



Internal Report 99-05

Entwicklung und Aufbau von taktiler Sensorik für eine Roboterhand

by

Peer Schmidt

Ruhr-Universität Bochum
Institut für Neuroinformatik
44780 Bochum



IR-INI 99-05
April 1999
ISSN 0943-2752

Diplomarbeit

Entwicklung und Aufbau von taktiler Sensorik für eine Roboterhand

Peer Schmidt

Dezember 1998



*Institut für
Neuroinformatik*



*Ruhr-Universität
Bochum*

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG	1
2 MOTIVATION	3
2.1 WAS GEHÖRT ZUM TASTSINN ?	3
2.2 DIE SENSOREN DES MENSCHLICHEN TASTSINNES	5
2.3 KONSTRUKTIONSPRINZIPIEN TAKTILER SENSOREN	8
3 DIE SENSOREN	11
3.1 DIE STATISCHEN SENSOREN	11
3.1.1 Beschreibung	12
3.1.2 Die Polymerschicht	17
3.1.3 Beschaltung	19
3.1.4 Messungen	21
3.1.5 Beurteilung und Vergleich mit den SA-Sensoren beim Menschen	24
3.2. DIE DYNAMISCHEN SENSOREN	25
3.2.1 Beschreibung	25
3.2.2 Beschaltung	29
3.2.3 Messungen	31
3.2.4 Beurteilung und Vergleich mit RA-Sensoren und Vater-Pacini-Körperchen	34
4 DIE AUSRÜSTUNG EINES ZWEI-BACKEN-GREIFERS MIT SENSOREN	36
5 DIE WEITERVERARBEITUNG DER SENSORSIGNALE	39
5.1 DIE ANALOGE ELEKTRONIK	39
5.1.1 Beschaltung der statischen Sensoren	40
5.1.2 Beschaltung der dynamischen Sensoren	42
5.1.3 Multiplexing der Sensorsignale	42
5.1.4 Die gesamte Schaltung	45
5.2 DIE DIGITALE ELEKTRONIK	46
5.2.1 Der Microcontroller	46
5.2.2 Der CAN-Bus	49

5.2.3 Die Microcontroller-Software	53
5.3 DAS KOMPLETTE SENSORMODUL	55
6 DIE EINBINDUNG IN DAS GESAMTSYSTEM	58
6.1 DIE HARDWARE	58
6.2 DIE SOFTWARE	60
6.3. SCREENSHOTS	64
7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	67
ANHANG	70
A PRINZIPIELLER AUFBAU VON KOMPLEXERER SENSORIK	70
B SCHALTPLAN UND BESTÜCKUNGSPLAN EINES ANALOGMODULS	73
C MECHANIK FÜR DEN AUFBAU DER SENSORIK DES ZWEI-BACKEN-GREIFERS	76
D EIGENSCHAFTEN UND ANSCHLUßBELEGUNG DES MICROCONTROLLER-BOARD	77
E FIRMENADRESSEN	80
LITERATURVERZEICHNIS	81

1 Einleitung

Bei der Manipulation von Gegenständen in der Robotik ist eine Vielzahl von Sensoren erforderlich, die die Sinne des Menschen ersetzen sollen. Neben dem Sehen, dem sicherlich wichtigsten Sinn bei der Manipulation von Gegenständen, ist auch der Tastsinn zur Lösung komplexer Aufgaben wesentlich.

Selbst einfache Aufgaben, wie das Ergreifen eines Gegenstandes, sind ohne Tastsinn nicht lösbar oder stellen sehr hohe Anforderungen an die Präzision des Sehsinnes. Komplizierte motorische Aufgaben werden für technische Systeme ohne Tastsinn unlösbar bleiben.

Ziel dieser Diplomarbeit war es, taktile Sensorik für das im Labor vorhandene Robotersystem zu entwickeln.

Der Mensch ist in der Lage, selbst die komplexesten Tast- und Manipulationsaufgaben mit großer Präzision zu lösen. Daher ist es naheliegend bei der Entwicklung von technischen Tastsensoren den menschlichen Tastsinn, insbesondere die Sensoren der menschlichen Hand, zum Vorbild zu nehmen.

In der Hand werden statische und dynamische Tasteindrücke von unterschiedlichen Sensortypen registriert, die in ihrer Struktur sehr verschieden und den unterschiedlichen Anforderungen optimal angepaßt sind.

Dynamische Sensoren spielen dabei beim Erkennungsvermögen eine wesentliche Rolle. Damit eine hohe Auflösung erreicht wird, müssen wir die Finger aktiv bewegen. Dennoch wurde bei der Entwicklung taktiler Sensorik bisher eher geringer Wert auf die dynamischen Aspekte des Tastens gelegt. Dynamische Sensoren wurden im allgemeinen allenfalls zur Wahrnehmung von rutschenden Objekten eingesetzt.

Um der wichtigen Rolle dynamischer Tasteindrücke gerecht zu werden, werden im Rahmen dieser Arbeit zwei Sensortypen vorgestellt. Ein Sensortyp dient ausschließlich zur Messung von statischen, ein weiterer zur Messung von dynamischen Komponenten des Tastens. Durch die Kombination beider Typen sollen die von den menschlichen Sensoren

gelieferten Datenprofile möglichst gut imitiert werden mit dem Ziel, komplexe Aufgaben biologisch motiviert lösen zu können.

Sensoren nach dem Prinzip der hier vorgestellten statischen Sensoren sind bereits von anderen Arbeitsgruppen mit Erfolg eingesetzt worden, um statische Tasteindrücke zu registrieren. Zusätzlich werden hier jedoch dynamische Sensoren mit sehr hoher Empfindlichkeit und vielfältigen Einsatzmöglichkeiten vorgestellt, die sich mit den statischen Sensoren kombinieren lassen und zusammen mit diesen Datenprofile liefern, die der biologischen Realität nahekommen.

Neben den Sensoren ist im Rahmen dieser Arbeit ein System entwickelt worden, das die Sensorsignale weiterverarbeitet und dem Gesamtsystem zur Verfügung stellt. Die Anbindung an das Gesamtsystem erfolgt dabei über den gemeinsamen CAN-Bus, einen schnellen seriellen Bus, über den alle Module des im Labor eingesetzten modularen Robotersystems angesteuert werden. Dadurch wurde es möglich, die Sensorik ohne zusätzliche Verkabelung in das bestehende System zu integrieren. Die Verwendung des CAN-Bus erlaubt außerdem eine einfache Integration in andere Systeme.

In der hier vorliegenden Arbeit wurde ein zum Robotersystem gehörender Zwei-Backen-Greifer mit taktiler Sensorik ausgestattet. Die entwickelte Sensorik ist jedoch prinzipiell auch in Verbindung mit anderen Manipulatoren oder für andere Aufgabenbereiche außerhalb der Robotik einsetzbar. Die Anordnung und Ausführung der statischen und dynamischen Sensoren kann leicht variiert und für unterschiedliche Anwendungen angepaßt werden.

Es folgt zunächst ein Kapitel, in dem die biologischen Grundlagen und die technischen Möglichkeiten beschrieben werden, die für die Entwicklung des hier vorgestellten Systems von Bedeutung waren.

Daraufhin folgt die Beschreibung der Sensoren und im Anschluß daran wird die Bestückung des im Labor eingesetzten Zwei-Backen-Greifers mit diesen Sensoren dargestellt.

Nach der Vorstellung der Elektronik zur Verarbeitung und Weiterleitung der Sensordaten wird schließlich die Einbindung der Sensorik in das Gesamtsystem beschrieben.

Im letzten Kapitel erfolgt eine Zusammenfassung und ein Ausblick.

2 Motivation

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über biologische und technische Grundlagen, die für die in dieser Arbeit entwickelte Sensorik von Bedeutung waren.

Der erste Abschnitt faßt die Voraussetzungen zusammen, die zum Aufbau eines Tastsinnes notwendig sind. Ein Ziel dieser Arbeit war es, Sensoren nach biologischem Vorbild zu entwickeln. Es folgt daher eine kurze Beschreibung der Sensoren des menschlichen Tastsinnes. Der letzte Abschnitt gibt einen Überblick über mögliche Konstruktionsprinzipien taktiler Sensoren.

2.1 Was gehört zum Tastsinn ?

In älteren Büchern wird der menschliche Tastsinn als niederer Sinn bezeichnet. Heute weiß man, daß der Tastsinn zu den differenziertesten und wichtigsten Sinnen des Menschen gehört.

Der Tastsinn trägt wesentlich zur Gestaltwahrnehmung von Gegenständen bei. Um eine klare Vorstellung von einem Gegenstand zu erhalten, führen wir die Finger über seine Oberfläche. Beim Betasten des Inhalts unserer Hosentasche unterscheiden wir mit Leichtigkeit einen Schlüssel von einem Taschenmesser. In der Dunkelheit erhalten wir durch Betasten eine Vorstellung des uns umgebenden Raumes. Diese Fähigkeit ist besonders für Blinde wichtig, wahrscheinlich trägt sie aber bei allen Menschen während der frühkindlichen Entwicklung entscheidend zur Entstehung der Raumvorstellung bei.

Die Hand ist somit eines der wichtigsten Sinnesorgane unseres Körpers.

(zitiert nach H.O. Handwerker, 1995)

Das Ziel bei der Entwicklung taktiler Sensorik ist es, ein System mit Tastsinn auszurüsten. Die taktilen Sensoren selbst sind dabei nur eine Komponente. Damit ein Tastsystem als Tastsinn bezeichnet werden kann, muß es folgende Voraussetzungen mitbringen:

1. Empfindliche Sensoren

Der menschliche Tastsinn verfügt über hochempfindliche Mechanosensoren. Es gibt verschiedene Sensortypen, die auf andauernde Deformationen, Eindruckgeschwindigkeiten und Vibrationen der Haut unterschiedlich antworten. Eine Beschreibung der einzelnen Sensortypen erfolgt im nächsten Kapitel.

Technische Tastsysteme, die in einer natürlichen Umgebung zum Einsatz kommen und die verschiedensten Aufgaben bewältigen sollen, erfordern Sensoren, die sich in ihrer Empfindlichkeit mit den Mechanosensoren des menschlichen Tastsinnes vergleichen lassen. Beim Versuch taktile Probleme mit biologisch motivierten Lösungsstrategien zu lösen ist es außerdem sinnvoll, Sensordaten zur Verfügung zu haben, die ebenfalls Informationen über Deformation, Geschwindigkeit und Vibration liefern, also ein ähnliches Datenprofil wie die menschlichen Sensoren besitzen.

2. Die Fähigkeit Informationen aus benachbarten Sensoren zu differenzieren

Ohne diese Fähigkeit wäre eine Erfassung von Mustern nicht möglich. Beim Menschen werden die Sensorsignale parallel über das zentrale Nervensystem zum somatosensorischen Projektionsareal der Hirnrinde projiziert. An den Fingerspitzen sind die rezeptiven Felder der afferenten Nervenfasern dabei sehr klein, so daß auch Reize, die nur einen Millimeter auseinander liegen, noch als getrennt wahrgenommen werden.

Auch in technischen Systemen müssen bei der Weiterleitung von Signalen zu übergeordneten Systemen die räumlichen und zeitlichen Informationen erhalten bleiben. Im Gegensatz zur parallelen Verarbeitung im Nervensystem ist es technisch bisher nur möglich, Daten sequentiell zu verarbeiten. Um Aussagen über die Gleichzeitigkeit von Ereignissen an verschiedenen Sensoren machen zu können, ist eine sehr schnelle Aufnahme der Daten aller Sensoren notwendig, so daß diese als quasi gleichzeitig betrachtet werden können. Bei der Manipulation von Objekten sind diese im allgemeinen in Bewegung, so daß taktile Daten nur dann einen Sinn ergeben, wenn sie dem übergeordneten System mit hoher Übertragungsrate in Echtzeit übermittelt werden.

3. Die Fähigkeit sensorische Daten mit der Tastmotorik zu verrechnen

Diese Fähigkeit ist Voraussetzung für die Manipulation von Objekten mit taktilem Feedback. Sie wird vom menschlichen Gehirn so perfekt beherrscht, daß durch „Ertasten“ sogar die Vorstellung von der Gestalt eines Gegenstandes erzeugt werden kann.

Letztendlich soll diese Leistung auch mit technischen Sensoren erbracht werden. Aber auch die Manipulation von bereits bekannten Objekten und die Erzeugung von stabilen Griffen mit Hilfe taktiler Rückkopplung sind für technische Systeme bereits anspruchsvolle Aufgaben. Da es sich bei motorischen und sensorischen Daten um dynamische Daten handelt, müssen diese in Echtzeit miteinander verrechnet werden.

In dieser Arbeit ist versucht worden, die notwendige Hardware zur Ausrüstung eines bestehenden Robotersystems mit einem Tastsinn zu schaffen. Damit die taktile Sensorik zu einem Tastsinn wird, muß jedoch auch die entsprechende Software zur Verrechnung von taktilen und motorischen Daten entwickelt werden. Neben den Sensoren und der Hardware zur Weiterleitung der Sensordaten sind daher auch Programme zur komfortablen Anzeige und Verwaltung der Sensordaten entstanden, die die weitere Entwicklung von Software vereinfachen sollen.

2.2 Die Sensoren des menschlichen Tastsinnes

Bei den in dieser Arbeit vorgestellten Sensoren wird versucht, sich an den Sensoren des menschlichen Tastsinnes zu orientieren. In diesem Abschnitt wird ein Überblick über diese gegeben.

In der Haut der Handfläche des Menschen befinden sich im wesentlichen vier Typen von Tastsensoren (Mechanosensoren). Diese Sensoren sind sehr empfindlich und können schon auf Verformungen der Haut in der Größenordnung von Bruchteilen eines Millimeters antworten. Das Antwortverhalten der einzelnen Sensortypen zeigt Abbildung 2-1.

Zwei Sensortypen, SA I und SA II¹, reagieren auf andauernde Deformationen der Haut, sind also rein statische Sensoren. Der dritte Sensortyp, RA², ist ein Geschwindigkeitsdetektor, dessen Antwortverhalten abhängig von der Eindrucksgeschwindigkeit der Haut ist. Die Vater-Pacini Körperchen als vierter Sensortyp reagieren überwiegend auf Vibrationen und können näherungsweise als Beschleunigungsdetektoren aufgefaßt werden. Bei RA Sensoren und Vater-Pacini Körperchen handelt es sich also um dynamische Sensoren.

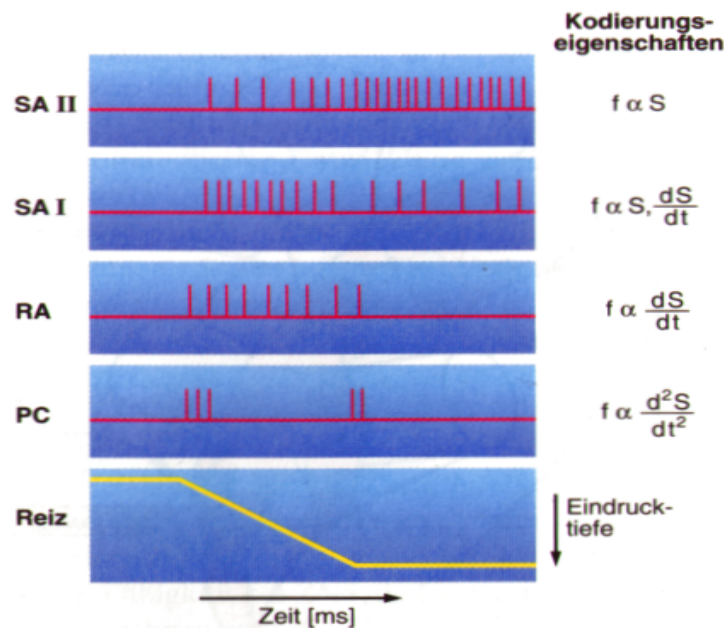


Abbildung 2-1 Kodierungseigenschaften verschiedener Mechanosensoren der Haut. Rechts: Kodierungsfunktionen (S Reizstärke, t Zeit, dS/dt Differentialquotient, entspricht der Geschwindigkeit). SA II und I langsam adaptierende Mechanosensoren („slowly adapting“), Typ II und I. RA rasch adaptierende Mechanosensoren, PC Vater Pacini- Sensoren (aus H.O. Handwerker, 1995).

Morphologisch können den einzelnen Sensortypen verschiedenartige Strukturen in unterschiedlichen Hautschichten zugeordnet werden. Eine schematische Darstellung findet sich in Abbildung 2-2.

Den SA I Sensoren können die Merkel-Zellen zugeordnet werden, die sich durch einen gelappten Kern auszeichnen. Von markhaltigen Nervenfasern ausgehende Axone nehmen

¹ SA: slowly adapting

² RA: rapidly adapting

Kontakt mit diesen auf. Jede der SA I-Afferenzen teilt sich in mehrere Äste auf, die jeweils an einer Merkelzelle enden.

Den SA II-Sensoren werden die Ruffini-Kolben zugeordnet. In diesen kolbenförmigen Körperchen endet jeweils eine markhaltige Nervenfasern.

RA-Sensoren werden vom Ende einer markhaltigen Nervenfasern gebildet, die im komplexen Gebilde des Meissner-Zellkomplexes endet.

Besonders interessant ist der Aufbau der Vater-Pacini-Körperchen. Diese bestehen aus einem freien Nervenende, das von einer zwiebelartigen Struktur umhüllt ist. Ohne diese Struktur wird aus dem extrem schnell adaptierenden Sensor ein langsam adaptierender, dessen Antwortverhalten ähnlich dem eines SA I Sensors ist. Die zwiebelartige Hülle wirkt also als mechanischer Hochpaß.

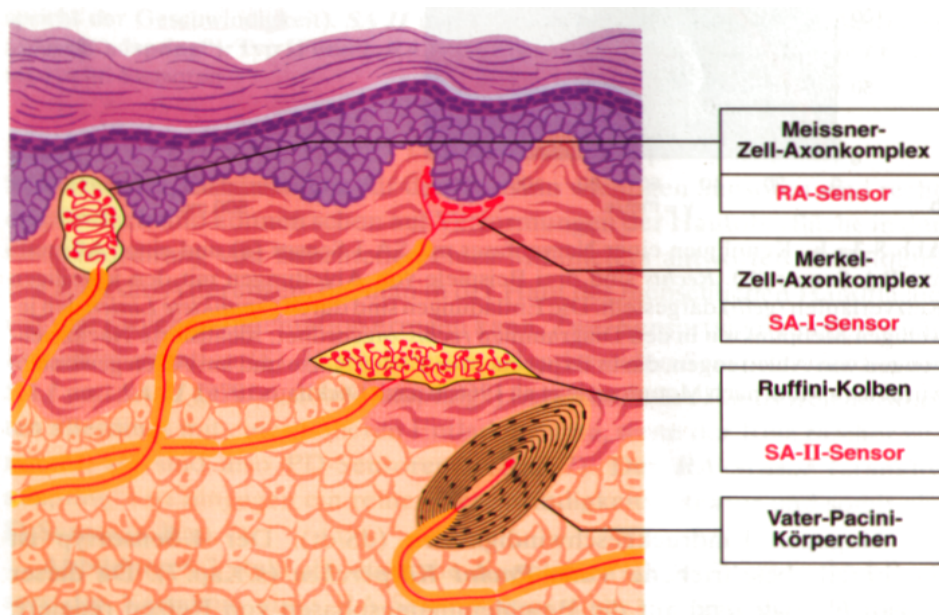


Abbildung 2-2 Schematische Darstellung der wichtigsten Mechanosensortypen der unbehaarten Haut des Menschen und anderer Säugetiere (Mod. nach Kandel 1981, aus H.O. Handwerker, 1995).

An den Fingerspitzen ist die Innervationsdichte der SA I- und der RA-Sensoren besonders hoch und ihre rezeptiven Felder besonders klein, weshalb man annimmt, daß diese Sensortypen für den Tastsinn besonders wichtig sind.

Von den menschlichen Sensoren motiviert werden in dieser Arbeit zwei Sensortypen vorgestellt, die ebenfalls auf andauernde Deformationen, Geschwindigkeit und Vibrationen reagieren.

Andauernde Deformationen werden dabei vom ersten Typ, den statischen Sensoren registriert, Annäherungsgeschwindigkeiten von den dynamischen Sensoren. Vibrationen werden ebenfalls über die dynamischen Sensoren registriert. Dazu wird das Sensorsignal noch vor der Digitalisierung über einen elektrischen Hochpaß gefiltert. Diese Filterung ist motiviert vom mechanischen Hochpaß der Vater-Pacini-Körperchen.

2.3 Konstruktionsprinzipien taktiler Sensoren

Vor allem in den Bereichen Robotik und Medizin sind die verschiedensten Arten taktiler Sensoren entwickelt worden. Für die in dieser Arbeit vorgestellten Sensoren mußten zunächst geeignete Konstruktionsprinzipien aus einer Vielzahl von Möglichkeiten ausgewählt werden. Die Konstruktionsprinzipien der am häufigsten eingesetzten Sensortypen werden in diesem Abschnitt kurz vorgestellt:

Kapazitive Sensoren können auf verschiedene Weise realisiert werden. Sie basieren im allgemeinen auf Plattenkondensatoren. Für deren Kapazität gilt:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot A}{d} ,$$

wobei ε die dielektrische Konstante (F/m), A die Fläche (m^2) und d der Abstand (m) der Kondensatorplatten ist.

Auf einen Sensor wirkende Kräfte können den Plattenabstand oder möglicherweise auch die effektive Fläche (durch Verschiebung der Platten zueinander) verändern, was zu einer meßbaren Kapazitätsänderung führt. Vorteile von kapazitiven Sensoren sind ihre geringen Abmessungen, was die Anordnung zu dichten Sensorarrays erlaubt. Außerdem lassen sich sowohl statische als auch dynamische Messungen mit ihnen durchzuführen. Nachteilig wirkt sich die Streukapazität aus, die einen Großteil der zu messenden Kapazität ausmachen kann. Kapazitive Sensoren sind bisher von verschiedenen Gruppen zur Mes-

sung von Normal- und Tangentialkräften benutzt worden (siehe Fan et al., 1984, Miyazaki and Ishida, 1984).

Piezoelektrische Sensoren nutzen den piezoelektrischen Effekt. Ein piezoelektrisches Material erzeugt eine meßbare Ladung, wenn es mechanischen Kräften oder Deformationen ausgesetzt wird. Vorteile bestehen darin, daß die Materialien sehr dünn und flexibel sind. Außerdem weisen sie eine sehr hohe Empfindlichkeit auf. Ein Nachteil besteht darin, daß mit piezoelektrischen Sensoren ausschließlich dynamische Messungen durchgeführt werden können. Dieser Sensortyp wird unter anderem zum Detektieren von Vibrationen eingesetzt (siehe Jockusch, 1996, Dario et al., 1984).

Induktive Sensoren beruhen auf dem Prinzip der magnetischen Induktion. Die Induktivität läßt sich durch Änderungen der Geometrie, der magnetischen Kopplung oder des magnetischen Widerstandes beeinflussen. Vorteile von induktiven Sensoren sind eine hohe Empfindlichkeit und Genauigkeit. Größter Nachteil beim Einsatz als taktile Sensoren ist die Größe aller bisherigen Entwicklungen. Ein weit verbreiteter induktiver Sensor ist der LVDT (linear variable differential transformer), der kommerziell vertrieben wird und zum Beispiel in Kraft-/Momentensensoren zum Einsatz kommt (siehe Liu, 1998, Schaevitz Engineering, 1987).

Optoelektrische Sensoren können auf unterschiedliche Weise realisiert werden. Ihr Aufbau ist im allgemeinen recht kompliziert. Wesentliche Komponenten eines optischen Tastsystems sind eine Lichtquelle, ein Modulationsmedium, ein Weiterleitungsmedium und ein Photodetektor. Normalerweise wird im Modulationsmedium durch auf die Sensoren erfolgenden Druck eine Änderung der Lichtintensität herbeigeführt, die vom Photodetektor registriert wird (siehe Evans, 1985).

Als **Piezoresistive Sensoren** werden alle Sensoren bezeichnet, die auf einwirkenden Druck mit einer Widerstandsänderung antworten (griech. piezein: drücken, pressen). Piezoresistive Sensoren werden sehr häufig eingesetzt, da die Messung von Widerstandsänderungen einen sehr geringen Aufwand an Elektronik erfordert. Die am häufigsten verwendeten piezoresistiven Sensortypen sind:

a) Dehnungsmeßstreifen: Es gibt Metall- und Halbleiter-Dehnungsmeßstreifen. Diese ändern ihren Widerstand abhängig davon, wie stark sie gedehnt werden und können daher bei geeigneter Anordnung als taktile Sensoren eingesetzt werden. Die Widerstandsänderung bei Halbleiter-Dehnungsmeßstreifen ist dabei wesentlich größer als bei Metallen. Dafür besitzen Halbleiter-Dehnungsmeßstreifen eine hohe Temperaturabhängigkeit, so daß im allgemeinen Maßnahmen zur Kompensation der Temperaturabhängigkeit getroffen werden müssen. Größter Nachteil beim Einsatz von Dehnungsmeßstreifen als taktile Sensoren ist der komplizierte mechanische Aufbau, der eine große Sorgfalt bei der Herstellung der Sensoren erfordert.

b) Leitende Elastomere: Hier werden einer Elastomer- oder Gummifolie leitende Partikel untergemischt. Druck vergrößert die Kontaktfläche zwischen Folie und einer darunter liegenden Elektrode, wodurch der Widerstand zwischen diesen verkleinert wird. Diese Sensoren werden häufig in Tastaturen eingesetzt, da sie sehr kostengünstig herzustellen sind. Zur genauen Messung von Kräften sind auf diesem Prinzip beruhende Sensoren nicht geeignet, da die Wiederholgenauigkeit und die Bandbreite sehr gering ist.

c) FSR's (Force Sensing Resistor): Auch hier handelt es sich um Foliensensoren. Dabei wird eine halbleitende Polymer-Tinte auf eine Folie aufgebracht. Unter Druck ändert diese ihren Widerstand sehr stark (im Bereich von ca. $10\text{ M}\Omega$ bis ca. $1\text{ k}\Omega$). Der Widerstand kann über unterhalb der Folie liegende Elektroden gemessen werden. Hergestellt wird diese Folie von der Firma Interlink, die das Verfahren patentiert hat. Da die Folien leicht zu verarbeiten sind und die Möglichkeit einer einfachen Beschaltung besteht, haben sie in letzter Zeit eine rasche Verbreitung in der Robotik erfahren. (siehe Liu, 1995, Jockusch, 1996)

In dieser Arbeit ist für die statischen Sensoren eine Konstruktion auf Basis von FSR's gewählt worden, während die dynamischen Sensoren auf kapazitiver Basis aufgebaut sind.

3 Die Sensoren

In diesem Kapitel werden die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Sensoren vorgestellt. Ein Ziel war es, mit den Sensoren die gleichen Tastqualitäten wie mit den menschlichen Sensoren registrieren zu können, also gleichbleibenden Druck, Geschwindigkeit und Vibration. Außerdem sollten insbesondere die dynamischen Tasteindrücke mit hoher Empfindlichkeit registriert werden.

Um dieses Ziel zu erreichen, sind zwei verschiedene Sensortypen entwickelt worden. Der erste Typ registriert ausschließlich Größe und Position einer auf ihn wirkenden Kraft. Es handelt sich also um einen rein statischen Sensor. Der zweite Typ registriert Annäherungsgeschwindigkeiten und auftretende Vibrationen, ist also ein rein dynamischer Sensor.

Der Aufbau und die Beschaltung der Sensoren werden so beschrieben, wie sie am Zwei-Backen-Greifer (siehe Kapitel 4) eingesetzt werden. Die verwendeten Konstruktionsprinzipien ermöglichen es jedoch auch, komplexere Sensoren aufzubauen, die in den jeweiligen Abschnitten kurz skizziert werden.

