.

5.1 Versuchsergebnisse Eigenschaften Velostat

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zu den in Kapitel 4.1 (S. 25 ff.) beschriebenen Untersuchungen vorgestellt. Die aufgezeichneten Impulsverläufe dienen zur Beantwortung der ersten Frage (Kapitel 4.1, S. 25 ff.) - Können Kraftsensoren, die Velostat als Basismaterial verwenden, Impulse auflösen? Durch den Vergleich verschiedener Versuche können aus den Impulsverläufen Aussagen über die Reproduzierbarkeit abgeleitet werden. Beides, die Impulsauflösung und die Wiederholbarkeit, wird in 5.1.1 (S. 60 ff.) behandelt. Kapitel 5.1.3 (S. 78 ff.) befasst sich mit der Amplitudenauflösung und der Amplitudendifferenzierung, für welche zusätzlich die Kraft-Spannungs-Beziehung der einzelnen Sensoren betrachtet wird (Kapitel 5.1.2, S. 73 ff.). Insgesamt ergibt sich ein umfassendes Bild der Eigenschaften von Velostat.

5.1.1 Impulsauflösung & Wiederholbarkeit

Wie bereits in Kapitel 4.1.2 (S. 29 ff.) beschrieben, wird jeder Sensor zehnmal einem Impuls durch den Modalhammer ausgesetzt. Jede Bauform wird zudem dreimal hergestellt. So können sowohl ein einzelner Sensor als auch drei baugleiche Sensoren auf ihre Wiederholbarkeit geprüft werden. Zusätzlich lässt sich anhand des zeitlichen Verlaufes des Impulses prüfen, ob der Impuls zeitlich aufgelöst wird.

5.1.1.1 Variante 1: Velo_Nr01 – 03 (einlagig)

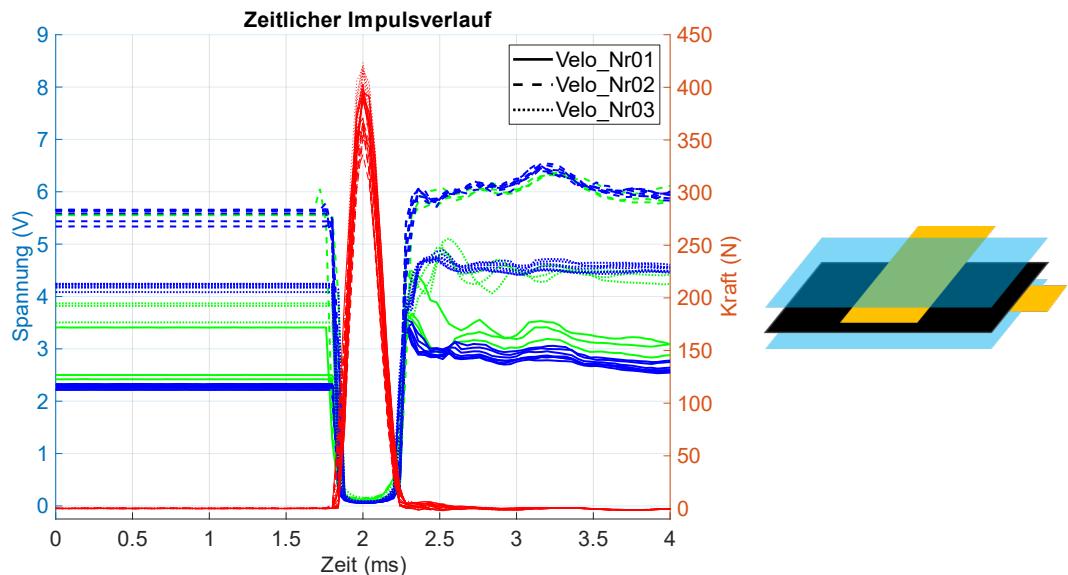


Abbildung 5.1: Zeitlicher Impulsverlauf Velo_Nr01 – 03 (einlagig)

Grün sind jeweils die ersten drei Impulsstöße, blau die restlichen sieben; rot ist die mit dem Impulshammer gemessene Kraft

Abbildung 5.1 zeigt den zeitlichen Verlauf der Spannungs- und Kraftamplitude des Impulses der ersten Bauform (einlagig, Velo_Nr01 - 03). Auf der x-Achse ist die Zeit aufgetragen. In dieser Auswertung wird ein Zeitfenster von 4 ms betrachtet. Die gemessene Spannung über den Sensor wird auf der linken y-Achse aufgetragen und die gemessene Kraft am Modalhammer auf der rechten y-Achse. Die Art der Strichelung der verschiedenen Linien dient zur Identifizierung der drei baugleichen Sensoren. In Grün sind die jeweils ersten drei Stöße eingefärbt. Blaue Verläufe stellen die weiteren sieben Stöße dar und die roten Verläufe den Kraftverlauf an der Modalhammerspitze. Diese Darstellung wird in den weiteren Kapiteln beibehalten.

Es ist zu erkennen, dass jeder Stoß eindeutig erfasst wird. Die Spannung fällt über den resistiven Sensor mit zunehmender Kraft ab. Die Dauer des Spannungsabfalls ist nahezu identisch mit der des Kraftanstiegs. Es ist keine nennenswerte Verzögerung zu erkennen. Weiterhin ist zu erkennen, dass die einzelnen Sensoren vor und nach dem Stoß (im unbelasteten Zustand) unterschiedlich hohe Spannungswerte und -verläufe aufweisen. Trotz der großen Unterschiede nähern sich alle Kurven bei ähnlicher Krafteinleitung (im belasteten Zustand) einem ähnlichen Wert an.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Unterschiede in den Minima der Spannungswerte aufgrund der gewählten Darstellung graphisch nicht erkennbar sind. Auf diese Unterschiede wird in den Kapiteln 5.1.2 (S. 73 ff.) und 5.1.3 (S. 78 ff.) näher eingegangen und sollen an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden.

Wird nur ein einzelner Sensor betrachtet, so ist zu erkennen, dass einige der ersten Stöße in ihrem Verlauf von dem der weiteren Stöße abweichen. Werden die ersten Stöße nicht weiter betrachtet, sind die Amplituden- und Formverläufe der letzten Stöße sehr ähnlich. Abbildung 5.2 fasst die mittleren Spannungen vor (a) und nach (b) dem Stoß zusammen und hebt jeweils die ersten drei Stöße farblich hervor. Wie in den Impulsverläufen ist auch hier zu erkennen, dass in einigen Fällen die Spannungswerte von den übrigen abweichen. Die Abweichungen treten innerhalb der ersten drei Stöße auf. Außerdem sind die großen Unterschiede in den Spannungswerten vor und nach dem Stoß zwischen den drei Sensorelementen zu erkennen. Die Standardabweichung der Spannungen vor dem Impulsstoß beträgt über alle 30 Versuche $\sigma = 1.32$ V. Nach dem Impulsstoß liegt dieser Wert bei $\sigma = 1.29$ V.

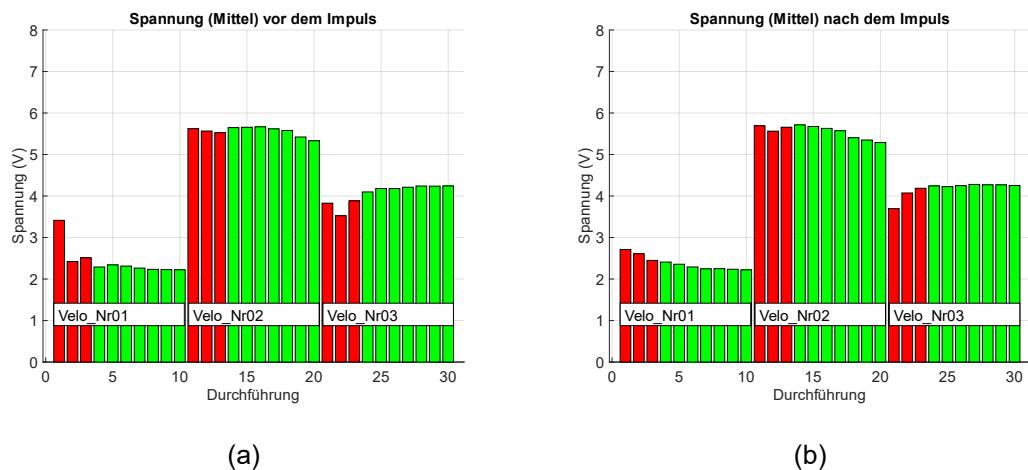


Abbildung 5.2: Mittlere Spannung (a) vor und (b) nach dem Impuls (VeloNr_01 - 03). Rot sind jeweils die ersten drei Impulsstöße

Wird die Stärke des Krafteintrags genauer betrachtet (Abbildung 5.3), ist ein deutlicher Trend zu erkennen. Bei gleicher Fallhöhe des Modalhammers nimmt die gemessene Kraft über die ersten Stöße zu, bis sie ein Plateau erreicht.

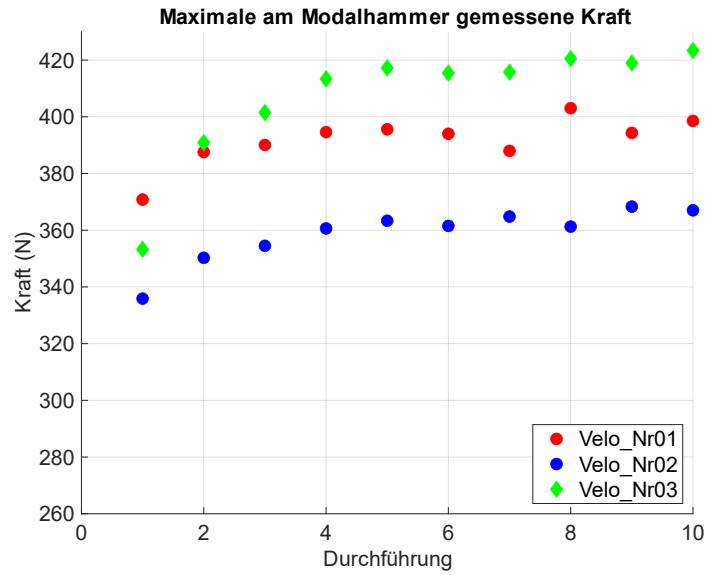


Abbildung 5.3: Stärke des Krafteintrags des Modalhammers über die Anzahl der Durchführungen (VeloNr_01 - 03)

5.1.1.2 Variante 2: Velo_Nr04 – 06 (zweilagig)

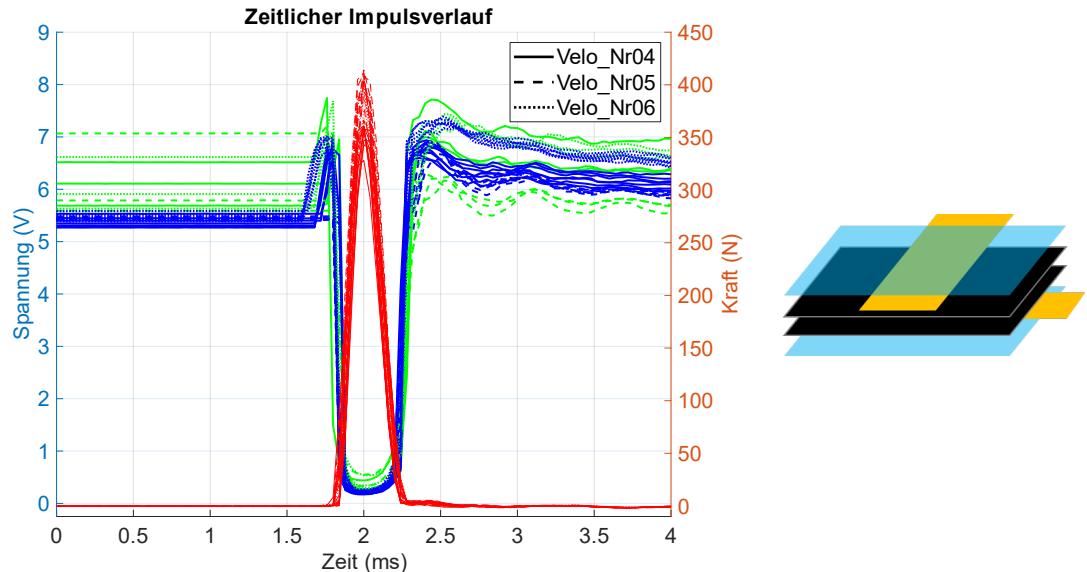


Abbildung 5.4: Zeitlicher Impulsverlauf Velo_Nr04 – 06 (zweilagig)
 Grün sind jeweils die ersten drei Impulsstöße, blau die restlichen sieben; rot ist die mit dem Impulshammer gemessene Kraft

Der zeitliche Verlauf der Spannungs- und der Kraftamplituden der zweilagigen Velostat-Sensoren Velo_Nr04 - 06 ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass jeder

Stoß eindeutig detektiert wird. Die Spannung fällt mit zunehmender Kraft am resistiven Sensor ab. Bei den Sensoren Velo_Nr4 und Velo_Nr6 kommt es zusätzlich vor dem Spannungsabfall zu einem kurzen, starken Spannungsanstieg. Eine zeitliche Auflösung des Impulses ist auch mit diesem Sensor Typ in allen gemessenen Fällen möglich.

Im Gegensatz zu den vorherigen Versuchen ist eine deutliche Verbesserung der Streuung der Spannungswerte vor und nach dem Stoß zwischen den baugleichen Sensoren zu erkennen. Die Amplituden und Verläufe der drei Sensoren sind insgesamt ähnlich. Bei den jeweils ersten drei Durchführungen lassen sich erhöhte Spannungswerte vor dem Stoß erkennen. Dies ist vor allem in Abbildung 5.5 zu erkennen. Die Spannungswerte sind anfangs höher und stabilisieren sich nach einigen ersten Durchläufen. Über alle 30 Versuche beträgt die Standardabweichung der Spannungen vor dem Impulstoß ohne Berücksichtigung der ersten drei Durchführungen $\sigma = 0,2387$ V. Nach dem Impulstoß beträgt dieser Wert $\sigma = 0,1482$ V. Zusätzlich sind die durchschnittlichen Spannungswerte vor und nach dem Stoß bei dieser Sensorvariante höher als zuvor (Velo_Nr01 - 03).

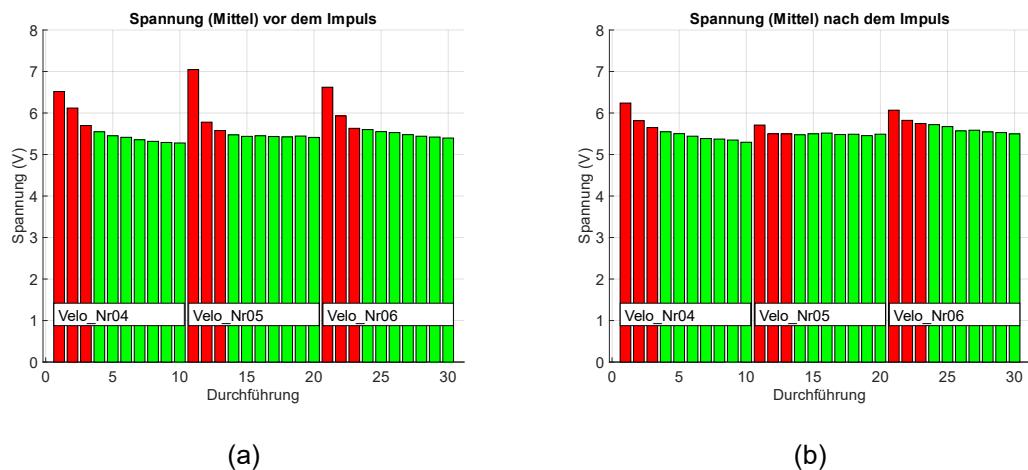


Abbildung 5.5: Mittlere Spannung (a) vor und (b) nach dem Impuls (VeloNr_04 - 06). Rot sind jeweils die ersten drei Impulstoße

Abbildung 5.6 zeigt ebenfalls ein klares Muster. Bei identischer Fallhöhe des Modalhammers nimmt die gemessene Kraft über die Durchführungen zu und stabilisiert sich ab der vierten Durchführung. Die Amplituden der einzelnen Sensoren weisen hingegen deutliche Unterschiede auf. So liegen die Kraftwerte von Velo_Nr04 zwischen 328,21 N und 361,14 N, während Velo_Nr05 mit 366,19 N bis 414,19 N die höchsten Kraftwerte hat.

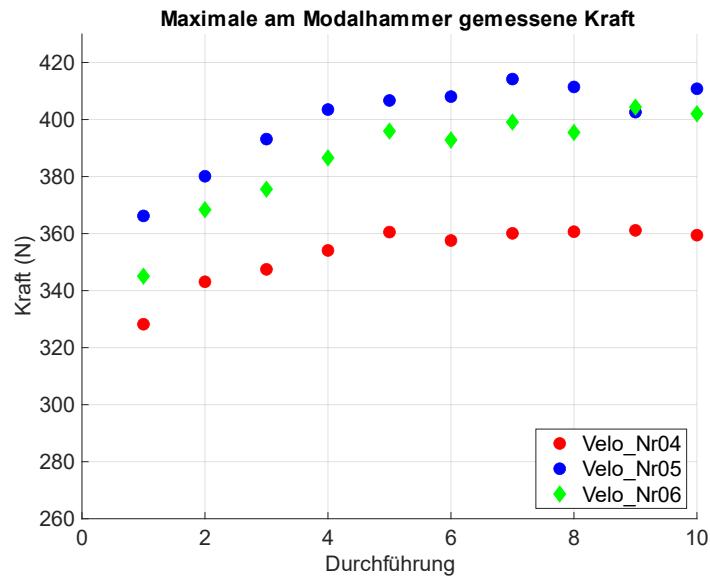


Abbildung 5.6: Stärke des Krafteintrags des Modalhammers über die Anzahl der Durchführungen (VeloNr_04 - 06)

5.1.1.3 Variante 3: Velo_Nr07 – 09 (dreilagig)

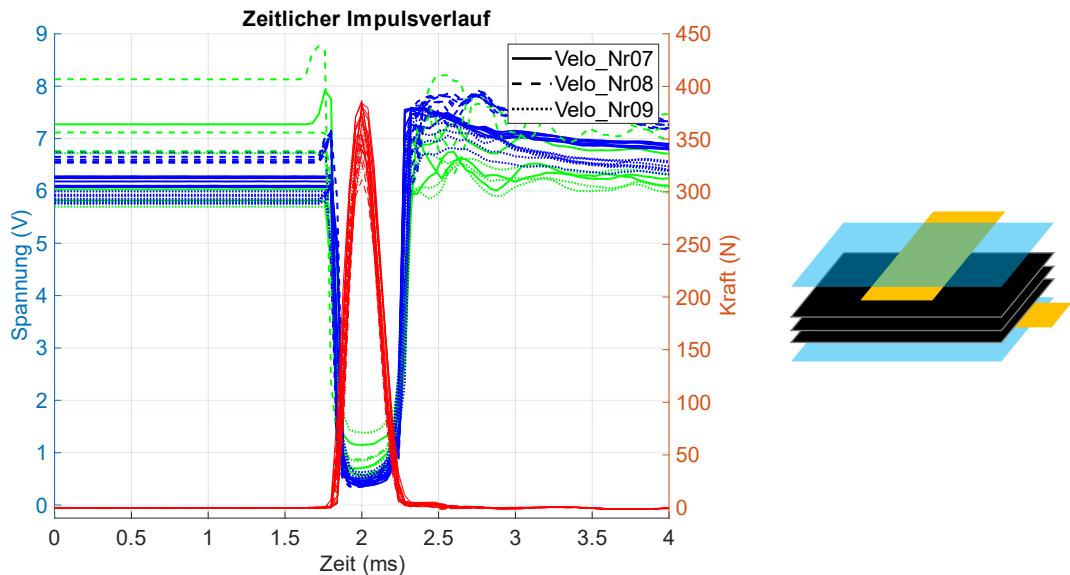


Abbildung 5.7: Zeitlicher Impulsverlauf Velo_Nr07 – 09 (dreilagig)
Grün sind jeweils die ersten drei Impulsstöße, blau die restlichen sieben; rot ist die mit dem Impulshammer gemessene Kraft

Abbildung 5.7 zeigt den zeitlichen Verlauf der Spannung an den Sensoren und die gemessene Krafteinleitung am Modalhammer. Bei den betrachteten Sensoren handelt es sich um die dreilagigen Sensoren Velo_Nr07 - 09. Der dargestellte Verlauf ist dem der vorherigen Sensortypen sehr ähnlich. Sowohl die präzise zeitliche Impulsauflösung als auch das vorhergesagte resistive Verhalten der Sensoren ist deutlich zu erkennen. In zwei von drei Fällen (Velo_Nr08 und 09) kommt es vor dem Spannungsabfall zu einem deutlichen Spannungsanstieg.

Wie bei den zweilagigen Velostat-Sensoren (Velo_Nr04 - 06) liegen auch hier die Spannungswerte vor und nach dem Stoß nahe beieinander. Die Streuung der Werte ist deutlich geringer als beim einlagigen Sensor (Velo_Nr01 - 03). Die Standardabweichung der Spannungen vor dem Impulsstoß beträgt über alle 30 Versuche $\sigma = 0,3461$ V. Nach dem Impulsstoß liegt dieser Wert bei $\sigma = 0,3255$ V. Besser zu erkennen ist dies in Abbildung 5.8. Die mittleren Spannungen vor und nach einem Stoß liegen bei den einzelnen Sensoren nahe beieinander. Auffällig ist, dass insbesondere die erste Durchführung einen deutlich höheren Mittelwert der Spannung vor dem Impulsstoß aufweist. Außerdem sind die Spannungswerte insgesamt höher als bei den zweilagigen Sensorelementen.

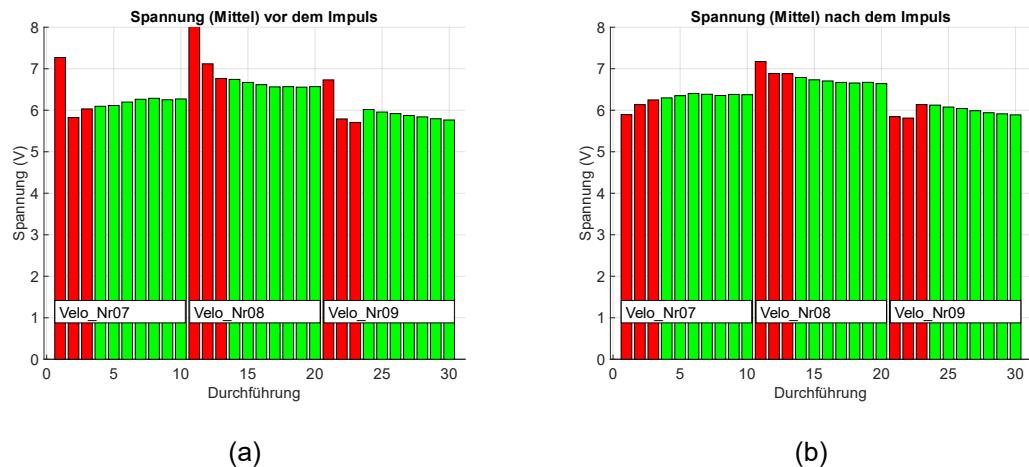


Abbildung 5.8: Mittlere Spannung (a) vor und (b) nach dem Impuls (VeloNr_07-09). Rot sind jeweils die ersten drei Impulsstöße

Bei der Betrachtung der Stärke des Krafteintrags über die Durchführungen zeigt sich das gleiche Muster wie zuvor. Die gemessene Kraft stabilisiert sich nach einigen ersten Durchführungen (Abbildung 5.9). Auch in diesem Fall weichen die Kraftwerte der einzelnen Sensoren voneinander ab. So weist VeloNr_07 die höchsten Werte zwischen

337,99 N und 386,53 N auf. VeloNr_08 die niedrigstem zwischen 311,42 N und 353,77 N.

