

Evaluation und Weiterentwicklung eines kapazitiven taktilen Näherungssensors

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

von der Fakultät für Informatik
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Stefan Escaida Navarro

aus Leimen

Tag der mündlichen Prüfung: 19. Juli 2016
Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Björn Hein
Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Tamim Asfour

Dankessagung

Zuerst möchte ich mich bei meinem Betreuer, Prof. Hein, für das Vertrauen und die Unterstützung bedanken, die ich von ihm während der gesamten Promotion erhalten habe. Ein besonderer Dank gilt auch Prof. Wörn, der mich zunächst an die wissenschaftliche Arbeit am IAR-IPR heranführte und entscheidende Impulse für meine gesamte Promotion gab. Ebenso bedanke ich mich bei meinem Korreferenten, Prof. Asfour, für sein Engagement, seine ehrliche Kritik und seine hilfreichen Anregungen.

Meinen Eltern, meinen Geschwistern und meinen Tanten danke ich, da sie sich immer für meine Erfolge mitgefremt haben, und mir Halt geboten haben, wenn ich ihn brauchte. Bei Rita und Marianne bedanke ich mich für stärkende Mahlzeiten, Essenslieferungen und die stetige Begleitung während meiner Zeit als Student und als Doktorand. Rita gilt noch ein besonderer Dank, weil sie meine Arbeit sprachlich korrekturgelesen hat (etwaige Unzulänglichkeiten in dieser Hinsicht sind aber auf keinen Fall auf sie zurückzuführen!).

Bei meinen Kollegen vom IAR-IPR bedanke ich mich wegen der tollen freundschaftlichen und kollegialen Atmosphäre auf der Arbeit. Die Zeit am IAR-IPR wird mir, neben den beruflichen Erfahrungen, wegen der unglaublich lustigen Runden – z. B. bei einer Partie *Worms* –, der schönen Grillfeste, der sportlichen Aktivitäten und den tollen Klausurtagungen in guter Erinnerung bleiben. Bei meinem ehemaligen Betreuer zu Studienzeiten, Nico, bedanke ich mich für die Förderung und die inhaltlichen Anstöße, von denen einige bis heute anhalten. Bei Dirk bedanke ich mich für das Vertrauen und die intensive Kollaboration zum Thema TNS. Ohne seine Vorarbeiten und Hardware wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Für mich ist diese Arbeit auch ein Erfolg seiner Ideen. Bei Sam bedanke ich mich für die grandiose Unterstützung und äußerst produktive Zusammenarbeit. Ich fühle mich stolz auf das, was wir erreicht haben! Bei Daniel und Stephan bedanke ich mich für das Engagement beim gemeinsamen Entwerfen des Forschungsprojekts zu den TNS. Bei Henni, Dave, Mirko, Michael, Sam und Jan bedanke ich mich über die Zusammenarbeit hinaus für ihre Freundschaft. Frau Franzke und Frau Maizik habe ich die reibungsfreien Abläufe und die freundliche Koordination der Aktivitäten, in denen ich am Institut involviert war, zu verdanken.

Ein spezieller Dank gilt auch den Studenten, die bei mir ihre Abschlussarbeit geschrieben haben oder als wissenschaftliche Hilfskraft tätig waren. Durch die Zusammenarbeit mit ihnen bin ich in besonderer Weise gewachsen. Vielen von ihnen haben auch wichtige Beiträge zur Entstehung der Dissertation geleistet. Danke Tobias, Tobias, David, Yitao, Matthias, Daniel, Maximiliano, Martin, Björn, Stefan, Franz, Tatjana, Alex und Daniel!

Ähnlich wie meiner Familie danke ich für Begleitung und Halt nicht zuletzt meinen guten Freunden Felix, Michael, Patrick, Gülperi, Esther, Juan, Johannes, Martín, Felipe und Matthias für die wertvolle Zeit und Treffen außerhalb der Uni sowie in manchen Fällen für die tatkräftige Unterstützung beim Korrekturlesen.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit hat die Technologie eines kapazitiven taktilen Näherungssensors zum Thema. Zunächst wird anhand eines existierenden Sensors gezeigt, wie dieser in der Robotik in zwei Aufgabenbereichen gewinnbringend eingesetzt werden kann: in der robusten Manipulation und in der Überwachung des Umfelds des Roboters. Im Bereich der Manipulation werden zwei neue Untergebiete für diese Art von Sensoren erschlossen: die Haptische Exploration und die Telemanipulation. Dann wird diese Technologie in einem neuen Entwurf entscheidend weiterentwickelt, indem ihre Funktionalität erweitert, ihre Integrierbarkeit verbessert und ihre Ortsauflösung erhöht wird.

Für den Bereich der Manipulation wird ein Zwei-Backen-Greifer mit vorhandenen Sensormodulen ausgestattet. Eine gradientenbasierte Regelung ermöglicht das berührungslose Ausrichten an Objekten in den sechs Raumfreiheitsgraden. Diese Methode ist Grundlage für die weiteren Methoden der Haptischen Exploration und der Telemanipulation. Die traditionelle Haptische Exploration wird erweitert, indem berührungslose Explorationschritte eingeführt werden, welche effizient ausgeführt werden können. Die Telemanipulation beinhaltet, dass der Nutzer des Systems eine Krafterückkopplung spürt, welche mit dem Gradienten, der durch die Näherungssensoren detektiert wird, korrespondiert. Mit dieser Unterstützung kann der Nutzer Objekte effizienter explorieren und greifen.

Die Überwachung des Umfelds des Roboters wird realisiert, indem ein End-Effektor mit den vorhandenen Sensormodulen ausgestattet wird. In einem Szenario zur Konturverfolgung bzw. Kollisionsvermeidung wird gezeigt, dass der End-Effektor unvorhergesehene Hindernisse erfolgreich umfahren kann. Im vorgestellten Ansatz wird gezeigt, dass die geschätzte Krümmung der Hindernisfläche für eine prädiktive Regelung verwendet werden kann.

Aus der anwendungsbezogenen Evaluation des Sensors werden die Anforderungen des neuen Entwurfs abgeleitet. Der Sensor wird in seiner Funktionalität erweitert, insbesondere mit der Fähigkeit, im beidseitig-kapazitiven Modus zu messen. Dieser Modus verbessert die Robustheit bei der Detektion von nicht leitenden Materialien. Hinsichtlich der Integrierbarkeit wird der Sensor modularisiert, d. h., einzelne Sensoreinheiten sind in der Lage autark zu messen und die Signale zu verarbeiten. Schließlich wird eine flexible Ortsauflösung für den Sensor realisiert, damit dieser situativ eine höhere Ortsauflösung oder eine höhere Empfindlichkeit aufweisen kann. Es wird gezeigt, dass sich die Methoden, welche für den ersten Sensor entwickelt wurden, auch mit dem neuen Sensor umsetzen lassen. Durch die bessere Integrierbarkeit und Vielseitigkeit werden die Voraussetzungen für eine weitere Verbreitung der Technologie geschaffen.

Inhaltsverzeichnis

I	Einführung	1
1	Einleitung und Motivation	2
1.1	Multimodale Näherungssensoren	2
1.2	Ortsauflösung: von der Kamera bis zum multimodalen kapazitiven Näherungssensor	3
1.3	Gliederung und wissenschaftlicher Beitrag	4
2	Grundlagen	6
2.1	Grundlegende Begriffe der Elektrostatik	6
2.1.1	Coulombsches Gesetz, elektrisches Feld, elektrisches Potential und gaußsches Gesetz	6
2.1.2	Kapazität	10
2.1.3	Dielektrika	10
2.2	Messung von Kapazitäten	13
2.2.1	Messung von Kapazitäten mit einer Tiefpass-Filter-Schaltung	13
2.2.2	Kapazitive Messanordnungen zur Erfassung von Objekten	14
	Beidseitig-kapazitive Messanordnung	14
	Selbst-kapazitive Messanordnung	17
2.3	Aktive Abschirmung	18
3	Stand der Forschung	20
3.1	Vorarbeiten am KIT	20
3.2	Begriffsklärung: Näherungssensor	22
3.3	Methoden	23
3.3.1	Vorausrichten, Explorieren und Greifen	23
	Gruppe Prof. Smith	23
	Gruppe Prof. Zangl	26
	Shimojo Labs	27
3.3.2	Konturverfolgung und Kollisionsvermeidung	29

3.4	Sensorsysteme für künstliche Häute	30
3.4.1	Infrarot-Sensoren	31
3.4.2	Kapazitive Sensoren	32
	Wissenschaftliche Publikationen	33
	Patente, Patentanmeldungen und Offenlegungsschriften	34
3.5	Bewertung	38
 II Anwendungsbezogene Evaluation des kapazitiven taktilen Näherungssensors „TNS V1.0“		40
4	Der Sensor von Göger	41
4.1	Konzept	41
4.2	TNS V1.0: Large Area Module, FPGA und Erweiterungsboard	44
4.3	Veränderungen am System von Göger	45
5	Proximity Servoing mit einem Zwei-Backen-Greifer	47
5.1	Beschreibung des konzipierten Systems	47
5.2	6D Proximity Servoing für das Vorausrichten und Greifen	49
5.2.1	Einleitende Diskussion	49
5.2.2	Implementierung	51
	Kriterien 1 ^{er} Ordnung	51
	Kriterien 2 ^{er} Ordnung	52
5.2.3	Phasen der Vorausrichtung	53
5.2.4	Evaluation	53
	Metallischer Quader	53
	Rundstäbe	55
5.3	TNS-basierte Haptische Exploration	58
5.3.1	Evaluation	59
5.4	Telemanipulation mit kraftbasierter Darstellung von Näherungsfeldern	61
5.4.1	Modifizierung des Zwei-Backen-Greifers	61
5.4.2	Haptisches Eingabegerät	62
5.4.3	Kaskadierter Regler	63
5.4.4	MIDI-Geräte	64
5.4.5	Evaluation	65
	NASA TLX-Fragebogen mit zusätzlichen Fragen	67
	Biosignale	69
	Eingegebene Geschwindigkeiten, Objektverschiebungen, Laufzeiten und Roboterbahnen	70
5.5	Fazit und Anforderungen für die Weiterentwicklung des Sensors	71
6	Konturverfolgung und Kollisionsvermeidung	74
6.1	Kalibrierung	75
6.2	Positionsmessungen	76

6.3	Krümmungsschätzung	76
6.4	Konzept Konturverfolgung	77
6.4.1	Krümmungsbasierte Bewegung	79
6.4.2	Spezialfälle	81
6.4.3	Proximity Servoing	82
6.5	Evaluation	83
6.5.1	Ausführung der krümmungsbasierten Bewegung	83
6.5.2	Empfindlichkeit für Materialeigenschaften	85
6.6	Fazit und Anforderungen für die Weiterentwicklung des Sensors	86
 III Weiterentwicklung des kapazitiven taktilen Näherungssensors: Realisierung einer flexiblen Orstauflösung		88
7	Weiterentwicklung des kapazitiven taktilen Näherungssensors	89
7.1	Entwurf und Prototyp des neuen Sensors	89
7.1.1	Altes Sensorelement	90
7.1.2	Neues Sensorelement	90
7.1.3	Messschaltung	92
7.2	Validierung des neuen Sensorkonzepts anhand des Prototypen „TNS V2.0“	95
7.2.1	Konfiguration des Sensormoduls	95
7.2.2	Experimente	96
8	Validierung des Sensorkonzepts anhand des Prototypen „TNS V3.1“	99
8.1	Zeitverhalten	100
8.2	Rauschverhalten	102
8.2.1	TNS V1.0 und TNS V3.1	102
8.2.2	Rauschverhalten bei analoger und digitaler Zusammenfassung von Elektroden	103
8.3	Taktile Modalität	105
8.4	Erfassung von Gradienten	108
8.4.1	Messungen im selbst-kapazitiven Modus zur Bestimmung von Gradienten	108
8.4.2	Messungen im beidseitig-kapazitiven Modus zur Bestimmung von Gra- dienten	112
8.4.3	Berührungsloses Vorausrichten	116
8.5	Fazit	118
8.6	Erfüllung der Anforderungen	120
9	Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick	122
9.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	122
9.2	Ausblick	124
 Literatur		126

Anhang	140
A Anhang 1	140
A.1	142

TEIL I

Einführung

KAPITEL 1

Einleitung und Motivation

In diesem ersten Kapitel werden die Motivation und ein Überblick über die Beiträge der vorliegenden Arbeit dargestellt. Dabei spielen zwei Aspekte eine herausragende Rolle: Einerseits wird auf die Aufgabe von multimodalen Näherungssensoren in der Robotik eingegangen, nämlich das robuste Greifen zu unterstützen und die Sicherheit der Robotersysteme zu erhöhen. Andererseits wird erläutert, welche Herausforderungen und Möglichkeiten die Verwendung des kapazitiven Messprinzips in Hinblick auf die Ortsauflösung mit sich bringt. Der Beitrag der Arbeit lässt sich diesen beiden Bereichen zuordnen.

1.1 Multimodale Näherungssensoren

In allen Anwendungsfeldern der Robotik gilt, dass das Umfeld des Robotersystems erfasst werden muss, damit das Robotersystem seine gesetzte Aufgabe erfüllen kann. Traditionellerweise werden Kameras zur Überwachung des Arbeitsraums verwendet. Die Wahrnehmung wird darüber hinaus oft durch taktile Sensoren ergänzt, welche in Greifer integriert werden und das Äußere des Roboters auskleiden können.

Methoden der Mensch-Roboter-Interaktion werden über Kameras und taktile Sensoren umgesetzt. Dennoch ist die Abdeckung der Umgebung des Roboters durch diese Modalitäten noch lückenhaft. Ein Kamerasystem kann zwar berührungslos die Umgebung erfassen, hat aber mit Beleuchtungsbedingungen und Verdeckungen zu kämpfen. Einerseits können die Verdeckungen in Interaktionsszenarien vorkommen, in denen der Mensch sich im Arbeitsraum des Roboters aufhält. Bei einer intensiven Interaktion oder Kooperation kann mithilfe der Kamera allein die Sicherheit des Menschen bezüglich eines unerwünschten Kontakts nicht garantiert werden. Andererseits kann es in vielen Fällen zu Selbstverdeckungen kommen. Wenn z. B. ein Objekt gegriffen wird, ist es in der Regel ab einem bestimmten Zeitpunkt nicht mehr vollständig im Kamerabild des Roboters zu sehen. Diese Lücke ist problematisch für die Eigensicherheit des Systems, da im Falle eines unvorhergesehenen Kontakts der Roboter oder sein Umfeld zu Schaden kommen können. Taktile Sensoren können diese Sicherheitsbedenken nicht grundsätzlich ausräumen, denn es erfordert einen Kontakt, damit der Roboter überhaupt etwas wahrnehmen kann.

Aus den genannten Gründen ist in den gleichen Szenarien, in denen taktile Wahrnehmung sinnvoll ist, eine zusätzliche Näherungswahrnehmung sinnvoll. Sowohl mit der Ausstattung des Greifers als auch der Auskleidung des Roboters kann ein Ereignis berührungslos erfasst und modelliert werden. Das bietet dem Roboter Spielraum, seine eigene Handlung anzupassen, bevor der sicherheitskritische Kontakt hergestellt wird. Deshalb ist ein Trend in der Robotik zu beobachten, wonach Forscher sich mit der Umsetzung von Näherungssensoren beschäftigen. Da die Wahrnehmung der Taktilität und die der Annäherung komplementär sind, ist es wünschenswert, diese beiden Modalitäten in einem Sensorkonzept umzusetzen. Weitere Modalitäten der Wahrnehmung können hinzukommen.

In dieser Arbeit wird in einem bestehenden taktilen Näherungssensor das Potential gesehen, innovative und robuste Lösungen in den beschriebenen Szenarien umzusetzen und damit die genannte Wahrnehmungslücke zu schließen. In einer Weiterentwicklung der Technologie des taktilen Näherungssensors wird das Potential gesehen, diesen besser integrierbar zu machen, damit sich die Lösungen etablieren und verbreiten können.

1.2 Ortsauflösung: von der Kamera bis zum multimodalen kapazitiven Näherungssensor

Die Entwicklung der digitalen Kamera befeuert seit ihrer Erfindung die Forschung an Bildverarbeitungsmethoden. Die Bilder einer Kamera entsprechen einem regelmäßigen zweidimensionalen Gitter aus Pixeln, wobei jedem Pixel in der Regel ein Intensitätswert (Schwarzweiß) zugeordnet wird bzw. drei Intensitätswerte (Farbe) zugeordnet werden. Oftmals ist eine der ersten Operationen, welche auf das Bild angewandt werden, eine Gradientenberechnung, d. h. der richtungsabhängige *Kontrast* zwischen benachbarten Pixeln wird ermittelt. Hierdurch können z. B. Ecken und Kanten im Bild zutage gefördert werden. Wird dieser Kontrast ins Verhältnis zur *Zeit* gesetzt, entsteht der *Optische Fluss*, der Bewegungen im Bild repräsentiert. Diese Methoden gehören immer noch zum Standardrepertoire von Bildverarbeitungssystemen und werden öfter nicht nur in Software, sondern auch von spezialisierter Hardware durchgeführt. Interessant ist auch, dass sich in jüngeren Jahren mit dem Durchbruch von selbstlernenden Algorithmen wie das *Deep Learning* herausgestellt hat, dass diese Systeme ebenfalls Varianten der Gradientenbestimmung als Zwischenschritt bei der internen Repräsentation von Daten herausbilden. Ein andauernder Trend bei Kamerasystemen ist der einer zunehmenden Auflösung. Allein dadurch wird die Genauigkeit der Verfahren, ausreichend Rechenleistung und ausreichende Trainingsdaten vorausgesetzt, fast automatisch erhöht.

Taktile Sensoren, welche ebenso aus einer regelmäßigen Anordnung von Messpunkten bestehen, haben von den Fortschritten der Bildverarbeitung profitiert, da sich viele Methoden direkt übertragen lassen. Nicht umsonst wird in Analogie zum Bildpunkt, dem Pixel, ein taktiler Messpunkt oft *Taxel* genannt. Dass ortsauflösende Näherungssensoren ebenso von diesen Fortschritten profitieren werden, ist zu erwarten. Folglich können die Messpunkte in diesem Fall *Proxel* genannt werden. Bisher gibt es allerdings noch keine weit verbreitete Technologie von (multimodalen) ortsauflösenden Näherungssensoren, die gut integrierbar und robust ist. Die möglichen Zusammenhänge mit Methoden der Bildverarbeitung sind entsprechend noch nicht ausreichend erprobt.

Näherungssensoren mit einem kapazitiven Messprinzip, wie sie in dieser Arbeit betrachtet werden, stellen in Hinblick auf die Ortsauflösung einen besonderen Fall dar. Bei ihnen nimmt die Empfindlichkeit des Sensors mit der Sensorfläche ab. Diese Tatsache steht mit dem Interesse, die Messpunkte zu verdichten, in Konflikt. Daher gibt es Vorschläge, situativ mehrere Elemente zusammenzuschließen, um die Reichweite zu erhöhen. Dies bedeutet, dass für Ereignisse in weiterer Entfernung die Ortsauflösung dafür geopfert wird, die Ereignisse überhaupt wahrnehmen zu können. Sind die Ereignisse nah genug am Sensor, können sie dafür mit höherer Ortsauflösung erfasst werden.

Darüber hinaus wird in dieser Arbeit die Möglichkeit gesehen, den Kompromiss zwischen Reichweite und Ortsauflösung in bestimmten Situationen zu umgehen: Wenn für eine gegebene Aufgabe die höhere Ortsauflösung dazu verwendet werden soll, einen Gradienten zu berechnen, so bietet sich auch die Möglichkeit, gezielt das Zusammenfassen der Elektroden zu verwenden. Zwei Vorteile werden in diesem Vorgang vereint: Die gewünschte Schärfe des Gradienten wird erreicht, und gleichzeitig wird die Reichweite der Messung erhöht. Schließlich kommt in dieser Arbeit noch ein weiterer Aspekt zum Tragen: die simultane Umsetzung einer taktilen Modalität, d. h. die Realisierung einer Multimodalität.

1.3 Gliederung und wissenschaftlicher Beitrag

Die vorliegende Arbeit ist in drei Hauptteile gegliedert:

- Teil I liefert in Kapitel 2 die Grundlagen, welche für das Verständnis der Arbeit notwendig sind, und bespricht in Kapitel 3 den Stand der Forschung.
- Teil II beschäftigt sich mit der anwendungsbezogenen Evaluation eines kapazitiven taktilen Näherungssensors (Kapitel 4-6).
- Teil III stellt eine Weiterentwicklung des verwendeten Sensors vor und schließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse samt Ausblick ab (Kapitel 7-9).

Der wissenschaftliche Beitrag der Arbeit ist in den Teilen II und III zu finden. In Teil II wird eine bereits bestehende Technologie von kapazitiven, taktilen Näherungssensoren (TNS) validiert, indem gezeigt wird, dass mit ihr neue Methoden realisierbar sind. In Teil III wird das Sensorkonzept hinsichtlich mehrerer Kriterien optimiert, insbesondere durch die Realisierung einer flexiblen Ortsauflösung. Die Beiträge können, wie folgt, zusammengefasst werden:

Beiträge Validierung der TNS

- Kapitel 5:
 - Konstruktion eines Zwei-Backen-Greifers mit einer Auflösung von 2×2 Tixel/Proxel.
 - Umsetzung einer gradientenbasierten Methode zum berührungslosen Ausrichten an Objekten in den sechs Raumfreiheitsgraden.

- Implementierung einer neuartigen Methode zur Haptischen Exploration, welche berührungslose und berührungsbasierte Schritte verwendet, um eine Objektform zu erfassen.
- Konzeption eines neuartigen Systems zur Telemanipulation, welches dem Benutzer Kraftwerte rückkoppelt, die auf den Gradienten der TNS basieren. Validierung des Systems in einer Nutzerstudie.
- Kapitel 6:
 - Konstruktion eines End-Effektors mit einer Auflösung von 3×16 Taxel/Proxel.
 - Umsetzung eines innovativen Verfahrens zur Konturverfolgung/Kollisionsvermeidung, welches zweidimensionalen Krümmungsinformationen zur prädiktiven Regelung verwendet.

Beiträge Weiterentwicklung der TNS

- Kapitel 7
 - Entwicklung eines neuen Sensorelements, welches den selbst- und beidseitig-kapazitiven Näherungsmodus, den taktilen Modus sowie die flexible Ortsauflösung ermöglicht.
 - Umsetzung einer Schaltung, durch welche der Betrieb des Sensors in den drei Modi und das flexible Umkonfigurieren möglich werden.
 - Entwicklung eines Prototypen des neuen Sensorkonzepts als Machbarkeitsnachweis für die Konzepte („TNS V2.0“, Auflösung von 2×2 Taxel/Proxel).
- Kapitel 8
 - Entwicklung eines Prototypen des neuen Sensorkonzepts und Integration in einen Zwei-Backen-Greifer („TNS V3.1“, Auflösung von 4×2 Taxel/Proxel).
 - Validierung der vorgestellten Sensorkonzepte, insbesondere der flexiblen Ortsauflösung und der drei Betriebsmodi.
 - Verwendung des Prototypen, um das berührungslose Vorausrichten mithilfe einer neuartigen Gradientenberechnung zu zeigen.

KAPITEL 2

Grundlagen

2.1 Grundlegende Begriffe der Elektrostatik

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen der Elektrotechnik vorgestellt, welche notwendig sind, um die Funktionsweise des vorgestellten Sensors verstehen zu können. Insbesondere sollen die wichtigen Begriffe *elektrisches Feld* und *Kapazität* besprochen werden. Als Quellen für diesen Abschnitt werden die Vorlesung „Electricity and Magnetism“ [49] und das Lehrbuch „Gleichstromnetze, Operationsverstärkerschaltungen, elektrische und magnetische Felder“ [9] verwendet.

2.1.1 Coulombsches Gesetz, elektrisches Feld, elektrisches Potential und gaußsches Gesetz

Ausgangspunkt in der Elektrostatik ist das *coulombsche Gesetz*, welches in dem Fall von zwei *ruhenden* Ladungen q_1 und q_2 , die durch einen Abstand r voneinander getrennt sind, beschreibt, welche Kräfte auftreten. In Abbildung 2.1 ist eine solche Konstellation dargestellt.

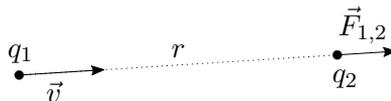


Abbildung 2.1: Die Konstellation, in der das coulombsche Gesetz beschrieben wird; beide Ladungen haben das gleiche Vorzeichen.

Das coulombsche Gesetz besagt, dass die Kraft, welche durch die Anwesenheit von q_1 auf q_2 ausgeübt wird,

$$\vec{F}_{1,2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{r} \text{ [N]}, \text{ mit } \|\vec{r}\| = r, \quad (2.1)$$

beträgt. Die Kraft, welche auf q_1 wirkt, ist $F_{2,1} = -F_{1,2}$, da sich in der Berechnung nur die Richtung von \vec{r} ändert. Die Zahl ϵ_0 stellt die Permittivität des Vakuums dar (s. Abschnitt 2.1.3). Die Ladungen können entweder ein positives oder negatives Vorzeichen haben, welches sich entsprechend der Formel auf die Richtung von $\vec{F}_{1,2}$ auswirkt. Ladungen

mit unterschiedlichen Vorzeichen ziehen sich an, Ladungen mit gleichem Vorzeichen stoßen sich ab. Darüber hinaus gilt das Superpositionsprinzip. Demnach ist in der Anwesenheit einer dritten Ladung q_3 die Kraft, welche auf q_2 wirkt $\vec{F}_{1+3,2} = \vec{F}_{1,2} + \vec{F}_{3,2}$.

Mithilfe des coulombschen Gesetzes lässt sich der Begriff des *Elektrischen Felds* (E-Feld) etablieren. Für eine Ladung Q und eine Probeladung q , welche sich an dem Punkt p befindet, sei \vec{F} die nach dem coulombschen Gesetz wirkende Kraft auf q . So ist das Elektrische Feld am Punkt p

$$\vec{E}_p = \frac{\vec{F}}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \vec{r} \left[\frac{\text{N}}{\text{C}} \right]. \quad (2.2)$$

Das E-Feld ist also die Kraft per Einheitsladung, die durch Q hervorgerufen wird, und hat die Einheit N C^{-1} . Die Richtung des E-Felds verläuft bei einer positiven Ladung Q in Richtung der Kraft für den Fall, dass q positiv ist. Das E-Feld ist ein Vektorfeld. Üblicherweise wird es jedoch nicht anhand von Vektoren, sondern anhand von Feldlinien veranschaulicht, wie in Abbildung 2.2 rechts wiedergegeben. In der Darstellung als Vektorfeld, Abbildung 2.2 links, kann die Feldstärke über die Länge der Pfeile dargestellt werden. Mit steigender Entfernung zu den Punktladungen nimmt das Feld ab, und somit werden die Vektoren kleiner. In der Darstellung mit Feldlinien ist die Information zur Feldstärke nur implizit darüber enthalten, wie dicht die Feldlinien zueinander liegen. Die Kraft, welche auf eine Probeladung wirkt, ist tangential zu den Feldlinien.

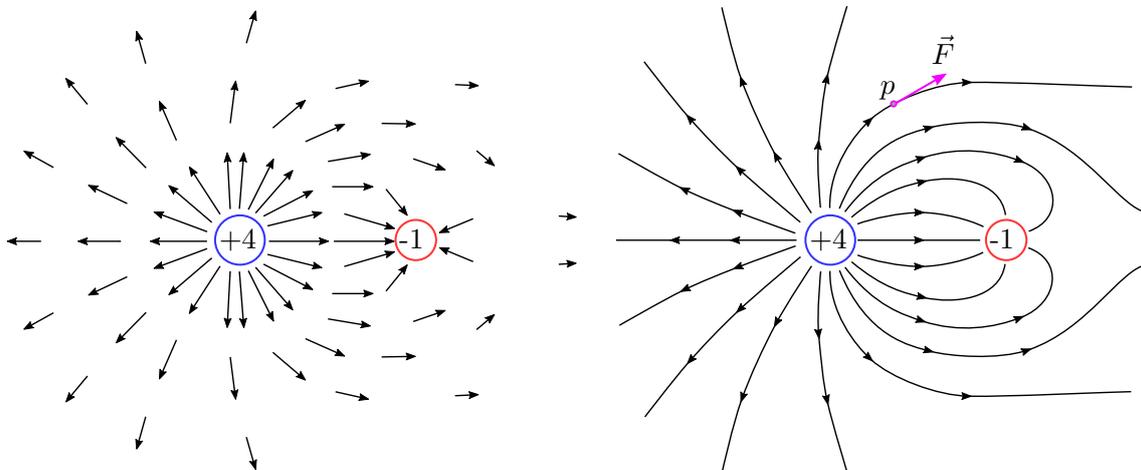


Abbildung 2.2: E-Feld einer positiven (+4) und einer negativen (-1) Ladung werden als Vektorfeld und mithilfe von Feldlinien dargestellt. Eine positive Probeladung an Punkt p erfährt eine Kraft \vec{F} , welche tangential zu den Feldlinien ist.

Gegeben sei, dass eine Ladung q_1 im Raum platziert ist. Wenn eine Ladung q_2 aus dem Unendlichen auf einen Abstand R zu q_1 gebracht wird, muss zur Überwindung der coulombschen Kraft Arbeit verrichtet werden. In Abbildung 2.3 wird diese Konstellation

veranschaulicht. Die Arbeit ist das Integral der Kraft über die zurückgelegte Strecke:

$$W = \int_R^\infty \vec{F} d\vec{r} = \int_R^\infty \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} d\vec{r} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 R} [\text{J}]. \quad (2.3)$$

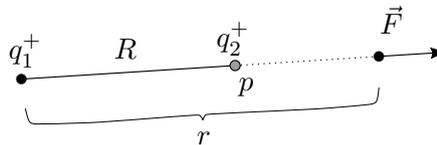


Abbildung 2.3: U ist die Arbeit, die verrichtet werden muss, um q_2 an den Punkt p bringen, welcher einen Abstand R zu Ladung q_1 besitzt.

Die Integration nach $d\vec{r}$ bedeutet, dass über den radialen Abstand zu q_1 , also entlang einer Geraden, integriert wird. Da die elektrische Kraft eine konservative Kraft ist, kann auch über einen beliebigen Weg S nach p integriert werden, der sich aus den Stücken $d\vec{s}$ zusammensetzt. Die Arbeit per Einheitsladung wird als *elektrisches Potential* bezeichnet. Für eine Ladung Q und eine Probeladung q wird sie, wie folgt, abgeleitet:

$$\phi = \frac{W}{q} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R} \left[\frac{\text{J}}{\text{C}} \right] \text{ bzwz. } [\text{V}]. \quad (2.4)$$

Alternativ kann ϕ auch als Integral über das E-Feld nach der Strecke beschrieben werden, denn

$$\phi = \int_R^\infty \frac{\vec{F}}{q} d\vec{r} = \int_R^\infty \vec{E} d\vec{r}. \quad (2.5)$$

Gegeben seien die elektrischen Potentiale ϕ_A und ϕ_B an zwei Punkten A und B . Dann ist die Differenz der elektrischen Potentiale die *Spannung*

$$U_{BA} = \phi_A - \phi_B = \int_A^\infty \vec{E} d\vec{r} - \int_B^\infty \vec{E} d\vec{r} = \int_A^B \vec{E} d\vec{r} [\text{V}]. \quad (2.6)$$

Der Begriff der Spannung ist hilfreich, da das elektrische Potential zwischen zwei Bezugspunkten definiert wird und nicht zwischen einem Punkt und der Unendlichkeit. Das Bezugspotential, welches am häufigsten verwendet wird, ist das der Erde, welches einfach *Erde* oder auch *Masse* genannt wird.

Der *elektrische Fluss* ist ein Maß für die Feldstärke eines Feldes \vec{E} , bezogen auf eine Fläche A , die im Feldraum liegt. Um den gesamten Fluss durch A zu berechnen, muss die Feldstärke über die infinitesimalen Flächenelemente $d\vec{A}$ integriert werden. Durch $d\vec{A}$ ist auch die Richtung der Flächennormale gegeben und entsprechend wird die Feldstärke nur anteilig über das Skalarprodukt bzw. dem Cosinus der Winkel zwischen \vec{E} und $d\vec{A}$ mit der Fläche aufintegriert. Ist A geschlossen, wie z. B. im Fall einer Kugel, so ist der Fluss

$$\Phi_A = \oiint_A \vec{E} \cdot d\vec{A}. \quad (2.7)$$

Durch den Krümmungswinkel am Integral wird gekennzeichnet, dass es sich um das geschlossene Integral handelt. In Abbildung 2.4 ist die Berechnung des elektrischen Flusses für den Fall dargestellt, dass A eine perfekte Kugel ist, in deren Mittelpunkt sich die Ladung Q^+ befindet. Da das E-Feld immer parallel zu den Oberflächennormalen von A ist, beträgt der Cosinus zwischen den Termen des E-Felds und $d\vec{A}$ immer 1. Somit ist der Fluss, in diesem Fall

$$\Phi_A = 4\pi R^2 \vec{E} = 4\pi R^2 \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2} = \frac{Q}{\epsilon_0}, \quad (2.8)$$

unabhängig vom Radius R (die Fläche der Kugel ist $4\pi R^2$). Es kann gezeigt werden, dass (2.8) auch gilt, wenn A eine beliebige geschlossene Fläche ist. Wegen des Superpositionsprinzips gilt dies nicht nur für eine einfache Ladung Q , sondern für die Summe aller Ladungen innerhalb von A , sodass (2.7) und (2.8) das *gaußsche Gesetz* darstellen.

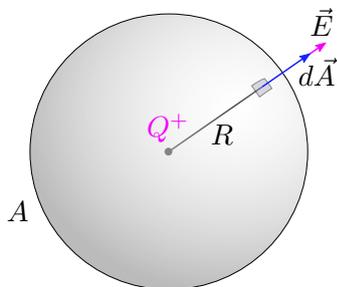


Abbildung 2.4: Der elektrische Fluss durch ein Flächenelement $d\vec{A}$

Das *gaußsche Gesetz* kann als Hilfsmittel verwendet werden, um die mathematische Form eines E-Felds zu bestimmen. Wenn man für eine geschlossene Fläche A das Integral (2.7) lösen kann, so kann durch die Gleichsetzung des Integrals mit $\frac{Q}{\epsilon_0}$ nach dem Feld \vec{E} aufgelöst werden. Beispielsweise kann mit einer geeigneten *gaußschen Fläche* A_g für eine weit ausgedehnte Platte mit Ladung Q gezeigt werden, dass das E-Feld auf beiden Seiten der Ebene $\frac{\sigma}{2\epsilon_0}$ ist. $\sigma = \frac{Q}{A}$ wird als die *Ladungsdichte* bezeichnet. Hier stellt A zwecks Konvention nicht mehr eine *gaußsche Fläche* dar, sondern die Fläche der Platte. Insbesondere ist das E-Feld in diesem Fall unabhängig vom Abstand zur Platte. Dieses Ergebnis kann verwendet werden, um das E-Feld zwischen zwei parallelen Platten mit den jeweiligen Ladungsdichten σ und $-\sigma$ zu berechnen. Dieses beträgt $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$ zwischen den Platten und ist außerhalb $E = 0$, wie in Abbildung 2.5 dargestellt.

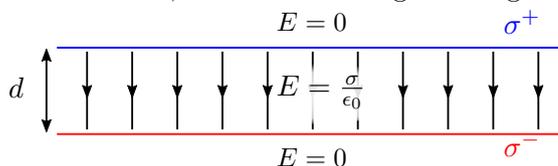


Abbildung 2.5: Das elektrische Feld zwischen zwei geladenen Platten und außerhalb dieser Platten

2.1.2 Kapazität

Ein *Kondensator* ist eine Anordnung von zwei Leitern, welche die Eigenschaft hat, Ladung speichern zu können. Die Kapazität eines Kondensators ist definiert als der Quotient der Ladung durch die Spannung zwischen den Leitern:

$$C = \frac{Q}{U} \left[\frac{\text{C}}{\text{V}} \right] \text{ bzw. } [\text{F}]. \quad (2.9)$$

Die Kapazität hängt nicht von der vorhandenen Ladung oder Spannung ab, sondern nur von der Geometrie der Leiter und deren Abstand voneinander. Die Kapazität kann als ein Maß für die Spannung angesehen werden, die notwendig ist, um eine bestimmte Ladung im Kondensator zu speichern. Für den Fall von zwei parallelen Elektrodenflächen in Abbildung 2.5 lässt sich die Kapazität wie folgt bestimmen:

$$C = \frac{A\sigma}{Ed} = \frac{A\sigma\epsilon_0}{\sigma d} = \frac{A\epsilon_0}{d} \quad (2.10)$$

Für weitere Konstellationen ist es ebenfalls möglich, die Kapazität in geschlossener Form anzugeben. Ein Beispiel ist der Kugelkondensator, welcher in Abbildung 2.6 gezeigt wird.

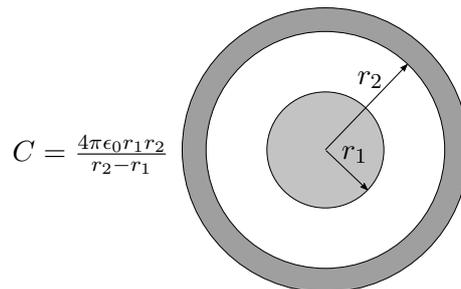


Abbildung 2.6: Für den Kugelkondensator und weitere Konstellationen ist es ebenso möglich, die Kapazität in geschlossener Form anzugeben. Weitere Beispiele sind in [9] zu finden.

2.1.3 Dielektrika

Ein Nicht-Leiter, auch *Dielektrikum* genannt, erfährt durch den Einfluss eines externen elektrischen Feldes eine *Polarisation*. Bisher wurde in Bezug auf die Kapazität nur von einem einzigen Dielektrikum ausgegangen, dem Vakuum. Durch das E-Feld werden in den Atomen (oder Molekülen) des Dielektrikums Dipole induziert, d. h., durch die elektrische Kraft ist der Schwerpunkt der Elektronenhülle bezüglich des Atomkerns verschoben. Gibt es im Material permanente Dipole, werden diese durch das Feld umorientiert. Dielektrika beeinflussen die Kapazität, und somit werden sie als Teil der Kondensatorkonfiguration betrachtet. In Abbildung 2.7 ist ein zu Abbildung 2.5 ähnlicher Fall des parallelen Plattenkondensators gegeben, mit dem Unterschied, dass ein vom Vakuum verschiedenes Dielektrikum zwischen den Platten liegt. Durch die Ellipsen mit Plus- und Minuszeichen ist die Polarisation des Dielektrikums schematisch dargestellt.

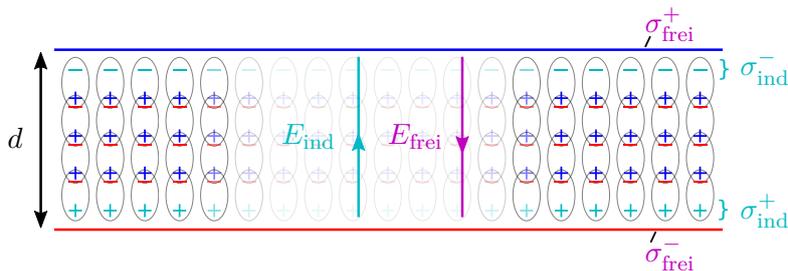


Abbildung 2.7: Die Polarisation schwächt durch die induzierte Ladungsdichte σ_{ind} das E-Feld in einem Plattenkondensator, wodurch die Kapazität des Kondensators steigt.

Wie im Beispiel aus Abbildung 2.5 ist die Ladungsdichte der Platten σ_{frei} . Der Bezeichner „frei“ soll dabei klarstellen, dass dies die Ladung im Leiter ist, also frei beweglich. Durch das E-Feld mit der Stärke $E_{\text{frei}} = \frac{\sigma_{\text{frei}}}{\varepsilon_0}$ wird mit der Polarisation eine Ladungsdichte σ_{ind} induziert, welche in Cyan hervorgehoben ist. Diese Ladung ist für ein E-Feld verantwortlich, welches E_{frei} entgegengesetzt ist und die Form $E_{\text{ind}} = \frac{\sigma_{\text{ind}}}{\varepsilon_0}$ hat. Das gesamte E-Feld ergibt sich zu $E_{\text{ges}} = E_{\text{frei}} - E_{\text{ind}}$. Dadurch, dass $E_{\text{ges}} < E_{\text{frei}}$ gilt, ist wegen $U = E_{\text{ges}} \cdot d$ (vgl. (2.5) und (2.6)) auch die Spannung geringer. Schließlich gilt, dass die Kapazität wegen $C = \frac{Q}{U}$ steigt, da die Ladungsmenge $Q = A\sigma_{\text{frei}}$ gleich bleibt.

Der Wert σ_{ind} lässt sich als proportionalen Anteil von σ_{frei} ausdrücken: $\sigma_{\text{ind}} = b \cdot \sigma_{\text{frei}}$, wobei b z. B. den Wert 0.15 besitzt. Es ergibt sich, dass $E_{\text{ind}} = b \cdot E_{\text{frei}}$, wodurch $E_{\text{ges}} = E_{\text{frei}}(1 - b)$ wird. Wird $\varepsilon_r = \frac{1}{1-b}$ gesetzt, lässt sich dieser Ausdruck umschreiben als

$$E_{\text{ges}} = \frac{E_{\text{frei}}}{\varepsilon_r}. \quad (2.11)$$

Der Wert ε_r wird *relative Permittivität* genannt und ist ein Maß für die „Durchlässigkeit“ des Mediums bzw. des Materials für das elektrische Feld, wie hier beschrieben. Eine gegebene Permittivität wird durch ε_r zur Permittivität des Vakuums ε_0 in Relation gesetzt. Ein Wert von beispielsweise $\varepsilon_r = 3$ bedeutet also, dass das Material dreimal so durchlässig für das E-Feld ist, wie das Vakuum. Um die Kapazität des Plattenkondensators für ein anderes Dielektrikum als das Vakuum zu beschreiben, muss (2.10) angepasst werden:

$$C = \frac{\varepsilon_r \sigma}{Ed} = \frac{A\varepsilon_r \varepsilon_0}{d}. \quad (2.12)$$

In der Tabelle 2.1 sind einige Materialien und ihre relative Permittivität aufgelistet. Die Luft besitzt (fast) dieselbe Permittivität wie das Vakuum. Da die Sensoren, welche in dieser Arbeit vorgestellt werden, in der Luft funktionieren sollen, wird ε_r von zu erfassenden Objekten immer höher sein als ε_r des Mediums (der Luft).

Zuletzt ist interessant, wie sich die Kapazität verhält, wenn sich mehr als ein Dielektrikum innerhalb der Kondensatoranordnung befindet. Hierzu wird nochmal das Beispiel des Plattenkondensators herangezogen. Diesmal befinden sich zwischen den Platten zwei bis drei Materialien mit unterschiedlichen relativen Permittivitäten ε_1 , ε_2 und ε_3 , wie in den Beispielen in Abbildung 2.8 dargestellt. Szenario (1) ist der allgemeine Fall, in dem

Tabelle 2.1: Materialien und ihre relative Permittivität (Auszug aus [9, Tabelle 3.1])

Material	relative Permittivität ϵ_r
Luft, Gase	1
Polyäthylen (Plastik)	2.3
PVC	3.1
Porzellan	5
Glas	10
Wasser	80

Materialien m_1 , m_2 und m_3 vorkommen.¹ In Abhängigkeit von den unterschiedlichen Permittivitäten sind die Spannungen U_1 , U_2 und U_3 gegeben, denn es gilt z. B.

$$U_1 = E_1 d = \frac{Q_1 d}{A \epsilon_1 \epsilon_0}. \quad (2.13)$$

E_1 ist dabei das E-Feld in m_1 (die Faktoren $\frac{A}{2}$ und $\frac{d}{2}$ heben sich in dieser Gleichung gegenseitig auf). Da die Spannung über dem Kondensator gleich sein muss, gilt

$$U_{\text{ges}} = U_1 + U_3 = U_2 + U_3 \Leftrightarrow U_1 = U_2 \Leftrightarrow \frac{Q_1 d}{A \epsilon_1 \epsilon_0} = \frac{Q_2 d}{A \epsilon_2 \epsilon_0}. \quad (2.14)$$

Weil $\epsilon_1 \neq \epsilon_2$ vorausgesetzt wird, muss $Q_1 \neq Q_2$ gelten. In anderen Worten, es tritt der etwas unintuitive Fall auf, dass die Spannung auf den Platten gleich ist, jedoch die Verteilung der Ladung wegen der Verteilung der Dielektrika unterschiedlich ist. Die Gesamtkapazität ergibt sich also zu

$$C = \frac{Q_1 + Q_2}{U_{\text{ges}}}. \quad (2.15)$$

Für diese Argumente wurde die Position der Dielektrika zwischen den Platten nicht verwendet. Somit ist das wichtigste Ergebnis für die vorliegende Arbeit, dass für den Fall $\epsilon_2 = 1$ und $\epsilon_3 = 1$ die Position von m_1 innerhalb des Plattenkondensators die Kapazität nicht beeinflusst. Dies entspricht dem Fall, dass sich im Kondensator nur das Medium und ein Objekt, das Dielektrikum, befindet.

Es kann abgeleitet werden, dass das Szenario (2) mit zwei gestapelten Schichten als zwei in Serie geschaltete Kondensatoren betrachtet werden kann. Szenario (3) mit parallel angeordneten Materialschichten kann als parallel geschalteter Kondensator betrachtet werden. Szenario (3) ist auch hilfreich, um zu verstehen, dass die Kapazitätsänderung eines Kondensators bei Eintritt eines Dielektrikums vom Volumen des Materials abhängt. Angenommen, es sei $\epsilon_2 = 1$. Je mehr Volumen durch ein Material mit der relativen Permittivität $\epsilon_1 > 1$ eingenommen wird, desto höher die Gesamtkapazität.

¹ Für die Betrachtungen in Szenario (1) wurde folgende Quelle verwendet: <http://tinyurl.com/ycy6e9h4>, Zugriff Mai 2016

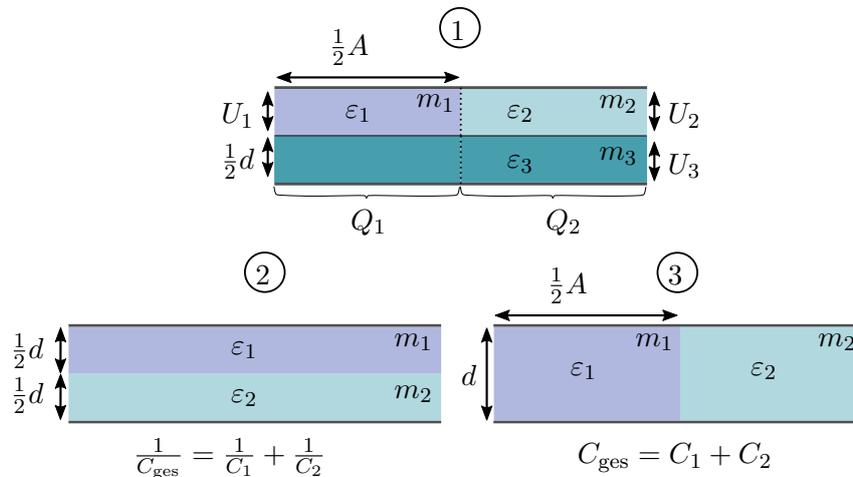


Abbildung 2.8: Szenarien, in denen mehr als ein Dielektrikum in einem Plattenkondensator vorkommt; in Szenario (1) wird veranschaulicht, dass die Position des Dielektrikums mit relativer Permittivität ε_1 innerhalb der Platten variiert werden kann, ohne die Gesamtkapazität zu beeinflussen. Die Szenarien (2) und (3) geben an, dass sich, je nach Anordnung, zwei in Serie oder parallel geschaltete Kondensatoren ergeben.

2.2 Messung von Kapazitäten

In Abschnitt 2.1 wurde besprochen, dass die Kapazität zwischen zwei elektrischen Leitern von deren Geometrie, Abstand und der Permittivität des umgebenden Mediums abhängt. In dieser Arbeit wird ein taktiler Näherungssensor verwendet und weiterentwickelt, der ein kapazitives Messprinzip verwendet. Gemeint ist damit, dass eine Änderung in der Kapazität (ΔC) erfasst werden soll, welche eine Änderung des Abstands zwischen Objekt und Sensor als Ursache hat. Mithilfe einer Strommessung kann der Wert der änderbaren Kapazität bestimmt werden.

2.2.1 Messung von Kapazitäten mit einer Tiefpass-Filter-Schaltung

Eine Schaltung, welche die Messung von Kapazitäten ermöglicht, ist die sogenannte *RC-Tiefpass-Schaltung*, welche in Abbildung 2.9 dargestellt wird. Sie besteht aus einem Widerstand R und einem Kondensator C in Reihe geschaltet. Klassischerweise wird diese Art von Schaltung dazu verwendet, wie der Name verrät, ein Signal am Eingang mit Tiefpasswirkung zu filtern. Auf diese Wirkung wird hier jedoch nicht abgezielt. Die Schaltung wird zur Bestimmung der Kapazität verwendet, indem ein Signal bekannter Frequenz, Amplitude und Phase am Eingang des Tiefpasses angelegt wird. Das Signal am Messwiderstand besitzt dieselbe Frequenz, aber seine Amplitude und Phase ist bei einem festen Widerstand R nur von der Kapazität C abhängig. Der Zusammenhang der Amplitude und der Kapazität wird durch die Gleichungen (2.16) und (2.17) beschrieben:

$$i_R = i_C = \frac{U_{\text{aus}}}{R} = U_{\text{ein}} \frac{1}{R + Z_C} = U_{\text{ein}} \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C}}. \quad (2.16)$$

Der Strom \underline{i}_R bzw. die Spannung $\underline{U}_{\text{aus}}$ ist eine komplexe Größe. Da jedoch die Amplitude des Signals von Interesse ist, wird noch der Betrag genommen:

$$\hat{i}_R = \hat{i}_C = \frac{\hat{U}_{\text{aus}}}{R} = \hat{U}_{\text{ein}} \left| \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C}} \right|. \quad (2.17)$$

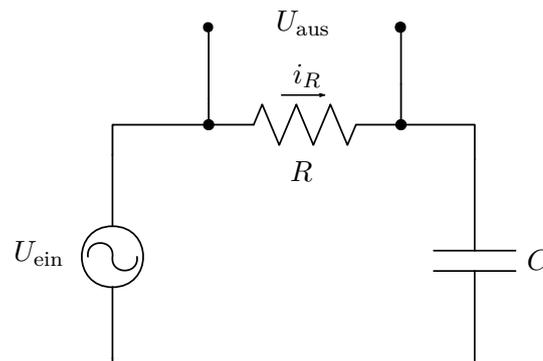


Abbildung 2.9: Über eine RC-Tiefpass-Schaltung kann die Kapazität eines Kondensators bestimmt werden.

Die Frequenz der Erregerspannung ist $\omega = 2\pi f$. Bei der Wahl der Erregerfrequenz muss die Tiefpasswirkung beachtet werden, welche von R und C abhängt. Die sogenannte Grenzfrequenz, ab der die Tiefpasswirkung eintritt, ist:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (2.18)$$

Typischerweise wird als Erregerfrequenz ein Wert unter $f_{\text{exc}} = 300 \text{ kHz}$ gewählt. Es treten Kapazitäten bis etwa 30 pF auf, und für den Messwiderstand kann bspw. ein Wert von $R = 600 \Omega$ gewählt werden. Es ergibt sich, dass $f_c = 8,84 \text{ MHz}$. Somit liegt f_{exc} deutlich unter der Grenzfrequenz des Tiefpasses, sodass keine Dämpfung zu erwarten ist. Die hier vorgestellte Methode bietet gegenüber anderen Methoden den Vorteil, dass nur die Amplitude und die Phase einer Wechselspannung mit bestimmter Frequenz ermittelt werden müssen und dementsprechend die Messelektronik optimiert werden kann.

2.2.2 Kapazitive Messanordnungen zur Erfassung von Objekten

Eine kapazitive Kopplung entsteht, wie beschrieben, zwischen zwei geladenen elektrischen Leitern, welche durch ein isolierendes Material, ein Dielektrikum, getrennt werden. Um ein Sensorsystem zu realisieren, sind zwei kapazitive Anordnungen verbreitet, welche im Folgenden erläutert werden.

Beidseitig-kapazitive Messanordnung

In einer beidseitig-kapazitiven Anordnung sind beide Elektroden eines Kondensators Teil des Sensors. Solche Systeme sind geeignet, fast jede Art von Material zu detektieren. Die einzige Einschränkung ist, dass isolierende Materialien eine relative Permittivität besitzen

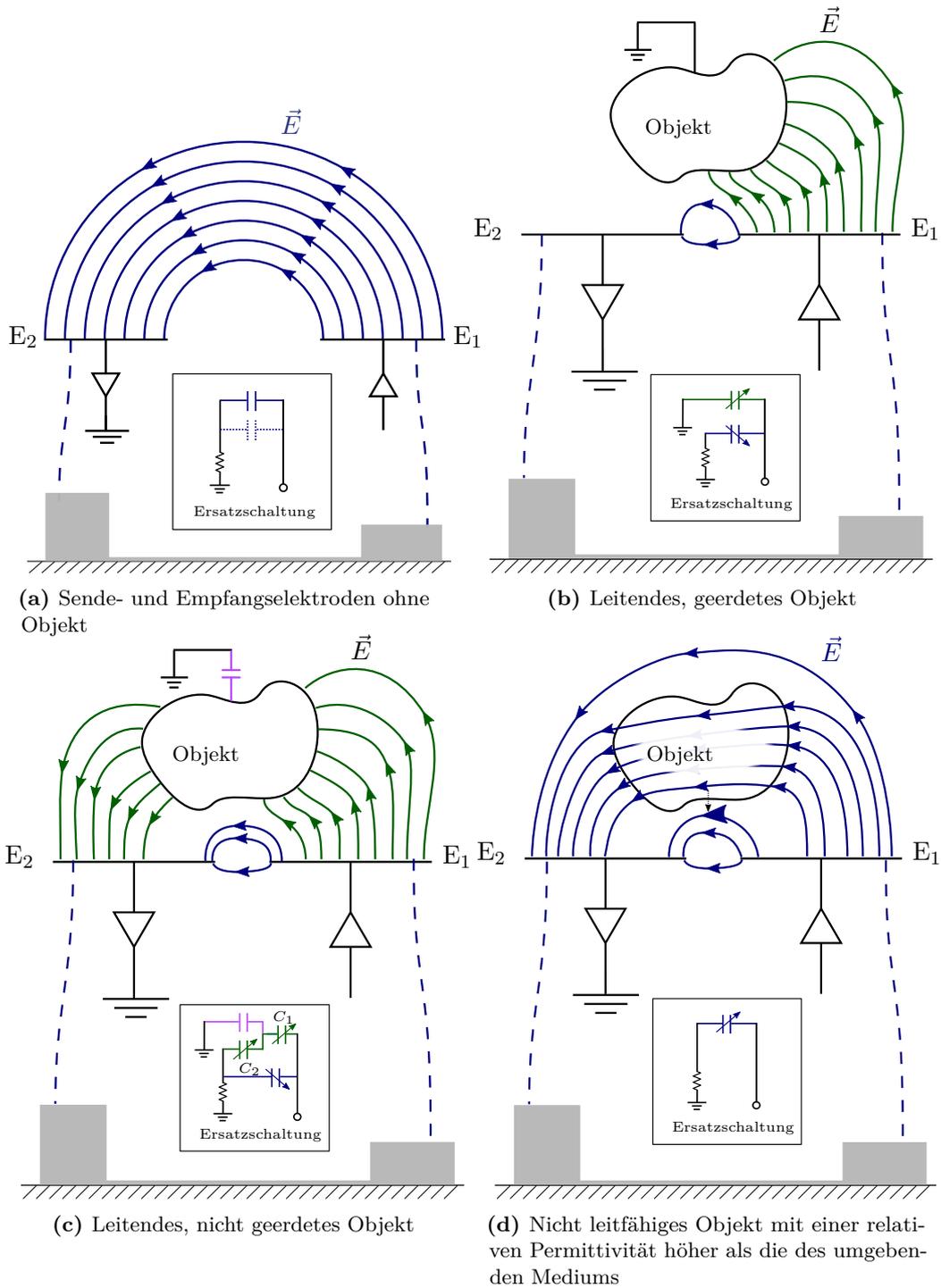


Abbildung 2.10: Ein beidseitig-kapazitives System mit unterschiedlichen Arten von Objekten

müssen, die bedeutend höher oder niedriger ist als die des umgebenden Mediums. Es spielt für Nicht-Leiter auch eine Rolle, welches Volumen sie einnehmen bzw. wie dicht sie sind. Die beidseitig-kapazitive Anordnung wird durch Abbildung 2.10 dargestellt. E_1 wird *Sende-Elektrode* und E_2 *Empfangs-Elektrode* genannt. In Abbildung 2.10(a) wird speziell der Fall betrachtet, in dem sich kein Objekt in der Nähe des Sensors befindet. Eine Kopplung findet hauptsächlich zwischen den beiden Elektroden statt. Eine weitere, im Allgemeinen vernachlässigbare Kopplung, findet mit der Umgebung statt, was durch gestrichelte Linien in der Feldkonfiguration und in der Ersatzschaltung angezeigt wird. Um Objekte zu detektieren, wird E_1 mit einer Wechselspannung beaufschlagt. Ein Strom fließt durch die Anordnung, welcher an E_2 gemessen wird. Dieser wird auch als *Empfangs-Strom* bezeichnet. Im Prinzip kann zusätzlich ein *Sende-Strom* gemessen werden, was aber für diese Anordnung nicht typisch ist. Je nachdem, welche Eigenschaften das Objekt besitzt, können folgende drei Fälle auftreten:

1. Ein geerdeter Leiter stellt eine alternative Senke für den Wechselstrom aus E_1 dar, wie in Abbildung 2.10(b) durch die grüne Kopplung dargestellt. Es ergibt sich, dass der Empfangs-Strom an E_2 , welcher durch die Kopplung in Blau gegeben ist, umso weiter sinkt, je mehr sich das Objekt den Elektroden nähert.
2. Ein nicht geerdeter Leiter teilt die Feldkonfiguration in zwei Bereiche auf, die zwei parallel geschaltete Kondensatoren ausmachen, was durch die Farben Blau und Grün in Abbildung 2.10(c) angezeigt wird. Zusätzlich besitzt der nicht geerdete Leiter im Allgemeinen eine gewisse kapazitive Kopplung an Masse, was durch den Kondensator in Lila angezeigt wird. Zusammen ergibt sich die Kondensatorkonfiguration, wie sie in der Ersatzschaltung dargestellt wird. Wenn das Objekt sich den Elektroden nähert, dann steigt die Kapazität der einzelnen Kopplungen in Grün, während die Kopplung in Blau sinkt. Hier wird angenommen, dass der Wert des Kondensators in Lila sich nicht ändert. Während der Annäherung des Objekts kann es vorkommen, dass der empfangene Strom bzw. die Gesamtkapazität zunächst abfällt und dann wieder steigt. Wenn das Objekt gerade beginnt, die Feldkonfiguration zu beeinflussen, geht die Kopplung in Blau etwas zurück. Die Kopplung in Grün ist geringer als die Summe beider Kondensatoren in Grün, da diese in Serie geschaltet sind ($\frac{1}{C_{\text{grün}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$). Es ergibt sich dadurch eine geringere Gesamtkapazität. Ist das Objekt wiederum nah am Sensor, sind die einzelnen Werte von C_1 und C_2 so hoch, dass der Verlust durch die Kopplung in Blau aufgehoben wird. Im Einzelnen hängt das Verhalten auch stark von der statischen Kopplung (Lila) ab. Der hier besprochene Fall ist der, welcher die Interaktion eines Menschen mit dem Sensor darstellt. Dieser ist wegen des ionenhaltigen Wasseranteils ein nicht geerdeter Leiter mit einer gewissen Kopplung an Masse (durch die Schuhe zum Boden, etc.). Im Rahmen der Entwicklung eines kapazitiven Systems zur Erkennung des Belegungszustands eines Autositzes wurden in [20] ähnliche Überlegungen angestellt.
3. Ein Objekt aus isolierendem Material wird die Feldkonfiguration zwischen E_1 und E_2 entsprechend seiner Größe/seines Volumen/seiner Dichte und elektrischen Permittivität beeinflussen, wie durch Abbildung 2.10(d) veranschaulicht. Sollte letztere höher

sein als die des umgebenden Mediums (Luft), dann steigt die Kapazität der Anordnung bei Annäherung des Objekts, da das Objekt mehr Volumen in der Kondensatorfiguration einnimmt. Mit anderen Worten: Das Dielektrikum der Kondensatorconfiguration, also zunächst Luft, wird zunehmend durch eines mit höherer Permittivität ausgetauscht. Falls die Permittivität des Objekts der des Mediums entspricht, bleibt das Objekt für den Sensor undetektierbar. Der Fall, dass die Permittivität des Materials niedriger ist, kommt in dieser Arbeit nicht vor, da die Permittivität von Luft nahe der geringstmöglichen Permittivität, die des Vakuums, liegt.