Während nach dem Prinzip der statischen Sensoren aufgebaute Sensorik schon in anderen Arbeiten verwendet wird, bietet die Konstruktion der dynamischen Sensoren und die Kombinationsmöglichkeiten mit den statischen Sensoren vielfältige neue Möglichkeiten zum Aufbau von taktiler Sensorik.

In den folgenden Abschnitten werden beide Sensortypen vorgestellt.

3.1 Die statischen Sensoren

Mit den hier beschriebenen Sensoren lassen sich Mittelwerte von Ort und Größe der auf eine Fläche wirkenden Kräfte messen. Dadurch war es möglich, die Verkabelung und Elektronik der Sensorik gegenüber einem Sensorarray drastisch zu reduzieren. Im praktischen Einsatz an einem Zwei-Backen-Greifer dürfte diese Methode kaum Einschränkungen mit sich bringen. Prinzipiell lassen sich mit dem gleichen Konstruktionsprinzip jedoch auch Sensorarrays aufbauen.

3.1.1 Beschreibung

Bei den Sensoren handelt es sich um piezoresistive Foliensensoren, die auf von der Firma Interlink hergestellten, mit einer halbleitenden Polymer-Tinte bedruckten Folien basieren. Die Interlink-Folien finden mittlerweile eine weite Verbreitung in der Robotik und werden unter anderem vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) an der Vier-Finger-Hand eines Leichtbauroboters eingesetzt (siehe Liu, 1998), sowie von der Technischen Fakultät der Universität Bielefeld an einer Drei-Finger-Hand (siehe Jockusch, 1996).

Interlink hat diese Folie patentieren lassen und macht keine Angaben über die Zusammensetzung der Tinte. Untersuchungen zu den Eigenschaften der Folie finden sich in der Diplomarbeit von Mehler (Mehler, 1994).

Wesentliche Eigenschaft der Folie ist es, daß diese ihren statischen Widerstand bei einwirkendem Druck von ca. $10\text{ M}\Omega$ bis auf ca. $1\text{ k}\Omega$ vermindert.

Die Widerstandsänderung läßt sich folgendermaßen erklären: Die Bandlücke dieses Halbleitermaterials ändert sich mit dem mechanischen Druck. Die dadurch veränderte Dichte thermisch angeregter Valenzelektronen im Leitungsband führt zu einer starken Änderung des statischen Widerstandes. Die Widerstand-Druck-Kennlinie hat dabei annähernd exponentiellen Verlauf (nach Jockusch, 1996).

Die Sensoren basieren auf dem Prinzip eines von Interlink unter der Bezeichnung FSR¹-Linearpotentiometer vertriebenen Sensors. Ein solcher Sensor besteht aus drei übereinander liegenden Schichten (siehe Abbildung 3-1):

¹ FSR: Force Sensing Resistor

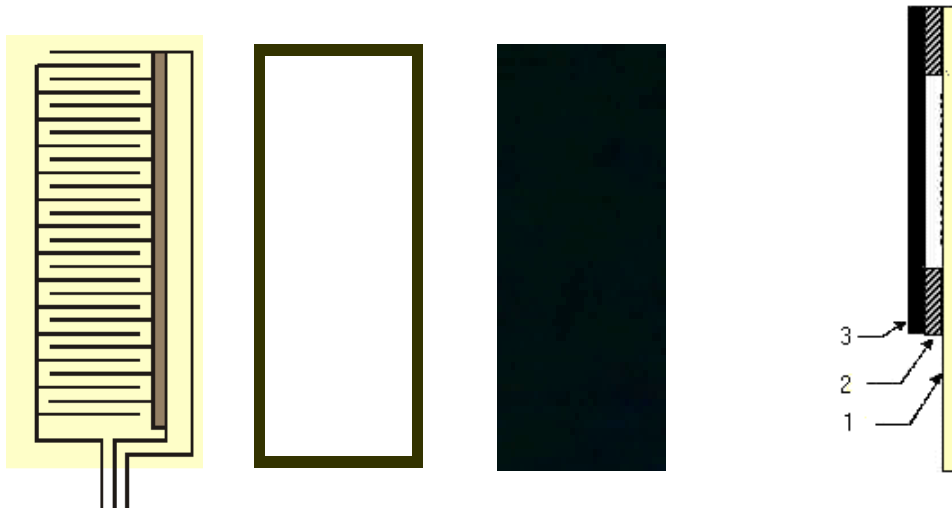


Abbildung 3-1 Komponenten eines Foliensensors. **Von links:** **1:** Basis mit ineinander verschachtelten Kontakt-fingern. Der braune Streifen stellt einen linearen Widerstand dar. **2:** Kleberahmen **3:** Folie bedruckt mit halbleitender Polymertinte. **Rechts:** Querschnitt durch einen Foliensensor.

- **Schicht 1** besteht aus zwei Elektroden mit ineinander verschachtelten Kontakt-fingern. Alle Kontakt-finger der ersten Elektrode sind über einen senkrecht am Rand verlaufenden Kontaktstreifen miteinander verbunden. Ein linearer Widerstand am gegenüberliegenden Rand bringt die Kontakt-finger der zweiten Elektrode über gleiche Teilwiderstände miteinander in Verbindung. Nach außen geführte Anschlüsse sind die Enden des linearen Widerstandes und ein Abgriff an der ersten Elektrode.
- **Schicht 2** ist eine doppelseitige Klebefolie, die auf die Ränder des Sensors geklebt wird. Neben der Verbindung der Schichten ergibt sich damit ein fest definierter Abstand zwischen Schicht 1 und 3.
- **Schicht 3** bildet die von Interlink hergestellte mit Polymertinte bedruckte Folie.

Die ineinander verschachtelten Kontakt-finger bilden bei Kontakt mit der Folie Brücken mit den Einzelwiderständen R_{Bi} (siehe Abbildung 3-2), abhängig vom lokalen Widerstand des Folienstreifens zwischen den jeweiligen Kontakt-fingern. Dieser Widerstand sinkt ungefähr exponentiell mit dem aufgetragenen Druck.

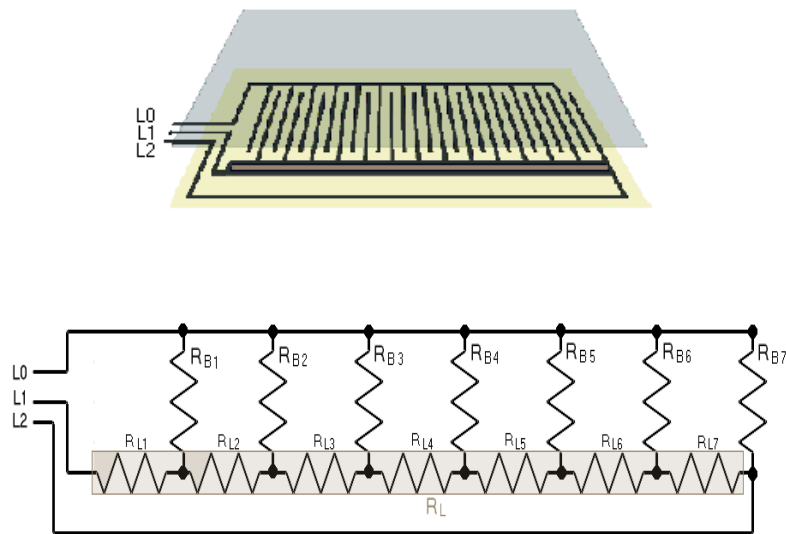


Abbildung 3-2 oben: schematische Darstellung eines Sensors. gelb: Kontaktfingerschicht grau: Polymerschicht in definiertem Abstand **unten:** Ersatzschaltung eines Sensors (bestehend aus 7 Kontaktfingern je Elektrode). Der Widerstand R_L verbindet die Kontaktfinger der zweiten Elektrode über jeweils gleiche Teilwiderstände miteinander. Bei Kontakt mit der Folie werden Brücken zwischen den Kontaktfingern der beiden Elektroden mit den Widerständen R_{Bi} gebildet, die Brückenwiderstände R_{Bi} sind dabei abhängig vom lokalen Druck auf den jeweiligen Folienstreifen.

Im Allgemeinen werden nur auf einen kleinen Teil der Folie Kräfte wirken, so daß die meisten Kontaktfinger die Folie nicht berühren ($R_{Bi} \rightarrow \infty$). Vernachlässigt man den linearen Widerstand R_L , der im allgemeinen klein gegen die Größe der Widerstandsbrücken R_{Bi} ist, ergibt sich der Gesamtwiderstand R_B aller Brücken, wie er zwischen L0 und L2 gemessen werden kann, zu

$$R_B = \left(\sum_i \frac{1}{R_{Bi}} \right)^{-1}.$$

Um mit einem so aufgebauten Sensor Kräfte quantitativ zu bestimmen, muß die Druckverteilung auf der Folie entweder bekannt sein oder es muß dafür gesorgt werden, daß diese Verteilung im wesentlichen unabhängig von der Form der zu betastenden Objekte ist. Um letzteres zu erreichen, werden die Sensoren mit einer Polymerschicht wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben abgedeckt.

Das Anlegen einer Spannung U zwischen L1 und L2 führt dazu, daß jeder Kontaktfinger der zweiten Elektrode auf einem anderen Potential liegt. Die Potentialdifferenzen sind dabei

jeweils gleich groß. Mit N als Gesamtzahl der Kontaktfinger und $U_{L1} = 0$, ergibt sich für die Spannung am i-ten Kontaktfinger:

$$U_i = U \frac{i}{N}$$

Damit läßt sich der Schwerpunkt der Leitwertverteilung wie folgt berechnen (Herleitung nach Jokus, 1996):

Für den Stromfluß über den i-ten Kontaktfinger gilt:

$$I_i = \frac{U_i - U_{L0}}{R_{Bi}}$$

Nach der Knotenregel gilt: $\sum_i I_i = 0 \Rightarrow \sum \left(\frac{U_i}{R_{Bi}} - \frac{U_{L0}}{R_{Bi}} \right) = 0$

$$\Leftrightarrow U_{L0} = \frac{\sum_i \frac{U_i}{R_{Bi}}}{\sum_i R_{Bi}^{-1}}$$

Nach Umstellen und Ersetzen der U_i und mit x_i als Ort des i-ten Kontaktfingers ergibt sich damit der Schwerpunkt der Leitwertverteilung x_s zu:

$$x_s = \frac{\sum_i R_{Bi}^{-1} \cdot x_i}{\sum_i R_{Bi}^{-1}}$$

Falls nur auf eine Stelle der Folie eine Kraft wirkt und die Druckverteilung dieser Kraft symmetrisch ist, was durch die in Abschnitt 3.1.2 beschriebene Polymerschicht erreicht werden soll, ist der Schwerpunkt des Leitwertes gleich dem Schwerpunkt des auf die Folie aufgetragenen Druckes.

Mit einem Sensor der hier vorgestellten Art ist es nur möglich in einer Dimension zu messen. Für Messungen beider Ortskoordinaten müssen daher zwei Sensoren mit senkrecht zueinander stehenden Kontaktfingern übereinander angeordnet werden (siehe Abb.3-3).

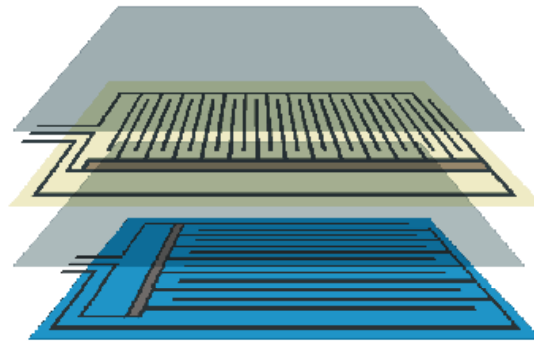


Abbildung 3-3 Schematischer Aufbau eines statischen Sensors zur Ermittlung von x- und y- Koordinate.

Bei Bedarf lassen sich die Sensoren auch als Array aufbauen. Die schematische Darstellung eines Sensorarrays befindet sich im Anhang (siehe Anhang A.1).

Bei den zur Bestückung des Zwei-Backen Greifers aufgebauten Sensoren sind die Elektroden zur Messung der y-Koordinate (Y-Sensor) auf ein Platinenstück geätzt und hinterher versilbert worden. Dieses Verfahren ist auch in der Arbeit von Jockusch angewendet worden (siehe Jockusch, 1996). Die Platine ist über die Sensorfolie hinaus verlängert worden, so daß der Linearwiderstand R_L durch eine Reihe von SMD¹-Widerständen zwischen den Kontaktfingern am oberen Rand der Platine realisiert werden konnte (siehe Abb. 3-4).

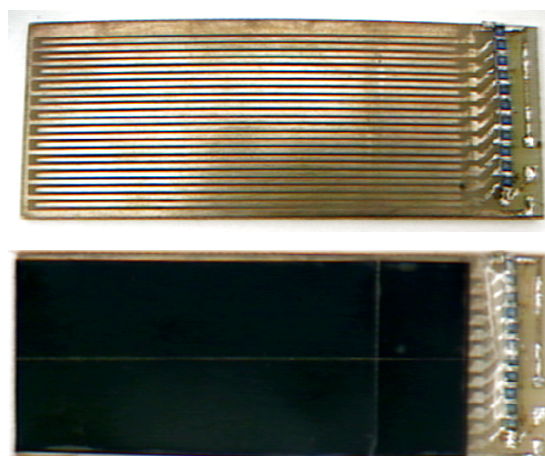


Abbildung 3-4 oben: Kontaktfingerschicht mit Linearwiderstand aus SMD Widerständen, unten: kompletter Y-Sensor.

¹ SMD: Surface Mounted Device

Der Sensor zur Messung der x-Koordinate (X-Sensor) besteht aus einem modifizierten Linearpotentiometer, wie es von der Firma Interlink geliefert wird. Die Elektroden sind bei diesem auf Folie geätzt und der Linearwiderstand ist als Film direkt auf die Folie aufgebracht. Die flexible Folie ermöglicht es, den X-Sensor über dem Y-Sensor anzubringen. Interlink stellt diese Potentiometer nur in einer Ausführung her, weshalb für den Y-Sensor die zuvor beschriebene Konstruktion verwendet worden ist.

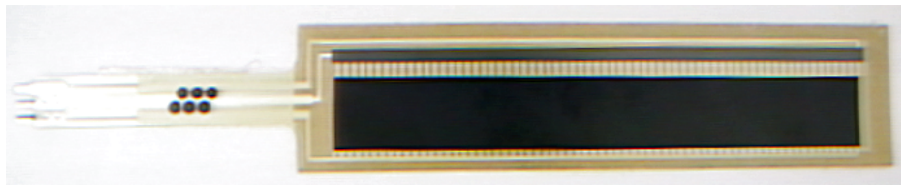


Abbildung 3-5 Interlink Linearpotentiometer

Die naheliegende Lösung, zueinander senkrecht stehende Elektroden beidseitig auf Folie zu ätzen und diese zwischen zwei Lagen Interlink-Folie zu kleben, konnte aus Kostengründen nicht realisiert werden.

Die komplett aufgebauten statischen Sensoren zeigt Abbildung 3-6.

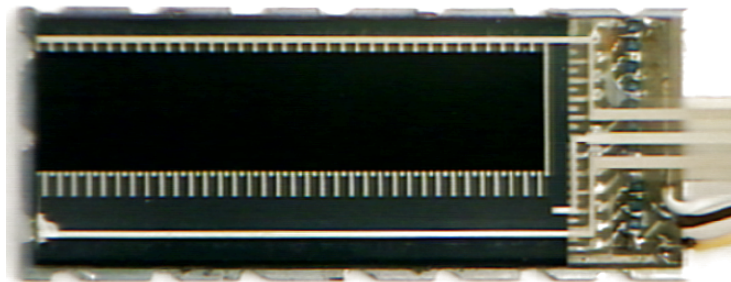


Abbildung 3-6 XY- Sensor auf Basisplatte befestigt.

3.1.2 Die Polymerschicht

Der auf einer Basisplatte befestigte Sensor (siehe Abb. 3-6) wird komplett in ein Polymer eingegossen (siehe Abb. 3-7).

Bei Bedarf ist es so möglich, auch wasserdichte Sensoren herzustellen. Die Rillen wurden nachträglich in die Oberfläche gefräst. Aufgabe der Rillen ist es, neben einer besseren Griffbarkeit die Abhängigkeit der Druckverteilung von der Dicke der Polymerschicht zu verkleinern.

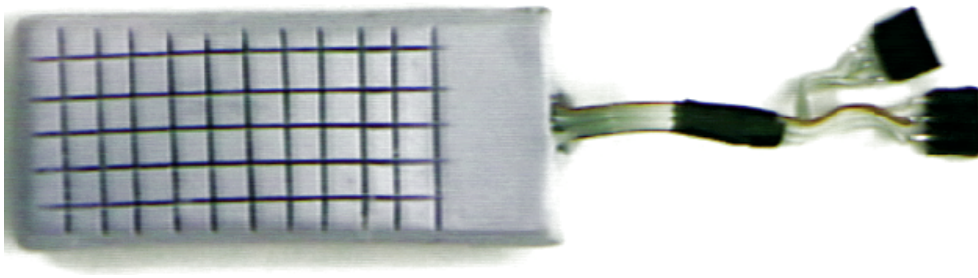


Abbildung 3-7 Statischer Sensor in Polymer vergossen.

Die Polymerschicht erfüllt mehrere Funktionen:

Schutz der Sensorfolie: Durch die robuste Abdeckung wird die empfindliche Sensorfolie vor Beschädigungen durch scharfe Kanten oder ähnlichem geschützt.

Vergrößerung der aktiven Sensorfläche: Da die Abdeckung einwirkende Kräfte großflächiger verteilt, sind auch an den konstruktionsbedingt (aufgrund der Klebefolie) unempfindlichen Rändern der Sensoren noch Messungen möglich.

Verbesserung der Haftung: Die abdeckende Polymerschicht hat einen höheren Reibungskoeffizienten als die Sensorfolie, was einen besseren Halt bei gleichzeitig geringerem Andruck erlaubt.

Bessere Sensordaten: Die Polymerschicht ist mit einer leichten Krümmung versehen worden (siehe Abb. 3-8). Dadurch wird es bei Kontakt mit Objekten im allgemeinen nur einen Berührungspunkt geben. Unter der Polymerschicht wird die Druckverteilung um diesen

Punkt relativ symmetrisch sein. Damit sind die im vorherigen Abschnitt erwähnten Bedingungen für qualitative Kraft- und Positionsmessungen erfüllt.

Es ist versucht worden, die Viskosität des Polymers so zu wählen, daß durch die Verformung bei steigendem Andruck eine ausreichende Größe der Kontaktfläche entsteht.

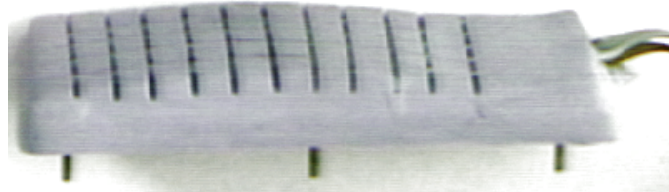


Abbildung 3-8 Seitenansicht eines statischen Sensors. Die Krümmung und die Befestigungsschrauben der Grundplatte sind zu erkennen.

3.1.3 Beschaltung

Die Beschaltung der Sensoren ist sehr einfach und ergibt sich direkt aus deren Beschreibung in Abschnitt 3.1.1. Wenn die Voraussetzungen für qualitative Kraft- und Positionsmessungen erfüllt sind, läßt sich das Ersatzschaltbild des Sensors idealisiert durch Abbildung 3.9 darstellen.

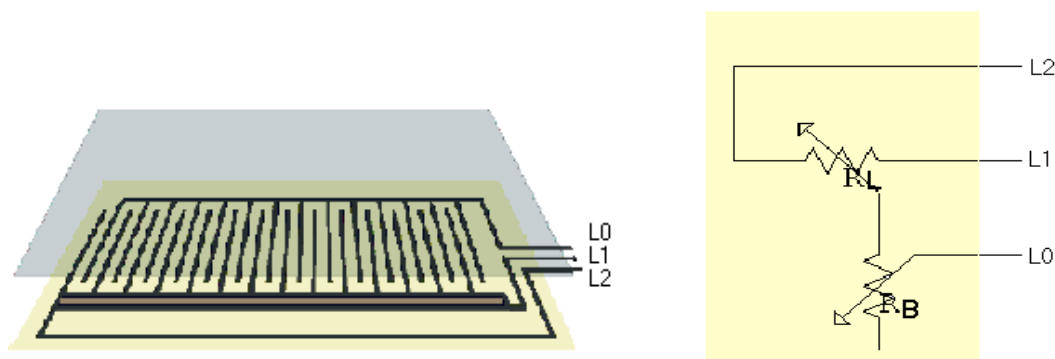


Abbildung 3-9 links: schematische Darstellung eines Foliensensors. **rechts:** Ersatzschaltbild

Positionsmessung: Um den Ort einer auf den Sensor einwirkenden Kraft zu bestimmen, wird zwischen L1 und L2 eine Spannung angelegt. Der Schwerpunkt der Leitwertverteilung als Repräsentation des Ortes ergibt sich aus der Spannung U, die zwischen L0 und L1 gemessen wird (Abb. 3-10).

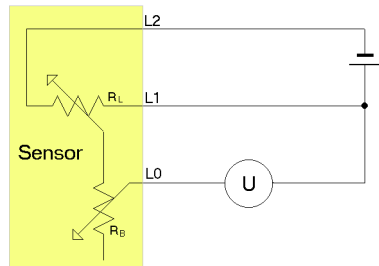


Abbildung 3-10 Beschaltung eines statischen Sensors zur Positionsmessung.

Sei L die Gesamtlänge der aktiven Sensorfläche, also die Länge von R_L . Das Potential bei L1 sei 0, das Potential bei L2 sei U_1 . Bei symmetrischer Verteilung des Druckes ergibt sich damit für den Schwerpunkt x des Andrucks:

$$x = \frac{U}{U_1} \cdot L$$

Kraftmessung: Um Aussagen über die Größe einer einwirkenden Kraft zu machen, wird der Sensor wie in Abbildung 3-11 beschaltet. Der gemessene Spannungsabfall an R_3 wird mit sinkendem Widerstand des Sensors, also zunehmender Kraft, größer.

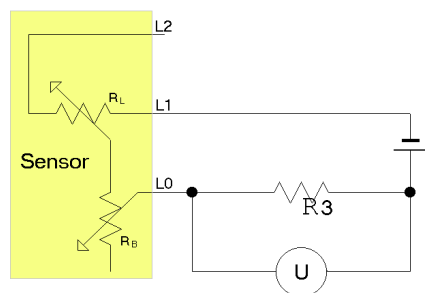


Abbildung 3-11 Beschaltung eines statischen Sensors zur Kraftmessung.

Ein Wechsel zwischen Kraft- und Positionsmessung läßt sich über einen einfachen Umschalter realisieren. Die verwendete Schaltung wird im Kapitel über die Analogelektronik beschrieben (Kapitel 6.1.1)

3.1.4 Messungen

Die durchgeführten Messungen sollen nicht als Maßstab zur Kalibrierung der Sensoren verstanden werden. Lediglich das prinzipielle Verhalten der Sensoren wird gezeigt. Alle Messungen sind an einem komplett aufgebauten XY-Sensor mit Polymerschicht durchgeführt worden (siehe Abb. 3-8). Die vom AD-Wandler gelieferten Werte schwanken während der Aufnahme eines Meßpunktes um eine nahezu konstante Größe, welche durch die Fehlerbalken repräsentiert wird.

3.1.4.1 Kraftmessungen

Es sind verschieden große runde Stempel mit unterschiedlicher Kraft auf die Sensormitte gedrückt worden. Die Stempel hingen dabei an einer Federwaage, wodurch die Auflagekraft aus der Differenz zwischen Gewichtskraft des Stempels und von der Federwaage registrierter Kraft ermittelt werden konnte. Die Kraft ist im Bereich von 0,1 Newton bis 8,5 Newton variiert worden. Die Stempel haben Durchmesser von 3 mm, 19 mm und 39 mm.

Zur Messung ist die in Kapitel 3.3 dargestellte Schaltung mit einem Widerstand R_3 von 100 k Ω verwendet worden. Die Meßkurven sind in Abbildung 3-12 dargestellt.

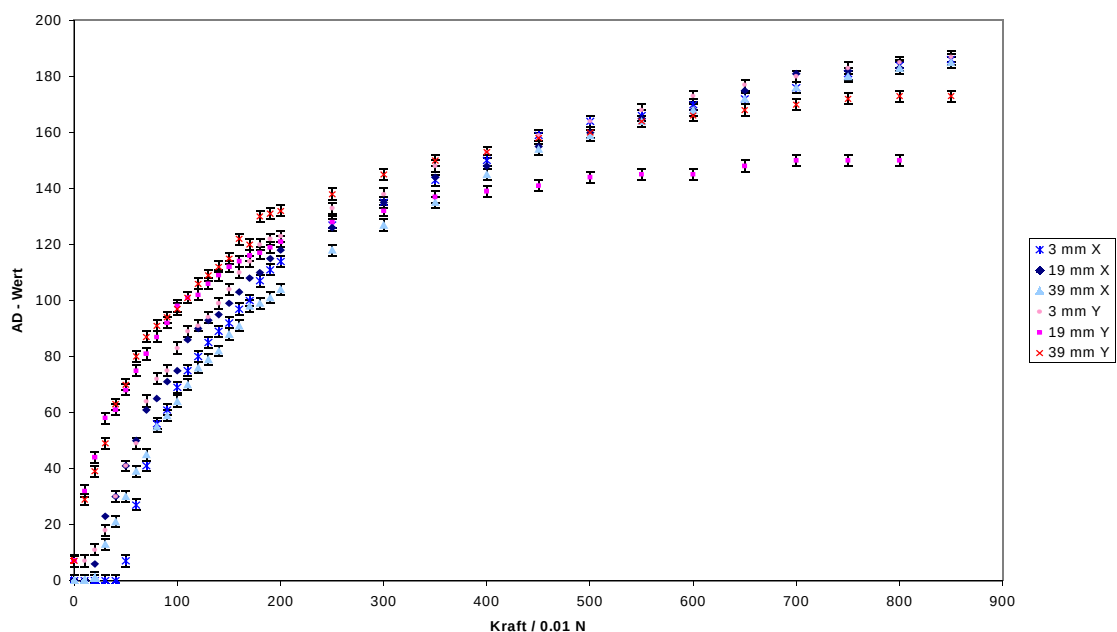


Abbildung 3-12 Sensorwerte in Abhängigkeit der einwirkenden Kraft bei drei verschiedenen Stempelgrößen. Aufgetragen sind die Werte für den X-Sensor (Blautöne) und den Y-Sensor (Rottöne).

Es ist zu sehen, daß der Zusammenhang zwischen Meßwert und Kraft ungefähr logarithmisch ist.

Die Meßwerte des X-Sensors sind nahezu unabhängig von der Stempelform, was darauf zurückzuführen ist, daß dieser unterhalb des Y-Sensors liegt und die darüberliegenden Folien des X-Sensors den Druck gleichmäßiger verteilen. Die y-Werte variieren leicht mit der Größe des Stempels, die Druckverteilung ist also hier nicht völlig unabhängig von der Objektform.

Die Minimalkraft zum Ansprechen der Sensoren liegt in der Sensormitte bei ca 0,2 – 0,5 Newton, abhängig von der Größe des Stempels, dabei ist der oben liegende Y-Sensor etwas empfindlicher.

3.1.4.2 Positionsmessungen

Positionsmessungen sind für X- und Y-Sensor durchgeführt worden, wobei jeweils auf der Mittenachse gemessen worden ist. Es sind Werte bei verschiedenen Auflagekräften aufgenommen worden. Abbildung 3-13 und 3-14 zeigen die Werte des X- bzw. Y-Sensors für einen 3 mm Stempel, Abbildung 3-15 zeigt die Werte des X-Sensors für einen 19 mm Stempel.