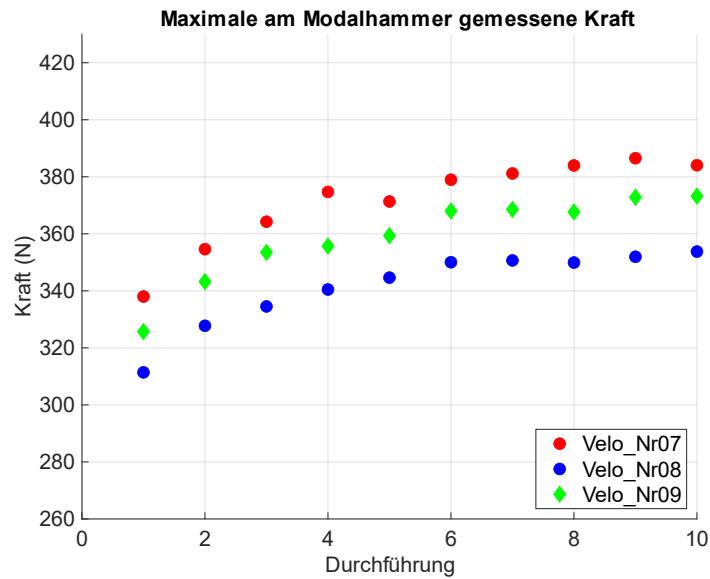


Abbildung 5.9: Stärke des Krafteintrags des Modalhammers über die Anzahl der Durchführungen (VeloNr_07-09)

5.1.1.4 Variante 4: Velo_Nr10 – 12 (zweilagig + gepresst)

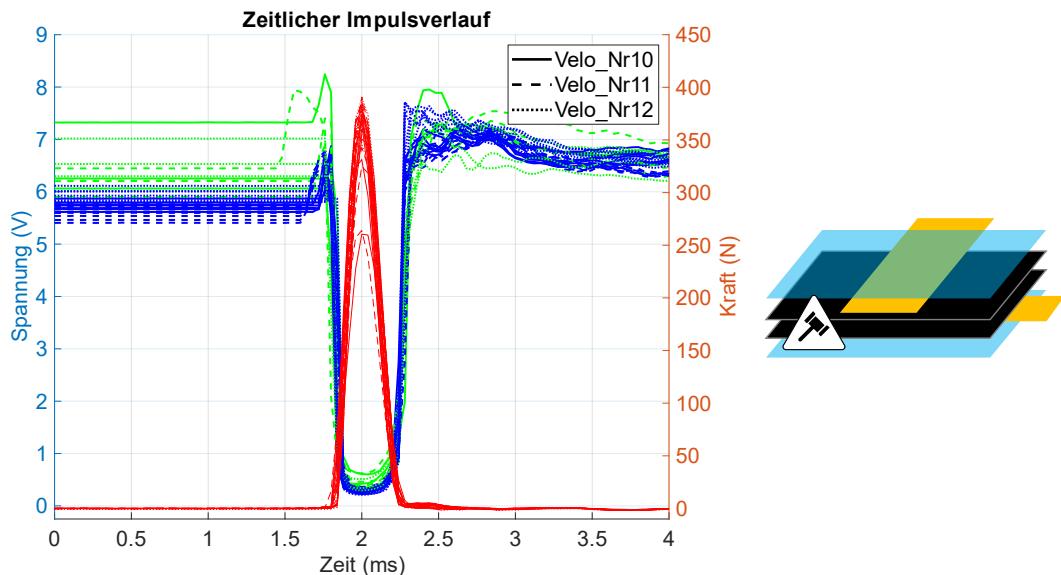


Abbildung 5.10: Zeitlicher Impulsverlauf Velo_Nr10 – 12 (zweilagig und gepresst)
 Grün sind jeweils die ersten drei Impulsstöße, blau die restlichen sieben; rot ist die mit dem Impulshammer gemessene Kraft

Abbildung 5.10 zeigt den zeitlichen Verlauf der Spannungs- und Kraftamplituden über die Impulsdauer für die zweilagigen, gepressten Velostat-Sensoren (VeloNr_10 - 12). Es ist zu erkennen, dass der zu erwartende Spannungsabfall die identische Dauer wie der Kraftanstieg des Impulses aufweist. Es kommt vor dem Spannungsabfall zu einem deutlichen Spannungsanstieg. Wird nun Abbildung 5.11 betrachtet, ist zu erkennen, dass die Mittelwerte der gemessenen Spannungen vor und nach dem Stoß nur eine geringe Streuung aufweisen. Es ist außerdem zu erkennen, dass sich nach mehreren Durchläufen kein eindeutiges Plateau ausbildet. Bei den ersten Durchführungen ist ein starker Abfall der Spannungswerte zu erkennen. Danach fallen die Werte von Durchgang zu Durchgang schwach ab. Die Standardabweichung der Spannungen vor dem Impulsstoß beträgt über alle 30 Versuche $\sigma = 0,3352$ V. Nach dem Impulsstoß liegt dieser Wert bei $\sigma = 0,2668$ V.

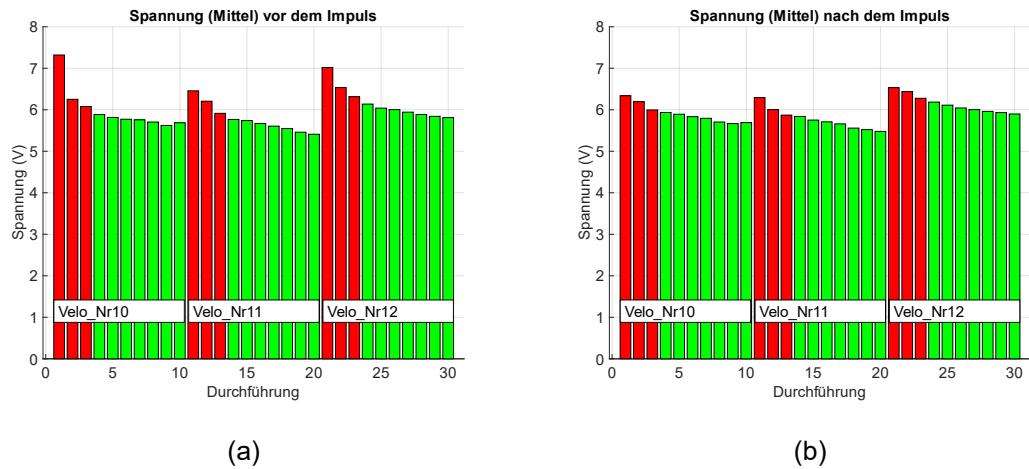


Abbildung 5.11: Mittlere Spannung (a) vor und (b) nach dem Impuls (VeloNr_10-12). Rot sind jeweils die ersten drei Impulsstöße

In Abbildung 5.12 ist zu erkennen, dass die gemessenen Kraftwerte über die ersten Durchführungen stark ansteigen. Im weiteren Verlauf des Versuchs steigt die gemessene Kraft leicht an. Nach dem anfänglichen Kraftanstieg liegen hier, im Gegensatz zu den andern Sensortypen (Velo_Nr01 - 09), die Werte der drei getesteten Sensorelementen deutlich näher beieinander.

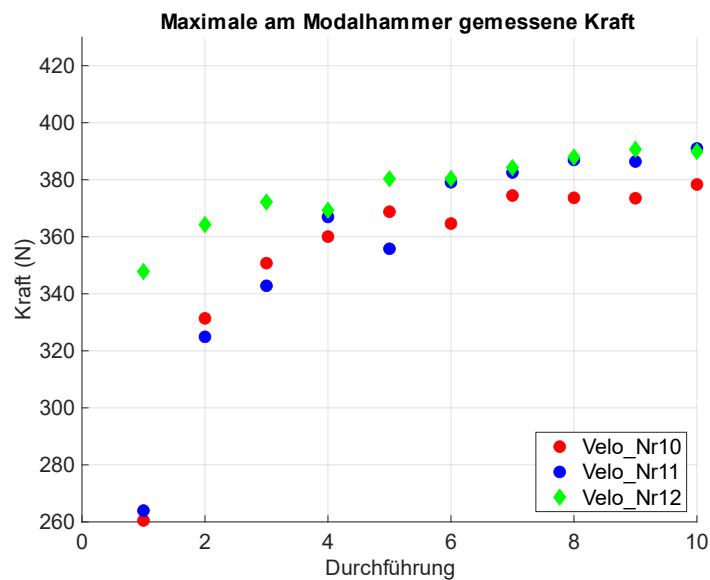


Abbildung 5.12: Stärke des Kraftbeitrags des Modalhammers über die Anzahl der Durchführungen (VeloNr_10 - 12)

5.1.1.5 Variante 5: Velo_Nr13 – 15 (zweilagig + erhitzt)

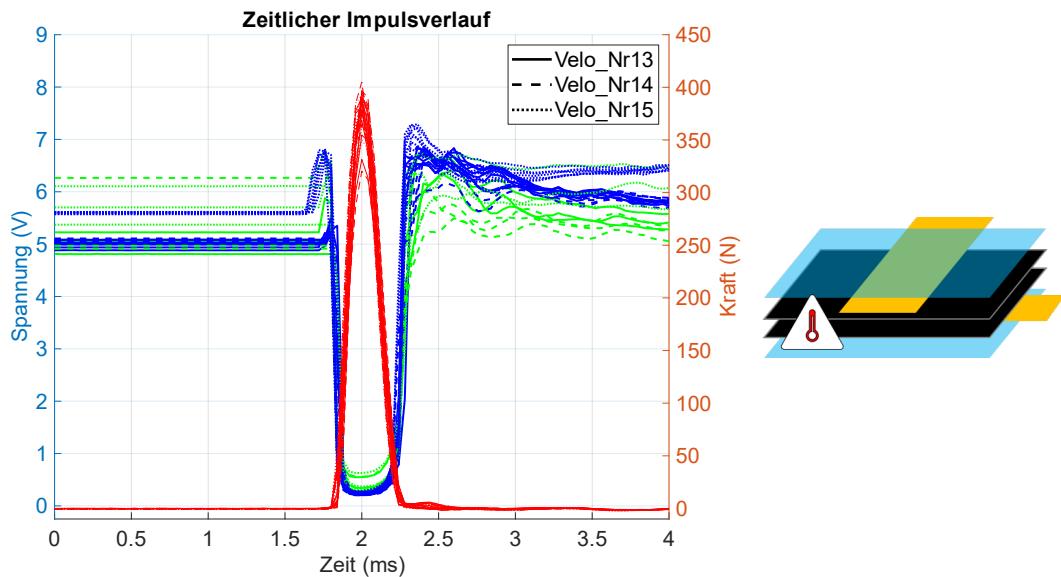


Abbildung 5.13: Zeitlicher Impulsverlauf Velo_Nr13 – 15 (zweilagig und erhitzt)
 Grün sind jeweils die ersten drei Impulsstöße, blau die restlichen sieben; rot ist die mit dem Impulshammer gemessene Kraft

Die Ergebnisse des letzten Velostat-Sensortyps sind in Abbildung 5.13 dargestellt. Bei Velo_Nr13 - 15 handelt es sich um zweilagige Sensoren, welche vor den Versuchen für 15 min auf 60 °C erwärmt wurden. Im zeitlichen Verlauf ist zu erkennen, dass der Spannungsabfall, der durch die aufgebrachte Kraft hervorgerufen wird, etwa die gleiche Dauer aufweist wie die des Kraftimpulses selbst. Hervorzuheben ist der Spannungsanstieg unmittelbar vor dem Spannungsabfall durch den Kraftimpuls. Außerdem liegen die Spannungswerte vor und nach dem Stoß bei Sensor Velo_Nr13 und Velo_Nr14 sehr nahe beieinander. Velo_Nr15 zeigt höhere Werte. Es ist zu erkennen, dass vor allem die Spannungswerte der jeweils ersten Durchläufe stärker von den restlichen Durchläufen abweichen. In Abbildung 5.14 ist dies besonders gut zu erkennen. Vor allem vor dem Stoß sind die Spannungswerte deutlich höher. Danach ändern sich die Werte geringfügig. Die Standardabweichung der Spannungen vor dem Impulsstoß beträgt über alle 30 Versuche $\sigma = 0,3075$ V. Nach dem Impulsstoß beträgt dieser Wert bei $\sigma = 0,2741$ V.

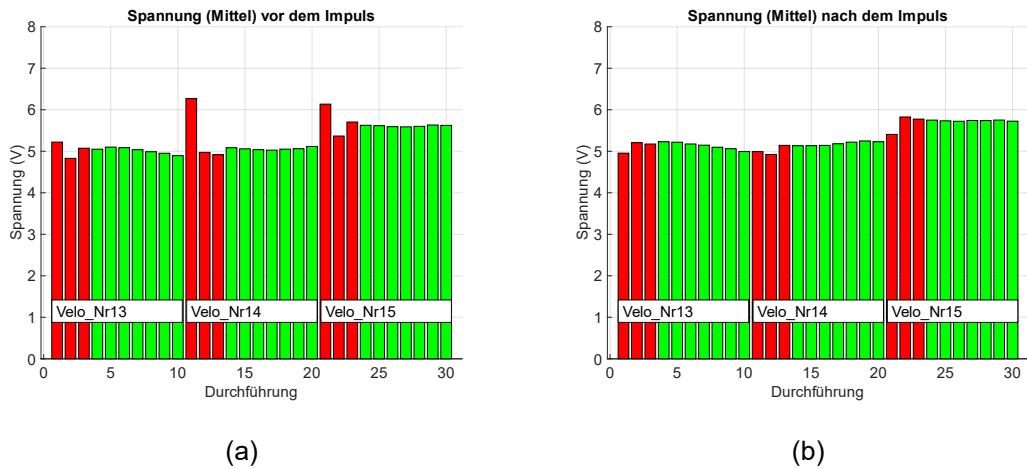


Abbildung 5.14: Mittlere Spannung (a) vor und (b) nach dem Impuls (VeloNr_13 - 15). Rot sind jeweils die ersten drei Impulsstöße

Abbildung 5.15 stellt die Kraftamplituden der zehn Durchgänge der drei Sensoren dar. Es ist zu erkennen, dass die gemessene Kraft nach dem ersten Durchgang stark ansteigt und nach einigen weiteren Durchgängen abflacht, ohne eine eindeutige Asymptote zu erreichen.

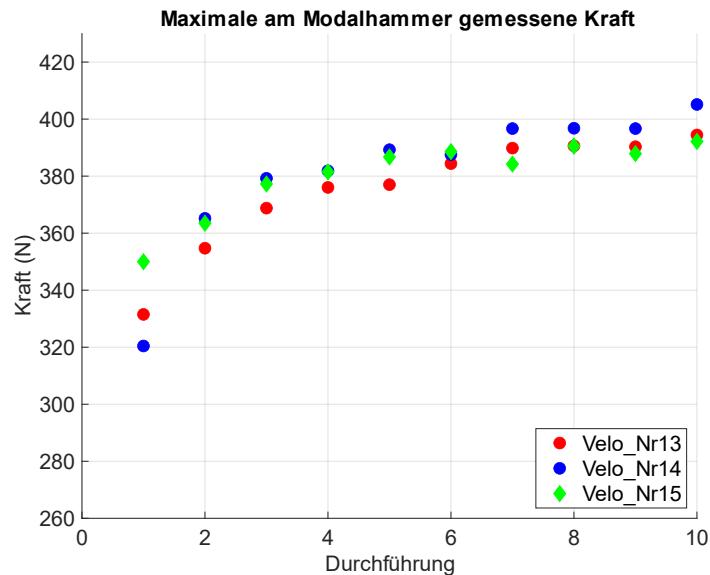


Abbildung 5.15: Stärke des Krafteintrags des Modalhammers über die Anzahl der Durchführungen (VeloNr_13 - 15)

5.1.1.6 FlexiForce_01-02

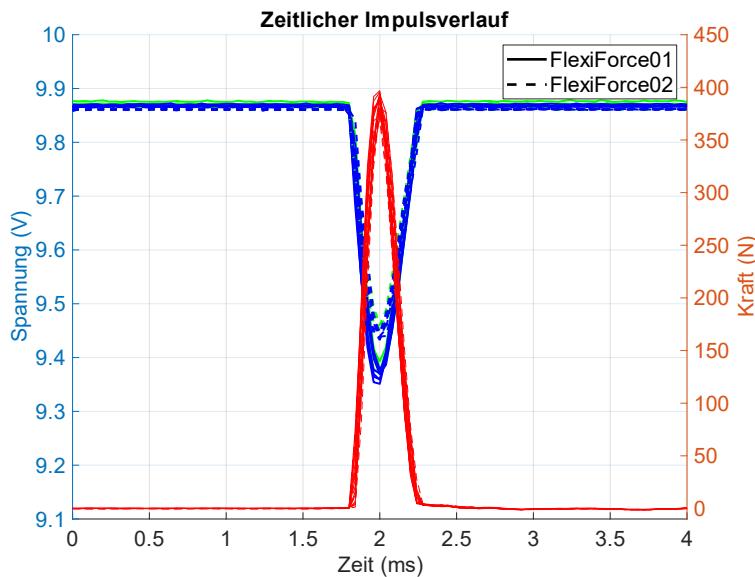


Abbildung 5.16: Zeitlicher Impulsverlauf FlexiForce_01 - 02

Grün sind jeweils die ersten drei Impulsstöße, blau die restlichen sieben; rot ist die mit dem Impulshammer gemessene Kraft

Der zeitliche Verlauf der Spannungs- und der Kraftamplitude der kommerziell erhältlichen FlexiForce Sensoren wird in Abbildung 5.16 dargestellt. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass sich, im Vergleich zu den vorherigen Graphen, der dargestellte Achsenbereich geändert hat. Dadurch wird das relevante Verhalten sichtbar.

Jeder Impuls wird klar erfasst. Mit zunehmender Kraftamplitude tritt ein deutlicher Spannungsabfall auf. Die Dauer dieses Spannungsabfalls ist nahezu identisch mit der des Kraftanstiegs. Zudem ist keine nennenswerte Verzögerung zwischen Kraftanstieg und Spannungsabfall zu erkennen.

Weiterhin ist zu erkennen, dass die einzelnen Sensoren vor und nach dem Stoß (im unbelasteten Zustand) nahezu identische Spannungswerte und -verläufe aufweisen. Bestätigt wird dies in Abbildung 5.17. Die Mittelwerte der Spannungen vor und nach dem Stoß streuen lediglich um eine Standardabweichung $\sigma = 0,0033$ V (vor dem Impulsstoß) und $\sigma = 0,0032$ V (nach dem Impulsstoß).

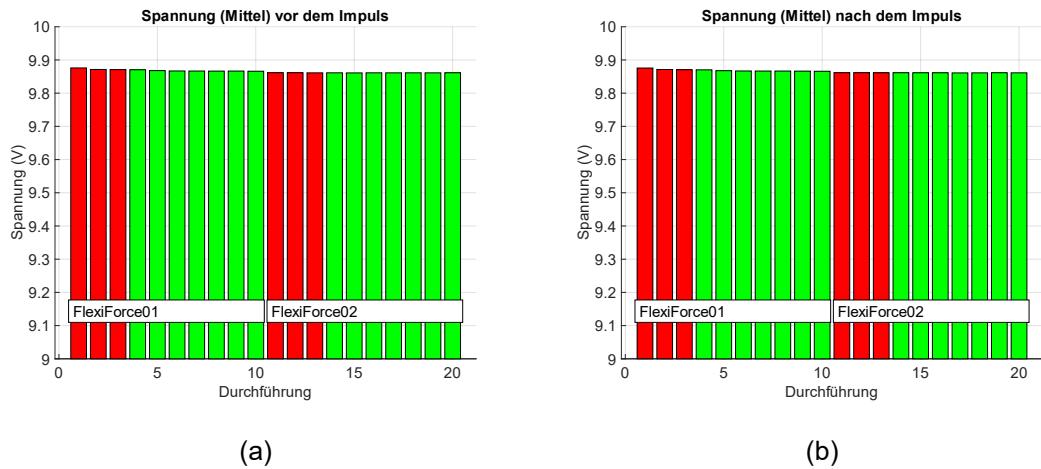


Abbildung 5.17: Mittlere Spannung (a) vor und (b) nach dem Impuls (FlexiForce_01 - 02). Rot sind jeweils die ersten drei Impulsstöße

Ebenso sind die Kraftamplituden der einzelnen Impulse sehr ähnlich, wie es in Abbildung 5.18 zu erkennen ist.

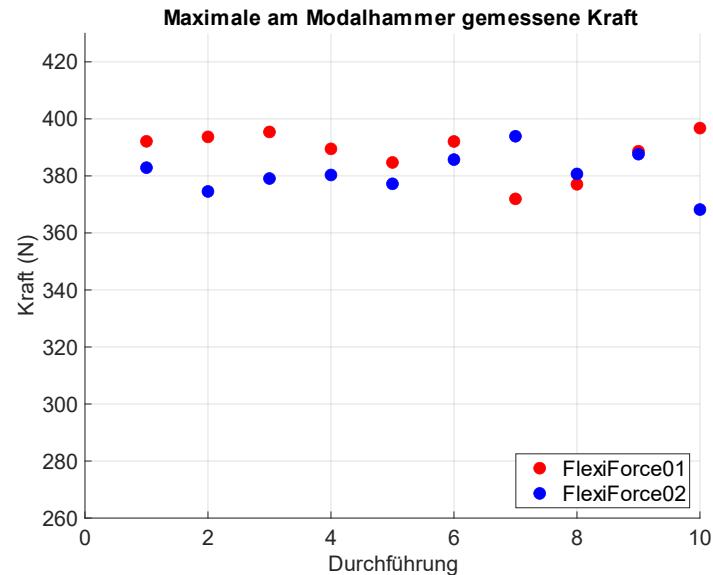


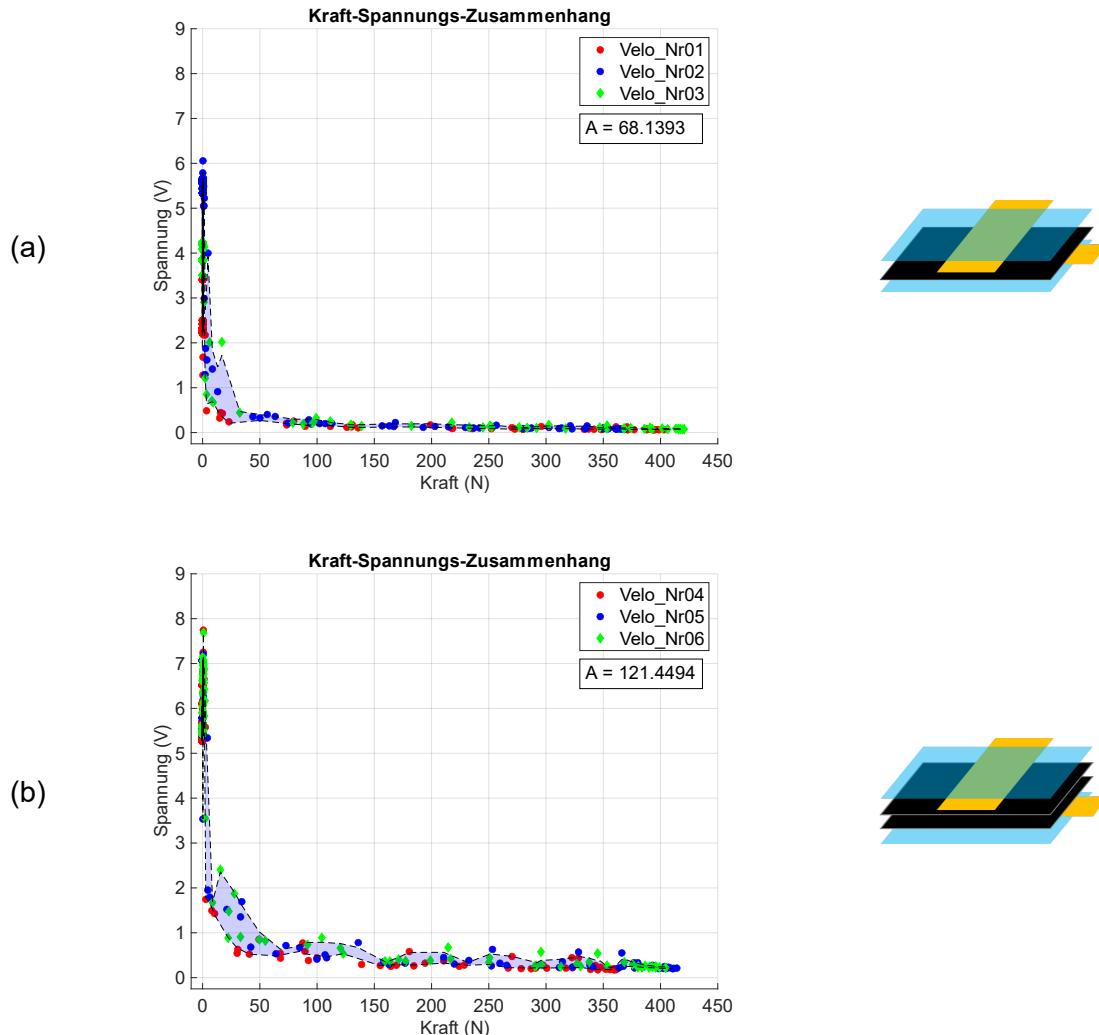
Abbildung 5.18: Stärke des Krafteintrags des Modalhammers über die Anzahl der Durchführungen (FlexiForce_01 - 02)

5.1.2 Kraft-Spannungs-Zusammenhang

In diesem Kapitel werden die Kraft-Spannungs-Zusammenhänge der getesteten Sensoren beschrieben. Jeder Graph enthält die Datenpunkte baugleicher Sensoren. Im

Fall der Velostat basierten Sensoren sind das drei Datensätze mit je zehn aufgenommenen Impulsen, bei den FlexiForce-Sensoren zwei Datensätze. Wie bereits in Kapitel 4.1.3 (S. 31 f.) erwähnt, wird ausschließlich die erste Hälfte des gesamten Impulsverlaufs, also bis zur maximalen Kraftamplitude, betrachtet.

