

Experimentelle Untersuchung und Modellierung des Sensorverhaltens einer taktilen Fußsohle für humanoide Roboter

Experimental analysis and modelling of the sensor behaviour of a tactile sole for humanoid robots

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades
Bachelor of Science (B.Sc.)

an der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München

Themenstellende/r Prof. dr.ir. Daniel J. Rixen
Lehrstuhl für Angewandte Mechanik

Betreuer/Betreuerin Felix Sygulla, M.Sc.
Lehrstuhl für Angewandte Mechanik

Eingereicht von Johannes Rainer
Dorfstraße 51
A-5661 Rauris
+43 664 3715481

Eingereicht am 03. Dezember 2020 in Garching

Abstract

In this bachelors thesis, a sensor model for the tactile foot sole of the humanoid walking robot LOLA is developed. For this purpose, the evaluation electronics of the sensor is programmed at the beginning. This electrical logic is used for the measurement of experimental data and will be used for the evaluation of real measured values on the humanoid robot in the future. Subsequently, a structured, comprehensible and reusable procedure for the experimental investigation of sensor properties is developed. Based on experimental results, a sensor model is generated in MATLAB[®], which is then translated into C++ Code and integrated into the multibody simulation environment of LOLA. Finally, the sensor model is going to be validated by measurements on a prototype of the real tactile foot sole.

KEYWORDS: experimental analysis, tactile sensor model, modeling, tactile foot sole, piezoresistive sensor, humanoid robot

Zusammenfassung

In dieser Bachelorarbeit wird ein Sensormodell für die taktile Fußsohle des humanoiden Laufroboters LOLA entwickelt. Dafür wird zu Beginn die Auswerteelektronik des verwendeten taktilen Sensors programmiert. Diese Elektronik dient zur Erfassung von experimentellen Daten und soll in weiterer Folge für die Auswertung von realen Messwerten am humanoiden Roboter verwendet werden. Anschließend wird ein strukturiertes, nachvollziehbares und wiederverwendbares Vorgehen zur experimentellen Untersuchung von Sensoreigenschaften entwickelt. Auf Basis von Versuchsergebnissen wird ein Sensormodell in MATLAB[®] entwickelt, welches anschließend in C++ Code übersetzt und in die Mehrkörpersimulationsumgebung von LOLA integriert wird. Abschließend wird das Sensormodell durch Messungen an einem Prototyp der realen taktilen Fußsohle validiert.

STICHWORTE: experimentelle Untersuchung, taktiles Sensormodell, Modellierung, taktile Fußsohle, piezoresistiver Sensor, humanoider Roboter

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	3
1.2	Ziele und Gliederung der Thesis	3
2	Stand der Wissenschaft und Technik	5
2.1	Sensorkonzepte für taktile Sensoren	6
2.1.1	Taktile Widerstandssensoren	6
2.1.2	Piezoresistive taktile Sensoren	8
2.2	Eigenschaften piezoresistiver Sensoren	10
2.3	Modelle für piezoresistive Sensoren	13
3	Versuchsaufbau zur experimentellen Untersuchung des taktilen Sensors	17
3.1	Prototyp der taktilen Fußsohle	17
3.2	Prüfstands-aufbau zur experimentellen Untersuchung von Sensoreigenschaften	18
3.3	Auswerteelektronik der Sensorsignale	19
3.4	Auswertesoftware der Sensorsignale	20
3.5	Validierung der Auswerteelektronik	22
4	Experimentelle Untersuchung der Sensoreigenschaften	23
4.1	Allgemeine Eigenschaften	24
4.1.1	Widerstandskennfeld im unbelasteten Zustand	24
4.1.2	Widerstandsstreuung um den unbelasteten Zustand	25
4.1.3	Empfindlichkeit bei niedrigen Belastungen	25
4.2	Modellrelevante Eigenschaften	27
4.2.1	Kopplung zwischen benachbarten Elementen	27
4.2.2	Kennlinien der taktilen Elemente	29
4.2.3	Hystereseverhalten	31
4.2.4	Drifteffekt	32
4.2.5	Prelleffekt	34
4.2.6	Totzeitverhalten	35
4.2.7	Rauschverhalten	35
4.3	Plan zur methodischen Untersuchung von Sensoreigenschaften bei Konfiguration des Sensors	38
5	Entwicklung des Sensormodells	41
5.1	Modell für die Kopplung zwischen benachbarten Elementen	42
5.2	Kennlinien- und Hysteresemodell	44
5.3	Driftmodell	47
5.4	Filtermodell	48
5.5	Prellmodell	49
5.6	Rauschmodell	51

6	Integration des Sensormodells in C++	53
6.1	Architekturdesign	53
6.2	Komponentenentwicklung	54
6.2.1	Übergeordnetes Sensormodell - <i>ContactSensorTactile</i>	55
6.2.2	Modell für die Kopplung benachbarter Elemente - <i>InfluenceOnAdjacent-Elements</i>	57
6.2.3	Kennlinien- und Hysteresemodell - <i>CharacteristicCurveHysteresis</i>	57
6.2.4	Driftmodell - <i>DriftModel</i>	59
6.2.5	Filtermodell - <i>FilterModel</i>	60
6.2.6	Prellmodell - <i>ImpulseBehaviour</i>	61
6.2.7	Rauschmodell - <i>NoiseBehaviour</i>	61
6.3	Performance des Sensormodells	62
7	Verifikation und Validierung des Sensormodells	63
7.1	Komponententest und Verifikation des Sensormodells	63
7.2	Validierung des Sensormodells	64
7.2.1	Validierung der Kopplung benachbarter Elemente	65
7.2.2	Validierung unterschiedlicher Zeitverläufe	66
7.2.3	Validierung des Sensormodells durch einen fußähnlichen Prototyp	67
8	Zusammenfassung und Ausblick	71
8.1	Zusammenfassung	71
8.2	Ausblick	72
A	Schaltplan der Auswerteelektronik	73
B	Versuchsaufbau und Auswertung der Sensorsignale	79
B.1	Auswerteelektronik der Sensorsignale und Kraftmessgerät	79
B.2	Ausgangssignale am Microcontroller bei hohen Schaltfrequenzen	81
B.3	Grafische Bedienoberfläche zur Auswertung der Sensorsignale	81
C	Validierungsmessungen	83
C.1	Validierung der Kopplung benachbarter Elemente	83
C.2	Validierung unterschiedlicher Zeitverläufe	86
C.3	Validierung des Sensormodells durch einen fußähnlichen Prototyp	88
	Literatur	91

Abbildungsverzeichnis

1.1	Hardware Übersicht von LOLA nach [8] (links) und bestehendes Designkonzept der Füße von LOLA in Anlehnung an [14] (rechts).	1
1.2	Designkonzept des taktilen Fußes von LOLA nach [19].	2
2.1	Konzept einer Roboterhand nach [11], ausgestattet mit taktilen Sensoren (links: mechanische Konstruktion und Gelenkstruktur, mitte: harte Pufferschicht zur Stoßabsorption und Sensoraufnahme, rechts: großflächige extrinsische Sensoren).	5
2.2	Druckabhängiger Widerstand (links) und Verschaltung zu einer taktilen Matrix (rechts) nach [11].	7
2.3	Widerstandsverlauf des Sensors aus [11] bei Belastung.	7
2.4	Spannungsteiler zur Widerstandsmessung am Mikrocontroller.	7
2.5	Crossedwire Design nach [25].	8
2.6	Schematischer Aufbau der DLR-Haut (links) und Aufbau der Transduktionsschicht (rechts) nach [26].	9
2.7	Test-Messaufbau und Abmessungen der Polymerelektroden nach [27].	9
2.8	Aufbau des Sensorprototyps aus [28] mit maschinengenähter Matrix und Stoffbezug.	10
2.9	Universelles und spezifisches Modell (links) und Modellabweichungen (rechts) - Die Belastungswerte in kPa ergeben sich nach [28] für eine Kontaktfläche von $3.0cm^2$	11
2.10	Belastungsabhängige Hysterese des Sensors (links) [28] und thermische Hysterese (rechts) [2].	11
2.11	Dynamisches und statisches Verhalten des Sensors aus [25].	12
2.12	Trägheit des Sensors aus [25].	13
2.13	Zusätzliche leitfähige Pfade des Sensors aus [13], beim Auslesen von Spalte 1 und Zeile 3.	14
2.14	Elastische Verformung der piezoresistiven Matrix in Zylinderkoordinaten nach [13].	14
2.15	Schema für den Drifteffekt (links) und Driftkorrektur (rechts) nach [24].	15
2.16	Vektorfeld (links) und Hystereseschleifen der Zelle x_k in Abhängigkeit von unterschiedlichen Eingangsraten (rechts) nach [20] - die schwarze Hystereseschleife ergibt sich dabei für hochfrequente Eingänge ξ	16
2.17	Hystereseschleifen (links) und Modellausgang ψ mit modellierter Hysterese und Drift (rechts) nach [20].	16
3.1	Piezoresistiver taktiler Sensor nach [28] (links) und Aufbau des Versuchsprototypen (rechts).	17
3.2	Spannungsteiler am druckabhängigen Widerstand R zwischen den Edelstahl-fäden.	18

3.3	Schematischer Aufbau der Prüfstandskonfiguration mit Motorsteuerung nach [7] und Auswerteelektronik der taktilen Fußsohle.	19
3.4	Schematischer Aufbau der Auswerteelektronik, bestehend aus zwei separaten Platinen mit Multiplexern, Kraftmessgerät, Infineon XMC4300 Microcontroller und dem Visualisierungsrechner. In der Abbildung ist das Taxel (7,1) zur Messung ausgewählt.	20
3.5	Aktivitätsdiagramm der Auswertesoftware.	21
3.6	Absoluter Messfehler der Auswerteelektronik.	22
4.1	Modellrelevante Sensoreigenschaften.	23
4.2	Widerstandskennfeld im unbelasteten Zustand. An den Zeilen mit Index 4, 5, 6 und 8 kann ein erhöhter Ruhewiderstand erkannt werden.	24
4.3	Empfindlichkeitsmessung an den Taxeln (3,10) und (4,9) mit zugehörigen Belastungsdrücken (oben) und resultierenden Widerständen (unten). Die geplotteten Widerstände werden durch deren jeweilige Ruhewiderstände normiert.	26
4.4	Gemessene Belastungsdrücke bei alleiniger Belastung von Taxel (4,6).	27
4.5	Taxelspezifische Kennlinien und Medianmodell zur Berechnung der wirkenden Pressung P in Abhängigkeit des gemessenen Widerstandes R (für positive Belastungsgradienten).	28
4.6	Gemessene Kennlinien ausgewählter Taxel bei Belastung (links) und Entlastung (rechts).	30
4.7	Unterschiede zwischen den Kennlinien zweier Taxel bei Be- und Entlastung.	30
4.8	Hysterese bei unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten des Kraftmessprüfstandes in [Pa/s].	31
4.9	Hysterese bei unterschiedlichen Maximalbelastungen, ausgehend vom unbelasteten Zustand (links). Hysterese bei unterschiedlichen Minimalbelastungen, ausgehend vom belasteten Zustand (rechts).	32
4.10	Widerstandsverlauf am Taxel (6,8) bei unterschiedlichen, abschnittsweise konstanten Belastungen.	33
4.11	Gemessene normierte Widerstände und zugehörige Belastungsdrücke. Die Übergangsdauer für einen Zustandswechsel (Be- nach Entlastet bzw. Ent- nach Belastet) beträgt jeweils 200ms.	35
4.12	Simulierte Ströme und Taxelwiderstände, überlagert mit weißem Rauschen.	37
5.1	Aufrufabfolge der Sensormodelle.	41
5.2	Interpolation der Messpunkte für die Kopplung zwischen benachbarten Elementen.	42
5.3	Parameter p_1 und p_4 des Kennfeldes für die Kopplung zwischen benachbarten Elementen.	43
5.4	Taxelspezifische Kennlinien und Medianmodell zur Berechnung des resultierenden Widerstandes aus der simulierten Pressung P für Be- und Entlastung.	45
5.5	Medianmodell der Kennlinien unter Be- und Entlastung.	45
5.6	In <i>MATLAB</i> [®] modellierte Widerstände des Hysterese Modells in Abhängigkeit des wirkenden Belastungsdruckes (links) und der Systemzeit (rechts). Dargestellt sind zwei Belastungen von 0 bis 60kPa bzw. 7.5kPa und eine anschließende Entlastung. In der Abbildung rechts ist zusätzlich das gemittelte Kennlinienmodell ohne dem Hysterese Modell aufgetragen.	46

5.7	In <i>MATLAB</i> [®] modellierte Widerstände des Hysterese-modells in Abhängigkeit des wirkenden Belastungsdruckes (links) und der Systemzeit (rechts). Dargestellt sind zwei Belastungen zwischen 0 und 60kPa bzw. 2kPa und 60kPa. In der Abbildung rechts ist zusätzlich das gemittelte Kennlinienmodell ohne dem Hysterese-modell aufgetragen.	46
5.8	Interpolierte Parameter der Driftfunktion in Abhängigkeit der normierten Widerstandsänderung.	47
5.9	In <i>MATLAB</i> [®] modellierte Widerstände nach dem Hysterese-modell und nach dem Driftmodell in Abhängigkeit der Systemzeit.	48
5.10	In <i>MATLAB</i> [®] modellierte Widerstände nach dem Driftmodell und nach dem Filtermodell in Abhängigkeit der Systemzeit.	49
5.11	Betrag des normierten Widerstandssprunges bei Be- und Entlastung.	50
5.12	In <i>MATLAB</i> [®] modellierte Widerstände nach dem Filtermodell und nach dem Prellmodell in Abhängigkeit der Systemzeit.	50
5.13	Standardabweichung des Rauschverhaltens in Abhängigkeit der normierten Taxelwiderstände.	51
6.1	V-Modell für die Entwicklung und Integration des Sensormodells nach VDI 2206.	53
6.2	Klassendiagramm des Sensormodells.	54
6.3	Visualisierung der Mehrkörpersimulation von LOLA in der Software Blender. An den Fußflächen sind die Kontaktelemente und wirkende Belastungskräfte dargestellt.	55
6.4	Aufbau der Vektoren für simulierte Modellwiderstände. Die Bezeichnung der Taxelwiderstände erfolgt als (x,y), mit x als Taxel-Zeilenindex und y als Taxel-Spaltenindex. Als <i>Sensor Pad</i> wird der kleine Zehen-Sensor mit $8 \cdot 14 = 112$ Taxel bezeichnet. Als <i>Sensor Heel</i> wird der große Fersen-Sensor mit $20 \cdot 14 = 280$ Taxel bezeichnet. Oberhalb der Abbildung ist der zugehörige <i>Taxel-Index</i> eingetragen, mit welchem in der Simulationsumgebung gearbeitet wird.	56
6.5	Simulierte Belastungsdrücke bei alleiniger Belastung von Taxel (4,5) und daraus resultierende, simulierte Widerstände am Taxel (4,5) und (5,6).	56
7.1	V-Modell für die Verifikation und Validierung des Sensormodells nach VDI 2206.	63
7.2	Aufrufabfolge einzelner Programme und erzeugte/benötigte Datenfiles zur Verifikation des Sensormodells.	64
7.3	Aufbau bzw. Strukturierung der Eingabe-Textdateien in die Verifikations-Anwendung der Mehrkörpersimulationsumgebung von LOLA. Zeitangaben erfolgen in [s] und Belastungsdrücke in [Pa].	64
7.4	Validierungsmessung der Kopplung benachbarter Elemente am Sensorprototyp aus Kapitel 3.1. Dargestellt ist eine punktförmige, statische Belastung von Taxel (4,6).	65
7.5	Validierungsmessung des Widerstandsverhaltens in Abhängigkeit der Systemzeit am Sensorprototyp aus Kapitel 3.1.	66
7.6	Schematischer Aufbau des fußähnlichen Prototyps.	68
7.7	Validierungsmessung des Widerstandsverhaltens in Abhängigkeit der Systemzeit am fußähnlichen Prototypen aus Abb. 7.6.	68
A.1	Platine 8MUX Pad. Die dargestellte Platine wird zur Auswertung der Taxel-Zeilenindizes am kleinen Zehen-Sensor (Pad) verwendet.	73
A.2	Platine 16MUX Pad. Die dargestellte Platine wird zur Auswertung der Taxel-Spaltenindizes am kleinen Zehen-Sensor (Pad) verwendet.	74

A.3	Platine 16MUX Heel. Die dargestellte Platine wird zur Auswertung der Taxel-Spaltenindizes am großen Fersen-Sensor (Heel) verwendet.	75
A.4	Platine 32MUX Heel. Die dargestellte Platine wird zur Auswertung der Taxel-Zeilenindizes am großen Fersen-Sensor (Heel) verwendet.	76
A.5	Verbindungsplatine zum Anschluss der Multiplexer an den Mikrokontroller. . .	77
B.1	Infineon XMC4300 Microcontroller mit Verbindungsplatine und Anschlüssen für die Multiplexer und das Kraftmessgerät.	79
B.2	Oberseite des taktilem Fußsensors (links) und Unterseite (rechts) mit den Platinen und Anschlusskabel der Multiplexer.	80
B.3	Sauter FL Kraftmessgerät mit einem zylindrischen Prüfkopf vom Durchmesser 20mm und taktilem Fußsensor (ohne Dämpfungsmaterial und abriebfesteste Schicht).	80
B.4	Ausgangssignal Port 3.6 des Infineon XMC4300 Microcontrollers bei einer Abtastrate der gesamten Fußsohle von 1000Hz.	81
B.5	Grafische Bedienoberfläche in Mircium zur Auswertung und Aufzeichnung von Messsignalen.	81
C.1	Validierungsmessungen der Kopplung benachbarter Elemente am Sensorprototyp aus Kapitel 3.1. Dargestellt ist eine punktförmige, statische Belastung von Taxel (4,6).	83
C.2	Validierungsmessungen der Kopplung benachbarter Elemente am Sensorprototyp aus Kapitel 3.1. Dargestellt ist eine punktförmige, statische Belastung von Taxel (4,6).	84
C.3	Validierungsmessungen der Kopplung benachbarter Elemente am Sensorprototyp aus Kapitel 3.1. Dargestellt sind großflächige Belastungen unterschiedlicher Taxel.	85
C.4	Validierungsmessungen des Widerstandsverhaltens in Abhängigkeit der Systemzeit am Sensorprototyp aus Kapitel 3.1.	86
C.5	Validierungsmessungen des Widerstandsverhaltens in Abhängigkeit der Systemzeit am Sensorprototyp aus Kapitel 3.1. Die dargestellten Messungen sind nicht direkt an der Belastungsstelle, sondern an benachbarten Taxeln der Belastungsstelle ausgewertet. Somit kann zusätzlich das Modell für die Kopplung benachbarter Elemente validiert werden.	87
C.6	Aufbau des fußähnlichen Prototypen zur Durchführung von Validierungsmessungen.	88
C.7	Validierungsmessungen des Widerstandsverhaltens in Abhängigkeit der Systemzeit am fußähnlichen Prototypen.	89

Tabellenverzeichnis

3.1	Relativer Messfehler bei dynamischer Widerstandsänderung zweier beispielhafter Normwiderstände.	22
4.1	Versuchskonfiguration zur Ermittlung der Widerstandsstreuung um den unbelasteten Zustand.	25
4.2	Versuchskonfiguration zur Ermittlung der Empfindlichkeit einzelner Taxel. . .	26
4.3	Parameter des Medianmodells aus Gleichung (4.1).	28
4.4	Versuchskonfiguration zur Ermittlung der Kopplung zwischen benachbarten Elementen.	29
4.5	Versuchskonfiguration zur Ermittlung der Kennlinien für Be- und Entlastung. .	31
4.6	Versuchskonfiguration zur Ermittlung des Hystereseverhaltens.	32
4.7	Versuchskonfiguration zur Ermittlung des Driftverhaltens.	34
4.8	Versuchskonfiguration zur Ermittlung des Totzeitverhaltens.	35
4.9	Versuchskonfiguration zur Ermittlung des Rauschverhaltens.	36
4.10	Plan zur Durchführung von Messungen nach Konfiguration des Sensoraufbaus. Der referenzierte Sensoraufbau ist dabei auf den Prototyp nach Kapitel 3.1 bezogen. Legende: + ... Messung notwendig, o ... Messung empfohlen, – ... Messung nicht notwendig	38
5.1	Konstanten p_2 , p_3 , p_5 und p_6 aus Gleichung (5.1).	43
5.2	Konstanten a_i und b_i aus Gleichung (5.2).	43
5.3	Konstanten der Medianmodelle für Be- und Entlastung aus Gleichung (5.3). B steht für Belastung und E für Entlastung.	44
5.4	Parameter der Funktionen $a(\Delta R)$ und $b(\Delta R)$ aus Gleichung (5.8) und (5.9). .	48
5.5	Konstanten des Prellmodells aus Gleichung (5.12). B steht für Belastung und E für Entlastung.	50
5.6	Konstanten des Rauschmodells aus Gleichung (5.13).	51
6.1	Input Parameter <i>sensorIndex</i> der jeweiligen Sensormodelle. Als <i>Sensor Pad</i> wird der kleine Zehen-Sensor mit $8 \cdot 14 = 112$ Taxel bezeichnet. Als <i>Sensor Heel</i> wird der große Fersen-Sensor mit $20 \cdot 14 = 280$ Taxel bezeichnet.	57
6.2	Mögliche Zustände des Driftmodells pro Taxel.	60
6.3	Sensormodelle nach Abschnitt 6.2 und deren Anteil an der Simulationsdauer des gesamten Sensormodells.	62
C.1	Zugehörige belastete Taxel aus Abb. C.3.	85

Kapitel 1

Einleitung

Unter humanoiden Robotern versteht man nach [14] Maschinen, deren Konstruktion der menschlichen Gestalt nachempfunden ist. Die Positionen und Bewegungsfreiheitsgrade der Gelenke sind dabei sehr ähnlich zum Körperbau des Menschen. Unter anderem läuft ein humanoider Roboter meist auf zwei Beinen. Am Lehrstuhl für Angewandte Mechanik der Technischen Universität München, wird die Forschungsplattform LOLA entwickelt, welche erstmals im Jahre 2010 auf der Hannovermesse vorgestellt wurde.

Der humanoide Roboter LOLA besteht aus einer kinematischen Struktur mit 24 elektrisch betätigten Gelenken. Eine Hardware Übersicht von LOLA findet sich in Abb. 1.1 links. Die Gelenke werden nach [8] von bürstenlosen Gleichstrommotoren angetrieben. Die meisten Gelenkstrukturen sind mit einem rotatorischen Inkrementalencoder, einem absoluten Winkelsensor zur direkten Positionserfassung und Endschaltern ausgestattet. Im Oberkörper des Roboters befindet sich zur Stabilisierung zusätzlich ein Beschleunigungssensor und Ringlaser-Gyroskop.

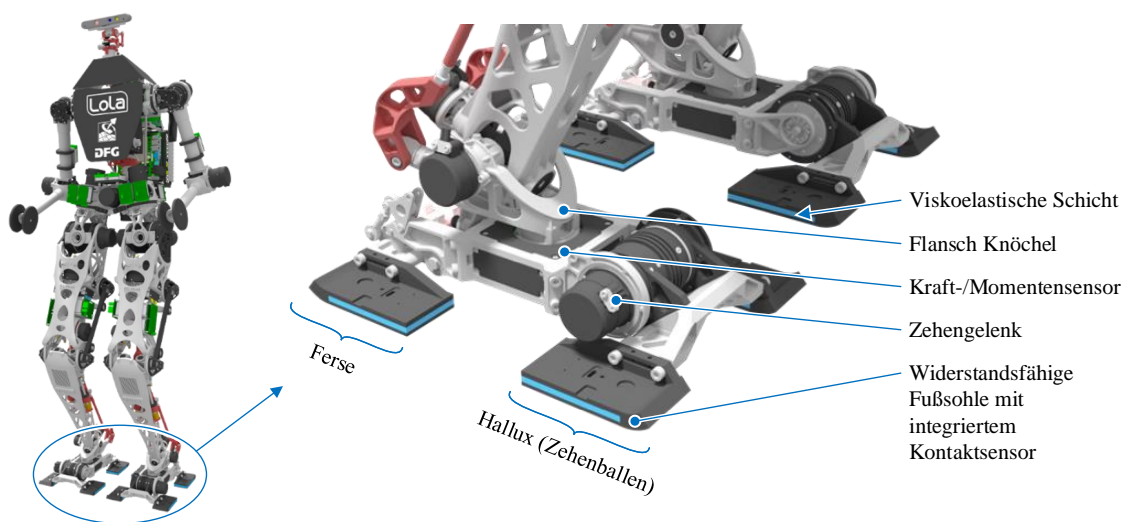


Abbildung 1.1: Hardware Übersicht von LOLA nach [8] (links) und bestehendes Designkonzept der Füße von LOLA in Anlehnung an [14] (rechts).

Bei humanoiden Laufrobotern spielen die Kontaktkräfte zwischen den Endeffektoren¹ und der Umgebung eine wesentliche Rolle für die Stabilität des Gesamtsystems. Die in [14] entwickelte Fußkonstruktion von LOLA ist weit angelehnt an die Biomechanik des menschlichen

¹Unter Endeffektoren versteht man bei humanoiden Laufrobotern die Füße und Hände.

Fußes. Da es beim Gehen zu hohen Bodenkontaktkräften kommt, verfügt der menschliche Fuß über aktive und passive Mechanismen zur Dämpfung von Vibrationen und impulsartigen Kräften. Durch das Anspannen von Muskeln und entsprechenden Ausgleichsbewegungen von Gelenken (aktive Mechanismen) kann ein gewisser Grad an Erschütterungen absorbiert werden. Zusätzlich zu den aktiven Mechanismen, werden hochfrequente Schwingungen durch ein 10 – 20mm dickes Gewebe an der Ferse sowie durch viskoelastische Eigenschaften von Gelenken, welche wie ein Tiefpassfilter wirken, absorbiert (passive Mechanismen). Auf Basis der Gelenkstrukturen des menschlichen Fußes und den Anforderungen an die Dämpfungseigenschaften, wurde die Konstruktion der Füße von LOLA wie in Abb. 1.1 ausgeführt. Die passiven Mechanismen zur Stoßreduktion werden jeweils durch die *viskoelastische Schicht* nach Abb. 1.1 übernommen. Aktive Mechanismen zur Stoßreduktion werden durch entsprechende Regelung umgesetzt.

Um die Regelung des Roboters jedoch erst zu ermöglichen, müssen die aktuell vorherrschenden Bodenreaktionskräfte und -momente sowie Kontaktinformationen mit dem Untergrund zur Verfügung stehen. Zur Messung der Reaktionskräfte wird ein sechssachsiger *Kraft- und Momentensensor* nach Abb. 1.1 verwendet. Die Kontaktinformationen erhält die Regelung von LOLA durch vier binäre *Kontaktsensoren* pro Fuß. Mit dieser Sensorkonfiguration ist es zwar möglich, die exakte Position und den Betrag der resultierenden Kraft an der Fußsohle zu messen, jedoch kann keine detaillierte Aussage über die Kontaktgeometrie zwischen den Füßen des Roboters und dem Boden getroffen werden. Der Grund hierfür ist, dass der Bodenkontakt nur an den jeweiligen Kontaktpads detektiert wird. Zur Anwendung unterschiedlicher Regelungskonzepte, muss somit die aktuelle Kontaktgeometrie zwischen diesen Messpunkten nach [29] geschätzt werden, was mit Ungenauigkeiten verbunden ist. Speziell Szenarien mit nur teilweisem Bodenkontakt erfordern schnelle und präzise Reaktionen, um Stürze und dergleichen zu vermeiden.

Am Lehrstuhl für Angewandte Mechanik der TU-München wurde bereits ein taktile Sensor² nach [28] entwickelt. Dieser Sensor ist durch eine matrixförmige Anordnung von mehreren taktilen Elementen in der Lage, die großflächige Kontaktfläche zwischen der Fußsohle und dem Untergrund zu erfassen. Aus den dadurch gewonnenen Informationen ist es möglich, präzisere Stellgrößen zu erzeugen. Ein schematischer Aufbau der neuen taktilen Fußsohle von LOLA ist in Abb. 1.2 dargestellt. Dabei werden die vier binären Kontaktsensoren pro Fuß, durch jeweils zwei taktile Sensoren ersetzt.

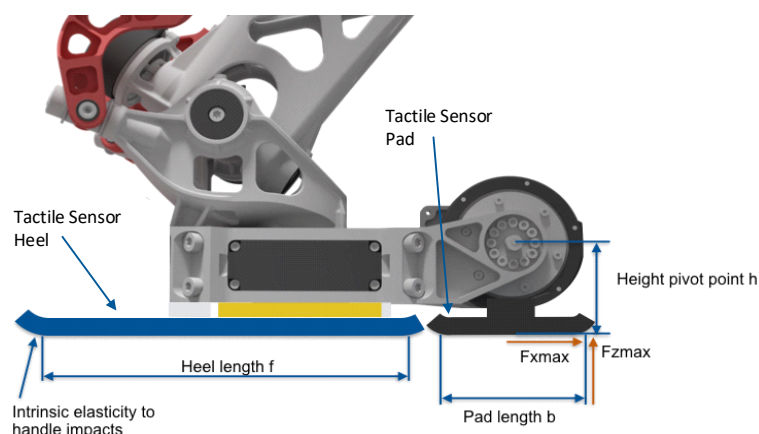


Abbildung 1.2: Designkonzept des taktilen Fußes von LOLA nach [19].

²Unter einem taktilen Sensor versteht man nach [12] ein Gerät oder System, welches bestimmte Eigenschaften eines physikalischen Kontaktes erfasst. Dabei können unterschiedlichste Größen, wie zum Beispiel Kräfte, Drücke, Temperaturen, Feuchtigkeit, Formen usw. gemessen werden.

1.1 Problemstellung

Ein Konzept der taktilen Fußsohle nach Abb. 1.2 ist bereits soweit fertig gestellt, dass dieses für den Einsatz am realen Roboter geeignet ist. Jedoch muss bei einer Konfiguration der Sensorik von LOLA auch deren Steuerung bzw. Regelung überarbeitet werden, um die neuen Kontaktinformationen auswerten und verarbeiten zu können.

Bei der Änderung von Steuerungssoftware, Optimierungen in Programmabläufen oder bei der Implementierung neuer Funktionalitäten, kommt es in der Praxis oftmals zum Einsatz von Modellen und Simulationen, da Versuche am realen System schlichtweg zu kostenintensiv und gefährlich sind oder auch zu schnell ablaufen. Aus denselben Gründen wurde für LOLA eine Mehrkörpersimulation entwickelt, durch welche zum Beispiel neue Funktionalitäten vorab simuliert und getestet werden können.

Das Thema dieser Thesis ist es, für den am Lehrstuhl für Angewandte Mechanik entwickelten taktilen Sensor nach [28], ein Simulationsmodell zu erarbeiten. Dafür müssen zu Beginn alle Eigenschaften des taktilen Sensors ermittelt werden. Auf Basis der ermittelten Eigenschaften soll ein Sensormodell erstellt und in die Mehrkörpersimulationsumgebung von LOLA integriert werden. Hierfür muss das bestehende Kontaktmodell in der Simulation so angepasst werden, dass für jedes taktile Element Kontaktkraft-Informationen zur Verfügung stehen. Auf Basis dieser Kontaktkraft-Informationen werden die tatsächlichen Sensorsignale simuliert. Darüber hinaus soll das Simulationsmodell mit realistischen Fehler- und Rauschmodellen erweitert werden. Zur Validierung des Sensormodells werden abschließend die Ergebnisse der Mehrkörpersimulation mit realen Laufversuchen der finalen Sensor-Hardware an LOLA verglichen.

1.2 Ziele und Gliederung der Thesis

Als oberstes Ziel dieser Arbeit steht die Erarbeitung eines validierten Sensormodells für die am Lehrstuhl für Angewandte Mechanik entwickelte taktile Fußsohle nach [28]. Zur Validierung des erarbeiteten Sensormodells, soll die reale Fußsohle an der bereits bestehenden Hardware von LOLA integriert werden, um Vergleichsmessungen durchführen zu können.

Um das Hauptziel der Thesis zu erreichen, wird die Arbeit in mehrere kleine Arbeitspakete mit Zwischenzielen unterteilt:

1. Literaturrecherche bzw. Stand der Wissenschaft und Technik:

Das Ziel der Literaturrecherche ist es, theoretische Grundlagen auf Basis veröffentlichter Forschungsberichte zu schaffen. In Kapitel 2 werden taktile Sensorkonzepte für humanoide Roboter ermittelt, welche auf unterschiedliche Art und Weise Berührungen zwischen Oberfläche und Sensor in ein messbares Signal umwandeln. Es werden Vor- und Nachteile sowie gewisse Eigenschaften der vorgestellten Sensoren herausgearbeitet. Darüber hinaus sollen für die unterschiedlichen Sensorprinzipien eventuell vorhandene Sensormodelle sowie deren Hintergründe und Funktionalitäten ermittelt werden.

Zwischenziel: Technische bzw. wissenschaftliche Grundlage, auf Basis derer die weitere Arbeit aufgebaut werden kann.

2. Experimentelle Untersuchung der Sensoreigenschaften:

Für den Einsatz an LOLA ist der am Lehrstuhl für Angewandte Mechanik entwickelte taktile Sensor nach [28] geplant. Um die Eigenschaften des Sensors wie Auflösung,

Rauschen, Genauigkeit und dynamisches Verhalten zu analysieren, werden in Kapitel 4 unterschiedliche Experimente, an einem Prüfstand nach Kapitel 3, durchgeführt. Das Auslesen der Sensorsignale soll entweder mit der finalen Elektronik an LOLA oder mittels dSpace³ System erfolgen.

Zwischenziel: Kenntnis über reale Sensoreigenschaften und mögliche Fehlerquellen.

3. Entwicklung und Integration des Sensormodells:

Auf Basis der experimentellen Versuchsergebnisse wird in Kapitel 5 ein Sensormodell der taktilen Fußsohle erarbeitet. Dieses Modell soll eine Nachbildung der realen Sensorcharakteristika sein. Das entwickelte Modell wird anhand der Vorgehensweise aus Kapitel 6 in die Mehrkörpersimulation von LOLA integriert. Dafür muss das bestehende Kontaktmodell in der Simulation so angepasst werden, dass für jedes taktile Element des Sensors eigene Kontaktkraft-Informationen zur Verfügung stehen.

Zwischenziel: Vollständiges, den Experimenten entsprechendes Sensormodell. Vollständige Integration des Sensormodells in die Mehrkörpersimulationsumgebung von LOLA.

4. Verifikation und Validierung des Sensormodells:

Zur Validierung der Simulationsergebnisse aus dem entwickelten Sensormodell, sollen nach der Integration der taktilen Fußsohle an LOLA, Laufversuche über unterschiedliches Terrain durchgeführt werden. Die Simulationsdaten werden in Kapitel 7 mit den realen Sensordaten verglichen. Bei Abweichungen wird das Sensormodell entsprechend adaptiert.

Zwischenziel: Validiertes, der Realität entsprechendes Sensormodell.

³dSPACE Prototyping-Systeme eignen sich nach [5] zum experimentellen Einlesen diverser Sensorsignale sowie zur Entwicklung und Optimierung von Regelungen. dSPACE Systeme verfügen über eine Vielzahl an Schnittstellenfunktionen.

Kapitel 2

Stand der Wissenschaft und Technik

Nach [3] umfasst der Tastsinn des Menschen zwei Haupt-Submodalitäten, nämlich den der Kinästhetik und den der Haut. Der kinästhetische Tastsinn empfängt sensorische Eingaben von den Rezeptoren in Muskeln, Sehnen und Gelenken. Dies ist bei LOLA zum Beispiel durch die Messung von Motormomenten bzw. -strömen umgesetzt. Der Hautsinn empfängt wiederum sensorische Eingaben durch die in der menschlichen Haut eingebetteten Rezeptoren. Der menschliche Hautsinn kann bei Robotern durch die Verwendung von taktilen Sensoren nachempfunden werden.

Basierend auf der Körperstelle, an der sich Sensoren befinden, wird die Berührungserkennung bei Robotern in [3] als intrinsische und extrinsische Erfassung kategorisiert. Intrinsische taktile Sensoren sind in der mechanischen Struktur des Roboters angebracht und erfassen Kontaktinformationen mithilfe von Kraftsensoren (z.B. Dehnmessstreifen). Diese messen nicht direkt die Eigenschaften des Kontaktes, sondern erfassen indirekte Informationen über wirkende Kräfte und berechnen somit die Kontaktinformationen. Hierfür muss die Geometrie des Kontaktes bekannt sein. Ein Beispiel für einen intrinsischen Sensor ist der sechssachsige *Kraft- und Momentensensor* aus Abb. 1.1. Die Geometrie des Kontaktes wird dabei durch die vier Kontaktsensoren pro Fuß erfasst. Extrinsische Sensoren sind hingegen direkt an den Kontaktschnittstellen angebracht und messen konkrete Werte wie Druck, Schubkräfte und/oder die Geometrie des Kontaktes.

Extrinsische Sensoren zur haptischen Wahrnehmung sind bei einer Vielzahl an Anwendungen unerlässlich. In [11] wird als Anwendungsbeispiel der zunehmende Grad an Automatisierung genannt. Hier wird es zu Situationen kommen, bei denen Mensch und Roboter in gleichen

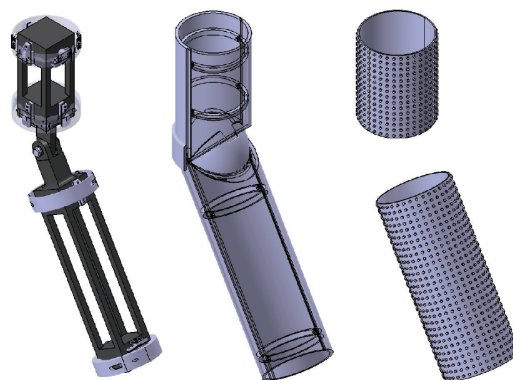


Abbildung 2.1: Konzept einer Roboterhand nach [11], ausgestattet mit taktilen Sensoren (links: mechanische Konstruktion und Gelenkstruktur, mitte: harte Pufferschicht zur Stoßabsorption und Sensoraufnahme, rechts: großflächige extrinsische Sensoren).

Räumlichkeiten, ohne trennende Schutz Einrichtung, zusammenarbeiten müssen (z.B. Krankenpflege, industrielle Fertigung, usw.). Dabei müssen alle beweglichen Teile großflächig mit extrinsischen Sensoren ausgestattet werden, um Kollisionen mit Menschen bzw. der Umgebung zu erkennen und daraufhin Bewegungen zu stoppen (siehe Abb. 2.1). Um Roboter großflächig mit taktilen Sensoren ausstatten zu können, müssen diese flexibel und leicht sein, damit sie zum einen an die Konstruktion der Gliedmaßen angepasst werden können und zum anderen die Dynamik der Bewegungen nicht negativ beeinflussen. Des Weiteren müssen die Sensoren, zum Beispiel bei der Verwendung als Fußsohle, eine gewisse Elastizität aufweisen, um Stoßenergien zu absorbieren.

2.1 Sensorkonzepte für taktile Sensoren

In [3] wird eine Vielzahl unterschiedlicher Messprinzipien für taktile Sensoren vorgestellt. Diese reichen von Prinzipien einfacher physikalischer Natur wie zum Beispiel kapazitiven, optischen oder piezoresistiven¹ Sensoren, bis hin zu komplizierteren und aufwendigen wie Ultraschall- oder Quantentunnel-Verbundwerkstoff-Basierten Sensoren.

Im Folgenden wird nur auf Messprinzipien für kostengünstige extrinsische Sensoren, mit Fokus auf dem piezoresistiven Konzept, eingegangen.

2.1.1 Taktile Widerstandssensoren

Auf der Internationalen Konferenz für Robotik und Bionik wurde in [11] eine modulare taktile Sensormatrix vorgestellt. Dieser Sensor ist für großflächige Anwendungen an unterschiedlichsten Robotern entwickelt, um Berührungen und eventuelle Kollisionen zu erkennen. Für ein solches Anwendungsfeld muss die Sensormatrix zum einen flexibel sein, um unterschiedlichen Konturen zu folgen, und zum anderen muss diese möglichst dünn und leicht sein, um die Dynamik der Bewegungen nicht negativ zu beeinflussen. Ein Konzept für großflächige Anwendungen dieser Matrix ist in Abb. 2.1 zu sehen.

Wie oberhalb erwähnt wird, ist dieser Sensor zur Kollisions- und Berührungserkennung entwickelt. Für solche Anwendungen reicht eine Matrixauflösung von ca. 1cm. Dieser Wert entspricht nach [11] in etwa der Auflösung der menschlichen Haut an nicht sehr empfindlichen Körperteilen (z.B. Arme im Gegensatz zu Fingerspitzen, Lippen usw.). Vor dem Entwurf wurde an zehn Erwachsenen eine Studie durchgeführt, um kleinste wahrnehmbare Kräfte und maximale Kräfte, die Erwachsene bei einer Mensch-Roboter-Interaktion auf den Unterarm ausüben würden, zu bestimmen. Als Ergebnis wird ein Mindestbereich von 0.5N bis 10N angeführt, in welchem der taktile Sensor zuverlässig funktionieren muss.

Die einzelnen taktilen Elemente des Sensors nach [11] bestehen aus quaderförmigen Widerständen (Abb. 2.2 links), welche zu einem großflächigen Modul zusammengeschaltet sind (Abb. 2.2 rechts). Die dargestellten Dioden dienen zur Verhinderung des Stromflusses in andere als die zu messenden Widerstände und wirken somit als „Schalter“ zur Erzielung von genaueren Messergebnissen.

Bei einer Belastung des Widerstandselements ändern sich dessen spezifischer Widerstand ρ_m und seine Abmessungen, wodurch sich wiederum der Gesamtwiderstand R_m des Elements verändert. Durch aufbringen von pulsierenden Kräften mittels Dynamometer, wird in [11]

¹Der piezoresistive Effekt beschreibt die Veränderung des elektrischen Widerstands eines Materials durch Druck oder Zug [1].

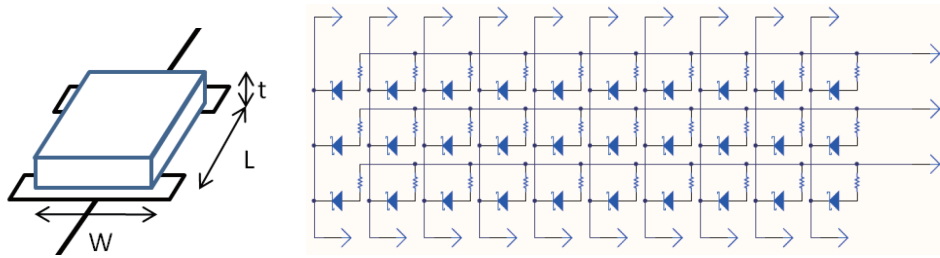


Abbildung 2.2: Druckabhängiger Widerstand (links) und Verschaltung zu einer taktile Matrix (rechts) nach [11].

zum einen die Widerstandsänderung der taktile Pixel bei Belastung und zum anderen der Einfluss von Hystereseeffekten auf die Messergebnisse ermittelt. Dabei kann festgestellt werden, dass die Widerstände nur verschwindende Hystereseeigenschaften aufweisen. Die Versuchsergebnisse an sieben Widerständen sind in Abb. 2.3 dargestellt.

