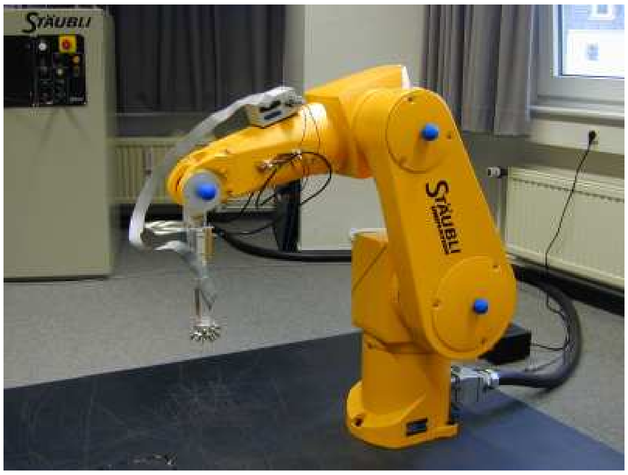
Diplomarbeit

Exploration von Objekten mittels eines haptischen Sensors



Lehrstuhl für Kognitive Systeme
Institut für Informatik und Praktische Mathematik
Christian–Albrechts–Universität zu Kiel
Prof. Dr. G. Sommer

vorgelegt von

Kord Ehmcke

Betreuer: Dr. Norbert Krüger,
Dipl.-Ing.(FH) Gerd Diesner

Juli 2002

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein haptischer Sensor entwickelt und zur Exploration von Objekten verwendet. Der haptische Sensor besteht aus mehreren *Haarsensoren*, die Berührungen und Vibrationen erfassen.

Im ersten Teil der Arbeit werden die Eigenschaften und der Aufbau der Haarsensoren untersucht. Dazu wird erläutert, wie die Signale in den Haarsensoren entstehen und es werden Versuche zur Kalibrierung, zum Einfluss der Haarlänge und zu Signaleigenschaften der Haarsensoren auf verschiedenen Oberflächen durchgeführt.

Der zweite Teil der Arbeit befasst sich mit der haptischen Exploration von Objekten. Zunächst werden verschiedene haptische Sensoren vorgestellt und mit den in dieser Arbeit verwendeten Haarsensoren verglichen. Danach wird beschrieben, wie die Form eines haptischen Sensors die Exploration beeinflusst. Für diese Arbeit wird zuerst ein Finger eines an der Ruhr-Universität in Bochum von Peer Schmidt [29] entwickelten Zwei-Backen-Greifers zur haptischen Exploration benutzt. Um diese Exploration zu unterstützen und zu vereinfachen, wird ein neuer haptischer Sensor entwickelt, der nicht mehr zum Greifen geeignet ist, sondern nur zum Tasten. Im Anschluss daran wird ein System von Regeln vorgestellt, das die halbautomatische haptische Exploration von Objekten mit dem neuen haptischen Sensor ermöglicht.

Den Abschluss der Arbeit bilden mehrere Experimente, die die Qualitäten des entstandenen Systems aus haptischem Sensor und Explorationsregeln zeigen.

Schlüsselwörter: Haptischer Sensor, Haptische Exploration, Haarsensoren

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung

Die menschliche Wahrnehmung basiert auf Sinnesorganen wie z.B. Auge, Ohr oder Nase. Heute ist man in der Lage, fast alle diese Sinnesorgane künstlich nachzuahmen. Die Camera Obscura (lat., *Dunkle Kammer*) [37] beispielsweise wurde schon im 17. Jahrhundert erfunden. Sie ist eine einfache Vorrichtung, bei der mit einer konvexen Linse Lichtstrahlen in einem sonst dunklen Raum auf eine Wand projiziert werden. Mechanische Tonaufzeichnungen wurden erstmals Ende des 19. Jahrhunderts von T.A. Edison durchgeführt [21]. Etwa 30 Jahre später wurden erstmals elektrisch aufgezeichnete Töne in Form von Schellackplatten verkauft [20].

Neville Hogan war 1985 einer der Ersten, der Grundlagen für haptische Manipulation und Sensorik erforschte [11]. Sensoren zur Geruchsmessung wurden erst in den letzten 10 Jahren entwickelt, Andreas Hierlemann beschreibt in [10] einen Sensor-Chip, der auf giftige Dämpfe reagiert. Im brasilianischen Forschungsinstitut EMBRAPA in Sao Carlo wurde 2001 ein Sensor entwickelt, der einzelne Weinsorten am Geschmack unterscheiden kann [24]. Geruchs- und Geschmackssensoren wurden erst durch die rasante Entwicklung der Computer-Technologie in den letzten 20 Jahren ermöglicht. Der Sehsinn wird allgemein als der wichtigste menschliche Sinn angesehen, und daher ist es verständlich, dass sich Wissenschaftler zuerst mit ihm beschäftigten. Filme und Musik-Aufzeichnungen waren zudem schon immer beliebte Unterhaltungsmedien, so dass sie schon aus diesem Grund schnell weiterentwickelt wurden.

Erst die Möglichkeit, mit dem Computer große Datenmengen in kürzester Zeit zu verarbeiten, führt dazu, dass heute optische (z.B. Bilder) oder akustische (z.B. Ultraschall) Signale automatisch ausgewertet werden können. Dabei wird immer deutlicher, dass einzelne Sinne anfällig für Fehler sein können, z.B. durch optische Täuschungen, und erst die Kombination verschiedener Sinne den menschlichen Wahrnehmungsapparat zu seiner vollen Leistungsfähigkeit bringt. Daher wird in den letzten Jahren, sicherlich begünstigt durch technischen Fortschritt, verstärkt an der Nachahmung anderer Sinne als dem Sehsinn gearbeitet, um die größere Interpretationssicherheit durch Kombination verschiedener Sensortypen von Lebewesen auf Maschinen zu übertragen [3, 32].

In dieser Arbeit wird ein mit Tastsensoren ausgestatteter haptischer[1] [22]

[1]haptisch, taktil: griech., *den Tastsinn betreffend*

Sensoren untersucht. Die Tastsensoren sind Haarbüschel von etwa 3 cm Länge, die auf eine flexible Membran aufgeklebt sind. Sie wurden von Peer Schmidt [29] konstruiert und werden im weiteren Verlauf der Arbeit als *Haarsensoren* bezeichnet. Ihre Eigenschaften werden in Kapitel 3 beschrieben. Darauf aufbauend wird ein haptischer Sensor, der aus mehreren Haarsensoren besteht, zur Exploration von Objekten benutzt.

Es gibt verschiedene Typen von taktilen Sensoren, wie z.B. Sensoren zur Messung des Berührungsdrucks oder Sensoren, die nur detektieren, ob Berührungen von Sensor und Objekten vorliegen. Diese Einzelsensoren lassen sich auf verschiedenste Weise kombinieren, auch aus diesem Grund gibt es unterschiedliche Ansätze zur Konstruktion haptischer Sensoren. Einige dieser Sensoren und ihre Anwendungen sind in Kapitel 4 beschrieben. Für diese Arbeit wurden Haarsensoren verwendet, weil sie nur sehr geringen Druck auf berührte Objekte ausüben. Dies ist insbesondere bei Objekten mit geringer Trägheit von Vorteil, weil ein Objekt durch die Abtastung nicht bewegt oder verändert wird.

1.1 Ziele

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist es, mit Hilfe eines haptischen Sensors, der auf einen Roboterarm montiert ist, Kontakt zu einem Objekt herzustellen und diesen aufrechtzuerhalten. Dabei sollen neue Gebiete, d.h. Objektteile und Objektflächen, erkundet und Informationen über diese gespeichert werden. Um dies zu erreichen, wird die verwendete Hardware, insbesondere die Haarsensorik, untersucht, auch um ihre Eignung für weitere Einsatzmöglichkeiten beurteilen zu können. Dazu wird u.a. untersucht, welche Eigenschaften von Oberflächen sich mit den Haarsensoren bestimmen lassen. Weiter werden aus den Sensordaten dreidimensionale Informationen über abgetastete Objekte gewonnen.

1.2 Überblick

In Kapitel 2 werden die mathematischen Grundlagen dieser Arbeit erklärt. Dabei werden der Hochpass, die Fouriertransformation und die spektrale Dichte betrachtet und ihre Anwendungen in dieser Arbeit beschrieben.

Kapitel 3 hat den Zweck, die verwendete Hardware und Signal-Eigenschaften der Haarsensoren zu beschreiben und zu erklären. Dabei werden die Stärken und Schwächen der verwendeten Haarsensoren näher betrachtet und ihre Möglichkeiten und Grenzen aufgezeigt.

In Kapitel 4 wird beschrieben, wie und warum für diese Arbeit aus den von Peer Schmidt [29] mit Haarsensoren bestückten Greiferfingern ein neuer haptischer Sensor entwickelt wird. Außerdem wird ein Überblick gegeben, welche anderen haptischen Sensoren es gibt und was ihre Eigenschaften sind.

In Kapitel 5 wird erläutert, wie die Signale der Haarsensoren benutzt werden, um Objekte zu erkunden. Dazu wird ein System von Regeln vorgestellt, das die haptische Exploration von Objekten automatisch steuert. Danach werden die Regeln an einigen einfachen Beispielen erläutert.

Kapitel 6 zeigt, was das in dieser Arbeit entstandene System aus Hardware und Software leistet, indem die automatische haptische Exploration von Objekten an Beispielen vorgeführt wird. Dabei werden sowohl 3-dimensionale Modelle der Sensordaten als auch Projektionen dieser Modelle in Realbilder der untersuchten Objekte gezeigt.

In Kapitel 7 werden die Ergebnisse dieser Arbeit im Hinblick auf Signalverarbeitung, Konstruktion eines neuen haptischen Sensors und haptische Exploration noch einmal kompakt zusammengefasst. Zum Schluss folgt noch eine Betrachtung der Möglichkeiten der Weiterentwicklung dieser Arbeit.

2 Mathematische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die mathematischen Grundlagen dieser Arbeit erläutert. Dafür werden Grundlagen der Signalverarbeitung beschrieben, die in den folgenden Kapiteln angewandt werden. Dazu zählen die Bildung des arithmetischen Mittels, die Filterung von Signalen mit einem Hochpass und die diskrete Fouriertransformation.

2.1 Das arithmetische Mittel

Das arithmetische Mittel ist für eine endliche Folge x von Werten $x_1, ..., x_L$ mit $x_i \in \mathbb{R}$ für $i \in \{1, ..., L\}$ der Länge $L > 0,\ L \in \mathbb{N}$ definiert als

$$m_x = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{L} x_i \quad .$$

Die zeitliche Mittelung von Signalen wird zur Glättung benutzt, indem z.B. bei sehr wechselhaften Signalen statt des aktuellsten Messwertes das arithmetische Mittel der letzten drei Messwerte betrachtet wird.

Eine weitere Anwendung des arithmetischen Mittels in dieser Arbeit ist die Mittelung über mehrere Messreihen zum selben Experiment. Dadurch erreicht man größere Sicherheit in der Interpretation. Hierbei wird pro Zeiteinheit der Durchschnitt gebildet und dann aus diesen Werten eine neue Messreihe gebildet.