5.1.2.1 Velostat basierte Sensoren



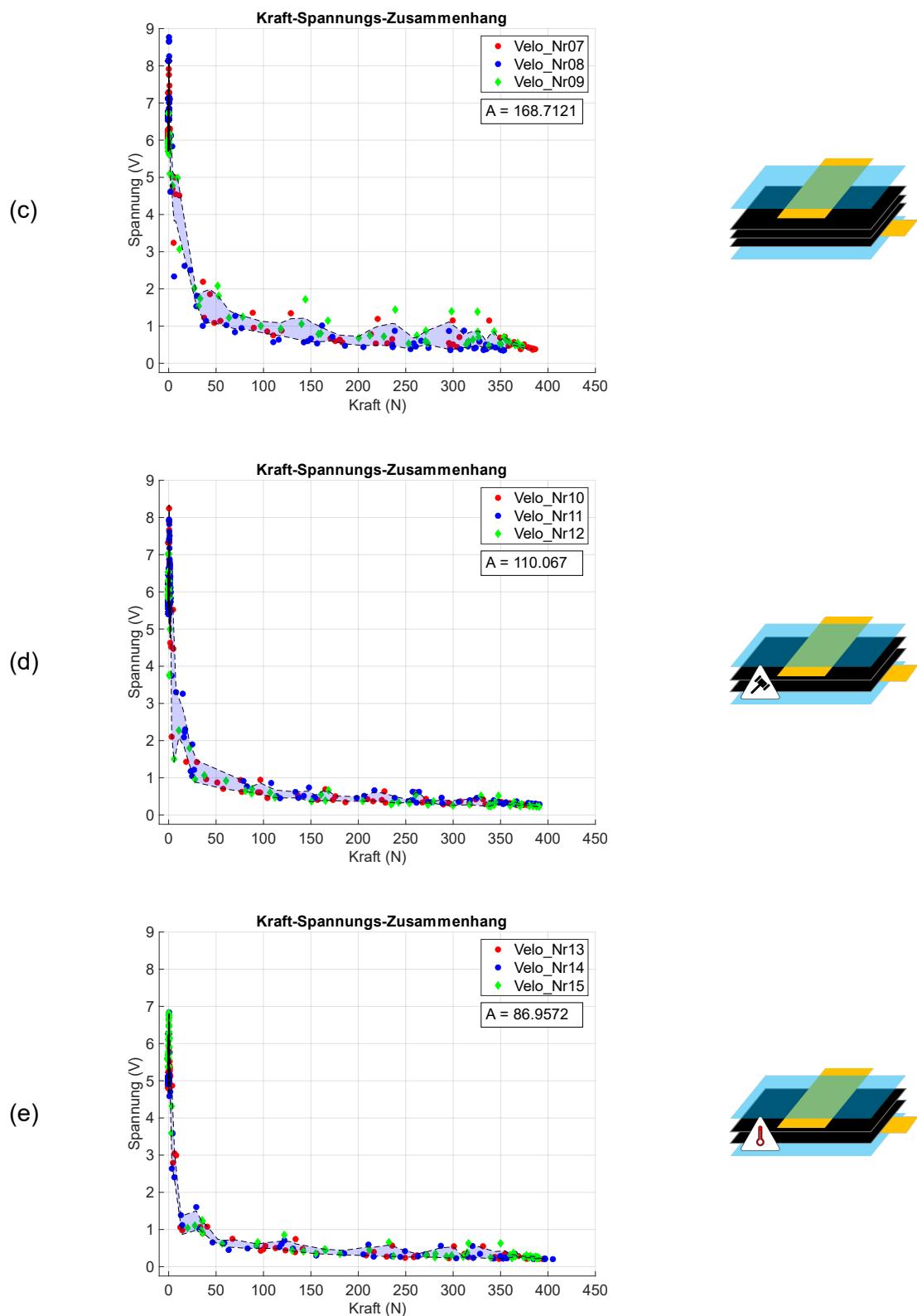


Abbildung 5.19: Kraft-Spannungs-Zusammenhang der Velostat basierten Sensoren.
 (a) Velo_Nr01-03; (b) Velo_Nr04-06; (c) Velo_Nr07-09; (d) Velo_Nr10-12; (e) Velo_Nr13-15

In Abbildung 5.19 werden die Kraft-Spannungs-Verläufe aller getesteten Velostat basierten Sensoren dargestellt. Für jeden Bautyp ist ein eigenes Diagramm vorgesehen. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Kraftamplitude die gemessene Spannung und damit der Gesamtwiderstand der Sensorelemente abnimmt. Dieses Verhalten ist zu erwarten und wurde bereits in Kapitel 2.1.3.1 (S. 14 f.) beschrieben. Insgesamt ist bei allen Sensoren ein stark nicht-lineares Verhalten zu erkennen. Das nicht-lineare Verhalten ähnelt dabei dem Verlauf einer e^{-x} -Funktion. Bei kleinen Kräften bis ca. 50 N fällt die Spannung stark ab. Das bedeutet, dass sich die anliegende Spannung schon bei kleinen Kraftänderungen stark ändert. Ab ca. 50 N sind die Spannungsänderungen auch bei großen Kraftänderungen lediglich im Millivolt-Bereich. Darüber hinaus wird der gesamte Spannungsbereich von sechs bis neun Volt (je nach Variante) bis zu einer Spannung von knapp über null Volt genutzt.

Die Kurven der verschiedenen Sensortypen unterscheiden sich in der Höhe der maximalen Spannung, der Steigung der Kurve und in dem Ausmaß der Streuung der Datenpunkte. Als Maß der Streuung wird der Flächeninhalt der einschließenden Kurve berechnet. So weist die dreilagige Bauart (Abbildung 5.19 (c)) die größte und die einlagige Bauart (Abbildung 5.19 (a)) die geringste Streuung auf. Für die zweilagigen Sensoren (Abbildung 5.19 (b,c,d)) reduziert sich die Streuung mit den Nachbehandlungen. Den größten Effekt zeigen dabei die zweilagigen Sensoren, mit Wärmenachbehandlung.

5.1.2.2 FlexiForce Sensoren

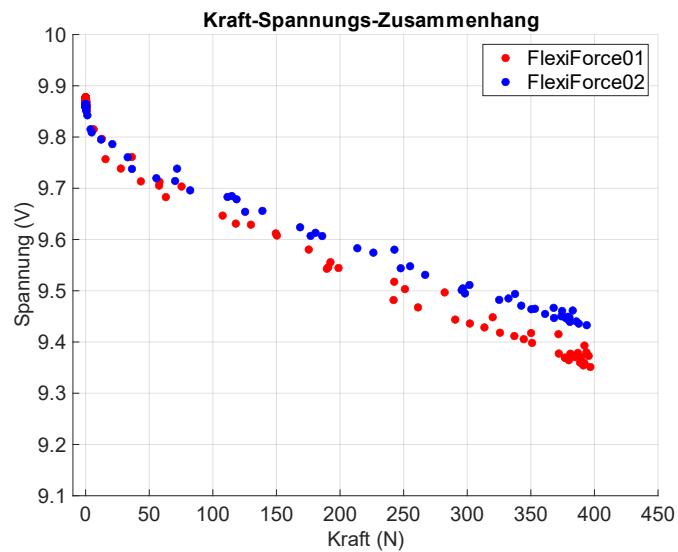


Abbildung 5.20: Kraft-Spannungs-Zusammenhang der FlexiForce-Sensoren

Im Gegensatz zu den Velostat-basierten Sensoren weisen die untersuchten FlexiForce Sensoren ein nahezu lineares Verhalten auf. Ausschließlich bei besonders niedrigen Kräften kommt es zu einem nicht-linearen Verhalten. Zur Auflösung von 400 N wird ein Spannungsbereich von ca. 0,6 V verwendet.

5.1.3 Kraft-Amplituden-Differenzierung

5.1.3.1 Velostat basierte Sensoren

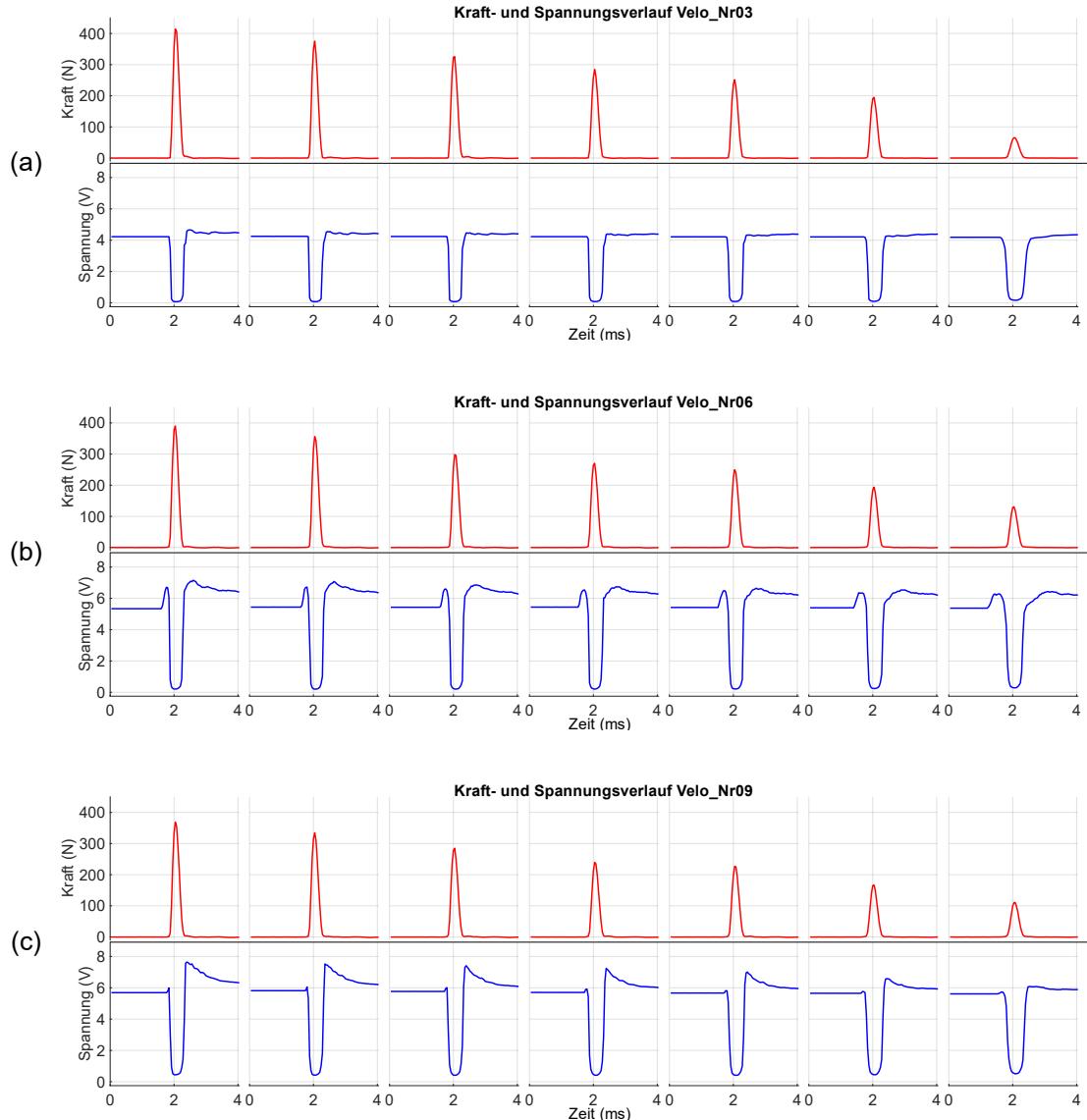


Abbildung 5.21: Kraft- und Spannungsverlauf verschiedener Stoßintensitäten;
Beispielhaft (a) Velo_Nr03, (b) Velo_Nr06, (c) Velo_Nr09

Zur weiteren Untersuchung der Eigenschaften der Velostat-basierten Sensoren werden, wie bereits in Kapitel 4.1.2.2 (S. 31) beschrieben, die Sensoren mit unterschiedlichen Kraftamplituden belastet. In Abbildung 5.21 (a-c) sind die Ergebnisse dieser Untersuchung exemplarisch an den Sensoren Velo_Nr03, 06 und 09 dargestellt. Da sich die Verläufe aller Sensoren stark ähneln, sind die Ergebnisse der weiteren Sensoren im Anhang (Abbildung 9.3) zu finden. In der oberen Hälfte des Graphens sind die

Kraftamplituden der einzelnen Stoße dargestellt. Hierbei wurde jeder Stoß in einem Zeitfenster von ± 2 ms ausgeschnitten und nebeneinander abgebildet. Darunter sind jeweils die dazugehörigen Spannungsverläufe im identischen Zeitfenster zu sehen.

Wie bereits in Kapitel 5.1.2.1 (S. 74 ff.) beschrieben, sind die Spannungsunterschiede bei höheren Kraftamplituden sehr gering. In der dargestellten Auflösung sind kaum Unterschiede in den Spannungsminima zu erkennen. Zur genaueren Betrachtung sind in Abbildung 5.22 die Maxima der Kraftamplituden und die Spannungsminima der einzelnen Impulse aufgetragen. Je Graph werden die Werte drei baugleicher Sensoren betrachtet und jeder Sensor-Bautyp wird in einem eigenen Graphen dargestellt. Die maximale Kraftamplituden werden in Rot und die minimalen Spannungswerte an den Sensoren werden in Blau dargestellt.

In allen Fällen ist eine leichte Tendenz zu erkennen, dass mit abnehmender Kraftamplitude die Werte der Spannungsminima zunehmen. Der Verlauf ist, ähnlich dem des Kraft-Spannungs-Zusammenhangs, nicht-linear. Die erkennbaren Unterschiede innerhalb eines Sensoryps sind auf die unterschiedlichen Kraftamplituden der realen Stoße (der erste Stoß im ersten Versuch war nicht zwingend gleich dem ersten Stoß des zweiten Versuches, usw.) zurückzuführen und nicht weiter aussagekräftig.

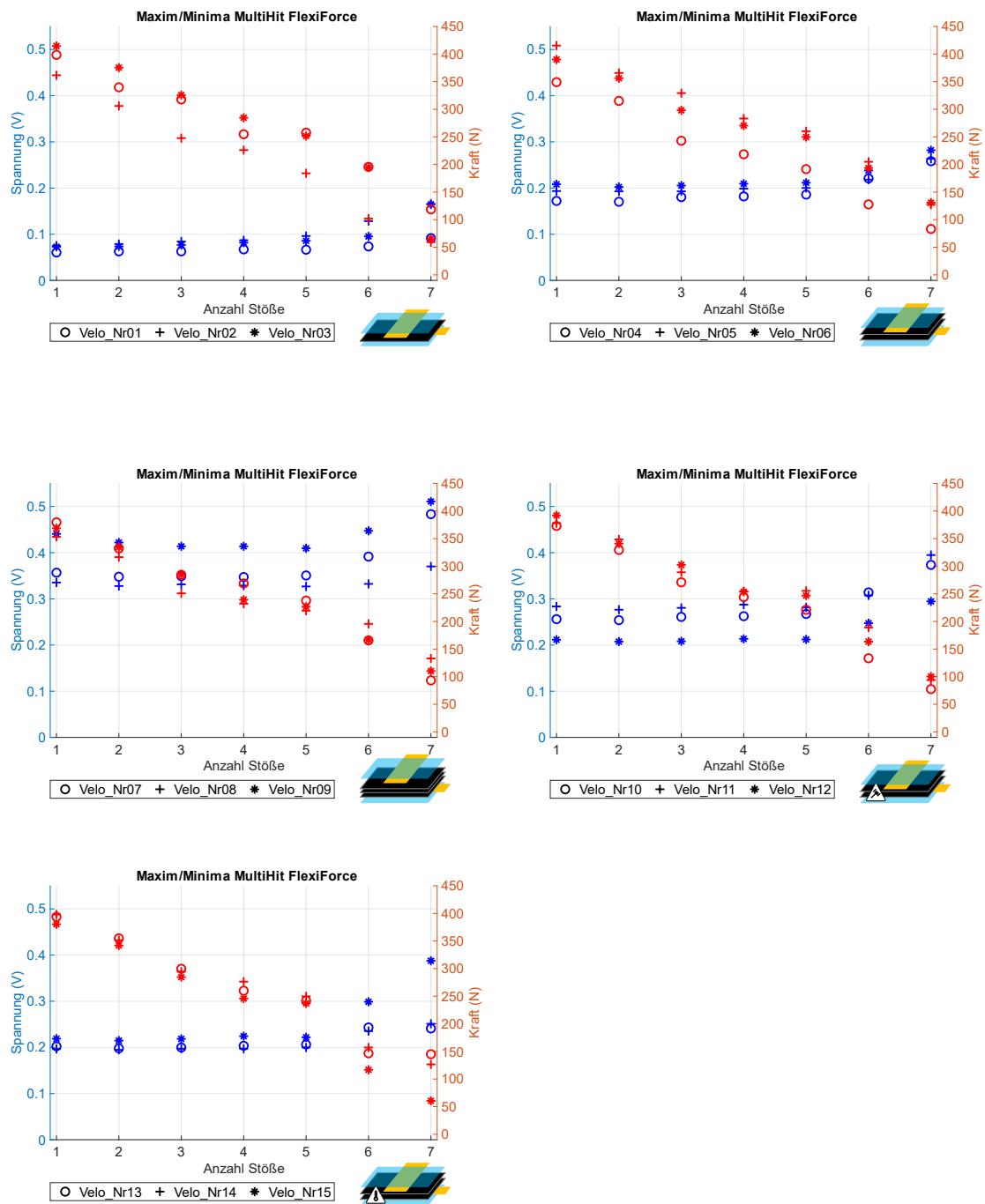


Abbildung 5.22: Maximale Kraft- und minimale Spannungswerte des Velostat basierten Kraftsensoren - Velo_Nr01 - 15. Je Bautyp ein Diagramm.

5.1.3.2 FlexiForce Sensoren

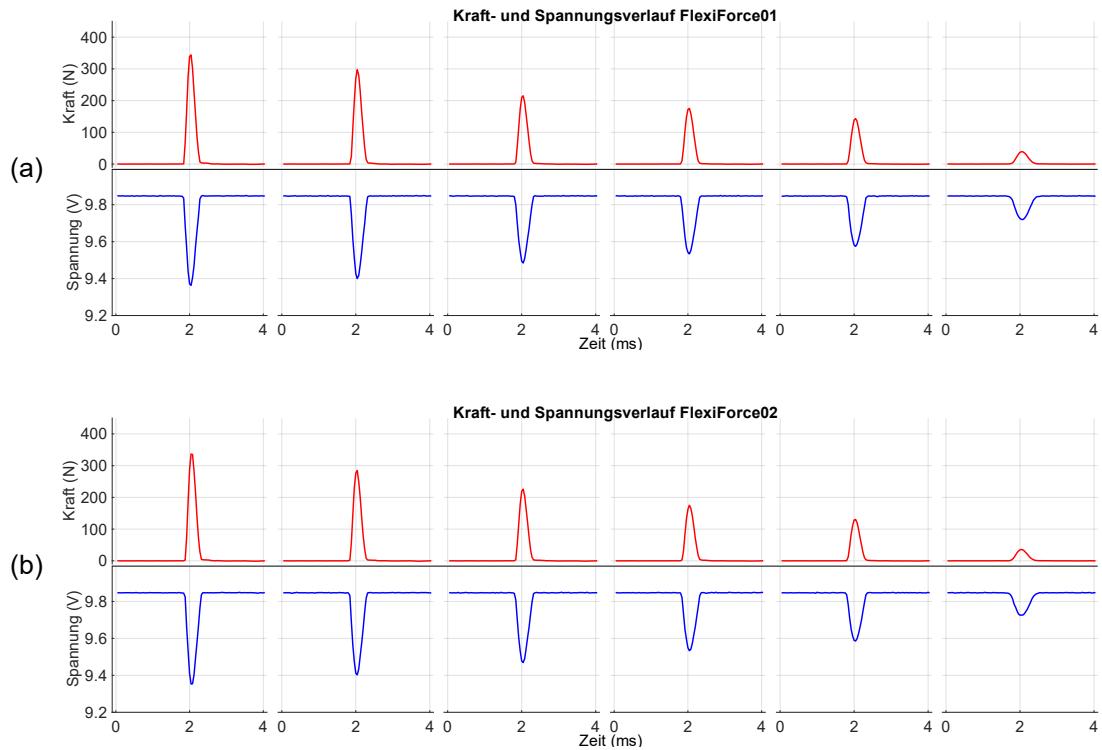


Abbildung 5.23: Kraft- und Spannungsverlauf verschiedener Stoßintensitäten - (a) FlexiForce_01, (b) FlexiForce_02

Bei den Versuchen mit mehreren unterschiedlich starken Impulsen zeigt sich bei den FlexiForce-Sensoren das bereits in 5.1.2.2 gezeigten lineare Verhalten (Abbildung 5.23). Es sei zu beachten, dass im Vergleich zu den Ergebnissen der Velostat-basierten Sensoren die Skala der gemessenen Spannung angepasst wurde. Eine genauere Betrachtung der Maxima und Minima der Kraft- und Spannungsamplituden in Abbildung 5.24 verdeutlicht das lineare Verhalten der Sensoren besonders gut. Mit abfallender Kraft erhöht sich die Spannung linear.