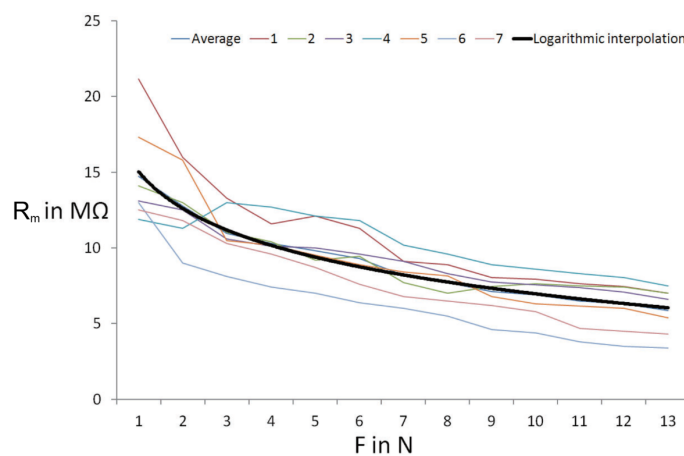


Abbildung 2.3: Widerstandsverlauf des Sensors aus [11] bei Belastung.

Die Messergebnisse aus Abb. 2.3 folgen, mit einer gewissen Streuung, einem logarithmischen Verlauf und werden durch

$$R_m = -3 \cdot 10^6 \cdot \ln(F) + 0.1 \cdot 10^8 \quad (2.1)$$

interpoliert (mit R_m in Ω und F in N).

Zur Messung der Widerstandswerte existiert an jedem Eingang des Mikrocontrollers bzw. dessen Eingangskarte ein Spannungsteiler nach Abb. 2.4, durch welchen die Spannung nach dem taktile Element erfasst werden kann.

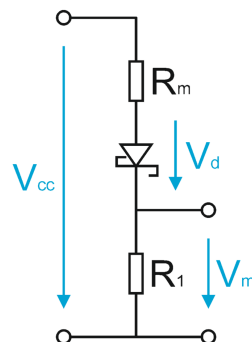


Abbildung 2.4: Spannungsteiler zur Widerstandsmessung am Mikrocontroller.

Die Spannungen am Spannungsteiler ergeben sich zu

$$V_m = \frac{R_1}{R_m + R_1} \cdot (V_{cc} - V_d) \quad (2.2)$$

mit V_m als gemessene Spannung am Eingang, V_{cc} als Versorgungsspannung, V_d als Spannungsabfall an der Diode, R_m als aktueller Widerstand eines taktilen Elements und R_1 als Referenzwiderstand. Durch Variation des Referenzwiderstandes R_1 lässt sich nach [11] der zu messende Kraftbereich und die Empfindlichkeit des Sensors einstellen.

Durch Kombination von Gleichung (2.1) und Gleichung (2.2) lässt sich schlussendlich die Formel zur Berechnung der wirkenden Kraft pro Sensorelement bestimmen:

$$F = \exp\left(3.33 \cdot 10^{-7} \cdot \left(10^7 + R_1 \cdot \left(1 - \frac{V_{cc} - V_d}{V_m}\right)\right)\right) \quad (2.3)$$

Bei dieser Anwendung, mit einem geforderten Messbereich von 0.5N bis 10N, wird ein Referenzwiderstand von $R_1 = 1\text{M}\Omega$ gewählt [11].

2.1.2 Piezoresistive taktile Sensoren

Ein flexibler taktiler Sensor für Roboterhände

Am Institut für Mechatronik und Robotik des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt, wurde ein piezoresistiver Sensor basierend auf einem „Crossedwire Design“ nach [25] entwickelt. Eine schematische Darstellung des Sensors ist in Abb. 2.5 zu erkennen.

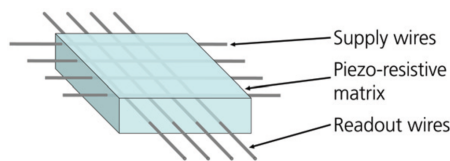


Abbildung 2.5: Crossedwire Design nach [25].

Der in [25] entwickelte Sensor besteht aus zwei gekreuzte Lagen an leitenden Metallfäden, die in eine piezoresistive Matrix eingegossen sind. In beiden Lagen liegen die Drähte parallel, wobei die zweite Lage um 90° gegenüber der ersten gedreht ist. An jedem Punkt, an dem sich zwei Drähte kreuzen, entsteht ein sogenanntes Taxel („Tactile Pixel“). Durch diese Anordnung steigt die Anzahl der Drähte unterproportional zur Anzahl der Sensorpunkte. Das piezoresistive Material, in welches die Drähte eingegossen sind, besteht aus einem flexiblen Polymer mit einer gewissen Konzentration an leitfähigen Füllstoffpartikeln. Der elektrische Widerstand der Matrix lässt sich durch die Konzentration, der geometrischen Form und der Verteilung der Füllstoffpartikel einstellen. Bei einer Verformung des piezoresistiven Materials ändern sich die Abstände der Füllstoffpartikel zueinander und somit auch der Widerstand zwischen den einzelnen Metallfäden. Durch Messung dieses Widerstandes bzw. der Eingangsspannung an einem Spannungsteiler, kann ähnlich wie in [11] auf die wirkende Kraft zurückgeschlossen werden. Als Trägermaterial wird ein ultraelastisches Poly[styrol-b-(ethylen-cobutylen)-b-styrol] (SEBS) Polymer verwendet. Dieses Trägermaterial wird mit einem Füllstoff aus Industrieruß bereichert. Industrieruß besitzt einen Kohlenstoffgehalt von 80% bis 99.5% und ist elektrisch leitfähig.

Die künstliche DLR² Haut

Die künstliche DLR-Haut nach [26] ist eine Weiterentwicklung des in [25] vorgestellten Sensors. Hier liegt der Fokus auf einer hohen Sensibilität und Kollisionstoleranz. Dieser Zielkonflikt soll durch verschiedene Designmaßnahmen gelöst werden. Statt nur einer Schicht, die für Deformation, mechanische Dämpfung und Signalübertragung zuständig ist, setzt man auf ein zweischichtiges Prinzip (siehe Abb. 2.6 links). Die äußere Transduktionsschicht sorgt für eine hohe Sensibilität und die darunterliegende Dämpfungsschicht dissipiert die bei einer Kollision auftretende kinetische Energie. Um die Empfindlichkeit weiter zu steigern, werden in die Transduktionsschicht geometrisch definierte Hohlräume eingebracht (siehe Abb. 2.6 rechts). Dadurch wird die für eine messbare Sensorleistung erforderliche Verformungsenergie reduziert und die Empfindlichkeit des Sensors erhöht. Darüber hinaus können Kräfte präziser auf die einzelnen Taxel einwirken. Um eine längere Lebensdauer des Sensors zu erreichen, werden die in [25] eingesetzten Metallfäden durch leitfähige Polymerfäden ersetzt.

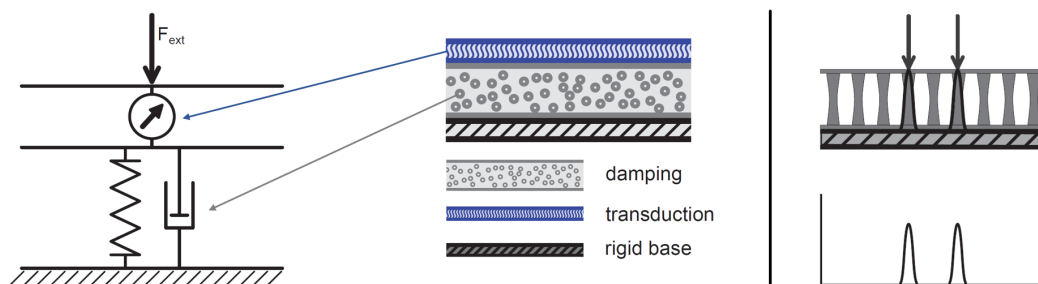


Abbildung 2.6: Schematischer Aufbau der DLR-Haut (links) und Aufbau der Transduktionsschicht (rechts) nach [26].

In [27] werden Maßnahmen zur Steigerung der Sensitivität des entwickelten Sensors aus [26] betrachtet. Die verwendeten Polymerfäden werden in die Hohlräume der Transduktionsschicht (Abb. 2.6 rechts) eingebracht. Diese Schicht dient somit nur mehr als Trägermaterial für die eingesetzten Fäden. Um die Widerstandseigenschaften des Sensors zu verbessern und eine bessere Skalierbarkeit für einen größeren Kraftbereich zu erreichen, werden die Polymerfäden mit einem dreieckigen Querschnitt ausgeführt. Die Dreieckquerschnitte stehen in direktem Kontakt miteinander, wobei sich die Kontaktfläche mit zunehmender Belastung vergrößert (siehe Abb. 2.7). Die Schrägungswinkel α der Polymerfäden werden auf einen Bereich von 30° bis 60° begrenzt.

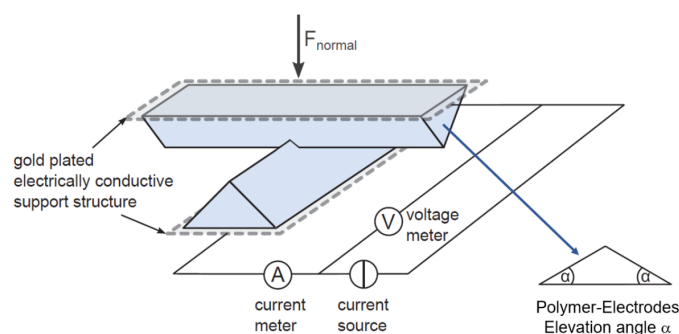


Abbildung 2.7: Test-Messaufbau und Abmessungen der Polymerelektroden nach [27].

²Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) ist das Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt [4].

Ein flexibler Low-Cost Sensor für robotische Anwendungen

Am Lehrstuhl für Angewandte Mechanik der Technischen Universität München, wurde ein taktile piezoresistiver Sensor nach [28] mit Anforderungen an niedrige Herstellkosten und hohe Flexibilität entwickelt. Ein weiterer Fokus liegt in der Anpassungsfähigkeit der räumlichen Auflösung des Sensors an unterschiedliche Aufgaben- bzw. Verwendungsgebiete (z.B. eine hohe Auflösung von 2-3mm an Fingern und eine gröbere Auflösung bei Ganzkörperanwendungen zur Kollisionserkennung). Es wurden einige Sensorprototypen gefertigt und getestet. Im Folgenden wird jedoch nur auf den schlussendlich ausgewählten Prototyp eingegangen.

Der Kern dieses Sensors besteht ähnlich wie in [25] aus einem Polymer. In diesem Fall wird ein Velostat™ 4540 EVA Copolymer verwendet, welches aus einer dünnen, mit Industrieroß bereicherten Polymerfolie besteht. Somit ist der Kern leitfähig und verändert unter Belastung seinen Widerstand. Auf beiden Seiten des Polymers befinden sich um 90° zueinander gedrehte Leiterbahnen, welche eine Matrixstruktur ergeben. Diese Bahnen, bestehend aus Edelstahl-Fäden, sind maschinell in ein schützendes Baumwollgewebe eingenäht. Durch vernähen der leitenden Fäden mit handelsüblichen Nähfäden, werden die Leiterbahnen zum einen im Baumwollgewebe fixiert und zum anderen ergibt sich eine elektrische Isolation nach außen. Zum Schutz kann der Sensor mit Neopren überzogen werden.

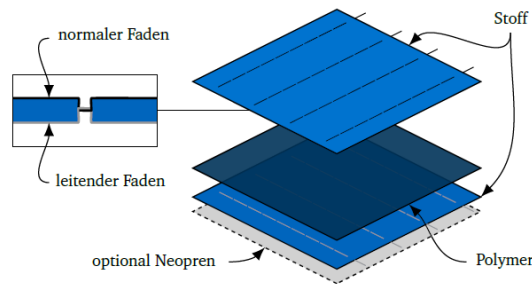


Abbildung 2.8: Aufbau des Sensorprototyps aus [28] mit maschinengenähter Matrix und Stoffbezug.

2.2 Eigenschaften piezoresistiver Sensoren

Kennlinien piezoresistiver Sensoren

Der Zusammenhang zwischen Belastung und Widerstand ist bei piezoresistiven Materialien stark nichtlinear und entspricht meist einem exponentiellen Verlauf. Das reale Verhalten des in [28] vorgestellten Prototypen wird am besten durch das Modell

$$p = a \cdot e^{b \cdot R} + c \cdot e^{d \cdot R}, \quad (2.4)$$

mit p als Belastung bzw. Druck in N/mm^2 , R als gemessener Widerstand in Ω und a, b, c, d als Material- bzw. Sensorparameter, angenähert. Aufgrund von Fertigungsungenauigkeiten, Materialabweichungen oder ähnlichem, ist es nicht möglich einen Sensor herzustellen, welcher über seine gesamte Messfläche identische Eigenschaften aufweist. Je nach Genauigkeitsanforderungen können entweder für die einzelnen Taxel spezifische Modelle mit einem eigenen Set aus Parameter a, b, c, d verwendet werden oder es wird durch exponentielle Interpolation ein universelles, für den gesamten Sensor geltendes Modell erzeugt. In Abb. 2.9 sind die Unterschiede zwischen den Modellen dargestellt. Für die Abweichungen der Messergebnisse aus Abb. 2.9 rechts sei bemerkt, dass Belastungen von $> 40\text{kPa}$ außerhalb des Kalibrierungsmodells von $0.5 - 33\text{kPa}$ liegen.

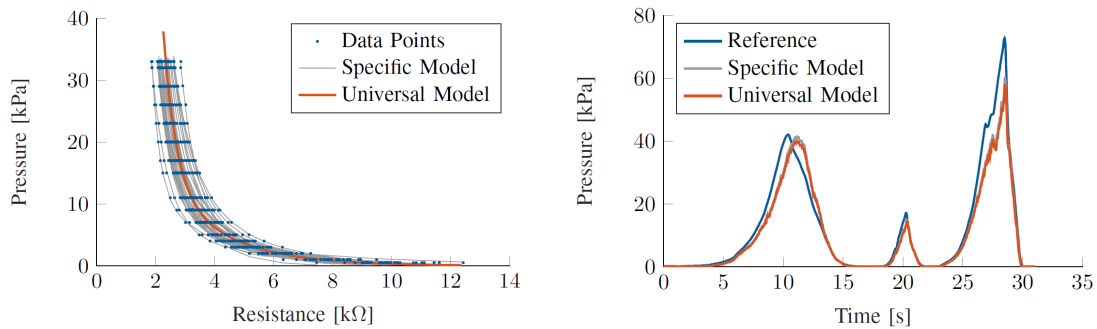


Abbildung 2.9: Universelles und spezifisches Modell (links) und Modellabweichungen (rechts) - Die Belastungswerte in kPa ergeben sich nach [28] für eine Kontaktfläche von 3.0cm^2 .

Hystereseigenschaften

Der belastungsabhängige Hystereseffekt tritt auf, wenn für den gleichen Dehnungs- bzw. Verformungswert, der während der Be- und Entlastungsphase erreicht wird, unterschiedliche Sensorsignale gemessen werden. Nach [21] wird die belastungsabhängige Hysterese bei piezoresistiven Materialien durch Reibung und Schlupf zwischen den Füllelementen sowie durch strukturelle Veränderungen des leitfähigen Gewebes aufgrund von Dehnungs-, Biege-, Verdrehungs- und Kompressionseffekten verursacht.

Um die mechanischen Hystereseigenschaften des Sensors aus [28] zu ermitteln, werden mehrere Lastzyklen mit unterschiedlichen Maximalbelastungen durchgeführt (siehe Abb. 2.10 links). Bei kleinen Belastungen hat die Hysterese kaum Einfluss auf die Sensordaten. Bei höheren Drücken kann die Messung jedoch um bis zu 15kPa beeinflusst werden, was bei einer Kontaktfläche von 3.0cm^2 einer Abweichung von 4.5N entspricht.

Belastungsabhängige Hystereseeffekte sind nicht nur von der wirkenden Maximalbelastung, sondern auch von der Belastungsgeschwindigkeit abhängig. Um diese Effekte zu ermitteln und vergleichbare Messergebnisse zu erzielen, werden in [20] die Sensoren mit unterschiedlichen Dehnungsraten und gleichbleibender Amplitude verformt.

Neben belastungsabhängigen Hystereseffekten kann es nach [2] auch bei thermischer Belastung von piezoresistiven Sensoren zu Hystereseerscheinungen kommen. Beim Durchlaufen eines Wärmebelastungszyklus kommt es zur Verformung der piezoresistiven Matrix und vor allem der Metalldrähte. Wenn die Temperatur nun wieder die Ausgangstemperatur erreicht, so vermerkt man einen Anstieg des piezoresistiven Widerstandes (siehe Abb. 2.10 rechts). Dieser Widerstandsanstieg kann auf induzierte Eigenspannungen während des Wärmebelastungszyklus zurückgeführt werden. Mit zunehmender Drahtdicke kommt es zu einem Anstieg der Hystereseeffekte.

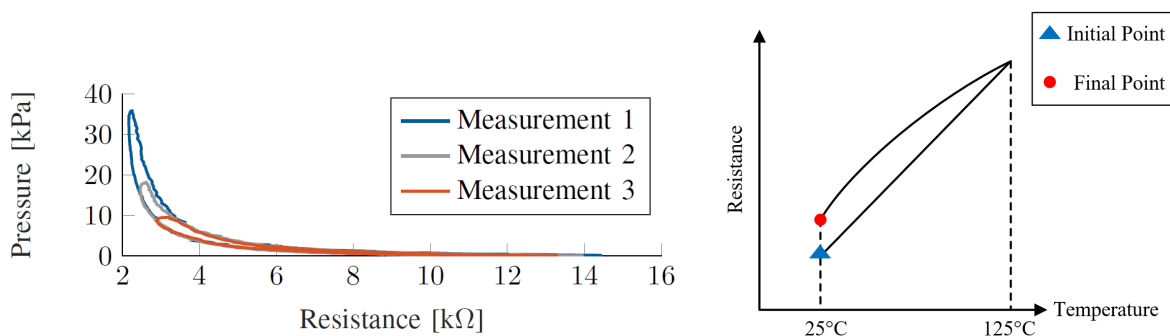


Abbildung 2.10: Belastungsabhängige Hysterese des Sensors (links) [28] und thermische Hysterese (rechts) [2].

Drifteffekte

Als Drift bezeichnet man eine verhältnismäßig langsame Änderung eines Wertes oder einer Eigenschaft eines Systems bzw. einer Einrichtung. Sensoren aus hoch nachgiebigen Materialien sind nach [25] grundsätzlich anfällig für Drifteffekte, da elastische Materialien unter Krafteinwirkung schwinden. Dieser Effekt kann zum einen beim Einbringen einer konstanten Deformation in die piezoresistive Matrix beobachtet werden. Ein idealer Sensor sollte bei gleichbleibender Dehnung immer eine konstante Gegenkraft aufbringen. Durch das Schwinden der elastischen Matrix sinkt jedoch die notwendige Belastungskraft und somit die aufgebrachte Gegenkraft bei konstanter Deformation (siehe Abb. 2.11 *Bereich C*). Zum anderen lassen sich Drifteffekte bei der Messung des Sensorsignales beobachten. Dabei wird der Sensor entweder mit einer gleichbleibenden Last oder wie in Abb. 2.11 (*Bereich C*) mit einer gleichbleibenden Dehnung beansprucht. Mit zunehmender Belastungsdauer lässt sich ein Anstieg der Ausgangsspannung am Spannungsteiler erkennen. Folglich muss der Widerstand an den taktilen Elementen abfallen. Dies wird wiederum durch das Schwinden des Materials verursacht. Zusätzlich bilden sich mit steigender Belastungsdauer immer mehr leitfähige Pfade über die Füllstoffpartikel, wodurch der Widerstand leicht abnimmt.

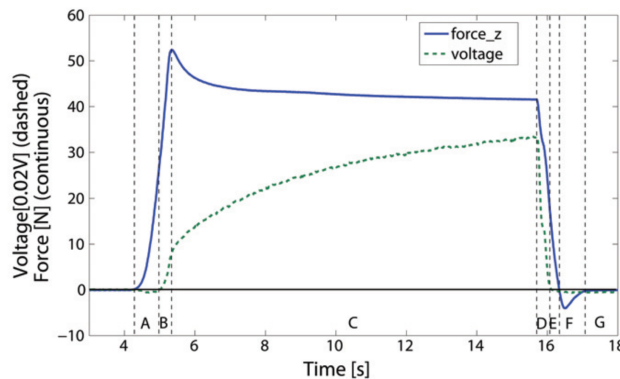


Abbildung 2.11: Dynamisches und statisches Verhalten des Sensors aus [25].

Der Sensor aus [28] weist unter statischer Belastung einen Drift von umgerechnet 0.26 kPa/s (Median) auf. Vorteilhaft ist jedoch, dass der Drifteffekt für alle Taxel nahezu identisch ist, wodurch die räumliche Lokalisierung der Taxel erhalten bleibt.

Da piezoresistive Sensoren nach [2] eine gewisse Temperaturabhängigkeit zeigen (Abb. 2.10 rechts), kann es bei der Anwendung als taktile Fußsohle auch zu einem temperaturabhängigen Drift der Sensorsignale kommen. Dies ist der Fall wenn sich die Umgebungstemperatur des Sensors im Vergleich zur Kalibrierungstemperatur verändert.

Dynamische Effekte

In Abb. 2.11 ist das Verhalten des Sensors aus [25] bei dynamischer und statischer Belastung dargestellt. Bei einer Belastung/Verformung schneller als $500 \mu\text{m/s}$ (*Bereich A*) zeigt der Sensor ein unerwartetes Verhalten. Der Widerstand des Materials sollte bei einer Kontraktion abnehmen, jedoch nimmt dieser bei zu schneller Verformung kurzfristig zu. Dieser Effekt wird durch einen sich ändernden Übertragungswiderstand zwischen Matrix und eingegossenen Metalldrähten verursacht. Wird das Matrixmaterial schnell verformt, so verliert es teilweise den Kontakt zu den Metalldrähten und der Übertragungswiderstand steigt vorübergehend an. In Abb. 2.12 ist das Sensorsignal für einen trapezförmigen Kraftverlauf (ähnlich zu Abb. 2.11), jedoch mit unterschiedlichen Be- und Entlastungsgeschwindigkeiten von 0.1 mm/s , 1 mm/s und 10 mm/s , dargestellt. Hier lässt sich deutlich eine gewisse Trägheit des Sensors erkennen, wel-

che mit steigender Deformations-Änderungsrate zunimmt.

Ein ähnliches Verhalten zeigt sich auch für den Sensor aus [28] in Abb. 2.9 rechts.

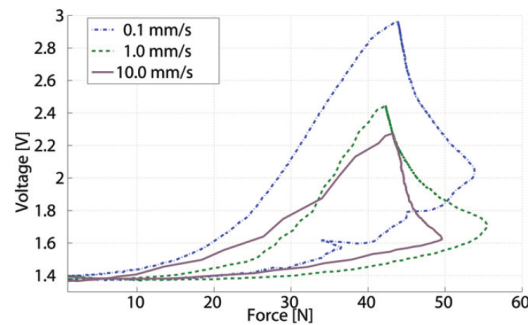


Abbildung 2.12: Trägheit des Sensors aus [25].

2.3 Modelle für piezoresistive Sensoren

Da es sich bei der taktilen Fußsohle aus [28] um eine Neuentwicklung handelt, gibt es für diesen Sensor nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft kein verwendbares Simulationsmodell. Generell gibt es für die vorgestellten Sensoren aus Abschnitt 2.1.2 kaum entwickelte und validierte Sensormodelle. Im Folgenden werden jedoch einige theoretische Modelle für piezoresistive Sensoren bzw. Modelle zur Implementierung von realen Sensoreigenschaften vorgestellt.

Piezoresistiver Effekt

In [13] wird ein Sensor vorgestellt, welcher nach einem ähnlichen Prinzip wie in [28] aufgebaut ist. Dieser Sensor besteht ebenfalls aus zwei gekreuzten Lagen an leitenden Metallfäden, welche eine piezoresistive Matrix umgeben. In beiden Lagen liegen die Drähte parallel, wobei die zweite Lage wie in [28] nicht um 90° gegenüber der ersten gedreht ist, sondern um einen variablen Winkel α zwischen 0° und 90° . Dies hat jedoch keinen Einfluss auf das Sensormodell, sondern nur auf gewisse Parameter bei der Auswertung. Grund einer schrägen Anordnung der Lagen zueinander ist die Absicht Querkräfte messen zu können.

Eine wichtige Grundlage für dieses theoretische Sensormodell ist die Erkenntnis, dass es beim „Zeilen-Spalten-Auslesen“ der Sensorwiderstände zu weiteren leitfähigen Pfaden, neben dem ursprünglich zu messenden Pfad, kommen kann. Dieser Effekt ist in Abb. 2.13 dargestellt.

In dem entwickelten Sensormodell aus [13] wird die piezoresistive Matrix als homogenes, isotropes Elastomer betrachtet, so dass sich auf Grundlage der linearen Elastizitätstheorie die vertikale Verschiebung u_z eines beliebigen Punktes (x, y, z) unter der Belastungskraft P zu

$$u_z = \frac{1 + \nu}{2\pi E r} \cdot P \quad (2.5)$$

ergibt (mit ν als Querkontraktionszahl, E als Elastizitätsmodul und r als Abstand/Radius zur Belastungskraft). Zur besseren Veranschaulichung ist die Verschiebung u_z in Abb. 2.14 grafisch dargestellt.

Piezoresistive Materialien weisen einen stark nichtlinearen Zusammenhang zwischen Verformung und Widerstandsänderung auf. Als Modell für die Widerstandsänderung ergibt sich

$$\frac{dR}{da} = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \frac{1}{a^2} \quad (2.6)$$

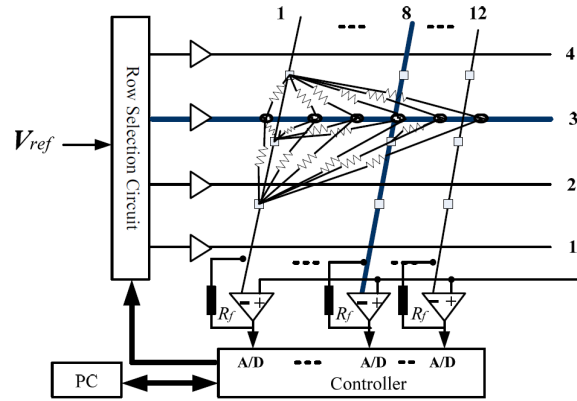


Abbildung 2.13: Zusätzliche leitfähige Pfade des Sensors aus [13], beim Auslesen von Spalte 1 und Zeile 3.

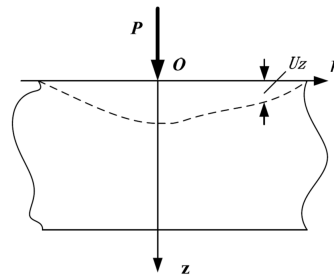


Abbildung 2.14: Elastische Verformung der piezoresistiven Matrix in Zylinderkoordinaten nach [13].

mit

$$a = \sqrt{(x_{I,J} - x_{i,j})^2 + (y_{I,J} - y_{i,j})^2 + (h + u_z)^2}, \quad da = \frac{h}{a} \cdot u_z. \quad (2.7)$$

Dabei ist a der Abstand zwischen den auszuwertenden Knoten bzw. dessen Ableitung da . ρ repräsentiert die spezifische Leitfähigkeit des piezoresistiven Polymers. Als x und y werden die Koordinaten der Knoten und als h die Dicke der piezoresistiven Matrix bezeichnet. Die Indizes $[I,J]$ definieren dabei den Knoten in Reihe I und Spalte J , der Elektroden in der oberen Lage, welche eine initiale Position von $(x_{I,J}, y_{I,J}, h)$ aufweisen. Die Indizes $[i,j]$ definieren wiederum den Knoten in Reihe i und Spalte j , der Elektroden in der unteren Lage, welche eine initiale Position von $(x_{i,j}, y_{i,j}, 0)$ aufweisen.

Durch Kombination von Gleichung (2.5), Gleichung (2.6) und Gleichung (2.7) ergibt sich die Widerstandsänderung zwischen den Knoten $[I,J]$ und $[i,j]$ schlussendlich zu

$$\Delta R = \frac{dR}{da} \cdot da = \frac{\rho(1+\nu)h}{4\pi^2 E r a^3} \cdot P. \quad (2.8)$$

Der in Abb. 2.13 dargestellte Effekt lässt sich nach [13] berücksichtigen, indem die Widerstandsänderung für jeden der möglichen Pfade aus Gleichung (2.8) berechnet wird. Anschließend wird die gesamte Widerstandsänderung für alle Pfade per Parallelschaltung ausgewertet.

Driftkorrektur bzw. Driftmodell

In [24] wird eine Maßnahme zur Driftkorrektur an einem piezoresistiven Sensor vorgestellt. Durch Modellierung von Drifteffekten und anschließender Subtraktion von der gemessenen Echtzeitsensorausgabe, kann die Sensorgenauigkeit verbessert werden. Im sogenannten

Voigt-Modell geht man davon aus, dass Drifteffekte immer in irgendeiner Form von Exponentialfunktionen nach Gleichung (2.9) vorkommen.

$$F_{drift}(t) = \beta \sum_i \Delta\sigma_i \left(1 - \exp\left(1 - \frac{t - T_i}{\tau_i}\right)\right), \text{ mit } i = 1 \dots n \quad (2.9)$$

Dabei ist $\Delta\sigma_i$ die inkrementelle Spannung zum Zeitschritt T_i , β ein Proportionalitätsfaktor und τ die Verzögerungszeitkonstante, welche die Form der Exponentialfunktion bestimmt.

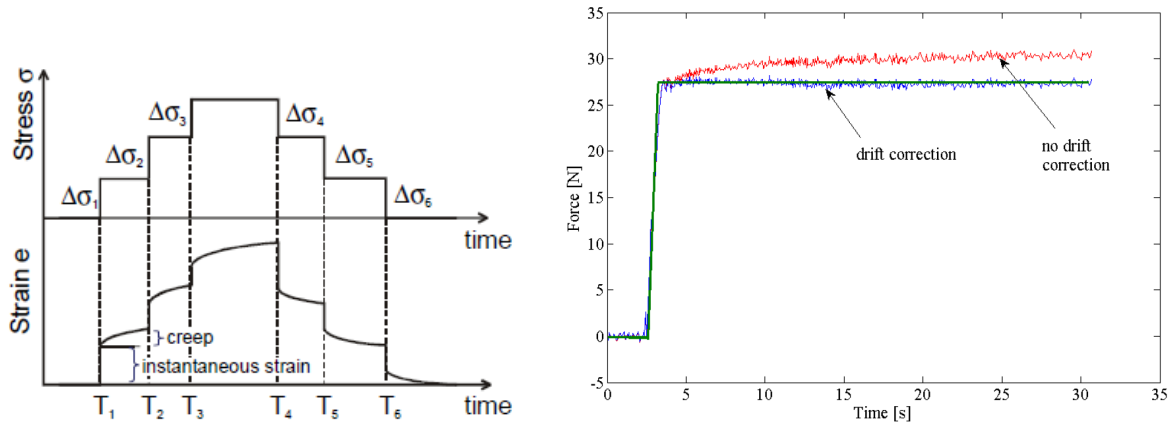


Abbildung 2.15: Schema für den Drifteffekt (links) und Driftkorrektur (rechts) nach [24].

In selbiger Form lässt sich anstelle eines Verfahrens zur Driftkorrektur auch ein Modell zur Simulation von Drifteffekten implementieren. Dafür muss die berechnete (ideale bzw. driftunabhängige) Sensorkraft mit der zeitabhängigen Funktion $F_{drift}(t)$ addiert werden.

Hysteresemodell

In [20] wird ein Hysterese Modell vorgestellt, durch welches gleichzeitig Hysterese- und Drifteffekte modelliert werden können. Dieses Modell muss lediglich dem idealen Sensorausgang nachgeschaltet werden. Der Modelleingang ist in dieser Anwendung der gemessene Widerstand R und der Ausgang wiederum die berechnete Belastung S . Diese beiden Größen werden zu $\xi = R/R_0 + \alpha$ und $\psi = S/S_0 + \beta$ normiert, wobei die Größen α , β , R_0 und S_0 so gewählt werden, dass die dimensionslosen Größen ξ und ψ im Intervall $[-1,1]$ liegen.

Das Modell nach [20] besteht aus einer Menge von N elementaren hysteresischen Zellen, welche jeweils durch eine Zustandsvariable x_k gekennzeichnet sind und deren Dynamik durch die implizite Formulierung $h_k(x_k, \dot{x}_k, t) = 0$, mit $k = 1 \dots N$, beschrieben wird. Die Funktionen h_k sind definiert als

$$h_k(x_k, \dot{x}_k, t) = \begin{cases} \dot{x}_k - \sigma \left(\frac{|\xi(t) - x_k(t)|}{\rho_k} \right)^p \cdot \text{sgn}(\xi(t) - x_k(t)), & \text{für } |\xi(t) - x_k(t)| \leq \rho_k \\ x_k - \xi(t) - \rho_k, & \text{für } \dot{x}_k \leq -\sigma \\ x_k - \xi(t) + \rho_k, & \text{für } \dot{x}_k \geq \sigma \end{cases} \quad (2.10)$$

mit $\rho_k = \frac{2k}{N+1}$ als Grenzwerte mit gleichem Abstand aus dem Intervall $(0,1)$. Die Parameter $\sigma > 0$ und $p > 0$ definieren die Form des nichtlinearen Vektorfeldes aus Abb. 2.16. Insbesondere erhält man für $p = 1$ eine gerade Linie für den Verlauf von \dot{x}_k .

Der Ausgang des Modells ergibt sich anschließend zu

$$\psi(t) = f^{-1} \left(\omega_0 \xi + \sum_{k=1}^N \omega_k x_k + \omega_{N+1} \right). \quad (2.11)$$

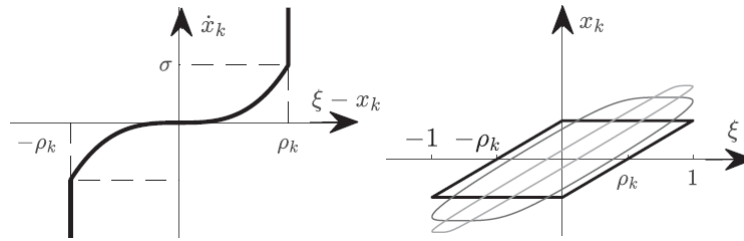


Abbildung 2.16: Vektorfeld (links) und Hystereseschleifen der Zelle x_k in Abhängigkeit von unterschiedlichen Eingangsraten (rechts) nach [20] - die schwarze Hystereseschleife ergibt sich dabei für hochfrequente Eingänge ξ .

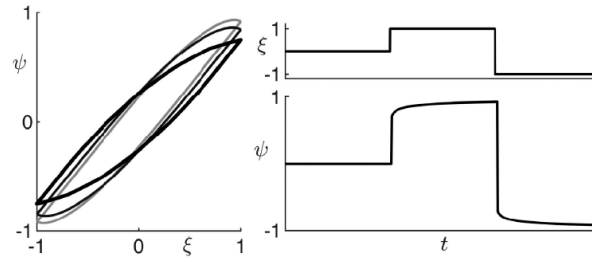


Abbildung 2.17: Hystereseschleifen (links) und Modellausgang ψ mit modellierter Hysterese und Drift (rechts) nach [20].

Dabei wird f als stückweise Funktion angenommen, welche eine zusätzliche Konfiguration des Ausgangsverhaltens zulässt. Die Parameter ω_k ergeben sich durch Anpassung des Ausgangs $\psi(t)$ an experimentelle Messergebnisse. Für genauere Informationen sei auf die Arbeit von Alberto Oliveri et al. [20] verwiesen.

Dieses Hysterese Modell wurde in der *MATLAB*[®] Toolbox *HysTool*TM implementiert. Dabei können alle Parameter automatisch an experimentelle Daten angepasst werden. Darüber hinaus können mit *HysTool* auch inverse Modelle, also zur Hysterese- und Driftkorrektur, erzeugt werden.

Kapitel 3

Versuchsaufbau zur experimentellen Untersuchung des taktilen Sensors

In diesem Kapitel wird auf den Aufbau eines Versuchsprototypen und dessen Funktionsweise eingegangen. Zusätzlich wird der Prüfstands Aufbau und die Auswertelektronik zur Erprobung von Sensoreigenschaften erläutert.

3.1 Prototyp der taktilen Fußsohle

Das Kernelement des Versuchsprototypen bildet der in Abschnitt 2.1.2 vorgestellte *piezoresistive Sensor (2)* (Abb. 3.1), welcher am Lehrstuhl für Angewandte Mechanik der Technischen Universität München entwickelt wurde. Der Sensor ist auf einer *dämpfungsfähigen Unterlage (3)* (Abb. 3.1) angebracht, welche im Betrieb des Roboters auftretende Vibrationen und impulsartige Kräfte absorbiert. Diese Dämpfungsschicht stellt ein passives Bauelement zur Schwingungsdämpfung dar und ersetzt somit die *viskoelastische Schicht* des alten Fußpads nach Abb. 1.1. Das Dämpfungsmaterial besteht aus einem Werkstoff mit der Bezeichnung *Star Pur 6mm schwarz*. An der Oberseite des Versuchsprototypen ist eine *abriebfeste Schutzschicht (1)* (Abb. 3.1) mit der Werkstoffbezeichnung *Nora Astral Crepe Transparentgummi*, in einer Stärke von 1.8mm, angebracht. Diese Schicht soll zum einen den darunterliegenden Sensor vor Verschleiß schützen und zum anderen den Reibungskoeffizienten zwischen Fuß und Untergrund maximieren.

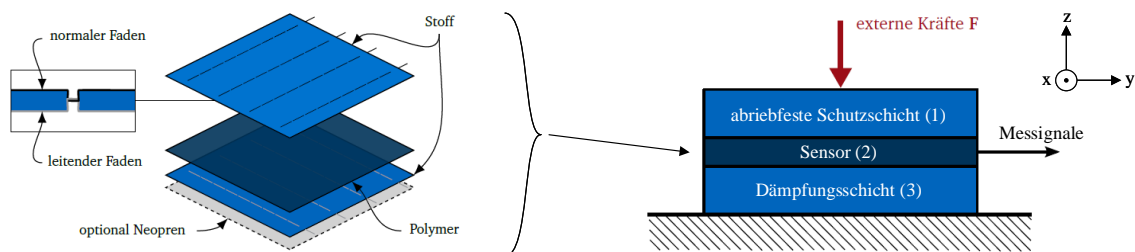


Abbildung 3.1: Piezoresistiver taktiler Sensor nach [28] (links) und Aufbau des Versuchsprototypen (rechts).

Das Sensorelement (2) besteht aus einem piezoresistiven Polymer, über welches beidseitig um 90° gekreuzte Edelstahlfäden verlaufen. Die somit entstehenden horizontalen und vertikalen Leiterbahnen bilden an deren Kreuzungspunkten einen Taxel. Jeder dieser Taxel ist durch

einen druckempfindlichen, elektrischen Widerstand R charakterisiert. Die Messung dieses Widerstands erfolgt über einen Spannungsteiler, welcher in der Auswerteelektronik des Sensors integriert ist. Die vertikalen Edelstahl-fäden werden dabei mit der Versorgungsspannung V_{cc} gespeist. Den Edelstahl-fäden in horizontaler Richtung ist ein Referenzwiderstand R_{Mess} in Serie geschaltet. Die Größe dieses Referenzwiderstandes ist bekannt und liegt bei $10k\Omega$. Mit der Auswerteelektronik wird der Spannungsabfall V_{Mess} über den Referenzwiderstand gemessen. Anschließend kann durch Gleichung (3.1) auf den Widerstand R zwischen den beiden Edelstahl-fäden rückgeschlossen werden.

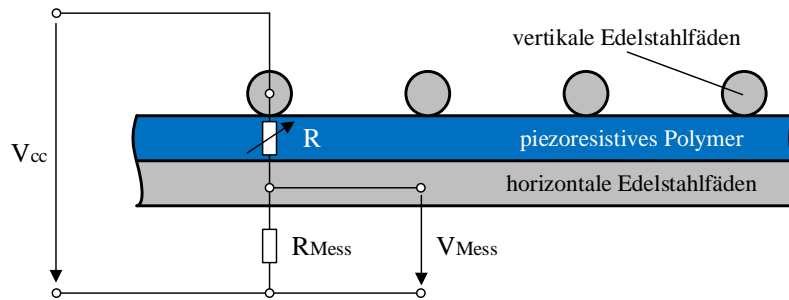


Abbildung 3.2: Spannungsteiler am druckabhängigen Widerstand R zwischen den Edelstahl-fäden.

$$R = R_{Mess} \cdot \frac{V_{cc} - V_{Mess}}{V_{Mess}} \quad (3.1)$$

Zur Untersuchung der Sensoreigenschaften wird ein piezoresistiver Sensor, bestehend aus 14 vertikalen und 8 horizontalen Edelstahl-Leiterbahnen, verwendet. Somit ergeben sich 112 Taxel pro Sensor. Die Auflösung entspricht in etwa $1\text{Taxel}/\text{cm}^2$. Dieser Sensor soll im späteren Verlauf das Zehen-Element der taktilen Fußsohle bilden.

3.2 Prüfstands-aufbau zur experimentellen Untersuchung von Sensoreigenschaften

Zur Untersuchung des taktilen Sensors wird ein Prüfstand am Lehrstuhl für Angewandte Mechanik verwendet. Der schematische Prüfstands-aufbau, inklusive Auswerteelektronik, ist in Abb. 3.3 dargestellt. Das Grundelement bildet eine Kraftmessprüfeinrichtung der Firma *Imada Co., Ltd.* An den beweglichen, durch eine Spindel angetriebenen Schlitten dieser Kraftmessprüfeinrichtung ist ein Kraftmessgerät vom Typ *Sauter FL* montiert, dessen Messbereich $\pm 25\text{N}$ mit einer Auflösung von 0.01N umfasst. Der Antrieb der Spindel erfolgt durch einen Servomotor mit Planetengetriebe und Inkrementalencoder zur Positionserfassung.