Selbst-kapazitive Messanordnung

In einer selbst-kapazitiven Anordnung wird nur eine Sendelektrode E_1 im Sensor verwendet. Im Allgemeinen können solche Systeme nur leitende Materialien zuverlässig detektieren. Die selbst-kapazitive Anordnung wird durch Abbildung 2.11 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Gesamtheit der (geerdeten) Leiter in der Umgebung die zweite Elektrode des (Sensor-)Kondensators darstellt. Somit ist eine solche Messung viel stärker von den Bedingungen der Umgebung abhängig als ein beidseitig-kapazitives System, wie durch Abbildung 2.11(a) veranschaulicht. In der Praxis werden auf den Platinen von Sensoren und Robotern große Flächen mit Massepotential beaufschlagt, sodass – unter Vorbehalt – von ungefähr gleichbleibenden Bedingungen die Rede sein kann. Um Objekte zu detektieren, wird E_1 mit einer Wechselspannung beaufschlagt. Ist eine kapazitive Kopplung mit der Umgebung/einem Objekt vorhanden, fließt ein Strom durch die Anordnung, welcher an E_1 gemessen wird. Dieser wird auch *Sende-Strom* genannt. Die Grundkopplung macht sich als *Offset* im Mess-Signal bemerkbar. Je nachdem, welche Eigenschaften das Objekt besitzt, können folgende drei Fälle auftreten:

1. Ein geerdeter Leiter stellt eine weitere Elektrode des Kondensators dar, wie in Abbildung 2.11(b) gezeigt. Eine Annäherung des Objekts bewirkt eine Zunahme der Kapazität und damit des Sende-Stroms.
2. Ein nicht geerdeter Leiter teilt die Feldkonfiguration “Sensor-Umwelt” in zwei Bereiche auf, die zwei parallel geschaltete Kondensatoren ausmachen, was durch die Farben Blau und Grün in Abbildung 2.11(c) angezeigt wird. Die Situation ist analog zum oben beschriebenen Fall für beidseitig-kapazitive Systeme. Allerdings hängt hier die Messung stärker von den Bedingungen der Umwelt ab. In der Regel geht die Annäherung eines Objekts mit einem Anstieg in der Kapazität einher. Die Konfiguration in Abbildung 2.10(c) zeigt beispielhaft eine Umgebung mit Massepotential.
3. Falls das Objekt ein Isolator ist, nimmt er die Rolle des Dielektrikums in der Kondensator-Anordnung ein. Je mehr Volumen durch das Dielektrikum eingenommen wird, desto höher wird der gemessene Sende-Strom. Ähnlich zum Fall von nicht-geerdeten Leitern hängt die Messung davon ab, welche statischen Kopplungen mit der Umwelt vorhanden sind, die die Messung ggf. begünstigen.

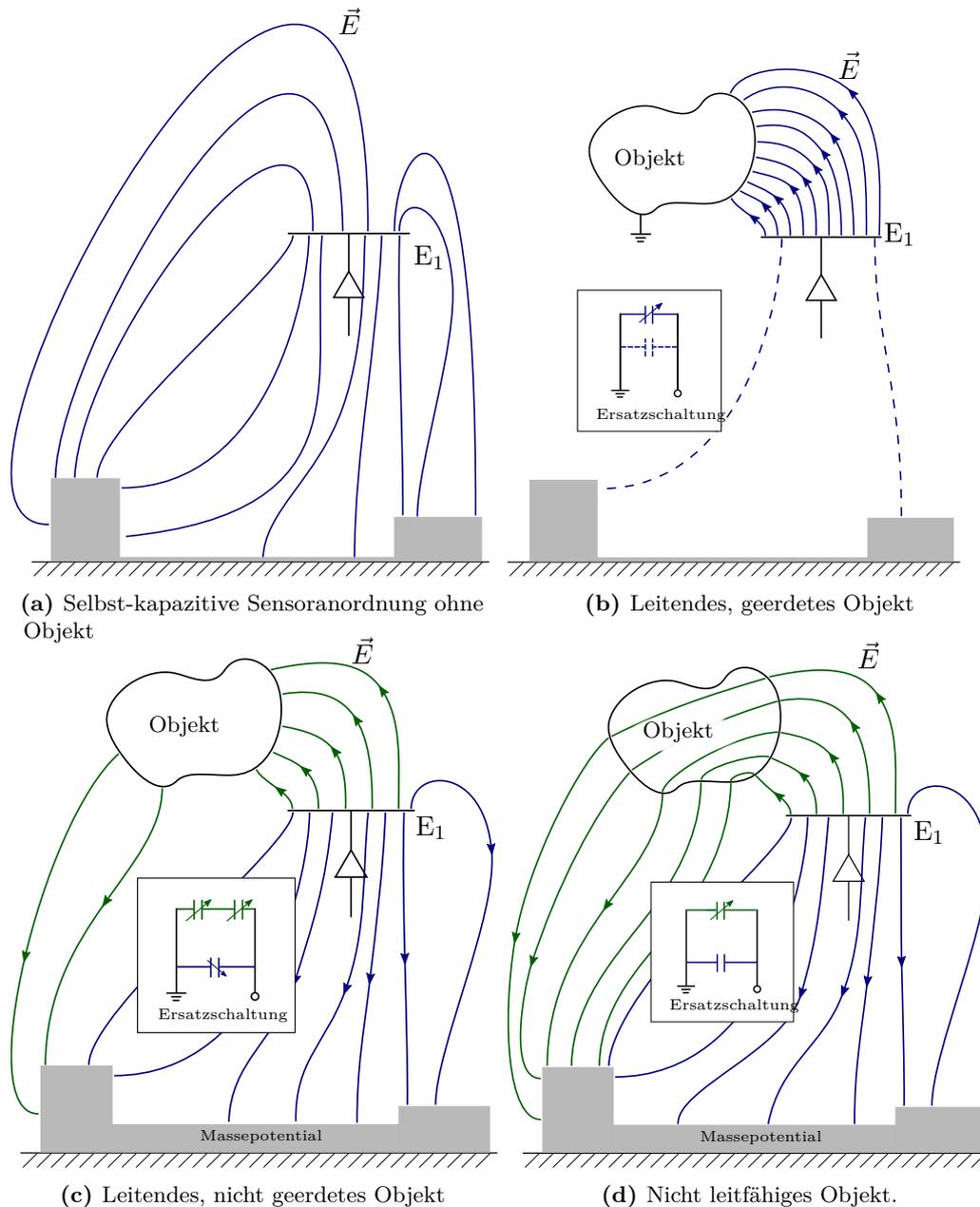


Abbildung 2.11: Ein selbst-kapazitives System mit unterschiedlichen Arten von Objekten

2.3 Aktive Abschirmung

Die Wirkung der kapazitiven Kopplung kann gezielt eingesetzt werden, um elektrische Komponenten gegen ungewünschte externe Einflüsse abzuschirmen. Eine gängige Praxis ist es, Komponenten *passiv* abzuschirmen, indem sie durch einen Mantel, bestehend aus einem leitenden Material, umhüllt werden. Hier entsteht die Schirmwirkung, da im In-

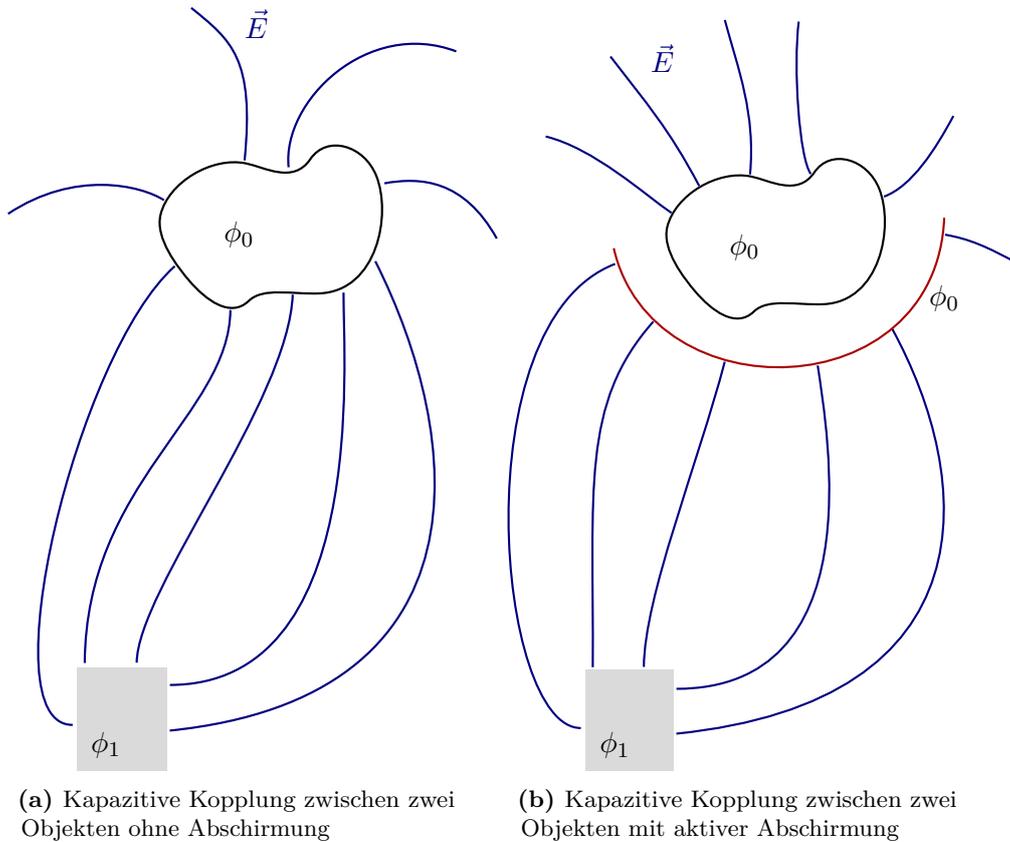


Abbildung 2.12: Auswirkung des Schirmeffekts bei zwei Objekten mit unterschiedlichen elektrischen Potentialen

neren eines Leiters und in Hohlräumen in Leitern das elektrische Feld $E = 0$ ist. Eine weitere weitverbreitete Methode ist, die Komponenten *aktiv* abzuschirmen. Dazu wird eine Schirmelektrode mit dem gleichen Potential beaufschlagt wie die abzuschirmende Komponente. Auch hier ist das Feld zwischen Schirm und Komponente 0. Die Komponente ist (absichtlich) nicht in den Bereichen ohne Schirm entkoppelt. Dieser Fall ist in dieser Arbeit erwünscht, damit die Kopplung gezielt als Effekt für die Näherungsmessung verwendet werden kann. Die Messelektrode und der Schirm besitzen so das gleiche Potential, sind aber nicht miteinander kurzgeschlossen. Die Umsetzung erfolgt in der Regel über einen Spannungsfolger. Der Spannungsfolger kann als ein Verstärker mit Verstärkungsfaktor 1 angesehen werden. Der Schirmeffekt wird durch Abbildung 2.12 veranschaulicht, wo die Komponente in Schwarz durch den Schirm in Rot vom Potential ϕ_1 entkoppelt wird.

KAPITEL 3

Stand der Forschung

In diesem Kapitel wird der Stand der Forschung zum Thema der kapazitiven taktilen Näherungssensoren und ihren Einsatzbereichen dargelegt. Im ersten Abschnitt wird ein Überblick der Vorarbeiten am Entstehungsort der vorliegenden Arbeit gegeben. Er ordnet die aktuelle Arbeit in eine Gesamtentwicklung ein und gibt dadurch bereits einen Eindruck, welche Forschungsziele sich für die Zukunft ergeben. Im darauf folgenden Abschnitt wird eine Begriffsklärung bezüglich der Näherungssensorik erläutert. Im Abschnitt danach werden die Methoden besprochen, welche aufgrund dieser Art von Technologie bisher gezeigt wurden. Anschließend wird auf die existierenden Sensortechnologien eingegangen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Sensoren mit einem kapazitiven Messprinzip. Schließlich wird der Stand der Forschung bewertet.

3.1 Vorarbeiten am KIT

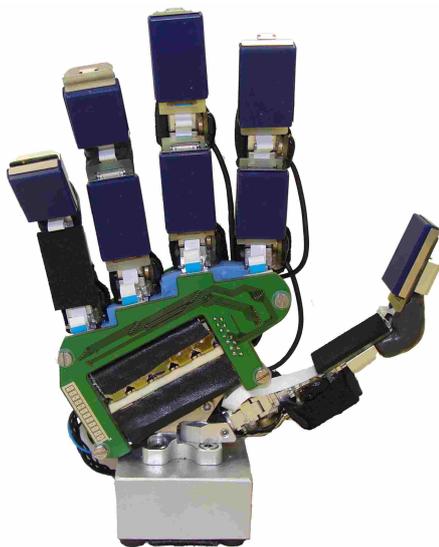
Die vorliegende Arbeit gliedert sich in eine Reihe von Arbeiten am KIT (dem Entstehungsort dieser Arbeit) ein, welche die Forschung an künstlichen Häuten für Roboter zum Thema haben. Bereits 2003 wurde von Kerpa et al. ein ortsauflösender, resistiver taktiler Sensor vorgestellt [44]. In der Arbeit wurde die vollständige Auskleidung von Segmenten eines Roboterarms gezeigt. In der Arbeit von Weiss und Wörn [75] wurde näher auf das zugrundeliegende Messprinzip des in [44] vorgestellten Sensors eingegangen und eine erste Modellbildung für den Sensor als Kraftzelle vorgestellt. Eine vertiefende Modellbildung, welche die Viskoelastizität des verwendeten Schaumstoffs berücksichtigt, wurde von Göger und Wörn in [21] vorgeschlagen. In [21] wurde auch eine flexibel integrierbare Variante des Sensors besprochen.

Der resistive taktile Sensor konnte auch in einen Zwei-Backen-Greifer integriert werden. In [65] wurde mit einer humanoiden Roboterplattform gezeigt, dass zusammen mit einem Kraft-Momenten-Sensor das Öffnen von Schranktüren ermöglicht wird. Ein Ansatz zur Haptischen Exploration wurde von Gorges et al. in [30] besprochen. Hier wurde ein planarer Sensor verwendet, um ein Objekt systematisch abzutasten und Merkmale wie Kanten und Ecken zu extrahieren. In Abschnitt 5.3 wurde ein Ansatz vorgestellt, der als Erweiterung

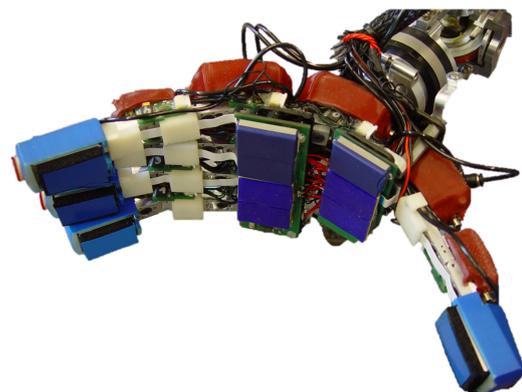
dieser Methoden angesehen werden kann. Eine Haptische Exploration, welche auf einer Aufmerksamkeitskarte basiert, wurde von Gorges et al. in [29] vorgestellt.

Ein Schritt in Richtung einer Hochintegration wurde von Göger et al. in [25] vollzogen. Die Ausstattung einer anthropomorphen Fünf-Finger-Hand mit den resistiven Sensoren inklusive einer Integration der Auswerteelektronik wurde vorgestellt. Abbildung 3.1(a) zeigt das Ergebnis dieser Integration. Diese ist die Grundlage, auf der der Ansatz von Gorges et al. in [28] aufbaut, um eine haptische Objekterkennung zu zeigen. Objekte werden nicht geometrisch, sondern im haptischen Merkmalsraum repräsentiert. Der Ansatz wurde durch Escalda et al. in [14] für die ARMAR-IIIb-Hand sowie die SDH2 (s. u.) verallgemeinert.

Die Integration des resistiven taktilen Sensors geschah auch in entscheidendem Umfang an der Plattform ARMAR-III [2], [26]. Bierbaum et al. erarbeiten, zunächst in der Simulation, Methoden für die Rekonstruktion, die Exploration und das Greifen von Objekten, welche durch taktile Sensoren in einer anthropomorphen Hand erfasst werden [6]–[8]. Die verwendete Simulation enthält relevante Aspekte, wie Kollisionsberechnungen, die Modellierung von Kinematiken oder Reibung. Aus der Interaktion der simulierten Sensoren mit den Objekten resultieren Kontaktpunkte, welche durch den Explorationsvorgang zu Punktwolken heranwachsen. In [6] zeigen Bierbaum et al., dass geometrische Formen, welche durch Superquadriken modelliert werden, gut anhand von einer unvollständigen Punktwolke mit Normaleninformation, wie sie für einen haptischen Explorationsvorgang typisch sind, rekonstruiert werden können. In [7] wird ein Ansatz zur Haptischen Exploration vorgestellt, der sich die Potentialfeld-Methode zu Nutze macht. Ein unexploriertes Objekt wirkt mit



(a) Eine anthropomorphe Hand, welche eine Vollintegration von taktilen Sensoren aufweist (Bildquelle: [25] ©2009 IEEE)



(b) Die Hand des humanoiden Roboters ARMAR-IIIb (Bildquelle: [14] ©2012 IEEE)

Abbildung 3.1: Anthropomorphe Roboterhände, welche am KIT entwickelt wurden

attraktivem Potential auf die Hand, sodass Berührungen herbeigeführt werden. Bereits explorierte Bereiche wirken abstoßend, sodass die Exploration dann auf die nicht bekannten Bereiche gerichtet wird. Schließlich erarbeitet Bierbaum et al. in [8] einen Ansatz, der aus der durch die Exploration gewonnene Punktwolke Griffe für die Fünf-Finger-Hand von ARMAR-III gewinnt. Dazu werden geeignete gegenüberliegende Flächen am Objekt gefunden, welche ausreichend Platz für die Finger der Hand bieten.

Mit der Hand von ARMAR-IIIb, welche mit den gleichen Sensoren wie [25] ausgestattet ist (s. Abbildung 3.1(b)), wurde in der Arbeit von Schill et al. [62] das Lernen von kontinuierlicher Griffstabilität gezeigt. Dazu wurde eine überwachte Lernmethode verwendet, welche mit den Daten aus den taktilen Sensoren und den Gelenkencodern gespeist wird. Mit der vorgestellten Methode kann im laufenden Greifprozess erkannt werden, ob der Griff stabil ist. Schiebener et al. präsentieren in [61] einen Ansatz zur Segmentierung von unbekanntem Objekten auf einem Tisch. Die Segmentierung beruht darauf, dass zunächst visuelle Merkmale von potentiellen Objekten erkannt werden. Ein Objektkandidat wird dann ein paar Mal durch den Roboter verschoben. Die Merkmale aus der jeweils vorherigen Posen werden wiedererkannt, sodass immer deutlicher wird, welche der Merkmale tatsächlich zum Objekt gehören. Anschließend wird das Objekt reaktiv gegriffen, wobei die Methode aus [62] verwendet wird, um die Stabilität des Griffes zu überwachen.

Die Technologie des resistiven taktilen Sensors etablierte sich weiter und wurde parallel zu den vorgestellten Entwicklungen in kommerziell verfügbare Systeme der Firma *SCHUNK* integriert. Hierdurch wiederum stand die Technologie weiteren Forschungsgruppen zur Verfügung, welche unter anderem Methoden zur Objekterkennung entwickelten, z. B. [12] und [66]. Diese beiden Arbeiten sind allerdings nur zwei Beispiele von vielen, welche die genannte Technologie verwenden.

Anhand des dargelegten Verlaufs ist zu erkennen, wie die Technologie des resistiven taktilen Sensors eine weite Verbreitung erreichen konnte. Entscheidend dafür waren eine robuste Funktionalität und Integrierbarkeit, welche das Ergründen von neuen Anwendungen ermöglichten. Diese Arbeit soll zu einer ähnlichen Entwicklung für kapazitive taktile Näherungssensoren beitragen, eine Entwicklung, welche bereits durch Göger in [22]–[24] angestoßen wurde. Eine Steigerung der Qualität bestehender Ansätze und das Entstehen von neuartigen Methoden sind zu erwarten.

3.2 Begriffsklärung: Näherungssensor

Ein Näherungssensor versetzt einen Roboter in die Lage, Ereignisse zu erfassen, bevor eine Berührung stattfindet. Dabei sollte von einem solchen Sensor erwartet werden, dass die Wahrnehmung ab der Detektion bis zum Eintritt der Berührung *lückenlos* ist. Aufgrund ihrer Beziehung zur eventuellen Berührung, werden solche Sensoren im englischen Sprachraum oft *Pretouch Sensors* genannt. Anders als bei der visuellen oder taktilen Wahrnehmung ist für die Wahrnehmung der Annäherung nicht klar definiert, welche physikalische Größe erfasst werden soll. Eine Annäherung kann bedeuten, dass bspw. die Menge an reflektiertem Licht erfasst wird, oder wie hier, dass eine kapazitive Kopplung zwischen Sensor und Objekt gemessen wird. Dies führt dazu, dass beim Vergleich der Ansätze auch immer

berücksichtigt werden muss, welches Messprinzip verwendet wurde. Ein weiteres Merkmal von Näherungssensoren ist, dass diese typischerweise eine *aktive* Komponente besitzen. Sie senden Energie in irgendeiner Form aus, um anhand der Antwort des physikalischen Systems die Annäherung bestimmen zu können. Ein guter Überblick über die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Messprinzipien für die Näherungsmessung wird durch die Forschung von Prof. Smith gegeben (s. Abschnitt 3.3.1).

3.3 Methoden

In diesem Abschnitt werden Forschungsarbeiten vorgestellt, die den Themenbereichen berührungsloses Vorausrichten, Greifen, Exploration, Telemanipulation und Kollisionsvermeidung/Konturverfolgung mit (taktile) Näherungssensoren zugeordnet werden können. Dem Leser wird es dadurch möglich, die in den Kapiteln 5 und 6 vorgestellten Methoden im Kontext der aktuellen Forschungslandschaft zu sehen. Es wird, falls relevant, kurz auf das verwendete Sensorsystem eingegangen. Ein vertiefender Blick auf die Forschungslandschaft bezüglich der Sensortechnologien wird dafür in 3.4 gegeben.

3.3.1 Vorausrichten, Explorieren und Greifen

Gruppe Prof. Smith

In der Gruppe von Prof. Smith an der University of Washington (u.a.) wird seit etwa 10 Jahren an Näherungssensortechnologien unter dem Stichwort *Pretouch* für Greifersysteme geforscht. In den ersten Jahren kam dabei ein beidseitig-kapazitives Messprinzip zum Einsatz, welches seinen Ursprung in der Dissertation von Prof. Smith hat [68] (s. auch Fig. 1 in [69]). Anwendungen, welche in der Dissertationsschrift gezeigt werden, sind im Schwerpunkt berührungslose Eingabegeräte für die Mensch-Maschine Interaktion. Das Greifen in der Robotik findet also noch keine Beachtung. In jüngeren Jahren wurden dann alternative Messprinzipien für die Näherungsdetektion untersucht.

In [69] werden erste Manipulator- und Greifer-Mechanismen als Machbarkeitsnachweis für die Kollisionsvermeidung und das Greifen gezeigt. Der „Manipulator“ ist ein Drehmodul mit einer Platte, die wie eine Fahne angebracht ist. An den beiden Seiten der Platte sind jeweils eine Sende- und Empfangselektrode angebracht und bei Annäherung einer Hand kann eine Ausweichbewegung durchgeführt werden. Mit dem ersten Greifer-Mechanismus wird eine 2D-Ausrichtung (mit einem P-Regler) gezeigt, indem jeweils ein Elektroden-Paar für die Detektion der Abweichung in einem Freiheitsgrad verwendet wird. Hier wird bereits der Begriff *Servoing* verwendet, der später in der vorliegenden Arbeit aufgegriffen wird (s. Kapitel 5). Dieser wird mit einer Positions- oder Geschwindigkeitsregelung assoziiert. Mit dem zweiten Greifer-Mechanismus mit zwei beweglichen Fingern und einem Sende-Empfänger Elektrodenpaar zwischen den Fingerspitzen wird gezeigt, dass durch bestimmte Bewegungen des Greifers, bezogen auf die Lage des Objekts, Größe und Abstand unterschieden werden können, selbst wenn in der Ausgangsposition des Greifers die Messung für die unterschiedlichen Fälle identisch sind.

Diese Arbeit wird in [77] und [52] weitergeführt. In [77] wird die Integration von einem beidseitig-kapazitiven Sensor in die Fingerspitzen der *Barret-WAM*-Hand und die getrennte

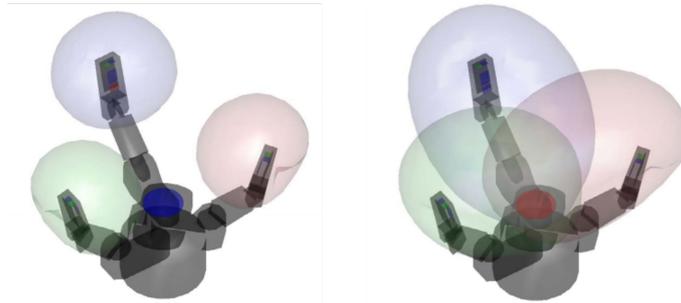


Abbildung 3.2: Darstellung der Iso-Signalfächen für die Modi *mid-range* und *high-range* nach [52]; die Hülle stellt die möglichen Positionen eines Probeobjekts dar, an denen der gleiche Sensorwert gemessen wird. (Bildquelle: [52] ©2010 IEEE)

Integration eines beidseitig-kapazitiven Systems in einem End-Effektor, der eine Handfläche darstellen soll, gezeigt. Die Fingerspitzen können sich jeweils mit einem Sicherheitsabstand an verschiedenen Objekten ausrichten. Mit dem Sensor in der Handfläche ist es möglich, die Handfläche über einem Objekt in translatorischen Achsen X und Y zu zentrieren. Die Arbeit in [52] schafft dann die Vollintegration von Sensoren zum Ausrichten der Finger und der Handfläche in einem Greifer. Mithilfe von Zeitmultiplexen werden beidseitig-kapazitive Systeme innerhalb der Fingerspitzen und zwischen Fingerspitzen und Handfläche realisiert. Situativ wird zwischen den Modi *short-range*, *mid-range* und *high-range* geschaltet (vgl. Abbildung 3.2). Grob gesagt wird mit den Werten der ersten beiden Modi die Ausrichtung der Finger erreicht, mit den Werten der letzten beiden die Pose der Hand beeinflusst (translatorisch X, Y und Z und rotatorisch um die Z -Achse). Darüber hinaus wird die *co-manipulation* besprochen, eine Methode, mit der es möglich ist, anhand des Erdungszustands eines Leiters festzustellen, ob der Mensch es gegriffen hat. Die Auswertung erreicht eine Rate von 20 Hz-30 Hz und ist damit im Vergleich zur Arbeit von Shimojo Labs (s.u.) eher langsam. Weiter wird in [53] noch eine ähnliche, spezialisierte Methode vorgestellt, in der die Kopplung eines Stromsteckers mit einer Steckdose in der Wand bestimmt wird, um die Steckdose zu lokalisieren und dann schließlich den Stecker dort einzuführen. Ein mobiler Roboter kann sich so selbstständig wieder aufladen.

Eine alternative Messmethode, basierend auf dem *Seashell*-Effekt, wird in [42], [43] für das Explorieren und Greifen verwendet. Der Effekt macht sich zu Nutze, dass sich die Resonanzfrequenz einer Kavität (eines Tunnels) bei Annäherung einer Fläche ändert. Dies entspricht dem bekannten Phänomen, was der Mensch wahrnimmt, wenn er eine Muschel an sein Ohr hält, um das “Meeresrauschen” zu hören. Ein Mikrofon in der Kavität nimmt die Umgebungsgeräusche auf, und eine Analyse des Spektrums lässt auf die Resonanzfrequenz schließen. Zusätzlich wird ein externes Mikrofon verwendet, um einen Vergleichswert für das Spektrum der Umgebungsgeräusche ohne Verstärkung (bzw. selektive Dämpfung) zu bilden. Dieser Sensor, der in die Vorderseite der Backe eines PR2-Roboters integriert wurde, weist eine vergleichsweise geringe Reichweite auf. In den Arbeiten wird ein Schwellwert für die Detektion verwendet, der 3-4 mm entspricht. Die Messmethode weist jedoch Unempfindlichkeit gegenüber Beleuchtungsbedingungen und weitgehend gegenüber

Materialeigenschaften aus. Transparente bzw. reflektierende Objekte oder Objekte aus dünnem Material können also prinzipiell ohne Probleme erkannt werden.

In [43] wird besprochen, wie Objekte in einer Szene, welche mit der MS-Kinect erfasst werden, durch eine *Pretouch*-Explorationsstrategie ergänzt werden können, um die Ergebnisse von einer Greifplanung, die auf Basis der Punktwolke Griffe berechnet, zu verbessern. Die Idee dabei ist, dass ein weiter vervollständigtes Objektmodell zu besseren Ergebnissen führt, weil Griffe besser zentriert werden können. In der Exploration wird mit einer einfachen Heuristik der Greifer dazu gebracht, an möglicherweise verdeckte Regionen des Objekts zu fahren, um dort Datenpunkte aufzunehmen. Die Exploration umfasst dabei nur ein regelmäßiges Abtasten. In [42] wird die Strategie erweitert, indem zunächst möglicherweise verdeckte und möglicherweise transparente Regionen des Objekts eingeführt werden, welche probabilistisch modelliert werden. Eine Greifplanung versucht in der gesamten annotierten Punktwolke einen stabilen Griff zu finden. Ist die Unsicherheit an dem Greifpunkt wegen einer möglichen Verdeckung oder Transparenz zu hoch, wird der Greifer dazu gebracht, diese Region kontaktlos zu explorieren. Hierdurch wird die Unsicherheit beseitigt, und eine neue Greifplanung wird iterativ mit der erweiterten Punktwolke durchgeführt, bis ein robuster Greifpunkt gefunden wird. Die Systeme wurden mit teilweise transparenten Objekten erfolgreich getestet. Sowohl in [43] als auch [42] geschieht die Exploration jedoch nicht kontinuierlich (also mittels Proximity Servoing), sondern in diskreten Abtastungsschritten, da der Sensor keine Ortsauflösung besitzt (vgl. Abschnitt 5.3). Die Ergebnisse werden erweitert, indem der Sensor für das Explorieren von transparenten Objekten in der Teleoperation mit Krafrückkopplung verwendet wird [39]. Dabei wird die Objektfläche, die durch den Näherungssensor wahrgenommen wird, als sogenannte *Virtual Fixtures* dargestellt. Virtual Fixtures stellen harte oder weiche Grenzen im Arbeitsraum des Roboters dar. Es konnte gezeigt werden, dass die Krafrückkopplung eine genauere Erfassung der Objektform ermöglicht und dass das Objekt während der Exploration nicht verschoben wird.

Zuletzt wird in [32] für Explorations- und Greifaufgaben ein IR-Näherungssensor vorgestellt. Die Besonderheit liegt dabei darin, dass der Empfänger für das Licht nicht an derselben Fläche wie der Sender angebracht ist, sondern direkt gegenüber in der anderen Backe

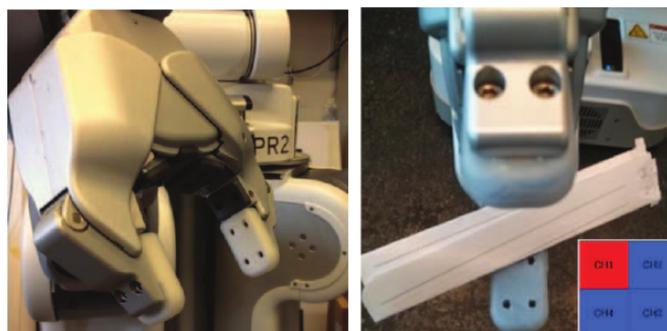


Abbildung 3.3: In [32] wird ein Lichtschrankensensor verwendet, um die Anwesenheit von Objekten zu detektieren. (Bildquelle: [32] ©2015 IEEE)

des Zwei-Backen-Greifers des PR2. Damit kann ein Signal gemessen werden, wenn *kein* Objekt vorhanden ist, d. h., es handelt sich um einen Sensor, der eine Lichtschranke umsetzt. Ähnlich zu dem in Kapitel 5 vorgestellten System, wird eine 2×2 -Anordnung realisiert, wie in Abbildung 3.3 zu sehen. Über diese Anordnung können mit kontaktloser Exploration Kanten und Ecken auch von sehr dünnen Objekten (ein Tuch) oder stark reflektierenden Objekten erkannt werden. Die verwendeten Muster zur Erkennung von Kanten und Ecken (s. Abbildung 3.3) sind analog zu den in Abschnitt 5.3 besprochenen Mustern (s. Abbildung 5.9). Die Einschränkung des vorgestellten Systems ist, dass nur translatorisch in den Richtungen senkrecht zur Strahlenrichtung exploriert werden kann, da der Sensor keine Abstandswerte liefert.

Insgesamt ist die Arbeit aus der Gruppe von Prof. Smith in zwei Aspekten wegweisend:

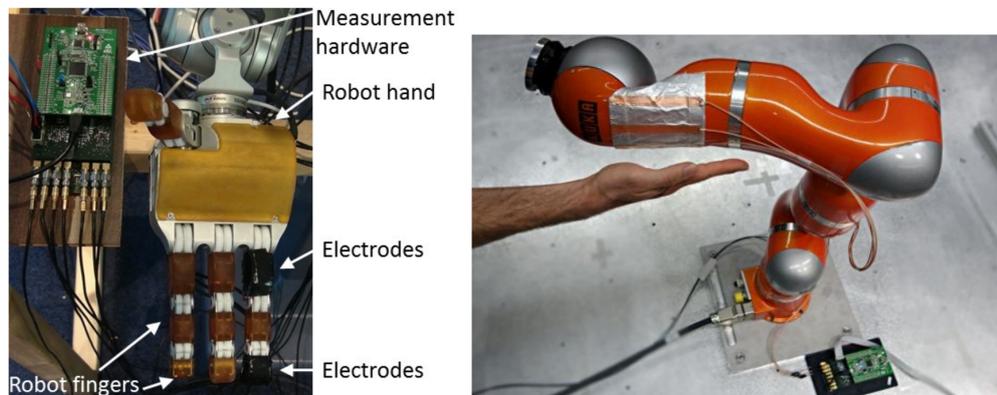
1. Die Machbarkeit einer Näherungsmessung für Robotergreifer mit einem beidseitig-kapazitiven Messprinzip wird nachgewiesen. Es wird gezeigt, dass das Vorausrichten sowohl für die Fingerstellung als auch für die Handwurzel funktioniert.
2. Unterschiedliche Messprinzipien für die Näherungsmessung (kapazitiv, akustisch, Lichtschranken-basiert) werden gezielt untersucht, um bekannte Schwachstellen von Kamerasystemen und traditionellen Näherungssensoren zu umgehen.

Als Nachteil der vorgestellten Ansätze ist an erster Stelle zu nennen, dass keine simultane taktile Messung verwendet wird, sodass z. B. beim Greifen oder in den Szenarien der Exploration diese Modalität nicht eingesetzt werden kann. Insgesamt werden die Ansätze aus Sicht der Regelung aufgrund der Datenraten von etwa 20 Hz-30 Hz mit den unterschiedlichen Systemen noch vergleichsweise langsam durchgeführt. In den Ansätzen beeinflussen die Sensorwerte auch nicht alle möglichen Freiheitsgrade der Pose der Handwurzel (4 oder weniger). Darüber hinaus werden Datenpunkte in der Exploration in [32], [42], [43] jeweils in diskreten Schritten erreicht, was einen hohen Zeitaufwand bedeutet.

Gruppe Prof. Zangl

Die Forschung von Prof. Zangl an der Alpen-Adria Universität Klagenfurt (davor an der TU Graz) umfasst u. a. kapazitive Sensorik für ein weites Feld von Anwendungen. In jüngeren Jahren kamen vermehrt Arbeiten im Bereich der Robotik vor. In [64] wird als Evaluationsplattform für unterschiedliche Ansätze eine Hardware (s. Abb 3.4(a)) vorgestellt, welche es ermöglicht, über sieben Kanäle sowohl selbst- als auch beidseitig-kapazitiv eine Annäherung zu messen. Das Betreiben einer Schirmelektrode ist dabei ebenso möglich. Eine Anpassung der Erregerfrequenz ist im Bereich von 10 kHz-1 MHz möglich. Durch den Einsatz eines analogen I/Q-Demodulators kann eine Abtastrate von 1,5 kHz erreicht werden.

In [56] wird die Hardware verwendet, um den Finger der Vier-Finger-Hand der Roboterplattform James mit Sensoren auszustatten, wie in Abbildung 3.4(a) zu sehen. Die Messungen in selbst-kapazitiven und beidseitig-kapazitiven Konfigurationen über die sieben Elektroden werden verwendet, um den Füllstand von gegriffenen Flaschen zu bestimmen. Der Roboter kann anhand des Füllstands entscheiden, ob die Flasche vom Tisch geräumt



(a) Die Hardware zur kapazitiven Messung der Gruppe von Prof. Zangl (links) und die Hand des Roboters James (rechts)

(b) Elektroden zur Kollisionsvermeidung, welche an einem KUKA LWR angebracht sind

Abbildung 3.4: Links: die in der Gruppe von Prof. Zangl verwendete Hardware; rechts: das Testsystem zur Kollisionsvermeidung von Schlegl et al. [63] (Bildquellen: (a) [56] ©2015 IEEE und (b) [63] ©2013 IEEE)

werden soll oder nicht. Es wird dazu eine Art Exploration durchgeführt, in der inkrementell über bayessche Inferenz die Konfidenz für einen Zustand der Flasche (voll bzw. leer) aktualisiert wird. Die Exploration besteht darin, die Flasche in der Hand zu kippen, um die Sensorwerte zu beeinflussen.

Die Arbeit von Schlegl et al. [63] beschäftigt sich mit Kollisionsvermeidung und zielt darauf ab, zu zeigen, dass das vorgestellte Sensorsystem die Ereignisse mit geringer Latenz und für unterschiedliche Materialien erfassen kann. Dennoch wird (bisher) kein System vorgestellt, welches Konturverfolgung oder Kollisionsvermeidung in 3D zeigt, denn die Auskleidung des Roboters ist bisher noch rudimentär bzw. als Nachweis der Machbarkeit anzusehen (s. Abbildung 3.4(b)).

Shimojo Labs

In Abschnitt 3.4.1 wird die prinzipielle Arbeitsweise der Sensoren zur Detektion von Annäherung [35] und Taktilität [67] der Gruppe Shimojo Labs vorgestellt. Hier werden die damit umgesetzten Anwendungen besprochen. In [34] werden beide Sensoren in eine *Intelligent Robot Hand*, eine Hand mit drei Fingern und insgesamt acht Freiheitsgraden, integriert und das Vorausrichten sowie das Greifen mit Rutschdetektion gezeigt. Jeder Finger der Hand besitzt zwei Freiheitsgrade und zwei Finger besitzen einen zusätzlichen Freiheitsgrad, um den Finger in der Wurzel drehen können. Die Distal-Gelenke der Finger sind mit dem taktilen Sensor ausgestattet, wobei mittig in der Sensorfläche eine Aussparung eingearbeitet ist, in der ein IR-Element platziert ist. Die Handfläche ist mit einem 3×5 -Netz an IR-Sensoren ausgekleidet. In den Versuchen wird gezeigt, dass die Hand sich erfolgreich in zwei translatorischen Freiheitsgraden (X und Z) mithilfe der Sensoren in der Handfläche ausrichten kann. Die Finger können eine geeignete Vorausrichtung erreichen,

d. h. einen kleinen Abstand zur Objektoberfläche, sodass sie beim darauf folgenden Greifen das Objekt gleichzeitig berühren. Während des Transportvorgangs wird eine Kraftregelung durchgeführt, die erreicht, dass die Finger eine ausreichende Kraft ausüben, um Rutschen zu vermeiden. Zuletzt hilft die Rutscherkennung auch beim Absetzen des Objekts, da erkannt werden kann, wann der Kontakt mit der Ablagefläche eintritt.

Die Arbeit mit der Drei-Finger-Hand wird in [45], [46], [70], [78] fortgesetzt. In Abbildung 3.5 ist die Fassung der Hand aus [78] zu sehen. Im Vergleich zu [34] sind mehrere IR-Elemente in den Fingern platziert, um nicht nur Abstände, sondern auch Abweichungen in den Roll- und Pitch-Winkeln pro Finger erfassen zu können. Die Sensoren in der Handfläche sind nicht mehr planar ausgerichtet, sondern leicht nach außen gewölbt, damit ein größerer Bereich erfasst werden kann. Der Greifer ist an einem Arm mit sieben Freiheitsgraden montiert. So können durch die Orientierungsfehler, welche durch die Finger detektiert werden, die Roll- und Pitch-Winkel der Handwurzel beeinflusst werden. Die Position der Handwurzel wird durch die Werte aus dem Sensor in der Handfläche angepasst. In [45] wird der Entwurf der Fingerspitzen erneut angepasst. Die Orientierungsfehler werden dann verwendet, um direkt die Konfiguration der Finger (nicht mehr der Handwurzel) zu beeinflussen, sodass diese sich parallel zur Objektoberfläche ausrichten. Mit derselben Hardware wird in [70] das Greifen von bewegten Objekten auf einem Förderband gezeigt. Eine MS-Kinect erfasst dazu zunächst in einer Folge von Bildern das Objekt und schätzt seine Geschwindigkeit. Daraufhin wird der Greifer aufgrund dieser Schätzung in die Nähe des Objekts gebracht. Sobald dieses in Reichweite des Näherungssensors in der Handfläche ist, wird die Position des Arms zusätzlich durch dessen Werte beeinflusst. Zuletzt wird in [46] eine Methode vorgestellt, mit der aufgrund der Sensorwerte die Geschwindigkeit eingestellt wird, welche die Fingerspitzen haben sollen, wenn sie das Objekt berühren. Indirekt bestimmt sich hierdurch der Impuls bei Eintreten des Kontakts. Voraussetzung ist die Berechnung der sogenannten *time to contact*, welche aus der aktuellen Distanz zum Objekt und dessen Geschwindigkeit bestimmt wird. In Experimenten wird gezeigt, dass

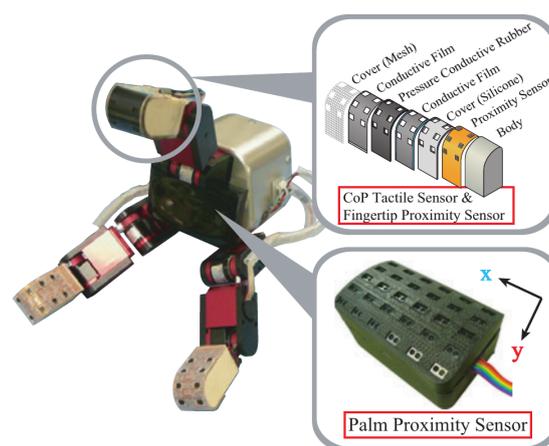


Abbildung 3.5: Die von Shimojo Labs verwendete 3-Finger-Hand in [78] (Bildquelle: [78] ©2013 IEEE)

die tatsächliche Geschwindigkeit für unterschiedliche Objekte gute Übereinstimmung mit der eingestellten Geschwindigkeit hat. Somit ist ein schnelles, aber kontrolliertes Greifen möglich.

Die in Abschnitt 3.4.1 besprochene Technologie von Shimojo Labs wird in [71] dazu verwendet, eine zylindrische mobile Plattform auszukleiden. Das verwendete Sensornetz kann bezogen auf den Zylinder den Winkel bestimmen, in dem sich ein Hindernis um die Plattform herum befindet, jedoch nicht die Höhe. Es wird gezeigt, dass die Auswertung der Daten mit einer Rate höher als 1 ms geschieht. Die eingesetzten IR-Elemente ermöglichen eine Reichweite von etwa 100 mm und somit ist die Plattform geeignet, in menschlicher Umgebung kollisionsfrei zu agieren. Dies wird in [71] allerdings nicht direkt evaluiert. Es wird jedoch gezeigt, wie mittels Zeitmultiplexen einzelne Sensoren (Spalten) angesprochen werden können, um auch eine Ortsauflösung für den Winkel zu erreichen, sodass mehrere Hindernisse getrennt wahrgenommen werden können. Dies aber nur, wenn sie weiter als 90° auseinander liegen.

3.3.2 Konturverfolgung und Kollisionsvermeidung

Zu den bereits besprochenen Ansätzen zur Kollisionsvermeidung von der Gruppe von Prof. Zangl und den Shimojo Labs kommen hier noch weitere hinzu. Ein essentieller Aspekt der Konturverfolgung und der Kollisionsvermeidung ist es, mithilfe von Sensoren die relative Pose des Hindernisses zu bestimmen. Cheung und Lumelsky [10], [51], sowie Nunes et al. [58] haben beide Verfahren vorgeschlagen, in denen die Detektion einer Tangentialebene am Hindernis verwendet wird, um eine Bewegung herzuleiten, welche parallel zur Hindernisfläche ist. In der Arbeit von Cheung und Lumelsky wird das Problem der Kollisionsvermeidung im Gelenkwinkelraum betrachtet, da die Armsegmente des verwendeten Roboters vollständig mit Näherungssensoren (Infrarot) ausgekleidet sind. Nunes et al. betrachten das Problem im kartesischen Raum, da ein End-Effektor verwendet wird, welcher mit einem Näherungssensor (Ultraschall) ausgestattet ist. Nunes et al. bringen an, dass für die Konturverfolgung eine gewünschte Bewegungsrichtung, bezogen auf die Hindernisfläche, vorgegeben sein muss, z. B. durch die Eingaben eines Teleoperators. Im Falle der Kollisionsvermeidung kann diese aus dem vorgegebenen Vektor, der von der aktuellen Konfiguration zur Zielkonfiguration zeigt, gewonnen werden. Insofern wird das Problem der Kollisionsvermeidung auf ein Problem der Konturverfolgung reduziert, falls kein weiteres Umweltmodell oder kein weiterer Plan vorhanden ist.

Im Rahmen der Konturverfolgung haben mehrere Autoren vorgeschlagen, eine Krümmungsschätzung als vorausschauende Komponente in der Regelung zu verwenden. Die Krümmungsinformation kann auf verschiedene Wege gewonnen werden. Es können komplementäre Sensorsysteme zum Einsatz kommen, wie z. B. Kameras in der kraftbasierten Konturverfolgung von Baeten und De Schutter [3]. Sie kann auch über ein Fit innerhalb eines Fensters durch die zurückgelegte Bahn bestimmt werden, wie z. B. von Mi und Jia in [54] gezeigt wird. Oder sie kann direkt durch eine Messung ermittelt werden, wie z. B. von Walker et al. in [74] vorgeschlagen wird. Ein Beispiel für letzteren Ansatz ist in Abbildung 3.6 dargestellt. In diesen Arbeiten wird gezeigt, dass die Krümmungsinformation die Leistung

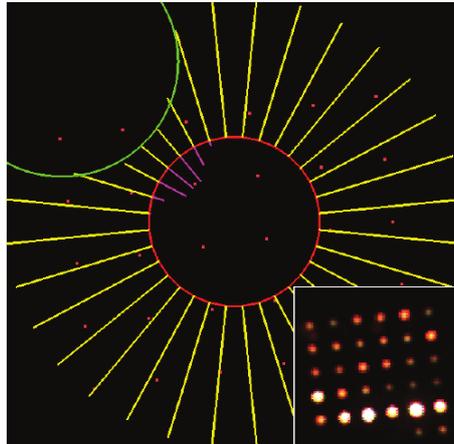


Abbildung 3.6: In der Arbeit von Walker et al. wird mit einem ortsauflösenden optischen Näherungssensor, welcher an einem runden End-Effektor angebracht ist, entlang einer Richtung die Krümmung von der Hindernisfläche direkt aus den Messungen bestimmt. (Bildquelle: [74] ©2007 IEEE)

der Systeme verbessern kann. Trotzdem bleibt die verwendete Krümmungsinformation nur eindimensional. Jia et al. zeigen in [41], wie eine Fläche und deren zwei Hauptkrümmungen mittels Exploration von einzelnen Kurven rekonstruiert werden können. Die Erfassung der zweidimensionalen Krümmungsinformation erfolgt dennoch nicht simultan. Über Sensorik mit einer Ortsauflösung in zwei Raumrichtungen kann, im Gegensatz zum Besprochenen, prinzipiell eine Schätzung der Krümmung gleichzeitig in zwei Richtungen erfolgen. Ein Beispiel hierfür ist die Arbeit von Teramoto et al. in [72], wo unter Verwendung von taktilen Sensoren 2D-Krümmungsinformation gewonnen wird. Im Kontext von Konturverfolgung und unter Verwendung von Näherungssensoren wurde dies jedoch noch nicht untersucht.

3.4 Sensorsysteme für künstliche Häute

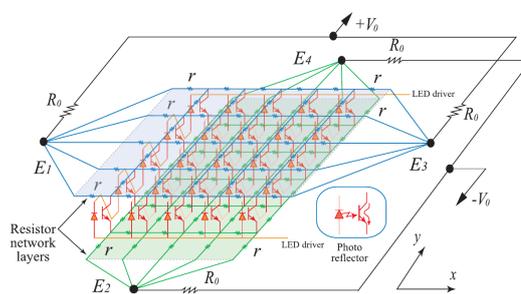
Dieser Abschnitt ist der Besprechung von Technologien für taktile Näherungssensoren gewidmet. Dem Leser wird es dadurch möglich, die in den Kapiteln 7 und 8 vorgestellte Technologie im Kontext der aktuellen Forschungslandschaft zu sehen. Bezüglich des modularen Sensorentwurfs gliedert sich die vorliegende Arbeit in eine Reihe von Ansätzen ein, die die Entwicklung von modularen und multimodalen Hautsensoren bzw. -sensorsystemen betrachten. Ein Beispiel für diesen Trend ist der *BioTac*-Sensor der Firma *Syntouch*, welcher zusammen mit einer Fingerkuppe in menschlichem Maßstab entwickelt wurde. Das Sensorsystem beinhaltet einen taktilen Sensor, einen Sensor für Temperaturfluss, sowie die Möglichkeit, Vibrationen zu erfassen [76]. Ein weiteres Beispiel ist die modulare Haut *HEX-o-SKIN*, welche von Mittendorfer und Cheng in [55] vorgestellt wird. Es handelt sich dabei um ein Modul, welches Zellen zur taktilen Messung, ein IR-Element für die Näherungsmessung, einen Temperatursensor und ein Inertialsensorsystem enthält. In den folgenden Abschnitten sollen weitere, unterschiedliche Technologien besprochen werden.

3.4.1 Infrarot-Sensoren

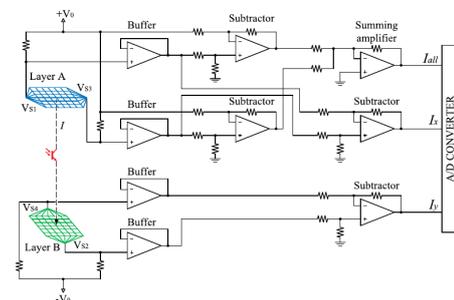
In der Forschungsgruppe *Shimojo Labs* um Prof. Shimojo an der University of Electro-Communications in Tokyo wird seit einigen Jahren an Netzen von Sensoren für die taktile Wahrnehmung und die Wahrnehmung der Annäherung geforscht. Die Einsatzgebiete umfassen die Kollisionsvermeidung für mobile Roboter bis hin zum Vorausrichten und Greifen von statischen und bewegten Objekten. Die grundlegende Technologie der Näherungssensoren, welche auf einem Netz von IR-Sendern und -Empfängern basiert, wurde mehrmals beschrieben, wird jedoch in [35] am detailliertesten vorgestellt. Der Aufbau der Netzstruktur wird in Abbildung 3.7(a) und die dazugehörige analoge Auswerteschaltung in Abbildung 3.7(b) dargestellt.

Die *Collectoren* der Phototransistoren sind in einer oberen Schicht mit einem Gitter von Widerständen verbunden. Die *Emitter* sind in einer unteren Schicht mit einem ebensolchen Gitter verbunden. Eine positive Spannungsquelle ($+V_0$) ist durch jeweils einen Widerstand R_0 an die erste und letzte Spalte des Netzes verbunden, d. h. an die Phototransistoren, die die minimale und maximale X -Koordinate darstellen. In der unteren Schicht sind orthogonal zur oberen Schicht die erste und letzte Reihe des Netzes, d. h., minimale und maximale Y -Koordinate, jeweils über einen Widerstand R_0 mit einer negativen Spannungsquelle ($-V_0$) verbunden. Durch das an einem Objekt reflektierte Licht werden entsprechend der Intensität die Phototransistoren in der Netzstruktur aktiviert, d. h., ein Strom kann zwischen $+V_0$ und $-V_0$ fließen. Befindet sich das Objekt bspw. links vom Zentrum des Netzes, so fließt, wegen des geringeren Widerstands über diesen Weg, mehr Strom durch den Punkt E_1 als durch E_3 . Durch eine Messung an den Widerständen R_0 kann dieser Strom ermittelt werden (s. auch Abbildung 3.7(b)). Analog verhält sich das für die Vergleichspunkte E_2 und E_4 in der unteren Schicht. Darüber hinaus wird durch den Gesamtstrom I_{all} die Nähe des Objekts widerspiegelt. Insgesamt kann ein Objekt also in den 3 Raumrichtungen lokalisiert werden.

Durch das Beschriebene können die wichtigsten Merkmale des Ansatzes herausgestellt werden: Da analoge Werte für die Objektlokalisierung vorliegen, müssen diese nur noch digitalisiert werden. Theoretisch stehen Sensorwerte im Takt der A/D-Wandlung zur Verfü-



(a) Der Aufbau des Net-Structure Proximity Sensors



(b) Der prinzipielle Aufbau der analogen Auswerteschaltung

Abbildung 3.7: Der Näherungssensor von Shimojo Labs (Bildquelle: [35] ©2015 IEEE)

die kapazitiven Systeme nicht grundsätzlich im Vorteil gesehen werden können. Wie in Abschnitt 3.3 beschrieben wird, sind für den Vergleich bezüglich der Anwendungen die weiteren Messprinzipien natürlich interessant, werden aber hier, zugunsten eines klaren Fokus, ausgelassen.

Häufig wird eine Anordnung von überkreuzten Leiterbahnen für die Implementierung der Sensoren verwendet. Die Kreuzungspunkte werden von den Autoren wahlweise *Pixel*, *Taxel* (oder auch *Proxel*, wie in 1.2 vorgeschlagen) genannt. Die Auswahl der Leiterbahnen erfolgt über einen Mehrfachschalter oder einen Multiplexer. Hier ergibt sich ein leichter Vorteil in der Anzahl an verwendeten Schaltern: bei N Pixeln sind nur \sqrt{N} Schalter bei gleicher Anzahl von Leitern in den beiden Schichten notwendig, um alle Pixel zu adressieren. In der Regel wird aus einem oder mehreren der Leiter in einer Richtung ein Sende-Strom erzeugt, welcher von den in einer anderen Schicht und Richtung liegenden Leitern empfangen bzw. gemessen wird. Es handelt sich also um ein beidseitig-kapazitives System (vgl. Abschnitt 2.2.2).

Eine weitere Möglichkeit des Entwurfs eines Sensorelements ist, Elektroden einzeln (für selbst-kapazitive Systeme) oder in Paaren (beidseitig-kapazitive Systeme) zu adressieren. Die einzelnen Elektroden oder Elektrodenpaare stellen die Proxel dar. Im Unterschied zu der überkreuzten Anordnung von Leitern ergibt sich ein höherer Schaltungsaufwand (Schalter der Größe N), aber dafür ist die Adressierung flexibler. Der Unterschied ist nicht vernachlässigbar, da mit einem Mehrfachschalter einzelne Leiter ausgewählt oder gruppiert werden können. Mit einem Multiplexer können sie nur einzeln angesprochen werden. Ein Multiplexer-Baustein ist damit elektronisch einfacher zu realisieren.

Bevor die konkreten Arbeiten besprochen werden, sei zuletzt noch erwähnt, dass bei einigen Entwürfen die Erfassung von Taktilität nicht kraftauflösend erfolgt. Besonders in der Unterhaltungselektronik wird oft zwischen der Detektion von Annäherung und Taktilität nicht scharf unterschieden. Letztere wird dann über einen Schwellwert in der Näherungsmessung realisiert, d. h., es wird ein sogenannter *Näherungsschalter* umgesetzt.

Wissenschaftliche Publikationen

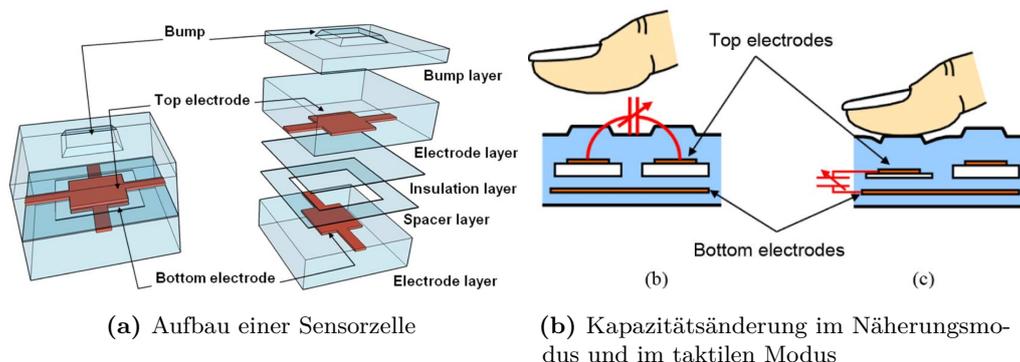


Abbildung 3.9: Flexibler kapazitiver Dualmodus-Sensor (Bildquelle: [48] ©2009 IEEE)

Lee et al. [48] verwenden für ihren Sensor eine Anordnung von überkreuzten Leiterbahnen,

welche durch eine komprimierbare, isolierende Zwischenschicht getrennt werden. In Abbildung 3.9 wird dieser Aufbau dargestellt. Taxels werden dadurch an den Kreuzungspunkten realisiert, wo eine Änderung der Kapazität gemessen werden kann, die mit der Kompression der Zwischenschicht zusammenhängt. Die Näherungsmessung wird dadurch realisiert, dass Streifen in der oberen Schicht in zwei Gruppen zusammengefasst werden, die ein beidseitig-kapazitives System darstellen (s. Abbildung 3.9(b)). In einer der Gruppen wird ein Sende-Strom generiert, der von der anderen Gruppe empfangen wird. Dieser Entwurf hat den Nachteil, dass so keine Ortsauflösung in der Näherungsmodalität realisiert werden kann. Ein weiterer, ähnlicher Entwurf, welcher ebenso überkreuzte Leiter verwendet, ist der von Zhang et al. in [79]. In diesem Fall wird die Annäherung über das Randfeld an den Kreuzungspunkten (Taxel/Proxel) gemessen, wobei der empfangene Strom in den Leitungen der Oberschicht sinkt, wenn sich ein gut an Masse gekoppelter Leiter (der Mensch) dem Sensor nähert (vgl. Abschnitt 2.2.2). Dies ist analog zur in Abbildung 3.11 dargestellten Konstellation, d. h. zu den Patenten von Hotelling und Bernstein [4], [37], welche weiter unten besprochen werden. Es wird vorgeschlagen, das Signal der Annäherung ebenso für die taktile Messung zu verwenden, da ab der Berührung das Signal eine Richtungsänderung erfährt, wenn durch die Kompression der Zwischenschicht die Leiter näher aneinander gebracht werden. Diese Lösung ist pragmatisch für Unterhaltungselektronik, die von Menschen verwendet wird, da diese elektrisch gut detektiert werden können. In [79] werden jedoch Fälle für nicht-geerdete bzw. schlecht an Masse gekoppelte Leiter, sowie isolierende Materialien, nicht besprochen. Darüber hinaus ist die Detektion von einer taktilen Interaktion über den Trend-Wechsel im Signal anfällig für Fehldetektionen, wenn das Objekt sich nach Annäherung wieder entfernt, ohne den Sensor zu berühren.

