

Fachhochschule Bielefeld

Fakultät für Mathematik und Technik

Optimierung eines Datenhandschuhs,
insbesondere Erweiterung um eine Taktile Sensorik

Diplomarbeit

Bielefeld, den 12.09.2011

Vorgelegt von:	Gereon Büscher
geb. am:	08.12.1983
Studiengang:	Produktentwicklung
Erster Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Andreas Tenzler
Zweiter Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Rolf Naumann

1 Vorwort

Mit meiner Arbeit zum Thema Datenhandschuh möchte ich einen Beitrag zur interdisziplinären Forschung, kognitiv interaktiver Systeme leisten. Im Vordergrund steht dabei die Verfeinerung der Mensch-Maschine Schnittstelle "Datenhandschuh". Dieser soll neben der Handpositur auch taktile Ereignisse in einer guten Qualität aufnehmen.

Sie erfahren in dieser Arbeit, wie ich unter Anwendung, der im Studium gelernten Methoden, eine besondere Art des Kraftsensors entwickeln konnte. Auf dem Weg dorthin, werden Ihnen verschiedene Probleme der Mechanik, Elektrotechnik und Chemie beschrieben, sowie das Finden ideenreicher Lösungen. Behandelt wird so die Produktentwicklung eines "Taktilensorhandschuhs" mit Anspruch auf Vollständigkeit. Klar abgegrenzt ist die Thematik von der computertechnischen Einbindung (Interface und Verarbeitungssoftware) dieses "Eingabegerätes". Die Produktion eines Funktionsmusters (taktile Fingerling) findet einen Abschluss. Den Handschuh, mit seiner wesentlich höheren Komplexität, habe ich in der Theorie vollständig entwickelt, in der Praxis steht er kurz vor seiner Fertigstellung. So ist das Schnittmuster als auch Verfahren zur Vorbereitung textiler Sensoren und deren Montage positiv getestet. Der taktile Handschuh ist damit reif für die Produktion einer Kleinserie.

Danken möchte ich, den Mitarbeitern des CITEC, Dr. Robert Haschke und Alexandra Barchunova für das zukunfts-trächtige Thema, meinem Betreuer, Prof. Andreas Tenzler für sein freundliches Entgegenkommen und Unterstützen, meinem Supervisor, Carsten Schürmann, für seine viele Geduld, das Einbeziehen ins CITEC, sowie die leichte Führung für ein gut strukturiertes Arbeiten und meinen Freunden und Eltern, für die Arbeit, die sie in die Korrektur investiert haben.

1.1 Eidesstattliche Versicherung gem. § 29 Abs. 1 DPO

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und unter ausschließlicher Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst habe.

Büscher, Gereon

Mat.-Nr.:704626

12.09.2011

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	I
1.1	Eidesstattliche Versicherung gem. § 29 Abs. 1 DPO	I
2	Einleitung	1
2.1	Problemstellung	2
3	Vorgehensstrategie	4
3.1	Anforderungsliste	5
3.2	Projektplan	5
4	Stand der Technik	7
4.1	Handschuh Typen	7
4.1.1	Sayre Glove	7
4.1.2	MIT LED Glove	7
4.1.3	Digital Data Entry Glove	7
4.1.4	DataGlove	7
4.1.5	Dexterous HandMaster (DHM)	8
4.1.6	Power Glove	9
4.1.7	CyberGlove	9
4.1.8	Space Glove	9
4.2	Immersion Cyberglove II	10
4.3	Taktilsensor- Handschuh	11
4.3.1	X-IST Data Glove HR3	11
4.3.2	Pinch-Glove	11
4.3.3	Peregrine Glove	11
4.3.4	Sensitive-Fingertip (Glove)	12
4.4	Taktilsensoren	12
4.4.1	Hybrid Taktil Sensor	13
4.4.2	Ball-shaped umbonal Fibre	13
4.4.3	Capacitive Fiber-Mesh	13
4.4.4	Elektrorheological Fluid Sensor Array	14
4.4.5	Full-Body Tactile Sensor Suit	14
4.4.6	Tactile Distribution Sensor	14
4.5	Halb- / leitende Stoffe	15
4.5.1	EeonTex	15
4.5.2	Piezoresistenz	16
4.5.3	Statex	16

4.6	Material für Elektroden	17
4.6.1	Litze	17
4.6.2	Lahnfaden	17
4.6.3	Resistives Silicon	18
4.7	Analyse und Synthese der Recherche	18
5	Messsystem	19
5.1	Testmessung	19
5.2	Messverfahren	19
5.2.1	Messgegenstand	20
5.3	Messeinrichtung	23
5.4	Schwingungsdämpfung, Optimierung	28
5.4.1	Viskosedämpfer	28
5.4.2	Elektromagnetische Dämpfung	29
5.4.3	Wirbelstromdämpfer	29
5.5	Messobjekt und -Träger	31
5.6	Messwandler	32
5.6.1	Instrumentationsverstärker	38
5.7	Messdatenverarbeitung, LabView	41
5.8	Auswertung, Fehlerrechnung	44
5.8.1	Messergebnisse	47
5.8.2	Sensor Charakterisierung	48
6	Taktilensorik	50
6.1	Begriff: Taktile	50
6.2	Funktionsstruktur	52
6.2.1	Stoffproblematik	53
6.3	Force Sensing Resistor (FSR)	54
6.4	Morphologischer Kasten	54
6.4.1	Variante 3	55
6.4.2	Variante 2	56
6.4.3	Nähen	56
6.4.4	Stickautomat	58
6.4.5	Variante 4	59
6.4.6	Variante 5	60
6.4.7	Variante 1	61
6.4.8	Auswahl einer Variante	63
6.5	Montageverfahren, Sensor	63
6.6	Verfahren zum Ätzen	64
6.6.1	Arbeit auf Unterdruck	65

6.6.2	Peristaltikpumpe	67
6.6.3	Laugenpumpe	68
6.6.4	Treibschieberpumpe	69
6.7	Prototyp Fingerling	69
6.8	Trägerchassis	73
6.8.1	Schnittmuster	73
6.9	Sensorflächen Layout	75
6.10	Ätzmaske	76
6.11	Verkabelung	76
6.12	Schnittstelle	77
7	Resümee	80
8	Ausblick	80
9	Anhang	81

2 Einleitung

Der Datenhandschuh ist im weitesten Sinne ein Eingabegerät für 3-D Computer unterstützte Designsysteme. Im Englischsprachigen auch Dataglove, Cyberglove oder Wired Glove genannt. Erste Berichte finden sich über den sog. "Sayre Glove" von 1976. Dieser wurde nach der Idee von Rich Sayre, durch Thomas A. DeFanti (Computer Information Science) und Daniel J. Sandin (video and coputer art/research) an der University von Illinois Chicago entwickelt. Die Wissenschaftler arbeiteten gemeinsam an Video/Audio Synthesizern.[14] Der Sayre Glove wurde weniger zur computergestützten Aufzeichnung von Gestiken eingesetzt, viel mehr diente er als Alternative zu herkömmlichen Schiebereglern, mit denen Effektgeräte bedient werden können. Weitere Handschuhe und deren unterschiedliche Funktionsweisen sind im Abschnitt Stand der Technik (4, Seite 7 und folgende) beschrieben.



Abbildung 1: DeFanti, Sandin 1970er
Quelle: [14]

Die Optimierung eines Datenhandschuhs, insbesondere die Erweiterung um eine Taktilsensorik ist eine Aufgabenstellung des CITEC.¹

“Die CITEC Forschungsagenda orientiert sich an vier zentralen Forschungsbereichen, die jeweils auf Schlüsselfunktionen kognitiver interaktiver Systeme zielen: Bewegingsintelligenz, Systeme mit Aufmerksamkeit, situierte Kommunikation sowie Gedächtnis und Lernen.” [4]

Die Frage nach Optimierung ging unter anderem von Alexandra Barchunova aus. Ihre aktuelle Arbeit wird in dem Paper “Learning of Object Manipulation Operations from Continuous Multimodal Input” beschrieben [35].

Hierbei gilt es, Bewegungsabläufe wie z.B. das Aufdrehen einer Wasserflasche in ein Computersystem zu übertragen (modulieren und generieren von Daten durch diverse Eingabegeräte, unter anderem Datenhandschuh). Die Bewegungen werden danach so systematisiert, dass ein Skriptprogramm zur Steuerung einer Roboterhand die Systembauteile je nach äußeren Gegebenheiten strukturieren und anpassen kann. So werden Gegenstände z.B. ein Marmeladenglas visuell er-

¹“Der Exzellenzcluster Kognitive Interaktionstechnologie (CITEC) wurde an der Universität Bielefeld im November 2007 als einer von 37 Exzellenzclustern im Rahmen der deutschen Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder gegründet. Er ist eine von insgesamt elf zentralen wissenschaftlichen Einrichtungen der Universität Bielefeld. Den Zielen der Exzellenzinitiative zur Entwicklung nachhaltiger Strukturen für die Forschung entsprechend, stellt CITEC die organisatorische Struktur für den strategischen Forschungsschwerpunkt Interaktive Intelligente Systeme an der Universität Bielefeld dar. In dieser Rolle bietet CITEC ein gemeinsames Dach für die Arbeitsgruppen des Forschungsinstituts für Kognition und Robotik (CoR-Lab) und des DFG-Sonderforschungsbereiches 673 Alignment in Communication.” [4]

kannt, und der Bewegungsablauf auf den größeren Deckel umgerechnet. Es wäre auch möglich, dem Skriptprogramm das Erlernen der Bewegung selbst zu überlassen, nur würde dies sehr viel Zeit in Anspruch nehmen und ein Erfolg wäre nicht garantiert. Das Erlernen durch Nachahmen ist hier die sinnvolle Alternative.

Um einen Anhaltspunkt für die auftretenden Kräfte zu geben, sind die Datenhandschuhe mit Drucksensoren ausgestattet. Die Roboterhand ist ebenfalls mit Drucksensoren ausgerüstet, so kann hier ein Abgleich der Werte stattfinden. Prinzipiell ist das Programm in der Lage, die benötigten Kräfte selbst zu ermitteln, dafür kann es sich unter anderem einem Skript zur Rutscherkennung bedienen. Die übertragenen Anhaltspunkte sind dennoch eine sinnvolle Unterstützung.

Der Datenhandschuh, der zur Verwendung kommt, heißt Cyberglove II und ist ein Produkt der Firma Immersion. (Eine weitere Beschreibung findet sich im Abschnitt 4.2, Seite 10). Dieser ist dahingehend modifiziert, zu den Beugungen der Finger auch die Kräfte, die durch den Druck der Fingerspitzen auftreten, aufzunehmen (Taktilität). Aktuell geschieht die Kraftaufnahme durch FSR's (Force Sensing Resistors). Diese sind auf jeweils eine Fingerspitze appliziert. Des Weiteren wird für eine bessere Funktion die auftretende Kraft durch eine Moosgummiplatte über den Sensor verteilt. Für einen besseren Halt des Sensors auf der Fingerkuppe ist diese noch einmal mit einem Fingerling geschützt. Den Aufbau zeigt auch Abbildung 2. Fotos (52, 53) sind im Anhang auf Seite 81 zu sehen.

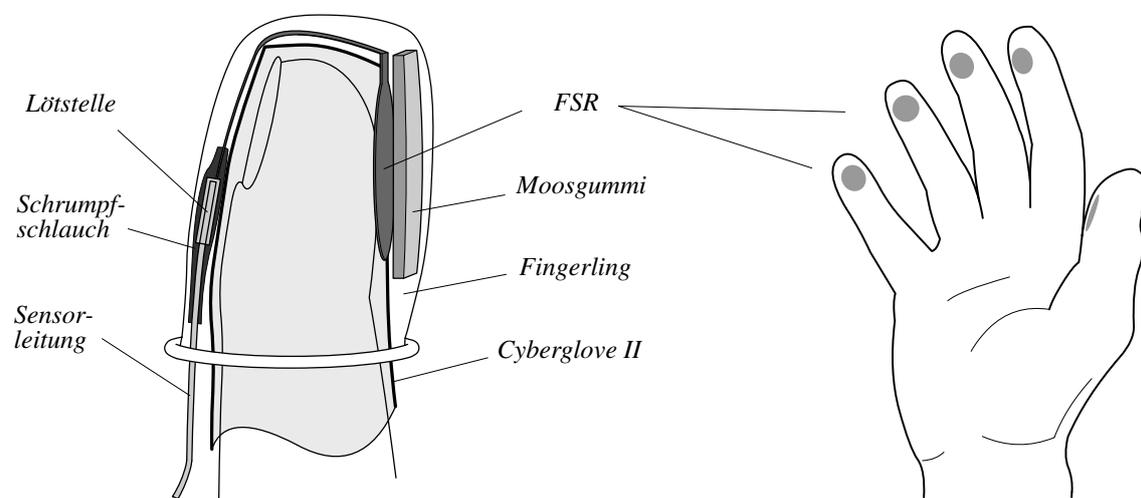


Abbildung 2: Integration des herkömmlichen Taktilsensors [GeBü]

2.1 Problemstellung

Das Hauptproblem bei der Arbeit mit dem modifizierten Datenhandschuh ist das Verrutschen (Wegdrehen) der Taktilsensoren. Durch die relativ kleine Sensorfläche führt dies schnell zu feh-

lerhaften Messungen. Begünstigt wird das Wegrutschen durch den losen Sitz des Handschuhs auf kleineren Händen und den darunter getragenen seidenähnlich glatten Unterziehhandschuh. Ein weiteres Problem ist die lose Verkabelung, die bis zu einer Auswertebox an den Oberarm führt (Foto 52 Seite 81). Die filigranen Lötstellen fordern zu ständiger Vorsicht bei der Handhabung auf, was mit dazu führt, dass das An- und Ablegen der gesamten Cyberglovemontur mehrere Minuten dauern kann und im Alleingang fast unmöglich ist. Gute Ergebnisse liefern die FSR-Sensoren bei dem Erstkontakt. Diese sehr kleine Kraft $< 0,01N$ ist für die Datenmodellierung sehr wichtig. Ergänzt wird diese sensorische Feinheit durch Körperschallsensoren, die unterschiedlichen Testobjekten angeheftet wurden.

Neben dem Beheben des Hauptproblems stehen noch Wünsche, wie das Erweitern der Sensorfläche, Erhöhen des taktilen Durchgangs (bleibendes Fingerspitzengefühl durch den Handschuh), besseres Abführen der Stauwärme und eine elegante Lösung für die Verkabelung.

Festgehalten sind die Pflichten und Wünsche an die Taktilsensorik in einer Anforderungsliste (54), einzusehen im Anhang Seite 85.

Als Referenz zur Entwicklung der Taktilsensoren wurde der Sensitive-Fingertip (Glove) gegeben. Darüber mehr, auf Seite 12 Abschnitt 4.3.4.

Die Strategie, mit der in dieser Arbeit an die Problemstellung herangegangen wird und zu einer praktikablen Lösung führen soll, ist im nachfolgendem Abschnitt dargestellt.

3 Vorgehensstrategie

In dieser Arbeit werden Methoden der Produktentwicklung aus dem Schrifttum des Vereins deutscher Ingenieure angewandt (VDI-2212, VDI-2222). Zu Beginn wurde die Richtlinie dazu ins Gedächtnis gerufen und auf anwendbare Verfahren hin untersucht.

Da die Diplomarbeit in voller Selbständigkeit zu erledigen obligatorische Bedingung ist, kann nur auf einige wenige Methoden der Ideenfindung zurückgegriffen werden. Auf den strukturell vorgegebenen Ablauf der Produktentwicklung wie seine übergeordnete Systemtechnik als interdisziplinäre Problemlösungsmethodik für künstliche Systeme kann hingegen gut und iterativ zurückgegriffen werden.

Die Produktentwicklung gliedert sich dabei in folgende Schritte:
Nach [36].

1. "Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung"
2. "Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen"
3. "Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen"
4. "Gliedern in realisierbare Module"
5. "Gestalten der maßgebenden Module"
6. "Gestalten des gesamten Produkts"
7. "Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben"

Beginnend mit Punkt 1. stellen sich ein paar Fragen, die hier bereits in der Einleitung grob beantwortet werden.

Was ist ein Datenhandschuh, was eine Taktilensorik, was müssen diese leisten, und für welchen Zweck? Um diese Fragen zu beantworten, wurden zunächst Personen akquiriert, die unmittelbar mit dem Handschuh arbeiten und an einem optimierten Modell mit gut funktionierender Taktilensorik interessiert sind. Als Grundlage dazu wurde ein Fragebogen erstellt, mit dessen Hilfe eine weite Übersicht aller erdenklichen Eigenschaften und Anforderungen geschaffen werden kann. Dabei werden bewusst auch weniger realistisch, aber zukünftig denkbare Eigenschaften und Anwendungen abgefragt. So sollen die Grenzen der Sichtweise des Befragten auf die Problematik erweitert werden. Durch eine sehr detaillierte Aufschlüsselung der Anforderung soll es später einfacher werden, Lösungen zu finden. Denn oft ist die Lösung bereits in der Fragestellung des Problems enthalten.

Ein weiter Vorteil der weit gefassten Befragung ist, die Entwicklung auch für zukünftige Anforderungen vorzubereiten, so dass bspw. Schnittstellen offen bleiben sollten. Der Fragebogen, der

zur Verwendung kam, ist im Anhang auf Seite 81 ff zu finden. Ursprünglich war angedacht den Fragebogen auch an anderen Hochschulen ausfüllen zu lassen, wegen des hohen Zeitbedarfs der Auswertung wurde davon jedoch abgesehen.

Ergebnisse aus der Befragung flossen mit in die Anforderungsliste (Seite 85) ein.

3.1 Anforderungsliste

Die Anforderungsliste stellt wichtige Anhaltspunkte dar, deren Werte den Rahmen der Entwicklung bilden. Über die Zeit werden immer wieder Aktualisierungen an dieser Liste vorgenommen. Zum einen von der Entwicklung selbst, zum anderen von außen. Das macht es schwierig, den gesamten Aufwand der Arbeit abzuschätzen (Projektplan Erstellung).

Ein früher Zwischenschritt der Entwicklung ist ein Brainstorming vor der Marktrecherche. Inspiriert von den Ergebnissen der Befragung lassen sich so viele Ideen sammeln, unvoreingenommen von existierenden Lösungen.

Die anschließende gründliche Recherche gilt dann als Ergänzung für ein umfassendes Bild der Datenhandschuhe und derer Umgebung (Einsatz). Rechercheergebnisse sind im Abschnitt 4, Seite 7 ff dargelegt.

Die Recherche hat auch den Zweck, eventuelle Doppelentwicklungen zu vermeiden (das Rad neu zu erfinden). Zudem ist es nur mit einem umfassenden Bild möglich, eine Neukonstruktion in den Stand der Technik einzuordnen und ihren Nutzen herauszustellen zu können.

Die Recherche umfasst neben den Datenhandschuhen auch Taktill- und weitere Sensoren (und deren Funktionsprinzipie). Im Laufe der Entwicklung wurde sie noch um einen Materialfundus erweitert (da seien erwähnt; piezoresistive Stoffe, leitende Silikone etc.).

3.2 Projektplan

Der Projektplan bildet das Gerüst, in dem der zeitliche Ablauf der Arbeitsschritte und Meilensteine festgelegt sind. Bei guter Strukturierung sorgt er für eine gleichmäßige Arbeitsverteilung und gibt Obacht über den Fortschritt. Tauchen unvorhergesehen Probleme auf, kann die Auswirkung anhand des Projektplans besser eingeschätzt werden und eventuell frühzeitige Umstrukturierungen stattfinden. Zu sehen ist der zugehörige Plan im Anhang auf Seite 85.

Da in dieser Arbeit Sensoren entwickelt werden, ist der Funktionstest der Sensoren ein fester und die Zeit über begleitender Bestandteil. Wie in der Einleitung erwähnt, steht als Referenz der Sensitive-Fingertip Glove. (Funktionsbeschreibung, Seite 12 Abschnitt 4.3.4). Dieser weist eine

elastische dünne Sensorfläche auf, die es möglich macht, einen solchen Taktil-Handschuh unter dem Cyberglove II zu tragen. Der Funktionstest der Sensoren beinhaltet sodann die Messung des Sensorwertes (einen unter Druck bzw. Kraft veränderlichen Widerstand). Die "Messung eines elastischen Sensors" ist nicht trivial, besonders dann, wenn die Messung repräsentativ nutzbar sein soll. (Ein elastischer Sensor könnte bei einfach aufgebauter Messung brauchbare Ergebnisse produzieren, im realen Gebrauch bspw. auf einer gewölbten Fingerkuppe jedoch versagen.) Daher wurde frühzeitig parallel zu der Entwicklung des Sensors ein Prüfverfahren (Messsystem) entwickelt. Beide Entwicklungen fließen so zusammen, dass eine Materialkombination für den Sensor erst auf einfache schnelle Weise und nach deren Erfolg auf komplexe Weise geprüft wird. Verläuft diese Prüfung ebenfalls positiv, kann das Trägerchassis auf den Sensor angepasst werden. Das korrekte Messen ist obligatorischer Bestandteil einer logisch strukturierten Sensorentwicklung. Das Messsystem und der Weg seiner Entstehung sind in Abschnitt 5 Seite 19 und folgende veranschaulicht.

Der Weg zur Taktilsensorik und seine Einbindung in ein Trägerchassis sind dem anschließend expliziert. (Abschnitt 6, Seite 50 ff)

Die Problembehandlung in systemtechnischem Vorgehen verbildlicht sich auf den Punkt gebracht in Abbildung 56, Seite 86. Zu sehen ist, wie iterativ das Schema zur Erfüllung der gestellten Gesamtanforderung angewendet wurde.

- Problemanalyse
- Problemformulierung
- Systemsynthese
- Systemanalyse
- Beurteilung
- Entscheidung.

Bei nicht erfüllen der Gesamtanforderung erneuter Durchlauf.

Ein Überblick der auf dem Markt vorhandenen Datenhandschuhe folgt auf den nächsten Seiten.

4 Stand der Technik

In den folgenden Unterabschnitten wird ein chronologisch geordneter Überblick der bedeutendsten Datenhandschuhe gegeben.

Als übersetzte und zusammengefasste Quelle (von 4.1.1 bis 4.1.8) steht dabei Ausgabe 14-1-6 der Fachzeitschrift IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) Computer Graphics & Applications [17].

4.1 Handschuh Typen

4.1.1 Sayre Glove

Die Funktion des Sayre Glove beinhaltet die Messung der Beugung aller fünf Finger (je ein Wert). Die Biegesensoren, die auf dem Rücken eines Handschuhs angebracht sind, bestehen aus dünnen Röhren, die an einer Seite mit einer Lichtquelle und an der anderen mit einem Fotosensor versehen sind. Durch Beugen des Fingers und damit des Lichtleiters kann ein Intensitätsabfall gemessen werden, der als veränderbarer Widerstand ausgelesen wird.

4.1.2 MIT LED Glove

Der in den frühen 80er Jahren im Media Lab des Massachusetts Institute of Technology entwickelte Datenhandschuh wurde genutzt, um in Echtzeit Bewegungen aufzunehmen (Motion Capturing). Dabei wurden Position der Hand und Winkel der Finger aufgelöst. Seine Funktion basiert auf einem Kamerasystem, welches auf den Handschuh fokussiert wird. Der Handschuh ist mit LED's bestückt, um für die Auswertung kontrastreiche Punkte zu erzeugen. Die Technologie war noch nicht weit genug entwickelt, um den Handschuh als effektives Eingabegerät nutzen zu können.

4.1.3 Digital Data Entry Glove

1983 wurde von Gary Grimes an den Bell Telephone Laboratories ein Handschuh speziell für die Dateneingabe über alphabetische Handzeichen entwickelt. Dieser textile Handschuh war bereits mit zahlreichen Berührungs-, Biege- und Trägheitssensoren ausgestattet. Der für Taube entwickelte Handschuh konnte 80 verschiedene Kombinationen aus der Gestik einer Hand ableiten, wurde allerdings nie kommerziell verbreitet.

4.1.4 DataGlove

Eine klare Verbesserung stellte der DataGlove dar, dieser wurde 1987 unter Leitung von Thomas Zimmerman entwickelt. Er konnte die Bewegungen von zehn Fingergelenken und sechs Freiheitsgraden der Hand aufnehmen, und war dabei schneller als die Kamera basierten Systeme. Zudem hatte er ein im Vergleich geringes Gewicht und war angenehm zu tragen.

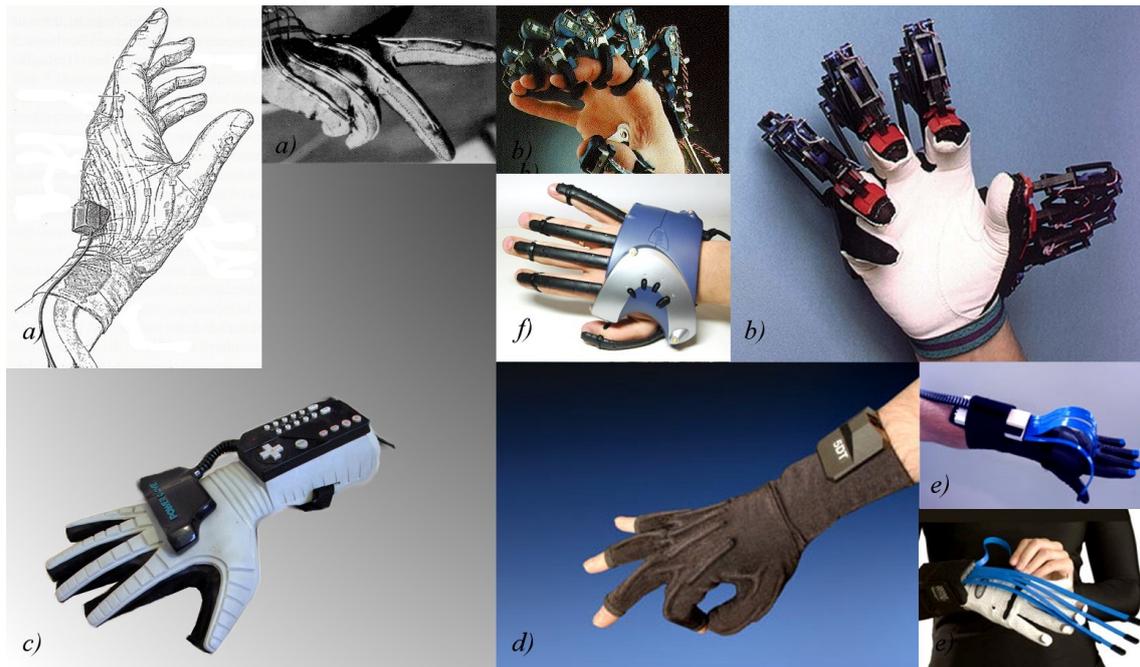


Abbildung 3: Collage; a) Entry Glove, b) Dexterous HandMaster, c) Power Glove, d) 5DT Glove, e) ShapeHand, f) P5 Glove. Quelle: [33], [15]

Der DataGlove wurde als erster im größerem Maßstab vermarktet (von VPL Research). Aufgenommen wurde die Fingerbiegung über einen Intensitätsabfall im Lichtleiter (ähnlich dem Sayre Glove nur mit Fasern). Gemessen wurde jeweils die Biegung der unteren beiden Fingergelenke und zweier Daumengelenke (mit Auflösungen von ca. 5° bei 30 Hz). Über einen Prozessor wurden die Werte für jeden Nutzer durch Prekallibratoren angepasst. Position und Orientierung wurden über ein Elektromagnetisches Trackersystem aufgenommen.

4.1.5 Dexterous HandMaster (DHM)

Dieser Handschuh wurde ursprünglich für die Steuerung der Utha/MIT Dexterous Roboterhand von Arthur D. Little und Sarcos entwickelt. Später wurde er von der Firma Exos re-designed und vermarktet. Der DHM misst über Hall Effekt Sensoren, die in ein Exoskelett integriert sind, drei Gelenke pro Finger aus und zwischen den Fingern die Spreizung. Auch die Winkelstellung des Daumens wird exakt wiedergegeben (bei den meisten Handschuhen ein Manko). Die generierten Analogwerte werden über ein zugehöriges A/D Board mit bis zu 200Hz digitalisiert. Wegen seiner hohen Auflösung (ca. 1°) wurde er auch für klinische Studien für Handprothesen eingesetzt. Durch das Metallexoskelett ist er relativ schwer, baut groß aus, und ist nicht für schnelle Bewegungen geeignet.

4.1.6 Power Glove

Der sog. Power Glove ist eine kostengünstige Entwicklung der Firma Mattel und kam 1989 für die Nintendo Konsole auf den Markt. Der Handschuh ist auf der Rückseite mit in Kunststoff gegossenen resistiven Biegesensoren ausgestattet. Die Sensoren nehmen die Biegung über den gesamten Finger bzw. des Daumens auf. Position und Orientierung werden per Ultraschall mit Sensoren, die am Monitor zu befestigen sind, ermittelt. Entwickelt wurde der Power Glove für Videospiele, die Vermarktung lief allerdings nach zwei bis drei Jahren aus. Durch einen Umbau wird er heute noch viel für Midi- Eingabe in diverse Geräte verwendet (Synthesizer, PC, etc.). Der Power Glove ist nicht sonderlich komfortabel, liefert aber zuverlässig ein grobes Abbild der Handpositur und -position.

4.1.7 CyberGlove

James Kramer entwickelte den CyberGlove an der Stanford University als Teil seiner Arbeit zur Übersetzung von Zeichensprache in verbale Sprache. Hierbei handelt es sich um einen Stoffhandschuh, der mit bis zu 22 Dünnschichten Biegesensoren ausgestattet ist. Die Analogwerte werden über eine kleine Box am Handgelenk konvertiert und über den seriellen Port zum Computer übertragen. Bei Bedarf kann ein 3-Space Tracker auf dem Handrücken montiert werden, um die Position im Raum aufzunehmen. Experimente haben gezeigt, dass der CyberGlove stabile Biegungen bis 1° auflösen kann. Vertrieben wurde er von der Firma Virtual technologies. Durch die Dünnschichtsensoren ist er komfortabel und sehr beweglich.

4.1.8 Space Glove

Der 1991 bei W. Industries entwickelte Handschuh ist nach dem Power Glove ebenfalls eine Entwicklung für den Unterhaltungsbereich. Er hat in weichen Kunststoff gegossene Sensoren (einen pro Finger, zwei für den Daumen). Angebunden sind die Sensoren über einzelne Ringe mit den Fingern. Die Auswerteelektronik wird mit einer Lasche auf dem Handrücken fixiert. Position und Orientierung werden von einem elektromagnetischen Tracker aufgezeichnet. Durch die eingegossenen Biegesensoren ist er eher unkomfortabel, wegen der Steifheit ist es schwer die Finger zu beugen.

Nach [15] sind noch zu erwähnen:

5DT Glove Dieser um 1998 erschienene Handschuh, ist speziell für den Einsatz in der Umgebung eines Kernspintomografen entwickelt. Bis zu der Auswertebox sind alle Leitungen und Sensoren faseroptisch.

Rutgers Master II-ND ist ein Handschuh, der eine Kraftrückmeldung (Force Feedback) geben kann. Dazu sind auf der Handinnenseite kleine Pneumatikzylinder arrangiert, die zu den Fingerspitzen führen.

P5 Glove (2002) ist ein kostengünstiges Eingabegerät ähnlich dem Space Glove. Allerdings ist dieser für alle Betriebssysteme geeignet.

IBDG (Image-Based Data Glove, 2008) ist ein Prototyp, der die Fingerspitzen visuell über Marker dedektiert. Besonderheit ist, dass die Kamera auf der Innenseite des Unterarms befestigt wird.

ShapeHand (2009) ist ein Modell aus zwei Bestandteilen. Ein Handschuh und eine Sensorelektronik (nebeneinander angeordnete Biegesensorstreifen, die in die Finger des Handschuhs zu schieben sind). Zur Posituraufnahme ist er mit 40 Sensoren ausgestattet.

4.2 Immersion Cyberglove II

Der im CITEC zur Verwendung kommende Datenhandschuh ist eine Weiterentwicklung des Cyberglove von James Kramer. Von seinem Vorgänger hebt er sich durch eine kabellose Anbindung (Bluetooth) ab. Der Handschuh besteht aus bi-elastischem Stoff (Lycra), in den mit Taschen die Foliensensoren eingenäht sind. Zur Aufnahme der Fingerspreizung sind die Sensoren aufrecht zwischen den Knöcheln adaptiert. Seit Dezember 2005 wird der Immersion Cyberglove II für ca. 12.500 € angeboten.

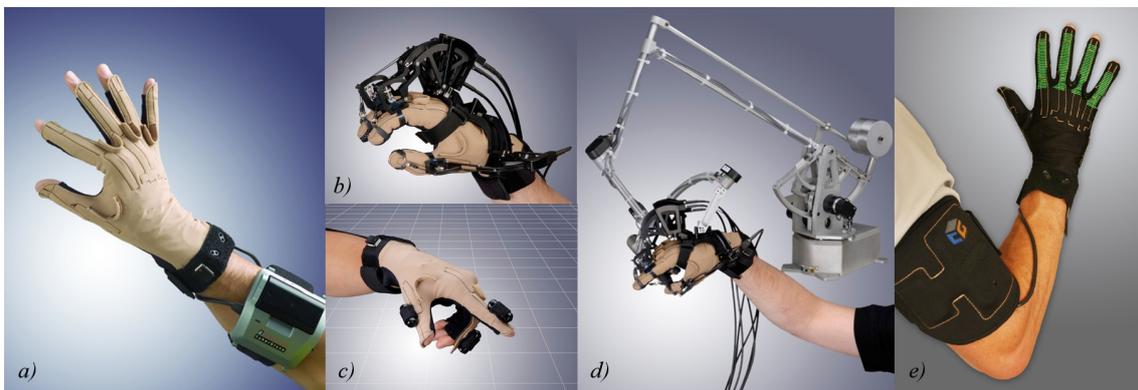


Abbildung 4: Collage; CyberGloveSystems a) CyberGlove II, b) CyberGrasp, c) CyberTouch, d) CyberGlove III, e) CyberForce. Quelle: [12]

Optional lässt sich eine Force Feedback Apparatur “CyberGrasp” über den Cyberglove II montieren. Sie wird über Bowdenzüge gesteuert und baut auf der Handrückseite recht groß auf.

Seit kurzem ist auf dem Internetauftritt der Herstellerfirma (CyberGlove Systems, ehemals Partner von Immersion) [23] der Cyberglove III zu sehen. Verbesserungen bietet dieser laut Werbeartikel in Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Biegesensorwerte. Zudem wurde die Elektronik verkleinert und an den Oberarm verlegt. Die Reichweite wurde erhöht und die Möglichkeit, Daten zwischen zu speichern, wird nun gegeben.

4.3 Taktile Sensor- Handschuh

Ebenfalls von CyberGlove Systems wird ein Takttilhandschuh (CyberTouch) angeboten. Hierbei handelt es sich um den CyberGlove II, der um Vibratoren auf der Fingerrückseite erweitert wurde (keine Taktile Sensoren). Siehe auch Abbildung 4.

4.3.1 X-IST Data Glove HR3

Bei den X-IST Datenhandschuhen der Firma NO DNA handelt es sich um Eingabegeräte, die über den Midi Port angeschlossen werden. Für eine genaue Beurteilung (Testberichte sind bisher nicht zu finden) müsste man eines der Produkte erwerben und testen. Auf den Abbildungen ist bereits zu erkennen, dass es sich um Umbauten industrieller nahtlos-Mikrostrickhandschuhe handelt. Diese weisen eine gute Passform und Tragekomfort auf, sind allerdings verhältnismäßig dick und dadurch warm. Das günstigste Testmuster mit fünf Taktile Sensoren (keine Biegesensoren) hätte umgerechnet 2.250 € gekostet. Das Premiummodell weist 15 Biegesensoren und ebenfalls 5 Taktile Sensoren auf.



Abbildung 5: Collage; a) X-IST, b) Pinch-Glove c) Peregrine. Quelle: [15], [3]

4.3.2 Pinch-Glove

Dieser Handschuh besitzt ebenfalls 5 Taktile Sensoren an den Fingerspitzen. Er ist aus einem Studentenprojekt hervorgegangen und wurde “kurzzeitig für ca. 1.300 € (paarweise) vermarktet” [28]. Bei den Sensoren handelt es sich wie bei der CITEC eigenen Erweiterung (2) um FSR’s. Als Trägergerüst dient ein Fahrradhandschuh mit kurzen Fingern. Die FSR’s wurden in abgetrennte Stoffhandschuhfingerspitzen integriert und schließlich mit dem Trägerhandschuh vernäht. Die Eigenschaften und Eigenheiten des Pinch-Glove gleichen sich durch die FSR’s wahrscheinlich mit denen des erweiterten CITEC Systems. [25]

4.3.3 Peregrine Glove

Der Peregrine Dataglove wurde entwickelt als Ersatz zur Tastatur. An den Fingern läuft ein feiner Widerstandsdraht entlang (in Schleifen, an der Flanke hin und auf der Innenseite zurück). Der Daumen hat an seiner Spitze eine Elektrode, die den “Schleifkontakt” bildet. Das Prinzip hinter

diesem Handschuh ist, dass ein Potentialvergleich zwischen den Schleifenenden und dem Schleifkontakt stattfindet (in der Auswerteelektronik auf dem Handrücken). So kann die Position des Daumens bei Kontakt mit der Schleife errechnet werden. Um den Handschuh als Tastatur nutzen zu können, sind bestimmte Bereiche der Schleife als Tasten festgelegt. Druckunterschiede kann der Handschuh nicht wahrnehmen.

4.3.4 Sensitive-Fingertip (Glove)

Hierbei handelt es sich um einen komplett aus Stoff gefertigten Takttilhandschuh (Abbildung 6). Kommerziell ist er nicht zu erwerben, allerdings gibt es eine Anleitung zum Eigenbau [10].

Der Handschuh besitzt 5 Sensoren, je einen pro Fingerspitze. Die Sensoren bestehen aus piezoresistivem Stoff (EeonTex), der über zwei Elektroden (Kupfergewebestreifen) angenäht ist. Auf Druck ändert sich der Widerstand in dem Stoff, abgenommen von den Elektroden wird dieser von einer externen Elektronik (Arduino²) ausgewertet. Das Trägergerüst ist aus feiner Baumwolle gefertigt, die Leitungen sind zur sicheren Führung mit einem Stoffstreifen übernäht. Als Schnittstelle zwischen Handschuh und Auswerteelektronik dienen 6 handelsübliche Metalldruckknöpfe, die auf dem Handrücken appliziert sind.



Abbildung 6: Sensitive-fingertip (Glove) Quelle: [10]

4.4 Takttilsensoren

Die Quelle IEEE, aus der über die Handschuhe zitiert wurde, war ein Zufallstreffer während der wiederholten Durcharbeit von Quellen der Internetrecherche. Auffällig wurde die Quelle auf der Seite [15] da dort bei den älteren Handschuhen wiederum vielfach auf IEEE berufen wurde.

Leider hat sich diese Quelle erst recht spät im Verlauf dieser Arbeit ergeben, denn es wird dort eine Fülle an Informationen bereitgestellt. Richtig ausfindig zu machen und einzusehen sind die Artikel des IEEE allerdings nur gegen Rechnung, oder über einen Terminal der Fachhochschulbibliothek hinter verschachtelten Linkstrukturen.

²Arduino ist eine kostengünstige programmierbare Steuerplattform. Für diese gibt es bereits eine große Nutzergruppe, die ihre Projekte teilweise rege in der Öffentlichkeit des Internets diskutieren. Zumeist sind auf den verschiedenen Modellvarianten ein Mikrokontroller und mehrere Ein-/ Ausgänge integriert

4.4.1 Hybrid Taktile Sensor

Dieser vereint die Funktionsweise eines resistivem Touchpads mit der Flexibilität eines Taktilensensors. Dabei bilden quer verschränkt übereinander liegenden Elektroden (Streifen) die Sensorebene. Sie bestehen aus elastischem halbleitendem Material. Getestet wurden in der Arbeit leitende Stoffe und Elastratomere, sowie Folien. Quelle:[9]

4.4.2 Ball-shaped umbonal Fibre

Dies ist ein Sensor, gewebt aus Spezialfäden. Ein Gewebe besteht aus Schuss- und Kettfäden, die im 90° Winkel ineinander gewebt sind. Die Schussfäden sind Hohlfaserleitungen, die mit Gold und einem Isolator beschichtet sind. Zudem sind die Hohlfasern mit kleinen Ausbeulungen (Bällen) versehen, die im Gewebe als Zug- Sensor dienen sollen (kapazitiv). Die Kettfäden bestehen aus Kupferdraht. Zwischen Kett- und Schussfäden wird ebenfalls die Kapazität gemessen, woraus schließlich die Druckkraft berechnet wird, die auf die sich verformenden Bälle wirkt. Zwischen den sich kreuzenden Sensorpunkten ist zur Isolation normales nichtleitendes Garn verwebt. Quelle:[12] Siehe auch Abbildung 7.