2.2 Die mittlere quadratische Abweichung

Die mittlere quadratische Abweichung ist für eine endliche Folge x von Werten $x_1, ..., x_L$ mit $x_i \in \mathbb{R}$ für $i \in \{1, ..., L\}$ der Länge $L > 0,\ L \in \mathbb{N}$ mit dem arithmetischen Mittel m_x definiert als

$$v_x = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{L} (x_i - m_x)^2 \quad .$$

Die mittlere quadratische Abweichung wird in dieser Arbeit verwendet, um bei der Mittelung über mehrere Messreihen zum selben Versuch die Abweichung der Messreihen zu berechnen. Weitere Informationen zum arithmetischen Mittel und zur mittleren quadratischen Abweichung finden sich in [1, 4, 14, 31].

2.3 Der Hochpass

Für die Filterung analoger Signale wird in dieser Arbeit eine Hochpass-Schaltung verwendet. Diese Schaltung überträgt hohe Frequenzen eines Signals unverändert und schwächt tiefe Frequenzen ab. Abbildung 1 zeigt die Schaltung für einen Hochpass mit einem Kondensator mit der Kapazität C, einem Widerstand von R Ohm, einer Eingangsspannung U_e und Ausgangsspannung U_a.

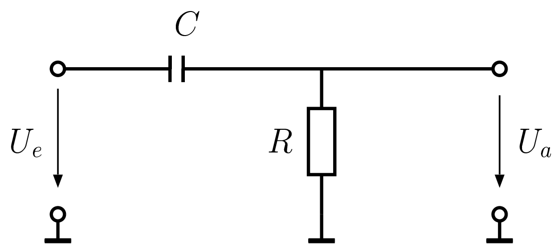


Abbildung 1: Einfache Hochpass-Schaltung

Die Grenzfrequenz u des Hochpasses ergibt sich aus

$$u = \frac{1}{2\pi RC} \quad .$$

Ein idealer Hochpass filtert exakt alle Frequenzen, die kleiner als seine Grenzfrequenz u sind, aus dem Eingangssignal heraus und lässt nur Frequenzen oberhalb von u passieren. Diese Frequenzen werden nicht verändert. Ein realer Hochpass arbeitet weniger exakt. Frequenzen des Eingangssignals unterhalb seiner Grenzfrequenz werden entsprechend der Kennlinie stark abgeschwächt, Frequenzen oberhalb der Grenzfrequenz werden kaum abgeschwächt. Frequenzen, die dicht an der Grenzfrequenz liegen, werden unabhängig davon, ob sie kleiner oder größer als die Grenzfrequenz sind, ähnlich stark abgeschwächt.

In dieser Arbeit wird ein Hochpass verwendet, um aus einem Signal den hochfrequenten Anteil herauszufiltern. Dieser wird benötigt, um schnelle Veränderungen des Eingangssignals, die sich besonders im hochfrequenten Anteil des Signals widerspiegeln, gesondert betrachten zu können. Weitere Informationen zum Hochpass finden sich in [35].

2.4 Fouriertransformation

Der Definitionsbereich in der Bild- oder Signalverarbeitung, also beispielsweise die Menge der Bildpunkte eines Bildes, wird oft als Ortsraum bezeichnet. Ein physikalischer Prozess kann im Signalraum, dem Raum der möglichen Signale über einem Ortsraum, als Folge von Werten betrachtet werden, als eine Funktion $f(t)$ über die Zeit t. Er kann aber auch im Frequenzraum betrachtet werden, wo er als Funktion $F(u)$ über die Frequenz u beschrieben ist. Beide Darstellungen sind verschiedene Repräsentationen desselben Prozesses. Wenn man ein Signal im Signalraum als Überlagerung verschiedener Frequenzen ansieht, so wird im Frequenzraum betrachtet, wie stark welche Frequenzen im Ausgangssignal vertreten sind. Dies wird durch die Amplitude der einzelnen Frequenzen im Frequenzraum beschrieben. Zwischen diesen beiden Repräsentationen wechselt man mit der *Fouriertransformation* (FT):

$$f(t) \quad \circ\!\!-\!\!\!-\!\!\bullet \quad F(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\, e^{-2\pi i u t}\, dt \quad .$$

Die Fouriertransformation mit dem Definitionsbereich D und dem Wertebereich W ist linear und bijektiv. Die Rücktransformation ergibt sich als:

$$F(u) \quad \bullet\!\!-\!\!\!-\!\!\circ \quad f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(u)\, e^{2\pi i u t}\, du \quad .$$

Zur Beschreibung der Wirkungsweise der FT werden die Fouriertransformierten einiger bekannter Funktionen in Abbildung 2 dargestellt.

2.5 Diskrete Fouriertransformation

Diskrete Signale entstehen aus der Abtastung kontinuierlicher Signale. Dies geschieht im für diese Arbeit verwendeten Mess-System durch einen Analog/-Digital-Wandler. Dadurch wird eine Signalfunktion mit kontinuierlichem Definitionsbereich auf eine Funktion mit diskretem Definitionsbereich abgebildet, um die Daten digital weiterverarbeiten zu können. Dabei wird der Definitionsbereich diskretisiert und der Wertebereich quantisiert.

Die *diskrete Fouriertransformation* (DFT) wandelt einen diskreten Signalvektor f mit Werten $f_0, ..., f_{M-1}$ in seine diskrete Fouriertransformierte F um. Abbildung 3 beschreibt die Wirkung der DFT.

Im eindimensionalen Fall ist die DFT für $u \in \{0, ..., M-1\}$ definiert als

$$F_u = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} f_m\, e^{\frac{-2\pi i m u}{M}}.$$

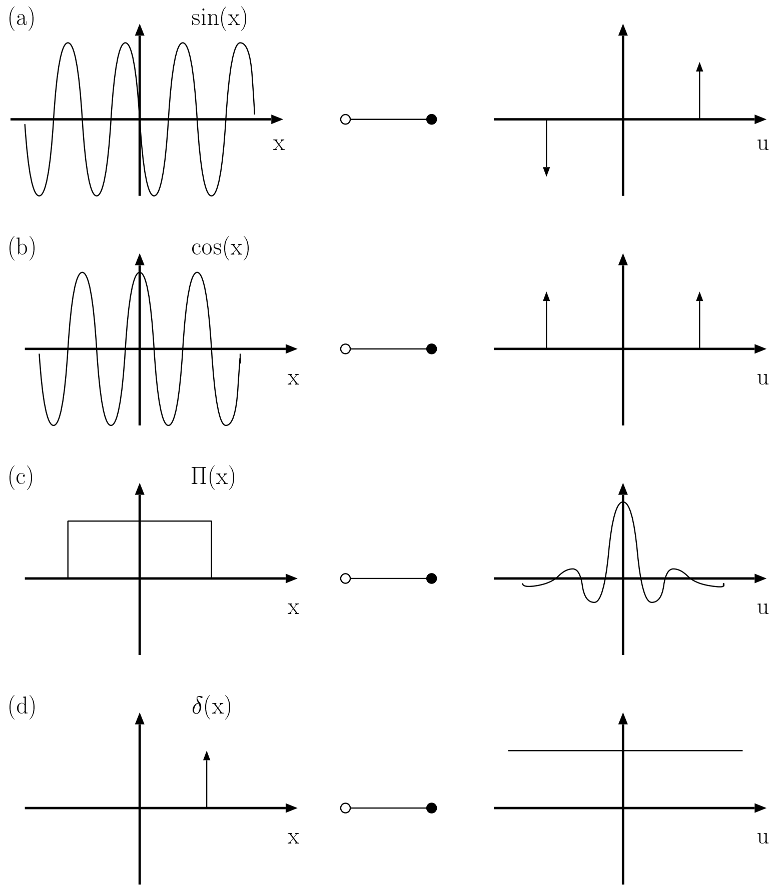


Abbildung 2: Wirkungsweise der Fouriertransformation am Beispiel der (a) Sinus-, (b) Cosinus-, (c) Rechteck- und (d) Deltafunktion

Die Rücktransformation ist für $m \in \{0, ..., M-1\}$ definiert als

$$f_m \quad = \quad \sum_{u=0}^{M-1} F_u \, e^{\frac{2\pi i m u}{M}}.$$

Dabei ist M die Länge des Signalvektors bzw. des transformierten Vektors. Das bedeutet, dass die DFT den Eingangsvektor auf ein System von Basisvektoren projiziert,

$$\left[\left(e^{\frac{-2\pi i}{M}} \right)^0 = 1, \left(e^{\frac{-2\pi i}{M}} \right)^1, \left(e^{\frac{-2\pi i}{M}} \right)^2, ... \right] \quad .$$

Man erhält eine Darstellung des Eingangsvektors als Linearkombination der Basisvektoren. Ein solches System wird auch *lineares System* genannt.

f_m ○——●	F_u
endlich	endlich
diskret	diskret
reell	komplex

Abbildung 3: Eigenschaften der diskreten Fouriertransformation

2.6 Powerspektrum

Die spektrale Dichte ist das Betragsquadrat der Spektralfunktion, der eindimensionalem Fouriertransformierten. Sie wird auch als Powerspektrum bezeichnet, weil das Amplitudenquadrat eines Signals in einem linearen System proportional zu dessen Energie ist. Die spektrale Dichte bietet den Vorteil, dass sie reell ist und sich damit einfacher und verständlicher darstellen lässt als komplexe Größen. Lokale Maxima im Powerspektrum weisen dabei auf im Originalsignal stark vertretene Frequenzen hin.

Das Powerspektrum wird hier mit einem *Periodogram* berechnet. Das Periodogram P ist der quadrierte Betrag des Ergebnisses einer diskreten Fouriertransformation bei einer Länge $M \in \mathbb{N}$ des Signalvektors x mit Werten $x_0, ..., x_{M-1} \in \mathbb{R}$,

$$P_k = \frac{1}{M} \left| \sum_{m=0}^{M-1} x_m \, e^{\frac{-2\pi i k m}{M}} \right|^2 \qquad \text{mit} \qquad k = 0, 1, ..., M-1,$$

(vergleiche Abschnitt 2.5). Für weitere Informationen zur Fouriertransformation und spektralen Dichte siehe auch [14, 23, 28].

3 Signalverarbeitung und Sensortechnik

Dieses Kapitel befasst sich mit der Entstehung, Qualität und Verarbeitung der Signale, die die Haarsensoren liefern. Die Signale werden auf Stabilität und Zuverlässigkeit untersucht, um beurteilen zu können, welche signaltechnischen Voraussetzungen für die haptische Erkundung vorliegen. In diesem Kapitel werden also Grundlagen für die in dieser Arbeit angestrebten Explorationsstrategien mit den vorliegenden Sensoren geschaffen. Für die Untersuchung der Signale eines Sensors ist es nötig, seine Form und technischen Eigenschaften zu kennen, weil man nur auf der Basis dieses Wissens Signale richtig interpretieren kann. Daher wird zuerst ein genauer Blick auf den technischen Aufbau des haptischen Sensors geworfen. Dieser Abschnitt soll außerdem dokumentieren, wie sich das Signal eines Haarsensors bei verschiedenen Kontaktsituationen verändert und welchen Einfluss die Haarlänge oder Oberflächenstruktur auf diese Veränderungen haben.