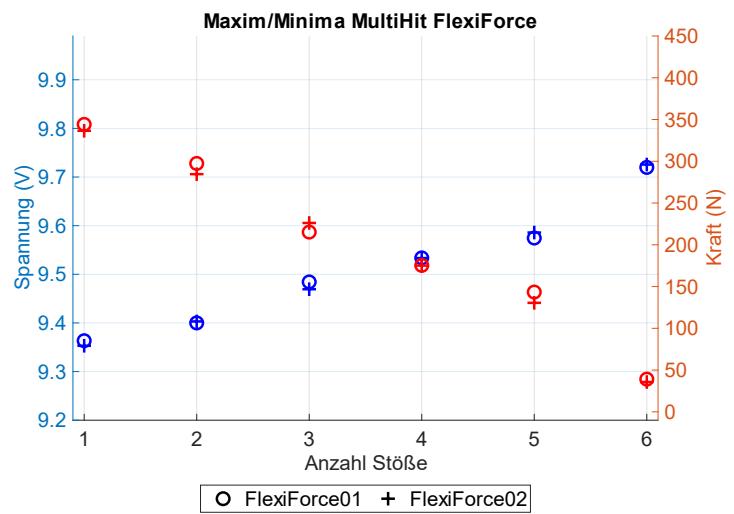


Abbildung 5.24: Maximale Kraft- und minimale Spannungswerte der FlexiForce Kraftsensoren - FlexiForce_01 - 02

5.2 Ergebnisse Prototypen

Dieses Kapitel befasst sich mit den Ergebnissen der in Kapitel 4.5 (S. 54 ff.) dargestellten Versuche. Die Ergebnisse aller Versuche für die beiden Prototypen, direkte (3D) und indirekte (2D) Applikation, werden getrennt in den einzelnen Unterkapiteln nacheinander beschrieben.

Für die Auswertung der verschiedenen Versuche werden Bilder und Videos aus der Sensordatenvisualisierung verwendet. Im Fall der Spannungswerte bedeutet ein gelbes Feld eine Spannung nahe null und ein blaues Feld eine höhere negative Spannung. Bei den Widerständen (nach „Type B“ berechnet) gilt, dass ein rotes Feld einen hohen Widerstandswert signalisiert und ein blaues einen niedrigeren. Somit bedeutet in beiden Fällen ein blaues Feld eine Aktivierung des entsprechenden Sensorelements.

5.2.1 Funktionsüberprüfung

Anhand der Testergebnisse wird die Funktionsweise der Sensormatrix demonstriert. Durch Streichen mit dem Finger über die Matrix können sowohl einzelne Sensorelemente als auch mehrere gleichzeitig aktiviert werden. Für den Test wurde ein Video der MATLAB-Visualisierung aufgenommen und ausgewertet.

5.2.1.1 Indirekte Applikation

Die Ergebnisse des Funktionstests der indirekten Applikation sind in der Bildsequenz in Abbildung 5.25 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass einzelne Sensorelemente aktiviert werden und die Spannung an diesen steigt (blau, Abbildung 5.25 (a,c)). Die gleichzeitige Aktivierung mehrerer Sensorelemente ist ebenfalls deutlich zu erkennen (Abbildung 5.25 (b,d)). Direkte Nachbarn der aktivierten Sensoren leuchten nicht auf, was darauf hinweist, dass kaum Übersprechen zwischen den Elementen vorhanden ist. Dennoch werden auch vereinzelte Sensorelemente weiter entfernt von der Berührungsstelle aktiviert, wie es zum Beispiel in Abbildung 5.25 (a, roter Kreis) oben in der Mitte zu erkennen ist, allerdings nur in geringem Maße. Es ist zu beobachten, dass dies vor allem in Richtung der Belastung geschieht (in diesem Beispiel wurde der Finger von vorne nach hinten über den Demonstrator gezogen) und sich wie eine Welle vor dem Finger herbewegt.

In Abbildung 5.25 (c) ist außerdem zu erkennen, dass bei Berührung des oberen Sensorelements auch das seitliche Sensorelement einen Spannungsanstieg registriert.

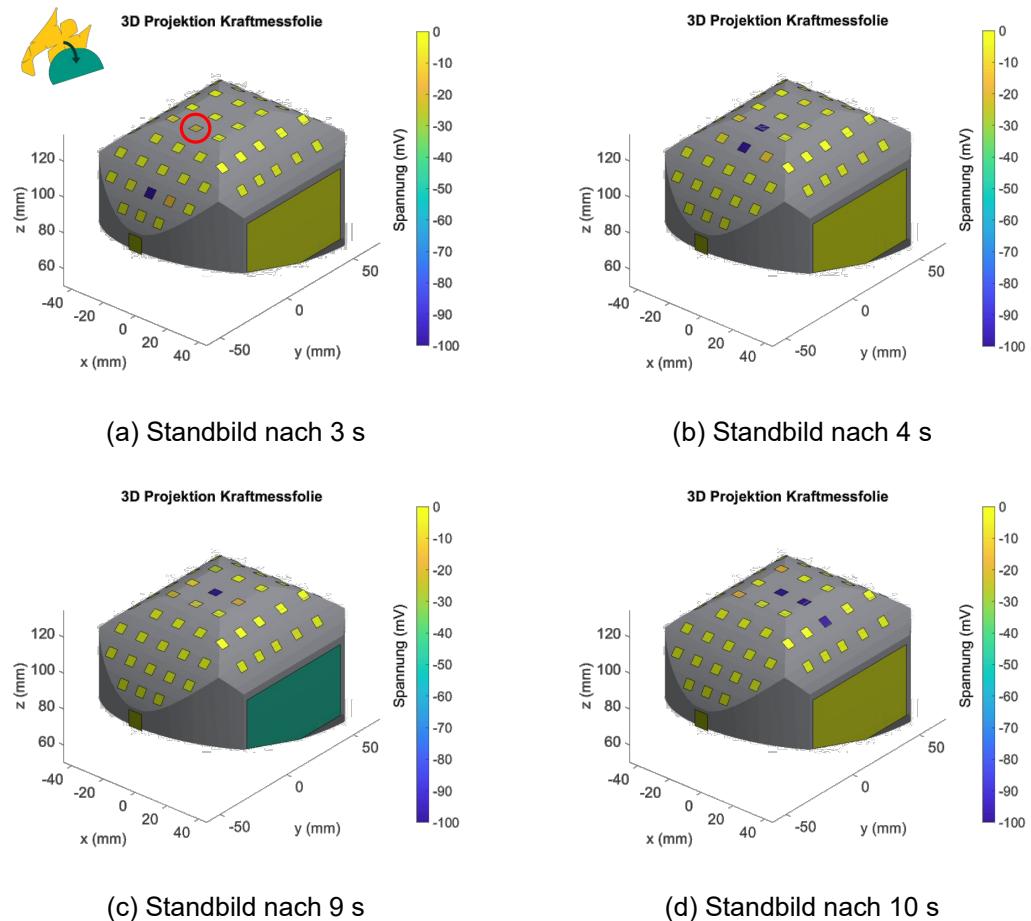


Abbildung 5.25: Einzelbilder aus dem Funktionstest des Prototyps mit indirekt applizierter (2D) Kraftmessfolie;
Roter Kreis: parasitäre Aktivierung eines Sensorelementes weiter entfernt vom Kontaktpunkt

Konkret ist zu beobachten, dass alle Sensoren ansprechbar und richtig zugeordnet sind. Generell ist ein klares Bild mit wenig Rauschen zu erkennen, wobei anzumerken ist, dass die Daten mittels Mittelwertentfernung aufbereitet wurden.

5.2.1.2 Direkte Applikation

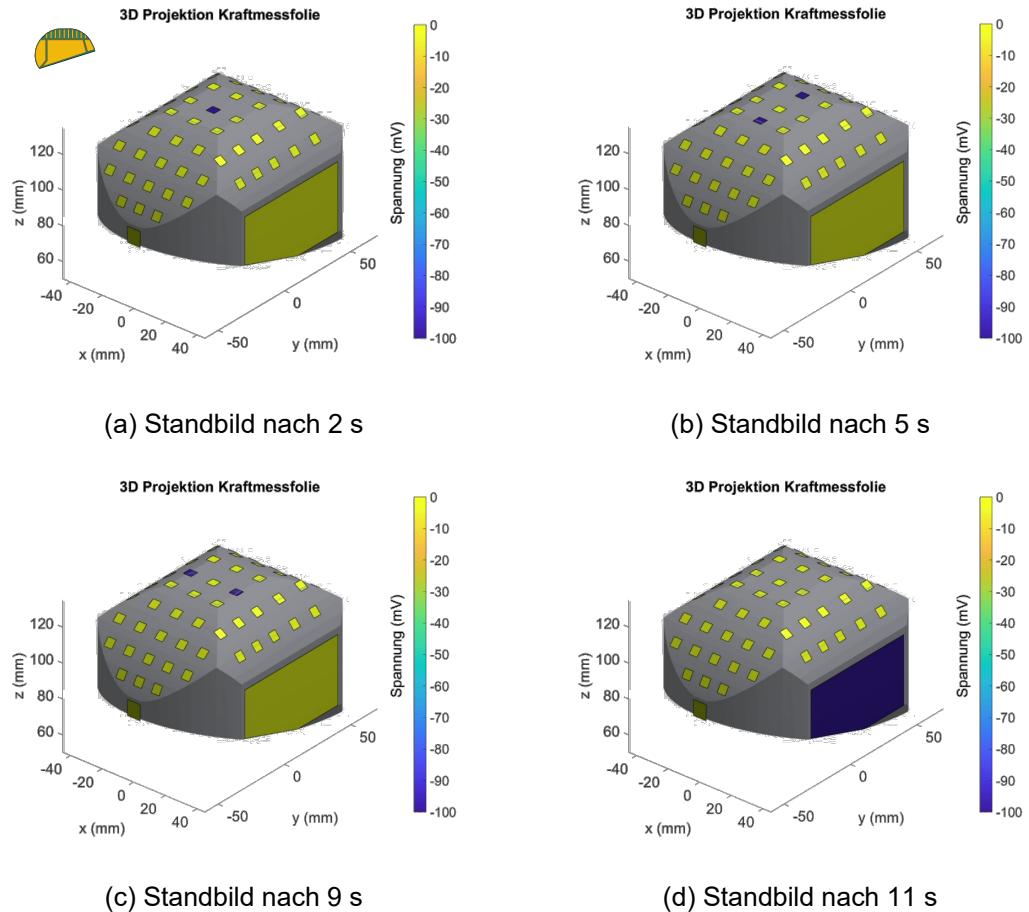


Abbildung 5.26: Einzelbilder aus dem Funktionstest des Prototyps mit direkt applizierter (3D) Kraftmessfolie

Bei der Auswertung der Funktionstests für die direkte Applikation ist erkennbar, dass einzelne belastete Pixel gut und eindeutig aktiviert werden. Die Bildsequenz des entsprechenden Ergebnisvideos ist in Abbildung 5.26 zu sehen. Es können mehrere Sensoren gleichzeitig angesprochen werden und es ist kein Übersprechen zu erkennen. Insgesamt gibt es sehr wenig Rauschen, wobei zu beachten ist, dass die Daten einer Mittelwertbereinigung unterzogen wurden.

Es kann festgehalten werden, dass die Sensormatrix voll funktionsfähig ist, alle Sensorelemente angesprochen werden können und auch richtig verkabelt und zugeordnet sind. Wie bei der indirekten Applikation ist auch hier der Spannungsanstieg im Vergleich zu einem Einzelsensor bei ähnlicher Belastung wesentlich geringer.

5.2.1.3 Applizierte vs. alleinstehende Sensoren

In den Versuchen zur Funktionsüberprüfung ist auffällig, dass die erreichten Spannungswerte bei Belastung deutlich niedriger ausfallen als bei den Velostat-Versuchen in Kapitel 5.1 (S. 60 ff.).

Um dieses Phänomen besser zu verstehen, wird das Verhalten bei langsamer Belastung an beiden Prototypen und an einem einzelnen Sensor analysiert (siehe Abbildung 5.27). Alle Auswertungen werden mit der identischen Ausleseelektronik und den gleichen Zeilen und Spalten durchgeführt. Es ist zu erkennen, dass das einzelne Sensorelement den gesamten Spannungsbereich bis -800 mV ausnutzt. Für dieses Element müsste die Elektronik anders ausgelegt werden, um die Sensorelemente vollständig zu erfassen. Die Spannungswerte der applizierten Sensorelemente liegen deutlich unter dem Maximum des einzelnen Sensorelements. Die direkte Applikation weist dabei die niedrigsten Spannungswerte auf.

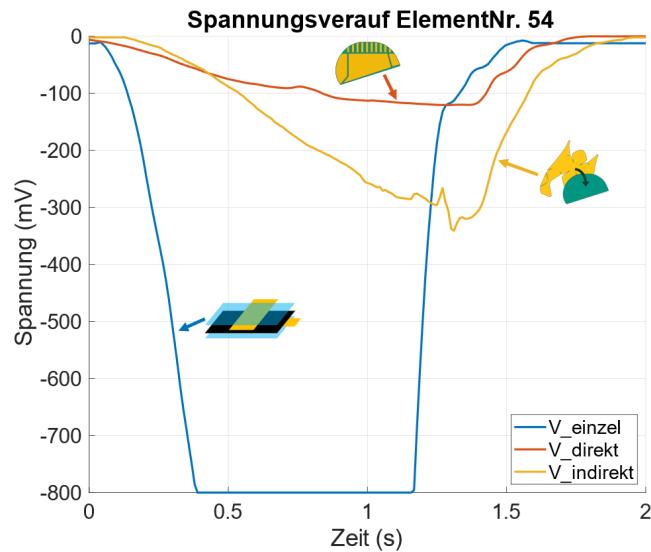


Abbildung 5.27: Vergleich Spannungsanstieg einzelner Sensorelemente der Prototypen mit dem eines einzelnen, alleinstehenden Sensorelement

5.2.1.4 Vergleich indirekte und direkte Applikation – Funktionsüberprüfung

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem visuellen Vergleich der beiden Prototypen ist in Tabelle 5.1 zu sehen.

Tabelle 5.1: Zusammenfassung Funktionstest

Kriterium	Indirekte Applikation (2D)	Direkte Applikation (3D)
Einzelne Sensoren gut zu erkennen?	Ja	Ja
Gleichzeitiges erkennen mehrerer Sensoren?	Ja	Ja
Übersprechen (Crosstalk)	Gering	Gering
Rauschen	Gering	Sehr gering
„Wellenbildung“	Ja	Nein

5.2.2 Formerkennung

Durch Auflegen eines Silikonringes und eines Gewichtes kann überprüft werden, ob die Sensormatrix und die Ausleseelektronik in der Lage sind, mehrere Sensorelemente gleichzeitig zu verarbeiten. Es ist zu beachten, dass es sich hierbei um einen statischen Versuch handelt und keine Aussage über das dynamische Verhalten bei Belastung mehrerer Sensorelemente gemacht werden kann.

5.2.2.1 Indirekte Applikation

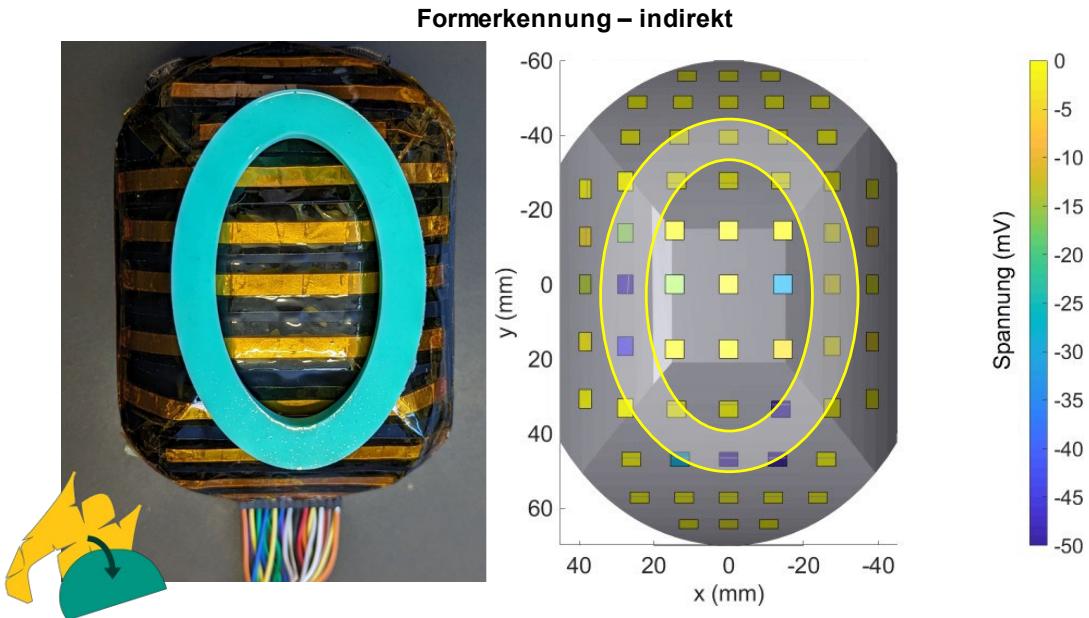


Abbildung 5.28: Spannungswerte mit Mittelwertkorrektur aus dem Formerkennungstest – indirekte Applikation

In Abbildung 5.28 ist das Ergebnis des Formerkennungstestes für die indirekte Applikation zu erkennen. Es wird die gemessene Spannung ausgegeben. Auf die Ausgabevisualisierung (rechts) werden die Konturen des Silikonrings projiziert. Leuchtet ein Sensorelement blau auf, so wird es belastet und die negative Spannung steigt an.

Es ist zu erkennen, dass bei der ringförmigen Belastung nicht alle darunter liegenden Sensorelemente aktiviert werden. Ein Spannungsanstieg ist vor allem im unteren Bereich des Rings zu erkennen. Einzelne Sensorelemente, welche nicht direkt unter dem Silikonring liegen, zeigen ebenfalls einen Spannungsanstieg, der jedoch deutlich schwächer ausfällt.

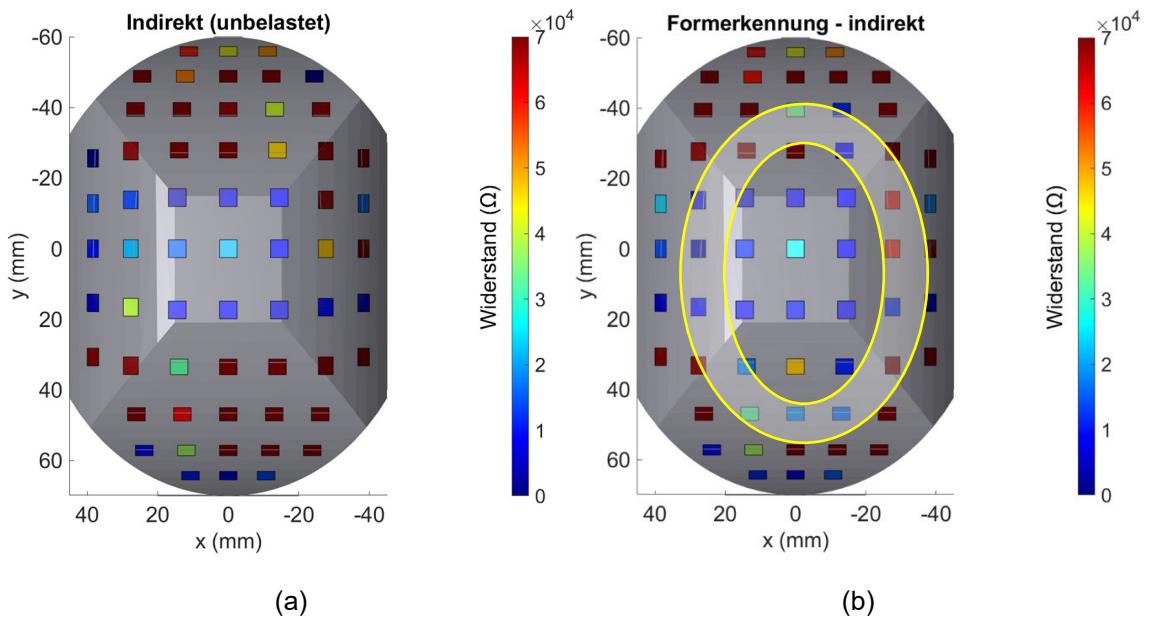


Abbildung 5.29: Widerstandswerte aus dem Formerkennungstest – indirekte Applikation
 (a) unbelastet, (b) belastet

Ein anderes Bild zeichnet sich bei der Auswertung der Widerstandswerte ab. Bei der indirekten Applikation werden im unbelasteten Zustand unterschiedlichste Widerstandswerte über die Sensormatrix ausgegeben. Dies führt zu einem sehr unruhigen und verrauschten Bild (Abbildung 5.29 (a)). Somit ist ein Belastungsmuster in Abbildung 5.28 (b) schwer zu erkennen. Im direkten Vergleich mit dem unbelasteten Zustand lässt sich bei einigen Sensorelementen, welche unter dem Silikonring liegen, ein Widerstandsabfall erkennen.

5.2.2.2 Direkte Applikation

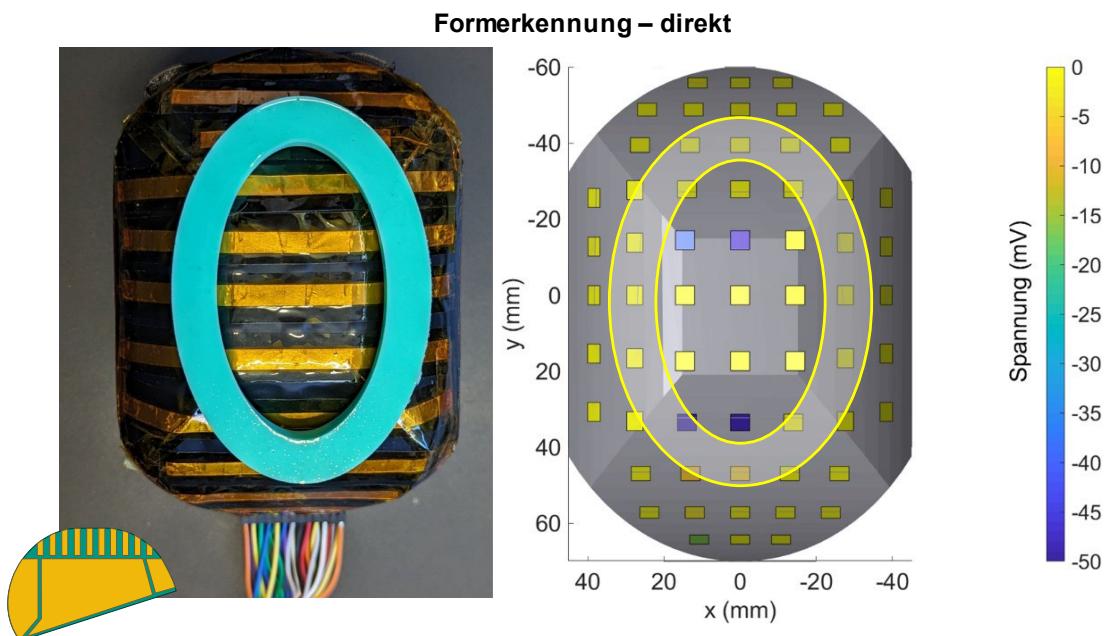


Abbildung 5.30: Spannungswerte mit Mittelwertkorrektur aus dem Formerkennungstest – direkte Applikation

Im Fall der direkten Applikation (Abbildung 5.30) sind nur wenige Sensorelemente unter dem Silikonring aktiv (nehmen eine Belastung wahr). Weitere aktive Sensorelemente scheinen nicht unter dem Silikonring zu liegen. Insgesamt kommt es durch die Ringbelastung bei vier Sensorelementen zu einer Spannungserhöhung.

Bei der Auswertung der Widerstandswerte ergibt sich ein ähnliches Bild (Abbildung 5.31). Nur wenige Sensorelemente in unmittelbarer Nähe des Silikonringes weisen einen Widerstandsabfall auf. Im Vergleich zu den Spannungswerten hat die Anzahl der aktiven Sensorelemente jedoch zugenommen. Zudem erscheint die gesamte Sensormatrix homogener, das heißt die Widerstandswerte der unbelasteten Sensoren liegen deutlich näher beieinander als bei dem anderen Prototypen (indirekte Applikation).