Der Prüfkopf des Kraftmessgerätes steht in Kontakt mit der Sensoroberfläche. Die Anpresskraft kann durch Linearbewegung der Spindel variiert werden. Die dabei auftretende Kraft bzw. Pressung wird am Kraftmessgerät über eine analoge Schnittstelle ausgelesen und wiederum über den Analog-Digital-Konverter an einem *Infineon XMC4300* Microcontroller erfasst.

Die aufgebrachte Pressung am Sensor verändert dessen Widerstandskennfeld, welches mithilfe einer Multiplexerschaltung erfasst wird. Die Ansteuerung der Multiplexer und das Auslesen der Sensorwiderstände erfolgt ebenfalls über den *Infineon XMC4300* Microcontroller.

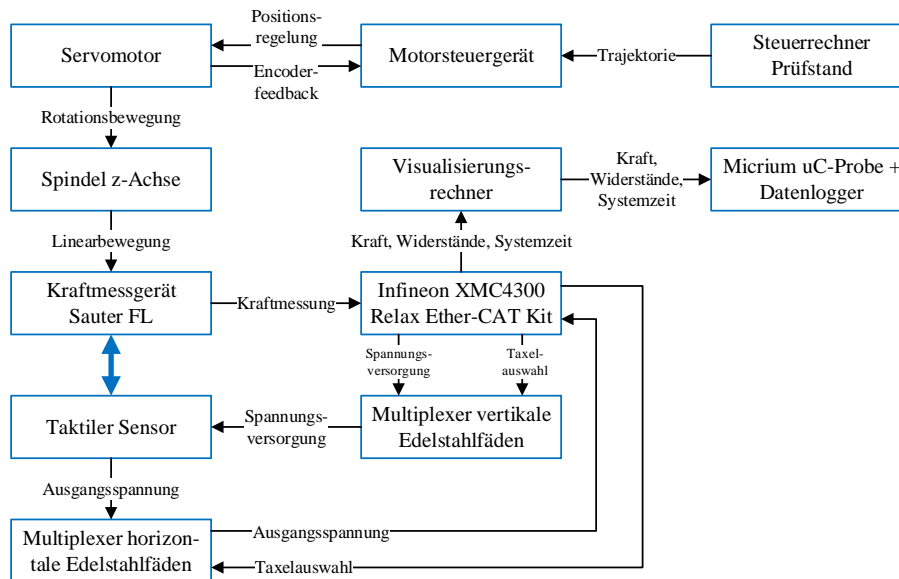


Abbildung 3.3: Schematischer Aufbau der Prüfstandskonfiguration mit Motorsteuerung nach [7] und Auswertelektronik der taktilen Fußsohle.

Über die Debug-Schnittstelle kann der Microcontroller mit der auf einem externen Visualisierungsrechner laufenden Software *Micrium uC-Probe* in Echtzeit kommunizieren. Diese Software ermöglicht eine Visualisierung der gemessenen Widerstandswerte sowie eine Aufzeichnung und Speicherung dieser Werte über einen integrierten Datenlogger.

Für die experimentelle Untersuchung der Sensoreigenschaften werden am Kraftmessgerät zylindrische Proben bzw. Prüfköpfe mit einem Durchmesser $\leq 20\text{mm}$ verwendet. Bei einem Messbereich von $\pm 25\text{N}$ können somit Anpressdrücke bis zu 79000Pa erzeugt werden. Unter Belastung von nur einem Zehen-Element (mit einem Gesamtgewicht von LOLA bei etwa 62kg), ergibt sich ein maximaler Anpressdruck von ca. 55000Pa . Da von keiner wesentlich kleineren Belastungsfläche ausgegangen wird, ist der Messbereich des verwendeten Kraftmessgerätes für die Experimente ausreichend.

Bilder des Versuchsaufbaus mit Prüfstand, Kraftmessgerät, Auswertelektronik und taktilem Sensor sind in Anhang B.1 dargestellt.

3.3 Auswertelektronik der Sensorsignale

Zur Abtastung der Widerstandsmatrix wurde am Lehrstuhl für Angewandte Mechanik eine Multiplexerschaltung entworfen. Detaillierte Schaltpläne sind in Anhang A angefügt.

In Abb. 3.4 ist der schematische Aufbau dieser Auswertelektronik, mit allen relevanten Anschlüssen und Ports dargestellt. Über die *Eingänge A0 bis A3* wird ein zugehöriger *Ausgang 1 bis 14* des Multiplexers für die vertikalen Edelstahl-fäden ausgewählt. Auf den jeweilig angesteuerten *Ausgang 0 bis 13* wird sodann die Versorgungsspannung von 2.5V geschaltet (Anschluss der Versorgungsspannung am Multiplexer über *COM*). Diese Spannung wird durch die dargestellte *Spannungsreferenz IC*, zuvor von 3.3V auf 2.5V reduziert und konstant gehalten.

Über die *Eingänge A, B und C* wird wiederum ein zugehöriger *Eingang 1 bis 8* des Multiplexers für die horizontalen Edelstahl-fäden ausgewählt. Der jeweilig angesteuerte Eingang wird auf

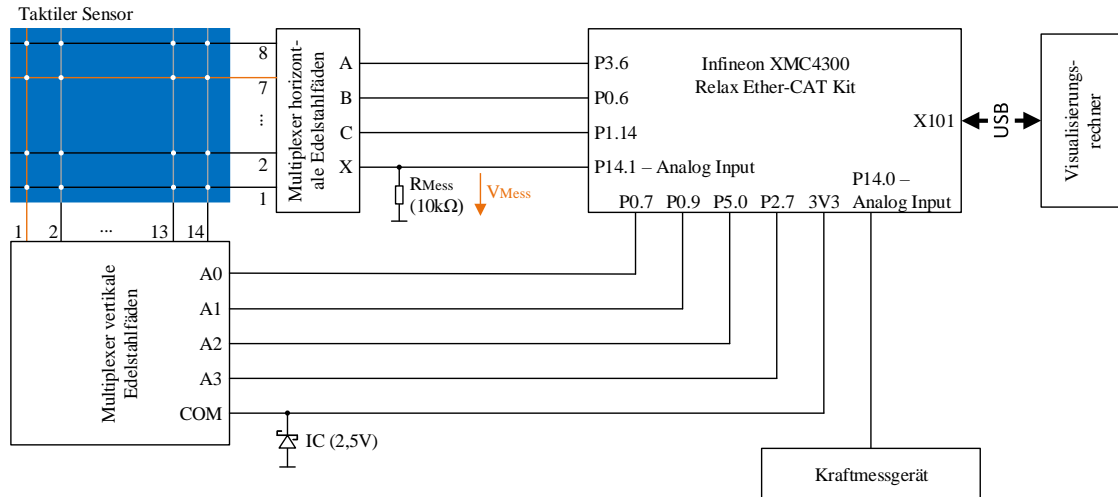


Abbildung 3.4: Schematischer Aufbau der Auswerteelektronik, bestehend aus zwei separaten Platinen mit Multiplexern, Kraftmessgerät, Infineon XMC4300 Microcontroller und dem Visualisierungsrechner. In der Abbildung ist das Taxel (7,1) zur Messung ausgewählt.

den Ausgang X des Multiplexers durchgeschaltet. Über den Analog-Digital-Konverter (Port 14.1) des Infineon XMC4300 Microcontrollers, kann nun die am Spannungsteiler anliegende Spannung gemessen werden. Aus der gemessenen Spannung wird nach Gleichung (3.1) der aktuelle Widerstand R des gewählten Taxels berechnet. Parallel zur Messung des Widerstandskennfeldes, wird die gemessene Kraft am Kraftmessgerät über einen zweiten Analog-Digital-Konverter (Port 14.0) des Infineon XMC4300 Microcontrollers erfasst.

Über die On-Board Debug-Schnittstelle (Segger J-Link) ist der Microcontroller mit einem auf dem Visualisierungsrechner laufenden XMC^{TM} -Flasher verbunden. Dieser XMC^{TM} -Flasher liest die gemessenen Widerstands- und Belastungsgrößen am Infineon XMC4300 Microcontroller zur Laufzeit ein und speichert diese in ein ELF -File¹. Die parallel am Visualisierungsrechner laufende Software Micrium uC-Probe kann Daten wiederum aus dem ELF -File lesen. Über das Line-Chart Tool können die Messwerte in Micrium visualisiert werden. Gleichzeitig werden die Widerstands- und Belastungsgrößen über das Data-Logger Tool in ein CSV -File² geschrieben. Dieses CSV -File kann in $MATLAB$ [®] zur Auswertung der Experimente eingelesen und verarbeitet werden. Micrium verfügt zusätzlich über Writable Control Tools, mit welchen Steuerungssignale für den Microcontroller erzeugt und in das ELF -File exportiert werden können. Diese Steuerungssignale werden anschließend über den XMC^{TM} -Flasher auf den Microcontroller geschrieben. Die erstellte, grafische Bedienoberfläche von Micrium ist in Anhang B.3 dargestellt.

3.4 Auswertesoftware der Sensorsignale

In Abb. 3.5 ist das Aktivitätsdiagramm der Auswertesoftware dargestellt. Nach der Initialisierung erfolgt eine parallele Abarbeitung der Widerstandsmessung bzw. -berechnung an der Fußsohle und der Kraftmessung bzw. -berechnung am Kraftsensor. In Abb. 3.5 ist der Multiplexer für die vertikalen Edelstahlfäden als $16MUX$ dargestellt. Der Grund hierfür ist, dass

¹ELF bedeutet Executable and Linking Format.

²CSV bedeutet Comma separated Values.

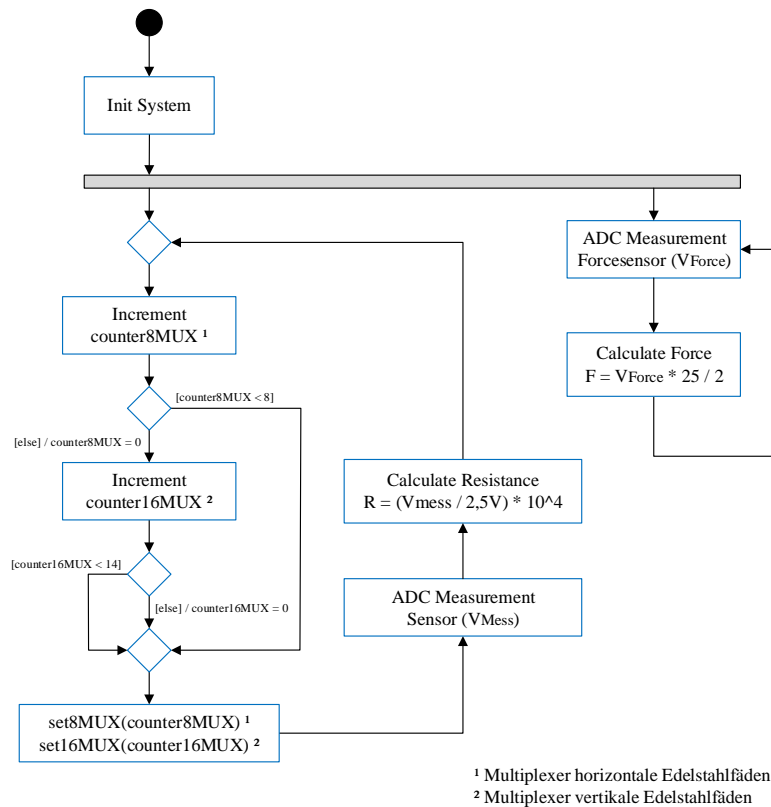


Abbildung 3.5: Aktivitätsdiagramm der Auswertesoftware.

es keinen handelsüblichen Multiplexer mit 14 Ausgängen gibt. Deshalb wird ein Multiplexer mit 16 Ausgängen verwendet, wobei die letzten beiden Ausgänge unbenutzt bleiben.

Zur Messung des Widerstandskennfeldes werden iterativ die Ausgänge des Multiplexers für die horizontalen Edelstahl­fäden durchlaufen. Erst nach Abschluss eines gesamten Pfades, werden jeweils die Ausgänge des Multiplexers für die vertikalen Edelstahl­fäden erhöht. Sobald ein Messzyklus durchlaufen ist, beginnt der Vorgang wieder von neuem. Nach jedem Setzen der Multiplexer, wird - nach einer kurzen Einschwingzeit des Sensors - der Spannungsabfall V_{Mess} über den Referenzwiderstand R_{Mess} gemessen (Abb. 3.4) und daraus der jeweilige Taxelwiderstand R berechnet und gespeichert.

Die Wahrheitstabellen zur Ansteuerung der Multiplexer finden sich in [17] und [18]. Auf Basis dieser Tabellen und dem aktuellen Wert der Variablen $counter8MUX$ und $counter16MUX$, werden in den Funktionen $set8MUX$ und $set16MUX$ (Abb. 3.5), die jeweiligen Ausgangssignalpegel am *Infineon XMC4300* Microcontroller bestimmt und gesetzt.

Die Abtastfrequenz der gesamten Fußsohle (bestehend aus dem Sensor für das Zehen-Element mit $8 \cdot 14 = 112$ Taxel und dem Sensor für das Fersen-Element mit $20 \cdot 14 = 280$ Taxel) liegt bei 100Hz. Da die Abtastung der beiden Sensorelemente parallel erfolgt, werden die einzelnen Taxel mit einer Abtastfrequenz von 28kHz eingelesen. Die Abtastung des Fersen-Elementes ist in Abb. 3.5 nicht dargestellt, da dieser Sensor für die experimentelle Untersuchung der Fußsohle nicht verwendet wird.

Um möglichst schnell auf unerwartete Ereignisse reagieren zu können, wird für spätere Anwendungen eine Abtastfrequenz der gesamten Fußsohle von 1000Hz angestrebt. Diese Frequenz kann aktuell nicht erreicht werden, da es bei höheren Abtastfrequenzen, ab ca. 300Hz (dies entspricht 84kHz pro Taxel), zu Signalverfälschungen an den digitalen Microcontroller-Ausgängen kommt. Die entstehenden Ausgangssignale, bei einer Abtastfrequenz der gesam-

ten Fußsohle von 1000Hz, sind in Anhang B.2 dargestellt. Der undefinierte Übergang zwischen High (3.3V) und Low (0V) führt dazu, dass die Multiplexer nicht mehr eindeutig schalten können. Ein Grund für die Signalverfälschungen könnte eine zu geringe Leistung der Pull-Up-Schaltungen an den Microcontroller-Ausgängen sein. Eine Support-Anfrage an den Hersteller wurde zum derzeitigen Zeitpunkt noch nicht beantwortet.

3.5 Validierung der Auswerteelektronik

In Abb. 3.6 ist der absolute Messfehler der Auswerteelektronik dargestellt.

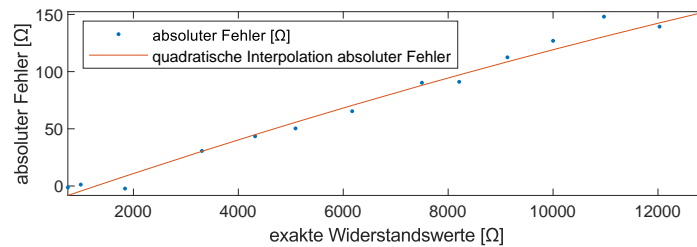


Abbildung 3.6: Absoluter Messfehler der Auswerteelektronik.

Für Validierungsmessungen der Elektronik wird die Multiplexerschaltung, statt dem in Abb. 3.4 dargestellten taktilen Sensor, mit Normwiderständen im Intervall von $0.75\text{k}\Omega$ bis $13\text{k}\Omega$ verkabelt. Somit kann allein die Genauigkeit der Auswerteelektronik, ohne Einflüsse des taktilen Sensors, betrachtet werden. Eine Auswertung der Messergebnisse liefert für den relativen Fehler eine obere Grenze von 1.4%. Verglichen mit der Messgenauigkeit des taktilen Sensors, liegt die relative Messabweichung der Auswerteelektronik in einem vertretbar kleinen Intervall. Zudem ist anzumerken, dass der absolute Fehler - bis auf kleine Streueffekte - allein vom Absolutwert des vorherrschenden Messwiderstandes abhängt.

In weiteren Experimenten wird die Messgenauigkeit der Elektronik unter dynamischen Widerstandsänderungen ausgewertet. Dabei wird eine Relaischaltung, über einen digitalen Ausgang des *Infineon XMC4300* Microcontrollers, mit Frequenzen im Intervall von 1Hz bis 10Hz geschaltet. Eine Frequenz von 1Hz entspricht in etwa der Schrittfrequenz von LOLA. Durch diese Messungen kann festgestellt werden, dass der Betrag des relativen Messfehlers auch bei dynamischen Widerstandsänderungen die Grenze von 1.4% nicht überschreitet. Die resultierenden, relativen Abweichungen sind in Tabelle 3.1 dargestellt.

Sollwiderstand	Relativer Fehler bei			
	1Hz	2Hz	5Hz	10Hz
1000Ω	-0.24%	-0.28%	-0.23%	-0.17%
13000Ω	0.83%	0.82%	0.84%	0.83%

Tabelle 3.1: Relativer Messfehler bei dynamischer Widerstandsänderung zweier beispielhafter Normwiderstände.

Da der absolute Fehler in Relation zu den exakten Widerstandswerten klein ist und sich bei unterschiedlichen Lastwechselfrequenzen keine Änderung des Fehlerverhaltens zeigt, wird die Entscheidung getroffen, kein Modell zur Kompensation des Messfehlers zu entwickeln. Stattdessen wird die Messabweichung bewusst bei der Bestimmung von Modellparametern akzeptiert. Bei der späteren Rückrechnung der gemessenen bzw. simulierten Widerstandsmatrix auf die wirkenden Belastungsdrücke, wird sich der Messfehler somit wieder kompensieren.

Kapitel 4

Experimentelle Untersuchung der Sensoreigenschaften

In diesem Kapitel werden die Eigenschaften des taktilen Sensors erläutert. Anschließend wird auf die experimentelle Untersuchung dieser Eigenschaften und Effekte eingegangen. Die Erfassung der experimentellen Daten erfolgt mit dem in Kapitel 3.3 vorgestellten *Data-Logger* Tool der Software *Micrium uC-Probe*. Für jede Eigenschaft des Sensors wird ein *MATLAB*[®] Live Script erstellt, mit welchem die experimentellen Daten verarbeitet und geplottet werden können. Eine Übersicht der modellrelevanten Sensoreigenschaften ist in Abb. 4.1 dargestellt. Die Experimente im folgenden Kapitel beziehen sich auf die Sensorkonfiguration aus Kapitel 3.1.

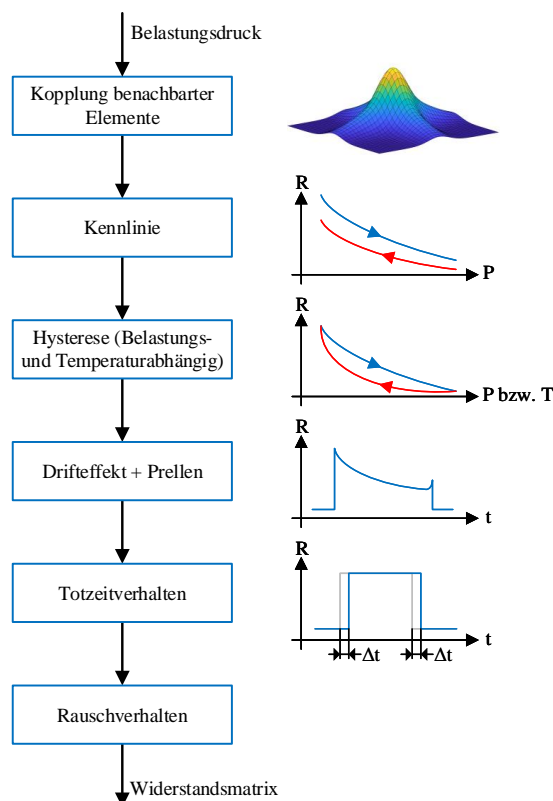


Abbildung 4.1: Modellrelevante Sensoreigenschaften.

4.1 Allgemeine Eigenschaften

Im Folgenden werden allgemeine Eigenschaften des Sensors erläutert. Diese Eigenschaften sind nicht zwingend für das zu entwickelnde Sensormodell von Relevanz, sondern mehr für die Auswertung der experimentellen Ergebnisse bzw. für die spätere Verarbeitung von realen Sensorsignalen.

4.1.1 Widerstandskennfeld im unbelasteten Zustand

In Abb. 4.2 ist das Widerstandskennfeld des Sensors im unbelasteten Zustand dargestellt. Die Bezeichnung einzelner Taxel erfolgt als *Taxel* (x,y), mit x aus Zeile 1 bis 8 und y aus Spalte 1 bis 14.

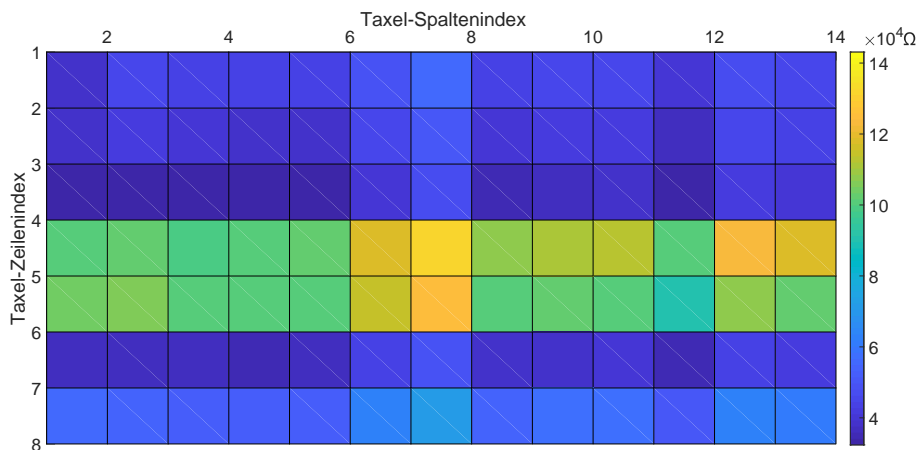


Abbildung 4.2: Widerstandskennfeld im unbelasteten Zustand. An den Zeilen mit Index 4, 5, 6 und 8 kann ein erhöhter Ruhewiderstand erkannt werden.

Wie sich in Abb. 4.2 erkennen lässt, variieren die Widerstände im unbelasteten Zustand in einem Intervall von $32\text{k}\Omega$ bis $144\text{k}\Omega$. Der Grund für die stark unterschiedlichen Ruhewiderstände kann auf fertigungsbedingte Schwankungen in den Fadenspannungen zurückgeführt werden. Durch geringere Spannungen reduziert sich der Anpressdruck auf das piezoresistive Material, wodurch wiederum der Übergangswiderstand und somit der Taxelwiderstand steigt. Dieser Effekt wird zusätzlich durch unterschiedliche Kontaktgeometrien, zwischen dem piezoresistiven Polymer und den leitfähigen Edelfadens, im unbelasteten Zustand verstärkt. Die Edelfadens sind bei geringen Zugspannungen sehr flexibel. Somit ergeben sich speziell bei niedrigen Fadenspannungen undefinierte Kontaktpunkte, welche eine Steigerung des Taxelwiderstandes verursachen. Teilweise wird an den Zeilen mit Index 4, 5, 6 und 8 sogar ein „unendlich hoher“ Ruhewiderstand gemessen. Dies lässt sich durch einen kompletten Kontaktverlust im unbelasteten Zustand erklären.

In [7] wird an den Randfäden ein zusätzlicher Einfluss durch die Heftnähte erläutert. Durch diese Heftnähte wird eine gewisse Eigenspannung in den Sensor gebracht, wodurch der Ruhewiderstand an den Randfäden sinkt. Dieser Effekt ist bei dem hier verwendeten Sensorelement nicht zu beobachten.

4.1.2 Widerstandsstreuung um den unbelasteten Zustand

Da im unbelasteten Zustand keine definierte Kontaktgeometrie zwischen dem piezoresistiven Polymer und den flexiblen Edelstahl­fäden vorhanden ist, ändert sich die unbelastete Widerstandsmatrix aus Abb. 4.2 nach jedem Belastungszyklus. Um den unbelasteten Zustand jedes Taxels sicher bestimmen zu können, wird der taktile Sensor in mehreren Belastungszyklen mit variierenden Belastungskräften und -flächen belastet und anschließend wieder entlastet. Nach jeder Entlastung wird die Ruhewiderstandsmatrix gemessen und mit den ursprünglichen Ruhewiderständen aus Kapitel 4.1.1 verglichen. Die Mehrheit aller Messungen zeigt eine Erhöhung des Ruhewiderstandes, welche nach einer gewissen Zeit verschwindend gering wird (siehe Drifteffekt Kapitel 4.2.4). Dennoch werden Messungen beobachtet, welche einen geringeren Ruhewiderstand nach der Belastung aufzeigen. Dieser Effekt ist auf eine bleibende Veränderung der Kontaktgeometrie, verursacht durch die Belastung, zurückzuführen. Durch eine günstige Veränderung der Positionierung zwischen den Edelstahl­fäden und dem piezoresistivem Polymer, kann der Übergangswiderstand sinken. Die durchgeführten Messungen ergeben eine maximale Abweichung einzelner Ruhewiderstände von -21% , der ursprünglichen Ruhewiderstände. Bei Unterschreiten dieser Grenze kann von einer Belastung des jeweiligen Taxels ausgegangen werden. Diese Belastung muss nicht direkt aufgebracht werden, sondern kann auch durch den in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Effekt verursacht werden.

Des Weiteren ist die maximale Abweichung von -21% nur bei den Taxeln mit hohen Ruhewiderständen (z.B. Taxel (5,7) aus Abb. 4.2) zu beobachten. Bei Taxeln mit niedrigeren Ruhewiderständen ergeben sich, aufgrund der höheren Fadenspannung, einheitlichere Kontaktbedingungen.

In Tabelle 4.1 sind die Eigenschaften der experimentellen Durchführung dargestellt.

Abtastfrequenz Fußsohle	100Hz
Start der Messung	Nach Entlastung und Ausklingen der Drifteffekte ($> 5\text{min}$ nach Entlastung)
Messdauer	$> 10\text{s}$ (Anschließend Mittelung der Taxelwiderstände)
Belastungsdruck	[700Pa, 60kPa]
Belastungsfläche	[0.7cm^2 , 40.5cm^2]

Tabelle 4.1: Versuchskonfiguration zur Ermittlung der Widerstandsstreuung um den unbelasteten Zustand.

4.1.3 Empfindlichkeit bei niedrigen Belastungen

In Abb. 4.3 sind Messungen zur Erfassung der Empfindlichkeit bei niedrigen Belastungsdrücken dargestellt. Für diese Experimente wird der Sensor an einzelnen Taxel mit unterschiedlichen Belastungsdrücken be- und entlastet. Anschließend wird das zugehörige Widerstandsverhalten ausgewertet.

Wie in Abb. 4.2 zu erkennen ist, weist das Taxel (3,10) einen niedrigen Ruhewiderstand auf. Dies ist laut Kapitel 4.1.1 auf höhere Fadenspannungen zurückzuführen. Taxel mit niedrigen Ruhewiderständen weisen sehr hohe Empfindlichkeiten auf. Bereits ab kleinen Belastungsdrücken von ca. 400Pa, lassen sich deutliche, reproduzierbare Sprünge im Widerstandsverlauf erzeugen. Belastungen können dabei auch schon oberhalb der in Kapitel 4.1.2 definierten Grenze von -21% des Ruhewiderstandes eindeutig erfasst werden.

Ein anderes Bild zeigt sich bei Taxeln mit hohen Ruhewiderständen, wie zum Beispiel Taxel

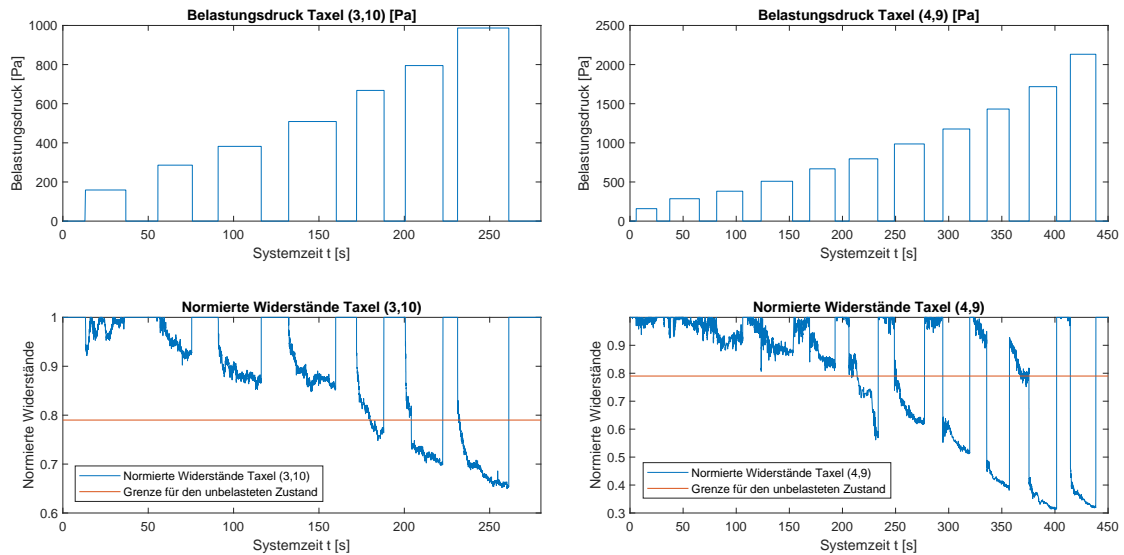


Abbildung 4.3: Empfindlichkeitsmessung an den Taxeln (3,10) und (4,9) mit zugehörigen Belastungsdrücken (oben) und resultierenden Widerständen (unten). Die geplotteten Widerstände werden durch deren jeweilige Ruhewiderstände normiert.

(4,9). Die undefinierte Kontaktgeometrie zwischen dem piezoresistiven Polymer und den flexiblen Edelfahnen bei niedrigen Fadenspannungen, hat einen negativen Einfluss auf die Empfindlichkeit dieser Taxel. Eindeutige und reproduzierbare Sprünge im Widerstandsverlauf, lassen sich erst ab Belastungsdrücken von ca. 900–1000Pa erzeugen. Des Weiteren lässt sich im Zeitintervall 350–380s (Abb. 4.3 rechts unten), der in Kapitel 4.1.2 erläuterte Effekt beobachten. Hier sinkt der Widerstand im unbelasteten Zustand auf die definierte Grenze von -21% des Ruhewiderstandes ab. Ohne Definition dieses Grenzwertes würde im genannten Zeitintervall eine Belastung des Sensors detektiert werden.

Bei statischer, gleichmäßiger Belastung beider Fußsohlen ergibt sich bei LOLA, mit einem Gesamtgewicht von ca. 62kg und einer Gesamtaufstandsfläche von ca. 784cm^2 , ein Anpressdruck von 7757.9Pa. Durch die Untergrenze von -21% aus Abschnitt 4.1.2, werden bei Taxel mit hohem Ruhewiderstand Belastungen ab ca. 1000Pa und bei Taxel mit niedrigem Ruhewiderstand Belastungen ab ca. 800Pa erkannt (siehe Abb. 4.3). Während dem Aufbau eines Fußkontaktes an LOLA, steigt der Belastungsdruck an den Fußsohlen annähernd linear und innerhalb von durchschnittlich 200ms, von null auf den jeweils maximalen Belastungsdruck an. Unter der Annahme eines maximal wirkenden Belastungsdruckes von 7757.9Pa, wird ein Fußkontakt somit innerhalb von maximal 26ms erkannt. Aufgrund dieser vergleichsweise geringen Detektionszeit, wird die Entscheidung getroffen, keine unterschiedlichen Grenzen für den unbelasteten Zustand einzelner Taxel zu definieren.

In Tabelle 4.2 sind die Eigenschaften der experimentellen Durchführung dargestellt.

Abtastfrequenz Fußsohle	100Hz
Start der Messung	Kontinuierliche Messung der Widerstände
Belastungsdruck	[0Pa, 2500Pa]
Belastungsdurchmesser	20mm
Be- und Entlastungsgeschwindigkeit	$\approx 350\text{kPa/s}$ (Dies entspricht in etwa der Be- und Entlastungsgeschwindigkeit bei Laufversuchen von LOLA.)

Tabelle 4.2: Versuchskonfiguration zur Ermittlung der Empfindlichkeit einzelner Taxel.

4.2 Modellrelevante Eigenschaften

Im Folgenden werden Eigenschaften des Sensors erläutert, welche dessen spezifische Charakteristik bei Be- und Entlastung beschreiben. Diese Eigenschaften bilden die Grundlage für das im nächsten Schritt zu entwickelnde Sensormodell.

4.2.1 Kopplung zwischen benachbarten Elementen

In Abb. 4.4 ist der am Sensor detektierte Belastungsdruck, bei alleiniger Belastung von Taxel (4,6), dargestellt. Die Belastung wird dabei quasi punktförmig, mit einer zylindrischen Probe vom Durchmesser 10mm, explizit auf ein Taxel aufgebracht. Als Referenz für eine punktförmige Belastung wird ein Probendurchmesser von 10mm gewählt, da somit exakt ein Taxel belastet werden kann. Zudem wird bei realen Laufversuchen von keinen kleineren Belastungsquerschnitten ausgegangen.

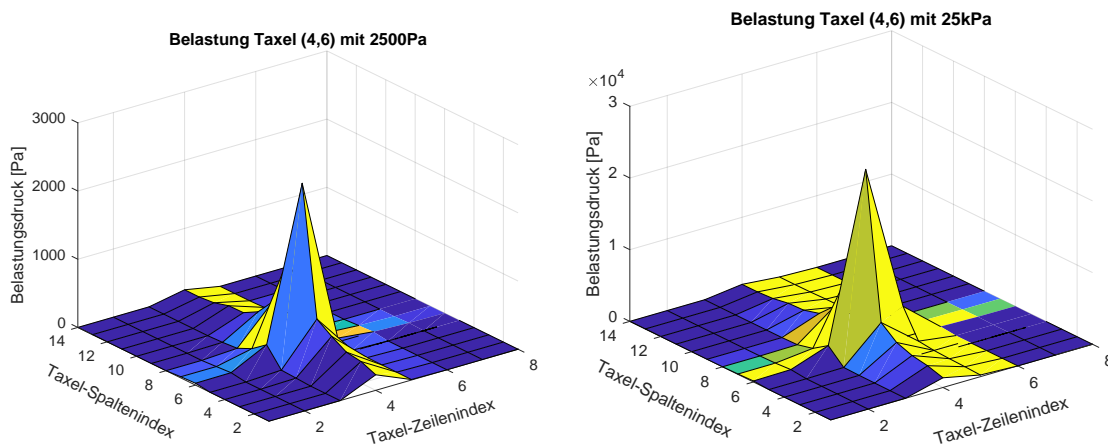


Abbildung 4.4: Gemessene Belastungsdrücke bei alleiniger Belastung von Taxel (4,6).

Die Auswertung der Kopplung zwischen benachbarten Elementen¹ soll möglichst unabhängig von anderen Sensoreigenschaften erfolgen. In [28] wurden bereits einige Eigenschaften des Sensorprototyps wie Hysterese, Drift und Rauschen vorgestellt. Um Hystereseeffekte zu unterdrücken, werden die Messdurchläufe nach und nach mit steigendem Belastungsdruck durchgeführt. Somit wird sichergestellt, dass die Hysterese-Schleife aus Abb. 2.10 nur auf dem Belastungs-Pfad durchlaufen wird. Darüber hinaus werden die Widerstände erst nach Ausklingen der Driteffekte gemessen. Nach dem Start einer Messung beträgt die Messdauer pro Belastungsstufe $> 10s$ (während dem Messen wird die aufgebrachte Kraft konstant gehalten). Die erfassten Widerstandswerte werden anschließend gemittelt, um Rauscheffekte auszublenden.

Bestimmung der inversen Sensorkennlinie

Mit der Auswerteelektronik des taktilen Sensors, kann nur dessen Widerstandsmatrix erfasst werden. Da die Kopplung benachbarter Elemente eine deutliche Druckabhängigkeit zeigt, wird die Entscheidung getroffen, das Sensormodell für diesen Effekt im späteren Verlauf ebenso druckabhängig umzusetzen. Um mithilfe der gemessenen Sensorwiderstände R , die

¹Unter Kopplung zwischen benachbarten Elementen wird im Folgenden der Belastungsdruck bezeichnet, welcher durch einzelne belastete Taxel auf deren Nachbartaxel ausgeübt wird.

zugehörige Druckverteilung P auf der Sensorfläche zu ermitteln, wird eine zeitinvariante, exponentielle Kennlinie der Form

$$P(R) = ae^{bR} + ce^{dR} \quad (4.1)$$

gebildet. a , b , c und d sind frei wählbare Modellparameter. Da die Messungen zur Bestimmung der Kopplung zwischen benachbarten Elementen nur mit steigendem Belastungsdruck durchgeführt werden, müssen die Konstanten in Gleichung (4.1) auch nur für positive Belastungsgradienten gebildet werden. (Wie in Kapitel 4.2.2 zu sehen ist, unterscheiden sich die Kennlinien für positive und negative Belastungsgradienten).

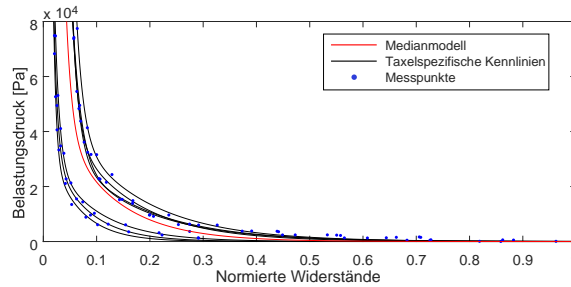


Abbildung 4.5: Taxelspezifische Kennlinien und Medianmodell zur Berechnung der wirkenden Pressung P in Abhängigkeit des gemessenen Widerstandes R (für positive Belastungsgradienten).

In Abb. 4.5 sind die Verläufe einiger taxelspezifischer Kennlinien (schwarz) und deren zugehörige Messpunkte (blau) dargestellt. Jeder der in blau dargestellten Messpunkte wird nach Ausklingen der Drifteffekte aufgezeichnet. Die spezifischen Kennlinien werden durch Interpolation der Messpunkte mit dem Modell aus Gleichung (4.1) gebildet. Als Interpolationsverfahren wird die Methode der kleinsten Quadrate verwendet. Um die Anzahl der durchzuführenden Experimente zu reduzieren, wird in [7] die Verwendung eines Medianmodells vorgeschlagen. Zur Bildung dieses Modells wird der Median aus den Parametern a_i , b_i , c_i und d_i einiger spezifischer Kennlinien gebildet. Die daraus entstehenden Konstanten a , b , c und d führen zu der in rot dargestellten Kennlinie und sind in Tabelle 4.3 abgebildet.

Parameter	Wert
Modellkoeffizient a	2157.10 kPa
Modellkoeffizient b	-89.72
Modellkoeffizient c	57.70 kPa
Modellkoeffizient d	-9.94

Tabelle 4.3: Parameter des Medianmodells aus Gleichung (4.1).

Da das absolute Widerstandsniveau einzelner Taxel zueinander stark schwankt, führt auch die Bestimmung der taxelspezifischen Kennlinien zu hohen Schwankungen in den Parametern a_i , b_i , c_i und d_i . Daraus resultiert ein hochgradig ungenaues Medianmodell. Werden die gemessenen Widerstände hingegen über ihre Ruhewiderstände normiert und anschließend aus diesen normierten Widerständen Kennlinien gebildet, so lassen sich einheitlichere Verläufe erzeugen. Dieses Vorgehen wird auch in den folgenden Kapiteln angewendet.

Die trotzdem resultierende Abweichung der Kennlinien im unteren Bereich der normierten Widerstände, beeinträchtigt die Genauigkeit der Experimente kaum. Der Grund hierfür ist, dass die normierten Widerstände um das belastete Taxel bei keiner Messung einen Wert von 0.35 unterschreiten. Im Widerstandsintervall von 0.35 bis 1 sind die Kennlinien relativ einheitlich. Der am Belastungspunkt wirkende Druck verursacht einen Taxelwiderstand < 0.35 , jedoch wird dieser Belastungsdruck über das Kraftmessgerät aufgezeichnet und muss somit

nicht durch das Medianmodell berechnet werden.

Die Versuchsdurchführung zur experimentellen Bestimmung der inversen Kennlinie, ist identisch zur Vorgehensweise nach Abschnitt 4.2.2. Da die inverse Kennlinie jedoch Belastungsdrücke in Relation zum gemessenen Sensorwiderstand setzt, wird diese separat betrachtet. Zudem wird die inverse Kennlinie für keine späteren Zwecke, sondern nur zur Auswertung der Kopplung benachbarter Elemente benötigt.

Auswertung der Kopplung benachbarter Elemente

Mit dem nach Gleichung (4.1) gebildeten Medianmodell können nun die in Abb. 4.4 dargestellten Belastungsdrücke berechnet werden. Vor allem in Zeilen- und Spaltenrichtung um das belastete Taxel, lassen sich erhöhte Belastungen erkennen, obwohl hier keine Kraft ausgeübt wird. Diese erfassten Drücke sind durch den elastischen Aufbau des Sensorprototyps verschuldet. Die aufgebrachte Kraft verformt die abriebfeste Schicht, die piezoresistive Matrix und die Dämpfungsschicht, wodurch Zugspannungen in die leitfähigen Edelfadendrähte induziert werden. Durch diese eingebrachten Spannungen verändern sich die Widerstandswerte der benachbarten Elemente. Gleichzeitig kommt es durch die abriebfeste Schutzschicht zu einer großflächigen Verteilung der punktförmig eingebrachten Belastungskraft, wodurch zusätzliche Druckspannungen auf die Sensoroberfläche ausgeübt werden. Die Kombination dieser beiden Effekte führt zu den in Abb. 4.4 dargestellten, gemessenen Belastungsdrücken. Durch die Experimente kann festgestellt werden, dass die Kopplung zwischen benachbarten Elementen, alleinig durch den externen Belastungsdruck einzelner Taxel hervorgerufen wird. Belastungsgradient (positiv/negativ) und -geschwindigkeit haben dabei keinen Einfluss. Das verwendete Medianmodell für positive Belastungsgradienten aus Abb. 4.5, wird nur zur Bestimmung des Belastungsdruckes auf die umliegenden Taxel benötigt. Bei Verwendung eines Medianmodells nach Gleichung (4.1) für die Entlastung und gleichzeitiger Auswertung von Messungen mit abnehmender Druckbeanspruchung, resultieren identische Versuchsergebnisse.

In Tabelle 4.4 sind die Eigenschaften der experimentellen Durchführung dargestellt.