Patente, Patentanmeldungen und Offenlegungsschriften

Die Offenlegungsschrift der *Robert Bosch GmbH* [19] zeigt einen kapazitiven taktilen Näherungssensor in einem Aufbau mit mehreren Schichten (vgl. Abbildung 3.10). Das Patent ist, der Einschätzung des Autors nach, die Grundlage der Haut, die für die Roboterarme der APAS-Familie verwendet wird.¹ Die Näherungsmodalität des Sensors wird in der obersten leitenden Schicht mit einem beidseitig-kapazitiven System realisiert. In Abbildung 3.10 sind die Elektroden des dazugehörigen Paares mit A und B gekennzeichnet. Eine weitere Elektrode (44) wird an Masse verbunden, um das Näherungselement abzuschirmen. Letzteres wird darüber hinaus über eine isolierende Schicht (45) von einem weiteren Sensorelement, durch welches die taktile Messung ermöglicht wird, getrennt. Die Elektroden-Schichten (46) und (48) werden durch ein komprimierbares Material, Schicht (47), getrennt. Dabei enthält Schicht (46) zwei leitende Strukturen (E1)-(E4) und (D), die eine kapazitive Konfiguration ausmachen. Schicht (48) ist mit Masse verbunden. Eine Annäherung durch Kompression von (47) bewirkt eine Änderung in der Kapazität zwischen den (E1)-(E4) und (D), was als taktile Information ausgewertet wird. Zuletzt wird der gesamte Sensor durch die isolierende Schicht (49) abgedeckt, sodass er auf eine beliebige Fläche ohne Kurzschlüsse montiert werden kann. Insgesamt ergibt sich also, dass der vorgeschlagene Sensor im Wesentlichen

¹ http://www.bosch-apas.com/en/apas/start/bosch_apas.html Zugriff: März 2016

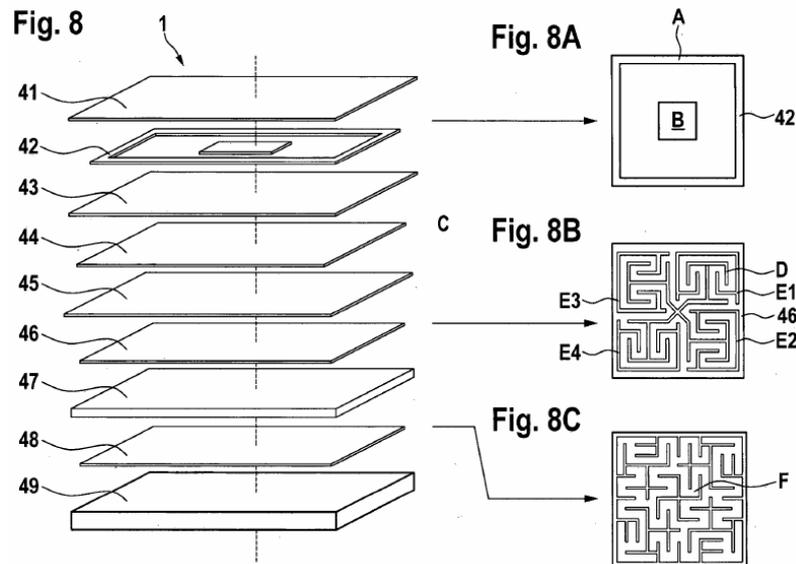
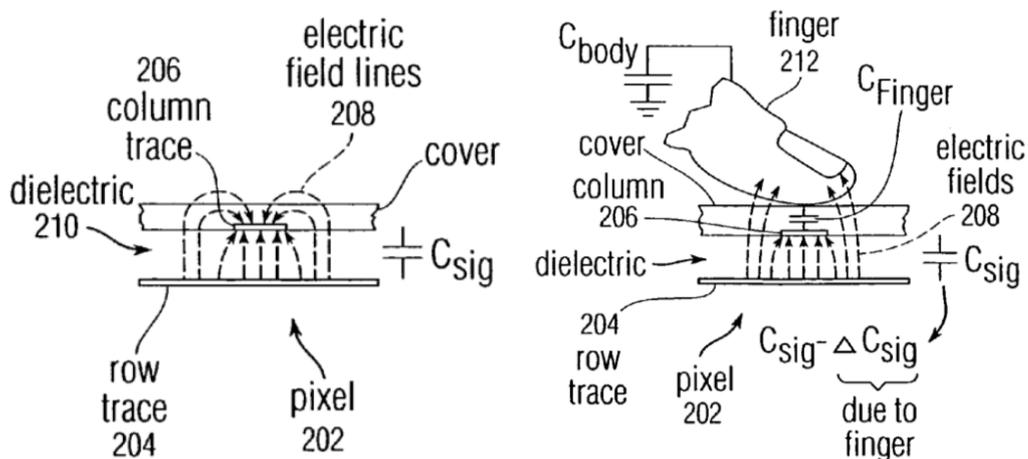


Abbildung 3.10: Mehrschichtiger Aufbau des Sensors der Robert Bosch GmbH. (Bildquelle: [19])

aus zwei voneinander getrennten Sensorelementen besteht, welche jeweils für eine Modalität der Messung zuständig sind. Der in Kapitel 7 beschriebene Entwurf verwendet vorteilhafterweise deutlich weniger Schichten und weist darüber hinaus eine Ortsauflösung in der Näherungsmodalität auf.



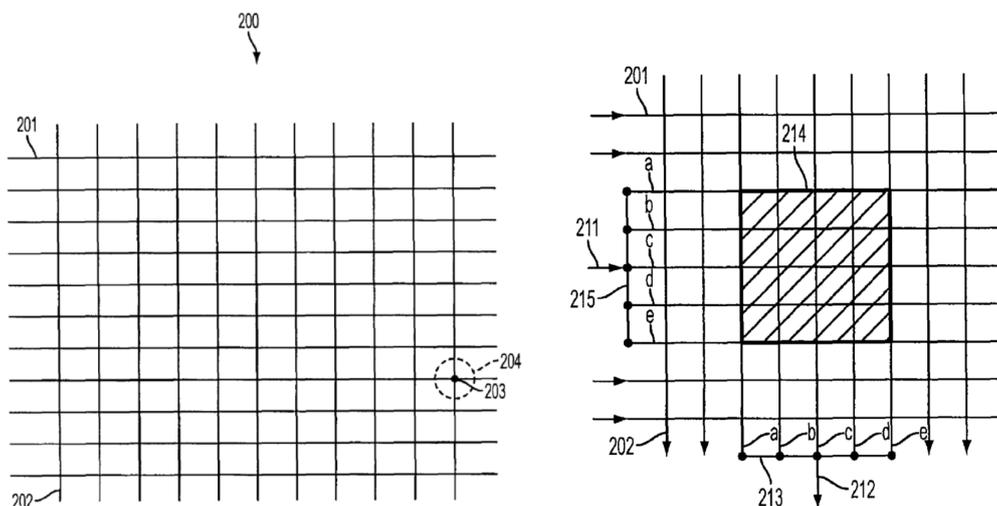
(a) Das elektrische Feld und Kapazitäten, die an einem Pixel entstehen (vgl. Abbildung 3.12)

(b) Ein Finger beeinflusst die Feldkonfiguration an einem Pixel.

Abbildung 3.11: Details zur Feldkonfiguration an einem Pixel nach Hotelling (Bildquelle: [37])

In der Domäne der Unterhaltungselektronik sind kapazitive Systeme weit verbreitet, etwa in Smartphones, Tablets, Navigationsgeräten, etc. Von Hotelling et al. wird in [37] (Apple Inc.) ein taktile Näherungssensor mit dem Schwerpunkt Signalverarbeitung bzw. Ermittlung der Kapazitätsänderung vorgestellt. Abbildung 3.11 zeigt, wie die Feldkonfiguration in einem Pixel aussieht. Abbildung 3.12 zeigt die Anordnung einer Vielfalt solcher Pixel. Im engeren Nahfeld wird wegen der Randfelder dieselbe Elektrodenkonfiguration wie für die taktile Messung verwendet. Im Fernfeld ist eine Näherungsmessung optisch (Infrarot) vorgesehen. Der Sensor verwendet die Tiefpass-Messmethode (vgl. Abschnitt 2.2.1), wobei die Kapazitätsänderung über eine Empfangselektrode erfasst wird. Es werden also separate Treiber- und Messschaltungen verwendet. Interessant ist, dass zur Eliminierung von statischen Kapazitäten und zur Ermittlung der reinen Kapazitätsänderung in der Amplitudendemodulation zusätzlich das Offset im Signal berechnet und vom gemessenen Signal abgezogen wird. In der vorliegenden Arbeit wird eine vergleichbare Methode verwendet (s. Abschnitt 7.1.3), die aber eine andere Funktionsweise hat. Zuletzt ist vorgesehen, dass der Sensor Erregersignale in mehreren Frequenzen sendet, um redundante Messungen für den Fall zu Erzeugung, dass Störungen im Frequenzbereich des Erregersignals auftreten. Auch in dem in Kapitel 7 gezeigten Entwurf ist dies möglich. Falls die Schicht zwischen den Elektrodenstreifen nicht komprimierbar ausgelegt wird, kann Taktilität nur als Überschreiten eines gewissen Schwellwerts in der Näherungsmodalität umgesetzt werden.

Im Rahmen einiger Patentanmeldungen wird die Wichtigkeit von hohen Reichweiten für die Näherungsmessungen anerkannt, was auch einer der zentralen Aspekte des in dieser



(a) Anordnung von Elektrodenstreifen (201) und (202), an deren Kreuzungspunkte sich Taxel/Proxel (203) bilden

(b) Zusammenfassung mehrerer Proxel über Schalter (212) und (211), um einen größeren Gesamttaxel/-proxel zu ergeben

Abbildung 3.12: Aufbau eines ortsauflösenden taktile Näherungssensors nach Bernstein (Bildquelle: [4])

Arbeit vorgestellten Sensorentwurfs darstellt (s. Kapitel 7). Da eine höhere Reichweite der Messung durch eine größere Fläche der Elektroden erlangt werden kann, wird in mehreren Fällen vorgeschlagen, zwei oder mehr Proxels dynamisch zusammenzuschließen, wie z. B. in dem Patent von Bernstein et al. [4] (Apple Inc.). Im Falle von überkreuzten Leitern besitzt dies die Einschränkung, dass nur rechteckige Flächen zusammenschaltet werden können. In der Patentanmeldung von Bernstein et al. [5] (Apple Inc.) wird ebenfalls ein taktile Näherungssensor vorgestellt. Durch eine zusätzliche Schirmlage unter der Matrixanordnung wird die Kopplung des Sensors an annähernde Objekte begünstigt. Ansonsten entspricht die Erfindung den bisher besprochenen Patenten von Apple.

In [36] wird ein taktile Näherungssensor vorgestellt, welcher wahrscheinlich mit der Technologie korrespondiert, die bei Smartphones und Tablets von Samsung eingesetzt wird.¹ So besitzt z. B. das Smartphone *Samsung Galaxy S4* die Fähigkeit, neben der Berührung auch Annäherung ortsauflösend feststellen zu können. Der Fokus des Patents liegt dabei auf der Näherungsmodalität. Das Sensorelement besteht auch aus überkreuzten elektrischen Leitern (Streifen). Die zu messende Kapazität befindet sich an den Überlappungsstellen zwischen den Leitern, analog zu Abbildung 3.11(a), wobei aus den Zeichnungen hervorgeht, dass die Streifen prinzipiell deutlich breiter als in [37] angelegt sind. Es ist ebenso vorgesehen, eine oder mehrere der Sendelektroden bzw. der Empfangselektroden zusammenzufassen. Zusätzlich zur überkreuzten Anordnung von Leitern sind seitlich an dem Gerät Empfangselektroden für die Näherungsmessung platziert, welche eine Messung mit höherer Reichweite, aber ungenauerer Lokalisierung, ermöglichen.

Ein Fall, in dem keine überkreuzten Leiter verwendet werden, ist das Patent von Osinach et al. [59]. Hier können Näherungselektroden, welche in einem selbst-kapazitiven Systemen angeordnet sind, zusammengeschlossen werden, wie in Abbildung 3.13 dargestellt wird.

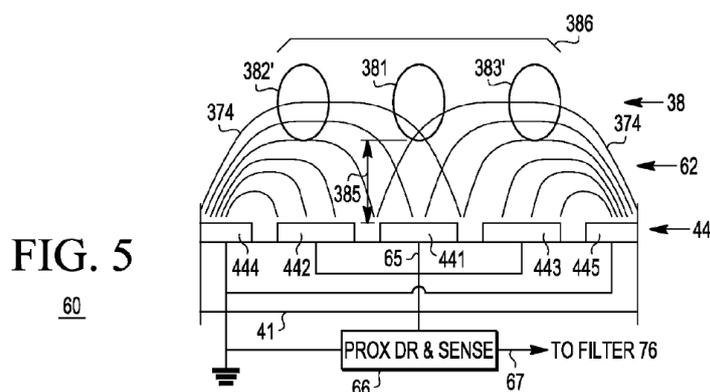


Abbildung 3.13: Näherungselektroden 441-443 werden in [59] zusammengefasst, um ein Objekt 38 in weiterer Entfernung erfassen zu können. Über die gemeinsame Leitung 65 wird der Sendestrom ausgelesen. Der Aufbau ermöglicht nicht das kraftauflösende Erfassen von Taktilität. (Bildquelle: [59])

¹ <http://www.synaptics.com/products/touch-controllers> (Zugriff: März 2016)

Dabei ist ebenso das Ziel, die Reichweite des Sensors zu erhöhen. Eine taktile Messung wird erwähnt, ist aber höchstens über einen Kontakt-Schwellwert der Näherungsmessung zu realisieren (Näherungsschalter), sodass keine Kraftauflösung vorliegt. In [60] wird ein taktile Näherungssensor vorgestellt, wobei hier die Taktilität ebenfalls ohne Kraftauflösung vorliegt. Die Firma *Freescale* vertreibt Chips (ICs), die wahrscheinlich auf der vorgestellten Technik beruhen.¹ Im IC wird die Auswertung der kapazitiven Messung gemacht, aber es ist dem Benutzer überlassen, die Elektroden zu gestalten. In [59] wurde zusätzlich zu [60] die Ableitung und Vorbereitung eines Schirmsignals beschrieben (vgl. Abschnitt 2.3).

Für Patente ist es erwähnenswert, dass in vielen Fällen keine weiteren Publikationen vorliegen, aus denen Informationen zu den tatsächlichen Parametern der Leistung gewonnen werden können, wie z. B. die tatsächliche Reichweite, Ortsauflösung oder Datenrate.

3.5 Bewertung

Bezüglich der Methoden, welche Näherungssensoren verwenden, kann festgestellt werden, dass es an einem Konzept mit einer regelmäßigen Ortsauflösung für die Taktilität und Annäherung fehlt. Durch die fehlende echte Ortsauflösung im Ansatz der Shimojo Labs ist die Erfassung mancher Freiheitsgrade für den Sensor unmöglich. Darüber hinaus sind Einschränkungen bei der Umsetzung von Methoden wie die Haptische Exploration zu erwarten, da hier auch in der Taktilität eine Ortsauflösung notwendig ist, um Merkmale detektieren zu können. Ohne die systematische Ortsauflösung ist beim Vorausrichten weder bei den Ansätzen von Shimojo Labs noch bei der Gruppe von Smith ein einheitliches Konzept vorhanden, sodass jeweils nur vier oder fünf der sechs Raumfreiheitsgrade ausgeregelt werden.

Die weiteren Ansätze von der Gruppe um Prof. Smith bzw. Prof. Zangl können nicht auf eine simultane taktile Modalität zurückgreifen. Von der Gruppe Prof. Smith wurden bspw. Ansätze zur berührungslosen Exploration gezeigt, jedoch keine, welche auch taktile Explorationsschritte enthalten. Durch die fehlende Ortsauflösung der Sensoren war es ebenso nicht möglich, in der gezeigten Exploration und Telemanipulation kontinuierliche Bewegungen durchzuführen. Als letztes kann festgestellt werden, dass es bisher keine Ansätze zur Kollisionsvermeidung mit einer regelmäßigen Anordnung an kapazitiven Näherungssensoren gab.

Die Sensorentwicklung betreffend gibt es zunächst Unterschiede zwischen den Messprinzipien. IR-Sensoren können zwar eine Ortsauflösung realisieren, bereiten aber Schwierigkeiten dabei, einen echten bi-modalen Sensor umzusetzen. An der Stelle wo ein IR-Element sitzt, kann keine taktile Wahrnehmung stattfinden. Dasselbe gilt auch für akustische Sensoren. Unabhängig von einer Bewertung der grundsätzlichen Vor- und Nachteile der Messprinzipien sind nur Entwürfe mit einem kapazitiven Messprinzip dazu in der Lage.

Bezüglich der Umsetzung von kapazitiven Sensoren gibt es zwei Tendenzen: Entweder die Näherungsmessung wird mit überkreuzten Leitern oder durch einzelne Elektroden

¹ http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/white_paper/PROXIMITYWP.pdf, Zugriff: März 2016

implementiert. In beiden Fällen ist eine simultane taktile Messung möglich. Bis auf die vorliegende Arbeit stimmt im Falle von einzelnen Elektroden jedoch die Ortsauflösung beider Modalitäten nicht überein. Die Arbeit von Göger bietet für die bessere Lösung einen Ausgangspunkt, an den hier angeknüpft wird. Das ortsauflösende Messen der Annäherung mit überkreuzten Leitern stellt für die gleichzeitige taktile Wahrnehmung eine Herausforderung dar: Gegebenfalls muss dasselbe Signal für beide Modalitäten verwendet werden. Es ergeben sich nicht trivial zu lösende Mehrdeutigkeiten. Die Anordnung mit überkreuzten Leitern erfüllt auch nicht alle Anforderungen an eine flexible Ortsauflösung, denn es können nicht beliebige, sondern nur rechteckige Elektrodenformen gebildet werden. Nach Einschätzung des Autors ist die in dieser Arbeit vorgeschlagene Lösung am robustesten, denn sie bietet eine taktile Messung unabhängig von der Näherungsmessung und darüber hinaus die maximal mögliche Flexibilität in der Ortsauflösung.

TEIL II

Anwendungsbezogene Evaluation des kapazitiven taktilen
Näherungssensors „TNS V1.0“

KAPITEL 4

Der Sensor von Göger

In diesem Kapitel wird ein Überblick über den kapazitiven taktilen Näherungssensor von Göger gegeben, welcher im Rahmen seiner Dissertation entwickelt wurde [22]. Dieser Sensor ist die Basis für die anwendungsbezogene Evaluation in diesem Teil der Arbeit. Dabei muss zwischen dem Konzept und den konkreten Realisierungen als Hardware unterschieden werden. Das Konzept ist das eines bi-modalen Sensors, der semi-modular aufgebaut werden kann. Es ist vorgesehen, dass Messungen im selbst- und beidseitig-kapazitiven Modus für die Näherungsmodalität stattfinden können und dass, parallel dazu, die Taktilität kraftauflösend erfasst werden kann. Insgesamt entstanden drei Varianten des Sensors als Hardware: ein Prototyp, der in [24] vorgestellt wurde, sowie das sogenannte *Large Area Module* (LAM) und ein Sensor für die Fingerspitzen einer Fünf-Finger-Hand, welche beide in [23] vorgestellt wurden. Als konkrete Hardware ist für Teil II dieser Arbeit nur das LAM wichtig. Dieses kann zu einem Array zusammengeschlossen werden, hat jedoch nur die Möglichkeit, im selbst-kapazitiven Modus Annäherungen zu detektieren. Zu den LAMs gehört auch die externe Auswerteelektronik dazu. Zusammen werden sie in dieser Arbeit als „TNS V1.0“ bezeichnet.

4.1 Konzept

Die erste Version eines kapazitiven Sensors von Göger ist ein reiner Näherungssensor, welcher in die Handfläche einer Fünf-Finger-Hand für die Mensch-Roboter-Interaktion integriert wurde [27]. Dieser weist vom prinzipiellen Aufbau her bereits einige Ähnlichkeiten mit dem hier beschriebenen Entwurf auf, wobei es an dieser Stelle zum Verständnis nicht nötig ist, diese im Detail zu besprechen. Eines der wichtigsten Merkmale des Entwurfs des taktilen Näherungssensors ist, dass er nicht nur aus einer nebenläufigen Implementierung von Sensorelementen für die Modalitäten Taktile und Annäherung besteht, sondern dass es mit dem Schichtenaufbau möglich ist, beides zu messen. In diesem Sinne ist es ein echter bi-modaler Sensor. Die Vorteile sind ein vergleichsweise einfacher Aufbau des Sensorelements, was günstige Bedingung für die Fertigung bedeutet. Darüber hinaus ist ein Sensor dieses Typs flexibel hinsichtlich der Integration, weil sich Elektroden prinzipiell freiförmig gestalten lassen.

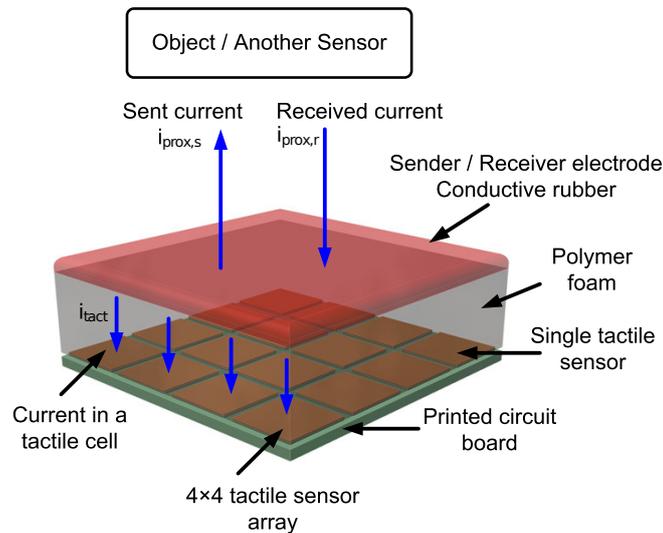


Abbildung 4.1: Entwurf des Sensorelements von Göger (Bildquelle: [24] ©2010 IEEE)

Der Entwurf des Sensorelements wird in Abbildung 4.1 dargestellt und die dazugehörige schematische Schaltung in Abbildung 4.2. Im *Näherungsmodus* wird die obere Elektrode mit einer Wechselspannung beaufschlagt, sodass ein elektrisches Feld etabliert wird, welches durch Objekte in der Nähe beeinflusst wird. Um das Sensorelement nach hinten, zur Seite der Elektronik, abzuschirmen, wird Schalter S 2 in Abbildung 4.2 verwendet, um die Schirmelektrode über einen Spannungsfolger an das gleiche Potential wie die obere Elektrode zu bringen. Hierdurch werden Einstreuungen von der Elektronik und der hinteren Seite des Sensors vermieden, sodass die Kopplung des Sensorelements vornehmlich mit Objekten in der Umgebung gegeben ist (vgl. auch mit Abschnitt 2.3). Die Amplitude des gesendeten Stroms korrespondiert mit der Kapazität der Konfiguration Sensor-Objekt-Umwelt und damit der Annäherung von Objekten (s. Abschnitt 2.2.2). Für den *taktilen Modus* wird ein Elektroden-Array verwendet, in dem jede Zelle mit der oberen Elektrode annähernd einen Plattenkondensator bildet. Zwischen der oberen Elektrode und dem Array liegt eine isolierende, komprimierbare Zwischenschicht. Diese wird durch eine Normalkraft, die auf den Sensor wirkt, gestaucht. Dadurch ändert sich der Abstand zwischen der (flexiblen) oberen Elektrode und den Elektroden aus dem Array und damit die Kapazität. Für jede Zelle aus dem Array wird ein Empfangs-Strom gegen Masse über einen Messwiderstand gemessen, der sich entsprechend der Kapazität ändert. Zuletzt ist der Sensor in der Lage, externe Ströme über die obere Elektrode zu empfangen und zu messen.

Um die Messungen in den unterschiedlichen Modi durchzuführen, müssen die Signale über Zeitmultiplexen zur A/D-Wandlung gebracht werden. Über diesen Vorgang werden die taktilen und näherungs-basierten Ereignisse quasi simultan erfasst. Bevor das Signal abgetastet wird, wird ein Anti-Aliasing-Filter angewandt, um die Einhaltung des Nyquist-Theorems zu garantieren. Mithilfe eines Tiefpass-Filters wird also garantiert, dass im Signal keine Frequenzanteile enthalten sind, die höher sind als die halbe Abtastrate. Das diskretisierte

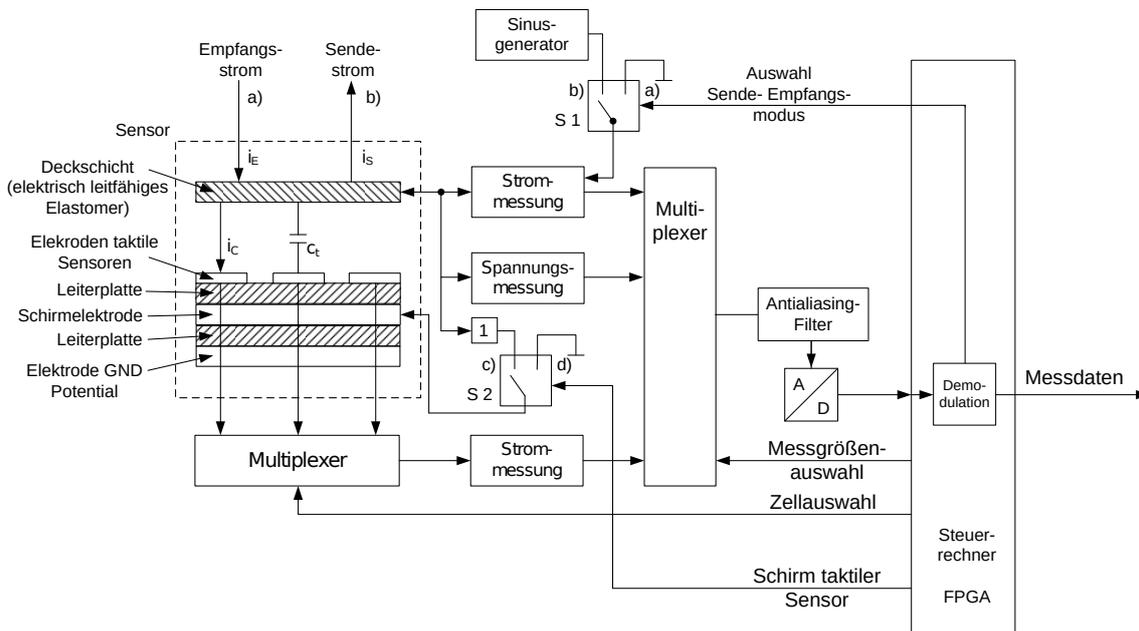


Abbildung 4.2: Schematische Schaltung des Sensors von Göger (Bildquelle: [24])

Signal der Wechsellspannung muss demoduliert werden, um die Amplitude, also den Nutzwert, ermitteln zu können. Dabei ist die Phasenlage zwischen dem Erregersignal und dem gemessenen Signal unbekannt. Von Göger ist vorgesehen, dass die Abtastfrequenz genau das 4-Fache der Erregerfrequenz beträgt. Der von ihm vorgeschlagene Algorithmus zur Demodulation basiert auf dieser Tatsache: Über das Phasenregister der DDS (engl. *direct digital synthesizer*, IC-Baustein, der Erzeuger des unverstärkten Erregersignals ist) wird die Phase des Erregersignals so lange verschoben, bis zwei der Abtastungen 0 sind. Damit stellen die Werte der anderen Abtastungen direkt die Amplitude des Signals dar [22], [24]. Dieser Ansatz wurde einer Demodulation über eine Fourier-Transformation vorgezogen, da er keinen Rechenaufwand hat. Diese Methode hat jedoch den entscheidenden Nachteil, dass die Phasenlage des Erregersignals zwischen den einzelnen Sensoren, die gleichzeitig messen, unbestimmt ist. Ebenso ist die Taktung der einzelnen Messung undeterministisch, da die Dauer eines Messzyklusses variabel ist. Deshalb wird in Abschnitt 4.3 ein Verbesserungsvorschlag präsentiert.

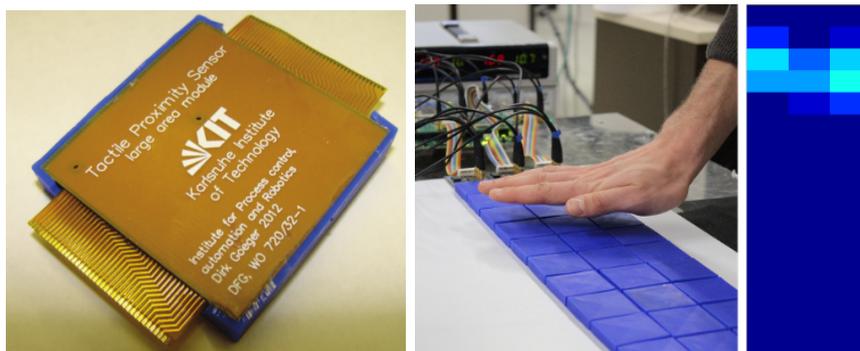
Die taktile Messung betreffend scheint es auf den ersten Blick legitim zu sein, einen direkten Zusammenhang zwischen der Messung und der aufgebrachten Kraft herzustellen. Das setzt allerdings voraus, dass die komprimierbare Schicht sich wie eine perfekte Feder verhält, d. h., dass die Abstandsänderung durch die Kompression direkt proportional zur einwirkenden Kraft ist. In Wirklichkeit zeigt ein Schaumstoff nicht-ideale Eigenschaften, wie z. B. Hysterese. Deshalb ist die Auswahl eines geeigneten Schaumstoffs sowie die visko-elastische Modellierung Gegenstand einer vertiefenden Studie durch Göger in [22], [23].

4.2 TNS V1.0: Large Area Module, FPGA und Erweiterungsboard

Von den unterschiedlichen Ausprägungen des Sensors von Göger, die gefertigt wurden, ist für die vorliegende Arbeit die relevanteste das *Large Area Module* [22], [23], welches in Abbildung 4.3 gezeigt wird. Es wurde entworfen, um das Äußere eines Roboterarms für Anwendungen wie die Kollisionsvermeidung und die Mensch-Roboter-Kooperation auskleiden zu können. Dennoch wurde ein Array solcher Sensoren für die Arbeit in Kapitel 5 als Machbarkeitsnachweis auch in einen Greifer integriert.

Das LAM besteht aus jeweils einer Zelle für die Annäherung und einer Zelle für die Taktilität. Eine Ortsauflösung wird deshalb erst dann erreicht, wenn ein Array solcher Sensoren verwendet wird. Jedes LAM hat eine Größe von $40 \times 40 \text{ mm}^2$ und kann aufgrund der Fläche leitende Objekte bis etwa in der Nähe von 10 cm detektieren. Bis zu 16 Module können über Verbindungselemente zu einem Streifen zusammengeschlossen werden. Jeder Streifen kann an einen Kanal des Erweiterungsboards angeschlossen werden. Insgesamt können so prinzipiell 160 Module betrieben werden, da das Board 10 Kanäle besitzt. In Abbildung 4.4 ist das Erweiterungsboard, welches auf dem FPGA Evaluationsboard montiert ist, zu sehen. Auf dem Erweiterungsboard befinden sich ICs, wie die DDS zur Generierung des Erregersignals, A/D-Wandler und weitere Komponenten. Ab der Digitalisierung der Werte findet die weitere Signalverarbeitung in der Logik des FPGAs statt (s. auch [24]). Die erreichbare Datenrate ist abhängig von der Anzahl an Modulen, die adressiert werden. Für den Greifer in Kapitel 5 sind es etwa 80 Hz für den End-Effektor aus Kapitel 6 mit 48 Sensoren sind es 25 Hz.

Die DDS-Bausteine, welche pro Kanal eingesetzt werden, generieren stets ein Signal mit der Frequenz $f_{\text{exc}} = 98,625 \text{ kHz}$, welches zu den Modulen geleitet wird. Die A/D-Wandler tasten das Signal mit $f_{\text{sample}} = 394,5 \text{ kHz} = 4 \cdot f_{\text{exc}}$ ab. Auf dem FPGA wird eine weitere Glättung der Daten mit einem FIR-Filter vorgenommen. Die Logik des FPGA ist ebenso dafür zuständig, die Multiplexer für jeden Kanal zu schalten und die ICs auf dem Erweiterungsboard zu parametrieren (z. B. das Schreiben in das Phasenregister der



(a) Das LAM von der unteren Seite mit zwei Verbindungselementen

(b) Die LAMs können zu einem Array zusammengeschlossen werden. Ein Array 3×16 LAMs wird dargestellt.

Abbildung 4.3: Überblick über das Large Area Modules (LAM) (Bildquelle: [17] ©2013 IEEE)

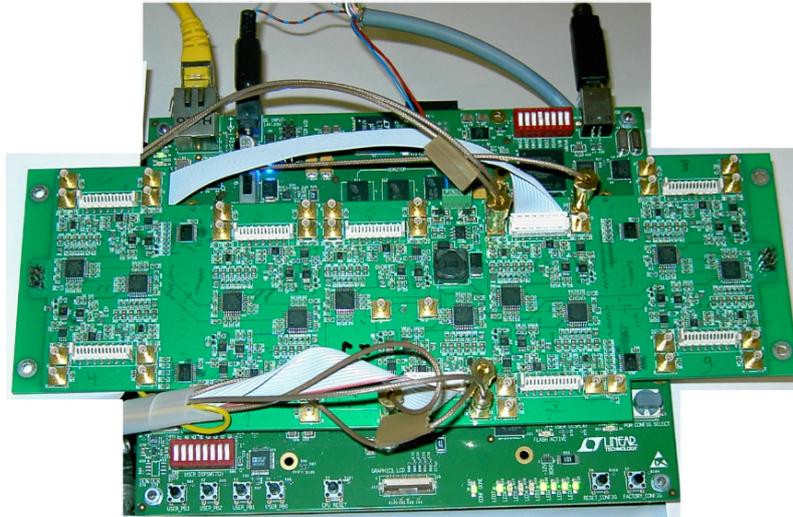


Abbildung 4.4: Erweiterungsbord mit zwei belegten Kanälen und darunter das FPGA Evaluationsboard

DDS-Module oder das Schreiben der Konfigurationen in die A/D-Wandler). Zuletzt werden die Daten verpackt und über TCP/UDP an den Zielrechner übertragen.

4.3 Veränderungen am System von Göger

Der Zusammenhang zwischen Erregerfrequenz und Abtastrate über den Faktor 4 ermöglicht einen neuen Ansatz der Demodulation, welcher in Abbildung 4.5 in Grün dargestellt wird. Dazu wird eine vereinfachte DFT verwendet, welche die Amplitude des Signals nur für die Frequenz von 98,625 kHz ermittelt. Die allgemeine Form der DFT ist:

$$DFT : X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-i2\pi kn/N}. \quad (4.1)$$

Aus der DFT ergibt sich die Amplitude unabhängig von der Phase des Signals. In diesem Fall wird für die Berechnung nur $X(k = 1)$ mit $N = 4$ (der oben genannte Faktor) gebraucht. Dadurch vereinfacht sich die Berechnung wie folgt:

$$e^{-i2\pi 0/4} = 1 \quad (4.2)$$

$$e^{-i2\pi 1/4} = i \quad (4.3)$$

$$e^{-i2\pi 2/4} = -1 \quad (4.4)$$

$$e^{-i2\pi 3/4} = -i \quad (4.5)$$

DFT:

$$X(1) = x(0) - x(3) + i(x(1) - x(4)). \quad (4.6)$$

Die Amplitude ist der Betrag von $X(1)$:

$$A = \text{abs}(X(1)) = \sqrt{[x(0) - x(3)]^2 + [x(1) - x(4)]^2}. \quad (4.7)$$

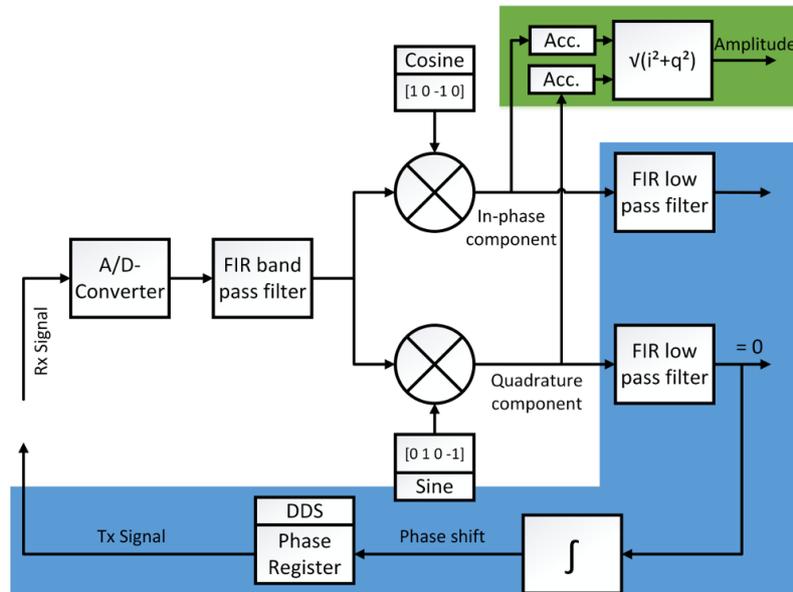


Abbildung 4.5: Schematische Struktur der Demodulation; in Blau ist die von Göger vorgeschlagene Methode hinterlegt und in Grün ist die neu implementierte Methode hinterlegt. (Bildquelle: [17] ©2013 IEEE)

Dies kann ohne großen Aufwand in dem FPGA unter Verwendung von zwei Multiplikatoren umgesetzt werden. Durch die neue Methode kann auf die Phasenregelung verzichtet werden, wodurch sich verkürzte Wartezeiten zwischen dem Umschalten von einem Modul zum nächsten ergeben. Mit der DFT-basierten Demodulation muss auch keine Einschwingzeit berücksichtigt werden. Es reicht, eine Wartezeit einzuhalten, damit das Signal nach dem Umschalten stabil anliegt. Mit der deterministischen Auswertung kann auch eine feste Phasenlage zwischen simultan ausgewerteten Sensoren gehalten werden. Dadurch werden unerwünschte Schwebungen im Signal vermieden.

KAPITEL 5

Proximity Servoing mit einem Zwei-Backen-Greifer

Ein großes Ziel bei der Entwicklung einer künstlichen Haut für Roboter ist das Austatten eines Greifers, damit dieser feinfühlig greifen kann. Wie aus dem Stand der Technik hervorgeht (s. Kapitel 3), ist das Sensorkonzept von Göger eine interessante Variante solch einer Haut, weil sie dazu verwendet werden kann, sowohl die Annäherungsphase als auch das Greifen an sich zu überwachen. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Validierung dieses Sensorkonzepts für das *Vorausrichten und Greifen*. Dazu wird das Konzept des *Proximity Servoings* eingeführt, welches ein Überbegriff ist für Methoden, die eine Regelung basierend auf Näherungssensorik verwenden. Darüber hinaus werden mit der *Haptischen Exploration* und der *Telemanipulation mit Krafrückkopplung von Näherungsfeldern* zwei neue Methoden vorgestellt, die durch den Sensor möglich wurden und die es in dieser Form noch nicht gab. Aus der Erfahrung mit dem Sensor ergeben sich ein Teil der Anforderungen, welche zum neuen Sensorentwurf führen, der im dritten Teil dieser Arbeit vorgestellt wird. Die in diesem Kapitel besprochenen Methoden und Ergebnisse, wurden auf den Konferenzen *IROS2014* [18] und *IROS2015* [15] vorgestellt.

5.1 Beschreibung des konzipierten Systems

Passend für die LAMs wurden zwei Backen für einen Greifer konzipiert, in die jeweils 2×2 LAMs integriert wurden. Diese Integration ist in Abbildung 5.1 rechts wiedergegeben. Das FPGA-Board mit Erweiterungsplatine wurden wegen des Platzbedarfs entfernt vom Greifer am dritten Glied der Roboterkinematik ein KR16 befestigt, wie in Abbildung 5.1 links zu sehen ist. Über drei Koaxialkabel und ein Flachbandkabel pro Backe sind die Sensoren mit der Auswerteelektronik verbunden. Da pro Kanal nur 4 LAMs ausgewertet werden müssen, konnte die Datenrate von 25 Hz (für 16 LAMs) auf 80 Hz hochgesetzt werden. Aus demselben Grund konnte auch die Fensterbreite der Mittelwertfilterung von 32 auf 128 hochgesetzt werden. Dieser Werte repräsentiert eine relativ starke Filterung. Hintergründe zu diesen Parametern können den Abschnitten 8.1 und 8.2 entnommen werden.

Bevor sie verwendet werden können, müssen die Sensoren kalibriert werden. Obwohl alle vom Prinzip her gleich aufgebaut sind, treten wegen Toleranzen der Bauteile und bei der

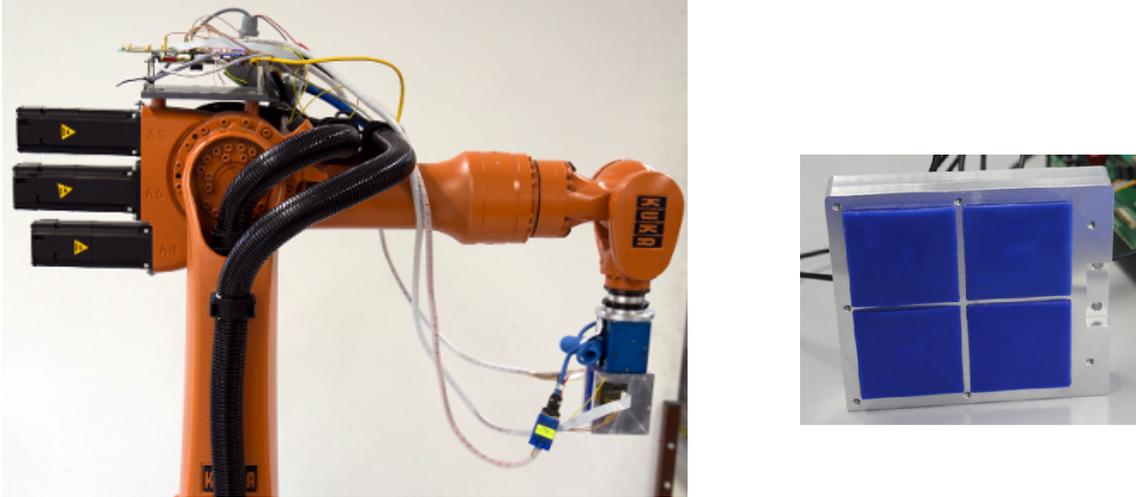
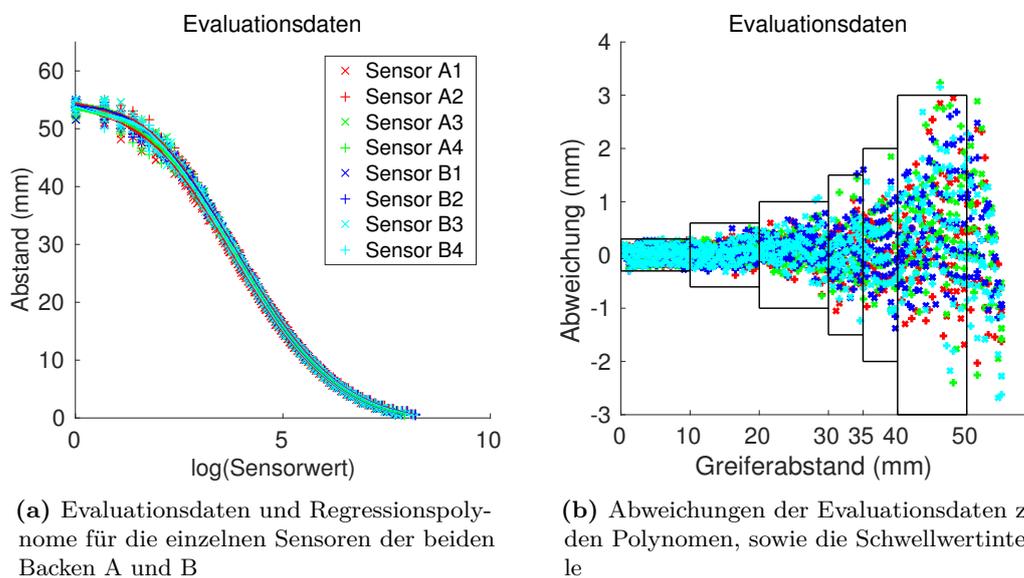


Abbildung 5.1: Links: der Roboter KR16 von KUKA mit dem Greifer und FPGA-Board, auf welches eine Erweiterungsplatine montiert ist; rechts: die TNS-Module, welche in den Backen des Greifers integriert sind (Bilderquelle: [18] ©2014 IEEE)



(a) Evaluationsdaten und Regressionspolynome für die einzelnen Sensoren der beiden Backen A und B

(b) Abweichungen der Evaluationsdaten zu den Polynomen, sowie die Schwellwertintervalle

Abbildung 5.2: Kalibrierungsdaten zu den einzelnen Sensoren im Greifer; die Daten zeigen die Validierung (Evaluationsdaten) von zuvor bestimmten Regressionen.

Montage leicht unterschiedliche Basiswerte bzw. Wertebereiche auf. Ein planarer geerdeter Leiter, welcher die Fläche der Sensoren komplett abdeckt, ist als Referenzmaterial geeignet, denn bei der Aufzeichnung einer Signal/Weg-Messung kann der komplette Wertebereich abgedeckt werden. Mithilfe einer Regression durch die Daten können Unterschiede in den Basiswerten und Verläufen ausgeglichen werden. Darüber hinaus sind die Sensorwerte, als (Pseudo-)Distanzen ausgedrückt, anschaulicher zu handhaben. Die Kalibrierung kann für ein anderes Material als das Referenzmaterial keinen genauen Abstand liefern, weshalb generell von Pseudo-Distanzen ausgegangen werden muss. Dennoch werden die Werte der einzelnen Sensoren durch die Kalibrierung miteinander vergleichbar gemacht. In Abbildung 5.2 wird das Ergebnis eines solchen Kalibriervorgangs veranschaulicht. Es wurden Kalibrierungsdaten aufgenommen, mit deren Hilfe eine Regression bestimmt wurde. In Abbildung 5.2 links sind die Regressionskurven zusammen mit Evaluationsdaten für die Sensoren aus der linken (A) und rechten Backe (B) wiedergegeben. Rechts ist die Abweichung der Evaluationsdaten zu den zuvor berechneten Regressionen dargestellt. Zusätzlich sind rechts noch Schwellwerte und ihre Gültigkeitsbereiche dargestellt. Die Bedeutung dieser Werte wird weiter unten besprochen. In Abschnitt 8.2 sind Details zu der Berechnung der Regressionen und der Abweichungen dargelegt.

5.2 6D Proximity Servoing für das Vorausrichten und Greifen

Die zentrale Idee des Proximity Servoings ist es, eine Zielkonfiguration der mit Sensoren bedeckten Fläche relativ zu einem Objekt oder der Umgebung zu erreichen. Im Falle des Greifers *ist* das Vorausrichten Proximity Servoing. Das Ziel ist es, das Objekt in allen sechs Raumfreiheitsgraden zwischen den Backen des Greifers zu zentrieren. Jeder Freiheitsgrad, in dem das Objekt versetzt ist, ist für einen Gradienten in den Sensorwerten verantwortlich. Somit ergibt sich ein Gradientenvektor für den Gesamtversatz. Die Backen des Greifers besitzen keine Freiheitsgrade, die die unabhängige Regelung der Pose der Backen bzw. der Sensorflächen ermöglichen. Deshalb muss die Regelung auf der Handwurzel, dem *Tool Center Point* (TCP) des Roboters, wirken. Die Zielkonfiguration kann erreicht werden, indem der Roboter im TCP-Frame entlang des Gradienten fährt. Wären die Sensoren an einem Greifer angebracht, dessen Finger mit mehreren Freiheitsgraden ausgestattet sind, könnte die Regelung auch auf die Pose der Finger wirken. Einige Arbeiten aus dem Stand der Technik, die Mehrfinger-Greifer verwenden, verfolgen diesen Ansatz (s. Kapitel 3).

Der Entwurf der Backen mit den 2×2 Sensoren ist speziell darauf ausgerichtet, mithilfe der symmetrischen Anordnung der Sensoren, den Gradientenvektor (ab jetzt auch nur noch Gradient) zu detektieren. Dieser Gradient wird kontinuierlich auf Geschwindigkeiten des TCPs des Roboters im 12 ms-Takt mit einem P-Regler abgebildet. Der Verstärkungsfaktor ist so gesetzt, dass beim maximal möglichen Gradienten eine Geschwindigkeit von $v_{\max} = 50 \text{ mm s}^{-1}$ für die translatorischen und $\omega_{\max} = 30^\circ \text{ s}^{-1}$ für die rotatorischen Freiheitsgrade erreicht wird.

5.2.1 Einleitende Diskussion

Der Entwurf der Gradientenberechnung, welcher weiter unten erläutert wird, kann mithilfe von Abbildung 5.3 erklärt werden. Als Beispiel sei gegeben, dass in der Draufsicht $d_1 < d_2$

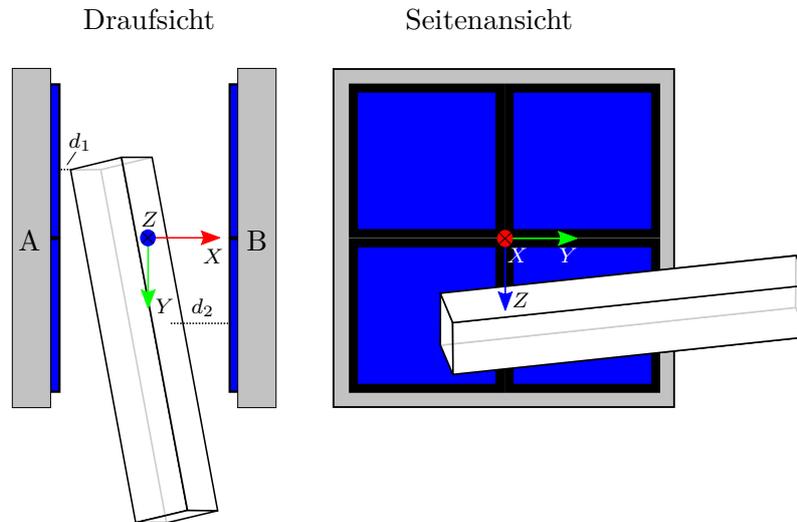


Abbildung 5.3: Beispiel für ein Objekt, dessen Pose innerhalb des Greifers versetzt ist

gilt. In anderen Worten: Das Objekt ist näher an der linken Backe als an der rechten. So sollte sich der Greifer in Richtung der negativen X -Achse bewegen, damit das Objekt bezüglich dieses Freiheitsgrades zentriert wird. Um diese Entscheidung anhand der Sensorwerte zu treffen, würde man prinzipiell die Differenz der Gesamtheit der Werte der Sensoren der linken Backe mit den Werten der Sensoren der rechten Backe betrachten. Es gibt jedoch zwei Situationen, die eine besondere Handhabung der Sensorwerte erfordert, sodass es nicht immer zweckmäßig ist, alle vier Werte pro Backe zu berücksichtigen.

An erster Stelle ist eine Situation zu nennen, die in Abbildung 5.3 zu erkennen ist. Hier werden die oberen Sensoren gar nicht vom Objekt abgedeckt. In der Praxis bedeutet das, dass die Werte dieser Sensoren wenig oder gar keine Aussagekraft über den Versatz des Objekts in der X -Achse haben (für den translatorischen Versatz in der Z -Achse sind die Werte jedoch entscheidend). An zweiter Stelle gilt, dass die Messungen nicht unbedingt korrekt wiedergeben, dass $d_1 < d_2$ gilt. Dies liegt darin begründet, dass die Messungen stark von der durch das Objekt abgedeckten Fläche abhängen, welche im dargestellten Fall für d_2 größer ist als für d_1 . Darüber hinaus wird das Objekt im Allgemeinen in weiteren Freiheitsgraden versetzt sein, d. h. in einer Drehung um die Z -Achse oder entlang der Y -Achse. Die Robustheit der Erkennung des Versatzes für die X -Achse ist damit abhängig vom Versatz in anderen Freiheitsgraden.

Aufgrund der genannten Gegebenheiten besteht die Strategie zur Regelung zunächst darin, nur die robustesten Sensorwerte zu nehmen, um die Differenzen zu bestimmen. Dies entspricht den *Kriterien 1^{er} Ordnung*. Es wird in Kauf genommen, dass die Ausrichtung für einen Freiheitsgrad kurzzeitig in die falsche Richtung laufen kann. Der Satz von *Kriterien 2^{er} Ordnung* bezieht mehrere Differenzen zwischen Sensorwerten mit ein, welche nicht unbedingt die robustesten im Sinne der Signalstärke sein müssen. Es wird allerdings festgelegt, dass die Differenzen untereinander keine widersprüchlichen Bewegungsrichtungen ergeben dürfen. Die Kriterien 2^{er} Ordnung helfen, eine präzise Ausrichtung zu erreichen.

5.2.2 Implementierung

Für die Berechnung der Differenzen in den sechs Freiheitsgraden werden die Sensoren der 2×2 -Arrays zunächst auf sechs Arten gruppiert, wie in Abbildung 5.4 dargestellt. Durch die symmetrische Anordnung der Proxels ist eine Ähnlichkeit zur Gradientenberechnung in der Bildverarbeitung erkennbar. Im Folgenden werden die zwei Stufen des Schemas zur Gradientenberechnung erläutert.

Kriterien 1^{er} Ordnung

Die Differenz, die an den P-Regler gegeben wird, ist die Differenz zwischen den beiden Sensoren aus den Gruppen *Blau* und *Grün*, welche den kleinsten Distanzwert haben. Diese seien $\min(Bl)$ und $\min(Gr)$. In dem Beispiel der Translation entlang der X -Achse bedeutet das, dass ein beliebiges Paar (A_i, B_j) für die Bewegung verantwortlich sein kann. In dem durch Abbildung 5.3 gezeigten Fall könnte es sich z. B. um das Paar (A_2, B_2) oder (A_3, B_2) handeln. Dies dient als eine grobe Maßnahme, um die Ausrichtung zu erreichen. In jedem Fall muss die Differenz größer sein als ein Schwellwert, der anhand des größeren Distanzwerts/kleineren Sensorwerts festgelegt wird. Dadurch wird garantiert, dass die Differenz bedeutend ist und nicht nur dem Rauschen der Sensorwerte entspricht. Die Schwellwerte werden durch Abbildung 5.2(b) dargestellt, wo nochmals deutlich wird, dass höhere Distanzwerte mit einem größerem Rauschen behaftet sind. Formell ausgedrückt wird die Differenz ΔT_a für translatorische Bewegungen und ΔR_a für rotatorische Bewegungen

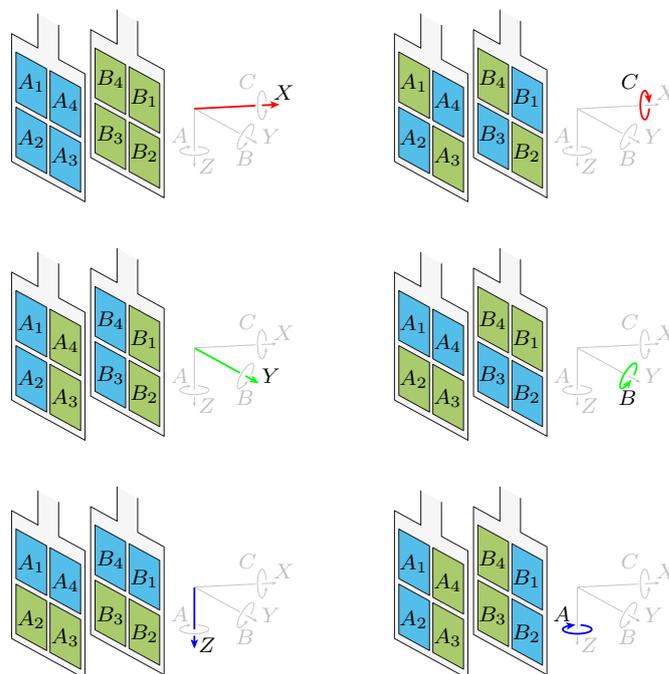


Abbildung 5.4: Die Gruppierungen der Sensoren, um einen Bewegungsradien in den sechs Raumfreiheitsgraden zu berechnen (Bildquelle: [15] ©2015 IEEE)

entlang oder um eine Achse a , wie folgt, berechnet:

$$p = (p_1, p_2) = (\min(Bl), \min(Gr)) \quad (5.1)$$

$$d(p) = p_1 - p_2, \quad (5.2)$$

$$\{\Delta T_a, \Delta R_a\} = \begin{cases} d(p), & \text{falls } |d(p)| > th(\max(p_1, p_2)) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.3)$$

$$th(x) = \begin{cases} v_1, & \text{falls } l_{n-1} < x \leq l_n \\ v_2, & \text{falls } l_{n-2} < x \leq l_{n-1} \\ \vdots & \\ v_n, & \text{falls } x \leq l_1 \end{cases} \quad (5.4)$$

Hier stellt $th(x)$ die verwendete Schwellwertfunktion dar, welche als Lookup-Tabelle implementiert ist. Die Liste $L = [l_1, \dots, l_n]$ stellt Grenzen der Intervalle, für die die Schwellwerte gelten, dar. Ein Beispiel für solche Intervalle ist in Abbildung 5.2(b) gegeben.

Kriterien 2^{er} Ordnung

Diese Kriterien realisieren eine Feinabstimmung der Ausrichtung des Greifers, auch für den Fall, dass die Kriterien 1^{er} Ordnung keinen Gradienten liefern. Ein Mehrheitsvotum von zwei blau-grünen Paaren unter Verwendung derselben Schwellwerte, wie in (5.4) wird herangezogen, um zu detektieren, ob eine Bewegung ausgeführt werden muss. Im Gegensatz zu den Kriterien 1^{er} Ordnung werden nur Paare von Sensoren berücksichtigt, die *direkt gegenüberliegend* sind in ihrer Beziehung, den Gradienten zu detektieren. Im Beispiel der Translation um die X -Achse in Abbildung 5.4 werden also nur die Paare (A_1, B_4) , (A_2, B_3) , (A_3, B_2) und (A_4, B_1) betrachtet. Von denen müssen unter der gleichen Betrachtung (5.1)-(5.4) zwei für eine Bewegung in dieselbe Richtung stimmen, wobei keine der restlichen beiden für eine Bewegung in die andere Richtung stimmen darf. Der Gradientenwert ist der Mittelwert der beiden beteiligten Differenzen. Formal ausgedrückt:

$$\{\Delta T_a, \Delta R_a\} = \begin{cases} \frac{1}{2} (d(p_i) + d(p_j)), & \text{falls } S \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} \text{wobei } S = & \exists p_i, p_j : |d(p_i)|, |d(p_j)| > 0 \wedge \\ & |d(p_i)| > th(\max(p_{i,1}, p_{i,2})) \wedge |d(p_j)| > th(\max(p_{j,1}, p_{j,2})) \wedge \\ & \text{sign}(d(p_i)) = \text{sign}(d(p_j)) \wedge \\ & \nexists p_k : p_k \neq p_i, p_j \wedge \text{sign}(d(p_k)) = -\text{sign}(d(p_i)). \end{aligned} \quad (5.6)$$

5.2.3 Phasen der Vorausrichtung

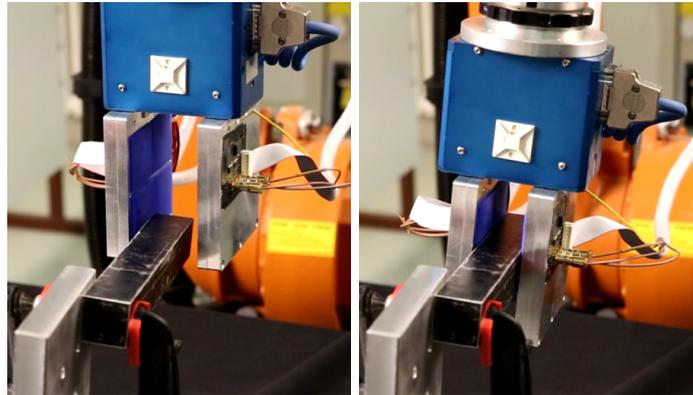
Die Vorausrichtung geschieht in zwei Phasen: In *Phase 1* ist die Öffnungsweite der Backen 50 mm und die Regelung wird wie beschrieben durchgeführt; in *Phase 2* werden die Finger langsam geschlossen, während die Regelung weiterhin die Ausrichtung des Greifers aktualisiert, bis über die taktile Modalität der Sensoren Kontakt festgestellt wird. Für leitende Objekte wird die Ausrichtung in Phase 1 bereits eine hohe Genauigkeit besitzen. Für kleinere Objekte oder Objekte aus nicht-leitendem Material, wie z. B. Holz, wird die Ausrichtung aus Phase 1 nicht so genau sein. Da durch Annäherung an das Objekt die Genauigkeit der Messungen steigt, gibt Phase 2 die Möglichkeit, die Ausrichtung insbesondere für diese Fälle zu verbessern. Eine quantitative Auswertung wird im folgenden Abschnitt besprochen.