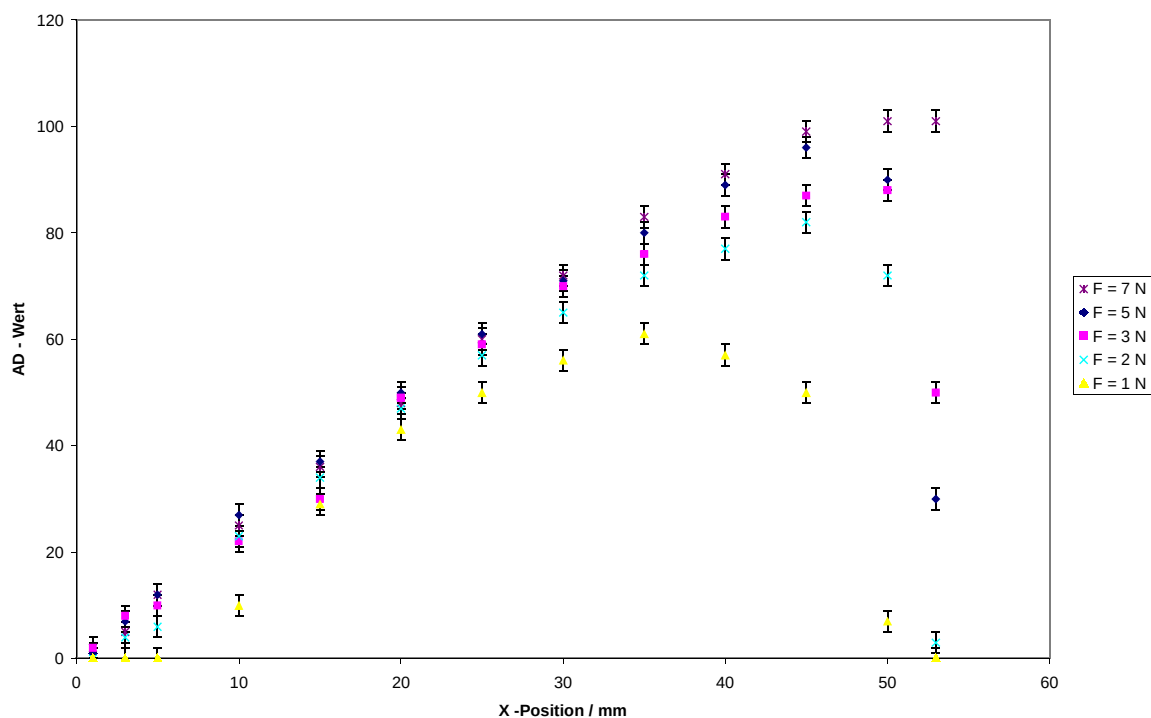


Abbildung 3-13 Sensorwerte des X-Sensors in Abhängigkeit der Position eines 3 mm Stempels.

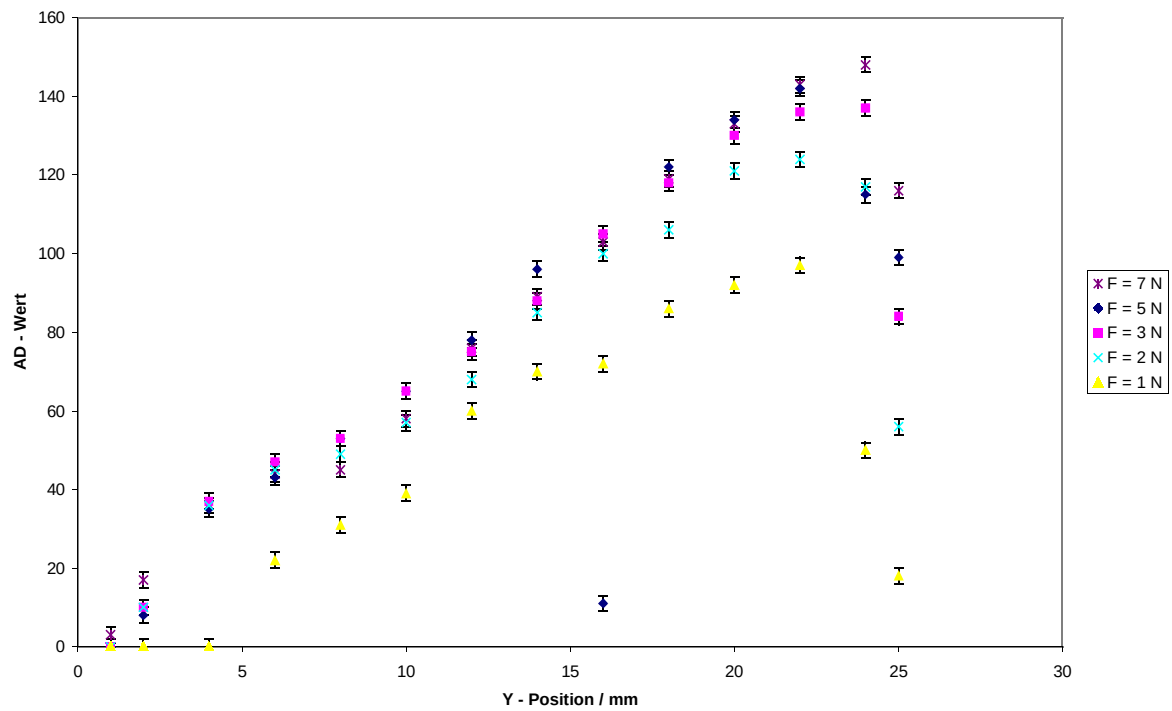


Abbildung 3-14 Sensorwerte des Y-Sensors in Abhängigkeit der Position eines 3 mm Stempels.

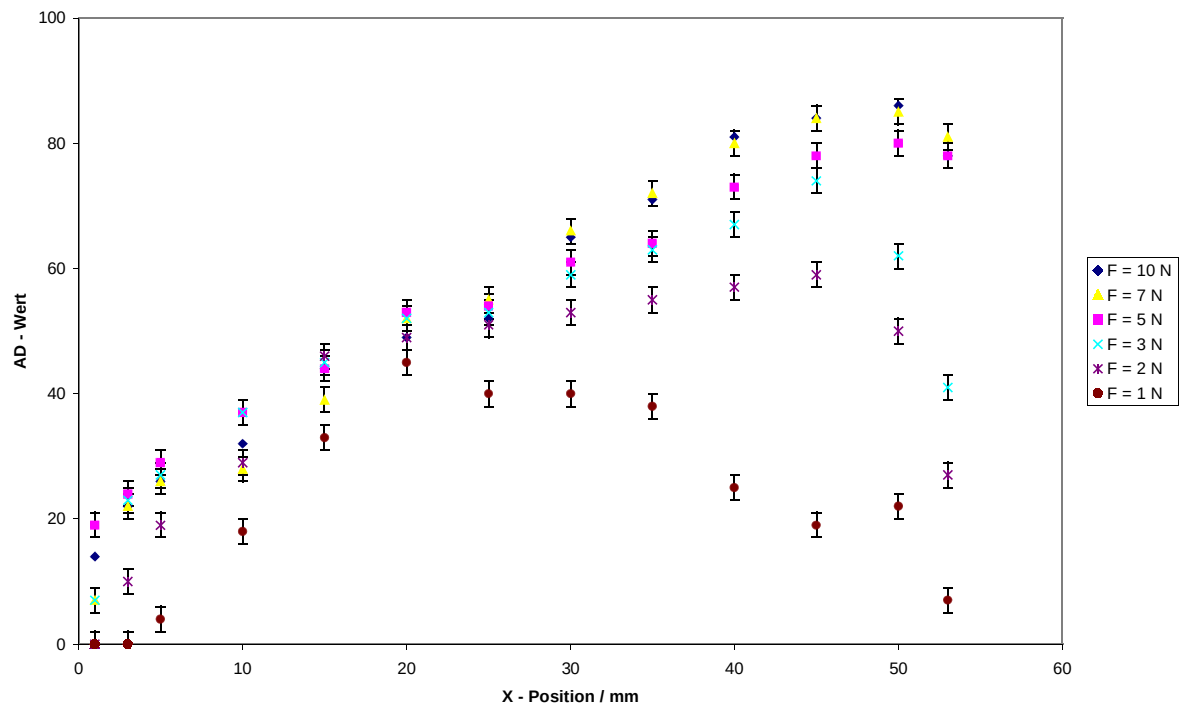


Abbildung 3-15 Sensorwerte des X-Sensors in Abhängigkeit der Position eines 19 mm Stempels.

Es zeigt sich, daß an den Rändern keine zuverlässigen Messungen möglich sind, was auf die Klebefolie zwischen Folie und Elektroden-schicht zurückzuführen ist. Bei Auflagekräften unterhalb von 2 Newton ist eine Positionsbestimmung nur noch im mittleren Sensorbereich möglich. Ein größerer Stempel liefert vor allem bei geringer Auflagekraft schlechtere Ergebnisse. Insgesamt wird die Messung mit steigender Auflagekraft genauer. Die Abhängigkeit der Meßwerte von der Auflagekraft kann durch eine ungleichmäßige Druckverteilung und durch mögliche Kontaktstellen von Folien- und Elektroden-schicht erklärt werden.

3.1.5 Beurteilung und Vergleich mit den SA-Sensoren beim Menschen

Prinzipiell eignen sich die entwickelten Sensoren zur Messung von Größe und Ort einer auf sie wirkenden Kraft.

Bei der Positionsbestimmung ist es sinnvoll, die Andruckkraft zu berücksichtigen. Ungleiche Druckverteilungen und mögliche Kontaktstellen von Folien- und Elektroden-schicht verhindern eine einfache Kalibrierung der Sensoren zur genauen Messung der Position bei kleinen Kräften, und es muß näher untersucht werden, inwieweit eine solche überhaupt möglich ist.

Die Randbereiche des Sensors registrieren sehr kleine Kräfte gar nicht, größere Kräfte werden zwar wahrgenommen, können jedoch nicht quantitativ bestimmt werden.

An den Fingerspitzen der menschlichen Hand befinden sich ungefähr 80 SA I Sensoren pro Quadrat-zentimeter, von denen jeder einzelne Aktionspotentialfolgen in Abhängigkeit der einwirkenden Kraft liefert. Ein direkter Vergleich mit einem Sensor wie er hier vorgestellt worden ist und mit dem nur Mittelwerte von Kraft und Position bestimmt werden können, ist also sicherlich nicht zulässig.

Es ist jedoch mit der verwendeten Folie auch möglich, Sensorarrays aus Einzelsensoren herzustellen, deren räumliche Auflösung dann nur von der Größe des Einzelsensors abhängt. Ein solcher Sensor, basierend auf Interlink-Folie und bestehend aus 16*16 Einzelsensoren wird zum Beispiel am Massachusetts Institute of Technology (MIT) eingesetzt.

In Abbildung 3-16 ist daher das Antwortverhalten eines auf Interlink-Folie basierenden statischen Sensors, in der hier verwendeten Ausführung und Beschaltung, dem eines SA I

Sensors gegenübergestellt. Es zeigt sich, daß die Schwelle und die Meßbereiche beider Sensoren in der gleichen Größenordnung liegen.

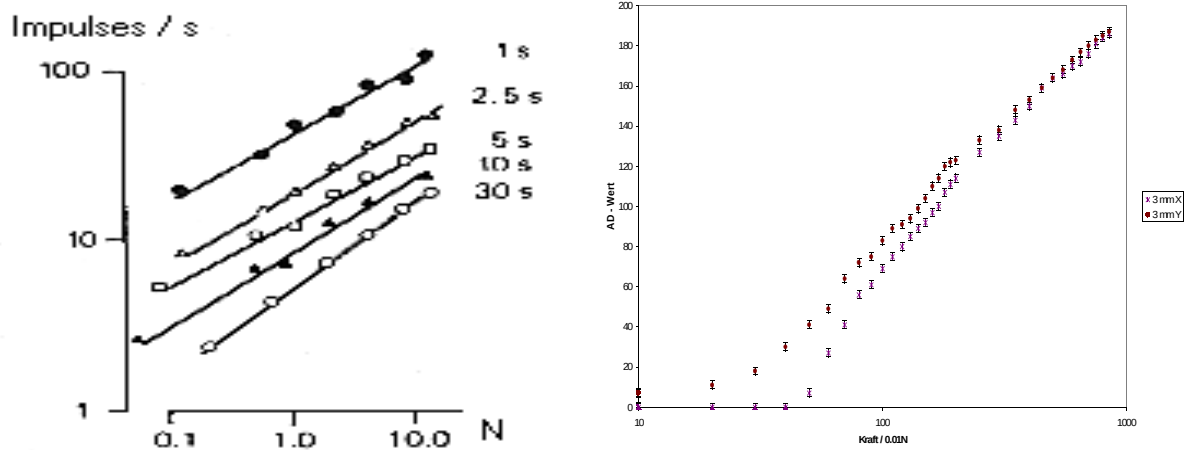


Abbildung 3-16 links: Verhältnis zwischen Reizintensität und Rezeptor-Entladungen zu verschiedenen Zeiten nach Beginn des Reizes bei einem SA-Sensor (aus Schmidt, 1977). **rechts:** Sensorantwort eines statischen Sensors aufgetragen gegen die Auflagekraft.

3.2. Die dynamischen Sensoren

Die menschlichen dynamischen Sensoren sind in der Lage, Eindruckgeschwindigkeiten und Vibrationen der Haut zu messen. Geschwindigkeiten werden dabei von den RA-Sensoren und Vibrationen von den Vater-Pacini Körperchen gemessen. Die hier vorgestellten dynamischen Sensoren messen in erster Linie Geschwindigkeiten, das Sensorsignal wird jedoch zusätzlich hochpaßgefiltert, um Informationen über auftretende Vibrationen zu gewinnen. Bei den Sensoren handelt es sich um diskret aufgebaute Einzelsensoren. Neben der Anordnung als Array sind daher beliebige andere Anordnungen möglich.

3.2.1 Beschreibung

Eine Forderung an die dynamischen Sensoren war es, eine sehr hohe Empfindlichkeit zu erzielen. Außerdem sollte es, obwohl es für den am Zwei-Backen-Greifer befindlichen Aufbau

nicht wesentlich war, möglich sein, eine hohe Auflösung zu erzielen, weshalb ein Konstruktionsprinzip mit geringem Platzbedarf pro Einzelsensor verwendet werden mußte.

Um diesen Forderungen gerecht zu werden sind Sensoren auf kapazitiver Basis entwickelt worden (siehe Abb. 3-17, 3-18).

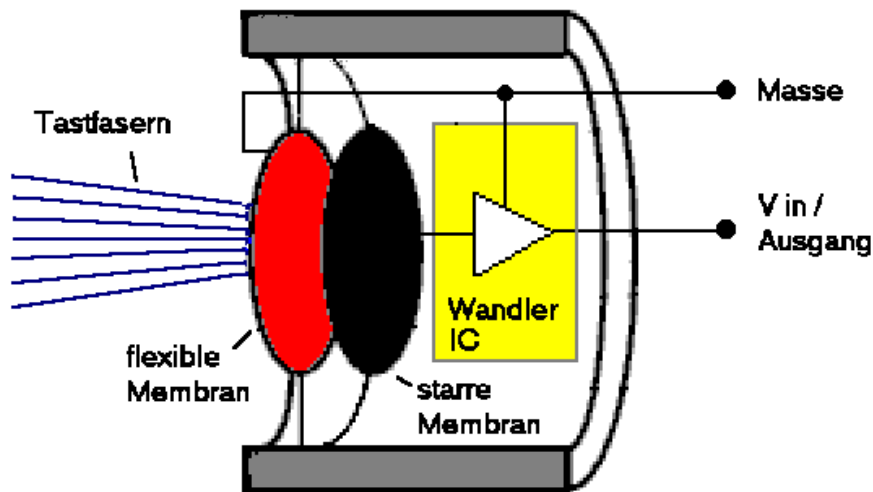


Abbildung 3-17 Schematischer Aufbau eines dynamischen Sensors mit Tastfasern und integriertem Wandler IC.

Rezeptive Elemente dieser Sensoren sind zwei Kondensator-Membranen. Die Membranen stammen aus Kondensatormikrophonen der Firma Teisco. Die obere Membran ist flexibel und verändert bei einwirkenden Kräften ihren Abstand zur unteren Membran. Mit der sich dadurch verändernden Kapazität verändert sich bei konstanter Ladung auch die zwischen den Platten gemessene Spannung.

Der Radius der Kondensatorplatten beträgt 2 mm, der Abstand zwischen den Platten beträgt in Ruhe 0,04 mm. Die Kapazität des Kondensators ergibt sich aus

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} ,$$

mit ϵ_0 als elektrische Feldkonstante, A als Fläche einer Platte und d als Plattenabstand. Die Kapazität in Ruhe beträgt also ca. 2,8 pF.

Bei Verbindung der Kondensatorplatten mit der nachgeschalteten Elektronik über längere Wege treten Streukapazitäten auf, die in der Größenordnung dieser Kapazität selbst sind. Um diese Schwierigkeiten zu vermeiden, befindet sich direkt unterhalb der starren Platte ein

Wandler-IC, über das die Platten beschaltet werden. Dieses wird normalerweise in Kondensatormikrophonen der Firma Teisco eingesetzt. Neben der Funktion als Impedanzwandler und Verstärker werden über dieses IC auch die Platten aufgeladen. Bei einer Veränderung der Plattenspannung aufgrund einer Änderung des Plattenabstandes wird die ursprüngliche Spannung mit einer Zeitkonstanten von ca. 300 ms wiederhergestellt, was man als Adaptionszeit des Sensors betrachten kann (siehe Abschnitt 3.2.3).

Ein Problem bisheriger Entwicklungen war es, eine gute Ankopplung der rezeptiven Sensorelemente an das zu ertastende Objekt zu erzielen. Bei den meisten bisherigen Sensoren sind die rezeptiven Elemente von einer mehr oder minder elastischen Schicht eines Polymers oder eines anderen Materials bedeckt. Dadurch werden die Auflösung (durch gegenseitige Beeinflussung) und die Empfindlichkeit reduziert.

Die menschliche Haut ist sehr flexibel und kann, ohne große Kräfte aufzuwenden, mehrere Millimeter eingedrückt werden. Während des Eindrückens können Sensorinformationen verrechnet und Bewegungen geplant werden, ohne große Kräfte auf das Objekt auszuüben. Technische Sensoren haben demgegenüber vom Objektkontakt bis zum Aufbau eines hohen Druckes im allgemeinen nur einen sehr geringen Spielraum.

Außerdem sollen die dynamischen Sensoren in Kombination mit den zuvor vorgestellten statischen Sensoren eingesetzt werden, weshalb eine Methode gefunden werden mußte, beide Sensortypen parallel zu verwenden.

Zur Überwindung dieser Probleme ist hier eine völlig neue Methode zur Ankopplung der rezeptiven Elemente an das Objekt gewählt worden.

Die Ankopplung des Sensors an das Objekt geschieht über Fasern (bei dem hier eingesetzten Sensor Rinderohrenhaare), die mit der flexiblen Membran des Kondensators verbunden sind. Über das freie Ende der Fasern wird eine direkte Ankopplung zwischen dem zu betastenden Objekt und der Kondensatormembran erzielt. Zur Verbindung der Fasern mit der Membran dient ein hochflexibles Silikonharz.

Die bei Objektkontakt über die Fasern auf die Membran übertragenen Kräfte führen zu einer Änderung des Plattenabstandes. Bei geeigneter Wahl von Fasern, Membran und Harz kann dabei der zeitliche Verlauf der Kondensatorspannung zur Messung der Annäherungsge-

schwindigkeit verwendet werden (siehe Abschnitt 3.2.3). Da die Fasern flexibel sind ist es mit dieser Methode nicht möglich, statische Tasteindrücke zu übertragen.

Die auf das Objekt wirkenden Kräfte sind extrem klein ($< 10 \text{ mN}$). Die Empfindlichkeit der Sensoren ist so hoch, daß die Schwelle mit den zur Verfügung stehenden Methoden nicht mehr meßbar war.

Die räumliche Auflösung ist nur abhängig von der Anzahl der Einzelsensoren und die Anordnung der auf ihnen befindlichen Tasthaare, die in großem Maße variiert werden kann.

Bei der in Kapitel 4 beschriebenen Bestückung des Zwei-Backen-Greifers sind nur die Ränder der Greiffläche mit dynamischen Sensoren ausgestattet worden, wobei die Tasthaare der einzelnen Sensoren fächerförmig angeordnet sind. Prinzipiell ist es jedoch auch möglich, die dynamischen unterhalb der statischen Sensoren anzubringen und die Tasthaare durch kleine Löcher in den statischen Sensoren an die Oberfläche zu führen (siehe Anhang A). Durch diese Art der Kombination beider Sensortypen lassen sich Senoren für unterschiedlichste Anwendungen aufbauen.

Die Einzelteile eines Sensors sowie einen komplett montierten Sensor zeigt Abb. 3-18.



Abbildung 3-18 links: Einzelteile eines dynamischen Sensors im Größenvergleich mit einem Streichholz. Von links: Grundplatte mit Wandler IC, starre Membran, Distanzring, flexible Membran mit Tastfasern. Der Radius der Einzelkomponenten beträgt 2 mm. **rechts:** dynamischer Sensor in Trägerplatte montiert.

3.2.2 Beschaltung

Abbildung 3-19 zeigt die Beschaltung der Sensoren. Die Impedanz des Wandler-IC ändert sich proportional zur Membranspannung und damit zum Abstand der Membranen.

An R1 fällt dadurch eine Spannung U1 ab, die ebenfalls proportional zum momentanen Membranabstand ist. Diese an Punkt 1 gemessene Spannung wird zur Messung der Annäherungsgeschwindigkeit oder auch nur zur Detektion von Kontakt verwendet. Durch die Aufladung des Kondensators über das Wandler-IC ergibt sich bei dauerhafter Veränderung des Plattenabstandes eine Adaption des Sensors, welche ca 300 ms dauert.

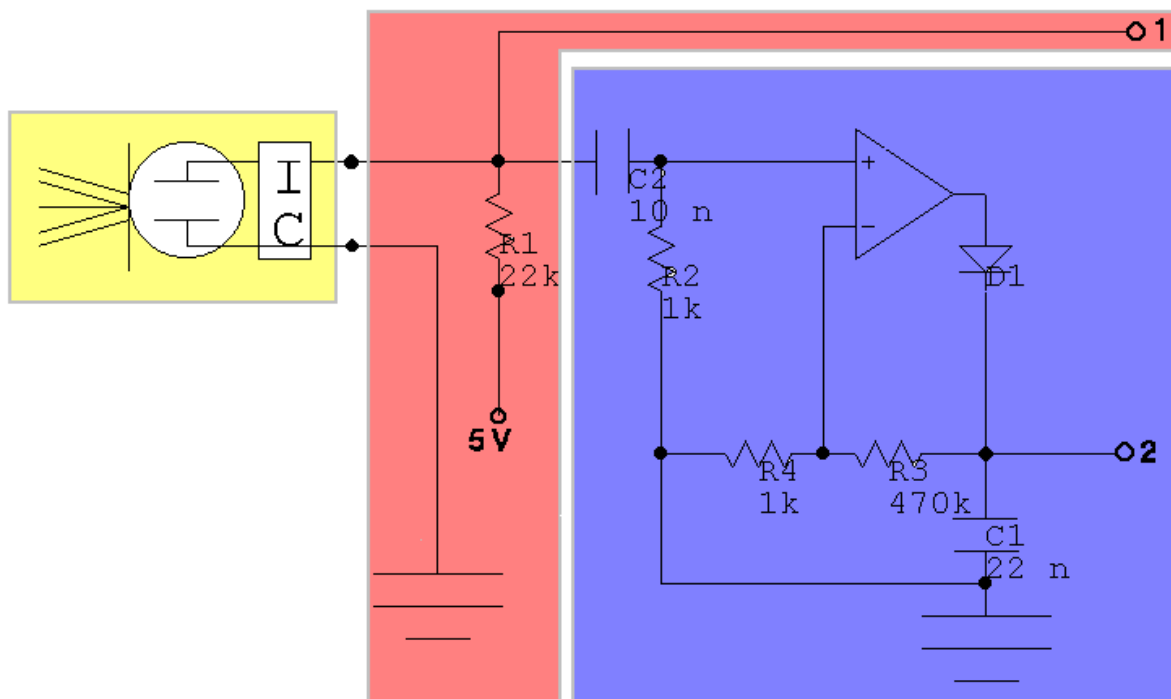


Abbildung 3-19 Beschaltung der dynamischen Sensoren, **gelb**: schematisch dargestellter Sensor mit Wandler IC. **rot**: Beschaltung des Sensors und Abgriff der Spannung zwischen Wandler und R1 zur Messung der Geschwindigkeitskomponente. **blau**: Hochpaßfilter und anschließende Verstärkung des Signals mit „Sample, Hold and Forget“-Schaltung zur Messung von Vibrationen.

Die Spannung U_1 wird außerdem hochpaßgefiltert. Der Hochpaß besteht aus einem RC-Glied, welches aus dem $1\text{k}\Omega$ Widerstand R_2 und dem 10nF Kondensator C_2 gebildet wird. Die Grenzfrequenz des Hochpaß ergibt sich aus

$$\nu = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot C_2}$$

zu ca. 16 kHz.

Die Ausgangsspannung des Hochpaß wird anschließend verstärkt. Da die auftretenden Frequenzen höher sind als die Abtastrate durch den AD-Wandler des Microcontrollers (siehe Abschnitt 5.2), ist der Verstärker im Verbund mit einer „Sample, Hold and Forget“-Schaltung aufgebaut. Damit ist eine Schaltung gemeint, die die Maximalamplituden der Eingangsspannung hält („Sample and Hold“), diese aber mit der Zeit exponentiell abfallen („Forget“). Die positiven Spitzenwerte des verstärkten Signales werden von dem Kondensator C_1 gehalten, der sich über die Widerstände R_3 und R_4 entlädt. Diese bestimmen auch den Verstärkungsfaktor V

$$V = \frac{R_3}{R_4}$$

= 470-fach. Die Zeitkonstante der Entladung bei der die Spannung auf $1/e$ des Maximalwertes gesunken ist, ergibt sich mit

$$t_e = (R_3 + R_4) \cdot C_1 ,$$

zu ca 10 ms. Bei einer Abtastrate von 100 Hz wird somit immer noch mindestens $1/e$ der Maximalamplituden registriert.

Die Diode D_1 verhindert das Herunterziehen des Kondensators bei Eingangsspannungen, die kleiner als die momentane Kondensatorpannung sind.

Das Ausgangssignal ist ein Maß für auftretende Vibrationen. Jede Art von Vibration regt ein Gemisch von Eigenfrequenzen der Tastfasern, der Membran und des gesamten Aufbaus an, deren Maximalamplituden am Ausgang 2 gemessen werden können.

3.2.3 Messungen

Wie schon bei den statischen Sensoren soll hier lediglich das prinzipielle Verhalten der dynamischen Sensoren dargestellt werden. Die Messungen sollen nicht zur Kalibrierung der Sensoren dienen.

Die Kraft, die die Sensoren bei Kontakt mit Objekten auf diese ausüben, ist in jedem Falle vernachlässigbar klein (< 10 mN).

3.2.3.1 Geschwindigkeitsmessungen

Abbildung 3-20 zeigt zwei Messungen, in denen der Sensor schnell mit einem Objekt in Kontakt gebracht und nicht wieder entfernt worden ist (Schließen des Greifers). Die Abbildung zeigt den Verlauf des Geschwindigkeits- und des Vibrationssignals.

Während fast keine Vibrationen auftreten, erreicht der Wert für die Auslenkung der Membran, der als Maß für die Annäherungsgeschwindigkeit dient, nach wenigen Millisekunden seinen Maximalwert. Im weiteren Verlauf ist die Adaption des Sensors zu erkennen. Nach ca. 300 ms hat die Spannung ihren ursprünglichen Wert wieder erreicht.