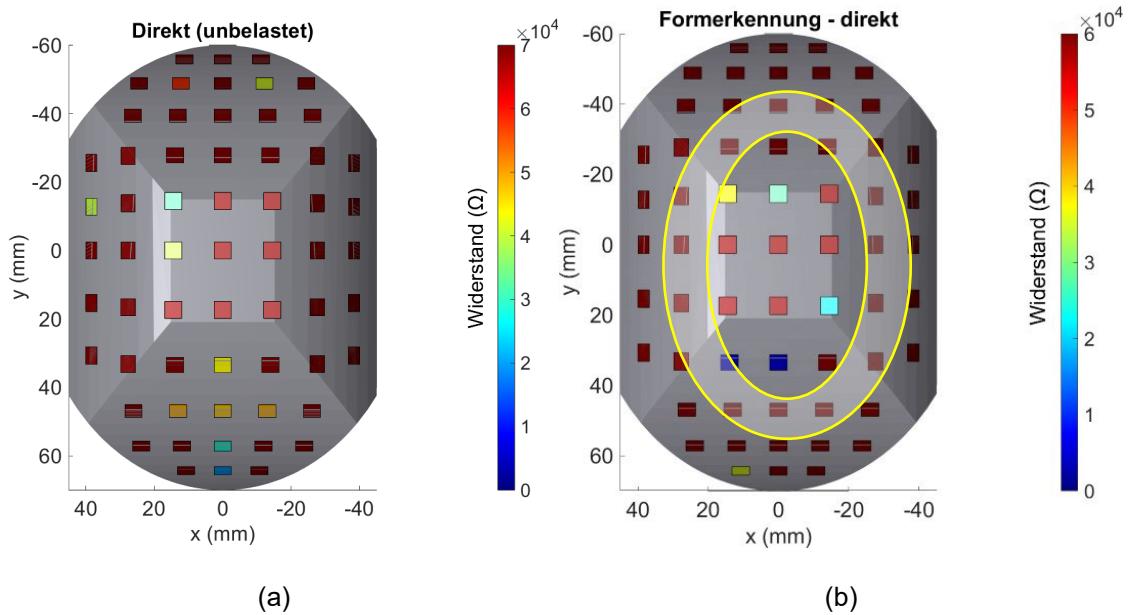


Abbildung 5.31: Widerstandswerte aus dem Formerkennungstest – direkte Applikation
 (a) unbelastet, (b) belastet

5.2.3 Impulsauflösung

Zur Analyse der Güte der Impulsauflösung werden Bild und Videodateien verwendet, um zu sehen, ob ein Impuls aufgenommen werden kann. Verglichen wird zum einen die Aufnahme der Spannungswerte und die berechneten Widerstandswerte. Zum anderen wird der zeitliche Verlauf der Spannungs- und Widerstandswerte des belasteten Sensorelements betrachtet.

5.2.3.1 Indirekte Applikation

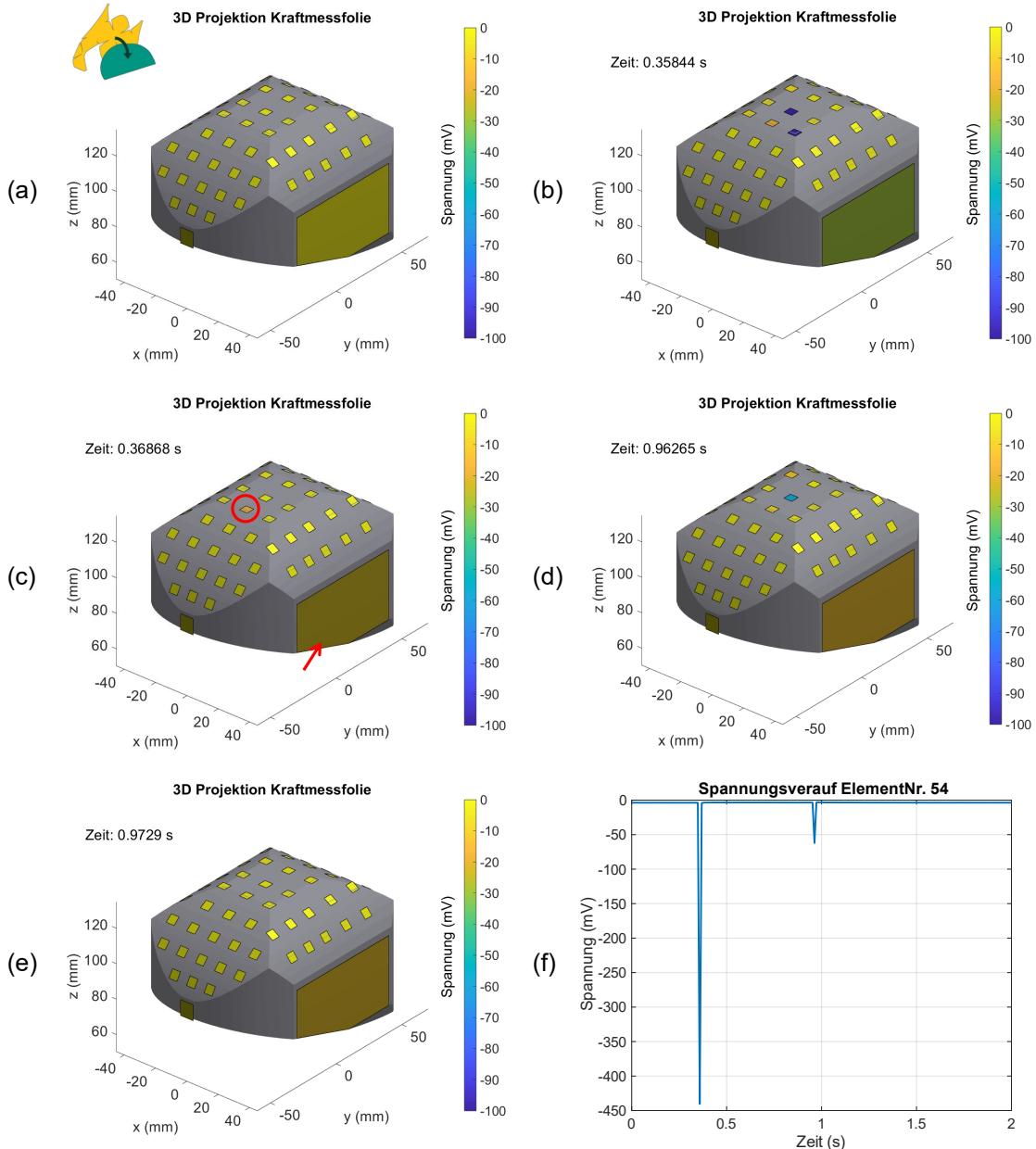


Abbildung 5.32: Bildsequenz Impulsversuch indirekte Applikation und Spannungsverlauf mit Mittelwertkorrektur des getroffenen Sensorelements.

(a) Grundzustand ($t = 0$), (b) erster Stoß, (c) Zeitschritt nach dem ersten Stoß, (d) zweiter Stoß, (e) Zeitschritt nach dem zweiten Stoß, (f) Spannungsverlauf des belasteten Sensorelements; Roter Kreis und Pfeil: Sensorelemente, welche erst nach einiger Zeit den Spannungsanstieg abbauen.

Die aufgenommene Bildsequenz aus dem ersten Impulsversuch für die indirekte Applikation ist in Abbildung 5.32 zu sehen. Oben links (Abbildung 5.32 (a)) wird der Grundzustand dargestellt. Auf der rechten Seite sind jeweils die Visualisierungen der

Spannungsdaten im Moment des Impulses zu sehen. Links der Zustand direkt nach dem Stoß. Zusätzlich wird unten rechts der Spannungsverlauf des belasteten Sensorelements dargestellt (Abbildung 5.31 (f)).

Der Prototyp wurde mit zwei unterschiedlich starken Impulsstöße belastet. Im Spannungsverlauf ist deutlich zu erkennen, dass die beiden Stöße einerseits zeitlich erfasst werden und sich andererseits in der Amplitude unterscheiden. Dies ist ebenfalls in den Bilddaten erkennbar. Zum Zeitpunkt des Stoßes leuchtet das belastete Sensorelement deutlich auf und nimmt einen Spannungsanstieg wahr.

Es ist zudem zu erkennen, dass neben dem Sensorelement in der Mitte auch andere Sensorelemente aktiviert werden. Zum einen direkte Nachbarn des mittleren Sensorelements, und zum anderen auch das große Element an der Seite (Abbildung 5.31 (b)). Das aktivierte Seitenelement (roter Pfeil) scheint den Spannungsanstieg auch erst nach einer längeren Zeit wieder vollständig abzubauen. Dies ist ebenso der Fall bei einem weiteren Element (rot eingekreist) welches direkt nach dem Stoß eine Spannung misst.

Zur Betrachtung der berechneten Widerstandswerte dient Abbildung 5.33. Sie zeigt sowohl den Spannungsverlauf des getroffenen Sensorelements als auch die berechneten Widerstandswerte desselben Elements. Der Prototyp wurde bei diesem Impulsversuch dreimal von einem Ball mit unterschiedlicher Kraft getroffen.

Bei näherer Betrachtung des Spannungsverlaufs (Abbildung 5.33 (unten)) sind alle drei Stöße in ihrer unterschiedlichen Stärke zu erkennen. Die berechneten Widerstandswerte (Abbildung 5.33 (oben)) lassen ebenso einen klaren Widerstandsabfall zum Zeitpunkt der Impulsstöße erkennen und liegen in diesem Punkt nahe beieinander. Ansonsten gibt es deutliche Unterschiede bei den mittleren Widerstandswerten außerhalb des belasteten Bereichs. Die „einfache Berechnung“ resultiert in den niedrigsten Spannungswerten, gefolgt von „Type B“ und „Type A“ weist die höchsten Widerstandswerte auf.

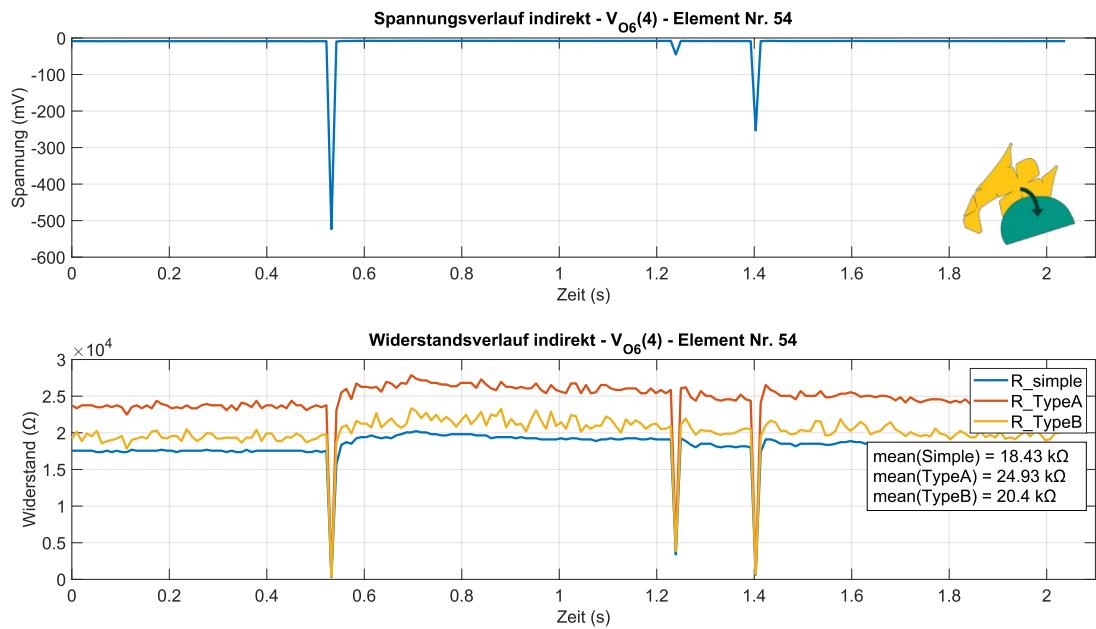


Abbildung 5.33: Spannungs- und Widerstandsverlauf des getroffenen Sensorelement – indirekte Applikation

5.2.3.2 Direkte Applikation

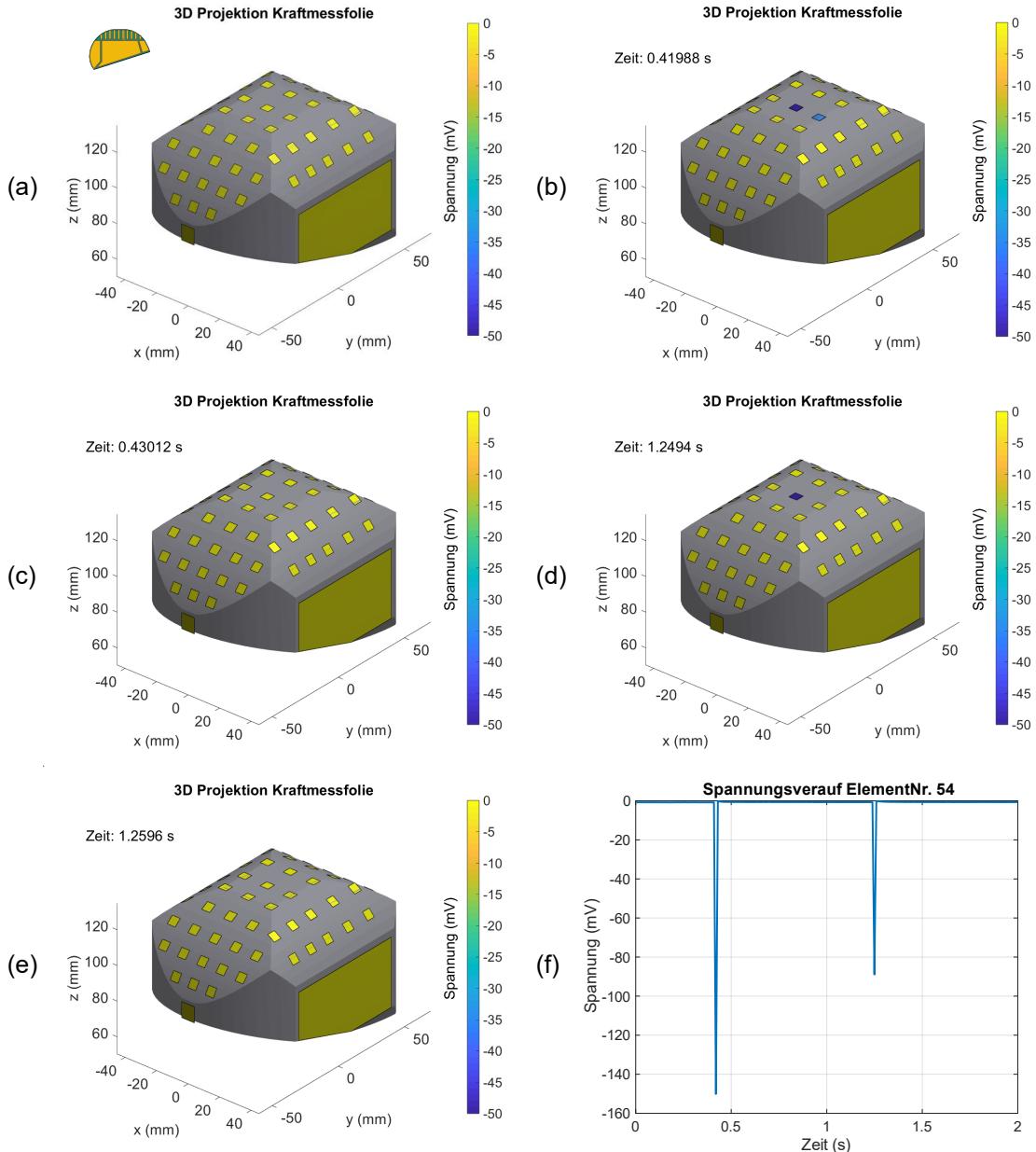


Abbildung 5.34: Bildsequenz Impulsversuch direkte Applikation und Spannungsverlauf mit Mittelwertkorrektur des getroffenen Sensorelementes.

(a) Grundzustand ($t = 0$), (b) erster Stoß, (c) Zeitschritt nach dem ersten Stoß, (d) zweiter Stoß, (e) Zeitschritt nach dem zweiten Stoß, (f) Spannungsverlauf des belasteten Sensorelementes

Abbildung 5.34 zeigt die Bildsequenz des Impulsversuches der direkten Applikation. In der linken oberen Ecke ist der Ausgangszustand abgebildet. Auf der rechten Seite sind die Spannungsdaten zum Zeitpunkt des Impulses dargestellt. Auf der linken Seite ist der

Zustand unmittelbar nach dem Stoß zu sehen. Darunter ist der Spannungsverlauf im belasteten Sensorelement abgebildet.

Der Prototyp wurde mit zwei verschiedenen Impulsstärken belastet. Im Spannungsdiagramm (Abbildung 5.34 (f)) ist deutlich zu erkennen, dass beide Impulse zeitlich erfasst wurden und in ihrer Amplitude unterscheidbar sind. Dies spiegelt sich auch in den Bildern wider. Während des Stoßes leuchtet das belastete Sensorelement auf und verzeichnet einen Spannungsanstieg (Abbildung 5.34 (b,c)). Lediglich bei einem weiteren Sensorelement, das sich in unmittelbarer Nähe des betroffenen Elements befindet, kommt es beim ersten Stoß zu einem Spannungsanstieg. Alle anderen Sensorelemente werden durch den Versuch nicht aktiviert.

Eine genauere Analyse des Spannungsverlaufs (siehe Abbildung 5.35) zeigt, dass beide Impulsstöße zeitlich und in ihrer jeweiligen Stärke gut unterscheidbar sind. Die aus den Messungen ermittelten Widerstandswerte zeigen ebenfalls einen deutlichen Widerstandsabfall zum Zeitpunkt der Impulsstöße. Die Widerstandswerte zu diesem Zeitpunkt liegen bei allen drei Berechnungsarten nahe beieinander. Nach dem Impuls ist in allen Fällen auch ein starker, kurzzeitiger Widerstandsanstieg zu erkennen. Hinsichtlich der mittleren Widerstandswerte zeigen sich eindeutige Unterschiede. Die "einfache Berechnung" ergibt die niedrigsten Spannungswerte, gefolgt von "Typ B", während "Typ A" die mit Abstand höchsten Widerstandswerte aufweist.

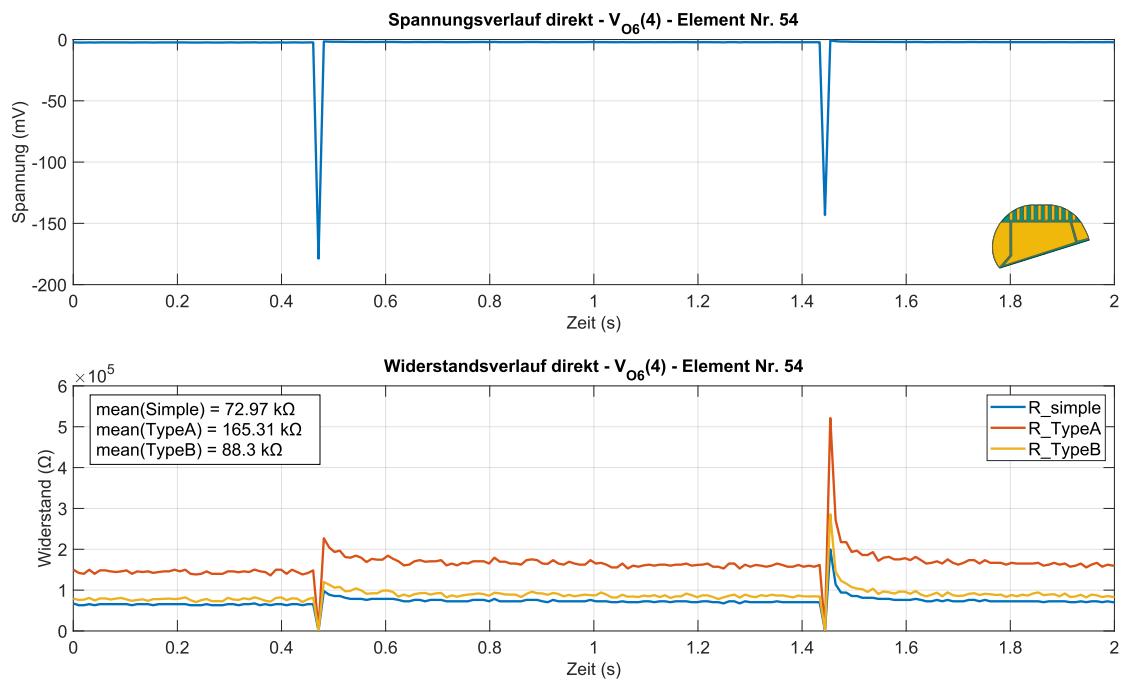


Abbildung 5.35: Spannungs- und Widerstandsverlauf des getroffenen Sensorelement – direkte Applikation

6 Diskussion

Ziel dieses Kapitels ist es, die zuvor dargestellten Ergebnisse zu interpretieren und zu vergleichen, Schlussfolgerungen zu ziehen und unbekannte Effekte festzuhalten. Dazu werden im ersten Unterkapitel die Ergebnisse der Eigenschaftsuntersuchungen von Velostat und im zweiten die Ergebnisse der beiden gefertigten Prototypen diskutiert.

6.1 Eigenschaften Velostat

Allgemeines Verhalten:

Bei der Untersuchung der Velostat-Eigenschaften konnte im ersten Schritt das elektrische Verhalten des Materials bestätigt werden. In Kapitel 5.1.2.1 (S. 74 ff.) ist der eindeutige Zusammenhang zwischen Kraft und Spannung (und damit auch Widerstand) bei allen Velostat-Sensorvarianten zu erkennen. Mit zunehmender Kraft nimmt die Spannung und damit der Widerstand ab. Bei besonders hohen Kräften geht der Widerstand des Materials gegen null, es kommt zum Kurzschluss und somit muss bei der verwendeten Schaltung die gemessene Spannung (bei höheren Kräften) gegen null gehen.

Erkenntnis: Die selbstgebauten Sensorelemente verhalten sich wie erwartet. Es kann davon ausgegangen werden, dass Testequipment, -skript und -routine ordnungsgemäß funktionieren.

Nicht-Linearität:

In den Versuchsergebnissen ist das nichtlineare Verhalten, welches bereits in vielen Veröffentlichungen (zum Beispiel [8, 24, 48, 51]) gezeigt wurde, gut zu erkennen. Dieses charakteristische Verhalten kann bei allen Sensorvarianten beobachtet werden und ähnelt dem Verlauf einer negativen Exponentialfunktion. Dies deckt sich mit den Ergebnissen einiger Veröffentlichungen (zum Beispiel Kalantari et al. [24] und Vehec et al. [52]), die Velostat mathematisch modellieren.

Die Ausprägung dieses nichtlinearen Verhaltens scheint von einer Vielzahl von Faktoren abzuhängen, von denen einige unbekannt sind. Unter diesen Faktoren scheinen insbesondere die Anzahl der Velostat-Schichten und die Art der Nachbehandlung einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis zu haben. Gemäß den Experimenten dieser

Arbeit zeigen diese Nachbereitungen eine Verbesserung der Reproduzierbarkeit. Es ist davon auszugehen, dass, wie bereits in Kapitel 2.1.3.1 (S. 14 f.) diskutiert, weitere Faktoren wie die Größe der Velostat-Sensoren, deren Krümmung und das verwendete Trägermaterial ebenfalls eine Rolle spielen. Besonders deutlich werden diese Abhängigkeiten der Velostat-Folie von der Montageart beim direkten Vergleich der einzelnen Sensorelemente mit den montierten Sensorfolien (siehe Abbildung 5.27, S. 86). Zudem steigt der Gesamtwiderstand der Velostat-Folie mit der Anzahl der Velostat-Schichten.

Erkenntnis: Viele Faktoren, wie zum Beispiel die Art der Nachbehandlung, die Montage oder die Anzahl der Velostat-Schichten, beeinflussen das Verhalten von Velostat. Um ein gleichmäßiges Verhalten zu erreichen, muss alles daran gesetzt werden, diese Einflussfaktoren konstant zu halten.

Impulsverhalten:

Aus Kapitel 5.1.1 (S. 60 ff.) geht hervor, dass Velostat in der Lage ist, impulsartige Stöße zeitlich aufzulösen. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen von Del Prete et al. [8] und Duminić et al. [50].

Erkenntnis: Für die zeitliche Auflösung mechanischer Impulse ist Velostat als Basismaterial für Kraftsensoren gut geeignet.