5.2.4 Evaluation

Um die Leistung der vorgeschlagenen Methoden zu evaluieren, wurden Experimente mit einem Quader aus Metall (nicht geerdet) sowie Rundstäben aus unterschiedlichen Materialien durchgeführt, welche in Abbildung 5.5 gezeigt werden. Es wird als gegeben vorausgesetzt, dass sich die Objekte zu Beginn in allgemeiner Lage innerhalb der Greiferbacken befinden. Es wird also davon ausgegangen, dass das Objekt zuvor über ein anderes System, z. B. eine Kamera, lokalisiert wurde. Der Greifer konnte demnach in eine Pose gebracht werden, in der er in der Lage ist, das Objekt mit den Näherungssensoren wahrzunehmen. In allen Experimenten werden die zwei Phasen der Vorausrichtung durchgeführt, wobei der Versatz des Greifers zum Objekt nach jeder Phase gemessen wird. Um den Versatz zu quantifizieren, wurden die Abstände D_S , D_U , D_L zwischen den Backen und dem Objekt an vordefinierten Stellen gemessen, wie durch Abbildung 5.6 gezeigt wird. Die Sollwerte für D_S , D_U , D_L ergeben sich aus den Dimensionen der Objekte und des Greifers. Der Abstand zwischen der Außenseite der Backen und dem Objekt (D_S) wird gemessen, um den translatorischen Versatz in der X -Achse und den rotatorischen Versatz um die Z -Achse festzustellen. Für den Quader werden stattdessen D_{S1} und D_{S2} gemessen, was den Abstand zu dessen Kanten darstellt, damit zusätzlich die Verdrehung um die Y -Achse festgestellt werden kann. Um den translatorischen Versatz in der Z -Achse sowie den rotatorischen Versatz um X -Achse festzustellen, werden die Abstände zwischen dem Objekt und der Greiferbasis berechnet (D_U) sowie zwischen dem Objekt und der unteren, äußeren Kante der Backen (D_L). Alle Abstände werden vorne und hinten gemessen, sodass sich insgesamt sechs bzw. acht (für den Quader) Werte ergeben. Die Messung der genannten Abstände wurde mit einem Messschieber durchgeführt. Es wird eine Genauigkeit von 1 mm angenommen, da die Messungen händisch erfolgten. Darüber hinaus sorgen die Toleranzen bei der Montage der Backen und Sensoren für Ungenauigkeiten, von denen ebenfalls angenommen wird, dass sie etwa um 1 mm liegen.

Metallischer Quader

Details der Ausrichtung in den sechs Raumfreiheitsgraden für den Quader aus Metall werden in Abbildung 5.7 gezeigt. In Abbildung 5.7(a) ist der zurückgelegte Pfad des TCPs



(a) Der Greifer in einer Anfangskonfiguration, bevor die Vorausrichtung startet

(b) Der Greifer greift den metallischen Quader, nachdem Phase 2 abgeschlossen ist



(c) Rundstäbe aus Aluminium, PVC und Holz, welche für die Experimente verwendet wurden

Abbildung 5.5: Beispiel für einen Versuchsaufbau und die unterschiedlichen verwendeten Materialien (Bilderquelle: [18] ©2014 IEEE)

während der Ausrichtung zu sehen. Die drei Frames in [Abbildung 5.7\(a\)](#) zeigen jeweils die Anfangskonfiguration, die Konfiguration nach Phase 1 (die Backen sind 50 mm weit geöffnet) und die Konfiguration nach Phase 2 (die Sensoren berühren den Quader). Zwischen den beiden letzten Konfigurationen ist nur ein leichter Versatz erkennbar, was bedeutet, dass die Ausrichtung nach Abschluss von Phase 1 bereits sehr genau war. Durch das Schließen der Backen wird nur eine geringfügige Verbesserung erreicht. In [Abbildung 5.7\(b\)](#) wird der Verlauf der Ausrichtung für die einzelnen Freiheitsgrade angezeigt. In der oberen Hälfte sind die translatorischen Freiheitsgrade angeordnet, darunter die rotatorischen Freiheitsgrade. Die schwarze Linie kennzeichnet das Ende von Phase 1. Der größte Unterschied ist für T_z zu sehen, wo innerhalb von etwa 2 s 40 mm zurückgelegt werden. Da hier der Gradient am stärksten war, bzw. deutlich zu detektieren ist, wurden entsprechend durch den P-Regler die höchsten Geschwindigkeiten an die Robotersteuerung weitergegeben. Im Allgemeinen sind die Änderungen in den Freiheitsgraden am Anfang (bis 6 s) am stärksten, außer für R_y . Für letzteren wird deutlich, dass die Detektion des Versatzes erst möglich ist, wenn die anderen Bewegungen abgeschlossen oder fortgeschritten sind (vgl. mit R_x). Generell nähert sich jeder Freiheitsgrad kontinuierlich seinem finalen Wert mit Ausnahme von T_x , für den durch die Abhängigkeit der Messung von anderen Freiheitsgraden zunächst eine Korrektur in die falsche Richtung erfolgt, wie in [Abschnitt 5.2.1](#) besprochen. Dabei ist

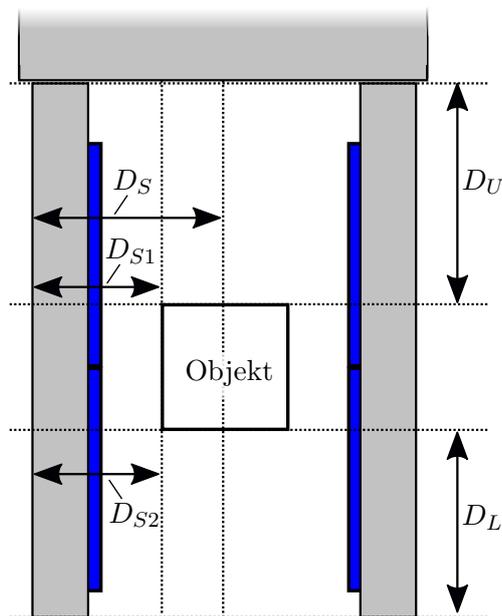


Abbildung 5.6: Messung von Abständen zur Beurteilung der Vorausrichtung; das Objekt kann hier ein Quader oder ein Rundstab sein.

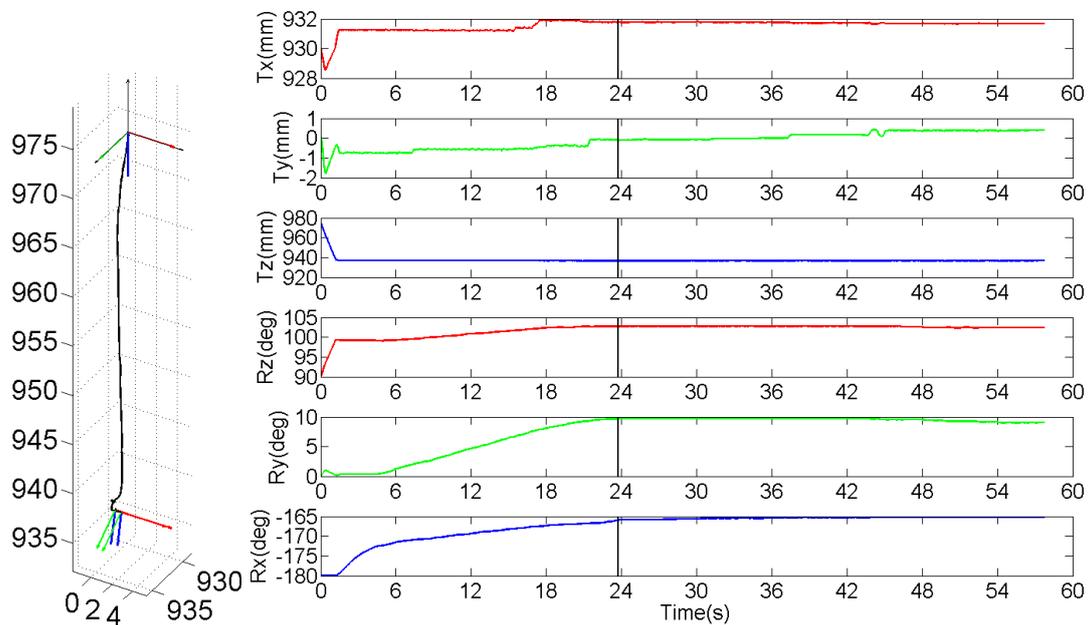
die Dauer und die Ausprägung dieser Bewegung kurz bzw. klein. Der gesamte Ablauf dauert in diesem Beispiel etwa 60 s, wobei Phase 1 \sim 24 s davon ausmacht. Quantitative Ergebnisse für die Ausrichtung sind in Tabelle 5.1 angegeben. Die beiden Zeilen zeigen die gemessene Abweichung von den Idealwerten. Fast alle Abstände sind in etwa so groß wie die festgestellte Toleranz (1 mm), d. h., die Vorausrichtung war für beide Phasen sehr genau.

Rundstäbe

Um die Robustheit der vorgeschlagenen Methode für unterschiedliche Materialien zu testen, wurden weitere Experimente durchgeführt. Drei Rundstäbe mit einem Durchmesser von 25 mm aus Holz, PVC und Aluminium wurden als Objekte verwendet (s. Abbildung 5.5(c)). Da die Rundstäbe rotationssymmetrisch sind, wurde die rotatorische Ausrichtung um die Y -Achse während der Experimente nicht durchgeführt. Unterschiedliche Startpositionen, welche in Abbildung 5.8 gezeigt werden, wurden untersucht, um auch die Robustheit

Tabelle 5.1: Gemessene Abweichungen für den Quader aus Metall

Phase	Messung Vorderseite				Messung Hinterseite			
	D_{S1} (mm)	D_{S2} (mm)	D_U (mm)	D_L (mm)	D_{S1} (mm)	D_{S2} (mm)	D_U (mm)	D_L (mm)
1	0.7	0.2	1.5	-1.8	0.7	0.2	-0.5	0.0
2	0.6	0.1	0.0	-0.7	1.1	0.6	0.5	0.6



(a) Pfad des TCPs während der Ausrichtung

(b) Zeitlicher Verlauf der Werte für die einzelnen Freiheitsgrade

Abbildung 5.7: Beispiel für den Verlauf des TCPs für die Vorausrichtung am metallischen Quader (Bilderquelle: [18] ©2014 IEEE)

bezüglich verschiedener Anfangsbedingungen zu untersuchen. In diesen Experimenten wird der Vorteil einer weitergehenden Ausrichtung in Phase 2 deutlicher.

Die Messung der Abweichungen wurden für alle drei Rundstäbe mit den vier in Abbildung 5.8 dargestellten Startpositionen durchgeführt. Die Werte für den Holzstab in beiden

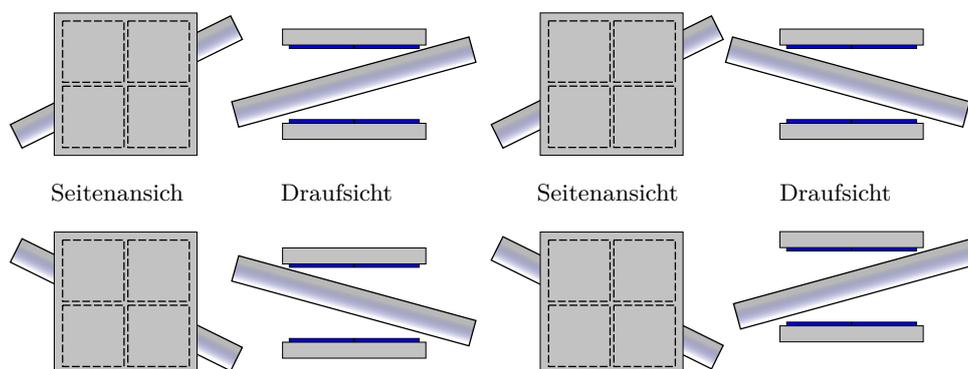


Abbildung 5.8: Vier repräsentative Startposition, um die Vorausrichtung zu untersuchen

Tabelle 5.2: Gemessene Abweichungen für den Holzstab bei den unterschiedlichen Startpositionen

Start- position	Phase	Messungen Vorderseite			Messungen Rückseite		
		D_S (mm)	D_U (mm)	D_L (mm)	D_S (mm)	D_U (mm)	D_L (mm)
1	1	9.2	3.4	-6.5	2.4	2.5	-3.2
	2	0.8	1.1	0.0	0.3	0.2	-2.1
2	1	3.7	7.1	-11.7	-1.6	-9.3	9.4
	2	0.8	-0.5	0.5	0.8	1.0	-0.3
3	1	-2.3	-9.5	8.5	-1.6	12.0	-11.0
	2	0.3	-0.2	0.7	0.3	-0.5	-0.5
4	1	5.2	-14.0	13.5	5.4	8.7	-9.7
	2	0.3	0.0	-0.3	0.3	-0.6	-0.9

Tabelle 5.3: Gemessene Abweichungen für den Rundstab aus Aluminium (nicht geerdet)

Start- position	Messungen Vorderseite			Messungen Rückseite		
	D_S (mm)	D_U (mm)	D_L (mm)	D_S (mm)	D_U (mm)	D_L (mm)
1	0.3	0.0	0.2	0.3	0.9	-1.0
2	-0.2	0.2	0.1	-0.2	1.0	-0.5
3	0.3	0.1	-0.2	0.3	0.5	-0.1
4	0.3	0.1	0.5	0.3	1.0	-1.0
1	-0.2	-0.6	-0.3	-0.2	0.8	0.0
(Gleiche Startposition)	0.3	0.2	-0.1	0.3	0.3	-0.2
	0.3	0.3	-0.2	0.3	1.7	-0.7

Phasen sind in Tabelle 5.2 eingetragen. Die Ergebnisse für den Rundstab aus PVC waren im Wesentlichen identisch und werden deshalb hier nicht extra aufgeführt. Die Abweichungen für den Rundstab aus Aluminium werden in Tabelle 5.3 aufgelistet, wobei nur die Abweichungen nach Phase 2 angegeben werden. Für den Rundstab aus Aluminium wurden zusätzlich drei Durchläufe ausgewertet, in denen die Startposition identisch war, um die Wiederholbarkeit zu analysieren.

Aus den Werten nach Phase 2 geht hervor, dass die Experimente im Allgemeinen erfolgreich, mit geringen Abweichungen für alle Rundstäbe, abgelaufen sind. Wie erwartet, sind die Abweichungen nach Phase 1 für Holz (und PVC) größer als die Abweichungen beim Rundstab aus Aluminium. Am Ende von Phase 2 kann die Ausrichtung für die nicht leitenden Materialien jedoch signifikant verbessert werden. Die drei Wiederholungen mit gleicher Startposition für den Rundstab aus Aluminium zeigen, dass das System konsistente Ergebnisse liefert. Insgesamt zeigt dieses Experiment, dass eine zufriedenstellende Vorausrichtung für die unterschiedlichen Konditionen mit dem System erreicht werden kann.

5.3 TNS-basierte Haptische Exploration

Die *Haptische Exploration* beschäftigt sich damit, Informationen über Objekte und die Umwelt zu eruieren, wobei dazu der Tastsinn und eine systematische Strategie der Exploration verwendet werden. Allgemein gesagt, zielt die Strategie darauf ab, einen mit taktilen Sensoren ausgestatteten Greifer bzw. End-Effektor an unbekannte Regionen des Arbeitsraums zu bringen, um dort berührungsbasiert Informationen zu sammeln. Klassischerweise fallen darunter geometrische Merkmale und Oberflächenmerkmale, wie Textur, aber auch weitere Merkmale wie die Deformierbarkeit oder Temperatur der Region. Mit der Ortsauflösung der Sensoren und den kinematischen Transformationen können lokale Berührungsmarkmale verwendet werden, um globale geometrische Modelle zu füttern.

Die Verfügbarkeit von den beiden Modalitäten, Berührung und Annäherung, eröffnet die Möglichkeit, Strategien der Haptischen Exploration zu erweitern.¹ In diesem Abschnitt werden grundlegende annäherungs- und berührungsbasierte *Skills* gezeigt, die verwendet werden können, um die Geometrie eines Objekts erfassen zu können. Diese Ideen können als Erweiterung des Ansatzes in [30] angesehen werden. In einer weiterführenden Arbeit kann der hier vorgestellte Ansatz dann zu einem vollständigen System für Haptische Exploration erweitert werden. Folgende Skills, basierend auf Proximity Servoing, wurden umgesetzt:

Detektion von Kanten und Ecken Sobald eine Vorausrichtung an das Objekt erreicht ist, wird mit der taktilen Modalität detektiert, welche Sensoren beim Schließen der Backen aktiviert werden. Um eine Kante oder Ecke zu finden, exploriert der Greifer das Objekt in 1 mm-Schritten mit der taktilen Modalität, bis ein zuordenbares Aktivierungsmuster erreicht wird, wie durch Abbildung 5.9 veranschaulicht wird. Bei einer Kante sind es zwei Paare von Sensoren und bei einer Ecke ist es ein Paar.

Detektion von gekrümmten Formen Die Anwesenheit einer Krümmung bedeutet, dass der Greifer während der berührungslosen Exploration seine Orientierung anpassen muss, d. h., er führt Proximity Servoing in für die rotatorischen Freiheitsgrade um X , Y und Z durch.

Näherungsbasierte Verfolgung von Merkmalen Wenn ein Merkmal (z. B. eine Kante) detektiert wird, dessen Ausdehnung weiter ist als durch die lokale Wahrnehmung der Sensoren erfassbar, so ist es nützlich, die Näherungsmodalität zur Exploration zu verwenden. Ein Skill zur näherungsbasierten Verfolgung von Merkmalen bewegt den Greifer entlang der gewünschten Richtung, um diese Ausdehnung des Merkmals zu bestimmen, was auch als eine Form des Proximity Servoings ist. Da kein Kontakt hergestellt werden muss, kann

¹ Implizit wird an dieser Stelle davon ausgegangen, dass die Annäherungsmodalität unter dem Begriff der Haptik fällt. Ohne diese Kategorisierung forcieren zu wollen, liegt dieser Idee zugrunde, dass die Annäherungsmodalität eine Schlüsseleigenschaft mit der herkömmlichen Haptik gemeinsam hat: Wie im Falle der taktilen Modalität hängt ihre vollständige Interpretation von der Propriozeption ab.

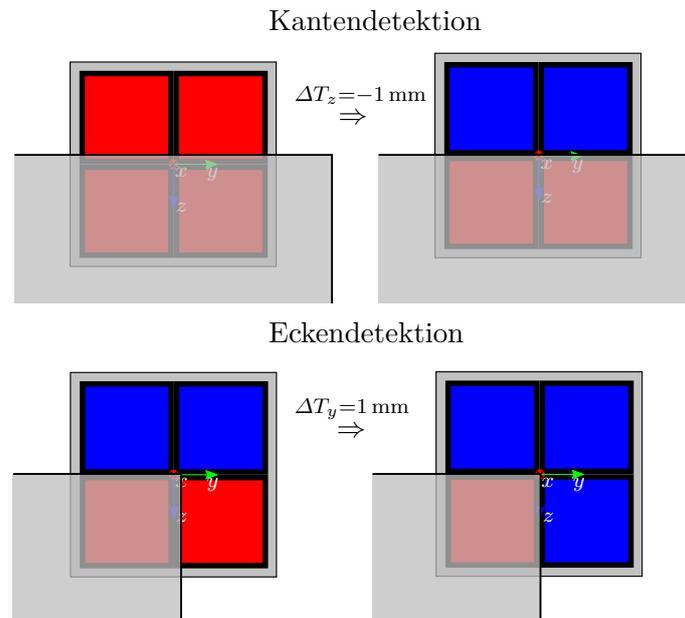


Abbildung 5.9: Der letzte taktile Explorationsschritt, in dem der Greifer eine Kante (oben) bzw. Ecke (unten) detektiert; durch Rot wird angezeigt, dass der taktile Sensor aktiviert wird, wenn sich der Greifer schließt; durch Blau, dass dies nicht der Fall ist. Diese Situationen sind gespiegelt für die andere Backe des Greifers. (Bildquelle: [18] ©2014 IEEE)

dieser Skill schneller ausgeführt werden als ein iteratives Abtasten. Darüber hinaus ist ein Teil des Skills zu bestimmen, wenn Transitionen zu einem neuen Merkmal stattfinden. Z. B. kann das Ende einer Kante, die verfolgt wird, daran erkannt werden, dass die Werte der Sensoren, die in die Vorschubsrichtung zeigen, abfallen.

5.3.1 Evaluation

Um diesen Ansatz zu evaluieren, wurde eine Exploration für drei Platten aus Aluminium, bei denen die oben besprochenen Merkmale vorkommen, durchgeführt. Das erste Objekt ist ein gerades Segment, also eine Kante, mit zwei Ecken. Das zweite Objekt ist ein lineares Segment mit einer zusätzlichen schrägen Stufe. Das dritte Objekt besitzt zwei Ecken und ein gekrümmtes Segment. Die Objekte und die Pfade des TCPs beim Explorieren werden in [Abbildung 5.10](#) dargestellt. In jedem Experiment befindet sich das Objekt in allgemeiner Lage innerhalb des Greifers, sodass es durch die Sensoren detektiert werden kann. Dann richtet sich der Greifer am Objekt aus und fängt an, die oben beschriebenen Skills durchzuführen, mit dem Ziel, jeweils die beiden Endpunkte bzw. Ecken, die das Objekt begrenzen, zu finden.

Die in [Abbildung 5.10](#) dargestellten Pfade beinhalten den kompletten Vorgang, d. h. auch das Vorausrichten zu Beginn. An den Punkten, an denen die Ecken detektiert wurden, werden die entsprechenden Frames des TCPs eingezeichnet. Es ist zu erkennen, dass die Form der Objekte durch die Bahn des TCPs, und damit durch die Exploration, geometrisch korrekt wiedergegeben wird. Da es keine genaue Vermessung der realen Objekte gibt,

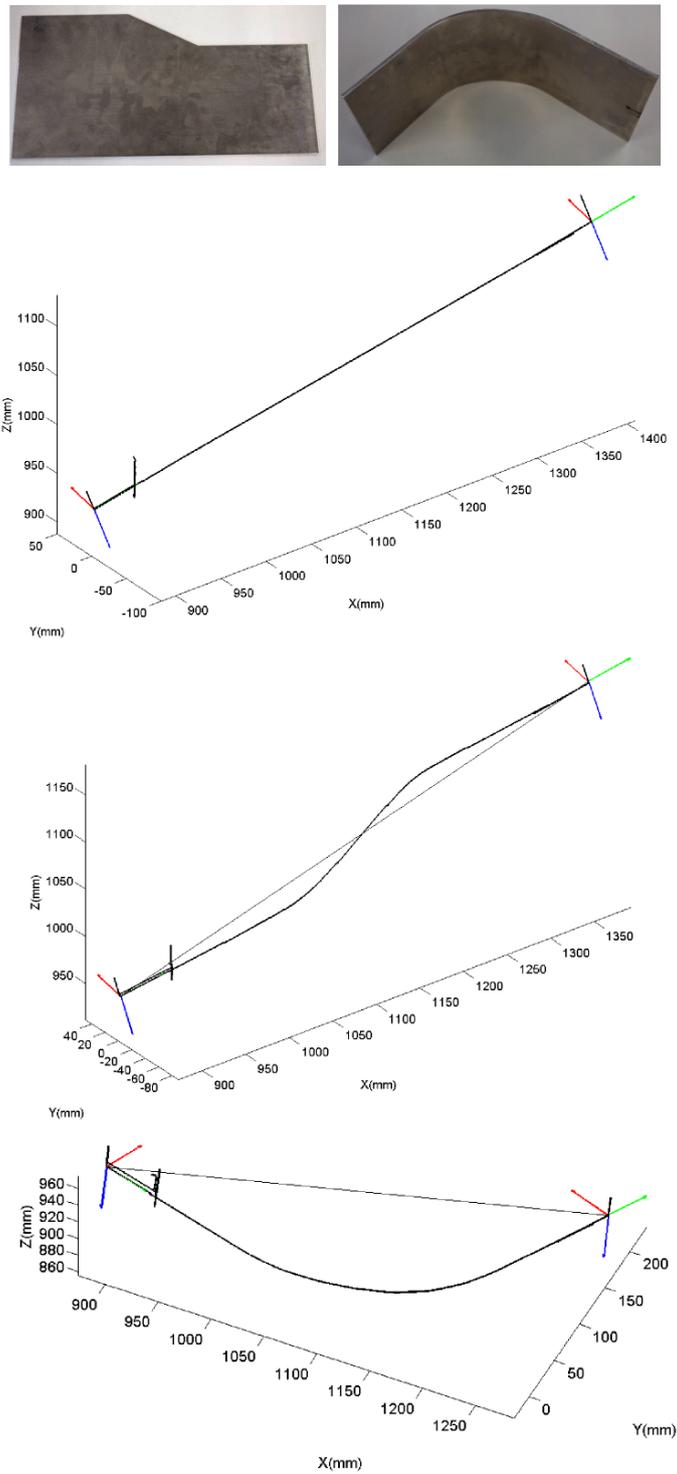


Abbildung 5.10: Objekte, die exploriert wurden, die korrespondierende Trajektorie des TCPs und die Verbindungsstrecken zwischen Endpunkten (Ecken) (Bildquelle: [18] ©2014 IEEE)

Tabelle 5.4: Differenz zwischen realem und gemessenem Abstand zwischen den Endpunkten der Objekte

	Obj. 1	Obj. 2	Obj. 3
Real Dist. (mm)	530	533	437
TCP Dist. (mm)	520	525	434
Differenz (mm)	10	8	3

können die erfassten Trajektorien nicht direkt mit den realen Geometrien verglichen werden. Deshalb wird der reale Abstand der Ecken, gemessen mit einem Lineal, und der durch die Exploration gewonnene Abstand zwischen den Ecken bestimmt und verglichen. Die Daten für die drei Objekte sind in Tabelle 5.4 aufgelistet. Es ist zu erkennen, dass keiner der Fehler größer als 10 mm ist. Zusammen mit der qualitativen Bewertung der Übereinstimmung der Formen ist das bereits ein gutes Ergebnis. Es ist jedoch anzumerken, dass durch die kontaktlose Exploration eine Tiefpasswirkung eintreten kann, sodass eckige Merkmale, wie in dem Fall der Stufe in Objekt 2, durch die kontaktlose Exploration abgerundet dargestellt werden. Hier wäre wieder ein oder wären mehrere Kontakte erforderlich, um die Merkmale genau abzubilden.

5.4 Telemanipulation mit kraftbasierter Darstellung von Näherungsfeldern

Eine Herausforderung bei der Konzeption eines Telemanipulationssystems ist es, dem Operateur hilfreiches sensorisches Feedback zu seiner Aufgabe zu geben. Die Krafterückkopplung von taktilen Messungen wurde bisher mehrfach untersucht und weiterentwickelt, hat aber dasselbe Problem wie die taktile Wahrnehmung eines autonomen Systems: Um etwas wahrnehmen zu können, muss eine Berührung hergestellt werden. Oft ist die Differenz der Kraft, welche notwendig ist, um etwas wahrzunehmen, bereits sehr nah an einer Kraftereinwirkung, welche die Aufgabe scheitern lässt. Deshalb können schon bei kleinen Latenzen nur sehr langsame Bewegungen durchgeführt werden, damit diese Schwelle nicht überschritten wird. Die Unterstützung des Operateurs durch eine Krafterückkopplung, die auf Näherungssensorik basiert, kann dieser Schwierigkeit entgegenwirken.

In diesem Abschnitt wird auf der Grundlage des bisher vorgestellten Systems ein Konzept zur *Telemanipulation mit kraftbasierter Darstellung von Näherungsfeldern* entwickelt. Zuerst werden die Anpassungen und Erweiterungen am bestehenden System beschrieben. Dann wird das Konzept der Telemanipulation vorgestellt. Dieses kann rein unterstützend wirken, aber auch den Benutzer mit Teilautonomie (teilweise) ablösen. Zum Abschluss wird eine ausführliche Nutzerstudie besprochen, in der das System validiert wurde. Die Ergebnisse aus diesem Abschnitt wurden auf der Konferenz *IROS 2015* vorgestellt [15].

5.4.1 Modifizierung des Zwei-Backen-Greifers

Zwei Kameras (Webcam-Module) wurden auf jeweils einer Seite der Schiene, auf der sich die Backen bewegen, montiert. Hierdurch wird es dem Benutzer ermöglicht, visuell zu beurteilen, ob ein Objekt in der lokalen X - und Y -Achse des Greifers (des TCPs)

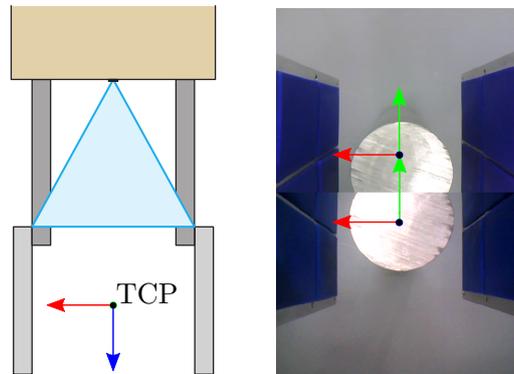


Abbildung 5.11: Links: schematische Darstellung der Position und des Sichtfelds der Kameras; rechts: ein Blick der beiden Kameras auf einen Zylinder, der zwischen den Backen zentriert ist (Bildquelle: [15] ©2015 IEEE)

zentriert ist, wie durch Abbildung 5.11 rechts dargestellt wird. Darüber hinaus wurden Verlängerungselemente für die Backen eingeführt, wie in Abbildung 5.11 links dargestellt wird. Diese garantieren, dass das Sichtfeld der Kameras mit dem Bereich übereinstimmt, in dem die Sensoren Objekte detektieren können. Die visuelle Rückmeldung allein ist der Basisfall zur Beurteilung der Systemfunktionalität. Durch diesen Entwurf werden Verdeckungen fast vollständig vermieden, sodass diese beim Vergleich des Basisfalls mit dem System mit Kraft-Rückkopplung keine entscheidende Rolle spielen. Der künstliche Versatz des TCPs weiter entfernt vom Roboterflansch führt im Allgemeinen zu Nachteilen, da dadurch etwa der Arbeitsraum des Roboters reduziert wird. Die Länge der Backen stellt auch eine nicht optimale Lösung dar, wenn mit hoher Kraft gegriffen wird, da durch Hebelwirkung ein hohes Drehmoment an der Basis der Finger auftritt. Aus diesen Gründen wird die vorgeschlagene Konstruktion außerhalb der hier angedachten Evaluation nicht als vorbildlich angesehen.

5.4.2 Haptisches Eingabegerät

Es wird das weit verbreitete *Sigma.7* von *Force Dimension* als Eingabegerät und Gerät zur Rückkopplung für Kräfte verwendet. Es besitzt die Fähigkeit, Kräfte und Momente in allen sechs Raumfreiheitsgraden darzustellen. Der siebte Freiheitsgrad, der über den Greifer bereitgestellt wird, wird nur für Vorgaben verwendet, jedoch nicht zur Darstellung von Kräften. Der berechnete Gradient entspricht annäherungsweise der Abweichung der Pose des im Greifer befindlichen Objekts zum TCP in Metern und in Grad. Dieser Gradient wird auf Kräfte und Momente abgebildet, die direkt über die API des Geräts gesetzt werden können. Obwohl der Gradient selbst mit einem PID-Regler bearbeitet wird, ist das Signal nicht den Bedürfnissen der Darstellung als Kraft-Anzeige angepasst. Deshalb wird das Signal noch einmal mit einem für die Anzeige optimierten PID-Regler verrechnet, wie den folgenden Abschnitten näher erläutert wird.

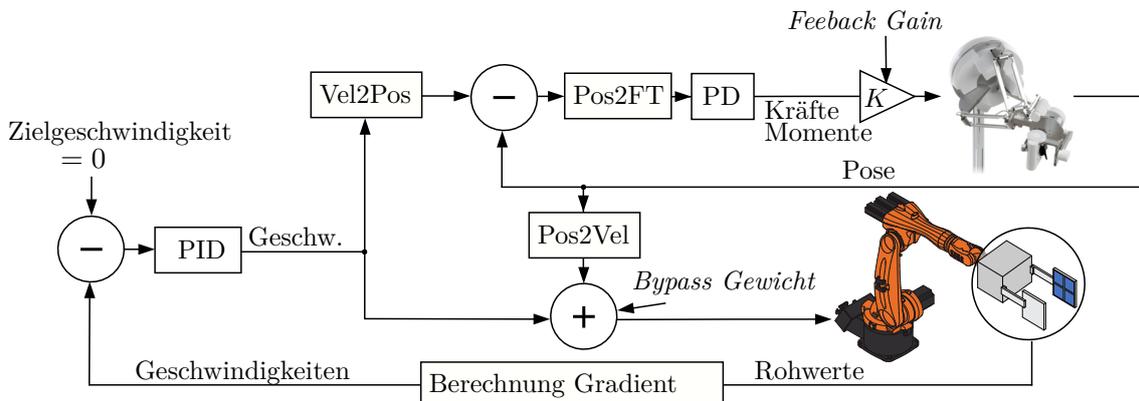


Abbildung 5.12: Überblick über den kaskadierten Regler mit den wichtigsten Hardware-Komponenten; der äußere Regler ergibt Geschwindigkeiten, welche an die Robotersteuerung weitergegeben werden, während der innere Regler die Kräfte und Momente am Eingabegerät darstellt.

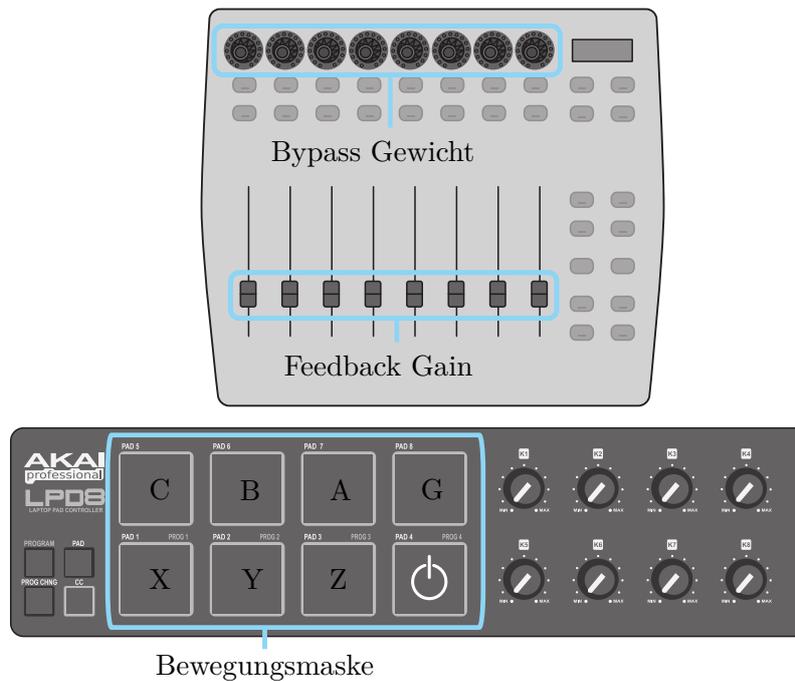
5.4.3 Kaskadierter Regler

Abbildung 5.12 liefert einen Überblick über den vorgeschlagenen Regler. Er ist darauf ausgelegt, Geschwindigkeiten an den Roboter rauszugeben. Es wird die einfachste Möglichkeit verwendet, durch das Sigma.7 Geschwindigkeitsvorgaben des Benutzers zu erfassen: Sie werden entsprechend der Auslenkung des End-Effektors des Sigma.7 skaliert. Zusätzlich ist die Idee, Kräfte am Gerät abzubilden, die darstellen, wie weit die Vorgabe des Benutzers von der Vorgabe durch die Sensoren abweicht. Dies führt zu vielen Übergängen zwischen physikalischen Einheiten im Regler, welche in Abbildung 5.12 angegeben sind. So bedeutet bspw. das Kästchen mit dem Inhalt *Pos2FT*, dass der Wert einer Pose als Kräfte und Momente interpretiert wird. Es handelt sich nur um eine semantische Umwandlung, die Zahlenwerte bleiben unverändert. Die tatsächliche Skalierungen der Werte passiert dann über die jeweiligen Regler.

Die Sollvorgabe an den äußeren Regler ist die Geschwindigkeit Null für alle sechs Freiheitsgrade. Genauer gesagt, ist die Vorgabe eine Geschwindigkeit Null relativ zum Objekt. Im Allgemeinen sind Objekte fixiert, was bedeutet, dass auch die globale Geschwindigkeit Null ist. Trotzdem ist der Regler darauf ausgelegt, mit langsamen Objektbewegungen umzugehen. Der Gradient, der aus den Sensorwerten berechnet wird, wird als Geschwindigkeit interpretiert und durch einen PID-Regler verarbeitet. Wird dieser Wert direkt an den Roboter ausgegeben, resultiert daraus eine autonome Ausrichtung an das Objekt, wie bereits in Abschnitt 5.2 beschrieben. Die Geschwindigkeitsvorgabe durch die Sensoren kann aber auch als Sollvorgabe für den Kraft-Positions-Regler dienen, der das Sigma.7 antreibt. Die Geschwindigkeitsvorgaben der Sensoren werden als Pose interpretiert, damit diese an die Ausgabe des Sigma.7 angepasst sind. Ein PD-Regler wird verwendet, um die Differenz zu verstärken, welche auf Kräfte und Momente abgebildet und dann direkt über die API des Geräts gesetzt wird. Wenn der Operateur vollen Widerstand leistet, d. h., den End-Effektor des Sigma.7 in der Null-Stellung hält, wird er eine Kraft spüren, die direkt

dem Gradienten aus den Näherungssensoren entspricht. Falls er keinen Widerstand leistet und somit nur minimale Kräfte spürt, wird der End-Effektor des Sigma.7 eine Auslenkung erfahren, die zu den Geschwindigkeiten des Gradienten korrespondiert, wodurch der Roboter sich entsprechend (selbstständig) bewegen wird.

5.4.4 MIDI-Geräte



Bewegungsmaske

Abbildung 5.13: Die MIDI-Eingabegeräte, welche sich am Bedienplatz des Operators befinden; die Zuordnung der Funktionalität zu Knöpfen und Fadern ist gekennzeichnet. Die Bewegungsmaske enthält einen Ein/Aus-Knopf, der für alle Freiheitsgrade gilt, sowie einen Knopf, der den Greifer aktiviert/deaktiviert. (Bildquelle: [15] ©2015 IEEE)

Die MIDI-Geräte bieten im Sinne der Benutzerfreundlichkeit vielseitigen Zugriff auf Systemeinstellungen. Der Benutzer kann die Verstärkung für die Kraftausgabe, das *Feedback Gain*, durch die Fader (Schieberegler) am Mischpult einstellen, wie in Abbildung 5.13 gezeigt. Da das Mischpult Motorfader besitzt, können Voreinstellungen auch abgerufen werden. Über das *Bypass-Gewicht* kann der Benutzer die Gradienteninformation am Kraft-Regler vorbei direkt an die Robotersteuerung weiterleiten. Wählt der Benutzer eine direkte Weiterleitung für Freiheitsgrade, so wird der Roboter sich in diesen selbstständig ausrichten. Somit kann das Verhalten des Systems in der sogenannten *Shared Autonomy* eingestellt werden. Wird das Feedback Gain für einen Freiheitsgrad auf Null gesetzt, so hat der Benutzer volle Kontrolle über die Geschwindigkeit dieses Freiheitsgrades ohne Kraftrückkopplung. Vorausgesetzt ist, dass gleichzeitig das Bypass-Gewicht auf Null gesetzt ist. Eine weitere interessante Variante ist die, in der die Bewegungsvorgaben für den Roboter extern erfolgen. Das Sigma.7 kann als *reines Anzeigegerät* verwendet werden, worüber der Mensch dann haptisch nachvollziehen kann, wie der Roboter sich um das Objekt herum bewegt. Das

Touchpad mit Hintergrundbeleuchtung wird verwendet um die Freiheitsgrade des Systems direkt ein- oder auszuschalten, also um die *Bewegungsmaske* zu setzen (s. Abbildung 5.13). Der Vorteil der MIDI-Geräte ist, dass die konfigurierten Systemparameter direkt durch Leuchthinweise und Positionen der Fader erkennbar sind.

5.4.5 Evaluation

Das Ziel der Evaluation ist es, den Einfluss des Kraft-Feedbacks basierend auf den Näherungsfeldern bezüglich Intuitivität und Auslastung (engl. *workload*) des Nutzers zu eruieren. Mithilfe einer Nutzerstudie soll herausgefunden werden, wie das System die Aufgaben im Bereich des Greifens und Explorierens (s. u.) hinsichtlich Genauigkeit und Anstrengung beeinflusst und ob sich das System gemäß der Erwartung der Benutzer verhält. Dazu werden drei Operationsmodi verwendet:

- *Modus 1, ohne Kraft-Feedback*: Der Benutzer muss sich nur auf visuelles Feedback verlassen und kontrolliert alle zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade, um die Aufgaben zu lösen. Eine Kamera, die über dem Roboter montiert ist, und die Kameras im Greifer stehen für diesen Zweck zur Verfügung.
- *Modus 2, partielles Kraft-Feedback/partielle Autonomie*: Der Benutzer verlässt sich auf visuelles Feedback und kontrolliert die translatorischen Freiheitsgrade, um die Aufgaben zu lösen.
- *Modus 3, volles Kraft-Feedback*: Der Benutzer verlässt sich auf visuelles Feedback und kontrolliert alle verfügbaren Freiheitsgrade.

Modus 1 ist die Baseline, also wird hierdurch ein Referenzdatensatz erzeugt. Mit Modus 2 ist es möglich zu untersuchen, ob die Auslastung des Nutzers reduziert werden kann, wenn das System teilweise autonom agiert, und Modus 3 stellt die vollen Fähigkeiten des Systems dar. Die Stärken von taktilen Sensoren und Näherungssensoren sind in Szenarien mit Verdeckungen am deutlichsten, d. h., wenn sie visuelle Wahrnehmung komplementär ergänzen. Trotzdem wurde mit Modus 1 eine strenge Baseline mit vollständigem visuellem Feedback, frei von Verdeckungen, gewählt, um den Beitrag der Sensorik am deutlichsten erkennen zu können. Dementsprechend wurde der Greifer, wie in Abschnitt 5.4.1 beschrieben, mit Kameras ausgestattet, sodass die Aufgaben ohne Kraft-Feedback lösbar sind. Das visuelle Feedback wird beispielhaft in Abbildung 5.11 gezeigt.

Die Nutzerstudie besteht aus Aufgaben für die Nutzer, welche Abstraktionen von konkreten Anwendungsfällen in Telemanipulationsszenarien sind. Es könnte sich z. B. um ein Telemanipulationsszenario in einem Gefahrengebiet o. ä. handeln, in dem eine direkte Sicht auf den Roboter gehindert ist, aber keine bedeutenden Latenzen durch lange Signalstrecken auftreten. Die Aufgaben sind das Navigieren, Greifen und Umgreifen sowie die kontaktlose Exploration von Objekten. Diese werden in drei Experimenten getestet, welche in Abbildung 5.14 schematisch dargestellt sind. Die Experimente sind nach Schwierigkeit aufsteigend sortiert. Unter anderem steigt die Schwierigkeit dadurch, dass zunehmend mehr Freiheitsgrade nötig sind, um die jeweilige Aufgabe zu erfüllen. Die Definition der Freiheitsgrade ist Abbildung 5.4 zu entnehmen. Die Experimente sind wie folgt beschrieben:

- Experiment 1: Navigiere zu einem stehenden Zylinder und greife diesen. Verfügbare Freiheitsgrade: X und Y . Dann, navigiere zu einem stehenden Quader, greife diesen und wähle einen weiteren Griff, indem einmal um Z gedreht wird. Verfügbare Freiheitsgrade: X, Y und A . Das Umgreifen wird nicht in Modus 2 ausgeführt, da in diesem die rotatorischen Freiheitsgrade dem Benutzer nicht zur Verfügung stehen.
- Experiment 2: Navigiere zu einem liegenden Quader, greife diesen von oben, d. h., zentriere in X und “tauche” dann in Z , um zu greifen. Führe dann einen weiteren Griff durch, indem um Y im Uhrzeigersinn gedreht wird. Verfügbare Freiheitsgrade: X, Z und B .
- Experiment 3: Im ersten Teil, exploriere eine gekrümmte Form, ohne diese zu berühren, und greife am ersten Wegpunkt zu. Verfügbare Freiheitsgrade: X, Y und A . Im zweiten Teil, exploriere eine weitere gekrümmte Form und greife am zweiten Wegpunkt zu. Verfügbare Freiheitsgrade: X, Y, Z, A und B .

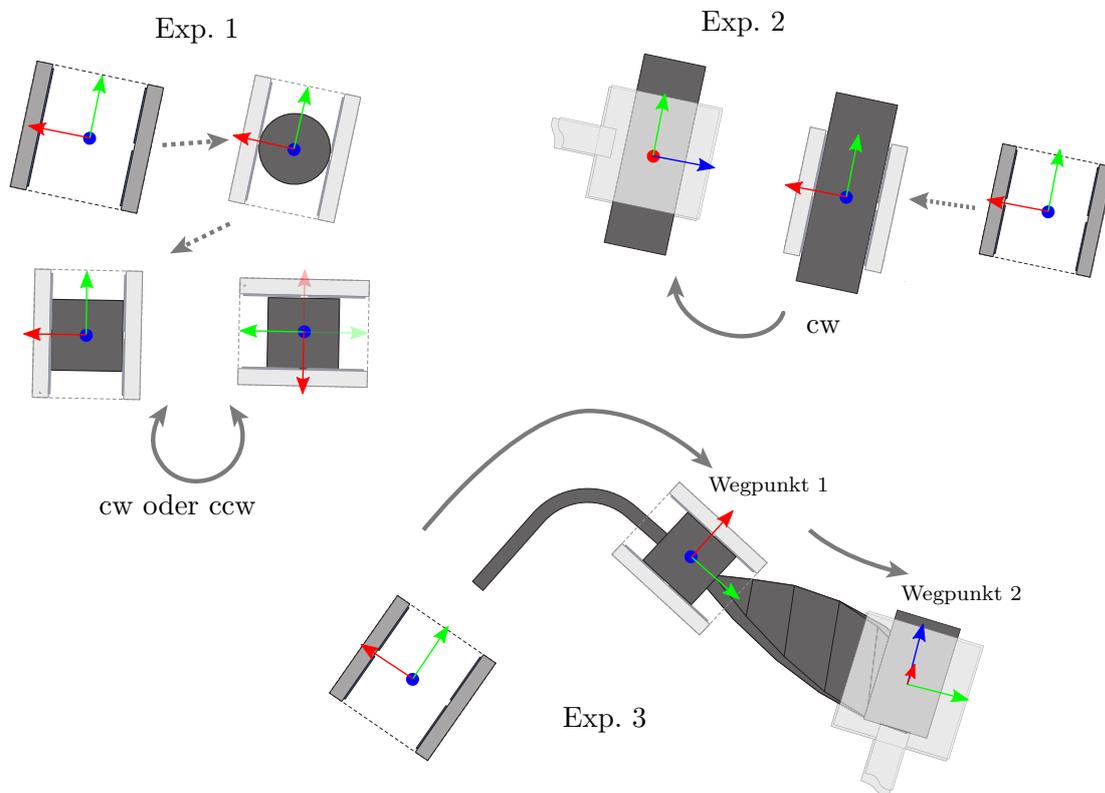


Abbildung 5.14: Die Experimente, welche von den Probanden durchgeführt wurden (Bildquelle: [15] ©2015 IEEE)

Da alle Probanden die Experimente in allen Modi durchgeführt haben, handelt es sich um ein sogenanntes *within-subjects design*. Um das Verfälschen der Daten durch Lerneffekte zu vermeiden, war es daher notwendig, für jeden Probanden eine zufällige Reihenfolge der Modi festzulegen. Jeder der drei Modi war jeweils genauso häufig an erster, zweiter oder dritter Stelle in den Versuchen. Experimente 1 und 3 werden in allen drei Modi

durchgeführt, wobei Experiment 2 nur in den Modi 1 und 2 durchgeführt wird, da es nicht möglich ist, die Aufgabe in Modus 2 zu bewältigen (dem Benutzer steht die zum Umgreifen notwendige Drehung nicht zur Verfügung). Im Rahmen der Studie durften Nutzer die MIDI-Geräte nicht verwenden, um Parameter anzupassen, da weitere Zeit für die Eingewöhnung notwendig gewesen wäre. Der Versuchsleiter hingegen konnte mithilfe der MIDI-Geräte schnell die Parameter für den jeweiligen Versuch einstellen.

Für die Nutzerstudie wurden 21 Probanden engagiert. Es handelte sich dabei überwiegend um unerfahrene Nutzer bezüglich der Verwendung von Telemanipulationssystemen oder haptischen Eingabegeräten, wie in Abbildung 5.15 an dem Item *Vorkenntnisse* erkennbar wird. Mehrere Datensätze wurden aus den Experimenten gesammelt:

- Der NASA TLX-Fragebogen [33], [73], welcher um weitere Fragen ergänzt wurde,
- Signale von einem Oxymeter, umfassend Herzfrequenz (HF) und Herzfrequenz-Variabilität (HFV),
- die Verschiebung der Objekte während der Manipulation,
- sowie die Eingabe der Benutzer und die Bewegung des Roboters.

Die Ergebnisse werden in den folgenden Unterabschnitten diskutiert. Bevor die Experimente starteten, wurden die Probanden etwa 10 Minuten mit dem System vertraut gemacht. Dazu hatten sie die Aufgabe, zu einem Quader zu navigieren und diesen zu greifen. Dies ermöglichte ihnen, sich an das Bezugssystem der Bewegungen und an das Kraft-Feedback zu gewöhnen. Insgesamt war jeder Proband zwischen 1 und 1,5 Stunden mit den Versuchen beschäftigt. Die Wichtigkeit einer korrekten Ausführung vor der Schnelligkeit derselben wurde betont.

NASA TLX-Fragebogen mit zusätzlichen Fragen

Der NASA TLX-Fragebogen (engl. *task load index*) wurde verwendet, da es ein bewährtes Instrument ist, um subjektive Auslastung durch eine Aufgabe aufzuzeigen. Allerdings haben nicht alle Dimensionen eine starke Relevanz für die hier vorliegende Nutzerstudie. Da die Probanden dazu angewiesen wurden, nicht auf die Ausführungszeit zu achten, betrifft dies insbesondere die Dimension *Zeitliche Anforderung*. Darüber hinaus wurde der Fragebogen mit Fragen zur Benutzerfreundlichkeit erweitert. Der Fragebogen wurde pro Betriebsmodus angewandt, dabei umfasste er jeweils die drei Experimente. Abbildung 5.15 zeigt die Evaluation der einzelnen Dimensionen des TLX-Fragebogens sowie die Frage nach den Vorkenntnissen. Abbildung 5.16 zeigt die Gesamt-Bewertung der TLX-Fragebögen und die Bewertung der zusätzlichen Fragen. Die Boxplots zeigen den Median, wobei innerhalb der Rechtecke 50% der Daten liegen. Die *Whisker* zeigen den letzten Datenpunkt, der kein Ausreißer ist, und Kreuze sind Ausreißer.

Die Gesamtbewertungen des TLX-Fragebogens, welche den Mittelwerten über die einzelnen Dimensionen entsprechen, zeigen, dass die Aufgaben einen leichten bis mittleren Anspruch an die Probanden stellten. Dabei ist die Auslastung für Modus 2, d. h. für das System mit Teilautonomie insgesamt etwas niedriger. Die Dimension mit der höchsten Einzelbewertung

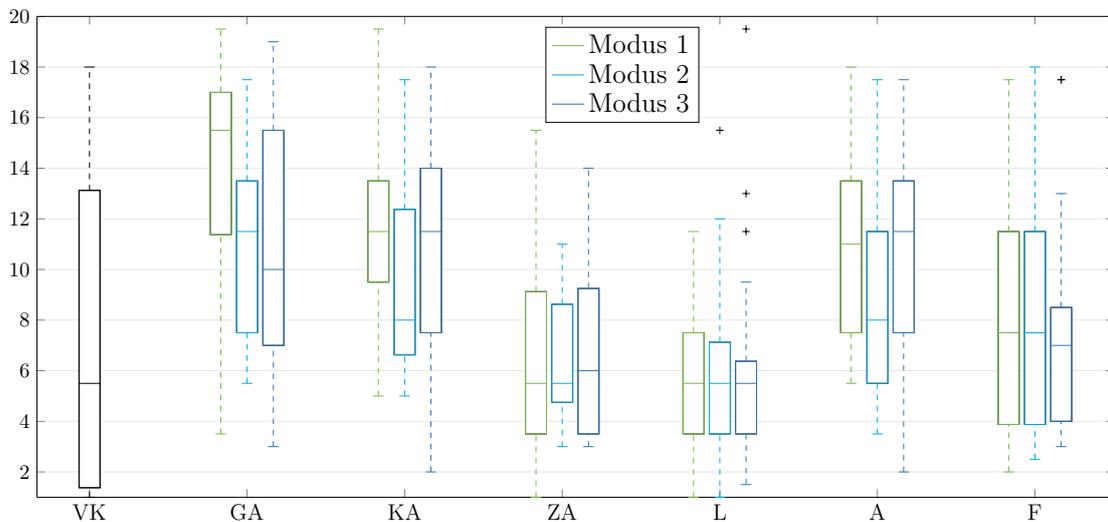


Abbildung 5.15: TLX-Fragebogen mit Boxplot-Darstellung für die einzelnen Dimensionen: Vorkenntnisse (VK), Geistige Anforderung (GA), Körperliche Anforderung (KA), Zeitliche Anforderung (ZA), Leistung (L), Anstrengung (A), Frustration (F) (Bildquelle: [15] ©2015 IEEE)

ist die *Geistige Anforderung*, was auf die Schwierigkeit zurückgeführt werden kann, die räumliche Orientierung zu behalten sowie das Kräfte-Feedback zu interpretieren. Gefolgt wird die Geistige Anforderung von der *Körperlichen Anforderung* und der *Anstrengung*. Die Probanden gaben an, dass die Verwendung des Sigma.7 über längere Zeiträume anstrengend war, sowie dass bereits die Navigation ohne Feedback-Situationen mit dem Gerät eine gewisse Schwerfälligkeit hatte.

Die größten Differenzen zwischen den Modi sind in den Dimensionen Geistige Anforderung, Körperliche Anforderung und Anstrengung auszumachen. Die Geistige Anforderung ist geringer, wenn das Feedback aktiv ist, wobei dieser Unterschied für Modus 2 am deutlichsten ausfällt. Die Körperliche Anforderung ist nur für Modus 2 reduziert. Das Gleiche gilt für die Anstrengung. Diese Ergebnisse zeigen, dass das Kraft-Feedback an sich die Aufgaben nicht entscheidend erleichtert, dass dies aber durch die Teilautonomie erreicht werden kann (Modus 2). Im Allgemeinen ist die Varianz der Bewertung für Modus 3 am größten.

Die zusätzlichen Fragen, die den Probanden gestellt wurden, bezogen sich auf die *Durchführbarkeit*, auf die *Veränderung* und auf das *Verhalten* des Systems. Die Durchführbarkeit ist die subjektive Einschätzung, wie gut die Aufgabe im gegebenen Modus zu bewältigen ist. Bewertet wird sie von "schlecht" bis "gut". Mit der Veränderung wird beurteilt, ob die Hinzunahme des Kraft-Feedbacks die Aufgabe erschwert oder erleichtert. Die Bewertungen liegen zwischen "erschwert" und "erleichtert". Die Probanden beurteilten zuletzt, ob das Verhalten des Systems ihren Erwartungen entsprach oder nicht. Die Skala lässt Bewertungen von "gering" bis "hoch" zu. Der genaue Wortlaut kann dem Nachdruck des Fragebogens im Anhang entnommen werden (s. Abschnitt A.1).

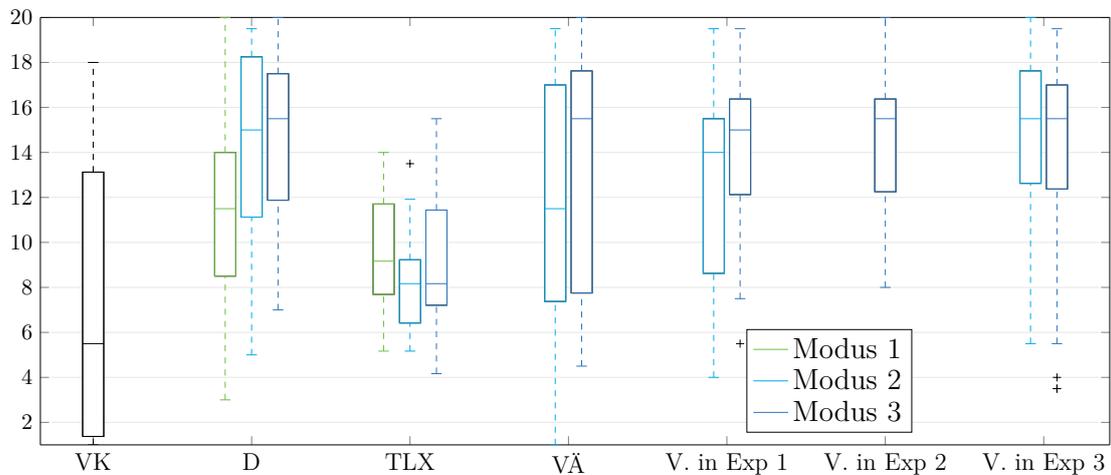


Abbildung 5.16: Zusatzfragen und Gesamtbewertung des TLX-Fragebogens: Vorkenntnisse (VK), Durchführbarkeit (D), Gesamtbewertungen TLX, Veränderung (VÄ), Verhalten in Exp. 1 bis 3 (Bildquelle: [15] ©2015 IEEE)

Die Durchführbarkeit betreffend gibt es eine deutliche Verbesserung durch das System mit Feedback, wobei der Konsens zu dieser Aussage für Modus 3 geschlossener ist (weniger Varianz). Diese Bewertung deckt sich mit Freitext-Antworten der Teilnehmer, denen zu entnehmen ist, dass das Kraft-Feedback einfach aufgrund der zusätzlichen Information geschätzt wird. Im Vergleich dazu wurde an Modus 2 (Teilautonomie) kritisiert, dass nicht die volle Kontrolle über das System gegeben war. Für eine weiterführende Studie wäre es demnach interessant, den Probanden zu erlauben, die Intensität des Feedbacks sowie den Grad der Autonomie des Systems selbst zu bestimmen. Technisch ist diese Option durch die MIDI-Geräte bereits realisierbar, hätte aber in dieser Studie den Rahmen gesprängt.