3.1 Aufbau des haptischen Sensors

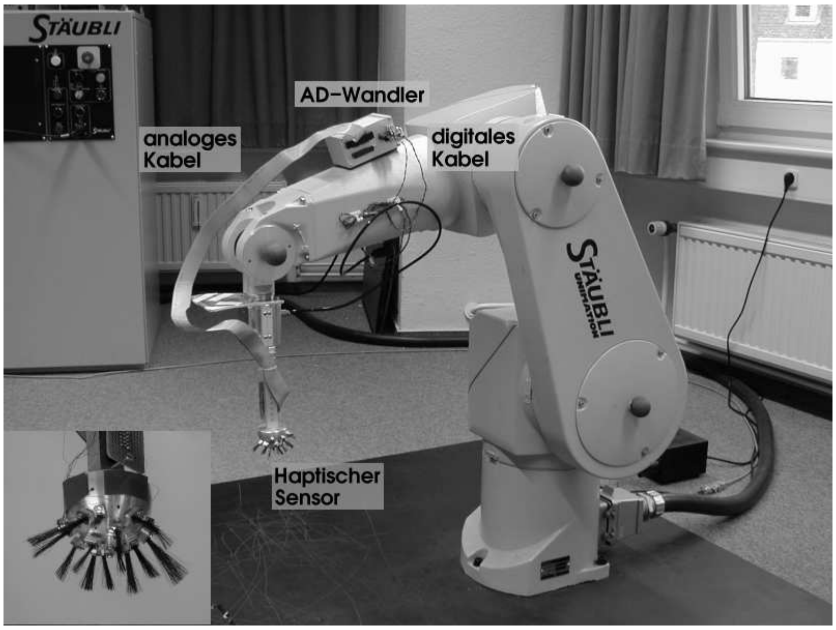


Abbildung 4: Roboterarm und haptischer Sensor

Der haptische Sensor ist auf einen RX90 Roboterarm der Firma Stäubli montiert und kann damit innerhalb des vom Roboter erreichbaren Raumes millimetergenau positioniert werden [26, 27] (siehe Abbildung 4). Mit den verwendeten Haarsensoren kann man aufgrund ihrer Größe und Elastizität nur zentimetergenau messen. Der vom Roboter erreichbare Raum hat eine Grundfläche von 2 Quadratmetern. An die Spitze des Roboterarms ist der haptische Sensor montiert, der einen Metallkern besitzt. Auf dem Metallkern des Sensors sind die Haarsensoren und eine Platine zur Zusammenfassung der Signalleitungen der Haarsensoren zu einem einzelnen Kabel untergebracht. Eine genaue Beschreibung des Metallkerns folgt in Kapitel 4. Das Kabel leitet die Signale zu einem C515C 8-Bit CMOS Mikrocontroller von Siemens [33] weiter, der die analogen Signale der Haarsensoren digitalisiert und per serieller Schnittstelle zur weiteren Verarbeitung bereitstellt. Der Mikrocontroller kann theoretisch in 12 ms alle Haarsensoren abfragen und die Signale weiterleiten. Damit ermöglicht er eine Messfrequenz von 83 Hz. Durch die geringe Übertragungskapazität der verwendeten seriellen Schnittstelle zwischen Mikrocontroller und Workstation von 9600 Baud liegt die tatsächliche Messfrequenz des Systems jedoch deutlich niedriger. Die Messfrequenz des Gesamtsystems mit Roboterarm ist ca. 4 Hz, d.h. etwa viermal pro Sekunde wird ein Satz von Signalen zur Workstation übertragen. Abbildung 5 zeigt den Aufbau des Messsystems.

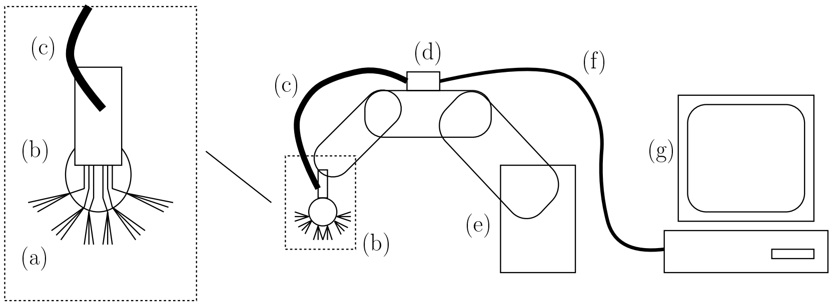


Abbildung 5: Aufbau des Messsystems:
(a) Haarsensor
(b) Haptischer Sensor
(c) Analoge Verbindung von Sensor und Mikrocontroller
(d) Mikrocontroller
(e) Roboterarm
(f) Digitale Verbindung von Mikrocontroller und Workstation
(g) Workstation

Die Haarsensoren (a) sind auf dem haptischen Sensor (b) befestigt. Sie sind über ein analoges Kabel (c), das am haptischen Sensor angeschlossen ist, mit dem Mikrocontroller (d) verbunden, der die Signale digitalisiert. Durch den Roboterarm (e), der die Messapparatur trägt, führt eine digitale Leitung (f), über die Signale per serieller Schnittstelle zur Workstation (g) übertragen werden.

3.1.1 Die technischen Details eines Haarsensors

Abbildung 6 zeigt einen einzelnen Haarsensor. Von außen sieht man von dem Haarsensor nur die Tastfasern, die aus einem Metallsockel herausragen.

Abbildung 6: Ein Haarsensor mit Tastfasern und Metallsockel

Der Metallsockel bildet das Gehäuse eines Haarsensors und schützt die Bauteile, die darin liegen, vor mechanischen Einflüssen. Abbildung 7 zeigt den schematischen Aufbau der Elektronik und Mechanik eines Haarsensors. Hauptbestandteil eines Haarsensors ist ein Kondensatormikrofon der Firma Teisco [9], das eine flexible und eine feste Membran enthält. Die Tastfasern sind Naturpinselhaare. Sie sind auf der flexiblen Membran aufgeklebt, die

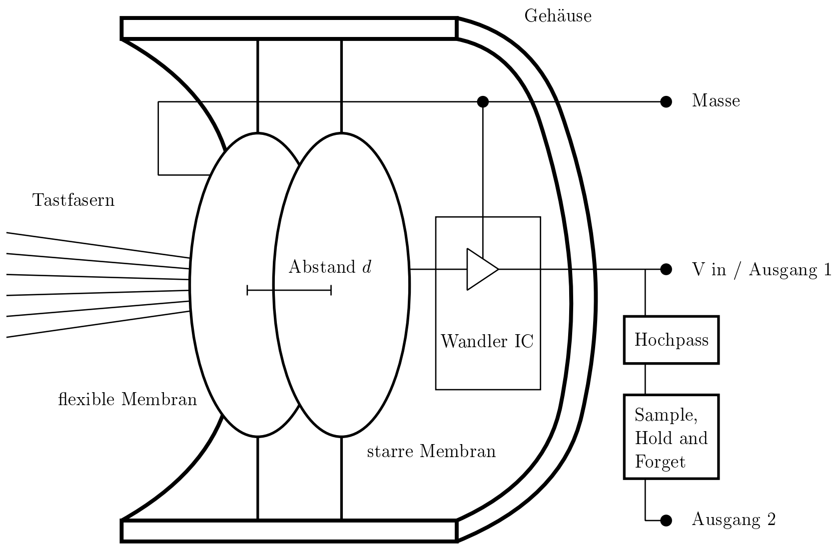


Abbildung 7: Schematischer Aufbau eines Haarsensors

einen Abstand von 0,04 mm zur starren Membran hat. Diese beiden Membranen werden wie zwei Kondensatorplatten aufgeladen. Bewegen sich die Haarbüschel, so ändert sich der Abstand der Membranen und damit die Potentialdifferenz zwischen ihnen. Diese ergibt das Ausgangssignal eines Haarsensors.

In diesem Abschnitt wurde dargestellt, dass mit diesem System eine Messfrequenz von 4 Hz möglich ist. Die Tastfasern eines Haarsensors sind auf einem Kondensatormikrofon befestigt, dessen Kapazität durch Bewegung der Tastfasern verändert wird.

3.2 Funktionalität der Haarsensoren

Die folgenden technischen Beschreibungen sind an die Diplomarbeit von Peer Schmidt [29] angelehnt. Zuerst wird der Sensor allgemein charakterisiert und anschliessend die Signalentstehung erläutert.

3.2.1 Das Originalsignal eines Haarsensors

Grundsätzlich ist der Sensor dynamisch angelegt, d.h. man muss ihn bewegen, um sinnvoll messen zu können. Wie schon erwähnt wurde, liefert ein Haarsensor Signale, indem durch Berührung der Tastfasern der Abstand zwischen zwei Membranen verändert wird. Diese Membranen bilden einen Kondensator, dessen Kapazität sich aus der Fläche $A = 12,6\,mm^2$ der Membranen, dem Abstand d der Membranen von 0,04 mm und der elektrischen Feldkonstante ϵ_0 berechnet:

$$C \;=\; \epsilon_0 \frac{A}{d} \;=\; \epsilon_0 \frac{12,6\,mm^2}{0,04\,mm} \;=\; 2,8\,pF. \qquad (1)$$

Ändert man den Abstand der Membranen, so verändert sich die Kapazität des Kondensators entsprechend der Formel 1 und damit die zwischen den Platten gemessene Spannung. Misst man diese Spannung am Membran-Kondensator, kann man daran ablesen, ob sich der Abstand der Membranen verändert hat. Die Spannung am Kondensator hängt also von seiner Ladung ab. Hinter den Kondensator ist ein Wandler geschaltet, der die Spannung durch Veränderung der Ladung des Kondensators ständig auf einen Ruhewert reguliert und als Verstärker wirkt. Die Verstärkung ist notwendig, da ansonsten aus der Verbindung des Kondensators mit der nachgeschalteten Elektronik Streukapazitäten in der Größenordnung der Kapazität des Kondensators selbst auftreten, die die Messung behindern. Der Wandler sorgt dafür, dass nach etwa 300 ms Adaptionszeit nach einer Bewegung der Membranen die Ruhespannung wiederhergestellt ist, indem er den Kondensator entsprechend auflädt oder entlädt. Diese Adaption ist der Grund für den dynamischen Charakter eines Haarsensors, da nach erfolgter Adaption die Ladung des Kondensators seiner Kapazität angepasst wurde und die Spannung wieder auf ihrem Ruhewert ist. Dann ist nicht mehr messbar, welchen Abstand die Membranen haben, bis der Sensor wieder bewegt wird. Das so entstandene Signal des Haarsensors soll als *Originalsignal* des Sensors bezeichnet werden. Es ermöglicht, sehr leichte Berührung eines Objektes zu registrieren, ohne dass auf dieses viel Druck ausgeübt wird. Für die hier vorgesehene Anwendung als einfacher Tastsensor bietet ein Haarsensor also sehr gute Voraussetzungen.

3.2.2 Das hochpassgefilterte Signal eines Haarsensors

Weiterhin wird das Signal aus dem Wandler mit einem Hochpass gefiltert und verstärkt. Der Hochpass besteht aus einem $1\,k\Omega$ Widerstand R und einem $10\,nF$ Kondensator C. Die Grenzfrequenz des Hochpasses ergibt sich aus

$$\frac{1}{2\pi RC} \quad \approx \quad 16\,kHz. \qquad (2)$$

Es werden also Frequenzen kleiner als 16 kHz entsprechend der Kennlinie des Hochpasses aus dem Signal herausgefiltert (siehe auch Abschnitt 2.3).