Abtastfrequenz Fußsohle	100Hz
Start der Messung	Nach Aufbringen des Belastungsdruckes und Ausklingen der Drifteffekte (> 5min nach Belastung)
Messdauer	> 10s (Anschließend Mittelung der Taxelwiderstände)
Belastungsdruck	[700Pa, 60kPa]
Belastungsdurchmesser	10mm
Belastungsgradient	positiv (steigende Belastungsdrücke)

Tabelle 4.4: Versuchskonfiguration zur Ermittlung der Kopplung zwischen benachbarten Elementen.

4.2.2 Kennlinien der taktilen Elemente

In Abb. 4.6 und Abb. 4.7 sind die gemessenen Kennlinien ausgewählter Taxel bei Be- und Entlastung dargestellt. Zur besseren Darstellung werden die Kennlinien zwischen den aufgezeichneten Messpunkten linear interpoliert. Wie für die meisten piezoresistiven Sensoren, zeigt sich auch für diesen Sensor ein exponentielles Widerstandsverhalten.

Die Kennlinien sollen, wie die Kopplung zwischen benachbarten Elementen, möglichst unabhängig von anderen Sensoreigenschaften bestimmt werden. Deshalb wird jeweils nur die Kennlinie eines Taxels ausgewertet, welche unter direkter Belastung durch den Prüfstand

steht. Somit kann die Kopplung zwischen benachbarten Elementen ausgeblendet werden. Ebenso werden alle Widerstände erst nach Ausklingen der Drifteffekte gemessen. Nach dem Start einer Messung beträgt die Messdauer pro Messpunkt $> 10\text{s}$ (während dem Messen wird die aufgebrauchte Kraft konstant gehalten). Die erfassten Widerstandswerte werden anschließend gemittelt, um Rauscheffekte auszublenden.

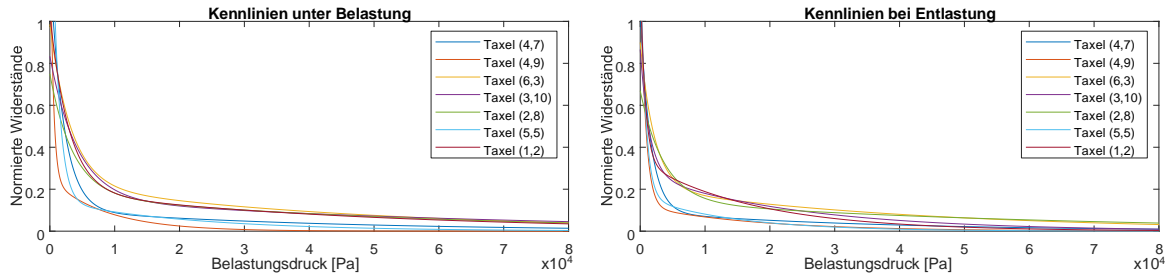


Abbildung 4.6: Gemessene Kennlinien ausgewählter Taxel bei Belastung (links) und Entlastung (rechts).

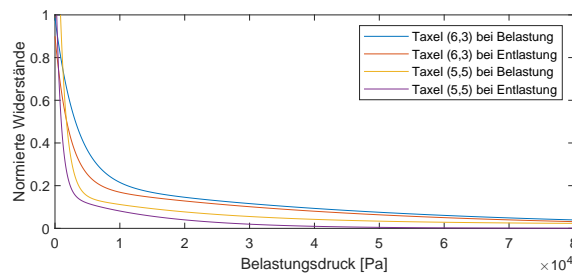


Abbildung 4.7: Unterschiede zwischen den Kennlinien zweier Taxel bei Be- und Entlastung.

Da die durchgeführten Messungen der Entwicklung eines Sensormodells dienen, werden die in diesem Abschnitt gemessene Widerstände, in Abhängigkeit des wirkenden Belastungsdruckes ausgewertet.

Durch Vergleich der Grafiken lässt sich erkennen, dass die Kennlinien zwischen Be- und Entlastung zwar eine ähnliche Form aufzeigen, jedoch im Widerstandsniveau unterschiedlich sind. Die Entlastungskennlinien liegen für jedes Taxel unter der jeweiligen Kennlinie für die Belastung. Dieses Verhalten lässt sich auf den in Kapitel 4.2.3 erläuterten Hystereseeffekt zurückführen.

Um eine hohe Streuung der taxelspezifischen Kennlinienverläufe zu verhindern, werden die gemessenen Widerstände - analog zu Abschnitt 4.2.1 - über deren Ruhewiderstände normiert. Bemerkenswert ist jedoch, dass sich trotzdem gewisse Abhängigkeiten der Kennlinien zu deren Ruhewiderständen zeigen. Taxel mit hohem Ruhewiderstand (z.B. Taxel (4,7), (4,9) und (5,5)) zeigen schneller abklingende Widerstandsverläufe als solche mit niedrigen Ruhewiderständen. Der Auslöser hierfür kann wahrscheinlich auf die Grundspannung in den Edelstahlädern zurückgeführt werden. Bei geringen Fadenspannungen ergeben sich undefinierte Kontaktgeometrien zwischen den Fäden und dem piezoresistiven Polymer. Daraus resultieren wiederum höhere Ruhewiderstände. Bei Belastung spielt jedoch die Fadenspannung kaum mehr eine Rolle, da sich durch den Belastungsdruck definierte Kontaktpunkte zwischen den Edelstahlädern und dem piezoresistivem Polymer bilden. Durch diese entstehenden Kontakte, sinkt der normierte Widerstand schneller ab als bei Fäden mit höherer Fadenspannung. Durch höhere Spannungen in den Edelstahlädern, sind auch im unbelasteten Zustand definierte Kontakte sichergestellt.

In Tabelle 4.5 sind die Eigenschaften der experimentellen Durchführung dargestellt.

Abtastfrequenz Fußsohle	100Hz
Start der Messung	Nach Aufbringen des Belastungsdruckes und Ausklingen der Drifteffekte (> 5min nach Belastung)
Messdauer	> 10s (Anschließend Mittelung der Taxelwiderstände)
Belastungsdruck	[700Pa, 79kPa]
Belastungsdurchmesser	20mm
Belastungsgradient	positiv (Belastung) und negativ (Entlastung)

Tabelle 4.5: Versuchskonfiguration zur Ermittlung der Kennlinien für Be- und Entlastung.

4.2.3 Hystereseverhalten

Nach Kapitel 2.2 weisen piezoresistive Sensorkonzepte sowohl belastungsabhängige als auch thermische Hystereseigenschaften auf.

Belastungsabhängige Hysterese

Das belastungsabhängige Hystereseverhalten des piezoresistiven Sensors, lässt sich in Anlehnung an [6] durch die viskoelastischen Eigenschaften der abriebsfesten Schutzschicht, des Sensorpolymers und des Dämpfungsmaterials erklären. Polymere und Elastomere zeigen bei Deformation Hystereseeffekte. Durch innere Reibung zwischen den Kohlenstoffketten, wird während dem Deformationszyklus Energie dissipiert. Aufgrund der inneren Reibung, dehnen sich die komprimierten Kunststoffschichten bei der Entlastung schwächer aus als sie bei der Belastung komprimiert werden.

Die Folge ist, dass der Abstand zwischen den leitenden Kohlenstoffadditiven im Sensorpolymer - bei gleichem Belastungsdruck - auf dem Entlastungsweig geringer ist als bei Belastung. Dadurch ergibt sich ein niedrigerer elektrischer Widerstand. Erst bei vollkommener Entlastung kehren die Kunststoffschichten in die Nulldeformation zurück und der Sensorwiderstand erreicht den Ausgangswiderstand.

In Abb. 4.8 ist das Hystereseverhalten des taktilen Sensors bei unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten durch den Prüfstand dargestellt. Wie sich erkennen lässt, ist der Hystereseeffekt geschwindigkeitsunabhängig. Zudem zeigt der Hystereseverlauf für die Belastung (oberer Hysterese-Pfad) und Entlastung (unterer Hysterese-Pfad), ein sehr ähnliches Verhalten zu den in Kapitel 4.2.2 dargestellten Kennlinien für Be- und Entlastung.

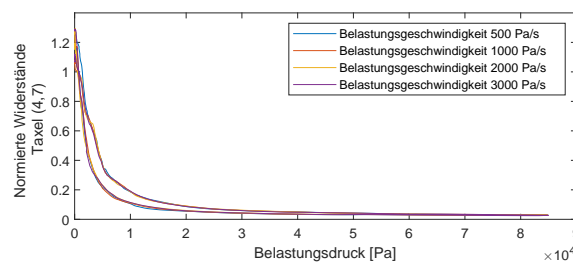


Abbildung 4.8: Hysterese bei unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten des Kraftmessprüfstandes in [Pa/s].

In Abb. 4.9 ist das Hystereseverhalten des taktilen Sensors bei unterschiedlichen Belastungsintervallen und gleichen Belastungsgeschwindigkeiten dargestellt. Dabei kann beobachtet werden, dass sich bei einer Änderung der Belastungsrichtung - vor Erreichen der Minimal- oder Maximalbelastung - weniger die Form des neuen Hysterese-Pfades ändert, sondern vielmehr eine Verschiebung des jeweiligen Pfades eintritt. Bei einem Übergang von Be- nach Entlastung (Abb. 4.9 links), wird die Entlastungskurve in positive y-Richtung verschoben, bis sich

Be- und Entlastungskurve schneiden. Bei einem Übergang von Ent- nach Belastung (Abb. 4.9 rechts), wird hingegen die Belastungskurve bis zum Schnittpunkt in negative x-Richtung verschoben. Erst bei vollständiger Entlastung bildet sich die Nulldeformation zurück und der Vorgang beginnt erneut.

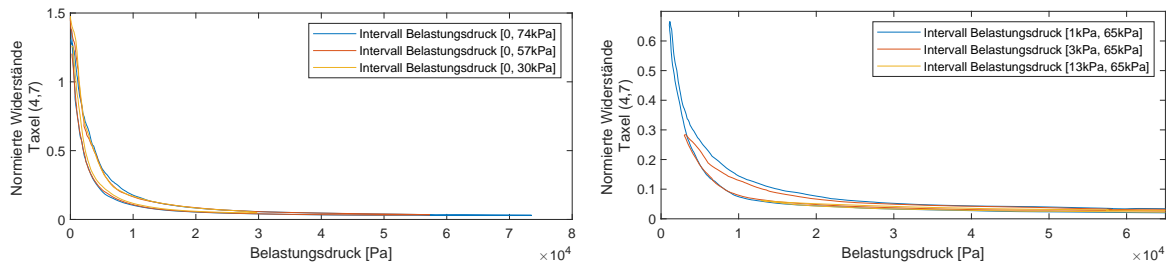


Abbildung 4.9: Hysterese bei unterschiedlichen Maximalbelastungen, ausgehend vom unbelasteten Zustand (links). Hysterese bei unterschiedlichen Minimalbelastungen, ausgehend vom belasteten Zustand (rechts).

Die Messung der Hystereseeffekte bzw. Hysteresewiderstände erfolgt kontinuierlich. Deshalb ist in den Messungen keine Entkopplung zwischen Hysterese- und Driftverhalten möglich. Dies lässt sich in Abb. 4.8 und Abb. 4.9 (links) erkennen, da hier die normierten Widerstände teilweise oberhalb der Ruhewiderstände liegen ($R_{\text{Ruhe, normiert}} = 1$).

In Tabelle 4.6 sind die Eigenschaften der experimentellen Durchführung dargestellt.

Abtastfrequenz Fußsohle	100Hz
Start der Messung	Kontinuierliche Messung der Widerstände
Belastungsdruck	[0, 79kPa]
Belastungsdurchmesser	20mm
Belastungsgradient	positiv (Belastung) und negativ (Entlastung)
Be- und Entlastungsgeschwindigkeit	[500Pa/s, 3000Pa/s] - Geschwindigkeitsabhängigkeit (Abb. 4.8)
	1500Pa/s - Unterschiedliche Belastungsintervalle (Abb. 4.9)

Tabelle 4.6: Versuchskonfiguration zur Ermittlung des Hystereseverhaltens.

Temperaturabhängige (thermische) Hysterese

Da LOLA unter Laborbedingungen betrieben wird, ist der taktile Fußsensor keinen nennenswerten Temperaturschwankungen ausgesetzt. Aus diesem Grund wird auf die Betrachtung von temperaturabhängigen Hystereseeffekten verzichtet. Die Durchführung aller Experimente erfolgt unter den Umgebungsbedingungen, bei welchen LOLA betrieben wird. Deshalb sind keine temperaturabhängigen Unterschiede der Eigenschaften zwischen Modell und realen Sensor zu erwarten.

Selbiges gilt auch für eventuelle Abhängigkeiten des Sensors auf Schwankungen in der Luftfeuchtigkeit und dergleichen.

4.2.4 Drifteffekt

In Abb. 4.10 ist das Driftverhalten des Sensors bei unterschiedlichen Widerstands- bzw. Belastungssprüngen dargestellt. Als Referenz ist der angenäherte Sollwiderstand ohne Drifteffekte eingetragen. Zur Ermittlung der Driftwiderstände, werden einzelne Taxel abschnittsweise mit unterschiedlichen Belastungsdrücken belastet, wodurch wiederum unterschiedliche driftverursachende Widerstandssprünge hervorgerufen werden.

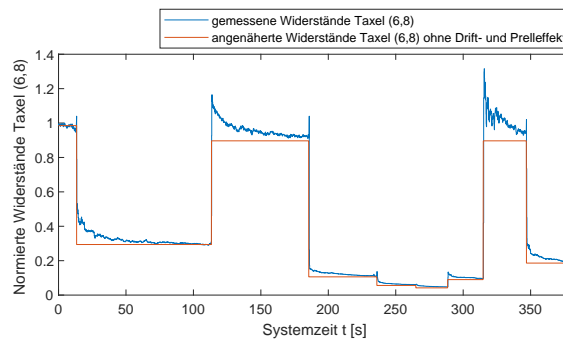


Abbildung 4.10: Widerstandsverlauf am Taxel (6,8) bei unterschiedlichen, abschnittsweise konstanten Belastungen.

Das Driftverhalten des piezoresistiven Sensors lässt sich auf Grund zweier unterschiedlicher Effekte erklären. Wie in Abb. 4.10 erkennbar ist, zeigt sich bei Be- und Entlastung des Sensors ein leicht unterschiedliches Driftverhalten. Im Anschluss an eine Belastung bilden sich nach [25] mit steigender Belastungsdauer immer mehr leitfähige Pfade über die Füllstoffpartikel. Durch die steigende Anzahl an Pfaden nimmt der gemessene Taxelwiderstand kontinuierlich ab, bis eine Sättigung erreicht ist. Dieser Effekt wird durch die viskoelastischen Eigenschaften der abriebsfesten Schutzschicht, des Sensorpolymers und des Dämpfungsmaterials abgeschwächt. Bei Kräfteinwirkung schwinden elastische Materialien unter der Belastungsstelle. Durch das Schwinden der Materialien sinkt - bei gleichbleibender Kräfteinwirkung - der Druck auf die piezoresistive Matrix, wodurch der Übergangswiderstand leicht zunimmt. Wie sich jedoch erkennen lässt, ist dieser Effekt dem ersten untergeordnet.

Nach einer Entlastung des Sensors (vollständig oder nur teilweise) treten beide Effekte in einer anderen Kombination auf. Durch die Trägheit der elastischen Materialien können diese bei einer schnellen Lastabnahme nicht der Trajektorie folgen, wodurch der Widerstand anfänglich über den Sollwiderstand ansteigt. Erst mit zunehmender Belastungsdauer bildet sich das Material in seinen Ursprungszustand zurück und der gemessene Taxelwiderstand fällt wiederum ab. Zusätzlich bilden sich - wie bei einer Belastung - immer mehr leitfähige Pfade über die Füllstoffpartikel, wodurch der Widerstand zusätzlich abnimmt. Aus diesem Grund ist das Driftverhalten bei Entlastung stärker ausgeprägt als bei Belastung.

Wie sich aus Abb. 4.10 erkennen lässt, sind Drifteffekte - sowohl bei Be- als auch bei Entlastung - abhängig von der jeweiligen Widerstandsänderung. Dieses Verhalten deckt sich mit dem in [24] vorgestellten Modell zur Driftkorrektur. Die gemessenen Widerstandssprünge stehen in direktem Zusammenhang zu den Belastungs- bzw. Verformungsänderungen. Bei kleinen Sprüngen in der Verformung kommen die viskoelastischen und piezoresistiven Effekte kaum zu tragen. Ebenso zeigt sich auch bei großen Belastungssprüngen eine gewisse Sättigung der Materialien. Maximal werden Drifteffekte bei mittleren Belastungssprüngen und bei mittleren bis großen Entlastungssprüngen.

Bei weiteren Experimenten kann in einem ausgewerteten Geschwindigkeitsintervall um 350 kPa/s , eine Geschwindigkeitsunabhängigkeit der Drifteffekte erprobt werden. Diese Geschwindigkeit entspricht in etwa der Be- und Entlastungsgeschwindigkeit bei Laufversuchen von LOLA.

In Tabelle 4.7 sind die Eigenschaften der experimentellen Durchführung dargestellt.

Abtastfrequenz Fußsohle	1kHz - Bei diesem Experiment werden nur einzelne Taxel eingelesen. Die Abtastfrequenz wird durch das <i>Data-Logger</i> Tool der Software <i>Micrium uC-Probe</i> auf 1kHz beschränkt.
Start der Messung	Kontinuierliche Messung der Widerstände
Belastungsdruck	[0, 79kPa]
Belastungsdurchmesser	20mm
Be- und Entlastungsgeschwindigkeit	$\approx 350\text{kPa/s}$ (Dies entspricht in etwa der Be- und Entlastungsgeschwindigkeit bei Laufversuchen von LOLA.)

Tabelle 4.7: Versuchskonfiguration zur Ermittlung des Driftverhaltens.

4.2.5 Prelleffekt

In Abb. 4.10 und Abb. 4.11 lassen sich zu den Zeitpunkten von Belastungszunahmen und -abnahmen Sprünge im Widerstandsverlauf erkennen. Zur experimentellen Untersuchung dieses Effektes, werden einzelne Taxel abschnittsweise mit unterschiedlichen Lastsprüngen be- und entlastet, wodurch sich das Widerstandsniveau ändert und Sprünge im Verlauf hervorgerufen werden. Anschließend werden die Absolutwerte der kurzzeitigen Widerstandserhöhung ausgewertet. Die Versuchskonfiguration aus Tabelle 4.7 ist auch in gleicher Weise für die experimentelle Untersuchung dieses Effektes anwendbar.

Im Gegensatz zum Drifteffekt, zeigen die erfassten Sprünge keine Abhängigkeit von der Widerstandsänderung, sondern vielmehr vom Absolutwiderstand des jeweiligen Taxels. Die Höhe des Sprunges ist dabei auf den Driftwiderstand vor der Belastung (bei einer Belastung des Sensors) bzw. den Driftwiderstand nach der Entlastung (bei einer Entlastung des Sensors) bezogen. Dabei zeigt sich, dass der Absolutwert des Widerstandssprunges, bei einem normierten Driftwiderstand von ca. $1/2$, für Be- und Entlastung ein Maximum aufweist. In Richtung der beiden Grenzwerte von 0 und 1 des normierten Driftwiderstandes, nimmt der Sprung ab. Ebenso zeigt der Absolutwert des Widerstandssprunges in einem ausgewerteten Geschwindigkeitsintervall um 350kPa/s , keine Geschwindigkeitsabhängigkeit.

Die Gründe für diesen Effekt lassen sich kaum evaluieren, da das Innere des Sensors während der Belastung nicht einsehbar ist. Das Verhalten erinnert jedoch an das Pellen von elektro-mechanischen Bauteilen, weshalb auch die Benennung als Prelleffekt erfolgt. Als Pellen wird nach [23] ein mechanisch ausgelöster Störeffekt bei Schaltern und Tastern bezeichnet. Anstatt eines sofortigen elektrischen Kontaktes, kommt es bei Betätigung des Schalters zu einem „Schwingen“ zwischen den beiden Schalterstellungen. Ursache ist elastisches Zurückprallen gegen die Federung. Die abrupte Deformation der viskoelastischen Sensormaterialien kann eine kurzzeitige Verformung des Edelstahlgeflechts hervorrufen. Dies kann zum einen den Leitungswiderstand im Edelstahlfaden erhöhen und zum anderen die Kontaktfläche zwischen Faden und dem piezoresistiven Material verändern.

Ein weiterer Ansatz ergibt sich durch die in Abb. 2.13 dargestellten, leitfähigen Nebenpfade über das piezoresistive Polymer. Da das Polymer ganzflächig leitfähig ist, ergeben sich neben gezielter Verbindung zweier Edelstahlfäden, auch leitende Nebenpfade. Da die Sensorschichten jedoch nur an den Rändern miteinander vernäht sind, kann es bei einer ruckartigen Belastung zu einem kurzfristigen Abheben der Sensorschichten um die Belastungsstelle kommen. Dadurch verlieren umliegende Nebenpfade den Kontakt und der Sensorwiderstand steigt kurzfristig an.

Für fundierte Aussagen über den Grund dieses Effektes sind weitere Messungen am Sensor notwendig. Die Parameter für eine vollständige Modellierung dieses Verhaltens, können hingegen durch den beschriebenen Messablauf bereits ermittelt werden.

4.2.6 Totzeitverhalten

In Abb. 4.11 sind auf den Sensor aufbrachte Belastungsdrücke und daraus resultierende Taxelwiderstände dargestellt. Die Übergangsdauer für einen Zustandswechsel beträgt jeweils 200ms. Dies entspricht der verstreichenden Zeitspanne bei Be- bzw. Entlastung des Fußes von LOLA. Somit kann die bei realen Gehversuchen auftretende Totzeit des Sensors simuliert werden.

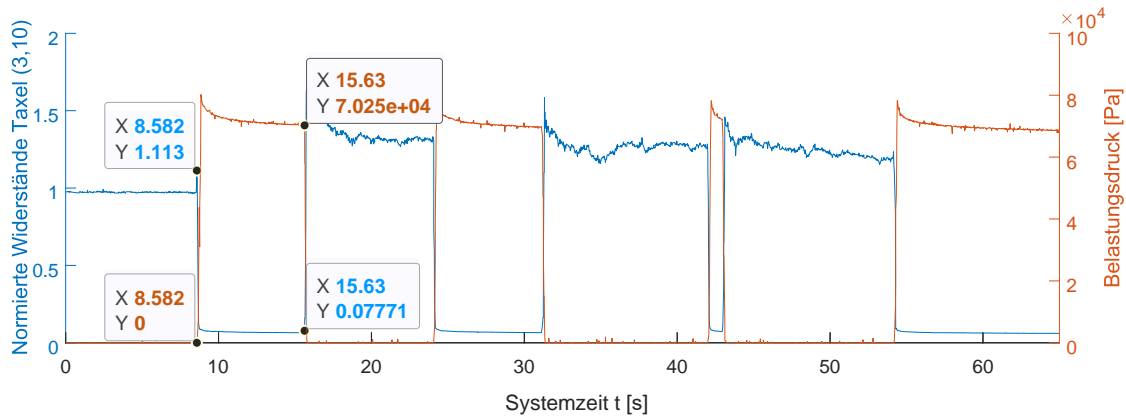


Abbildung 4.11: Gemessene normierte Widerstände und zugehörige Belastungsdrücke. Die Übergangsdauer für einen Zustandswechsel (Be- nach Entlastet bzw. Ent- nach Belastet) beträgt jeweils 200ms.

Die eingezeichneten Datenpunkte kennzeichnen jeweils den Start eines Zustandswechsels (orange) und den zugehörigen Start einer Widerstandsänderung (blau). Wie sich aus den eingetragenen Zeitpunkten erkennen lässt, folgt der Widerstandsverlauf - bei einer Messgenauigkeit von 1ms - dem aufbrachten Belastungsdruck exakt. Da für die Fußsohle eine Abtastfrequenz von 1kHz ($\hat{=}$ 1ms) angestrebt wird, liegt die maximale Totzeit des Sensors mit < 1 ms unter der Messgenauigkeit am realen Roboter. Aus diesem Grund muss im Sensormodell keine Zeitverzögerung der Sensorsignale integriert werden.

In Tabelle 4.8 sind die Eigenschaften der experimentellen Durchführung dargestellt.

Abtastfrequenz Fußsohle	1kHz - Bei diesem Experiment werden nur einzelne Taxel eingelesen. Die Abtastfrequenz wird durch das <i>Data-Logger</i> Tool der Software <i>Micrium uC-Probe</i> auf 1kHz beschränkt.
Start der Messung	Kontinuierliche Messung der Widerstände
Belastungsdruck	[0, 79kPa]
Belastungsdurchmesser	20mm
Be- und Entlastungsgeschwindigkeit	$\approx 350\text{kPa/s}$ (Dies entspricht in etwa der Be- und Entlastungsgeschwindigkeit bei Laufversuchen von LOLA.)

Tabelle 4.8: Versuchskonfiguration zur Ermittlung des Totzeitverhaltens.

4.2.7 Rauschverhalten

Zur Messung des Rauschverhaltens werden mehrere Messungen mit unterschiedlichen, abschnittsweise konstanten Belastungsdrücken durchgeführt. Nach Ausklingen der Drifteffekte werden die resultierenden Taxelwiderstände gemessen. Anschließend wird ein Mittelwert für

jeden Taxelwiderstand gebildet und die Standardabweichung um diesen Mittelwert berechnet. Nach [22] ist die Standardabweichung ein Maß für das stochastisch verteilte Rauschsignal. In Tabelle 4.9 sind die Eigenschaften der experimentellen Durchführung dargestellt.

Abtastfrequenz Fußsohle	100Hz
Start der Messung	Nach Aufbringen des Belastungsdruckes und Ausklingen der Drifteffekte (> 5min nach Belastung)
Messdauer	> 10s (Anschließend Mittelung der Taxelwiderstände und Berechnung der Standardabweichung)
Belastungsdruck	[0, 79kPa]
Belastungsdurchmesser	20mm

Tabelle 4.9: Versuchskonfiguration zur Ermittlung des Rauschverhaltens.

In Abb. 4.10 und Abb. 4.11 sind jeweils unterschiedliche Widerstandsverläufe dargestellt. In beiden Abbildungen lässt sich ein Sensorrauschen, welches dem eigentlichen Taxelwiderstand überlagert ist, erkennen. Dabei zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit der Rauschamplitude vom aktuellen Taxelwiderstand. Betrachtet man den Ursprung des Rauschverhaltens, so erkennt man hingegen konstantes Rauschen, welches erst durch die Umrechnung auf Taxelwiderstände skaliert wird.

Grundsätzlich kann nach [22] zwischen äußeren und inneren Rauschquellen unterschieden werden. Äußere Rauschquellen sind elektrische Störungen aus der Umgebung. Diese können durch umliegende stromführende Leitungen, Motoren und dergleichen verursacht werden. Der taktile Sensor stellt unter anderem durch seine große und leitfähige Polymerschicht eine Antenne dar, weshalb er empfindlich auf Rauschquellen reagiert. Inneres Rauschen wird zum Beispiel durch die Multiplexer der Auswerteelektronik erzeugt.

Eine Kombination aus diesem konstanten inneren und äußeren Rauschen, überlagert sich dem über das Taxel fließenden Strom. Eine Widerstandsabhängigkeit des Rauschverhaltens ergibt sich erst dadurch, dass der fließende Strom den am Microcontroller gemessenen Spannungsabfall V_{Mess} erzeugt (siehe Abb. 3.2). Durch diese Spannung kann aus Gleichung (3.1) wiederum der Taxelwiderstand berechnet werden. Erst durch diese Umrechnung wird die Rausch-Amplitude skaliert. Diese Annahme lässt sich mathematisch folgendermaßen beweisen:

Der über das Taxel fließende Strom berechnet sich durch den Spannungsteiler nach Abb. 3.2 zu

$$I_{Taxel} = \frac{V_{cc}}{R_{Taxel} + R_{Mess}} \quad (4.2)$$

und wird durch den konstanten, standardnormalverteilten Rauschstrom zu

$$I = \underbrace{\frac{V_{cc}}{R_{Taxel} + R_{Mess}}}_{I_{Taxel}} + I_{Rausch} \quad (4.3)$$

überlagert. R_{Taxel} bezeichnet darin den tatsächlichen Widerstand des jeweiligen Taxels. Durch Anwendung von Gleichung (3.1) kann nun der Anteil des Rauschverhaltens R_{Rausch} am berechneten, verfälschten Taxelwiderstand R ausgewertet werden. Dafür wird die Differenz aus dem im Microcontroller berechneten Widerstand R und dem tatsächlichen Taxelwiderstand R_{Taxel} nach Gleichung (4.4) gebildet.

$$R_{Rausch} = R_{Mess} \cdot \underbrace{\frac{V_{cc} - I \cdot R_{Mess}}{I \cdot R_{Mess}}}_R - R_{Mess} \cdot \underbrace{\frac{V_{cc} - I_{Taxel} \cdot R_{Mess}}{I_{Taxel} \cdot R_{Mess}}}_{R_{Taxel}} \quad (4.4)$$

Durch Kombination von Gleichung (4.2), Gleichung (4.3) und Gleichung (4.4) kann ein Ausdruck des skalierten Rauschwiderstandes nach Gleichung (4.5) gefunden werden. Dieser zeigt eine Abhängigkeit des jeweilig wirkenden Taxelwiderstandes und des konstanten Rauschstromes.

$$R_{Rausch}(R_{Taxel}, I_{Rausch}) = -\frac{I_{Rausch} \cdot (R_{Taxel} + R_{Mess})^2}{V_{cc} + I_{Rausch} \cdot (R_{Taxel} + R_{Mess})} \quad (4.5)$$

Aus Gleichung (4.5) ist ersichtlich, dass der Anteil des Rauschverhaltens zwar allein durch den konstanten Rauschstrom I_{Rausch} erzeugt, jedoch erst durch die Umrechnung auf einen Widerstand skaliert wird. Der Skalierungsfaktor ist dabei vom tatsächlichen Taxelwiderstand R_{Taxel} abhängig. Das negative Vorzeichen in Gleichung (4.5) hat keinen Einfluss auf das Ergebnis, da der Rauschwiderstand einen Mittelwert von null aufweist und R_{Rausch} die jeweilige standardnormalverteilte Rausch-Amplitude um den Mittelwert darstellt.

Zur Simulation dieses Verhaltens wird ein *MATLAB*[®] Skript erstellt. Dabei werden die über zwei Taxel fließenden Ströme I_1 und I_2 , aus fiktiven Taxelwiderständen R_{Taxel1} und R_{Taxel2} berechnet und anschließend mit einem Rauschstrom konstanter Standardabweichung überlagert. Anschließend wird aus den Strömen, die am Microcontroller gemessene Eingangsspannung $V_{Mess,i} = I_i \cdot R_{Mess}$ berechnet. Nach Gleichung (3.1) wird nun der im Microcontroller berechnete Taxelwiderstand simuliert. Wie aus Abb. 4.12 erkennbar ist, wird das konstante Rauschen erst durch die Umrechnung auf Taxelwiderstände skaliert. Dabei ergibt sich eine Skalierung nach Gleichung (4.5).

```

1      % Simulationsparameter:
2      R_Taxel1 = 40000; % Ohm
3      R_Taxel2 = 10000; % Ohm
4      R_Mess = 10000; % Ohm
5      Vcc = 2.5; % Volt
6
7      % Berechnung des fließenden Stromes mit standardnormalverteiltem Rauschen:
8      I1 = Vcc / (R_Taxel1 + R_Mess) + randn(1,1000) * 10^-6;
9      I2 = Vcc / (R_Taxel2 + R_Mess) + randn(1,1000) * 10^-6;
10
11     % Berechnung des gemessenen Taxelwiderstandes:
12     R1 = R_Mess * (Vcc - I1 .* R_Mess) ./ (I1 .* R_Mess);
13     R2 = R_Mess * (Vcc - I2 .* R_Mess) ./ (I2 .* R_Mess);

```

Listing 4.1: *MATLAB*[®]-Code zur Simulation des Rauscheffektes.

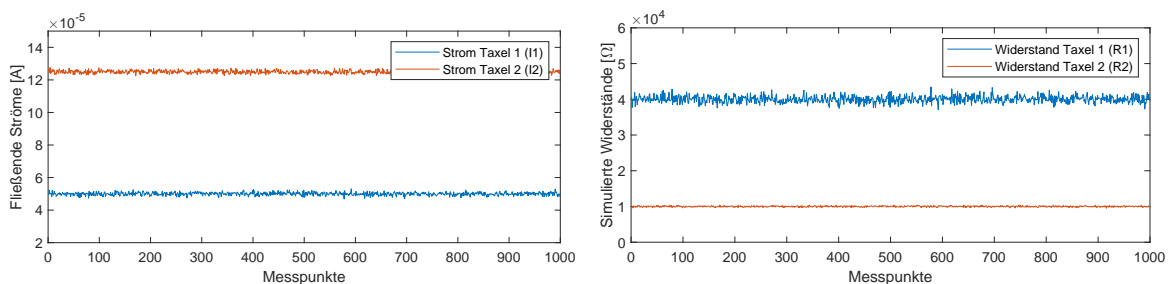


Abbildung 4.12: Simulierte Ströme und Taxelwiderstände, überlagert mit weißem Rauschen.

4.3 Plan zur methodischen Untersuchung von Sensoreigenschaften bei Konfiguration des Sensors

Einfluss auf Sensoreigenschaften	Veränderung am Sensor					
	Dämpfungs- schicht	abriebfeste Schicht	Sensor- element	Über- spannung	Aus- richtung	Auswerte- elektronik
Ruhewiderstand	–	–	+	+	–	–
Streuung um den Ruhewiderstand	–	–	+	+	–	–
Empfindlichkeit	+	+	+	+	–	–
Kopplung benach- barter Elemente	+	+	+	+	–	–
Kennlinie	o	o	+	+	–	–
Hysterese Geschwin- digkeitsabhängigkeit	+	+	+	–	–	–
Hysterese Belastungs- abhängigkeit	o	o	+	–	–	–
Drifteffekt	+	+	+	o	–	–
Prellereffekt	+	+	+	+	–	–
Totzeitverhalten	+	+	+	–	–	+
Rauschverhalten	–	–	o	–	–	+

Tabelle 4.10: Plan zur Durchführung von Messungen nach Konfiguration des Sensoraufbaus. Der referenzierte Sensoraufbau ist dabei auf den Prototyp nach Kapitel 3.1 bezogen. Legende: + ... Messung notwendig, o ... Messung empfohlen, – ... Messung nicht notwendig

Änderungen am Sensor können deutliche Einflüsse auf dessen Verhalten haben. In Tabelle 4.10 sind notwendige bzw. empfohlene Messungen bei Konfiguration des Sensors vermerkt. Diese Annahmen basieren auf den experimentellen Erkenntnissen aus Kapitel 4 und Validierungsmessungen aus Kapitel 7.2.3. Im Folgenden werden die Gründe für Veränderungen der Sensoreigenschaften näher erläutert.

1. Veränderung der Dämpfungsschicht und abriebfesten Schutzschicht:

Die Dämpfungsschicht und abriebfeste Schutzschicht haben durch ihre viskoelastischen Eigenschaften ähnliche Einflüsse auf das Sensorverhalten. Durch Variation des Elastizitätsmoduls kommt es zu Änderungen in allen Sensoreigenschaften, welche sich aufgrund viskoelastischer Eigenschaften von Sensormaterialien erklären lassen. Eine Erhöhung der Steifigkeit führt unter anderem zur Abschwächung der Kopplung benachbarter Elemente, des Drifteffektes und kann die Sensorempfindlichkeit erhöhen. Jedoch nimmt gleichzeitig die Dämpfungsfähigkeit der Fußsohle ab. Eine Verringerung des Elastizitätsmoduls kann hingegen zeitabhängige Eigenschaften wie die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Hystereseverhaltens und das Totzeitverhalten negativ beeinflussen. Da die Sensorkennlinie nach Ausklingen aller zeitabhängigen Größen erfasst wird, wird nur von einem geringen Einfluss der elastischen Bauteile auf diese ausgegangen.

2. Veränderung des Sensorelements:

Das Sensorelement bildet die Grundlage der gesamten taktilen Fußsohle. Grundsätzlich wird jede betrachtete Sensoreigenschaft durch dieses piezoresistive Sensorelement beeinflusst. Aus diesem Grund wird bei einer Veränderung des taktilen Sensorelements eine neue Durchführung aller experimentellen Untersuchungen empfohlen. Lediglich das Rauschverhalten hat seinen Ursprung in der Auswertelektronik. Da jedoch der

Sensor als Antenne wirkt, kann sich auch das Rauschverhalten bei einer Konfiguration des Sensorelements geringfügig ändern.

3. Erhöhung der Überspannungskraft an den Sensorschichten:

Da der Versuchsprototyp nach Kapitel 3.1 keinen nennenswerten Vibrationen oder Beschleunigungen ausgesetzt ist, sind dessen Schichten lediglich lose aufeinander gelegt. Für die reale Fußkonstruktion von LOLA muss jedoch ein gewisser Zusammenhalt erreicht werden, um eine relative Verschiebung zwischen den Sensorschichten zu verhindern. Aus diesem Grund werden die Dämpfungsschicht und das taktile Sensorelement mit der abriebfesten Schicht überspannt. In Kapitel 7.2.3 wird ein fußähnlicher Prototyp für Validierungsmessungen entwickelt. Mit diesem Prototyp kann die Überspannung der Sensorschichten simuliert werden.

Bei der Überspannung des taktilen Sensorelements zeigen sich positive Veränderungen des Sensorverhaltens. Es ändern sich zwar viele Modellparameter, jedoch werden diese deutlich einheitlicher als bei dem nicht überspannten Prototyp aus Kapitel 3.1.

Zum einen sinken die Absolutwerte der Ruhewiderstandsmatrix zu einheitlicheren Ruhewiderständen. Dies lässt sich durch entstehende, klar definierte Anpressdrücke im unbelasteten Zustand erklären. Davon betroffen sind auch alle Effekte, welche mit der Ruhewiderstandsmatrix in Verbindung stehen. Aus diesem Grund wird die Wiederholung aller Messungen aus Abschnitt 4.1 empfohlen.

Zum anderen verändert sich das Kennlinienverhalten. Dieses wird deutlich einheitlicher und die Kennlinien werden generell etwas flacher. Die Kopplung benachbarter Elemente wird auf Basis der inversen Kennlinie nach Abb. 4.5 bestimmt. Aus diesem Grund muss auch der Einfluss auf benachbarte Elemente bei einer Überspannung des Sensors neu ausgewertet werden.

Ein Unterschied zeigt sich zudem im Prellverhalten. Der Prelleffekt ist, verglichen mit dem Sensorprototyp ohne Überspannung, bei Belastung teilweise schwächer ausgeprägt. Bei Entlastung zeigt sich hingegen kaum eine Veränderung.

4. Änderung der räumlichen Ausrichtung des Sensors:

Der entwickelte Prototyp nach Abschnitt 7.2.3 kann in verschiedenen Raumrichtungen eingespannt werden. Bei der Durchführung mehrerer Experimente unterschiedlicher Ausrichtung, lässt sich keine Änderung des Sensorverhaltens beobachten. Es muss jedoch auf eine ausreichend hohe Überspannungskraft des Sensors geachtet werden, da ansonsten bei Gehversuchen starke Vibrationen induziert werden können. Bei einer unzureichenden Überspannungskraft kann es zusätzlich zu einer relativen Verschiebung zwischen den Sensorschichten kommen, wodurch die Messdaten unbrauchbar werden.

5. Änderung der Auswerteelektronik:

Die Auswerteelektronik hat Einfluss auf das Totzeit- und Rauschverhalten des Sensors. Bei einer Konfiguration der Elektronik muss überprüft werden, ob eine Vernachlässigung des Totzeitverhaltens nach wie vor gerechtfertigt ist. Bei Reduktion der Abtastfrequenz kommt es zum Beispiel zu Verzögerungen im Zeitverhalten. Das Rauschverhalten hat seinen Ursprung ebenso in der Auswerteelektronik. Vor allem bei einer Veränderung der elektronischen Komponenten, muss das Rauschverhalten neu ausgewertet werden. Es kann jedoch auch bereits bei einer Steigerung der Abtastfrequenz, zur Skalierung des Rauscheffektes durch die Multiplexer und dergleichen kommen. Für die spätere Anwendung des Sensors als taktile Fußsohle, muss die Auswerteelektronik am Fuß von LOLA angebracht werden. In dessen Nähe befinden sich viele Stellantriebe und stromführende Leitungen. Besonders elektrische und magnetische Felder haben deutliche Einflüsse auf Rauscheffekte. Aus diesem Grund wird empfohlen, das Rauschverhalten an der finalen Fußkonfiguration von LOLA erneut auszuwerten.

Kapitel 5

Entwicklung des Sensormodells

In diesem Kapitel wird auf die Entwicklung einzelner Eigenschaftsmodelle des Sensors eingegangen.

Die Modelle im folgenden Kapitel beziehen sich auf die Sensorkonfiguration aus Kapitel 3.1 und die experimentellen Ergebnisse aus Kapitel 4. Für jedes der folgenden Sensormodelle wird eine eigene *MATLAB*[®] Funktion erstellt, über welche die Ausgangsgrößen des jeweiligen Modells erzeugt werden können. Einzelne Modelle werden in einem übergeordneten *MATLAB*[®] File aufgerufen. Die Aufrufreihenfolge ist in Abb. 5.1 dargestellt. Das *MATLAB*[®] Modell dient als Grundlage für die spätere Entwicklung eines Sensormodells in der Mehrkörpersimulationsumgebung von LOLA nach Kapitel 6.

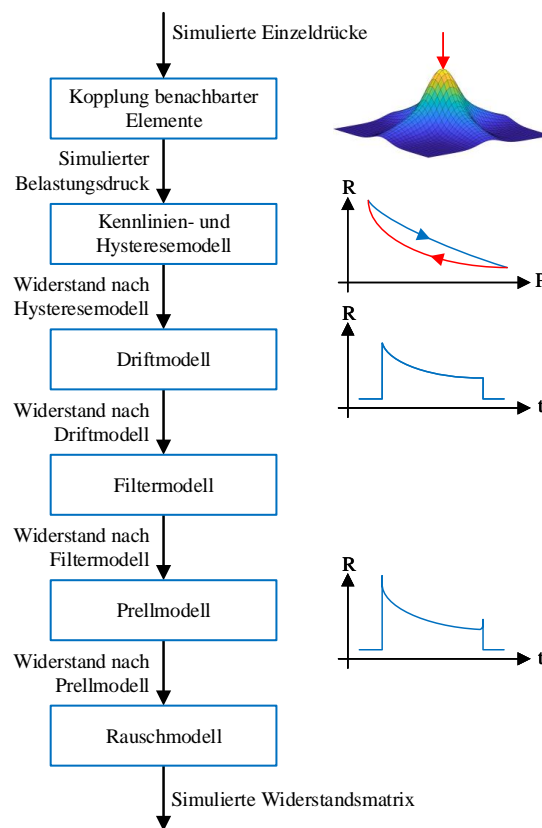


Abbildung 5.1: Aufrufabfolge der Sensormodelle.