Biosignale

In diesem Abschnitt werden die Daten der Biosignale analysiert, um herauszufinden, ob sich die Ergebnisse aus den Fragebögen mit objektiven physiologischen Parametern decken. Aus den Daten des Oxymeters werden die Herzfrequenz (HF) und die Herzfrequenz-Variabilität (HFV) extrahiert. Zur Extraktion wurden die Algorithmen in [50] verwendet. Für die Analyse wurde der Schwerpunkt auf den komplexesten Teil der Experimente gelegt, d. h. den 2. Teil von Experiment 3. Die Signale wurden extrahiert, indem zu den Zeitpunkten $t_0 = 90\text{ s}$ and $t_1 = t_{end} - 10\text{ s}$ segmentiert wurde. Durch die Segmentierung wurden Artefakte aus dem Ende der Aufnahme vermieden. Die Werte für HF und HRF

Tabelle 5.5: HF und HFV für die drei Modi in Experiment 3

Mode	HR	HRV
Modus 1	77,9	2,8
Modus 2	75,7	2,5
Modus 3	77,5	2,7

können Tabelle 5.5 entnommen werden. Eine Differenz ist erkennbar zwischen Modus 1 und 2 und zwischen 2 und 3 (nicht zwischen Modus 1 und 3). Im Vergleich zu den anderen Modi ist die HF für Modus 2 reduziert, Differenzen, die statistisch signifikant sind (beidseitiger t-Test, $p = 0.04$ für 1 vs. 2, $p = 0.02$ für 2 vs. 3). Diese Resultate spiegeln die Effekte wieder, welche in den Dimensionen *Physikalische Anforderung* und *Anstrengung* im TLX-Fragebogen zu sehen waren. D. h. Modus 2 ist weniger anspruchsvoll als die anderen beiden. Für beide Dimensionen ist es plausibel anzunehmen, dass sie das Herzkreislaufsystem beeinflussen. Für die HFV ist ein ähnlicher Effekt zu beobachten wie für die HF, wobei dieser jenseits der statistischen Signifikanz liegt ($p = 0.2$). Durch die Analyse ist eine Bestätigung der subjektiven Bewertung durch die Probanden teilweise gegeben. Für die einfacheren Experimente 1 und 2 waren in den Biosignalen keine Unterschiede zwischen den Modi erkennbar.

Eingegebene Geschwindigkeiten, Objektverschiebungen, Laufzeiten und Roboterbahnen

Aus den Aufnahmen der eingegebenen Geschwindigkeiten, Objektverschiebungen, Laufzeiten und Roboterbahnen sind teilweise interessante Erkenntnisse zu entnehmen. Die Daten der eingegebenen Geschwindigkeiten lassen keinen Schluss zur Differenz zwischen den Modi zu, da die Unterschiede nicht signifikant sind. Die Objektverschiebungen waren im Allgemeinen klein, d. h. höchstens 1-2 mm, und ebenso nicht signifikant unterschiedlich zwischen den Modi. In Abbildung 5.17 werden Boxplots für die Laufzeiten sowie für die Roboterbahnlängen für die Experimente 1-3 gezeigt. Modus 2 wird für Experiment 1 nicht gezeigt, da das Umgreifen in Modus 2 nicht sinnvoll durchführbar ist. Bezüglich der Laufzeit ist ein Trend erkennbar, in dem für zunehmendes Feedback diese kürzer werden. Dies ist insbesondere deshalb hervorzuheben, da explizit darauf hingewiesen wurde, dass die Laufzeit nicht für den Erfolg der Experimente relevant ist. Das ist ein Hinweis darauf, dass das Feedback die Effizienz der Ausführung steigert.

Für die Roboterbahnen in den Experimenten 1 und 3 sind kleine Unterschiede auszumachen (eine Differenz von $\approx 3\%$ zwischen den Median-Längen), die nicht signifikant sind. Dahingegen ist interessant, dass eine bedeutende Differenz (10%) für die Bahnlänge in Experiment 2 zwischen Modus 1 und 3 gegeben ist, obwohl diese Bahnen die kürzesten insgesamt sind. In diesem Experiment wurde eine Navigation in Z , also in der Tiefe aus der visuellen Perspektive, von den Probanden verlangt (Exp. 2, Schritt 2 in Abbildung 5.14). Mit Hilfe der Kameras allein ist es anspruchsvoll, die Bewegung in der Tiefe zu beurteilen. Dies kann als eine Art Verdeckung des Systems angesehen werden. Aus diesem Fall lässt sich erahnen, welche Effekte sich in Szenarien mit umfangreichen Verdeckungen beobachten ließen.

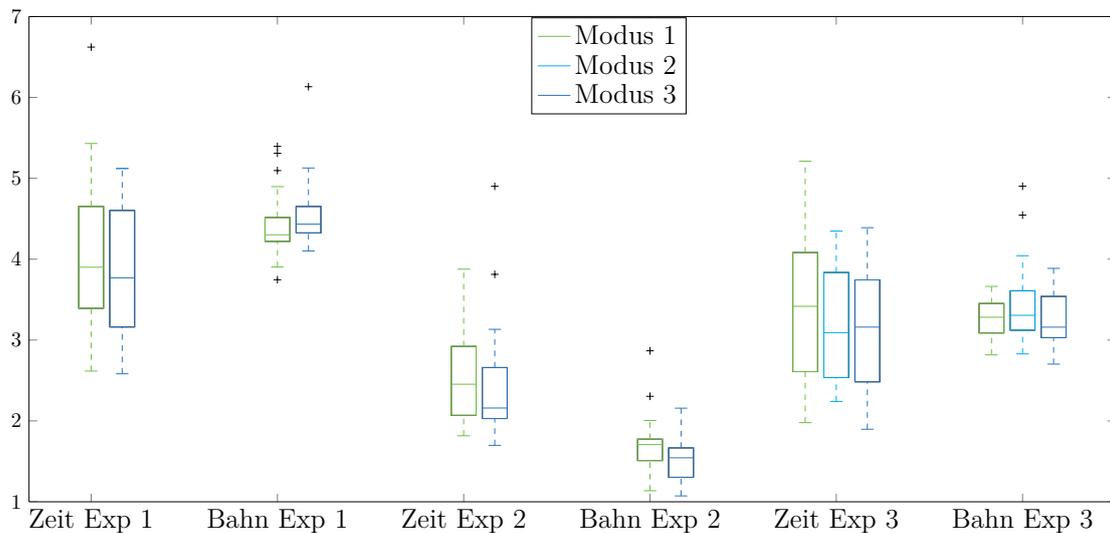


Abbildung 5.17: Boxplots für die Laufzeiten in Minuten und Länge der Roboterbahnen in Metern für Experimente 1, 2 und 3 (Bildquelle: [15] ©2015 IEEE)

5.5 Fazit und Anforderungen für die Weiterentwicklung des Sensors

In diesem Kapitel wurde der Entwurf eines Zwei-Backen-Greifers vorgestellt, in den die LAMs von Göger integriert wurden. Die Anordnung der Sensoren ist so gewählt, dass ein Gradient für die sechs Raumfreiheitsgrade erfasst werden kann. Es wurde gezeigt, dass diese Gradienteninformation in einer Regelung verwendet werden kann, um den Greifer berührungslos an Objekten auszurichten. Diese Form der Regelung wurde *Proximity Servoing* genannt. Für leitende Objekte war die Abweichung der Ausrichtung bereits bei voller Öffnungsweite des Greifers sehr gering. Bei nicht-leitenden Objekten ist die Abweichung bei voller Öffnungsweite signifikant. Diese kann aber reduziert werden, indem die Regelung weiterhin ausgeführt wird, während der Greifer sich schließt. Das Ergebnis am Ende des Vorgangs, wenn der Greifer das Objekt berührt, ist für nicht-leitende Objekte ähnlich wie für Leiter. Dies gilt als Machbarkeitsnachweis für das berührungslose Ausrichten mit der von Göger vorgestellten Technologie. Insbesondere wurde diese Möglichkeit mit einem Zwei-Backen-Greifer und für die sechs Raumfreiheitsgrade gezeigt. Vergleichbare Methoden aus der Literatur verwenden andere Anordnungen der Sensoren bzw. andere Kinematiken und decken nicht die sechs Raumfreiheitsgrade ab.

Aufbauend auf dem Proximity Servoing wurden die *Haptische Exploration* und die *Telemanipulation mit kraftbasierter Darstellung von Näherungsfeldern* entwickelt. Beides sind neuartige Methoden, die aufgrund der Technologie der TNS erst möglich wurden. Grundlage der Haptischen Exploration sind einzelne Skills, welche mit der Erfassung von einem dazugehörigen geometrischen Merkmal korrespondieren. In dieser neuartigen Haptischen Exploration können diese Skills sowohl berührungsbasiert als auch näherungs-basiert sein. Es wurde gezeigt, dass eine Objektform aus einer Kombination von Skills beider Art gut erfasst werden kann. Noch handelt es sich um vergleichsweise einfache Formen, in denen

zunächst nur die Merkmale „Ecke“, „Kante“ und „Krümmung“ vorkommen.

Das vorgestellte Telemanipulationssystem wurde so konzipiert, dass es sowohl rein unterstützend als auch teilautonom agieren kann. Eine Unterstützung bedeutet, dass der Operateur die Näherungsinformation als Kraft auf sein Eingabegerät gespiegelt bekommt, jedoch die volle Kontrolle über die Bewegung des Roboters besitzt. Eine Teilautonomie bedeutet, dass der Roboter sich selbstständig in bestimmten Freiheitsgraden ausrichtet, während der Operateur mit Krafrückkopplung die Bewegung in den restlichen Freiheitsgraden kontrolliert. Die durchgeführte Nutzerstudie konnte eine Steigerung der Effizienz mithilfe der reinen Unterstützung zeigen. Eine Erleichterung der Auslastung der Nutzer hat sich jedoch nur für das teilautonome System gezeigt. Insgesamt bewerteten die Nutzer die zusätzliche Information als nützlich.

In diesem Kapitel wurde das Potential eines Greifsystems, welches mit TNS ausgestattet ist, gezeigt. Die regelmäßige und symmetrische Anordnung der Sensoren ermöglicht eine systematische Auswertung der Daten ähnlich zur Bildverarbeitung. Gerade in den Bereichen der Haptischen Exploration und Objekterkennung sowie in der robusten Manipulation sieht der Autor noch viele Möglichkeiten, diese Technologie gewinnbringend einzusetzen.

Bezüglich der Anforderungen für eine Weiterentwicklung wird festgestellt, dass die LAMs nicht geeignet sind, beliebige Greifersysteme auszustatten. Aufgrund der Größe der Backen muss die gezeigte Konstruktion nur als ein Machbarkeitsnachweis angesehen werden. Für eine Anwendung im Bereich der Feinmanipulation, etwa bei Haushaltsgegenständen, sind sie in der Regel zu groß. Auch die Integration in flexible Mehrfingergreifer in der Servicerobotik ist unrealistisch. Die Frage bei einer höheren Integrationsdichte ist, wie eine ähnliche Leistung (Reichweite u. Rauschverhalten) erreicht werden kann, wenn weniger Sensorfläche zur Verfügung steht. Hier ist auch zu verstehen, dass die Elektronik von zukünftigen Entwicklungen mindestens im Greifer und am besten in die Finger integriert werden kann. Gleichzeitig ist eine höhere Ortsauflösung in der Näherungsmodalität wünschenswert. In den LAMs ist die taktile Ortsauflösung auf eine taktile Zelle pro Modul beschränkt, also sehr grob. Dies stellt jedoch keine prinzipbedingte Einschränkung des Entwurfs von Göger dar (s. Kapitel 4). Ein neuer Entwurf muss also ebenso eine taktile Ortsauflösung anbieten. Ein kapazitives Messsystem muss auch in der Lage sein, nicht nur im selbst-kapazitiven Modus, sondern auch im beidseitig-kapazitiven Modus zu agieren.

Zusammengefasst lassen sich folgende Anforderungen für einen neuen Sensor formulieren, welche die Verwendung in einem Greifersystem betreffen:

Anforderungen Greifer (AG)

AG1 Integrierbarkeit I: Die Gesamtfläche der Sensoren soll bei gleichbleibender Leistung (Rauschverhalten u. Reichweite) reduziert werden.

AG2 Integrierbarkeit II: Die Auswertelektronik soll im Greifersystem vollständig integriert sein.

AG3 Integrierbarkeit III: Das Sensorelement soll geometrisch flexibel integrierbar sein, d. h., es soll räumlich unabhängig von der Auswertelektronik angebracht und auf

planaren und gekrümmten Flächen realisiert werden können.

AG4 Ortsauflösung: Die Ortsauflösung in der Näherungsmodalität soll erhöht werden, um geometrische Informationen von Objekten und der Umwelt auf einer kleineren Skala erfassen zu können.

AG5 Beidseitig-kapazitive Messung: Die beidseitig-kapazitive Messung soll das robuste Erkennen von Nicht-Leitern ermöglichen.

KAPITEL 6

Konturverfolgung und Kollisionsvermeidung

Die Auskleidung des Roboteräußeren ist das zweite große Ziel der Entwicklung einer künstlichen Haut. Die Anforderungen an Reichweite und Ortsauflösung können sich dabei von denen unterscheiden, welche für die Ausstattung eines Greifsystems gelten. Für die Kollisionsvermeidung und die damit verbundene Sicherheit ist es natürlich wünschenswert, Ereignisse frühzeitig, also mit möglichem weitem Abstand, erfassen zu können. Das impliziert eine größere Sensorfläche zulasten der Ortsauflösung. Auch in der Natur sind die Anzahl der Rezeptoren pro Fläche optimiert und entsprechend der erwarteten Interaktionen mit der Umwelt angepasst. So ist es beim Menschen gegeben, dass die Zweipunktschwelle an den Fingerspitzen 1 mm beträgt (Greifen/Manipulieren), während sie am Rücken oder an den Armen etwa 50 mm beträgt (Detektion von Berührung/Interaktion) [47].

Als Beispiel für eine Auskleidung wurde die in Abbildung 6.1 gezeigte Integration eines Arrays von 3×16 LAMs an einem End-Effektor umgesetzt. Das Ziel ist es, zu zeigen, dass ortsauflösende kapazitive Näherungssensorik für Aufgaben wie die Kollisionsvermeidung bzw. Konturverfolgung eingesetzt werden kann. Die Ortsauflösung ist deshalb wichtig, weil sie dazu verwendet werden soll, geometrische Informationen über das Hindernis zu erfassen.

Die hier vorgestellte Methode baut auf Ansätzen weiterer Forscher auf, welche die Grundlagen für die Konturverfolgung/Kollisionsvermeidung gegeben haben. Diese wurden im Stand der Forschung besprochen (s. Abschnitt 3.3.2). Aufgrund der Ortsauflösung des Arrays am End-Effektor ist es möglich, Krümmungsmessungen in das System mit aufzunehmen. Krümmungsinformationen haben sich als Mittel bewährt, um glattere Bahnen und schnellere Ausführungsgeschwindigkeiten zu erreichen. Bisher wurden in den Ansätzen jedoch vornehmlich 1D Krümmungsinformationen verwendet. Deshalb werden die bisherigen Ansätze hier erweitert, indem gezeigt wird, dass eine Krümmungsschätzung entlang der zwei Richtungen des Arrays gleichzeitig möglich ist. Aus diesen Krümmungen wird eine zusammengesetzte Bewegung abgeleitet, die eine Konturverfolgung in 3D umsetzt. Die in diesem Kapitel besprochenen Methoden und Ergebnisse wurden auf der Konferenz *IROS2016* vorgestellt [16].



Abbildung 6.1: Der End-Effektor, welcher für die Arbeit in diesem Kapitel konzipiert wurde, ist mit einem 3×16 Netz von LAMs ausgestattet. (Bildquelle: [16] ©2016 IEEE)

6.1 Kalibrierung

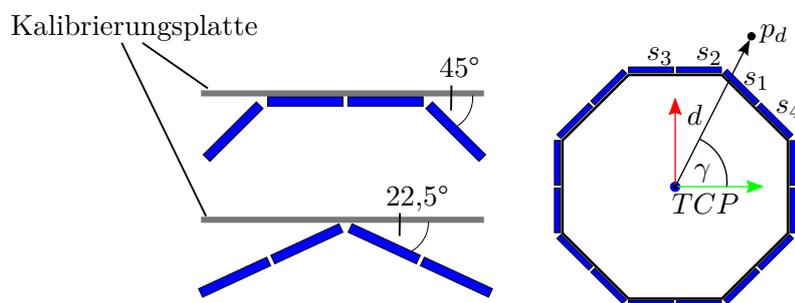


Abbildung 6.2: Unterschiedliche Ausrichtung des End-Effektors zur Referenzplatte für die Kalibrierung; der Winkel γ wird verwendet, um einen Überblendungsfaktor zwischen den Kalibrierungen zu bestimmen. (Bildquelle: [16] ©2016 IEEE)

Analog zur Beschreibung in Abschnitt 5.1 müssen die Sensoren nach dem Einschalten kalibriert werden, um unter den gleichen Bedingungen die gleiche Ausgabe zu produzieren. In Abschnitt 8.2 wird die Genauigkeit des Kalibrierungsvorgangs analysiert. Wegen der oktogonalen Konstruktion des End-Effektors müssen zwei Kalibrierungsvorgänge durchgeführt werden, um die Empfindlichkeit der Messung für die Orientierung der Hindernisfläche kompensieren zu können. Dies ist notwendig, da für die Regelung entschieden wurde, dass der End-Effektor sich nicht um seine Z-Achse drehen sollte, um die Orientierung der Sensoren an die Hindernisoberfläche anzupassen. Durch Abbildung 6.2 werden die zwei Kalibrierungsvarianten veranschaulicht. Während des ersten Kalibrierungsvorgangs sind die Flächen der Sensoren parallel zur Kalibrierungsplatte ausgerichtet, also in einem Winkel

von 0° . Während des zweiten Kalibrierungsvorgangs beträgt die relative Orientierung $22,5^\circ$. Aus der Sammlung der Daten des ersten Vorgangs kann darüber hinaus eine Kalibrierung für die relative Orientierung von 45° gewonnen werden.

6.2 Positionsmessungen

Bevor die Position des Hindernisses bestimmt wird, werden auf das Näherungsbild Methoden der Rauschunterdrückung angewandt. Mit einem einfachen Schwellwert wird pro Proxel bestimmt, ab welcher Signalstärke ein Proxel aktiv ist. Darüber hinaus wird mithilfe von strukturierenden Elementen das Bild weiter bereinigt, indem alleinstehende Proxel bzw. Pixel eliminiert werden. Anschließend wird der Vordergrund in Zylinderkoordinaten (γ, r, h) umgewandelt, wobei das Bezugssystem der TCP ist. Dieser ist in der Mitte des Zylinders definiert. Der Winkel γ des Punkts p_d , bei dem das Hindernis detektiert wird, wird über den Masseschwerpunkt im Bild-Vordergrund ermittelt. Zur Bestimmung des Abstands d und der Höhe h wird eine Gewichtung der Kalibrierungen bei 0° und $22,5^\circ$ verwendet. Der Winkel γ wird benutzt, um das Gewicht ω zu berechnen:

$$\omega = \begin{cases} \omega' & \text{falls } \omega' \leq 1 \\ 2 - \omega' & \text{falls } \omega' > 1, \end{cases} \quad (6.1)$$

$$\text{wobei } \omega' = \frac{\text{mod}(\gamma, \frac{2\pi}{8})}{\frac{2\pi}{16}}. \quad (6.2)$$

Danach ist der Abstand

$$d = (1 - \omega)f_1(s_{i,j}) + \omega f_2(s_{i,j}). \quad (6.3)$$

Um weitere Größen für die Regelung zu schätzen, muss definiert werden, wie und welche Sensorwerte mit einbezogen werden. Der Winkel γ bestimmt, welches die *Hauptsensoren* sind. Es handelt sich um die Sensoren in den Spalten s_1 und s_2 , wie in Abbildung 6.2 dargestellt wird. Die Spalte der Sensoren s_1 ist diejenige, welche direkt vom Vektor zum Hindernis geschnitten wird. Die Spalte s_2 ist dann diejenige, die dem Vektor zum Hindernis am nächsten ist, ohne von ihm geschnitten zu werden. Aus den Werten der Sensoren der Spalten s_1 und s_2 werden die Gradienten für das Orientierungs-Servoing berechnet (s. Abschnitt 6.4.3). Der Abstand d ist der Wert des Sensors mit dem höchsten Sensorwert/kleinsten Abstand. Es ist einer von $s_{1,j}$, wobei j der Index von einer der Zeilen (Streifen) des End-Effektors ist. s_3 und s_4 sind definiert als die Spalten links und rechts von s_1 und s_2 und werden zur Messung der Krümmung verwendet.

6.3 Krümmungsschätzung

Die Schätzung der Krümmung der Hindernisse geschieht durch eine direkte Messung, wie von Walker et al. in [74] vorgeschlagen. Dazu wird jeweils ein lokales Bezugssystem in der horizontalen und vertikalen Richtung des Arrays definiert, wie in Abbildung 6.3

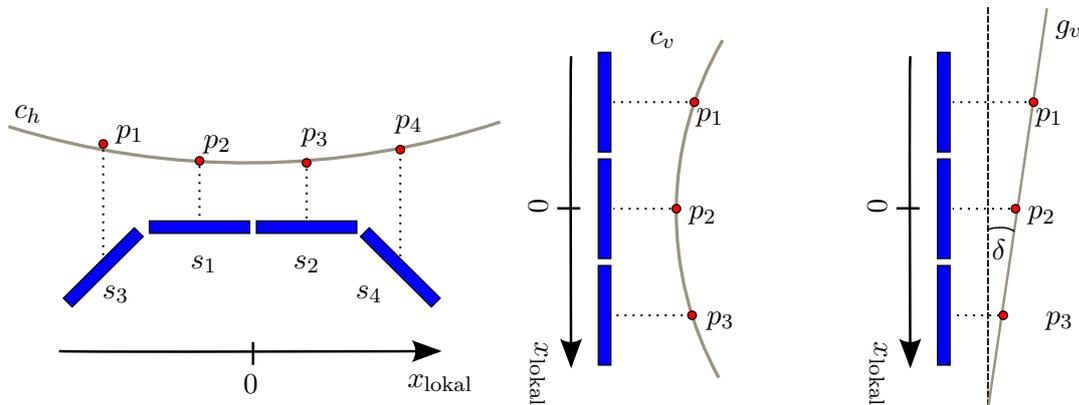


Abbildung 6.3: Links und Mitte: Kreise werden durch die Messungen gelegt, um die horizontale und die vertikale Krümmung der Hindernisfläche zu bestimmen. Rechts: Der Winkel δ wird mithilfe der Geraden g_v bestimmt und gibt die Inklination der Hindernisfläche zur Fläche des Sensorarrays an. (Bildquelle: [16] ©2016 IEEE)

dargestellt wird. Der Überblendungsfaktor der Distanzeregressionen aus (6.2) und (6.1) wird berücksichtigt. In diesen Bezugssystemen werden Kreise c_h bzw. c_v durch den gemessenen Abstand der Punkte gelegt, wozu das Gauß-Newton-Verfahren verwendet wird. Zur Bestimmung der horizontalen Krümmung wird nur der mittlere Streifen verwendet, für die vertikale Krümmung werden die Mittelwerte aus den beiden Spalten s_1 und s_2 verwendet. Es ergeben sich der horizontale Radius r_h und der vertikale Radius r_v , respektive die Krümmungen $\kappa_h = \frac{1}{r_h}$ und $\kappa_v = \frac{1}{r_v}$. An dieser Stelle sei angemerkt, dass aufgrund der groben Ortsauflösung der Näherungsmessung der Krümmungswert für schmale Kanten nicht genau geschätzt werden kann. In Abschnitt 6.5 wird näher erläutert, wie sich diese Tatsache auf das Verfahren auswirkt.

6.4 Konzept Konturverfolgung

Das hier vorgestellte Konzept zur näherungssensorikbasierten Konturverfolgung wird durch die Arbeiten von Lumelsky und Cheung [51] sowie Nunes et al. [58] inspiriert. Von der ersten wird die Herleitung der charakteristischen Roboterkonfigurationen (End-Effektor-Konfigurationen) verwendet, welche in Abbildung 6.4 dargestellt werden. Von der ersten und zweiten wird die Herleitung des Zielvektors und die damit assoziierte Planung der Bewegung parallel zur Hindernisfläche verwendet, die ebenso durch Abbildung 6.4 veranschaulicht wird. Darüber hinaus ist der vorgestellte Ansatz ähnlich zu dem von Nunes et al., weil er im kartesischen Raum durchgeführt wird und eine näherungssensorikbasierte Regelung (Proximity Servoing) verwendet, um die gewünschte relative Orientierung und den gewünschten Abstand des End-Effektors zur Hindernisfläche zu halten. Dieser letzte Aspekt deckt sich mit den Ansätzen zu Proximity Servoing für das Vorausrichten und Greifen, die in Kapitel 5 vorgestellt wurden.

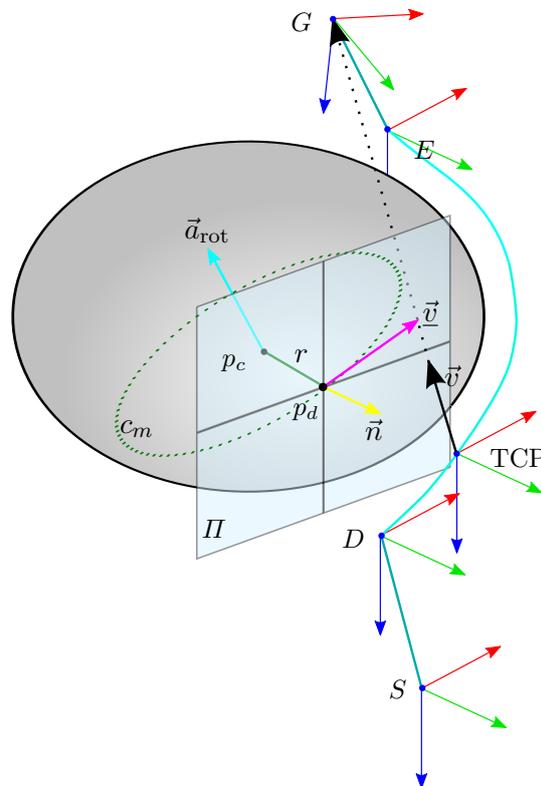


Abbildung 6.4: Die vier charakteristischen Konfigurationen S , D , E und G für den End-Effektor in einem Kollisionsvermeidungs-Szenario; der Vektor vom gegebenen TCP zum Ziel ist \vec{v} , und seine Projektion auf der Tangentialebene Π ist \vec{v} . Die Tangente wird an dem Punkt p_d detektiert. Der Krümmungsradius der Fläche in der Richtung von \vec{v} ist r , und der Mittelpunkt des entsprechenden Kreises c ist p_c . Der Vektor \vec{a} ist der Normalenvektor der Ebene, in der der Kreis definiert ist. (Bildquelle: [16] ©2016 IEEE)

Die End-Effektor-Konfigurationen, die in Abbildung 6.4 gezeigt werden, sind, wie folgt, beschrieben: Die Start-Konfiguration ist S , in der der End-Effektor kein Hindernis wahrnimmt. G ist die Ziel-Konfiguration. Während der Aufgabe bewegt sich der End-Effektor auf dem direkten Pfad nach G , bis die Sensoren die Anwesenheit eines Hindernisses erkennen, welches den direkten Pfad blockiert. Die zu diesem Moment dazugehörige Konfiguration wird D genannt. Ab diesem Zeitpunkt bewegt sich der End-Effektor entlang der Hindernisfläche, bis er die Konfiguration E erreicht, wo der direkte Pfad zum Ziel nicht mehr durch das Hindernis blockiert wird.

Das Konzept wird ergänzt, indem Krümmungsinformation der Hindernisfläche in jedem Regelungsschritt hinzugezogen wird. Damit wird eine vorausschauende Komponente in der Regelung realisiert, bei der der End-Effektor seine Pose entsprechend der gemessenen Krümmung anpasst. Dass dies einen Vorteil für Konturverfolgungsansätze darstellt, wurde bereits durch mehrere Autoren bestätigt, wie in Abschnitt 3.3.2 besprochen. Als weiterer Schritt, um eine krümmungsbasierte Konturverfolgung in 3D zu realisieren, wird hier eine

gleichzeitige Schätzung der Krümmungen in der horizontalen und vertikalen Richtung des End-Effektors verwendet. Diese Schätzungen werden dann kombiniert, um eine Bewegung zu ermöglichen, die entlang beider Krümmungen verläuft, wie in Abbildung 6.5 dargestellt.

6.4.1 Krümmungsbasierte Bewegung

Wie in Abschnitt 3.3.2 erwähnt wird, kann das Problem der Kollisionsvermeidung zu einem Problem der Konturverfolgung umformuliert werden, wenn kein Umweltmodell und nur näherungs-basierte Wahrnehmung vorhanden sind. Zur Kollisionsvermeidung wird eine Bewegung parallel zur Hindernisfläche durch den Vektor \vec{v} bestimmt, der von der aktuellen Konfiguration, d. h. dem TCP, zum Ziel G zeigt (s. Abbildung 6.4). Genauer gesagt müssen, um den End-Effektor um das Hindernis vorbeizuführen, die Normale \vec{n} der Tangentialebene Π und die Projektion \vec{v} von \vec{v} auf Π bestimmt werden. Mithilfe dieser Vektoren können die Inkremente der Bewegung geplant werden. In Abbildung 6.5 ist im Detail dargestellt, wie solche Inkremente unter der Berücksichtigung der Krümmung der Hindernisoberfläche berechnet werden. An dieser Stelle sei angemerkt, dass der End-Effektor zwecks Veranschaulichung deutlich kleiner dargestellt wird, als er in Wirklichkeit ist.

Die Krümmung der Hindernisfläche entlang der Richtung \vec{v} induziert die Kreise c_m und c_{tcp} in der Ebene, welche durch die Vektoren \vec{n} und \vec{v} aufgespannt wird (s. Abbildung 6.4). Der Kreis c_{tcp} kann verwendet werden, um eine *Abkürzung* zu berechnen, die letztlich für die vorausschauende Regelung verantwortlich ist. Sie besteht aus einem translatorischen und aus einer Änderung der Orientierung. Der translatorische Teil ist eine Sehne \vec{t} von c_{tcp} , deren Länge von der maximale zulässigen Geschwindigkeit v_{max} abhängt. Die Änderung in der Orientierung bewirkt, dass die Fläche der Sensoren nach der Bewegung möglichst wieder parallel zur Hindernisfläche ist. Sie stellt eine Drehung um die Achse \vec{a}_{rot} dar.

Im Folgenden wird die Berechnung der Abkürzung hergeleitet. Sie wird mit Hilfe der Vektoren und Winkel aus den Abbildungen 6.4 und 6.5 erläutert. Dabei wird mit einem hochgestellten T gekennzeichnet, dass es sich um den translatorischen Teil einer Pose handelt und mit einem hochgestellten R , dass es sich um den rotatorischen Teil einer Pose handelt. So ist bspw. mit TCP^T der translatorische Teil der Pose des TCPs gemeint.

Die Normale \vec{n} der Tangentialebene Π_t kann berechnet werden, indem der Vektor, der vom Detektionspunkt p_d in Richtung des End-Effektors zeigt, verwendet wird

$$\vec{n} = \frac{TCP_t^T - p_d}{\|TCP_t^T - p_d\|}. \quad (6.4)$$

Die Achse \vec{a}_{rot} und \vec{v} sind respektive

$$\vec{a}_{rot} = \vec{n} \times \vec{v} \text{ und } \vec{v} = \vec{a}_{rot} \times \vec{n}. \quad (6.5)$$

Der Radius des Kreises c_m ist der Kehrwert des gewichteten Mittelwerts der Krümmungen der Kreise c_h und c_v (s. Abschnitt 6.3)

$$r_m = (\cos^2 \alpha \kappa_v + \sin^2 \alpha \kappa_h)^{-1}. \quad (6.6)$$

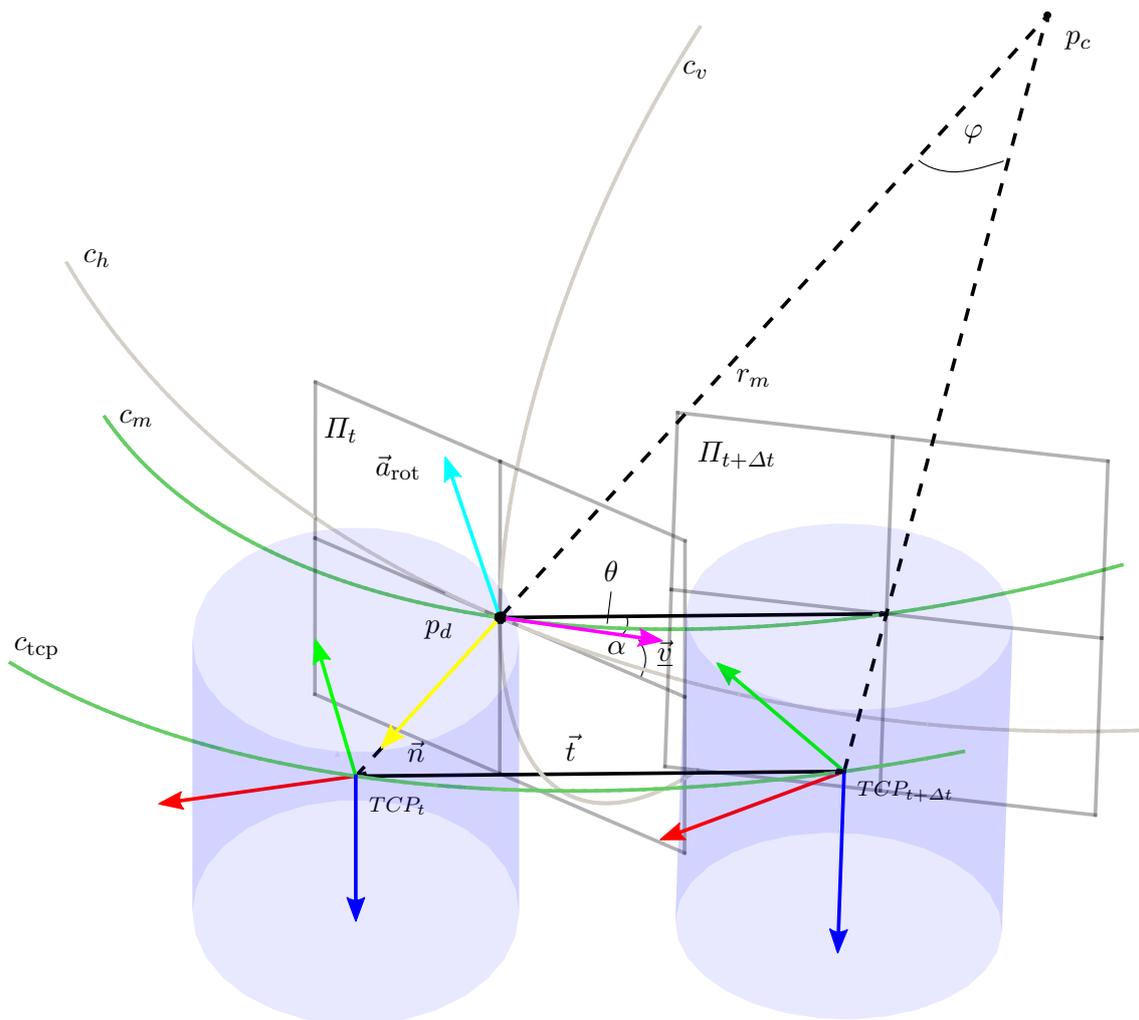


Abbildung 6.5: Der End-Effektor, der sich an der Pose TCP_t befindet, führt eine Rotationsbewegung durch, welche die gemessenen Krümmungen (horizontal und vertikal) berücksichtigt. So wird die Ausrichtung zur Oberfläche vorausschauend angepasst, wenn der End-Effektor die nächste Pose $TCP_{t+\Delta t}$ erreicht. Kurz gesagt, bedeutet es, den TCP_t um den Punkt p_c und die Achse \vec{a}_{rot} um den Winkel φ zu drehen. Der translatorische Teil der Bewegung \vec{t} ist die Sehne auf dem Kreis c_{tcp} , die eine Abweichung θ von der Tangentialebene Π_t hat. Der Winkel α ist die Erhöhung von \vec{v} zur xy -Ebene des TCP_t und wird als Überblendungsfaktor verwendet, um die Parameter des gemittelten Kreises c_m zu bestimmen. (Bildquelle: [16] ©2016 IEEE)

Der Überblendungsfaktor wird mit Hilfe des Winkel α ermittelt. α ist die Erhöhung des Vektors \vec{v} bezogen auf die XY -Ebene des TCP_t . Mithilfe von r_m ist es dann möglich, r_{tcp} zu ermitteln, worüber der Kreis c_{tcp} definiert wird, auf dem sich der End-Effektor bewegt:

$$r_{tcp} = r_m + d. \quad (6.7)$$

Dabei ist d die Distanz zum Hindernis. Die Länge l einer Sehne für einen gegebenen Radius r wird berechnet als

$$l = 2r \sin\left(\frac{1}{2}\varphi\right). \quad (6.8)$$

Da in diesem Fall die Länge der Sehne bekannt ist $l = \|\vec{t}\| = v_{max}\Delta t$, kann nach dem gesuchten Winkel φ aufgelöst werden:

$$\varphi = 2 \arcsin\left(\frac{v_{max}\Delta t}{2r_{tcp}}\right). \quad (6.9)$$

Der zweite gesuchte Winkel

$$\theta = \frac{1}{2}\varphi \quad (6.10)$$

kann über die Inspektion der Winkel in der Dreieckskonstellation gefunden werden. Um die Translation von TCP_t nach $TCP_{t+\Delta t}$ zu vollziehen, wird der Vektor $\vec{u} = \vec{v}l$ um den Vektor \vec{a}_{rot} mit dem Winkel θ gedreht und dann auf das alte Frame addiert.

$$TCP_{t+\Delta t}^T = TCP_t^T + \vec{t}, \text{ wobei } \vec{t} = R_{\vec{a},\theta}\vec{u}. \quad (6.11)$$

Die Änderung in der Orientierung wird erreicht, indem das alte Frame um den Vektor \vec{a}_{rot} mit dem Winkel φ gedreht wird

$$TCP_{t+\Delta t}^R = R_{\vec{a},\varphi}TCP_t^R. \quad (6.12)$$

Um die Inkremente in der Orientierung an die Robotersteuerung weiterzugeben, werden sie in die sogenannte (*roll*, *pitch*, *yaw*)-Form gebracht

$$(\text{roll}, \text{pitch}, \text{yaw}) = \text{axangle2rpy}(\vec{a}_{rot}, \varphi). \quad (6.13)$$

Die Methode `axangle2rpy()` ist eine Standardfunktion von Software-Bibliotheken der Robotik und Computergrafik, welche eine Drehung, dargestellt als Drehachse und Drehwinkel, in die (*roll*, *pitch*, *yaw*)-Form bringt. In dem hier verwendeten Robotersystem werden die Orientierungsvorgaben in der (*roll*, *pitch*, *yaw*)-Form gemacht.

6.4.2 Spezialfälle

In Abbildung 6.6 wird der Fall gezeigt, dass der TCP weiter vom Hindernis entfernt ist als der berechnete Mittelpunkt p_c des Kreises c_m . Dies kann bei stark gekrümmten Flächen

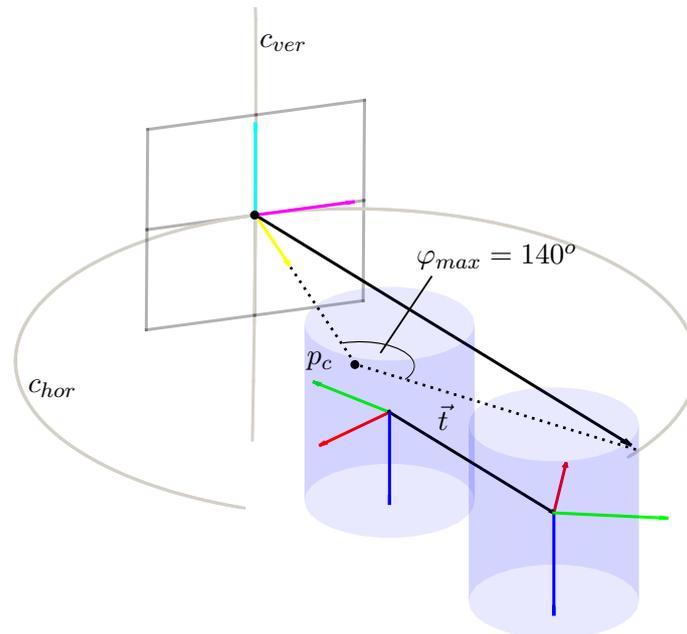


Abbildung 6.6: Eine spezielle Bewegung muss durchgeführt werden, wenn der End-Effektor weiter vom Hindernis entfernt ist als der Mittelpunkt p_c von c_m . (Bildquelle: [16] ©2016 IEEE)

vorkommen. Hier macht die Definition des Kreises c_{tcp} keinen Sinn, und daher wird eine Sehne auf dem Kreis c_m berechnet, für die $\varphi = \varphi_{max} = 140^\circ$ gilt. Der Translationsvektor \vec{t} ist dann parallel zu dieser Sehne, wie in Abbildung 6.6 dargestellt.

6.4.3 Proximity Servoing

In Kapitel 5 wurde bereits das Konzept des Proximity Servoing diskutiert. Es wurde gezeigt, wie auf Näherungssensordaten basierende Gradienten dazu verwendet werden können, eine Regelung zu implementieren, die einen Greifer an einem Objekt ausrichtet. Hier wird ein Gradient bzw. eine Winkelabweichung δ in der vertikalen Richtung des Sensorarrays berechnet, wie in Abbildung 6.3 gezeigt. Dazu werden die 3×2 Sensoren verwendet, die zum Hindernis zeigen, d. h. die Spalten s_1 und s_2 . Eine Gerade g_v wird durch die Messwerte gelegt. Der Winkel zwischen der Geraden und der Ebene des Sensorarrays ist die Abweichung, welche an die Robotersteuerung über einen Proportionalfaktor, d. h. mit einem P-Regler, weitergegeben wird. Es ist ebenso möglich, einen Gradienten in der horizontalen Richtung zu berechnen, aber da eine Drehung um die eigene Z -Achse des End-Effektors nicht vorgesehen ist, wird diese Berechnung nicht durchgeführt. Zusätzlich gibt es einen Regler, der die Distanz zum Hindernis überwacht, sodass der End-Effektor sich innerhalb eines vorgegebenen Abstandsbereichs zum Hindernis aufhält. Auch diese Vorgabe geschieht mit einem P-Regler. Falls eine Kollision unmittelbar bevorsteht oder das Hindernis unerwarteterweise nicht mehr detektiert wird, werden die Regelungsvorgänge angehalten, bis ein sicherer Zustand wieder hergestellt wird. Mit dieser Methode alleine kann auch eine Konturverfolgung durchgeführt werden, welche jedoch nicht prädiktiv ist.

6.5 Evaluation

6.5.1 Ausführung der krümmungsbasierten Bewegung

Um den Mehrwert zu überprüfen, der durch Hinzunahme von Krümmungsinformation erreicht wird, wurden Experimente in drei Szenarien durchgeführt. Die Hindernisse sind in Abbildung 6.7 zu sehen. In Abbildung 6.8 sind die Bahnen des Roboters dargestellt, einmal in Blau, wenn die krümmungsbasierte Bewegung aktiv ist, und einmal in Rot, wenn sie nicht aktiv ist (nur mit der Methode aus Abschnitt 6.4.3). In letzterem Fall plant das System seine Bewegung parallel zur geschätzten Tangente, d. h. unter Verwendung des Vektors \vec{v} , welcher magenta dargestellt wird. Die Zielgeschwindigkeit des End-Effektors während der Experimente war 80 mm s^{-1} .

In Abbildung 6.8(a) ist erkennbar, dass mithilfe der Krümmungsschätzung eine Bahn (in Blau) zurückgelegt wird, die vermeidet, dass der End-Effektor zu nah an das Hindernis kommt. Ohne Berücksichtigung der Krümmungsinformation tritt der End-Effektor über den zulässigen Abstandsbereich hinaus und muss den Sicherheitsabstand wieder herstellen, was durch die Delle im roten Pfad erkennbar wird. Ebenso wird durch den dünnen Teil der roten Bahn gekennzeichnet, dass hier die Konturverfolgung unterbrochen wird, damit der Sicherheitsabstand wieder hergestellt wird. Für die "konvexe" Form gibt es keinen bedeutenden Unterschied zwischen der Ausführung mit und ohne Krümmungsinformation, was die Kontinuität der Bewegung betrifft (s. Abbildung 6.8(b)). Wegen der Krümmungsschätzung ist jedoch der Abstand der blauen Trajektorie konsistenter. Im Allgemeinen sind glatte Bahnen für den End-Effektor bei Krümmungen, wie im Fall der Ecken, eine Herausforderung, da die Messungen durch die Fläche des Merkmals verfälscht werden. Wegen der im Vergleich zum Sensor kleineren Fläche einer Kante erscheint diese weiter entfernt als sie in Wirklichkeit ist. Durch die Sprünge in der Abstandsmessung kommt es

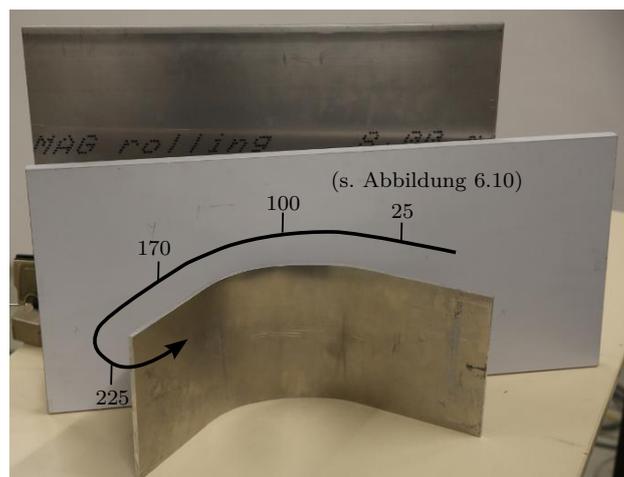


Abbildung 6.7: Die Hindernisse, die zur Durchführung der Experimente verwendet wurden: eine Aluminium-Platte, eine gebogene Aluminium-Platte ("konkav" auf der Innenseite, "konvex" von außen) und eine Pressspanplatte (Bildquelle: [16] ©2016 IEEE)

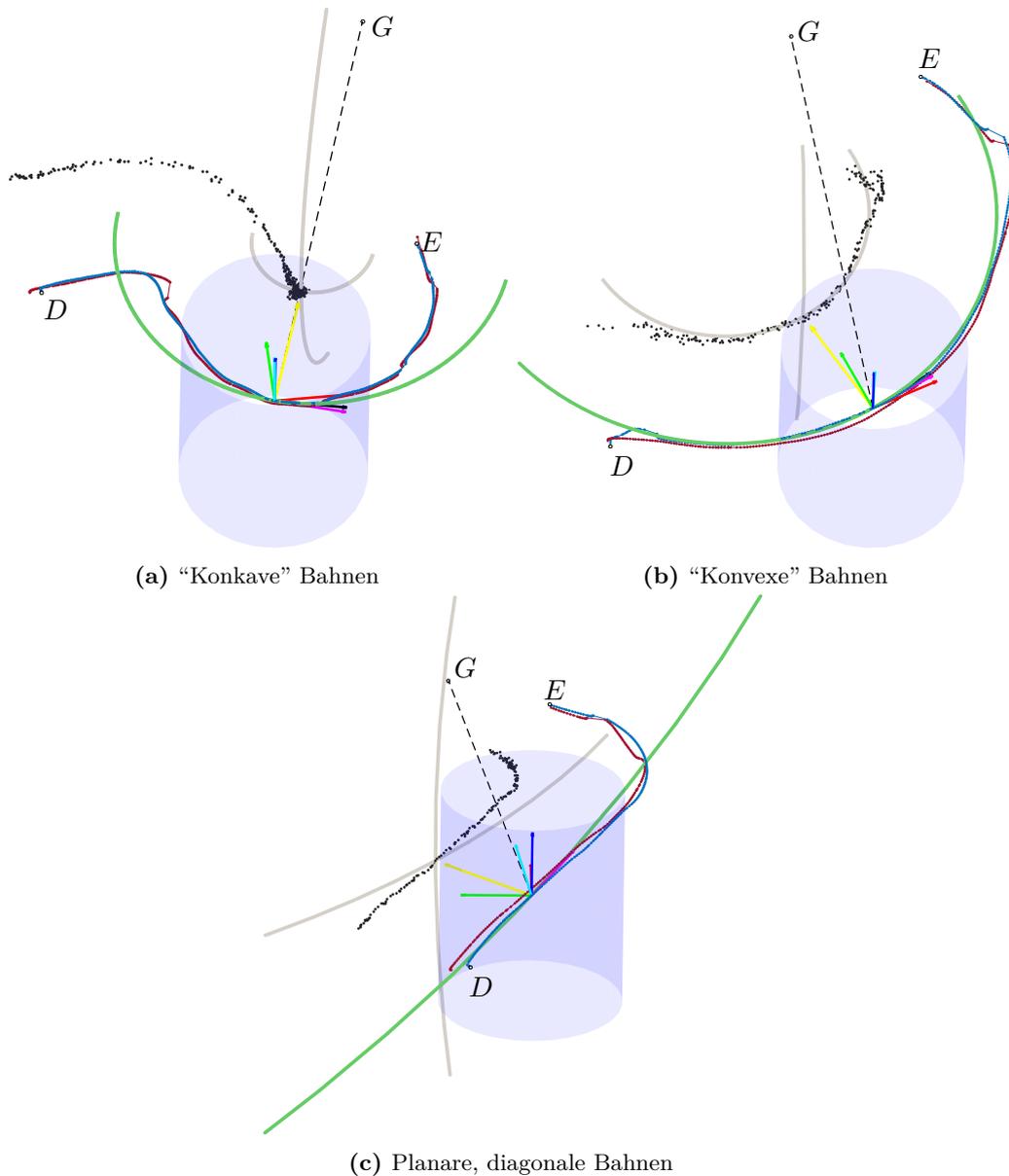


Abbildung 6.8: Bahnen des TCPs für Experimente, in denen die Krümmungsschätzung verwendet wurde (Blau) und nicht verwendet wurde (Rot); der Zylinder ist maßstabsgetreu abgebildet. Um die Details erkennen zu können, empfiehlt es sich, die Zoom-Funktion des PDF-Viewers zu verwenden. (Bilderquelle: [16] ©2016 IEEE)

dann öfter dazu, dass das System unterbrechen muss, um wieder einen – aus Sicht der Messung – sicheren Abstand herzustellen. An den Beispielen von [Abbildung 6.8\(a\)](#) und [6.8\(c\)](#) ist zu erkennen, dass die Bahn bei verwendeter Krümmungsinformation weniger oft ausbricht, also glatter ist, ohne jedoch komplett glatt zu sein.

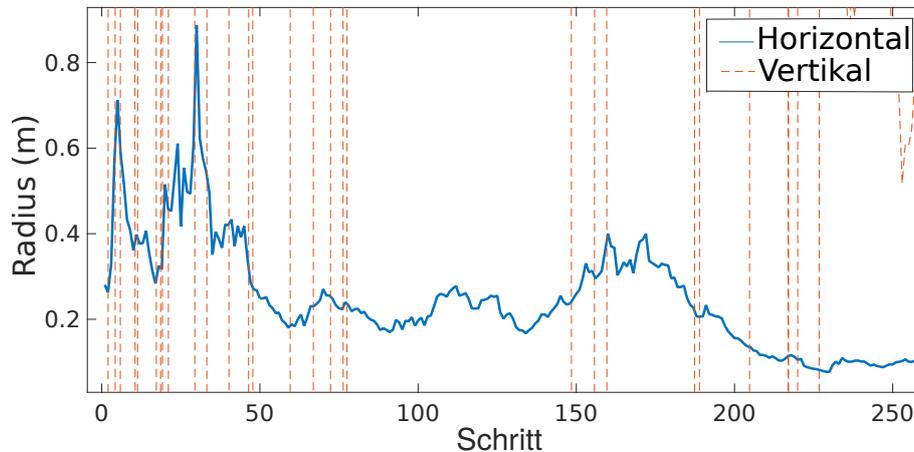


Abbildung 6.9: Messdaten für die horizontalen und die vertikalen Radien für die Außenseite der gebogenen Aluminiumplatte (Bildquelle: [16] ©2016 IEEE)

Abbildung 6.9 zeigt Messdaten der Krümmungsradien für die Außenseite der gebogenen Aluminiumplatte (die “konvexe” Form). In Abbildung 6.7 werden die Werte („Schritt“) aus Abbildung 6.9 zur Geometrie der Form in Verbindung gebracht. Da die Oberfläche in der vertikalen Richtung flach ist, d. h., eine Krümmung von 0 besitzt, sind die Messwerte in höheren Bereichen und springen zwischen positiven und negativen Werten. Für das erste Segment der horizontalen Messungen korrespondieren sie zu der flacheren Region der Platte. Das mittlere Segment der Daten zeigt Werte etwa um die 20 cm herum. Die realen Krümmungsradien für den gebogene Teil der Platte liegen zwischen 26 cm und 13 cm. Somit zeigen die Messungen eine gewisse Übereinstimmung mit den realen Werten, ohne jedoch ein hohe Genauigkeit aufzuweisen. Im letzten Segment, welches mit den Messungen der Kante korrespondiert, gibt die Schätzung Radien um die 10 cm aus, was das Minimum dessen ist, was das System ausgeben kann. Obwohl die Platte flache Bereiche hat, werden die Sensoren eine Krümmung feststellen, da das Array im Vergleich zu diesen Bereichen groß ist. Die Messungen der äußeren Sensoren (s_3 und s_4) werden somit bereits durch die Kanten der Platte beeinflusst.

6.5.2 Empfindlichkeit für Materialeigenschaften

Das System wurde für die Hindernisse aus Aluminium im geerdeten und nicht geerdeten Zustand sowie mit einer Holzplatte getestet. Für die ersten beiden Fälle war die Konturverfolgung robust, obwohl die Reichweite der Messung bei nicht geerdetem Aluminium geringer ist. Auch höhere Zielgeschwindigkeiten von 150 mm s^{-1} für den End-Effektor wurden mit der konvexen Form erfolgreich getestet. Es kommt bei nicht geerdetem Aluminium zu Fällen, in denen der Zielabstand zum Hindernis nicht gehalten werden kann, d. h., wegen der hohen Geschwindigkeit bricht der End-Effektor aus der Bahn aus. Trotzdem ist das System schnell in der Lage, den Zielabstand wieder herzustellen und die Konturverfolgung weiter durchzuführen. Die Fähigkeit der Sensoren, nicht-geerdetes Aluminium zu erkennen, ist besser als die, den Menschen zu erkennen. Tatsächlich liegt im Labor die mit einem

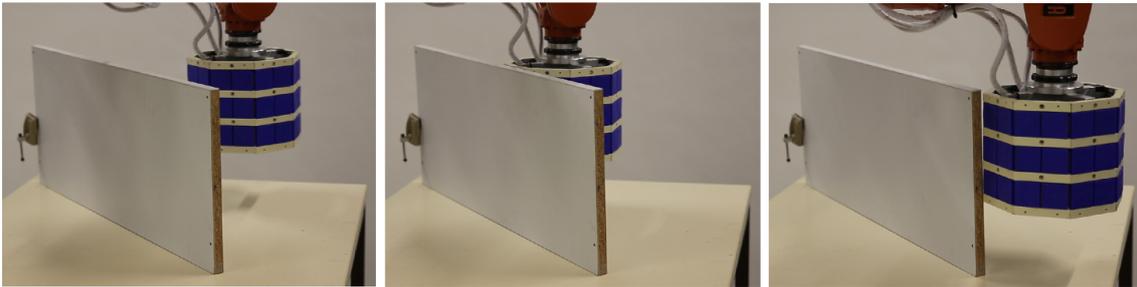


Abbildung 6.10: Sequenz, in der der End-Effektor versucht, kollisionsfrei um eine Holzplatte zu navigieren (Bildquelle: [16] ©2016 IEEE)

Multimeter gemessene Kopplung der Aluminiumplatte an Erde bei $\sim 0,05$ nF und die des Menschen bei $\sim 0,4$ nF. Die Kopplung des Menschen ist fast 10 Mal höher und somit sind diese Ergebnisse vielversprechend für die sichere Mensch-Roboter-Interaktion.

Wie bereits diskutiert wurde, ist es mit selbst-kapazitiven Systemen schwierig, nicht leitende Materialien zu erfassen. Diese Tatsache hat sich auch im Experiment mit der Holzplatte bemerkbar gemacht, wo die Ausführung nicht zufriedenstellend beendet wurde, wie in Abbildung 6.10 dargestellt wird. Bei einer Geschwindigkeit von 60 mm s^{-1} ist das System in der Lage, das Hindernis zu erkennen und entlang der Fläche der Holzplatte zu navigieren. Es ist jedoch nicht in der Lage, um die Kante herum zu fahren, ohne diese zu berühren, was in dem letzten Bild aus Abbildung 6.10 erkennbar ist.

6.6 Fazit und Anforderungen für die Weiterentwicklung des Sensors

Anders als beim berührungslosen Ausrichten in Kapitel 5 tritt bei der Methodik, welche die Aufgabe der Konturverfolgung löst, das kapazitive Messprinzip einen Schritt in den Hintergrund: Die Daten aus dem Array am End-Effektor können meistens einfach als Tiefenkarte betrachtet werden. Herkömmliche Methoden der Bildverarbeitung ermöglichen das Lokalisieren des Hindernisses in Bezug zum End-Effektor. Darüber hinaus können aus den orts aufgelösten Daten Informationen zur Geometrie, d. h. die tangentielle Ausrichtung und Krümmung des Hindernisses, gewonnen werden. So wird das schrittweise Planen einer kollisionsfreien Bewegung um das Hindernis herum möglich.

Eine bedeutend höhere Ortsauflösung der Sensoren ist nach Einschätzung des Autors für die Konturverfolgung/Kollisionsvermeidung nicht zwingend notwendig, da weder die elektro-mechanische Integration problematisch ist, noch die Erfüllung der Aufgabe eine höhere Ortsauflösung voraussetzt. In den Fällen, in denen die erfassten Merkmale kleiner sind als die Sensorfläche, wäre sie jedoch wünschenswert gewesen. So ist die Bestimmung von kleinen Krümmungsradien durch die Ortsauflösung begrenzt. Auch die Abstandsschätzung könnte bei einer höheren Ortsauflösung die Fälle von großen Objekten in weiter Entfernung und kleinen Objekten nah an der Sensorfläche besser differenzieren. Ein weiterer Aspekt ist, dass die Auskleidung des Roboters auch mit der sicheren Mensch-Roboter-Interaktion einhergeht. Auch hier ist eine höhere Auflösung wünschenswert, um Gesten nicht nur auf der Ebene von Handbewegungen (vgl. [17]), sondern auch von Fingerbewegungen

erkennen zu können. Wie am Anfang des Kapitels erwähnt, gibt es also einen gewissen Zusammenhang zwischen der Funktion und Rolle des ausgekleideten Robotersegments und der zu erwartenden erforderlichen Ortsauflösung.

Die Reichweite des Sensors für leitende Materialien, inklusive des Menschen, ist bei der Fläche des LAMs ausreichend. Für nicht-leitende Objekte kann durch das System eine Erkennung der Hindernisse nicht ausreichend garantiert werden. Eine Verwendung einer beidseitig-kapazitiven Messung ist also eine essenzielle Voraussetzung für ein neues Sensorkonzept. Es ist zu beachten, dass dies trotzdem keine Erkennung von Hindernissen jeglicher Art garantieren kann. Insbesondere, wenn mit dünnen Hindernissen zu rechnen ist, muss ggf. auf weitere Messprinzipien ausgewichen werden, wie akustische oder optische Messungen (s. Kapitel 3).