4.4.3 Capacitive Fiber-Mesh

Bei dieser Entwicklung handelt es sich um Sensoren für den Einsatz in E-Textilien (Kleidung mit integrierter Steuerelektronik für z.B. Audioplayer). Der Sensor arbeitet durch eine kapazitiv-/resistive Änderung, die bei dem Kurzschluss zweier Sensorelektroden über die Haut des Fingers geschieht. Die Elektroden sind in Jacquard-Technik (Webverfahren) in den Stoff integriert. Quelle:[29]

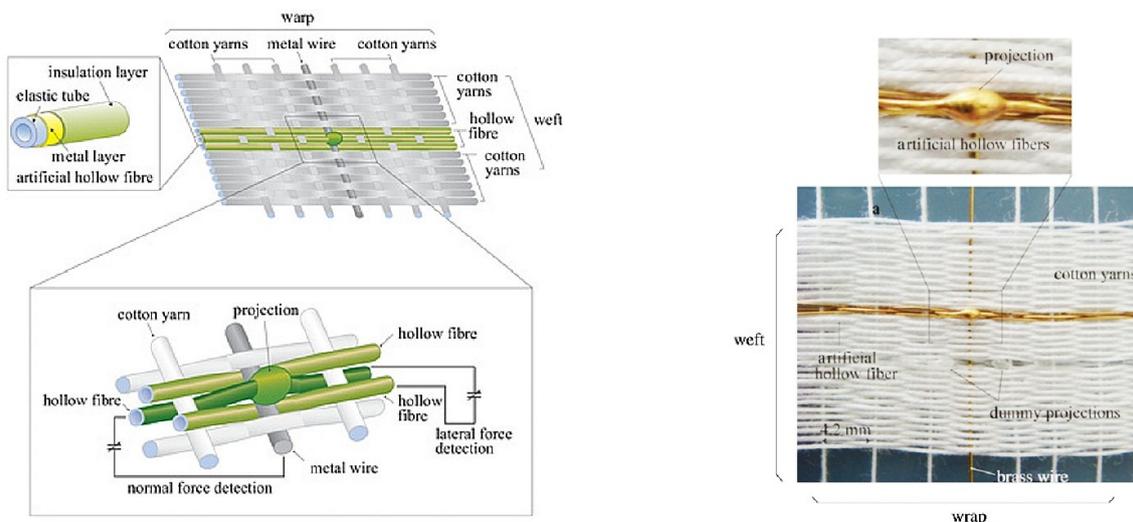


Abbildung 7: Ball-shaped umbonal fibre, Quelle: [12]

4.4.4 Elektrorheological Fluid Sensor Array

In diesem Paper wird ein taktiles Array beschrieben, welches eine Widerstandsänderung zwischen leitendem Silikongummi, einer halbleitenden Trennschicht (Flüssigkristall basiertes electrorheologisches Fluid) und Aluminiumelektroden aufnimmt. Besonderheit ist dabei die weich-elastische Oberfläche (hautähnlich) des Sensors. Durch das verwendete Substrat aus Acrylglas ist der Sensor insgesamt allerdings nur wenig flexibel. Quelle: [26]

4.4.5 Full-Body Tactile Sensor Suit

Dieser ist eine japanische Entwicklung, die Humanoid-Roboter mit über den ganzen Körper verteilten Taktile Sensoren ausstatten soll. In einem speziellen Anzug wurden dazu 192 Sensoren integriert, die eine binäre Rückmeldung (Kontakt- ja oder nein, kein Kraftspektrum) über Körperkontakt geben können. Aufgebaut sind die Sensoren aus sechs Lagen. Die innerste und äußerste Lage (normaler Stoff) dienen der Isolation zur Umgebung. Die Sensorfunktion wird aus zwei Elektroden-Lagen (leitender Stoff) gebildet, die durch eine Abstandshalterebene (Netz) getrennt sind. Die verbleibende Lage bildet die Verdrahtung der Sensoren zu einer Auswerteelektronik. Der Full-Body Suit ist flexibel, im weiteren Sinne aber nicht elastisch. Quelle:[18]

Abbildung 8 Zeigt den Aufbau des Sensors, der äußerlich viel Ähnlichkeit mit dem in dieser Arbeit entwickelten Sensor zeigt. Die Funktion unterscheidet sich aber vielfach.

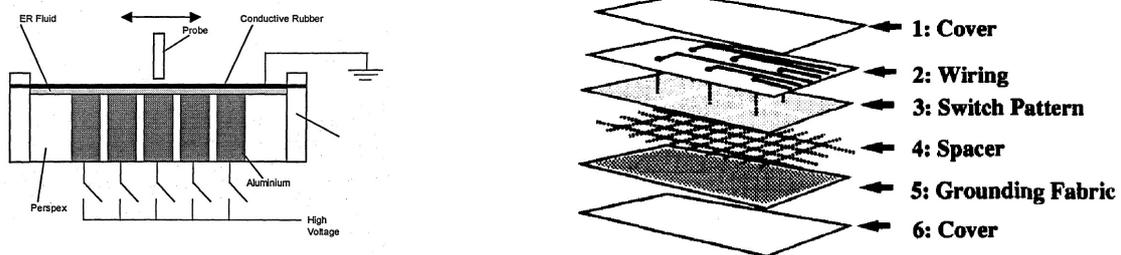


Abbildung 8: Electrorheological Fluid Sensor Array, Quelle: [26] und Full-Body Sensor [18]

4.4.6 Tactile Distribution Sensor

Der im Paper [2] beschriebene Sensor ist elastisch, nimmt Druck auf und ist relativ dünn. Zudem nimmt er den Ort des Druckes mit einer Auflösung von ca. 9 mm auf. Für die Erfüllung der Funktion werden in dem Sensor gleich mehrere Prinzipie angewendet. Die Druckaufnahme funktioniert über zwei Elektroden-Ebenen (eine gut- und eine schlecht leitende Ebene), zwischen denen ein Widerstand ist, der unter Druck geringer wird. Ausgelesen wird der Widerstand an verschiedenen Stellen der Ebene (die sog. Verteilung), durch Anwenden der elektrischen Impedanz-Tomografie. Dafür sind rund um die schlecht leitende Ebene Elektroden angebracht, die paarweise (immer zwei Elektroden nebeneinander) bestromt werden. Währenddessen werden von den übrigen Elektroden

die Potentiale abgenommen. Die Bestromung läuft rundherum. Aus den Potentialen werden über die Adjazent Methode Daten akquiriert und durch Newtons iterational Methode die Widerstandsverteilung geschätzt. Dieses Verfahren wird, da es nichtinvasiv ist, auch in der Medizin angewandt, um die Verteilung von Gewebe zu erfassen (bspw. bei der Krebserkennung).

Damit der flächige Taktile Sensor beim Strecken keine Abweichung seiner Leitfähigkeit aufzeichnet, wurde das verwendete Material mit gut leitendem Garn im Elastikstich (Nähart, Zickzack oder Serpentina) in die Ebene eingebracht. Um mehrere Druckpunkte gleichzeitig aufnehmen zu können, wurde die gut leitende Ebene in kleine voneinander isolierte Flächen aufgeteilt. Der Sensor liefert gute Ergebnisse. Auch wenn er stark ausgeformt wird, nimmt er noch Druckpunkte wahr. Die rechnerische Auswertung ist aufwendig und noch nicht gänzlich ausgereift, zudem sind die verwendeten Materialien noch nicht ideal, andernfalls könnte die Strukturbreite verkleinert werden. Abbildung 9 stellt den Aufbau des Sensors dar.

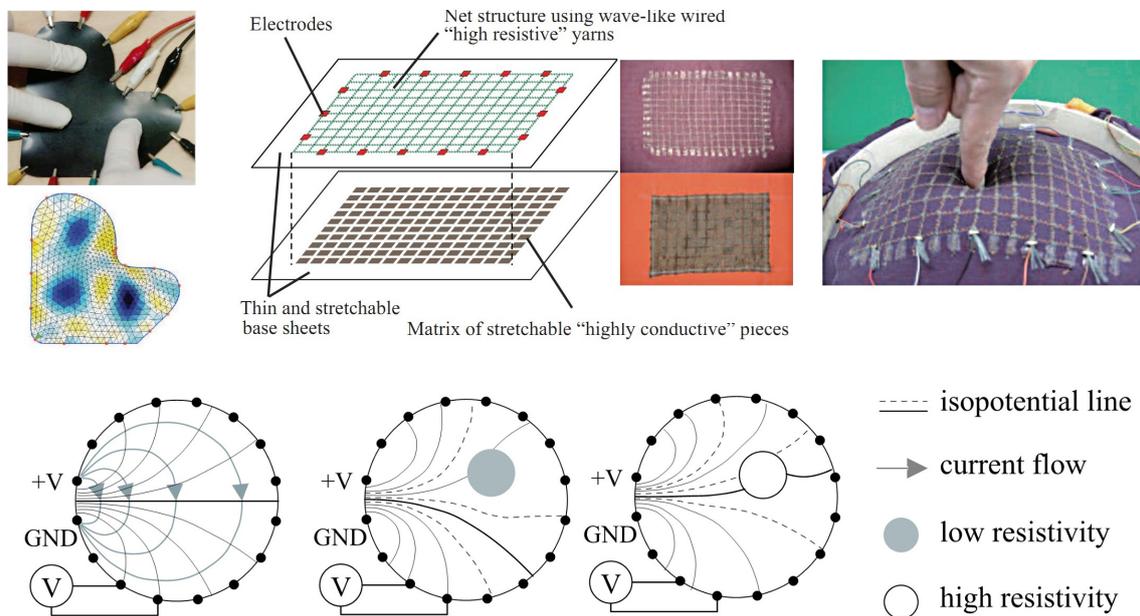


Abbildung 9: Tactile Distribution Sensor [2]

4.5 Halb- / leitende Stoffe

4.5.1 EeonTex

Unter EeonTex verbirgt sich eine Produktreihe der Firma Eeonyx aus Californien, USA. Auf der Internetseite [8] erfährt man, dass es sich bei Eeontex um Stoffe aus Syntetikfaser handelt, die mit einer Schicht leitender drucksensibler Polymere beschichtet sind. Auf der Webseite wird auch damit geworben, die Textilien den Kundenwünschen entsprechend mit Verläufen oder Mustern der Beschichtung fertigen zu können. Ob die Kunstfaser beschichtet wird oder der gesamte Stoff, geht nicht aus der Beschreibung hervor. Die genaue Bezeichnung des erwähnten Polymers ist ebenfalls

ohne weiteres nicht zu finden.

Eigenschaften der zur Verwendung kommen Stoffgruppe EeonTex LR-SL-PA-10E5

- Zusammensetzung: Nylon 69 %/Elastan 31%
- Elastizität: 2:1 oder 100%
- Oberflächenwiderstände³ von 10^4 , 10^5 und $10^6 \Omega/cm^2$
- piezoresistiv, steht nicht im Datenblatt, wird aber so auf der Internetseite beworben.

Die Stoffe weisen verschiedene Dicken auf, genaue Angaben lassen sich den Datenblättern nicht entnehmen. Ebenso ist die Rauigkeit der Oberfläche verschieden, wie in Abbildung 10 dargestellt ist.

4.5.2 Piezoresistenz

“Als piezoresistiven Effekt bezeichnet man die Änderung des elektrischen Widerstandes eines Leitwerkstoffs infolge seiner Deformation bei Einwirken äußerer Kräfte. Der Effekt eignet sich nur für die sensorische Wandlung mechanisch → elektrisch, ist also nicht umkehrbar. Der piezoresistive Effekt hat zwei Ursachen; die Änderung der Geometrie (dominant in Metallen) und die Änderung im Leitungsmechanismus (dominant in Halbleitern).“ [11]

4.5.3 Statex

Die Firma Statex aus Bremen bietet eine Vielzahl leitender Flächenwahren an. Darunter auch Gewirke (bereits elastisch durch ihre Struktur), die mit 99 prozentigem Silber beschichtet sind. Weitere Eigenschaften des aus dem Portfolio gewählten Stoffs Techniktex P 130 + B sind folgend aufgelistet. Quelle: Datenblatt Techniktex P 130 + B [31]

- Basismaterial 78% Polyamid + 22 % Elastan
- Bi-Elastisch
- Oberflächenwiderstand $< 2 \Omega/cm^2$
- Temperatur Bereich -30°C bis 90°C
- Dicke $0,45\text{mm} \pm 10\%$
- Gewicht $145\text{g}/\text{m}^2 \pm 5\%$

³Der Oberflächenwiderstand wird nach ISO 93 auf einer Quadratischen Testfläche gemessen, dabei verlaufen die Elektroden über die Länge zweier gegenüberliegender Seiten.

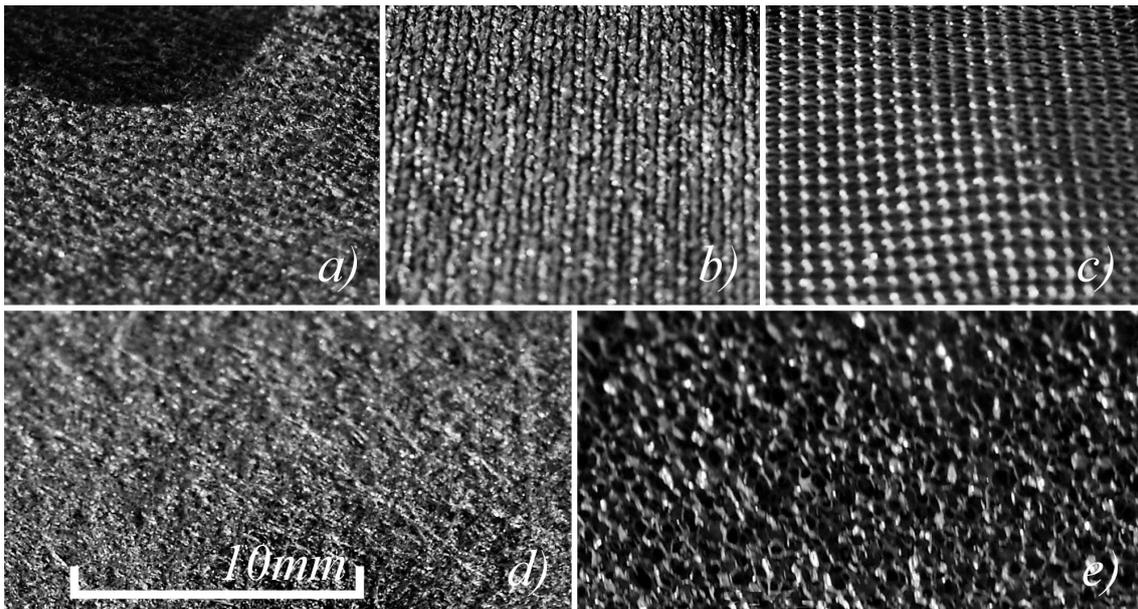


Abbildung 10: Resistive Flächenware: a) Eeontex $10E5\Omega/sq$, b) Ee. $10E4\Omega/sq$, c) Ee. $10E6\Omega/sq$, d) Vlies, e) Schaum [GeBü]

4.6 Material für Elektroden

4.6.1 Litze

Litze ist ein Leiterbund aus vielen Drähten, das macht sie flexibler als einen Einzeldraht gleicher Querschnittsfläche. Von der Firma Haarländer (Regensburg) [21] wurde eine Produktprobe mit 10 Drähten á 0,05mm bestellt. Diese bestehen aus hoch reinem Kupfer (E-Cu), sind verzinkt und wärmebehandelt. Das macht die Litze noch einmal beständiger gegen mechanische Einwirkungen. Litzenleiter gibt es in vielerlei Varianten, getestet wurde hier die beschriebene lineare Litze und ein sog. Zopfgeflecht (jeweils ohne Isolation).

Für die Leitungen vom Sensor zur Schnittstelle bzw. Auswerteelektronik wurde eine spezielle Messlitze bestellt. Diese zeichnet sich ebenfalls durch einen besonders kleinen Querschnitt aus. Bezeichnet ist das Leitermaterial als "Alloy". Eine weitere Besonderheit, auf die bei der Suche geachtet wurde, ist die Teflon Isolation. Diese soll Zugspannungen, die durch Bewegen der Leiterumgebung entstehen durch besseres gleiten, verringern.

4.6.2 Lahnfaden

Lahn oder Lahnfaden ist ein metallener Faden, welcher einen Kern aus strapazierfähigen Garn besitzt. Um diesen herum, ist ein platt gewalzter Draht gewickelt.

Eine Rolle versilberten Kupferlahns stellte die Firma Karl Grimm (Roht - Eckersmühlen) bereit. Dieses Unternehmen (seit 1885) ist auf die Fabrikation Leonischer Waren und Posament spezialisiert (Metalldrahtartikel, Textiler Schmuck). Lahnfaden bietet allerdings auch Vorzüge für den technischen Einsatz. So hat der zur Verfügung stehende Faden (High-Flex 7077) neben seiner gut

leitenden Ummantelung, einen Aramidkern, der ihn besonders Reißfest macht (ebenfalls schwierig zu schneiden). Nachteilig ist, dass die Ummantelung relativ schnell bricht (sinnvoll wäre es wohl dem Kern einige Einzeldrähte beizufügen).

4.6.3 Resistives Silicon

An einer amerikanischen Zweigstelle der Münchener Firma Wacker, werden leitende Silikonkautschuke der Markenbezeichnung POWERSIL entwickelt und produziert [1]. Test wurden mit dem Produkt POWERSIL 402 A/B gemacht. Ausführlicher ist dieses Thema in Abschnitt 6.4.6 S. 60 beschrieben.

4.7 Analyse und Synthese der Recherche

Kommerziell wird derzeit nur ein Taktile sensorhandschuh angeboten (4.3.1) von NO-DNA. Dieser ist mit seinen 5 Sensoren allerdings nicht besser als die momentan genutzten FSRs, die einzeln an den Cyberglove II appliziert werden. Seiner Verwendung steht die relativ hohe Wandstärke entgegen, die das Tragen unter dem Cyberglove wohl unmöglich macht (Platz- und Temperaturproblem). Die Taktile sensoren stehen noch in der Entwicklung. Es bleibt noch der Sensitive Fingertip Glove. Dieser ist bereits als Favorit angegeben worden und wird daher auch in die Entwicklung einbezogen.

5 Messsystem

Ziel der Messung ist es, die Taktilsensoren in ihrer Güte zu beurteilen.

Nach [16] Taschenbuch der Messtechnik wird diese in der Metrologie genauer als “Erkundungsmessung” beschrieben, da sie “der qualitativen Bestätigung oder Korrektur von Hypothesen oder Thesen dient. Messgröße, Messbereich und Messsystem sind zwar hinreichend, die Einflussgrößen aber wenig bekannt.”

Als Grundlage für das Vorgehen in diesem Abschnitt wird sich auf die Norm 1319 - 1 bis 4 des deutschen Institutes für Normung berufen [6].

5.1 Testmessung

Die Abstimmung der Sensorkomponenten lässt sich im Groben über simple Messungen erreichen. Dabei genügt es bspw. die Paarung von Elektrodenoberfläche und Halbleiterschicht mittels Multimeter und Stempel (50g Gewicht, Newtonmeter, etc.) zu testen. Der Widerstand zwischen den Ebenen wird dabei von dem Multimeter angezeigt, während der Stempel per Hand auf verschiedene Stellen der übereinander gelegten Ebenen gedrückt oder gelegt wird. Diese Methode hat den Vorteil, mit wenig Aufwand bestimmte Garne, Stoffe oder Arten der Verarbeitung als tauglich beurteilen zu können oder frühzeitig von der Entwicklung auszuschließen.

Für den weiteren Fortschritt der Entwicklung reicht diese Methode allerdings nicht mehr aus. Die entscheidenden Anforderungen an die Taktilsensoren sind neben der Kraftaufnahme in bestimmter Mindestqualität auch die elastische Verformung und die Einbindung in ein Trägergerüst (Handschuh). Wichtig sind die weiteren Anforderungen, da sie für eine Funktion der Taktilität des Datenhandschuhs unabdingbar sind. Zudem stellen sie für die alleinige Funktion der Kraftaufnahme der Sensormaterialien eine Gefährdung dar. (Siehe auch Abschnitt 6.5 Seite 63 ff). Somit folgt der Schluss, dass die Messung der Kraftaufnahme in realistischem Maße an den Sensoren durchgeführt werden sollte, heißt, die Sensoren für die Messungen sollen in ihrer Bauweise, Einfassung und Belastung auf die zum Einsatz kommenden Taktilsensoren übertragbar sein. Dennoch sollte das Messsystem so abstrakt und grundlegend wie möglich aufgebaut sein.

Durch diese Rahmenbedingungen lässt sich folglich die Gestalt des Messobjektes und dessen Aufnahmevorrichtung ableiten. Dazu mehr im Abschnitt Messobjekt 5.5 auf Seite 31.

Die vom Messsystem umfassten Bereiche sind das Messverfahren, die Messeinrichtung, das Messobjekt und die Umgebung, in der die Messungen stattfinden.

5.2 Messverfahren

Eine qualitative Aussage über den Taktilsensor lässt sich nur über ein entsprechend abgestimmtes Verfahren schaffen. Für die meisten Messungen gibt es Normen, die das Verfahren vorschreiben. Diese gelten einerseits als Grundlage, um reproduzierbare Ergebnisse zu erlangen. Zum Anderen

können sie als Hilfestellung betrachtet werden, da sie alle nötigen Mittel und Vorgehensweisen darlegen. Zusätzlich geben sie Sicherheit zur Eignung des entsprechenden Messsystems.

Recherche über **Perinorm**

Perinorm ist ein Onlineportal, welches über die Computer der Fachhochschulbibliothek zugänglich ist. Es wird beschrieben als Zitat [22]: “Referenz-Datenbank, die bei der Suche und Verwaltung von Normen und technischen Regeln unterstützt.”

Ergebnis der Recherche war, dass eine Norm für das in Frage kommende Verfahren noch nicht fertig ist. Gekennzeichnet ist der entsprechende Eintrag (Stand Juni 2011) wie folgt:

“Elastomere oder thermoplastische Elastomere - Elektrischer Widerstand - Bestimmung des Volumen- und oder Oberflächenwiderstandes (gelpante Dok. Nr. iso/Dis 14309; keine Einsicht möglich. Ausgabe Datum 2010-03-00)” Anzunehmen ist, dass diese Norm seit März 2010 in Arbeit ist.

Da die Werkstoffe (4.5 S. 15), insbesondere die piezoresistiven Stoffe recht neue Errungenschaften sind, ist das Suchergebnis durchaus plausibel.

Weitere Rechercheergebnisse, die sich dem Gesuchten annähern sind:

- Ein Verfahren zur Prüfung weich-elastischer Schaumstoffe (Eindrückversuch) wird in der DIN 53579 beschrieben.
- Die DIN 51220 behandelt Allgemeines zu Anforderungen an Werkstoffprüfmaschinen und zu deren Prüfung und Kalibrierung.
- Die DIN EN 13895 dient zur Bestimmung der Zugeigenschaften von Textilien und Monofilamenten.

Aus eigenem Ermessen und unter Absprache wurden diese Verfahren als zu wenig geeignet für den Zweck der Taktilsensormessung bewertet. Daher wurde eigens ein neues Messverfahren entwickelt, welche sich wie in den folgenden Abschnitten beschrieben, aufbaut.

5.2.1 Messgegenstand

Die zu messende Größe (Messgegenstand) ist der elektrische Widerstand der Sensoren, welcher sich wie vorausgesetzt unter Krafteinwirkung ändert. (siehe auch 39 S. 62 Funktionsweisen der Taktilsensoren). Für die Aufnahme einer Messkurve wird die Kraft auf den Sensor langsam erhöht, während Kraft und elektrischer Widerstand zu zeitgleichen Punkten aufgezeichnet werden. Das Prinzip hinter dem Verfahren ist also dasselbe simple wie eingangs 5.1 beschrieben. Hinter dem Prinzip steht der Vergleich zweier Größen. Zum einen die Kraft und zum anderen der Widerstand, der unmittelbar von der Kraft abhängt. Man kann auch sagen, das der Widerstand eine Abbildung der Kraft ist, dargestellt durch eine Funktionskurve. Wird später der Taktilsensor z.B.

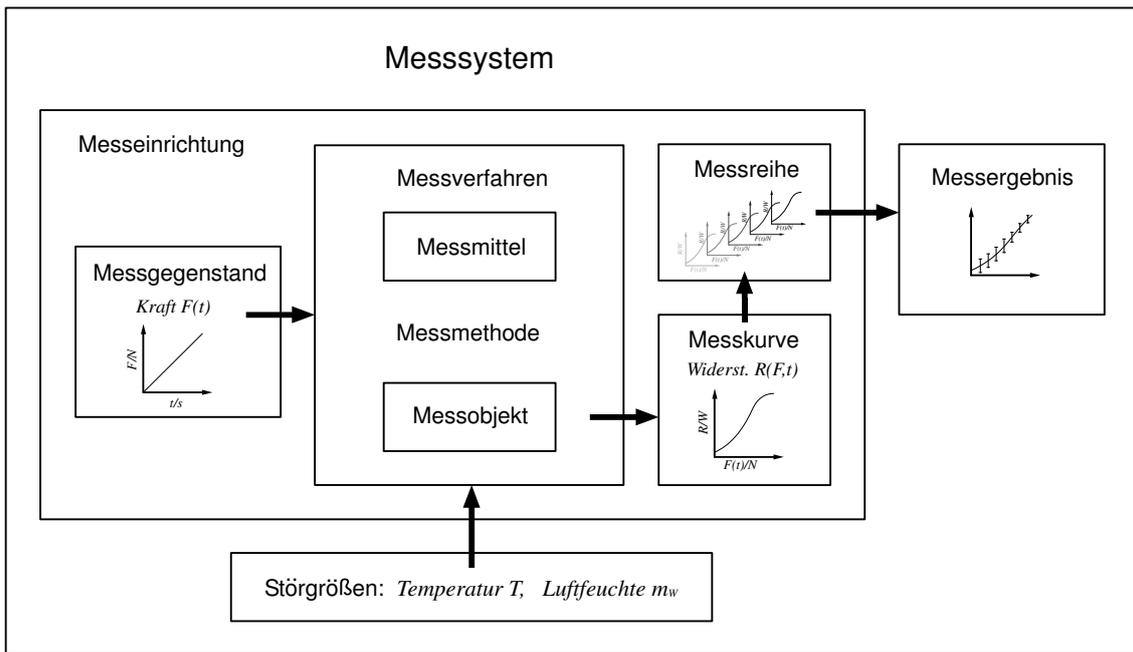


Abbildung 11: Struktureller Aufbau des Messsystems [GeBü]

einem kräftigen Händedruck ausgesetzt, kann durch rückgängiges Einsetzen des Widerstandes in die Funktion die zugehörige Kraft ermittelt werden.

Anstelle der Kraft F könnte auch der Druck p gemessen werden, welcher sich aus der Division von Kraft zu Fläche ergibt “ $p = F/A$ [N/mm^2]”. [24]

Das hätte den Vorteil, einen Vergleich zwischen Sensoren unterschiedlicher Größe anstellen zu können, da sich die Größe als Flächenfaktor aus der Gleichung kürzen ließe. Im Gegensatz dazu steht der als zu groß eingeschätzte Aufwand, die Fläche zu messen oder rechnerisch zu ermitteln (da diese sich funktionsbedingt unter Krafteinwirkung ändert). Die Fläche auf ein Einheitsmaß oder Normal zu bringen käme wiederum mit den unterschiedlichen Funktionsweisen (6.4.7 Seite 61) der Taktilsensoren in Konflikt.

So sind die Eingangsgrößen des Messsystems die Kraft $F[N]$, der elektrische Widerstand $R[\Omega]$ und die Zeit $t[s]$. Störgrößen sind Temperatur $T[K]$, Luftfeuchtigkeit $m_w[g/m^3]$ und mechanische Abweichungen. (U.U auch starke magnetische Wechselfelder). Ausgangsgröße ist der Widerstand in Abhängigkeit von Kraft und Zeit mit bestimmter Qualität $R(F,t)$. Zur Veranschaulichung sei hier auf Abbildung 11 verwiesen.

Umfassend gilt für die Messungen die Erfüllung der “Wiederholbedingungen” nach [6]. “Bedingungen, unter denen wiederholt einzelne Messwerte für dieselbe spezielle Messgröße unabhängig voneinander so gewonnen werden, dass die systematische Messabweichung für jeden Messwert die gleiche bleibt. Es müssen wenigstens die folgenden Bedingungen erfüllt sein:

- derselbe Beobachter,
- dasselbe Messverfahren,
- dieselbe Messeinrichtung,
- dieselben speziellen Einflussgrößen.

Mitunter wird durch die Messung das Messobjekt nachhaltig verändert oder zerstört. In diesem Fall werden mehrere möglichst gleichartige Messobjekte in der Weise nacheinander gemessen, dass Wiederholbedingungen näherungsweise erfüllt sind.”

Die Anzahl der Einzelmessungen vervielfacht sich mit jeder Messreihe. Diese Tatsache, und das relativ einfache Messprinzip, legt es nahe, das Messverfahren zumindest teilweise zu automatisieren. Die Gegebenheit, dass in der Laborumgebung des CITEC Messmittel für die Zusammenstellung eines derartigen Messsystems größtenteils vorhanden sind, ließ die Entscheidung unter Absprache zu einem vollautomatischen Messsystem treffen.

Die Kraft weist den einzigen gewünschten variablen Parameter auf, der Einfluss auf die Messung nehmen soll. Jedoch ist die Zeit als Parameter nicht zu vernachlässigen, da davon ausgegangen werden kann, dass die Sensoren ein Setzungsverhalten aufweisen. Für einen abstrakten Aufbau soll die Kraft nur aus einer Richtung wirken, sprich fünf von sechs Freiheitsgrade sind nach Möglichkeit auszuschließen. Der bleibende Freiheitsgrad, ermöglicht sodann eine translatorische Bewegung w . Durch ein kompressibles Element c wird die schreitende Bewegung in schreitende Kraft F_F gewandelt.

$$F_F = c \cdot w \quad (1)$$

(Prinzip der Federkraft [24]). Auf die Konstruktion der Messeinrichtung wird genauer im Abschnitt 5.3 eingegangen.

Für die Automatisierung wird die translatorische Bewegung computergesteuert sequenziell ausgeführt. Der Messgegenstand $R(F, t)$ wird simultan mit dem Vergleichswert der Kraft F über eine Messdatenerfassungskarte in einen Computer übertragen und verarbeitet. Für eine optimale Nutzung der Messdaten sollten selbige, wenn nötig, gewandelt und verstärkt werden, so dass die spezifischen Eingangsanforderungen der Messkarte erfüllt werden. Auf die Herausforderung der Messdatenwandlung wird im Abschnitt Messwandler 5.6 auf Seite 32 eingegangen. Die rechnergestützte Verarbeitung geschieht wie im Abschnitt 5.7 Seite 41 beschrieben.

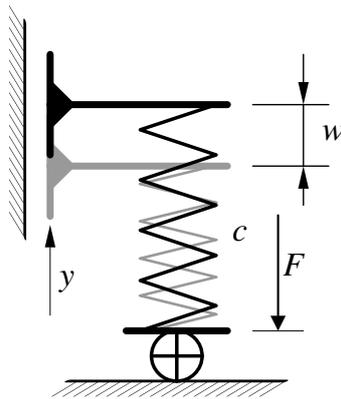


Abbildung 12: Messgrößenwandlung, Federprinzip [GeBü]

5.3 Messeinrichtung

Die beschriebene translatorische Bewegung wird computergesteuert von einem XYZ-Tisch ausgeführt. Dieser ist aus ein bis zwei Linearmodulen pro Achse aufgebaut. Für die Taktilsensormessung beschränkt sich die Nutzung auf die vertikale Achse. Das elastische Element/ eine Federung ist an den sog. Läufer des vertikalen Linearmoduls angeflanscht. In vorhergegangenen Versuchen wurde der XYZ-Tisch für die Messung kraftsensitiver Sensorarrays verwendet, daher war er bereits mit einer Federung ausgerüstet. Für die Messung der Taktilsensoren schien diese allerdings ungeeignet, da sie für einen wesentlich geringeren Belastungsbereich ausgelegt ist. Diese Gegebenheit wurde diskutiert und so unter Absprache frühzeitig zu einer Neukonstruktion der Federung entschieden.

Der Einsatz einer Kraftmessdose wäre hier angebracht, steht dem Labor des CITEC allerdings nicht zur Verfügung. Der im Verhältnis verschwindende Federweg einer Kraftmessdose weckt zudem Zweifel an einem funktionierenden Zusammenspiel mit dem schrittmotorgetriebenen Linearmodul.

Angedacht wurde auch, eine Laborwaage zu verwenden. Deren Messwerte $[kg]$ ließen sich durch multiplizieren mit der regionalen Gravitation $g \approx 9,81m/s^2$ als Kraft darstellen “[$N \cong [kg \cdot m/s^2]$ ” [24]. Da bei ca. $20N$ die Grenze des Messbereichs der zur Verfügung stehenden Waage erreicht ist und diese zudem einen wackeligen Eindruck der Waagschale macht, kam sie ebenfalls nicht zur Verwendung. Stattdessen wird nun die Auslenkung der Feder verwendet, um Rückschluss auf die resultierende Kraft zu erhalten. (Genauer beschrieben in Abschnitt 5.6 Seite 32.)

Die Entwicklung der Federung ging verhältnismäßig schnell von statten, dennoch sollen die konstruktiven Kniffe und ihr Entstehen hier kurz erläutert werden.

Anforderungen an die Federung sind:

- Festanforderung: Federn in einem Bereich bis $> 20N$. Damit verbunden
- Verfahren auf einer Achse um $ca.30mm$ und

- möglichst guter Ausschluss der übrigen Freiheitsgrade (FG 1 bis 5) (Spiel).
- Mindestanforderung ist eine möglichst geringe Reibung.
- Wünschenswert sind einfache Justierung der resultierenden Federkonstanten und
- geringer Aufwand von Kosten, Fertigungs- und Montagezeit.

Als Ideal für die ersten beiden und die vierte Anforderung bietet sich eine Blattfeder an. Wird eine solche einseitig fest eingespannt (siehe Abbildung 13 Seite 24), lässt sich aus Querschnitt und Länge unter bestimmter Krafteinwirkung die Verschiebung berechnen. Ist die Blattfeder breit genug, können bereits zwei Freiheitsgrade als eingeschränkt betrachtet werden. Zum einen die Verschiebung in z -Richtung (FG 1), und zum anderen die Rotation um die y -Achse (FG 2), da das Flächenträgheitsmoment in dieser Richtung sehr groß ist.

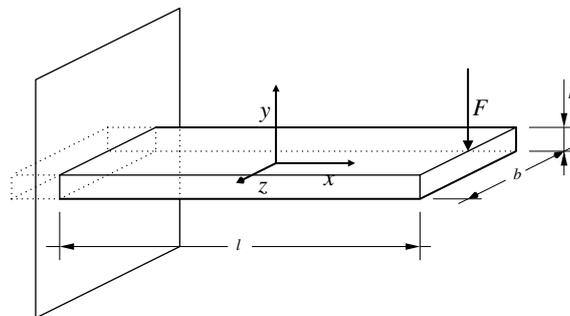


Abbildung 13: Rechteckfeder, einseitig eingespannt [GeBü]

Um die Rotation um die Achsen z (FG 3) und x (FG 4) zu blockieren, wird eine zweite Feder mit gleichen Eigenschaften vertikal versetzt integriert (y -Versatz). Verbindet man beide Federn über eine Strebe (Link), wirkt das Prinzip des Parallelschwingarms (Abbildung 14). Je weiter die Federn auseinander stehen, desto größer können die Momente um die Achsen wirken (Hebelgesetz) ohne die Federn einzuknicken.

Es bleibt noch die Verschiebung (shift) s_w in x -Richtung, die unerwünscht ist (FG 5), wie in Abbildung 14 gezeigt. Diese ist proportional zu dem obligatorischen Federweg w . Der Kniff, um die Verschiebung s_w wieder auszugleichen ist, sie ein zweites mal zu erzeugen, allerdings in entgegengesetzter Richtung. Bedingung dazu ist, wie bei dem Parallelschwingarm, dass die Eigenschaften der Blattfeder gleich sind. Realisiert wurde dies wie in Abbildung 15 veranschaulicht.

Ebenfalls lässt sich in Abbildung 15 erkennen, dass durch die gestiegene Komplexität der Federung leicht Strukturschwingungen auftreten können. Herausstechend sind dabei die frei stehenden Einspannungen (Brackets), die ein ungewollt gutes Feder-Masse-System bilden. Im unbelasteten Fall liegen die Federn hier auf einer Ebene und können am Ende auf und ab schwingen. Dies

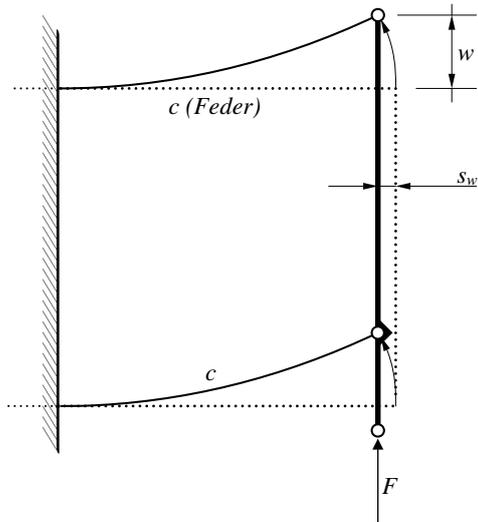


Abbildung 14: Parallelschwingarm [GeBü]

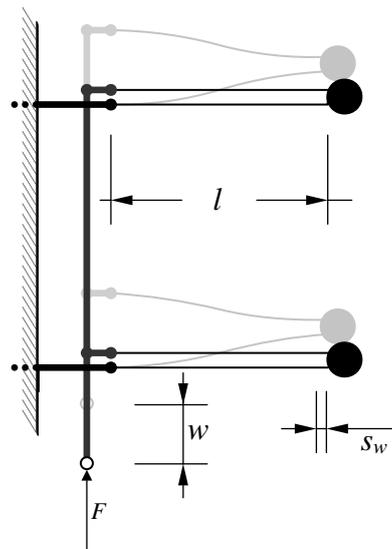


Abbildung 15: Verschiebungsfehler-kompensiert [GeBü]

ist bei der Fahrt mit dem Linearmodul(Schrittmotor getrieben) recht wahrscheinlich. Im belasteten Fall spannt sich die Konstruktion zu einer annähernd dreieckigen Struktur auf. (In Abbildung 15 grau dargestellt). Von dieser wird angenommen, dass sie wesentlich weniger zum Schwingen neigt. Um diesen Effekt zu nutzen, wurde die Einspannung der Blattfedern um einen bestimmten Winkel geneigt.

Die zweidimensionale Abbildung bleibt noch einer weiten Lösung schuldig. Da sich die Parallelschwingarme nicht ineinander bewegen können (Kollision), wurden sie auf der z -Achse versetzt angeordnet. Dadurch tritt wiederum an den frei stehenden Einspannungen eine Scherung auf. Hier ist es wahrscheinlich, dass sich die Einspannungen samt Federenden verdrillen (Moment um x). Somit wurde die gesamte bisher angedachte Konstruktion noch einmal verdoppelt. Es soll wie bei dem eingangs beschriebenen Kniff ebenfalls die gleiche Kraft oder gleichen Kräfte in Gegenrichtung erzeugt werden und das störende Moment auslöschen.

Die Strebe, zusammengesetzt aus ($Li4, Li6$) nach Abbildung 16 muss strukturell ein großes Moment aufnehmen. Die Einspannungen aus $Li3$ und $Li4$ wirken dabei in gleicher Weise, und würden zu einer S-förmigen Verformung führen. Als Lösung hierfür würde sich eine Strebe mit breitem Profil anbieten (großes Flächenträgheitsmoment um z). Alternativ wurde wie schon in der Abbildung dargestellt auf die Verwendung zweier nebeneinander stehender Streben rundem Querschnitts zurückgegriffen. Diese nehmen zwar die Belastung nicht so gut auf wie ein Rechteckprofil, lassen sich aber einfacher montieren. Zudem dient die Strebe $Li6$ als Schnittstelle um den Messobjektträger adaptieren zu können.