5.1 Modell für die Kopplung zwischen benachbarten Elementen

In Abb. 5.2 ist die Interpolation der in Kapitel 4.2.1 erzeugten Messpunkte für die Kopplung zwischen benachbarten Elementen dargestellt. Dabei gilt zu beachten, dass die Interpolation dieses Kennfeldes vorerst nur für die punktförmige Belastung eines Taxels gültig ist.

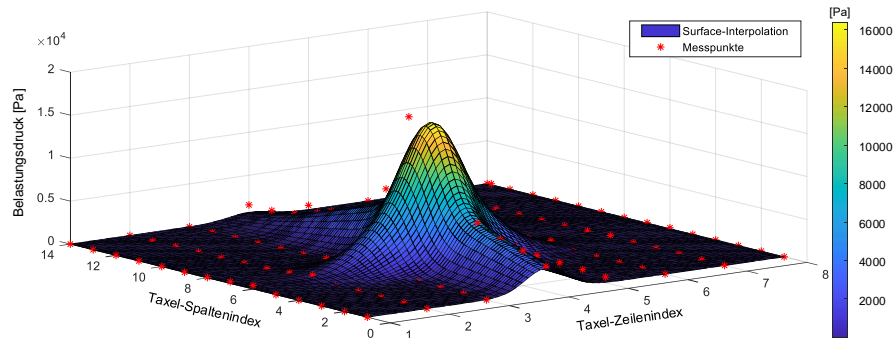


Abbildung 5.2: Interpolation der Messpunkte für die Kopplung zwischen benachbarten Elementen.

Die Interpolation der Messpunkte erfolgt durch eine Gauß-Funktion (Glockenkurve) im Dreidimensionalen, der Form

$$P(x, y) = p_1 \cdot e^{p_2(x-x_0)^2} \cdot e^{p_3(y-y_0)^2} + p_4 \cdot e^{p_5(x-x_0)^2} \cdot e^{p_6(y-y_0)^2}, \quad (5.1)$$

wobei die Parameter p_1 bis p_6 frei wählbare Modellkoeffizienten sind. Über die Funktionsgrößen $x \in [1, 8]$ für den Zehen-Sensor bzw. $x \in [1, 20]$ für den Fersen-Sensor und $y \in [1, 14]$, können einzelne Taxel gewählt werden. Die Parameter x_0 und y_0 ermöglichen eine Verschiebung des Funktionsursprungs in das jeweilig belastete Taxel. Die Gauß-Funktion stellt für $x_0 = y_0 = 0$ eine symmetrische Funktion bezüglich der x - und y -Achse dar. Zudem weist sie ein Maximum im Punkt $(0,0)$ auf.

Die Parameter p_1 bis p_6 werden durch Interpolation der Messdaten aus Kapitel 4.2.1, mit der Funktion aus Gleichung (5.1) erzeugt. Als Interpolationsverfahren wird die Methode der kleinsten Quadrate verwendet. Dieses Verfahren erzeugt Quadrate zwischen den Messwerten und dem zu interpolierenden Kennfeld. Als beste Interpolationsparameter ergeben sich nach [10] solche, bei denen die Fläche aller Quadrate minimal wird. Die Methode der kleinsten Quadrate ist in der *MATLAB® Curve Fitting Toolbox™* implementiert.

Die aus der Interpolation mehrerer Messdaten resultierenden Parameter $p_{1,i}$ bis $p_{6,i}$ werden wiederum zu einheitlichen Parametern gemittelt bzw. zu Parameterfunktionen interpoliert. Die Parameter p_2 , p_3 , p_5 und p_6 zeigen keine Abhängigkeit vom wirkenden Belastungsdruck und werden zu den Konstanten nach Tabelle 5.1 bestimmt.

Die Parameter p_1 und p_4 zeigen hingegen eine deutliche Abhängigkeit vom wirkenden Belastungsdruck. Dies deckt sich mit den physikalischen Hintergründen für den Effekt der Kopplung zwischen benachbarten Elementen. Der Einfluss auf benachbarte Elemente steigt mit wachsendem Belastungsdruck, da die viskoelastischen Materialien stärker verformt werden und somit auch höhere Zugspannungen in die Edelstahlfäden induziert werden. Die Parameter p_1 und p_4 sind für die Skalierung der interpolierten Kennfelder verantwortlich und spiegeln somit diesen Effekt wieder. Die Belastungsdruckabhängigkeit von p_1 und p_4 ist in

Parameter	Wert
p_2	-0.20
p_3	-0.6965
p_5	-2.50
p_6	-0.0150

Tabelle 5.1: Konstanten p_2 , p_3 , p_5 und p_6 aus Gleichung (5.1).

Abb. 5.3 dargestellt. Die Interpolation der beiden Parameter erfolgt durch Kennlinien der Form

$$p_i(P) = a_i \cdot P^{b_i} \text{ mit } i \in \{1, 4\}, \quad (5.2)$$

wobei a_i und b_i frei wählbare Konstanten sind und P den wirkende Belastungsdruck darstellt. Als Interpolationsverfahren wird wiederum die Methode der kleinsten Quadrate verwendet. a_i und b_i ergeben sich nach Tabelle 5.2.

Parameter	Wert
a_1	1.5417
b_1	0.8377
a_4	0.4171
b_4	0.9285

Tabelle 5.2: Konstanten a_i und b_i aus Gleichung (5.2).

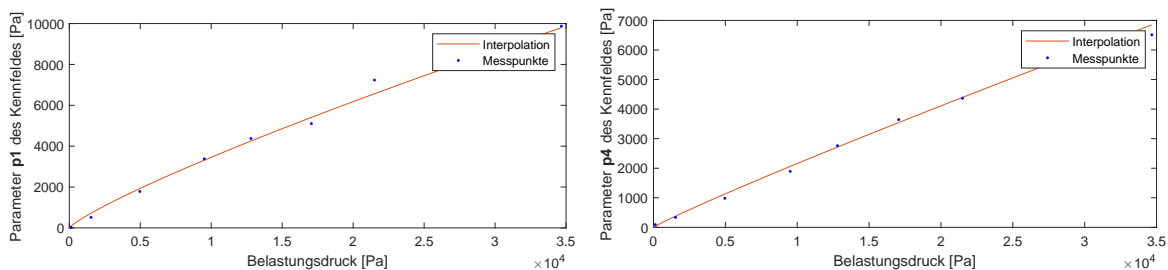


Abbildung 5.3: Parameter p_1 und p_4 des Kennfeldes für die Kopplung zwischen benachbarten Elementen.

Aus dem Modell nach Gleichung (5.1) können nun die induzierten Belastungsdrücke auf benachbarte Taxel berechnet werden. Diese sind jedoch wie oberhalb erwähnt wird, vorerst nur für punktförmige Belastungen geeignet.

Experimentelle Auswertungen ergeben, dass sich eine großflächige Belastung des Sensors durch eine Überlagerung der Modelle für punktförmige Belastungen abbilden lässt. Die spezifischen Kennfelder für belastete Taxel beeinflussen sich dabei gegenseitig, wobei pro Taxel das jeweilige Kennfeld mit den höchsten simulierten Belastungsdrücken dominiert.

Dieses Verhalten lässt sich modellieren, indem vorerst für jedes belastete Taxel ein separates Kennfeld nach Gleichung (5.1) gebildet wird. Anschließend werden die taxelspezifischen Kennfelder überlagert. Für die Überlagerung der entstandenen Menge an Kennfeldern, werden bei der Modellbildung unterschiedliche Verfahren ausgewertet. Als beste Annäherung des realen Sensorverhaltens zeigt sich ein Median- oder Mittelwertmodell, wobei die Mittelwertbildung einen geringfügig kleineren Modellierungsfehler aufweist und deshalb in der Simulation eingesetzt wird. Das Mittelwertmodell wird durch Berechnung des Mittelwerts aus den Funktionswerten an jedem Taxel bestimmt. Da pro Taxel das jeweilige Kennfeld mit den höchsten Belastungsdrücken eine gewisse Dominanz aufweist, erfolgt anschließend eine

Addition des Maximums, aus den Funktionswerten an jedem Taxel, zu dem bestimmten Mittelwert. Diese Vorgehensweise ist anschaulich als *MATLAB*[®]-Code in Listing 5.1 dargestellt.

```
1 P_gesamt(x,y) = mean(P_einzel(x,y,:)) + max(P_einzel(x,y,:))
```

Listing 5.1: *MATLAB*[®]-Code zur Simulation großflächiger Belastungen.

Dabei beschreibt x den Zeilen- und y den Spaltenindex einzelner Taxel. Die dritte Dimension von P_einzel kennzeichnet das für jedes belastete Taxel gebildete Kennfeld nach Gleichung (5.1).

Durch die Überlagerung der gebildeten Kennfelder ergibt sich eine großflächige Belastungsverteilung für jeden Zeitschritt. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die gebildete Belastungsverteilung nach Listing 5.1 nur für ursprünglich unbelastete Taxel gültig ist. Für direkt belastete Taxel wird der wirkende Belastungsdruck beibehalten, da dieser zum einen bereits bekannt ist und zum anderen nicht von benachbarten Taxeln beeinflusst wird.

5.2 Kennlinien- und Hysteresemodell

In Abb. 5.4 sind die Messpunkte aus Kapitel 4.2.2 und die daraus interpolierten Kennlinien des Sensors, bei Be- und Entlastung, dargestellt. Um mithilfe der simulierten Druckverteilung P auf der Sensorfläche, die zugehörigen Sensorwiderstände R zu ermitteln, wird eine zeitinvariante, exponentielle Kennlinie der Form

$$R(P) = ae^{bP} + ce^{dP} \quad (5.3)$$

gebildet. a , b , c und d sind frei wählbare Modellparameter. Die blauen Messpunkte werden pro Taxel durch das Modell aus Gleichung (5.3) interpoliert, wodurch sich die in schwarz dargestellten Kennlinien ergeben. Als Interpolationsverfahren wird die Methode der kleinsten Quadrate verwendet. Um die Anzahl der durchzuführenden Experimente zu reduzieren und eine taxelübergreifende, einheitliche Kennlinie zu erzeugen, wird aus den taxelspezifischen Kennlinien ein Medianmodell gebildet. Zur Bildung dieses Modells, wird der Median aus den Parametern a_i , b_i , c_i und d_i einiger spezifischer Kennlinien berechnet. Die daraus entstandenen Konstanten a , b , c und d führen zu den in rot dargestellten Kennlinien. Da sich die Kennlinien für Be- und Entlastung nach Kapitel 4.2.2 unterscheiden, wird je ein Medianmodell für positive und negative Belastungsgradienten gebildet. Die zugehörigen Parameter sind in Tabelle 5.3 eingetragen.

Parameter	Wert	Parameter	Wert
a_B	0.8436	a_E	0.8567
b_B	$-3.3967 \cdot 10^{-4} \text{ 1/Pa}$	b_E	$-8.5378 \cdot 10^{-4} \text{ 1/Pa}$
c_B	0.1776	c_E	0.1657
d_B	$-2.1538 \cdot 10^{-5} \text{ 1/Pa}$	d_E	$-4.1842 \cdot 10^{-5} \text{ 1/Pa}$

Tabelle 5.3: Konstanten der Medianmodelle für Be- und Entlastung aus Gleichung (5.3). B steht für Belastung und E für Entlastung.

Die taxelübergreifenden, einheitlichen Kennlinien aus dem Medianmodell sind in Abb. 5.5 dargestellt. Es lässt sich deutlich das Hystereseverhalten des Sensors in den Kennlinien erkennen, da die Entlastungs- unter der Belastungskurve liegt.

In Kapitel 4.2.3 wird eine Geschwindigkeitsunabhängigkeit der Hystereseigenschaften festgestellt. Darüber hinaus zeigen sich ähnliche Verläufe zwischen den Kennlinien für Be- bzw.

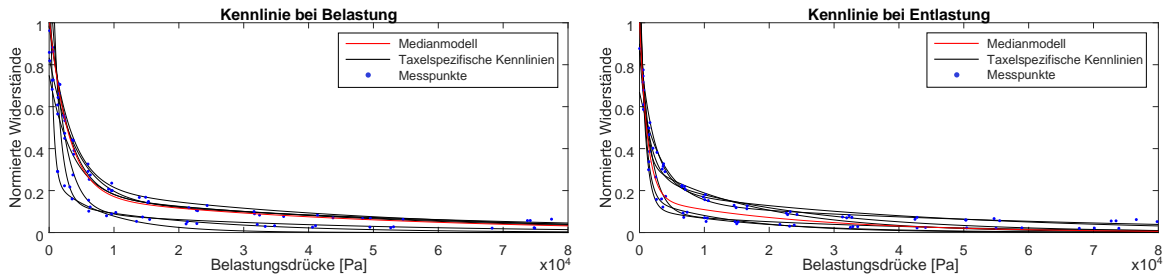


Abbildung 5.4: Taxelspezifische Kennlinien und Medianmodell zur Berechnung des resultierenden Widerstandes aus der simulierten Pressung P für Be- und Entlastung.

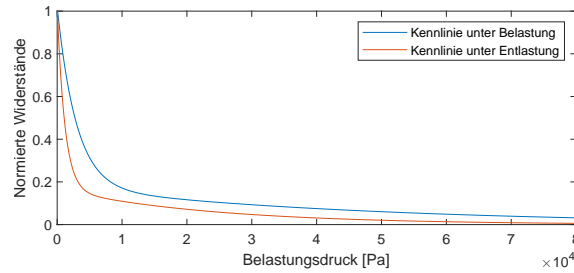


Abbildung 5.5: Medianmodell der Kennlinien unter Be- und Entlastung.

Entlastung und den beiden Hysterese-Pfaden. Aus diesen Gründen wird die Entscheidung getroffen, Hystereseeffekte aus den Medianmodellen für Be- und Entlastung zu simulieren. Somit kann das Kennlinien- und Hystereseverhalten in einem Modell kombiniert werden. Die Modellfunktionen basieren auf Gleichung (5.3) und sind im Folgenden dargestellt:

$$R_B(P) = a_B e^{b_B(P+P_0)} + c_B e^{d_B(P+P_0)} \quad R_E(P) = R_0 + a_E e^{b_E P} + c_E e^{d_E P} \quad (5.4)$$

Die Modellfunktion für Entlastung (Index E) kann um den Faktor R_0 in y -Richtung verschoben werden. Ziel dieser Verschiebung ist die Erzeugung eines glatten Kennlinienverlaufs bei einem Übergang von Be- nach Entlastung. Bei steigender Belastung erzeugt das Modell für die Kopplung zwischen benachbarten Elementen positive Belastungsgradienten. Bei zunehmender Entlastung hingegen negative Gradienten. Kommt es bei einem wirkenden Belastungsdruck P_w zu einem Wechsel des Belastungsgradienten von positiv nach negativ, so wird der Verschiebungsfaktor R_0 nach Gleichung (5.5) berechnet.

$$R_0 = R_B(P_w) - (a_E e^{b_E P_w} + c_E e^{d_E P_w}) \quad (5.5)$$

Die Kennlinie für Entlastung ist so lange aktiv, bis ein erneuter Wechsel des Belastungsgradienten von negativ nach positiv erfolgt oder das jeweilige Taxel vollständig entlastet wird. Die Verschiebung von $R_E(P)$ ist in Abb. 5.6 für zwei unterschiedliche Belastungsintervalle dargestellt. Zum Vergleich ist auch ein gemittelt Kennlinienmodell, ohne Hysteresemodell, aufgetragen. Dafür wird aus den Kennlinien-Parametern für die Be- und Entlastung nach Tabelle 5.3 jeweils ein Mittelwert gebildet. Somit ergibt sich eine belastungsrichtungs- und hystereseunabhängige Kennlinie nach Gleichung (5.3).

Die Modellfunktion für Belastung (Index B) kann um den Faktor P_0 in x -Richtung verschoben werden. Bei einem positiven P_0 erfolgt eine Verschiebung in negative x -Richtung. Ziel dieser Verschiebung ist die Erzeugung eines glatten Kennlinienverlaufs bei einem Übergang von Ent- nach Belastung. Bei zunehmender Entlastung erzeugt das Modell für die Kopplung zwischen benachbarten Elementen negative Belastungsgradienten. Bei steigender Belastung hingegen positive Gradienten. Kommt es bei einem wirkenden Belastungsdruck P_w zu einem Wechsel

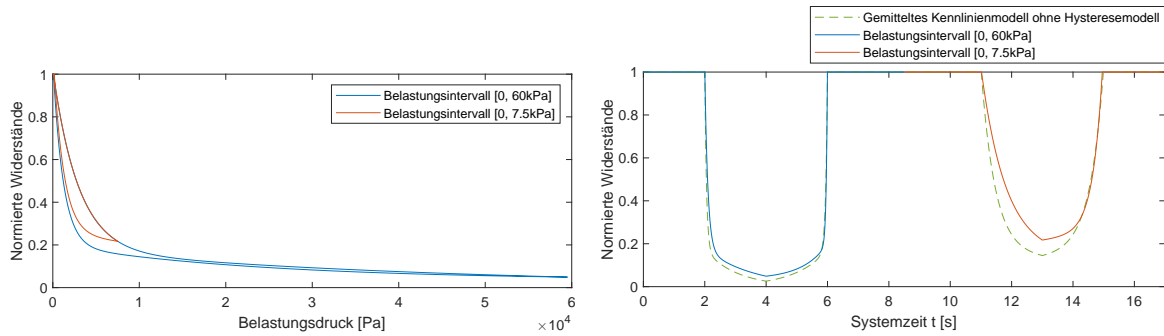


Abbildung 5.6: In *MATLAB*[®] modellierte Widerstände des Hysterese Modells in Abhängigkeit des wirkenden Belastungsdruckes (links) und der Systemzeit (rechts). Dargestellt sind zwei Belastungen von 0 bis 60kPa bzw. 7.5kPa und eine anschließende Entlastung. In der Abbildung rechts ist zusätzlich das gemittelte Kennlinienmodell ohne dem Hysterese Modell aufgetragen.

des Belastungsgradienten von negativ nach positiv, so wird der Faktor P_0 durch Berechnung der Nullstelle in Gleichung (5.6) ermittelt.

$$0 = -R_E(P_w) + a_B e^{b_B(P_w + P_0)} + c_B e^{d_B(P_w + P_0)} \quad (5.6)$$

Die Kennlinie für die Belastung ist so lange aktiv, bis ein erneuter Wechsel des Belastungsgradienten von positiv nach negativ erfolgt. Bei vollständiger Entlastung wird $P_0 = 0$ gesetzt. Die Verschiebung von $R_B(P)$ ist in Abb. 5.7 für zwei unterschiedliche Belastungsintervalle dargestellt. Zum Vergleich ist auch das gemittelte Kennlinienmodell, ohne Hysterese Modell, aufgetragen.

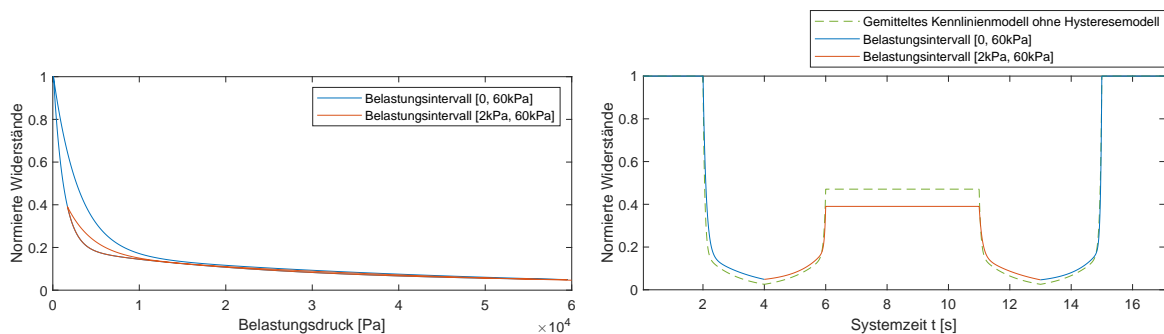


Abbildung 5.7: In *MATLAB*[®] modellierte Widerstände des Hysterese Modells in Abhängigkeit des wirkenden Belastungsdruckes (links) und der Systemzeit (rechts). Dargestellt sind zwei Belastungen zwischen 0 und 60kPa bzw. 2kPa und 60kPa. In der Abbildung rechts ist zusätzlich das gemittelte Kennlinienmodell ohne dem Hysterese Modell aufgetragen.

Die Berechnung der Nullstelle aus Gleichung (5.6) erfolgt in *MATLAB*[®] durch die Funktion *fzero* nach Listing 5.2.

```

1   f_zeroLoad = @(x) (a_B * exp(b_B * x) + c_B * exp(d_B * x)) - (R0 + a_E * exp(
2       b_E * Pw) + c_E * exp(d_E * Pw));
   P0 = fzero(f_zeroLoad, 0); % Start der Nullstellensuche in x = 0

```

Listing 5.2: *MATLAB*[®]-Code zur Berechnung der Nullstelle aus Gleichung (5.6).

Der Algorithmus hinter *fzero* verwendet zur Nullstellenberechnung nach [15] eine Kombination aus Bisektions-, Sekanten- und inversen quadratischen Interpolationsverfahren.

5.3 Driftmodell

Die Entwicklung des Driftmodells erfolgt in Anlehnung an das in [24] umgesetzte Modell zur Driftkorrektur. Der Driftverlauf nach einem Widerstandssprung tritt in Form einer abklingenden Exponentialfunktion - überlagert zum Widerstand aus dem Hysteresemodell - nach Gleichung (5.7) auf.

$$R_{Drift}(t) = a \cdot e^{-b(t-T)} \quad (5.7)$$

Dabei sind a und b frei wählbare Parameter. T ermöglicht eine Verschiebung der Driftfunktion in den Zeitpunkt nach der Beendigung eines Widerstandssprunges. In den Experimenten aus Kapitel 4.2.4 werden unterschiedliche Widerstandssprünge für die Be- und Entlastung erzeugt. Die aus den Widerstandssprüngen resultierenden Driftverläufe (z.B. im Zeitintervall [15s, 110s] oder [110s, 170s] nach Abb. 4.10) werden durch Gleichung (5.7) interpoliert. Als Interpolationsverfahren wird die Methode der kleinsten Quadrate verwendet. Die durch Interpolation ermittelten Parameter a_i und b_i sind in Abhängigkeit des verursachenden Widerstandssprunges ΔR_i , in Abb. 5.8 als blaue Messpunkte eingetragen.

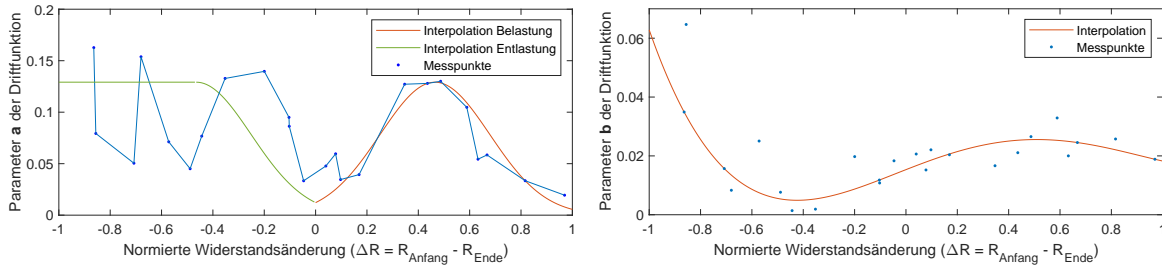


Abbildung 5.8: Interpolierte Parameter der Driftfunktion in Abhängigkeit der normierten Widerstandsänderung.

Die Messpunkte für a_i und b_i werden wiederum durch Kennlinien der Form

$$a(\Delta R) = \begin{cases} p_{1,a} \cdot e^{p_{2,a}(\Delta R - p_{3,a})^2}, & \text{für } \Delta R > 0 \\ p_{1,a} \cdot e^{p_{2,a}(\Delta R + p_{3,a})^2}, & \text{für } -p_{3,a} < \Delta R < 0 \\ p_{1,a}, & \text{für } \Delta R \leq -p_{3,a} \end{cases} \quad (5.8)$$

$$b(\Delta R) = p_{1,b}\Delta R^4 + p_{2,b}\Delta R^3 + p_{3,b}\Delta R^2 + p_{4,b}\Delta R + p_{5,b} \quad (5.9)$$

interpoliert. Auch hier wird als Interpolationsverfahren die Methode der kleinsten Quadrate verwendet. Die ermittelten Parameter $p_{i,a}$ und $p_{i,b}$ sind in Tabelle 5.4 dargestellt.

In Abb. 5.8 links lässt sich bei teilweiser und vollständiger Entlastung des Sensors, ein stochastisches Verhalten des Parameters $a(\Delta R)$ erkennen. Dies lässt sich wiederum auf unterschiedliche Fadenspannungen in den Edelstahlfäden zurückführen. Bei geringen bis keinen Belastungsdrücken können sich Driteffekte aufgrund der wechselnden Kontaktbedingungen zwischen den Edelstahlfäden und dem piezoresistiven Polymer verändern. Da Simulationen reproduzierbare Ergebnisse liefern sollen, muss das Driftmodell als deterministisches Modell implementiert werden. Eine gute Annäherung an das Driftverhalten im Bereich $-0.4648 < \Delta R \leq 0$, ergibt die um die y-Achse gespiegelte Parameterfunktion für $a(\Delta R)$ bei Belastung. Für Widerstandssprünge mit $\Delta R \leq -0.4648$, wird das Maximum der Parameterfunktion beibehalten. Die daraus resultierende Funktion ist durch den grünen Verlauf in Abb. 5.8 dargestellt.

Parameter	Wert	Parameter	Wert
$p_{1,a}$	0.1291	$p_{1,b}$	0.0324 1/s
$p_{2,a}$	-10.9405	$p_{2,b}$	-0.0564 1/s
$p_{3,a}$	0.4648	$p_{3,b}$	0.0072 1/s
		$p_{4,b}$	0.0341 1/s
		$p_{5,b}$	0.0153 1/s

Tabelle 5.4: Parameter der Funktionen $a(\Delta R)$ und $b(\Delta R)$ aus Gleichung (5.8) und (5.9).

Nach [24] addieren sich Drifteffekte bei mehreren Widerstandssprüngen auf. Dies ist auch bei diesem Sensor der Fall, jedoch kommt es bei neuen Widerstandsänderungen zur Abschwächung bereits bestehender Driftfunktionen. Als beste Annäherung des Driftverhaltens ergibt sich ein Modell mit einem Maximum aus den fünf aktuellsten Driftfunktionen nach Gleichung (5.10).

$$R_{Drift}(t) = R_{Hysteresese}(t) + a_1 \cdot e^{-b_1 \cdot (t-T_1)} + \sum_{i=2}^{i \leq 5} \frac{a_i}{2(i-1)} \cdot e^{-2 \cdot (i-1) \cdot b_i \cdot (t-T_i)} \quad (5.10)$$

Index 1 entspricht dabei immer der aktuellsten Driftfunktion. Bei Hinzukommen einer neuen Funktion, werden bestehende Funktionsparameter a_i und b_i um jeweils einen Index nach hinten verschoben und skaliert. $R_{Hysteresese}(t)$ entspricht dem simulierten Widerstand aus dem Hysteresemodell.

In Abb. 5.9 ist die Anwendung des Driftmodells auf einen vorgegebenen Widerstandsverlauf aus dem Hysteresemodell dargestellt. Nach jedem Sprung im Widerstandsverlauf lässt sich eine deutliche Änderung des Driftverhaltens erkennen.

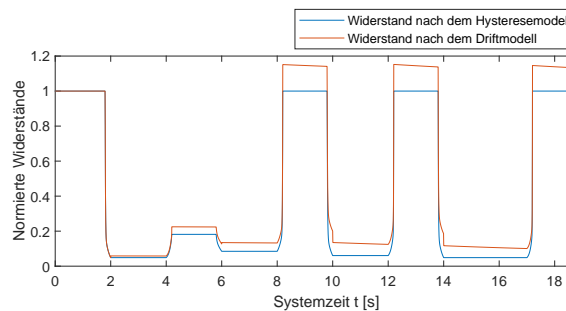


Abbildung 5.9: In *MATLAB*[®] modellierte Widerstände nach dem Hysteresemodell und nach dem Driftmodell in Abhängigkeit der Systemzeit.

5.4 Filtermodell

Die Parameter a und b des Driftmodells aus Gleichung (5.10) können erst nach Beendigung eines Widerstandssprunges gesetzt werden, da diese von der Höhe einer Widerstandsänderung ΔR abhängen. Bei realen Laufversuchen mit LOLA erfolgt eine Be- oder Entlastung nicht in unendlich kurzer Zeit, sondern durchschnittlich innerhalb von 200ms. Aus diesem Grund ergeben sich im simulierten Widerstandsverlauf aus Abb. 5.9, nach jeder Belastung Sprünge, da neue Driftparameter erst bei bekanntem ΔR gesetzt werden können (siehe Zeitpunkte 2s, 6s, 10s und 14s). Diese Sprünge stimmen nicht mit dem realen Sensorverhalten überein, da

sich beim Ausklingen von Be- oder Entlastungsschritten glatte Übergänge ergeben. Zur Simulation von glatten Zustandsübergängen wird dem Driftmodell ein FIR-Filter¹ nachgeschaltet. Dieser diskrete Filter hat die Form aus Gleichung (5.11). Über *windowSize* kann die Länge der zu filternden Daten bestimmt werden. Für das Filtermodell wird *windowSize* = 150 gewählt.

$$R_{Filter}[n] = \frac{1}{windowSize} (R_{Drift}[n] + R_{Drift}[n-1] + \dots + R_{Drift}[n-(windowSize-1)]) \quad (5.11)$$

Da es nur nach simulierter Belastung des Sensors zu Sprüngen im Widerstandsverlauf kommt, wird der FIR-Filter auch nur beim Übergang auf positive Belastungsgradienten aktiviert. Übersteigt der Widerstand aus dem Driftmodell dessen des Filtermodells, also beim Übergang auf negative Belastungsgradienten, so wird der FIR-Filter deaktiviert. In Abb. 5.10 ist die Anwendung des Filtermodells auf einen vorgegebenen Widerstandsverlauf aus dem Driftmodell dargestellt.

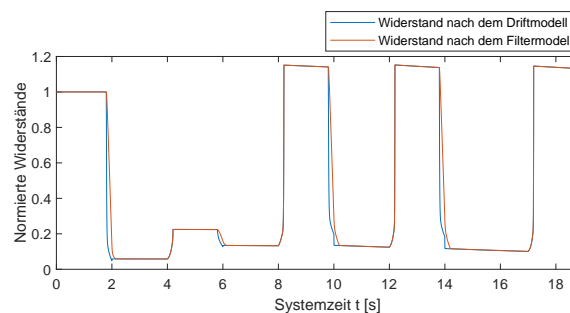


Abbildung 5.10: In *MATLAB*[®] modellierte Widerstände nach dem Driftmodell und nach dem Filtermodell in Abhängigkeit der Systemzeit.

5.5 Prellmodell

In Kapitel 4.2.5 werden zu den Zeitpunkten von Belastungszunahmen und -abnahmen, Sprünge im Widerstandsverlauf erfasst. Die Höhe des Sprunges ist dabei auf den Driftwiderstand vor der Belastung (bei einer Belastung des Sensors) bzw. den Driftwiderstand nach der Entlastung (bei einer Entlastung des Sensors) bezogen. Diese Widerstandssprünge sind als blaue Messpunkte in Abb. 5.11 dargestellt. Da die Sprünge auf Driftwiderstände bezogen sind, können sich höhere normierte Widerstände als 1 ergeben.

Wie in Abb. 5.11 erkennbar ist, zeigen die Widerstandssprünge bei mittleren Widerständen ein Maximum. Dies legt die Verwendung einer Gauß-Funktion (Glockenkurve) zur Interpolation der Messpunkte nahe. Jedoch zeigt sich, dass die Beträge der Widerstandssprünge, ausgehend von deren Maximalwerten, nicht symmetrisch abnehmen wie es bei einer reinen Glockenkurve der Fall ist. In Richtung höherer Widerstände fällt die Funktion flacher ab als bei Widerständen welche gegen null gehen. Aus diesem Grund werden die Messpunkte aus Abb. 5.11 durch zwei kombinierte Gauß-Funktionen nach Gleichung (5.12) interpoliert. Diese Interpolationsfunktion zeigt, verglichen mit Polynomen ähnlicher Parameteranzahl, den geringsten Modellierungsfehler.

$$\Delta R_{Sprung}(R) = a \cdot e^{b \cdot R^2} + c \cdot e^{d \cdot R^2} \quad (5.12)$$

¹FIR-Filter bedeutet Finite Impulse Response Filter.

a , b , c und d sind frei wählbare Modellparameter und ergeben sich nach Tabelle 5.5. Als Interpolationsverfahren wird die Methode der kleinsten Quadrate verwendet.

Parameter	Wert	Parameter	Wert
a_B	-1.2150	a_E	-0.8198
b_B	-4.8035	b_E	-6.0806
c_B	1.2153	c_E	0.8305
d_B	-3.0902	d_E	-1.4757

Tabelle 5.5: Konstanten des Prellmodells aus Gleichung (5.12). B steht für Belastung und E für Entlastung.

Wie aus Abb. 5.11 ersichtlich ist, weisen die Messpunkte hohe Streueffekte auf. Da generell die Ursache der Widerstandssprünge nicht genau evaluierbar ist, kann nur erschwert eine Aussage über den Grund dieser Streuung getroffen werden. Bei der Durchführung mehrerer Messungen unter identischen Rahmenbedingungen, ist es nicht möglich identische Widerstandssprünge zu erzeugen. Diese Sprünge haben zwar immer den widerstandsabhängigen Anteil nach Gleichung (5.12), jedoch auch zusätzlich einen stochastischen Anteil. In Kapitel 4.2.5 wird eine Analogie zwischen den Widerstandssprüngen und dem Prelleffekt bei elektromechanischen Bauteilen gefunden. Prellen ist ein stochastisches, nicht reproduzierbares Verhalten. Falls sich der auftretende Widerstandssprung auf den Prelleffekt zurückführen lässt, so wird wahrscheinlich auch der stochastische Anteil in den Widerstandssprüngen durch diesen Effekt verursacht.

Da das Simulationsmodell vergleichbare und reproduzierbare Ergebnisse liefern soll, dürfen in diesem keine stochastischen Eigenschaften integriert werden. Aus diesem Grund wird der Prelleffekt allein auf Basis von Gleichung (5.12) implementiert.

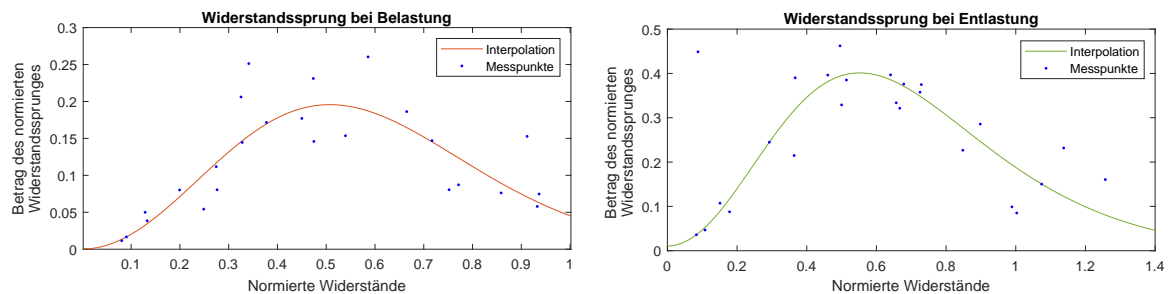


Abbildung 5.11: Betrag des normierten Widerstandssprunges bei Be- und Entlastung.

In Abb. 5.12 ist die Anwendung des Prellmodells auf ein vorgegeben Widerstandsverlauf nach dem Filtermodell dargestellt. Die Widerstandssprünge werden dabei aus Gleichung (5.12) und in Abhängigkeit des Widerstandes aus dem Filtermodell R_{Filter} bestimmt.

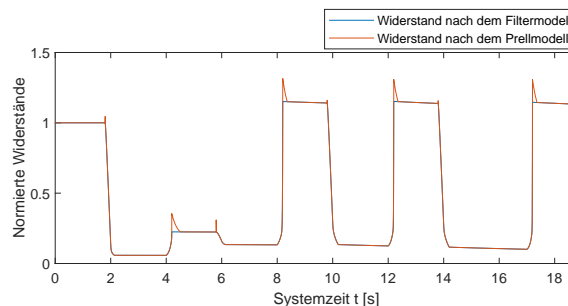


Abbildung 5.12: In *MATLAB*[®] modellierte Widerstände nach dem Filtermodell und nach dem Prellmodell in Abhängigkeit der Systemzeit.

Im *MATLAB*[®] Sensormodell wird nach Entlastungssprüngen, ein Abklingen der Sprungeffekte durch Exponentialfunktionen integriert (siehe Zeitpunkte 4s, 8s, 12s und 17s). Die dadurch nur minimal erhöhte Sensorgenauigkeit steht in keiner Relation zum erhöhten Rechenaufwand. Dadurch wird in Kapitel 6 auf die Integration dieses Abklingens verzichtet. Im Zeitintervall [0s, 18s] aus Abb. 6.5, wird durch das Simulationsmodell in C++ ein analoger Verlauf zu Abb. 5.12 geplottet. Durch Vergleich der beiden Abbildungen lässt sich der auftretende Modellierungsunterschied erkennen. Dieser tritt nur sehr kurzzeitig auf und hat keinen nennenswerten Einfluss auf die Modellgenauigkeit.

5.6 Rauschmodell

In Kapitel 4.2.7 wird die Versuchsdurchführung zur Ermittlung des Rauschverhaltens erläutert. Die aus den Experimenten ermittelten Standardabweichungen in Abhängigkeit des wirkenden Taxelwiderstandes, sind in Abb. 5.13 dargestellt. Grundsätzlich wird dem über das Taxel fließenden Strom konstantes Rauschen überlagert. Eine Widerstandsabhängigkeit ergibt sich wie in Kapitel 4.2.7 erwähnt wird, erst durch die Umrechnung auf Taxelwiderstände. Da jedoch der Rauscheffekt eine Störung im Sensormodell verursacht, wird dieses Verhalten erst als letztes aller Modelle simuliert. Aus diesem Grund wird die Entscheidung getroffen, das Rauschmodell in Abhängigkeit des aktuellen Taxelwiderstandes umzusetzen. Die in Abb. 5.13 dargestellten Messpunkte werden durch ein Modell der Form

$$\sigma(R) = a \cdot R^2 + b \cdot R \quad (5.13)$$

interpoliert. $\sigma(R)$ stellt die Standardabweichung in Abhängigkeit des Taxelwiderstandes dar. a und b sind frei wählbare Modellparameter und ergeben sich zu den Werten nach Tabelle 5.6. Als Interpolationsverfahren wird die Methode der kleinsten Quadrate verwendet.

Parameter	Wert
a	0.006
b	0.001

Tabelle 5.6: Konstanten des Rauschmodells aus Gleichung (5.13).

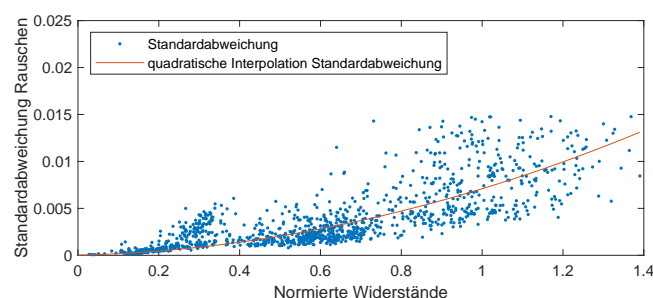


Abbildung 5.13: Standardabweichung des Rauschverhaltens in Abhängigkeit der normierten Taxelwiderstände.

Rauschen ist ein stochastischer Effekt. Da die Simulation des taktilen Sensors jedoch reproduzierbare Ergebnisse liefern soll, wird das Rauschmodell als deterministisches Modell implementiert. In *MATLAB*[®] wird als Zufallszahlengenerator standardmäßig ein *Mersenne-Twister* initialisiert. Dieser *Mersenne-Twister* ist ein Pseudozufallszahlengenerator, dessen Zufallszahlen nach [16] durch einen deterministischen Algorithmus berechnet werden. Nach Aufruf

der *randn*-Funktion gibt *MATLAB*[®] eine normalverteilte, durch den *Mersenne-Twister* erzeugte, Pseudozufallszahl zurück. Die Standardabweichung σ der normalverteilten Zufallszahl wird dabei aus Gleichung (5.13) und in Abhängigkeit des Widerstandes nach dem Prellmodell bestimmt. Das Rauschverhalten wird anschließend dem simulierten Widerstand aus dem Prellmodell überlagert.

Kapitel 6

Integration des Sensormodells in C++

Die Mehrkörpersimulationsumgebung von LOLA ist Teil des *am2b-Projektes*¹. Dieses beinhaltet alle Module für die Steuerung, Regelung und Simulation von LOLA. Die entwickelten Sensormodelle aus Kapitel 5 werden anhand der folgenden Abschnitte in das *am2b-Projekt* integriert. Die Vorgehensweise zur Integration des Sensormodells stützt sich auf den linken Pfad des V-Modells nach Abb. 6.1.

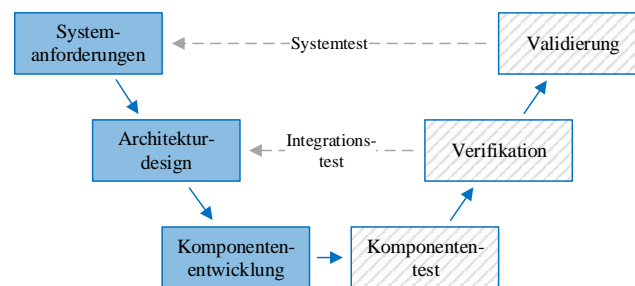


Abbildung 6.1: V-Modell für die Entwicklung und Integration des Sensormodells nach VDI 2206.

Die Systemanforderungen an das Sensormodell resultieren aus der experimentellen Untersuchung von Sensoreigenschaften und den bereits in *MATLAB*[®] umgesetzten Eigenschaftsmodellen. Diese Anforderungen können aus Kapitel 4 und Kapitel 5 entnommen werden.