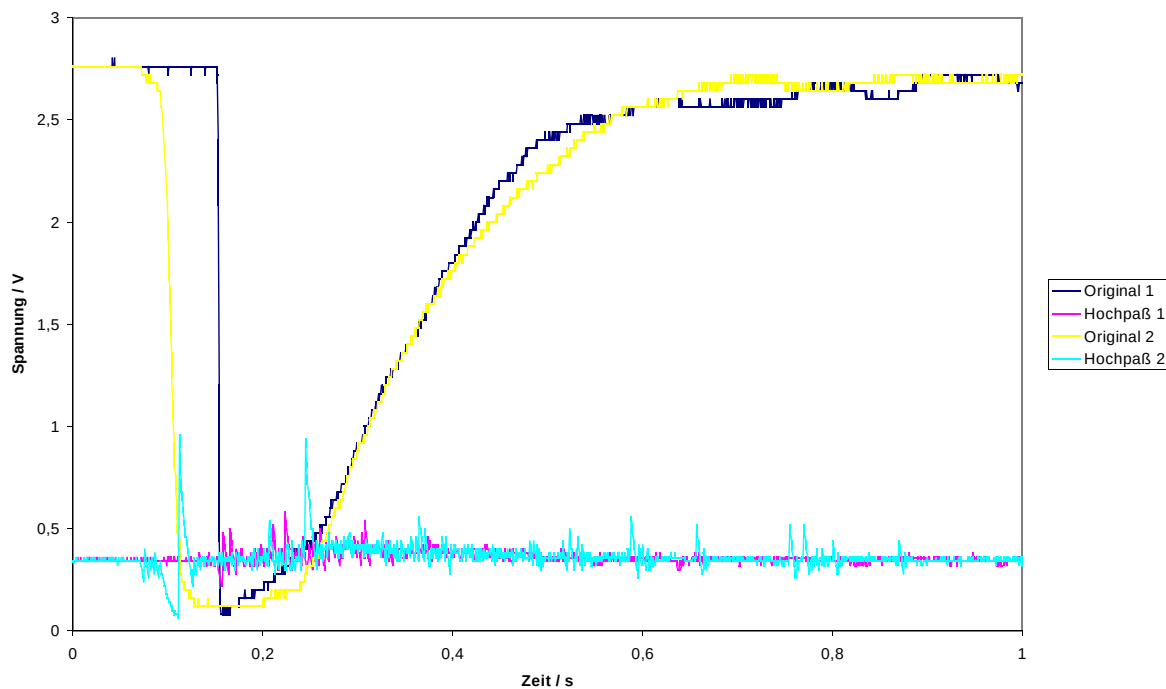


Abbildung 3-20 Verlauf beider Sensorsignale in zwei Messungen. Die Annäherung des Objektes an den Sensor erfolgte dabei schnell. Das Objekt wurde nicht wieder entfernt, so daß das Adaptionsverhalten des Sensors sichtbar wird.

Im folgenden ist die Antwort des Sensors in Abhängigkeit von der Annäherungsgeschwindigkeit bestimmt worden. Dazu ist dem Sensor ein Stempel mit definierter Geschwindigkeit genähert und plötzlich angehalten worden. Abbildung 3-21 zeigt fünf Messungen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Die am Ende jeder Messung auftretenden Schwingungen sind vom Sensor registrierte Schwingungen der gesamten Meßapparatur, die beim plötzlichen Stoppen des Stempels aufgetreten sind. Diesen Schwingungen überlagert ist die Adaption des Sensors.

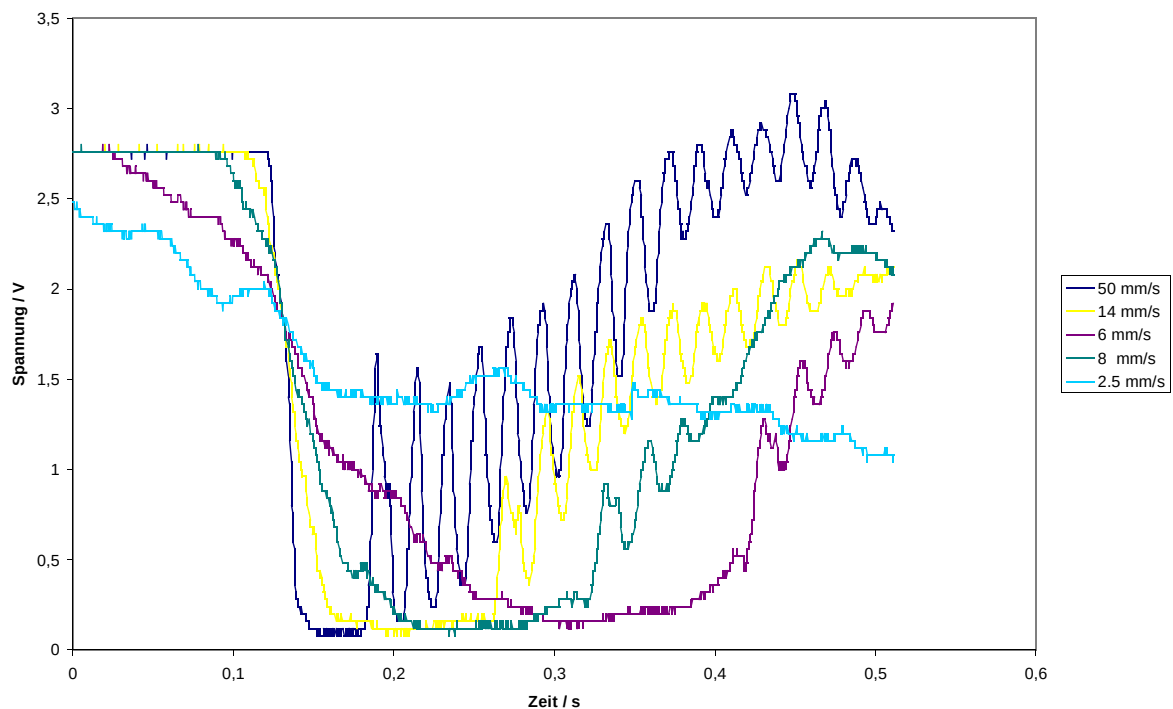


Abbildung 3-21 Verhalten der Sensoren bei unterschiedlichen Annäherungsgeschwindigkeiten. Der Moment des Kontaktes findet im Diagramm zu unterschiedlichen Zeiten statt und macht sich in sofortigem Absinken der Spannung bemerkbar (bei 2,5mm/s außerhalb des Diagrammes). Stoppen des Stempels führt zu Schwingungen der Meßapparatur, die der Adaption des Sensors überlagert sind.

Es zeigt sich, daß der Signalverlauf abhängig von der Geschwindigkeit der Annäherung ist. Mit Hilfe der Steigung lassen sich Annäherungsgeschwindigkeiten quantitativ bis ca. 50 mm/s bestimmen.

3.2.3.2 Vibrationen / Rutschen

Abbildung 3-22 zeigt das Geschwindigkeits- und Vibrationssignal des Sensors, aufgenommen, während ein Objekt zwischen den Greiferbacken anfängt zu rutschen. Während das

Geschwindigkeitssignal vom Rutschen nahezu unbeeinflusst bleibt, lassen sich die durch das rutschende Objekt ausgelösten Vibrationen deutlich mit dem hochpaßgefilterten Signal detektieren.

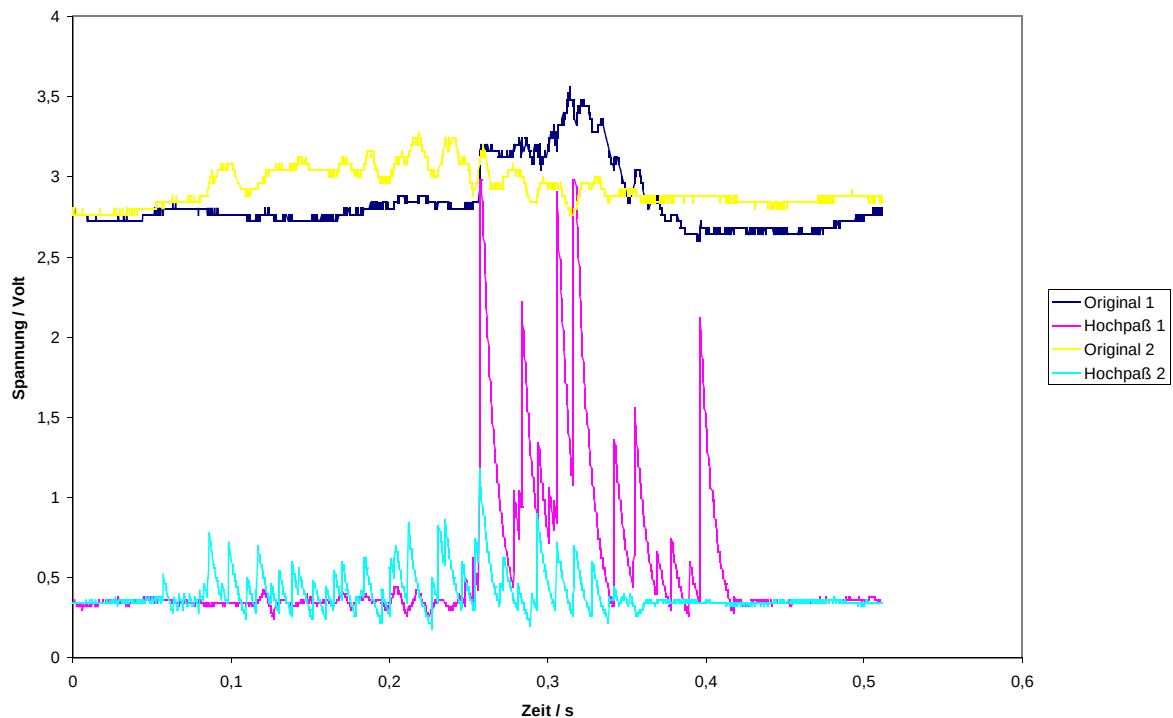


Abbildung 3-22 Sensorsignale von zwei Messungen bei einsetzendem Rutschen. Während sich mit dem Originalsignal Vibrationen nicht erkennen lassen, läßt sich Rutschen mit dem hochpaßgefilterten Signal eindeutig detektieren.

Die Funktion der „Sample, Hold and Forget“-Schaltung wird noch einmal in Abbildung 3-23 deutlich. Sie zeigt den Verlauf des tatsächlichen Signals direkt nach der Filterung zusammen mit dem Ausgangssignal der „Sample, Hold and Forget“-Schaltung.

Es ist zu sehen, daß die Sensorkonstruktion mit einer Vielzahl überlagerter Eigenfrequenzen schwingt, deren Maximalamplituden am Ausgang der „Sample, Hold and Forget“-Schaltung registriert werden. Diese fallen durch den sich entladenden Kondensator so lange exponentiell ab, bis eine Schwingung größerer Amplitude diesen wieder auflädt.

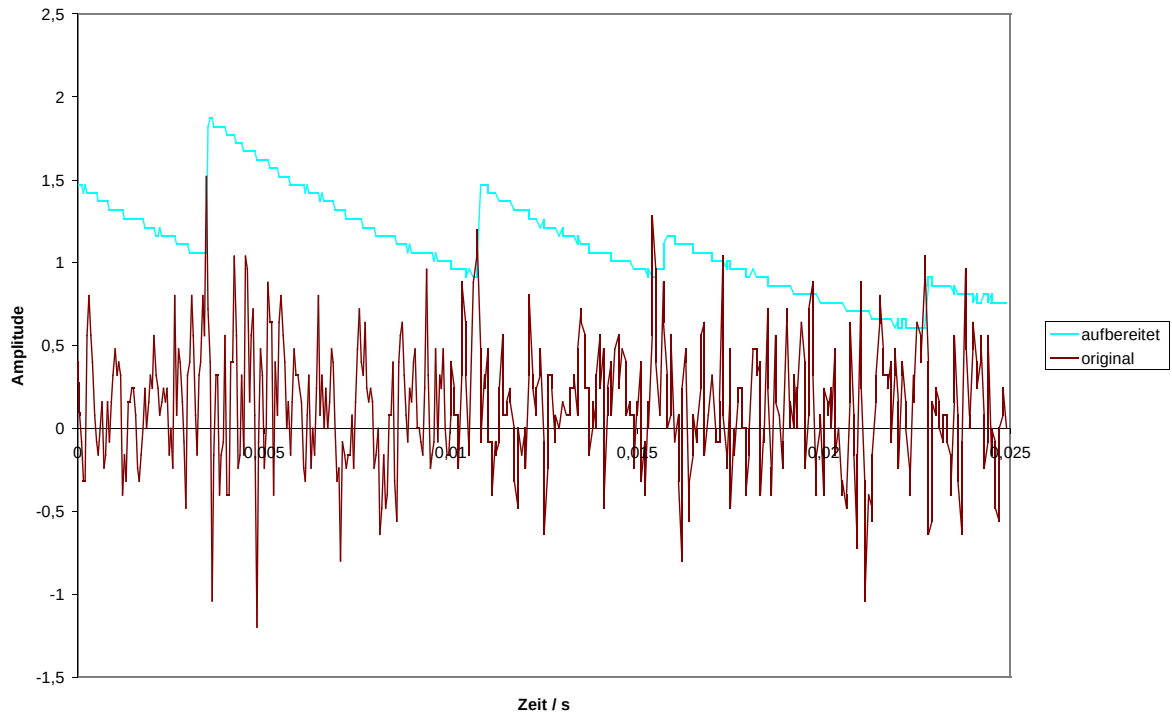


Abbildung 3-23 Ausgangssignal des Hochpaß (200-fach verstärkt) und Ausgangssignal der „Sample, Hold and Forget“-Schaltung im Vergleich.

3.2.4 Beurteilung und Vergleich mit RA-Sensoren und Vater-Pacini-Körperchen

Die vorgestellten Sensoren besitzen eine extrem hohe Empfindlichkeit. Es lassen sich Rückschlüsse auf Annäherungsgeschwindigkeit und Vibrationen, wie sie zum Beispiel beim Rutschen auftreten, ziehen. Die Ankoppelung über Tasthaare ermöglicht außerdem vielfältige Kombinationsmöglichkeiten mit den statischen Foliensensoren, was für den Aufbau von taktilen Sensoren diverse Möglichkeiten eröffnet.

Die Empfindlichkeit der vorgestellten Sensoren läßt sich durchaus mit denen der RA-Sensoren vergleichen. Die Schwelle ist so niedrig, daß sie mit den hier verwendeten Meßmethoden nicht zu ermitteln war.

Unterschiedliche Annäherungsgeschwindigkeiten lassen sich bei den RA-Sensoren im Bereich von ca. 2 mm/s bis ca. 120 mm/s differenzieren. Mit den Sensoren, wie sie hier verwendet werden lassen sich Geschwindigkeiten bis ungefähr 50 mm/s differenzieren.

Vibrationen werden von den dynamischen Sensoren registriert, indem die Gesamtkonstruktion zu Eigenschwingungen unterschiedlicher Frequenzen angeregt wird, von denen die über 16 kHz liegenden registriert werden. Damit lassen sich Vibrationen jeder Art zwar mit hoher Empfindlichkeit wahrnehmen, es können jedoch keine Frequenzen unterschieden werden.

Die dynamischen Sensoren können, so wie sie hier aufgebaut sind, mit einem Mindestabstand von ca. 5 mm zueinander zu einem Array angeordnet werden. Das räumliche Auflösungsvermögen der RA-Sensoren an den Fingerspitzen beträgt ca. 1 mm.

Insgesamt läßt sich sagen, daß die Ankopplung der Sensormembranen mittels Fasern erhebliche Vorteile gegenüber einer direkten Ankopplung bietet.

4 Die Ausrüstung eines Zwei-Backen-Greifers mit Sensoren

Bei dem vorhandenen Robotersystem handelt es sich um ein modular aufgebautes Robotersystem der Firma Amtec, das über einen Zwei-Backen-Greifer verfügt. In diesem Kapitel wird die Ausrüstung dieses Greifers mit den zuvor beschriebenen Sensoren dargestellt.

Bei der Anordnung der Sensoren ist versucht worden, den Aufwand möglichst gering zu halten und dennoch für alle mit einem Zwei-Backen-Greifer lösbaren Aufgaben das nötige taktile Feedback zu erhalten.

Auf die Greiffläche der Backen sind die in Kapitel 3 beschriebenen statischen Foliensensoren montiert worden. Dynamische Sensoren sind dabei nur um den Rand der Greiffläche herum angeordnet worden. Abbildung 4-1 zeigt die dynamischen Sensoren auf der Trägerplatte montiert. Insgesamt wurden 16 Sensoren pro Greiferbacke verwendet, jeweils sechs an den Längsseiten und jeweils zwei an den Frontseiten. Die Tastfasern der Sensoren sind dabei fächerförmig angeordnet, um den gesamten Sensorrand zu erfassen.

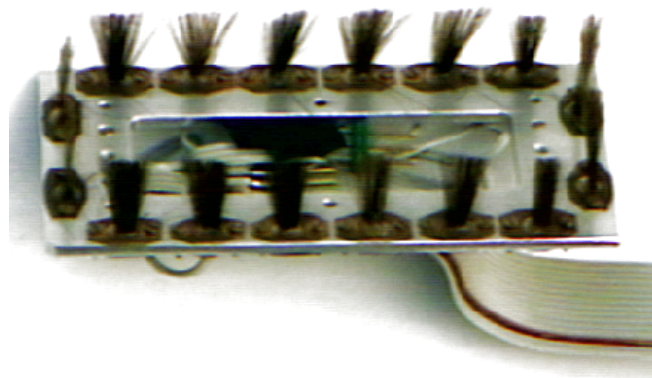


Abbildung 4-1 Die dynamischen Sensoren des Zwei-Backen-Greifers montiert auf Trägerplatte

Von dieser Anordnung wird erhofft, die nötige taktile Rückkopplung für alle mit einem Zwei-Backen-Greifer ausführbaren Aufgaben zu bekommen. Für den Fall, daß es sich im Verlauf der weiteren Arbeit zeigt, daß diese Anordnung nicht genügt, um ein ausreichendes taktiles

Feedback zu bekommen, wird im Anhang ein komplexerer Aufbau der Sensorik beschrieben (siehe Anhang A).

Die Fasern auf der Hinterseite des Sensors sind absichtlich etwas länger gelassen worden, um auch bei weit geöffnetem Greifer ein mögliches Durchgreifen durch das Objekt zu registrieren. Abbildung 4-2 zeigt einen komplett montierten Sensor.

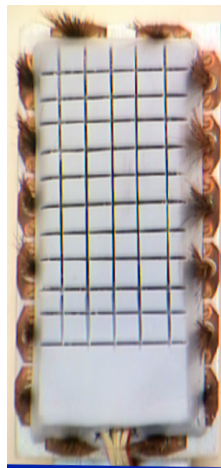


Abbildung 4-2 Komplet montierter Sensor.

Die Sensorik ist so konstruiert, daß innerhalb von Minuten die herkömmlichen Greiferbacken durch die mit Sensoren bestückten Greiferbacken ausgetauscht werden können. Eine komplette Greiferbacke ist in Abbildung 4-3 dargestellt.

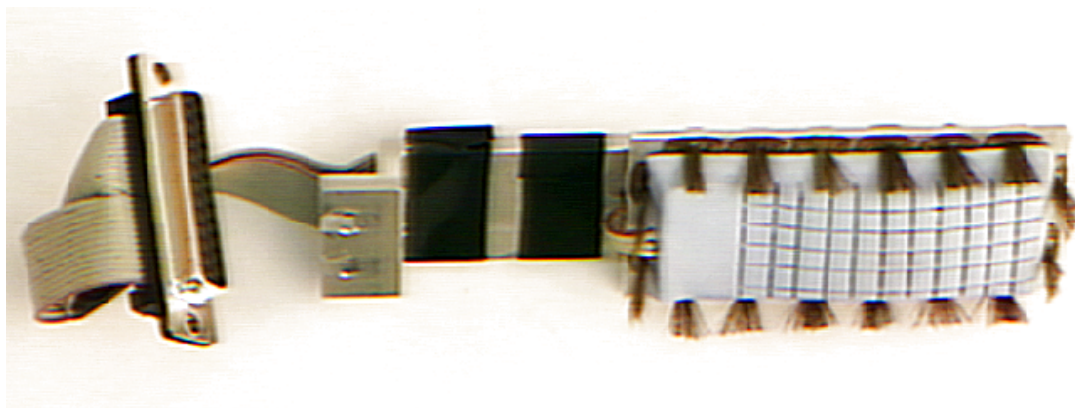


Abbildung 4-3 Greiferbacke bestückt mit taktilen Sensoren.

Den komplett mit Sensoren und Elektronik bestückten Greifer zeigt Abbildung 4-4. Die Elektronik zur Aufbereitung und Weiterleitung der Sensorsignale (Kasten links im Bild) wird im nächsten Kapitel beschrieben.

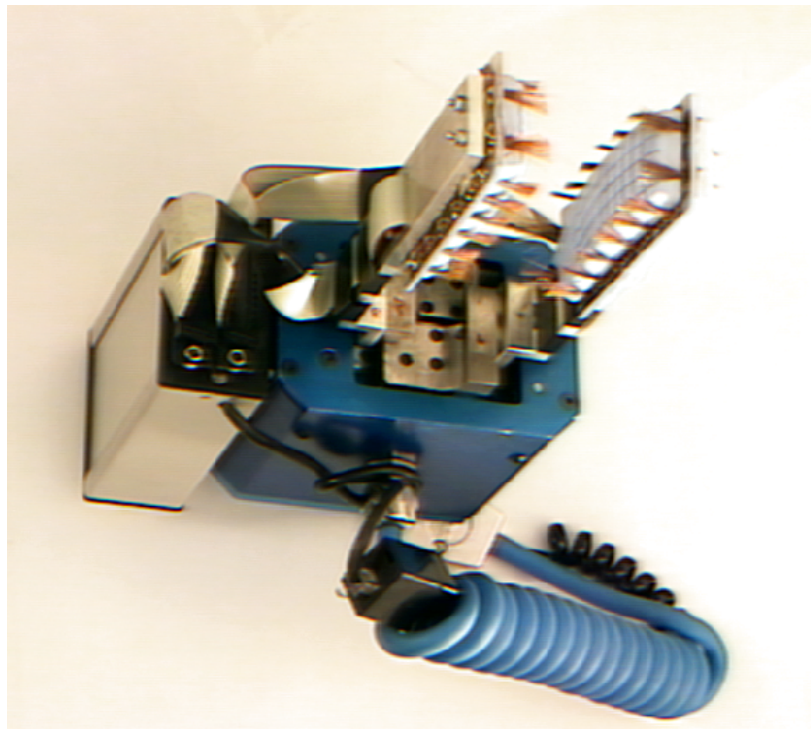


Abbildung 4-4 Greifer komplett bestückt mit taktilen Sensoren und Sensorelektronik.

5 Die Weiterverarbeitung der Sensorsignale

Die Weiterverarbeitung der Sensorsignale gliedert sich in einen analogen und einen digitalen Teil.

Die Analogelektronik umfaßt die Beschaltung der Sensoren, deren Aufbau schon bei der Vorstellung der Sensoren beschrieben wurde. Außerdem müssen die Sensorsignale vor der Digitalisierung gemultiplext werden, was ebenfalls in den Bereich der analogen Elektronik fällt. In Kapitel 5.1 werden die einzelnen Komponenten der analogen Elektronik beschrieben.

Die digitale Elektronik umfaßt die Sammlung und Weiterleitung der Sensordaten mit Hilfe eines 8-Bit Microcontrollers. Der Microcontroller und seine peripheren Komponenten werden in Kapitel 5.2 beschrieben. Die Weiterleitung der Sensordaten erfolgt über einen CAN-Feldbus, an den auch die anderen Robotermodule angeschlossen sind. Neben der vollständigen Integration in das bestehende System ermöglicht es die Anbindung an den CAN-Bus auch, die Sensorik ohne größeren Aufwand in andere Systeme zu integrieren. Die Grundlagen der Datenübertragung mittels CAN werden in einem eigenen Abschnitt (siehe Abschnitt 5.2.2) beschrieben.

Am Schluß dieses Kapitels steht eine Beschreibung der für den Microcontroller entwickelten Software, die die Aufnahme und Weiterleitung der Sensordaten steuert (siehe Abschnitt 5.2.3).

5.1 Die analoge Elektronik

Jede der beiden Greiferbacken ist (siehe Kapitel 4) mit 16 dynamischen Sensoren und zwei statischen Sensoren (für x- und y-Komponente) ausgestattet. Jeder der dynamischen Sensoren liefert ein Geschwindigkeits- und ein Vibrationssignal. Die statischen Sensoren liefern abhängig von ihrer Beschaltung ein Kraft- oder ein Positionssignal. Insgesamt lassen sich von den Sensoren beider Backen also 72 Signale erhalten.

Da auf der digitalen Seite der Elektronik eine Parallelverarbeitung von 72 analogen Eingangssignalen nicht möglich ist, muß von der analogen Elektronik neben der Beschaltung der einzelnen Sensoren ein Multiplexing der Signale vorgenommen werden. Dem Microcontroller werden (siehe Abschnitt 5.2) pro Greiferbacke je zwei analoge Signale zugeführt. Die 36 Signale einer Greiferbacke werden daher in zwei Blöcke mit je 18 Kanälen aufgeteilt. Zur Auswahl eines Kanals dient ein vom Microcontroller kommender 5 Bit breiter Bus, der im folgenden als Auswahlbus bezeichnet wird.

In den nächsten Abschnitten wird die Beschaltung der statischen und dynamischen Sensoren und anschließend das Multiplexing der Sensorsignale beschrieben.

5.1.1 Beschaltung der statischen Sensoren

Die prinzipielle Beschaltung der statischen Sensoren zur Messung von Kraft und Position ist bereits in Kapitel 3.3 beschrieben worden. Die Wahl zwischen Kraft- und Positionskomponente des X- und Y-Sensor erfolgt in der entwickelten Schaltung über Bit 0 des Auswahlbuses (siehe Abbildung 5-1).

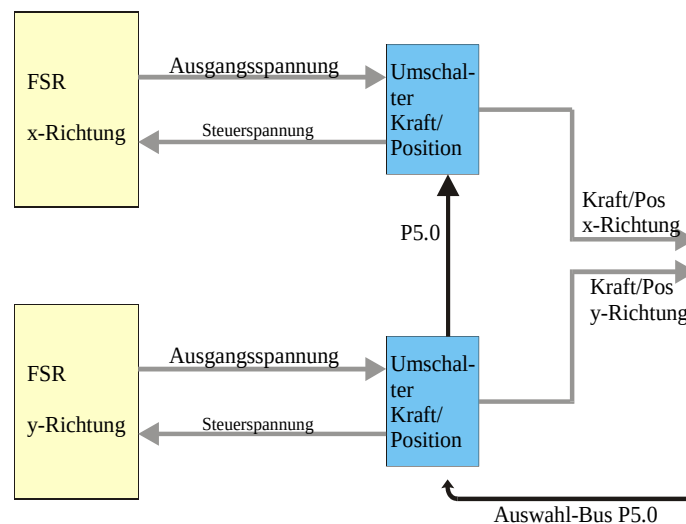
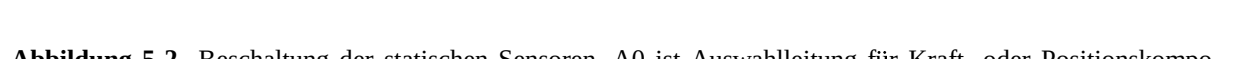


Abbildung 5-1 Schematische Darstellung der Umschaltung der statischen Sensoren einer Greiferbacke zwischen Kraft- und Positionsmessung.

Um zwischen Kraft- und Positionskomponente umzuschalten wird ein analoges Schalter-CMOS IC vom Typ 4053 verwendet. Dieser Baustein enthält insgesamt drei Wechselschalter. Zur Umschaltung zwischen Kraft und Position wird dabei pro Foliensensor ein Schalter benötigt.