Die gestrichelt dargestellte Strebe $Li7$ wurde nachträglich in das Federungssystem eingesetzt, da

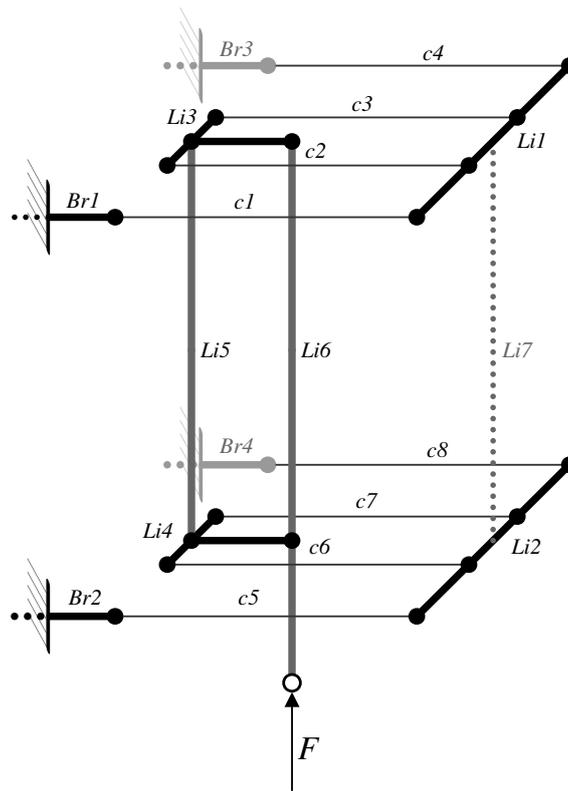


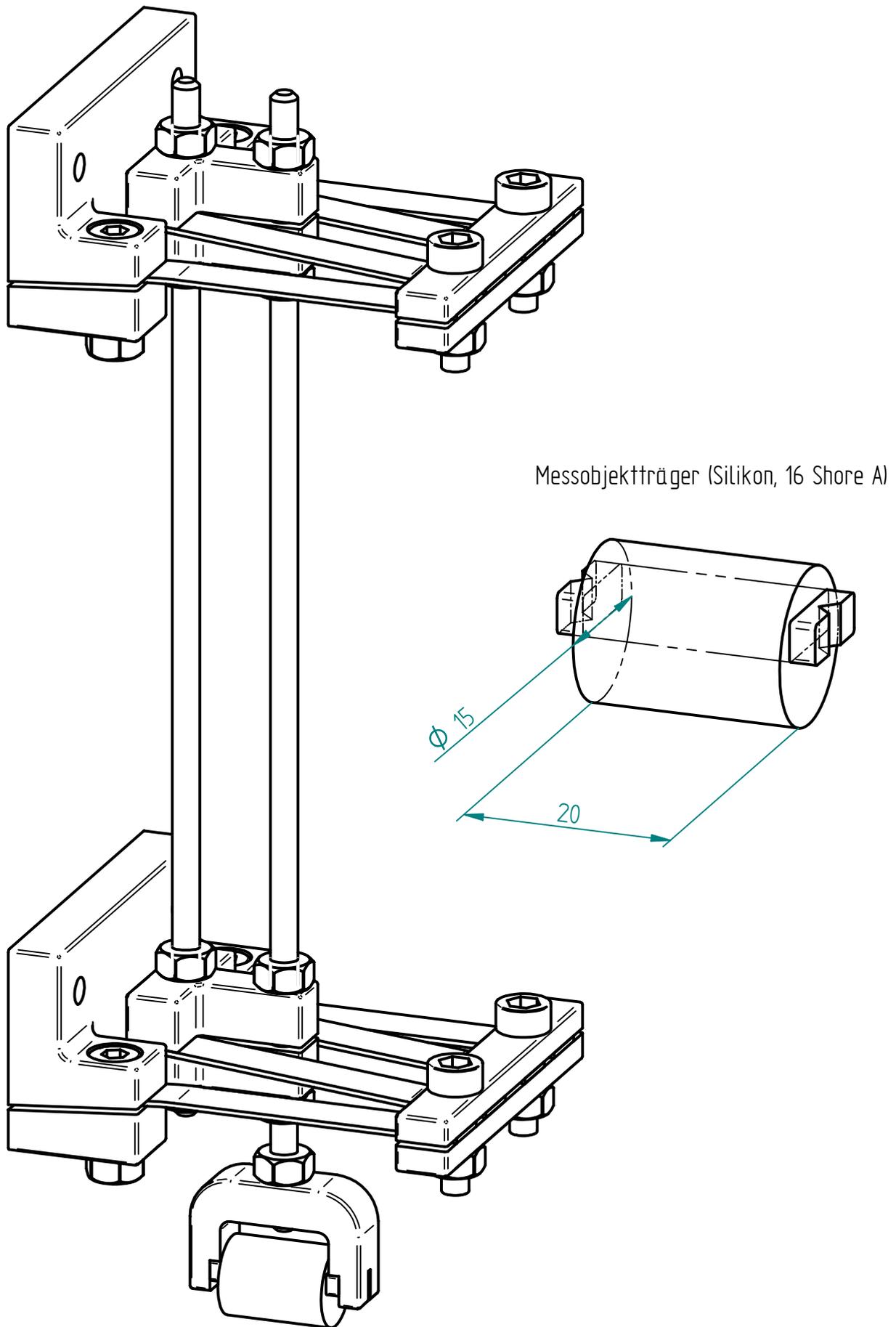
Abbildung 16: Federungsschematik [GeBü]

sie bei der idealisierten Betrachtung nicht nötig schien. Jedoch wurde dabei übersehen, dass bei der Wirkung einer Querkraft (F_y) sich die Streben $Li1$ und $Li2$ auseinander bewegen, sofern die beschriebene dreieckige Struktur besteht. Wirkt F_y , bewegen sie sich zueinander hin.

Als gut veranschaulichende Ergänzung zu dieser Entwicklung sei an dieser Stelle auf Abbildung 56 im Anhang, Seite 86 verwiesen.

Für die Umsetzung der Konstruktion wurden Abstände, Längen und Materialstärken so gewählt, dass sich eine möglichst gleichmäßige Belastung der Struktur ergibt. Zumindest wurden sie nach bestem Vermögen intuitiv bestimmt, da für eine komplette rechnerische Auslegung oder auch Computer gestützter Strukturanalyse nicht die Zeit war.

Als Material für die Einspannungen wurde Aluminium gewählt (leicht und steif). Eine Legierung wurde nicht bestimmt, da dies unnötig schien und eventuell zu einer Bestellung mit verbundenen Wartezeiten hätte führen können. Ideal und wünschenswert wäre eine Hochfeste Knetlegierung gewesen. Beispielsweise nach [7] "DIN Kurzname AlZnMgCu1,5". Die Rechteckfedern sollten aus Federstahlband z.B. "65 Si 7" zugeschnitten werden (Trennschleifen).



Messeinrichtung , Federung, Messobjektträger

Gereon Büscher 20.07.11

Die CAD Zeichnung ist ein Ausdruck der Software SolidEdge ST (Siemens AG) (kostenfrei für Studenten der FH). Der Sprung von der bis dato verwendeten Version 14 auf die ST Version ist groß, hat sich im weiteren Entwicklungsverlauf aber als gute Investition erwiesen, da an der Uni ebenfalls mit SolidEdge ST gearbeitet wird.

Innerhalb der Uni befindet sich eine gut ausgestattete Schlosserei, die zur Fakultät Biologie gehört, gleichwohl werden dort Aufträge des CITEC angenommen. Dabei werden zur internen Kostenrechnung alle Einzelheiten quittiert, wie es auch bei einer externen Werkstatt der Fall wäre. Geliefert wurden von dieser Stelle die Blattfedern. Die Aluminiumteile wurden freundlicherweise kostenlos im Berufsbildungswerk Bethel gefertigt. Aufgeteilt wurde die Fertigung, da die Werkstatt der Uni nur einen Fräsaufautomaten besitzt, dessen Kapazitäten oft über mehrere Wochen verbucht sind.

5.4 Schwingungsdämpfung, Optimierung

Nach der Montage der Federung zeigte sich, dass, verursacht durch die recht große bewegliche Masse trotz der vorher getroffenen Maßnahmen, der Messobjektträger zu stark auf- und abschwang. Um dieses Manko zu beheben, wurden verschiedene Dämpfer mit einer Wirkung parallel zu der Feder angedacht.

Die Dämpfungsstärke sollte dabei passend zu der Messung eingestellt sein. Je kleiner sie ist, desto schneller kann die Messung durchgeführt werden. Das liegt daran, dass die Dämpfung bei der Messung einen Fehler darstellt, da ihre Kraft additiv zu der Federkraft wirkt, welche den Vergleichswert der Messung bildet (5.2.1). Um den Messfehler auszuschließen, müsste die Messung sehr langsam durchgeführt werden, da so die Dämpfungskraft auch sehr klein ist. Durch die geplanten vielen Messungen und dem Setzverhalten des Taktisensors ist dies allerdings unkonform. Wird die Messung (Belasten und Entlasten kurzzeitig kontaktlos) schnell durchgeführt, können einerseits nach dem Kontakt und andererseits bei der Bewegungsrichtungsumkehr Nachschwingungen auftreten. Eine weitere Gefahr liegt in dem Schrittmotor Antrieb, der u.U. durch seine finiten Bewegungsschritte die Einrichtung zur Resonanz bringen kann. So gibt es zwischen Messgeschwindigkeit und Dämpfungsstärke ein Optimum.

5.4.1 Viskosedämpfer

Herkömmlicherweise würde eine derartige Einrichtung mit einem Viskosedämpfer versehen werden. Im Idealfall ist seine Dämpfung proportional zur Geschwindigkeit. Das führt zu einer großen Gegenkraft bei großen Schwingungsamplituden und wirkt bei kleinen Verschiebungen umso weniger. Für die Messeinrichtung ist das wichtig, da so der Nullpunkt nicht verschoben wird. Die Viskosedämpfung baut sich zumeist aus einem Kolben auf, der sich in einem Zylinder gefüllt mit einem Fluid bewegen kann. Die Dämpfung lässt sich durch Parameter, wie Viskosität oder Spiel, zwischen Kolben und Zylinder relativ leicht einstellen. Noch besser lässt sich die Dämpfung ein-

stellen, wenn ein gut zugängliches Steuerventil in den Strömungskreis geschaltet wird. Anbieten würde sich der Dämpfer auch, da er fest in der Vertikalen eingebaut werden kann. So könnte der Kolben von oben eintauchen und müsste nicht abgedichtet werden. Die Dichtungen hätten wieder Einfluss auf die Dämpfungsart und würden zu dem proportionalen noch einen statischen Teil hinzufügen. Ein Nachteil der Viskosedämpfung ist, dass sie durch die Eigenschaften des Fluids mehr oder weniger von der Temperatur abhängig ist.

5.4.2 Elektromagnetische Dämpfung

Eine andere Möglichkeit ist die Elektromagnetische Dämpfung. Dabei wirkt ein Magnetfeld als dämpfende Kraft zwischen Stator und Aktor, die statt Zylinder und der Kolben des Viskosedämpfers eingesetzt werden können. Angenommen, die Spule steht fest (Stator) und der Kern (Aktor) ist ein Permanent- / Stabmagnet. So wird bei Bewegung ein Strom in der Spule induziert. Rückwirkend kann durch Leiten eines Stroms ein Magnetfeld um die Spule aufgebaut werden, welches als Kraft zu dem Stabmagnetfeld wirkt. Bedingt durch dieses Prinzip kann der elektromagnetische Dämpfer durch Kurzschließen der Spule seine Dämpfungskraft aufbauen. Diese ist ähnlich wie die des Viskosedämpfers proportional zur Geschwindigkeit. Auf die Kraft einflussnehmende Parameter sind u.a. Wirkungsgrad der Spule, Luftspalt (Spiel) und die Stärke des eingesetzten Magneten. Bei zu hohem Wirkungsgrad (supraleitende Spule) würde der Dämpfer wieder einer Feder gleichkommen (rein theoretisch). Ein Verringern der Dämpfungskraft lässt sich durch zwischenschalten eines Potentiometers erreichen. Hier zeigt sich, dass der elektromagnetische Schwingungsdämpfer auf relativ einfache Weise einem Regelkreis angebunden werden kann. Ersetzt man das Potentiometer durch einen Transistor, lassen sich Proportional-, Integral-, und Differenzialregler mit Hilfe weniger Bauteile realisieren. Für eine saubere Funktion müsste allerdings noch eine zusätzliche Spannungsquelle angeschlossen werden. Die drei Reglertypen ließen sich letztendlich so kombinieren, dass ein Optimum zwischen Messgeschwindigkeit und Dämpfungsstärke erreicht werden könnte. Nachteil dieser Möglichkeit ist insgesamt ein recht hoher Aufwand, der mit der Auslegung der Komponenten verbunden wäre.

5.4.3 Wirbelstromdämpfer

Die dritte Möglichkeit, die auch so zur Anwendung kommt, ist ebenfalls eine magnetische Dämpfung. Sie wird erzeugt durch ein nichtmagnetisches Metallprofil, welches dicht an einem starken Permanentmagneten vorbei geführt wird, und so bremsende Wirbelströme erzeugt. Beeinflussende Parameter sind, Stärke des Magneten, Luftspalt (zwischen den Elementen) und bis zu einem gewissen Grad die Wandstärke des Profils und dessen elektrische Eigenschaften. Realisiert wurde die Wirbelstromdämpfung mit zwei starken Neodymmagneten (Reihenschaltung), die an der Feder adaptiert sind und einem Aluminiumprofil. Die flache Konstruktionsweise hat den Vorteil, den

Luftspalt gut einstellen zu können.

Die Wahl fiel schließlich auf den Wirbelstromdämpfer. Diese kosten- und zeitgünstige Lösung liefert zufriedenstellende Ergebnisse. Zu sehen ist die Dämpfung in Abbildung 18. Nachstehend (Abbildung 17) sind die Schwingungskurven mit und ohne Dämpfung dargestellt.

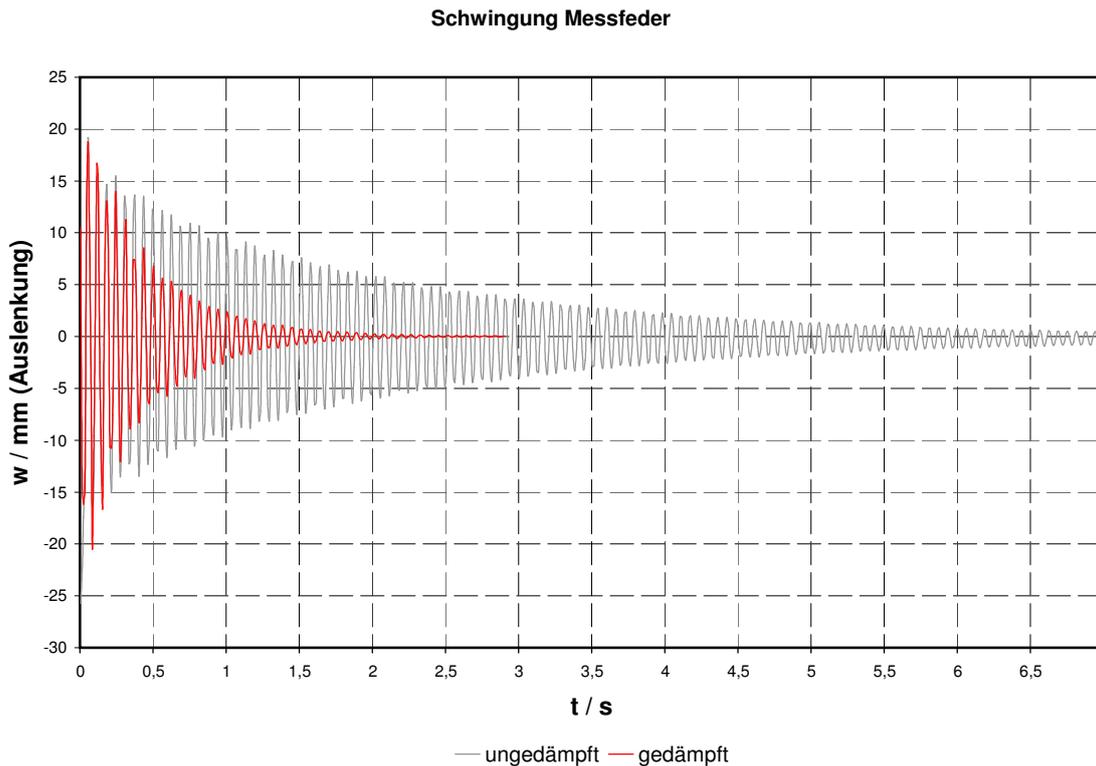


Abbildung 17: Gedämpfte und ungedämpfte Schwingung [GeBü]

Hier lässt sich die Wirkung des Wirbelstromdämpfers gut erkennen. Zu beobachten ist, dass die Frequenz nahezu konstant bleibt. Die Kurven wurden nacheinander in vollständigem Aufbau für die eigentliche Sensormessung aufgezeichnet. Dafür wurde die Feder stark ausgelenkt und abrupt losgelassen. Der Dämpfer wurde für die erste Messung außer Kraft gesetzt, indem die Neodymmagnete auf den Gewindestangen an den Rand versetzt wurden, wo sie keine Wirkung mehr auf das Aluprofil ausüben konnten. Die Messpunkte wurden mit einer zeitlichen Auflösung von 100,00 Hz über LabView aufgezeichnet. Aufgrund der verhältnismäßig groben Abtastrate ist in Abbildung 17 auch zu erkennen, dass die Amplituden keine saubere Linie (Abklingkonstante) bilden. Dies erklärt sich durch fehlende Messpunkte an den entscheidenden Stellen. In Excel wurden die Spannungen [V] in die Auslenkung w [mm] umgerechnet, und der Offset ausgeglichen (ca. -2,1 V). Der Offset geht aus der (vor) Verstimmung der Messbrücke hervor. Diese kann entweder so wie hier geschehen rechnerisch ausgeglichen werden, oder elektrisch, indem die Brücke mit einem

zusätzlichen Widerstand (meist ein Potentiometer) vorbelastet wird (Potential verschieben). Die Potentiometer haben dabei den Nachteil, stärker durch Luftfeuchte und inneren Abrieb Fehler zu erzeugen. Bei der rechnerischen Methode büßt man einen Teil des Messspektrums ein.

Eine weitere Optimierungsmaßnahme wäre noch das Reduzieren der beweglichen Masse. (Wegen ihrer Trägheit kann sie bei schnellem Verfahren einen Druckimpuls auf das Messobjekt übertragen). Dazu könnten die Gewindestangen durch leichter und steiferes Kohlefaserverbund-Rohr ersetzt werden. Die Aluteile ließen sich noch zu einer Stegstruktur hohlfräsen. Die Schrauben und Muttern ließen sich durch hohle Titanteile ersetzen. Beziehungsweise statt der Sechskantmuttern könnte auf versenkbare Hülsenmuttern zurückgegriffen werden.

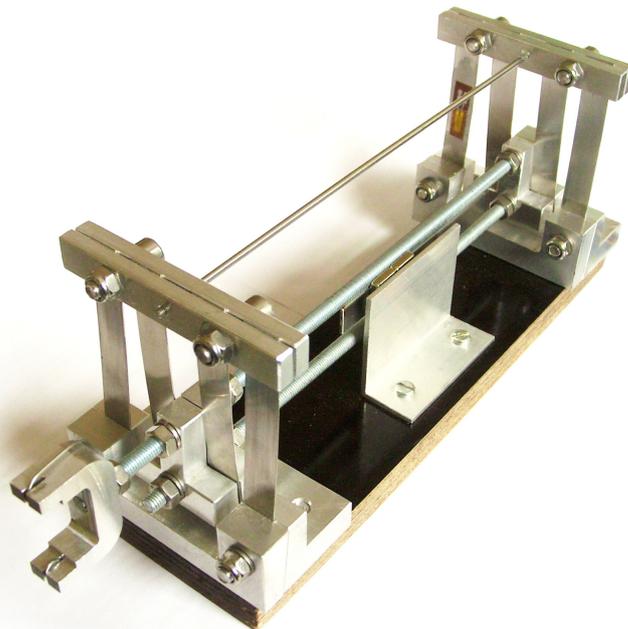


Abbildung 18: Reale Messeinrichtungsfederung samt Wirbelstromdämpfer [GeBü]

5.5 Messobjekt und -Träger

Nach DIN 1319-1 [6] ist das Messobjekt “Träger der physikalischen Größe, der die Messung gilt”. In diesem Fall der Taktilsensor. Wie bereits erwähnt soll die Messung Ergebnisse liefern, die den Sensor in einer Form beschreiben, in der er auch angewendet wird. Der Sensor soll nicht flach auf einer harten Unterlage getestet werden, da diese ideale Bedingung zwischen Fingerspitzen, Handschuh und zu greifenden Objekten eher selten eintritt.

Es lässt sich vorstellen, dass z.B. beim Fassen einer Teekanne die Sensoren sich der Kontur des Henkels (dessen freiförmiger Oberfläche) anpassen (verformen). Um Verformungen dieser Art zu simulieren, wurde ein Messobjektträger entwickelt, der einen Teil des Fingers imitiert. Zu sehen

ist der Träger in Abbildung 5.3 Seite 28. Den elastischen Part des natürlichen Vorbildes verkörpert ein Silikonzylinder. Versteift ist dieser durch ein Aluminiumprofil rechteckigen Querschnitts, der den Knochen nachahmt. Das Aluprofil bringt zugleich die Schnittstelle mit, um an der Messeinrichtungsfederung angebunden zu werden. Zentriert und arretiert wird der Träger von einem Draht, der geführt in vorgesehene Senken einklickt. Dies ermöglicht einen schnellen und unkomplizierten Wechsel der Messobjekte.

Messobjekt ist ein Sensor, der einem Element aus dem späteren Sensorhandschuh gleicht. Vorzustellen ist er als ausgeschnittenes Stück (Tubus) eines Handschuhfingers. Problemstellen, wie die Verbindung von Sensor zu Trägergerüst, werden auf diese Weise ebenfalls einem Tauglichkeitstest unterzogen. Für jede Sensorkonstruktion, die in die nähere Auswahl gekommen ist, wurde ein Prototyp als Messobjekt hergestellt. Zum Test von Materialeigenschaften und Kombinationen, wurden auch einfacher aufgebaute Messobjekte genäht bzw. zusammengeklebt.

Als Alternative zu dem beschriebenen Messobjektträger war auch ein kugelförmiger Trägerkörper angedacht. Dieser hätte die bidirektionale Streckung des Sensors besser abgebildet. Als größeres Problem stand die Anbindung von Messobjekt zu Träger der Realisierung im Weg. Besondere Schwierigkeit dabei ist, die Streckung immer gleich zu halten. Mit einer speziellen Vorrichtung wäre das wohl möglich, schien insgesamt allerdings zu aufwendig im Vergleich zu dem Vorteil, den der kugelförmige Träger bringen würde.

Um den Spannungszustand der zweidimensionalen Verformung zu erreichen, kann der tubusförmige Träger auch mit einem gewölbten Messuntergrund kombiniert werden. So ist anzunehmen, dass zwischen zwei orthogonal angeordnet und gegeneinander gedrückten Zylindern eine Art Sattelfläche mit ringförmigen Zugspannungen entsteht, wie sie ähnlich wohl auch beim Plattdrücken einer elastischen Kugel entstehen würden.

5.6 Messwandler

Der Messwandler, auch Messverstärker, hat die Aufgabe, die Signale der Sensoren für die computertechnische Verarbeitung vorzubereiten. Wie in Abschnitt 5.3 erwähnt, wird die Kraft über die Auslenkung w der Feder hergeleitet. Zugrunde liegt dabei wieder das Prinzip der Federkraft (Formel 1 Seite 22).

Für die sensorische Erfassung der Auslenkung kommt eine Vielzahl an Verfahren in Betracht.⁴ Die Entscheidung fiel letztendlich auf eine Bestimmung über die Federbiegung, welche durch einen Dehnungsmessstreifen (kurz DMS) ermittelt wird. In der Messeinrichtung werden zwei Folien-DMS der Firma HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH Darmstadt, Datenblatt siehe Anhang) verwendet, die zu einer halben Wheatstoneschen Messbrücke zusammengeschaltet wurden, folglich Abbildung 19.

⁴Beispielsweise zu finden in [16] unter: "Messen von Längen und Winkeln; Füllstand und Grenzstand; Messen von Dehnungen und daraus abgeleiteten Größen..."

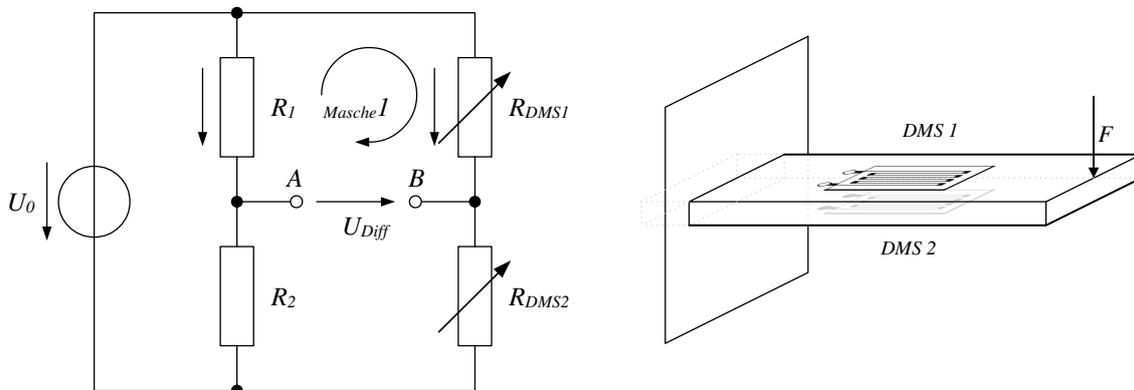


Abbildung 19: Halbe Wheatstonesche Messbrücke [GeBü]

Der k-Faktor der Messstreifen beträgt laut Datenblatt $k = 2,05 \pm 1\%$, und beschreibt das Verhältnis von relativer Widerstandsänderung $\Delta R/R$ zur Dehnung ε (proportional bei metallischen Widerstandslegierungen).

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (2)$$

Der Widerstand ist mit $R_{DMS} = 120\Omega \pm 0,35\%$ angegeben. Diese Werte sind entscheidend für das Auslegen der Messelektronik.

Die Messbrücke baut sich aus zwei parallelgeschalteten Spannungsteilern auf R_1/R_1 sowie R_{DMS1}/R_{DMS2} , die je ein Potential auf A und B legen. Sind alle vier Widerstände gleich groß, befinden sich A und B auf gleichem Niveau, ähnlich einer ausgeglichenen Waage. In diesem Fall ist die Differentialspannung $U_{diff} = 0 [V]$, folglich dem Ohmschen Gesetz (3) fließt ebenso kein Strom $I [A]$.

$$I = \frac{U}{R} \quad (3)$$

Idealerweise werden für den Aufbau einer Messbrücke vier gleiche DMS derselben Charge verwendet, so werden Abweichungen (Verstimmungen) im unbelasteten Fall möglichst gering gehalten. Die Verwendung zweier DMS in einer Halbbrücke hat immer noch den Vorteil, Temperatur bedingte Störungen weitestgehend auszugleichen. Für die beiden übrigen Widerstände wurden Hochpräzisionswiderstände eingelötet.

Nach der Annahme vier gleichwertiger Widerstände (je 120Ω), gelangt man unter Anwendung des 1. und 2. Kirchhoffschen Gesetzes

(Summe aller (n) ein und -ausgehenden Ströme I um einen Punkt ist Null)

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0 \quad (4)$$

(Summe aller Spannungen U der Anzahl n einer Masche ist Null)

$$\sum_{k=1}^n U_k = 0 \quad (5)$$

zu der Brückengleichung:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_{DMS1}}{R_{DMS2}} \quad (6)$$

Der Niveauunterschied zwischen A und B (Differentialspannung U_{diff}) lässt sich durch

$$U_{diff} = U_A - U_B \quad (7)$$

beschreiben.

Die Spannungen an den Punkten A und B lassen sich nach dem allgemeinen Verhalten eines Spannungsteilers wie folgt berechnen (unbelasteter Fall).

$$\frac{U_{R1}}{U_{Ein}} \hat{=} \frac{R_1}{R_{ges}} \quad (8)$$

Speziell für diesen Fall:

$$\frac{U_B}{U_0} \hat{=} \frac{R_{DMS1}}{(R_{DMS1} + R_{DMS2})} \quad (9)$$

Umgestellt nach U_B :

$$U_B = \frac{R_{DMS1}}{(R_{DMS1} + R_{DMS2})} \cdot U_0 \quad (10)$$

Und analog für U_A :

$$U_A = \frac{R_1}{(R_1 + R_2)} \cdot U_0 \quad (11)$$

U_A und U_B eingesetzt in Gleichung (7) resultiert zu:

$$U_{diff} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_{DMS1}}{R_{DMS1} + R_{DMS2}} \right) \cdot U_0 \quad (12)$$

Angenommen die Feder wird nun gebogen, wächst nach Gleichung (2) R_{DMS1} um ΔR . R_{DMS2} schrumpft um ΔR , da er auf der gegenüberliegenden Seite der Feder eine negative Spannung erfährt. Ist $\Delta R \ll R_{DMS}$ und $R = R_1 = R_2 \approx R_{DMS1} \approx R_{DMS2}$, folgt:

$$\begin{aligned} U_{diff} &\approx \left(\frac{R}{R + R} - \frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R - \Delta R} \right) \cdot U_0 \\ &\approx \left(\frac{R}{2R} - \frac{R + \Delta R}{2R} \right) \cdot U_0 \end{aligned}$$

$$\approx \frac{\Delta R}{2R} \cdot U_0 \quad (13)$$

Mit dem Einsetzen von Gleichung (2)

$$U_{diff} \approx \frac{k \cdot \varepsilon}{2} \cdot U_0 \quad (14)$$

zeigt sich, dass die elektrische Differenzialspannung U_{diff} annähernd linear von der mechanischen Dehnung ε abhängt.

Eine volle Messbrücke (4 Dehnungsmessstreifen) hätte eine 1 im Nenner, eine viertel Messbrücke (1 aktiver Streifen) eine 4. Die volle Messbrücke hätte damit die doppelte Empfindlichkeit wie die verwendete Halbe. Weiter lässt sich erkennen, dass U_{diff} unmittelbar von U_0 abhängt. Schwankungen in der Spannungsversorgung haben demnach großen Einfluss auf die Messergebnisse und müssen durch eine angemessene Regelung ausgeglichen werden.

Für das Auslegen der Messelektronik fehlt noch die maximale Dehnung ε_{max} , die unter maximaler Belastung F_{max} der Federung auftritt.

In den Folgeschritten wird ε berechnet, dafür wird zuerst der Biegemomentverlauf $M(x)$ einer einzelnen Blattfeder ermittelt.

Abbildung 20 zeigt das Ersatzschaltbild der Blattfeder $c1$, welche in Abbildung 16 (Seite 26) wiederzufinden ist.

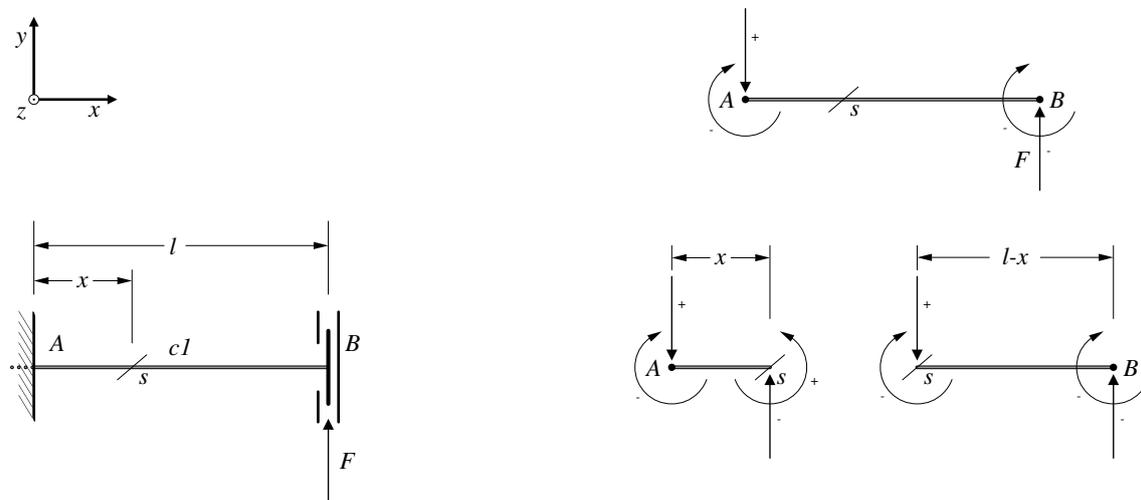


Abbildung 20: Ersatzschaltbild, Blattfeder [GeBü]

Durch die beidseitige Einspannung ist das System überbestimmt, daher wurde es an der Stelle s geschnitten. Mit den Gesetzen der statischen Mechanik werden nun die wirkenden Kräfte und Momente berechnet:

Äußere Kräfte,

$$\sum F_x = \underline{\underline{0}}$$

(da Lager B keine horizontalen Kräfte aufnimmt)

$$\sum F_y = 0 \longrightarrow F_A = F_B = \underline{\underline{F}}$$

äußerer Momente,

$$\sum M_z = 0 \longrightarrow M_A = M_B = \underline{\underline{\frac{F \cdot l}{2}}}$$

innere Kräfte,

$$\sum F_y(x) = 0 \longrightarrow F_A = F(x) = \underline{\underline{F}} \rightarrow \textit{konstant}$$

innere Momente,

durch Gleichsetzen der Momentensumme beider Schnitthälften

$$\sum M_z(x) = 0 \longrightarrow M(x) = M_A - F \cdot x = \underline{\underline{F \left(\frac{l}{2} - x \right)}} \quad (15)$$

Gleichung (15) beschreibt den Momenteverlauf (Biegemoment). Setzt man die Gleichung Null und stellt sie nach x um, erhält man einen neutralen Punkt auf $l/2$. An dieser Stelle sollte der Dehnungsmessstreifen nicht angebracht werden (da er dort nichts messen kann).

Hin zu den Einspannungen steigt das Biegemoment linear zu seinen Maxima. Um Störungen durch die Einspannung zu verringern, wurden die DMS mit 15mm Abstand angebracht, das entspricht der $1/2$ -fachen Breite der Blattfeder.

Um nun von dem Biegemoment zu der gesuchten Dehnung ε zu gelangen, macht man sich das Hookesche Gesetz zu Nutze. Demnach ist die Dehnung der im Material auftretenden mechanischen Spannung σ proportional. Gekoppelt ist sie über das materialspezifische Elastizitätsmodul (kurz E-Modul $E[\text{N}/\text{mm}^2]$).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (16)$$

oder nach ε umgestellt,

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (17)$$

(Quelle der Gesetzmäßigkeiten (16), (18), (19): [24])

Für ein Rechteckprofil, wie es die Blattfeder aufweist, lässt sich die Maximalspannung σ_{max} wie folgt berechnen.

$$\sigma_{max} = \frac{M_{by}}{w_y} \quad (18)$$

w_y ist hier das Widerstandsmoment um y , welches für ein Rechteck mit Breite b und Höhe h ,

$$w_y = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (19)$$

lautet.

Durch Einsetzen aller Elemente in Gleichung (17) kommt man zu:

$$\varepsilon = \frac{F(\frac{l}{2} - x) 6}{b h^2 E} \quad (20)$$

Da die Feder $C1$ dem Gesamt-Federsystem entnommen ist, muss die Kraft (F) zuvor auf diese umgerechnet werden. Zur Veranschaulichung der Kräfte sei hier auf Abbildung (21) verwiesen.

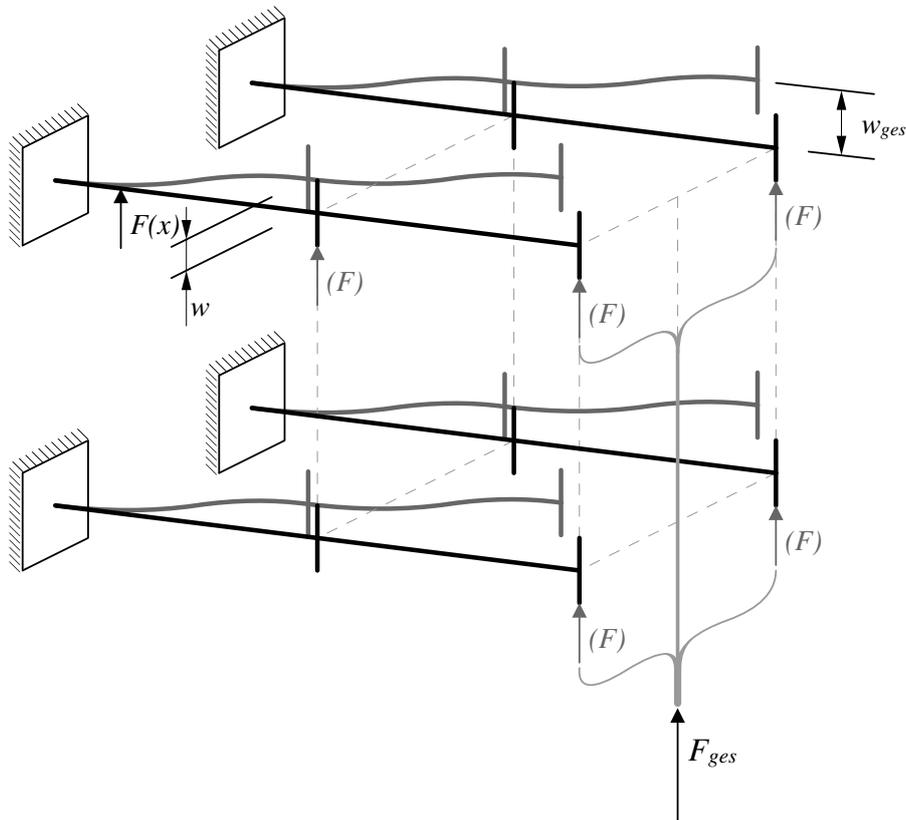


Abbildung 21: Federung, Kräfteverteilung [GeBü]

Die in Klammern stehenden Kräfte “(F) sowie $F(x)$ ” sind intern und dienen nur der Visualisierung. Die aufgefaltete Federung zeigt, dass es sich um vier parallel geschaltete Federn handelt. Die Gesamtkraft “ F_{ges} ” teilt sich damit auf und es folgt:

$$F = \frac{F_{ges}}{4} \quad (21)$$

Durch die horizontal geführten Einspannungen berechnet sich die Verschiebung w für $c1$ zu:

$$W = \frac{w_{ges}}{2} \quad (22)$$

Mit den Werten $l = 50 \text{ mm}$, $b = 10 \text{ mm}$, $h = 0,4 \text{ mm}$

$$F_{ges} = 20 \text{ N} \rightarrow F = \frac{20}{4} = \underline{\underline{5 \text{ N}}}$$

und einem E-Modul von $207,5 \text{ kN/mm}^2$ (Normfeder) erhält man an der Stelle $x = 15 \text{ mm}$ schließlich eine Dehnung von:

$$\frac{5 \left(\frac{50}{2} - 15 \right) \cdot 6}{10 \cdot 0,4^2 \cdot 207,5 \cdot 10^3} = \underline{\underline{9,04 \cdot 10^{-4}}}$$

Hiermit lässt sich nun nach Gleichung (2) (Seite 33) die maximale elektrische Widerstandsänderung berechnen. Nach Gleichung (14) (Seite 35) halbiert sich dieser Faktor allerdings noch einmal annähernd durch die verwendete Messbrückenschaltung.

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{k \cdot \varepsilon}{2} \approx \frac{2,05 \cdot 9,04 \cdot 10^{-6}}{2} \approx \underline{\underline{9,27 \cdot 10^{-4}}}$$

Der zu messende Widerstand ändert sich demnach maximal um ca. $1/1000$.

Durch die Speisespannung U_o ließe sich der Faktor (die Empfindlichkeit) erhöhen, allerdings sind die DMS nicht für größere Ströme geeignet. Im Gegenteil, um starke Wärmeentwicklung zu verhindern, muss die Messbrücke noch mit Vorwiderständen versehen werden.

Hier zeigt sich, dass die Wahl anderer DMS ihre Vorzüge hätte. Z.B. Messtreifen, auf Halbleiterbasis, mit k -Faktoren im 3-stelligen Bereich. Diese wurden allerdings erst lange nach dem aufwendigen Applizieren (mehrständiger Prozess unter hoher Gründlichkeit) der nun verwendeten DMS entdeckt.

5.6.1 Instrumentationsverstärker

Der Verstärker dient der Skalierung und Verschiebung des Messsignals für eine optimierte Nutzung der Messkarteneingänge.

Da noch jede Menge Zeit für die Entwicklung vorrätig war, wurde nach Absprache so verblieben, dass nur im Falle, dass ein einfach aufgebauter Verstärker nicht die gewünschte Funktion bringt, auf einen kommerziellen zurückgegriffen wird. Industriemessverstärker gibt es ab ca. 100 € (Platine ohne Gehäuse etc.), seine Bestandteile wie im Folgenden beschrieben schon für wenige Cent.