Folglich treten am Ausgang des Hochpasses vorrangig Signale auf, die aus schnell aufeinander folgenden Veränderungen des Abstandes der Membranen herrühren. Somit hat man ein Maß für Vibrationen der Härchen. Da die auftretenden Frequenzen höher als die Abtastrate des AD-Wandlers im Mikrocontroller sind, folgt auf den Hochpass eine *Sample, Hold and Forget*-Schaltung [29, 35]. Diese hat den Zweck, maximale Amplituden des hochpassgefilterten Signals zu halten (*Sample, Hold*) und danach exponentiell abfallen zu lassen (*and Forget*). Damit wird garantiert, dass der AD-Wandler alle Maxima im Signal aus dem Hochpass erfasst. Mit diesem zweiten Signal hat man die Möglichkeit, während einer Streichbewegung über eine Fläche festzustellen, ob noch Kontakt von Härchen zur Fläche vorliegt.

Es ist möglich, mit diesem Sensor zu registrieren, ob Kontakt zu einem Objekt hergestellt wurde, indem man den Sensor in einem vorgegebenen Suchbereich bewegt und bei Berührungen, die am Originalsignal abgelesen werden, stoppt. Eine derartige Suchbewegung, die in Richtung der Härchen durchgeführt wird, wird im weiteren Text *Stossbewegung* genannt.

Ebenso kann man während einer Bewegung anhand des hochpassgefilterten Signals der Haarsensoren feststellen, ob ein Objekt noch berührt wird. Diese Bewegung, die vorzugsweise senkrecht zur berührten Fläche stattfindet, wird im Folgenden *Streichbewegung* genannt.

Mit dem Roboterarm und dem haptischen Sensor mit den Haarsensoren steht also ein Werkzeug zur Verfügung, um Objektformen taktil zu erfassen, d.h. Informationen über Objektformen durch direkte Berührung zu gewinnen. Abbildung 8 zeigt die Unterschiede zwischen den zwei Signalen.

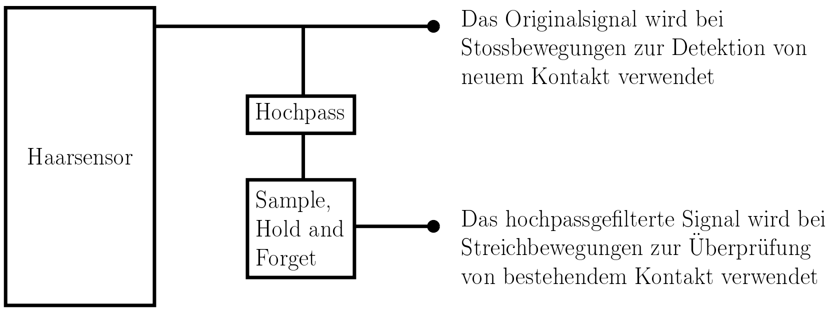


Abbildung 8: Die zwei Signale eines Haarsensors

Dieser Abschnitt zeigt, dass ein Haarsensor bewegt werden muss, um sinn-

voll messen zu können, weil seine Elektronik ihn mit einer Adaptionszeit von etwa 300 ms ständig auf eine Ruhespannung regelt. Dies ist für alle weiteren Versuche mit den Haarsensoren grundlegend. Weiter wird beschrieben, wie ein Haarsensor zwei verschiedene Signale liefert, ein Signal zur Erfassung von Berührungen, das Originalsignal, und ein hochpassgefiltertes Signal zur Erfassung von Vibrationen, die etwa durch Bewegungen der Härchen an Objekten entlang entstehen.

3.3 Eigenschaften der Haarsensoren

Da die verwendeten Sensoren auf zwei verschiedene Kontaktarten ansprechen, Stossen und Streichen, können Versuche zu den Eigenschaften der Sensoren in zwei Kategorien eingeteilt werden. Zum einen Versuche, bei denen Haarsensoren auf ein Objekt zu bewegt werden und der Kontaktzeitpunkt und Kontaktort festgestellt werden. Zum anderen Versuche, bei denen Haarsensoren an einem Objekt entlang bewegt werden, um genauere Aufschlüsse über Struktur oder Form zu erhalten. Zunächst werden Stossbewegungen betrachtet und danach Streichbewegungen.

3.3.1 Versuchsabläufe

Die Haarsensoren müssen zum Messen bewegt werden und der Roboterarm muss jederzeit angehalten werden können, um Kollisionen des haptischen Sensors mit untersuchten Objekten zu vermeiden. Dieser dynamische Charakter der verwendeten Haarsensoren und die fehlende Möglichkeit, den Roboterarm während einer Bewegung anzuhalten, geben den Ablauf für Versuche vor. Für einen einzelnen *Messschritt* wird der haptische Sensor mit Hilfe des Roboterarms eine kurze Strecke von 1-2 mm bewegt und danach die Signale der Haarsensoren gemessen. Soll nun der haptische Sensor in eine bestimmte Richtung über ein bestimmte Strecke tasten, werden so viele Messschritte in diese Richtung durchgeführt, bis der Sensor die Strecke zurückgelegt hat. Dabei ist die Geschwindigkeit der Messung und Verarbeitung der Signale so hoch, dass die Einzelbewegungen für die einzelnen Messschritte zusammen als eine Bewegung erscheinen. Der Messschritt bildet die Grundlage für alle Versuche, die im weiteren Text beschrieben werden. Daher ist die Einheit der x-Achsen in den meisten folgenden Diagrammen die Anzahl der Messschritte (siehe z.B Abbildung 10). Diese Betrachtungsweise der Messdaten spiegelt den Umstand wider, dass die Messungen mehr von den Bewegungen und der Geschwindigkeit des Roboters abhängen als von der verstrichenen Zeit.

Abbildung 9 (a) zeigt den Versuchsablauf für einen typischen Stossversuch. Der Haarsensor wird gegen eine Fläche bewegt, bis er Kontakt hat und

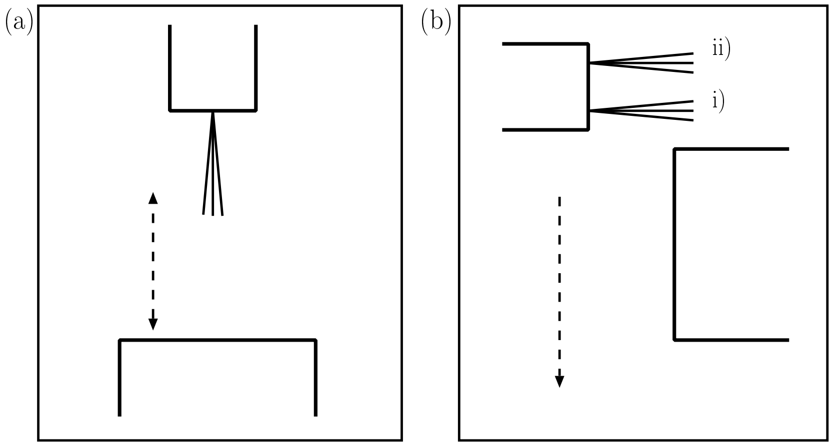


Abbildung 9: Versuchsabläufe zum Testen der Detektion von:
(a) Stossbewegungen
(b) Streichbewegungen

dann wieder entfernt. Abbildung 9 (b) demonstriert den Ablauf für einen Test der Reaktion zweier Haarsensoren, die über eine Fläche gestrichen werden. Zwei Haarsensoren werden mit gleichbleibender Geschwindigkeit parallel zur abgetasteten Fläche bewegt.

3.3.2 Stossbewegungen

Abbildung 10 zeigt typische Signalverläufe an einem Haarsensor bei einer Annäherung an eine ebene Fläche. Die Bewegung des Haarsensors erfolgte in Richtung der Haare auf eine senkrecht zur Bewegungsrichtung liegende Fläche zu (siehe Abbildung 9 (a)). Die gestrichelte Linie in Diagramm (a) zeigt den Abstand von Sensorspitze und Fläche mit entsprechender y-Achse rechts, der bei Annäherung sinkt und bei Enfernung des Haarsensors wieder den Startwert erreicht. Die Sensorspitze ist dabei die Spitze der Härchen eines Haarsensors. Die Diagramme (a) bis (d) zeigen das Verhalten 4 verschiedener Haarsensoren. Diagramm (e) unten links zeigt das arithmetische Mittel der 4 dargestellten Signale und einer weiteren Messung und Diagramm (f) die mittlere quadratische Abweichung. Die Haarsensoren wurden in 30 Messschritten jeweils 1 mm auf die Fläche zu bewegt und hatten nach ca. 28 mm direkten Kontakt, wie man an den erhöhten Signalen bei etwa 30 Messschritten ablesen kann. Danach wurden die Sensoren in 30 Messschritten wieder von der Fläche entfernt. Alle Sensoren zeigen einen deutlichen Ausschlag, wobei zwei Sensoren zwei Ausschläge haben. Bei direktem Kontakt wird auf die

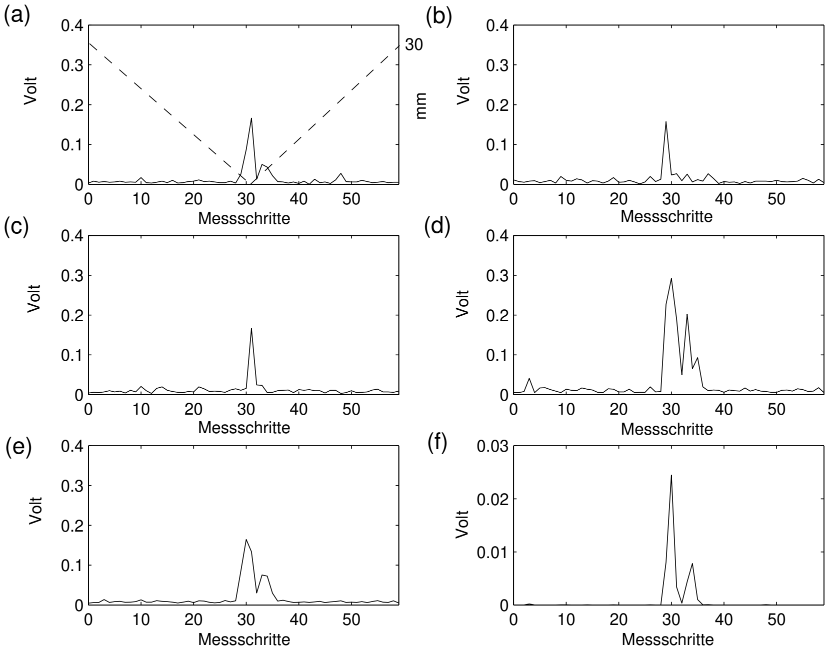


Abbildung 10: (a) - (d) Beispiele für die Signale von Haarsensoren bei einer Stossbewegung
(e) Arithmetisches Mittel über die Versuche
(f): Mittlere quadratische Abweichung der Versuche

Härchen Druck ausgeübt, unter dem sie sich leicht verbiegen. Die Härchen sind elastisch genug, um ihre alte Form wiederherzustellen und zu entspannen, sobald der Haarsensor von der Fläche entfernt wird. Diese Entspannung verursacht die zweiten Maxima bei einigen Sensoren. Die Entspannung ist davon abhängig, wie stark die Härchen gebogen sind und wie lang diese sind, weil die Elastizität der Härchen mit ihrer Länge abnimmt. Daher tritt wegen der unterschiedlichen Länge der Haare nicht bei jedem Haarsensor ein deutlicher zweiter Ausschlag auf.