Bei der Positionsmessung ist Anschluß 2 des Sensors mit Masse verbunden und gleichzeitig der 100 k Ω Widerstand abgekoppelt.



5.1.2 Beschaltung der dynamischen Sensoren

Die Beschaltung der dynamischen Sensoren ist bereits in Kapitel 3 beschrieben worden. Jeder der 16 Sensoren ist so beschaltet wie in Abbildung 3.18 dargestellt. Abb. 5-3 zeigt noch einmal eine schematische Darstellung der Funktionalität dieser Schaltung. Neben dem direkten Sensorsignal, das als Maß für die Geschwindigkeit der Annäherung dient, wird dieses Signal (siehe Abschnitt 3.2.2) hochpaßgefiltert, verstärkt und die maximalen Amplituden von einer „Sample, Hold and Forget“ Schaltung gehalten, deren Ausgangssignal ein Maß für aufgetretene Vibrationen darstellt.

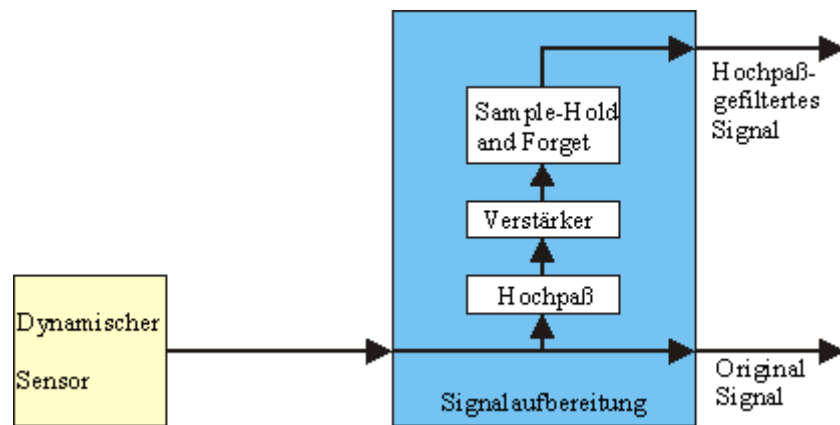


Abbildung 5-3 Schematische Darstellung der Beschaltung eines dynamischen Sensors.

Jeder Sensor liefert also zwei Ausgangssignale, die dann auf verschiedene Eingänge der Multiplexer gegeben werden.

5.1.3 Multiplexing der Sensorsignale

Um die Sensorsignale weiterverarbeiten zu können, müssen diese zuvor digitalisiert werden. Der verwendete Microcontroller C515C von Siemens besitzt einen eigenen AD-Wandler, dessen Eingang intern auf acht Analogeingänge geschaltet werden kann.

Um die insgesamt 72 Sensorsignale zu verarbeiten sind pro Greiferbacke (also 36 Signale) je zwei Analogeingänge des Controllers verwendet worden.

Die Schaltungen für die rechte und die linke Greiferbacke sind identisch. Nur die Ausgänge der Multiplexer werden auf verschiedene Analogeingänge des Microcontrollers geschaltet. Die vier noch freien Eingänge können zum zukünftigen Ausbau des Sensorsystems genutzt werden (zum Beispiel für Kraft-/Momentensensoren). Eine schematische Darstellung der Multiplexeebenen einer Greiferbacke zeigt Abbildung 5-4.

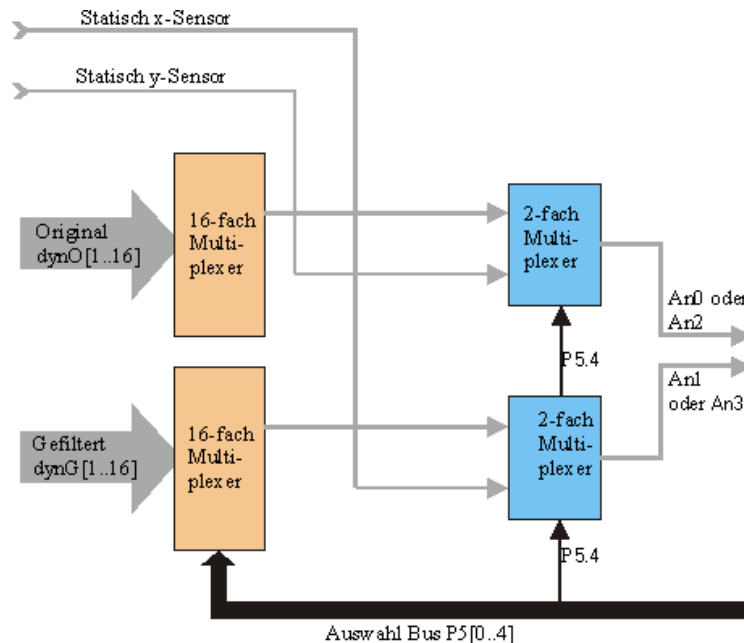


Abbildung 5-4 Schematische Darstellung der Multiplexeebenen. Nicht zu sehen ist die Umschaltung zwischen Kraft- und Positionskomponenten der statischen Sensoren, welche über P5.0 des Auswahlbusses geschieht. An[0..3] sind die Analogeingänge des Microcontrollers.

Die Geschwindigkeits- und Vibrationssignale der 16 dynamischen Sensoren werden getrennt auf die Eingänge je eines 16-fach Multiplexers gegeben. Deren Ausgangssignale werden wiederum auf die Eingänge zweier analoger Wechselschalter (2-fach Multiplexer) gegeben. Auf den anderen Eingang des Wechselschalters wird das Signal jeweils eines statischen Sensors gegeben.

Der durchgeschaltete Kanal wird über den vom Microcontroller gesteuerten Auswahl-Bus gewählt. Solange das höchste Bit P5.4 nicht gesetzt ist, wird über die Bits P5.0 – P5.3 der aktuelle dynamische Sensor gewählt. Wenn P5.4 gesetzt ist, wird das Signal der statischen Sensoren durchgeschaltet. In diesem Fall dient P5.0 zur Auswahl von Kraft- oder Positionskomponente (siehe Kapitel 5.1.1). Die in Abhängigkeit vom Bitmuster des Auswahlbusses zu den Analogeingängen des Microcontrollers durchgeschalteten Signale zeigt Tabelle 5-1.

Auswahlbus P5.[0..4]	Analogeingang An0	Analogeingang An1	Analogeingang An2	Analogeingang An3
0 .. 15	Originalsignal dynamischer Sensor 1 .. 16 links	Hochpaßsignal dynamischer Sensor 1 .. 16 links	Originalsignal dynamischer Sensor 1 .. 16 rechts	Hochpaßsignal dynamischer Sensor 1 .. 16 rechts
16	Kraft X-Sensor links	Kraft Y-Sensor links	Kraft X-Sensor rechts	Kraft Y-Sensor rechts
17	Pos. X-Sensor links	Pos. Y-Sensor links	Pos. X-Sensor rechts	Pos. Y-Sensor rechts

Tabelle 5-1 Durchgeschalteter Kanal an den Analogeingängen An[0..3] in Abhängigkeit des Auswahlbus P5.[0..4].

Abbildung 5-5 zeigt den Schaltplan der kompletten Multiplexschaltung. Als Umschalter ist ein analoges Schalter-IC vom Typ CMOS 4053 verwendet worden. Die 16-fach Multiplexer sind vom Typ CMOS 4067. Um Rückkopplungen zu den dynamischen Sensoren zu vermeiden, ist am Ausgang der 16-fach Multiplexer jeweils ein Operationsverstärker als Spannungsfollower zwischengeschaltet. Alle Ein- und Ausgänge zum Microcontroller sind über 4,7 kΩ Widerstände gegen zu hohe Ströme (wie sie zum Beispiel bei falscher Programmierung der IO-Ports des Controllers auftreten könnten) gesichert.

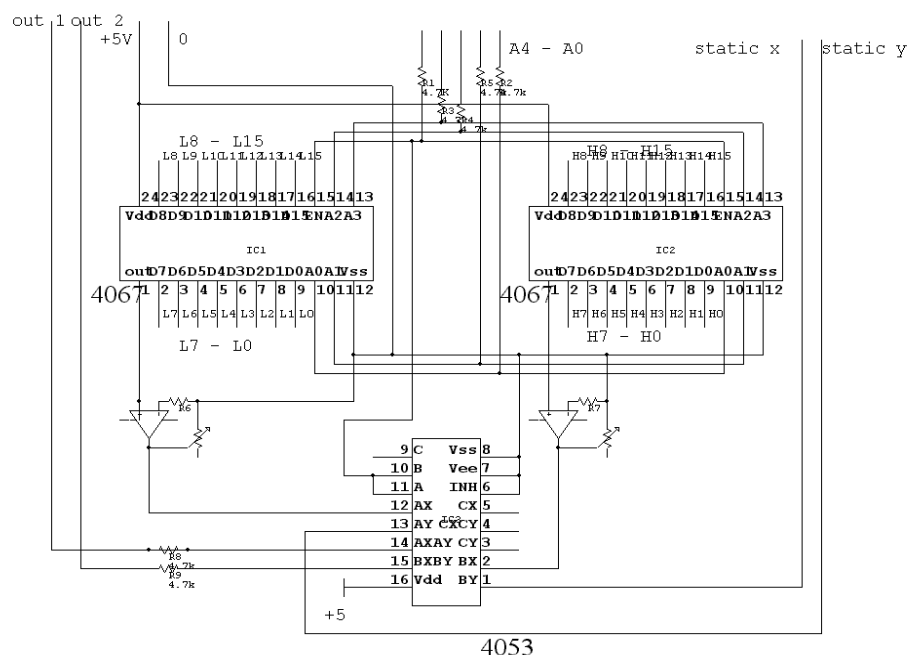


Abbildung 5-5 Schaltplan der kompletten Multiplexschaltung.

5.1.4 Die gesamte Schaltung

Die analoge Schaltung ist modular aufgebaut, mit jeweils einem Modul pro Greiferbacke. Das in Kapitel 5.2 vorgestellte Microcontroller-Board besitzt Stecker- oder Buchsenleisten für alle nach außen geführten Verbindungen. Die Module der Analogelektronik sind so konstruiert, daß sie in „Sandwichbauweise“ direkt auf das Controller-Board gesteckt werden. Dadurch ist eine sehr kompakte Bauweise erzielt worden. Außerdem kann weitere Sensorik durch einfaches Einfügen von zusätzlichen Modulen integriert werden. Ober- und Unterseite eines analogen Moduls zeigt Abbildung 5-6.

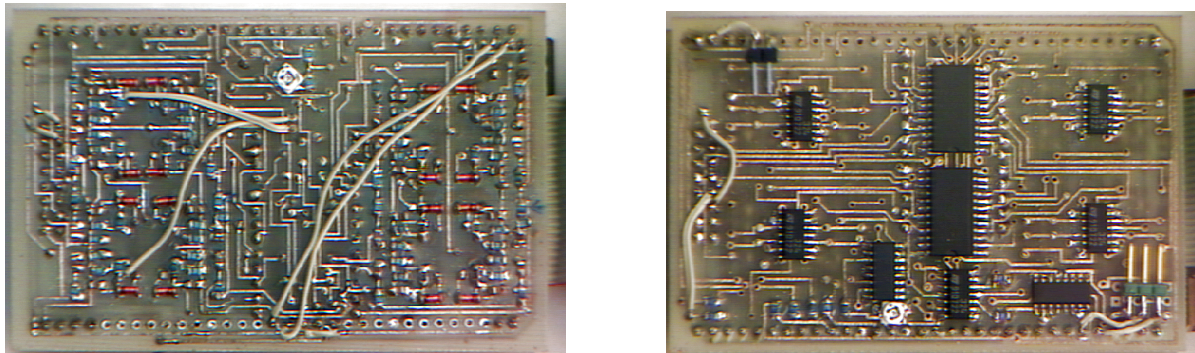


Abbildung 5-6 **links:** Unterseite, **rechts:** Oberseite des analogen Moduls. Sämtliche Bauteile in SMD-Ausführung, was zu einer Gesamtgröße von nur 79*59mm führt.

Die gesamte Elektronik sollte direkt am Greifer des Roboters befestigt werden. Die Größe der analogen Module sollte daher möglichst gering sein und die Größe des Microcontroller-Boards nicht überschreiten. Dazu sind die Module beidseitig in SMD-Technik bestückt worden. Es ist so eine Modulgröße von 79*59 mm erreicht worden.

Neben den in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Komponenten der analogen Schaltung befindet sich auf einem der beiden Module (linke Greiferbacke) auch die Stromversorgung für die gesamte Elektronik.

Das Layout der Module ist mit BPECS erstellt worden. Dabei handelt es sich um ein sehr kostengünstiges und dennoch leistungsfähiges Shareware-Programm der Firma Best Proto zum Erstellen von Schaltplänen und Layouts. Die dichte Bestückung der Module hat es

jedoch erforderlich gemacht, die Platzierung der Bauteile und das Routen vieler Verbindungen von Hand durchzuführen. Den Aufbau der kompletten Sensorelektronik zeigt Abbildung 5-11.

5.2 Die digitale Elektronik

Den Kern der digitalen Elektronik bildet ein 8-Bit Microcontroller C515C von Siemens. In diesem Kapitel werden dieser Microcontroller und seine Peripherie beschrieben.

Die Sensorik ist mit dem übergeordneten System über einen CAN-Feldbus verbunden, über den auch die anderen Module des modularen Robotersystems angesprochen werden. Der CAN-Controller, der die Kommunikation über diesen Bus autonom steuert, ohne dabei auf die Ressourcen des Microcontrollers zuzugreifen, ist bereits auf dem C515C integriert. Der CAN-Controller und das CAN-Protokoll werden in einem eigenen Abschnitt beschrieben.

Am Schluß des Kapitels steht eine Beschreibung der Software, die für den Microcontroller geschrieben wurde.

5.2.1 Der Microcontroller

Den Kern der digitalen Elektronik bildet ein 8-Bit Siemens Microcontroller vom Typ C515C. Um lange Entwicklungszeiten zu vermeiden, ist ein Controller-Board der Firma PHYTEC verwendet worden (siehe Abb. 5-7). Dieses verfügt neben dem Controller und sämtlichen peripheren Bauteilen (RAM, FLASH-RAM, Adreßdecoder, Quartz, CAN-Transceiver) über eine im FLASH-RAM resistente Programmierhilfe, die die Programmierung über die RS 232 Schnittstelle ermöglicht. Sämtliche Anschlüsse des Microcontrollers sowie die Anschlüsse der peripheren Komponenten sind über Stecker- bzw. Buchsenleisten nach außen geführt.

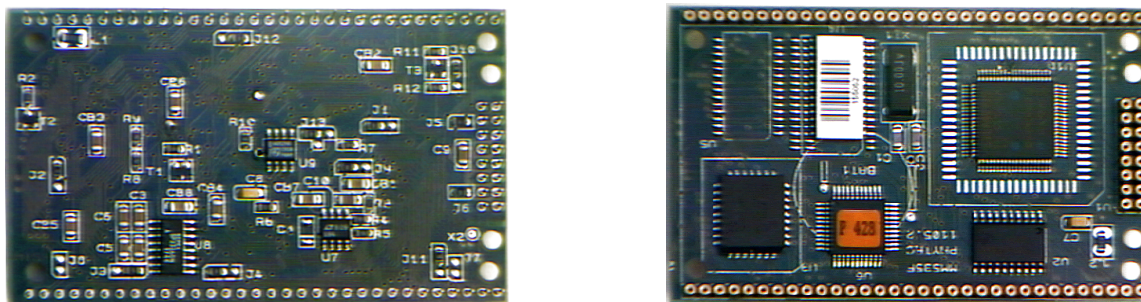


Abbildung 5-7 Ober- und Unterseite des Microcontroller-boards

Bei dem Controller handelt es sich um ein Derivat des seit den achtziger Jahren auf dem Markt befindlichen 8051 Microcontrollers. Die Speicheraufteilung und die Adressierung sind relativ umständlich und erscheinen auf den ersten Blick nicht mehr zeitgemäß. Dennoch haben sich ständig neue Derivate dieses Typs etabliert und ihre Zahl nimmt auch heute noch ständig zu. Das hat zur Folge, daß es gerade für die 8051-Derivate sehr gute Entwicklungs-umgebungen gibt. So war es möglich, die Programmierung fast ausschließlich in C durchzuführen und die Software vor dem Übertragen auf den Controller zum großen Teil auf einem Simulator zu testen, was die Entwicklungszeit erheblich verkürzt hat. Ausschlaggebend für die Wahl dieses speziellen Derivats war der auf dem Chip integrierte CAN-Bus Controller. Der gesamte Datentransfer über den CAN-Bus (also die Kommunikation mit dem übergeordneten System) wird von diesem Controller autonom abgewickelt. Das CAN-Protokoll wird im nächsten Kapitel beschrieben.

Der C515C verfügt neben dem CAN-Controller noch über eine Reihe weiterer peripherer Komponenten (siehe Abbildung 5-8). Im folgenden werden die Komponenten beschrieben, von denen die Hard- und Software der Sensorik Gebrauch macht.

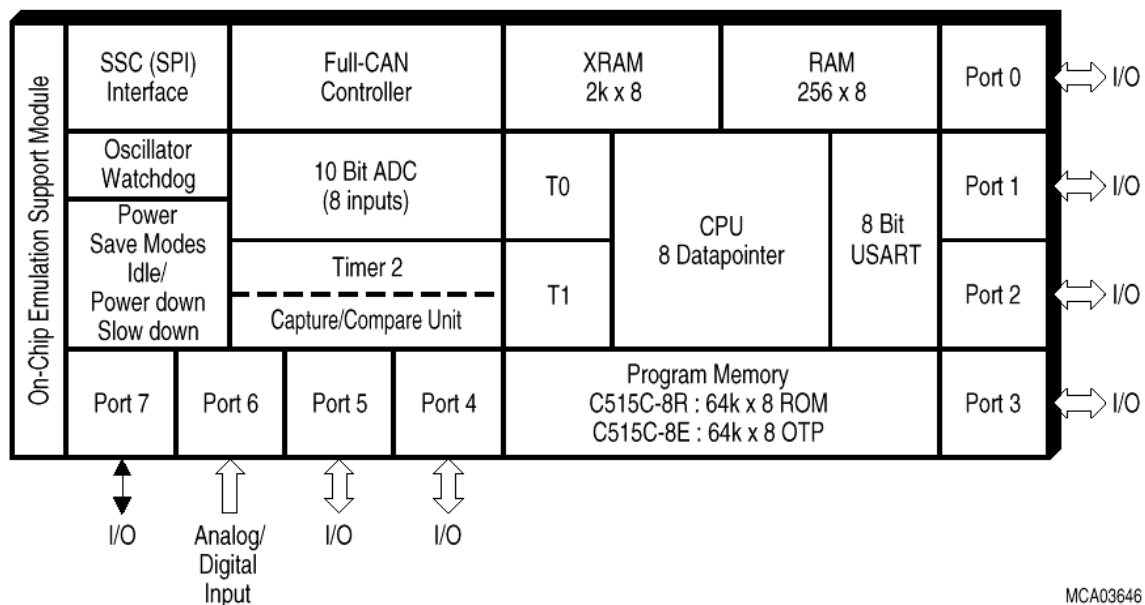


Abbildung 5-8 Funktionseinheiten des Siemens Microcontrollers C515C (aus Siemens, 1996).

Die IO-Leitungen des Controllers, die in insgesamt sieben Ports³ gegliedert sind, erfüllen folgende Funktionen:

- **Port 0 und Port 2** bilden den Adreßbus. Beide Ports besitzen je 8 Datenleitungen, mit denen externer Speicher adressiert wird. Es können also maximal 64 kByte Speicher angesprochen werden. Die Port 0 Leitungen bilden außerdem den Datenbus des Controllers.
- **Port 4.6 und 4.7** sind als Datenleitungen des CAN-Controllers geschaltet. P4.6 bildet dabei den Transmitter Output und P4.7 den Receiver Input.
- **Port 6** Leitungen sind als Eingänge des AD-Wandlers geschaltet. Benutzt werden hier nur P 6.0 – P 6.3. Diese Leitungen sind mit den Ausgängen der Analogelektronik verbunden.
- **Port 5** bildet den Auswahl-Bus. Über P5.0 – P5.4 werden die Multiplexer der Analogelektronik angesprochen.
- **Port 3.0 und 3.1** sind als serielle Schnittstelle geschaltet (RS 232). Das RXD (Receiver data input) Signal liegt dabei an P3.0, das TXD (Transmitter data output) Signal liegt an P3.1.
- **Register 0xFC00 und 0xFC01** steuern den Adreßdecoder des Controller-Boards. Auf dem Board befinden sich insgesamt 32 kByte RAM und 128 kByte FLASH RAM. Die unteren 64 kByte FLASH RAM sind dabei von den Programmierertools belegt. Da maximal 64 kByte Speicher angesprochen werden können, besteht mit dem Adreßdecoder die Möglichkeit, zwischen den Speicherbereichen nach Bedarf umzuschalten.

Die auf dem Controller integrierten peripheren Komponenten erfüllen die folgenden Aufgaben:

- **Der CAN-Controller** steuert die Kommunikation mit dem übergeordneten System und wird in Kapitel 5.2.2 beschrieben.
- **Timer 0** ist als 16-Bit Timer programmiert. Zwei 8-Bit Register legen den Startwert fest, der mit jedem Maschinenzyklus herunter gezählt wird. Der Timer wird benutzt um eine

³ Jeder Port besitzt 8 Datenleitungen, Ausnahme bildet Port 7 mit nur 2 Datenleitungen. Die im folgenden verwendete Bezeichnung Port X.Y meint Leitung Y von Port X. Port X ohne Zusatz meint alle 8 Datenleitungen

softwaregesteuerte Echtzeituhr zu verwalten und um die Meßroutine zu definierten Zeiten aufzurufen.

- **Der AD-Wandler** wird zur Digitalisierung der von den Multiplexern kommenden Signale verwendet.
- **Das interne RAM** von 256 Bytes wird zur Speicherung von Daten verwendet, auf die häufig zugegriffen wird. Der Zugriff ist wesentlich schneller als auf externes RAM.
- **Das serielle Interface** wird zur Ausgabe von Status- oder Fehlermeldungen über die RS 232 Schnittstelle genutzt. Die Programmierung mit Hilfe des Programmier-Tools erfolgt ebenfalls über diese Schnittstelle.
- **Der interne Baud-Raten-Generator** wird zur Generierung der Baudrate bei Datenübertragung über die serielle Schnittstelle genutzt.

Die Software, die auf die hier vorgestellten Komponenten zugreift, ist in Kapitel 5.2.3 beschrieben.

5.2.2 Der CAN-Bus

Das im Labor vorhandene modulare Robotersystem kommuniziert mit dem übergeordneten System über einen CAN-Feldbus. Ziel war es, auch das Sensormodul über diesen Bus in das System zu integrieren.

Die Verbreitung von CAN-Netzwerken hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Ursprünglich ist das „Controller-Area-Network (CAN)“-Protokoll für den Einsatz in Kraftfahrzeugen entwickelt worden. Es wird jedoch zunehmend auch in industriellen Anwendungen als systeminternes Kommunikationssystem eingesetzt.

Das Protokoll bietet eine Vielzahl von Leistungsmerkmalen, die zu dieser raschen Verbreitung beigetragen haben, auf die hier nicht im einzelnen eingegangen wird. Eine ausführliche Beschreibung findet sich zum Beispiel bei Etschberger (Etschberger, 1994). Die wesentlichen Eigenschaften in Stichpunkten sind jedoch:

- Hohe Geschwindigkeit (maximal 1 Mbit/s)
- Unbegrenzte Teilnehmerzahl
- Priorisierung von Nachrichten
- Bitweise verlustlose Busarbitrierung
- Multi-Master System
- Hohe Sicherheit der Datenübertragung
- Sicherstellung netzweiter Datenkonsistenz
- Lokalisation ausgefallener Stationen

Die Übertragung von Daten über den Bus erfolgt in Form von Blöcken, die als CAN-Nachricht oder CAN Message Object bezeichnet werden. Zu jeder CAN-Nachricht gehört ein Identifier, der den anderen Teilnehmern sagt, woher die Nachricht stammt. Außerdem dient der Identifier zur Busarbitrierung. Je niedriger der Identifier, desto höher ist die Priorität der Nachricht. Die maximale Blocklänge eines CAN-Objekts ist auf acht Bytes begrenzt. Zur Kommunikation über den CAN-Bus ist mittlerweile eine Vielzahl von Protokollbausteinen (CAN-Controller) entwickelt worden.

Der verwendete Microcontroller C515C verfügt über einen solchen, bereits auf dem Chip integrierten CAN-Controller. Das Handling des CAN-Protokoll wird dabei vollständig von diesem übernommen, ohne auf die Ressourcen des Microcontrollers zuzugreifen.

Der Controller verfügt über eigenen Speicher für bis zu 15 Nachrichten (Message Objects) mit jeweils maximal 8 Bytes Länge. Jede Nachricht besitzt einen eigenen Identifier, der in den zum Objekt gehörigen Arbitrierungsregistern festgelegt ist und einen eigenen Satz von Control- und Status-Bits. Diese legen unter anderem fest, ob ein Objekt als zu senden oder zu empfangen deklariert ist, sowie die Anzahl der Datenbytes.

Ein zu sendendes Message Object kann so konfiguriert werden, daß es bei Empfang eines passenden Identifiers automatisch abgeschickt wird. Ein zu empfangenes Message-Object kann eine Anfrage nach einem passenden Identifier senden, um das Senden des Objektes zu initiieren.

Eine detaillierte Beschreibung findet sich im Siemens C515C Users manual (Siemens, 1996).

Abbildung 5-9 zeigt die 16 Register eines Objektes und die Speicherbereiche, die den insgesamt 15 Objekten zugeordnet sind.

Neben den Registern der einzelnen Objekte verfügt der CAN-Controller über 16 globale Register, mit denen allgemeine Kommunikationsparameter wie Baudrate und Abtastzeitpunkt festgelegt werden.

Offset

Message Control Reg. Low	+0
Message Control Reg. High	+1
Upper Arbitration Reg. Low	+2
Upper Arbitration Reg. High	+3
Lower Arbitration Reg. Low	+4
Lower Arbitration Reg. High	+5
Message Configuration Reg.	+6
Data Byte 0	+7
Data Byte 1	+8
Data Byte 2	+9
Data Byte 3	+10
Data Byte 4	+11
Data Byte 5	+12
Data Byte 6	+13
Data Byte 7	+14
Reserved	+15

Register Address Calculation:

Message Object n Register Address =
Message Object n Base Address + Offset

(see also **Figure 6-31**)

Message Object n (n=1 to F _H)	Message Object n Base Address
1	F710 _H
2	F720 _H
3	F730 _H
4	F740 _H
5	F750 _H
6	F760 _H
7	F770 _H
8	F780 _H
9	F790 _H
A _H	F7A0 _H
B _H	F7B0 _H
C _H	F7C0 _H
D _H	F7D0 _H
E _H	F7E0 _H
F _H	F7F0 _H

MCD02738

MCD02738

Abbildung 5-9 Speicherbelegung der CAN-Objekte (aus Siemens, 1996).

Der Controller wurde so programmiert, daß das Sensormodul vom übergeordneten System aus mit der gleichen Software angesprochen werden kann wie die anderen Module des modularen Robotersystems. Diese Software ist von der Firma Amtec (der Herstellerfirma der Roboter-Module) entwickelt worden und lag nicht als Source-Code vor. Spezielle Anpassungen waren

daher nicht möglich, so daß die Struktur der CAN-Objekte des Sensormoduls vollständig an die bereits vorhandene Struktur angepaßt werden mußte. Amtec macht keinen Gebrauch von den speziellen Möglichkeiten, die das CAN-Protokoll bietet. Sammelanfragen an verschiedene Module sind ebensowenig realisiert worden wie die sinnvolle Nutzung der Bus-Arbitrierung.