Der Messverstärker hat nachstehende Anforderungen:

- 1000-fache Verstärkung erreichen.
- Bestromen der Messbrücke.
- Dabei die Spannung nivellieren.
- Hochohmiger Spannungsabgriff der Messbrücke. (Ist auf Gleichung 8 (Spannungsteiler), Seite 34 zurückzuführen, da der Eingangswiderstand des Messverstärkers das Teilungsverhältnis mitbestimmt.
- Dem Ausgang ein Potential von -10 bis $+10 \text{ V}$ zur Verfügung stellen. (Nach dem Arbeitsspektrum der Messkarte (ohne erreichen dieser Grenzen).

- Wenn möglich; variable Verstärkungsrate.
- Justierbarer Nullpunkt.
- Filtern hochfrequenter Störsignale.
- Wünschenswert wären geringe Herstellungskosten.
- Eine kompakte Bauform. (Installation an bewegter Federung und somit kurze Messleitungen).
- Indikator für den Fall einer Überlastung.
- Indikator für den Betrieb.

Die Entwicklung setzte hier auf das Verknüpfen bewährter Schaltkreise, wie sie in Fachbüchern und vielfältig in Datenblättern zu elektrischen Bauteilen zu finden sind.

Prinzipiell baut sich ein Messverstärker aus drei Operationsverstärkern (kurz OP) auf. Zwei Eingangs-OP's, die als Impedanzwandler arbeiten und so den hochohmigen Eingang schaffen. Und einen Ausgangs-OP, der als Differenzverstärker arbeitet. Für das Verstärken der Messbrücke eignen sich besonders rauscharme OP's, diese sind schon für wenige Cent zu erwerben. Beispielsweise der OP; LM324, welcher mit zwei oder vier OP's in einem Chip angeboten wird. Aus dessen Datenblatt sei hier Abbildung 22 eingefügt.

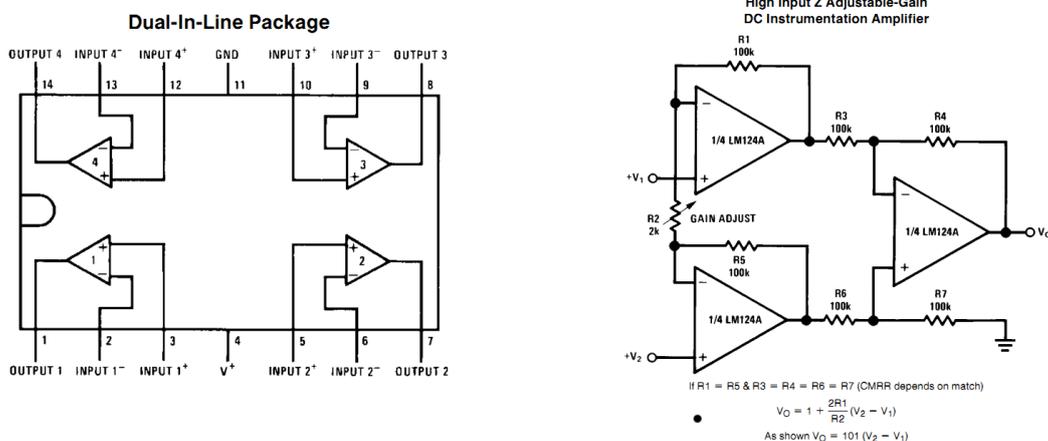


Abbildung 22: IC LM324, Quelle: [20]

Neben den rauscharmen OP's gibt es auch komplette Instrumentationsverstärker als integrieren Schaltkreis (IC). Beispielsweise der INA111, welcher für ca. 9 € zu erwerben ist. Neben den verschalteten OP's birgt das Bauteil auch hochpräzise (lasergetrimmte) Widerstände, welche für eine gute Funktion unerlässlich sind.

Für den Bau des Verstärkers wurde das Datenblatt es INA111 studiert und zunächst auf dessen Basis ein Schaltkreis konstruiert. Dies geschah mit dem Programm LT Spice, ein kostenloses Simula-

tionsprogramm der Firma Lienar Technologies aus Californien. Einen Screenshot der Entwicklung zeigt Abbildung 23.

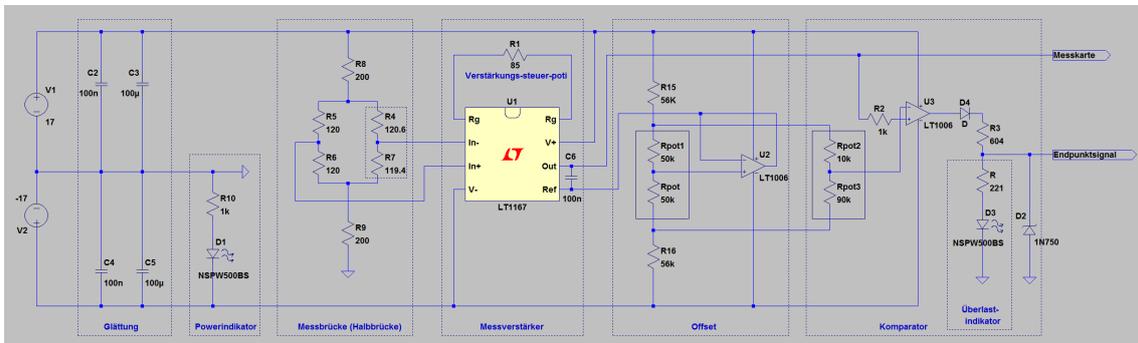


Abbildung 23: LT Spice Verstärkerschematik [GeBü]

Zentral gelegen ist der Verstärker IC, da sich der INA111 nicht ohne Weiteres in die Programm-bibliothek laden lässt, ist dort ein IC mit ähnlichen Parametern von Linear Technologies eingefügt. Für die Simulation kann die Messbrücke durch Variation eines Widerstandes künstlich verstimmt werden. Die Ausgangsspannung lässt sich dabei mit virtuellen Messspitzen abnehmen und in einem Zeit/Spannungsdiagramm darstellen. Mit Hilfe der Simulation wurden die Widerstände und Kondensatoren ausgelegt, sowie die elektrischen Ströme an sensiblen Stellen überwacht.

Um eine reale Schaltung aufzubauen wurde die schematische Zeichnung (23) mit dem Programm STL (Stripboard Layout Tool) in die gewünschte Form gebracht. Dieses Programm ist ausschließlich für das Gestalten von Lochstreifenplatinen gedacht. Es beinhaltet nur wenige Funktionen und ist recht zeitintensiv, erfüllt aber seinen Zweck. Abbildung 24 zeigt das finale Platinenlayout und die umgesetzte Elektronik.

Neben dem INA111 ist noch ein zweiter IC auf der Platine, dieser beinhaltet zwei Operationsverstärker über dem zum einen die Nullpunktverschiebung eingestellt wird, zum anderen wurde mit ihm eine Komparatorschaltung realisiert. Letztere dient zur Signalgebung im Falle einer Lastüberschreitung der Messeinrichtung (rote LED + 5V Signal out). Die gelbe LED zeigt den Betrieb an. Diese Funktion ist wichtig, da die Messeinrichtung keinerlei Betriebsgeräusche o.Ä abgibt und das Abschalten nach dem Gebrauch leicht übersehen wird. Die drei Präzisionspotentiometer (in der Abbildung blau) sind zum Einstellen der Verstärkung, des Nullpunktes, und der Grenzspannung des Komparators. In der LTSpice Simulation wurden noch ein paar Kondensatoren zur Filterung störender Frequenzen verbaut. Dabei auch teils mehrere Kondensatoren parallel, da je nach Kapazität ein anderes Frequenzspektrum geglättet wird. In der realen Schaltung führten diese allerdings teilweise zu mehr Störungen als sie beseitigten (Resonanz). Um bei einer Fehlfunktion die DMS nicht zu beschädigen wurde der Instrumentationsverstärker mit einem Messbrückendummy aus einfachen Widerständen getestet.

Ein Problem stellt die Spannungsversorgung der Schaltung da. Der Verstärker IC benötigt positive und negative Eingangsspannungen. Für diesen Zweck wurde eigens ein Netzteil hergestellt.

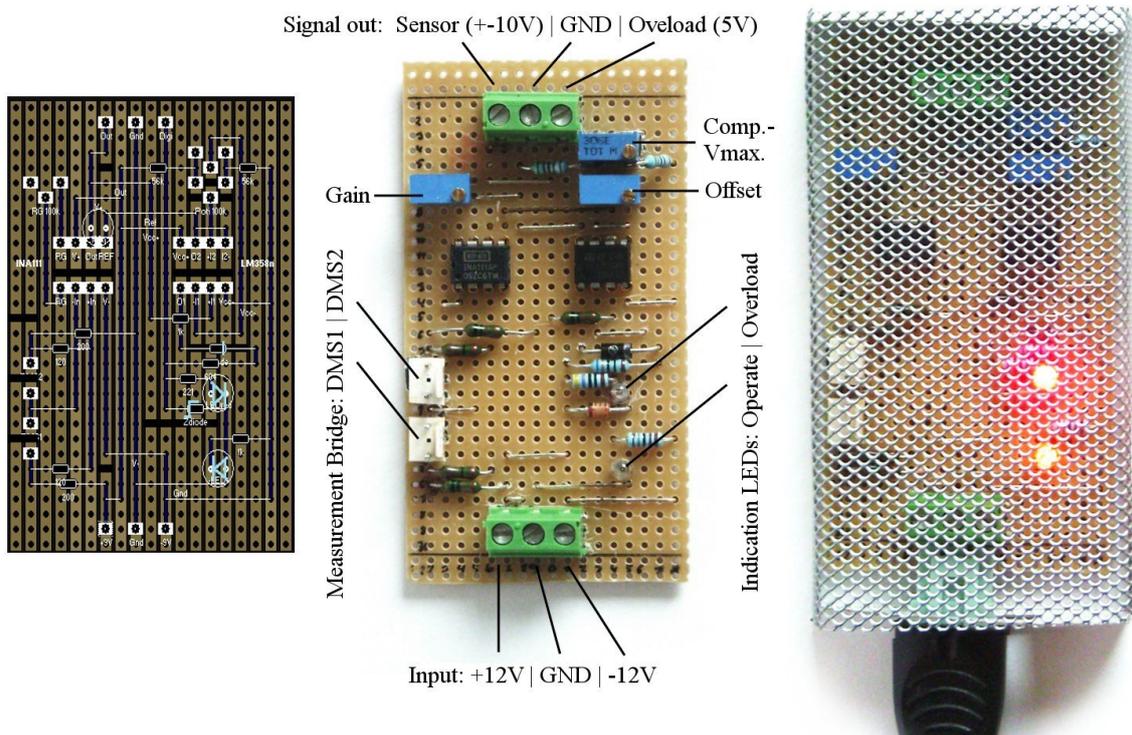


Abbildung 24: STL Layout, bestückte Platine, in Funktion mit provisorischer Schirmung [GeBü]

Quelle des verwendeten Schaltplans war dabei die Internetseite Elektronik-Kompendium.de [34] (dort zu finden unter symmetrische Ausgangsspannung). Realisiert wurde das Netzteil nach dem gleichen Ablauf wie der Verstärker. Aufgefallen ist, dass es die dort zum Einsatz kommenden integrierten Spannungsregler auch für negative Ausgangsspannungen gibt.

Auf Grund von Sicherheitsbestimmungen darf das Netzteil allerdings nicht im CITEC verwendet werden. Die eingeplante Zeit für das Vorhaben war bereits verstrichen, daher wurde vom CITEC aus der eingangs beschriebene industrielle Instrumentationsverstärker bestellt. Für die Spannungsversorgung wäre sonst noch eine Reihenschaltung aus Batterien, mit Mittelpotentialabgriff als Nullpunkt, oder wesentlich eleganter, die Verwendung eines sog. DC-DC-Wandlers in Betracht gekommen. Fotos des Netzteils, sowie der schematische Schaltplan finden sich im Anhang auf Seite 87.

5.7 Messdatenverarbeitung, LabView

Als Ergebnis der Verarbeitung steht das Messergebnis. Dieses soll in einem Diagramm als Messkurve dargestellt werden, so dass dem Betrachter die Sensoreigenschaften auf den ersten Blick klar werden. Siehe auch 5.8

Zur Messdatenerfassung steht die Umgebung LabView der Firma National Instruments zur Verfügung. Die elektrischen Analogwerte werden über einen Anschlussblock digitalisiert und durch

die Messkarte NI PCIe-6259 in einer virtuellen Schnittstelle zum Abruf zur Verfügung gestellt. Mit dem an Möglichkeiten sehr mächtigem Programm LabView können sogenannte virtuelle Instrumente in einer grafischen Programmierumgebung vernetzt werden. Erstellte Programmstrukturen lassen sich zu eigenständigen Programmen compilieren (z.B. Testprogramm.exe), um sie problemlos auf andere Rechnersysteme portieren zu können.

Das LabView Programm wurde unter Zuhilfenahme des Lehrbuchs "Einführung in LabView" [13] erstellt. Große Schwierigkeiten bereitete dabei die Nutzung des "Measurement and Automation Explorer (MAX)". Ein Unterprogramm, welches die Einrichtung der Ein- und Ausgabe zur Messkarte unterstützen soll. Ursache dafür ist, dass die LabView Version im CITEC (Version 9.0) auf das Betriebssystem Linux zugeschnitten ist. Zwischen der im Buch behandelten Windowsversion und der Linux Version von LabView 9.0 bestehen Unterschiede im Funktionsumfang, der Struktur (unter der Funktionen zu finden sind), und Bezeichnungen. Die Unterschiede sind gering, stören den Arbeitsfluss aber enorm.

Gelöst wurde das Problem durch Kopieren und Einfügen von Teilen aus Beispielprogrammen, die der LabView Hilfe beiliegen.

Zum Testen auf korrekte Funktion der Messkarte und deren Peripherie wurde ein kleines Programm erstellt, welches einerseits einen Ausgangskanal mit einer Sinusschwingung belegt, und andererseits einen Eingangskanal ausliest. Die Kanäle wurden (real) mit einem Widerstand gekoppelt. Das Ergebnis wurde am Monitor ausgegeben. Das Programm arbeitet dabei mit virtuellen Leitungen, die über MAX mit den realen verbunden werden. Wie auch die realen Leitungen können die virtuellen eine große Varianz an Strömen transportieren. Intern werden diese als (Daten) Typen bezeichnet. Zur Verarbeitung, bspw. zur Darstellung der Sinusschwingung in einem kartesischem Koordinatensystem, muss der Datentyp gewandelt werden (von String zu Array). Bewerkstelligt wird dies durch ein Funktionselement, welches zwischen die Leitung geschaltet wird. Teilweise erledigt LabView diesen Schritt auch automatisch. Komplexe Elemente, wie die zur Verarbeitung der MAX-Leitung, weisen noch eine extra Schnittstelle zur Fehlercodeübertragung auf. Diese führt von Element zu Element zu einer Fehlercode-Ausgabe, sofern eine solche eingebunden wurde. Eine weitere Möglichkeit der Fehlerbehandlung bietet der "Debug-Modus". Wird dieser aktiviert, läuft das Programm verlangsamt ab, so dass Datenflüsse und Störungen in der optischen Programmierumgebung erkannt werden können (veranschaulicht durch Laufflichter).

Für die Programmierung wurde zunächst ein grobes Struktogramm gezeichnet (Abbildung 25). Die Struktur wurde Segmentweise verfeinert und schließlich in Reinform programmiert.

Um die Datenmenge für die Auswertung möglichst kompakt zu halten, werden nur relevante Messpunkte aufgezeichnet. Die Kraft auf den Taktildsensor steigt von Null bis zum Maximum an und sinkt anschließend wieder auf Null. Das Programm berechnet aus der gewünschten Anzahl

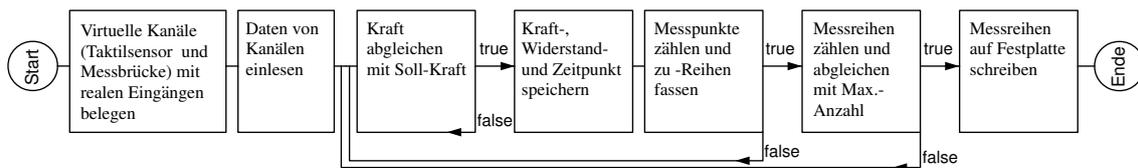


Abbildung 25: Struktogramm, LabView Datenakquise [GeBü]

der Messpunkte pro Kurve die Sollkräfte, bei dessen Erreichen ein Messpunkt abgespeichert wird. Zu dem Messpunkt zählt die Zeit, der Widerstand des Taktile Sensors, sowie die auf ihn wirkende Kraft. Die Messpunkte werden in ein 2-Dimensionales Array (Feld) geschrieben, dabei stehen die Messkurven in Spalten. Steigende und fallende Kraft sind durch eine Reihe Nullwerte optisch getrennt. Da es sich um drei Einzelwerte handelt werden pro Messung mit beliebiger Kurvenanzahl drei Arrays auf der Festplatte abgelegt.

Das Speichern in 2D-Arrays hat den Sinn, bei der Auswertung in Excel gut mit den Werten hantieren zu können.

Der Testlauf des Programms verlief erschreckend schlecht. Zwar wurden Daten von der Karte aufgenommen, allerdings war auf beiden Kanälen (für Widerstand und Kraft) dasselbe Signal. Wie sich sehr bald herausstellte war dies kein Fehler des erstellten Programms, auch nicht der Verschaltung der Hardware, sondern ein Treiberfehler zwischen der Messkarte und Linux. Da dieses Problem auf die Schnelle auch unter professioneller Hilfe nicht hätte behoben werden können, wurde zur Lösung auf ein Windows basiertes LabView System umgestellt. Dazu wurde eine Studentenversion erworben zusammen mit einer Auswertebox (National Instruments my DAQ), die mit dem Privatnotebook betrieben werden kann. Da die unkompilierte Linuxversion des Programms nicht auf Windows übertragbar war, musste die ganze Programmierarbeit noch einmal geleistet werden. Letztenendes hat sich diese Mühe gelohnt und das Programm zur Datenaufnahme arbeitet nun wie gewünscht. Ein Screenshot des Programms im Anwendungsmodus zeigt Abbildung 59 im Anhang Seite 88. In Abbildung 26 ist die bildliche Programmieroberfläche zu sehen, in LabView auch Blockdiagramm genannt.

Für die Programmierung muss man etwas umdenken, da nicht mit Variablen gearbeitet wird, wie es sonst gewohnt ist. Die Generierung der Messreihen und schließlich des Feldes geschieht mit ineinander gestaffelten For-Schleifen. In der inneren läuft eine While-Schleife, in der immer auf den nächsten zu speichernden Wert gewartet wird. Wird diese unterbrochen, zählt die darüber liegende For-Schleife hoch. Damit die Schleifen koordiniert arbeiten, sind einige Programmlogik Bausteine eingesetzt, sog. Boolesche Operatoren (and, or, xor, etc.).

Sehr hilfreich für die Wahl der Operatoren ist es, die eingehenden sowie die ausgehenden Werte gegenüber zu stellen. Anhand von Wahrheitstabellen kann dann durch Verknüpfen einzelner Operatoren das Logikproblem ohne großes Kopfzerbrechen gelöst werden.

Neben Excel könnten die Messwerte auch mit Diadem ausgewertet werden. Dieses Programm

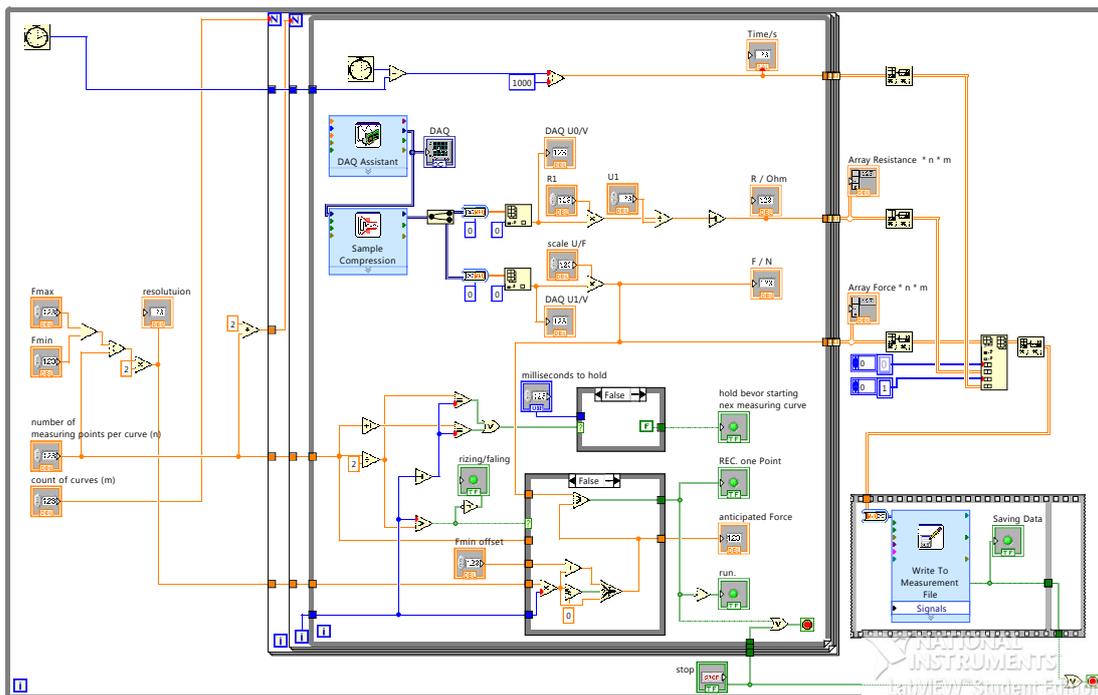


Abbildung 26: Programm, LabView Datenakquise [GeBü]

ist ebenfalls von National Instruments und für große Datenmengen ausgelegt. Nach einem kurzen Überblick wurde wegen fehlender Kenntnisse über das Programm aber darauf verzichtet.

5.8 Auswertung, Fehlerrechnung

Es folgen Zitate der DIN1319-4 [6].

“Ziel jeder Messung einer Messgröße oder gemeinsamer Messung mehrerer Messgrößen ist es, die wahren Werte der Messgröße zu ermitteln. Dabei werden Messeinrichtungen und Messverfahren auf Messobjekte, die Träger der Messgrößen, angewendet. Die Messung kann mit Hilfe eines Rechners simuliert sein. Die Messung umfasst auch die Auswertung der gewonnenen Messwerte und anderer zu berücksichtigender Daten. Ein einheitliches Verfahren für die Auswertung ermöglicht den kritischen Vergleich und die Kombination von Messergebnissen.”

“Wegen der bei der Messung wirkenden Einflüsse treten unvermeidlich Messabweichungen auf. Diese sind der Grund, warum es nicht möglich ist, den wahren Wert einer Messgröße genau zu finden. Lediglich das Messergebnis als ein Schätzwert einer Messgröße sowie die Messunsicherheit lassen sich aus den Messwerten und anderen Daten gewinnen und angeben, bei mehreren Messgrößen auch die gemeinsamen Komponenten der Messunsicherheit.”

Mathematisch lässt sich dies wie folgt beschreiben. (Quelle der nachstehenden Formulierungen

[27])

Zwischen Messwert x_m und wahren Wert x_w liegt immer eine Differenz, die als wahrer Fehler ε bezeichnet wird.

$$\varepsilon = x_m - x_w \quad (\approx \Delta x) \quad (23)$$

Da der wahre Fehler nicht bekannt ist, wird ersatzweise der geschätzte Fehlerwert Δx aus erfassbaren systematischen Fehlern und statistischen Schwankungen der Messwerte bestimmt. Der wahre Wert liegt dann mit großer Wahrscheinlichkeit im Intervall von;

$$x_m - |\Delta x| < x_w < x_m + |\Delta x|$$

angegeben wird er in der Form;

$$x_w = x_m \pm |\Delta x| \quad (24)$$

Der Wert, der mit großer Wahrscheinlichkeit die geringste Abweichung vom wahren Wert hat ist der Bestwert x_b . Dieser lässt sich nach einer Forderung von Gauß, dass die Summe der Abstandsquadrate minimal sein muss, berechnen;

$$\sum_{i=1}^n (x_i - x_b)^2 = \text{Min!} \quad (25)$$

Die Durchrechnung lässt folgen, dass dies der arithmetische Mittelwert \bar{x} ist.

$$x_b = \bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (26)$$

x_i ist hierbei das Ergebnis der i 'ten Messung.

Der Mittelwert allein sagt noch nichts über die Genauigkeit der Messung aus. Es fehlt ein Maß der Streuung der Einzelmessungen oder ein Wert für die Güte des Mittelwertes. Eine Charakterisierung der Güte einer Messreihe gibt die durchschnittliche Abweichung der Messwerte vom Mittelwert; die Standardabweichung s .

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (27)$$

Die Standardabweichung (auch mittlerer quadratischer Fehler o. Varianz bei s^2) ist damit ein Maß für die Zuverlässigkeit der einzelnen Messwerte innerhalb einer Messreihe und charakterisiert die Messgenauigkeit des verwendeten Messverfahrens.

Um den Einfluss der Anzahl n der Einzelmessungen mit in das Ergebnis einzubeziehen, wird der "mittlere Fehler des Mittelwertes" $\Delta \bar{x}$ gebildet.

$$\Delta \bar{x} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (28)$$

Der mittlere Fehler des Mittelwertes verringert sich mit wachsender Anzahl der Einzelmessungen. Für eine Halbierung des mittleren Fehlers bei gleicher Messunsicherheit müsste die Anzahl der Einzelmessungen allerdings vervierfacht werden.

Zur Steigerung der Messgenauigkeit könnte so entweder die Zahl der Einzelmessungen erhöht oder der Fehler der Einzelmessungen verringert werden. Dieses Erkenntnis ist wichtig für die Planung der Messreihen.

die Messgröße x , in diesem Fall der gesuchte Widerstand des Taktilsensors, lässt sich schließlich vollständig angeben in der Form:

$$x = \bar{x} \pm \Delta\bar{x} \quad (29)$$

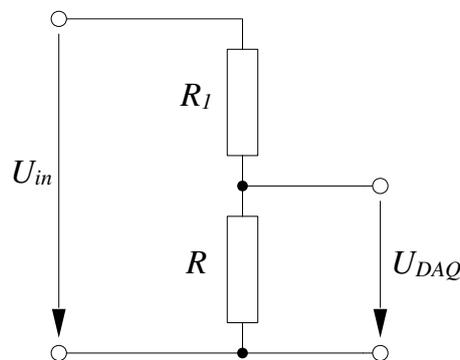


Abbildung 27: Spannungsteiler zur Widerstandsermittlung [GeBü]

Zu beachten ist noch, dass das Messergebnis sich zusammensetzt. Der Mittelwert muss daher aus den Mittelwerten der einzeln eingehenden Werte gebildet werden. Der Messgegenstand $R[\Omega]$ wird über einen Spannungsteiler (Abbildung 27) ermittelt, der sich ausgehend von Gleichung 8 (Seite 34) berechnen lässt. Umgestellt nach R ergibt sich demnach:

$$R = \left(\frac{U_{DAQ}}{U_{in} - U_{DAQ}} \right) \cdot R_1 \quad (30)$$

Für den Mittelwert von R , \bar{R} gilt daher:

$$\bar{R} = \left(\frac{\bar{U}_{DAQ}}{\bar{U}_{in} - \bar{U}_{DAQ}} \right) \cdot \bar{R}_1 \quad (31)$$

Die Formelzeichen sind hier dem Zweck entsprechend angepasst, U_{DAQ} ist dabei die Spannung die von der Messkarte akquiriert wird. R_1 ist ein konstanter Widerstand, der einen systematischen Fehler hervorruft. Angenommen seine Temperatur ist die Messung über konstant, bleibt auch der Fehler konstant. Der Fehler liegt, je nachdem wie präzise der Widerstand ist, in einem sehr kleinen Bereich $< 1\%$ und ist für das Ergebnis der Messung irrelevant, kann aber dennoch mit einbezogen werden. Die Spannungsquelle U_{in} wird von einem integrierten Spannungsregler nivelliert, dennoch ändert sich seine Spannung leicht in Abhängigkeit der Last. Hier wäre es sinnvoll, diese

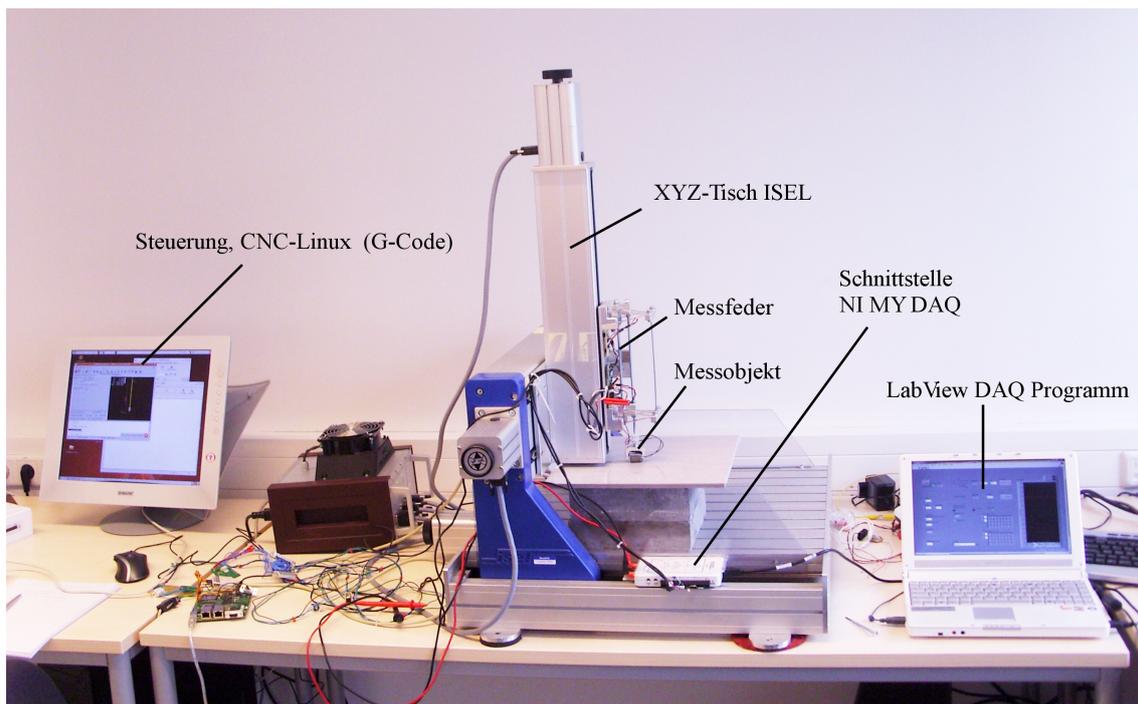


Abbildung 28: Laboreinrichtung [GeBü]

Spannung ebenfalls zu messen und in die Fehlerrechnung einzubeziehen. Die zur Verwendung kommende Messkarte bzw. Messbox hat allerdings nicht genügend analoge Eingänge, so muss der Fehler auf andere Weise ermittelt werden (Wertentnahme aus dem entsprechenden Datenblatt). Um den Fehler der Spannungsquelle möglichst gering zu halten, kann der Taktilsensor mit einem Vorwiderstand versehen werden. So kann aus dem belastenden niederohmigen Bereich in den höherohmigen Bereich gewechselt werden. Dies ist keine ideale Lösung, schafft aber dem Zweck entsprechend gute Abhilfe.

Der zuvor erwähnte Widerstand R_1 wird für die Messung so gewählt, dass er ungefähr mittig zwischen dem Minimum und Maximum des Sensorwiderstandes liegt.

Die Mittelwertbildung wird so nur für U_{DAQ} durchgeführt. Werte der anderen Größen werden den Datenblättern entnommen.

5.8.1 Messergebnisse

Abbildung 69, im Anhang S. 96 zeigt tabellarisch, die Messergebnisse eines Sensors, der nach Variante 1 (6.4.7 S. 61) aufgebaut ist. Der angegebene relative Fehler macht dabei die Qualität des Sensors (bei versch. Belastungen) besser deutlich, als der mittlere Fehler des Mittelwertes $\Delta\bar{x}$ (Gl. 28).

$$\text{relativer Fehler} = \frac{\Delta\bar{x}}{|\bar{x}|} \quad (32)$$

Die Standardabweichung s (Gl. 27), gilt dabei mit einer statistischen Sicherheit von 68,3%, sofern die Messreihe entsprechend groß ist und eine Normalverteilung der Messwerte nach Gauß vorliegt. Soll das Ergebnis mit höherer Wahrscheinlichkeit angegeben werden, wird die Standardabweichung mit 2 (für 95,4%), oder 3 (für 99,73%) multipliziert. Die Darstellung der Werte erfolgt hier mit 95,5%er Wahrscheinlichkeit, auch wenn die Anzahl der Einzelmessungen dafür etwas zu gering ist. Ziel ist es trotz der Umstände den Charakter des Sensors angemessen zu vermitteln.

5.8.2 Sensor Charakterisierung

Ergänzend zur numerischen Angabe der Messergebnisse stehen die Diagramme aus Abbildung 29. Das obere Diagramm zeigt in Säulen, die zweifache Standardabweichung und zusätzlich, die zugehörigen relativen Fehler. Hier ist gut zu erkennen, dass der Fehler bei einer Belastung zwischen $2N$ und $8N$ sein Maximum findet. Wie das untere Diagramm zeigt, ist hier auch die Hysterese am größten. Zurückführen lässt sich dies wohl auf die Eigenheiten des Stoffes, wie in 6.2.1 S. 53 näher erläutert wird. Der untere, der drei Graphen, stellt die Belastungskurve, der obere, die Entlastungskurve dar. Bei normalem betätigen des Taktilsensors, kann sein Widerstand so zwischen diesen Kurven verlaufen.

Mit geschickter Herangehensweise an die Auswertung der Sensordaten, kann sicher trotz der Hysterese ein gutes Ergebnis erzielt werden. Vorstellbar ist, hierbei den zeitlichen Verlauf der Belastung zu beobachten. Daraus ließe sich die Belastungsrichtung und deren Wendepunkte bestimmen, womit sich wiederum die relativ ungenauen Widerstände, zurück auf eine schärfere Abbildung der Betätigungskraft führen ließen. Da nicht Teil dieser Arbeit, wird an dieser Stelle auf die Taktilsensorauswertung nicht weiter eingegangen.

Insgesamt sind die Eigenschaften, die der getestete und hier aufgeführte Sensor bietet durchaus zufriedenstellend. Auch wenn der Fehler zum Teil groß ist, werden die Anforderungen an eine hohe Sensibilität, im Bereich des Erstkontakts, gut erfüllt. Mit steigender Kraft sinkt der Fehler zudem auf ein Maß, mit dem sich auch ohne Korrektur gut arbeiten lässt. Eine Zusammenstellung der Charakteristiken weiterer Sensorvarianten findet sich im Anhang auf Seite 97. Zur Kontrolle, ob die Messeinrichtung richtig gearbeitet hat, sind in einem weiteren Diagramm alle Messpunkte eines Sensortest abgebildet. Beispielsweise dazu steht Abbildung 71, ebenfalls im Anhang auf S. 98.

F400 (aus Abbildung 29), ist ein Parameter der Messeinrichtung. Er gibt an, mit welcher Geschwindigkeit der Sensor Betätigt wird. Der Ausdruck stammt aus dem G-Code Programm welches den XYZ-Tisch ansteuert. F400 bedeutet hier, verfahren mit 400mm pro Minute.

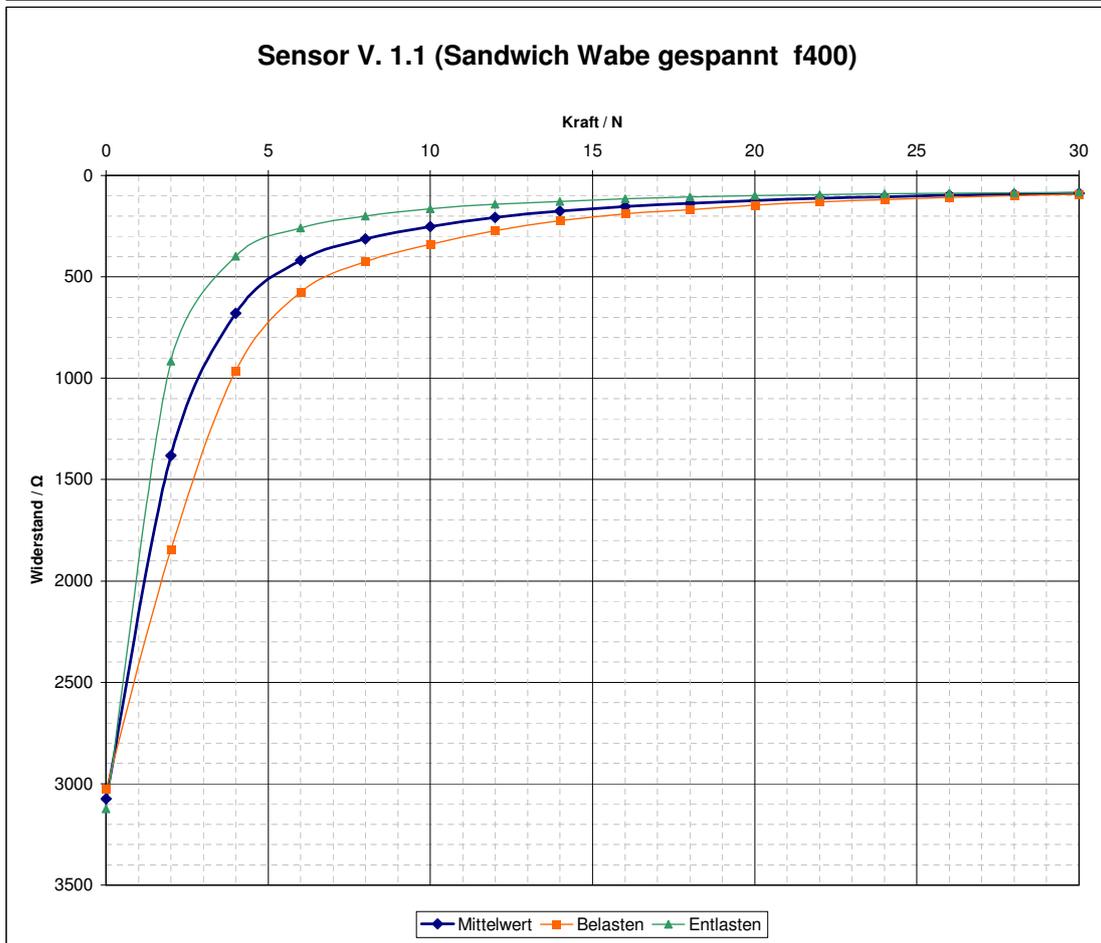
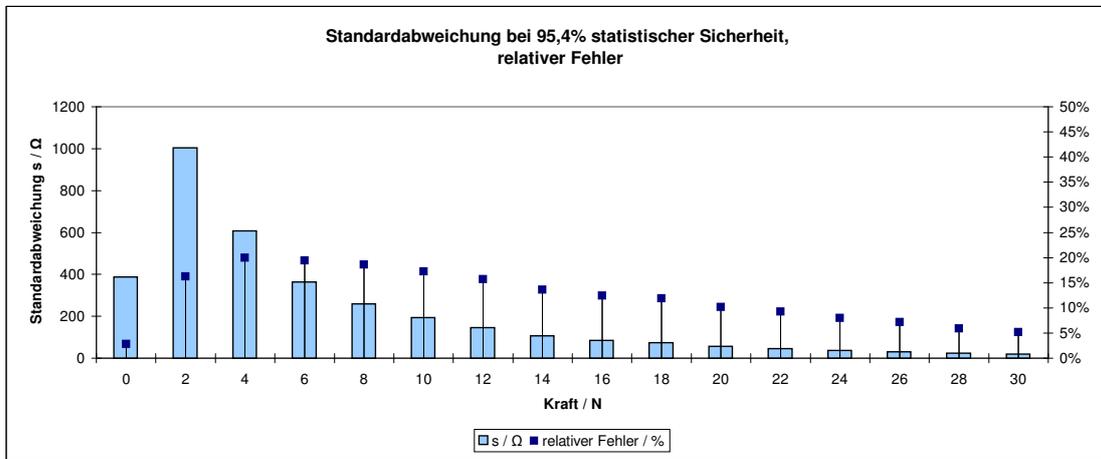


Abbildung 29: Charakteristik, Sensor V. 1 [GeBü]

6 Taktile Sensorik

6.1 Begriff: Taktile

Taktile bedeutet den Tastsinn betreffend, berührungssensitiv (medizinisch, biologisch). Herkunft ist "tangere" (berühren) aus dem Lateinischen [32]. Abbildung 30 zeigt die Einordnung des Tastsinns innerhalb der menschlichen Sinne.