6.1 Architekturdesign

Ein Klassendiagramm des Sensormodells ist in Abb. 6.2 dargestellt. Das Sensormodell besteht aus einer zentralen Klasse *ContactSensorTactile*, über welche alle Zugriffe auf das taktile Sensormodell geregelt werden. Diese Klasse bildet die zentrale Schnittstelle zur Mehrkörpersimulationsumgebung von LOLA und muss pro Roboterfuß instanziiert werden. Zusätzlich wird eine übergeordnete Klasse *CharacteristicModel* angelegt. Diese Klasse enthält relevante Methoden für alle Sensormodelle. Darunter finden sich Methoden, welche die Modellfunktionen aus Kapitel 5 (Gauß-Funktion im Zweidimensionalen, Dreidimensionalen, usw.) enthalten, aber auch Methoden, um einzelne Modelle zu aktivieren oder deaktivieren. Darüber

¹*am2b* bedeutet „Angewandte Mechanik Zweibeiner“ und steht für den am Lehrstuhl für Angewandte Mechanik entwickelten Steuerungscode von LOLA.

hinaus enthält diese Klasse Attribute mit konstruktiven Größen wie den Sensorabmessungen und der Taxelanzahl.

Für jedes Sensormodell aus Kapitel 5 wird eine separate Klasse angelegt. Jede dieser Klassen erbt von *CharacteristicModel*. Die Modellklassen sind über eine Aggregations-Beziehung in die zentrale Sensorklasse eingebunden. In jede dieser Klassen ist durch Aggregation wiederum die übergeordnete Klasse *ContactSensorTactileParameters* eingebunden. Diese Klasse enthält eine Sammlung der Funktionsparameter aus Tabelle 5.1 bis Tabelle 5.6. Nach einer Konfiguration des Sensors müssen gewisse Experimente anhand dem Vorgehensschema aus Abschnitt 4.3 erneut ausgeführt werden. Kommt es dabei zu einer Veränderung von Modellparametern, so müssen diese in der Klasse *ContactSensorTactileParameters* upgedatet werden.

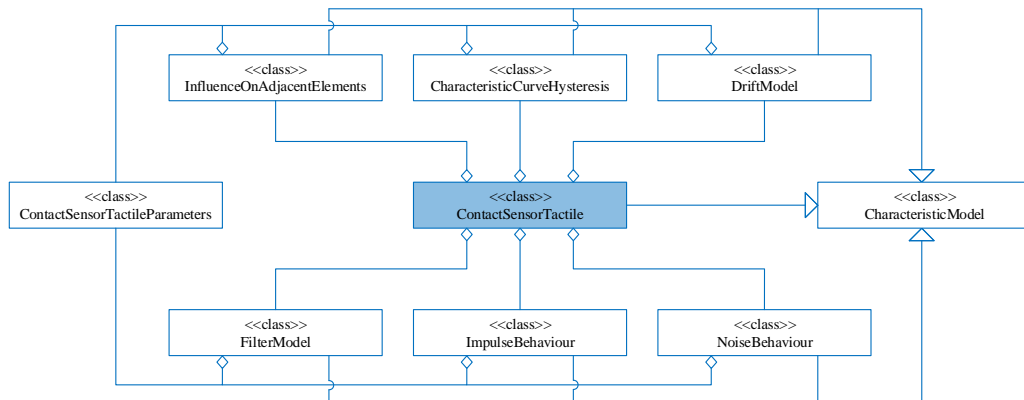


Abbildung 6.2: Klassendiagramm des Sensormodells.

6.2 Komponentenentwicklung

Die Entwicklung der Modellklassen erfolgt anhand der Systemanforderungen aus der experimentellen Untersuchung von Sensoreigenschaften nach Kapitel 4 und den bereits in *MATLAB*[®] umgesetzten Eigenschaftsmodellen nach Kapitel 5. Neben der Funktionsimplementierung wird für jede Klasse eine Doxygen-Dokumentation erstellt. Diese dient zur einfacheren Anwendung und besseren Nachvollziehbarkeit des taktilen Sensormodells.

Vor der Implementierung von Modellklassen, müssen die Fuß-Kontakteigenschaften in der Mehrkörpersimulationsumgebung an die neuen Kontakte des taktilen Sensors angepasst werden. Dafür werden anstatt der pro Fuß integrierten, vier alten Kontaktpads, jeweils zwei neue Kontaktflächen erzeugt, welche die großflächigen taktilen Sensoren widerspiegeln. Die Randabmessungen der neuen Kontaktflächen werden in der Simulation vorerst gegenüber den alten Fußabmessungen nicht verändert. Der Grund hierfür ist, dass die Regelung des Roboters auf diese Kontaktabmessungen optimiert ist. Ebenso haben die Randabmessungen der Kontaktfläche keinen Einfluss auf die Funktionsweise des Sensormodells. Anschließend werden in die Kontaktflächen zusätzliche Kontaktelemente gelegt und in äquidistanten Abständen verteilt. Diese Elemente entsprechen den Taxeln des taktilen Sensors und ermöglichen ein Abrufen der wirkenden Belastungskräfte während der Simulation. In Abb. 6.3 ist die Visualisierung der Mehrkörpersimulation von LOLA dargestellt. An den Fußelementen sind die neu eingeführten Kontaktelemente zu erkennen. Die roten Pfeile stellen die wirkende Kontaktkraft pro Taxel dar.

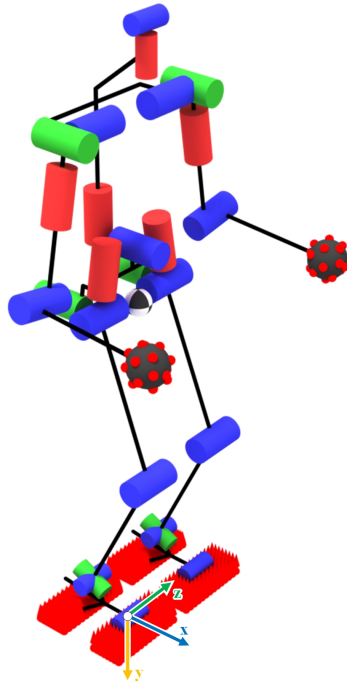


Abbildung 6.3: Visualisierung der Mehrkörpersimulation von LOLA in der Software Blender. An den Fußflächen sind die Kontaktelemente und wirkende Belastungskräfte dargestellt.

6.2.1 Übergeordnetes Sensormodell - *ContactSensorTactile*

Über die zentrale Klasse *ContactSensorTactile* werden alle Zugriffe auf das taktile Sensormodell geregelt. Diese Klasse bildet die zentrale Schnittstelle zur Mehrkörpersimulationsumgebung von LOLA und muss pro Roboterfuß instanziiert werden. Im Wesentlichen besteht diese Klasse aus den zwei Methoden nach Listing 6.1. Der Aufruf der beiden Methoden *update* und *getSensorResistance* muss zyklisch und nacheinander erfolgen.

```

1 // Update sensor data periodically
2 void update(const double t, const double dt);
3
4 // Get simulated sensor data periodically
5 void getSensorResistance(VectorPadSize& resistancePad, VectorHeelSize&
   resistanceHeel);

```

Listing 6.1: Wesentliche Methoden der Klasse *ContactSensorTactile*.

In der Methode *update* werden zunächst aus den pro Kontaktelement wirkenden Belastungskräften, Belastungsdrücke berechnet. Zur Berechnung dieser Drücke wird nur die Normalkraft am jeweiligen Taxel verwendet, da der taktile Sensor auch nur solche erfassen kann. Diese Normalkraft wird an jedem Taxel durch den Kraftanteil in negative y-Richtung repräsentiert. In Abb. 6.3 wird die y-Achse durch den gelben Pfeil dargestellt. Die Ausrichtung der y-Achse ist bei allen definierten Kontaktflächen identisch. Zur Berechnung der Belastungsdrücke nach Gleichung (6.1) wird eine Belastungsfläche von $A = 1\text{cm}^2$ pro Taxel angenommen.

$$P_{\text{Taxel}} = -\frac{F_{y,\text{Taxel}}}{A} \quad (6.1)$$

Nach Berechnung der Belastungsdrücke werden die einzelnen Sensormodelle bzw. -klassen zur Simulationszeit t ausgeführt. Die Aufrufabfolge der Modelle ist in Abb. 5.1 dargestellt.

Der an die Methode *update* zusätzlich übergebene Parameter *dt*, entspricht der verstrichenen Zeit seit dem letzten Methodenaufruf. Dieser Parameter wird in einigen Modellen zur Bestimmung von Differenzenquotienten und dergleichen benötigt.

Durch die übergebenen Referenzen an die Methode *getSensorResistance* können die simulierten Widerstände nach Ausführung der Methode *update* abgefragt werden. Die Vektoren der zurückgegebenen Widerstandswerte sind nach Abb. 6.4 geordnet. Dabei ist jedoch zu beachten, dass durch die implementierten Sensormodelle lediglich normierte Widerstände simuliert und zurückgegeben werden. Falls die in Zukunft adaptierte Regelung von LOLA mit realen Sensorwiderständen in Ω arbeitet, so müssen die Modellausgänge mit der Ruhewiderstandsmatrix nach Kapitel 4.1.1 multipliziert werden.

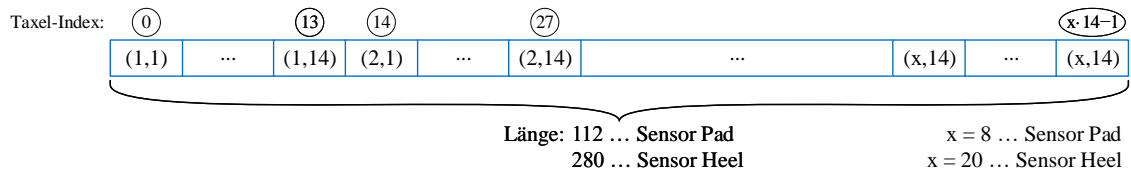


Abbildung 6.4: Aufbau der Vektoren für simulierte Modellwiderstände. Die Bezeichnung der Taxelwiderstände erfolgt als (x,y), mit x als Taxel-Zeilenindex und y als Taxel-Spaltenindex. Als *Sensor Pad* wird der kleine Zehen-Sensor mit $8 \cdot 14 = 112$ Taxel bezeichnet. Als *Sensor Heel* wird der große Fersen-Sensor mit $20 \cdot 14 = 280$ Taxel bezeichnet. Oberhalb der Abbildung ist der zugehörige *Taxel-Index* eingetragen, mit welchem in der Simulationsumgebung gearbeitet wird.

Alle in den Modellklassen verwendeten Vektoren, Matrizen, Matrix- und Vektorarithmetiken basieren auf *Eigen*. *Eigen* ist eine C++ Bibliothek mit Templates für lineare Algebra, Matrix- und Vektoroperationen, geometrische Transformationen, numerische Löser und verwandte Algorithmen [9].

In Abb. 6.5 sind die simulierten Widerstände zweier Taxel, bei alleiniger Belastung von Taxel (4,5), dargestellt. Die Simulationsergebnisse werden durch zyklische Ausführung des vollständigen Sensormodells in C++ erzeugt.

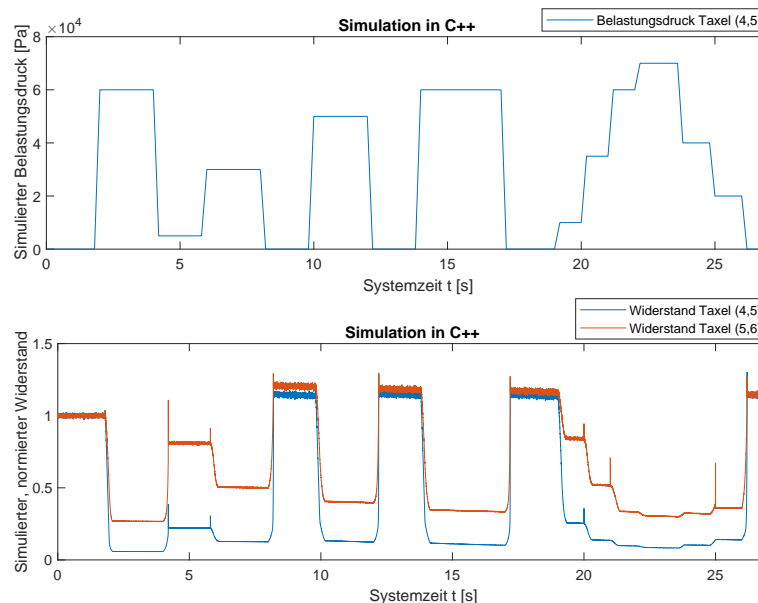


Abbildung 6.5: Simulierte Belastungsdrücke bei alleiniger Belastung von Taxel (4,5) und daraus resultierende, simulierte Widerstände am Taxel (4,5) und (5,6).

6.2.2 Modell für die Kopplung benachbarter Elemente - *InfluenceOnAdjacentElements*

Zur Ausführung des Modells für die Kopplung benachbarter Elemente muss die Methode *executeInfluenceOnAdjacentElementsModel*, der Klasse *InfluenceOnAdjacentElements*, aufgerufen werden. Übergabeparameter sind der wirkende Belastungsdruck an der Fußsohle, in der Form aus Abb. 6.4, und ein Index für den aktuell gewählten Sensor nach Tabelle 6.1. Rückgabeparameter ist die simulierte Druckverteilung.

```

1 // Execution of the influence on adjacent elements model
2 Eigen::VectorXd executeInfluenceOnAdjacentElementsModel(const Eigen::VectorXd
   pressureActing, const int sensorIndex);

```

Listing 6.2: Methode zur Ausführung des Modells für die Kopplung benachbarter Elemente.

Sensor	Pad	Heel
sensorIndex	0	1

Tabelle 6.1: Input Parameter *sensorIndex* der jeweiligen Sensormodelle. Als *Sensor Pad* wird der kleine Zehen-Sensor mit $8 \cdot 14 = 112$ Taxel bezeichnet. Als *Sensor Heel* wird der große Fersen-Sensor mit $20 \cdot 14 = 280$ Taxel bezeichnet.

Nach Aufruf der Methode *executeInfluenceOnAdjacentElementsModel*, wird für jedes direkt belastete Taxel, die Gauß-Funktion nach Gleichung (5.1) berechnet und zeilenweise in der Matrix *m_individualProfiles* gespeichert. Die Spalten dieser Matrix haben eine Struktur nach Abb. 6.4. Die Zeilen entsprechen wiederum der jeweiligen Anzahl an belasteten Taxel. Ein Taxel wird dabei als belastet betrachtet, wenn der berechnete Belastungsdruck aus Gleichung (6.1) größer null ist. Die Gauß-Funktion ist in der übergeordneten Klasse *CharacteristicModel* implementiert.

Die Funktionswerte der berechneten Gauß-Funktionen werden anschließend nach Kapitel 5.1 in jedem Zeitschritt zu einer großflächigen Belastungsverteilung *m_pressureSensed* überlagert. Dafür wird pro Taxel der Mittelwert und das Maximum aller bestimmten Kennfelder bestimmt. Diese Vorgehensweise ist in Listing 6.3 dargestellt. *i* bezeichnet dabei den jeweiligen Taxel-Index auf Basis von Abb. 6.4.

```

1 // Calculation of mean and max on unloaded taxels
2 m_pressureSensed(i) = m_individualProfiles.col(i).mean() + m_individualProfiles.
   col(i).maxCoeff();

```

Listing 6.3: Simulation großflächiger Belastungen in C++.

Dabei ist jedoch zu beachten, dass die gebildete Belastungsverteilung nur für ursprünglich unbelastete Taxel verwendet wird. Für direkt belastete Taxel wird der wirkende Belastungsdruck beibehalten, da dieser zum einen bereits bekannt ist und zum anderen nicht von benachbarten Taxeln beeinflusst wird.

Die nach diesem Vorgehen bestimmte Belastungsverteilung, wird anschließend an die Klasse *ContactSensorTactile* zurückgegeben.

6.2.3 Kennlinien- und Hysteresemodell - *CharacteristicCurveHysteresis*

Zur Ausführung des Kennlinien- und Hysterese Modells muss die Methode *executeCharacteristicCurveHysteresisModel*, der Klasse *CharacteristicCurveHysteresis*, aufgerufen werden. Übergabeparameter sind der simulierte Belastungsdruck der Klasse *InfluenceOnAdjacentElements*,

in der Form aus Abb. 6.4, und ein Index für den aktuell gewählten Sensor nach Tabelle 6.1. Rückgabeparameter ist der berechnete Widerstand nach dem Hysteresemodell.

```

1 // Execution of the characteristic curve and hysteresis model
2 Eigen::VectorXd executeCharacteristicCurveHysteresisModel(const Eigen::
  VectorXd pressureSensed, const int sensorIndex);

```

Listing 6.4: Methode zur Ausführung des Kennlinien- und Hysterese Modells.

Nach der Initialisierung, bei aktiver Belastung und nach vollständiger Entlastung, ist immer die Kennlinie für Belastung aus Gleichung (5.4) (Index B) aktiv. Kommt es hingegen zu einer Entlastung des Sensors, so wird die Kennlinie für Entlastung aus Gleichung (5.4) (Index E) aktiviert.

Um bei einem Wechsel der Belastungsrichtung einen glatten Hysterese-Verlauf zu erzeugen, müssen die Kennlinien im Übergangspunkt aneinander angeglichen werden. Bei einem Zustandswechsel von Be- nach Entlastung, erfolgt eine Verschiebung der Kennlinie für Entlastung in positive y -Richtung um den Faktor R_0 . Die Berechnung dieses Parameters erfolgt direkt nach Gleichung (5.5). Bei einem Übergang von Ent- nach Belastung, muss die Kennlinie für Belastung in negative x -Richtung verschoben werden. Die Verschiebung erfolgt hierbei um den Faktor P_0 , welcher durch Ermittlung der Nullstelle aus Gleichung (5.6) bestimmt wird.

Zur Nullstellensuche ist in der Klasse *CharacteristicCurveHysteresis* ein Newton-Verfahren implementiert, dessen Ablauf schematisch in Listing 6.5 dargestellt ist.

```

1 double x0 = 0, x1 = 0;
2 double Rref = R0 + a_E * exp(b_E * P) + c_E * exp(d_E * P); // Equation (5.4),
  Parameters of Table 5.3
3 do {
4     x0 = x1; // Start point of the iteration step
5     double fZero = - Rref + a_B * exp(b_B * x0) + c_B * exp(d_b * x0);
6     // Equation (5.6), Parameters of Table 5.3
7     double dotfZero = a_B * b_B * exp(b_B * x0) + c_B * d_b * exp(d_b * x0);
8     // Derivation of Equation (5.6), Parameters of Table 5.3
9     x1 = x0 - fZero / dotfZero; // Calculation of the new newton step
} while (abs(x1 - x0) > pow(10, -5));
P0 = x1; // P0 for Equation (5.4)

```

Listing 6.5: Newton-Verfahren zur Berechnung der Nullstelle aus Gleichung (5.6).

Zur Bestimmung der Belastungsrichtung, werden für jeden Zyklus der aktuelle Übergabevektor *pressureSensed* und der Übergabevektor des vorherigen Zeitschritts, in der Matrix *m_pressureSensed* gespeichert. In Zeile 0 befindet sich der Vektor des vergangenen Zeitschritts und in Zeile 1 der aktuelle. Durch Vergleich der jeweiligen Matrixeinträge kann die Belastungsrichtung nach den Bedingungen aus Listing 6.6 bestimmt werden. i bezeichnet dabei den jeweiligen Taxel-Index auf Basis von Abb. 6.4.

```

1 // Condition for load direction
2 (m_pressureSensed(1, i) - m_pressureSensed(0, i)) > 0
3
4 // Condition for unload direction
5 (m_pressureSensed(1, i) - m_pressureSensed(0, i)) < 0

```

Listing 6.6: Bedingungen zur Bestimmung der Hysterese-Belastungsrichtung.

Nach Berechnung der notwendigen Parameter R_0 oder P_0 und Bestimmung der Belastungsrichtung, wird nun für jedes Taxel ein simulierter Hysterese-Widerstand nach Gleichung (5.4) berechnet und an die Klasse *ContactSensorTactile* zurückgegeben.

6.2.4 Driftmodell - *DriftModel*

Zur Ausführung des Driftmodells muss die Methode *executeDriftModel*, der Klasse *DriftModel*, aufgerufen werden. Übergabeparameter sind der simulierte Widerstand der Klasse *CharacteristicCurveHysteresis*, in der Form aus Abb. 6.4 und ein Index für den aktuell gewählten Sensor nach Tabelle 6.1. Ebenso muss an diese Methode die aktuelle Zeit der Simulation *t1* und der vorherige Zeitschritt *t0* übergeben werden, da das Driftmodell zeitliche Abhängigkeiten aufzeigt. Rückgabeparameter ist der berechnete Widerstand nach dem Driftmodell.

```

1 // Execution of the drift model
2 Eigen::VectorXd executeDriftModel(const Eigen::VectorXd resistanceHysteresis,
    const double t1, const double t0, const int sensorIndex);

```

Listing 6.7: Methode zur Ausführung des Driftmodells.

Drifteffekte sind abhängig von den Absolutwerten aus Sprüngen im Widerstandsverlauf. Da die Be- und Entlastung des Fußes von LOLA nicht impulsartig geschieht, sondern durchschnittlich 200ms in Anspruch nimmt, erfolgt die Auswertung von Widerstandsänderungen über mehrere Zeitschritte hinweg. Um zwei Zeitpunkte miteinander vergleichen zu können, muss der Übergabeparameter *resistanceHysteresis* des jeweils vorherigen Zeitschritts gespeichert werden. Die Speicherung erfolgt in der Matrix *m_resistanceHysteresis*. In Zeile 0 befindet sich der Vektor des vergangenen Zeitschritts und in Zeile 1 der aktuelle.

Die Erkennung einer Widerstandsänderung erfolgt aus der Berechnung des Differenzenquotienten zwischen zwei Zeitschritten (siehe Listing 6.9, Zeile 2 und 9). Wird der definierte Grenzwert $m_deltaRdotLimit = 0.3 \text{ 1/s}$ überschritten, so beginnt die Messung des Widerstandssprunges. Umgekehrt wird die Messung bei Unterschreiten des Grenzwertes gestoppt. *m_deltaRdotLimit* kennzeichnet eine Geschwindigkeitsgrenze, ab welcher Drifteffekte auftreten. Diese Grenze resultiert aus verschiedenen Versuchen und Simulationen.

Nach Beendigung einer Messung wird die Widerstandsänderung ΔR ausgewertet. Überschreitet der Widerstandssprung einen Grenzwert von $m_deltaRLimit = 0.04$, so werden neue Driftparameter $a(\Delta R)$ und $b(\Delta R)$ nach Gleichung (5.8) und Gleichung (5.9) berechnet. Wird dieser Grenzwert hingegen nicht überschritten, so bleibt das Driftverhalten unbeeinflusst. Diese Grenze resultiert ebenso aus verschiedenen Versuchen und Simulationen.

Zusammen mit dem Startzeitpunkt der Driftfunktion T , werden die neu berechneten Parameter $a(\Delta R)$ und $b(\Delta R)$ in einer Matrix gespeichert. Diese Matrix enthält ebenso Parameter alter Driftfunktionen, da sich das Driftverhalten nach Kapitel 5.3 aus den fünf letzten Driftfunktionen zusammensetzt. Sind bereits fünf Parametersets in der Matrix gespeichert, so werden bei Hinzukommen neuer Parameter, die am weitesten zurück liegenden Parameter gelöscht. Anschließend wird der Driftverlauf nach Gleichung (5.10) berechnet und an die Klasse *ContactSensorTactile* zurückgegeben.

Der aktuelle Status des Driftmodells wird von darauffolgenden Modellen benötigt und kann deshalb durch die Methode *getDriftState*, der Klasse *DriftModel*, abgerufen werden.

```

1 // Get the actual state of the drift model
2 Eigen::VectorXd getDriftState(const int sensorIndex);

```

Listing 6.8: Methode für den Abruf des aktuellen Drift-Status.

Pro Taxel kann das Driftmodell drei Zustände nach Tabelle 6.2 haben. Bedingungen zur Bestimmung des Drift-Status sind in Listing 6.9 dargestellt. *i* bezeichnet dabei den jeweiligen Taxel-Index auf Basis von Abb. 6.4.

Bedingung	Status des Driftmodells
Messung aktiv und der Sensor wird belastet	-1
Messung aktiv und der Sensor wird entlastet	1
Messung nicht aktiv	0

Tabelle 6.2: Mögliche Zustände des Driftmodells pro Taxel.

```

1 // Condition for starting the measurement
2 if (abs(m_resistanceHysteresis(1, i) - m_resistanceHysteresis(0, i)) / (t1 - t0
3     )) > m_deltaRdotLimit) {
4     if (m_resistanceHysteresis(1, i) < m_resistanceHysteresis(0, i))
5         driftState(i) = -1; // Measurement active and loading
6     else if (m_resistanceHysteresis(1, i) > m_resistanceHysteresis(0, i))
7         driftState(i) = 1; // Measurement active and unloading
8 }
9 // Condition for stopping the measurement
10 else if (abs(m_resistanceHysteresis(1, i) - m_resistanceHysteresis(0, i)) / (t1
    - t0)) <= m_deltaRdotLimit)
    driftState(i) = 0; // Measurement not active

```

Listing 6.9: Berechnung des Differenzenquotienten und Bedingungen zur Bestimmung des Drift-Status.

6.2.5 Filtermodell - *FilterModel*

Zur Ausführung des Filtermodells muss die Methode *executeFilterModel*, der Klasse *FilterModel*, aufgerufen werden. Übergabeparameter sind der simulierte Widerstand der Klasse *DriftModel*, in der Form aus Abb. 6.4 und ein Index für den aktuell gewählten Sensor nach Tabelle 6.1. Ebenso muss an diese Methode der aktuelle Status des Driftmodells übergeben werden, da somit auf bereits erfolgte Berechnungen aus dem Driftmodell zurückgegriffen werden kann. Rückgabeparameter ist der berechnete Widerstand nach dem Filtermodell.

```

1 // Execution of the filter model
2 Eigen::VectorXd executeFilterModel(const Eigen::VectorXd resistanceDrift,
    const Eigen::VectorXd driftState, const int sensorIndex);

```

Listing 6.10: Methode zur Ausführung des Filtermodells.

Durch Anwendung des Driftmodells entstehen - vor allem bei Belastung des Sensors - unste-tige Verläufe im simulierten Widerstand. Deshalb wird dem Driftmodell ein FIR-Filter nach Gleichung (5.11) nachgeschaltet. Der Ausgang des diskreten Filters berechnet sich aus den letzten *windowSize* = 150 Driftwiderständen. Um Gleichung (5.11) auswerten zu können, werden die übergebenen Widerstände *resistanceDrift* jeweils aus den letzten 150 Zeitschritten in einer Matrix gespeichert, um auf diese zugreifen zu können.

Da es nur nach simulierter Belastung des Sensors zu Sprüngen im Widerstandsverlauf kommt, wird der FIR-Filter auch nur beim Übergang auf positive Belastungsgradienten aktiviert. Dies ist der Fall, wenn der übergebene *driftState* nach -1 übergeht. Übersteigt der Widerstand aus dem Driftmodell dessen des Filtermodells, so wird der FIR-Filter wieder deaktiviert.

Der gefilterte Widerstand wird anschließend an die Klasse *ContactSensorTactile* zurückgegeben.

6.2.6 Prellmodell - *ImpulseBehaviour*

Zur Ausführung des Prellmodells muss die Methode *executeImpulseModel*, der Klasse *ImpulseBehaviour*, aufgerufen werden. Übergabeparameter sind der simulierte Widerstand der Klasse *FilterModel*, in der Form aus Abb. 6.4 und ein Index für den aktuell gewählten Sensor nach Tabelle 6.1. Ebenso muss an diese Methode der aktuelle Status des Driftmodells übergeben werden, da somit auf bereits erfolgte Berechnungen aus dem Driftmodell zurückgegriffen werden kann. Rückgabeparameter ist der berechnete Widerstand nach dem Prellmodell.

```

1 // Execution of the impulse model
2 Eigen::VectorXd executeImpulseModel(const Eigen::VectorXd resistanceFilter,
   const Eigen::VectorXd driftState, const int sensorIndex);

```

Listing 6.11: Methode zur Ausführung des Prellmodells.

Der Prelleffekt tritt zum Zeitpunkt einer Belastung und nach jeder Entlastung auf. Die jeweiligen Belastungszustände werden aus dem übergebenen *driftState* ermittelt.

Bei einem Übergang des *driftState* nach -1 wird eine Belastung des Sensors erkannt. Zum Startzeitpunkt der Belastung wird dem übergebenen Widerstand des Filtermodells *resistanceFilter*, ein Sprung nach Gleichung (5.12) aufgeschaltet. Die Parameter für den Sprung werden aus Tabelle 5.5 (Index *B*) entnommen. Kommt es hingegen zu einem Übergang des *driftState* von 1 nach 0 oder -1 , so wird das Ende einer Entlastung erkannt. In diesem Fall wird dem übergebenen Widerstand des Filtermodells *resistanceFilter*, ein Sprung nach Gleichung (5.12), mit den Parametern aus Tabelle 5.5 (Index *E*), aufgeschaltet.

Im Zeitintervall von 20–25s aus Abb. 6.5, sind teilweise keine Widerstandssprünge zu erkennen. Dies hat den Hintergrund, dass die Widerstandsänderung in diesem Bereich sehr langsam ist und der Geschwindigkeitsgrenzwert *m_deltaRdotLimit* des Driftmodells nicht überschritten wird. Somit bleibt das Prellmodell deaktiviert.

6.2.7 Rauschmodell - *NoiseBehaviour*

Zur Ausführung des Rauschmodells muss die Methode *executeNoiseModel*, der Klasse *NoiseBehaviour*, aufgerufen werden. Übergabeparameter sind der simulierte Widerstand der Klasse *ImpulseBehaviour*, in der Form aus Abb. 6.4, und ein Index für den aktuell gewählten Sensor nach Tabelle 6.1. Rückgabeparameter ist der berechnete Widerstand nach dem Rauschmodell.

```

1 // Execution of the noise model
2 Eigen::VectorXd executeNoiseModel(const Eigen::VectorXd resistanceImpulse,
   const int sensorIndex);

```

Listing 6.12: Methode zur Ausführung des Rauschmodells.

Rauschen ist ein stochastischer Effekt. Da die Simulation des taktilen Sensors jedoch reproduzierbare Ergebnisse liefern soll, wird das Rauschmodell als deterministisches Modell implementiert. Aus diesem Grund wird zur Simulation des Rauschverhaltens ein Pseudozufallszahlengenerator verwendet, dessen Zufallszahlen durch einen deterministischen Algorithmus berechnet werden. Auf Basis dieses Pseudozufallszahlengenerators werden für jeden Zeitschritt normalverteilte Zufallszahlen, mit einem Mittelwert von null und einer Standardabweichung nach Gleichung (5.13), gebildet. Das erzeugte Rauschsignal wird dem simulierten Widerstand *resistanceImpulse* überlagert und anschließend an die Klasse *ContactSensorTactile* zurückgegeben.

6.3 Performance des Sensormodells

Um die Leistungsfähigkeit des implementierten Sensormodells zu testen, werden mehrere Laufzeitmessungen in der Mehrkörpersimulationsumgebung von LOLA durchgeführt. Dabei wird die um das taktile Sensormodell erweiterte Mehrkörpersimulation, über mehrere Zeitschritte hinweg ausgeführt. Die zur Ausführung benötigte Laufzeit wird anschließend mit der Performance vor Implementierung des Sensormodells verglichen. Auf Basis dieser Auswertungen können Modelle aus Abschnitt 6.2 ermittelt werden, durch welche Performance-Einbußen entstehen. Anschließend erfolgt eine Optimierung der Modelle, um die benötigte Rechenzeit zu reduzieren.

Die Beurteilung der Leistungsfähigkeit nach Optimierung des Sensormodells, erfolgt durch simulierte Laufversuche mit LOLA über ebenes Gelände. Die Art der Kontaktbedingungen zwischen Boden und Sensormodell (großflächig oder lokal) hat nur einen geringen Einfluss auf die Simulationsdauer, da durch das Modell für die Kopplung benachbarter Elemente lokale Belastungsdrücke ohnehin großflächig verteilt werden.

Zur Durchführung der Laufzeitmessungen wird die Mehrkörpersimulationsumgebung für eine Simulationsdauer von 5s ausgeführt. Dies entspricht 5000 zeitlich äquidistant verteilten Simulationszyklen. Bei Deaktivierung des Sensormodells, beträgt die Ausführungsdauer der bestehenden Mehrkörpersimulation auf einem herkömmlichen Rechner 24.58s. Eine Aktivierung des optimierten Sensormodells, führt zu einer zusätzlichen Ausführungsdauer von 3.42s, was einer Laufzeitverlängerung um den Faktor 1.14 entspricht. Bezogen auf die große Menge an zu verarbeitenden Daten und auszuführenden Rechenoperationen, ist dieser erreichte Faktor bereits relativ gering. Die Aufteilung der benötigten Laufzeit zwischen den implementierten Eigenschaftsmodellen ist in Tabelle 6.3 ersichtlich.

Sensormodell	Aufteilung der Modelllaufzeit
InfluenceOnAdjacentElements	26.15%
CharacteristicCurveHysteresis	4.62%
DriftModel	10.96%
FilterModel	12.45%
ImpulseBehaviour	1.64%
NoiseBehaviour	22.79%

Tabelle 6.3: Sensormodelle nach Abschnitt 6.2 und deren Anteil an der Simulationsdauer des gesamten Sensormodells.

Die verbleibenden 21.39% der Modelllaufzeit, resultieren aus dem Einlesen der Belastungskräfte bzw. deren Umrechnung auf Belastungsdrücke und der Speicherung von Simulationsergebnissen.

Kapitel 7

Verifikation und Validierung des Sensormodells

Die Verifikation und Validierung, des in die Mehrkörpersimulationsumgebung von LOLA integrierten Sensormodells, erfolgt anhand des rechten Pfades aus dem V-Modell nach Abb. 7.1.

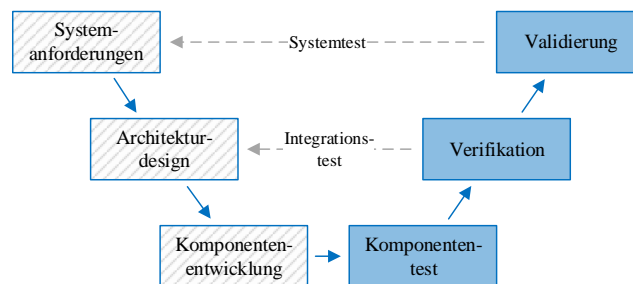


Abbildung 7.1: V-Modell für die Verifikation und Validierung des Sensormodells nach VDI 2206.

7.1 Komponententest und Verifikation des Sensormodells

Zur Verifikation einzelner Komponenten und des Gesamtmodells, wird das C++ Sensormodell gegen das *MATLAB*[®] Sensormodell ausgeführt. Der Verifikationsablauf ist in Abb. 7.2 dargestellt. Mit dem in *SIMULINK*[®] erstellten *signalBuilder.slx* können beliebige Schrittabfolgen simuliert und anschließend automatisch exportiert werden. Die aus den simulierten Schritten resultierenden Belastungsdrücke, werden wiederum durch das *MATLAB*[®] Script *exportPressure.m* als C++ kompatible Textdateien exportiert.

Die im *am2b-Projekt* implementierte Anwendung *contactSensorTactile_test.cpp*, liest die erzeugten Textdateien ein und führt das Sensormodell aus. Während der Abarbeitung werden die Simulationsdaten automatisch von einem Datenlogger exportiert.

Anschließend wird durch Ausführung des *MATLAB*[®] Scripts *verificateModel.m*, das exportierte Simulationsergebnis zwischen dem C++ Sensormodell und dem *MATLAB*[®] Sensormodell verglichen und verifiziert. *verificateModel.m* führt dabei automatisch das *MATLAB*[®] Sensormodell aus. Bei einer Abweichung zwischen den Modellen wird eine Fehlermeldung ausgegeben.

Jedes Modell aus Kapitel 6.2 kann über eine Methode aktiviert und deaktiviert werden. Somit können durch die Vorgehensweise nach Abb. 7.2 sowohl einzelne Komponenten als auch das Gesamtmodell verifiziert werden.

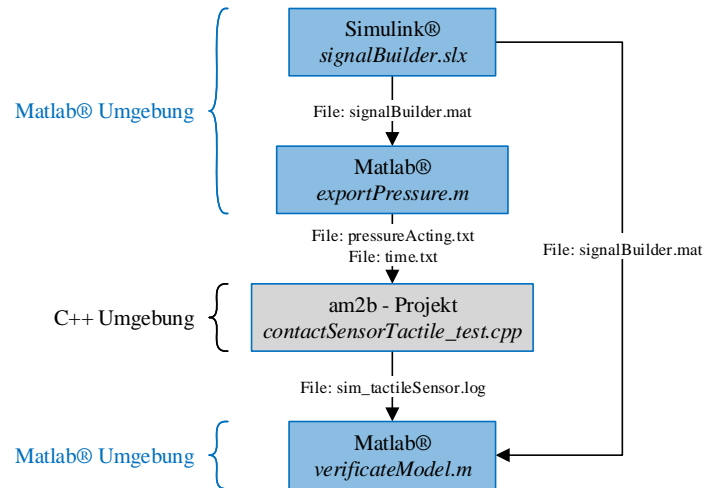


Abbildung 7.2: Aufrufabfolge einzelner Programme und erzeugte/benötigte Datenfiles zur Verifikation des Sensormodells.

Die Anwendungen nach Abb. 7.2 sind so implementiert, dass alle erzeugten Datenformate kompatibel sind. Die Eingangssignale der Mehrkörpersimulationsumgebung können jedoch auch anderweitig erzeugt werden. Dabei müssen die Textdateien *pressureActing.txt* und *time.txt* lediglich eine Form nach Abb. 7.3 aufweisen. Die Files bestehen aus Zeitschritten bzw. zugehörigen Belastungs-Trajektorien. Die Zuordnung der Trajektorien zu einzelnen Taxeln erfolgt in der Anwendung *contactSensorTactile_test.cpp*.

<u>time.txt</u>	<u>pressureActing.txt</u>
0.000000	0.000000
0.001000	5000.000000
0.002000	10000.000000
0.003000	15000.000000
0.004000	20000.000000
⋮	⋮

Abbildung 7.3: Aufbau bzw. Strukturierung der Eingabe-Textdateien in die Verifikations-Anwendung der Mehrkörpersimulationsumgebung von LOLA. Zeitangaben erfolgen in [s] und Belastungsdrücke in [Pa].

7.2 Validierung des Sensormodells

Die Validierung des Sensormodells erfolgt in zwei Schritten. Zu Beginn wird das Modell für die Kopplung benachbarter Elemente validiert. Dieses Modell simuliert, im Gegensatz zu anderen Modellen, Belastungsdrücke und wird deshalb vorerst separat betrachtet. In den darauf folgenden Schritten werden alle Modelle aus Kapitel 5 gleichzeitig ausgeführt und anschließend mit realen Sensordaten verglichen. Als Abschluss werden die Sensormodelle an einem fußähnlichen Prototyp validiert.

7.2.1 Validierung der Kopplung benachbarter Elemente

In Abb. 7.4 ist eine exemplarische Validierungsmessung des Modells für die Kopplung benachbarter Elemente dargestellt. In der Grafik sind gemessene und modellierte Belastungsdrücke sowie die relative Modellabweichung dargestellt.

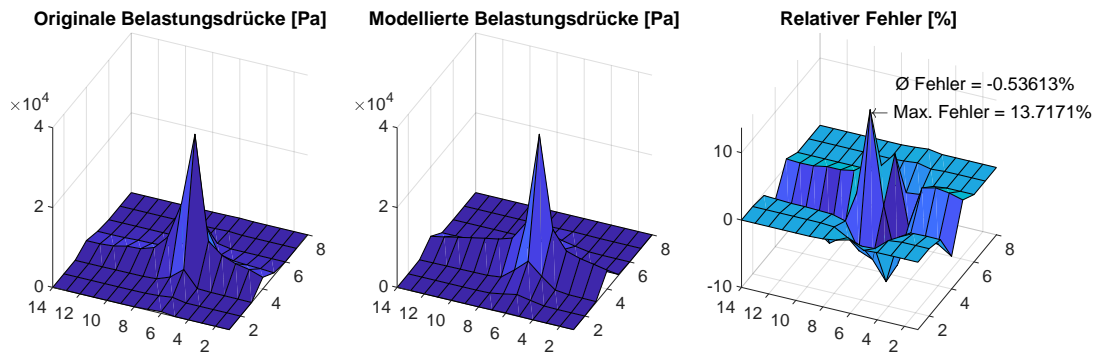


Abbildung 7.4: Validierungsmessung der Kopplung benachbarter Elemente am Sensorprototyp aus Kapitel 3.1. Dargestellt ist eine punktförmige, statische Belastung von Taxel (4,6).

Zur Durchführung von Validierungsmessungen werden auf den Sensorprototyp nach Kapitel 3.1 unterschiedliche, abschnittsweise konstante Belastungsdrücke aufgebracht. Der Sensor wird dabei an einzelnen taktilen Elementen sowohl punktförmig¹ als auch großflächig belastet. In Anhang C.1 ist eine Sammlung weiterer Validierungsmessungen dargestellt.

Wie sich in Abb. 7.4 und Anhang C.1 erkennen lässt, wird die Kopplung benachbarter Elemente durch das Modell aus Gleichung (5.1) bereits sehr gut modelliert. An manchen taktilen Elementen, wie zum Beispiel Taxel (4,5) und (4,7), ergeben sich jedoch vergleichsweise hohe Abweichungen. Bei Taxel (4,5) liegt der reale Belastungsdruck unterhalb und bei Taxel (4,7) oberhalb des Simulationsmodells. Dies lässt sich durch eine leicht außermittige Belastung von Taxel (4,6) erklären. Durch die abriebfeste Schutzschicht lassen sich einzelne Taxel nur durch „Probieren“ ermitteln, da deren exakte Position nicht einsehbar ist. In diesem Beispiel ist der Belastungspunkt leicht in Richtung Taxel (4,7) verschoben, wodurch sich die Ungenauigkeiten ergeben.