Im folgenden werden die Grundlagen der Programmierung des Controllers skizziert:

Anfragen oder Kommandos werden ausschließlich vom übergeordneten System an ein bestimmtes Modul geschickt. Der Identifier des CAN-Objektes dient dabei zur Auswahl des Moduls und gleichzeitig zur Klassifizierung der Anfrage oder des Kommandos. Die Länge des Identifiers beim hier benutzten Standard CAN-Protokoll beträgt 11 Bit. Die letzten 5 Bit identifizieren das angesprochene Modul, während die Anfrage oder das Kommando in den ersten 6 Bit codiert werden. Das angesprochene Modul sendet als Antwort ein Objekt, dessen Identifier die eigene Modulnummer und den Nachrichtentyp der Antwort enthält. Falls die Antwort Daten enthält, stehen diese in den Datenbytes des Objektes. Zu jedem Anfragetyp gibt es einen zugehörigen Antworttyp. Tabelle 5.1 zeigt die möglichen Anfrage- und Antwortkombinationen.

Anfrage	Antwort vom Modul
CANID_MODULEREQ + log. Nummer	CANID_MODULEEACK + log. Nummer
CANID_STATE	CANID_STATE + Modulstatuswort
CANID_SETMOTION + Bewegungs-Kdo.	CANID_SETMOTION
CANID_CMDGET + Kdo.	CANID_CMDACK + Kdo. + Daten
CANID_CMDPUT + Kdo. + Daten	CANID_CMDACK + Kdo.

Tabelle 5-2 Anfrage der Steuerung und Antwort des Moduls bei Verwendung der Amtec-Software zur Steuerung der Roboter-Module (nach Amtec, 1995).

Dem Sensormodul ist die Modulnummer 9 zugeteilt worden. Zur Initialisierung beantwortet das Modul die Anfrage „CANID_MODULEREQ + 9“ mit „CANID_MODULEEACK + 9“, womit es von der Steuerungssoftware der Firma Amtec erkannt wird und eine laufende

Nummer zugewiesen bekommt. Das Senden von Befehlen über die Steuerungssoftware geschieht mittels „CANID_CMDPUT + Kommando + Daten“ und wird vom Modul bestätigt. Das Lesen von Daten wird von der Steuerungssoftware mit „CANID_CMDGET + Kdo.“ initiiert und vom Modul mit „CANID_CMDACK +Kdo. + Daten“ beantwortet. Ein Überblick über die Codierung aller Kommandos befindet sich im Amtec Programmierhandbuch (Amtec, 1995).

5.2.3 Die Microcontroller-Software

Sämtliche auf dem Controller laufende Software ist mit Hilfe einer Entwicklungsumgebung der Firma Keil entwickelt worden. Neben einem C-Compiler gehören ein Debugger, ein Simulator und weitere Hilfsprogramme zu diesem Programmpaket.

Der C-Compiler bietet neben dem ANSI-C Standard eine Reihe speziell auf 8051 Derivate zugeschnittene Befehle, insbesondere um die Adressierung des Speichers zu erleichtern. Mit Hilfe des Simulators können große Teile der Software vor der Übertragung auf den Controller getestet werden.

Durch den Einsatz dieser Entwicklungsumgebung konnte nahezu die komplette Software in C programmiert werden und außerdem die Zeit für die Programmentwicklung stark reduziert werden.

Die auf dem Controller laufende Software läßt sich in drei Prozesse gliedern:

Im **Hauptprogramm** werden neben der Deklaration von Variablen alle wichtigen Register des Microcontrollers initialisiert. Die wesentlichen Schritte dabei sind:

- Setzen der Interruptvektoren.
- Zeitkonstanten für Timer und Baudratengenerator festlegen.
- Initialisieren des CAN-Controllers und Festlegen der Message-ID's.
- Initialisieren aller Ports und Festlegen der Portfunktionen.

Der Timer 0 Interruptvektor wird so gesetzt, daß nach jedem Timerdurchlauf die Interrupt-Routine „Measure“ gestartet wird.

Nach der Initialisierung des CAN-Controllers wartet dieser darauf Nachrichten zu empfangen. Das Setzen des CAN-Interruptvektors führt zum Ausführen der Interruptroutine „CAN“ bei jeder empfangenen Nachricht mit passendem Identifier.

Nach Beenden der Initialisierung wird im Hauptprogramm eine Endlosschleife gestartet, in der die serielle Schnittstelle abgefragt wird. Die Kommunikation über die serielle Schnittstelle ist dabei ausschließlich zur Fehlersuche oder zur Abfrage des Modulstatus gedacht.

Die Interrupt-Routine „Measure“ wird nach jedem Durchlauf von Timer 0 durchlaufen. Die Echtzeituhr wird hochgezählt und die aktuelle Spannung an den analogen Eingängen wird über den AD-Wandler eingelesen. Die Zeitkonstante von Timer 0 ist nach der Initialisierung so eingestellt, daß „Measure“ alle 125 µs durchlaufen wird. Bei jedem vierten Durchlauf, also alle 500 µs erfolgt ein Sprung in die Meßschleife, und die aktuellen Spannungen an den 4 verwendeten Analogeingängen werden eingelesen. Zum Update aller Meßwerte der vier, jeweils 18-fach gemultiplexten Kanäle werden also 9 ms benötigt.

Die Interrupt-Routine „CAN“ wird immer durchlaufen, wenn der CAN-Controller eine Nachricht mit passendem Identifier empfangen hat. „CAN“ analysiert die empfangene Nachricht und schickt Meßwerte oder Statusnachrichten zum CAN-Controller. Bei Anforderung von Daten schickt „CAN“ maximal 6 Meßwerte als Antwort an den CAN-Controller. Zum Auslesen aller 72 Werte müssen also 12 Messages angefordert werden. Die Übertragung aller Werte dauert ca. 12 ms, was einer maximalen Updatefrequenz von ca. 83 Hertz entspricht.

Neben den beschriebenen Eigenschaften besitzen die Routinen „CAN“ und „Measure“ noch andere Funktionalitäten. Bei Bedarf können auch einzelne Sensoren oder Blöcke von Sensoren ausgelesen werden, was die Update-Frequenz entsprechend erhöht. Außerdem können bis zu 200 Messungen intern gespeichert werden und bei Bedarf nur die je Kanal registrierten Maximalwerte gesendet werden.

Eine schematische Darstellung der wichtigsten auf dem Controller laufenden Prozesse zeigt Abbildung 5-10.

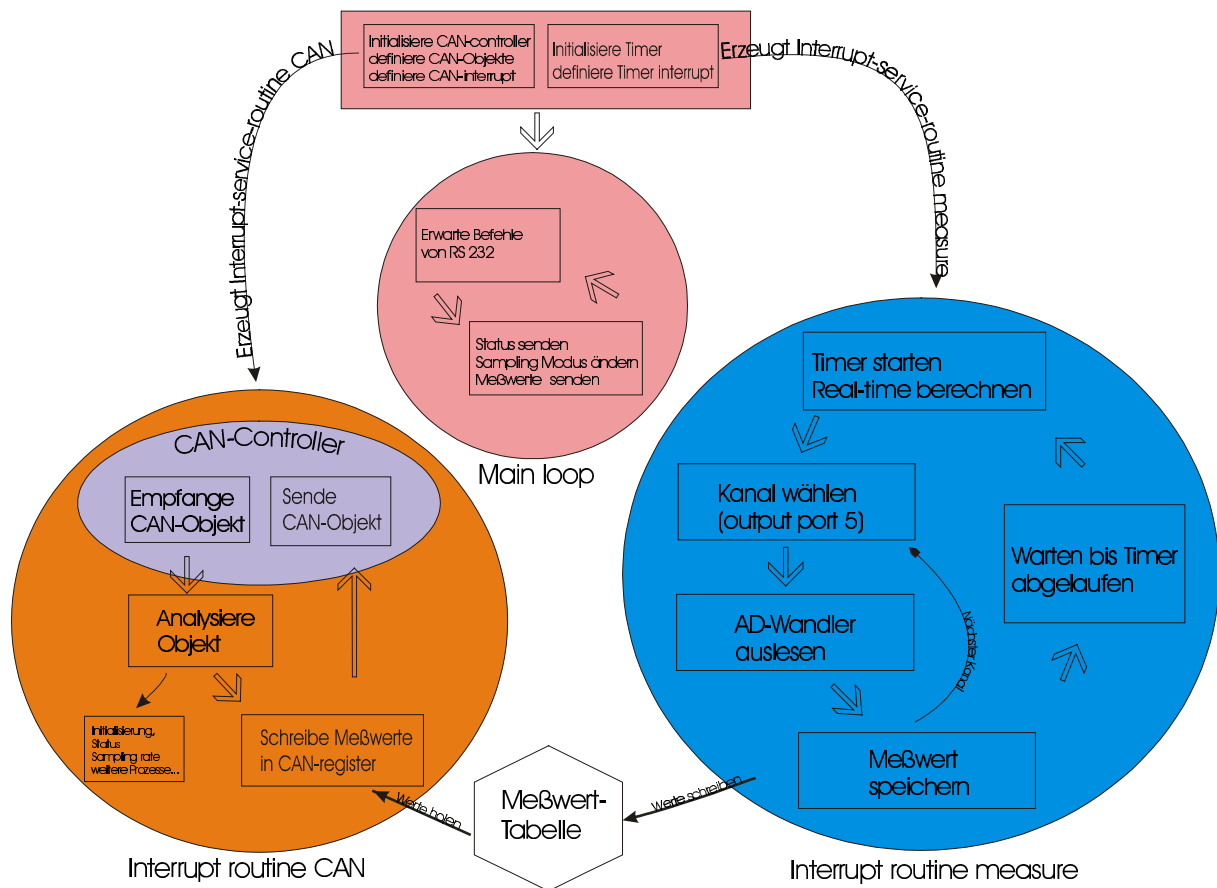


Abbildung 5-10 Schematische Darstellung der auf dem Microcontroller laufenden Prozesse.

5.3 Das komplette Sensormodul

Die beiden Module der analogen Elektronik sind so konstruiert, daß sie direkt über Stecker- bzw. Buchsenleisten mit dem Microcontroller-Board verbunden werden können (siehe Abb. 5-11).

Alle Verbindungen zu den Sensoren, zum CAN-Bus und zur Stromversorgung sind als Steckerleisten ausgeführt, so daß das Auswechseln eines Moduls ohne Lötarbeiten möglich ist. Bei Bedarf (z. B. beim Anschluß zusätzlicher Sensorik) können ohne Lötarbeiten weitere Module eingefügt werden. Durch das Stapeln der Module ist eine sehr kompakte Bauweise erzielt worden.

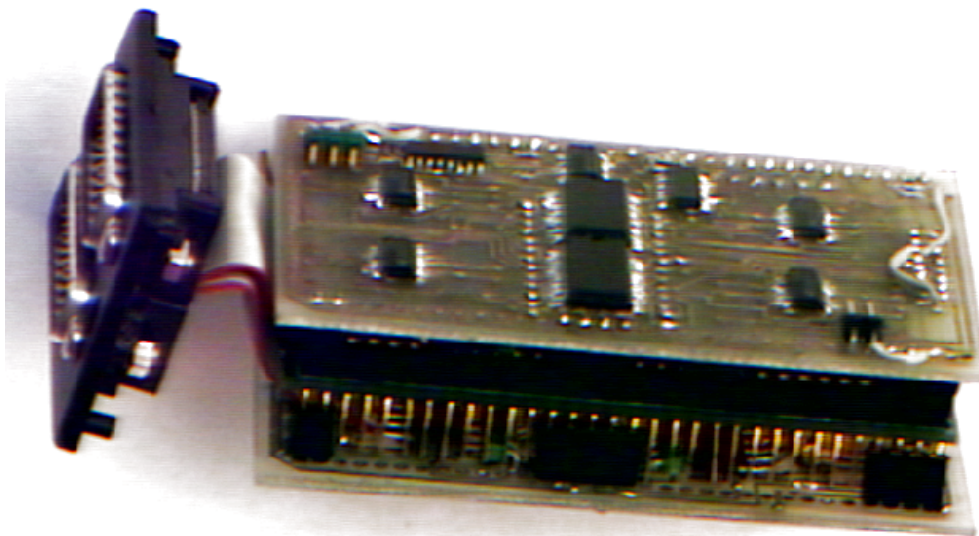


Abbildung 5-11 Komplette Elektronik in „Sandwichbauweise“. Das Microcontroller-Board befindet sich zwischen den beiden Modulen mit Analogelektronik. Die Sensoren werden über zwei 25-polige Sub-D Stecker angeschlossen. Die Stromversorgung und der Anschluß an den CAN-Bus erfolgt ebenfalls über Steckerleisten.

Die gesamte Elektronik des Sensormoduls befindet sich in einem Aluminiumgehäuse, das direkt auf dem Greifer montiert ist (siehe Abb 4-4).

Abbildung 5-12 zeigt noch einmal den Weg der Sensorsignale vom Sensor bis zum übergeordneten System.

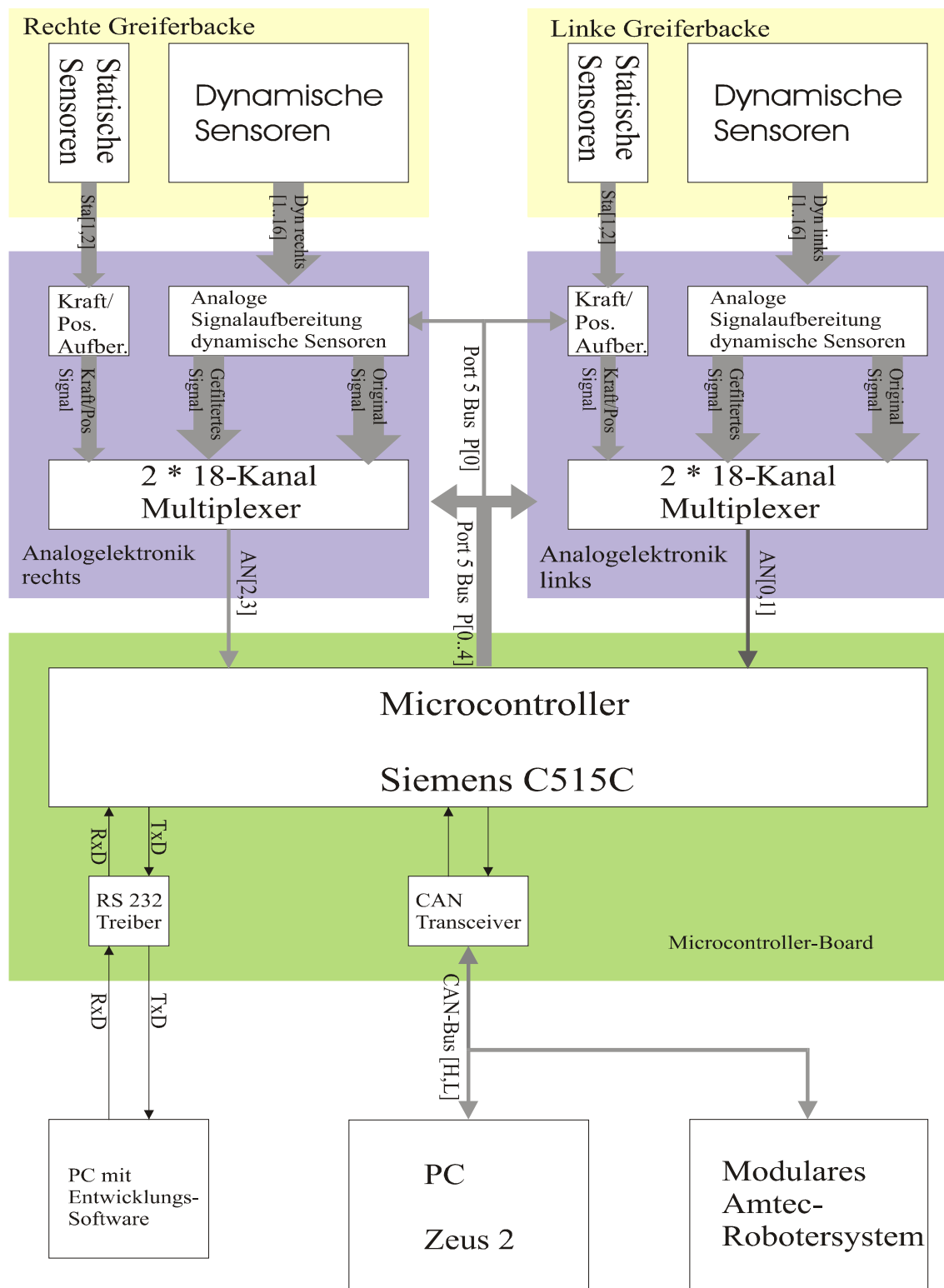


Abbildung 5-12 Blockdiagramm zur Verarbeitung der Sensordaten von den Sensoren bis zum PC Zeus 2, welcher Teil des übergeordneten Systems ist. Die RS 232 Schnittstelle dient nur zur Programmierung und Fehlersuche.

6 Die Einbindung in das Gesamtsystem

In diesem Kapitel wird zunächst die Hardware des Roboter-Systems vorgestellt. Im Anschluß daran folgt ein Überblick über die Software des Systems und eine Vorstellung der bisher entwickelten Software zum Einbinden der taktilen Sensorik. Das Kapitel endet mit einigen Screenshots von der graphischen Oberfläche der Sensor-Software, die einen Eindruck für die von den Sensoren gelieferten Meßwerte bei verschiedenen Arten von Objektkontakten geben sollen.

6.1 Die Hardware

Das Gesamtsystem, in das die Sensoren integriert sind, besteht aus einem modularen Roboter-System der Firma Amtec, das über einen CAN-Feldbus mit einem PC (Zeus 2) verbunden ist. Dieser ist in ein lokales Netzwerk bestehend aus drei weiteren PC's (Zeus 1, 3, 4) und einer SUN-Workstation (Isko) eingebunden. Die Workstation ist dabei in das Institutsnetzwerk integriert. Die PC's werden unter QNX, einem „Multi-User, Multi-Tasking“ Echtzeit-Betriebssystem betrieben, die SUN-Workstation unter Solaris.

Zeus 4 ist mit einem Kamerakopf verbunden, der über zwei Kameras zur Aufnahme von Stereo-Bildern verfügt. Diese Bilder werden dem System über die Frame-Grabber von Zeus 3 zur Verfügung gestellt.

Abbildung 6-1 zeigt die gesamte Hardware und die Verbindungen der Einzelkomponenten untereinander.

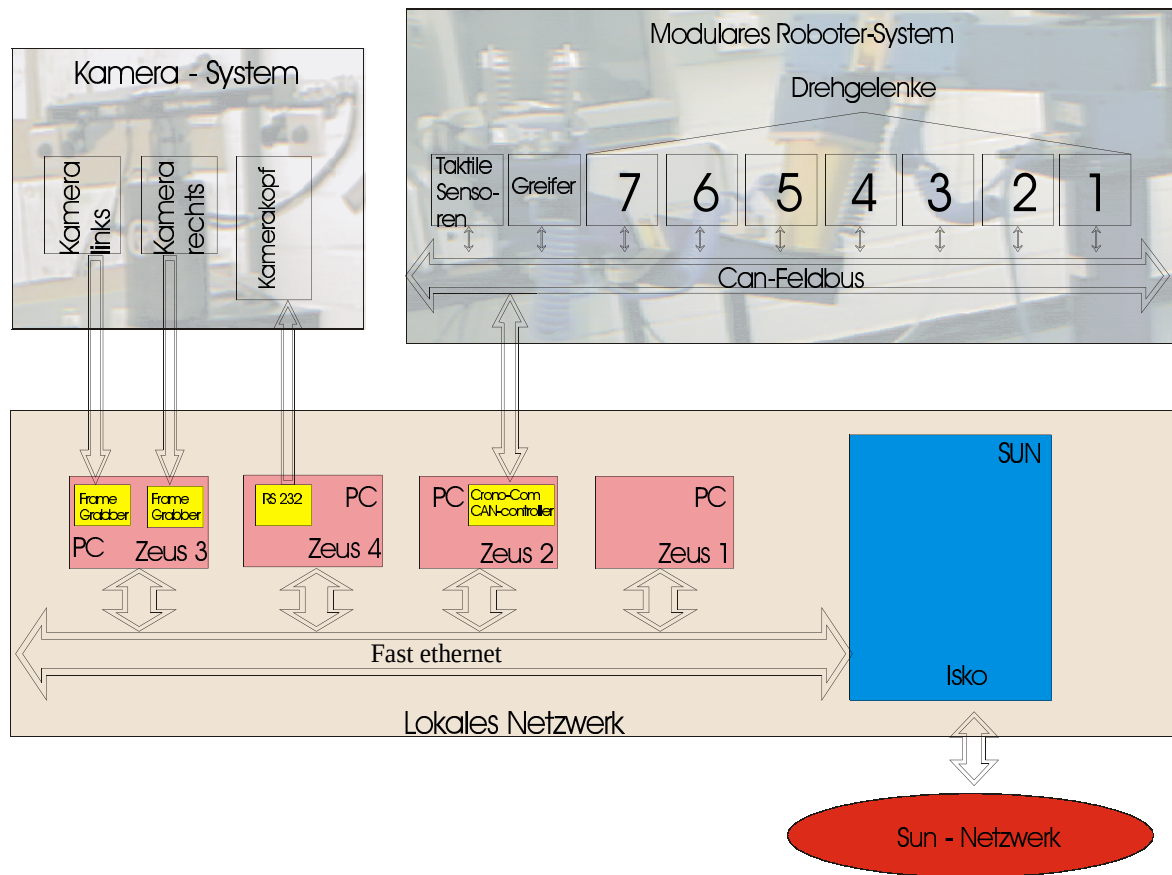


Abbildung 6-1 Die Hardware-Komponenten des Gesamtsystems und deren Verbindungen untereinander.

Die Einbindung der Sensorik in dieses System erfolgt über den bereits beschriebenen CAN-Bus (siehe Abb. 6-1). Dadurch war möglich, komplett auf zusätzliche Verkabelung oder PC-Karten zu verzichten.

Das lokale Netzwerk wurde auch im Hinblick darauf errichtet, den Roboter später einmal auf einer mobilen Plattform zu montieren und das gesamte System in diese Plattform zu integrieren. Momentan jedoch ist der Roboter im Labor fest am Boden montiert. Abbildung 6-2 zeigt den Roboter mit der am Greifer angebrachten taktilen Sensorik.

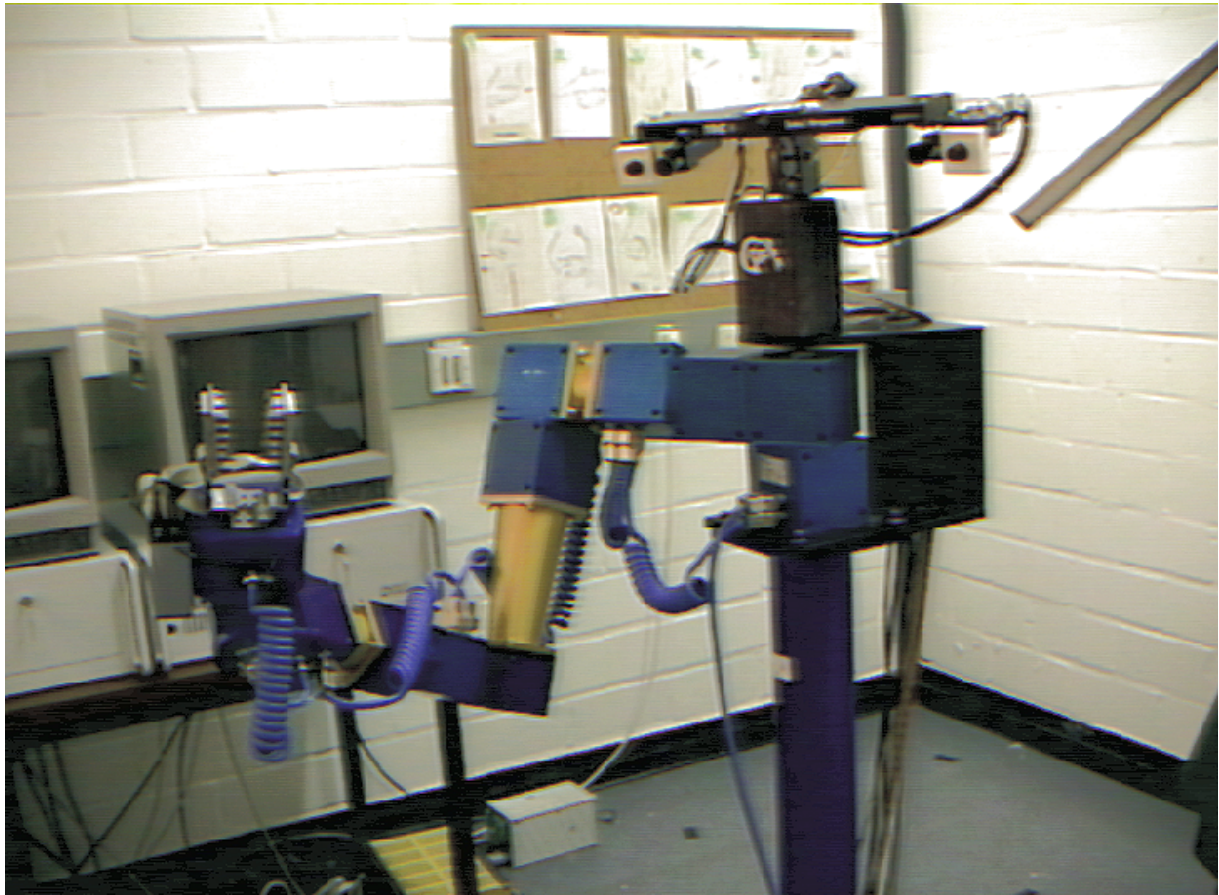


Abbildung 6-2 Abbildung des NEUROS-Roboters mit Kamerakopf, komplett montierten Sensoren und Sensor-elektronik.

6.2 Die Software

Das System ist zur Zeit in der Lage, verschiedene auf einem Tisch liegende Objekte zu erkennen und deren Position zu bestimmen. Außerdem werden Handgesten des Benutzers erkannt, die dem System mitteilen, auf welche Weise auf dem Tisch liegende Objekte gegriffen werden und wo diese abgelegt werden sollen (siehe Becker et al, 1999). Neben den bereits vorhandenen Leistungen sollen neue Fähigkeiten, wie zum Beispiel das Tracken der menschlichen Hand, als Vorstufe zum Imitationslernen hinzukommen.

Die Robotersteuerung bekommt momentan vom visuellen System lediglich Koordinaten, welche Position unter welchem Winkel anzufahren ist. Das Greifen von Objekten erfolgt dabei ohne Korrekturmöglichkeiten und ohne Rückmeldung über Erfolg oder Mißerfolg.

In einer ersten Stufe zur Integration der Sensoren sollen diese als Teil der Robotersteuerung eingesetzt werden. Griffe sollen mit definierter Kraft ausgeführt werden und durch Auswertung der Sensordaten soll eine Generierung und Ausführung von Griffen mit taktilem Feedback erfolgen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde bisher die Low-Level Software entwickelt, die die Grundlage zur Einbindung in das Gesamtsystem bildet. Alle Programme sind in C++ geschrieben und in das am Institut entwickelte Programmpaket namens FLAVOR eingebunden.

Die bisher entwickelte Software ermöglicht es, Sensordaten über den CAN-Bus anzufragen, die aktuellen Sensordaten anzuzeigen und den zeitlichen Verlauf aller Sensorsignale über einen beliebigen Zeitraum zu speichern und anzuzeigen (Historie). Mit Hilfe der Historie können Rückschlüsse auf die Interaktion zwischen Sensor und Umgebung gezogen werden.