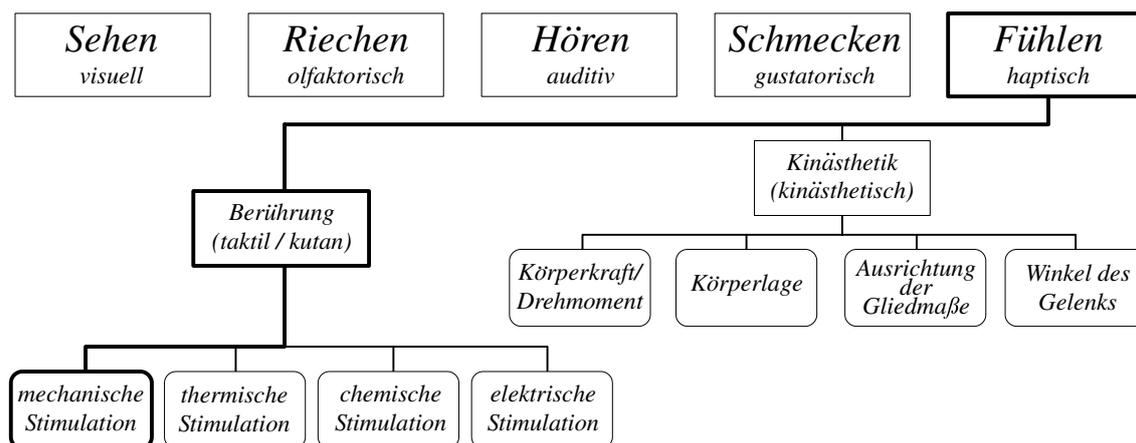


Abbildung 30: Fünf Sinne, erweiterte Quelle: [5]

Wie wichtig der Tastsinn ist, fällt auf, wenn er plötzlich fehlt. Als Beispiel ist sicher die Situation bekannt, im Winter mit gefrorenen Fingern den Haustürschlüssel zu greifen und das Schloss zu öffnen. Dies fällt trotz des unterstützenden Sehens relativ schwer. Wie in der Einleitung beschrieben, beschäftigt sich diese Arbeit mit dem mechanischen Tastsinn. Genauer wird die Kraft, die nahezu senkrecht auf die Sensorfläche wirkt, registriert.

Das natürliche Pendant bilden in der Haut liegende Mechanorezeptoren. In der Literatur [5] werden sechs Rezeptortypen beschrieben, die an der taktilen Aufnahme beteiligt sind. "Meissner-Körperchen (leichte Berührung), Merkel-Scheiben (Druck und Hautkrümmung, räumliche Auflösung 0,5mm), Pacini-Körperchen (besonders schnell ca. 300Hz), Ruffini-Körperchen, Haarfollikel und freie Nervenendigungen (schmerzempfindlich)". Ihre Funktionen ergänzen sich gegenseitig. Die höchste Dichte an Mechanorezeptoren befindet sich in den Lippen und den Händen. Bei den Händen wiederum ist der Daumen mit den meisten Rezeptoren pro Fläche ausgestattet. Bereiche, die besonders für das Ertasten geeignet sind werden, auch Fingerbeere oder terminaler Tastballen (med. Torulus tactilis) genannt. Diese Bereiche zeichnen sich durch besonders hohe Durchblutung aus und besitzen ein eigenes Fettpolster. Charakteristisch ist dort die Hautoberfläche mit den bekannten Riefen (Fingerabdruck Muster).

Ideal wäre es wohl, das natürliche Vorbild nachzukonstruieren. Dafür müssten druckempfindliche Zellen mit sehr kleinen Ausmaßen entwickelt werden. Diese müssten durch ein elastisches Substrat gebunden werden. Auf diese Weise oder ähnlich gibt es bereits Forschungsprojekte, al-

lerdings sind die Sensorzellen (sog. Taxel) noch relativ groß und das Substrat ist zumeist flexibel, aber nicht elastisch.

Anforderungen an die Taktile Sensorik sind:

- Sensorpunkte an jeder Fingerkuppe und wenn möglich auch in der Handfläche zur Aufnahme der Kraft, die zwischen Fingern und Gegenständen wirkt.
- Als Auflösung reicht ein Punkt pro Fingerkuppe, mehr wäre gut. Viele Punkte können falls nötig nachträglich zu einem zusammengefasst werden.
- Gleichzeitiges Tragen der Sensorik zum Cyberglove II.
- Es muss sicher gestellt sein, dass die Sensorpunkte während des Hantierens nicht zur Seite rutschen, auch wenn schwere Gegenstände angehoben werden.
- Möglichst kleine Erstkontaktschwelle aufweisen, ca. $0,1N$.
- Leitende Textilien verwenden, in Anlehnung an den Taktile Fingertip Glove (4.3.4 S. 12).

Zu Beginn wurde die Webseite mit der Bauanleitung des Sensitive Fingertip Glove “instructables.com” [30] unter die Lupe genommen. Ebenso die Seite “kobakant.at” [19], auf der viele weitere Experimente mit leitenden Stoffen, Garnen, Folien usw. zu finden sind. Diverse leitende Handschuhe, wie sie in der Industrie zum geerdeten Arbeiten verwendet werden, wurden ebenfalls wie die Links von meinem Supervisor zum Studium bereitgestellt.

Das Prinzip hinter dem Sensitive Fingertip Glove ist in 4.3.4 Seite 12 erläutert. Die besonderen elektrischen Eigenschaften des verwendeten Stoffes der Firma Eeonix sind in 4.5.1, Seite 15 dargelegt.

Für eigene Experimente wurden Stoffproben letzterer und weiterer Firmen aus den USA geordert.

Es stellte sich heraus, dass die Eigenschaften des nach der Bauanleitung gefertigten Sensors nicht den gestellten Anforderungen gerecht wurden. Der Sensor weist im unbelasteten Zustand starke Widerstandsschwankungen mit zackigen Ausbrüchen auf. Dies ist erst einmal nicht schlimm, da dieser Bereich bei der Auswertung abgeschnitten werden kann. Negativ aufgefallen ist die relativ geringe Druckempfindlichkeit, die zudem stark von der Einleitungsstelle abhängig ist. Ebenfalls problematisch ist das Verhalten bei Entlastung. Dabei steigt der Widerstand nicht gleich zu seinem Ausgangsniveau, sondern ändert sich erst nach einigen lockernden Bewegungen. Auch der Effekt, dass der Sensor beim Strecken seinen Widerstand ändert, ist in dem Maße, wie es hier beobachtet wurde, problematisch.

Beim wiederholten Schauen der zur Anleitung beigelegten Videos wurden die eigenen Ergebnisse noch einmal bestätigt. Dass die Sensoren in den Videos stark belastet werden, war zuvor nicht

aufgefallen.

Auf den Punkt gebracht, ist die Aufgabe, einen Handschuh zu entwickeln, der mindestens an seinen Fingerspitzen druck- bzw. kraftempfindliche Sensorflächen aufweist. Der Handschuh soll so dünn sein, dass er unter dem Cyberglove II getragen werden kann.

Der "Takttilhandschuh" lässt sich dabei in folgende Bereiche einteilen, die modulweise bearbeitet werden können, um jeweils ein überschaubares Maß an Problemstellungen vor sich zu haben.

- Takttilsensor
Da der Sensor des Sensitive Fingertip Glove nicht wie gewünscht funktioniert, soll ein neuer Sensor auf Stoffbasis entwickelt werden.
- Tägerschassis
Ein Handschuh, in den die Sensoren eingebunden werden. Er sollte möglichst atmungsaktiv und universell passend sein.
- Verkabelung
Sie soll sehr robust sein für Dauerbiege- und Zugbeanspruchung. Zudem ist eine Lösung für eine robuste Verbindung zwischen Sensor und Leiterbahn zu finden.
- Schnittstelle
Sie wird zur lösbaren Anbindung der Auswerteelektronik gebraucht. Lösungen zu finden sind hier für eine optimale Position (keine Konflikte mit dem Cyberglove II) und einer Zugentlastung der inneren Leiter.

6.2 Funktionsstruktur

Aus dem Ergebnis der Funktionsanalyse des Fingertip Sensors wurde eine relativ einfach aufgebaute Funktionsstruktur abgeleitet (Abbildung 31).

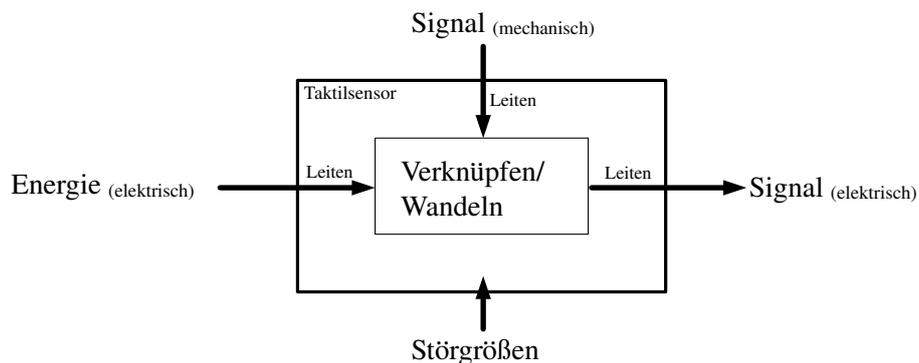


Abbildung 31: Funktionsstruktur, Sensitive Fingertip Glove [GeBü]

Die Funktion des Verknüpfens (elektrische Energie mit dem Signal) übernimmt dabei der piezoresistive Stoff (4.5.1 Seite 15). Das eingehende mechanische Signal entspricht der Kraft, die

auf den Sensor wirkt. Das ausgehende Signal wird für die Auswerteelektronik stets in elektrischer Form benötigt. Für den Fall, dass ein Sensorprototyp auf nicht elektrische Weise arbeitet, müsste das Signal nachträglich gewandelt werden. Die eingehende elektrische Energie ist Hilfsenergie, die als Träger des Signals anzusehen ist. Die Störgrößen können z.B. Temperaturänderungen oder Feuchtigkeit sein. Diese müssen unter Umständen isoliert werden.

Die Funktionsstruktur alleine, beschreibt den Sensor nicht sonderlich detailliert. Die zentrale Funktion des Verknüpfens muss daher weiter aufgeschlüsselt werden. Dazu wurde sie in ein elektrisches Schema übersetzt, zu sehen in Abbildung 32.

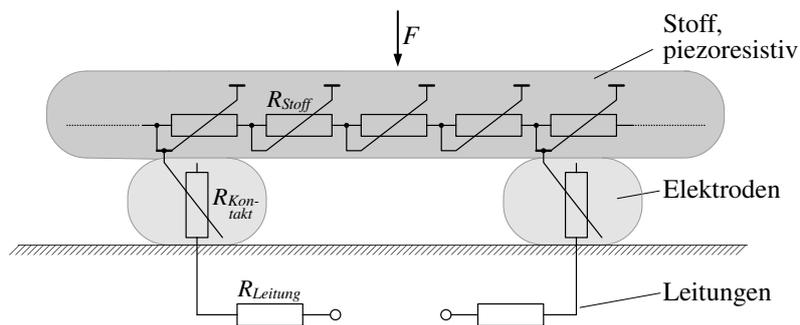


Abbildung 32: Schematik, Sensitive Fingertip [GeBü]

6.2.1 Stoffproblematik

Der Stoff weist bei genauerer Betrachtung eine hochgradig inhomogene Oberfläche und Volumen auf. Die Oberfläche könnte auch als sehr rau angesehen werden. So wäre die Kontaktstelle zwischen Stoff und Elektrode noch einmal ein eigenes Ersatzschaltbild wert. Gerät der Stoff mit einer Elektrode zusammen, bilden erst wenige einzelne Fasern Brücken. Jede Faser kann dabei als Widerstand angesehen werden, unter größerem Druck kommen mehr Brücken zustande, was sich wie eine Parallelschaltung von Widerständen auswirkt, der Widerstand sinkt also mit steigender Kraft an der Kontaktstelle. Kennzeichnend dafür ist der Kontaktwiderstand, der als Potentiometer abgebildet ist. Eine weitere Eigenschaft, die durch das Material hervorgerufen wird, ist, dass sich die einzelnen Fasern ineinander verschränken, wenn sich der Stoff unter Druck verformt. Das führt zu einer größeren Hysterese, da sich die Verschränkungen nicht gleich wieder lösen. Auf Zug spielen wohl mehrere Prozesse gemeinsam in dem piezoresistivem Stoff zusammen. Insgesamt fällt der Widerstand dabei. Steht der Stoff nicht unter permanent leichter Zugspannung, wirft er wahllos Falten, dies ist bei der Sensorkonstruktion zu beachten. Da der Stoff einen Oberflächen- bzw. volumetrischen Widerstand besitzt und der Strom immer den Weg des geringsten Widerstandes nimmt, ist bei der Einbindung des Sensors Obacht zu geben. Wie bei dem Sensitive Fingertip Glove, wo die Nähte durch den Piezostoff gehen und so stellenweise seine Leitfähigkeit ändern. Hierbei ist der Abstand der Naht entscheidend.

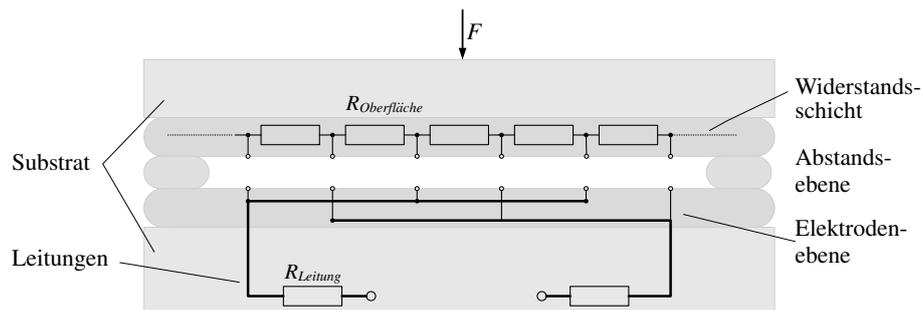


Abbildung 33: Schematik, Force sensing Resistor [GeBü]

6.3 Force Sensing Resistor (FSR)

Neben dem Sensitive Fingertip Glove wurde auch die Funktion des FSRs genauer betrachtet. Dieser setzt sich aus drei Ebenen zusammen. Die unterste ist die Elektroden Ebene. Die Elektroden selber, bestehen aus vergoldetem Kupfer oder einer Silber-Polymer Dickfilm Tinte, die auf das Kunststoffsubstrat (PET, FPC oder PCB) aufgetragen wird. Die mittlere Ebene bildet einen Abstandshalter, der gleichzeitig die Funktion erfüllt, alle Ebenen zusammenzuhalten. Er besteht aus einem Acryl basierten Klebstoff. Die Schichtdicke der Abstandsebene beträgt zwischen $0,03\text{mm}$ und $0,1\text{mm}$. Der aktive Sensorbereich, sowie ein Kanal für den Luftdruckausgleich sind in der Ebene ausgespart. Die oberste Ebene ist mit einer Widerstandsschicht bedruckt, bestehend aus einer Kohlenstoff basierten Tinte. Das Substrat ist dasselbe wie das der untersten Ebene. Die aktive Sensorfläche besteht so aus einem Elektrodenpaar, das ineinander verzahnt ist (typische Vergabelung, wie sie auch von Mikrotastern bekannt ist), einer Isolation aus Luft und der Widerstandsschicht. Bei Belastung des Sensors wölbt sich die obere Ebene nach innen. Ist die wirkende Kraft hoch genug, wird durch die Widerstandsschicht eine Brücke zwischen den Elektroden geschlossen. Je höher die Kraft nun steigt, desto größer ist die Kontaktfläche zwischen Widerstandsebene und Elektroden. So werden zwischen den Elektrodenzähnen immer mehr Brücken geschlossen, dies kommt einer Parallelschaltung von Widerständen gleich. Der Einzelwiderstand berechnet sich dabei aus dem Oberflächenwiderstand der Widerstandsschicht, mal dem Abstand der Elektroden. Der Sensor ist dafür ausgelegt, auf eine feste Unterlage aufgeklebt zu werden. Betätigt werden sollte er nur mit weichen Objekten oder dem Finger, da sich sonst die beschriebene Wölbung nicht korrekt bildet. Spitze, harte Gegenstände können den Sensor beschädigen. Abbildung 33 zeigt das schematische Ersatzschaltbild des FSRs.

6.4 Morphologischer Kasten

Für die Entwicklung alternativer Sensoren wurde die Funktionsstruktur weiter aufgefächert und die einzelnen Funktionen in die erste Spalte einer Tabelle übertragen. In den Reihen wurden zu der jeweiligen Funktion diverse Möglichkeiten der Funktionserfüllung eingetragen. So bildete sich der sog. morphologische Kasten. Durch Bedacht gewählte Verknüpfung der Funktionen kann man nun neue Sensorvarianten schaffen. (Bezeichnungen der Varianten sind bedingt durch die Struktur

des morphologischen Kastens im Folgenden nicht in numerischer Reihenfolge)

Funktion	Effekt (-Träger)				
	Litze	Lahn Faden	leit. Stoff	leit. Silikon / -Lack	(Kupfer) Folie
Leiten (Elektroden)					
Verknüpfen/Wandeln	Piezores.	FSR-Funktion	Sandwich	Sandw.-Stapel	FSR-Stapel
Topologie d. Elektroden	lin. verzahnt	Zickzack	Serpentinen	lin. multi Pol	Zickzack multi Pol
Isolation/Abstand	Waben	Karo	Noppen	Nählschlaufen	Fäden
Variante	1	2	3	4	5

Abbildung 34: Morphologischer Kasten [GeBü]

6.4.1 Variante 3

Variante 3 aus Abbildung 34 ist durch eine graue Linie abgehoben, da sie keine potentielle Variante für den Taktilsensor darstellt. Interessant ist hier aber, dass dies derselbe Aufbau ist, wie er bei resistiven Touchpads zu finden ist. Bei resistiven Touchdisplays besteht die Folie (der Leiter) aus einer Aluminiumverbindung (ZnO:Al) mit bestimmten Oberflächenwiderstand. Die abstandhaltenden Noppen sind dabei mit bloßem Auge nicht mehr wahr zu nehmen. Für die Registrierung der Position sind die Folienleiter in Längsstreifen unterteilt, die in zwei Ebenen orthogonal zueinander stehen. Diese werden abwechselnd von der Elektronik abgetastet. Pro Streifen ergeben sich so zwei Widerstände (Anfang bis Druckpunkt und Druckpunkt bis Ende). Mit den insgesamt vier Widerständen kann so die horizontale und vertikale Position aufgenommen werden.

Es wäre zu überlegen, ob dieses Funktionsprinzip auch für die Stoff basierten Sensoren anwendbar ist, und somit eine Vielzahl an Einzelsensoren zu imitieren.

6.4.2 Variante 2

Variante 2 (Abbildung 35) ist dem Fingertip Sensor nachempfunden. Das Funktionsschema ist dasselbe, nur wurde statt des Stoffs als Elektrode eine feine Litze ausgewählt. Mit diesem Typ wurden einige Experimente gemacht, die Litze wurde dabei variiert, sowie deren Topologie und die Sorte des piezoresistiven Stoffes (4.5.1 S. 15). Ziel bei den Proben war es, den optimalen Abstand der Elektroden zu ermitteln, sowie deren Dehnbarkeit bei verschiedenen Sticharten. Eine Grafik mit diversen Mustern für die Elektroden ist im Anhang zu finden (Abbildung 60 S. 88). Zu der Verarbeitung sei an dieser Stelle auf Abschnitt 6.4.3 verwiesen. Wegen der sich darin beschriebenen Probleme wurden nicht alle für sinnvoll gehaltenen Elektrodenmuster hergestellt. Die verwendete Litze und deren Vorteile sind in Abschnitt 4.6.1 S. 17) beschrieben.

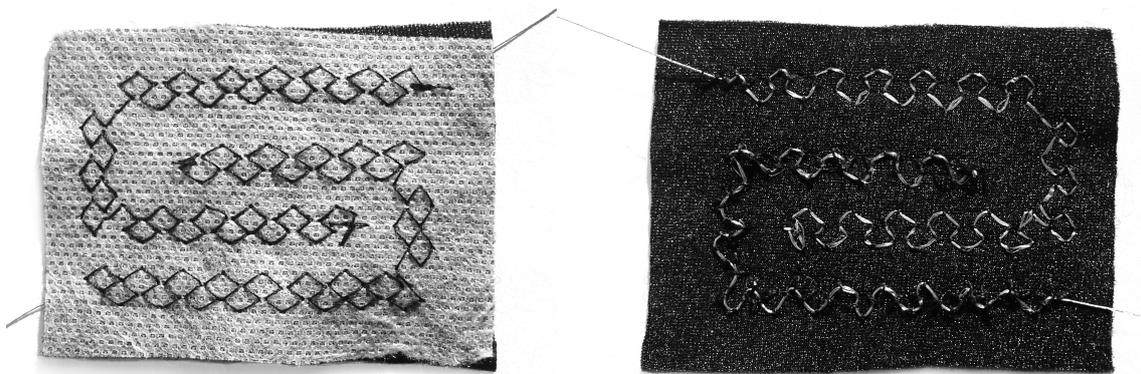


Abbildung 35: Sensorvariante 2, Serpentin Muster (Rückseite mit wasserlöslichem Stickfließ) [GeBü]

6.4.3 Nähen

Erste Versuche wurden per Hand mit Nadel und Faden bzw. Litze gemacht. Die Ergebnisse waren nicht zufriedenstellend. Die Naht oder das Stickmuster sind dabei trotz hoher Konzentration unregelmäßig ausgefallen. Daher erschien, den kompletten Sensorhandschuh oder lediglich die Elektroden auf diese Weise zu erstellen, unpraktikabel. Weitere Versuche wurden bei einer Nähmaschinen Reparaturwerkstatt gemacht (Kappe, Bielefeld). Die Resultate für gradlinige Bahnen mit leitendem Garn (Litze) sind durchaus brauchbar, allerdings sind kompliziertere Formen auch mit einer Nähmaschine schwierig herzustellen. Problematisch ist die Position der Start und Endpunkte exakt zu treffen, ebenso ist das Drehen des Stoffes aufwendig. Damit überhaupt auf dem elastischen Stoff (Lycra) genäht werden kann, muss er stabilisiert werden. Dies kann entweder durch eine Unterlage (bspw. Stickfließ) geschehen oder der Stoff muss auf Spannung in einen Rahmen fixiert werden.

Die Nähmaschine mit der nun gearbeitet wird (Pfaff hobby 721), wurde aus eigenem Interesse teilweise zerlegt, gereinigt, neu justiert und geschmiert. Die Nähmaschine ist ein kleines mechanisches Wunder. Angetrieben wird sie von einem Elektromotor, der über ein Fußpedal gesteuert,

seine Kraft mit einem Zahnriemen überträgt. Die Nadel erhält ihre typische Bewegung von einer Kurbelwelle, die durch den ausgelegten Arm der Maschine führt. Die Naht entsteht durch zwei Fäden, den sog. Ober- und Unterfaden. Der Oberfaden wird über einige Ösen bis durch das Nadelöhr geführt. Der Unterfaden befindet sich in einer kleinen Spule im sog. Umlaufgreifer. Das Prinzip, um die Beiden Fäden und den Stoff zu verbinden, verläuft wie folgt. Die Nadel samt Faden durchdringt den Stoff und taucht bis in die Nähauflage ein. Während die Nadel wieder zurückfährt, wird der Stoff von dem sog. Nähfuß niedergehalten. Unter dem Stoff bildet der Oberfaden so eine kleine Schlaufe, die sogleich von dem Umlaufgreifer erfasst wird. Der schalenförmige Greifer hat dafür eine angeschliffene Spitze, die direkt oberhalb des Nadelöhrs vorbeifährt. Der Trick, der nun angewendet wird, verdreht (verknötet) den Ober- mit dem Unterfaden. Dafür dreht der Umlaufgreifer sich bis über den Zenit der Schlaufe, so dass diese beim Straffen selbständig den restlichen Weg über den Umlaufgreifer rutscht. Damit dies funktioniert, wird der schalenförmige Umlaufgreifer mit seiner innen liegenden Spule von einer federnd gelagerten Nase geführt (gedreht), an der der Faden zur rechten Zeit vorbei gleiten kann. Der Greifer läuft also nicht komplett um, sondern nur ca. 180°. Der umlaufende Oberfaden wiederum wird durch einen Hebel am Ausleger der Nähmaschine nachgezogen. Alle Teile dieser mechanischen Einheit (Abbildung 36) sind poliert, damit der Faden ungehindert hinübergleiten kann.

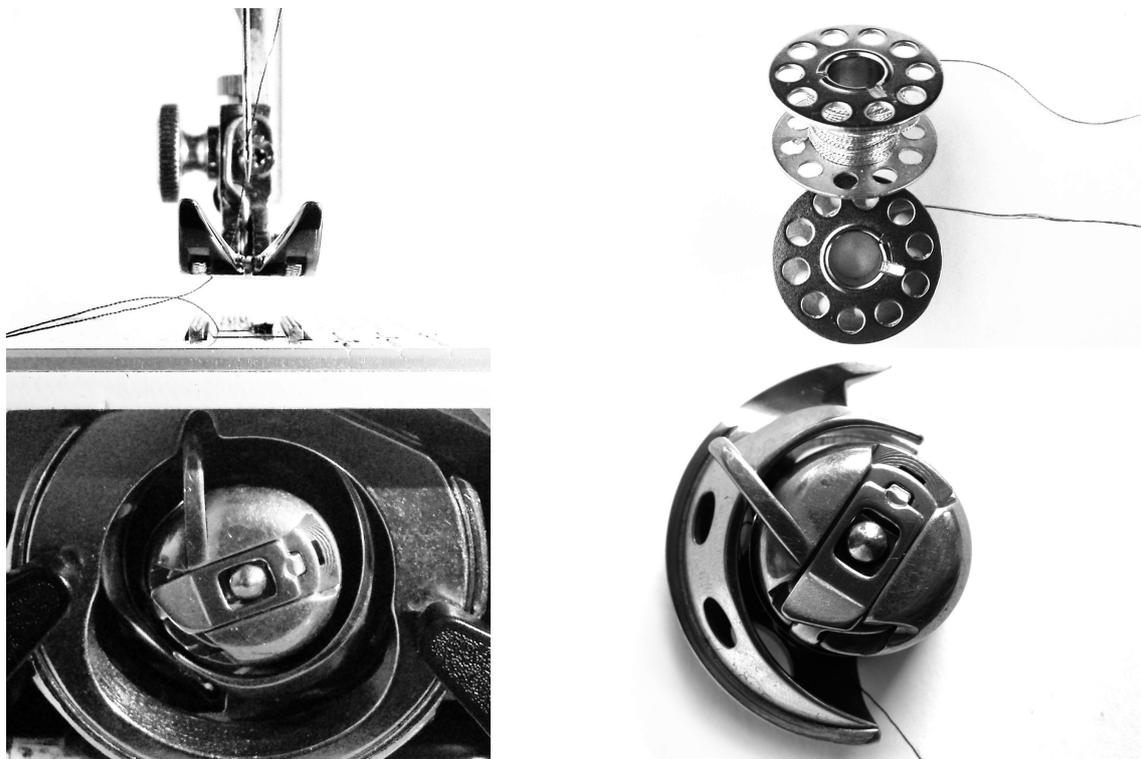


Abbildung 36: Nähmaschine, Umlaufgreifer mit Kapsel, Spulen [GeBü]

Die Erkenntnisse der Demontage trugen einer korrekten Justierung bei. Ebenso wurde somit aus

festem Klebeband die Nähauflage dahingehend modifiziert, dass sich die beschriebene Schlaufe auch bei ungünstigen Bedingungen bildet (allerdings nur für lineare Nähte). Das Klebeband bildet dabei eine exakte Maske für die Nadel. An der Unterseite des Klebebands, welches auf der Nähauflage appliziert ist, verhakt sich der Faden gut, und die Schlaufe bildet sich sauber aus. So ist es möglich den elastischen Stoff ohne weitere Hilfsmittel zu nähen.

Wichtig ist auch das Einstellen der Fadenspannung. Durch die Spannungen kann die Position des Knotens bestimmt werden. Je nachdem welcher Faden stärker gespannt ist, liegt der Knoten auf der Ober- oder Unterseite des Stoffes. Bei den Mustern ist zudem darauf zu achten, dass die Spannung den Stoff nicht zu einer Wulst zusammenzieht.

Die Stichmuster wie Zickzack oder Serpentine sind spezielle Elastikstiche. Wird der Stoff gedehnt, ziehen sich die Muster trotz des relativ steifen Garns weitestgehend auseinander. Die Nähmaschine erstellt diese, indem die Hubachse, an der die Nadel befestigt ist, nach links ausgelenkt wird, nach rechts wird sie durch eine Feder zurückgezogen. Die Muster sind auf Nockenscheiben kodiert, die von einem verstellbaren Läufer abgetastet werden. Dabei spielen die Auslenkung der Nadel und des Transporters (Vorschubeinheit unter dem Nähfuß) zusammen. Die Stichweite wie die Breite beim Zickzackstich wiederum ist raffiniert durch die Verlagerung des Drehpunktes der Läufer gelöst.

Neben dem beschriebenen Mechanismus sind noch weiter interessante Funktionen in der Maschine verborgen, auf deren Beschreibung wird hier mangels Relevanz aber verzichtet.

Weiter lässt sich aus der Funktion ableiten, dass die Litze oder der Lahnfaden, der verwendet werden soll, nur als Unterfaden mit der Maschine verarbeitet werden kann. Als Oberfaden wäre die Gefahr des Verhakens im Nadelöhr zu groß, ebenso könnte der Leiter leicht wegen der hohen Biegebeanspruchung brechen.

6.4.4 Stickautomat

Als Alternative zu der herkömmlichen Nähmaschine steht der sog. Stickautomat. Diesen gibt es in verschiedenen Ausführungen, für die Industrie (z.B: zum Gurte vernähen), für professionelles Motivsticken (Kappen Tshirts etc.) und für den Privat-Bereich. Der letztere ist für das Sticken des Sensors besonders wegen seiner Funktionsweise und den verhältnismäßig niedrigen Preis interessant. Der Automat setzt sich aus zwei Teilen zusammen, einer computergesteuerten Nähmaschine und einer schrittmotorgetriebenen XY-Einheit, die auf Höhe der Nähauflage angebracht ist. Die Hersteller bieten für die Erstellung der Stickmuster jeweils eigene zur Maschine abgestimmte Software an. Dabei ist der Funktionsumfang gestaffelt von der Verknüpfung vorgegebener Muster über automatisches Umwandeln von Fotos in Muster bis zur Software, die das einzelne Setzen von Stichen erlaubt. Die letztere und angenommenerweise programmiertechnisch simpelste Funktion ist leider die teuerste. Sie übersteigt bei den Herstellern Bernina (Schweiz) und Brother (USA) mit über 2400 € sogar deren Maschinenpreis. Die Maschine selbst findet sich gebraucht und frisch überholt samt Stickmodul bereits für 700 €. Für eine neue Maschine ist mit ca. dem doppelten Preis zu rechnen.

Da der Erwerb der überteuerten Software nicht in Frage kam, wurde nach Alternativen gesucht. Zunächst wurde in der Werkstatt “Kappe” angeboten, die dortigen Maschinen verwenden zu können. Als die Umsetzung akut wurde, stellte sich leider heraus, dass der Werkstatt sowohl die Zeit als auch das Know How im Umgang mit der Software fehlte. Das selbständige Arbeiten mit dem System wurde nicht gestattet. Gespräche mit Bernina, Dürkopp Adler (Bielefeld) und verschiedenen Händlern und Werkstätten aus der Region führten ebenfalls nicht weiter. So wurde die Idee des maschinellen Stickens fallen gelassen.

Der Gedanke, die vorhandene Maschine mit dem im CITEC stehenden XYZ-Tisch zu kombinieren, wurde mangels Zeit nicht weiter verfolgt.⁵

Neben dem Stickern der Elektroden war auch angedacht, die kompletten Sensoren samt Leiterbahnen und Handschuh aus mehreren Lagen maschinell exakt zusammen zu fügen. Die Ausarbeitung der dreidimensionalen Form ließe sich anschließend durch Abnähen überflüssigen Materials bewerkstelligen.

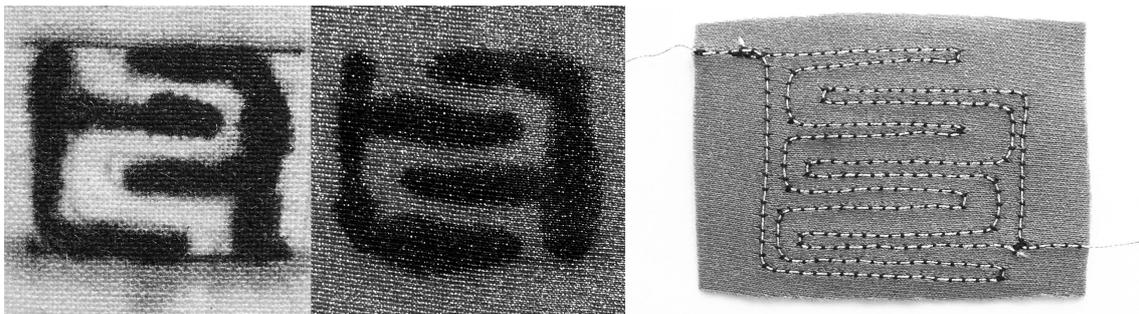


Abbildung 37: Leitender Silikonkautschuk auf Flachs / Lycra, Bsp. Variante 4 [GeBü]

6.4.5 Variante 4

Sie setzt sich von Variante 2 dadurch ab, dass ein Abstand zwischen Elektroden und piezoresistivem Stoff geschaffen und nach dem Prinzip des FSRs (6.3 S. 54) gearbeitet werden soll. Dies ist durch die Schlaufen des nichtleitenden Oberfadens zu gewährleisten. Stellt man sich vor, die Lagen des Sensors stehen unter leichter Zugspannung, müssten die “Erhebungen”, die durch die Schlaufen entstehen, ausreichen, um den Stoff abzuheben. Für dieses Prinzip eignet sich der Lahnfaden als Leiter besser, da er sich im Gegensatz zu der Litze nicht so leicht platt drücken lässt. In den Versuchen zu dieser Variante wurde die Stichweite, und somit die Schlaufenzahl pro mm Leitung variiert. Die Funktionsweise des FSRs, wie sie dieser Variante im morphologischen Kasten zuzuordnen ist, ergibt sich durch den Abstand und die Verzahnung der Elektroden. Durch die Piezoresistenz wird die Sensitivität noch einmal erhöht. Es spielen also mehrere Effekte zusammen.

⁵Nötig wäre: - Anbinden eines Schrittmotors an den Zahnriemen, und Endschalter an die Hubachse der Maschine.
 - Montieren eines Stoffspannrahmens an den Tisch und festes Ausrichten der beiden Gerätschaften zueinander.
 - Programmieren der Bahnen in G-Code. Mögliche auftretende Probleme dabei wären vielfältig.

Fehlfunktionen der Variante 4 entstehen durch die, für die eigentliche Funktion nötigen Erhebungen. Sie führen in dem piezoresistenten Stoff zu Druckspitzen, die das Ergebnis verfälschen. Ein weiteres Problem ist, dass sich der Stoff trotz Zugspannung an den Erhebungen nach einigen Betätigungen dauerhaft ausformt. (S. Abbildung 37)

6.4.6 Variante 5

Diese Variante besitzt die Besonderheit nahezu keine ungewollten Erhebungen innerhalb der Sensorfläche auszubilden. Dies wird durch den Wechsel der üblichen Leiter zu einer ebenen gedruckten Leiterbahn erreicht. An das Druckmedium sind dabei die Forderungen gestellt, einen niedrigen elektrischen Widerstand aufzuweisen, im festen Zustand elastisch zu sein, und den im Sensor zu erwartenden mechanischen Einflüssen widerstehen zu können (Abriebfestigkeit). Nach längerer Recherche tat sich eher zufällig das sog. conductive Silicon Rubber als mögliches Druckmedium hervor (elektrisch leitender Silikonkautschuk). Die meisten alternativen Lacke, Tinten etc. weisen nicht die gewünschte Elastizität auf. Eben so lange hat es noch einmal gedauert einen Anbieter dieses Spezialsilikons ausfindig zu machen. Entdeckt wurde schließlich die Firma Wacker Silicones [1] über den Umweg der Recherche von Beschichtungen für Laserdruckerrollen. Zwischenzeitlich wurden eigene Versuche gemacht, Bausilikon soweit mit Graphitpulver anzureichern bis es leitfähig wird, jedoch ohne größeren Erfolg. Zwar tritt die Leitfähigkeit irgendwann ein, die Streichfähigkeit, im ausgehärtetem Zustand, Elastizität, und Reißfestigkeit gehen dabei aber stark zurück. Ebenso kann das Graphit leicht wieder von dem Verbund abgerieben werden. Die Firma Wacker mit Hauptsitz in München ist ein weltweit agierender Chemiekonzern. Das Portfolio überspannt diverse Silikon- und Siliziumprodukte, die Vertiefung in deren Anwendungsbereichen ist durchaus interessant.

Über das CITEC wurde schließlich eine Probestportion des sog. POWERSIL 402 A/B bestellt. Dies wird aus zwei Komponenten 1:1 gemischt und in flüssiger Form verarbeitet. Nach dem Vulkanisieren bei ca. 200°C⁶ soll es bis zu 600% dehnbar sein und einen Volumenwiderstand von 30Ω/cm aufweisen.

Die reizenden Bestandteile wurden für Tests unter Einhaltung geforderter Sicherheitsbedingungen gemischt und verarbeitet. Als praktikabel erwies sich dabei das Verfahren, die Komponenten zunächst in Spritzen zu ziehen, diese anschließend über ein Röhrchen zu verbinden und durch hin und her Pumpen der Flüssigkeit eine gute Durchmischung zu erhalten. Die ersten Tests mit dem leitenden Silikonkautschuk wurden auf Flachsstoff gemacht, da dieser angenommenerweise chemisch stabil ist, und die Vulkanisierungstemperatur problemlos übersteht. Aufgetragen wurde das Gemisch mit der Spritze, dabei wurde festgestellt, dass sich durch den kapillaren Sog im Stoff nur schwer scharfe Konturen für die Elektroden bilden lassen. Um dem entgegen zu wirken, wurden Bereiche mit Vaseline imprägniert. Der Silikonkautschuk löste die Barriere allerdings sofort wieder auf. Vulkanisiert wurden die Proben in einem Umluft-Backofen, die Oberflächentemperatur

⁶Antrocknen für 5 min. bei 165°C und druchvulkanisieren für 4 h bei 200°C (Quelle: [1] - Datenblatt POWERSIL 402 A/B)

wurde dabei mit einem Infrarot Thermometer kontrolliert. Die Ergebnisse waren ernüchternd, das Material war nicht wie gewünscht ausgehärtet und der Widerstand war wesentlich höher als er sein sollte. Für den nächsten Test wurde eine große Glaspipette verwendet, um chemische Verunreinigungen auszuschließen (bei den zuvor verwendeten Kunststoffspritzen hatten sich die Kolben angelöst), zudem wurden nun auch Proben auf Lycra (80 % Polyamid, 20 % Elastan) gemacht. Das Ergebnis war ähnlich. Der Kunstfaserstoff ist zudem teilweise durch die Hitze geschmolzen und hat seine elastischen Eigenschaften verloren. Angestellte der Fa. Wacker konnten mit dem Problem auf die Schnelle nicht weiter helfen, woraufhin die Arbeit mit dem Silikonkautschuk eingestellt wurde. Mögliche Lösungsansätze wären noch gewesen: Zusammenarbeit mit der Fakultät für Chemie der Uni Bielefeld. “Verdicken des Gemisches mit Zusatz von chemisch reinem Xylen” [1]. Studieren der normalerweise zur Verwendung kommenden Mischautomaten. Ideenskizzen zu den Sensorvarianten finden sich im Anhang auf S. 89.