3.3.3 Streichbewegungen

Abbildung 11 zeigt die hochpassgefilterten Signale an zwei Haarsensoren bei einem Streichversuch, wie er in Abbildung 9 (b) dargestellt ist. Dabei gehört Signal (a) zum Sensor i) und Signal (b) zu Sensor ii) aus Abbildung 9 (b). Die Sensoren wurden in Einzelbewegungen von jeweils 1 mm bewegt, zwischendurch wurden die Signale gemessen. Man kann ablesen, dass der obere Sensor früher Kontakt anzeigt als der untere, aber auch früher wieder auf dem Ruhepegel ist, was dem Versuchsablauf entspricht. Betrachtet man die Signale genauer, kann man erkennen, dass eine Streichbewegung bei beiden Sensoren große Sprünge im Signal erzeugt und dass der Signallevel während der Berührung deutlich erhöht ist. Dieser Level kann bei verschiedenen Sensoren dieses Typs unterschiedlich hoch liegen. Insgesamt ist das Signal sehr un-

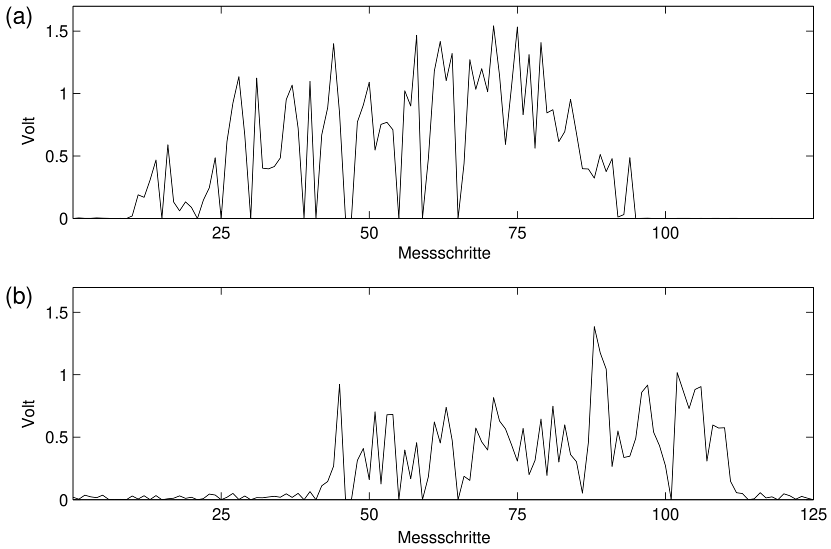


Abbildung 11: Signalverlauf zum Streichversuch.
(a) Signal von Sensor i) aus Abbildung 9(b),
(b) Signal von Sensor ii)

ruhig, was eine Glättung nahelegt (siehe Abschnitt 3.5 über Kalibrierung). Die Signale sind beide jeweils über etwa 80 Messschritte hinweg deutlich erhöht. Das entspricht einer Strecke von 80 mm, die die Sensoren dabei bewegt wurden. Das berührte Objekt hat aber eine Breite von nur 65 mm. Der Unterschied entsteht dadurch, dass die Haare auf den Sensoren nicht unbedingt eng zusammenliegen, wie Abbildung 6 zeigt. Außerdem werden die Härchen bei Objektkontakt leicht zurückgebogen, so dass sie noch Kontakt haben, wenn ihr Metallsockel schon über das Objekt hinausbewegt wurde. Dies muss beachtet werden, wenn man aus Sensordaten Rückschlüsse auf Objektformen und -ausdehnungen zieht.

In diesem Abschnitt wird beschrieben, dass Versuche mit den Haarsensoren aus einzelnen Messschritten aufgebaut sind. Ein Messschritt besteht aus einer kleinen Bewegung, meist 1 mm, der kleinsten Schrittweite des Roboterarms, und einer Erfassung der Messwerte an den Haarsensoren. Weiter *werden die zwei Grundtypen von Messbewegungen eingeführt, die mit den Haarsensoren möglich sind. Es gibt Stossbewegungen, bei denen die Originalsignale der Haarsensoren benutzt werden, um Kontakt der Härchen zu einem Objekt herzustellen. Und es gibt Streichbewegungen, bei denen die hochpassgefilterten Signale der Haarsensoren verwendet werden, um vorhandenen Kontakt der Härchen zu einem Objekt zu erhalten.*

3.4 Der Einfluss der Haarbüschelform auf das Signal

Bei den bisherigen Versuchen mit den Haarsensoren wurde deutlich, dass unterschiedliche Sensoren auch unterschiedlich stark auf Berührungen reagieren können(siehe Abbildung 10 oder 9). Diese Schwankungen der Qualität zwischen den einzelnen Sensoren lassen sich auf die manuelle Fertigung der Haarsensoren zurückführen. Wegen der geringen Abmessungen der Bauteile sind immer gleich gute Sensoren unmöglich. Aus demselben Grund ist auch die Form der Haarbüschel unterschiedlich. Manche Haarbüschel sind in einem Strang angeordnet, während andere eher einem Fächer ähneln. Daher erscheint es zweckmäßig, festzustellen, wie die Form der Haarsensoren das Signal beeinflusst. Dazu wurden Stoss- und Streichversuche mit drei verschiedenen Haarformen gemacht. Zuerst mit normalen Haarbüscheln, die eine Länge von 30-40 mm haben, dann mit durch Alufolie gebündelten Haarbüscheln und zuletzt mit auf die Hälfte der ursprünglichen Länge gekürzten Haarbüscheln (siehe Abbildung 12). Die Bündelung der Härchen ist eine Alternative zur Kürzung, die betrachtet wird, weil eine Kürzung nicht rückgängig gemacht werden kann.

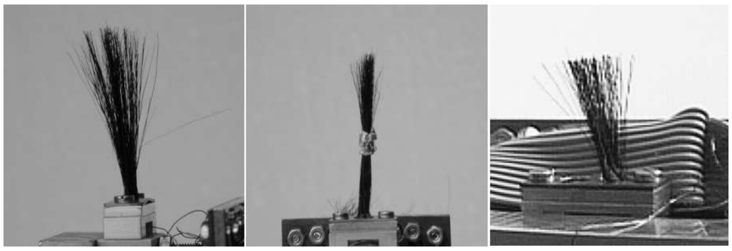


Abbildung 12: Drei Formen von Haarsensoren: normal, gebündelt und gekürzt

3.4.1 Auswirkungen auf das Originalsignal

Bei den Stossversuchen wurden die Haarsensoren in 30 Messschritten, bei denen der Sensor jeweils um 1 mm bewegt wurde, auf eine senkrecht zur

Bewegungsrichtung stehende Fläche zubewegt und dann wieder auf dieselbe Weise entfernt. Bei Versuchsbeginn hatten Fläche und Sensorspitze einen Abstand von etwa 30 mm. Abbildung 13 zeigt die Messergebnisse zu den Stossversuchen. Die linke Spalte enthält die arithmetischen Mittel über je-

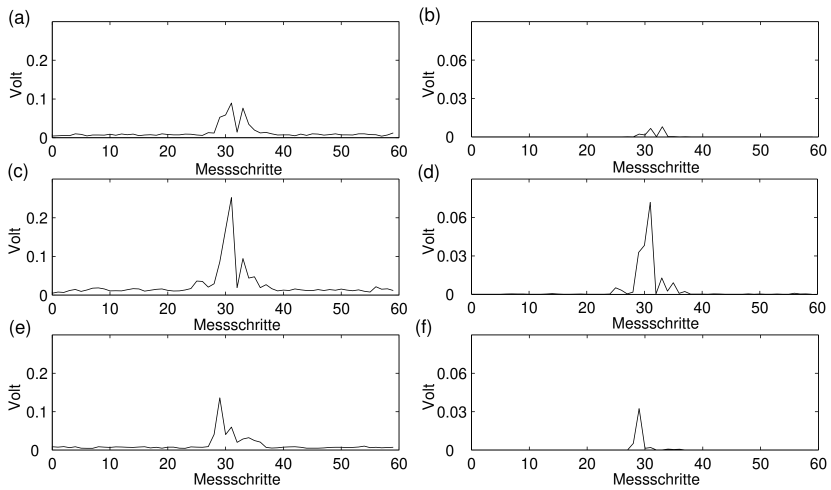


Abbildung 13: Vergleich von normalen (a),(b), gebündelten (c),(d) und gekürzten Härchen (e),(f) bei einem Stossversuch, links arithmetische Mittel, rechts mittlere quadratische Abweichungen

weils 10 Versuche aus den drei Versuchsgruppen, die rechte Spalte die zugehörigen mittleren quadratischen Abweichungen. An den drei arithmetischen Mitteln kann man ablesen, dass die Sensoren in jedem Fall deutlich erkennbar Berührungen erfassen. Das arithmetische Mittel aus den Signalen der normalen Sensoren in Diagramm (a) hat das niedrigste Maximum. Dies lässt sich auf die Schwankungen der Haarbüschelformen zurückführen, die den Zeitpunkt bzw. den Messschritt des maximalen Ausschlages variieren lassen und im Mittel geringere Messwerte bewirken, wie auch die mittlere quadratische Abweichung belegt. Die gebündelten Sensoren hatten alle annähernd dieselbe Form und im Mittel die größte Amplitude (Abbildung 13 (c)). Dies lässt sich damit erklären, dass der Kontaktzeitpunkt eindeutiger wird, weil alle Härchen etwa gleichzeitig auf das Objekt treffen. Die Messwerte an den gebündelten Sensoren sind am größten und weisen wegen der höheren Amplituden auch die größte mittlere quadratische Abweichung auf. Die gekürzten Sensoren liegen bezüglich des Maximums des arithmetischen Mittels und der mittleren quadratischen Abweichung zwischen den Werten für die normalen und die gebündelten Haarsensoren. Dies liegt an der geringeren Länge dieser Sensoren. Die Kürzung bewirkt, dass die Härchen an der Sensorspitze im Mittel enger zusammen liegen als bei den normalen Sensoren, weil die Spitzen dichter am Befestigungspunkt der Härchen liegen und daher nicht so weit aufgefächert sind. Die Kürzung der Härchen hat also einen ähnlichen Effekt wie die Beringung, nämlich die Verstärkung des Signals, aber in etwas schwächerer Form, da die Härchen an der Sensorspitze nicht so dicht zusammen liegen, wie bei den gebündelten Sensoren.