Besonderer Wert ist auf die graphische Darstellung der Sensordaten gelegt worden. Mit Hilfe der graphischen Oberfläche soll es ermöglicht werden, einen Überblick über das Antwortverhalten der Sensoren zu bekommen, und die Entwicklung von Software zur Integration in das Gesamtsystem zu vereinfachen.

Die wesentlichen Programmteile werden im folgenden vorgestellt:

- **Get Data** liest die aktuellen Sensordaten vom CAN-bus. „Get Data“ kann nur vom direkt mit dem CAN-Bus verbundenen PC (Zeus 2) aufgerufen werden.
- **„Read Socket Data“** and **„Write Socket Data“** schicken die aktuellen Sensordaten über das lokale Netzwerk. Mit Hilfe dieser beiden Funktionen können die Sensordaten an alle Rechner des lokalen Netzes übermittelt werden.
- **„Display Sensor“** ist die graphische Anzeige der aktuellen Sensorwerte einer Greiferbakke (siehe Abbildung 6-3).

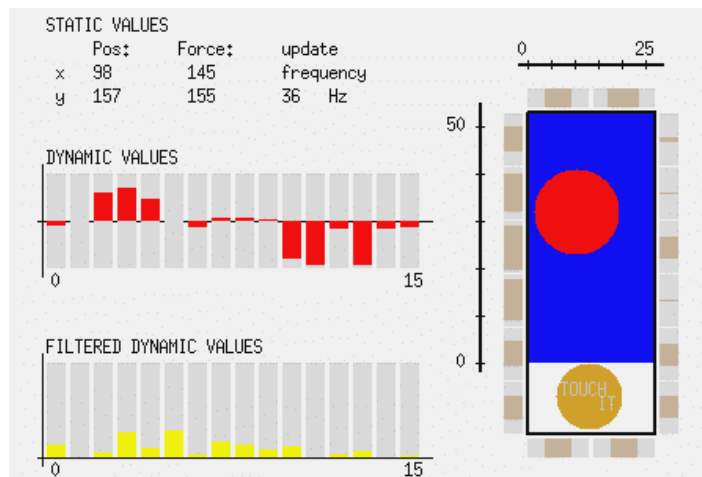


Abbildung 6-3 Graphische Anzeige der aktuellen Sensordaten.

Die blaue Fläche zeigt dabei die empfindliche Fläche der statischen Sensoren an. Der rote Punkt innerhalb dieser Fläche gibt den Ort einer auf die Sensoren wirkenden Kraft an. Die Größe des Punktes ist dabei proportional zur Größe der Kraft.

Die Felder am Rand der Sensorfläche repräsentieren die dynamischen Sensoren. Die Größe des braunen Rechtecks ist dabei ein Maß für den aktuellen Sensorwert. Eine mittlere Größe zeigt einen Sensor in Ruhe, kleinere Rechtecke bedeuten negative Sensorwerte (positive Annäherungsgeschwindigkeiten), größere Rechtecke bedeuten positive Sensorwerte (negative Annäherungsgeschwindigkeiten).

Die linke Seite des Diagramms zeigt im oberen Teil noch einmal die vom AD-Wandler gelieferten Werte für Kraft und Position der statischen Sensoren. Rechts davon wird angegeben, mit welcher Frequenz die Anzeige erneuert wird. Die roten Balken zeigen noch einmal den aktuellen AD-Wert des Geschwindigkeitssignals der dynamischen Sensoren an. Die gelben Balken zeigen den AD-Wert des hochpaßgefilterten Signals, sind also ein Maß für die von den Sensoren registrierten Vibrationen.

Die Numerierung der Balken ist dabei wie folgt: Die Werte des linken Sensors der Unterseite und des Sensors der linken Seite unten werden gemittelt und durch Balken 0 dargestellt. Es folgen im Uhrzeigersinn die Sensoren 1-6, Balken 6 ist also der Wert des Sensors oben links. Die Balken 7 und 8 haben im Moment keine Funktion und sind zur Anzeige der Werte von bisher nicht implementierten Sensoren zur Hinderniserkennung vorgesehen. Balken 9 stellt den Wert des Sensors oben rechts dar. Die weitere Numerie-

rung erfolgt wiederum im Uhrzeigersinn, wobei Balken 15 den gemittelten Wert des Sensors der rechten Seite unten und des Sensors der Unterseite rechts darstellt.

- „**Record measurements**“ fügt bei jedem Aufruf der Historie die aktuellen Sensordaten hinzu und löscht alle Daten, die nicht mehr innerhalb des gewählten Zeitfensters liegen.
- „**Display Graph**“ zeigt eine graphische Darstellung des zeitlichen Verlaufes der Sensorsignale (Historie) für beliebig wählbare Sensoren (siehe Abbildung 6-4).

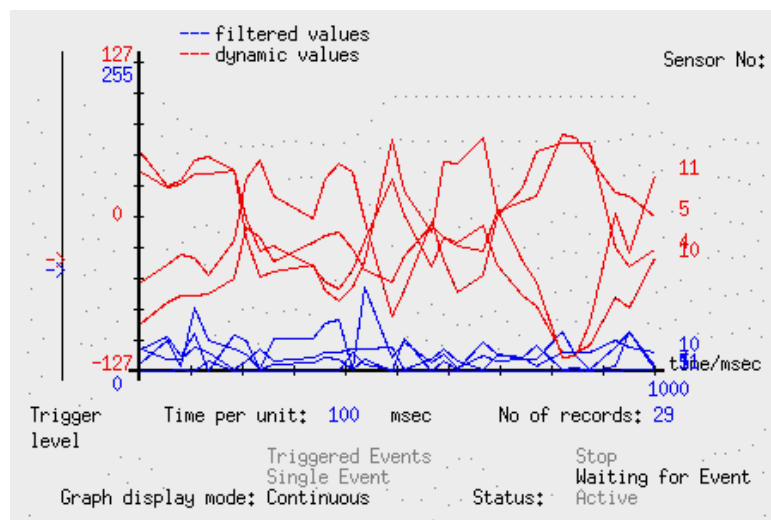


Abbildung 6-4 Graphische Darstellung des zeitlichen Signalverlaufes (Historie). Es können beliebig viele Sensoren angezeigt werden (hier 4 Stück). Die Zeitskala der Aufzeichnung ist frei wählbar. Ebenfalls besteht die Möglichkeit, nur Ereignisse anzeigen zu lassen, die einen Schwellwert überschreiten. Diese Schwelle ist ebenfalls frei wählbar (Trigger level links im Bild).

Es können auch Schwellwerte eingestellt werden, so daß nur Ereignisse, die die Schwelle überschreiten, gezeigt werden. „Display Graph“ kann damit als Speicheroszilloskop für insgesamt 72 Kanäle aufgefaßt werden.

6.3. Screenshots

Um einen Eindruck in das Antwortverhalten der Sensoren zu vermitteln, sind hier einige Schnappschüsse der graphischen Oberfläche während verschiedener Kontakte der Sensoren mit Objekten abgebildet. Es sind dabei jeweils nur die aktuellen Sensordaten, beziehungsweise die Daten der Historie, für eine Greiferbacke gezeigt.

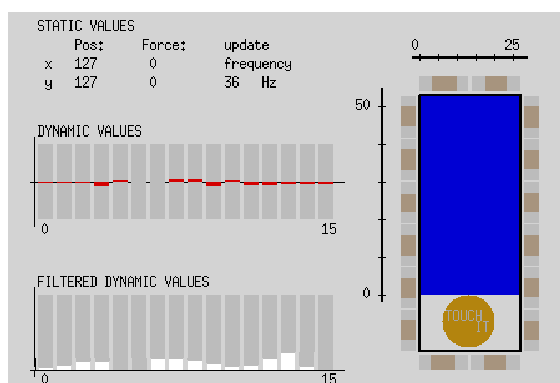


Abbildung 6-5 Sensoren ohne Objektkontakt.

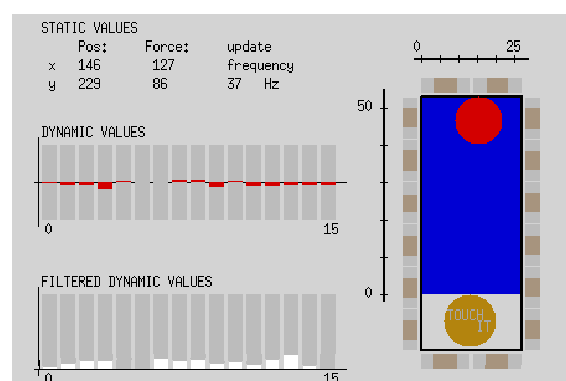


Abbildung 6-6 An der Spitze der festgehaltenes Objekt in Ruhe.

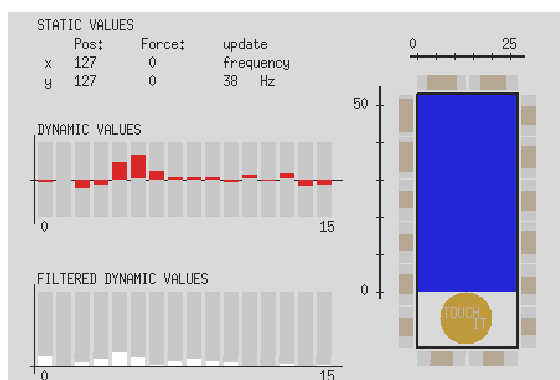


Abbildung 6-7 Entfernen von Objekt an vorderer linker Kante.

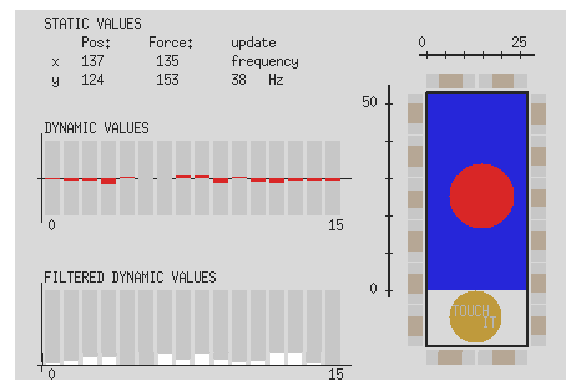


Abbildung 6-8 In der Mitte festgehaltenes Objekt in Ruhe (optimaler Griff).

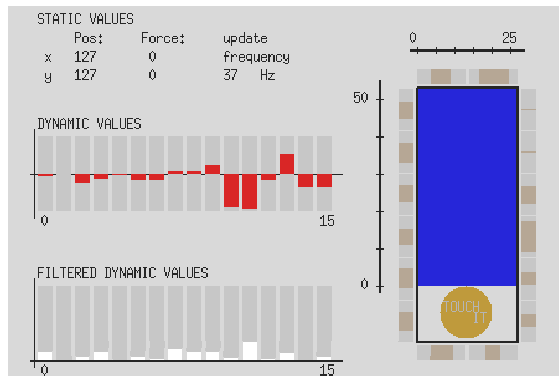


Abbildung 6-9 Berühren von Objekt mit rechter Seite.

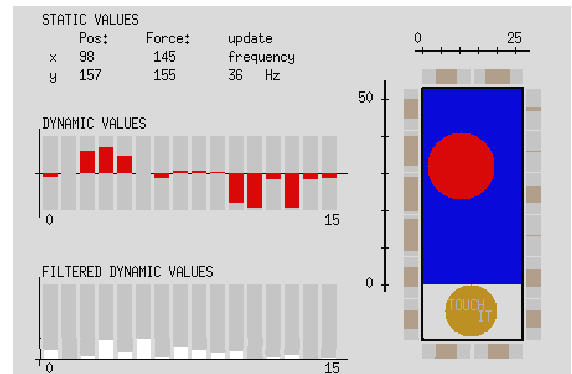


Abbildung 6-10 Leichtes Ziehen des Benutzers an einem gegriffenen Stab.

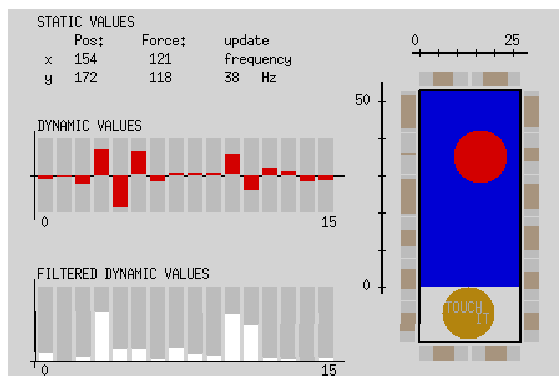


Abbildung 6-11 Einsetzendes Rutschen bei zuvor stabilem Griff.

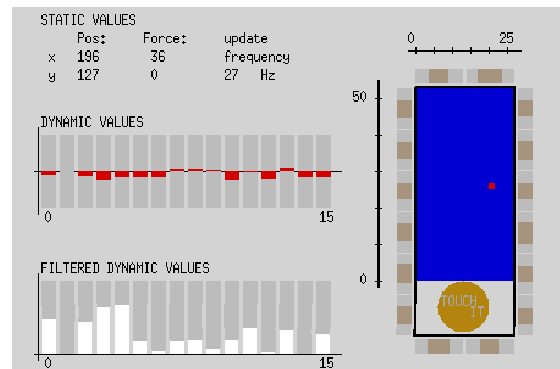


Abbildung 6-12 Rutschen bei nicht fest genug gegriffenem Objekt.

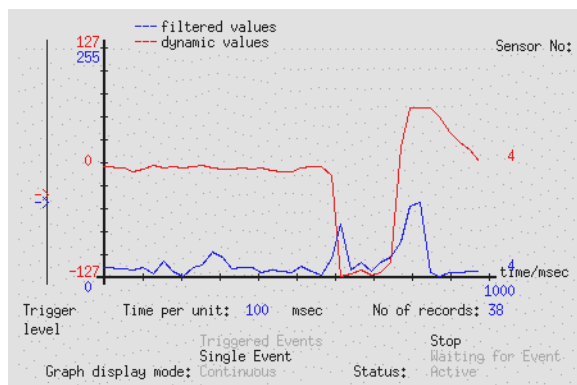


Abbildung 6-13 Historie eines Sensors während des Antippens mit dem Finger.

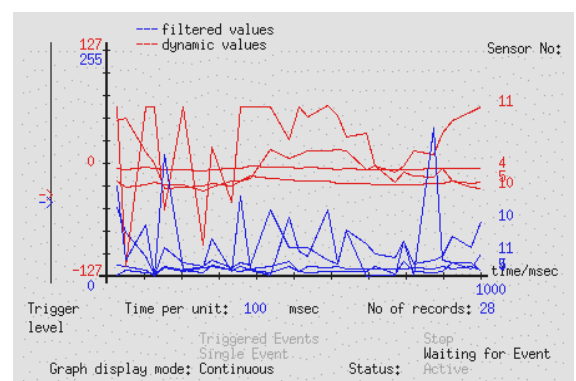


Abbildung 6-14 Historie von 4 Sensoren bei rutschendem Objekt.

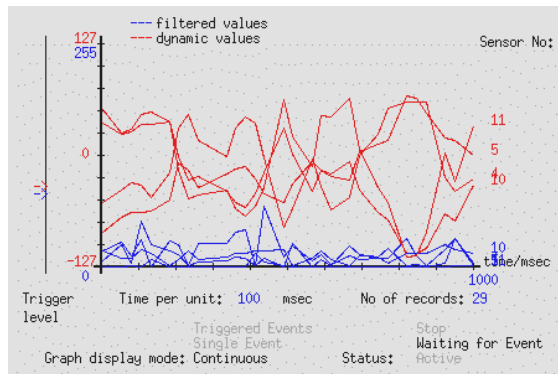


Abbildung 6-15 Historie von 4 Sensoren bei leichtem Ziehen an gegriffenem Stab.

Einem menschlichen Betrachter ist es in den meisten Fällen unmittelbar möglich, die Art des Kontaktes durch alleiniges Betrachten der Abbildungen zu erkennen, was darauf hindeutet, daß es mit der gewählten Anordnung prinzipiell möglich ist, mit taktilem Feedback zu greifen.

Neben den Möglichkeiten zur Generierung von Griffen ist auch die Möglichkeit gegeben, auf Reize aus der Umwelt einzugehen. Abbildung 6-10 zeigt zum Beispiel ein Objekt, an dessen einer Seite der Benutzer leicht zieht („gib das her“), wobei die Daten der Sensoren eindeutig von denen für einsetzendes Rutschen zu unterscheiden sind.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit ist der Zwei-Backen-Greifer eines bestehenden Robotersystem mit taktiler Sensorik ausgestattet worden.

Dabei wurden zwei Typen von Sensoren eingesetzt:

- Statische Sensoren, die auf die Sensorfläche aufgebrachten Druck messen. Es handelt sich dabei um piezoresistive Foliensensoren, die auf einer von der Firma Interlink patentierten Folie basieren. Diese ist mit einer halbleitenden Polymertinte bedruckt, die ihren Widerstand in Abhängigkeit des aufgebrachten Druckes ändert. Mit den in dieser Arbeit aufgebauten Sensoren ist es möglich, Mittelwerte von Größe und Position einer auf die Sensorfläche wirkenden Kraft zu bestimmen. Es lassen sich jedoch nach dem gleichen Prinzip auch Sensorarrays aufbauen.
- Dynamische Sensoren, die in der Lage sind, Annäherungsgeschwindigkeiten und Vibrationen zu registrieren. Es werden dazu kapazitive Sensoren verwendet, wobei die Ankopplung der Sensoren an das zu betastende Objekt über Fasern erfolgt. Die Sensoren registrieren in erster Linie die durch Objektkontakt hervorgerufenen Änderungen des Membranabstandes. Dabei kann aus dem zeitlichen Verlauf des Sensorsignals die Annäherungsgeschwindigkeit bestimmt werden. Eine anschließende Filterung des Sensorsignals über einen Hochpaß ermöglicht es, Rückschlüsse auf Vibrationen zu ziehen. Die Sensoren weisen eine hohe Empfindlichkeit auf, und die vom Sensor auf das Objekt ausgeübte Kraft ist minimal, weshalb auch Manipulationen von sehr empfindlichen Objekten möglich sind. Die von einem Sensor erfaßte Fläche ist nur abhängig von der Anzahl und Anordnung seiner Fasern, die sich innerhalb weiter Grenzen variieren läßt.

Diese Sensoren lassen sich auf vielfältige Weise miteinander kombinieren. Zusammen liefern sie Daten über einwirkende Kräfte, Geschwindigkeiten und Vibrationen. Dieses Datenprofil kommt der biologischen Realität nahe und soll es ermöglichen, das Robotersystem mit einem biologisch plausiblen Tastsinn auszustatten.

In dieser Arbeit sind dynamische Sensoren ausschließlich um den Rand der Greiferbacken des Zwei-Backen-Greifers herum angeordnet worden. Ziel war es, den Aufwand an Mechanik und Elektronik in Grenzen zu halten und dennoch das notwendige taktile Feedback für alle mit einem solchen Greifer durchführbaren Manipulationen zu erhalten.

Ein weiterer Teil dieser Arbeit umfaßte die Entwicklung von Elektronik zur Aufbereitung und Weiterleitung der Sensorsignale. Die Elektronik ist modular aufgebaut und gliedert sich in einen analogen und einen digitalen Teil:

- Für die analoge Verarbeitung der Sensorsignale existiert jeweils ein Modul für jede Greiferbacke. Diese Module übernehmen die Beschaltung der Sensoren, das Multiplexen der Sensorsignale und die Stromversorgung. Um eine kompakte Größe zu erzielen sind die Module beidseitig in SMD-Technik bestückt.
- Die digitale Weiterverarbeitung geschieht mit Hilfe eines Microcontroller-Board der Firma PHYTEC, das mit einem 8-Bit Siemens Microcontroller C515C und sämtlichen Peripheriekomponenten bestückt ist. Der Microcontroller wird zum Aufnehmen und Verwalten der Sensordaten verwendet. Er verfügt außerdem über einen integrierten CAN-Controller, der zur Kommunikation mit dem übergeordneten System dient.

Die analogen Module sind so konstruiert, daß Analog- und Digitalelektronik direkt übereinander gesteckt werden können („Sandwichbauweise“). Durch die damit erzielten geringen Abmessungen ist es möglich gewesen, die gesamte Elektronik direkt auf dem Greifer zu montieren.

Die Kommunikation der Sensorik über einen CAN-Feldbus, der auch die übrigen Module des Robotersystems miteinander verbindet hat es erlaubt, die Sensorik ohne weitere Verkabelung in das bestehende System zu integrieren.

Die für den Microcontroller geschriebene Software ermöglicht es, das Sensormodul vollständig in die Steuerung der vorhandenen Robotermodule der Firma Amtec zu integrieren und es wie ein zum System gehörendes Modul anzusprechen.

Zur softwaremäßigen Einbindung der Sensorik in das Gesamtsystem sind im Rahmen dieser Arbeit alle Funktionen zum Auslesen und zur Speicherung des zeitlichen Verlaufs der Sensordaten (Historie) geschrieben worden. Um die weitere Entwicklung von Software zu erleichtern, lassen sich die aktuellen Sensordaten und die Daten der Historie über ein komfortables Display anzeigen.

Die entwickelte Hard- und Software bildet die Voraussetzung für ein System zum Greifen mit taktilem Feedback.

Im Verlauf der weiteren Arbeit muß untersucht werden, ob die hier gewählte Ausführung und Anordnung der Sensorik für die geplanten Anwendungen ausreichende Daten liefert.

Für die statischen Sensoren und beim Einsatz der dynamischen Sensoren über die Funktion als Kontaktdetektor hinaus, müssen außerdem Überlegungen zu Kalibrierungsmöglichkeiten der Sensoren angestellt werden.

Geplant ist eine stufenweise Einbindung der Sensorik in die Robotersteuerung:

- Zum jetzigen Zeitpunkt werden die statischen Sensoren bereits zum Greifen mit definierter Kraft verwendet.
- Im folgenden soll zunächst das Geschwindigkeitssignal der dynamischen Sensoren zur Korrektur der vom visuellen System kommenden Griffdaten eingesetzt werden, so daß auch bei fehlerhafter Lokalisierung des Objekts ein sicherer Griff möglich wird.
- Einsetzendes Rutschen oder Eingriffe des Benutzers (Ziehen am Objekt) sollen registriert, und entsprechend beantwortet werden.
- Mit Hilfe der Sensoren sollen selbständig „gute“ Griffe ermittelt werden und diese Daten den Objekteigenschaften hinzugefügt werden.

Mit der noch zu leistenden Interpretation der Sensordaten und der vollständigen Integration der Sensorik in die Robotersteuerung wird dem System in Zukunft ein leistungsfähiger Tastsinn zur Verfügung stehen.

Anhang

A Prinzipieller Aufbau von komplexerer Sensorik

Mit den in dieser Arbeit vorgestellten Sensortypen lässt sich auch komplexere Sensorik als die am Zwei-Backen-Greifer verwendete aufbauen. Die äußere Beschaltung und der Aufbau der Sensorik selbst wird dabei entsprechend komplizierter. Die vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten von statischen und dynamischen Sensoren werden insbesondere bei der Anordnung von dynamischen Sensoren unterhalb der statischen Sensoren deutlich.

Der prinzipielle Aufbau eines statischen Sensorarrays und die Anordnung von dynamischen unterhalb der statischen Sensoren wird im folgenden beschrieben.

A.1 Aufbau eines statischen Sensorarrays

Falls die von den statischen Sensoren gelieferten Mittelwerte nicht ausreichen, ist es möglich, die Sensoren als Array aufzubauen. Die äußere Beschaltung eines solchen Sensorarrays ist jedoch wesentlich komplexer, da jedes Feld einen Sensor mit eigener Beschaltung darstellt. Abbildung 8-3 zeigt den möglichen Aufbau der Elektroden schicht eines 5*10 Sensorarrays. Die Elektroden befinden sich bei dieser Konstruktion ebenfalls auf einer Platine. Rot dargestellt sind die Leiterbahnen auf der Oberseite der Platine, die die Elektroden schicht bilden. Die Leiterbahnen der Unterseite sind grün dargestellt und dienen zur Beschaltung der einzelnen Sensorfelder. Dadurch kann die gesamte Verkabelung des Sensorarrays an einer Seite des Sensors erfolgen. Die Löcher in der Mitte jedes Feldes dienen zur Durchkontaktierung von Ober- und Unterseite. Außerdem ist es möglich, Fasern von dynamischen Sensoren durch diese Löcher zu führen (siehe Abbildung A-1).

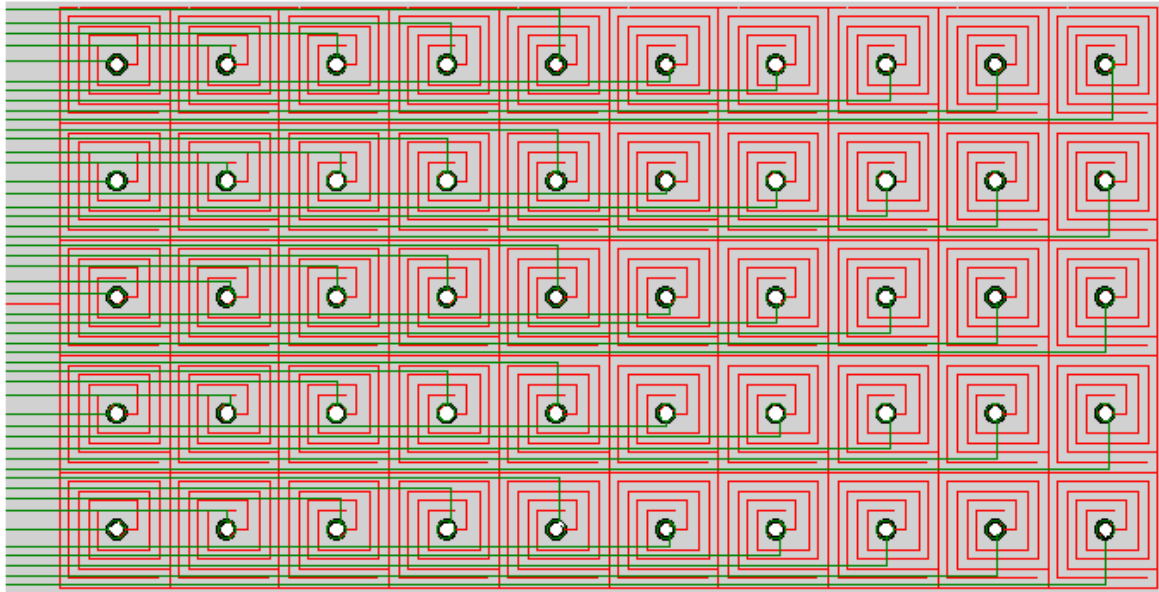


Abbildung A-1 Elektrodenschicht eines statischen Sensorarrays. Rot: Leiterbahnen auf der Oberseite, diese bilden die Elektrodenschicht. Grün: Leiterbahnen auf der Unterseite, welche eine Verkabelung ausschließlich von der linken Sensorseite ermöglichen.

A.2 Anordnung von dynamischen Sensoren unterhalb der statischen Sensoren

Abbildung A-2 zeigt eine schematische Darstellung zur Anordnung eines dynamischen unterhalb eines statischen Sensors. Mit dieser Art der Konstruktion ist es möglich, statische und dynamische Sensoren auf vielfältige Weise miteinander zu kombinieren.

Abbildung A-3 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines statischen Sensorarrays mit darunter befindlichen dynamischen Sensoren.

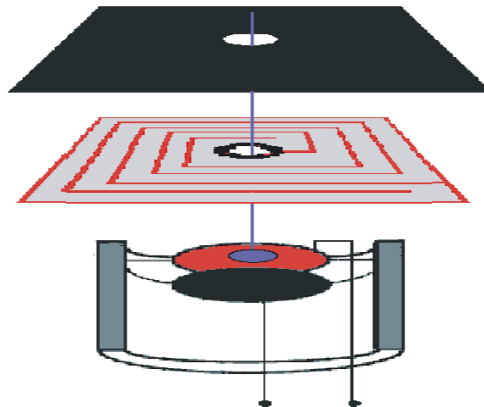


Abbildung A-2 Schematische Darstellung zur Anordnung eines dynamischen unterhalb eines statischen Sensors.
Oben: Interlink-Folie. **Mitte:** Elektrodenschicht. **Unten:** Dynamischer Sensor mit einzelner Faser oder schmalen Faserbündel, welches durch den statischen Sensor an die Oberfläche geführt wird.