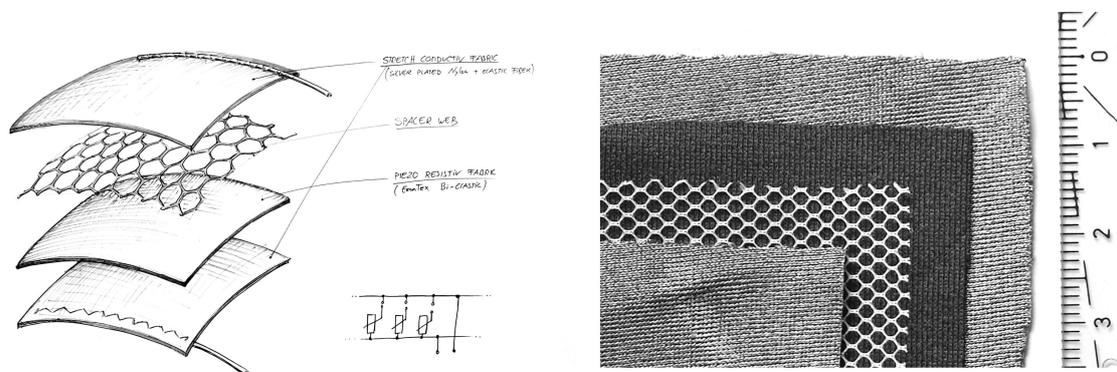


Abbildung 38: Skizze Sandwichbauweise, Sensormaterial mit Größenvergleich [GeBü]

6.4.7 Variante 1

Variante 1 ist in der Art des Aufbaus grundlegend von den anderen Varianten verschieden. Bis zu dem Fund des Full-Body Sensor-Suits 4.4.5 S. 14 wurde angenommen, dabei sogar eine Innovation gefunden zu haben. Die Elektroden befinden sich nicht mehr nebeneinander, sondern sind lagenweise mit dem piezoresistivem Stoff verschaltet (Sandwich-Bauweise). Für die Elektroden wird nun ein gut leitender Stoff (versilbertes Elastan-Mischgewebe 4.5.3 S. 16) verwendet. Bei Versuchen zu diesem Aufbau wurden eine ganze Reihe flächiger Leiter untersucht, der Stoff der Fa. Statex stellte sich schließlich als beste Alternative heraus (genaue Bezeichnung: Techiktex P130 + B). Dieser in Bremen produzierte Stoff hebt sich von den Konkurrenzprodukten noch einmal dadurch ab, dass er neben der hohen Elastizität auch relativ dünn ist ($0,45\text{mm} \pm 10\%$, Quelle [31]). Wichtig ist diese Eigenschaft, da die Schichtdicke sich gleich doppelt in dem Sensor auswirkt. Je dünner der Sensor später ist, desto größer ist der bleibende taktile Durchgang, was einen Wunsch aus der Anforderungsliste darstellt. Durch die Silberbeschichtung ist der Oberflächenwiderstand mit $< 2\Omega/\text{cm}$ verhältnismäßig gut, zudem wirkt diese Beschichtung antibakteriell. Über

die Korrosionsbeständigkeit gegen Hautschweiß lassen sich noch keine Angaben machen. Eventuell muss mit einer Dampfsperre das Sensormaterial vor Feuchtigkeit geschützt werden (z.B. einseitige Silikon-Beschichtung).

Für diese Sensorvariante wurde das Elektroendmaterial, sowie die Sorte des piezoresistiven Stoffes variiert. Getestet wurden die Sensorwiderstände dabei mit der simplen Methode (s. 5.1 S. 19), da die Messeinrichtung noch nicht fertig war. Die Ergebnisse zeigten sich vielversprechend, der Bereich $< 1N$ schwankte allerdings recht stark. Dieses Problem wurde mit dem Einsatz der Abstandshalter-Ebene gelöst. Dafür wurden wiederum diverse netzartige Stoffe bestellt und in Kombination mit den anderen Materialien getestet.

Der Netzstoff hat dabei die Anforderungen möglichst dünn zu sein, einen großen Prozentsatz an Durchlässigkeit aufzuweisen und bestenfalls elastisch zu sein. Als gut geeignet erwies sich sog. Tüll. Dies ist ein Gewebe, das durch ständiges Verdrehen der Kettfäden während des Webvorgangs seine typische Wabenstruktur erhält. Die Wabe an sich bildet dabei das ideale Verhältnis von Druckfläche zu abstandshaltender Struktur. Karos oder Dreiecksstrukturen hätten wegen der kleineren Innenwinkel Verluste der Druckfläche. Stoff, der die Anforderungen komplett erfüllt wurde bisher nicht gefunden, trotz aufwendiger Suche in den großen und kleinen Stoffmärkten der Region und dem Internet. Der einzige elastische Tüll, der den Anforderungen nahe kam und somit bestellt wurde, hatte entgegen seiner Werbeanzeige nur eine Maschenweite von $< 0,5mm$ und erwies sich in den Test damit als zu fein. Andere elastische Netzstoffe, wie sie auch von Damenstrumpfhosen bekannt sind wiesen ebenfalls ungestreckt zu feine Maschen auf. Auch die Stoffdicke, die dem Tragekomfort zu Gute kommen soll ist für den Sensor nachteilig. Zur Verwendung kommt nun ein Tüll-Gewebe mit ca. $2mm$ Maschenweite. Es ist ebenfalls leicht elastisch, was sich allerdings auf die Struktur zurückführen lässt. Abbildung 38 zeigt eine Skizze nach der Idee aus dem morphologischen Kasten und die dazu passenden Materialien.

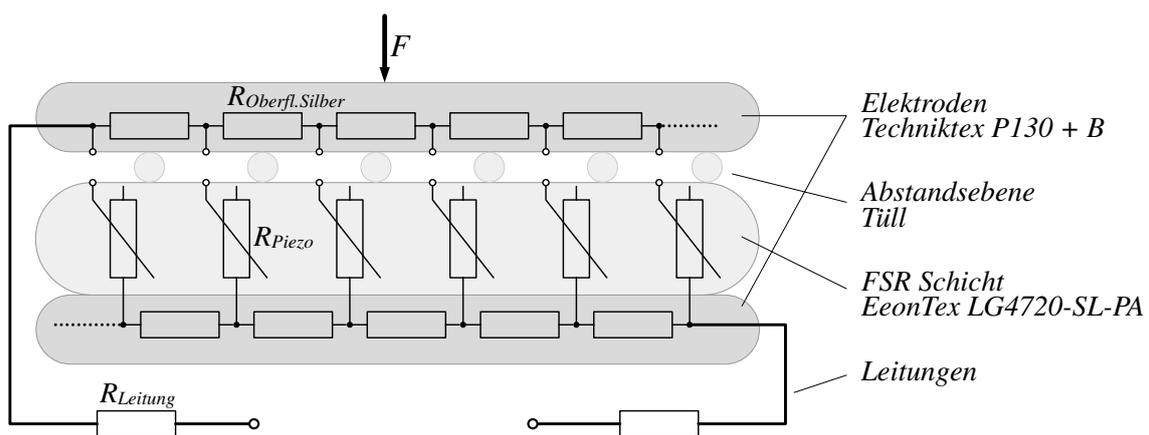


Abbildung 39: Schematik, neuer Sensor in Sandwichbauweise [GeBü]

Tests mit dem Tüll als Abstandshalter fielen positiv aus. Ein weiterer Vorteil, den diese Bauweise besitzt ist, dass der Stromverbrauch für die Auswertung im unbelasteten Fall stark zurück geht.

Dadurch dass der Sensor vorrangig für das Auslesen differenzierter Kräfte entwickelt wurde, weist er doch einen größeren funktionellen Unterschied zu dem Full-Body Sensor-Suit auf. Dieser registriert lediglich einen Kontakt aber nicht seine Kraft. Zudem ist er der Beschreibung nach ([18]) eher flexibel als elastisch.

6.4.8 Auswahl einer Variante

Für die weitere Entwicklung fiel die Auswahl unter Absprache auf Sensor-Variante 1. Diese weist zwar insgesamt eine etwas höhere Dicke auf, liefert aber die beste Sensitivität im gewünschten Arbeitsspektrum.

6.5 Montageverfahren, Sensor

Das Verbinden der Sensorebenen stellt ein ungeahnt schwieriges Problem dar. Zunächst war der Gedanke, die Ebenen mittels doppelseitigem Klebeband zu isolieren (und Fixieren) und anschließend mit leicht gespanntem Garn zu vernähen. Ebenso wie den Sensor auf sein Trägerchassis. Doch kam es trotz Variation der Isolation immer wieder zu Kurzschlüssen der Ebenen. Dies ließ sich darauf zurückführen, dass die Nähnadel ab und zu leitende Filamente durch die Isolation zieht. Der Versuch, diese mit dem Anlegen eines größeren Stroms an den Sensor zum Wegschmelzen zu bringen, führte nur zu mäßigem Erfolg. So konnte zwar eine Kraftdifferenz bei der Betätigung registriert werden, der Widerstand ist für eine gute Verarbeitung aber viel zu klein.

Zur Lösung bieten sich nun verschiedene Methoden an.

- Die Ebenen in unterschiedlichen Größen übereinander versetzt auf das Trägermaterial nähen.

Dazu zeigt Abbildung 40 verschiedene Varianten. Bei dem Vernähen ist darauf zu achten, dass die Kombination konfliktfrei, und die Reihenfolge stimmig ist.

Nachteil dieser Methode ist der hohe Aufwand und das Fehlerrisiko des Nähens. Vorteile sind relativ hohe Beständigkeit und geringe Dicke. Bei den abgebildeten Varianten sind auch zwei zu finden, bei denen das Substrat gleichzeitig eine Sensorfunktion trägt. So könnte die Sensordicke reduziert werden.

- Auf das Nähen verzichten und die Ebenen mittels elastischem Klebstoff oder Silikon verbinden.

Hierfür wurden unterschiedliche Klebstoffe getestet. Als Ergebnis kommt ein zähflüssig zu verarbeitendes Silikon am ehesten in Betracht (Wacker E43). Mit seiner verhältnismäßig niedrigen Viskosität dringt es zwar in den Stoff ein, verbreitet sich aber nicht, wie es bei dem getesteten 2 Komponenten-Klebstoff (UHU-plus schnell fest) zu beobachten war. Der Stoff-Kleber (UHU-Textil) hat wie die übrigen Klebstoffe im ausgehärteten Zustand eine zu geringe Elastizität aufgewiesen. Pastöse Bausilikone wiesen eine schlechte Adhäsion im Verbund mit Lycra auf.

Nachteil dieser Methode ist, Reparaturen oder Korrekturen schlecht durchführen zu können, und die Steifigkeit nimmt zu, wodurch sich auch die Haptik ändert. Über die Beständigkeit gibt es bisher keine Information. Vorteil sind eine simplere Verarbeitung (sofern die Stoffe spannungsfrei verbunden werden sollen), und geringerer Platzbedarf, womit eine größere Sensorfläche möglich ist.

- Isolieren durch Ätzen der Nahtbereiche, der in Konflikt stehenden Ebenen.

Diese Methode wurde erst gefunden, nachdem schon einige Stunden mit den zuvor beschriebenen Methoden experimentiert wurde. Die Idee ist abgeleitet aus einem Bericht der Webseite kobakant.at [19]. Dort wird beschrieben, wie mit Haushaltsmitteln (Natriumchlorid und Essigsäure) Muster in kupferbeschichteten Stoff geätzt werden. Dazu werden die Bereiche, die stehen bleiben sollen mit Vaseline versiegelt. Das Ätzen in dem Bad aus Essig und Kochsalz soll für 10cm^2 Stoff etwa 2 h benötigen.

Nachteil dieser Methode ist der ebenfalls hohe Aufwand. Jedoch liegt dieser in der Vorbereitung. Das Montieren (vernähen) ist weitaus weniger problematisch, da eine Naht ausreichen sollte, die Ebenen, sowie den Sensor auf das Chassis, zu montieren. Ein Vorteil ist, wie bei dem Kleben, dass die Sensorfläche weniger eingeschränkt wird.

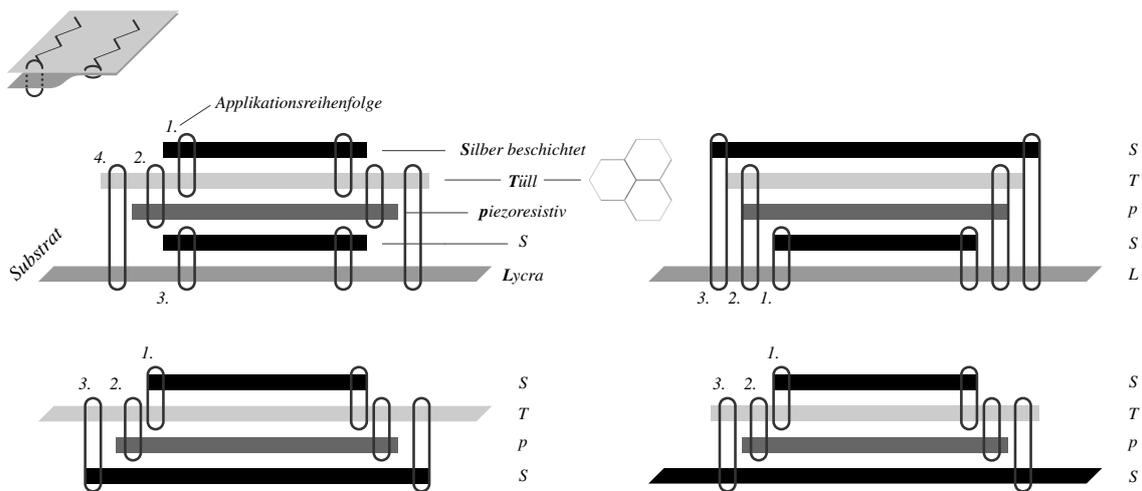


Abbildung 40: Topologievarianten - Sensor Nähen [GeBü]

Als Favorit ging nach Abwägen von Aufwand und Nutzen die Methode des Ätzens hervor.

6.6 Verfahren zum Ätzen

Eingangs wurden Stücke des versilberten Stoffes auf ihre Lösbarkeit hin überprüft. Als Ätzmittel diente dabei eine Lösung aus Wasser und Eisen III Chlorid, wie sie auch zum Platinenätzen verwendet wird (eine starke Lauge). Die Resultate sind dabei überraschend positiv ausgefallen. Dies ist wohl darauf zurück zu führen, dass lediglich die obere Schicht der Stofffasern versilbert ist, die darunter liegende Schicht ist Kupfer. Dies ist allerdings nur eine Vermutung, eine Vertiefung in

die chemischen Abläufe ist mangels Zeit ausgeblieben.

Im nächsten Schritt wurden Bahnen zur Isolation aufgetragen. Damit die Lauge sich nicht unkontrolliert in den Stoff zieht, und das Auftragen leichter wird, wurde mit dem Beimengen von Guarmehl (pflanzlich) ein Gel hergestellt. Wie sich herausstellte, ist der Vorteil, den das Gel hat, zugleich nachteilig für den Ätzprozess. So hat der Stoff trotz langen Wartens (bis zur Austrocknung der Gelbahnen) nur eine leichte Korrosion aufgewiesen. Dies lässt sich wohl darauf zurückführen, dass das Gel die reaktiven Bestandteile am Fließen hindert. Das getrocknete Gel ist zudem schwer auszuwaschen. Der Widerstand, den die Isolation so bringt, ist zwar messbar, erfüllt ihren Zweck aber nicht komplett. Aufgefallen ist auch, dass der Oberflächenwiderstand allein durch das Waschen herab gesetzt wird (möglicherweise auch wegen leichten Ätzens durch das Waschwasser).

Ein weiterer Versuch, um den Vorgang zu verbessern, war zwischen dem ätzenden Gel und dem versilberten Stoff eine Spannung anzulegen. Verfahren des sog. Elysierens nach dem Galvanischen Effekt. Ebenso wie die Umgebungstemperatur zu erhöhen (Auslage auf der sonnenbeschienenen Fensterbank). Bei dem elektrochemischen Verfahren ist es schwierig, die Elektrode gut zu positionieren (muss langsam verschoben werden) wie auch die Spannung zu regulieren. Es kommt auch schnell zur Bildung von Glasbläschen (durch Elektrolyse), die wiederum das Metall isolieren und so den Ätzprozess aufhalten.

Mit den Erkenntnissen dieser Versuche wurde schließlich ein Verfahren entwickelt, welches die Lauge kontinuierlich durch die zu ätzenden Bereiche des Stoffes treibt. Im Anhang sind dazu Ideenskizzen beigefügt, zu finden auf Seite 90.

6.6.1 Arbeit auf Unterdruck

Die Idee ist, mit einer Maske die Ätzbahnen von dem übrigen Stoff zu trennen. Dazu bedarf es einer zweischaligen Vorrichtung, die den Stoff dicht umschließt. Für die zu ätzenden Bereiche sind Bahnen aus den Schalenhälften zu heben, durch die später die Lauge fließen kann.

Damit die so geschützten Bereiche des Stoffes sich nicht mit Lauge vollsaugen ist das Verfahren so angedacht, dass die Lauge nicht durch die Bahnen gepumpt, sondern gesaugt wird. So soll der äußere Überdruck der Kapillarkraft entgegen wirken. Dafür ist zudem für jede stehenbleibende Fläche ein Entlüftungsloch vorgesehen. Im schlimmsten Fall kann so Luft in das System gelangen, der Stoff (die Sensorbereiche) sind aber gut geschützt.

Die Lauge soll in einem Kreislauf fließen. Gefäße zum Auffangen und Beruhigen sind dabei unterhalb der Maske aufgebaut, um dem Druck durch die Schwerkraft ins Positive zu kehren. Sinnvoll ist zudem, die Vorrichtung sogleich zum Auswaschen der Lauge zu nutzen, so könnte mit einem Ventil von dem Lauge- zu einem Wasserbehälter gewechselt werden.

Für das Erstellen der Maske sind zwei Methoden angedacht und getestet worden.

1. Fräsen der Bahnen aus der Schale und anschließendes umranden der Konturen mit einer

feinen Silikondichtung.

Die Dichtung soll dabei an den entscheidenden Stellen die Poren des Stoffes ausfüllen. Über die gesamte Fläche, so ist die Vermutung, wäre der resultierende Flächendruck zu hoch um ihn in einem vernünftigen Maß an Aufwand aufzunehmen.

2. Schneiden der Bahnen aus eine Gummimatte, ähnlich einem Lenoliumschnitt (Bahnen U- oder V- Förmig).

Diese Matten ergeben dann mit Platten hinterlegt, die Schalung. Damit sich der Flächendruck reduziert, sollten die stehenbleibenden Flächen durch eine Stegstruktur ersetzt werden.

Methode 2 scheint zunächst wegen des geringeren Arbeitsaufwandes (einsparen der Dichtung) praktikabler zu sein, die Ergebnisse entsprachen allerdings nicht der Erwartung. So haben sich durch die Pressung Bahnen verengt, so dass die Lauge sich eine anderen Weg gesucht hat. Um dies zu verhindern hätte für die Matte ein in Lagen mit Fasern verstärktes Gummi zum Einsatz kommen können, es wurde jedoch statt der Suche nach solchem Material auf die andere Methode gesetzt.

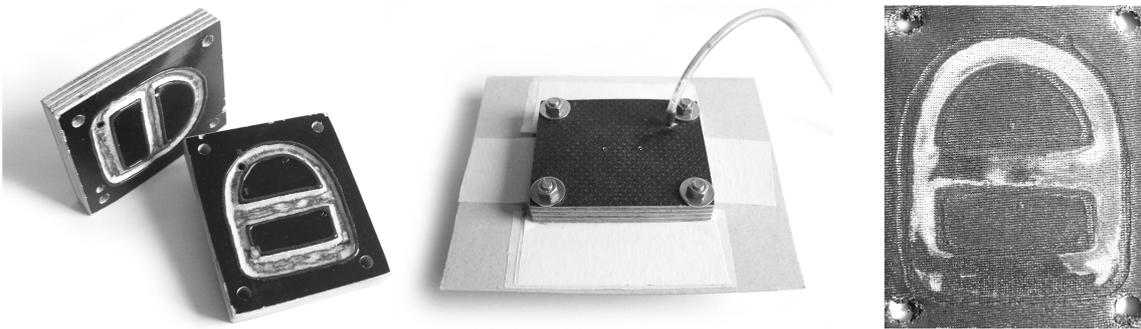


Abbildung 41: Ätzversuch mit Vorrichtung, montierte Schalen, Resultat [GeBü]

Methode 1 erwies sich als verwendbar. Abbildung 41 zeigt dazu eines der Probestücke. Das Pumpen wurde vorerst mit zwei großen Spritzen (20ml) bewerkstelligt, da dies für den Test ausreichen sollte. Bei dem Ätzresultatfig:Ätzen01 zeigt sich, dass nicht alle Stellen von der Lösung erreicht wurden, teilweise ist die Lauge auch über die Dichtung getreten. Ursache ist, dass versucht wurde mehrere Lagen (kompletter Sensor) gleichzeitig zu ätzen, was nicht gelang, da hierfür die Strömung besser kontrolliert werden müsste. Das Übertreten lässt sich auf die Pausen zwischen dem hin- und herpumpen und entlassen der eingetretenen Luft zurückführen (kapillarer Sog während der Pausen).

Der Ein- und Auslass ist bei dem Versuch so gelegt worden, dass die Lauge durch den Stoff dringen, und die Bahn vom oberen zum unteren Ende abfahren muss. Da die Flüssigkeit normalerweise immer den Weg des geringsten Widerstandes nimmt, wäre der Versuch nur eine

Schale zu Fräsen und die Andere plan zu belassen, bei dem Ätzen wohl weniger erfolgreich gewesen. Für das dargestellte Resultat wurde das beschriebene Verfahren ca. 20 min. angewendet.

Für ein besseres Ergebnis muss der fehlerverursachende Handbetrieb so auf jeden Fall von einer Pumpe übernommen werden. Hierfür bietet sich am ehesten eine sog. Schlauch- oder Peristaltik-Pumpe an. Durch Walgen eines Schlauches befördert diese die Flüssigkeit ohne direkten Kontakt mit ihr zu haben. Diese Pumpen sind allerdings recht teuer, daher wurde aus parat liegenden Teilen eine Pumpe mit der beschriebenen Funktion hergestellt. So konnten auch die 2 bis 10 Tage oder länger dauernde Lieferzeit eingespart werden (bei Bestellung über die Uni).

6.6.2 Peristaltikpumpe

Die Pumpe besteht aus einem Planetengetriebe, dessen Sonnenrad mit einem 14V Getriebemotor gekoppelt ist. Montiert sind die Teile auf einen Stahlwinkel. Der Schlauch wird zwischen den Planetenrädern und einem zähelastischem Kunststoffkäfig durchgewalkt. Eine lange Haltbarkeit ist für die Konstruktion nicht von Nöten, da der zur Verwendung kommende Silikonschlauch nur die erwähnten 20 min. durchhalten muss.

Zu sehen ist die Pumpe in Abbildung 42 Der komplette Aufbau, in dem sie eingesetzt wurde zeigt Abbildung 63 im Anhang S. 91.

Das Ergebnis ist mittelmäßig. Das gesamte Verfahren funktioniert so schon besser, die Lauge kommt aber immer noch nicht an alle zu ätzenden Bereiche. Grund dafür ist der zu geringe Volumenstrom der Pumpe (ca. $5\text{ml}/\text{min.}$, es strömt mehr Luft ein, als abgepumpt wird). Für größere Masken als das Versuchsexemplar, reicht dieser auf keine Fall aus. Die Pumpe wurde darauf hin noch einmal leicht modifiziert (größerer Schlauch, exzentrisches Kugellager statt Planetengetriebe). Rechnerisch sollte sich durch Verdoppelung des Schlauchinnendurchmessers eine Vervierfachung und durch Wegfall des Getriebes eine weitere Verdoppelung des Volumenstroms ergeben (insgesamt 8 mal mehr Flüssigkeit pro min.). Die modifizierte Version funktionierte nicht mehr korrekt, auch nach Integration eines Rückschlagventils. So wurde die Arbeit mit der Peristaltik Pumpe beiseite gelegt und Alternativen gesucht.

Der Motor war bereits an seiner Leistungsgrenze, so hätte nur ein Austausch geholfen. Ideal ist es wohl, wie bei den kommerziellen Pumpen zu beobachten, den Schlauch mit zwei Exzenterwalzen zu Walgen. Mehr Walzen reduzieren das Pumpvolumen, weniger führen zur Unterbrechung des Kreislaufs. Der Radius der Walzen ist dabei wohl am sinnvollsten dem Knickradius des Silikonschlauchs anzugleichen. So muss keine zusätzliche Leistung zum Verformen des Schlauches aufgewendet werden.

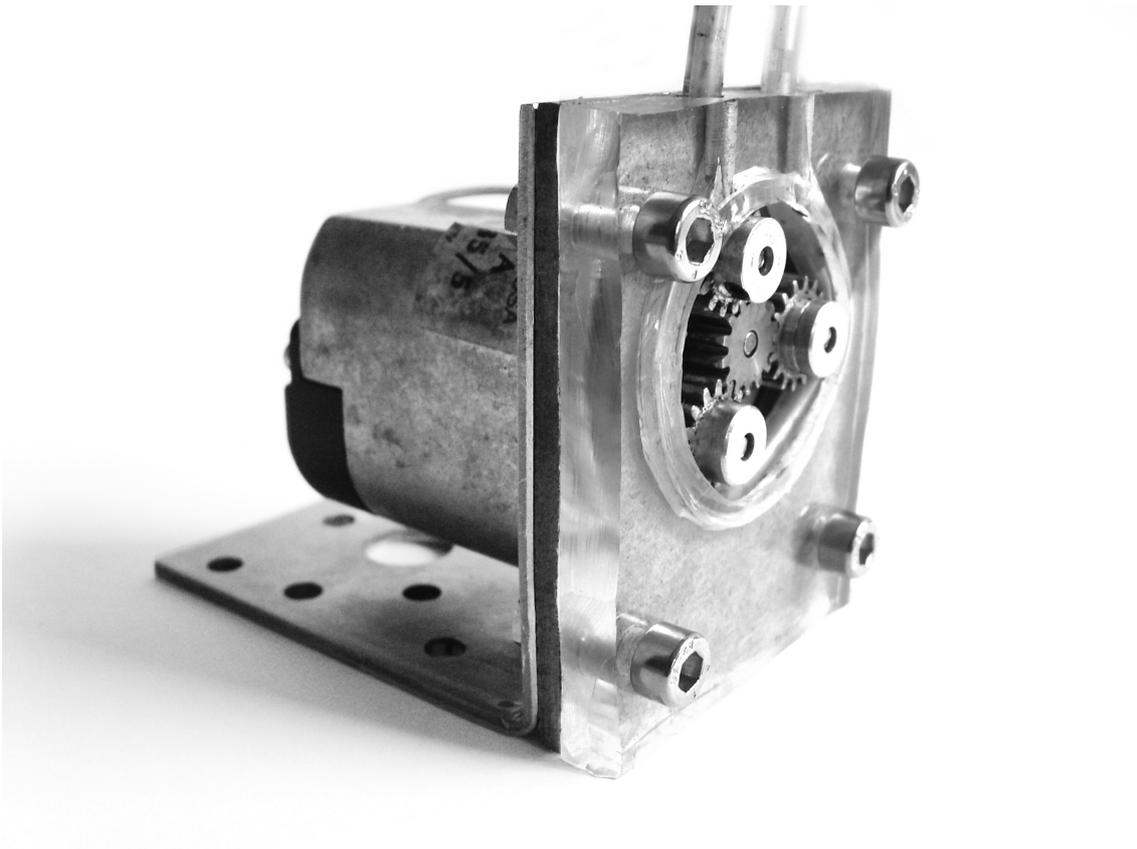


Abbildung 42: Peristaltik Pumpe [GeBü]

6.6.3 Laugenpumpe

Da die Laugenpumpe ursprünglich für das Pumpen von Scheibenwischerflüssigkeit vorgesehen ist, ist anzunehmen, dass auch konzentriertere Laugen kein Problem für das Material darstellen. Zum Test kam dabei ein Mercedes Ersatzteil. Hierbei handelt es sich um eine 12V Kreiselpumpe mit Kunststoffgehäuse, die auf dem Prinzip der Zentrifugalkraft beruht. Sofern die Pumpe voll Flüssigkeit (Wasser zum Testen) ist, zeigt sie eine hervorragende Pumpleistung, auch dann, wenn dem Strom ein großer Widerstand entgegengesetzt wird. Ist hingegen etwas Luft in der Pumpe, fällt ihre Leistung rapide ab.

Da nicht zu vermeiden ist, dass Luft in die Leitungen gelangt, müsste für den Einsatz der Pumpe ein System eingebunden werden, welches "kontinuierlich" die Luft abscheidet. In einem breiteren Rohr würde die Luft zwar nach oben steigen, sobald dies voll ist, wäre die Pumpe aber wieder außer Kraft. So müsste entweder extrem viel Lauge verwendet werden, um damit ein großes Abscheidegefäß zu füllen, oder die Luft mit einer zusätzlichen Pumpe abgesaugt werden (gesteuert). Da beide Lösungen insgesamt zu unökonomisch schienen, wurde noch eine dritte Pumpe getestet.

6.6.4 Treibschieberpumpe

Zur Verfügung stand noch eine Treibschieberpumpe, die jedoch nur zum Pumpen von Luft geeignet war. Bei dem Versuch Wasser zu fördern, kam ihr Rotor zum Stillstand. Die Pumpe funktioniert dadurch, dass sich bei hoher Drehgeschwindigkeit Trennscheiben aus dem Rotor schieben und diese so dicht an der Wand der exzentrischen Einfassung langlaufen. Dort wo der Spalt zwischen Rotor und Fassung konvergiert, komprimiert sich das Pumpmedium und wird durch Kanäle abgeleitet. Die Pumpe ist so konstruiert, dass auch inkompressible Medien abgeleitet werden können. Analytierte Ursache der Dysfunktion ist ein Stau in den Lagerfächern der Trennscheiben (rechteckige Aussparungen im Rotor). Gängig wurde die Pumpe nun gemacht, indem Bypässe in den Rotor gebohrt wurden. Diese verbinden den hinteren Bereich der Lagerfächer mit dem Pumpenraum. Das führt einerseits dazu, dass die Trennscheiben wieder zurückfahren können, zum anderen schiebt der Druck innerhalb des Pumperraums die Scheiben zurück an die Einfassung, sobald der Spalt divergiert. Die Treibschieberpumpe ist damit so modifiziert, dass sie zuverlässig sowohl Luft, als auch die Lauge pumpt. Veranschaulicht ist das Prinzip in Abbildung 43.

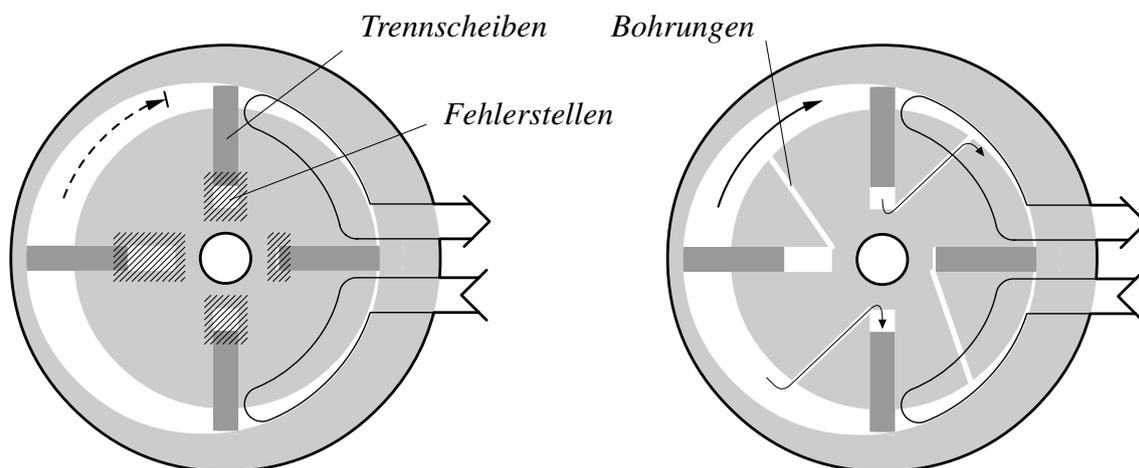


Abbildung 43: Modifikation, Treibschieberpumpe [GeBü]

6.7 Prototyp Fingerling

Mit der entwickelten Sensorfunktion und dem nun korrekt arbeitendem Ätzverfahren kann nun ein funktionstüchtiger Prototyp in Form eines Fingerlings produziert werden. Der Fertigungsablauf beschreibt sich danach wie folgt.

1. Maße des Modells (in diesem Fall eines Fingers) nehmen.
2. Berechnen eines Schnittmusters für Trägerchassis und Sensorlagen.
3. Übertragen des Musters auf die Stoffe.
4. Einspannen der zu ätzenden Sensorlage in Rahmen.

5. Ätzen, Waschen, Trocknen.
6. Einspannen der übrigen Lagen in den Rahmen.
7. Abnähen der Sensorkontur.
8. Entfernen des überflüssigen Sensormaterials (übrig bleiben einzelne Sensoren auf der Trägerebene).
9. Entfernen des Rahmens.
10. Vernähen der Trägerebene mit der Rückenfläche.
11. Auf links ziehen.
12. Einnähen und verlegen der Leiterbahnen.
13. Versiegeln und versteifen strapazierter Bereiche mit Silikon.

Für Punkt 2. wurde eine Formel entwickelt (Erweiterung der Umfangsformel, 33), mit der die genommenen Maße für das Schnittmuster konvertiert werden können. So wird z.B. aus der Breite der Fingerkuppe die Breite des Musters, mit einkalkulierter Streckung des Stoffes.

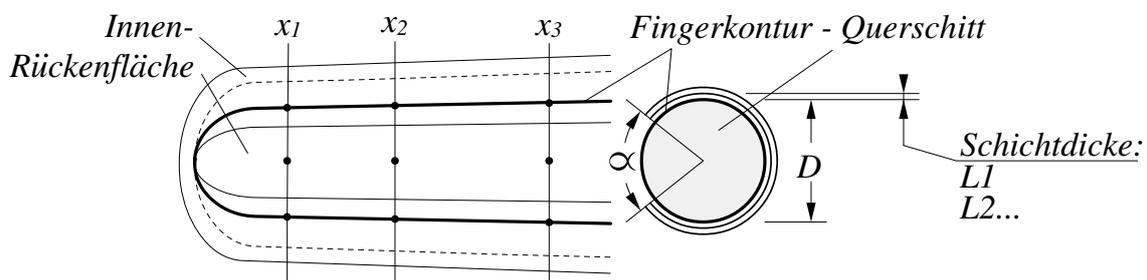


Abbildung 44: Schnitt Berechnung [GeBü]

Die Formel leitet sich folgender Maßen her: Berechnung des Umfangs,

$$U = D \cdot \Pi \quad (33)$$

des Kreisbogens,

$$U = D \cdot \Pi \left(\frac{\alpha}{360} \right)$$

der anderen Kreisbogenhälfte.

$$U = D \cdot \Pi \left(1 - \frac{\alpha}{360} \right)$$

Multiplikation des Streckungsfaktors st .

$$U = D \cdot \Pi \left(1 - \frac{\alpha}{360} \right) \cdot st$$

Addition eines Randes B .

$$U = D \cdot \Pi \left(1 - \frac{\alpha}{360} \right) \cdot st + 2B$$

Berechnung höherliegender Sensorebenen durch Addition der Schichtdicke L mit dem Durchmesser D .

$$U = (D + L) \cdot \Pi \left(1 - \frac{\alpha}{360} \right) \cdot st + 2B$$

Ergänzen der Variablen x , zu:

$$U(x) = (D(x) + L) \cdot \Pi \left(1 - \frac{\alpha}{360} \right) \cdot st + 2B \quad (34)$$

Dabei ist $U(x)$ die berechnete Stoffbreite der Position x (bspw. oberer Knöchel). $D(x)$ ist der wie in Abbildung 44 dargestellte Durchmesser, der den realen Fingerquerschnitt approximiert. Für Sensoren größere Wandstärke ist für L die Summe der Stoffdicken L_1, L_2, \dots, L_n einzusetzen. Die unterste Ebene wird mit $L = 1$ berechnet. st ist der Faktor mit dem der Stoff beim Tragen gestreckt wird, daher $st < 1$. Mit B lässt sich noch ein Rand hinzufügen, der für den Überstand der Naht nötig ist. Über den Winkel α lässt sich das Verhältnis von Umfang zu Sensorfläche einstellen. Soll der Sensor weit um den Finger gehen, ist ein Winkel $< 180^\circ$ zu wählen.

Mit der Formel wurde u.a. in Solid Edge eine interaktive Zeichnung erstellt. Jedoch ließen sich wegen der hohen Komplexität der Handoberfläche nur die Schnittmuster der Finger (ohne Daumen) berechnen. Mit x werden dort gemessene Strecken variiert. Einen Screenshot der CAD Anwendung findet sich im Anhang auf Seite: 92.

Punkt 4. hat mehrere Vorteile. So kann mit dem Rahmen der Stoff beim Ätzen besser in und aus der Ätzvorrichtung genommen werden, das Nähen feiner Konturen ist mit der Einspannung einfacher, und was der eigentliche Gedanke ist; die Sensorebenen lassen sich mit verschiedenen Vorspannungen fixieren.

Da die Sensorfläche an den Fingern stark gewölbt ist, schieben sich ohne Vorspannung die inneren Ebenen zu Falten auf. Der Rahmen hat so die Anforderungen mehrere Lagen Stoff zu fixieren, deren Spannung einstellen zu können, und insgesamt so flach und kompakt zu sein, dass er unter dem Nähfuß hergeht. Die Lösung ist simpel, so wird nun aus ca. 2mm starker Pappe ein Passepartout geschnitten. Die einzelnen Stoffebenen lassen sich sodann nacheinander mit Klebeband fixieren. Es hat sich gezeigt, dass dabei Bänder mit verschiedener Klebkraft sinnvoll sind. So eignen sich Papierbänder gut für schwache Spannungen, Kunststoffisolerband für die resistiven Stoffe und Textilband für das Wabenmaterial. Andere Kombinationen führen zum Abreißen der Klebung oder zur Zerstörung der Stoffoberfläche. Die Passepartout-Lösung geht auf einen Prozess stetiger Vereinfachung zurück. Die Skizzen der Ideenfindung sind im Anhang S. 92 abgebildet.

Der nach den aufgelisteten Schritten gefertigte taktile Fingerling ist in Abbildung 45 in einer möglichen Anwendung gezeigt. Ebenfalls ist das frisch entformte Ätzteil zu sehen (Verfahren nach 6.6 Seite 64 ff, mit detaillierter Ätzmaske und modifizierter Pumpe 6.6.2). Der taktile Fingerling

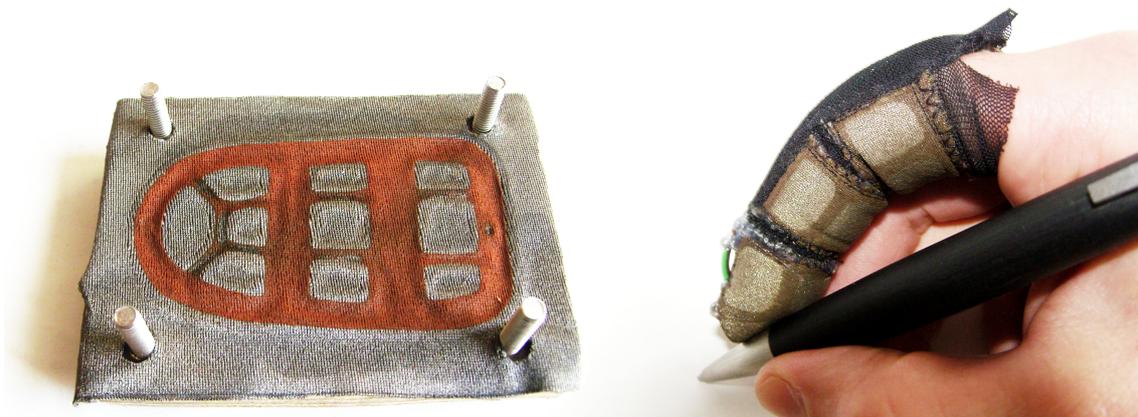


Abbildung 45: Taktile Fingerling [GeBü]

stellt einen Prototypen zum Testen des Sensors und der Fertigungsverfahren dar und bildet einen wichtigen Meilenstein der gesamten Entwicklung. Er passt gut und die Funktion der Sensoren ist gegeben. Dabei sind allein vier Sensorbereiche in der Fingerkuppe realisiert. Es hat sich gezeigt, dass die Spaltmaße zwischen den Gliedern größer gewählt werden müssen, da sich die Sensorflächen bei Beugung früher als gewünscht berühren. Die Leiter sind aus Telefondraht hergestellt, nachfolgende Sensoren sollen mit spezieller Messlitze realisiert werden, die für den Zweck der Verkabelung in diesem stark beanspruchten Milieu ausgesucht wurde 4.6⁷.