Zusammengefasst lassen sich folgende Anforderungen für einen neuen Sensor formulieren, welche die Auskleidung von äußeren Partien des Roboters betreffen:

Anforderungen Auskleidung (AA)

AA1 Beidseitig-kapazitives Messen: Der Sensor soll im beidseitig-kapazitiven Modus messen können, um nicht-leitende Materialien robust erkennen zu können.

AA2 Flexible Integration: Das Sensorelement soll geometrisch flexibel integrierbar sein, d. h., es soll räumlich unabhängig von der Auswertelektronik angebracht und auf planaren und gekrümmten Flächen realisiert werden können.

AA3 Modularisierung/Vernetzung: Jedes Sensormodul soll eine integrierte Datenverarbeitung haben und beliebig mit weiteren Modulen vernetzbar sein.

AA4 Ortsauflösung: Es ist wünschenswert, dass die Ortsauflösung gesteigert wird, um die hochperformante und sichere Mensch-Roboter-Interaktion zu ermöglichen.

TEIL III

Weiterentwicklung des kapazitiven taktilen Näherungssensors:
Realisierung einer flexiblen Orstauflösung

KAPITEL 7

Weiterentwicklung des kapazitiven taktilen Näherungssensors

Mit der Technologie des TNS V1.0 war es bereits möglich, innovative Methoden für das Vorausrichten und Greifen sowie für die Konturverfolgung/Kollisionsvermeidung zu zeigen. Dennoch war von Anfang an klar, dass die Hardware, deren Signalverarbeitung in einem FPGA-Evaluationsboard realisiert ist, praktisch nicht integrierbar ist. Die Verwendung dieser Hardware kann nur zu einem prinzipiellen Machbarkeitsnachweis führen. Deshalb war es notwendig, eine neue Hardware zu konzipieren und zu realisieren, sodass die vorgeschlagenen Methoden in Zukunft auf performantere und robustere Weise umgesetzt werden können. Die Erfahrung aus der Entwicklung der Applikationen in den Kapiteln 5 und 6 sind als Anforderungen für den neuen Entwurf formuliert worden (s. Abschnitte 5.5 und 6.6).

In diesem Kapitel wird systematisch der neue Sensor vorgestellt. Zuerst wird das Sensorkonzept vorgestellt, gefolgt von dessen Umsetzung inklusive Schaltung. Es wird eine Prototyp-Hardware, „TNS V2.0“, vorgestellt, die diese Schaltung umsetzt. Zuletzt werden in einer kleinen Evaluation die wichtigsten Aspekte der Funktionalität des Sensors überprüft. Für das Verständnis dieses Kapitels sei an dieser Stelle auf Abschnitt 2.2.2 der Grundlagen verwiesen. Dort werden die hier verwendeten kapazitiven Konfigurationen detailliert erläutert. Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden auf der Konferenz *Haptics Symposium 2016* vorgestellt [1].

7.1 Entwurf und Prototyp des neuen Sensors

In diesem Abschnitt wird der vorgeschlagene Sensorentwurf diskutiert. Zuerst wird erklärt, wie das Sensorelement aufgebaut ist, d. h., wie die Elektroden und das komprimierbare dielektrische Material angeordnet werden müssen, um die gewünschten Ereignisse erfassen zu können. Dann wird die analoge Schaltung präsentiert, die gebraucht wird, um den Sensor zu betreiben. Zuletzt wird die Gesamtarchitektur vorgestellt, also die Bestandteile des Sensors inklusive digitaler Signalverarbeitung.

7.1.1 Altes Sensorelement

Der alte Sensorentwurf wurde bereits in Kapitel 4 beschrieben. An dieser Stelle sei deshalb nur für den Zweck des direkten Vergleichs nochmals der Aufbau des Sensorelements erläutert. Wie in Abbildung 7.1 zu sehen, besitzt jedes Modul einen Proxel, welcher über die Deckelektrode realisiert wird, und eine Vielfalt von Taxels (taktiles Array), die durch eine spezialisierte Schicht realisiert werden. Um den Sensor im Näherungsmodus (selbst- und beidseitig-kapazitiv) betreiben zu können, muss das Element aktiv abgeschirmt werden. Dafür kommen jedoch nicht die Elektroden aus dem taktilen Array in Frage, da diese nur einzeln über einen analogen Multiplexer angesprochen werden können. Dies führt dazu, dass die *Abschirmungselektrode* eingeführt werden muss. Diese wird situativ zum Abschirmen mit einem Spannungsfolger auf das gleiche Potential wie die Deckelektrode gebracht (Näherungsmodus) oder an Masse-Potential gebracht, wenn taktil gemessen wird. Eine weitere Isolator-Schicht muss eingeführt werden, um das taktile Array von der Abschirmungselektrode zu trennen.

7.1.2 Neues Sensorelement

Der Aufbau des neuen vorgeschlagenen Sensors ist in Abbildung 7.2 zu sehen. Das Sensorelement ohne Schaltungselemente besteht aus zwei Elektrodenschichten, welche durch eine komprimierbare Schicht, die aus einem dielektrischen Material besteht, getrennt werden. In der obersten Schicht gibt es eine Vielfalt an *Deckelektroden* $DE_{i,j}$, wodurch gleichzeitig die Ortsauflösung im taktilen Modus *und* im Näherungsmodus definiert wird. Insbesondere war die Ortsauflösung für den Näherungsmodus innerhalb eines Moduls mit dem bisherigen Entwurf nicht möglich. Die *Bodenelektrode* BE ist einzeln pro Modul ausgeführt. Unter Verwendung eines analogen Schalters können die $DE_{i,j}$ auf beliebige Weise, d. h. in allen Kombinationen, angesprochen und zusammengefasst werden. Wenn A die Gesamtfläche in der oberen Schicht ist, so ist es in dem angegebenen Beispiel möglich, Flächen der Größe $\frac{1}{4}A$, $\frac{1}{2}A$, $\frac{3}{4}A$ oder A zusammenzuschalten. Im Folgenden sei erläutert, wie mit diesem Entwurf der Sensor in den drei durch Göger vorgeschlagenen Modi betrieben werden kann:

- Modus 1: Selbst-kapazitiver Näherungsmodus
- Modus 2: Beidseitig-kapazitiver taktiler Modus
- Modus 3: Beidseitig-kapazitiver Näherungsmodus (Empfangsmodus)

Um eine Messung in Modus 1 durchzuführen, wird eine Wechselspannung einer wählbaren Frequenz f_{exc} an eine beliebige Konfiguration von zusammengeschalteten Deckelektroden $DE_{i,j}$ geführt. Gleichzeitig wird unter Verwendung eines Spannungsfolgers diese an die Bodenelektrode BE geführt, um die Schirmwirkung zu erreichen. In diesem Falle übernimmt BE die Funktionalität der Abschirmungselektrode im alten Entwurf. Da es sich um eine selbst-kapazitive Messung handelt, wird der Sende-Strom gemessen. Durch Zeitmultiplexen wird erreicht, dass mehrere Messungen für unterschiedliche Konfigurationen der $DE_{i,j}$ quasi-gleichzeitig, d. h. in einer für die Anwendung bzw. menschliche Wahrnehmung vernachlässigbarer Zeit, durchgeführt werden können. Es ist also möglich, in einem Messzyklus die $DE_{i,j}$ einzeln zu adressieren, um eine hohe Ortsauflösung zu erreichen

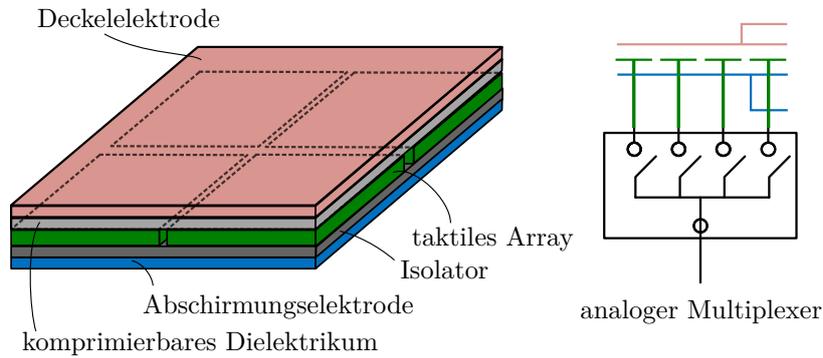


Abbildung 7.1: Der Schichtenaufbau des Sensorelements, welcher durch Göger vorgeschlagen wurde

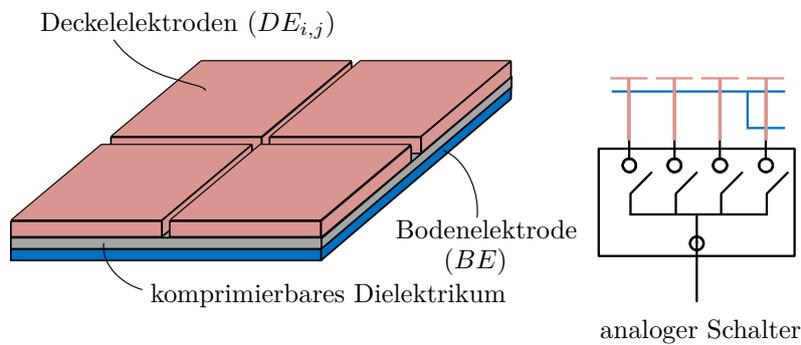


Abbildung 7.2: Der Schichtenaufbau des Sensorelements für den neuen TNS zusammen mit dem analogen Schalter zur Auswahl und Kombination der Elektroden

und quasi-gleichzeitig mehrere $DE_{i,j}$ zusammenzufassen, um eine höhere Reichweite zu erlangen. Die Konfiguration des Sensors in Modus 1 wird in Abbildung 7.3 in Anwesenheit eines leitenden Objekts gezeigt.

Zeitmultiplexen wird ebenso verwendet, um die taktilen Messungen in Modus 2 in jedem

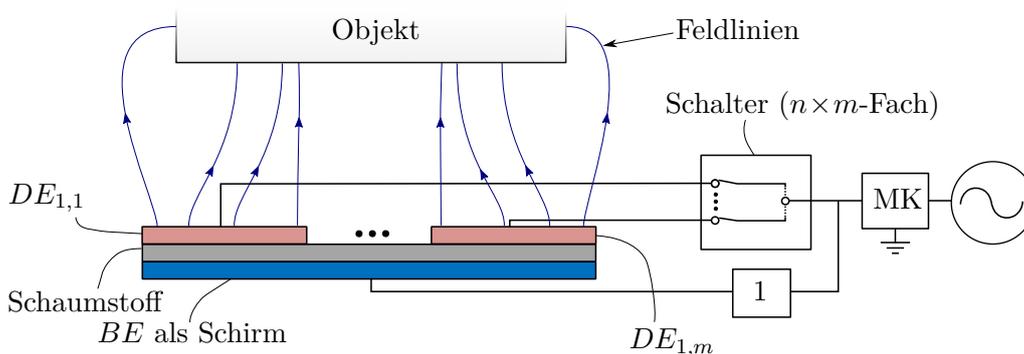


Abbildung 7.3: Der Sensor im selbst-kapazitiven Näherungsmodus mit einem leitenden Objekt; abgebildet sind auch die Signalquelle, der Schalter, der Messkanal (MK) und der Spannungsfolger.

Zyklus durchzuführen. Um die Messungen durchzuführen, wird je eine $DE_{i,j}$ zusammen mit BE zu einem beidseitig-kapazitiven System konfiguriert. Eine externe Kraft, die auf das Sensorelement einwirkt, bewirkt die Kompression der dielektrischen Schicht, wodurch der Abstand von einer oder mehreren $DE_{i,j}$ zu BE reduziert wird. Das Dielektrikum agiert als Feder, welche durch die Normalkraft gestaucht wird. In dem beidseitig-kapazitiven System agiert jede $DE_{i,j}$ als Sende-Elektrode für einen Strom, der durch BE empfangen wird. Die Messung findet dabei auf der Empfängerseite statt. Hierdurch wird in diesem Fall durch die $DE_{i,j}$ und BE die Rolle der Deckelektrode und die der Elektroden aus dem taktilen Array in dem bisherigen Entwurf übernommen. Die Konfiguration des Sensors in Modus 2 unter Auswahl einer Deckelektrode wird in Abbildung 7.4 gezeigt.

Der Empfangsmodus in einem beidseitig-kapazitiven System, also Modus 3, wird möglich, wenn zwei Gruppen von Sensormodulen zusammen koordiniert agieren. Eine der Gruppen wird in Modus 1 betrieben, erzeugt also einen Sende-Strom. Die andere Gruppe ist in Modus 3 konfiguriert und empfängt diesen Strom mit einer entsprechenden Konfiguration von $DE_{i,j}$. Eine Vielfalt von Sensormodulen kann also auch für weiterführende Methoden verwendet werden, wie z. B. die kapazitive Tomographie (ein Vorschlag dazu liefert z. B. [57]). In Modus 3 wird der empfangene Strom auch über einen Spannungsfolger an BE geführt, um die Schirmwirkung zu entfalten. Die Konfiguration des Sensors in Modus 3 wird in Abbildung 7.5 in Anwesenheit einer Elektrode, die einen Strom aussendet, und in der Anwesenheit eines geerdeten Objekts gezeigt.

7.1.3 Messschaltung

Für leitende Objekte in der Nähe eines Sensors, in einer Entfernung von 0 mm bis etwa 100 mm, konnten Kapazitäten zwischen 10 pF und 0,1 pF gemessen werden. Die Verwendung passiver Bauteile in der Schaltung, insbesondere des analogen Schalters zur Auswahl der $DE_{i,j}$, führt parasitäre Kapazitäten in die Schaltung ein, welche es erschweren, änderbare Kapazitäten in den genannten Größenordnungen direkt zu messen. D. h., eine Tiefpassschaltung (s. Abschnitt 2.2.1), wie sie von Göger verwendet wird, ist ungeeignet, da die Änderungen der Kapazitäten im Vergleich zur Gesamtkapazität klein sind. Deshalb wurde eine Brückenschaltung, welche in Abbildung 7.6 dargestellt wird, verwendet. Mit ihr ist es möglich, die parasitären Kapazitäten (welche der Schaltung entspringen) und Offset-Kapazitäten (welche der Kopplung des Sensors mit der Umwelt entspringen) auszugleichen.

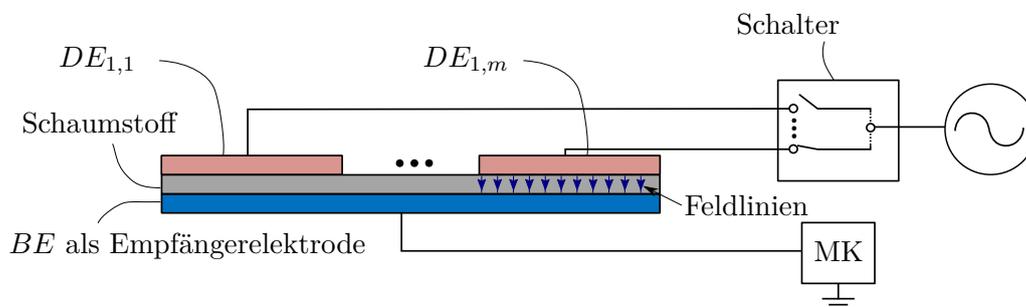


Abbildung 7.4: Der Sensor im taktilen Modus

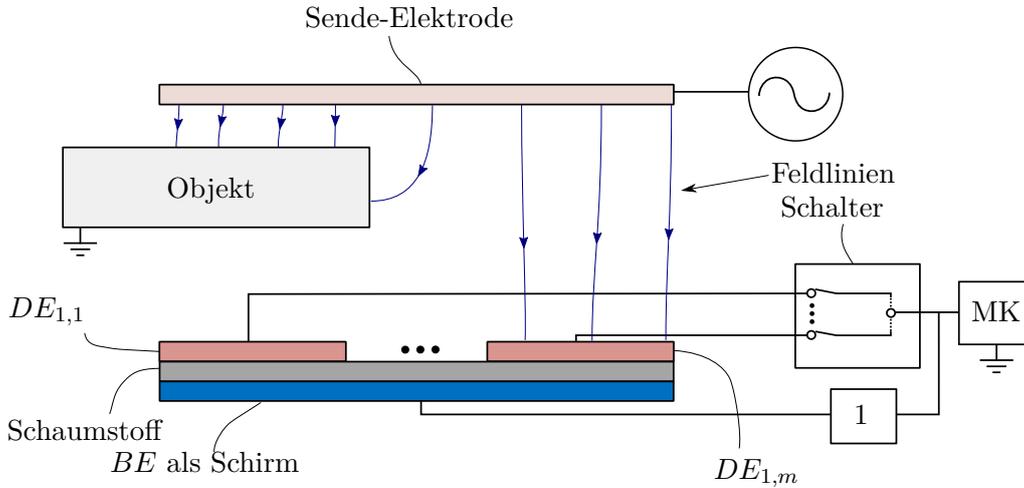


Abbildung 7.5: Der Sensor im beidseitig-kapazitiven Näherungsmodus

Die Brückenspannung gibt die Änderung der Kapazität in Bezug zu einer Referenzkapazität an. Letztere kann im Prinzip so eingestellt werden, dass die Spannung 0 V am Verstärker anliegt. In Abbildung 7.6 ist die Referenzkapazität C_{ref} gegeben durch einen gespiegelten Schalter, der vorgegebene Kondensatoren auswählt und nach Bedarf parallel schaltet. Dabei ist zu beachten, dass der Schalter je nach Stellung selbst unterschiedliche Eingangskapazitäten aufweist. Diese Lösung ermöglicht also einen unkomplizierten Ausgleich der parasitären Kapazitäten, bringt aber zusätzlichen Platz-, Schaltungs- und finanziellen Aufwand für die Dopplung des Schalters mit ein.

Im Sende-Modus (Modus 1) wird Schalter (1) verwendet, um die Brücke mit dem Erregersignal \underline{U}_{exc} zu betreiben. Der Sende-Strom wird gemessen, indem die Brückenspannung gemessen wird, wie in (7.1) und (7.2) dargestellt

$$\underline{U}_B = \underline{U}_{exc} \left(\frac{Z_{C_s} || Z_{C^*}}{R + Z_{C_s} || Z_{C^*}} - \frac{Z_{C_{ref}} || Z_{C^*}}{R + Z_{C_{ref}} || Z_{C^*}} \right) \quad (7.1)$$

$$\hat{U}_B = \hat{U}_{exc} \left| \left(\frac{1}{1 + j\omega R(C_s + C^*)} - \frac{1}{1 + j\omega R(C_{ref} + C^*)} \right) \right|, \quad (7.2)$$

wo \underline{U}_B und \underline{U}_{exc} die jeweils komplexwertige Brückenspannung und die Erregerspannung sind und \hat{U}_B und \hat{U}_{exc} entsprechend ihre Amplitude. Das Sensorelement wird abgeschirmt, indem über Schalter (2) BE mittels eines Spannungsfolgers versorgt wird.

Im Empfangsmodus (Modus 3) wird das Erregersignal von der Brückenschaltung getrennt, d. h., Schalter (1) verbindet an Masse. In diesem Fall wird über den Widerstand der Strom gemessen. Hier wird ebenso BE mithilfe von Schalter (2) über den Spannungsfolger mit der gleichen Spannung versorgt, um das Sensorelement abzuschirmen. Die äquivalente Schaltung für ein Paar von Modulen im Sende-Empfangsmodus wird in Abbildung 7.7

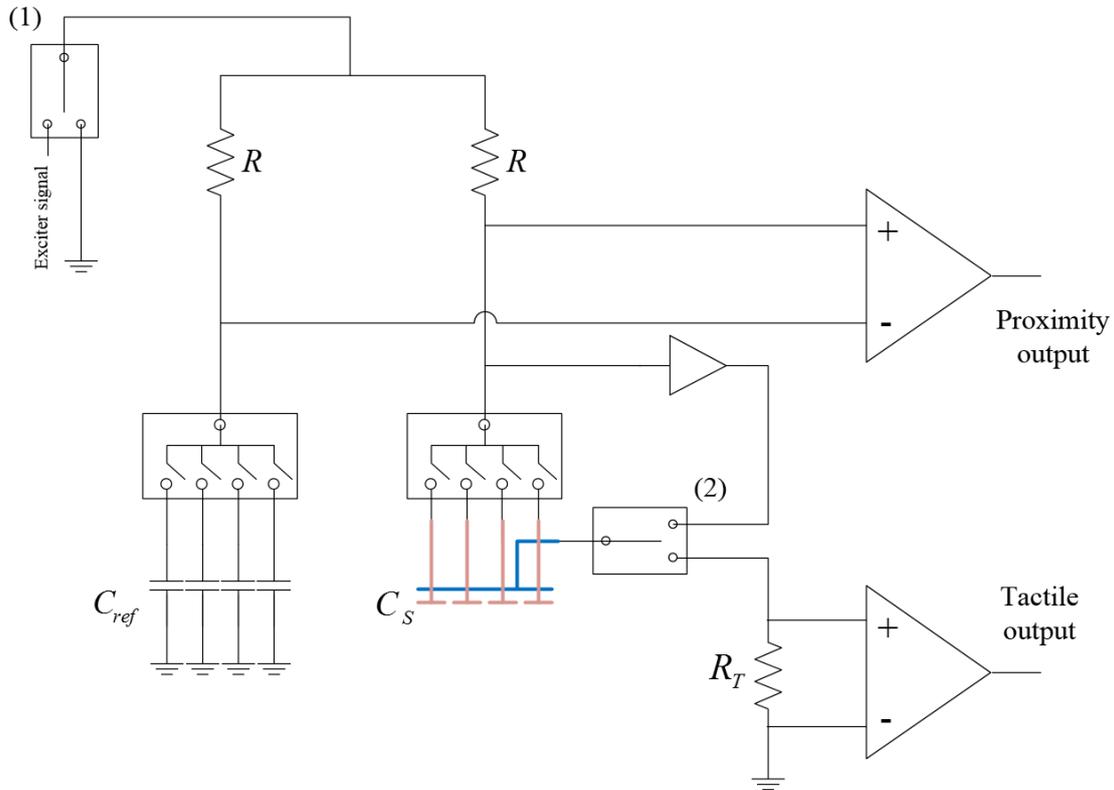


Abbildung 7.6: Brückenschaltung zur Kompensation von parasitären Kapazitäten im Näherungsmodus, inklusive der Messschaltung für den taktile Modus sowie Schalte (1) und (2) zur Rekonfiguration des Systems (Bildquelle: [1] ©IEEE 2016)

gezeigt. Die gemessene Spannung an der Empfängerseite wird, wie folgt, beschrieben:

$$\underline{U}_R = \underline{U}_{exc} \left(\frac{Z_{C_R^*} \| R_R}{Z_{C_R^*} \| R_R + Z_{C_S}} \frac{Z_{C_S^*}}{Z_{C_S} + R_S} \right) \quad (7.3)$$

$$\hat{U}_R = \hat{U}_{exc} \left| \left(\frac{\frac{C_R^* + R_R}{C_R^* R_R}}{\frac{Z_{C_R^*} + R_R}{Z_{C_R^*} R_R} + Z_{C_S}} \frac{Z_{C_S^*}}{Z_{C_S} + R_S} \right) \right|. \quad (7.4)$$

C_S^* und R_S sind jeweils die parasitäre Kapazität und der Messwiderstand auf der Senderseite. C_R^* und R_R sind die entsprechenden Werte an der Empfängerseite.

Im taktilem Modus (Modus 2) wird die Spannung direkt gemessen, um die Änderung der Kapazität durch die Deformation der Isolationsschicht festzustellen. In dieser Konfiguration verbindet Schalter (1) mit dem Erregersignal, und Schalter (2) führt das Signal durch die taktile Messschaltung.

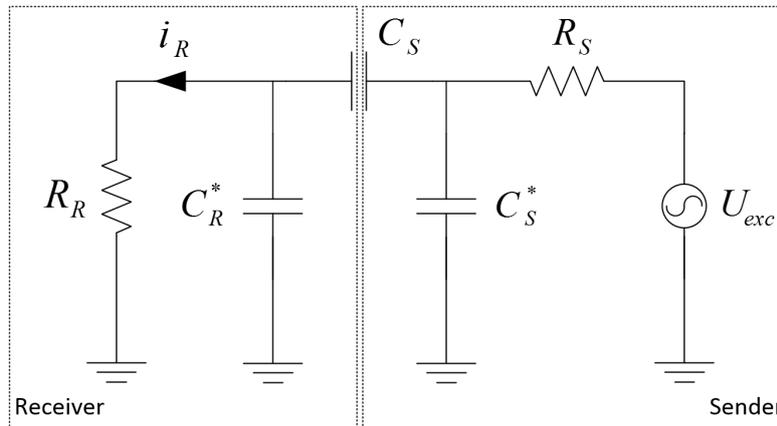


Abbildung 7.7: Äquivalente Schaltung für den beidseitig-kapazitiven Näherungsmodus (Modus 3) mit einem Sender und einem Empfänger (Bildquelle: [1] ©IEEE 2016)

Am Übergang zur digitalen Domäne wird das Signal mit einer Rate von etwa 1 MHz AD-gewandelt. Nach einer Filterung werden die Amplituden mit Hilfe der Diskreten Fourier Transformation (DFT) nach demselben Verfahren ermittelt, wie es bereits für den alten Sensor verwendet wurde (s. Abschnitt 4.3). Die Referenzphase für die DFT ist unabhängig vom Erregersignal, und daher ist diese nicht aussagekräftig.

7.2 Validierung des neuen Sensorkonzepts anhand des Prototypen „TNS V2.0“

Zur Validierung des Sensorkonzepts wurde eine Hardware entwickelt, welche in Abbildung 7.8 abgebildet ist. Als Mikrocontroller wird der 32-Bit PSoC-CY8C58LP von Cypress Semiconductors verwendet [11], der mit einer Taktrate von 67 MHz läuft. Der PSoC (*Programmable System on Chip*) bietet bereits als Peripherie zwei A/D-Wandler, die jeweils für die Näherungsmessung und die taktile Messung verwendet werden. Der verwendete Signalerzeuger ist der DDS-Baustein AD9835 [13], dessen Signal mit dem Operationsverstärker LM8262 [40] verstärkt wird.

7.2.1 Konfiguration des Sensormoduls

Das Sensormodul ist voll konfigurierbar, wobei die wichtigsten Parameter zur Laufzeit über ein Kontrollregister bestimmt werden können, welches über das Bussystem erreicht werden kann, wie in Abbildung 7.9 dargestellt. Die Umkonfigurierbarkeit des Sensors ist in Hinblick auf Szenarien mit Proximity Servoing oder Haptischer Exploration sinnvoll, wo die Reichweite/Ortsauflösung entsprechend der vorliegenden Situation angepasst werden kann. Der Zugriff auf die Frequenz der Erregerspannung ermöglicht z. B. die frequenzabhängige Analyse der Permittivität der Objekte. Insgesamt ist der Nutzer des Sensors in der Lage, folgende Einstellungen vorzunehmen: Elektrodenkonfiguration, Messmodus, Frequenz des Erregersignals, Fenstergröße des Mittelwertfilters, Offsetkompensation und Ausgabebetyp (Sensorwert oder Distanzwert). In dieser konkreten Ausführung ist der Sensor je nach Konfiguration in der Lage, Daten mit einer Rate zwischen 22 Hz und 380 Hz zu liefern, mit

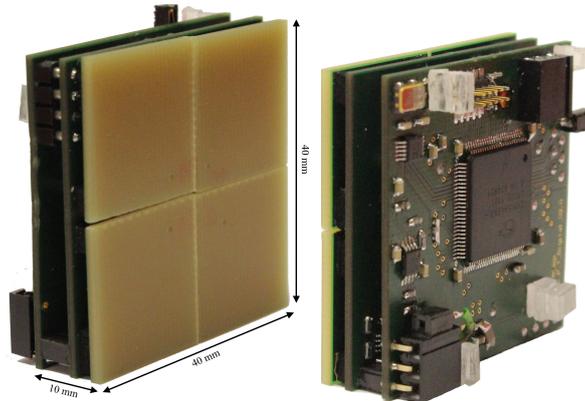


Abbildung 7.8: Der erste Prototyp, „TNS V2.0“, der das vorgestellte Sensorkonzept umsetzt; links: Vorderansicht mit den Schichten an Elektroden und Schaumstoff, welche das Sensorelement ausmachen; rechts: Rückseite des Moduls, auf der die digitale Elektronik realisiert ist. Die analoge Elektronik liegt auf der Innenseite der Platine und ist demnach verdeckt. (Bildquelle: [1] ©IEEE 2016)

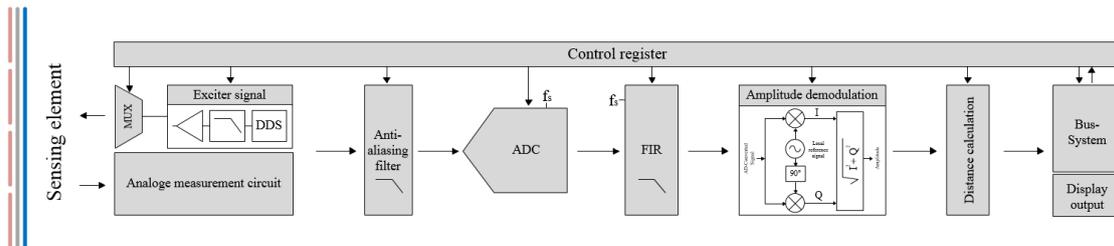


Abbildung 7.9: Funktionsblöcke der analogen und digitalen Komponenten, welche verwendet werden, um die Signale zu messen, um den Operationsmodus des Sensors zu steuern und um ihn mit einem Bussystem zu verbinden (Bildquelle: [1] ©IEEE 2016)

einer entsprechenden Latenz zwischen 48 ms and 3 ms. So ist z. B. die Datenrate, wenn DE_1 bis DE_4 und die Gesamtheit der $DE_{i,j}$ für zwei Frequenzen in Modus 2 ausgelesen werden, etwa 40 Hz und die Latenz etwa 26 ms. In jedem Fall ist die Datenrate und Latenz stark abhängig von der Rechenleistung und Möglichkeit der parallelen Verarbeitung des verwendeten Mikrocontrollers und der erwünschten Qualität der Messungen.

7.2.2 Experimente

Das Ziel der Experimente ist es, die essenziellen Merkmale des vorgestellten Entwurfs zu überprüfen, d. h. den Betrieb in den drei besprochenen Modi und die Funktionsweise der flexiblen Ortsauflösung. In dem Versuchsaufbau für Näherungsmessung, welcher in Abbildung 7.10 dargestellt wird, ist an einer Z-Einheit das Probematerial befestigt. Dieses wird dann in senkrechter Richtung zum Sensor verfahren. Platten aus vier Materialien wurden getestet: Aluminium (geerdet), PVC, Holz und Beton. Der Sensor ist für die Versuche, wie folgt, konfiguriert:

- Amplitude des Erregersignals: 2,5 V
- Frequenz des Erregersignals: 100 kHz
- Elektrodenkonfiguration: DE_0 - DE_3 einzeln und alle zusammen (DE)

Die Abmaße der Platten sind in Tabelle 7.1 hinterlegt.

Tabelle 7.1: Abmaße der Probematerialien in mm³

Alu	Wood	PVC	Concrete
120 × 100 × 20	240 × 100 × 18	240 × 100 × 16	240 × 100 × 20

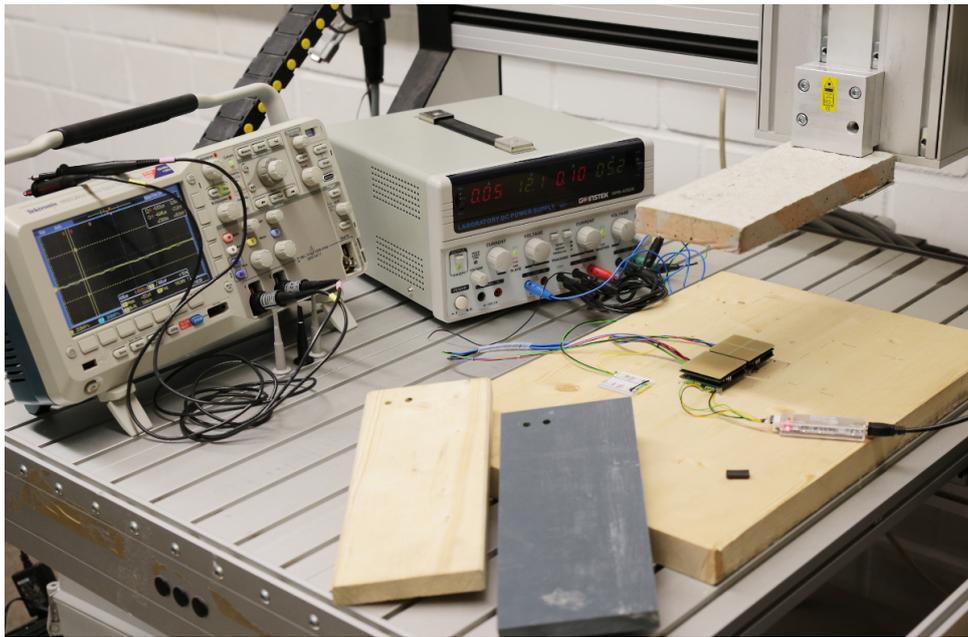
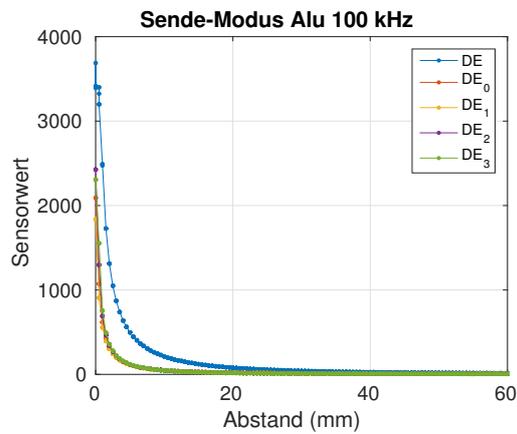


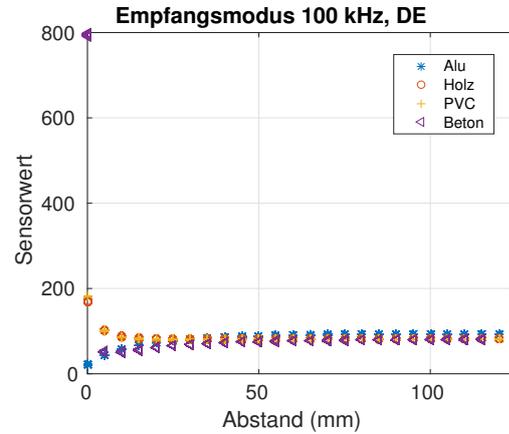
Abbildung 7.10: Versuchsaufbau zur Validierung des Prototypen TNS V2.0

Für die Platte aus (geerdetem) Aluminium wurde eine Messung im selbst-kapazitiven Modus für die einzelnen und zusammengeschalteten DE_i über einen Bereich von 0-60 mm durchgeführt. In Abbildung 7.11(a) sind die Messkurven aufgetragen. Der erwartete Verlauf, ähnlich zu $\frac{1}{x}$, ist für alle Messungen deutlich zu erkennen. Aus den Messungen ist ebenso deutlich erkennbar, dass die Reichweite bzw. Empfindlichkeit des Sensors mit größeren Flächen steigt.

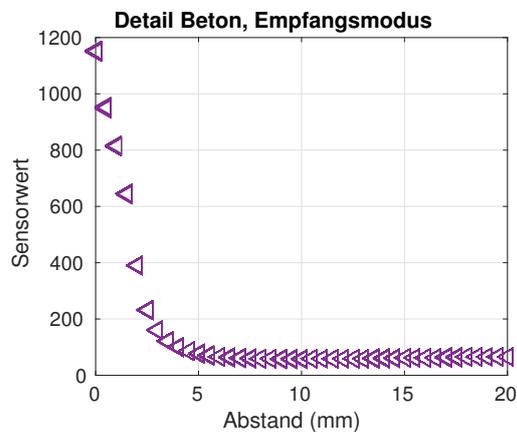
Da die beidseitige-kapazitive Messung sowohl für leitende als auch für isolierende Materialien geeignet ist, wurden für diesen Fall Messungen mit allen vier vorgeschlagenen Materialien durchgeführt. Dazu wurde ein erstes Modul im Sende-Modus konfiguriert und ein weiteres im Empfangs-Modus, wobei dazu alle DE_i in beiden Modulen zusammengeschaltet sind. Entsprechend der Erläuterung aus Abschnitt 2.2.2 steigt das Signal für die nicht leitenden Materialien, wenn sich diese den Sensormodulen nähern, wie an den Messkurven in Abbildung 7.11(b) erkennbar. Unerwarteterweise verhält sich der Beton wie ein nicht-geerdeter Leiter: Zunächst kann ein Abfall des Signals beobachtet werden; ab einem Abstand von 5 mm hat das Signal eine Wende und steigt dann rapide bis 0 mm an,



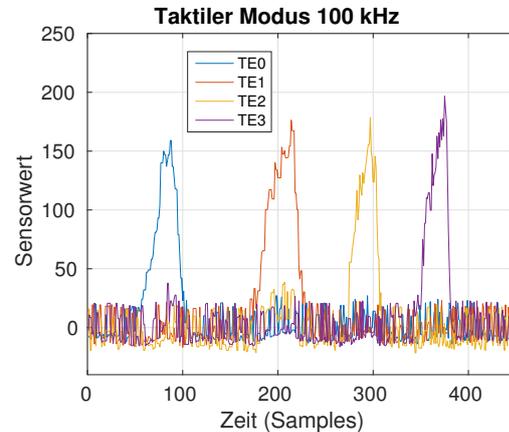
(a) Messkurven im Sende-Modus für geerdetes Aluminium



(b) Messkurven im Empfangs-Modus für unterschiedliche Materialien



(c) Detailansicht zur Messkurve der Betonplatte



(d) Signale im taktilem Modus

Abbildung 7.11: Messungen, welche die wichtigste Funktionalität des Sensors betreffen (Bilderquelle: [1] ©IEEE 2016)

wie in Abbildung 7.11(c) zu erkennen. Eine Erklärung dafür ist, dass der Beton vor dem Versuch noch nicht vollständig ausgetrocknet, also im Inneren wegen des Wassergehalts noch leitend war.

Um die prinzipielle Tauglichkeit des taktilem Modus zu überprüfen, wurde nacheinander auf die DE_i ein Gewicht von 1 kg gelegt. Der entsprechende Verlauf der Signale ist in Abbildung 7.11(d) zu sehen. Die vier Peaks sind deutlich erkennbar. Sie weisen jedoch unterschiedliche maximale Amplituden auf. Das Verhalten der taktilem Zellen bezüglich Kompression ist nicht direkt vergleichbar. Dafür sind Ungenauigkeiten verantwortlich, welche bei der manuellen Montage nicht zu vermeiden sind.

KAPITEL 8

Validierung des Sensorkonzepts anhand des Prototypen „TNS V3.1“

Eine ausführliche Evaluation des vorgestellten Sensorkonzepts erfolgt in diesem Kapitel anhand der Hardware „TNS V3.1“, welche in Abbildung 8.1 gezeigt wird. Die Geometrie und die Auflösung von 4×2 des Sensorelements sind so gewählt, dass es in den Backen eines Greifers zur Erfassung von Gradienten verwendet werden kann (s. Kapitel 5). Die analoge und digitale Hardware des TNS V3.1 basiert auf der des TNS V2.0. Die wesentlichen Erweiterungen sind, dass die Sensormodule über eine Interrupt-Leitung verbunden werden können und dass die Taktgebung der DDS-Bausteine von Modulen verbunden werden können, damit eine definierte Phase zwischen den Erregersignalen herrscht. Der erste Aspekt kommt jedoch in der vorliegenden Evaluation nicht zum Tragen. Es ist zu beachten, dass bei TNS V3.1 das Sensorelement auf einfache Weise austauschbar ist, d. h., es ist elektro-mechanisch entkoppelt von der Elektronik.

Dieses Kapitel steht auch im Zeichen eines Vergleichs des neuen Sensorkonzepts und der neuen Hardware mit dem Sensorkonzept und der Hardware von Göger. Insgesamt wird jedoch unabhängig von diesem Vergleich der Nachweis erbracht, dass der Sensor in

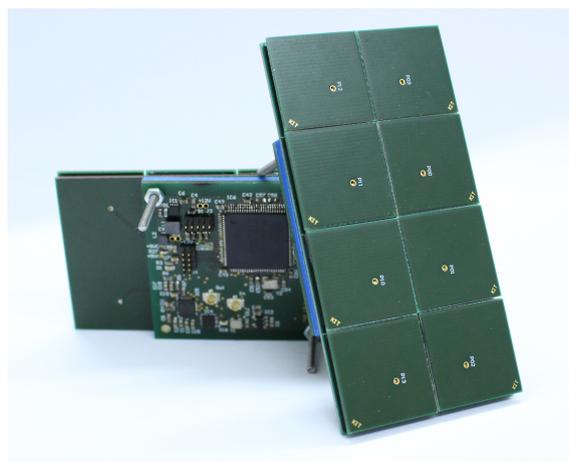


Abbildung 8.1: Die Hardware des TNS V3.1 und das Sensorelement mit 4×2 Deckelelektroden

seinen Betriebsmodi, selbst-kapazitiv, beidseitig-kapazitiv und taktil, eingesetzt werden kann. Es wird gezeigt, dass der Sensor mithilfe der beiden Näherungsmodi in der Lage ist, Gradienten in den sechs Raumfreiheitsgraden sowohl für leitende als auch nichtleitende Objekte zu erkennen. Insbesondere wird dafür die Fähigkeit des Sensors genutzt, Elektroden zusammenzuschalten, sodass Kondensatorkonfigurationen entstehen, welche diese Gradientenbestimmung unterstützen.

8.1 Zeitverhalten

Im System von Göger und im hier vorgeschlagenen Sensor besteht die Erfassung der Amplitude des Signals in der Abtastung durch einen A/D-Wandler, der Demodulation der Rohwerte mittels DFT und einer anschließenden Tiefpassfilterung durch eine Mittelwertbildung (s. Abbildung 4.5). Die Wahl der Größe des Fensters zur Mittelwertbildung ist ein Kompromiss zwischen der gewünschten Datenrate bzw. Latenz und dem zu erwartenden Rauschen. Um die Systeme TNS V1.0 und TNS V3.1 hinsichtlich Zeit- und Rauschverhalten miteinander vergleichen zu können, wurde für beide ein Mittelwertfenster der Größe 32 festgelegt. Für das Sensorarray mit 48 Sensoren ist das die Einstellung, die für die Konturverfolgung verwendet wurde (s. Kapitel 6). Es ist zu bemerken, dass die Hardware des TNS V1.0 prinzipiell leistungsfähiger ist als die des TNS V3.1. Der Vergleich ist eine Voruntersuchung zu der Übertragbarkeit der Verfahren, welche mit TNS V1.0 gezeigt wurden, auf die neuen Sensoren.

Um das zeitliche Verhalten des TNS V3.1 zu analysieren, wurde eine Blockkonfiguration aus vier Deckelektroden zusammengeschaltet und gemessen, wieviel Zeit der Mikrocontroller braucht, um das Signal abzutasten und anschließend einen Mittelwert über die 32 Werte zu bilden. Die Zeitmessung wird durch einen digitalen Ausgang ermöglicht, der aus dem Code auf dem Mikrocontroller schaltbar ist. Um die Zeit zu messen, die der Mikrocontroller für einen bestimmten Abschnitt braucht, wird der Ausgang vor Eintritt in diesen Abschnitt auf 1 gesetzt und nach Austritt wieder auf 0. Eine Messung der Spannung mit einem Oszilloskop ermöglicht dann die Bestimmung der Zeit. Abbildung 8.2 zeigt links die Zeitmessung für die Abtastung des Signals, inklusive Konfiguration der Elektroden und Speicheroperationen, welche die abgetasteten Werte im Hauptspeicher des Mikrocontrollers bereitstellen (440 μ s). Rechts wird die Zeitmessung für die Demodulation und Mittelwertbildung, inklusive der Operation, um das Ergebnis an den Datenbus zu legen, gezeigt (2,6 ms).

Eine Periode des Erregersignals beträgt 8,9 μ s, wobei für die Betrachtungen hier auf 10 μ s aufgerundet wird. Es werden insgesamt 32 Perioden für die Mittelwertbildung und 5 Perioden Versatz (Offset) verwendet, wodurch das Signal für eine Zeit von etwa 370 μ s abgetastet wird. Die fünf Perioden Versatz sind vorgesehen, um Artefakte zu vermeiden, welche durch das Umschalten der Elektrodenkonfiguration auftreten. Es werden etwa 70 μ s für die restlichen Operationen in diesem Abschnitt benötigt. Die Berechnung der DFT von jeder der 32 Perioden und die anschließende Mittelwertberechnung darüber benötigt 2,6 ms auf dem Mikrocontroller. Es zeigt sich, dass 83 % der Rechenzeit des Mikrocontrollers für die Berechnungen benötigt wird. Die Digitalisierung benötigt dahingegen lediglich 17 %.



Abbildung 8.2: Links: Zeitmessung für die Abtastung der Rohwerte; rechts: Zeitmessung für die Demodulation und Mittelwertbildung; es ergibt sich eine Gesamtzeit von 3,04 ms.

Die Hardware des TNS V1.0 bietet nicht die Möglichkeit, solch eine direkte Zeitmessung durchzuführen, aber die verwendete Zeit kann abgeschätzt werden. Die Datenrate beträgt 25 Hz. In dieser Zeit werden pro Kanal je 16 Messungen im taktilem Modus und im Näherungsmodus, also 32 Messungen insgesamt durchgeführt. Die Kanäle werden im FPGA parallel ausgelesen und verarbeitet, d. h., die Analyse kann anhand eines Kanals durchgeführt werden. In der Hardware des TNS V1.0 ist ein Versatz von 32 Perioden vorgesehen, sodass hier das Signal pro Messung für eine Zeit von etwa $(32_{\text{offset}} + 32_{\text{mittelwert}}) \cdot 10 \mu\text{s} = 640 \mu\text{s}$ abgetastet wird. Die Zeit x , die durch Speicheroperationen, Mittelwertbildung und sonstige Operationen anfällt, lässt sich nun berechnen:

$$((640 \mu\text{s} + x) \cdot 32_{\text{messungen}}) \cdot 25 \text{ Hz} = 1 \text{ s} \Rightarrow x = 610 \mu\text{s} \quad (8.1)$$

Es ergibt sich also, dass die Hardware des TNS V1.0 deutlich zeiteffizienter in der Berechnung der DFT und Mittelwertbildung ist. Da der FPGA die Operationen mit dedizierter Logik ausführen kann, ist dies kein überraschendes Ergebnis.

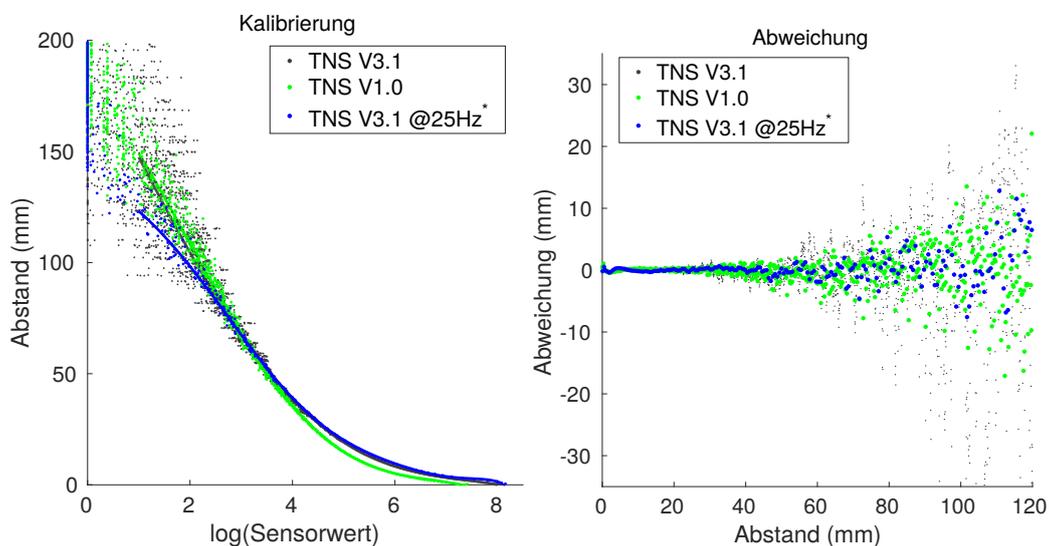
Das Zeitverhalten kann in beiden Fällen noch optimiert werden. So ist eine prinzipielle Verbesserung möglich, wenn Abtastung und Demodulation/Mittelwertbildung parallelisiert werden bzw. nach dem Schema einer Pipeline verarbeitet werden. Während die digitale Verarbeitung für eine Elektrodenkonfiguration läuft, wird parallel die Abtastung des Signals für die folgende Elektrodenkonfiguration durchgeführt und vom A/D-Wandler mit DMA (engl. *direct memory access*, d. h. Speicherzugriffe ohne Beteiligung des Prozessors) übertragen. Im Idealfall ist die Zeit für die Verarbeitung kürzer als die Abtastzeit, wodurch das Signal lückenlos abgetastet werden könnte. Dafür kommt spezialisierte und leistungsstärkere Hardware in Frage, also etwa FPGAs oder DSPs. Eine kostengünstigere Lösung ist eventuell die Übertragung der ungefilterten Daten an das Host-System, wo die Berechnung der Filterung schneller abgewickelt werden kann. Diese Möglichkeit hängt jedoch von der Bandbreite des Bus-Systems ab, und es wird ggf. ein Kompromiss zwischen lokaler Filterung und Bandbreite gefunden werden müssen. Diese Möglichkeit ist generell für kleinere Sensornetzwerke wie die des Greifers geeignet, wo vergleichsweise wenig Daten anfallen.

8.2 Rauschverhalten

8.2.1 TNS V1.0 und TNS V3.1

Um das Rauschverhalten beider Systeme gegenüberzustellen, wurde bei einer Fensterbreite von 32 für die Mittelwertbildung ein Kalibriervorgang mit einer geerdeten Aluminiumplatte durchgeführt. Es handelt sich dabei um dieselbe Platte, welche für die Experimente zur Konturverfolgung verwendet wurde (s. Abbildung 6.7). Sie wird verwendet, da sie wegen ihrer Größe bei der weitesten Entfernung detektiert werden kann und als geerdeter Leiter den maximalen Ausschlag der Sensorwerte verursacht. Durch das Zusammenschalten von vier Deckelektroden des TNS V3.1 haben beide Sensoren die gleiche Fläche. Abbildung 8.3(a) zeigt den Signal/Weg-Verlauf, inklusive Polynomregression für TNS V3.1 (in Grau), TNS V1.0 (in Grün) und TNS V3.1 bei einer Datenrate von 25 Hz (in Blau). Das Signal der Sensoren wird logarithmiert, um deren Wertebereich anzupassen, sodass eine Polynomregression möglich ist. In Abbildung 8.3(b) sind die entsprechenden Abweichungen der Datenpunkte von den Regressionskurven dargestellt. Um die Abweichungen der Sensordaten vom Polynom zu bestimmen, wird der Abstand zur Platte als Ground-Truth gewertet und die gegebenen Sensorwerte über das Polynom in einen Distanzwert umgewandelt. Die Differenz zwischen realem und geschätztem Abstand ist dann die Abweichung. Diese Abweichung a für eine Messung i berechnet sich bei dem gegebenen Regressionspolynom p und dem Abstand d als:

$$a_i = d_i - p(s_i). \quad (8.2)$$



(a) Datenpunkte und Regressionen für TNS V1.0 und TNS V3.1

(b) Abweichungen der Datenpunkte von den Regressionen

Abbildung 8.3: Kalibrierungswerte für TNS V1.0 und TNS V3.1 mit einer Aluminiumplatte; die Regressionen werden als durchgezogene Linien dargestellt.

Es ist erkennbar, dass das Rauschen von TNS V3.1 höher ist als das des TNS V1.0. Der Verlauf der Regressionen ist bei höheren Entfernungen sehr ähnlich. Im näheren Bereich, ab 50 mm, ist das Rauschverhalten beider Sensoren ähnlich, TNS V3.1 weist jedoch eine höhere Steigung auf, d. h. eine gleiche Änderung im Abstand bewirkt bei TNS 3.1 eine größere Änderung im Signal. Durch die höhere Steigung ergibt sich, dass TNS V3.1 einen größeren Wertebereich abdeckt als TNS V1.0. Die Differenz der maximal gemessenen Werte beträgt $8.1647 - 7.6981 = 0.4666$ auf der Logarithmuskala bzw. 1300 Einheiten auf der Skala des Rohsignals.

Die Miniaturisierung bzw. Integration der Elektronik spielt eine Rolle bei der Unterdrückung des Rauschens, da ein Modul wie das TNS V3.1 in einem vernetzten System weniger einzelne Messungen durchführen muss und es so mehr Spielraum für Filterungsmethoden gibt. Wenn die Ortsauflösung des End-Effektors von 1×16 zum Vergleich herangezogen wird, sodass ein Sensormodul eine Zelle (1 Mal Taktile, 1 Mal Annäherung) realisiert, so erreicht ein TNS V3.1 eine Latenz von $2 \cdot 3.04 = 6,08$ ms bzw. eine Datenrate von $\frac{1}{6,08 \text{ ms}} = 164,5$ Hz (im Vergleich zu aktuell möglichen 25 Hz mit dem 1×16 Streifen von TNS V1.0). Würde ein hypothetischer Streifen aus 16 TNS V3.1 aufgebaut werden, so könnte jedes Modul für den Betrieb bei 25 Hz zusätzliche Berechnungen zur Mittelwertbildung anstellen. Die Ergebnisse hierzu sind mit den blauen Datenpunkten in Abbildung 8.3 gekennzeichnet. Es ist zu erkennen, dass unter diesen Bedingungen das Rauschverhalten des TNS V3.1 besser ist als bei TNS V1.0. Aus der Analyse des Zeitverhaltens (s. Abschnitt 8.1) folgt, dass bei leistungsfähigerer Hardware diese Werte noch weiter verbessert werden können. Insgesamt ergibt sich, dass die Ergebnisse, welche mit TNS V1.0 gezeigt wurden, prinzipiell auf TNS V3.1 und auf die neue Generation von Sensoren übertragbar sind, da die TNS V3.1 die TNSV 1.0 quasi simulieren können.

Generell kann das Rauschverhalten auch durch die Wahl der Komponenten in der Schaltung beeinflusst werden. Konkret tritt hier für die Hardware des TNS V1.0 pro Kanal ein hochwertiger A/D-Wandler auf, während für die neue Hardware auf die im Mikrocontroller integrierte Lösung zurückgegriffen wird. Die Kosten für den A/D-Wandler-Baustein des TNS V1.0 allein sind vergleichbar mit denen für den Mikrocontroller (beide etwa 20 EUR). Das Rauschverhalten kann also auch eine Frage der Kosten sein. Alternative Methoden der Demodulation, z. B. über ein Verfahren der Spitzendetektion (engl. *peak-detection*) oder die analoge I/Q-Demodulation (vergleiche mit der Arbeit von Schlegel et al. in [64]) bedeuten zwar einen höheren Schaltungsaufwand, können aber einen positiven Effekt auf das Rauschen haben und reduzieren den Berechnungsaufwand drastisch.

8.2.2 Rauschverhalten bei analoger und digitaler Zusammenfassung von Elektroden

Der Möglichkeit, Deckelektroden analog zusammenzuschließen, steht die Alternative gegenüber, die Deckelektroden einzeln auszuwerten und das Ergebnis digital zusammenzuführen. Letzteres entspricht dem klassischen Umgang mit der Ortsauflösung und hat den Vorteil einer vollständigen Flexibilität. So können nachträglich beliebige Kombinationen, z. B. für die Gradientenbestimmung, gebildet werden. Dass ersteres trotzdem sinnvoll ist, liegt darin begründet, dass das Rauschverhalten bei gleicher ausgewerteter Gesamtfläche günstiger ist.

In Abbildung 8.4 wird dies anhand von Aufnahmen mit dem TNS V3.1 gezeigt. Es wurde im selbst-kapazitiven Modus über Zeitmultiplexen der Signal-Weg-Verlauf für vier anliegende Deckelektroden und die analoge Zusammenschaltung derselben Elektroden zu einer Gesamtelektrode aufgezeichnet. Die resultierenden Signale, die entsprechende Regressionen und die verwendeten Konfigurationen werden in Abbildung 8.4(a) dargestellt.

Die Summe der Einzelsignale (Grün) ist zunächst höher als das Signal des zusammenschalteten Blocks (Blau). Das Rauschen kann als Zufallsprozess modelliert werden und somit ist durch die Addition der Varianzen der einzelnen Messung die Varianz der Summe das Vierfache. In Standardabweichungen ausgedrückt ist das Rauschen doppelt so hoch wie das der Einzelmessungen bzw. das der Blockkonfiguration, denn für alle Messungen hat das Rauschen dieselbe Ursache, nämlich in der Hardware. Anders gesagt: Das Summensignal müsste für jeden Abstand, in dem gemessen wird, mehr als den doppelten Wert aufweisen als das der Blockmessung, um den Anstieg im Rauschen zu kompensieren. In Abbildung 8.4(b) wird das Rauschen in Bezug zum Abstand (Öffnungsweite der Backen des Greifers) gestellt und es wird deutlich, dass das Signal der Blockkonfiguration für gleiche Abstände weniger verrauscht ist, als das des Summensignals. Eine Auswertung für dieses Szenario ergibt, dass bei einem Abstand von 2 mm das Signal der Blockkonfiguration eine Standardabweichung von 1.68 A/D-Wandler-Einheiten hat, das des Summensignals 3 A/D-Wandler-Einheiten. Die Amplitude des Summensignals ist das 1.2-Fache des Blocksignals. Die Messungen decken sich also gut mit den vorhergesagten Werten.

An dieser Stelle soll nicht ausgeschlossen werden, dass etwa durch eine bessere Abschirmung (s. Abbildung 8.9) die Amplitude der Einzelmessungen bzw. des Summensignals angehoben werden kann. Eine Verbesserung des Faktors 1.2 zwischen des Summensignals und des

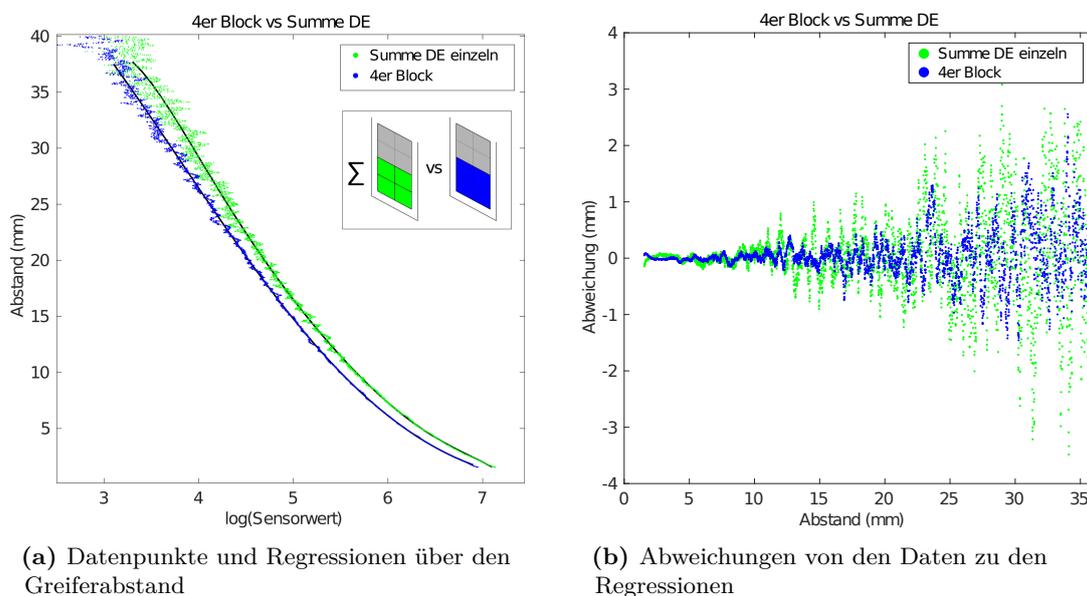


Abbildung 8.4: Vergleich der Qualität der Messungen für die Summe der Werte von einzelnen Elektroden mit einer zusammengefassten Elektrode mit gleicher Gesamtfläche

Blocksignals auf einen Faktor > 2 scheint jedoch unrealistisch. Die Zusammenfassung von Elektroden lohnt sich also in Hinblick auf die Signalqualität. Darüber hinaus darf auch nicht vergessen werden, dass durch das Zusammenfassen in manchen Szenarien insgesamt weniger Messungen in einem Zyklus anfallen, wie etwa in Abschnitt 8.4, wo für die Erfassung von Gradienten das Auslesen von 6 anstatt 8 Konfigurationen ausreichend ist. Diese Zeiteinsparung lässt sich, wie weiter oben beschrieben, prinzipiell ebenso in eine bessere Signalqualität ummünzen. Ist das Messen mit zusammengefassten Elektroden wegen der Anzahl an Konfigurationen zeitaufwändiger als das Messen der Einzelelektroden, muss, unter Berücksichtigung der möglichen Filterung, abgewogen werden, welche Variante zu einer besseren Signalqualität führt.