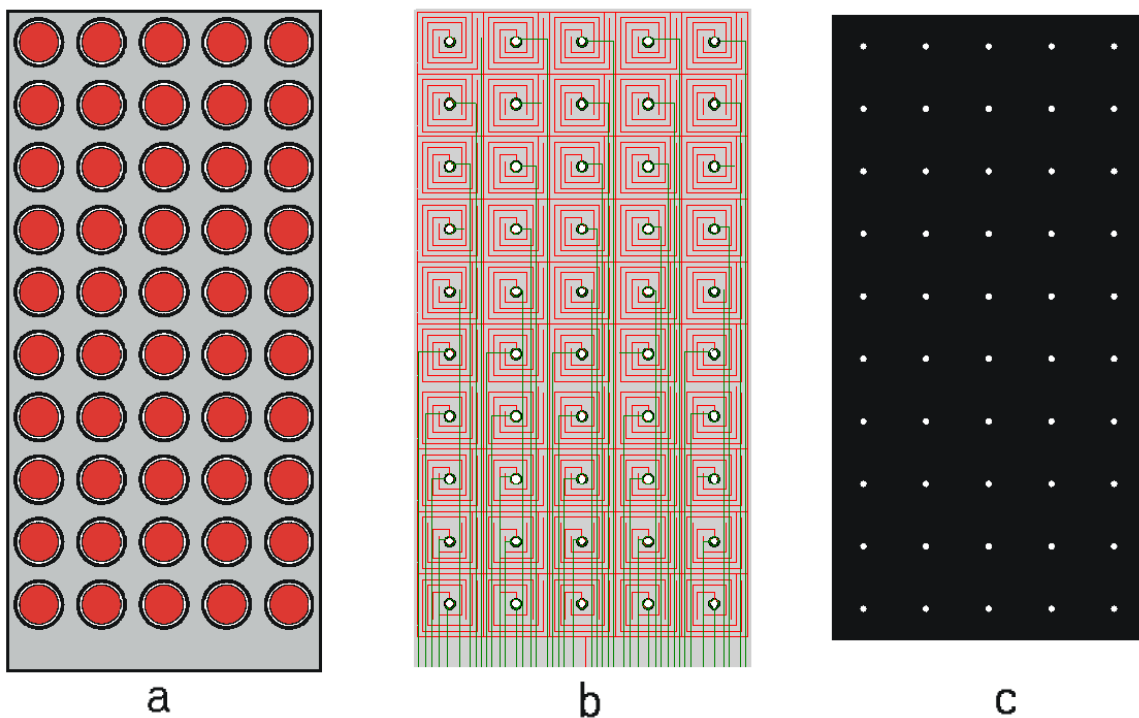


Abbildung A-3 Schematische Darstellung zum Aufbau eines statischen Sensorarrays mit darunter befindlichen dynamischen Sensoren. **a:** Grundplatte mit dynamischen Sensoren (rot). Die Fasern und die Beschaltung der Sensoren sind nicht eingezeichnet. **b:** Elektrodenschicht eines statischen Sensorarrays. Die Löcher der Durchkontaktierungen dienen gleichzeitig zur Durchführung der Fasern **c:** Interlink-Folie mit Löchern zur Durchführung von Fasern der dynamischen Sensoren.

B Schaltplan und Bestückungsplan eines Analogmoduls

Abbildung B-1 zeigt den Bestückungsplan eines Analogmoduls. Eine Liste aller verwendeten Bauteile befindet sich in Tabelle B-1. Der komplette Schaltplan eines Analogmoduls ist in Abbildung B-2 gezeigt.

Sämtliche Schaltpläne und Layouts sind mit BPECS, einem kostengünstigen Shareware-Programm erstellt worden. Die Bezeichnung der Bauform und die Darstellung der Bauteile weicht unter Umständen vom allgemeinen Standard ab.

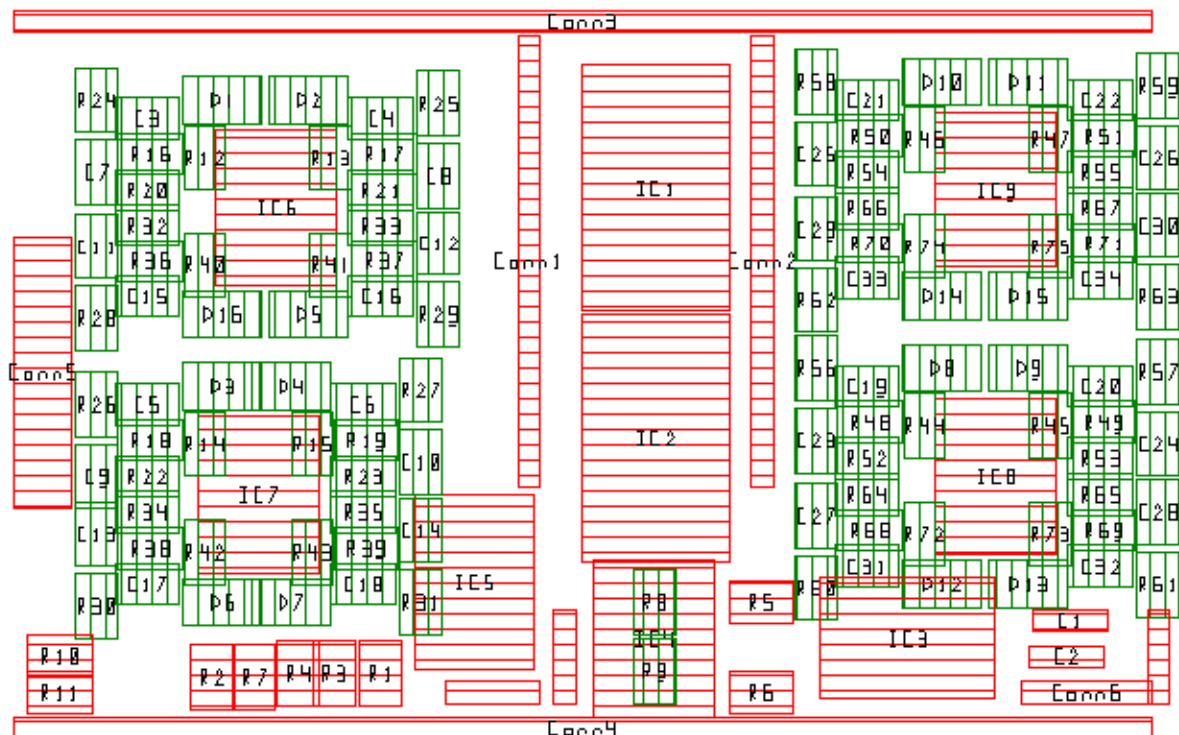


Abbildung B-1 Bestückungsplan eines Analogmoduls. Rot: Bauteile auf der Oberseite des Moduls. Grün: Bauteile auf der Unterseite des Moduls.

Bauteil	Bauform	Typ	Bauteil Nummer	Gesamt
Widerstände	SMD 0805	1 k Ω	R71; R67; R55; R66; R54; R51; R50; R70; R37; R33;R21; R32; R20; R17; R16; R36; R69; R65; R53; R64; R52; R49; R48; R68; R39; R35; R23; R34; R22; R19; R18; R38	32
		4.7 k Ω	R1; R4; R7; R2; R3; R11; R10	7
		10 k Ω	R9; R8	2
		22 k Ω	R62; R58; R59; R63; R28; R24; R25; R29; R60; R56; R57; R61; R30; R26; R27; R31	16
		100 k Ω	R6;R5	2
		470 k Ω	R75; R47; R46; R74; R41; R13; R12; R40; R73; R45; R44; R72; R43; R15; R14; R42	16
Kondensatoren	SMD 0805	10 nF	C29;C25;C26;C30;C11;C7;C8;C12;C27;C23; C24; C28; C13; C9; C10; C14	16
		22 nF	C21; C22; C34; C33; C3; C4; C16; C15; C19; C20; C32; C31; C5; C6; C18; C17	16
	SMD Tantal	10 μ F	C1; C2	2
IC's	SMD SO14	LM 324	IC9; IC6; IC8; IC7; IC4	5
	SMD SO 16	CMOS 4053	IC3; IC5	2
	SMD SOJ24_3	CMOS 4067	IC2; IC1	2
	TO 220	7805	IC 11	1
Dioden	SMD 1206		D16; D10; D1 ; D3; D6; D12; D15; D11; D5; D2; D4; D7; D9; D13; D14; D8	16
Potentiometer	SMD	10 k Ω Poti	3; 2	2
Stecker-/Buchsen-leisten	2.54 mm	32 Pins	Conn1; Conn 2	2
	Raster	4 Pins	Conn 6	1
		13 Pins	Conn 3, Conn 4	2
		2*8 Pins	Conn 5	1

Tabelle B-1 Bestückungsliste eines Analogmoduls. Die Nummern der Bauteile sind in der von BPECS erzeugten Reihenfolge übernommen worden. Die Bauform ist ebenfalls im BPECS Format angegeben, welches unter Umständen von der Standardbezeichnung abweicht.

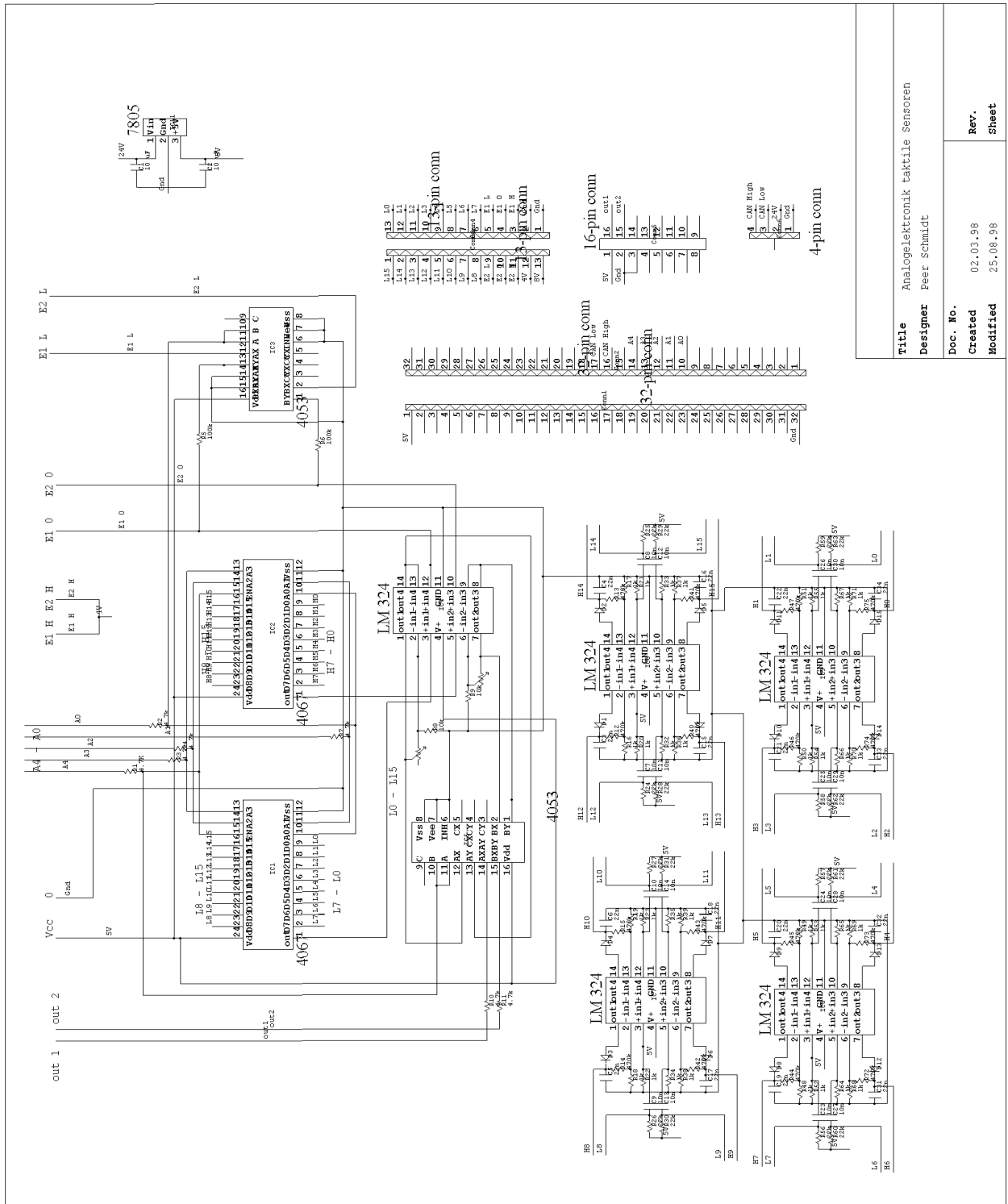


Abbildung B-2 Kompletter Schaltplan der Analogelektronik.

C Mechanik für den Aufbau der Sensorik des Zwei-Backen-Greifers

Die Mechanik zur Anordnung und Befestigung der Sensoren auf dem Zwei-Backen-Greifer zeigt Abbildung C-1. Die statischen Sensoren sind auf einer Grundplatte montiert (Abb. C-1 c). Die dynamischen Sensoren sind direkt in eine Trägerplatte integriert (Abb. C-1 a), die auch Bohrungen für die Befestigung der Grundplatte der statischen Sensoren und für die Befestigung auf den Greiferbacken besitzt. Zwischen der Trägerplatte und der Grundplatte der statischen Sensoren befindet sich eine Distanzplatte (Abb. C-1 b) mit der gleichen Dicke wie die Deckelplatten der dynamischen Sensoren (Abb. C-1 d).

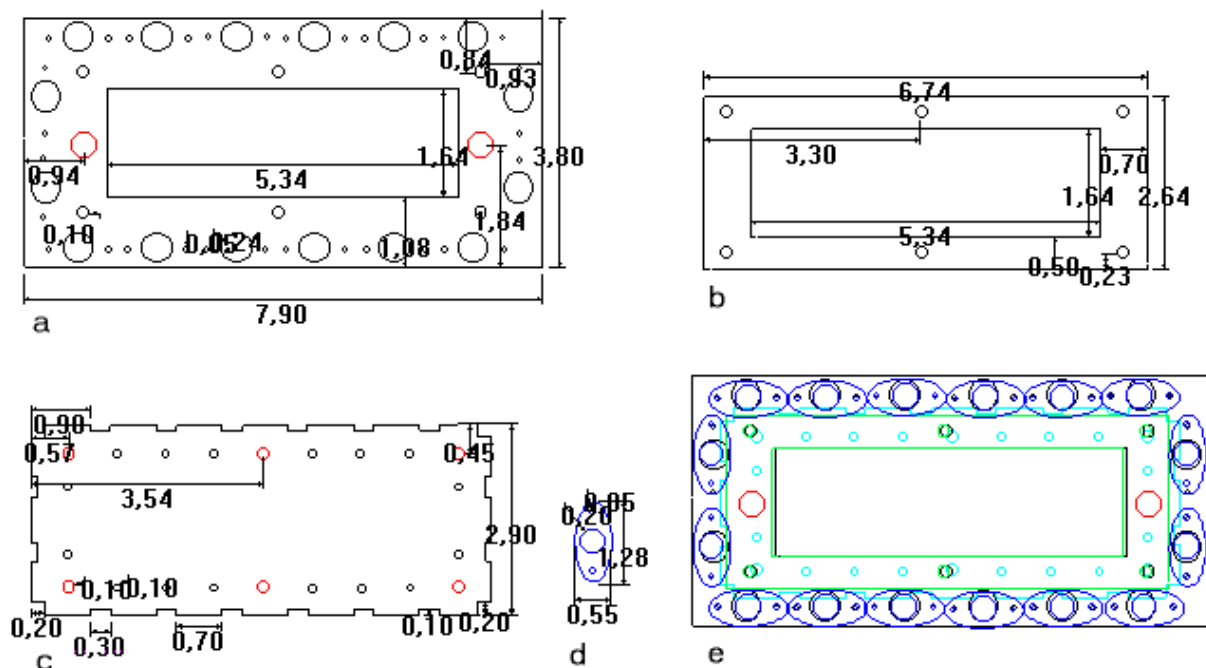


Abbildung C-1 Mechanik für den Aufbau der Sensorik des Zwei-Backen-Greifers. Alle Maßangaben in Zentimetern. **a:** Trägerplatte mit Bohrungen für die dynamischen Sensoren. **b:** Distanzplatte **c:** Grundplatte auf der die statischen Sensoren befestigt werden. **d:** Deckel bzw. Bodenplatte eines dynamischen Sensors. **e:** Gesamtansicht der Mechanik ohne Sensoren.

D Eigenschaften und Anschlußbelegung des Microcontroller-Board

Das Microcontroller-Board ist um Entwicklungszeit zu sparen, fertig aufgebaut von der Firma PHYTEC gekauft worden. Insbesondere die kleinen Abmessungen und der bereits integrierte CAN-Transceiver waren ausschlaggebend bei der Wahl dieses speziellen Boards. Den Kern bildet der Microcontroller C515C von SIEMENS. Die genaue Bezeichnung des Boards lautet: miniMODUL-515C. Eine ausführliche Beschreibung befindet sich im PHYTEC Hardware-Manual (PHYTEC, 1996).

Die wesentlichen Eigenschaften des Boards sind:

- Scheckkartenformat 55*85 mm durch Einsatz von SMD-Technik
- Multilayer-Technik
- Controller SAB80C515 von SIEMENS mit integriertem CAN-Controller, befehlskompatibel zur Familie der 8051-Prozessoren von INTEL
- Einzige Versorgungsspannung 5V, typisch <100 mA Stromaufnahme
- 128 kByte Flash On-Board
- On-Board Flash-Programmierung
- Keine separate Programmierspannung notwendig
- 32 kByteRAM On-Board (SMD)
- Alle Ports sowie Daten-und Adreßleitungen am Platinenrand über Stiftleisten verfügbar
- Flexible, per Software konfigurierbare Adreßdecodierung durch komplexen Logikbaustein
- Banklatches für Flash und RAM, im Adreßdekoder integriert
- RS-232 Schnittstelle
- CAN-Transceiver On-Board

Alle relevanten Signale sind über Stiftleisten am Platinenrand zugänglich. Eine Übersicht über die Belegung der Pins gibt Tabelle D-1. Die Lage der Pins zeigt Abbildung D-1.

PIN Nr.	Bezeichnung	Beschreibung
1	NC / WDI	opt. Watchdog-Eingang
2...9	P4.0...P4.7	Port 4
10...17	P5.0...P5.7	Port 5
18...25	P1.0...P1.7	Port 1
26	P3.0 RXD	Port 3.0 bzw. RXD (RS232)
27	P3.1 TXD	Port 3.1 bzw. TXD (RS232)
28	P3.2 INT0	Port 3.2 bzw. INT0
29	P3.3 INT1	Port 3.3 bzw. INT1
30	P3.4 T0	Port 3.4 bzw. Timer 0
31	/RES	/Reset-Eingang des Moduls
32	NC / VBAT	opt. ext. Batteriepufferung
33	VCC	Versorgungsspannung +5V=
34	VPD	Batteriespannungsausgang
35	P3.5 T1	Port 3.5 bzw. Timer 1
36...39	A11...A8	Adreßbus (High-Byte)
40...47	A7...A0	Adreßbus (Low-Byte)
48	/PFO	/Power-Fail-Output
49	/HPD	opt. /HPWD-Eingang
50	/PSEN	/Program-Store-Enable-Ausgang
51	P3.6 /WR	Port 3.6 bzw. /WR-Signal
52	P3.7 /RD	Port 3.7 bzw. /RD-Signal
53	/CS3	Chip-Select-Signal #1
54	/CS2	Chip-Select-Signal #2
55	/CS1	Chip-Select-Signal #1
56...63	D7...D0	Datenbus (Port 0 des Controllers)
64	GND	Schaltungsmasse 0V
65	AREF	Referenzspannung Analogteil +5V=
66,68,70,72,74,76,78,80	AN7...AN0	8 Analogeingänge
67,69,71,73,75,77,79	AGND	Bezugsmasse Analogteil 0V

Tabelle D-1 Pinout des Microcontroller-Boards (aus PHYTEC, 1996).

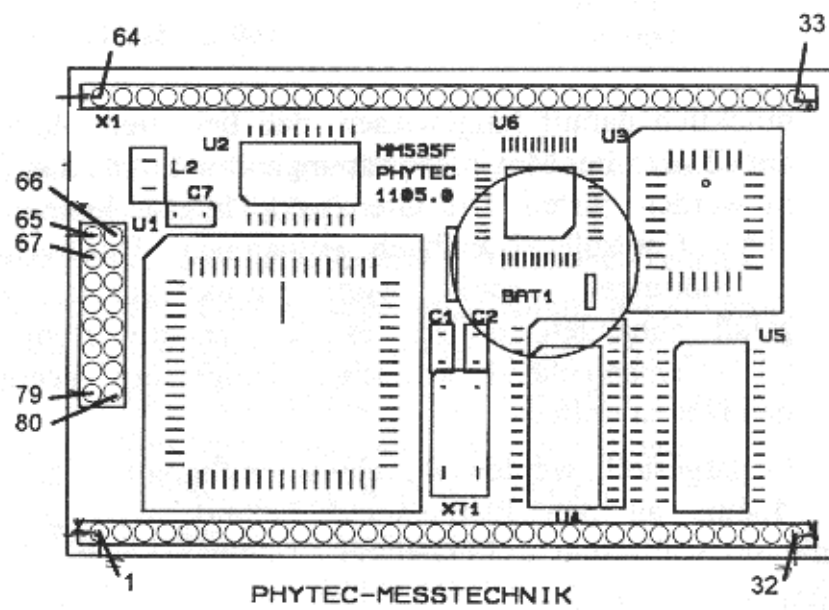


Abbildung D-1 Lage der Pins des Microcontroller-Boards (aus PHYTEC, 1996).

E Firmenadressen

Amtec GmbH, Pankstraße 8-10, 13127 Berlin

Best Proto Service Corp., Box 232440, San Diego CA 92193-2440, USA

ELECTRADE GmbH, Postfach 1743, 82159 Gräfeling (Vertrieb von FSR's in Deutschland)

I.E.E International Electronics & Engineering S.à.r.l., Zone Industrielle Findel, 2b, route de Trèves, L – 2632 Luxembourg (vormals Interlink Electronics Europe, Hersteller der FSR's).

Keil Elektronik GmbH, Bretonischer Ring 15, 85630 Grasbrunn

PHYTEC Meßtechnik GmbH, Robert-Koch-Straße 39, 55129 Mainz

Siemens AG, Salzufer 6-8, 10587 Berlin

Teisco Sound Research, LTD, Tokyo, Japan

Literaturverzeichnis

Amtec GmbH. 1995. Morse Treiber Version 2.20, Programmierhandbuch. Amtec GmbH Berlin

Becker, M., Kefalea, E., Maël, E., von der Malsburg, C., Pagel, M., Triesch, J., Vorbrüggen, J. C., Würtz, R. P. and Zadel, S. 1999. GripSee: A Gesture-controlled Robot for Object Perception and Manipulation. Autonomous Robots. In press.

Dario, P., Domenici, C., Bardelli, R., DeRossi, D. and Pinotti, P. C. 1983. Piezoelectric polymers: new sensor materials for robotic applications. Proc. 13th Int. Symp. Industrial Robots, 1434.

ELECTRADE GmbH. 1997. Der FSR-Sensor, Ein Überblick über die FSR – Technologie. ELECTRADE GmbH München.

Etschberger, K. 1994. CAN Controller-Area-Network, Grundlagen, Protokolle, Bausteine, Anwendungen. Carl Hanser Verlag München Wien.

Evans, M. R. 1985. Optical Sensor gives robots a light touch. Pop. Sci. 227(2), 36.

Fan, L. S., White, R. M. and Muller, R. S. 1984. A mutual capacitive normal- and shear-sensitive tactile sensor. IEEE Int. Electron. Devices Mg, 220 – 222.

Handwerker, H. O. 1995. Allgemeine Sinnesphysiologie, Somatosensorik. In: Robert F. Schmidt (Hrsg.). Neuro- und Sinnesphysiologie, 2. Auflage. Springer Verlag, 201 - 249.

Interlink Electronics Europe. 1990. Druck- und Positionssensoren – eine aufstrebende Technologie. Interlink Electronics Europe, Echternach, Luxemburg.

Jockusch, J. 1996. Taktile Sensorik für eine Roboterhand. Diplomarbeit, Technische Fakultät, Universität Bielefeld.

Liu, H., Meusel, P., Butterfass, J., Hirzinger, G. 1998. DLR's Multisensory Articulated Hand Part II: Parallel Torque/Position Control System. IEEE Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, 2087 – 2093.

Liu, H., Meusel, P. und Hirzinger, G. 1995. A Tactile Sensing System for the DLR Three Finger Robot Hand. ISMCR, 91 – 96.

Mehler, B. H. 1994. Entwicklung eines taktilen ortsauflösenden Sensorsystems zur Unterstützung des Greifens mit Robotern. Diplomarbeit, Lehrstuhl für elektrische Meßtechnik, TU München.

Miyazaki, S. und Ishida, A. 1984. Capacitive transducer for continuous measurement of vertical foot force. Med. Biol. Eng. Comp. 22, 309 – 316.

PHYTEC Meßtechnik GmbH. 1996. miniModul-535, Hardware-Manual. PHYTEC Meßtechnik GmbH, Mainz.

Schaevitz Engineering. 1987. LVDT and RVDT linear and angular displacement transducer. Technical Bulletin 1000A. Pennsauken, NJ.

Schmidt, R. F. 1977. Somatovisceral sensibility. In R.F. Schmidt (ed.), Fundamentals of sensory physiology. Springer-Verlag, New York.

Siemens. 1996. C515C 8-Bit CMOS Microcontroller, Users Manual 08.96. Siemens Semiconductor Group.

Siemens. 1997. C500 Microcontroller Family, Architecture and Instruction Set. Siemens Semiconductor Group.

Son, J. S., Cutkosky, M. R., Howe, R. D. 1995. Comparison of contact sensor localization abilities during manipulation. Robotics and Autonomous Systems 17, 217 – 233.

Webster, J. G. (Hrsg.). 1988. Tactile Sensors for Robotics and Medicine. Wiley-Interscience Publication.

Zimmermann, M. 1993. Das somatoviscerale sensorische System. In: Robert F. Schmidt, Gerhard Thews (Hrsg.). Physiologie des Menschen, 25. Auflage. Springer Verlag, 207 - 233.

Danksagung

Hiermit möchte ich allen Personen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Mein Dank gilt insbesondere:

- Prof. Dr. Christoph von der Malsburg für die Möglichkeit, diese Arbeit an seinem Institut anfertigen zu können. Die dort vorgefundene angenehme Arbeitsatmosphäre und die Gewährung jeglicher Unterstützung bei der Umsetzung eigener Ideen haben entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.
- Frau Uta Schwalm für ihre Hilfsbereitschaft, insbesondere bei der Lösung aller organisatorischen Probleme.
- Dr. Rolf Würtz, dessen Betreuung es mir ermöglicht hat, frei zu arbeiten, und der jederzeit ein hilfreicher Gesprächspartner war.
- Dipl.-Phys. Eric Maël für seine unermüdliche Bereitschaft, Fragen jeglicher Art zu beantworten.
- Ute, für ihren Beistand und ihre Geduld.
- Meinen Eltern, die mir mein Studium ermöglicht und mich während der gesamten Zeit unterstützt haben. Ihnen ist diese Arbeit gewidmet.