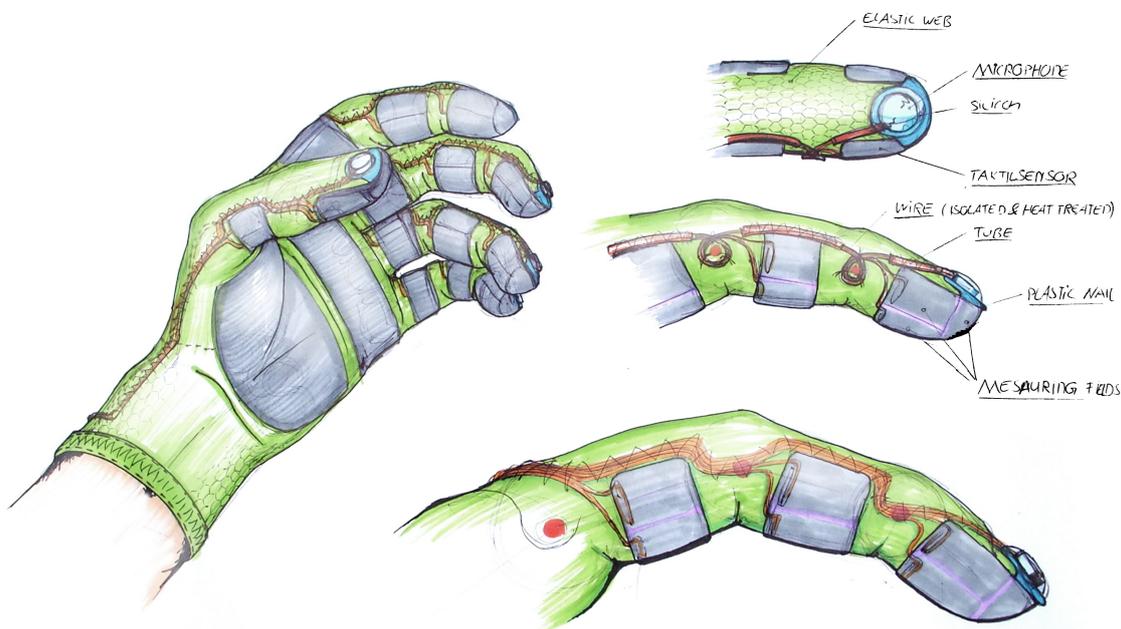


Abbildung 46: Designskizze Takttilhandschuh, Verkabelung [GeBü]

⁷Es lässt sich viel Zeit sparen, Kabel unter Zuhilfenahme einer AWG-Tabelle (American Wire Gauge) zu spezifizieren und zu suchen, da viele Hersteller ihre Produkte danach gekennzeichnet haben.

6.8 Trägerchassis

Im Grunde ist das Trägerchassis ein Handschuh, der dünn und elastisch ist. So kann theoretisch ein kommerzielles Modell dazu verwendet werden, als Träger der Taktilsensoren zu dienen.

Mit dem Anspruch, die Sensoren über einen weiten Bereich der Fingerbeere (6.1 S. 50) zu platzieren, schränkt sich das Angebot dieser Handschuhe jedoch stark ein. So besitzen die meisten Handschuhe eine Naht in diesem Bereich, die störend wirkt. In nähere Auswahl kommen nahtlose "Feinstrick" Handschuh. Diese finden ihre Anwendung auch im X-IST Dataglove (4.3.1 S. 11). Er hat aufgrund des in der Herstellung verwendeten Garns eine relativ große Wandstärke und ist somit unter dem Cyberglove II, inkompatibel zu tragen. Man könnte nun einen Hersteller ausfindig machen und darum bitten ein paar Exemplare aus noch dünnerem Nylon zu erstellen, es bleibt aber das große Problem, die Sensoren mit einem fertigen Handschuh zu verbinden.

Nähen per Hand und Kleben sind zwar möglich, der Arbeitsaufwand für einen Handschuh wird aber als zu hoch eingeschätzt. Da sowohl Sensoren wie auch der Handschuh Spannungen im Material aufweisen, wäre eine ausgeklügelte Haltevorrichtung von Nöten. Für geeigneter schien es daher, erst die Sensoren zu applizieren und später den Handschuh aus wenigen Einzelteilen zu verbinden. Eine Designskizze (46 S. 72) zeigt, wie das Ergebnis demnach vorzustellen ist.

6.8.1 Schnittmuster

Ein Schnittmuster für das Trägerchassis zu finden, stellt eine besondere Herausforderung dar. Typische Handschuhe zu zerlegen und ein Muster davon abzunehmen würde wenig bringen, da so die beschriebenen Mängel bestehen blieben. Nähte aus dem Muster zu tilgen, ist nicht möglich, da die Schnitte nicht zur Zierde sind, sondern nötig, um aus ebenen Bahnen das dreidimensionale Gebilde der Hand zu schaffen. Ideal ist es, mittels CAD-Software das Muster zu erzeugen. Anbieten würde sich dazu das Programm "Blender", dies ist eine Open Source Software, die u.a. das Fallen von Textilien simulieren kann. Das Programm ist auf Graphik ausgelegt und entspricht der physikalischen Realität damit nur bedingt. Im Gegensatz zu Solid Edge hätte es dennoch seine Vorteile. Wegen fehlenden Kenntnissen im Umgang, und einigen Anzeigefehlern des Programms konnte darauf nicht zurück gegriffen werden.

Das Erstellen des Schnittmusters wird so auf andere findige Weise gehandhabt. Um eine möglichst exakte Abbildung der Handoberfläche zu schaffen, wird diese mit Latexgel abgeformt. Noch an der Hand, lässt sich die spätere Schnittlinie auf dem Latex anzeichnen. Wichtig ist, die Linie mit Markerpunkten zu versehen, sodass die Stoffteile an der gleichen Stelle wieder zusammen finden. Verschiebt sich die Naht nur wenige Millimeter, z.B. an den Fingern, verdreht sich der Handschuh dort so, dass die Festanforderung eines positionierten Sensors nicht mehr erfüllt ist.

Die Entwicklung des Schnittmusters zielt darauf, mit möglichst wenigen Schnitten, sowie Nähten das Trägerchassis fertigen zu können. Weiter wird darauf geachtet die Nähte so zu positionieren, dass sie nicht im Bereich der Sensoren, wie auch Stellen hoher Zugbeanspruchung liegen (über den Gelenken). Völlig ausschließen lässt sich die letzte Forderung nicht, so ist die Naht im Scheitelpunkt der Finger nicht zu vermeiden.

Der so gewonnene Latexhandschuh wird an den vorgezeichneten Schnittlinien aufgetrennt und flächig ausgebreitet. Das Latex hat dabei den großen Vorteil, sich strecken zu lassen, wodurch es einfacher ist, die äußere Kontur plan und faltenfrei abzubilden. Das Streckprinzip soll bedacht genutzt werden, da es einen Fehler im Schnittmuster hervorruft.

Die aufgespannten Latexteile werden mit einem Maßstab versehen, fotografiert und mit dem Computer (speziell, Solid Edge Draft) weiter verarbeitet. Dazu zählt das Nachzeichnen der Kontur, sowie die Übertragung der Markerpunkte. Das so entstandene Schnittmuster kann nun ausgedruckt, als Schablone für das Zuschneiden der Stoffbahnen verwendet werden.

Das Vernähen der einzelnen Teile bedarf noch einmal großer Konzentration, so ist die Reihenfolge der Nähte zuvor festzulegen, um nicht in eine Sackgasse zu geraten. Ebenfalls schwierig ist die Position der Naht (innen oder außen), bei mehreren Teilen geht schnell der Überblick verloren und am Ende wird das gesamte Gebilde noch einmal auf Links gezogen.

An dem fertigen Handschuhprototyp werden die fehlerhaften Stellen aufgenommen, sowie die Probleme, die beim Nähen auftraten. Die Ergebnisse werden sodann in die Entwicklung des nächsten Prototypen einbezogen. Teilweise lassen sich Nähte auch auftrennen und anders vernähen, dies ist jedoch nur in gewissen Grenzen möglich.

Auf diese Weise wurden 21 Prototypen gefertigt, das 22. Muster erfüllte endlich alle Anforderungen. Um Kosten zu sparen, wurde für viele Prototypen Flachstoff verwendet. Bei diesem fallen zudem wegen seiner hohen Steifheit Schnittfehler sofort auf. Das Muster besteht jetzt aus drei Teilen, der Innenseite, dem Rücken und einem Teil zwischen Daumen und Zeigefinger. Die dreidimensionale Form wird mit diesem Muster exakt und nahezu streckungsfrei wiedergegeben. Um das zu erreichen, ist der Handschuhrücken so modelliert, dass er die schmale Stoffbahn die bei herkömmlichen Handschuhen zwischen der Innen- und Rückseite liegt, überflüssig macht. Dazu wurden dem Latex-Rücken Flächen hinzugefügt, die bei dem Handschuh wieder abgenäht wurden. Das Abnähen bildet dabei eine Falte. Diese ist bei dem Schnittmuster 22 so verlegt, dass sie noch den Nutzen hat, als Kanal der Sensorleiterbahnen zu stehen. Abbildung 47 zeigt das Muster, die Markerpunkte sind dort als kleine Bohrungen an der Kontur zu erkennen.

Das aus Lycra genähte Trägerchassismodell ist im Anhang auf Seite 93 zu sehen (Die Naht zwischen Daumen und Zeigefinger steht auf links). Das Trägerchassis soll später aus einen bi-

6.10 Ätzmaske

Für ein ökonomisches Produzieren der Sensorik, werden alle Einzelsensoren auf einer Ebene gemeinsam, in einem Durchgang gefertigt. Die Maske ist ein Bestandteil, der für das Ätzverfahren (6.6 S. 64)) benötigt wird.

Ursprünglich war angedacht, die beiden Hälften der Maske aus Acrylglas fertigen zu lassen, so könnte der Ätzprozess gut verfolgt und wenn nötig beeinflusst werden. Wegen geringerer Kosten, wurde sie dann aus 10mm starkem Hart-PVC gefräst. Für die Aufnahme der Kräfte wurde die Maske mit MDS-Platten von 20mm Stärke unterstützt. Abbildung 48 zeigt ein Foto des Fräsprozesses. Die dazu angefertigte CAD Zeichnung ist im Anhang S.94 zu sehen.

Und dennoch einen Blick auf den Stoff während des Ätzten zu erhalten, ist vorhergesehen, Acrylglasstifte an entscheidenden Stellen einzuarbeiten. Pro Hälfte gibt es 8 Ein-/ Auslässe für die Lauge. Über Silikonschläuche mit 4mm Innendurchmesser werden diese an einen Verteiler angeschlossen. Gedacht ist, die Schläuche beim Ätzen teilweise abzuklemmen, und so den Strömungsverlauf im Inneren der Masken beeinflussen zu können. Alle weiteren Bestandteile entsprechen denen, des beschriebenen Verfahrens.

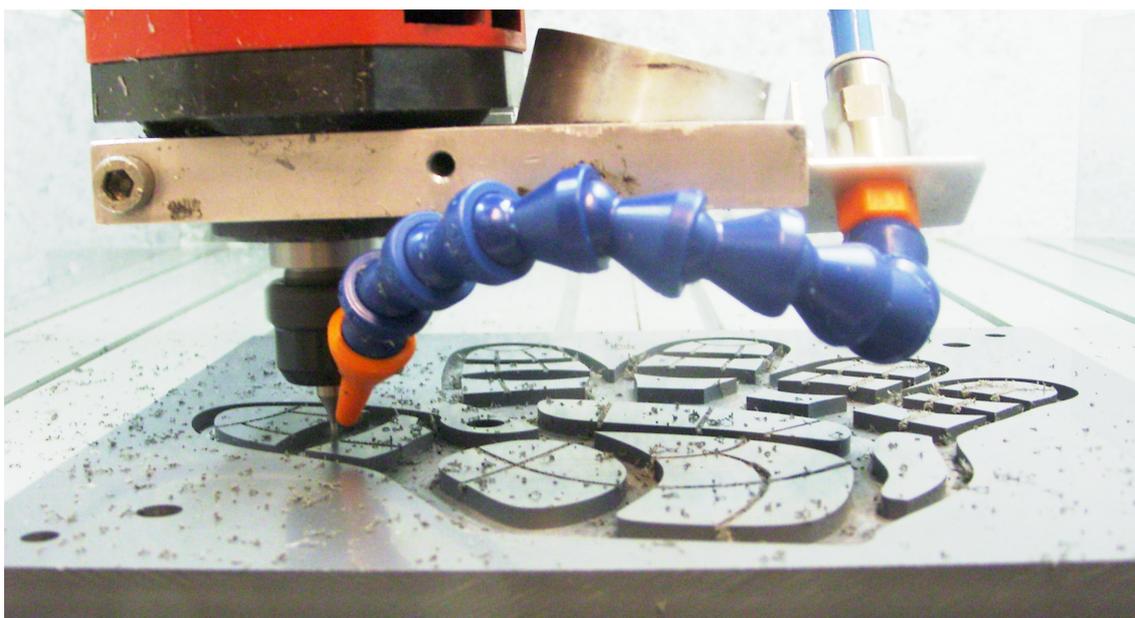


Abbildung 48: Fräsprozess der Ätzmaske[GeBü]

6.11 Verkabelung

Die Verkabelung wird via spezieller Messlitze (4.6.1 S. 17) durch die im Abschnitt 6.8.1 erwähnten Kanäle gelegt. Die Sensoren werden durch Einnähen einzelner Litzen angebunden. Dies wird mit einer feinen Nähnadel, als einer der letzten Arbeitsschritte per Hand durchgeführt. Die Erdung verläuft dabei auf der zum Körper zeigenden Seite, die Kontakte der einzelnen Sensorflächen sind von außen zugänglich. Damit der Sensor nicht beschädigt wird, verläuft die Litze an einem Rand

der jeweiligen Sensorfläche und inmitten der Stoffdicke. Die Messlitze ist mit Teflon ummantelt und wird vor dem Einnähen im Bereich der Sensorfläche abisoliert. Das offene Ende der Litze wird mit etwas Silikon (Wacker E34) fixiert (denkbar wäre auch ein leitender Klebstoff. Dieser würde neben der Funktion des Zugentlastens auch einen gesicherten Kontakt zum versilberten Stoff des Sensors herstellen). Die Kanäle verlaufen in Kurven, so kann beim An- und Ablegen des Handschuhs eine gewisse Streckung kompensiert werden. Die Leitungen enden am Handschuhsaum, wo sich die Schnittstelle befindet.

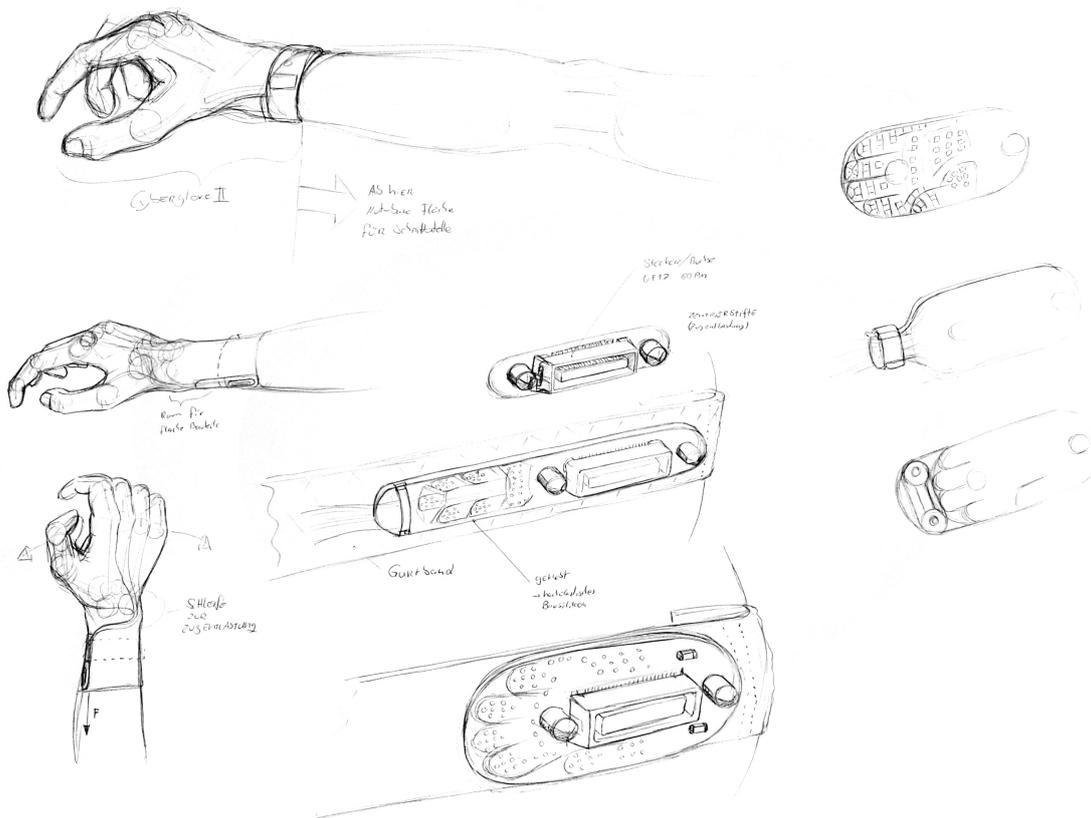


Abbildung 49: Ideenskizzen, Schnittstelle[GeBü]

6.12 Schnittstelle

Mit der Schnittstelle wird eine lösbare Bindung zur Auswerteelektronik geschaffen. Positioniert ist sie so, dass es weder Konflikte mit dem Cyberglove II gibt, noch mit der Umgebung seines Trägers. So findet sie sich ca. auf einem viertel der Elle, von Seiten der Handinnenkante aus. Die Schnittstelle an sich, ist ein Industrieteil, welches für das Verbinden zweier Platinen gedacht ist. Ausgewählt wurde die Steckverbindung unter Absprache von einer Übersichtstabelle, die nach einer Recherche zusammen gestellt wurde. Passend zu der gewählten Schnittstelle (DF17 (3.0H)-60DS-0.5V) sind in Abbildung 49 Ideen der Einbindung aufgeführt.

Um die Steckverbindung (l,b,h = 20mm x 5mm x 4mm) mit dem Handschuh zu koppeln, ist eine Platine vorgesehen. Diese dient einerseits als Lötgrund, andererseits sind an ihr Punkte zur mechanischen Entlastung vorgesehen. Die Litze direkt an die Verbindung zu löten und mit 2 Komponentenkleber zu verkapseln, wäre nicht akkurat, da Reparaturen so schwer möglich wären. Um das Verkabeln bei dem kleinen zur Verfügung stehenden Raum übersichtlich zu gestalten, ist die Platine ein ganzes Stück größer, als der Stecker gewählt und bietet so Platz für eine gute Lötstellenverteilung.

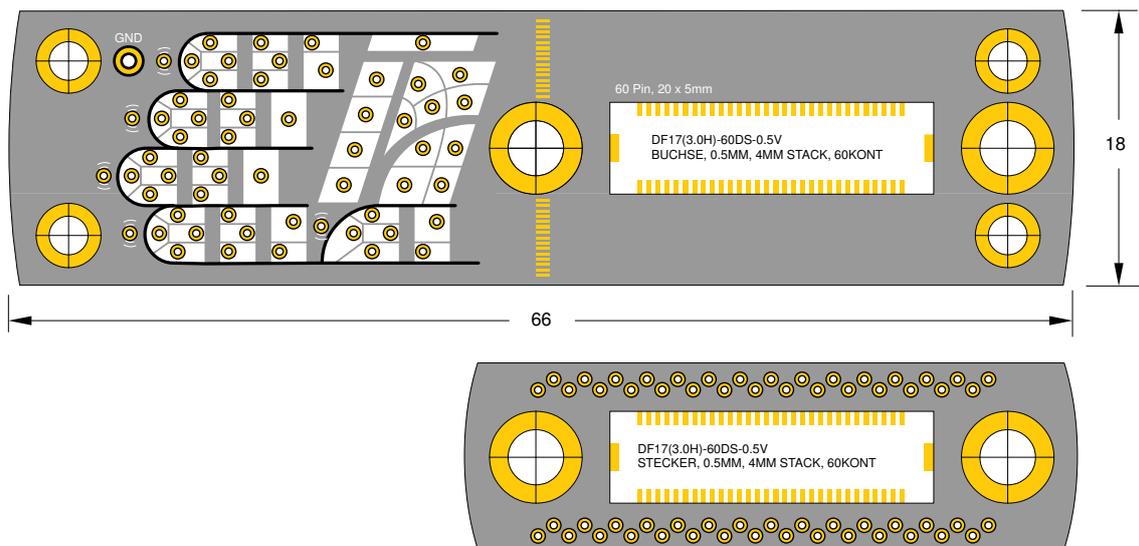


Abbildung 50: Platinenlayout, Schnittstelle [GeBü]

Wie in Abbildung 49 zu sehen, ist die Verteilung so angedacht, dass der Taktisensorhandschuh als Miniatur abgebildet wird. So sollen die Leiter, intuitiv an richtiger Stelle eingelötet werden können. Abbildung 50 zeigt das Layout der Platine. Die obere Zeichnung steht für den Teil, der an den Handschuh gebunden wird, die untere, für der Stecker. Von dem letzteren aus, soll ein vieladriges Kabel zur Auswerteelektronik am Oberarm geführt werden, so wie es bisher auch geschieht (zu sehen im Anhang auf Seite 81). Die Anbindung der Platine zum Handschuh ist so gedacht, dass der Bereich der Schnittstelle (ca. 30mm), auf einen Gurt geklebt wird. Für das Löten wird die Platine von dem Gurt weggeklappt. Um die Lötstellen zu schützen und von Zug zu entlasten, soll ein Gehäuse mit Schrauben, die Leiter, die Platine und den Gurt, zu einem Modul binden. Der Gurt soll dabei als verstärkendes Element dienen und einen Übergang von dem leichten Tüllstoff zur Platine herstellen. Zudem soll er das Aufschieben des Handschuhsaums verhindern. Überlegungen für ein Gehäuse und den Lösungsmechanismus der Schnittstelle, finden sich ebenfalls im Anhang auf Seite 95.

Für die Umsetzung des Taktile sensorhandschuhs, unter Zuhilfenahme der entwickelten Gerätschaften, Verfahren wie auch den bestellten Materialien, steht nun nichts mehr im Wege. Das Produkt wird jedoch erst nach Abgabe dieser Arbeit fertiggestellt werden. So muss hier auf Abbildungen, wie auch auf Berichte dessen Einsatzes, verzichtet werden.

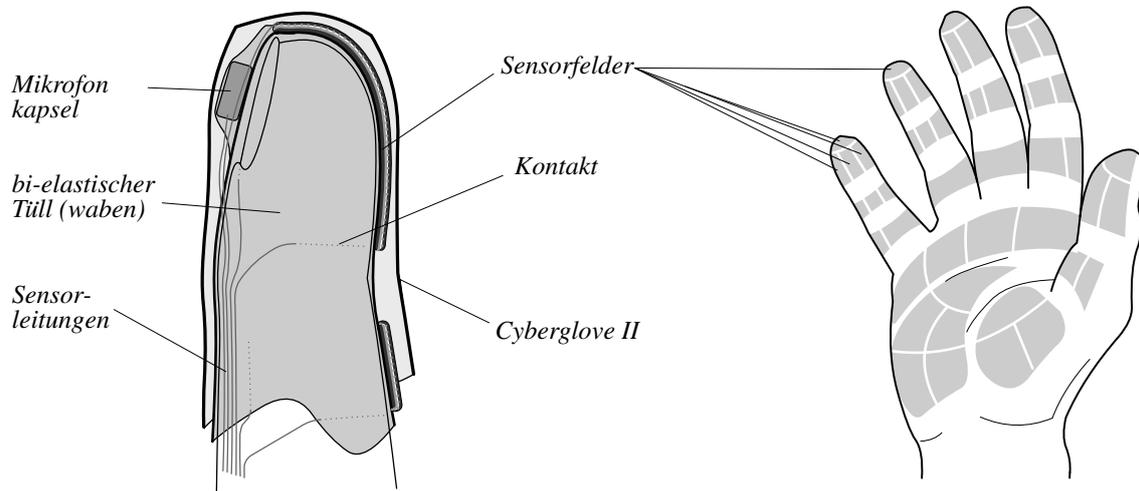


Abbildung 51: Neuer Taktile sensorhandschuh [GeBü]

Mit seinen 18 Sensoren und insgesamt 54 Sensorfeldern wird der Handschuh eine enorme Auflösung bieten, vergleicht man ihn mit den 5 Feldern aktueller Taktile sensorhandschuhe. Die Sensoren sind ca. 1,6mm dick und in beide Richtungen elastisch, so ist ein taktile Durchgang gewährleistet. Das Belastungsspektrum lässt sich von 0,3N bis > 30N in 256 Schritten gut auflösen. Die Fehlerquote reicht dabei von ca. 5% ($F > 10N$) bis 20% ($F < 10N$) bei mittlerer Betätigungsgeschwindigkeit.

Im Vergleich zu FSRs ist er sehr robust und entgegen des Sensitive Fingertip Gloves, nimmt er stumpfe wie auch spitze Betätigungen auf. Versehen mit einer geeigneten Versiegelung wird der neue Taktile sensorhandschuh die Arbeit, für die er zugeschnitten ist, sicher positiv beeinflussen, wenn nicht sogar neue Anwendungen ermöglichen. Der taktile Fingerling hat dort bereits die Erwartungen zur vollsten Zufriedenheit mehr als erfüllt.

7 Resümee

Die Anfangs überschaubare Aufgabe, einen Taktilensensor auf Basis leitender Textilien zu entwickeln, stellte sich im Laufe der Zeit als große Herausforderung dar.

Da ich der Forschung, intelligenter Robotiksysteme, einen großen Sinn zuschreibe, war die Entwicklung der taktilen Sensoren für deren Datenmodellierung sehr interessant. Mit dieser Motivation ging ich an die Bearbeitung zur Lösung der verschiedenen Probleme, die sich in der Praxis auftaten. Unter großem Organisations-, Zeit- und Arbeitsaufwand und unter Nutzung einer einmonatigen Verlängerungsfrist löste ich die Probleme und führte den taktilen Handschuh bis zur Produktionsreife einer Kleinserie.

8 Ausblick

Mit meiner Arbeit hoffe ich einen Beitrag für die Forschung am CITEC, der Universität Bielefeld, zu leisten. Darüber hinaus sehe ich Anwendungsmöglichkeiten, die elastischen Sensoren direkt am Roboter wie eine künstliche Haut zu platzieren. Und im Bereich der Medizin für die Erweiterung von Prothesen.

9 Anhang

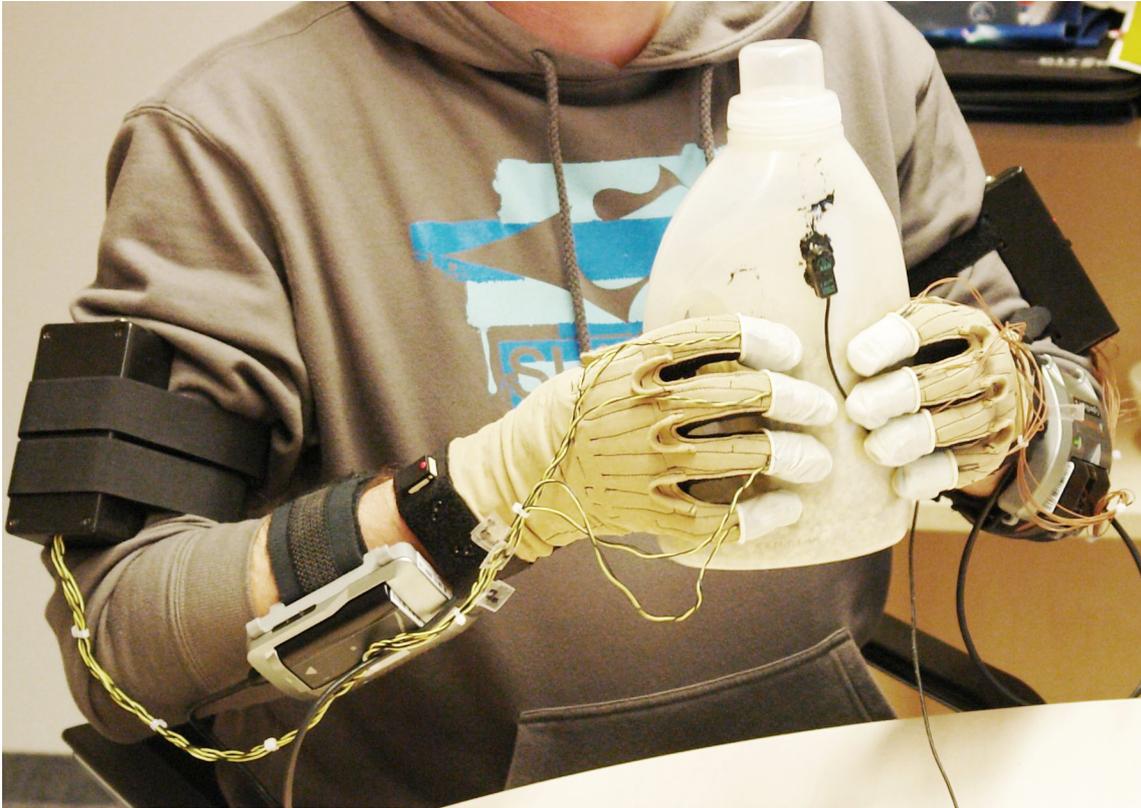


Abbildung 52: Setup des Cyberglove II mit FSR Taktile Sensoren Quelle: [4]



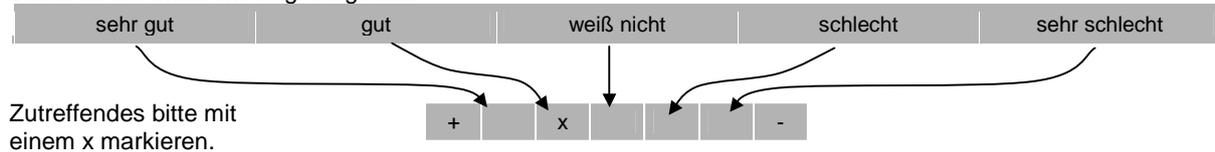
Abbildung 53: Einbindung eines FSR's [GeBü]

Fragenkatalog zur Akquirierung von Forscherinnen und Forschern, die zur Ausübung ihrer Tätigkeiten häufig Datagloves (Datenhandschuh) verwenden.

Ziel ist es, anhand der Antworten eine Beurteilung der Datagloves sowie Hinweise zur Optimierung eines Datagloves zu erhalten.

Als Diplomarbeit schreibe ich an der FH Bielefeld im Fachbereich Produkt-entwicklung über das Thema „Optimierung eines Datenhandschuhs, insbesondere Erweiterung um eine Taktilsensorik“. Das Thema, wie auch die Betreuung kommen vom CITEC, einem Forschungsbereich zur „Cognitive Interaction Technology“ der Universität Bielefeld. Die Ergebnisse der Entwicklung sollen den Einsatz der Datagloves an den Hochschulen verbessern.

Bitte teilen sie mir in der Bewertungsskala mit, wie sie den Punkt beurteilen. Dabei ist die Skala wie folgt aufgeteilt:



Ja/nein Felder bitte mit einem j bzw. Einem n ausfüllen z.B.:

j/n	j
-----	---

1. Welches Dataglove Modell verwenden Sie? Bitte schriftlich eintragen.

2. Haben sie auch schon andere Modelle verwendet, und wenn ja, welche?

2.1. Aus welchen Gründen benutzen sie jetzt ein anderes Modell?

2.2. Gab es irgendetwas, das dennoch bei den alten Modellen besser war?

3. Zu welchem Zweck werden die Ergebnisse ihres Datagloves verwendet?

4. Verwenden Sie gleichzeitig einen rechten und einen linken Dataglove?

j/n	
-----	--

5. Welche Funktionen muss der Dataglove beherrschen, um den Aufgaben gerecht zu werden?

5.1. Reicht die Anzahl der Biegesensoren in den Fingern?

j/n	
-----	--

 5.1.1 In dem Daumen?

j/n	
-----	--

5.1.2 Wo sollten Ihrer Meinung nach noch weitere Biegungen ermittelt werden?

Gibt es Funktionen, die von der Qualität her nicht zufriedenstellend sind?

5.2. Wie beurteilen Sie die Messung der Winkelstellung
 5.2.1 der Finger

+									-
+									-

 5.2.2 des Daumens.....

5.3. Wie beurteilen Sie die ergonomischen Eigenschaften ihres Datagloves?
 5.3.1 Tragekomfort allgemein.....

+									-
+									-

 5.3.2 Passgenauigkeit

5.7.5 Ist die Bewegungsfreiheit durch die Datenleitung beeinträchtigt? j/n

5.7.6 Welche Verbesserungen sind hierbei wünschenswert?

5.8. Kann Ihr Dataglove eine Krafrückmeldung geben? (Force Feedback)..... j/n

5.8.1 Wie wichtig ist oder wäre diese Funktion in ihrem Arbeitsfeld?

+								-
---	--	--	--	--	--	--	--	---

Warum?

Wenn Sie diese Funktion benutzen, wie beurteilen Sie

- 5.8.2 die Gegenkraft?.....
- 5.8.3 die Agilität?.....
- 5.8.4 das Gewicht der Mechanik.....
- 5.8.5 das äußere Volumen der Mechanik.....

+								-
+								-
+								-
+								-

5.8.6 Haben Sie weitere Verbesserungswünsche?

6. Finden Sie den Preis Ihres Datagloves angemessen?..... j/n

6.1. Würden Sie ein Modulares Dataglove System bevorzugen, wenn Sie aktuell nicht alle Funktionen benötigen?..... j/n

7. Welche Funktionen müssten Ihrer Meinung nach optimiert werden, um „besser“ mit dem Dataglove forschen zu können.

8. Welche Änderungen wünschen Sie sich, um den Dataglove in weiteren Gebieten einsetzen zu können?

9. Haben Sie noch weitere Anmerkungen zu dem Thema?

Vielen Dank für Ihre freundliche Mitarbeit :)

Anforderungen: Taktile Sensoren - Dataglove Stand: 27.05.11

	Anforderung	Min	Soll	Max	Einheiten	Bewertung
Fest- anforderungen	Kraftaufnahme	0,1		10	Newton	
	Lebensdauer	10 000			Schaltzyklen	
	Schnittstelle zur Bluetooth Übertragungsbox					
	geeignet für die Adaption mit Immersion CyberGlove II					
	geeignet für Verfahren der Kleinserienfertigung					
Mindest- anforderungen	gegen Verdrehen gesichert von	-10		10	Grad	••••
	möglichst dünnwandig					•••
	möglichst flexible Sensorfläche					••
	möglichst elastischer Schuh					•••
	robuste Übergangskontakte					••••
	möglichst integrierte Verkabelung					••
	möglichst dampfdurchlässig					•
möglichst griffige Sensoroberfläche					•••	
Wünsche	ästhetisch					••

Ergänzungen: Stand: 28.06.11

	Anforderung	Min	Soll	Max	Einheiten	Bewertung
Fest- anforderungen	Einbinden der Sensoren in Trägerchassis - Taktilhandschuh					
	Taktilhandschuh unter Cyberglove II tragbar					
Mindest- anforderungen	möglichst robust					••••
	möglichst keine Irritation optischer Systeme (monochrom)					•••
	möglichst einfach anzulegen					••
	möglichst guter taktiler Durchgang					•
	möglichst komfortabel (kein drücken)					••
Wünsche	atmungsaktiv					••
	universell passend					••

Abbildung 54: Anforderungsliste [GeBü]

Meilensteine, Taktile Sensor-Entwicklung

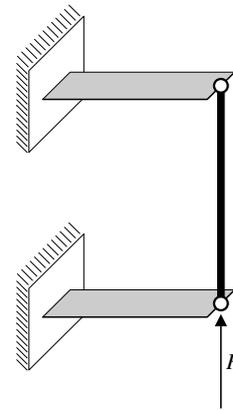
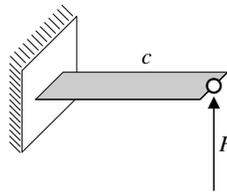
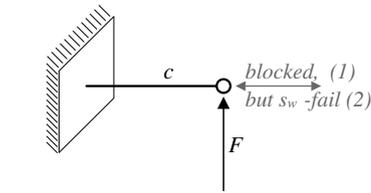
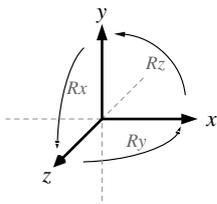
Gereon Büscher 16.05.2011

Monat Woche	1	Mai 2	3	4	Juni 5	6	7	Juli 8	9	10	August 11	12
Recherche	Marktübersicht (Hersteller, Funktionsweisen etc) Anforderungsliste fest											
Messaufbau:	Konzepte Bewertung, Auswahl Messeinrichtung Funktion											
Sensor Entwicklung:	Funktionsstrukturen Konzepte (Prinzipielle Lösungen Morphologischer Kasten) Bewertung Vorentwürfe zu maßgebenden Modulen Gesamtentwurf Entwurf überarbeit Bewertung											
Fertigung											Prototyp(en)	Kleinserie
Messreihen Sensoren	Konzepte Bewertung, Auswahl Prototyp testen Auswerten Taktile Sensoren Testen Auswerten											
Dokumentation											Vorschrift	Reinschrift

Abbildung 55: Projektplan, Meilensteine [GeBü]

Measurement Suspension

Gereon Buscher 08.07.11



Degrees of freedom
 (1)

x	y	z	Rx	Ry	Rz
---	---	---	----	----	----

 Fig.(a)
 (2) remaining Target

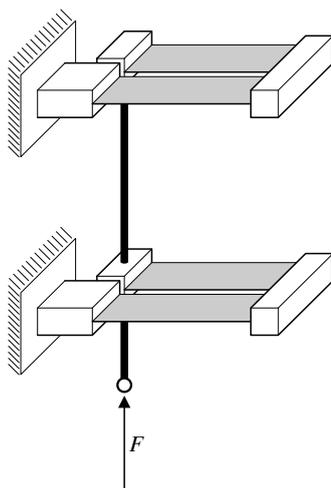
x	y	z	Rx	Ry	Rz
---	---	---	----	----	----

 (b)

x	y	z	Rx	Ry	Rz
---	---	---	----	----	----

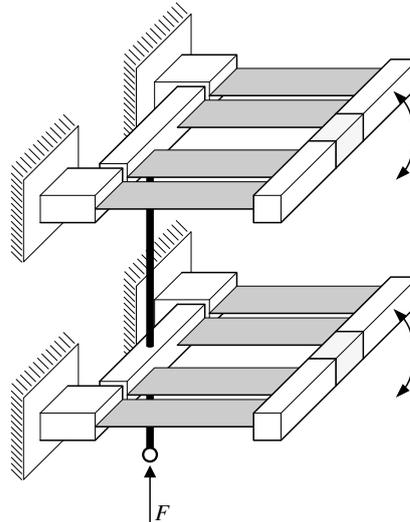
 (c)

Steps of development



x	y	z	Rx	Ry	Rz
---	---	---	----	----	----

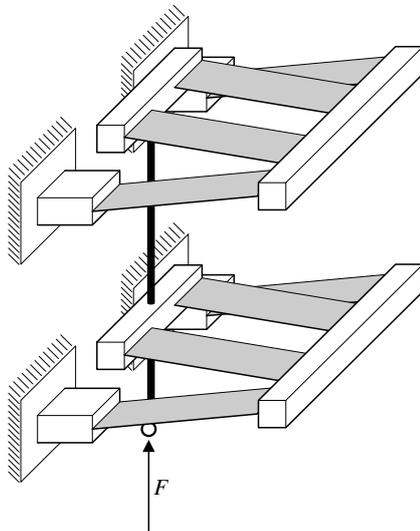
 (d)



x	y	z	Rx	Ry	Rz
---	---	---	----	----	----

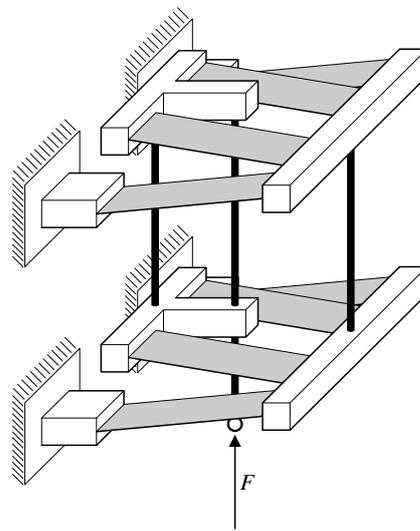
 (e)

Fail compensation



x	y	z	Rx	Ry	Rz
---	---	---	----	----	----

 (f)



x	y	z	Rx	Ry	Rz
---	---	---	----	----	----

 (g)

Optimization

Abbildung 56: Entwicklungsschritte der Messeinrichtungsfederung [GeBü]