Kraft-Amplituden-Differenzierung:

Aus dem angesprochenen nichtlinearen Verhalten und den Ergebnissen aus Kapitel 5.1.3 (S. 78 ff.) lässt sich ableiten, dass sich die genaue Messung der Kraftamplitude als schwierig erweist. So liegen die Spannungswerte bei einer Kraft von beispielsweise 100 N und 400 N im Streubereich der Sensorelemente. Daher kann keine eindeutige Aussage über die Impulsamplitude getroffen werden. Hier sind weitere Untersuchungen erforderlich. Vielversprechend könnten zum Beispiel Auswertungen der Ableitung sein wie dies B. Galindo Blancin zeigt [15]⁷.

⁷ Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Erkenntnis: Die Differenzierung der Kraftamplitude ist bei Velostat-Kraftsensoren im hohen Kraftbereich schwierig. Neue Methoden müssen gefunden werden, um dies zu verbessern.

Sensorfixierung:

Ein auffälliges Phänomen, das bei der Analyse der Impulskurven (Kapitel 5.1.1, S. 60 ff.) zu beobachten ist, ist der Spannungsanstieg, der dem Spannungsabfall vorausgeht. Dies deutet darauf hin, dass das Sensorelement durch den Stoß kurzzeitig bewegt wird und sich dadurch seine elektrischen Eigenschaften ändern. Dieser Effekt wurde auch in einer früheren Studie von Dumnić et al. beschrieben [50], die eine ähnliche experimentelle Methode verwendeten.

Erkenntnis: Für eine genaue Messung ist eine gute Befestigung des Sensors erforderlich.

Spannungsüberhöhung nach Impulsstoß:

Nach den Impulsen ist zudem eine Überhöhung der Spannungswerte und ein anschließendes Einschwingen zu erkennen. Im Mittel sind die Spannungswerte nach dem Stoß höher als vor dem Stoß. Dieses Verhalten konnte auch von Duminić et al. [50] beobachtet werden. Die Autoren schlussfolgern, dass die Sensoren in Abhängigkeit von der einwirkenden Kraft unterschiedlich viel Zeit benötigen, um in den Ausgangszustand zurückzukehren.

Erkenntnis: Der von der Kraftamplitude abhängige Spannungsanstieg nach einem Impuls kann zu ungenauen Messungen führen, wenn der folgende Kraftimpulse in die Einschwingphase nach dem Vorgängerimpuls fällt.

Wiederholbarkeit unbelasteter Zustand:

Aus den Ergebnissen der Kapitel 5.1.1 (S. 60 ff.) und 5.1.2.1 (S. 74 ff.) können Rückschlüsse auf die Wiederholbarkeit der Messungen gezogen werden. Werden die verschiedenen Sensortypen miteinander verglichen, so zeigt sich, dass die Wiederholbarkeit, gemessen an den Spannungswerten vor und nach dem Impulsstoß, bei den zweilagigen Elementen am besten ist. Hier ist die Standardabweichung am

niedrigsten. Bei einlagigen Sensoren ist die Wiederholbarkeit am geringsten (Standardabweichung am höchsten).

Erkenntnis: Unterschiede in der Materialoberfläche können durch mehrere Schichten ausgeglichen werden. Die Unterschiede sind auch innerhalb der identischen Ausgangs-Folie (aus welcher die Sensorelemente ausgeschnitten wurden) groß und beeinflussen das elektrische Verhalten der Sensorelemente erheblich. Durch die Verwendung mehrerer Schichten Velostat können diese Unterschiede teilweise ausgeglichen werden.

Wiederholbarkeit belasteter Zustand:

Die vorherigen Erkenntnisse zur Wiederholbarkeit im unbelasteten Zustand stehen im scheinbaren Widerspruch zu den Erkenntnissen aus den berechneten Flächeninhalten der Hüllkurve für den Kraft-Spannungsverlauf. Hier weisen die einlagigen Sensorelemente den geringsten Flächeninhalt und damit die geringste Streuung auf. Bei der Untersuchung der Spannungswerte vor und nach dem Stoß wurde nur der unbelastete Zustand betrachtet. Dieser Teil der Kraft-Spannungs-Kurve ist bei 0 N einzuordnen und macht nur einen unwesentlichen Teil der Fläche der Hüllkurve aus. Daraus lässt sich schließen, dass die Betrachtung des Flächeninhalts der Hüllkurve des Kraft-Spannungsverlaufs mehr Aufschluss über die Streuung im belasteten Bereich gibt.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Streuung im belasteten Bereich bei den einlagigen Sensorelementen am geringsten ist. Sensorelemente dieser Kategorie folgen der theoretischen Sensorkennlinie am besten.

Sensorelemente mit mehreren Velostat-Schichten weisen im belasteten Bereich eine größere Streuung auf. Ein möglicher Grund dafür ist, dass bei der Montage Luft zwischen den Schichten eingeschlossen wird. Diese wird erst im belasteten Zustand unkontrolliert verdrängt und führt zu einem inkonsistenteren Verhalten der Sensorelemente.

Darüber hinaus sind positive Effekte der Nachbehandlung, insbesondere bei Erwärmung, zu erkennen. Dies deutet darauf hin, dass durch eine Erwärmung der Sensorelemente die Oberflächentopologie verändert und homogenisiert wird.

Erkenntnis: Die Streuung im belasteten Zustand nimmt mit der Anzahl der Velostat-Schichten zu. Dies steht im Konflikt mit der geringeren Streuung der Spannungswerte im unbelasteten Zustand bei mehr Schichten Velostat. Es muss ein geeigneter

Kompromiss gefunden werden. Eine Nachbehandlung der mehrschichtigen Sensorelemente kann das Verhalten und die Wiederholbarkeit positiv beeinflussen.

Tabelle 6.1: Zusammenfassung Streuwerte der Eigenschaftsuntersuchung von Velostat

Variante	Velostat Nr.	σ vor dem Impulstoß	σ nach dem Impulstoß	Flächeninhalt der Einhüllenden aus Kraft-Spannungs-Zusammenhang
1	01-03	1,32 V	1,29 V	68,14 NV
2	04-06	0,2387 V	0,1482 V	121,45 NV
3	07-09	0,3461 V	0,3255 V	168,71 NV
4	10-12	0,3352 V	0,2668 V	110,01 NV
5	13-15	0,3075 V	0,2741 V	86,96 NV
FlexiForce_01-02		0,0033 V	0,0032 V	-*

* nicht berechnet, da hier ein anderer Spannungsbereich betrachtet wird und die Daten somit nicht vergleichbar sind.

Setzungsverhalten:

Darüber hinaus ist auch das in Dzedzickis et al. [10] angesprochene Setzungsverhalten zu erkennen. Auf dieses Verhalten wird insbesondere in Kapitel 5.1.1 (S. 60 ff.) eingegangen. Es dauert einige Belastungszyklen, bis die Oberfläche von Velostat gleichmäßig ist und sich das Material konstant verhält (Abbildung 6.1). Dies erklärt auch, warum sich das Setzungsverhalten in Abhängigkeit von der Anzahl der Velostat-Schichten und der Nachbehandlung ändert.

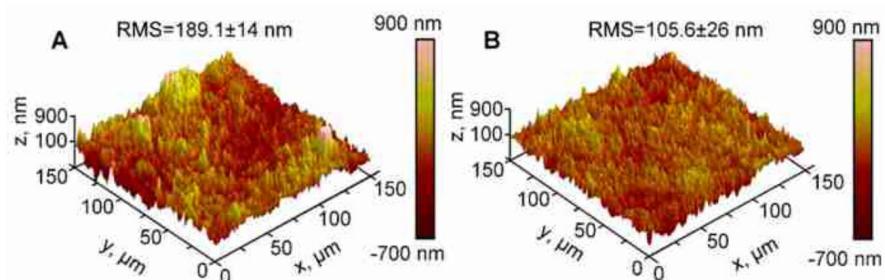


Abbildung 6.1: AFM Bild der Oberflächenrauigkeit von: (A) neuem Velostat und (B) benutzen Velostat [10]

Erkenntnis: Bevor Velostat-basierte Sensoren zuverlässig eingesetzt werden können, müssen sie den Setzungsprozess vollständig durchlaufen haben.

Vergleich FlexiForce Sensoren:

Die FlexiForce-Sensorelemente scheinen viele der Schwächen der Velostat-Sensoren nicht aufzuweisen. FlexiForce-Sensoren zeigen ein sehr konstantes und reproduzierbares Verhalten, haben eine nahezu lineare Kraft-Spannungs-Beziehung und können Impulse sowohl zeitlich als auch in ihrer Amplitude gut messen. Allerdings schränken die von Tekscan (aber auch von anderen Herstellern) vorgegebene Geometrien die Gestaltungsfreiheit bezüglich Form und Größe der Sensoren ein. Zudem sind die einzelnen Sensoren um ein Vielfaches teurer. So betragen die Materialkosten für einen 5 mm x 5 mm Velostat-Sensorelement ca. \$0,01. Ein einzelner FlexiForce-Sensor kostet ca. \$23,50 [45] und ist damit über 2000 Mal so teuer. Bei Sonderanfertigungen ist mit höheren Kosten zu rechnen.

Aufgrund der Kosten und der größeren Gestaltungsfreiheit lohnt es sich, Sensorelemente auf der Basis kostengünstiger Materialien wie Velostat weiter zu erforschen und zu entwickeln. Die vorgestellten Sensorelemente erscheinen bereits vielversprechend. Die durchgeföhrten Untersuchungen geben einerseits Aufschluss über viele Materialeigenschaften und andererseits eine Richtung für die weitere Forschung vor.

6.2 Prototypen

Pixelaktivierung / Grundfunktion:

In Kapitel 5.2.1 (S. 83 ff.) und 5.2.2 (S. 87 ff.) konnte gezeigt werden, dass beide Prototypen in der Lage sind, Belastungen sowohl an einzelnen als auch an mehreren Sensorelementen gleichzeitig zu erfassen. Es sei darauf hingewiesen, dass einzelne Sensorelemente gut lokalisiert belastet werden müssen, damit sie einen Spannungsanstieg wahrnehmen. Um eine bessere Sensorabdeckung auf einem Grundkörper zu erreichen, ist es daher von Vorteil, die Abstände zwischen den Sensorelementen möglichst gering zu halten. Wenn die Anzahl der Sensorelemente nicht erhöht werden soll, können die einzelnen Sensorelemente größer gestaltet werden, so dass der gesamte Grundkörper nur mit kleinen Zwischenräumen bedeckt ist.

Insbesondere bei der Analyse der Spannungsverläufe der Impulsversuche ist zu beobachten, dass der Spannungsanstieg der Prototypen sehr unterschiedlich ist. Bei der indirekten Applikation erreicht die Spannung maximal -445 mV, während sie bei der direkten Applikation maximal -150 mV erreicht. Dies geschieht trotz weitgehend ähnlicher Belastungen. Daraus wird deutlich, wie stark die Pixel von der Herstellungsmethode abhängig sind. Es ist auch möglich, dass diese großen Unterschiede auf unterschiedliche Materialchargen zurückzuführen sind.

Diese Unterschiede sind auch beim Vergleich mit einem einzelnen Sensor deutlich erkennbar (Kapitel 5.2.1.3, S. 86). Über die genaue Ursache dieser Unterschiede kann derzeit nur spekuliert werden (siehe 6.2.1 „H1“). Diese Ergebnisse zeigen, wie wichtig eine vollständige Kalibrierung ist, um eine genaue Umrechnung in Kraftwerte zu gewährleisten.

Übersprechen / Crosstalk:

Bei der Belastung einzelner Elemente ist bei beiden Prototypen kein Übersprechen erkennbar. Die verhinderten Maßnahmen aus Hidalgo-Lopez et al. [19] haben funktioniert. Bei der Aktivierung direkter Nachbarn ist davon auszugehen, dass diese durch eine unbeabsichtigte Belastung ebenfalls aktiviert wurden und es sich nicht um ein Übersprechen handelt. Alternativ ist es möglich, dass durch die Belastung eines Sensorelements sich die Folie an dieser Stelle so stark lokal verformt, dass benachbarte Sensorelemente aktiviert werden.

Bei der indirekten Applikation werden jedoch - je nach Art der Belastung - neben den direkt belasteten Sensorelementen auch andere vereinzelte Sensorelemente aktiviert.

Dieses Phänomen tritt bei der direkten Applikation nicht auf. Eine mögliche Erklärung hierfür wird im nächsten Abschnitt behandelt.

Aktivierung parasitärer Sensorelemente

Die Aktivierung unbelasteter Sensorelemente tritt nur bei der indirekten Applikation auf. Zum einen tritt dies an den Seitenflächen auf. Die Ursache hierfür ist vermutlich ein leichter seitlicher Überstand der Folie. Steht der Prototyp nun auf einer Fläche und wird belastet, kommt es zu einer Verformung der seitlichen Sensorelemente (siehe 6.2.1 „H2“).

Zum anderen werden auch einzelne Sensorelemente aktiviert, die in Belastungsrichtung weiter von der Kontaktstelle entfernt sind. Hier ist zu vermuten, dass durch die indirekte Applikation die Folie nicht vollständig verklebt ist. Daher kann es sein, dass beim Abtasten der Folie diese nicht nur normal zur Oberfläche belastet wird, sondern es auch zu einer Verschiebung kommt. Diese Verschiebung führt wiederum zu einer Verformung anderer Sensorelemente, was durch einen Spannungsanstieg registriert wird (siehe 6.2.1 „H3“).

Ein weiteres Phänomen ist in Kapitel 5.2.3.1 (S. 92 ff.) zu sehen. Hier klingen die Spannungswerte einzelner Sensorelemente erst nach einiger Zeit ab. Dies könnte daran liegen, dass einige Sensorelemente leicht verklebt sind oder durch andere Ursachen kurzzeitig aneinander haften und sich erst nach einiger Zeit wieder lösen.

Formerkennung:

Hier ist festzuhalten, dass bei beiden Prototypen, obwohl mehrere Elemente aktiviert sind, nur eine eingeschränkte Formerkennung möglich ist.

Dies kann entweder an der Ausleseelektronik oder an der Art des Versuches liegen. Die Aktivierung zu vieler Elemente kann dazu führen, dass andere Sensorelemente nicht mehr effektiv gemessen werden können und die Ausleseelektronik Fehler macht. Alternativ können Elemente durch die Versuchsdurchführung falsch belastet worden sein. Eine falsche Belastung kann durch eine fehlerhafte Versuchsdurchführung (Gewicht nicht mittig platziert) oder durch Verformungen/Verschiebungen in der Folie verursacht werden.

Insgesamt bedarf diese Thematik weiterer Untersuchungen, um aussagekräftige Hypothesen formulieren zu können. Bislang lassen die durchgeführten Versuche keine Aussage über die Fähigkeiten der Formerkennung bei impulsartiger Belastung zu.

Homogenität im Grundzustand – Rauschen:

Auffällig ist, dass die Darstellungen der Spannungen grundsätzlich weniger verrauscht erscheinen als die der Widerstände. Besonders stark ist dies bei der indirekten Anwendung. Bei genauerer Betrachtung ist zu erkennen, dass es sich nicht um Rauschen im klassischen Sinne handelt, sondern dass die Spannungs- und Widerstandswerte in den unbelasteten Zuständen über die gesamte Fläche hinweg ungleichmäßig sind. Bei den Spannungswerten wird einerseits durch die Mittelwertkorrektur ein Teil der Inhomogenität beseitigt, andererseits kann auch die gewählte Skalierung vorteilhaft sein. Bei den Widerstandswerten ist eine Mittelwertkorrektur nicht möglich (siehe Kapitel 4.5.2, S. 57 f.), so dass das volle Ausmaß der Inhomogenität der Sensorfolien sichtbar wird.

Vor allem bei der indirekten Applikation scheint die Folie durch die Herstellung auf der Ebene (2-D) und anschließende Applikation sehr inhomogen zu sein. Es ist zu vermuten, dass durch das Verkleben der einzelnen Sensorschichten miteinander, bevor diese über den Grundkörper gekrümmmt wird, Spannungen entstehen, die die elektrischen Eigenschaften der Matrix beeinflussen. Ein Indiz dafür ist, dass vor allem die Sensorelemente der indirekten Applikation, die über den kleineren Radius seitlich über den Grundkörper gebogen wurden, im unbelasteten Zustand einen deutlich geringeren Widerstandswert aufweisen als die Elemente auf der „vorderen Lasche“. Diese Spannungen werden bei der direkten Applikation nicht in die Folie eingebracht, weshalb sich hier ein homogeneres Bild ergibt (siehe 6.2.1 „H4“).

Impulsauflösung:

Die durchgeführten Tests zeigen, dass beide Prototypen in der Lage sind, Impulse zeitlich aufzulösen. Zusätzlich können auch Änderungen in der Amplitude durch unterschiedlich starke Belastungen erkannt werden. Da es sich um sehr einfache Versuche handelt, bleibt die Frage, bis zu welchem Grad und mit welcher Güte verschiedene Kräfte unterschieden werden können. Außerdem wurde jeder Impulsstoß nur mit einem Datenpunkt aufgezeichnet. Es ist daher möglich, dass nicht das Maximum des Stoßes erfasst wurde und sowohl der Zeitpunkt als auch die Amplitude verfälscht sind. Außerdem beträgt die Abtastfrequenz ca. 100 Hz, so dass jeder Zeitschritt 10 ms lang ist. Bei einer Impulsdauer von ca. 0,5 ms in den Velostat-Versuchen (Kapitel 5.1.1, S. 60 ff.) besteht die Möglichkeit, dass ein Impuls komplett ausgelassen wird. Dies deutet darauf hin, dass weitere Verbesserungen an der Auslesegeschwindigkeit erforderlich sind. Die Ausleseelektronik ist in diesem Bereich noch nicht ausgereift.

Widerstandsberechnung:

Der Vergleich der berechneten Widerstandswerte ("einfach", "Type A", "Type B") zeigt deutliche Unterschiede zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Berechnungsmethoden. Um diese Werte richtig bewerten zu können, ist es wichtig, sie mit den tatsächlichen Widerstandswerten zu vergleichen. Zu diesem Zweck wurde der Widerstand des Elements Nr. 54 sowohl bei der indirekten als auch bei der direkten Applikation mit einem Multimeter gemessen. Zusätzlich wurde ein einzelnes, isoliertes Element gemessen (siehe Tabelle 6.2).

Tabelle 6.2: Gemessene Widerstandswerte Element Nr. 54 der indirekten und direkten Applikation und eines alleinstehenden Sensorelements

		Berechnete Werte aus gemessenen Spannungswerten – aus Impulsversuchen und Multimetermessung		
		„Einfach“	„Type A“	„Type B“
Indirekte Applikation	Ca. 24 kΩ	18,43 kΩ	24,93 kΩ	20,4 kΩ
Direkte Applikation	Ca. 31 kΩ	73,97 kΩ	165,31 kΩ	88,3 kΩ
Alleinstehendes Sensorelement	Ca. 4,2 kΩ	4,9 kΩ	4,1 kΩ	4,0 kΩ

Es fällt auf, dass der Widerstandswert des alleinstehenden Sensorelements deutlich niedriger ist als der der applizierten Sensorelemente. Dieser Unterschied bleibt unerklärt. Zusätzlich weichen die berechneten Widerstandswerte im Fall der direkten Applikation erheblich von den Werten ab, die mit dem Multimeter gemessen wurden. Die geringsten Abweichungen zeigen sich in den beiden anderen Fällen bei der Berechnung nach "Type A". Diese Ergebnisse sind überraschend, da gemäß Hidalgo-Lopez et al. [19] "Type B" die besten Ergebnisse liefern sollte. Dies wurde auch in einer weiteren Veröffentlichung von Hidalgo-Lopez et al [20] experimentell bestätigt. Um eine eindeutige Auswertung zu ermöglichen, sind weitere Untersuchungen erforderlich. Es gilt herauszufinden, warum es zu den großen Unterschieden zwischen den mit dem Multimeter gemessenen und den berechneten Werten bei der direkten Applikation kommt und ob die Multimetermessungen zuverlässig sind. Erkenntnisse darüber, welches Berechnungsmethode die genauesten Widerstandswerte liefert, können zur Optimierung des Auslesealgorithmus führen.

Vergleich zwischen direkter und indirekter Applikation:

Die direkte Applikation scheint insgesamt zu besseren Ergebnissen zu führen. Zum einen aufgrund der besseren Fixierung an der Schädeloberfläche, zum anderen aufgrund der Tatsache, dass bei der Montage in der Folie keine zusätzlichen Spannungen entstehen. Dennoch hat die indirekte Applikation einige Vorteile. Die Herstellung der Folie in einer Ebene ist wesentlich einfacher und eine Automatisierung der Herstellung ist besser realisierbar. Darüber hinaus bieten sich bessere Möglichkeiten der Nachbehandlung, wie z.B. Druck- oder Wärmebehandlungen. Es ist auch denkbar, die Schwächen der Folie durch weitere Entwicklungsarbeit zu minimieren. Dies könnte bedeuten, an Methoden zu arbeiten, um die Befestigung auf dem Grundkörper zu verbessern, Kalibrierungsmöglichkeiten zu finden oder andere Materialien zu finden, die bei der Montage weniger Spannungen erzeugen.

Tabelle 6.3 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der beiden Applikationsmethoden.

Tabelle 6.3: Zusammenfassung Vergleich zwischen indirekter und direkter Applikation. Erfüllung von zwei Kriterien von sehr gut (++) bis sehr schlecht (--)

Kriterium	Betrachtete Größe	Indirekte Applikation (2D)	Direkte Applikation (3D)
Homogenität des Grundzustands	Spannung	++	++
	Widerstand	--	+
Formerkennung	Spannung	o	-
	Widerstand	o	-
Zeitliche Auflösung eines Impulses	Spannung	+	+
	Widerstand	+	+
Auflösung der Amplitude eines Impulses	Spannung	o*	o*
	Widerstand	o*	o*
parasitäre Aktivierungen von Sensorelementen		Ja	Nein

* Obwohl alle Impulsstöße aufgelöst werden, geschieht dies nur mit einem Messpunkt, der nicht mit Sicherheit im Impulsmaximum aufgenommen wurde.

6.2.1 Zusammenfassung unerklärter, beobachteter Effekte und deren Hypothesen

Hier werden bereits oben genannte Effekte mit ihren zugrundeliegenden Hypothesen und offenen Fragestellung nochmal tabellarisch zusammengefasst. Zu jeder Hypothese wird zudem ein mögliches weiteres Vorgehen vorgeschlagen.

Tabelle 6.4: Zusammenfassung unerklärte Effekte der Prototypentests und ihre Hypothesen. Jeder Hypothese wird ein mögliches weiteres Vorgehen zur Bestätigung dieser angehängt.

	Effekt	Unterschiedliche Spannungswerte zwischen applizierten Sensorelementen und einem alleinstehenden Sensor
1	Hypothese	Durch die Applikation der Sensormatrix auf den Grundkörper kommt es zu Spannungen und Verschiebungen in der Folie, welche die elektrischen Eigenschaften der Sensorelemente verändert.
	Vorgehen	Sensormatrix nach der Herstellung in der Ebene auch in der Ebene testen und mit den Einzelsensoren vergleichen.
2	Effekt	Unerwünschte / parasitäre Aktivierung einiger seitlicher Sensorelemente im Prototyp mit indirekter Anwendung
	Hypothese	Durch einen leichten Überstand der Folie über die Unterkante des Grundkörpers hinaus wird bei Belastung des Prototyps die überstehende Folie verformt.
	Vorgehen	Modifizierung der Folie an den Seiten oder andere Lagerung des Prototyps, sodass die Folie beim Impulseintrag nicht verformt wird. Ergebnisse vergleichen.
3	Effekt	Aktivierung einzelner Sensorelemente, die in Belastungsrichtung weiter von der Kontaktstelle entfernt sind.
	Hypothese	Durch die in der indirekten Applikation verklebte Folie kann sich auf der Grundkörperoberfläche verschieben. Dies kann zu einer Verformung der Folie („Wellenbildung“) und damit zu einer Veränderung der elektrischen Eigenschaften einzelner Sensorelemente führen.