8.3 Taktile Modalität

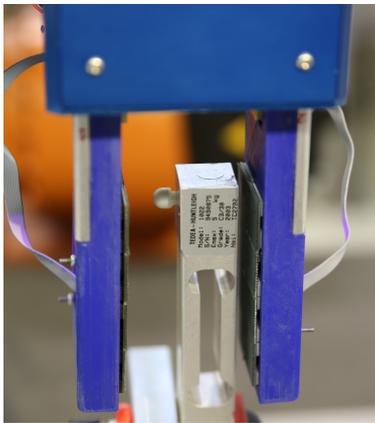
Die Auswertung zur taktilen Modalität in der vorliegenden Arbeit hat nicht das Ziel, die ausführliche Charakterisierung und Auswertung in der Dissertation von Göger [22] zu erweitern. Da die Konfigurationen der einzelnen Deckelektroden mit der Bodenelektrode hinreichend als Plattenkondensator modelliert werden können, hängt der gemessene Wert nur von dem Abstand zwischen den beiden Elektroden ab. Es gelten also die Erkenntnisse aus der Dissertation von Göger [22, Kap. 6] bezüglich der gewählten Materialien für die komprimierbare Zwischenschicht, also das Verhalten in Hinblick auf Hysterese, Linearität, usw. An dieser Stelle sei eine Auswertung der taktilen Modalität des Prototypen TNS V3.1 besprochen, um dessen erwartungsgemäße Funktionalität zu zeigen.

In Abbildung 8.5 werden der Versuchsaufbau und die erfassten Daten dargestellt. Eine einzelne Deckelektrode des TNS V3.1 wird durch eine kleine Gummikuppe belastet, welche an einem Kraftsensor befestigt ist, wie in Abbildung 8.5(a) zu erkennen. Der verwendete Kraftsensor *Tedea-Huntleigh Model 1022*¹ besitzt einen Messbereich von 0-5 kg. Der Greifer wurde mithilfe des Roboters mit einer Geschwindigkeit von $0,1 \text{ mm s}^{-1}$ verfahren, sodass der Gummiknopf am Kraftsensor eine Deckelektrode in der linken Backe trifft. Bei einer Kraft von 25 N wurde dann die Bewegungsrichtung umgekehrt, sodass der TNS V3.1 wieder entlastet wurde. Die resultierenden Daten der Kraftmessung und der Sensorwerte werden in Abbildung 8.5(b) gezeigt. Es ist zu beachten, dass eine Skalierung der Sensorwerte als Maßnahmen des Angleichs getroffen wurde.

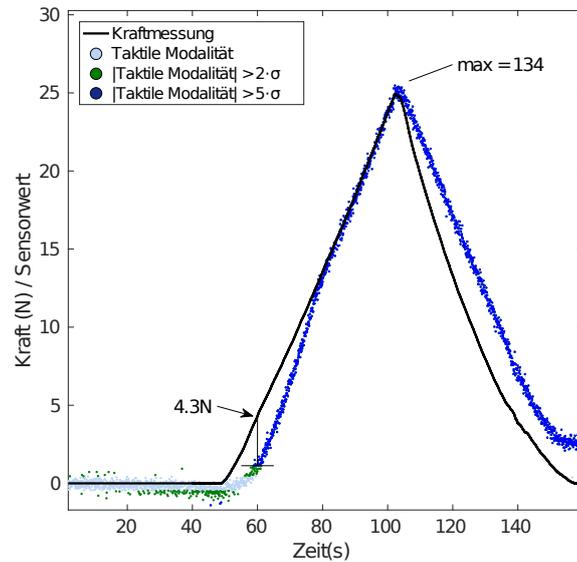
Bei einer Kraft von 25 N erreicht die taktile Messung einen maximalen Wert von 134 Einheiten, was ein relativ kleiner Wertebereich ist. Eine höhere Verstärkung des Rohsignals könnte eine Verbesserung bedeuten. Ein effektiverer Weg ist jedoch, die Deckelektrode näher an der Bodenelektrode zu platzieren, da in diesem Fall kleinere Abstandsänderungen für bedeutende Signaländerungen ausreichen. Wegen der Fertigung aus Platinenmaterial ist der Abstand der beiden Elektroden im Prototypen 3 mm, d. h. in diesem Aspekt sind noch deutliche Verbesserungen möglich.

In Abbildung 8.5(b) sind im taktilen Signal drei Bereiche in Hellblau, Grün und Dunkelblau gekennzeichnet. Das Signalrauschen wird hier als normalverteilt modelliert. So liegen alle

¹ http://intertechnology.com/Tedea_Huntleigh/pdfs/1022.pdf, Zugriff: Mai 2016



(a) Eine Deckelelektrode der linken Backe wird mit einer Gummikuppe belastet, welche an einem Kraftsensor befestigt ist



(b) Signalverläufe der Kraftmessung und der taktilen Modalität

Abbildung 8.5: Versuchsaufbau und Daten zur Validierung der taktilen Modalität von TNS V3.1

Punkte im hellblauen Bereich maximal 2σ von der Nulllinie des Signals entfernt, die Punkte im grünen Bereich liegen maximal 5σ entfernt, und alle dunkelblauen Punkte liegen über 5σ entfernt. Dabei ist $n = 5$ die kleinste Ganzzahl n , für die gilt, dass über $n \cdot \sigma$ keine gemessenen Punkte liegen, wenn die Kraft 0 ist. Deshalb wird hier dieser Wert als Schwellwert für das Auslösen der taktilen Modalität genommen. Wie in Abbildung 8.5(b) gekennzeichnet, erreicht das Signal der taktilen Modalität diesen Schwellwert bei einer Kraft von 4,3 N. Für die Praxis ist dieser Wert nur bedingt geeignet, aber die oben vorgeschlagenen Verbesserungen lassen sich auch hier anwenden. In der Dissertationsschrift von Göger wird bei einer Realisierung des Sensors eine Empfindlichkeit von $< 3 \text{ mN}$ ($< 1 \text{ g}$) erreicht [22, S. 109], was für die Detektion des ersten mechanischen Kontakts ein sehr guter Wert ist.

Wenn die Bewegung des Greifers den Kraftsensor und die taktile Zelle wieder entlastet, wird deutlich, dass eine Hysterese auftritt. Der Sensor bringt bei der Entlastung für eine gleiche Eindringtiefe nicht die gleiche Kraft auf wie bei der Belastung. Am Ende der Trajektorie, wenn die Kraftmessung wieder auf 0 zurückgegangen ist, hat der Schaumstoff zwischen den Elektroden wegen seines elastischen Verhaltens nicht seinen ursprünglichen Zustand erreicht.

Ein Aspekt, der in der Dissertationsschrift von Göger keine Erwähnung findet, ist, dass der Sensor in der taktilen Modalität auch eine Kopplung mit dem sich annähernden oder berührenden Objekt erfahren kann. Es handelt sich allerdings dabei um ein relativ

subtiles Phänomen, welches leicht übersehen werden kann. In Abbildung 8.5(b) ist mithilfe der grünen Datenpunkte unterhalb des hellblauen Schlauchs hervorgehoben, dass vor der Berührung das taktile Signal zunächst sinkt. Ein Teil des Stroms, welcher die Bodenelektrode erreichen sollte, fließt in diesem Fall über den Kraftsensor, der aus Aluminium besteht, ab. Eine Möglichkeit, sich diesen Effekt zu Nutze zu machen, ist, die Trendwende im Signal zu erkennen, wodurch der Schwellwert für die Detektion herabgesetzt werden kann. Dies wäre analog zu dem von Zhang et al. [79] vorgeschlagenen Ansatz. Über die Näherungsmessung kann darüber hinaus abgesichert werden, dass die Trendwende nicht mit einer Änderung der Trajektorie des Objekts zusammenhängt.

Interessanterweise ist der genannte Näherungseffekt für die taktile Modalität sehr deutlich zu erkennen, wenn das Objekt ein geerdeter Leiter ist. Auch bei den TNS V1.0 war das schon der Fall, wie in Abbildung 8.6 gezeigt wird. In diesem Experiment wird der End-Effektor (s. Kapitel 6) auf Kollisionskurs mit einer geerdeten Aluminiumplatte bei einer Geschwindigkeit von 60 mm s^{-1} gebracht. Das Näherungssignal des Sensors gibt die Robotertrajektorie zuverlässig wieder und auch der Schnittpunkt des Signals mit der Nulllinie liegt nahe dem der Robotertrajektorie. Für das taktile Signal ist ab 25 mm Abstand zur Platte die Änderung deutlich erkennbar. In Abbildung 8.6 wurde der Zeitpunkt markiert, ab dem in der taktilen Modalität zuverlässig der Kontakt anhand der Trendwende erkannt wird. Es ergibt sich ein Fehler bzw. Versatz $e = 0,072\text{ s}$ zum Nulldurchgang der Robotertrajektorie. Obwohl die Signale des Sensors nicht über eine externe Quelle mit der Bewegung des Roboters synchronisiert werden, kann festgestellt werden, dass diese Verzögerung in der Erkennung des Kontakts noch behandelt werden muss, um den Sensor geeignet für die sichere Mensch-Roboter-Interaktion zu machen. Eine alternative Konzeption der analogen Schaltung zur Auswertung der taktilen Modalität könnte den Einkopplungseffekt mindern.

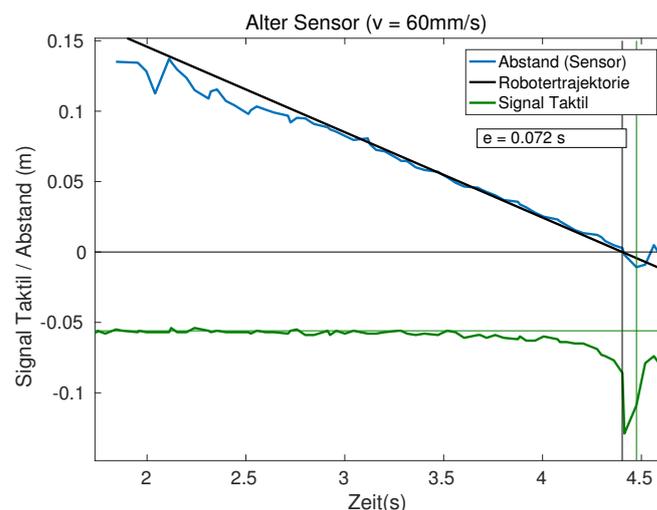


Abbildung 8.6: Detektion eines Kontakts anhand der Trendwende im taktilen Signal des TNS V1.0

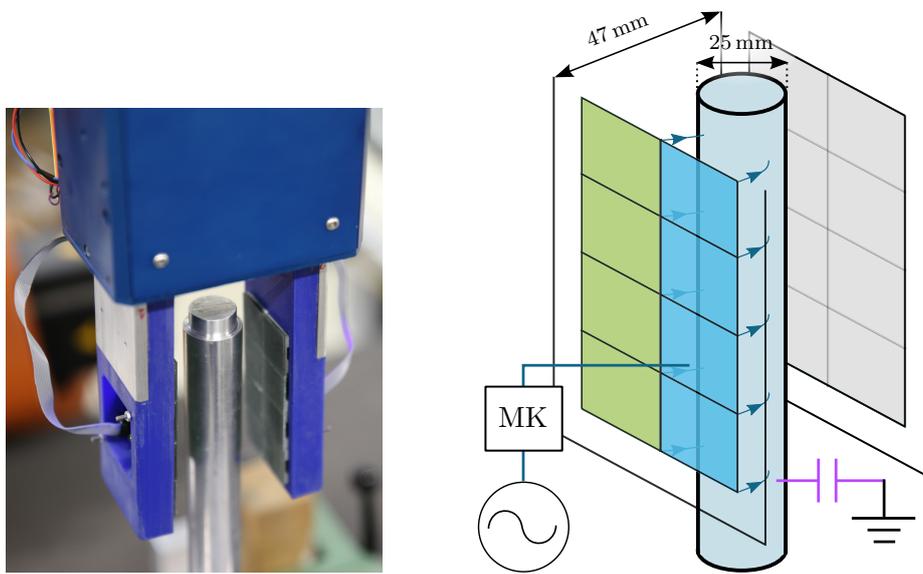
In den Experimenten wurde die Deformation der Trägerstrukturen (Greifer bzw. End-Effektor) durch die Belastung nicht beachtet, was eine Erklärung für die hohen Schwellwerte und geringe Empfindlichkeit sein kann. Im industriellen Kontext können Strukturen mit einer höheren Steifigkeit verwendet werden, sodass die Schwellen zur Erkennung des Kontakts niedriger liegen können. Bei Systemen, welche in menschlicher Umgebung agieren, ist das nicht unbedingt der Fall. Dies unterstreicht nochmals die Wichtigkeit einer kontaktlosen Detektion von Ereignissen.

8.4 Erfassung von Gradienten

8.4.1 Messungen im selbst-kapazitiven Modus zur Bestimmung von Gradienten

Eine der interessanten Möglichkeiten des neuen Sensors ist es, durch flexibles Zusammenschalten von Elektroden, kapazitive Konfigurationen zu etablieren, die die Erfassung von Gradienten ermöglichen. Mit dem Prototypen TNS V3.1 und den 4×2 Deckelektroden können auch Konfigurationen mit der gleichen Fläche wie das Large Area Module (LAM) von Göger (s. Abschnitt 4.2) erreicht werden. Für das Vorausrichten in Kapitel 5 werden vier LAMs pro Backe im Greifer benötigt, was als Machbarkeitsnachweis zählen kann, aber wegen der damit verbundenen Ausmaße der Backen noch weit entfernt von einer praktikablen Lösung ist. Hier werden als Alternative die zusammengeschalteten Konfigurationen vorgeschlagen, welche in den Abbildungen 8.7 und 8.8 zu sehen sind. Die Idee ist, dass jeweils ein Paar an Konfigurationen verwendet wird, um einen Kontrast zu messen, welcher als Gradient für den gegebenen Freiheitsgrad interpretiert wird. Der Kontrast ist dabei einfach die Differenz zwischen den Messungen der Konfigurationen, die ein Paar ausmachen. Dieser Ansatz bedarf nur der Hälfte der Fläche verglichen mit der Konstruktion aus Kapitel 5.

Das erste Szenario der Validierung des Sensors bezüglich seiner Fähigkeit, räumliche Gradienten zu erfassen, ist der Betrieb im selbst-kapazitiven Modus in der Anwesenheit eines nicht geerdeten Rundstabs aus Aluminium (s. Abbildung 8.7). Der Greifer hat eine Öffnungsweite von 47 mm und der Rundstab ist mittig, also mit einem Abstand von 11 mm zur Sensoroberfläche, entweder aufrecht oder quer zwischen den Backen platziert. Diese Pose ist als Nullpunkt für die Trajektorie des Roboters definiert. Anschließend wird der Greifer bezüglich dieser Pose entlang der einzelnen Freiheitsgrade verfahren oder verdreht. Für die Paare an Konfigurationen werden die Signalverläufe aufgezeichnet, welche in Abbildung 8.8 wiedergegeben sind. Die quere Lage wird nur dazu verwendet, den Kontrast für die Z -Translation und -Rotation festzustellen. Es ist zu beachten, dass die Darstellung in Abbildung 8.8 nur die aktive, linke Backe des Greifers aus Abbildung 8.7(b) betrifft. In Abbildung 8.8 ist die Position des Roboters bzw. seine Bewegung in Bezug zum Sensorsignal mit einer schwarzen Linie in den Diagrammen hinterlegt. Für die Y - und Z -Translation ergibt sich ein Wendepunkt, der den Nulldurchgang der Trajektorie kennzeichnet. Es ist zu beachten, dass die Effekte der Latenz zwischen dem Erfassen der Roboterpose und der Aufnahme der Signale durch den Sensor *nicht* kompensiert wurden. Wegen der Ungenauigkeit in der Platzierung des Rundstabs wird eine Toleranz von etwa 1 mm angenommen.



(a) Für die Versuche wurden ein Aluminium-Stab mit einem Durchmesser von 25 mm verwendet, der entweder aufrecht oder quer zentriert zwischen den Backen des Greifers platziert war. Die Öffnungsweite des Greifers betrug 47 mm.

(b) Das Sensormodul in der linken Backe wird im selbst-kapazitiven Modus in unterschiedlichen Konfigurationen betrieben, um die kapazitive Kopplung zwischen Sensor und Objekt zu messen. Im Beispiel hier wird die hellblaue Linienkonfiguration über den Messkanal (MK) ausgelesen. Für die Versuche ist das Modul der rechten Seite inaktiv.

Abbildung 8.7: Versuchsaufbau zur Evaluierung der Gradientenbestimmung im Sende-Modus; die Messung einer Beispielkonfiguration wird in Hellblau dargestellt.

Für die X -Translation ist die Startposition der Bewegung mit 21 mm (fast) maximal innerhalb des Greifers vom Sensor entfernt. Der Greifer wurde dann über die Strecke von 21 mm in Richtung des Objekts verfahren bis kurz vor der Berührung. Die Bewegung ist in diesem Fall verzögernd, da der Greifer vor dem Kontakt zum Stopp kommen muss. Deshalb flacht der Verlauf der Trajektorie über die Zeit ab. Das aufgezeichnete Signal für die obere und untere Blockkonfiguration steigt über diese Strecke deutlich an und zeigt den größten Unterschied in Sensorwerten in den Experimenten mit ca. 1000 Einheiten. Dieser maximale Kontrast unter allen Messungen ist mit der hohen Empfindlichkeit des Sensors im engen Nahbereich zu erklären. Mit einer äquivalenten Messung mit dem zweiten Modul von der anderen Seite wäre eine Zentrierung möglich, indem der Punkt gefunden wird, wo sich die Signalverläufe der linken und rechten Seite schneiden.

Für die Y -Translation ist der Stab anfangs außerhalb des Greifers und der Reichweite der Sensoren. Der Greifer wird dann, wie an der Trajektorie zu erkennen, mit einer konstanten Geschwindigkeit von 30 mm s^{-1} so gefahren, dass die Backen am Stab links und rechts vorbeigeführt werden. Der Schnittpunkt der Signale der Linienkonfigurationen gibt an, wo die zentrierte Position des Stabs ist. Der Wendepunkt des Betrags der Trajektorie

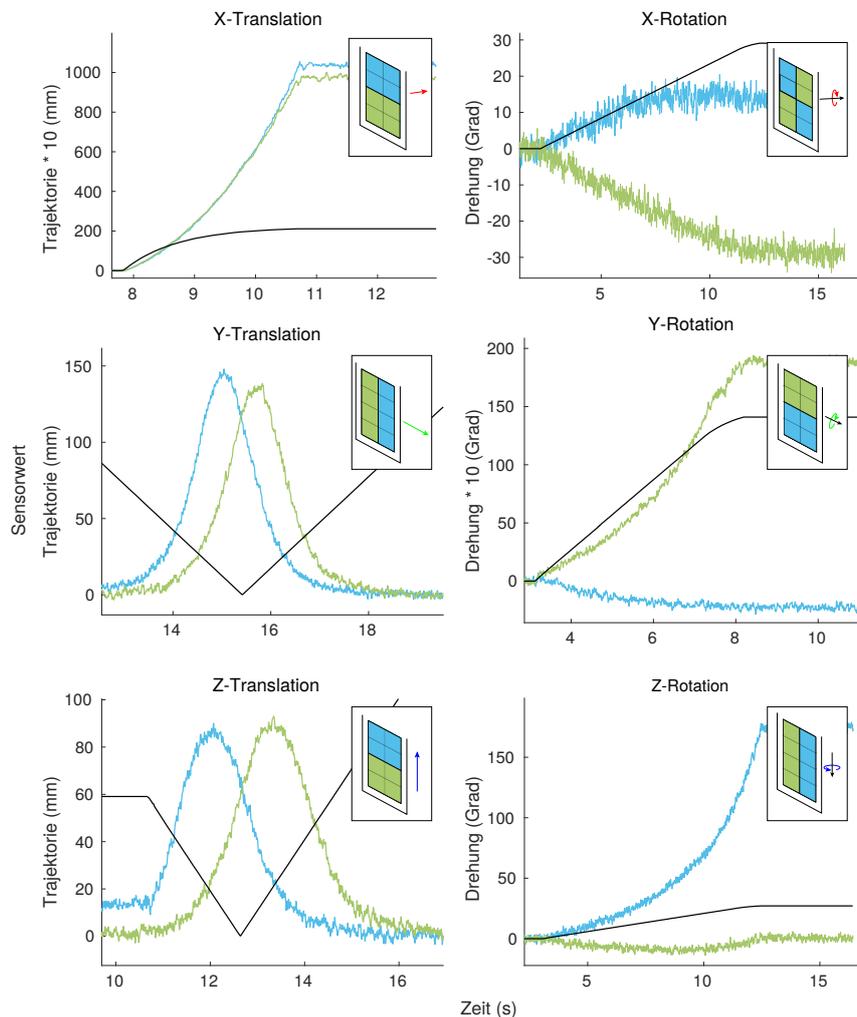


Abbildung 8.8: Verlauf der Signal-Paare im selbst-kapazitiven Modus für eine Änderung in den sechs Raumberechtigungen; der Betrag der Trajektorie des Roboters für den betreffenden Freiheitsgrad ist in Schwarz dargestellt. Die Wendepunkte kennzeichnen Durchgang der Robotertrajektorie durch die Nullposition. Es ist zu beachten, dass die Robotertrajektorien für X -Translation und die Y -Rotation skaliert wurden, damit der Verlauf gut erkennbar ist.

am Nulldurchgang zeigt gute Übereinstimmung mit dem Schnittpunkt der Signale. Eine Zentrierung anhand dieser Werte ist also möglich. Analoges gilt für die Z -Translation, welche mithilfe der Blockkonfigurationen erfasst wird. Hier ist der Startpunkt des Greifers so gewählt, dass der Rundstab innerhalb des Greifers, jedoch oberhalb des Sensormoduls, ist. Der Greifer fährt dann in negativer Z -Richtung, sodass der Stab zuerst an dem hellblauen und dann an dem hellgrünen Block vorbeikommt. In der Startposition wird der Stab bereits vom oberen, hellblauen Block erfasst, wodurch der Unterschied im Anfangswert zwischen den beiden Signalen erklärt wird.

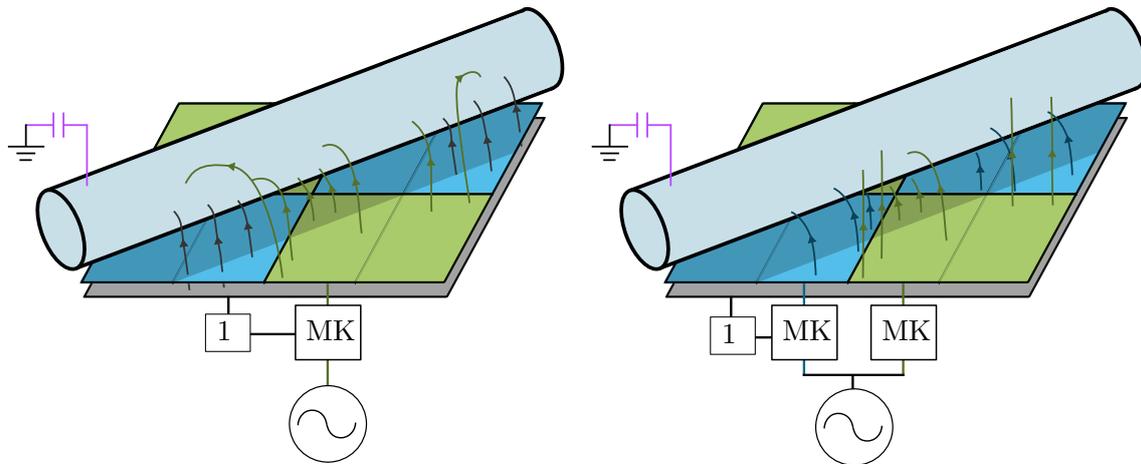


Abbildung 8.9: Links: Im aktuellen Sensorkonzept bleibt während der Messung einer Konfiguration die andere Konfiguration inaktiv. Das Feld, welches in diesem Beispiel dem grünen Bereich entspringt, erreicht ungehindert das Objekt und sorgt für eine Kopplung, obwohl das Objekt den grünen Bereich nur spärlich abdeckt. Rechts: Das Feld, welches dem hellblauen Bereich entspringt, verhindert teilweise die Kopplung mit dem Objekt durch den grünen Bereich, da die Spannung beider Sender gleich ist.

Die Erkennung eines Kontrasts bei der X -Rotation fällt schwerer; ein Unterschied von maximal 45 Einheiten wird erreicht. Dabei umfasst die Drehung einen Bereich von 0° - 30° , bei einer Winkelgeschwindigkeit von 3° s^{-1} . Eine Möglichkeit, die Messung zu verbessern, besteht darin, die Backen des Greifers bzw. die Sensoren näher an das Objekt zu bringen, da so die Empfindlichkeit für kleine Änderungen in der Abdeckung grundsätzlich steigt. Man vergleiche hierzu den Verlauf für die X -Translation.

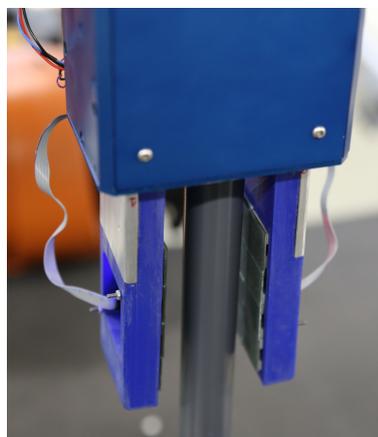
Eine alternative Methode, die Messung zu verbessern, bedeutet eine Erweiterung des vorgestellten Sensorkonzepts um eine parallele Quelle für das Erregersignal bzw. einen zweiten Messkanal (inklusive Verstärker für das Erregersignal), wie in Abbildung 8.9 rechts dargestellt. In Abbildung 8.9 links wird die Funktionsweise des aktuellen Entwurfs gezeigt. Da während der Messung einer Konfiguration aus dem Paar die andere Konfiguration inaktiv bleibt, tritt eine Kopplung zwischen der gemessenen Konfiguration und dem Objekt ein, obwohl dieses die gemessene Konfiguration gar nicht oder nur spärlich abdeckt und obwohl die Bodenelektrode als Schirm arbeitet. Da der Abstand der Bodenelektrode zur Deckelektrode nicht vernachlässigbar ist, verliert der Schirm an Wirkung, und es findet die unerwünschte Kopplung statt. In Abbildung 8.9 rechts ist dargestellt, wie durch Betreiben einer parallelen Messung mit einem Signal der gleichen Spannung (gleiche Amplitude, Frequenz und Phase) unerwünschte Kopplung teilweise verhindert werden kann. Dies ist eine Variante des in Abschnitt 2.3 besprochenen Schirm-Effekts. Die Feldlinien der hellblauen Konfiguration blockieren die Feldlinien der grünen Konfiguration und umgekehrt, d. h., beide Felder sind auf ihren Bereich beschränkt. Wie gut dieses Konzept in dem vorliegenden Fall funktionieren würde, muss noch untersucht werden, aber ggf. lohnt es sich, es grundsätzlich für alle Konfigurationen anzuwenden. Mit einem zweiten Messkanal

kann darüber hinaus über das parallele Auslesen der Konfigurationen die Gesamtauslesezeit des Sensors verkürzt werden. Zuletzt sei erwähnt, dass in der Literatur Beispiele zu finden sind, die dieses Konzept verwenden, wie die im Stand der Technik besprochene Arbeit von Osoinach et al. [59].

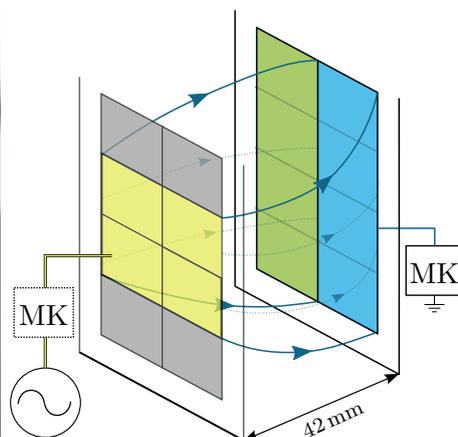
Für die Y - und Z -Rotation ergibt sich für einen Bereich von jeweils 14° und 27° ein guter Kontrast. Die angegebenen Winkel sind jeweils die maximale mögliche Auslenkung, bevor das Objekt berührt wird. Hier macht sich, wie bei der X -Translation, der Näherungseffekt bemerkbar; am Ende der Trajektorien sind, wie gesagt, die Elektroden fast in Berührung mit dem Rundstab. Zuletzt sei erwähnt, dass eine Regelung mit dem Greifer auf beide Sensormodule gleichzeitig zugreifen kann, wodurch die Robustheit der Erkennung der Abweichungen gesteigert werden kann.

8.4.2 Messungen im beidseitig-kapazitiven Modus zur Bestimmung von Gradienten

Für den beidseitig-kapazitiven Modus, der mit der Erfassung von nicht leitenden Materialien assoziiert wird, gilt es nun zu untersuchen, inwiefern mithilfe der flexiblen Ortsauflösung auch eine Gradientenbestimmung möglich ist. Dazu wurde ein Versuchsaufbau, ähnlich zum vorherigen Abschnitt 8.4.1, eingerichtet. Der hier verwendete Aufbau wird in Abbildung 8.10 gezeigt. Das Sensormodul in der linken Backe des Greifers wird exklusiv im Sende-Modus betrieben, während das Sensormodul in der rechten Backe im Empfangs-Modus betrieben wird. Abbildung 8.10(b) veranschaulicht die Feldkonfiguration zwischen den beiden Sensormodulen ohne Objekt. Es wird abwechselnd in den sechs Konfigurationen



(a) Für die Versuche wurden ein PVC- und Aluminium-Stab verwendet, die einen Abstand von 3 mm zum Sensormodul im Empfangsmodus hatten. Die Öffnungsweite des Greifers betrug 42 mm.



(b) Ein Sensormodul im Sende-Modus mit einer Blockkonfiguration bestehend aus vier DE sendet einen Strom, der von einer Linienkonfiguration im anderen Sensor empfangen wird

Abbildung 8.10: Versuchsaufbau zur Evaluierung der Gradientenbestimmung im Empfangsmodus

zur Gradientenbestimmung gemessen. Bei der Öffnungsweite des Greifers von 42 mm ohne Objekt wird eine Signalstärke von 500-600 Einheiten gemessen. Entsprechend der besprochenen Grundlagen erhöht sich dieser Wert deutlich, wenn die Backen sich weiter schließen. Die Feststellung von Kontrast in den Messungen fällt bei kleineren Öffnungsweiten auch genauer aus, da das Feld zwischen den Backen weniger streut. Die Rundstäbe aus PVC und (geerdetem) Aluminium sind zum Erfassen der Y - und Z -Translation und der X -Rotation 3 mm vom empfangenden Sensormodul entfernt, für die Y - und Z -Rotation jedoch mittig zwischen den Backen platziert. Zum Aufzeichnen der Signalverläufe wurde für die Versuche der Rundstab aus PVC (Durchmesser von 25 mm) zwischen den Backen aufrecht (wie in Abbildung 8.10(a) gezeigt) oder quer platziert. Für die Erfassung für der Rotation um die Z -Achse wurde zum Vergleich zusätzlich eine Platte aus PVC der Stärke 15 mm verwendet (s. Abbildung 8.12).

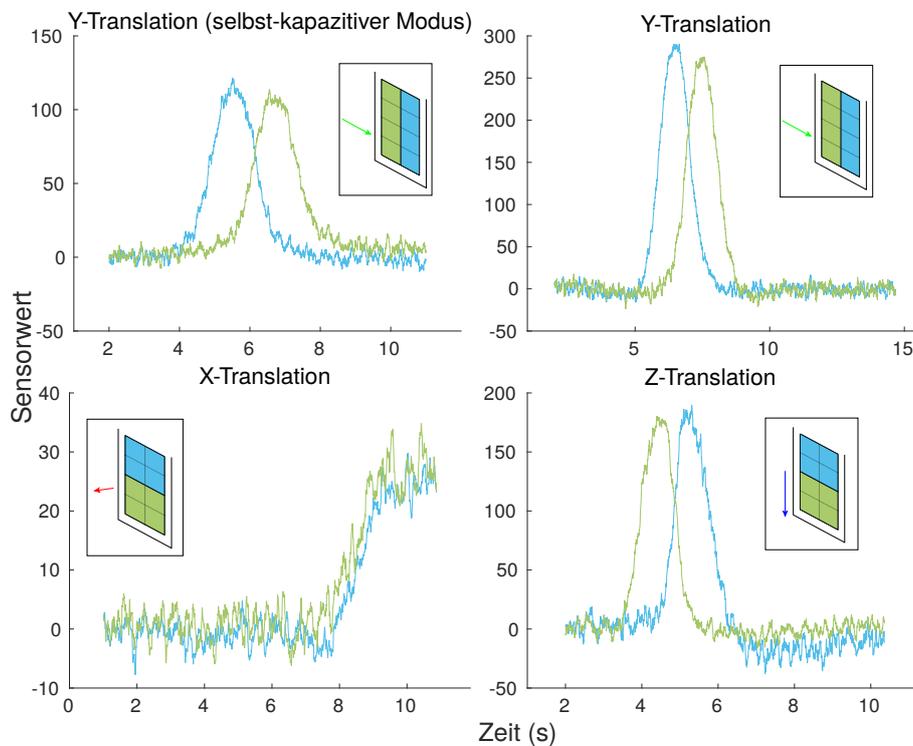


Abbildung 8.11: Signalverläufe mit abgezogenem Nullpunktversatz für Bewegungen entlang der translatorischen Freiheitsgrade, inklusive eines Signalverlaufs für die Y -Translation im selbst-kapazitiven Modus zum Vergleich (oben links)

Die Signale für den PVC-Stab in den translatorischen Bewegungen sind in Abbildung 8.11 zu sehen. Die durchgeführten Bewegungen, um die Signalverläufe zu erhalten, sind analog zu denen aus dem vorherigen Abschnitt. Zum Vergleich ist für die Y -Translation ein Signalverlauf im selbst-kapazitiven Modus unter den gleichen Bedingungen in der oberen linken Grafik angegeben. Im direkten Vergleich ist erkennbar, dass bei gleichem Rauschen ein mehr als doppelt so großer Messbereich zur Verfügung steht. Der Wertebereich für die Bewegung entlang der Z -Achse zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die Y -Translation, aber

der Wertebereich ist etwas kleiner. Dieser Effekt wird dadurch erklärt, dass die Fläche der Blockkonfiguration im Vergleich zur Linienkonfiguration durch den Rundstab nicht maximal 100 %, sondern nur etwa zu 63 %, abgedeckt wird. Genauer gesagt, nimmt der Rundstab in der Orientierung quer zu den Backen ein geringeres Volumen im E-Feld zwischen den Backen ein.

Die Translation über eine Strecke von 15 mm entlang der X -Achse, an deren Ende das Objekt die Empfängerseite fast berührt, zeigt die geringste Variation im Signal. Im idealisierten Falle eines Plattenkondensators würde die Verschiebung des Dielektrikums innerhalb des E-Felds keinen Einfluss haben, d. h., es dürfte keine Änderung im Signal feststellbar sein, wie in Abschnitt 2.1.3 besprochen. In der vorliegenden Anordnung spielen jedoch die Randfelder bzw. parallele Kopplungen mit der Umwelt (z. B. dem Gehäuse des Greifers) eine bedeutende Rolle, sodass die Bündelung der Feldlinien sich im Signal bemerkbar macht, wenn der Stab in die Nähe des Empfängers kommt. Dieser Effekt ist jedoch nicht als verlässlich einzustufen, sodass diese Messungen bei einer Regelung nur bedingt zum Einsatz kommen können. Eine effektive Lösung wäre, ein weiteres Sensorelement senkrecht zur gegebenen Anordnung anzubringen, z. B. in der Ebene am Greifer zwischen den Fingern. Wird dieses Sensorelement im Sende-Modus betrieben, können die Module in der linken und rechten Backe ein Signal empfangen, welches mit der Verschiebung entlang der X -Achse, wie gewünscht, korrespondiert.

Die Signale für die rotatorischen Bewegungen werden in Abbildung 8.12 gezeigt. Die Bereiche der Drehung sind 12° , 40° und 24° jeweils für die Y -, X - und Z -Achse. Für die Drehung um die Z -Achse wurde, wie oben erwähnt, zusätzlich eine PVC-Platte der Stärke 15 mm verwendet, da das eingenommene Volumen durch den PVC-Stab für diesen Freiheitsgrad gering ist. Hier betrug der Winkel 30° . Für die Rotation um die X -Achse ist die Abdeckung für einen Arm der X -Konfiguration bei $26,5^\circ$ maximal.

Für die Y - und Z -Rotationen mit dem Rundstab ist zu erkennen, dass der Wertebereich der Änderung der Signale im Vergleich zu den translatorischen Freiheitsgraden geringer ist. Ähnlich zum Fall der Translation entlang der X -Achse kann eine Drehung des Dielektrikums im E-Feld allein nicht für eine signifikante Änderung im Signal verantwortlich sein. Es kann also nur sein, dass durch die Drehung zunehmend Volumen durch das Dielektrikum in der Kondensator-Konfiguration eingenommen wird. Genau genommen spielt also die Nähe des Objekts, für sich genommen, keine entscheidende Rolle. Man vergleiche hierzu die Überlegungen aus Abschnitt 2.1.3 der Grundlagen. Der fehlende Antagonismus der Signalverläufe in der Y - und Z -Rotation erklärt sich dadurch, dass durch die Schiefelage zunehmend mehr Volumen durch das Dielektrikum in der Kondensator-Konfiguration mit steigendem Signal eingenommen wird, jedoch das Volumen sich mit der Drehung für die andere Konfiguration nicht bedeutend ändert.

Im Signalverlauf für die Drehung um die X -Achse ist zusätzlich die Anfangsbewegung des Greifers in die Ausgangspose vor der Drehung angezeigt, was den Unterschied zwischen Anwesenheit des Objekts und Kontrast durch Versatz in diesem Freiheitsgrad aufzeigt. Diese Drehung erzeugt, im Gegensatz zur Drehung um Y und Z , einen merklichen Kontrast von etwa 150 Einheiten bei $26,5^\circ$. Interessant bei der Drehung um die X -Achse ist, dass die

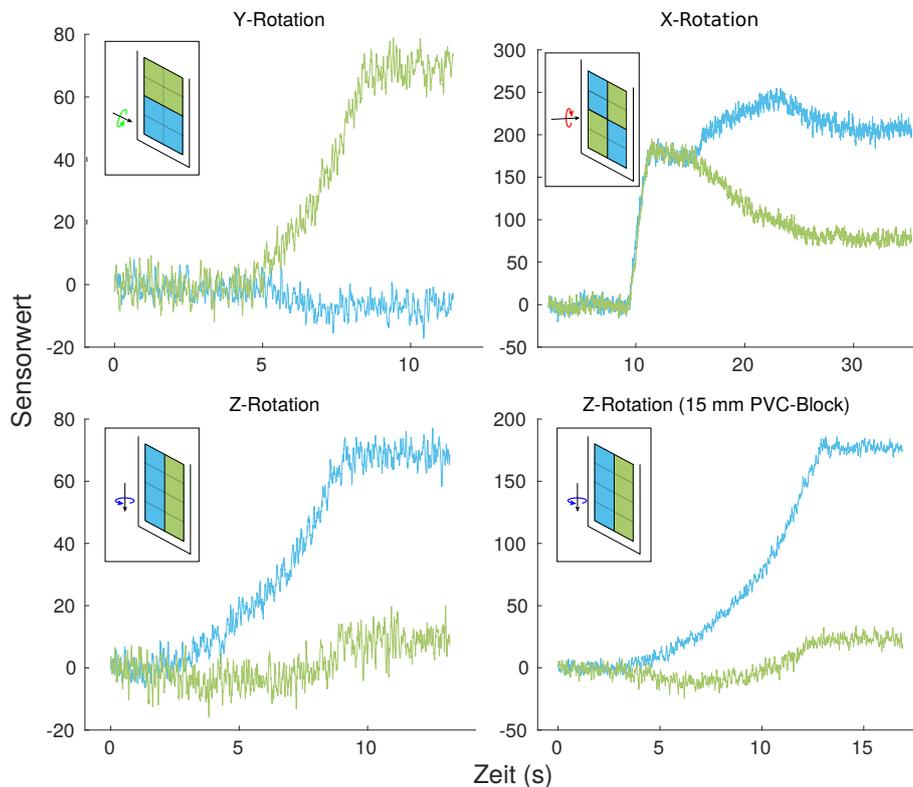


Abbildung 8.12: Signalverläufe mit abgezogenem Nullpunktversatz für Bewegungen in den rotatorischen Freiheitsgraden

Signalverläufe Antagonismus zeigen: Wird ein Arm der X-Konfiguration abgedeckt, verliert der andere Arm Abdeckung, was zu gegensätzlichen Verläufen in den Signalen führt. Dieser Effekt ist in den anderen Fällen deutlich schwächer. Der deutlichste Unterschied wird durch die Drehung um die Z-Achse um die PVC-Platte erkennbar. Diese nimmt mit der Drehung viel Volumen in der Kondensator-Konfiguration, welche durch das Hellblaue Signal dargestellt wird, ein, was den gezeigten Verlauf erklärt.

Auch für leitende Objekte ist die beidseitig-kapazitive Messung eine interessante Möglichkeit zur Erfassung von Gradienten. In [Abbildung 8.13](#) werden repräsentative Signalverläufe gezeigt, die den oben besprochenen Versuchen entsprechen, wobei wieder der Rundstab aus Aluminium, diesmal im geerdeten Zustand, verwendet wurde. Durch die gezeigten Beispiele werden alle Elektrodenkonfigurationen (Linien-, Kreuz- und X-Konfiguration) abgedeckt. Wie in [Abschnitt 2.2.2](#) besprochen, wird eine Messelektrode im Empfangsmodus durch ein leitendes geerdetes Objekt „abgeschattet“, wenn es zwischen Sender und Empfänger platziert ist. Deshalb wird ein Abfall der Signale beobachtet, wenn das Objekt anwesend ist. Ansonsten sind die Verläufe in ihrer Form analog zu den oben besprochenen Fällen. Bei der Translation entlang der Z-Achse ist noch zu bemerken, dass der Wert für den oberen Block (in Hellblau) nicht ganz auf seinen Wert im Ruhezustand zurückgeht, da der Stab, wenn er im Greifer oberhalb der Sensoren ist, nicht ganz den Erfassungsbereich der Sensoren

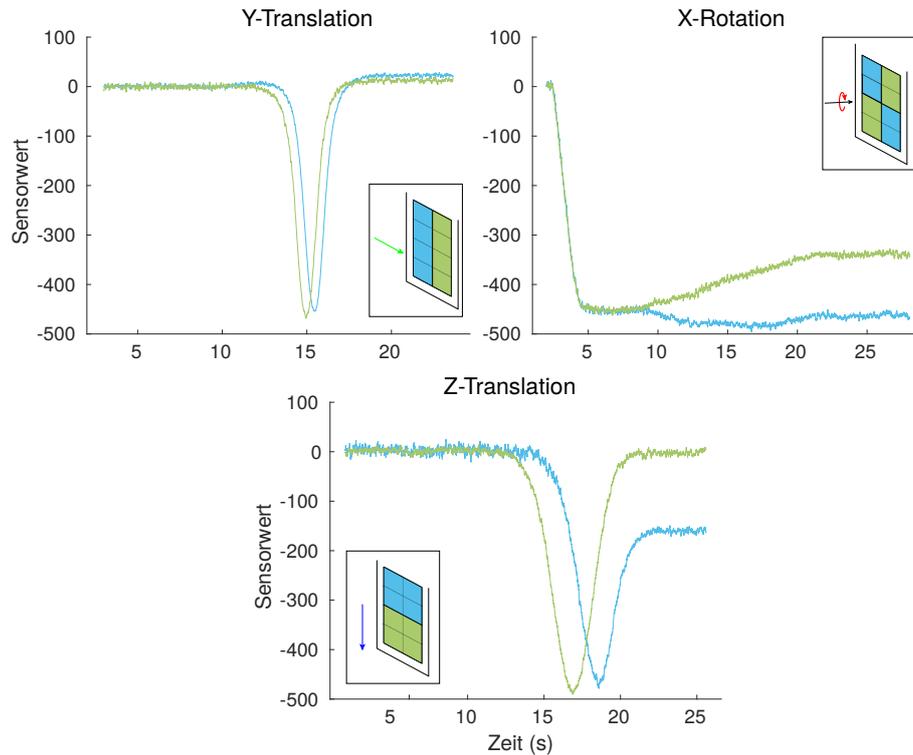


Abbildung 8.13: Signalverläufe mit abgezogenem Nullpunktversatz für einen geerdeten Rundstab aus Aluminium

verlassen hat, da diese Möglichkeit nicht besteht. Was die Signalstärke bzw. den Kontrast betrifft, so verursacht die Abschattung einen Abfall der Signale von etwa 500 Einheiten, was das Signal, absolut gesehen, fast an die Nulllinie bringt. In diesem Extremfall fließt der von dem anderen Modul gesendete Strom also fast vollständig über den Rundstab ab. Bei der Drehung um die X -Achse ist eine Ähnlichkeit mit dem Fall für den nicht leitenden PVC-Stab in Abbildung 8.12 zu erkennen. Der gegensätzliche Verlauf der Signale und des Kontrasts ist ähnlich, wobei der Signalverlauf bei gleicher Bewegung für die beiden Teile der X -Konfiguration genau umgekehrt ist.

8.4.3 Berührungsloses Vorausrichten

Als letzter Schritt der Validierung wird in diesem Abschnitt das berührungslose Vorausrichten mit dem TNS V3.1 durchgeführt. Die Versuchsbedingungen sind analog zu Abschnitt 8.4.1, d. h., der Rundstab aus Aluminium wird im nicht geerdeten Zustand erfasst. Zwischen den Backen des Greifers befindet sich der Rundstab in versetzter Lage. Die Regelung, wie in Kapitel 5, bringt ihn in eine ausgerichtete Pose. Im Unterschied zum vorherigen Abschnitt werden die Sensoren in beiden Backen verwendet. Wie in Kapitel 5, werden die Werte der Sensoren beider Seiten verwendet und gemittelt. Damit die Felder, welche von beiden Seiten erzeugt werden, keine unerwünschte gegenseitige Beeinflussung hervorrufen, werden die Signale beider Sensoren über eine Taktleitung synchronisiert. Die

Phasenverschiebung zwischen den Signalen ist 0. Somit schirmen sie sich gegenseitig ab.

Tabelle 8.1: Abweichungen Versuch 1 (Stab ist aufrecht)

Durchgang	Öffnungsweite (mm)	X_T (mm)	Y_T (mm)	X_R (Grad)	Y_R (Grad)
1	45	-0.8	1.9	3.7	0.3
2	45	-0.9	0.7	3.7	0.2

Im ersten Versuch ist das Ziel der Regelung, die aufrechte Pose des Rundstabs innerhalb des Greifers herzustellen. Die Ausgangspose ist in den Freiheitsgraden X -Translation, Y -Translation, X -Rotation und Y -Rotation bezüglich der Zielpose versetzt. In Abbildung 8.14 sind die Startpose und die erreichte Pose dargestellt. In Tabelle 8.1 sind Abweichungen für zwei Durchläufe für den Versuch dargestellt. Die Abweichungen wurden per Hand mit einem Messschieber ermittelt. Deshalb wird mit einer Genauigkeit von 1 mm gerechnet. Somit ist, bis auf die Y -Translation in Durchgang 1 und der X -Rotation in beiden Durchgängen, der Greifer bezüglich des Objekts praktisch ausgeregelt. Dass in der X -Rotation nicht vollständig ausgeregelt werden kann, hängt mit den schlechteren Kontrastwerten zusammen, welche für diesen Freiheitsgrad im vorherigen Abschnitt festgestellt wurden.

Im zweiten Versuch wird der Greifer auf die Pose des quer liegenden Rundstabs ausgerichtet. Die Ausgangspose ist in den Freiheitsgraden X -Translation, Z -Translation, X -Rotation und Z -Rotation bezüglich der Zielpose versetzt. Der Versuch wird in Abbildung 8.15 dargestellt. Die Ergebnisse in Tabelle 8.2 sind analog zu Versuch 1, d. h., nur die Ausrichtung in der X -Rotation zeigt signifikante Abweichungen. Wie im vorherigen Abschnitt besprochen, werden die Messungen genauer, je näher das Objekt zum Sensor ist. Deshalb wurden im zweiten Durchlauf von Versuch 2 die Backen auf einen kleineren Abstand gebracht. An den Ergebnissen in Tab. 8.2 ist abzulesen, dass sich dies in der Tat positiv auf die Güte der Ausrichtung in der X -Rotation auswirkt.

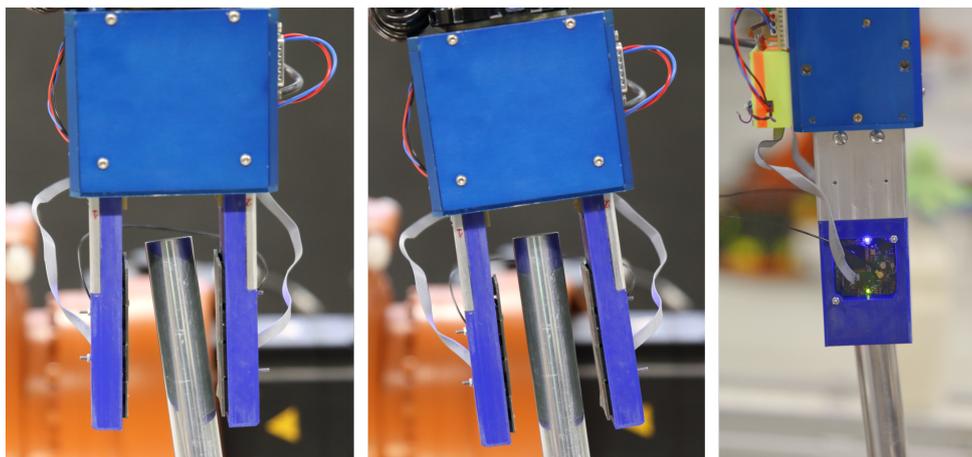


Abbildung 8.14: Von links nach rechts: Ausgangspose des Greifers, Vorderansicht der erreichten Pose und Seitenansicht der erreichten Pose; in allen Freiheitsgraden ist die Ausrichtung akkurat, bis auf die X -Rotation. Dieses Ergebnis deckt sich mit der Fähigkeit der TNS V3.1, Kontrast in den einzelnen Freiheitsgraden zu erkennen, wie in Abschnitt 8.4.1 ausgewertet.

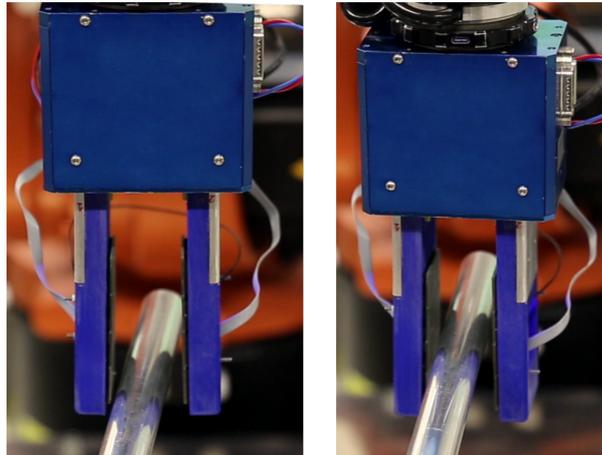


Abbildung 8.15: Die Ausgangspose und erreichte Pose für den Rundstab in querer Lage; im zweiten Durchlauf (hier dargestellt) ist der Greifer etwas weiter geschlossen, um die Abweichung bezüglich der X -Rotation besser erfassen zu können (s. Tabelle 8.2).

Tabelle 8.2: Abweichungen Versuch 2 (Stab ist quer)

Durchgang	Öffnungsweite (mm)	X_T (mm)	Z_T (mm)	X_R (Grad)	Z_R (Grad)
1	45	-0.4	-0.3	7.6	-1
2	35	-0.9	0.7	3.7	0.2

Die Ergebnisse hier zeigen, dass auch mit TNS V3.1 das berührungslose Ausrichten möglich ist. Im beidseitig-kapazitiven Modus wurde im vorherigen Abschnitt gezeigt, dass die Erfassung von einem Kontrast für Nicht-Leiter auf ähnliche Weise möglich ist. Deshalb wird eine Ausrichtung auch für Nicht-Leiter möglich sein. Allerdings muss ggf. die Anordnung der Sensoren variiert oder erweitert werden, um beispielsweise eine Erfassung der Translation in der X -Richtung zu ermöglichen. Die Erfassung von geerdeten Leitern ist sowohl im selbst- als auch im beidseitig-kapazitiven Modus am genauesten.

8.5 Fazit

In diesem Kapitel wurde die Validierung des neuen Sensorkonzepts anhand des Prototypen TNS V3.1 vorgestellt. Die Hardware wurde hinsichtlich des Zeit- und Rauschverhaltens analysiert und in diesen Domänen mit dem Prototypen TNS V1.0 von Göger verglichen. Die ordnungsgemäße Funktionstüchtigkeit des taktilen Modus wurde betrachtet. Anschließend wurden die Möglichkeiten analysiert, mit dem Sensor durch Zusammenschalten von Elektroden räumliche Gradienten zu erfassen. Insbesondere wurden die Modi selbst- und beidseitig-kapazitiv betrachtet. Im letzten Abschnitt wurde dann gezeigt, dass es mit den erfassten Gradienten möglich ist, einen Greifer berührungslos an einem Rundstab auszurichten.

Da in TNS V1.0 hochwertige, aber auch teure und platzaufwändige Komponenten verwendet, ist diese Hardware hinsichtlich Zeit- und Rauschverhalten den TNS V3.1 zunächst

überlegen. Die TNS V3.1 agieren aber dezentralisiert und sind wegen der parallel verfügbaren Rechenleistung in der Lage, diese Nachteile aufzuwiegen. Das Verhalten der TNS V1.0 lässt sich mit den TNS V3.1 emulieren, sodass die Ergebnisse aus der Evaluation in Teil II sich prinzipiell auf die neue Generation von Sensoren übertragen lassen. Eine großes Potential für Verbesserung besteht noch darin, die Abtastzeit durch leistungsfähigere Hardware optimal zu verwenden. Bisher wird sie nur bis zu ca. 13 % ausgenutzt. Weitere Verbesserungen sind auch über Optimierung der analogen Schaltung zu erreichen. In Hinblick auf das Rauschverhalten ist hervorzuheben, dass nachgewiesen wurde, dass das analoge Zusammenschalten von Deckelelektroden für die Näherungsmessung eine bessere Signalqualität liefert als die digitale Zusammenfassung der Einzelmessungen. Effektiv wird dadurch die Reichweite des Sensors erhöht und damit eines der wichtigen Ziele der vorliegenden Arbeit erfüllt.

Das Verfahren zu Gradientenbestimmung profitiert von der Erhöhung der Reichweite. In den sechs Raumfreiheitsgraden wurde untersucht, welcher Kontrast die Paare an Konfigurationen erfassen können. In fast allen Fällen konnte gezeigt werden, dass die Sensorwerte eine gute Grundlage für die Berechnung der Gradienten liefern. Nur die Erfassung der X -Rotation, also von einer Drehung parallel zur Sensorfläche im selbst-kapazitiven Modus, sollte noch verbessert werden. Durch eine vorgeschlagene Verbesserung der Schaltung könnte auch in diesem Fall ein guter Kontrast erreicht werden. Die Auswertung wurde für beide Näherungsmodi, selbst- und beidseitig-kapazitiv, und alle gewünschten Materialienklassen geerdete Leiter, nicht-geerdete Leiter und Nicht-Leiter, mit vielversprechenden Ergebnissen durchgeführt. Im beidseitig-kapazitiven Modus ist die Anordnung der Sensoren jedoch nicht optimal, um Verschiebungen des Objekts innerhalb des erzeugten E-Felds zu detektieren. In diesem Modus korrespondieren die Messwerte mit einer Abschattungs- bzw. mit einem Volumeneffekt. Diese muss man sich noch besser zu Nutze machen, um auf eine Annäherung schließen zu können. Da die Funktionalität erwiesen ist, muss also nur eine passende Anordnung gefunden werden, um diesem Problem zu begegnen. In der Evaluierung anhand der berührungslosen Ausrichtung des Greifers bestätigt sich, dass die Sensorwerte für diese Aufgabe geeignet sind. Die Genauigkeit der Ausrichtung erfüllt die Erwartungen, d. h., sie ist für alle Freiheitsgrade außer der X -Rotation sehr hoch.

Die Anwendungsbereiche des Sensors gehen deutlich über das hier gezeigte berührungslose Vorausrichten hinaus. So wird die flexible Ortsauflösung auch bei der Auskleidung des Roboters eine wichtige Rolle spielen. Die in Kapitel 6 vorgestellte Konturverfolgung kann z. B. mithilfe einer kompakt integrierten Hardware umgesetzt werden. Der beidseitig-kapazitive Modus wird den Einsatz des Ansatzes zur Konturverfolgung bei nicht-leitenden Materialien ermöglichen. Im Kontext der Mensch-Roboter Interaktion wird darüber hinaus die feinere Auflösung eine vielseitige Funktionalität ermöglichen. Die Aspekte der kraftauflösenden taktilen Modalität und des modularen Aufbaus wurden zwar hier nicht vertiefend untersucht, sind aber weitere Alleinstellungsmerkmale des Sensorkonzepts. Mithilfe einer konsolidierten Version des Sensors können so bewährte Methoden verbessert und neue Methoden erschlossen werden.

8.6 Erfüllung der Anforderungen

Als letzter Teil der Validierung wird hier die Erfüllung der Anforderungen, die in den Kapiteln 5 und 6 formuliert wurden, besprochen. In Tabelle 8.3 sind die Anforderungen mit ihrem Erfüllungsgrad eingetragen. Der Übersicht halber sind die Anforderungen nochmal wiedergegeben:

Anforderungen Greifer (AG)

- AG1 Integrierbarkeit I:** Die Gesamtfläche der Sensoren soll bei gleichbleibender Leistung (Rauschverhalten u. Reichweite) reduziert werden.
- AG2 Integrierbarkeit II:** Die Auswerteelektronik soll im Greifersystem vollständig integriert sein.
- AG3 Integrierbarkeit III:** Das Sensorelement soll geometrisch flexibel integrierbar sein, d. h., es soll räumlich unabhängig von der Auswerteelektronik angebracht und auf planaren und gekrümmten Flächen realisiert werden können.
- AG4 Ortsauflösung:** Die Ortsauflösung in der Näherungsmodalität soll erhöht werden, um geometrische Informationen von Objekten und der Umwelt auf einer kleineren Skala erfassen zu können.
- AG5 Beidseitig-kapazitive Messung:** Die beidseitig-kapazitive Messung soll das robuste Erkennen von Nicht-Leitern ermöglichen.

Anforderungen Auskleidung (AA)

- AA1 Beidseitig-kapazitives Messen:** Der Sensor soll im beidseitig-kapazitiven Modus messen können, um nicht-leitenden Materialien robust erkennen zu können.
- AA2 Flexible Integration:** Das Sensorelement soll geometrisch flexibel integrierbar sein, d. h., es soll räumlich unabhängig von der Auswerteelektronik angebracht und auf planaren und gekrümmten Flächen realisiert werden können.
- AA3 Modularisierung/Vernetzung:** Jedes Sensormodul soll eine integrierte Datenverarbeitung haben und beliebig mit weiteren Modulen vernetzbar sein.
- AA4 Ortsauflösung:** Es ist wünschenswert, dass die Ortsauflösung gesteigert wird, um die hochperformante und sichere Mensch-Roboter-Interaktion zu ermöglichen.