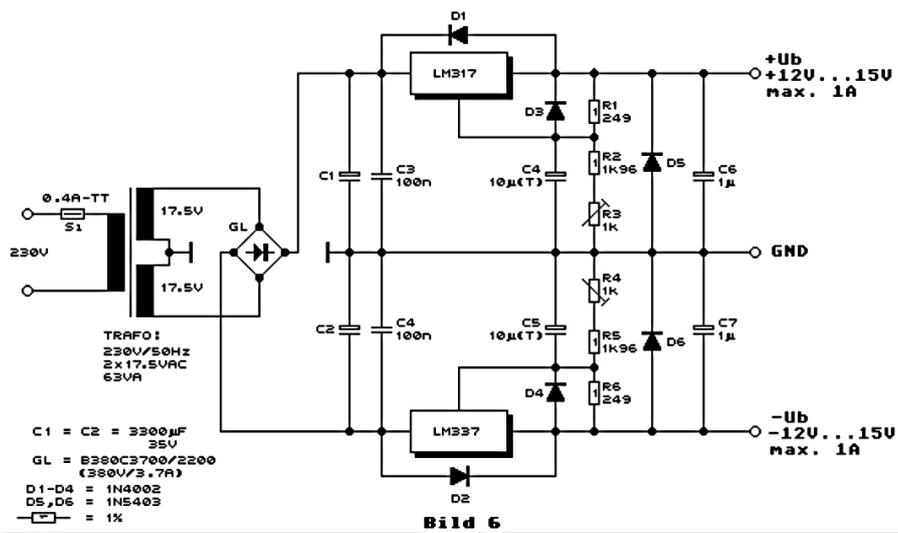


Abbildung 57: Schematik symmetrische Ausgangsspannung, Quelle [34]

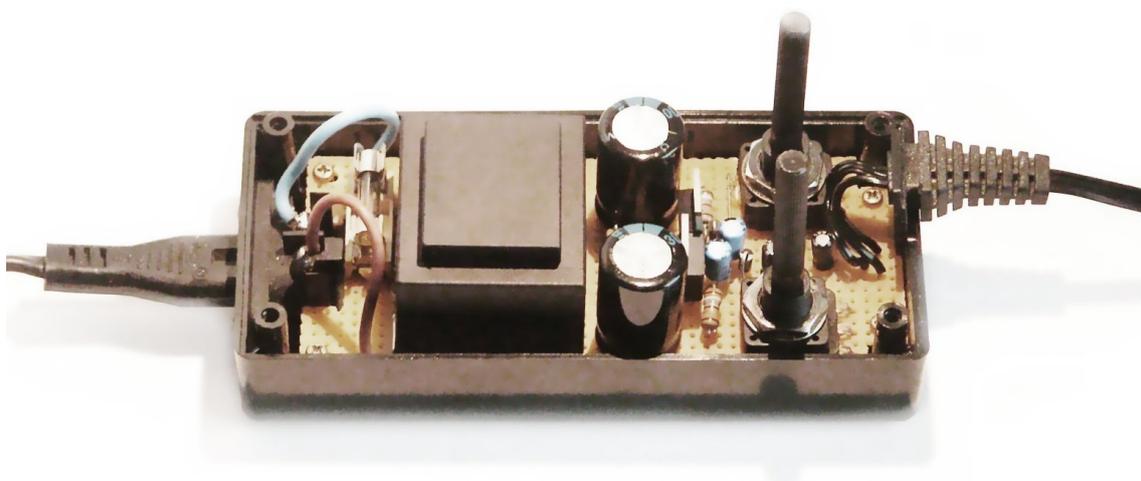
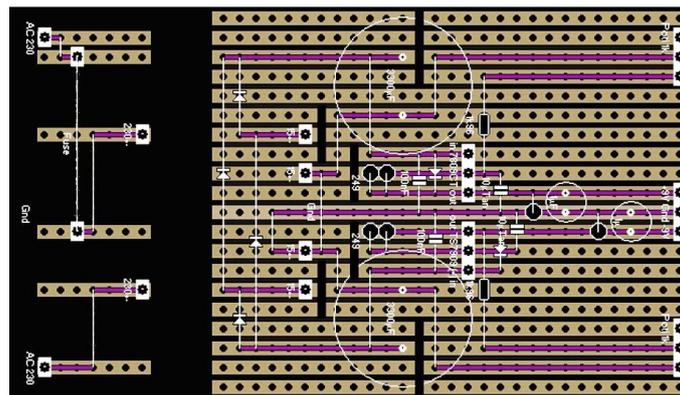


Abbildung 58: Netzteil für positive und negative Spannungsversorgung, STL Ausdruck [GeBü]



Abbildung 59: Screenshot, erstelltes LabView DAQ Programm [GeBü]

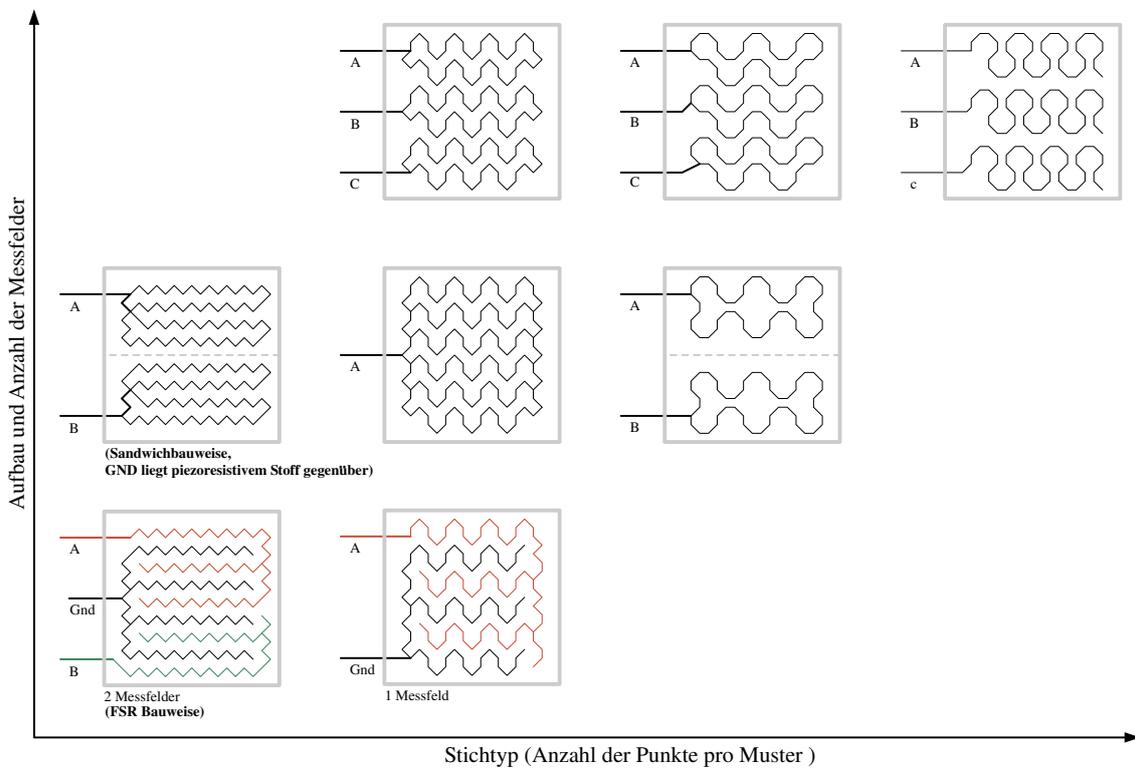
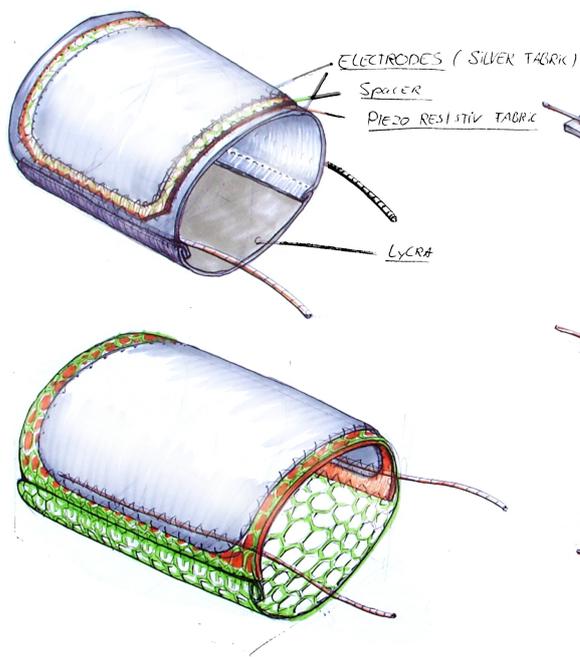


Abbildung 60: Sensor-Elektroden, Morphologie [GeBü]

SENSOR VARIANTS



LAYER VARIANTS
FOR MULTIFIELD MEASURING

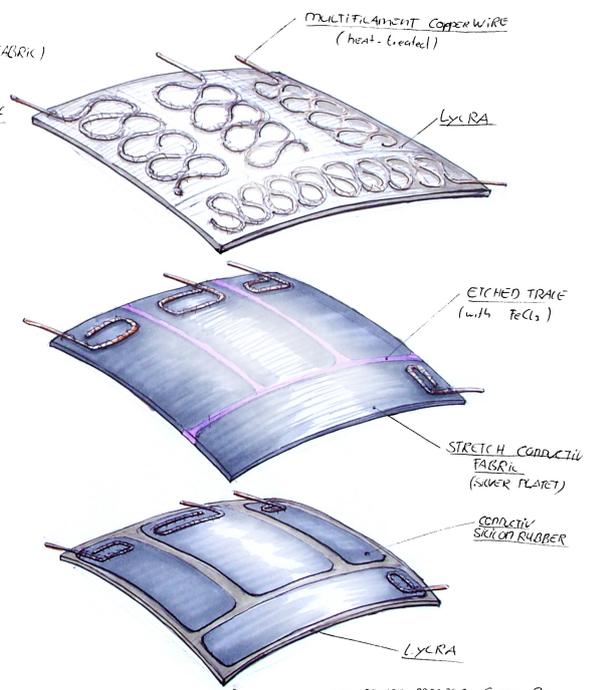


Abbildung 61: Skizzen, Sensorvarianten [GeBü]

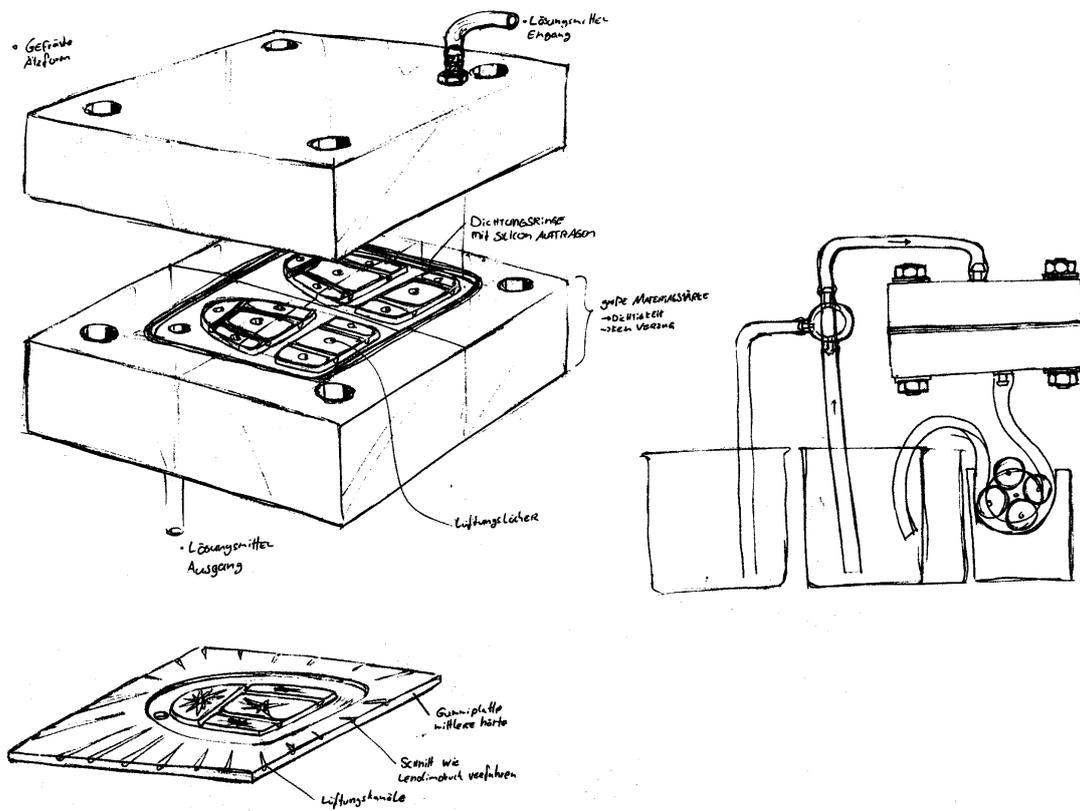


Abbildung 62: Skizzen, Verfahren zum Ätzen [GeBü]

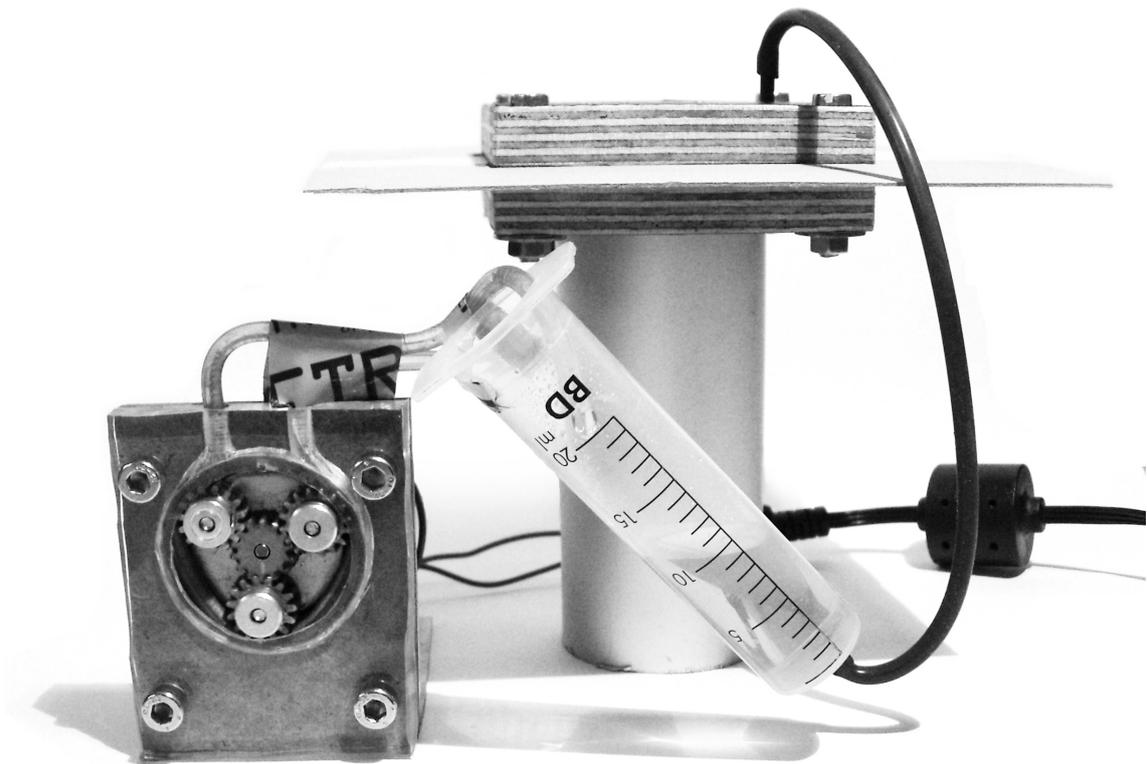
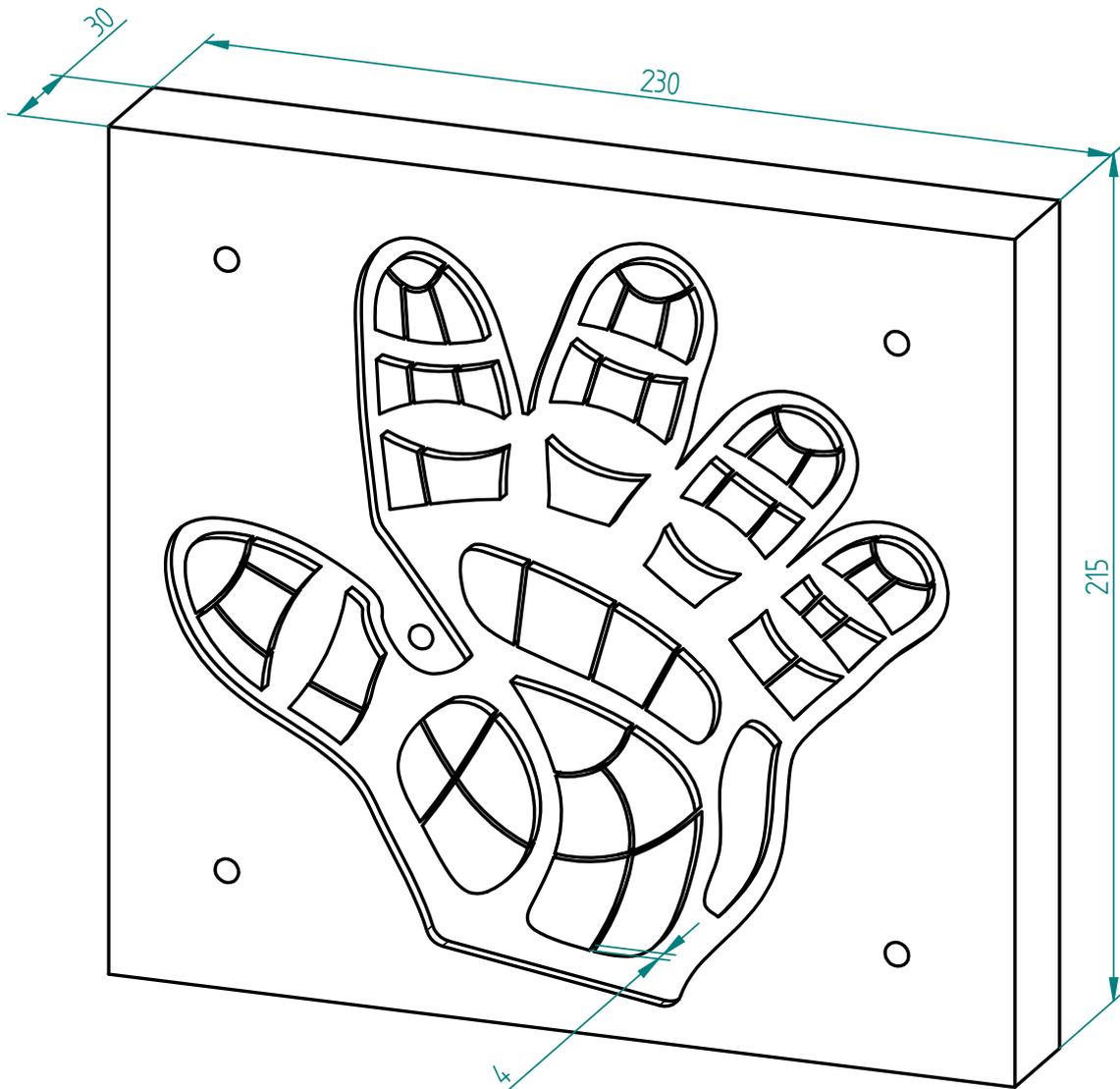


Abbildung 63: Ätzen, realer Aufbau mit Peristaltik Pumpe [GeBü]



Abbildung 66: Foto, Trägerchassismodell [GeBü]



SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Abbildung 67: CAD Zeichnung, Ätzmaske [GeBü]

Leitung Alcy Tasterummanhelt
 64 ADERN 5TC-36T-7B
 let. Nr. 1504

12mm x 8mm
 4mm

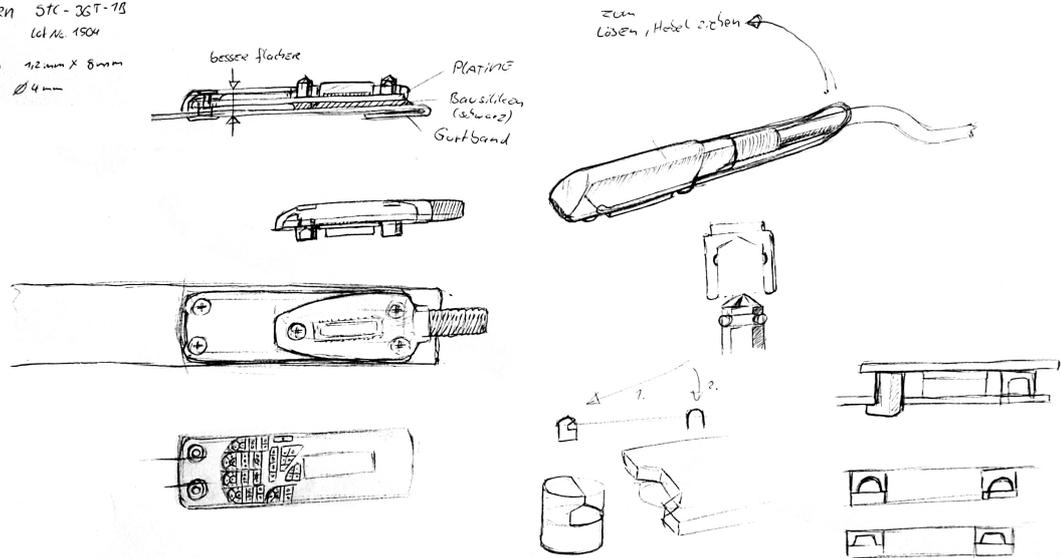


Abbildung 68: Ideenskizzen, Stecker-Mechanismus [GeBü]

Sensor V1.1 Sandwich, Wabe, gespannt, Belastungstempo F400 (schnell)

Kraft / N	Mittelwert \bar{x} / Ω	Standardabw. $2*s / \Omega$	mittlerer Fehler des Mittelw. $\Delta\bar{x} / \Omega$	relativer Fehler
0	3027	495,36	+ - 111	3,66%
2	1845	431,74	+ - 97	5,23%
4	962	295,63	+ - 66	6,87%
6	577	241,12	+ - 54	9,34%
8	426	175,84	+ - 39	9,24%
10	339	115,79	+ - 26	7,63%
12	272	87,46	+ - 20	7,19%
14	224	65,74	+ - 15	6,57%
16	189	54,55	+ - 12	6,45%
18	169	46,99	+ - 11	6,22%
20	147	39,03	+ - 9	5,94%
22	130	35,93	+ - 8	6,16%
24	119	28,82	+ - 6	5,40%
26	108	27,21	+ - 6	5,63%
28	100	21,82	+ - 5	4,88%
30	93	19,33	+ - 4	4,63%
30	83	15,38	+ - 3	4,14%
28	84	15,70	+ - 4	4,15%
26	87	16,79	+ - 4	4,33%
24	90	16,94	+ - 4	4,20%
22	94	17,79	+ - 4	4,25%
20	100	19,28	+ - 4	4,32%
18	106	20,45	+ - 5	4,33%
16	116	22,78	+ - 5	4,41%
14	129	26,06	+ - 6	4,52%
12	142	29,31	+ - 7	4,62%
10	165	34,97	+ - 8	4,74%
8	200	42,58	+ - 10	4,77%
6	259	55,97	+ - 13	4,83%
4	399	125,97	+ - 28	7,06%
2	917	331,55	+ - 74	8,09%
0	3124	188,94	+ - 42	1,35%

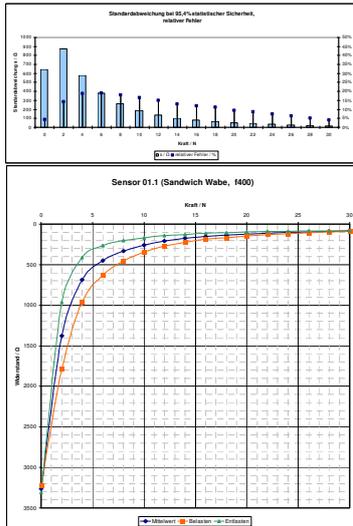
Mittelwert aus Belastung + Entlastung

Kraft / N	Mittelwert \bar{x} / Ω	Standardabw. $2*s / \Omega$	mittlerer Fehler des Mittelw. $\Delta\bar{x} / \Omega$	relativer Fehler
0	3075	387,34	+ - 87	2,82%
2	1381	1004,94	+ - 225	16,27%
4	681	607,37	+ - 136	19,95%
6	418	362,98	+ - 81	19,41%
8	313	259,54	+ - 58	18,56%
10	252	194,25	+ - 43	17,23%
12	207	145,31	+ - 32	15,70%
14	176	107,17	+ - 24	13,58%
16	152	84,64	+ - 19	12,42%
18	137	72,97	+ - 16	11,89%
20	123	56,27	+ - 13	10,20%
22	112	46,39	+ - 10	9,26%
24	105	37,53	+ - 8	8,01%
26	97	31,10	+ - 7	7,14%
28	92	24,47	+ - 5	5,94%
30	88	20,28	+ - 5	5,14%

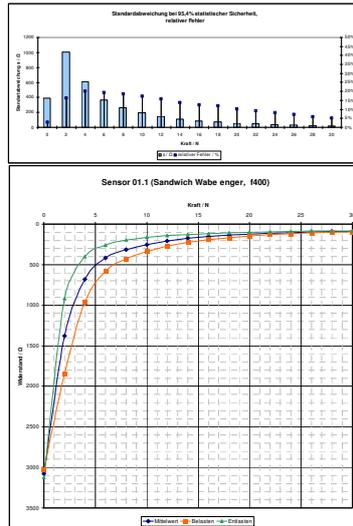
Abbildung 69: Tabelle, Messergebnisse [GeBü]

Übersicht verschiedener Sensorvarianten

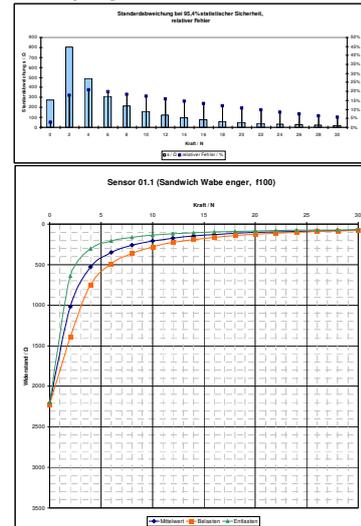
Variante 1.1 (locker)
Sandwichbauweise



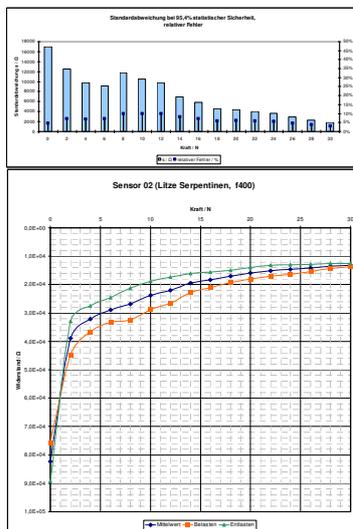
Variante 1.1 (gespannt)



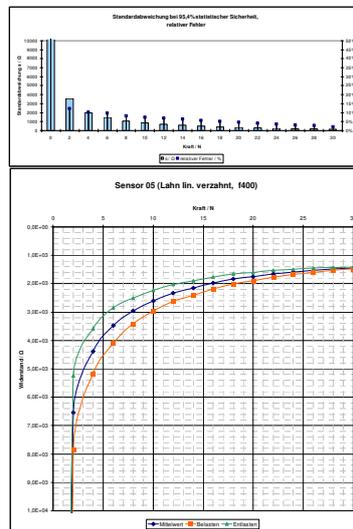
Variante 1.1 (gespannt)
Belastungstempo auf 1/4 reduziert



Variante 2.1
Litze, Serpentin



Variante 4.1
Lahn, lin. Verzahnt



Variante 2.2
Litze, Serpentin, piezores. Stoff doppelseitig

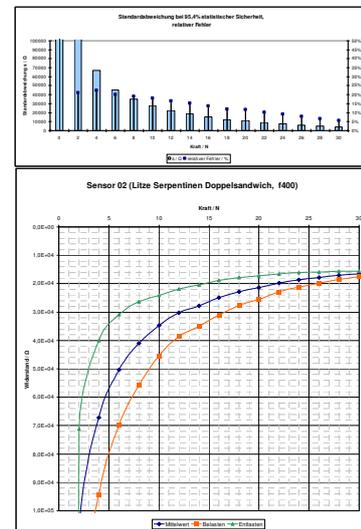


Abbildung 70: Sensorvarianten Charakteristik [GeBü]

Messpunkte, Sensor 01.3 (Sandwich, Waben, f100)

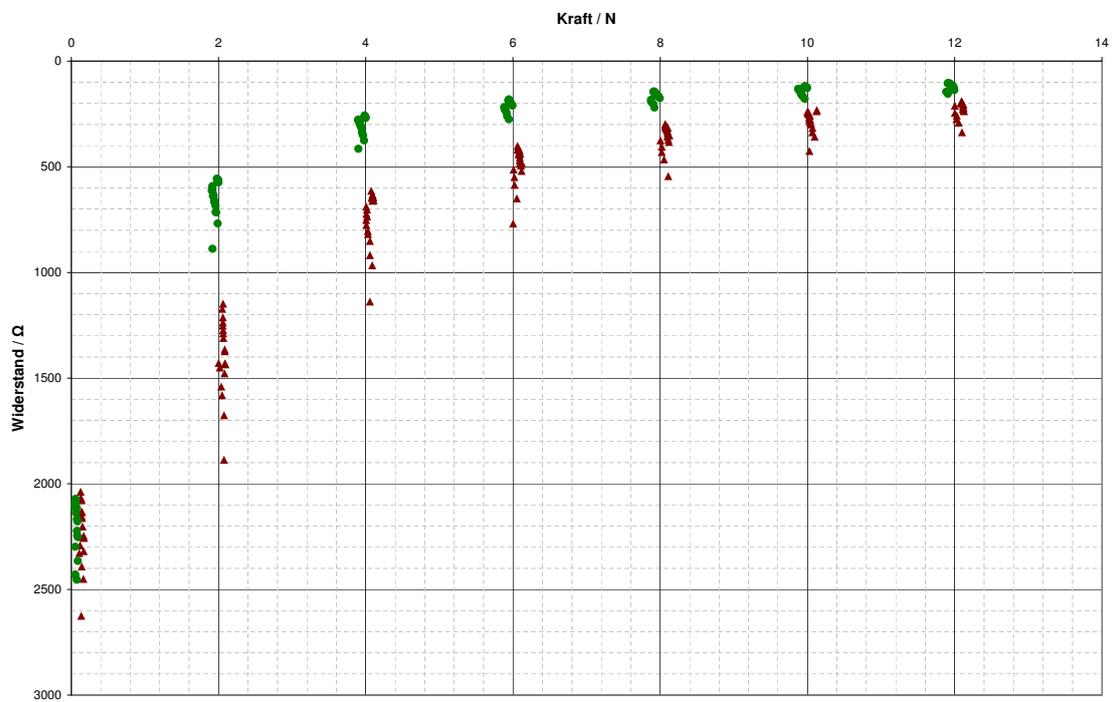


Abbildung 71: Messpunktessatz zur optischen Verfahrenskontrolle, Spektrum 0N bis 12N [GeBü]

Quellen

- [1] Wacker Chemie AG. <http://www.wacker.com/>.
- [2] Akihiko Nagakubo Hassan Alirezaei. A Tactile Distribution Sensor Which Enables Stable Measurement Under High and Dynamic Stretch. *IEEE*, (14-15 March, Lafayette 978-1-4244-3965-2/09/), 2009.
- [3] The Peregrine Baier, Brent. <http://theperegrine.com/product/>.
- [4] CITEC. <http://www.cit-ec.de>.
- [5] Deutsches Institut für Normung. DIN EN ISO 9241-910.
- [6] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN 1319-1, Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe, Januar 1995.
- [7] Wilhelm Domke. *Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung*. Cornelsen, Düsseldorf, 10 edition, 1986.
- [8] Eeonyx Our Nanotechnology Behind Electrically Conductive Fabrics. <http://www.eeonyx.com/technology.php>.
- [9] Hong Zhang Eric So and Yi sheng Guan. Sensing contact with analog resistive technology - Systems, Man, and Cybernetics, 1999. IEEE SMC '99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International.
- [10] Sensitive Fingertip. <http://www.instructables.com/id/sensitive-fingertips/>, 06.23.2009.
- [11] Joachim Frühauf. *Werkstoffe der Mikrotechnik: Lehrbuch für Ingenieure ; mit 89 Tabellen*. Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl., München and , Wien, 2005.
- [12] M. Shikida K.Sato G. Kita, Y. Suzuki. Ball-shaped umbonal fibre for detecting normal and lateral force. *IEEE*, 11.06.2010.
- [13] Wolfgan Georgi and Ergun Metin. *Einführung in LabVIEW*. Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl, München, 4., neu bearb edition.
- [14] Dan Sandin GRAphics Symbiosis System GRASS. <http://www.evl.uic.edu/dan/grass.html>.
- [15] History Of Glove Input Devices Interface Design. <http://interface-design-10.wikis.bgc.bard.edu/history-of-glove-input-devices>.
- [16] Jörg Hoffmann. *Taschenbuch der Messtechnik*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, 4 edition, 2004.

- [17] IEEE. A survey of glove-based input - IEEE Computer Graphics and Applications. *IEEE*, (14-1-6), 1994.
- [18] Yukiko HOSHINO Kenichiro NAGASAKA Tatsuo NINOMIYA Satoshi KAGAMI Hirochika INOUE Masayuki INABA. A Full-body Tactile Sensor Suit Using Electrically Conductive Fabric And Strings - Intelligent Robots and Systems '96, IROS 96, Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Confer. *IEEE*, 1996.
- [19] Hannah Perner-Wilson Mika Satomi. <http://www.kobakant.at/diy/>.
- [20] National Semiconductor. Datenblatt LM234, 26.09.2004.
- [21] HAARLÄNDER online. <http://www.haarlaender-gmbh.com/>, 17.11.2006.
- [22] Perinorm Online. <http://www.perinorm.com>.
- [23] Overview cyberglovesystems.com. <http://www.cyberglovesystems.com/>.
- [24] Ernst-Guenter Paland. *Technisches Taschenbuch*. Schaeffler KG Herzogenaurach Germany, 7., aufl. edition, 2002.
- [25] Pinch Glove Documentation. <http://studierstube.icg>, 13.12.2005.
- [26] A. Hosseini-Sianaki C.J Varley D.M Pollet P.M.Taylor. Advances In An Electrorheological Fluid Based Tactile Array - Developments in Tactile Displays (Digest No. 1997/012), IEE Colloquium on. *IEEE*, 1997.
- [27] Prof. Dr. Roland Friedrich. *Physik Vorkurs*. PhD thesis, FH Bielefeld, Bielefeld, WS 2004/05.
- [28] Virtual Data Gloves Reality. <http://www.vrealities.com/glove.html>.
- [29] K. Mitcham W Hurley R. Wijesiriwardana and T. Dias. Capacitive Fiber-Meshed Transducers for Touch and Proximity-Sensing Applications. *IEEE*, (VOL. 5, NO. 5, OCTOBER 2005).
- [30] Sensitive Fingertips. <http://www.instructables.com/id/sensitive-fingertips/>.
- [31] Bremen Statex Produktions-und Vertriebs GmbH. <http://www.statex.biz/wpi/>.
- [32] taktil Wiktionary. <http://de.wiktionary.org/wiki/taktil>, 16.08.2011.
- [33] TFH-Wildau. <http://www.tfh-wildau.de>.
- [34] Fixe und einstellbare 3-pin-Spannungsregler Thomas Schaerer. <http://www.elektronik-kompodium.de/public/schaerer/ureg3pin.htm>.
- [35] Alexandra Barchunova Ulf Großekathöfer. *Learning of Object Manipulation Operations from Continuous Multimodal Input*. PhD thesis, Universität Bielefeld, Bielefeld, 2011.
- [36] Verein Deutscher Ingenieure. Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, 16.12.1998.

Abbildungsverzeichnis

1	DeFanti, Sandin 1970er Quelle: [14]	1
2	Integration des herkömmlichen Taktilsensors [GeBü]	2
3	Collage; a) Entry Glove, b) Dexterous HandMaster, c) Power Glove, d) 5DT Glove, e) ShapeHand, f) P5 Glove. Quelle: [33], [15]	8
4	Collage; CyberGloveSystems a) CyberGlove II, b) CyberGrasp, c) CyberTouch, d) CyberGlove III, e) CyberForce. Quelle: [12]	10
5	Collage; a) X-IST, b) Pinch-Glove c) Peregrine. Quelle: [15], [3]	11
6	Sensitive-fingertip (Glove) Quelle: [10]	12
7	Ball-shaped umbonal fibre, Quelle: [12]	13
8	Electrorheological Fluid Sensor Array, Quelle: [26] und Full-Body Sensor [18] .	14
9	Tactile Distribution Sensor [2]	15
10	Resistive Flächenware: a) Eeontex $10E5\Omega/sq$, b) Ee. $10E4\Omega/sq$, c) Ee. $10E6\Omega/sq$, d) Vlies, e) Schaum [GeBü]	17
11	Struktureller Aufbau des Messsystems [GeBü]	21
12	Messgrößenwandlung, Federprinzip [GeBü]	23
13	Rechteckfeder, einseitig eingespannt [GeBü]	24
14	Parallelschwingarm [GeBü]	25
15	Verschiebungsfehler-kompensiert [GeBü]	25
16	Federungsschematik [GeBü]	26
17	Gedämpfte und ungedämpfte Schwingung [GeBü]	30
18	Reale Messeinrichtungsfederung samt Wirbelstromdämpfer [GeBü]	31
19	Halbe Wheatstonesche Messbrücke [GeBü]	33
20	Ersatzschaltbild, Blattfeder [GeBü]	35
21	Federung, Kräfteverteilung [GeBü]	37
22	IC LM324, Quelle: [20]	39
23	LT Spice Verstärkerschematik [GeBü]	40
24	STL Layout, bestückte Platine, in Funktion mit provisorischer Schirmung [GeBü]	41
25	Struktogramm, LabView Datenakquise [GeBü]	43
26	Programm, LabView Datenakquise [GeBü]	44
27	Spannungsteiler zur Widerstandsermittlung [GeBü]	46
28	Laboreinrichtung [GeBü]	47
29	Charakteristik, Sensor V. 1 [GeBü]	49
30	Fünf Sinne, erweiterte Quelle: [5]	50
31	Funktionsstruktur, Sensitiv Fingertip Glove [GeBü]	52
32	Schematik, Sensitive Fingertip [GeBü]	53
33	Schematik, Force sensing Resistor [GeBü]	54
34	Morphologischer Kasten [GeBü]	55

35	Sensorvariante 2, Serpentin Muster (Rückseite mit wasserlöslichem Stickfließ) [GeBü]	56
36	Nähmaschine, Umlaufgreifer mit Kapsel, Spulen [GeBü]	57
37	Leitender Silikonkautschuk auf Flachs / Lycra, Bsp. Variante 4 [GeBü]	59
38	Skizze Sandwichbauweise, Sensormaterial mit Größenvergleich [GeBü]	61
39	Schematik, neuer Sensor in Sandwichbauweise [GeBü]	62
40	Topologievarianten - Sensor Nähen [GeBü]	64
41	Ätzversuch mit Vorrichtung, montierte Schalen, Resultat [GeBü]	66
42	Peristaltik Pumpe [GeBü]	68
43	Modifikation, Treibschieberpumpe [GeBü]	69
44	Schnitt Berechnung [GeBü]	70
45	Taktiler Fingerling [GeBü]	72
46	Designskizze Takttilhandschuh, Verkabelung [GeBü]	72
47	Schnittmuster 22 [GeBü]	75
48	Fräsprozess der Ätzmaske [GeBü]	76
49	Ideenskizzen, Schnittstelle [GeBü]	77
50	Platinenlayout, Schnittstelle [GeBü]	78
51	Neuer Takttilsensorhandschuh [GeBü]	79
52	Setup des Cybergolove II mit FSR Takttilsensoren Quelle: [4]	81
53	Einbindung eines FSR's [GeBü]	81
54	Anforderungsliste [GeBü]	85
55	Projektplan, Meilensteine [GeBü]	85
56	Entwicklungsschritte der Messeinrichtungsfederung [GeBü]	86
57	Schematik symmetrische Ausgangsspannung, Quelle [34]	87
58	Netzteil für positive und negative Spannungsversorgung, STL Ausdruck [GeBü]	87
59	Screenshot, erstelltes LabView DAQ Programm [GeBü]	88
60	Sensor-Elektroden, Morphologie [GeBü]	88
61	Skizzen, Sensorvarianten [GeBü]	89
62	Skizzen, Verfahren zum Ätzen [GeBü]	90
63	Ätzen, realer Aufbau mit Peristaltik Pumpe [GeBü]	91
64	Screenshot Solid Edge [GeBü]	92
65	Skizzen, Ideenfindung Spannrahmen [GeBü]	92
66	Foto, Trägerchassismodell [GeBü]	93
67	CAD Zeichnung, Ätzmaske [GeBü]	94
68	Ideenskizzen, Stecker-Mechanismus [GeBü]	95
69	Tabelle, Messergebnisse [GeBü]	96
70	Sensorvarianten Charakteristik [GeBü]	97
71	Messpunktessatz zur optischen Verfahrenskontrolle, Spektrum 0N bis 12N [GeBü]	98