	Vorgehen	Sensormatrix nach der Herstellung in der Ebene auch in der Ebene testen und prüfen, ob die „Wellenbildung“ auftritt bzw. sicherstellen, dass die Sensorfolie fest und vollständig auf dem Grundkörper fixiert ist.
4	Effekt	Bei der indirekten Applikation unterscheiden sich die Widerstandswerte der unbelasteten Sensorelemente stark.
	Hypothese	Durch die Herstellung der Folie in der Ebene und das anschließende Aufbringen auf den Schädel werden Spannungen in die Folie eingebracht, die die elektrischen Eigenschaften der einzelnen Sensorelemente beeinflussen.
	Vorgehen	Die Folie der indirekten Applikation vor der Montage in der Ebene testen und mit dem montierten Zustand vergleichen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Um die Ursachen und Mechanismen von AHT vollständig zu verstehen, müssen weitere Daten gesammelt werden. Dazu ist ein AHT-Dummy erforderlich, wobei der Schwerpunkt der Datenerfassung auf dem Kopf liegt. Ein Aspekt ist die Kraftmessung an der Schädeloberfläche, wofür Kraftmessfolien ein geeignetes Instrument sein können.

Die derzeit verfügbaren Kraftmessfolien können nur bedingt zuverlässig auf gekrümmten Oberflächen eingesetzt werden [32]. Spezielle Anfertigungen für gekrümmte Oberflächen, insbesondere für die Messung von Kräften am Schädel, sind teuer, durch die Vorgaben der Hersteller wenig individualisierbar und sind oft relativ dick, was die Haptik und das Verhalten der Oberfläche verändert.

Diese Arbeit befasste sich mit der Entwicklung einer vollständig individualisierbaren Kraftmessfolie, die auf gekrümmten Oberflächen angebracht werden kann und in der Lage ist, Kraftimpulse sowohl zeitlich als auch in der Amplitude aufzulösen.

Im Rahmen der Arbeit wurden Materialtests durchgeführt, die zeigten, dass Velostat ein geeignetes, resistives Material für die Anwendung in Kraftsensoren sein kann. Anschließend wurden zwei Herstellungsmethoden, die direkte und die indirekte Applikation der Kraftmessfolie, vorgestellt. Zusätzlich wurde eine geeignete Ausleseelektronik entwickelt, die in der Lage ist, die Kraftmessfolien mit einer Frequenz von ca. 100 Hz auszulesen.

Die entwickelten Prototypen wurden umfassend getestet und miteinander verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Prototypen die gesteckten Ziele erreichen. Sie sind in der Lage, Impulse sowohl zeitlich als auch in ihrer Amplitude aufzulösen. Zudem sind die Kraftmessfolien mit einer Dicke von ca. 0,2 mm sehr dünn und konnten kostengünstig hergestellt werden. Durch die Verwendung von Kapton-Klebeband als stabilisierende Schicht sind die Folien robust und vor allem die indirekte Applikation einfach in der Handhabung.

7.2 Ausblick

Im Rückblick auf die vorliegende Arbeit zeigt sich, dass die aktuellen Prototypen bereits ein vielversprechendes Potenzial aufweisen und einen großen Teil der definierten Zielanforderungen erfüllen konnten. Dennoch gibt es weitere Fragen und Bereiche, die in Zukunft geklärt und weiterentwickelt werden können.

Ein wichtiger Schwerpunkt liegt darin, die bestehenden Schwächen der vorliegenden Prototypen anzugehen. Eine erste Verbesserung könnte zum Beispiel eine bessere Verklebung der Folie bei der indirekten Applikation sein. Darüber hinaus sollte die Klärung der in Kapitel 6.2.1 (S. 109 f.) aufgestellten Hypothesen angegangen werden.

Außerdem sollte das dynamische Verhalten der Prototypen weiter untersucht werden. Bisher wurde nur ein Sensorelement mit einem Impuls beaufschlagt, während das Verhalten mehrerer kurz aufeinander folgender Impulse, beispielsweise bei einem Treppensturz des Dummys, unklar ist. Es ist auch wichtig zu untersuchen, wie sich mehrere Sensorelemente verhalten, wenn sie gleichzeitig durch einen Kraftimpuls aktiviert werden.

Da derzeit nur ein Messpunkt im Impuls gemessen wird, sollte die Messelektronik weiterentwickelt werden, um eine bessere Impulsauflösung zu erreichen. Ein mögliches Engpassproblem scheint die Bestromung der Reihen (also der Multiplexer) zu sein. Es wird vermutet, dass aufgrund der großen Kupferflächen der einzelnen Sensorelemente diese auch Eigenschaften eines Kondensators aufweisen könnten. Eine Lösung könnte darin bestehen, mit einer höheren Spannung oder einem höheren Strom zu arbeiten.

Zusätzlich sollten weitere Untersuchungen zur Verbesserung der Wiederholbarkeit von Velostat durchgeführt werden, wobei ein ausgewogenes Verhältnis zwischen der Wiederholbarkeit im belasteten und unbelasteten Zustand gefunden werden sollte. Dies könnte durch eine Nachbehandlung der Folie erreicht werden. Alternativ könnten auch andere resistive Materialien wie piezoelektrische Tinten, die in der Industrie verwendet werden, getestet werden.

Ein weiterer Ansatz wäre die Verwendung von flexiblen Leiterplatten, anstatt die Leiterbahnen selbst auszuschneiden und auf der Klebefläche zu platzieren. Hier stellt sich die Frage, ob diese Leiterplatten flexibel genug sind.

Auch die Kalibrierung der Folie im montierten Zustand steht noch aus, wobei die Ausgabe von Kraftwerten als Zielgröße angestrebt wird.

Eine Weiterentwicklung der Folie könnte auch eine neue Anordnung der Sensorelemente beinhalten. Um den Totraum zwischen den Sensorelementen, in dem keine Messung möglich ist, zu minimieren, könnten mehr Pixel verwendet oder die vorhandenen Pixel vergrößert werden. Es ist dabei darauf zu achten, dass die Lücken nicht wesentlich kleiner als 3 mm sind, um die planare Leitfähigkeit des Materials zu berücksichtigen [10]. Alternativ kann mit speziellen Schnittmustern gearbeitet werden, um ein mögliches Übersprechen aufgrund der planaren Leitfähigkeit von Velostat zu vermeiden.

Schließlich sollte die Möglichkeit weiterer Methoden zur Abwicklung der Folie untersucht werden. Die derzeitige Abwicklung ist lediglich auf den verwendeten Grundkörper anwendbar. Sollte in Zukunft eine realistische Schädelform im Dummy verwendet werden, müsste die Abwicklung entsprechend angepasst werden. Eine Möglichkeit wäre die parametrische Anpassung eines vereinfachten Schnittmusters, wie es derzeit verwendet wird. Dieses wird dann iterativ an den realen Kopf angepasst (Anpassung der Rundungen, Hinzufügen oder Entfernen von Material an bestimmten Stellen), bis der Schädel maximal bedeckt ist.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Adler, R., Desmarest, P. J., 1987. An Economical Touch Panel Using SAW Absorption. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 34, 2, 195–201. DOI: <https://doi.org/10.1109/t-uffc.1987.26932>.
- [2] Ando, S., Shinoda, H., 1995. Ultrasonic emission tactile sensing. *IEEE Control Syst.* 15, 1, 61–69. DOI: <https://doi.org/10.1109/37.341866>.
- [3] Athavale, O. N., Paskaranandavadiel, N., Angeli, T. R., Avci, R., Cheng, L. K., 2020. Design of Pressure Sensor Arrays to Assess Electrode Contact Pressure During In Vivo Recordings in the Gut. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual International Conference* 2020, 4204–4207. DOI: <https://doi.org/10.1109/EMBC44109.2020.9175843>.
- [4] Chen, L., Chen, G., Lu, L., 2007. Piezoresistive Behavior Study on Finger-Sensing Silicone Rubber/Graphite Nanosheet Nanocomposites. *Adv. Funct. Mater.* 17, 6, 898–904. DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.200600519>.
- [5] Chen, W., Yan, X., 2020. Progress in achieving high-performance piezoresistive and capacitive flexible pressure sensors: A review. *Journal of Materials Science & Technology* 43, 175–188. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.11.010>.
- [6] Cotton, D. P. J., Graz, I. M., Lacour, S. P., 2009. A Multifunctional Capacitive Sensor for Stretchable Electronic Skins. *IEEE Sensors J.* 9, 12, 2008–2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2009.2030709>.
- [7] D'Alessio, T., 1999. Measurement errors in the scanning of piezoresistive sensors arrays. *Sensors and Actuators A: Physical* 72, 1, 71–76. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0924-4247\(98\)00204-0](https://doi.org/10.1016/s0924-4247(98)00204-0).
- [8] Del Prete, Z., Monteleone, L., Steindler, R., 2001. A novel pressure array sensor based on contact resistance variation: Metrological properties. *Rev. Sci. Instrum.* 72, 2, 1548. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1340561>.
- [9] Donati, M., Vitiello, N., De Rossi, S. M. M., Lenzi, T., Crea, S., Persichetti, A., Giovacchini, F., Koopman, B., Podobnik, J., Munih, M., Carrozza, M. C., 2013. A flexible sensor technology for the distributed measurement of interaction pressure. *Sensors (Basel, Switzerland)* 13, 1, 1021–1045. DOI: <https://doi.org/10.3390/s130101021>.
- [10] Dzedzickis, A., Sutinys, E., Bucinskas, V., Samukaite-Bubniene, U., Jakstys, B., Ramanavicius, A., Morkvenaite-Vilkonciene, I., 2020. Polyethylene-Carbon Composite (Velostat®) Based Tactile Sensor. *Polymers* 12, 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12122905>.
- [11] Fatema, A., Kuriakose, I., Devendra, D., Hussain, A. M., 2022. Investigation of the Mechanical Reliability of a Velostat-based Flexible Pressure Sensor. In *2022 IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems (FLEPS)*. IEEE, 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/FLEPS53764.2022.9781575>.
- [12] Fatema, A., Poondla, S., Mishra, R. B., Hussain, A. M., 2021. A Low-Cost Pressure Sensor Matrix for Activity Monitoring in Stroke Patients Using Artificial Intelligence. *IEEE Sensors J.* 21, 7, 9546–9552. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3054406>.
- [13] Feld, K., 2023. *Biomechanisches, KI-basiertes Unterstützungsmodell zur Diagnostik eines „Abusive Head Traumas“ (AHT)* (September 2023). Abgerufen am September 17, 2023 von <https://www.kinder-radiologie.org/de-DE/10614/ki-basiertes-unterstuetzungsmodell-zur-diagnostik-eines-aht/>.
- [14] Feld, K., Feld, D., Karger, B., Helmus, J., Schwimmer-Okike, N., Pfeiffer, H., Banaschak, S., Wittschieber, D., 2021. Abusive head trauma in court: a multi-center study on criminal proceedings in Germany. *International journal of legal medicine* 135, 1, 235–244. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00414-020-02435-5>.

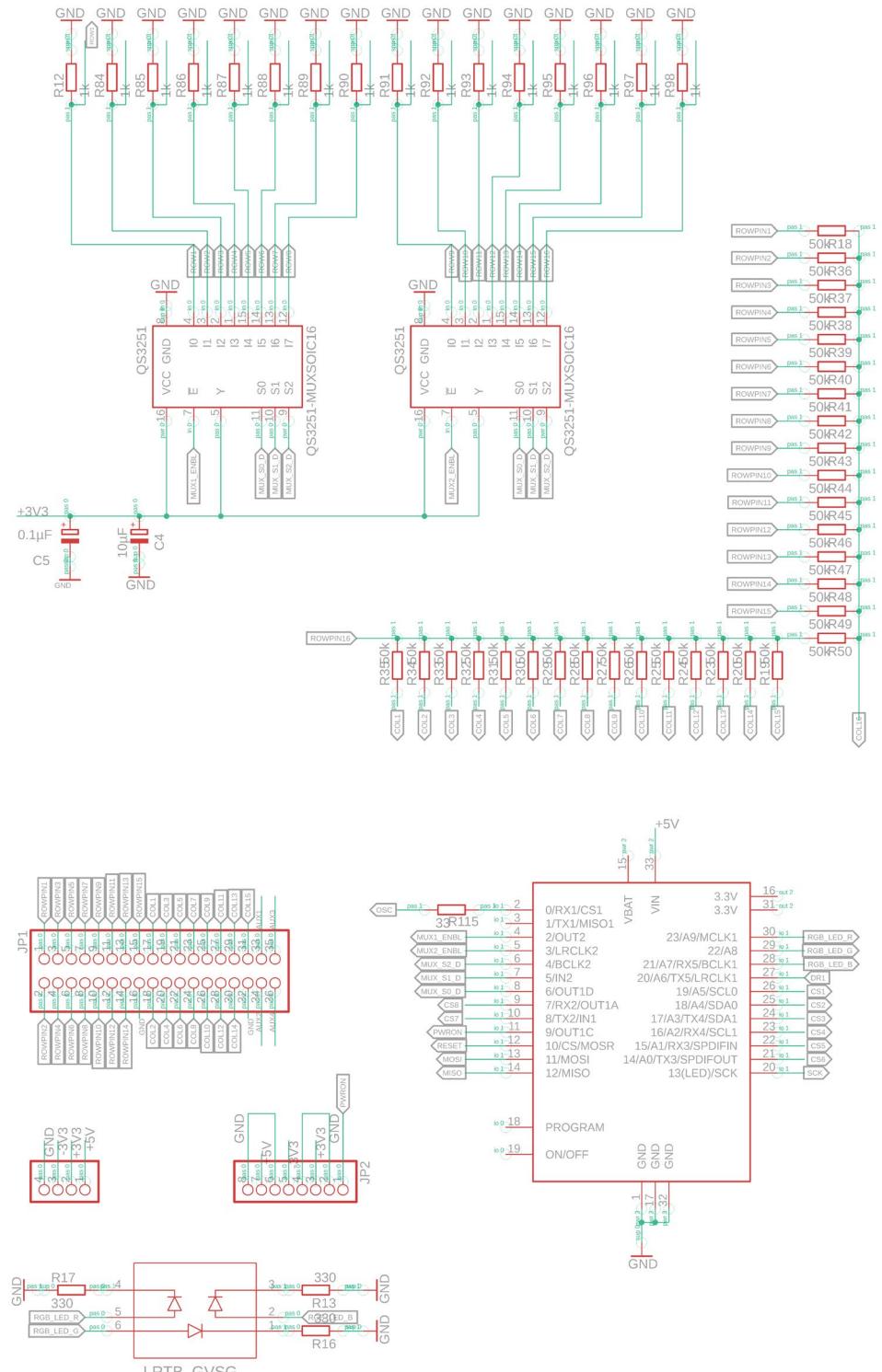
- [15] Galindo Blanco, B., 2021. *Prototyping Smart Vessel Phantoms for a Modular Catheter Test Bed*. Masterarbeit. Escuela Superior de Ingeniería. Universidad de Cádiz, Cádiz, Spanien.
- [16] Giovanelli, D., Farella, E., 2016. Force Sensing Resistor and Evaluation of Technology for Wearable Body Pressure Sensing. *Journal of Sensors* 2016, 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/9391850>.
- [17] Haug, R., 2022. *Entwicklung und experimentelle Untersuchung eines fluidischen Druck-Messsystems zur Ermittlung von Interaktionskräften zwischen Anwender und Power-Tool*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. IPEK. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- [18] Hellebrekers, T., Kroemer, O., Majidi, C., 2019. Soft Magnetic Skin for Continuous Deformation Sensing. *Advanced Intelligent Systems* 1, 4, 1900025. DOI: <https://doi.org/10.1002/aisy.201900025>.
- [19] Hidalgo-Lépez, J. A., Romero-Sánchez, J., Fernández-Ramos, R., 2017. New Approaches for Increasing Accuracy in Readout of Resistive Sensor Arrays. *IEEE Sensors J.* 17, 7, 2154–2164. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2662803>.
- [20] Hidalgo-López, J. A., Oballe-Peinado, Ó., Castellanos-Ramos, J., Sánchez-Durán, J. A., Fernández-Ramos, R., Vidal-Verdú, F., 2017. High-Accuracy Readout Electronics for Piezoresistive Tactile Sensors. *Sensors (Basel, Switzerland)* 17, 11. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17112513>.
- [21] Hopkins, M., Vaidyanathan, R., McGregor, A. H., 2020. Examination of the Performance Characteristics of Velostat as an In-Socket Pressure Sensor. *IEEE Sensors J.* 20, 13, 6992–7000. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2978431>.
- [22] Ibach, H., Lüth, H., 2008. *Festkörperphysik: Einführung in die Grundlagen*. (7th ed.). Springer-Lehrbuch. Springer Berlin, Heidelberg.
- [23] Jayawant, B. V., Onori, M. A., MckWatson, J. D., 1985. Robot Tactile Sensing: A New Array Sensor. *IFAC Proceedings Volumes* 18, 16, 267–270. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)59973-5](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)59973-5).
- [24] Kalantari, M., Dargahi, J., Kövecses, J., Mardasi, M. G., Nouri, S., 2012. A New Approach for Modeling Piezoresistive Force Sensors Based on Semiconductive Polymer Composites. *IEEE/ASME Trans. Mechatron.* 17, 3, 572–581. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2011.2108664>.
- [25] Lindenmann, A., Uhl, M., Gwosch, T., Matthiesen, S., 2021. The influence of human interaction on the vibration of hand-held human-machine systems - The effect of body posture, feed force, and gripping forces on the vibration of hammer drills. *Applied ergonomics* 95, 103430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103430>.
- [26] Liu, H., Zhang, Y.-F., Liu, Y.-W., Jin, M.-H., 2010. Measurement errors in the scanning of resistive sensor arrays. *Sensors and Actuators A: Physical* 163, 1, 198–204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2010.08.004>.
- [27] Maminshev, A. V., Sundara-Rajan, K., Yang, F., Du Yanqing, Zahn, M., 2004. Interdigital sensors and transducers. *Proc. IEEE* 92, 5, 808–845. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2004.826603>.
- [28] Matschke, J., Herrmann, B., Sperhake, J., Körber, F., Bajanowski, T., Glatzel, M., 2009. Shaken baby syndrome: a common variant of non-accidental head injury in infants. *Deutsches Ärzteblatt international* 106, 13, 211–217. DOI: <https://doi.org/10.3238/arztebl.2009.0211>.
- [29] Murali Krishna, G., Rajanna, K., 2004. Tactile Sensor Based on Piezoelectric Resonance. *IEEE Sensors J.* 4, 5, 691–697. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2004.833505>.
- [30] Narang, S. K., Fingarson, A., Lukefahr, J., 2020. Abusive Head Trauma in Infants and Children. *Pediatrics* 145, 4. DOI: <https://doi.org/10.1542/peds.2020-0203>.
- [31] Nicholls, H. R., Lee, M. H., 1989. A Survey of Robot Tactile Sensing Technology. *The International Journal of Robotics Research* 8, 3, 3–30.
- [32] Niu, J., Zhang, C., Chen, X., Ma, C., Chen, L., Tong, C., 2019. A Novel Helmet Fitness Evaluation Device Based on the Flexible Pressure Sensor Matrix. *Sensors (Basel, Switzerland)* 19, 18. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19183823>.
- [33] Oballe-Peinado, Ó., Vidal-Verdú, F., Sánchez-Durán, J. A., Castellanos-Ramos, J., Hidalgo-López, J. A., 2016. Improved Circuits with Capacitive Feedback for Readout

- Resistive Sensor Arrays. *Sensors (Basel, Switzerland)* 16, 2, 149. DOI: <https://doi.org/10.3390/s16020149>.
- [34] Pang, Y., Zhang, K., Yang, Z., Jiang, S., Ju, Z., Li, Y., Wang, X., Wang, D., Jian, M., Zhang, Y., Liang, R., Tian, H., Yang, Y., Ren, T.-L., 2018. Epidermis Microstructure Inspired Graphene Pressure Sensor with Random Distributed Spinosum for High Sensitivity and Large Linearity. *ACS nano* 12, 3, 2346–2354. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b07613>.
- [35] Park, Y.-L., Chen, B.-R., Wood, R. J., 2012. Design and Fabrication of Soft Artificial Skin Using Embedded Microchannels and Liquid Conductors. *IEEE Sensors J.* 12, 8, 2711–2718. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2012.2200790>.
- [36] Park, Y.-L., Majidi, C., Kramer, R., Bérard, P., Wood, R. J., 2010. Hyperelastic pressure sensing with a liquid-embedded elastomer. *J. Micromech. Microeng.* 20, 12, 125029. DOI: <https://doi.org/10.1088/0960-1317/20/12/125029>.
- [37] PPS, 2023. *Head Pressure Mapping — PPS* (September 2023). Abgerufen am September 11, 2023 von <https://pressureprofile.com/body-pressure-mapping/head-pressure-mapping>.
- [38] Pugh, A., Heginbotham, W. B., Page, C. J., 1977. Novel techniques for tactile sensing in a three dimensional environment. *Industrial Robot: An International Journal* 4, 1, 18–26. DOI: <https://doi.org/10.1108/eb004474>.
- [39] Rebman, J., Morris, K., 1984. A Tactile Sensor With Electrooptical Transduction. In , 0449. SPIE, 210–216. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.939242>.
- [40] Reverter, F., Vidal-Verdú, F., Hidalgo-Lopez, J. A., 2017. Advanced Techniques for Directly Interfacing Resistive Sensors to Digital Systems. In *Advanced Interfacing Techniques for Sensors. Measurement Circuits and Systems for Intelligent Sensors*, Boby George, V. J. Kumar, Subhas C. Mukhopadhyay and Joyanta K. Roy, Eds. Smart Sensors, Measurement and Instrumentation, 25. Springer International Publishing; Imprint: Springer, Cham, 139–165.
- [41] Roberts, P., Zadan, M., Majidi, C., 2021. Soft Tactile Sensing Skins for Robotics. *Curr Robot Rep* 2, 3, 343–354. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43154-021-00065-2>.
- [42] Schröder, T., Lindenmann, A., Hehmann, S., Wettstein, A., Germann, R., Gwosch, T., Matthiesen, S., 2022. Use of data-driven design for the development of knob-shaped handles in the context of impedance measurements. *Applied ergonomics* 98, 103575. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103575>.
- [43] Shu, L., Tao, X., Feng, D. D., 2015. A New Approach for Readout of Resistive Sensor Arrays for Wearable Electronic Applications. *IEEE Sensors J.* 15, 1, 442–452. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2333518>.
- [44] Smith, C. S., 1954. Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon. *Phys. Rev.* 94, 1, 42–49. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.94.42>.
- [45] Sparkfun, 2023. *FlexiForce Pressure Sensor - 25lbs. - SEN-08712 - SparkFun Electronics* (September 2023). Abgerufen am September 13, 2023 von <https://www.sparkfun.com/products/8712>.
- [46] Stassi, S., Cauda, V., Canavese, G., Pirri, C. F., 2014. Flexible tactile sensing based on piezoresistive composites: a review. *Sensors (Basel, Switzerland)* 14, 3, 5296–5332. DOI: <https://doi.org/10.3390/s140305296>.
- [47] Sundaram, S., Kellnhofer, P., Li, Y., Zhu, J.-Y., Torralba, A., Matusik, W., 2019. Learning the signatures of the human grasp using a scalable tactile glove. *Nature* 569, 7758, 698–702. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1234-z>.
- [48] Suprapto, S. S., Setiawan, A. W., Zakaria, H., Adiprawita, W., Supartono, B., 2017. Low-Cost Pressure Sensor Matrix Using Velostat. In *Proceedings of 2017 5th International Conference on Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering (ICICI-BME). November 6-7, 2017, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia*. IEEE, [Piscataway, NJ], 137–140. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICICI-BME.2017.8537720>.
- [49] Tekscan, 2023. *Small Force Sensing Resistor | FlexiForce A201 Sensor | Tekscan* (July 2023). Abgerufen am July 21, 2023 von <https://www.tekscan.com/products-solutions/force-sensors/a201?tab=specifications-performance>.