3.4.2 Auswirkungen auf das hochpassgefilterte Signal

Bei den Streichversuchen wurden die Haarsensoren in 120 Messschritten an einer ebenen Fläche entlangbewegt, die parallel zur Bewegungsrichtung lag. Die Fläche hatte eine Breite von etwa 80 mm und der Sensor lag nach 20 Messschritten direkt neben der Fläche. Die Härchen wurden bei Berührung der Fläche um etwa 2 bis 3 mm zusammengedrückt. Der Versuchsaufbau entspricht dem aus Abbildung 9 (b). Wie bei den Stossversuchen zur Bewertung des Einflusses der Haarlänge auf das Sensorsignal ist auch bei den Streichversuchen festzustellen, dass die normalen, gebündelten und gekürzten Sensoren bei Objektkontakt im Mittel alle deutlich vom Grundrauschen unterscheidbare Signale liefern. Die Abbildungen 14, 15 und 16 zeigen jeweils das

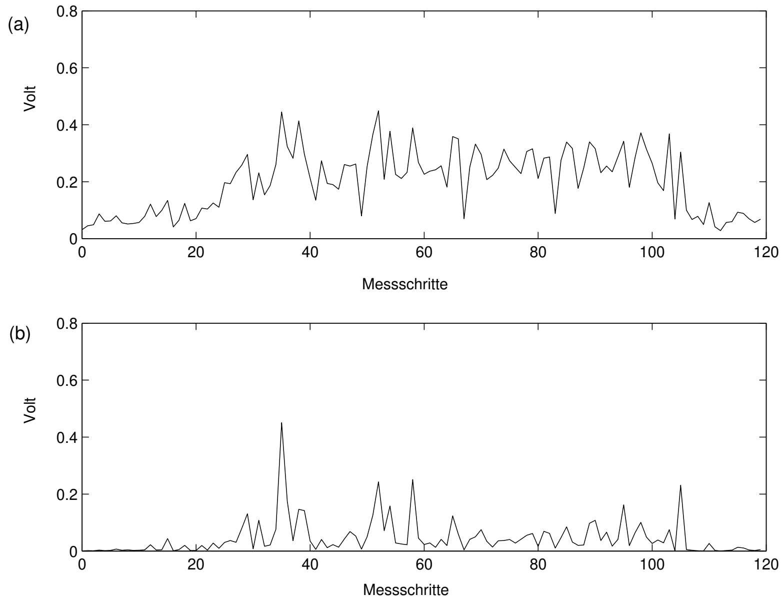


Abbildung 14: Signale von Haarsensoren mit normalen Härchen bei einem Streichversuch: (a) Arithmetisches Mittel, (b) Mittlere quadratische Abweichung

arithmetische Mittel über 12 Versuche und die mittlere quadratische Abweichung der Messungen bezüglich dieser arithmetischen Mittel. Abbildung 14 zeigt die Messergebnisse mit normalen Härchen. Der Signallevel des arithmetischen Mittels liegt deutlich unter dem der beiden anderen Versuchsreihen, die in den Abbildungen 15 und 16 dargestellt sind, mit anderer Härchenlänge und das Signal fällt mehrfach fast bis zum Grundrauschen von etwa 0.07 Volt ab, obwohl Kontakt vorliegt. Die mittlere quadratische Abweichung liegt aufgrund des niedrigeren Signallevels ebenfalls tiefer. In Abbildung 15 sind die Ergebnisse mit gebündelten Haarsensoren dargestellt.

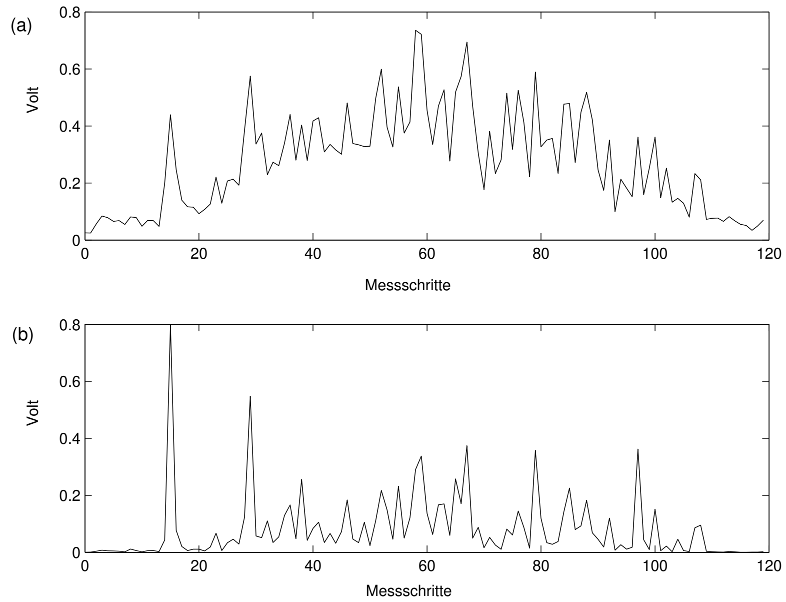


Abbildung 15: Signale von Haarsensoren mit gebündelten Härchen bei einem Streichversuch: (a) Arithmetisches Mittel, (b) Mittlere quadratische Abweichung

Das arithmetische Mittel über die gemessenen Werte liegt deutlich höher als bei den normalen Härchen und auch deutlich über dem Grundrauschen. Aus diesem Signal lassen sich Grundrauschen und Objektkontakt besser ablesen als aus dem Signal von den Versuchen mit den normalen Härchen. Die mittlere quadratische Abweichung ist auch aufgrund von sehr großen Messwerten bei einem Messvorgang beim ersten Objektkontakt sehr hoch. Da derartige Schwankungen mehrfach aufgetreten sind, ist eine Glättung des Signals angebracht.

Mit gekürzten Härchen liefern die Sensoren bei den Streichversuchen das beste Ergebnis, wie Abbildung 16 zeigt. Die Amplitude ist im Mittel noch deutlich höher als bei den Versuchen mit gebündelten Haarbüscheln, die mittlere quadratische Abweichung ist ähnlich groß. Eine Glättung verbessert auch hier die Ergebnisse und macht sie robuster.

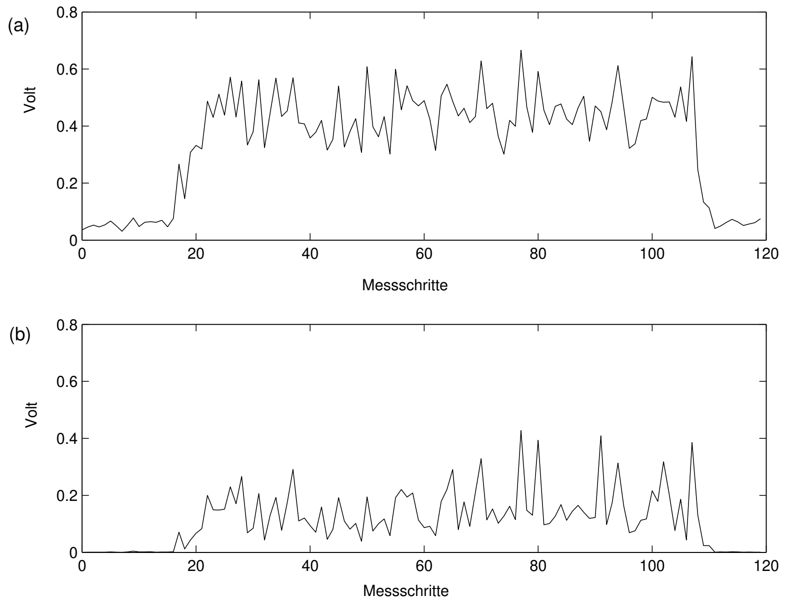


Abbildung 16: Signale von kurzen Haarsensoren bei einem Streichversuch (a) Arithmetisches Mittel, (b) Mittlere quadratische Abweichung

Die Versuche in diesem Abschnitt zeigen, dass gebündelte oder gekürzte Härchen größere Amplituden der Signale bei Berührungen der Haarsensoren bewirken, sowohl bei Stoss, als auch bei Streichbewegungen. Bei Streichbewegungen wird das Signal gleichmäßiger, was die Überprüfung des Kontaktes erleichtert. Die gekürzten Härchen liefern insgesamt das beste Ergebnis, daher werden für weitere Versuche alle Härchen auf etwa 15-20 mm gekürzt. Noch kürzere Härchen lassen den Sicherheitsabstand von Sensor und Objekt zu gering werden. Für die hochpassgefilterten Signale erscheint eine Glättung angebracht.

3.5 Kalibrierung

Die bisherigen Messungen mit den Haarsensoren machen deutlich, dass alle Haarsensoren unterschiedlich reagieren und verschiedenes Grundrauschen haben (siehe Abbildungen 10,11). Es gibt also keinen einheitlichen Haarsensor.

Der Gleichspannungsanteil (siehe [12, 7, 19]) der Signale wurde in den bisherigen Versuchen vom Mikrocontroller herausgefiltert, was nicht allzu flexibel ist, da der Controller für jede Änderung neu programmiert werden muss. Außerdem ist das hochpassgefilterte Signal stark schwankend. Daher soll die bisherige Kalibrierung genauer untersucht und Verbesserungen beschrieben werden.

3.5.1 Herausfiltern des Gleichspannungsanteils

Das Originalsignal eines Haarsensors hat einen vom eingebauten Wandler bestimmten Gleichspannungsanteil von etwa 2-3 Volt, die hochpassgefilterten Signale besitzen einen Gleichspannungsanteil von etwa 0.2-0.9 Volt (siehe Abbildung 17). Diese Spannungen sollen zusammen mit ihren Schwankungen möglichst genau aus den Signalen herausgefiltert werden, um im Ruhezustand kalibrierte Messwerte von 0 Volt zu erhalten. Das Grundrauschen soll also minimiert werden.

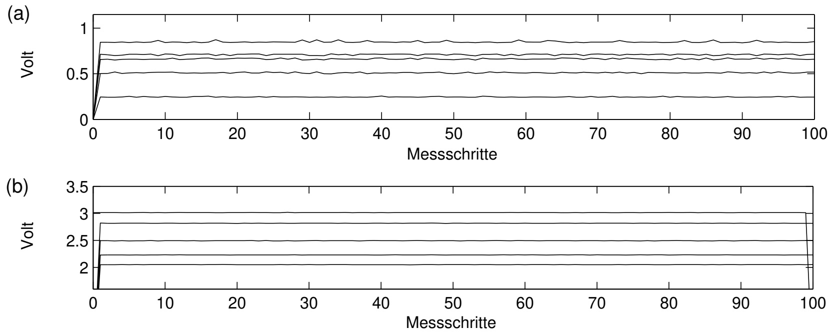


Abbildung 17: Typische Gleichspannungsanteile der Signale:
(a) 5 hochpassgefilterte Signale
(b) 5 Originalsignale

Der Mikrocontroller ist in der Lage, alle 12 ms einen Datensatz zu erstellen, der aus je zwei Messwerten von allen Haarsensoren besteht (Originalsignal und hochpassgefiltertes Signal). Durch die geringe Übertragungsgeschwindigkeit der seriellen Schnittstelle werden aber ca. 250 ms gebraucht, um einen Datensatz an die Workstation zu übertragen. Um die Zeit während des Übertragungsvorgangs zu nutzen, werden vom Mikrocontroller immer 10 Datensätze aufsummiert und dann die Absolutwerte weiterverarbeitet. Die Weiterverarbeitung wird im nächsten Abschnitt beschrieben. Die Anzahl von 10 summierten Datensätzen stellt einen guten Kompromiss zwischen der

Ausnutzung der 250 ms Wartezeit und der schnellen Verfügbarkeit neuer aufsummierter Datensätze dar.

Kalibrierung auf dem Mikrocontroller

Für die Kalibrierung auf dem Mikrocontroller (*Hardwarekalibrierung*) wird beim Start eines Messvorgangs im Ruhezustand (d.h. der haptische Sensor wird dabei nicht bewegt) 1 Datensatz gespeichert. Diese Messwerte werden als Kalibrierungswerte verwendet. Danach beginnt der Mikrocontroller, von jedem Datensatz die Kalibrierungswerte abzuziehen und die Absolutwerte der Differenzen zu bilden. Von diesen kalibrierten Datensätzen werden immer 5 aufsummiert und dann für die Übertragung an die Workstation durch die serielle Schnittstelle bereitgestellt, bis die nächsten Werte berechnet sind. Abbildung 18 zeigt den Ablauf der Hardwarekalibrierung. Die serielle Schnittstelle kann dabei nur etwa jeden dritten kalibrierten Datensatz übertragen. Auf der Workstation werden die Datensätze durch 5 dividiert und zur Robotersteuerung weiterverwendet. Die Division findet auf der Workstation statt, um den Mikrocontroller nicht unnötig zu belasten.