Wie in Tabelle 8.3 aufgeführt, wurden alle gestellten Anforderungen umgesetzt und die resultierende Funktionalität getestet. Die essenziellen Ziele dieses Abschnitts und der vorliegenden Arbeit insgesamt wurden damit erreicht.

- AG1, AG2 und AG4 haben sich durch die Validierung in diesem Kapitel sogar in einer Anwendung bewährt.
- AG3 bzw. AA2 werden als erfüllt angesehen, obwohl nicht explizit Sensorelemente mit gekrümmten Flächen ausgeführt wurden. Daher ist dieser Haken mit einem

Tabelle 8.3: Stand der Umsetzung der Anforderungen aus den Kapiteln 5 und 6

Anforderung	umgesetzt und getestet	evaluiert	anwendungsbezogen evaluiert
AG1	✓	✓	✓
AG2	✓	✓	✓
AG3,AA2	✓*		
AG4	✓	✓	✓
AG5,AA1	✓	✓	
AA3	✓		
AA4	✓	✓	

Sternchen versehen. Die Möglichkeit, ein Sensorelement mit einer gekrümmten Fläche zu realisieren, ist dadurch gegeben, dass es prinzipiell möglich ist, elektrische Leiter in einer beliebigen Form auszuführen. Bezüglich der flexiblen Integration wurde am Beispiel des TNS V3.1 gezeigt, dass das Sensorelement von der Elektronik entkoppelt werden kann.

- AG5 bzw. AA1 wurde ausführlich evaluiert. Eine Implementierung des berührungslosen Ausrichten und der Konturverfolgung mit dem beidseitig-kapazitiven Modus verspricht gute Ergebnisse.
- AA3 wurde mit der Integration der Sensoren in den Greifer getestet. Dort sind beide Sensoren über ein gemeinsames Bus-System verbunden. Die prinzipielle Machbarkeit ist damit nachgewiesen. Die Umsetzung eines Arrays bedarf noch einiger Arbeit, welche jedoch durch die Modularisierung entscheidend vorangebracht wurde.
- AA4 wurde durch AG4 erfüllt. Die Implementierung der flexiblen Ortsauflösung am Äußeren des Roboters verspricht, die Mensch-Roboter-Interaktion entscheidend weiterzubringen.

KAPITEL 9

Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick

9.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die vorliegende Arbeit spannt den Bogen zwischen der Realisierung innovativer Ansätze, welche durch einen kapazitiven taktilen Näherungssensor (TNS V1.0) ermöglicht wurden, und der Weiterentwicklung dieser Technologie. Am Anfang der Arbeit stand solch ein Sensor zur Verfügung, der sowohl in einen Greifer integriert wurde als auch verwendet wurde, um einen End-Effektor auszukleiden. Die Konzeption dieser beiden Systeme deckt den Einsatzbereich solcher Sensoren ab: Sie sollen einerseits verwendet werden, um das Greifen durch den Roboter robust zu machen und andererseits um dem Roboter eine Möglichkeit zu geben, sein nahes Umfeld verdeckungsfrei zu erfassen. Damit sich diese Ansätze fest etablieren können, wurde die Sensortechnologie hinsichtlich der Funktionalität, Integrierbarkeit und der Ortsauflösung weiterentwickelt.

Das Potential, mit der Art von Sensoren neuartige Ansätze zu entwickeln, wurde in Teil II der Arbeit belegt. Als erstes wurde das berührungslose Ausrichten des Greifers an Objekten gezeigt. Es wurde eine gradientenbasierte Regelung umgesetzt, welche den Greifer in den sechs Raumfreiheitsgraden ausrichten kann. Aufgrund des kapazitiven Messprinzips konnte für diese Ausrichtung bei leitenden Objekten eine hohe Genauigkeit erreicht werden, obwohl zwischen Sensoren und Objekt ein vergleichsweise weiter Abstand gehalten wurde. Bei Nicht-Leitern musste der Greifer geschlossen werden, während kontinuierlich ausgeregelt wurde, um eine ähnlich genaue Ausrichtung zu erreichen. In beiden Fällen wurde bis zum Kontakt mit dem Objekt eine gute Vorausrichtung erreicht, sodass das Objekt ohne Verschiebungen gegriffen werden konnte. Auf dieser Idee des Vorausrichtens basierend wurden zwei neuartige Methoden vorgestellt: die Haptische Exploration mit Näherungsmodalität und die Telemanipulation mit rückgekoppelter Kraft von Näherungsfeldern.

Es wurde gezeigt, dass die Haptische Exploration von Näherungsmodalität profitiert, weil berührungslose Explorationsschritte kontinuierlich erfolgen können. So kann bspw. eine Kante erfasst werden, ohne dass aufwändige Einzelabtastungen durchgeführt werden müssen. Zusammen mit den präzisen taktilen Abtastungsschritten konnte die Rekonstruktion von unterschiedlich geformten Alu-Platten mit Ecken, Kanten und Krümmungen in all-

gemeiner Lage gezeigt werden. Mit der Telemanipulation, welche den Benutzer durch Krafrückkopplung auf Basis von Näherungswerten unterstützt, wurde ein Konzept gezeigt, welches durch die TNS erst ermöglicht wurde. Das System erweitert die Informationen, welche dem Benutzer zur Verfügung stehen, und es konnte eine Effizienzsteigerung gezeigt werden. Die Auslastung des Operateurs konnte darüber hinaus gemindert werden, wenn das System sich teilautonom verhielt.

Mit dem End-Effektor wurde ein innovatives System zur Konturverfolgung/Kollisionsvermeidung konzipiert. Aufgrund der zweidimensionalen Ortsauflösung konnte ein Hindernis nicht nur detektiert werden, sondern die Krümmung seiner Oberfläche in zwei Richtungen geschätzt werden. Diese Information wurde verwendet, um eine prädiktive Regelung umzusetzen. In der vorgestellten Methode wird die Bahn des End-Effektors beim Traversieren entsprechend der Krümmung des Objekts mitgekrümmt. So konnte eine höhere Glätte erreicht werden als ohne Prädiktion. Dieses System zeigte Robustheit gegenüber unterschiedlichen Geometrien, konnte jedoch aufgrund des selbst-kapazitiven Messprinzips des TNS V1.0 nicht-leitende Objekte nur unzureichend erkennen.

Obwohl das grundsätzliche Potential der Sensoren erkennbar wurde, wurden auch Möglichkeiten der Verbesserung deutlich. Bei der Erkennung von Nicht-Leitern zeigt das selbst-kapazitive Messen von TNS 1.0 Schwächen, welchen mit einer Messung im beidseitig-kapazitiven Modus begegnet werden sollte. Die Auswerteelektronik der TNS V1.0 basiert auf einer Evaluationsplattform und ist somit nicht robust integrierbar. Eine Modularisierung der Elektronik war der logische nächste Schritt. Für die Greifaufgaben bei kleineren Objekten bzw. Strukturen ist zugleich die verwendete Fläche der Sensoren zu groß und die Ortsauflösung zu gering. Dieser Situation sollte mit einer flexiblen Ortsauflösung begegnet werden.

Die genannten Anforderungen wurden in Teil III der Arbeit umgesetzt. Zunächst wurde ein neues Sensorkonzept vorgestellt, welches das selbst- und beidseitig-kapazitive Messen in der Näherungsmodalität beherrscht und ebenso eine kraftauflösende taktile Messung ermöglicht. Die Trennung von Sensorelement und Auswerteelektronik ist möglich, sodass eine flexible Integrierbarkeit gewährleistet ist. Das Konzept ist modular, wodurch jeder Sensor in der Lage ist, seine Messungen selbstständig auszuwerten. Die Ortsauflösung wurde erhöht und gleichzeitig das flexible Zusammenschalten von einzelnen Elementen des Sensors ermöglicht, um situativ eine höhere Empfindlichkeit in den Näherungsmodi zu erreichen.

Um das neue Sensorkonzept zu evaluieren, wurde ein Prototyp gebaut (TNS V3.1). Eine Analyse des Zeit- und Rauschverhaltens zeigt, dass die Funktionalität, welche mit den TNS V1.0 untersucht wurde, prinzipiell auch mit TNS V3.1 erreicht werden kann. Generell ist jedoch noch ein deutlicher Raum für Verbesserung durch Verwendung von spezialisierter Hardware, wie z. B. eines DSPs, gegeben. Es wurde nachgewiesen, dass das analoge Zusammenschalten von Elektroden in der Näherungsmodalität tatsächlich eine höhere Empfindlichkeit als das digitale Zusammenfassen der Einzelmessungen aufweist. Dadurch wurde die Idee des Zusammenschaltens untermauert. In den beiden Näherungsmodi wurde für unterschiedliche Objektklassen gezeigt, dass für die Raumfreiheitsgrade ein guter Kontrast

zum Bilden von Gradienten durch Zusammenschalten von entsprechenden Konfigurationen erreicht werden kann. Zuletzt wurde gezeigt, dass, analog zur Implementierung mit TNS V1.0, das berührungslose Ausrichten im selbst-kapazitiven Modus umgesetzt werden kann. Dabei wurde die jetzt mögliche günstigere Ortsauflösung verwendet.

9.2 Ausblick

Ein erster Anhaltspunkt für weiterführende Arbeiten auf diesem Feld sind die Anforderungen, welche in Abschnitt 8.6 besprochen wurden, sowie deren Erfüllung. So ist es interessant, für den neuen vorgestellten Sensor seine Funktionalität weiter anwendungsbezogen zu untersuchen. Als Ausgangspunkt solch einer Validierung ist es sinnvoll, ein System, wie in Abbildung 9.1 dargestellt, zu entwerfen. Da in diesem System beide Einsatzbereiche der multimodalen Sensorik umgesetzt sind, können die Bereiche synergetisch betrachtet werden. Es kann z. B. ein System realisiert werden, das zugleich selbstständig und kooperativ mit dem Menschen handeln kann. Hier kann bspw. die Rolle der flexiblen Ortsauflösung vertieft untersucht werden, um eine performante Interaktion zu erreichen. Die Manipulation betreffend ist es sinnvoll, neue Sensoranordnungen und Greiferkinematiken zu betrachten, mit denen die Erfassung der Objekte und das anschließende Greifen optimiert werden. Insbesondere für den beidseitig-kapazitiven Modus gibt es noch Untersuchungsbedarf hinsichtlich einer optimalen Anordnung, die die Erfassung eines Kontrasts in allen Freiheitsgraden begünstigt.

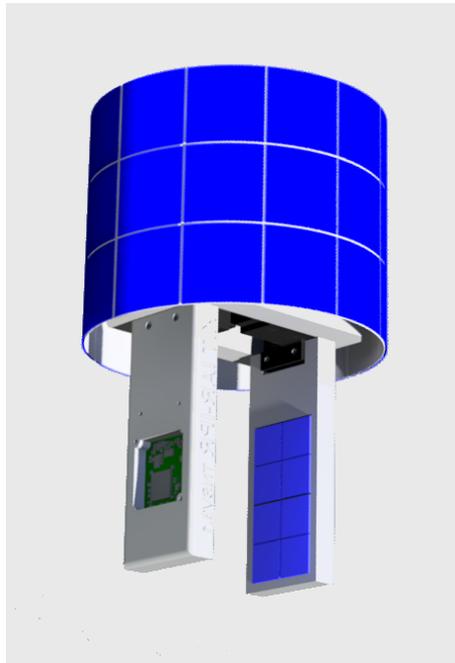


Abbildung 9.1: Ein Konzept, in dem eine Ausstattung des Greifers und die Auskleidung des End-Effektors mit den neuen Sensoren gleichzeitig realisiert ist (Bildquelle: [16] ©2016 IEEE)

Die gezeigte Umsetzung des Sensorkonzepts hat, verglichen mit rein-taktilen Sensoren, welche aus der Literatur bekannt sind, eine grobe Ortsauflösung in der taktilen Modalität.

Vom Prinzip des Sensorelements her lässt sich auch mit dem neuen Sensorkonzept eine hohe Dichte an Messpunkten realisieren. Dazu bedarf es jedoch einer Möglichkeit, diese elektrisch anzusprechen und auszuwerten. Einerseits gibt es keine elektronischen Bausteine, die einen Schalter mit der dafür notwendigen Anzahl an Eingängen aufweisen. Hier muss ggf. auf Spezialanfertigungen zurückgegriffen werden. Andererseits stellt die Herstellung des dazugehörigen Sensorelements eine Herausforderung dar, sodass evtl. 3D-Druck-Verfahren eingesetzt werden müssen. In jedem Fall stellt sich hier die Frage, auf welcher Granularität die resultierende Auflösung in der Näherungsmodalität in weiteren Szenarien sinnvoll verwendet werden kann. Für das berührungslose Ausrichten wurde bereits eine praktikable Lösung präsentiert, wobei viele weitere Anwendungsfälle mit variierender Ortsauflösung denkbar sind.

Ein äußerst interessantes Konzept, welches in der Zukunft untersucht werden kann, ist das eines ortsauflösenden Scherkraft-Näherungssensors. Eine Näherungsmodalität kann nach dem hier vorgestellten Beispiel implementiert werden. Eine ortsauflösende Scherkraftmessung erweitert die Wahrnehmung bisheriger taktiler Sensoren um weitere Raumfreiheitsgrade, denn taktile Sensoren sind nur in der Lage, Normalkräfte angemessen zu detektieren. Über die Druckverteilung ist es immerhin möglich, auf die zwei Drehmomente um die Achsen, welche die Sensorebene aufspannen, zu schließen. Die Kraft, welche quer auf den Sensor einwirkt oder das Drehmoment, welches in der Normalen der Sensorebene wirkt, bleiben undetektierbar. Diese Messungen können essenzielle Merkmale enthalten, welche die robuste und geschickte Manipulation entscheidend voranbringen könnten.

Über die Robotik hinaus kann die vorgestellte Technologie bspw. in der Unterhaltungselektronik oder in der Medizintechnik Anwendung finden. Die taktile Modalität und die Näherungsmodalität ermöglichen, ähnlich wie in der Robotik, neuartige Interaktionsformen, z. B. mittels Gestik. Eine Auswahl an berührungslosen und berührungsbasierten Gesten könnte die Bedienbarkeit der Geräte entscheidend erweitern. In der Medizintechnik werden Interaktionen mit elektronischen Geräten möglich, gerade wenn eine Berührung wegen Verunreinigung dringend zu vermeiden ist. In jedem Fall verspricht die vorgestellte Technologie, die Interaktion mit Technik für den Menschen zuvorkommend zu machen.

Literatur

1. ALAGI, H., S. ESCAIDA NAVARRO, M. MENDE und B. HEIN: „A Versatile and Modular Capacitive Tactile Proximity Sensor“, *Haptics Symposium 2016*, 2016: S. 290–206 (siehe S. 89, 94–96, 98).
2. ASFOUR, T., K. REGENSTEIN, P. AZAD, J. SCHRODER, A. BIERBAUM, N. VAHRENKAMP und R. DILLMANN: „ARMAR-III: An Integrated Humanoid Platform for Sensory-Motor Control“, *Humanoid Robots, 2006 6th IEEE-RAS International Conference on*, IEEE, 2006: S. 169–175 (siehe S. 21).
3. BAETEN, J. und J. DE SCHUTTER: „Improving Force Controlled Planar Contour Following Using Online Eye-in-Hand Vision based Feedforward“, *Advanced Intelligent Mechatronics, 1999. Proceedings. 1999 IEEE/ASME International Conference on*, IEEE, 1999: S. 902–907 (siehe S. 29).
4. BERNSTEIN, J. T.: „Capacitive Sensor Panel Having Dynamically Reconfigurable Sensor Size and Shape“, US000008390597B2, 2013 (siehe S. 34, 36, 37).
5. ———, „Touch and Hover Sensing“, US020110007021A1, 2011 (siehe S. 37).
6. BIERBAUM, A., I. GUBAREV und R. DILLMANN: „Robust Shape Recovery for Sparse Contact Location and Normal Data from Haptic Exploration“, *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*, IEEE, 2008: S. 3200–3205 (siehe S. 21).
7. BIERBAUM, A., M. RAMBOW, T. ASFOUR und R. DILLMANN: „A Potential Field Approach to Dexterous Tactile Exploration of Unknown Objects“, *Humanoid Robots, 2008. Humanoids 2008. 8th IEEE-RAS International Conference on*, IEEE, 2008: S. 360–366 (siehe S. 21).
8. BIERBAUM, A., M. RAMBOW, T. ASFOUR und R. DILLMANN: „Grasp Affordances from Multi-Fingered Tactile Exploration Using Dynamic Potential Fields“, *Humanoid Robots, 2009. Humanoids 2009. 9th IEEE-RAS International Conference on*, IEEE, 2009: S. 168–174 (siehe S. 21, 22).
9. BRABETZ, L., O. HAAS und C. SPIEKER: *Grundgebiete der Elektrotechnik*, 12. Aufl., CLAUSERT, H., Hrsg. Berlin: De Gruyter, 2015, Bd. 1: Gleichstromnetze, Operationsverstärkerschaltungen, elektrische und magnetische Felder (siehe S. 6, 10, 12).

10. CHEUNG, E. und V. LUMELSKY, „A Sensitive Skin System for Motion Control of Robot Arm Manipulators“, *Robotics and Autonomous Systems* 1992, Bd. Jg. 10(Nr. 1): S. 9–32, 1992 (siehe S. 29).
11. CORPORATION, C. S. (Mai 2016). CY8C58LPxxx, Cypress Semiconductor Corporation (siehe S. 95).
12. DETRY, R., C. H. EK, M. MADRY und D. KRAGIC: „Learning a Dictionary of Prototypical Grasp-Predicting Parts from Grasping Experience“, *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on*, IEEE, 2013: S. 601–608 (siehe S. 22).
13. DEVICES, A. (Mai 2016). AD9835, Adresse: <http://www.analog.com/en/products/rf-microwave/direct-digital-synthesis-modulators/ad9835.html> (siehe S. 95).
14. ESCAIDA NAVARRO, S., N. GORGES, H. WÖRN, J. SCHILL, T. ASFOUR und R. DILLMANN: „Haptic Object Recognition for Multi-Fingered Robot Hands“, *Haptics Symposium (HAPTICS), 2012 IEEE*, 2012: S. 497–502 (siehe S. 21).
15. ESCAIDA NAVARRO, S., F. HEGER, F. PUTZE, T. BEYL, T. SCHULTZ und B. HEIN: „Telemanipulation with Force-based Display of Proximity Fields“, *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015 IEEE/RSJ International Conference on*, 2015: S. 4578–4574 (siehe S. 47, 51, 61, 62, 64, 66, 68, 69, 71).
16. ESCAIDA NAVARRO, S., S. KOCH und B. HEIN: „3D Contour Following for a Cylindrical End-Effector Using Capacitive Proximity Sensors“, *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016 IEEE/RSJ International Conference on*, 2016 (siehe S. 74, 75, 77, 78, 80, 82–86, 124).
17. ESCAIDA NAVARRO, S., M. MARUFO, Y. DING, S. PULS, D. GÖGER, B. HEIN und H. WÖRN: „Methods for Safe Human-Robot-Interaction Using Capacitive Tactile Proximity Sensors“, *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*, 2013: S. 1149–1154 (siehe S. 44, 46, 86).
18. ESCAIDA NAVARRO, S., M. SCHONERT, B. HEIN und H. WÖRN: „6D Proximity Servoing for Preshaping and Haptic Exploration using Capacitive Tactile Proximity Sensors“, *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2014 IEEE/RSJ International Conference on*, 2014: S. 7–14 (siehe S. 47, 48, 54, 56, 59, 60).
19. FRANGEN, J.: „Sensorsystem zur Umfeldüberwachung an einem mechanischen Bauteil und ein Verfahren zur Ansteuerung und Auswertung des Sensorsystems“, DE 102009029021A1, 2011 (siehe S. 34, 35).
20. GEORGE, B., H. ZANGL, T. BRETTERKLIEBER und G. BRASSEUR, „Seat Occupancy Detection based on Capacitive Sensing“, *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* 2009, Bd. Jg. 58(Nr. 5): S. 1487–1494, 2009 (siehe S. 16).
21. GÖGER, D. und H. WÖRN: „A Highly Versatile and Robust Tactile Sensing System“, *Proc. of the IEEE Conf. on Sensors*, Atlanta (GA), USA, 2007 (siehe S. 20).

22. GÖGER, D.: „Ein kapazitives Sensorsystem für Robotergreifer“, Zugl.: Karlsruhe, KIT, Diss., 2014, Diss., Karlsruher Institut für Technologie, München, 2014 (siehe S. 22, 41, 43, 44, 105, 106).
23. GÖGER, D., H. ALAGI und H. WÖRN: „Tactile Proximity Sensors for Robotic Applications“, *International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2013 (siehe S. 22, 41, 43, 44).
24. GÖGER, D., M. BLANKERTZ und H. WÖRN: „A Tactile Proximity Sensor“, *IEEE Sensors 2010*, 2010: S. 589–594 (siehe S. 22, 41–44).
25. GÖGER, D., N. GORGES und H. WÖRN: „Tactile Sensing for an Anthropomorphic Robotic Hand: Hardware and Signal Processing“, *Robotics and Automation, 2009. ICRA '09. IEEE International Conference on*, Mai 2009: S. 895–901 (siehe S. 21, 22).
26. GÖGER, D., K. WEISS, C. BURGHART und H. WÖRN: „Sensitive Skin for a Humanoid Robot“, *Proceedings of the 2006 international conference on human-centered robotic systems*, 2006 (siehe S. 21).
27. GORGES, N., A. SCHMID, D. GÖGER und H. WÖRN: „Grasping and Guiding a Human with a Humanoid Robot“, *Humanoid Robots, 2008. Humanoids 2008. 8th IEEE-RAS International Conference on*, Dez. 2008: S. 623–628 (siehe S. 41).
28. GORGES, N., S. ESCAIDA NAVARRO, D. GÖGER und H. WÖRN: „Haptic Object Recognition Using Passive Joints and Haptic Key Features“, *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, Mai 2010: S. 2349–2355 (siehe S. 21).
29. GORGES, N., P. FRITZ und H. WÖRN: „Haptic Object Exploration using Attention Cubes“, *33rd Annual German Conference on Artificial Intelligence (KI 2010)*, 2010 (siehe S. 21).
30. GORGES, N., S. GAA und H. WÖRN: „Object Exploration With A Humanoid Robot Using Tactile And Kinesthetic Feedback“, *International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, 2008 (siehe S. 20, 58).
31. GUNJI, D., Y. MIZOGUCHI, S. TESHIGAWARA, A. MING, A. NAMIKI, M. ISHIKAWA und M. SHIMOJO: „Grasping Force Control of Multi-Fingered Robot Hand based on Slip Detection Using Tactile Sensor“, *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*, IEEE, 2008: S. 2605–2610 (siehe S. 32).
32. GUO, D., P. LANCASTER, L.-T. JIANG, F. SUN und J. R. SMITH: „Transmissive Optical Pretouch Sensing for Robotic Grasping“, *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015 IEEE/RSJ International Conference on*, IEEE, 2015: S. 5891–5897 (siehe S. 25, 26).
33. HART, S. G. und L. E. STAVELAND: „Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research“, *Advances in psychology* 1988, Bd. Jg. 52: S. 139–183, 1988 (siehe S. 67).

34. HASEGAWA, H., Y. MIZOGUCHI, K. TADAKUMA, A. MING, M. ISHIKAWA und M. SHIMOJO: „Development of Intelligent Robot Hand Using Proximity, Contact and Slip Sensing“, *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, Mai 2010: S. 777–784 (siehe S. 27, 28).
35. HASEGAWA, H., Y. SUZUKI, A. MING, K. KOYAMA, M. ISHIKAWA und M. SHIMOJO, „Net-Structure Proximity Sensor: High-Speed and Free-Form Sensor With Analog Computing Circuit“, *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on* 2015, Bd. Jg. 20(Nr. 6): S. 3232–3241, 2015 (siehe S. 27, 31).
36. HOCH, D.: „Proximity Sensing for Capacitive Touch Sensor“, US000008902191B2, 2014 (siehe S. 37).
37. HOTELLING, S. P.: „Proximity and Multi-Touch Sensor Detection and Demodulation“, US020080158172A1, 2008 (siehe S. 34–37).
38. HSIAO, K., P. NANGERONI, M. HUBER, A. SAXENA und A. NG: „Reactive Grasping using Optical Proximity Sensors“, *Robotics and Automation, 2009. ICRA '09. IEEE International Conference on*, 2009: S. 2098–2105 (siehe S. 32).
39. HUANG, K., L.-T. JIANG, J. R. SMITH und H. J. CHIZECK: „Sensor-Aided Tele-operated Grasping of Transparent Objects“, *Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on*, IEEE, 2015: S. 4953–4959 (siehe S. 25).
40. INSTRUMENTS, T. (Mai 2016). LM8262, Adresse: <http://www.ti.com/product/lm8262> (siehe S. 95).
41. JIA, Y.-B., L. MI und J. TIAN: „Surface Patch Reconstruction via Curve Sampling“, *Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on*, IEEE, 2006: S. 1371–1377 (siehe S. 30).
42. JIANG, L.-T. und J. R. SMITH: „A Unified Framework for Grasping and Shape Acquisition via Pretouch Sensing“, *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on*, IEEE, 2013: S. 999–1005 (siehe S. 24–26).
43. ———, „Seashell Effect Pretouch Sensing for Robotic Grasping“, *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on*, IEEE, 2012: S. 2851–2858 (siehe S. 24–26).
44. KERPA, O., K. WEISS und H. WORN: „Development of a flexible Tactile Sensor System for a Humanoid Robot“, *Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on*, IEEE, Bd. 1, 2003: S. 1–6 (siehe S. 20).
45. KOYAMA, K., H. HASEGAWA, Y. SUZUKI, A. MING und M. SHIMOJO: „Pre-Shaping for Various Objects by the Robot Hand Equipped with Resistor Network Structure Proximity Sensors“, *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*, Nov. 2013: S. 4027–4033 (siehe S. 28).

46. KOYAMA, K., Y. SUZUKI, A. MING und M. SHIMOJO: „Grasping Control Based on Time-to-Contact Method for a Robot Hand Equipped with Proximity Sensors on Fingertips“, *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015 IEEE/RSJ International Conference on*, IEEE, 2015: S. 504–510 (siehe S. 28).
47. LEDERMAN, S. J. und R. L. KLATZKY, „Haptic Perception: A Tutorial“, *Attention, Perception, & Psychophysics* 2009, Bd. Jg. 71(Nr. 7): S. 1439–1459, 2009 (siehe S. 74).
48. LEE, H.-K., S.-I. CHANG und E. YOON, „Dual-Mode Capacitive Proximity Sensor for Robot Application: Implementation of Tactile and Proximity Sensing Capability on a Single Polymer Platform Using Shared Electrodes“, *Sensors Journal, IEEE* 2009, Bd. Jg. 9(Nr. 12): S. 1748–1755, 2009 (siehe S. 33).
49. LEWIN, W.: *Electricity and Magnetism*. MIT, 2002, Vorlesung (siehe S. 6).
50. LU, S., H. ZHAO, K. JU, K. SHIN, M. LEE, K. SHELLEY und K. H. CHON, „Can Photoplethysmography Variability Serve as an Alternative Approach to Obtain Heart Rate Variability Information?“, *Journal of clinical monitoring and computing* 2008, Bd. Jg. 22(Nr. 1): S. 23–29, 2008 (siehe S. 69).
51. LUMELSKY, V. J. und E. CHEUNG, „Real-Time Collision Avoidance in Teleoperated Whole-Sensitive Robot Arm Manipulators“, *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on* Jan. 1993, Bd. Jg. 23(Nr. 1): S. 194–203, Jan. 1993 (siehe S. 29, 77).
52. MAYTON, B., L. LEGRAND und J. R. SMITH: „An Electric Field Pretouch System for Grasping and Co-Manipulation“, *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, IEEE, 2010: S. 831–838 (siehe S. 23, 24).
53. ———, „Robot, Feed Thyself: Plugging in to Unmodified Electrical Outlets by Sensing Emitted AA Electric Fields“, *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, IEEE, 2010: S. 715–722 (siehe S. 24).
54. MI, L. und Y.-B. JIA: „High Precision Contour Tracking with a Joystick Sensor“, *Intelligent Robots and Systems, 2004.(IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on*, IEEE, Bd. 1, 2004: S. 804–809 (siehe S. 29).
55. MITTENDORFER, P. und G. CHENG, „Humanoid Multimodal Tactile-Sensing Modules“, *Robotics, IEEE Transactions on* Juni 2011, Bd. Jg. 27(Nr. 3): S. 401–410, Juni 2011 (siehe S. 30).
56. MÜHLBACHER-KARRER, S., A. GASCHLER und H. ZANGL: „Responsive Fingers – Capacitive Sensing during Object Manipulation“, *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015 IEEE/RSJ International Conference on*, IEEE, 2015: S. 4394–4401 (siehe S. 26, 27).
57. MÜHLBACHER-KARRER, S. und H. ZANGL: „Object Detection Based on Electrical Capacitance Tomography“, *Sensors Applications Symposium (SAS), 2015 IEEE, IEEE*, 2015: S. 1–5 (siehe S. 92).

58. NUNES, U., P. FAIA und A. de ALMEIDA: „Sensor-based 3-D Autonomous Contour-Following Control“, *Intelligent Robots and Systems '94. 'Advanced Robotic Systems and the Real World', IROS '94. Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on*, Bd. 1, Sep. 1994: 172–179 vol.1 (siehe S. 29, 77).
59. OSOINACH, B.: „Device with Proximity Detection Capability“, US000008115499B2, 2012 (siehe S. 37, 38, 112).
60. OSOINACH, B. T.: „Method and Application for Performing Capacitive Touch Sensing and Proximity Detection“, US000008558802B2, 2013 (siehe S. 38).
61. SCHIEBENER, D., J. SCHILL und T. ASFOUR: „Discovery, Segmentation and Reactive Grasping of Unknown Objects“, *Humanoid Robots (Humanoids), 2012 12th IEEE-RAS International Conference on*, IEEE, 2012: S. 71–77 (siehe S. 22).
62. SCHILL, J., J. LAAKSONEN, M. PRZYBYLSKI, V. KYRKI, T. ASFOUR und R. DILLMANN: „Learning Continuous Grasp Stability for a Humanoid Robot Hand based on Tactile Sensing“, *Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob), 2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on*, IEEE, 2012: S. 1901–1906 (siehe S. 22).
63. SCHLEGL, T., T. KROGER, A. GASCHLER, O. KHATIB und H. ZANGL: „Virtual Whiskers – Highly Responsive Robot Collision Avoidance“, *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*, Nov. 2013: S. 5373–5379 (siehe S. 27).
64. SCHLEGL, T. und H. ZANGL: „Sensor Interface for Multimodal Evaluation of Capacitive Sensors“, *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, Bd. 450, 2013: S. 012018 (siehe S. 26, 103).
65. SCHMID, A. J., N. GORGES, D. GÖGER und H. WORN: „Opening a Door with a Humanoid Robot Using Multi-Sensory Tactile Feedback“, *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*, IEEE, 2008: S. 285–291 (siehe S. 20).
66. SCHNEIDER, A., J. STURM, C. STACHNISS und W. B. MARC REISERT Hans Burkhardt: „Object Identification with Tactile Sensors Using Bag-of-Features“, *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on*, Okt. 2009: S. 243–248 (siehe S. 22).
67. SHIMOJO, M., T. ARAKI, A. MING und M. ISHIKAWA: „A ZMP Sensor for a Biped Robot“, *Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on*, IEEE, 2006: S. 1200–1205 (siehe S. 27, 32).
68. SMITH, J. R.: „Electric Field Imaging“, Diss., Massachusetts Institute of Technology, 1998 (siehe S. 23).
69. SMITH, J., E. GARCIA, R. WISTORT und G. KRISHNAMOORTHY: „Electric Field Imaging Pretouch for Robotic Graspers“, *Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on*, 2007: S. 676–683 (siehe S. 23).

70. SUZUKI, Y., K. KOYAMA, A. MING und M. SHIMOJO: „Grasping Strategy for Moving Object Using Net-Structure Proximity Sensor and Vision Sensor“, *Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on*, IEEE, 2015: S. 1403–1409 (siehe S. 28).
71. TERADA, K., Y. SUZUKI, H. HASEGAWA, S. SONE, A. MING, M. ISHIKAWA und M. SHIMOJO: „Development of Omni-Directional and Fast-Responsive Net-Structure Proximity Sensor“, *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2011 (siehe S. 29).
72. TERAMOTO, K. und K. WATANABE: „Acoustical Tactile Sensor Utilizing Multiple Reflections for Direct Curvature Measurement“, *SICE 2002. Proceedings of the 41st SICE Annual Conference*, IEEE, Bd. 1, 2002: S. 121–124 (siehe S. 30).
73. VERTANEN, K.: *NASA Task Load Index*, Englisch, www.keithv.com/software/nasatlx/nasatlx_german.html, 2015 (siehe S. 67).
74. WALKER, S., K. LOEWKE, M. FISCHER, C. LIU und J. K. SALISBURY: „An Optical Fiber Proximity Sensor for Haptic Exploration“, *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*, IEEE, 2007: S. 473–478 (siehe S. 29, 30, 76).
75. WEISS, K. und H. WÖRN: „The Working Principle of Resistive Tactile Sensor Cells“, *Mechatronics and Automation, 2005 IEEE International Conference*, IEEE, Bd. 1, 2005: S. 471–476 (siehe S. 20).
76. WETTELS, N., J. FISHEL und G. LOEB: „Multimodal Tactile Sensor“, Englisch, *The Human Hand as an Inspiration for Robot Hand Development*, Ser. Springer Tracts in Advanced Robotics, BALASUBRAMANIAN, R. und V. J. SANTOS, Hrsg., Bd. 95, Springer International Publishing, 2014: S. 405–429 (siehe S. 30).
77. WISTORT, R. und J. R. SMITH: „Electric Field Servoing for Robotic Manipulation“, *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*, IEEE, 2008: S. 494–499 (siehe S. 23).
78. YE, S., K. SUZUKI, Y. SUZUKI, M. ISHIKAWA und M. SHIMOJO: „Robust Robotic Grasping Using IR Net-Structure Proximity Sensor to Handle Objects with Unknown Position and Attitude“, *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on*, IEEE, 2013: S. 3271–3278 (siehe S. 28).
79. ZHANG, B., Z. XIANG, S. ZHU, Q. HU, Y. CAO, J. ZHONG, Q. ZHONG, B. WANG, Y. FANG, B. HU, J. ZHOU und Z. WANG: „Dual Functional Transparent Film for Proximity and Pressure Sensing“, Englisch, *Nano Research* 2014, Bd. Jg. 7(Nr. 10): S. 1488–1496, 2014 (siehe S. 34, 107).

Abbildungsverzeichnis

2.1	Die Konstellation, in der das coulombsche Gesetz beschrieben wird; beide Ladungen haben das gleiche Vorzeichen.	6
2.2	E-Feld einer positiven (+4) und einer negativen (-1) Ladung werden als Vektorfeld und mithilfe von Feldlinien dargestellt. Eine positive Probeladung an Punkt p erfährt eine Kraft \vec{F} , welche tangential zu den Feldlinien ist. . .	7
2.3	U ist die Arbeit, die verrichtet werden muss, um q_2 an den Punkt p bringen, welcher einen Abstand R zu Ladung q_1 besitzt.	8
2.4	Der elektrische Fluss durch ein Flächenelement $d\vec{A}$	9
2.5	Das elektrische Feld zwischen zwei geladenen Platten und außerhalb dieser Platten	9
2.6	Für den Kugelkondensator und weitere Konstellationen ist es ebenso möglich, die Kapazität in geschlossener Form anzugeben. Weitere Beispiele sind in [9] zu finden.	10
2.7	Die Polarisation schwächt durch die induzierte Ladungsdichte σ_{ind} das E-Feld in einem Plattenkondensator, wodurch die Kapazität des Kondensators steigt.	11
2.8	Szenarien, in denen mehr als ein Dielektrikum in einem Plattenkondensator vorkommt; in Szenario (1) wird veranschaulicht, dass die Position des Dielektrikums mit relativer Permittivität ε_1 innerhalb der Platten variiert werden kann, ohne die Gesamtkapazität zu beeinflussen. Die Szenarien (2) und (3) geben an, dass sich, je nach Anordnung, zwei in Serie oder parallel geschaltete Kondensatoren ergeben.	13
2.9	Über eine RC-Tiefpass-Schaltung kann die Kapazität eines Kondensators bestimmt werden.	14
2.10	Ein beidseitig-kapazitives System mit unterschiedlichen Arten von Objekten	15
2.11	Ein selbst-kapazitives System mit unterschiedlichen Arten von Objekten . .	18
2.12	Auswirkung des Schirmeffekts bei zwei Objekten mit unterschiedlichen elektrischen Potentialen	19
3.1	Anthropomorphe Roboterhände, welche am KIT entwickelt wurden	21
3.2	Darstellung der Iso-Signalfächen für die Modi <i>mid-range</i> und <i>high-range</i> nach [52]; die Hülle stellt die möglichen Positionen eines Probeobjekts dar, an denen der gleiche Sensorwert gemessen wird. (Bildquelle: [52] ©2010 IEEE)	24

3.3	In [32] wird ein Lichtschrankensensor verwendet, um die Anwesenheit von Objekten zu detektieren. (Bildquelle: [32] ©2015 IEEE)	25
3.4	Links: die in der Gruppe von Prof. Zangl verwendete Hardware; rechts: das Testsystem zur Kollisionsvermeidung von Schlegl et al. [63] (Bildquellen: (a) [56] ©2015 IEEE und (b) [63] ©2013 IEEE)	27
3.5	Die von Shimojo Labs verwendete 3-Finger-Hand in [78] (Bildquelle: [78] ©2013 IEEE)	28
3.6	In der Arbeit von Walker et al. wird mit einem ortsauflösenden optischen Näherungssensor, welcher an einem runden End-Effektor angebracht ist, entlang einer Richtung die Krümmung von der Hindernisfläche direkt aus den Messungen bestimmt. (Bildquelle: [74] ©2007 IEEE)	30
3.7	Der Näherungssensor von Shimojo Labs (Bildquelle: [35] ©2015 IEEE) . . .	31
3.8	Der Aufbau des taktilen Sensors von Shimojo Labs (Bildquelle: [67] ©2006 IEEE)	32
3.9	Flexibler kapazitiver Dualmodus-Sensor (Bildquelle: [48] ©2009 IEEE) . . .	33
3.10	Mehrschichtiger Aufbau des Sensors der Robert Bosch GmbH. (Bildquelle: [19])	35
3.11	Details zur Feldkonfiguration an einem Pixel nach Hotelling (Bildquelle: [37])	35
3.12	Aufbau eines ortsauflösenden taktilen Näherungssensors nach Bernstein (Bildquelle: [4])	36
3.13	Näherungselektroden 441-443 werden in [59] zusammengefasst, um ein Objekt 38 in weiterer Entfernung erfassen zu können. Über die gemeinsame Leitung 65 wird der Sende-Strom ausgelesen. Der Aufbau ermöglicht nicht das kraftauflösende Erfassen von Taktilität. (Bildquelle: [59])	37
4.1	Entwurf des Sensorelements von Göger (Bildquelle: [24] ©2010 IEEE) . . .	42
4.2	Schematische Schaltung des Sensors von Göger (Bildquelle: [24])	43
4.3	Überblick über das Large Area Modules (LAM) (Bildquelle: [17] ©2013 IEEE)	44
4.4	Erweiterungsboard mit zwei belegten Kanälen und darunter das FPGA Evaluationsboard	45
4.5	Schematische Struktur der Demodulation; in Blau ist die von Göger vorgeschlagene Methode hinterlegt und in Grün ist die neu implementierte Methode hinterlegt. (Bildquelle: [17] ©2013 IEEE)	46
5.1	Links: der Roboter KR16 von KUKA mit dem Greifer und FPGA-Board, auf welches eine Erweiterungsplatine montiert ist; rechts: die TNS-Module, welche in den Backen des Greifers integriert sind (Bildquelle: [18] ©2014 IEEE)	48
5.2	Kalibrierungsdaten zu den einzelnen Sensoren im Greifer; die Daten zeigen die Validierung (Evaluationsdaten) von zuvor bestimmten Regressionen. . .	48
5.3	Beispiel für ein Objekt, dessen Pose innerhalb des Greifers versetzt ist . . .	50
5.4	Die Gruppierungen der Sensoren, um einen Bewegungsradius in den sechs Raumfreiheitsgraden zu berechnen (Bildquelle: [15] ©2015 IEEE)	51
5.5	Beispiel für einen Versuchsaufbau und die unterschiedlichen verwendeten Materialien (Bildquelle: [18] ©2014 IEEE)	54

5.6	Messung von Abständen zur Beurteilung der Vorausrichtung; das Objekt kann hier ein Quader oder ein Rundstab sein.	55
5.7	Beispiel für den Verlauf des TCPs für die Vorausrichtung am metallischen Quader (Bilderquelle: [18] ©2014 IEEE)	56
5.8	Vier repräsentative Startposition, um die Vorausrichtung zu untersuchen . .	56
5.9	Der letzte taktile Explorationsschritt, in dem der Greifer eine Kante (oben) bzw. Ecke (unten) detektiert; durch Rot wird angezeigt, dass der taktile Sensor aktiviert wird, wenn sich der Greifer schließt; durch Blau, dass dies nicht der Fall ist. Diese Situationen sind gespiegelt für die andere Backe des Greifers. (Bildquelle: [18] ©2014 IEEE)	59
5.10	Objekte, die exploriert wurden, die korrespondierende Trajektorie des TCPs und die Verbindungstrecken zwischen Endpunkten (Ecken) (Bildquelle: [18] ©2014 IEEE)	60
5.11	Links: schematische Darstellung der Position und des Sichtfelds der Kameras; rechts: ein Blick der beiden Kameras auf einen Zylinder, der zwischen den Backen zentriert ist (Bildquelle: [15] ©2015 IEEE)	62
5.12	Überblick über den kaskadierten Regler mit den wichtigsten Hardware-Komponenten; der äußere Regler ergibt Geschwindigkeiten, welche an die Robotersteuerung weitergegeben werden, während der innere Regler die Kräfte und Momente am Eingabegerät darstellt.	63
5.13	Die MIDI-Eingabegeräte, welche sich am Bedienplatz des Operateurs befinden; die Zuordnung der Funktionalität zu Knöpfen und Fadern ist gekennzeichnet. Die Bewegungsmaske enthält einen Ein/Aus-Knopf, der für alle Freiheitsgrade gilt, sowie einen Knopf, der den Greifer aktiviert/deaktiviert. (Bildquelle: [15] ©2015 IEEE)	64
5.14	Die Experimente, welche von den Probanden durchgeführt wurden (Bildquelle: [15] ©2015 IEEE)	66
5.15	TLX-Fragebogen mit Boxplot-Darstellung für die einzelnen Dimensionen: Vorkenntnisse (VK), Geistige Anforderung (GA), Körperliche Anforderung (KA), Zeitliche Anforderung (ZA), Leistung (L), Anstrengung (A), Frustration (F) (Bildquelle: [15] ©2015 IEEE)	68
5.16	Zusatzfragen und Gesamtbewertung des TLX-Fragebogens: Vorkenntnisse (VK), Durchführbarkeit (D), Gesamtbewertungen TLX, Veränderung (VÄ), Verhalten in Exp. 1 bis 3 (Bildquelle: [15] ©2015 IEEE)	69
5.17	Boxplots für die Laufzeiten in Minuten und Länge der Roboterbahnen in Metern für Experimente 1, 2 und 3 (Bildquelle: [15] ©2015 IEEE)	71
6.1	Der End-Effektor, welcher für die Arbeit in diesem Kapitel konzipiert wurde, ist mit einem 3×16 Netz von LAMs ausgestattet. (Bildquelle: [16] ©2016 IEEE)	75
6.2	Unterschiedliche Ausrichtung des End-Effektors zur Referenzplatte für die Kalibrierung; der Winkel γ wird verwendet, um einen Überblendungsfaktor zwischen den Kalibrierungen zu bestimmen. (Bildquelle: [16] ©2016 IEEE) .	75

6.3	Links und Mitte: Kreise werden durch die Messungen gelegt, um die horizontale und die vertikale Krümmung der Hindernisfläche zu bestimmen. Rechts: Der Winkel δ wird mithilfe der Geraden g_v bestimmt und gibt die Inklination der Hindernisfläche zur Fläche des Sensorarrays an. (Bildquelle: [16] ©2016 IEEE)	77
6.4	Die vier charakteristischen Konfigurationen für den End-Effektor in einem Kollisionsvermeidungs-Szenario	78
6.5	Details zur Berechnung der Vektoren und der Winkel zur krümmungsbasierten Bewegung des End-Effektors	80
6.6	Eine spezielle Bewegung muss durchgeführt werden, wenn der End-Effektor weiter vom Hindernis entfernt ist als der Mittelpunkt p_c von c_m . (Bildquelle: [16] ©2016 IEEE)	82
6.7	Die Hindernisse, die zur Durchführung der Experimente verwendet wurden: eine Aluminium-Platte, eine gebogene Aluminium-Platte (“konkav” auf der Innenseite, “konvex” von außen) und eine Pressspanplatte (Bildquelle: [16] ©2016 IEEE)	83
6.8	Bahnen des TCPs für Experimente, in denen die Krümmungsschätzung verwendet wurde (Blau) und nicht verwendet wurde (Rot); der Zylinder ist maßstabsgetreu abgebildet. (Bilderquelle: [16] ©2016 IEEE)	84
6.9	Messdaten für die horizontalen und die vertikalen Radien für die Außenseite der gebogenen Aluminiumplatte (Bildquelle: [16] ©2016 IEEE)	85
6.10	Sequenz, in der der End-Effektor versucht, kollisionsfrei um eine Holzplatte zu navigieren (Bildquelle: [16] ©2016 IEEE)	86
7.1	Der Schichtenaufbau des Sensorelements, welcher durch Göger vorgeschlagen wurde	91
7.2	Der Schichtenaufbau des Sensorelements für den neuen TNS zusammen mit dem analogen Schalter zur Auswahl und Kombination der Elektroden	91
7.3	Der Sensor im selbst-kapazitiven Näherungsmodus mit einem leitenden Objekt; abgebildet sind auch die Signalquelle, der Schalter, der Messkanal (MK) und der Spannungsfolger.	91
7.4	Der Sensor im taktilen Modus	92
7.5	Der Sensor im beidseitig-kapazitiven Näherungsmodus	93
7.6	Brückenschaltung zur Kompensation von parasitären Kapazitäten im Näherungsmodus, inklusive der Messschaltung für den taktilen Modus sowie Schalte (1) und (2) zur Rekonfiguration des Systems (Bildquelle: [1] ©IEEE 2016)	94
7.7	Äquivalente Schaltung für den beidseitig-kapazitiven Näherungsmodus (Modus 3) mit einem Sender und einem Empfänger (Bildquelle: [1] ©IEEE 2016)	95

7.8	Der erste Prototyp, „TNS V2.0“, der das vorgestellte Sensorkonzept umsetzt; links: Vorderansicht mit den Schichten an Elektroden und Schaumstoff, welche das Sensorelement ausmachen; rechts: Rückseite des Moduls, auf der die digitale Elektronik realisiert ist. Die analoge Elektronik liegt auf der Innenseite der Platine und ist demnach verdeckt. (Bildquelle: [1] ©IEEE 2016)	96
7.9	Funktionsblöcke der analogen und digitalen Komponenten, welche verwendet werden, um die Signale zu messen, um den Operationsmodus des Sensors zu steuern und um ihn mit einem Bussystem zu verbinden (Bildquelle: [1] ©IEEE 2016)	96
7.10	Versuchsaufbau zur Validierung des Prototypen TNS V2.0	97
7.11	Messungen, welche die wichtigste Funktionalität des Sensors betreffen (Bildquelle: [1] ©IEEE 2016)	98
8.1	Die Hardware des TNS V3.1 und das Sensorelement mit 4×2 Deckelelektroden	99
8.2	Links: Zeitmessung für die Abtastung der Rohwerte; rechts: Zeitmessung für die Demodulation und Mittelwertbildung; es ergibt sich eine Gesamtzeit von 3,04 ms.	101
8.3	Kalibrierungswerte für TNS V1.0 und TNS V3.1 mit einer Aluminiumplatte; die Regressionen werden als durchgezogene Linien dargestellt.	102
8.4	Vergleich der Qualität der Messungen für die Summe der Werte von einzelnen Elektroden mit einer zusammengefassten Elektrode mit gleicher Gesamtfläche	104
8.5	Versuchsaufbau und Daten zur Validierung der taktilen Modalität von TNS V3.1	106
8.6	Detektion eines Kontakts anhand der Trendwende im taktilen Signal des TNS V1.0	107
8.7	Versuchsaufbau zur Evaluierung der Gradientenbestimmung im Sendemodus; die Messung einer Beispielkonfiguration wird in Hellblau dargestellt.	109
8.8	Verlauf der Signal-Paare im selbst-kapazitiven Modus für eine Änderung in den sechs Raumbfreiheitsgraden; der Betrag der Trajektorie des Roboters für den betreffenden Freiheitsgrad ist in Schwarz dargestellt. Die Wendepunkte kennzeichnen Durchgang der Robotertrajektorie durch die Nullposition. Es ist zu beachten, dass die Robotertrajektorien für X -Translation und die Y -Rotation skaliert wurden, damit der Verlauf gut erkennbar ist.	110
8.9	Links: Im aktuellen Sensorkonzept bleibt während der Messung einer Konfiguration die andere Konfiguration inaktiv. Das Feld, welches in diesem Beispiel dem grünen Bereich entspringt, erreicht ungehindert das Objekt und sorgt für eine Kopplung, obwohl das Objekt den grünen Bereich nur spärlich abdeckt. Rechts: Das Feld, welches dem hellblauen Bereich entspringt, verhindert teilweise die Kopplung mit dem Objekt durch den grünen Bereich, da die Spannung beider Sender gleich ist.	111
8.10	Versuchsaufbau zur Evaluierung der Gradientenbestimmung im Empfangsmodus	112

8.11	Signalverläufe mit abgezogenem Nullpunktversatz für Bewegungen entlang der translatorischen Freiheitsgrade, inklusive eines Signalverlaufs für die Y -Translation im selbst-kapazitiven Modus zum Vergleich (oben links) . . .	113
8.12	Signalverläufe mit abgezogenem Nullpunktversatz für Bewegungen in den rotatorischen Freiheitsgraden	115
8.13	Signalverläufe mit abgezogenem Nullpunktversatz für einen geerdeten Rundstab aus Aluminium	116
8.14	Von links nach rechts: Ausgangspose des Greifers, Vorderansicht der erreichten Pose und Seitenansicht der erreichten Pose; in allen Freiheitsgraden ist die Ausrichtung akkurat, bis auf die X -Rotation. Dieses Ergebnis deckt sich mit der Fähigkeit der TNS V3.1, Kontrast in den einzelnen Freiheitsgraden zu erkennen, wie in Abschnitt 8.4.1 ausgewertet.	117
8.15	Die Ausgangspose und erreichte Pose für den Rundstab in querer Lage; im zweiten Durchlauf (hier dargestellt) ist der Greifer etwas weiter geschlossen, um die Abweichung bezüglich der X -Rotation besser erfassen zu können (s. Tabelle 8.2).	118
9.1	Ein Konzept, in dem eine Ausstattung des Greifers und die Auskleidung des End-Effektors mit den neuen Sensoren gleichzeitig realisiert ist (Bildquelle: [16] ©2016 IEEE)	124

Tabellenverzeichnis

2.1 Materialien und ihre relative Permittivität (Auszug aus [9, Tabelle 3.1]) . . .	12
5.1 Gemessene Abweichungen für den Quader aus Metall	55
5.2 Gemessene Abweichungen für den Holzstab bei den unterschiedlichen Start- positionen	57
5.3 Gemessene Abweichungen für den Rundstab aus Aluminium (nicht geerdet) .	57
5.4 Differenz zwischen realem und gemessenem Abstand zwischen den Endpunkten der Objekte	61
5.5 HF und HFV für die drei Modi in Experiment 3	69
7.1 Abmaße der Probematerialien in mm^3	97
8.1 Abweichungen Versuch 1 (Stab ist aufrecht)	117
8.2 Abweichungen Versuch 2 (Stab ist quer)	118
8.3 Stand der Umsetzung der Anforderungen aus den Kapiteln 5 und 6	121

ANHANG A

Anhang 1

A.1 Fragebogen

Fragebogen zur Teleoperation mit haptischem Feedback¹

Teilnehmernummer:

Aufgabe

Die Aufgabe besteht aus den folgenden drei Experimenten:

- Ausrichtung an Objekten in der Ebene XY
- Ausrichtung am Objekt in der Ebene XZ
- Objektexploration im kartesischen Raum

Bei der Durchführung ist darauf zu achten, dass es nicht zu ungewollten Kontakten des Greifers oder des Roboters mit Objekten der Umwelt kommt, da dies Greifer und Roboter beschädigen könnte. Die Experimente werden in drei unterschiedlichen Szenarien durchgeführt:

1. Durchführung ohne haptisches Feedback
2. Durchführung mit haptischem Feedback für Translationsbewegungen und automatischem Rotationsausgleich
3. Durchführung mit haptischem Feedback für alle Bewegungen

Diese Szenarien sollen getrennt voneinander anhand dieses Fragebogens von den Teilnehmern bewertet werden.

Vorkenntnisse

Wie viele Vorkenntnisse haben Sie in den Bereichen Teleoperation, haptisches Feedback, CAD-Modellierung?

Keine																	Viele		

Welche Vorkenntnisse (auch aus anderen Bereichen) haben Ihnen bei der Erfüllung der Aufgabe genutzt?

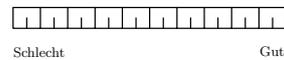
¹Haptisches Feedback bezeichnet die Kraftrückkopplung auf das Eingabegerät, durch die der Benutzer die Umgebung des Roboters erfahren kann. Hier wird haptisches Feedback dazu genutzt, um den Benutzer bei der Bewegung des Roboters zu unterstützen.

Feedback/Kritik/Anregungen

2 Durchführung mit haptischem Feedback für Translationsbewegungen und automatischem Rotationsausgleich

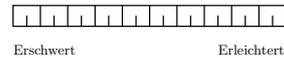
Durchführbarkeit

Wie gut kann die Aufgabe von Personen, die über keine Vorkenntnisse verfügen, mit haptischem Feedback für Translationsbewegungen und automatischem Rotationsausgleich durchgeführt werden?



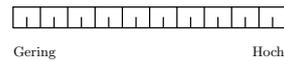
Veränderung

Wie hat sich das haptische Feedback auf die Lösung der Aufgaben ausgewirkt?

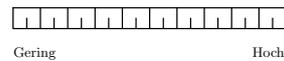


Verhalten

Entspricht das Verhalten des Systems bei Experiment 1 Ihren Erwartungen?

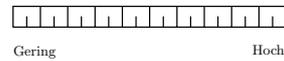


Entspricht das Verhalten des Systems bei Experiment 3 Ihren Erwartungen?



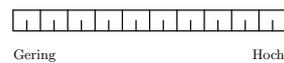
Geistige Anforderung

Wie viel geistige Anforderung war bei der Informationsaufnahme und bei der Informationsverarbeitung erforderlich (z.B. Denken, Entscheiden, Erinnern, Hinsehen, Suchen ...)? War die Aufgabe leicht oder anspruchsvoll, einfach oder komplex, erfordert sie hohe Genauigkeit oder ist sie fehlertolerant?



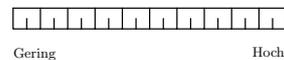
Körperliche Anforderung

Wie viel körperliche Aktivität war erforderlich (z.B. ziehen, drücken, drehen, steuern, aktivieren ...)? War die Aufgabe leicht oder schwer, einfach oder anstrengend, erholsam oder mühselig?



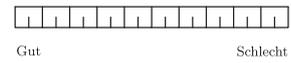
Zeitliche Anforderung

Wie viel Zeitdruck empfanden Sie hinsichtlich der Häufigkeit oder dem Takt mit dem die Aufgaben oder Aufgabenelemente auftraten? War die Aufgabe langsam und geruhsam oder schnell und hektisch?

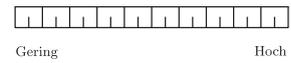


Leistung

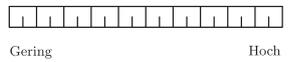
Wie erfolgreich haben Sie Ihrer Meinung nach die vom Versuchsleiter (oder Ihnen selbst) gesetzten Ziele (Anfahrt ans Objekt/Umgreifen/Greifvorgang) erreicht? Wie zufrieden waren Sie mit Ihrer Leistung bei der Verfolgung dieser Ziele?

**Anstrengung**

Wie hart mussten Sie arbeiten (geistig und körperlich), um Ihren Grad an Aufgabenerfüllung zu erreichen?

**Sicherheit**

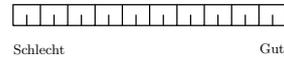
Wie sicher, bestätigt, zufrieden, entspannt und zufrieden mit sich selbst (versus unsicher, entmutigt, irritiert, gestresst und verärgert) fühlten Sie sich während der Aufgabe?



3 Durchführung mit haptischem Feedback für alle Bewegungen

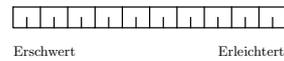
Durchführbarkeit

Wie gut kann die Aufgabe von Personen, die über keine Vorkenntnisse verfügen, mit haptischem Feedback für alle Bewegungen durchgeführt werden?



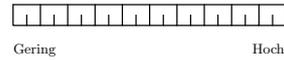
Veränderung

Wie hat sich das haptische Feedback auf die Lösung der Aufgabe ausgewirkt?

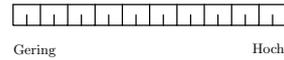


Verhalten

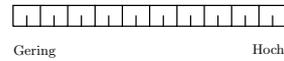
Entspricht das Verhalten des Systems bei Experiment 1 Ihren Erwartungen?



Entspricht das Verhalten des Systems bei Experiment 2 Ihren Erwartungen?

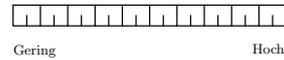


Entspricht das Verhalten des Systems bei Experiment 3 Ihren Erwartungen?



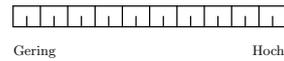
Geistige Anforderung

Wie viel geistige Anforderung war bei der Informationsaufnahme und bei der Informationsverarbeitung erforderlich (z.B. Denken, Entscheiden, Erinnern, Hinsehen, Suchen ...)? War die Aufgabe leicht oder anspruchsvoll, einfach oder komplex, erfordert sie hohe Genauigkeit oder ist sie fehlertolerant?



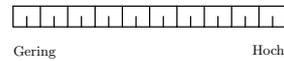
Körperliche Anforderung

Wie viel körperliche Aktivität war erforderlich (z.B. ziehen, drücken, drehen, steuern, aktivieren ...)? War die Aufgabe leicht oder schwer, einfach oder anstrengend, erholsam oder mühselig?



Zeitliche Anforderung

Wie viel Zeitdruck empfanden Sie hinsichtlich der Häufigkeit oder dem Takt mit dem die Aufgaben oder Aufgabenelemente auftraten? War die Aufgabe langsam und geruhsam oder schnell und hektisch?



Leistung

Wie erfolgreich haben Sie Ihrer Meinung nach die vom Versuchsleiter (oder Ihnen selbst) gesetzten Ziele (Anfahrt ans Objekt/Umgreifen/Greifvorgang) erreicht? Wie zufrieden waren Sie mit Ihrer Leistung bei der Verfolgung dieser Ziele?

Gut Schlecht

Anstrengung

Wie hart mussten Sie arbeiten (geistig und körperlich), um Ihren Grad an Aufgabenerfüllung zu erreichen?

Gering Hoch

Sicherheit

Wie sicher, bestätigt, zufrieden, entspannt und zufrieden mit sich selbst (versus unsicher, entmutigt, irritiert, gestresst und verärgert) fühlten Sie sich während der Aufgabe?

Gering Hoch