- [50] Tihak, A., Boskovic, D., 2019. Experimental evaluation of challenges in tesigning a resistive pressure sensors: 1st-4th of July 2019, Novi Sad, Serbia.
- [51] Valle-Lopera, D. A., Castraño-Franco, A. F., Gallego-Londoño, J., Hernández-Valdivieso, A. M., 2017. Test and fabrication of piezoresistive sensors for contact pressure measurement. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 82, 47–52. DOI: <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n82a06>.
- [52] Vehec, I., Livovsky, L., 2020. Flexible Resistive Sensor Based on Velostat. In *43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISSE49702.2020.9121009>.
- [53] Weber, W., 1987. Prädilektionsstellen infantiler Kalottenfrakturen nach stumpfer Gewalt. *Zeitschrift für Rechtsmedizin*, 98.
- [54] Wu, J.-F., 2017. Scanning Approaches of 2-D Resistive Sensor Arrays: A Review. *IEEE Sensors J.* 17, 4, 914–925. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2641001>.
- [55] Yarahmadi, R., Safarpour, A., Lotfi, R., 2016. An Improved-Accuracy Approach for Readout of Large-Array Resistive Sensors. *IEEE Sensors J.* 16, 1, 210–215. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2477494>.
- [56] Yuan, L., Qu, H., Li, J., 2022. Velostat Sensor Array for Object Recognition. *IEEE Sensors J.* 22, 2, 1692–1704. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3132793>.

9 Anhang

9.1 Ausleseelektronik – Messplatine



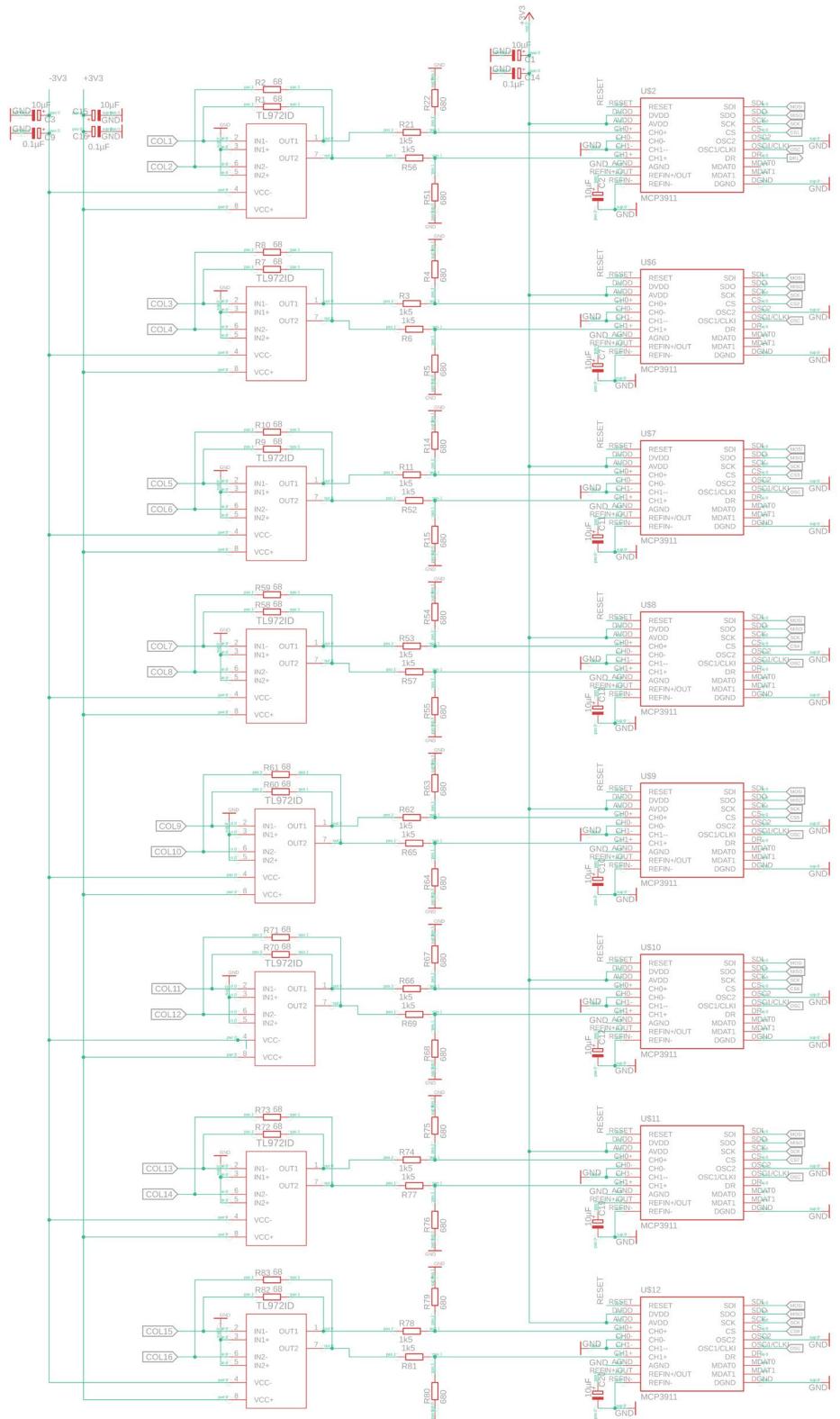


Abbildung 9.1: Schaltplan Messplatine

9.2 Ausleseelektronik – Netzteil

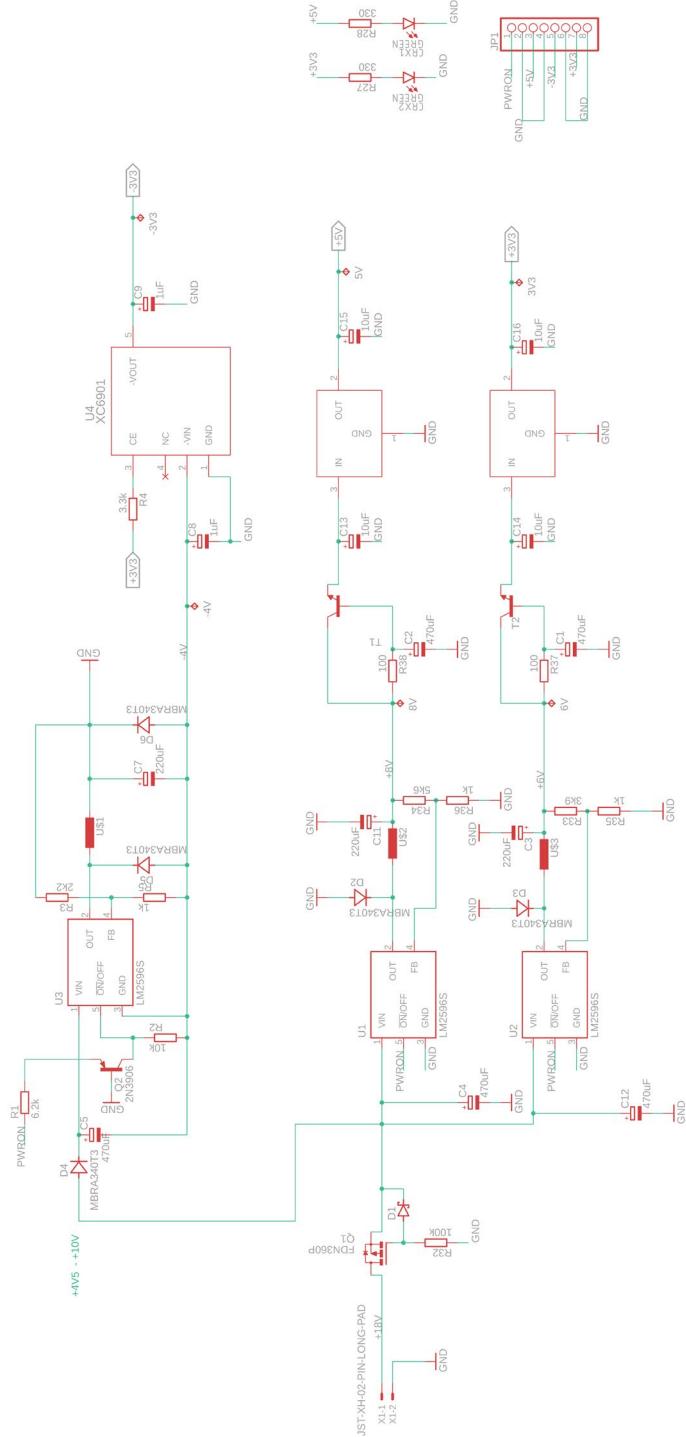
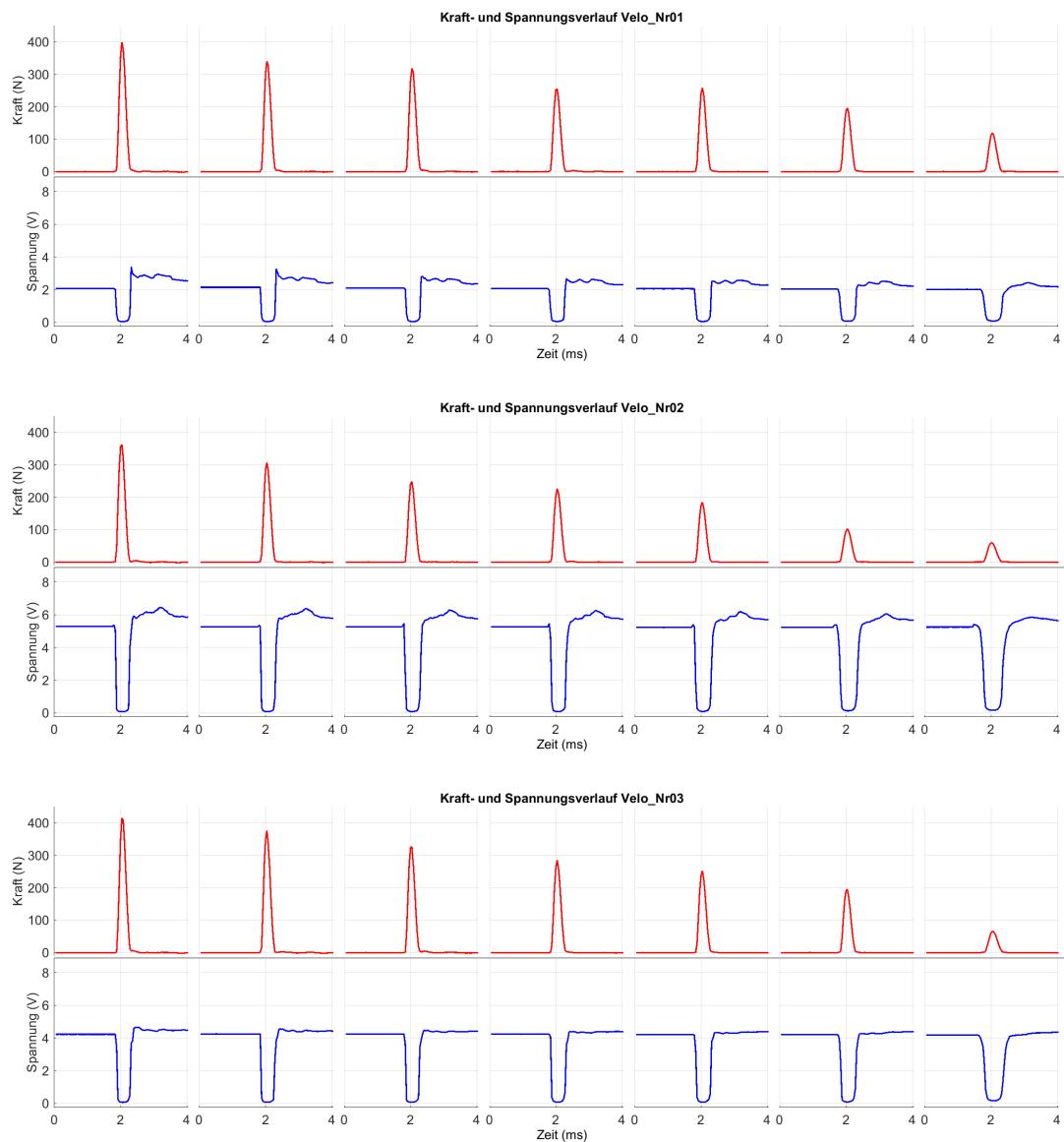
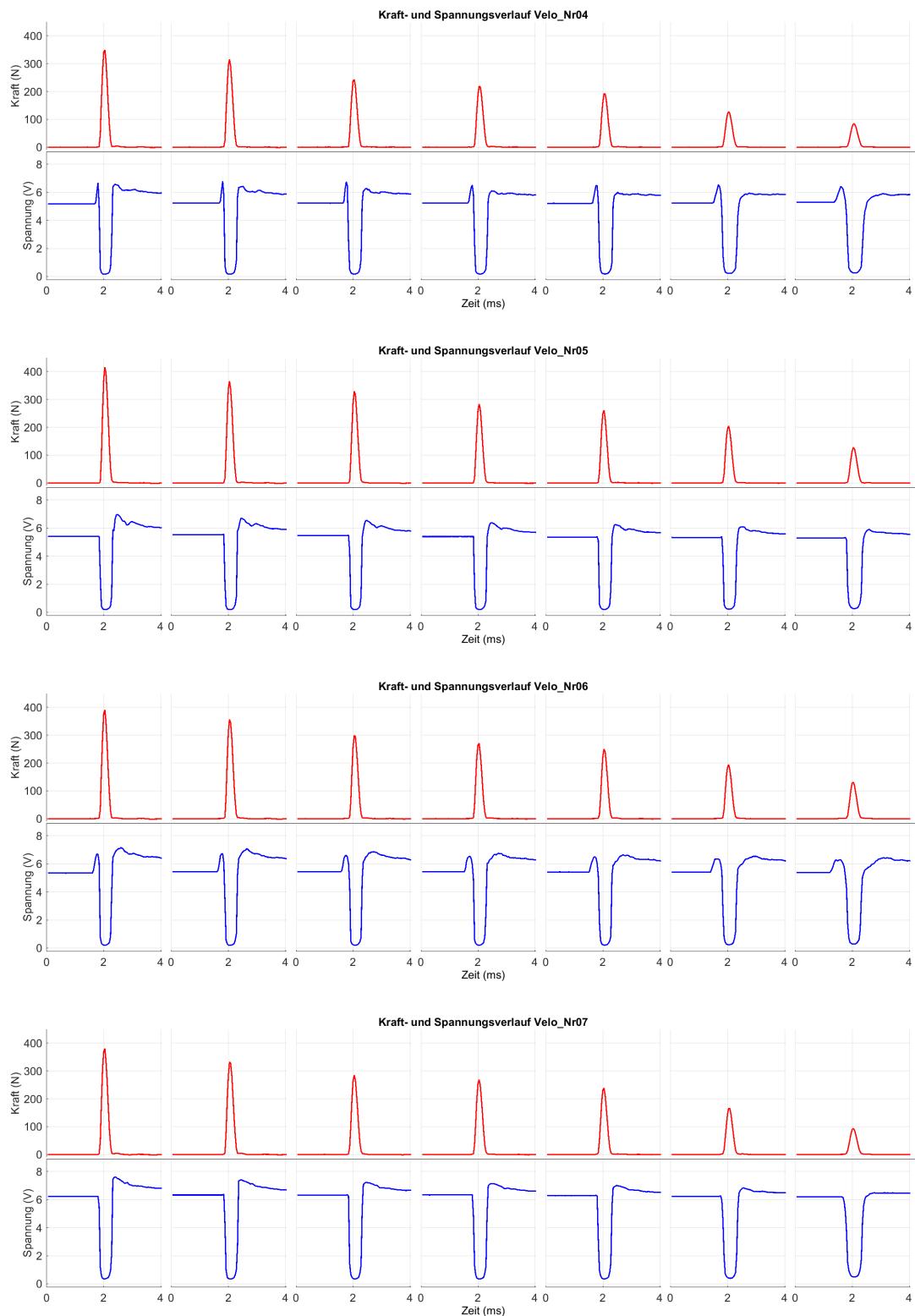


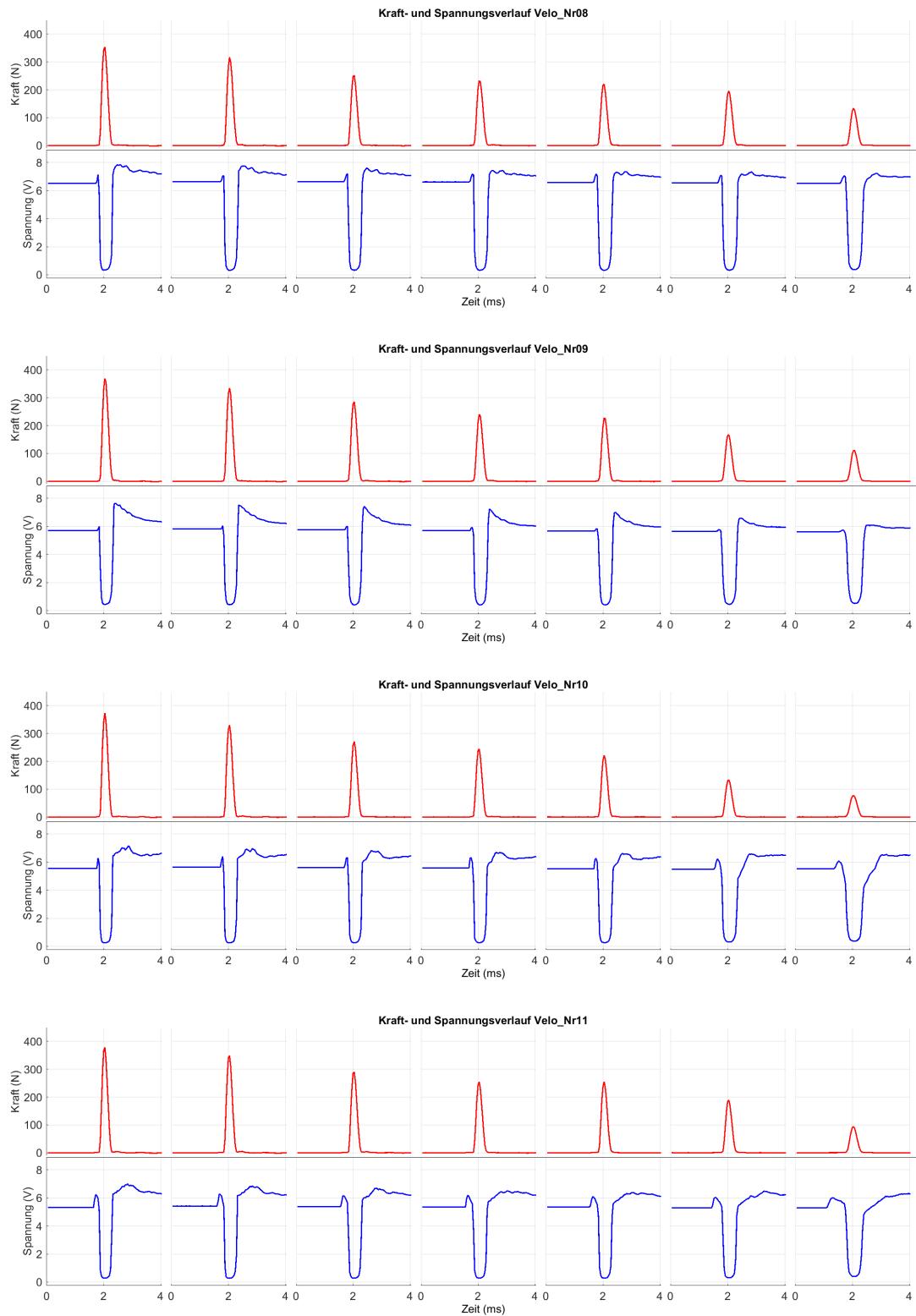
Abbildung 9.2: Schaltplan Netzteil

9.3 MultiHit Velostat

In diesem Kapitel werden die Untersuchungsergebnisse der „MultiHit“-Versuche mit den Velostat-Sensoren, wie diese in Kapitel 4.1.2.2 (S. 31) beschrieben sind, dargestellt. Die oberen Verläufe stellen jeweils den Kraftverlauf gemessen am Modalhammer dar. Die unteren Verläufe sind die entsprechenden Spannungswerte, die am Velostat-Sensor gemessen wurden.







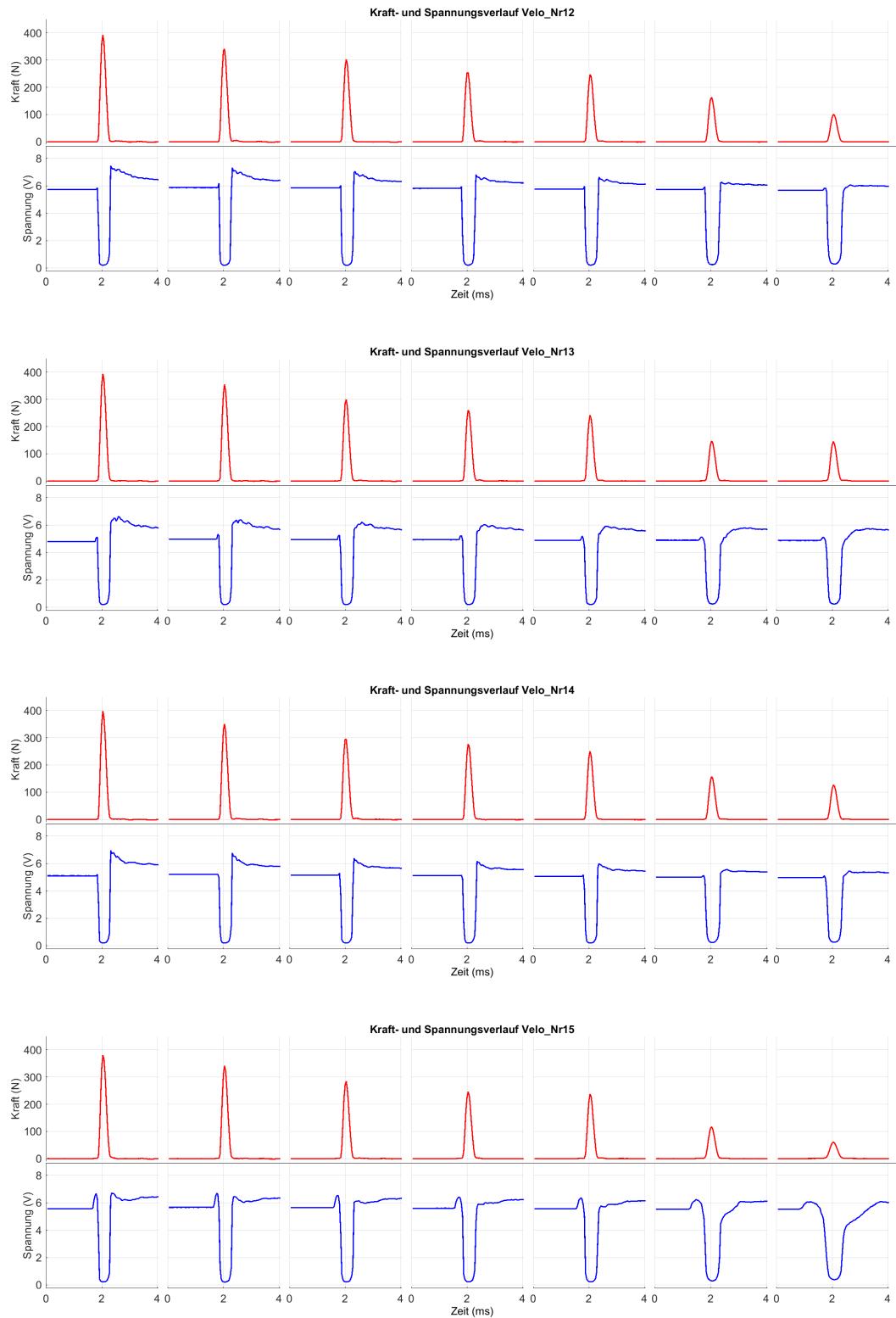


Abbildung 9.3: Ergebnisse mehrfacher Impulsstoß, verschiedener Stärken - Velostat