In Abb. C.3 sind Validierungsmessungen mit großflächigen Belastungen dargestellt. Auch in diesen Abbildungen lässt sich eine sehr gute Annäherung der realen Messergebnisse durch das Sensormodell erkennen. Lediglich bei der letzten Versuchsdurchführung ergeben sich Abweichungen $> 25\%$. Diese Fehler resultieren ebenso aus einer nicht klar definierbaren Belastungsgrenze, da die Taxel durch die abriebfeste Schutzschicht nicht einsehbar sind. Um das Sensormodell kritisch zu betrachten, werden in der Simulation alle Taxel mit einem Spaltenindex von 2 und 13 als unbelastet angesehen, obwohl diese im Realfall zumindest teilweise belastet sind. Da der Belastungsdruck an betroffenen taktilen Elementen nur durch das Modell für die Kopplung benachbarter Elemente berechnet wird und auf diese Taxel in der Simulation keine externe Belastung aufgebracht wird, ergibt sich der dargestellte Fehler. Zusammenfassend sei bemerkt, dass größere Abweichungen - für punktförmige und großflächige Belastungen - nicht durch das Modell für die Kopplung benachbarter Elemente, sondern durch die erschwerte Validierungs-Durchführung verschuldet sind. Bei allen anderen Elementen wird der Einfluss auf benachbarte Taxel bereits sehr gut angenähert.

¹Als Referenz für eine punktförmige Belastung wird nach Kapitel 4.2.1 ein Probendurchmesser von 10mm gewählt.

7.2.2 Validierung unterschiedlicher Zeitverläufe

In Abb. 7.5 ist eine exemplarische Validierungsmessung des Sensormodells in Abhängigkeit der Systemzeit dargestellt.

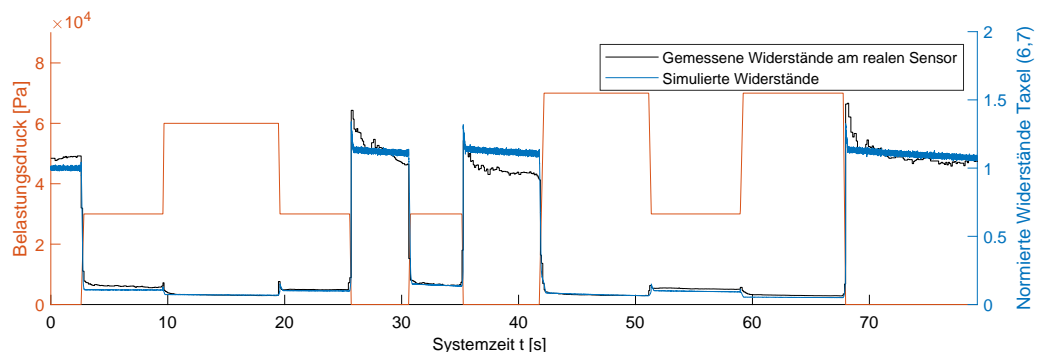


Abbildung 7.5: Validierungsmessung des Widerstandsverhaltens in Abhängigkeit der Systemzeit am Sensorprototyp aus Kapitel 3.1.

Zur Durchführung von Validierungsmessungen werden auf den Sensorprototyp nach Kapitel 3.1 unterschiedliche Belastungsdrücke aufgebracht. Die Belastung des Sensors erfolgt dabei entweder abschnittsweise konstant oder anhand von zeitlich variierenden Belastungstrajektorien. Die Übergangsdauer zwischen zwei abschnittsweise konstanten Belastungsstufen beträgt jeweils ca. 200ms, was der verstreichenden Zeitspanne bei Be- bzw. Entlastung des Fußes von LOLA entspricht. Somit kann eine Schrittabfolge möglichst realitätsgetreu simuliert werden. In Anhang C.2 ist eine Sammlung weiterer Validierungsmessungen dargestellt. Die abgebildeten Messungen werden zum Teil nicht direkt an der Belastungsstelle, sondern an benachbarten Taxeln ausgewertet. Somit kann die Kopplung benachbarter Elemente in Kombination mit anderen Modellen validiert werden.

Wie sich in Abb. 7.5 und Anhang C.2 erkennen lässt, wird das Sensorverhalten für simulierte Schrittabfolgen durch das Simulationsmodell bereits sehr gut modelliert. Das Kennlinien- und Hystereseverhalten, in Kombination mit Drift- und Filtermodell, zeigt bei hohen Belastungsdrücken $> 20\text{kPa}$ einen sehr geringen Fehler gegenüber dem realen Sensorverhalten. Bei kleineren Belastungen steigt der Modellierungsfehler hingegen leicht an, da hier die taxelspezifischen Kennlinien nach Abb. 5.4 eine größere Streuung untereinander aufweisen. Durch Verwendung eines einheitlichen Medianmodells ergibt sich somit eine gewisse Modellabweichung.

Bemerkenswert ist, dass das Driftmodell trotz der großen Streuungen in Abb. 5.8, das reale Driftverhalten bei Belastungsdrücken $> 0\text{Pa}$ sehr gut abbildet. Bei vollständiger Entlastung des Sensors treten hingegen Modellabweichungen im Driftverhalten auf. Diese lassen sich auf das Verhalten der Edelfahnen im unbelasteten Zustand zurückführen. Bei vollständiger Entlastung schwanken die Kontaktbedingungen zwischen den Edelfahnen und dem piezoresistiven Polymer. Dadurch ergibt sich eine stochastische Streuung in der Ruhewiderstandsmatrix und dem Driftverhalten. Da jedoch das Sensormodell deterministisch ist, können solche Effekte nicht berücksichtigt werden. Dies hat jedoch nur einen geringen Einfluss auf die Modellgenauigkeit, da das jeweilige Taxel bei einem normierten Ruhewiderstand > 1 ohnehin als unbelastet betrachtet wird.

Ähnlich zum Driftverhalten, zeigt auch der Prelleffekt bei vollständiger Entlastung des Sensors stochastisches Verhalten. Dies hat, ähnlich zum Driftverhalten, nur eine geringe Relevanz für die Modellgenauigkeit. Von höherer Relevanz ist der Prelleffekt bei mittleren normierten Widerständen, da hier die impulsartigen Widerstandssprünge deutlich das Sensorverhalten beeinflussen. Nach Abb. 5.11 treten bei Widerständen in einem Intervall um 0.6, Sprünge

in einer Höhe von bis zu 0.4 auf. Somit können sich kurzzeitig, trotz aktiver Belastung des jeweiligen Taxels, normierte Widerstände > 1 ergeben, was einer vollständigen Entlastung des taktilen Elements entsprechen würde. Solch ein Verhalten muss in der späteren Auswertelogik des Sensors berücksichtigt werden und soll daher auch möglichst genau simuliert werden. Die Validierungsmessungen ergeben, dass das reale Sensorverhalten für normierte Widerstände < 1 , bereits realitätsnah durch das Prellmodell abgebildet wird.

Das Rauschverhalten stimmt zwischen den realen Sensordaten und dem Simulationsmodell ebenso sehr gut überein. Darstellungsunterschiede ergeben sich lediglich dadurch, dass die Abtastzeit am realen Sensor bei 10ms und in der Simulation bei 1ms liegt.

In der obersten Grafik aus Abb. C.4 ist die Belastung des Sensors anhand einer vergleichsweise langsamen Belastungs-Trajektorie dargestellt. In der Grafik können relativ hohe Modellabweichung festgestellt werden. Diese Abweichungen lassen sich wahrscheinlich anhand des implementierten Driftmodells erklären. Da das Sensormodell für simulierte Schrittabfolgen entwickelt ist, werden die Driftverläufe erst nach Beendigung von Be- oder Entlastungsschritten gesetzt. Nach [24] entstehen Drifteffekte jedoch schon während einer Be- oder Entlastung. Um dies zu simulieren, müssten die Driftverläufe kontinuierlich, während der Be- oder Entlastung, erzeugt werden. Somit würde sich das allgemeine Widerstandsniveau anheben und sich das Simulationsmodell an das reale Sensorverhalten annähern. Da die Be- und Entlastungs-Trajektorien des Fußes von LOLA ähnlich zu Abb. 7.5 sind, hat diese Modellabweichung keinen Einfluss auf die Simulationsgenauigkeit für den Einsatz als Fußmodell von LOLA.

7.2.3 Validierung des Sensormodells durch einen fußähnlichen Prototyp

Alle experimentellen Untersuchungen und Validierungsmessungen der vorherigen Kapitel basieren auf dem Sensorprototyp nach Abschnitt 3.1. Der künftige Aufbau des realen Fußes von LOLA weist jedoch gewisse Unterschiede zu diesem Prototyp auf. Zum einen erfolgt beim Gehen die Lastaufbringung von unten, weshalb der Versuchsaufbau nach Abschnitt 3.1 um die x-y-Ebene gespiegelt werden muss. Da bei Gehversuchen auch Querkräfte auf die abriebfeste Schutzschicht aufgebracht werden, reicht ein alleiniger Schichtverbund - mit lose aufeinander gelegten Sensorelementen - nicht aus, um die wirkenden Kräfte aufzunehmen. Aus diesem Grund muss ein gewisser Zusammenhalt zwischen den Sensorschichten erreicht werden.

Da zum aktuellen Zeitpunkt kein finales Fußmodell zur Verfügung steht, wird ein fußähnlicher Prototyp aufgebaut. Dieser Versuchsprototyp weist zwar nicht die endgültige Form des realen Fußes auf, jedoch erfüllt er alle geforderten Eigenschaften an diesen. Ein schematischer Aufbau des fußähnlichen Prototyps ist in Abb. 7.6 dargestellt. Der Sensor-Schichtverbund ist identisch zu dem um die x-y-Ebene gespiegelten Aufbau nach Kapitel 3.1. Um den geforderten Zusammenhalt der Sensorschichten zu erreichen, werden die *Sensorelement* (2) und die *Dämpfungsschicht* (3) durch die *abriebfeste Schutzschicht* (1) überspannt. Über vier Einstellschrauben kann der vertikale Abstand zwischen den Stahlplatten Δx und somit die Überspannungskraft der Sensorschichten variiert werden. Über eine weitere Schraube erfolgt die Einspannung des Prototyps in den Prüfstand. Bilder des fertigen Aufbaus sind in Anhang C.3 dargestellt.

In Abb. 7.7 ist eine exemplarische Validierungsmessung des Sensormodells in Abhängigkeit der Systemzeit dargestellt. Zur Durchführung von Validierungsmessungen werden auf den Sensorprototyp nach Abb. 7.6 unterschiedliche, abschnittsweise konstante Belastungsdrücke aufgebracht. In Anhang C.3 ist eine Sammlung weiterer Messungen dargestellt.

Durch die Validierungsmessungen lässt sich feststellen, dass der Sensor trotz Änderung seiner Ausrichtung und Überspannung, keine zusätzlichen Eigenschaften aufweist. Alle entwickel-

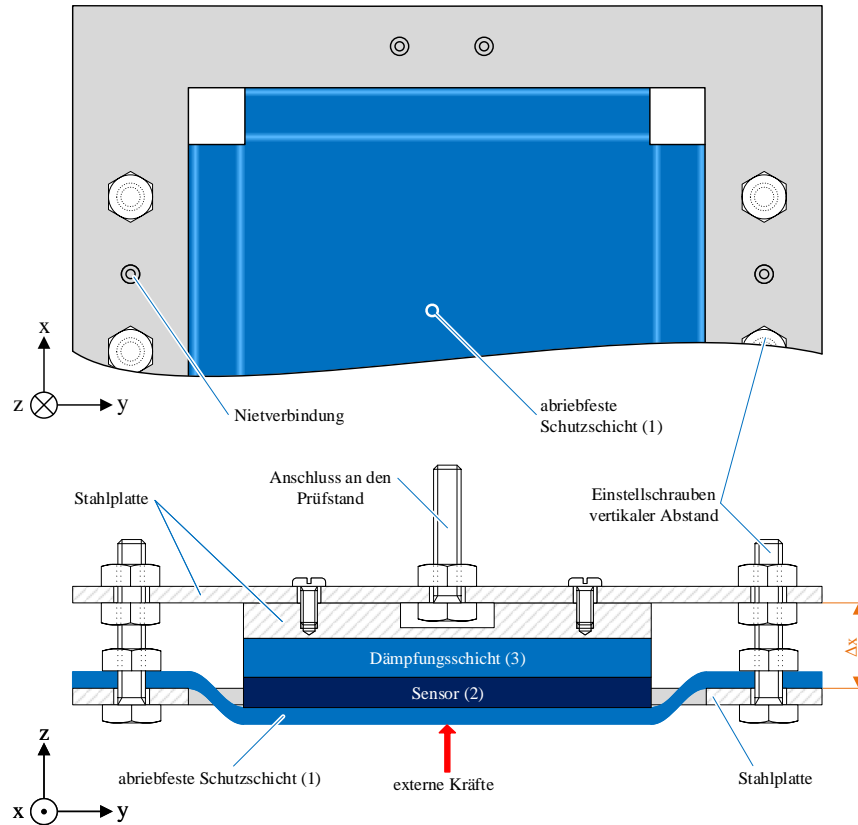


Abbildung 7.6: Schematischer Aufbau des fußähnlichen Prototyps.

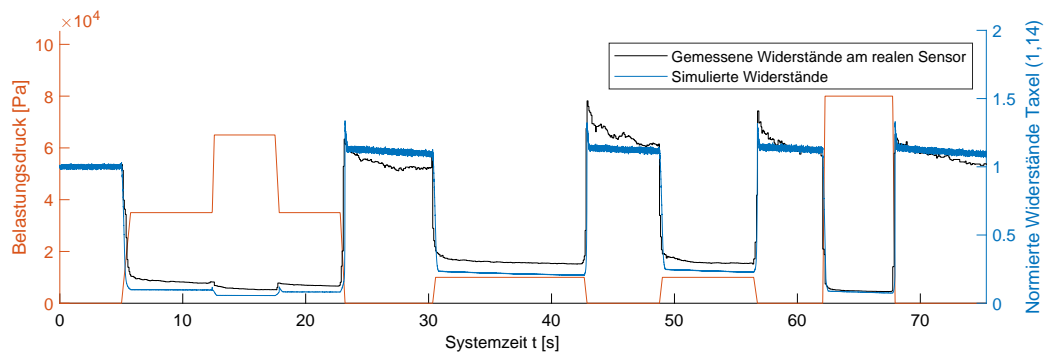


Abbildung 7.7: Validierungsmessung des Widerstandsverhaltens in Abhängigkeit der Systemzeit am fußähnlichen Prototypen aus Abb. 7.6.

ten Modelle aus Kapitel 5 sind nach wie vor für den fußähnlichen Prototyp und somit auch für den finalen Fuß von LOLA gültig. Zu beachten ist jedoch, dass sich durch Konfiguration des Sensors, Parametersets der Modelle ändern können.

Über die vier Einstellschrauben für den vertikalen Abstand zwischen den Stahlplatten nach Abb. 7.6, kann die Überspannungskraft des Sensor-Schichtverbundes variiert werden. Um alleinige Einflüsse der Sensorausrichtung auf dessen Verhalten zu untersuchen, wird für erste Versuche die Überspannungskraft so niedrig gewählt, dass lediglich die Sensorschichten in ihrer Position gehalten werden. Der Aufbau entspricht somit exakt dem um die x-y-Ebene gespiegelten Prototyp aus Abschnitt 3.1. Bei der Experiment-Durchführung kann erkannt werden, dass eine Veränderung der Sensorausrichtung keine Auswirkung auf das Sensor-

verhalten mit sich bringt. Es ist jedoch zu beachten, dass der Sensor bei einer geringen Überspannungskraft sehr empfindlich auf Vibrationen reagiert.

Wird hingegen die Überspannungskraft des Sensor-Schichtverbundes erhöht, so wird der Sensor deutlich resistenter gegen Vibrationen. Im gleichen Zuge kommt es jedoch zu Abweichungen der Modellparameter. Zum einen wird durch die Überspannung ein gleichmäßiger Ruhe-Belastungsdruck auf den Sensor gebracht, wodurch sich die Absolutwerte der Ruhewiderstandsmatrix hin zu einheitlicheren Widerständen verschieben. Dies lässt sich durch entstehende, klar definierte Kontaktbedingungen zwischen den Edelstahlfäden und dem piezoresistiven Polymer erklären.

Durch einheitlichere Kontaktbedingungen, nähern sich auch die taxelspezifischen Kennlinien einander an, wodurch auch die Verwendung des einheitlichen Medianmodells für Sensorkennlinien aus Kapitel 5.2 gerechtfertigt wird. Durch die Überspannung werden die taxelspezifischen Kennlinien generell etwas flacher. Dies zeigt sich in den Validierungsmessungen, da hier die simulierten Widerstände unter den realen Sensorwiderständen liegen.

Ein Unterschied lässt sich zudem im Prellverhalten erkennen. Der Prelleffekt ist, verglichen mit dem Sensorprototyp ohne Überspannung, bei Belastung teilweise schwächer ausgeprägt. Bei Entlastung zeigt sich hingegen kaum eine Veränderung.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich durch den Aufbau des fußähnlichen Prototypen zwar Sensorparameter ändern, jedoch auch gleichzeitig das Sensorverhalten einheitlicher wird. Durch die Validierungsmessungen kann festgestellt werden, dass das entwickelte Sensormodell direkt und ohne Änderungen auf den finalen Fuß von LOLA anwendbar ist. Es muss jedoch beachtet werden, dass gewisse Parametersets erneut zu bestimmen sind. Eine übersichtliche Darstellung aller neu durchzuführenden Experimente bei Konfiguration des Sensors, ist in Kapitel 4.3 dargestellt.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

Abschnitt 8.1 fasst die Errungenschaften und Ergebnisse dieser Bachelorarbeit zusammen. Abschließend wird in Abschnitt 8.2 ein Ausblick auf weitere Fragestellungen und Aufgaben gegeben, die aufbauend auf dieser Bachelorarbeit beantwortet bzw. ausgeführt werden können.

8.1 Zusammenfassung

Die Literaturrecherche bezüglich verschiedener taktiler Sensoren, deren Eigenschaften und zugehörigen Sensormodellen nach Kapitel 2 dient als Ausgangspunkt für das Entwicklungsprojekt. Durch die ermittelten Sensoreigenschaften kann der benötigte Implementierungsumfang des zu entwickelnden Modells bereits grob abgesteckt werden. Zusätzlich ergeben sich durch die recherchierten Sensormodelle erste Anhaltspunkte zur funktionalen Umsetzung eigenschaftsspezifischer Modelle. Auf Basis dieses erarbeiteten Grundwissens können experimentelle Vorgehensweisen zur Ermittlung der Sensoreigenschaften entwickelt werden, deren Ausführung durch den Prüfstand nach Kapitel 3 erfolgt. Mit diesem können statische und dynamische Versuche zur Untersuchung des taktilen Sensors wiederholbar und automatisiert ausgeführt werden. Die experimentellen Ergebnisse der durchgeführten Messungen werden mit *MATLAB*[®] ausgewertet und in Kapitel 4 zusammengefasst.

Auf Basis der experimentellen Erkenntnisse kann nach Kapitel 5 ein Sensormodell entwickelt werden, welches anschließend in C++ Code übersetzt und in die Mehrkörpersimulationsumgebung von LOLA integriert wird. Das Sensormodell wird anhand mehrerer unabhängiger Eigenschaftsmodelle aufgebaut. Somit sind die Modelle zum einen gewissen Sensoreigenschaften zuordenbar und zum anderen können Änderungen einfacher und übersichtlicher umgesetzt werden.

Wie in Kapitel 7 dargestellt, wird das reale Sensorverhalten für normierte Widerstände $R < 1$ bereits sehr realistisch abgebildet. Bei normierten Widerständen $R \geq 1$ sind jedoch gewisse Modellabweichungen zu erkennen. Diese Fehler ergeben sich aufgrund diverser stochastischer Effekte, welche in einem Simulationsmodell - aufgrund der Anforderung an Reproduzierbarkeit - nicht berücksichtigt werden können. Diese Abweichungen sind jedoch von untergeordneter Relevanz, da der taktile Sensor bei normierten Widerständen $R \geq 1$ als unbelastet betrachtet wird.

8.2 Ausblick

Wie im vorherigen Abschnitt erwähnt wird, kann das Sensorverhalten bei der Verwendung als taktile Fußsohle, bereits sehr gut durch das Sensormodell abgebildet werden. Bei einer solchen Anwendung erfolgen Be- und Entlastungen vergleichsweise schnell. Werden hingegen hinreichend langsame Belastungstrajektorien auf den Sensor aufgebracht, so kommt es zu leichten Abweichungen zwischen dem realen Sensorverhalten und dem Modell. Eine solche Trajektorie ist in Abb. C.4 dargestellt. Der Grund für die auftretenden Abweichungen wird am Ende von Kapitel 7.2.2 erläutert. Bei einer Verwendung des Sensors für allgemeine robotische Anwendungen (wie z.B. zur Kollisionserkennung und dergleichen), sollte das Sensormodell noch zusätzlich für langsame Belastungstrajektorien erweitert werden.

Ein weiterer Ausblick ergibt sich im Bezug auf den finalen Fuß von LOLA. Da zum aktuellen Zeitpunkt kein finales Fußmodell zur Verfügung steht, können die Sensoreigenschaften anfänglich nur anhand von einem Schichtverbund nach Kapitel 3.1 erfasst werden. Aufbauend auf diesem Prototyp wird für Validierungszwecke ein fußähnlicher Prototyp nach Kapitel 7.2.3 entwickelt. Durch diesen Aufbau kann zwar die Gültigkeit und Richtigkeit der entwickelten Sensormodelle validiert werden, jedoch wird auch festgestellt, dass sich zum Beispiel durch Überspannung der Sensorschichten gewisse Modellparameter ändern können. Aus diesem Grund wird für den finalen Fuß von LOLA die erneute Messung von Modellparametern nach Abschnitt 4.3 empfohlen.

Da alle Experimente unter Laborbedingungen durchgeführt werden, sind die Sensorschichten keinem nennenswerten Verschleiß ausgesetzt. Deshalb kann die Lebensdauerbeständigkeit der Modellparameter nicht überprüft werden. Da jedoch von einer verschleißabhängigen Veränderung der Sensoreigenschaften ausgegangen wird, empfiehlt sich eine wiederholte Auswertung der Modellparameter nach einer gewissen Betriebsdauer der Fußsohle. Somit können bei Bedarf nachträglich Verschleißeffekte im Sensormodell integriert werden. Eine Implementierung von Verschleißeffekten kann zum Beispiel durch Integration von zeitabhängigen Modellparametern, in der Klasse *ContactSensorTactileParameters* aus Kapitel 6.1, erfolgen.

Ein weiterer Ansatzpunkt für eine Weiterentwicklung ergibt sich in der Auswerteelektronik der Fußsohle. Die Abtastfrequenz der Sensoren ist nach Abschnitt 3.4 aktuell auf $\leq 300\text{Hz}$ begrenzt. Dies hat zwar keinerlei Einflüsse auf die experimentelle Untersuchung der Fußsohle und das entwickelte Sensormodell, da die meisten Größen unter statischen Bedingungen ausgewertet werden. Für zeitkritische Messungen wie zum Beispiel dem Prelleffekt oder das Totzeitverhalten, wird die Messung wiederum auf einzelne Taxel beschränkt, wodurch die geforderte Abtastrate von 1000Hz erreicht werden kann.

Die Auswertung der realen Sensorsignale kann jedoch sehr wohl durch diese begrenzte Abtastfrequenz betroffen sein. Im Zweifelsfall könnten dadurch zum Beispiel gewisse Hindernisse zu spät erkannt werden, was zu einem Sturz führen könnte. Der Grund für die Verfälschung der Ausgangssignale am Infineon XMC4300 Microcontroller kann zum aktuellen Zeitpunkt nicht abgeklärt werden. Sollte jedoch eine Abtastfrequenz von 1000Hz angestrebt werden, so muss der Grund für die auftretenden Signalverfälschungen nach Abb. B.4 noch genauer hinterfragt werden.

Anhang A

Schaltplan der Auswerteelektronik

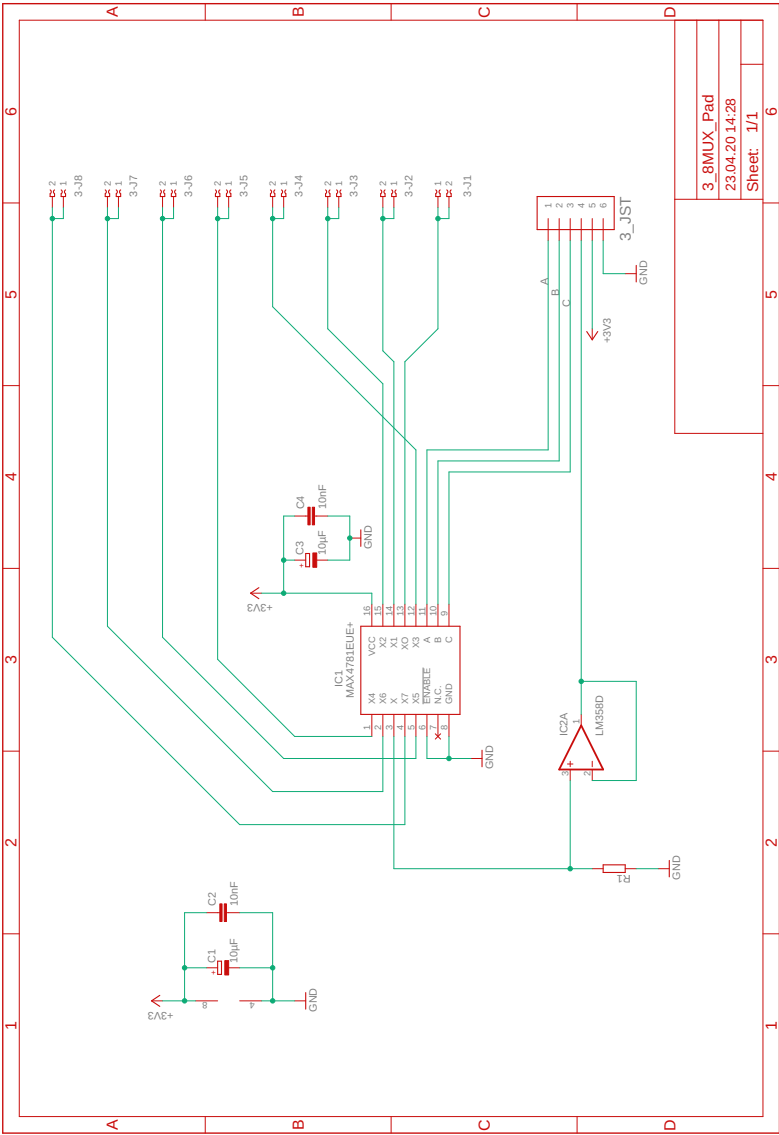


Abbildung A.1: Platine 8MUX Pad. Die dargestellte Platine wird zur Auswertung der Taxel-Zeilenindizes am kleinen Zehen-Sensor (Pad) verwendet.

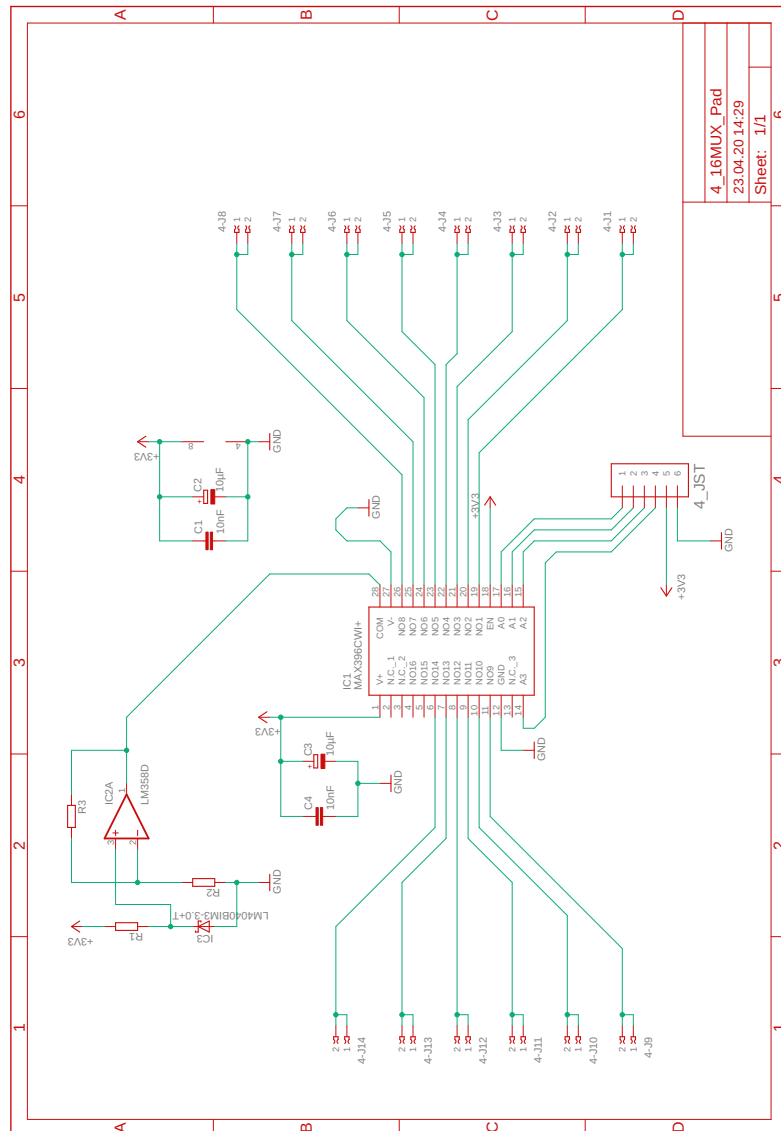
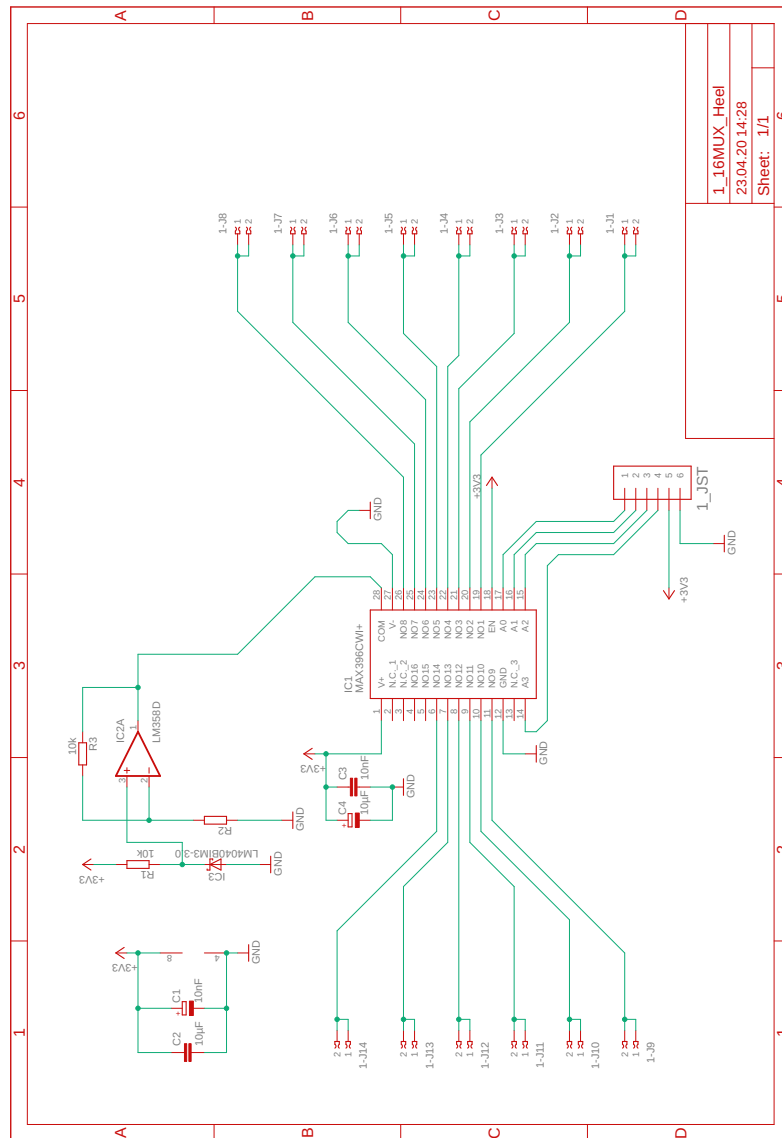


Abbildung A.2: Platine 16MUX Pad. Die dargestellte Platine wird zur Auswertung der Taxel-Spaltenindizes am kleinen Zehen-Sensor (Pad) verwendet.



1_16MUX_Heel
23.04.2014:28
Sheet: 1/1

Abbildung A.3: Platine 16MUX Heel. Die dargestellte Platine wird zur Auswertung der Taxel-Spaltenindizes am großen Fersen-Sensor (Heel) verwendet.

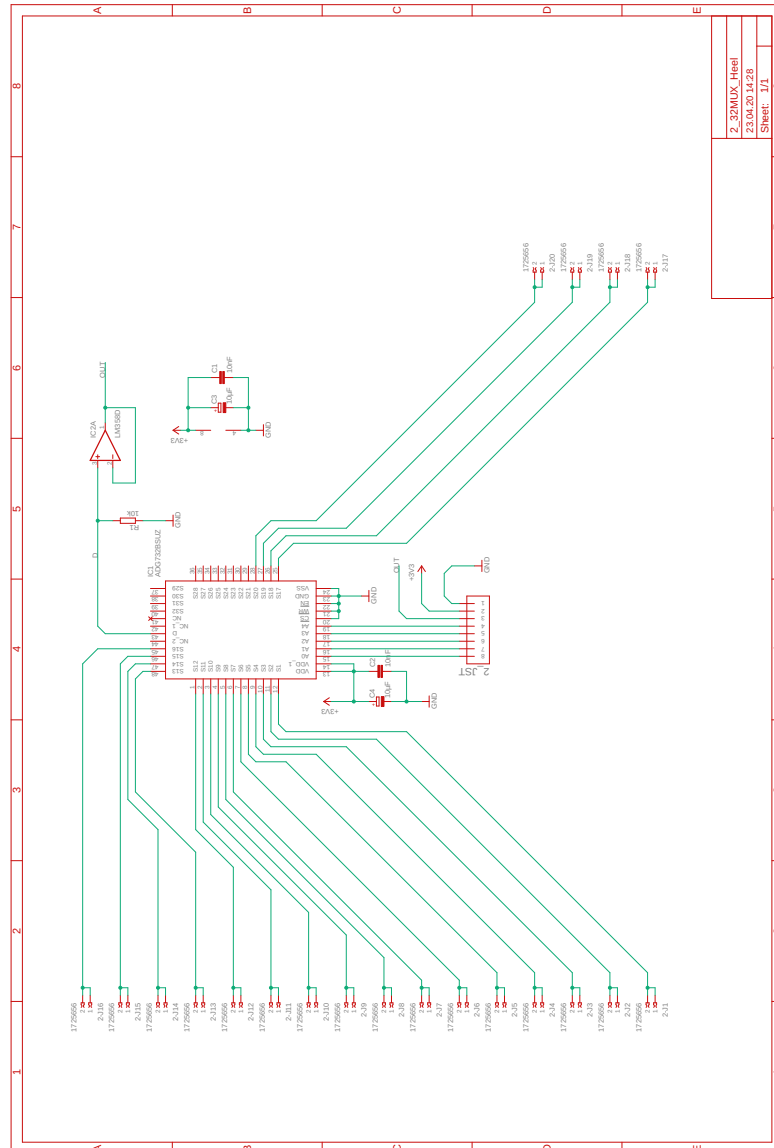


Abbildung A.4: Platine 32MUX Heel. Die dargestellte Platine wird zur Auswertung der Taxel-Zeilenindizes am großen Fersen-Sensor (Heel) verwendet.

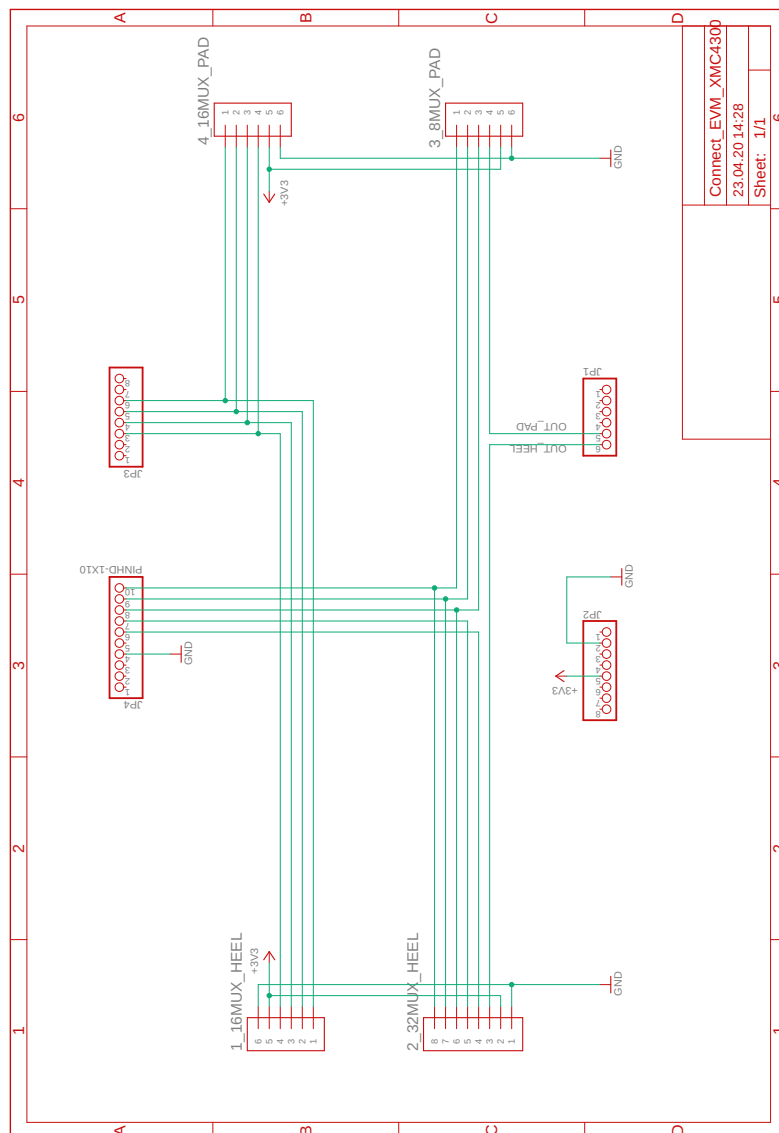


Abbildung A.5: Verbindungsplatine zum Anschluss der Multiplexer an den Mikrocontroller.

Anhang B

Versuchsaufbau und Auswertung der Sensorsignale

B.1 Auswertelektronik der Sensorsignale und Kraftmessgerät

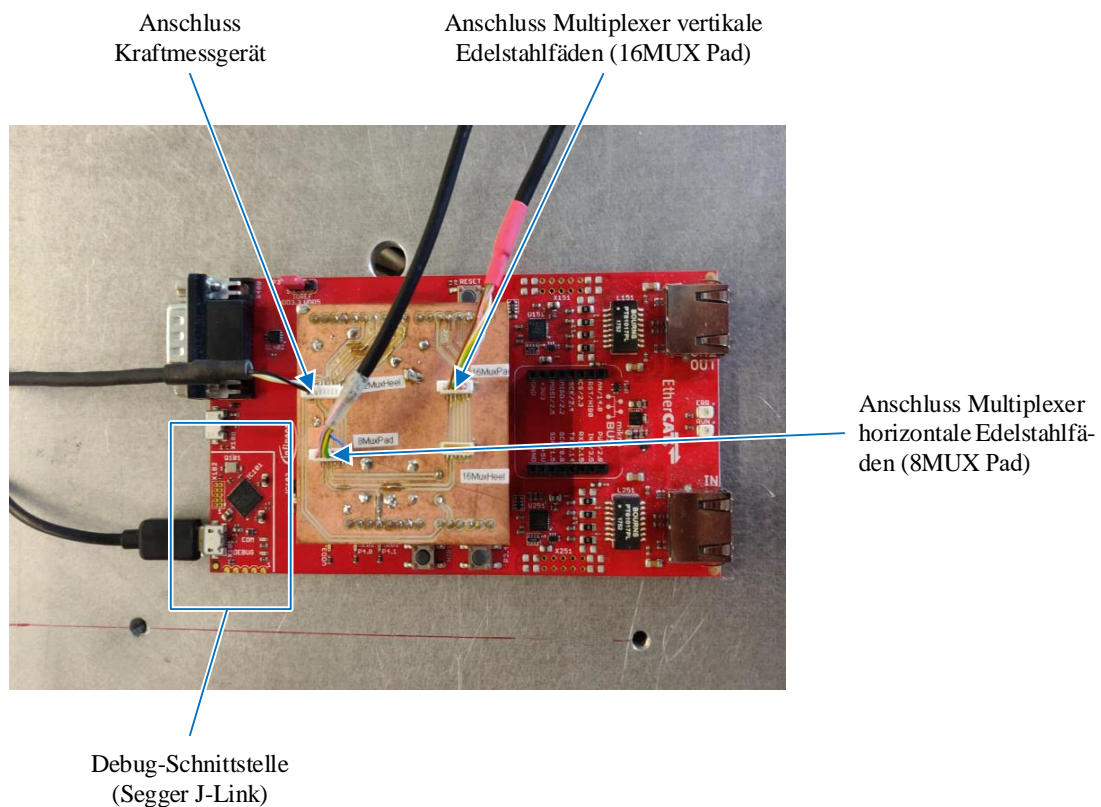


Abbildung B.1: Infineon XMC4300 Microcontroller mit Verbindungsplatine und Anschlüssen für die Multiplexer und das Kraftmessgerät.

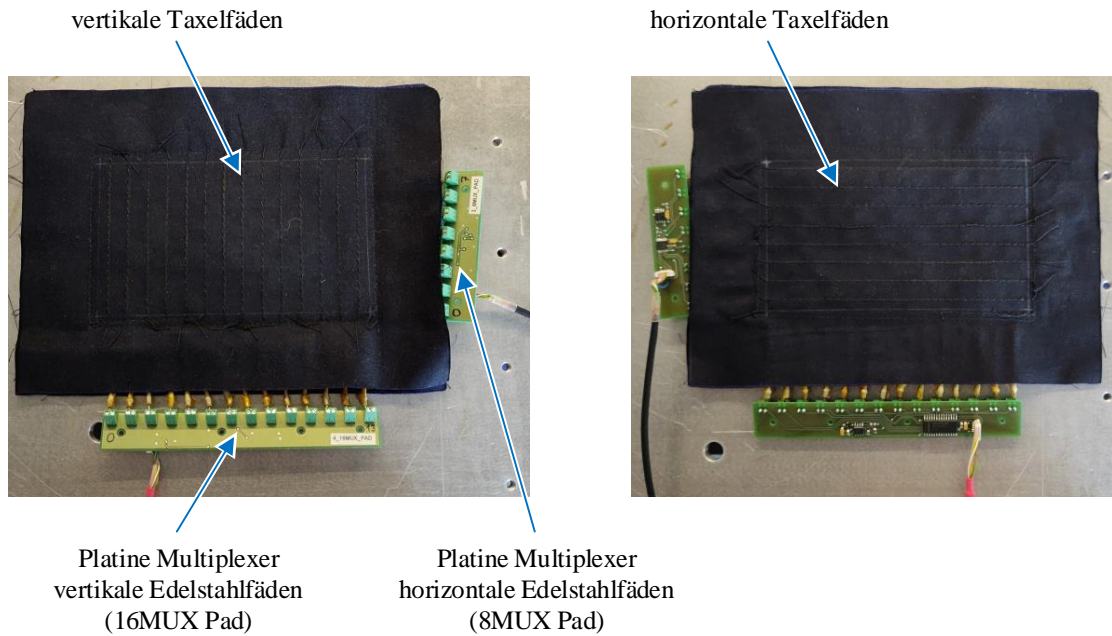


Abbildung B.2: Oberseite des taktilen Fußsensors (links) und Unterseite (rechts) mit den Platinen und Anschlusskabel der Multiplexer.