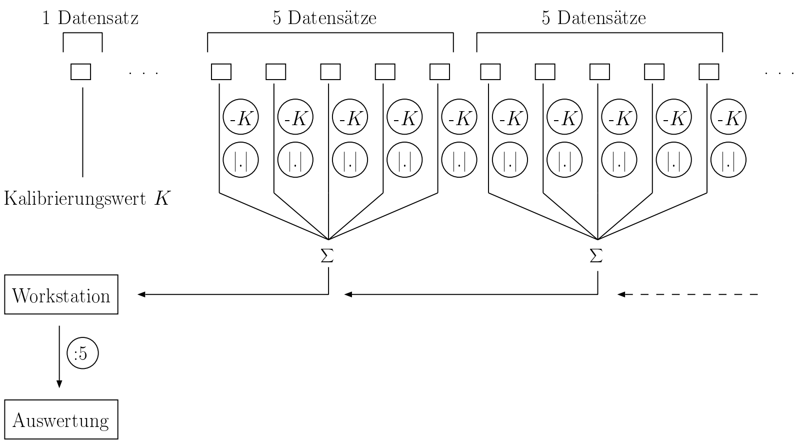


Abbildung 18: Hardwarekalibrierung für ein einzelnes Signal

Als Ergebnis der Hardwarekalibrierung haben die gefilterten Originalsignale ein Grundrauschen von ca. 0.01 Volt, die hochpassgefilterten Signale liegen bei bis zu 0.15 Volt, wie Abbildung 19 zeigt. Das Grundrauschen der Originalsignale liegt im Bereich der durch den AD-Wandler im Mikrocontroller bestimmten Messgenauigkeit und ist somit kaum verbesserbar. Das Grundrauschen der hochpassgefilterten Signale liegt um den Faktor 15 höher. Die

Ausnutzung dieses Verbesserungspotentials wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

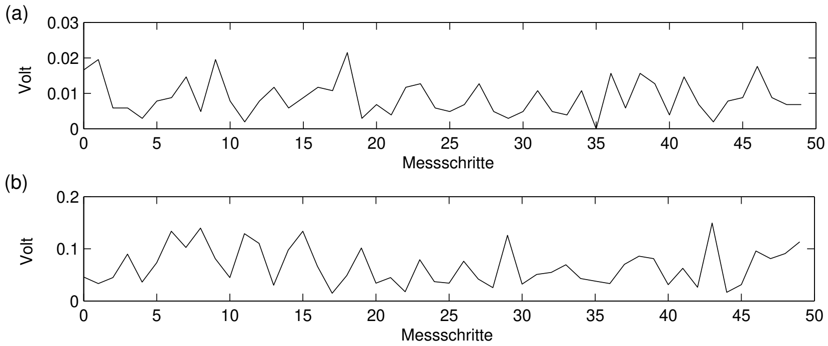


Abbildung 19: Typische hardwarekalibrierte Signale:
(a) Originalsignal
(b) hochpassgefiltertes Signal

Kalibrierung auf der Workstation

Wie im letzten Abschnitt beschrieben wurde, filtert die Kalibrierung auf dem Mikrocontroller den Gleichspannungsanteil der hochpassgefilterten Signale nicht optimal heraus. Daher werden Versuche mit einer Kalibrierung auf der Workstation (*Softwarekalibrierung*) durchgeführt. Für die Softwarekalibrierung werden wie bei der Hardwarekalibrierung vom Mikrocontroller in einer Endlosschleife immer 5 Werte pro Signal aufsummiert. Für diese Summen werden keine Kalibrierungswerte im Mikrocontroller berechnet wie bei der Hardwarekalibrierung, sondern sie werden direkt über die serielle Schnittstelle an die Workstation geschickt und dort durch 5 dividiert. Auf der Workstation werden im Ruhezustand aus 25 Sätzen der Summen die arithmetischen Mittel gebildet. Damit hat man dann für jedes Signal einen Kalibrierungswert, für den man die Betragsdifferenz zu den Absolutwerten der übertragenen Werte dieses Signals bilden kann. Die Ergebnisse dieser Differenz werden dann zur Steuerung des Roboterarms mit dem haptischen Sensor weiterverwendet. Abbildung 20 zeigt den Ablauf der Softwarekalibrierung. Die Anzahl von 25 für die Kalibrierung aufsummierten Datensätzen stellt einen Kompromiss zwischen größerer Geschwindigkeit und Exaktheit der Kalibrierung dar. Abbildung 21 macht die Verringerung insbesondere des Grundrauschens der hochpassgefilterten Signale deutlich. Für Originalsignale macht es kaum Unterschied, ob man Software- oder Hardwarekalibrierung

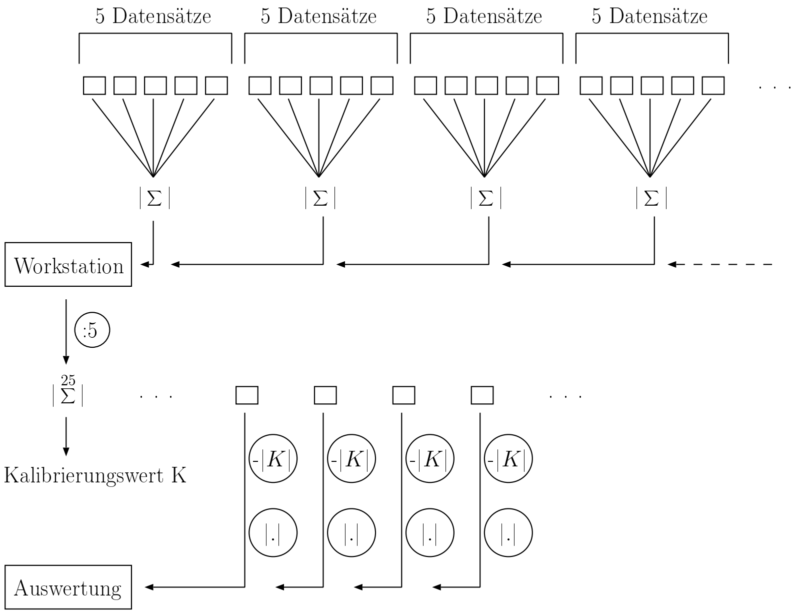


Abbildung 20: Softwarekalibrierung für ein einzelnes Signal

verwendet, lokale Maxima der Amplitude können aber bei der Softwarekalibrierung leichter vom Grundrauschen unterschieden werden.

3.5.2 Glättung des Signals

In Abschnitt 3.3.3 wurde deutlich, dass das hochpassgefilterte Signal der Haarsensoren sehr unruhig ist. Da dieses Signal verwendet wird, um während kontinuierlicher Bewegungen festzustellen, ob noch Objektkontakt vorliegt, ist ein gleichmäßigeres Signal nötig. Daher wird das Signal geglättet. Dabei muss ein Kompromiss zwischen Glattheit und Exaktheit gefunden werden, um verlässliche und genaue Aussagen über Kontakaufnahme und -verlust machen zu können. Eine einfache Mittelung hat sich als sinnvoll und ausreichend erwiesen. Abbildung 22 (a) zeigt ein typisches hochpassgefiltertes Signal eines Haarsensors, der über eine Fläche gestrichen wird. Von Messschritt 10 bis 90 liegt Kontakt von Haarsensor und Fläche vor. Dabei fällt auf, dass das Signal mehrere lokale Minima von 0 Volt aufweist, was Kontaktverlust signalisiert, obwohl Kontakt vorliegt. Außerdem schwankt das Signal stark und weist zwischen dem 15. und 25. Messschritt eine große Lücke auf. Diese Eigenschaften erschweren die Interpretation des Signals, daher wird eine Einermaske der Länge N angewandt, um das Signal zu glätten. Nähere Informationen zu Filtermasken finden sich in [35]. Der Aufpunkt der Maske liegt

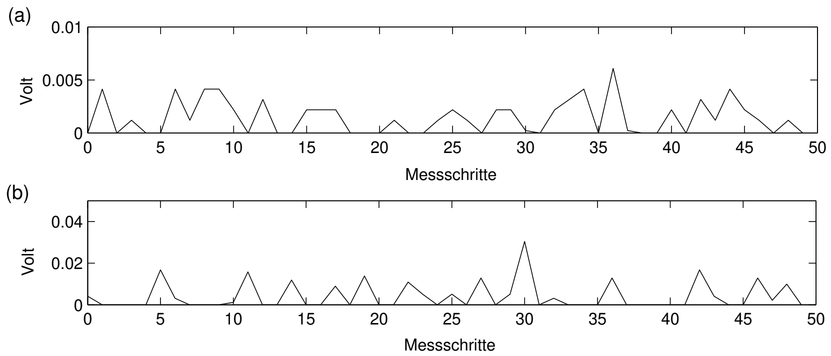


Abbildung 21: Typische softwarekalibrierte Signale:
(a) Originalsignal,
(b) hochpassgefiltertes Signal

rechts, damit das Ergebnis für einen Wert sofort vorliegt und ohne weitere Messwerte, die eine Verschlechterung der Reaktionszeit des Systems bedeuten würden, interpretiert werden kann. Abbildung 22 (b) zeigt das Ergebnis einer Mittelung. Die Schwankungen sind deutlich geringer und das Signal fällt nicht mehr auf 0 Volt, obwohl Kontakt vorliegt. Die Lücke im Signal wurde geschlossen. Während des Objektkontaktes liegt dauerhaft ein Signalpegel von mindestens 0.1 Volt an, also deutlich über dem Grundrauschen von 0.02 Volt (siehe Abbildung 21b)). Der einzige Nachteil ist die Verlängerung des hohen Signalpegels am Ende. Dieser Fehler entsteht aus der Mittelung und wird durch die Wahl einer möglichst kurzen Filtermaske (N=3) minimiert. Das Ziel der Glättung wird also mit der verwendeten Mittelung erreicht, lokale Minima von 0 Volt und starke Schwankungen werden erfolgreich aus dem Signal herausgefiltert.

In diesem Abschnitt hat sich gezeigt, dass die Kalibrierung auf der Workstation genauer ist als die Hardwarekalibrierung und dass die Glättung der Signale die Signalqualität bzw. die Auswertbarkeit deutlich verbessert.

3.6 Abhängigkeit der Messwerte von der Oberflächenstruktur

Zunächst wird untersucht, welchen Einfluss die Oberflächenstruktur der betasteten Oberfläche auf das Messergebnis hat. Weiter gehört zur Betrachtung der Haarsensoren auch die Bewertung ihrer Auflösungsfähigkeit, d.h. wie groß Objekte sein müssen, um von der Umgebung unterschieden wer-

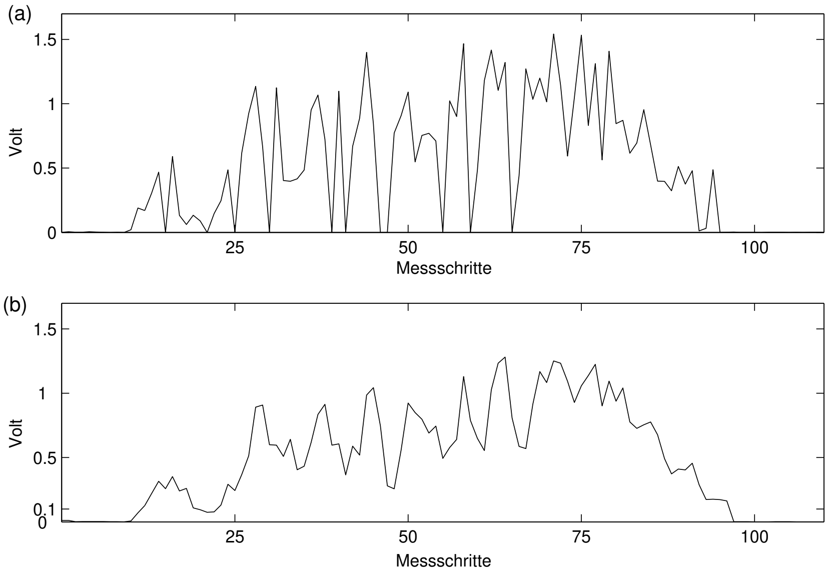


Abbildung 22: (a) Typisches hochpassgefiltertes Signal,
(b) Dasselbe Signal gemittelt

den zu können. In diesem Unterkapitel werden nur hochpassgefilterte Signale verwendet, weil sie bei streichenden Bewegungen besser geeignet sind.