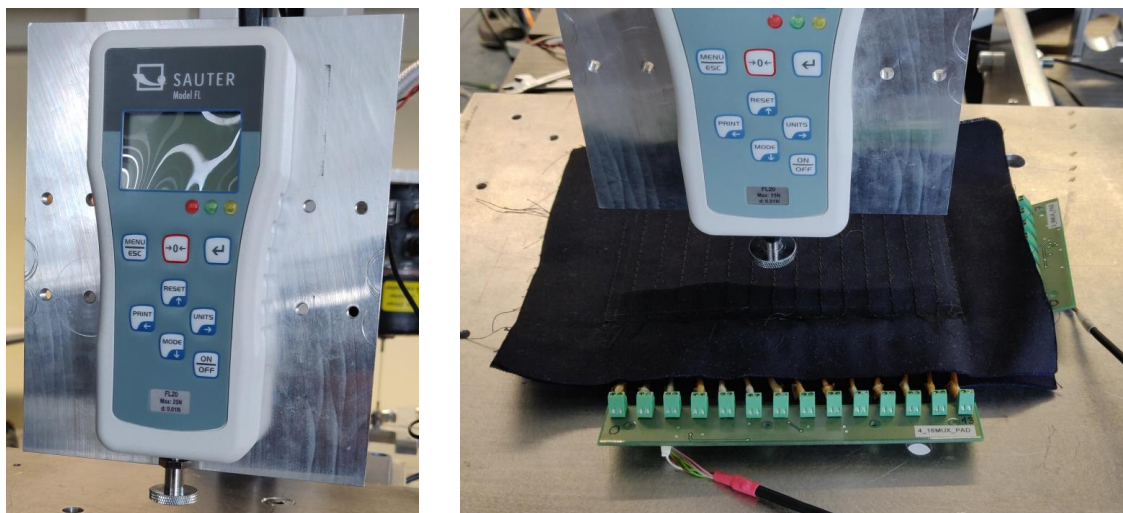


Abbildung B.3: Sauter FL Kraftmessgerät mit einem zylindrischen Prüfkopf vom Durchmesser 20mm und taktiler Fußsensor (ohne Dämpfungsmaterial und abriebfestester Schicht).

B.2 Ausgangssignale am Microcontroller bei hohen Schaltfrequenzen

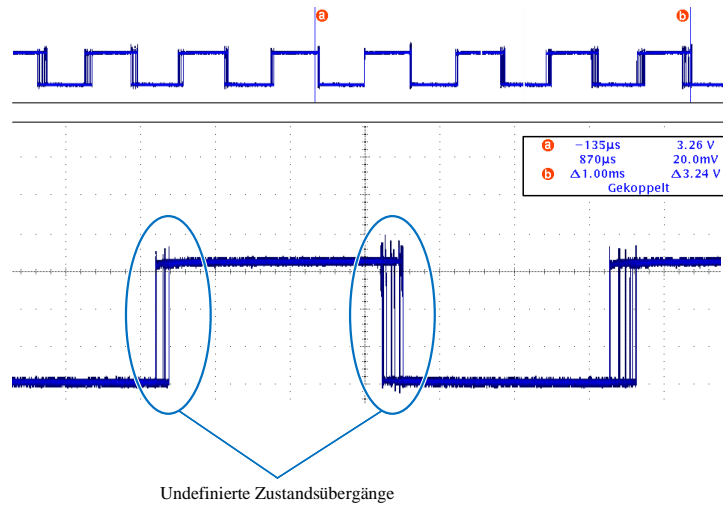


Abbildung B.4: Ausgangssignal Port 3.6 des Infineon XMC4300 Microcontrollers bei einer Abtastrate der gesamten Fußsole von 1000Hz.

B.3 Grafische Bedienoberfläche zur Auswertung der Sensorsignale

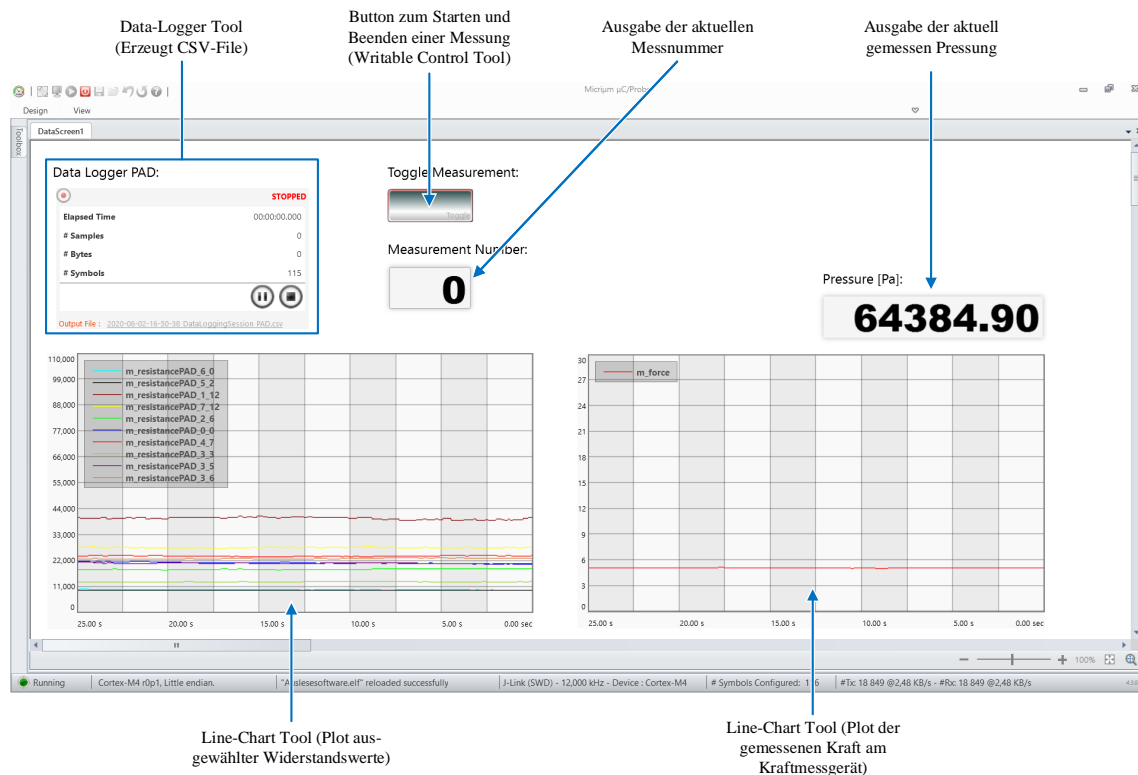


Abbildung B.5: Grafische Bedienoberfläche in Mircium zur Auswertung und Aufzeichnung von Messsignalen.

Anhang C

Validierungsmessungen

C.1 Validierung der Kopplung benachbarter Elemente

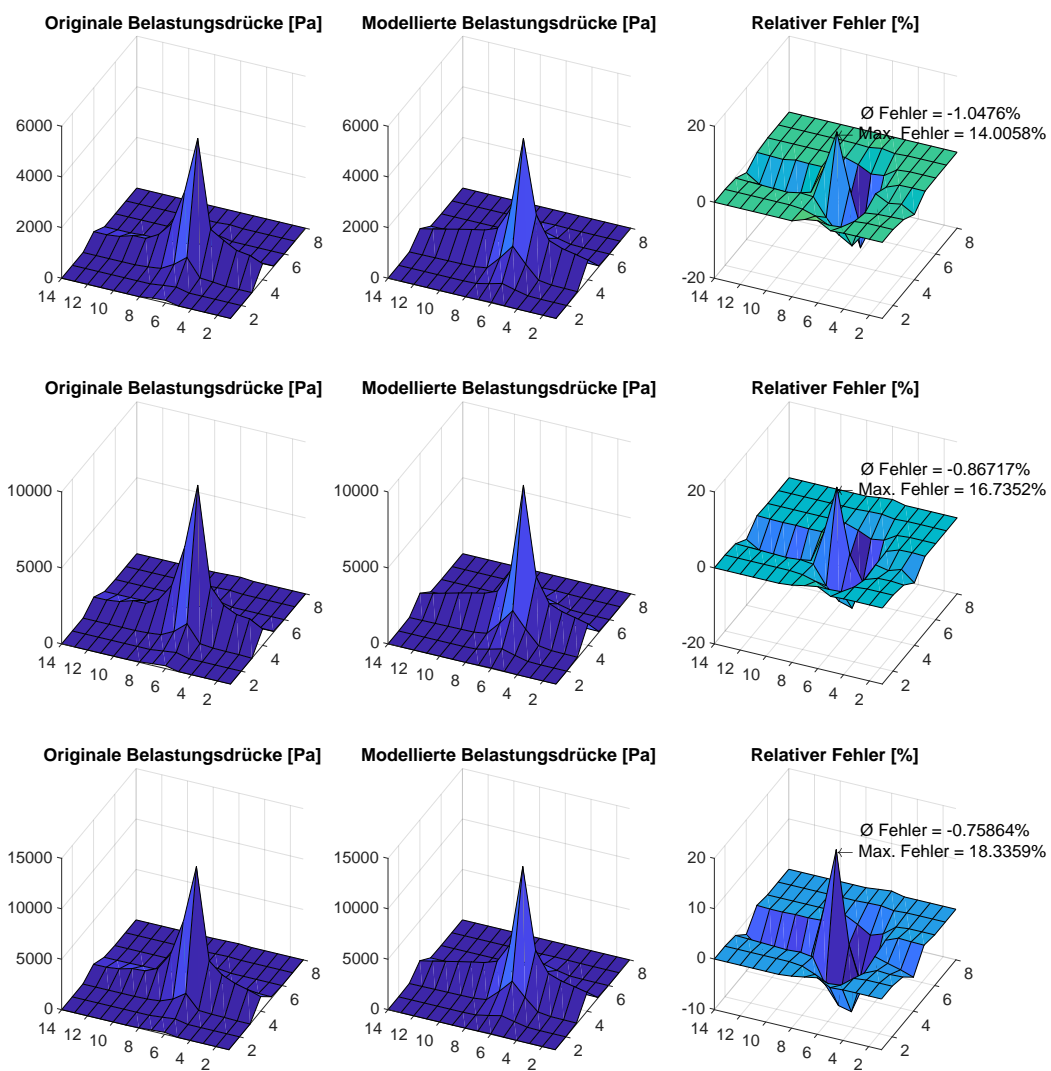


Abbildung C.1: Validierungsmessungen der Kopplung benachbarter Elemente am Sensorprototyp aus Kapitel 3.1. Dargestellt ist eine punktförmige, statische Belastung von Taxel (4,6).

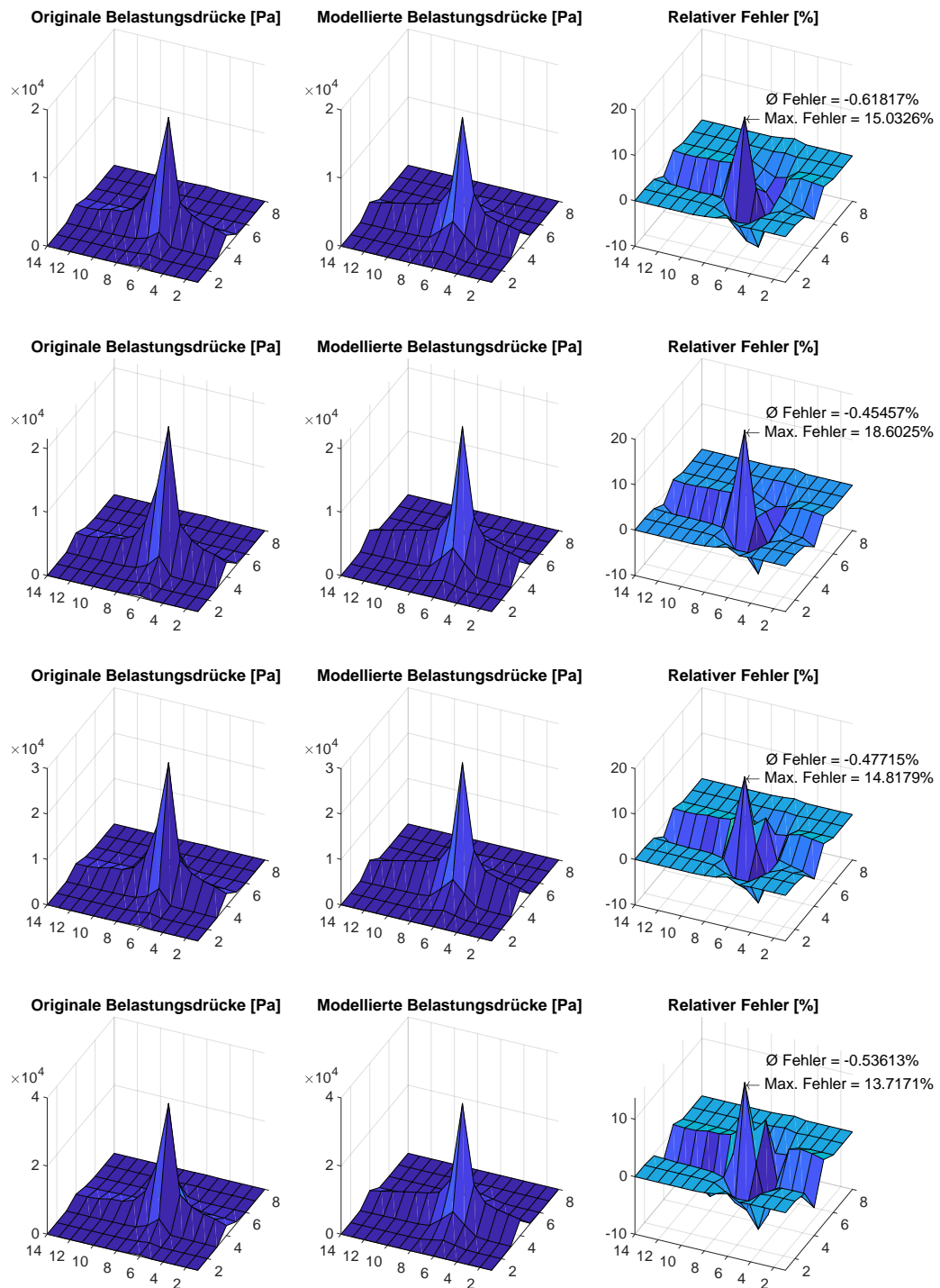


Abbildung C.2: Validierungsmessungen der Kopplung benachbarter Elemente am Sensorprototyp aus Kapitel 3.1. Dargestellt ist eine punktförmige, statische Belastung von Taxel (4,6).

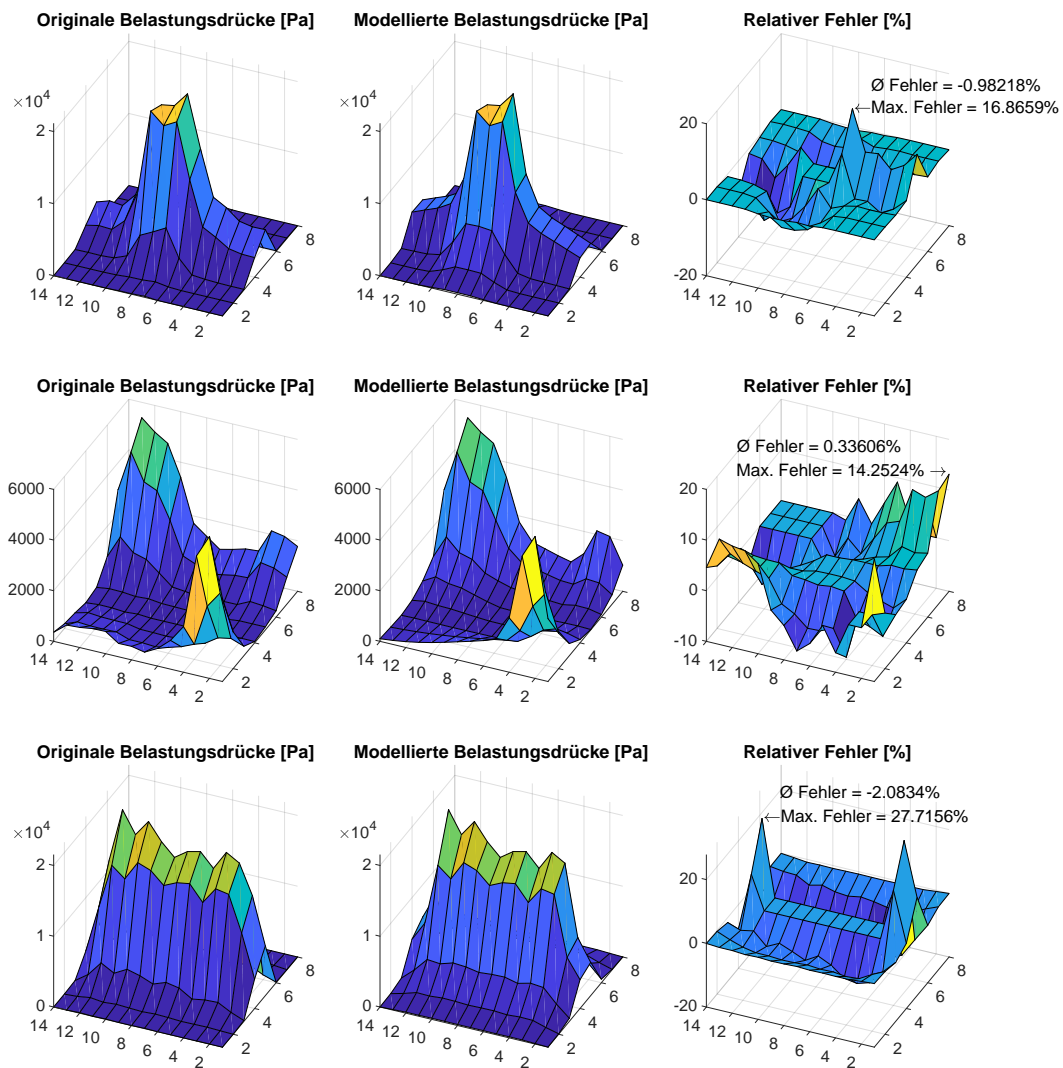


Abbildung C.3: Validierungsmessungen der Kopplung benachbarter Elemente am Sensorprototyp aus Kapitel 3.1. Dargestellt sind großflächige Belastungen unterschiedlicher Taxel.

In Tabelle C.1 sind die jeweils belasteten Taxel aus Abb. C.3 dargestellt.

Abb. C.3 (oben)	(4,7), (4,8), (4,9), (5,7), (5,8), (5,9)
Abb. C.3 (Mitte)	(1,2), (1,3), (2,2), (2,3) und (6,11), (6,12), (6,13), (7,11), (7,12), (7,13), (8,11), (8,12), (8,13)
Abb. C.3 (unten)	(4,3), (4,4), (4,5), (4,6), (4,7), (4,8), (4,9), (4,10), (4,11), (4,12), (5,3), (5,4), (5,5), (5,6), (5,7), (5,8), (5,9), (5,10), (5,11), (5,12)

Tabelle C.1: Zugehörige belastete Taxel aus Abb. C.3.

C.2 Validierung unterschiedlicher Zeitverläufe

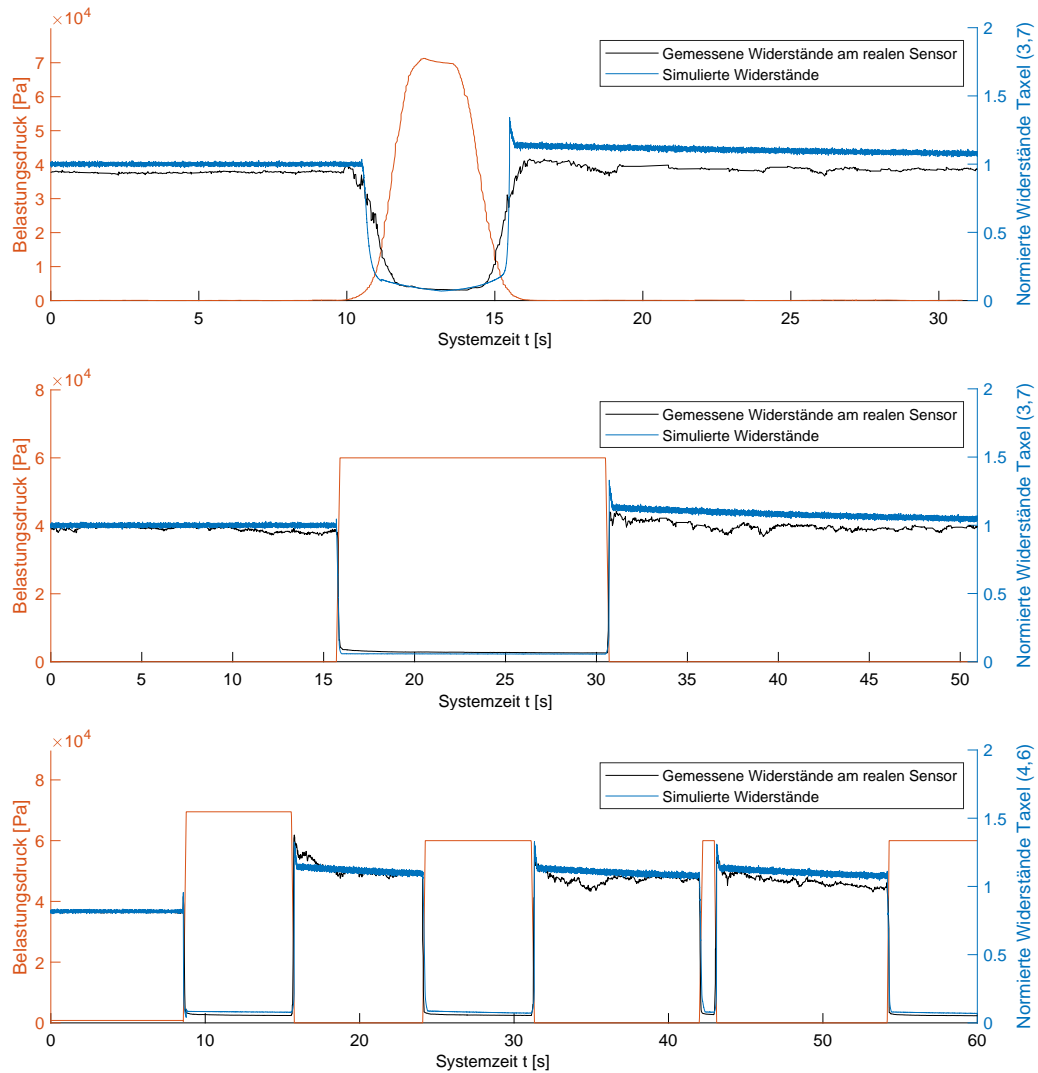


Abbildung C.4: Validierungsmessungen des Widerstandsverhaltens in Abhängigkeit der Systemzeit am Sensorprototyp aus Kapitel 3.1.

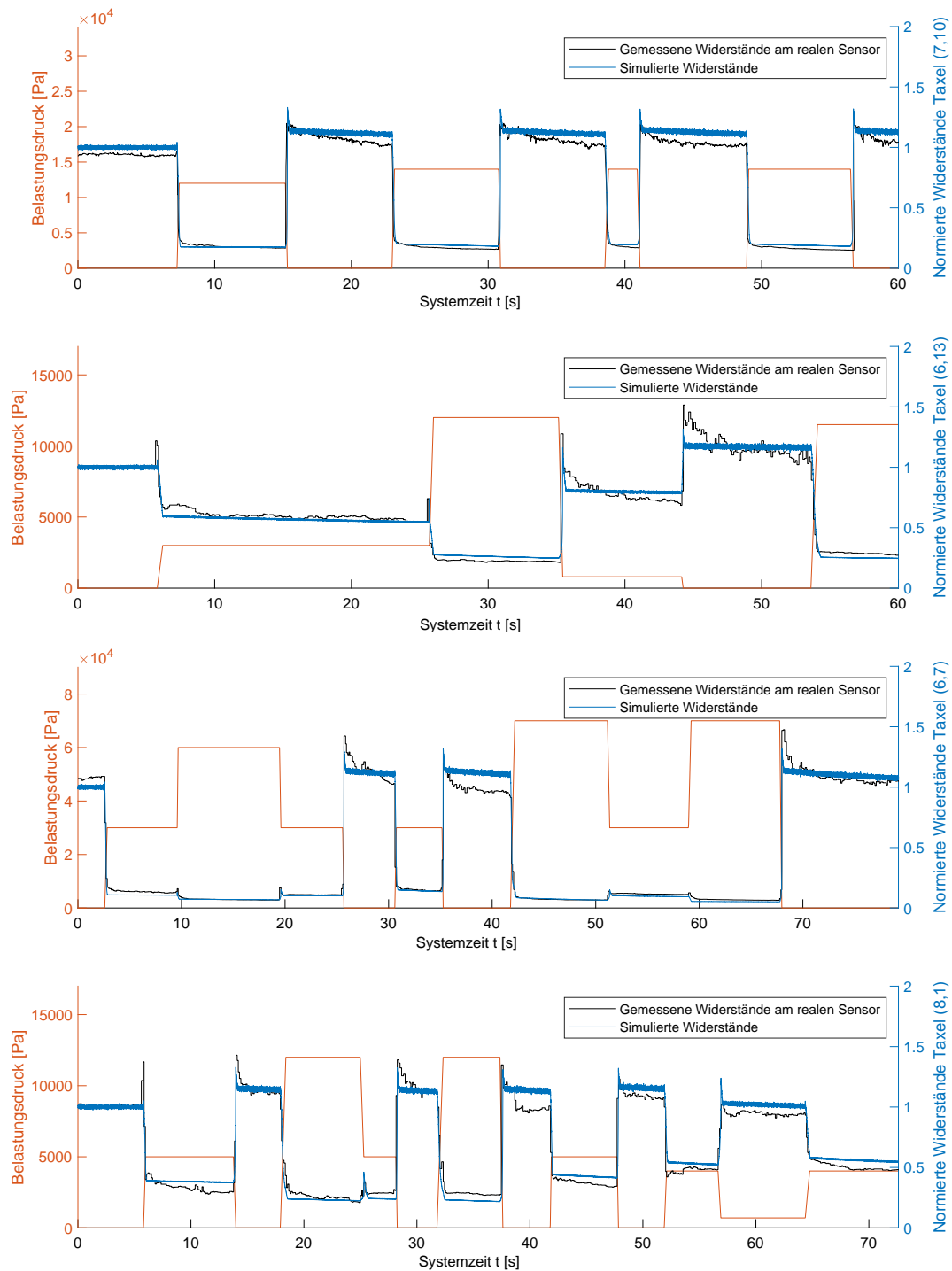


Abbildung C.5: Validierungsmessungen des Widerstandsverhaltens in Abhängigkeit der Systemzeit am Sensorprototyp aus Kapitel 3.1. Die dargestellten Messungen sind nicht direkt an der Belastungsstelle, sondern an benachbarten Taxeln der Belastungsstelle ausgewertet. Somit kann zusätzlich das Modell für die Kopplung benachbarter Elemente validiert werden.

C.3 Validierung des Sensormodells durch einen fußähnlichen Prototyp

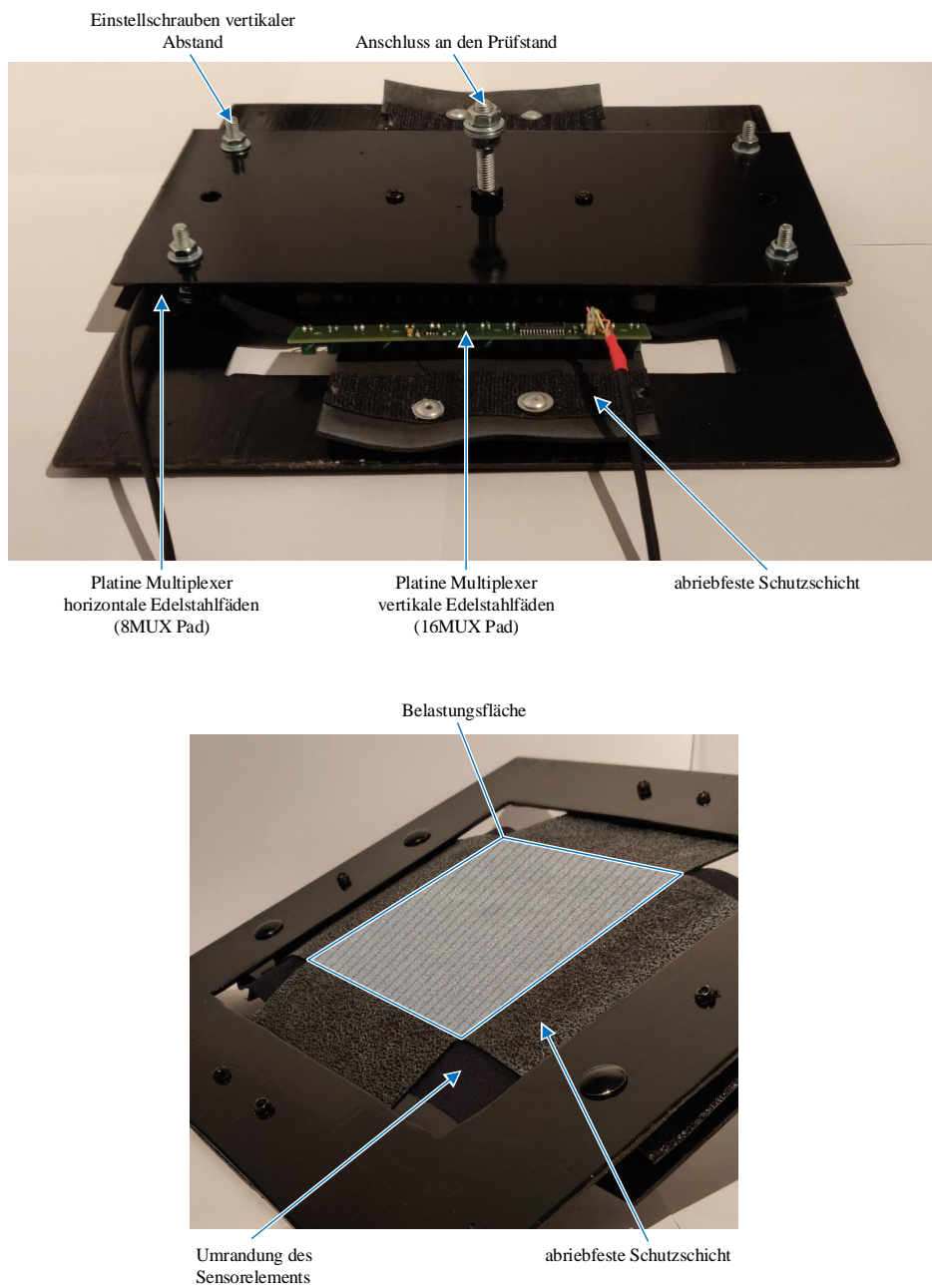


Abbildung C.6: Aufbau des fußähnlichen Prototypen zur Durchführung von Validierungsmessungen.

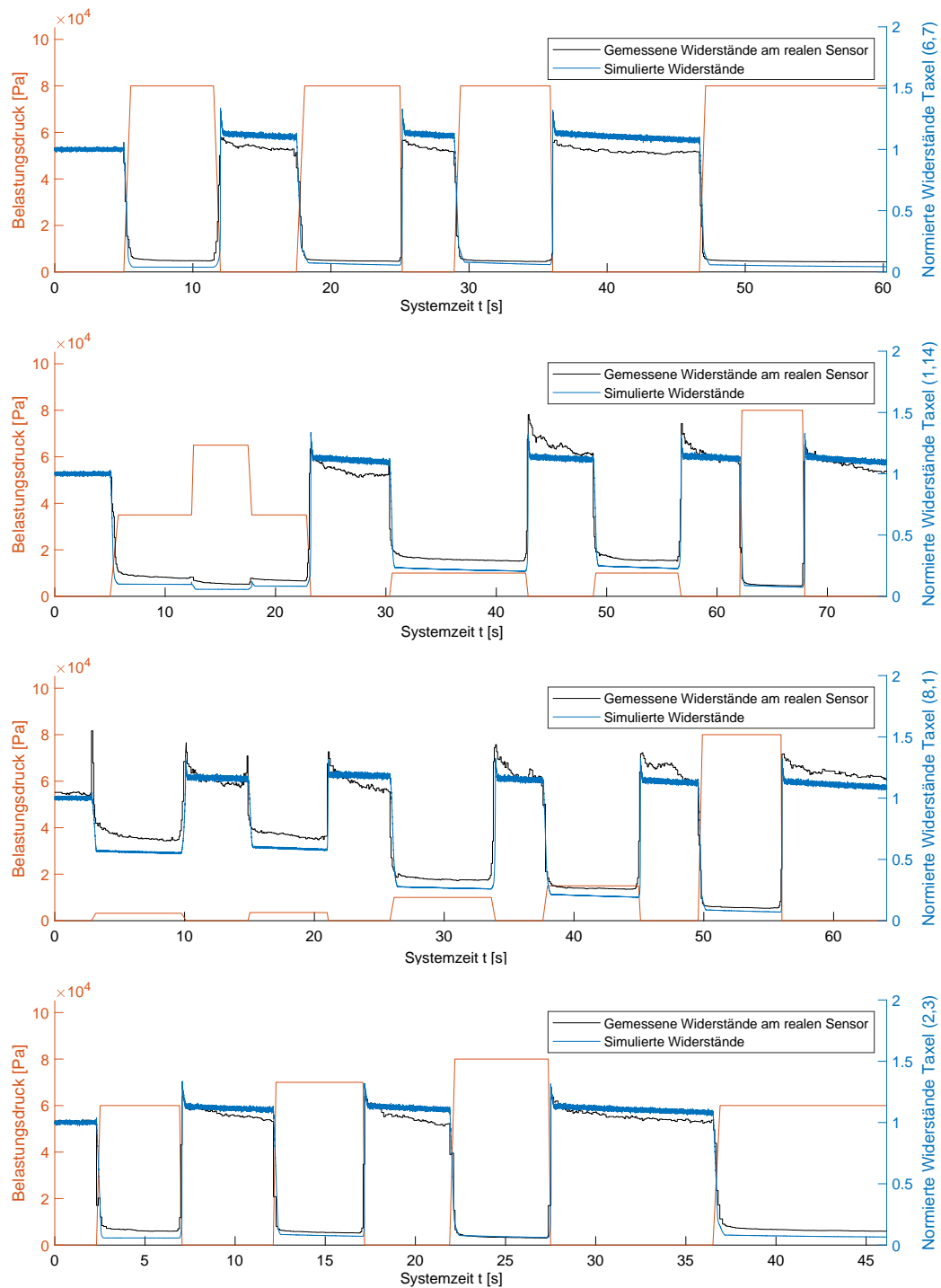


Abbildung C.7: Validierungsmessungen des Widerstandsverhaltens in Abhängigkeit der Systemzeit am fußähnlichen Prototypen.

Literatur

- [1] Bridgman, P. W. „The Effect of Tension on the Electrical Resistance of Certain Abnormal Metals“. In: *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences* (Apr. 1922), S. 41–66. DOI: 10.2307/20025885.
- [2] Chiang, H.-N., Chou, T.-L., Lin, C.-T. und Chiang, K.-N. *Investigation of the Hysteresis Phenomenon of a Silicon-based Piezoresistive Pressure Sensor*. Conference contribution in: *Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology*. Department of Power Mechanical Engineering, National Tsing Hua University, Nov. 2007. DOI: 10.1109/IMPACT.2007.4433592.
- [3] Dahiya, R. S., Sandini, G. und Valle, M. „Tactile Sensing - From Humans to Humanoids“. In: *IEEE Transactions on Robotics* (Feb. 2010), S. 1–20. DOI: 10.1109/TRO.2009.2033627.
- [4] *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR). URL: <https://www.dlr.de/DE/Home> (besucht am 20. 11. 2020).
- [5] *dSPACE Prototyping Systeme*. dSPACE GmbH. URL: <https://dSPACE.com> (besucht am 21. 11. 2020).
- [6] Grellmann, W. und Seidler, S. *Kunststoffprüfung*. 5. Aufl. Hanser-Fachbuch, 2015. ISBN: 978-3-446-44390-7.
- [7] Hirschmann, H. „Entwicklung einer taktile Fußsohle für einen humanoiden Roboter“. Master Thesis. Technische Universität München, 4. Juli 2017.
- [8] *Humanoid Robot LOLA*. Lehrstuhl für Angewandte Mechanik (TU-München). URL: <https://www.mw.tum.de/am/forschung/aktuelle-projekte/robotik/humanoider-roboter-lola> (besucht am 10. 06. 2020).
- [9] Jacob, B. und Guennebaud, G. *Eigen*. URL: <https://eigen.tuxfamily.org> (besucht am 04. 11. 2020).
- [10] Karpfinger, C. *Höhere Mathematik in Rezepten*. 2. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2015. ISBN: 978-3-662-43810-7.
- [11] Kheddar, A. und Billard, A. „A Tactile Matrix for Whole-Body Humanoid Haptic Sensing and Safe Interaction“. In: *Robotics and Biomimetics (ROBIO), IEEE International Conference* (Dez. 2011), S. 1433–1438. DOI: 10.1109/ROBIO.2011.6181491.
- [12] Lee, M. und Nicholls, H. R. „Tactile sensing for mechatronics - a state of the art survey“. In: *Mechatronics* (1. Feb. 1999), S. 1–31. DOI: 10.1016/S0957-4158(98)00045-2.
- [13] Li, S., Wang, Y., Cao, H., Ding, J., Shuang, F. und Ge, Y. „Flexible Tactile Sensor Based on Conductive Rubber and Sensing Mechanism“. In: *Sensors and Transducers* (März 2013), S. 12–17.
- [14] Lohmeier, S. „Design and Realization of a Humanoid Robot for Fast and Autonomous Bipedal“. Dissertation. Technische Universität München, 2. Juni 2010.

- [15] *Matlab fzero - Root of nonlinear function*. MathWorks. URL: <https://de.mathworks.com/help/matlab/ref/fzero.html> (besucht am 24. 10. 2020).
- [16] *Matlab rng - Control random number generator*. MathWorks. URL: <https://de.mathworks.com/help/matlab/ref/rng.html> (besucht am 24. 10. 2020).
- [17] Maxim. *High-Speed Low-Voltage CMOS Analog Multiplexers MAX4781EUE*. Produktdokumentation. Feb. 2005.
- [18] Maxim. *Precision 16-Channel Low-Voltage CMOS Analog Multiplexers MAX396CWI*. Produktdokumentation. Jan. 2016.
- [19] *New Foot Design*. Lehrstuhl für Angewandte Mechanik (TU-München). URL: <https://wiki.tum.de/display/lolaprojects/New+Foot+Design> (besucht am 04. 11. 2020).
- [20] Oliveri, A., Maselli, M., Lodi, M., Storace, M. und Cianchetti, M. „Model-Based Compensation of Rate-Dependent Hysteresis in a Piezoresistive Strain Sensor“. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* (Okt. 2019), S. 8205–8213. DOI: 10.1109/TIE.2018.2884204.
- [21] Pacelli, M., Caldani, L. und Paradiso, R. *Performances evaluation of piezoresistive fabric sensors as function of yarn structure*. Conference contribution in: *Annual International Conference of the IEEE EMBS*. Juli 2013, S. 6502–6505. DOI: 10.1109/EMBC.2013.6611044.
- [22] Pehl, E. *Digitale und analoge Nachrichtenübertragung*. Hüthig, 2001. ISBN: 3-7785-2801-7.
- [23] Peter, B., Bumiller, H., Burgmaier, M., Eichler, W., Käppel, T., Klee, W., Kober, K., Manderla, J., Schwarz, J., Spielvogel, O., Tkotz, K., Winter, U. und Ziegler, K. *Fachkunde Elektrotechnik*. 26. Aufl. Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel, 2009. ISBN: 978-3-8085-3479-3.
- [24] Phan, K. „Methods to correct for creep in elastomer-based sensors“. In: *SENSORS, 2008 IEEE* (Okt. 2008), S. 12–17. DOI: 10.1109/ICSENS.2008.4716637.
- [25] Strohmayer, M., Saal, H., Potdar, A. und Smagt, P. *The DLR touch sensor I: A flexible tactile sensor for robotic hands based on a crossed-wire approach*. Conference contribution in: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. DLR - German Aerospace Center, Institute of Robotics und Mechatronics, Germany, Okt. 2010. DOI: 10.1109/IROS.2010.5650191.
- [26] Strohmayer, M., Wörn, H. und Hirzinger, G. *The DLR artificial skin step I: Uniting sensitivity and collision tolerance*. Conference contribution in: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. DLR - German Aerospace Center, Institute of Robotics und Mechatronics, Germany, Mai 2013. DOI: 10.1109/ICRA.2013.6630697.
- [27] Strohmayer, M. und Schneider, D. *The DLR artificial skin step II: Scalability as a prerequisite for whole-body covers*. Conference contribution in: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. DLR - German Aerospace Center, Institute of Robotics und Mechatronics, Germany, Nov. 2013. DOI: 10.1109/IROS.2013.6697036.
- [28] Sygulla, F., Ellensohn, F., Hildebrandt, A.-C., Wahrmann, D. und Rixen, D. *A Flexible and Low-Cost Tactile Sensor for Robotic Applications*. Conference contribution in: *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. Chair of Applied Mechanics, Technical University of Munich, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching, Germany, 4. Juli 2017. DOI: 10.1109/AIM.2017.8013995.
- [29] Sygulla, F. und Rixen, D. „A force-control scheme for biped robots to walk over uneven terrain including partial footholds“. In: *International Journal of Advanced Robotic Systems* (21. Jan. 2020), S. 1–14. DOI: 10.1177/1729881419897472.

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die von mir eingereichte Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Garching, 03. Dezember 2020

A handwritten signature in black ink that reads "J. Dainer". The signature is written in a cursive style with a large, prominent 'J' and 'D'.

(Unterschrift)