3.6.1 Betrachtung verschiedener Oberflächen

Für einen Vergleich der Messergebnisse auf verschiedenen Oberflächen wird eine Styroporplatte verwendet, die halb mit Papier überklebt ist. Diese zweigeteilte Fläche wird quer zum Flächenübergang mit dem Sensor überstrichen. Dadurch werden die Messbedingungen für beide Oberflächen vergleichbar. Es werden 8 Versuche gemacht, Abbildung 23 (a) zeigt das arithmetische Mittel an einem Sensor über diese Versuche, Abbildung 23 (b) die zugehörige mittlere quadratische Abweichung.

Über dem arithmetischen Mittel ist die Rauheit der Oberfläche skizziert. Der Sensor bekommt nach etwa 50 Messschritten Kontakt zur Papierfläche und kommt nach etwa 185 Messschritten auf die Styroporfläche. Das lokale Maximum der Messreihe bei 60 Messschritten rührt von der Kontaktaufnahme des Sensors zur Testfläche her. Sobald der Sensor Kontakt zur Styroporfläche hat, werden die Messwerte höher und schwanken stärker. Der Wechsel der Oberflächenstruktur verändert also das Sensorsignal deutlich, die Styroporoberfläche erzeugt höhere Amplituden als die Papieroberfläche. Die größeren Schwankungen im zweiten Teil der Messreihe erklären auch die

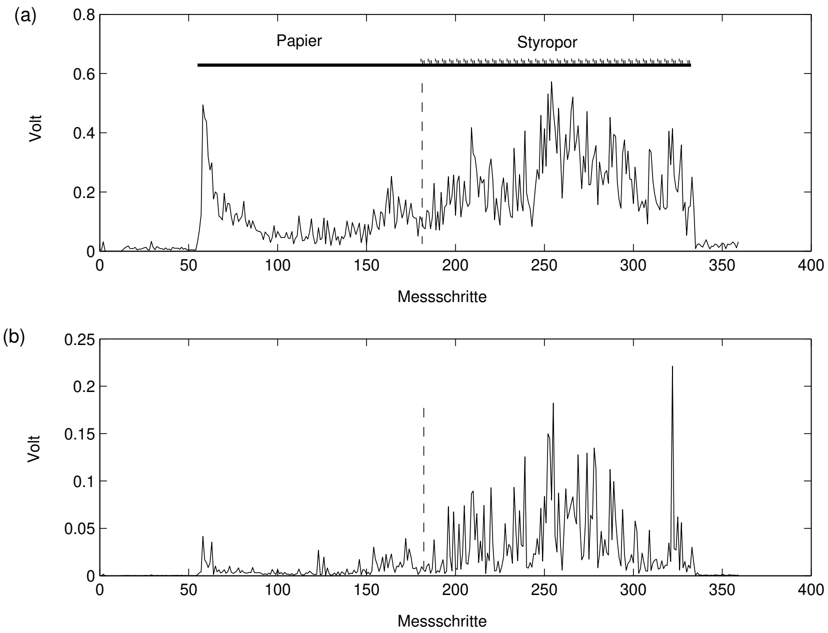


Abbildung 23: Übergang von einer glatten Fläche (Papier) auf eine rauhe Fläche (Styropor) nach 185 Messschritten
(a) Arithmetisches Mittel über 8 Messungen
(b) Mittlere quadratische Abweichung

höhere mittlere quadratische Abweichung. Die Messwerte an den Haarsensoren sind abhängig von der Rauheit der untersuchten Objekte und haben eine höhere Amplitude, je größer die Rauheit ist. Das bedeutet, dass rauhere Oberflächen die Exploration mit dem haptischen Sensor erleichtern, weil Kontakt und Nicht-Kontakt am Signal deutlicher unterscheidbar sind.

3.6.2 Beschreibung der Testobjekte

Die Testobjekte zur Bestimmung der Auflösungsfähigkeit der Haarsensoren sind 7 Metallplatten, die unterschiedlich tiefe und breite Einkerbungen aufweisen (siehe Abbildung 24).

Jede Platte hat eine bestimmte Frequenz der Wiederholung ihrer Einkerbungen, bestimmt durch die Breite der Einkerbungen und deren Abstand. Es gibt je eine Platte mit Einkerbungen von 3 mm, 5 mm, 7 mm, 9 mm, 11 mm, 13 mm und 15 mm Breite. Auf jeder Platte gibt es je nach Breite der Einkerbungen 4 oder 5 Gruppen von 3 bis 8 Einkerbungen. Der Abstand

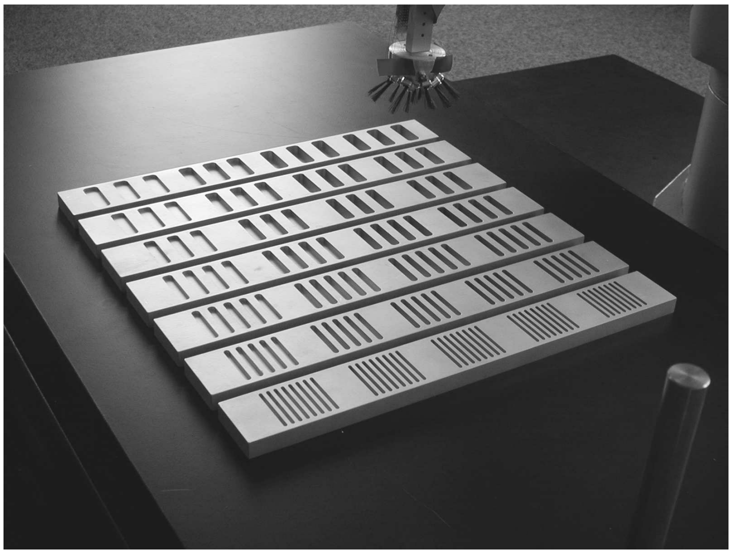


Abbildung 24: Die Testobjekte: Sieben Metallplatten mit Einkerbungen unterschiedlicher Tiefe, Breite und Wiederholfrequenz

der Einkerbungen untereinander entspricht ihrer Breite. Die Gruppen liegen jeweils etwa 30 mm auseinander. Auf jeder Platte hat die erste Gruppe von Einkerbungen eine Tiefe von 3 mm. Die weiteren Gruppen werden in 2 mm-Schritten tiefer. Abbildung 25 zeigt die Platten schematisch von der Seite. Die Form der Platten ist in den Abbildungen 26, 27 und 28 über den Messreihen eingetragen, um deren Interpretation zu erleichtern. Wenn die Einkerbungen dabei unterschiedlich tief erscheinen, dann liegt das an den unterschiedlichen Maßstäben der drei Abbildungen.

3.6.3 Test der Auflösungsfähigkeit

Abbildung 26 zeigt die Ergebnisse von Messungen auf den 7 verschiedenen Metallplatten. Für jeden Messschritt wurde jeweils das arithmetische Mittel über die letzten drei Messwerte aufgezeichnet. Um die Interpretation der Messwerte zu erleichtern, ist über jeder Messreihe die Form der benutzten Metallplatte eingezeichnet. Nur bei Messreihe (f) und (g) lassen sich die Einkerbungen in den Metallplatten am gemessenen Signal deutlich von der Umgebung unterscheiden, also ab einer Breite der Einkerbungen von 13 mm. Die Veränderung der Tiefe der Einkerbungen in die Platten kann man nicht ablesen. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass eine einzelne Messreihe wenig Aussagekraft besitzt und damit nur sehr grobe Strukturen voneinander unterscheidbar sind.

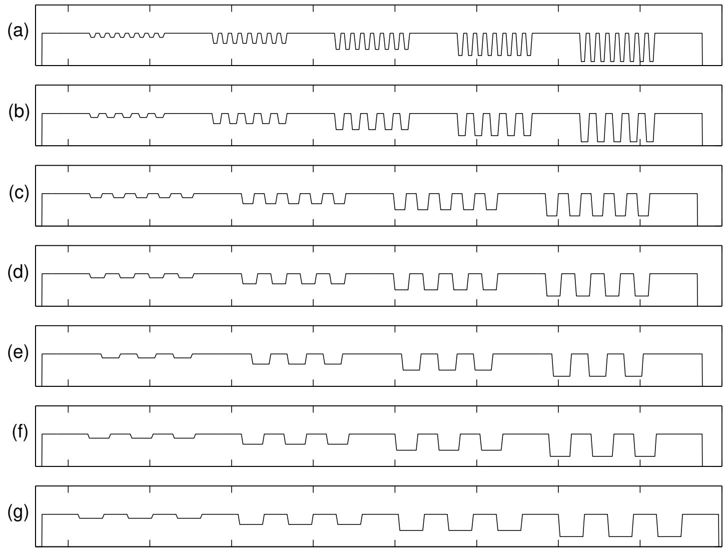


Abbildung 25: Seitenansicht der Metallplatten

Nimmt man das arithmetische Mittel über mehrere Messungen, verbessert sich das Ergebnis deutlich. Abbildung 27 zeigt das arithmetische Mittel und die mittlere quadratische Abweichung über 8 Messungen auf der Platte mit 3 mm breiten Einkerbungen. Hier lassen sich alle Einkerbungen an den Messwerten ablesen und das Anwachsen der Tiefe der Einkerbungen lässt die Messwerte größer werden, weil die Plattenoberfläche dadurch schrittweise gröber wird (siehe auch 3.6.1). Die mittlere quadratische Abweichung hat etwa ein Zehntel der Amplitude des arithmetischen Mittels und spiegelt ebenfalls die Plattenstruktur in abgeschwächter Form wider. Man kann also mit größerem Messaufwand sogar Strukturen von 3 mm Breite unterscheiden.

3.6.4 Erhöhung der Messfrequenz

Im vorigen Abschnitt wurde deutlich gemacht, dass sich die Auflösungsfähigkeit der Haarsensoren durch Mittelung über mehrere Messreihen deutlich verbessern lässt. Weil der dabei nötige Zeitaufwand groß ist, werden Versuche mit erhöhter Messfrequenz gemacht. Bei normaler Konfiguration des Messsystems lassen sich etwa vier Messwerte pro Sekunde von jedem Haarsensor nehmen. Für diese Versuche wird die Programmierung des Mikrocontrollers so verändert, dass nur noch die hochpassgefilterten Messwerte von den fünf Sensoren übertragen werden, die für die beabsichtigten Messungen benötigt

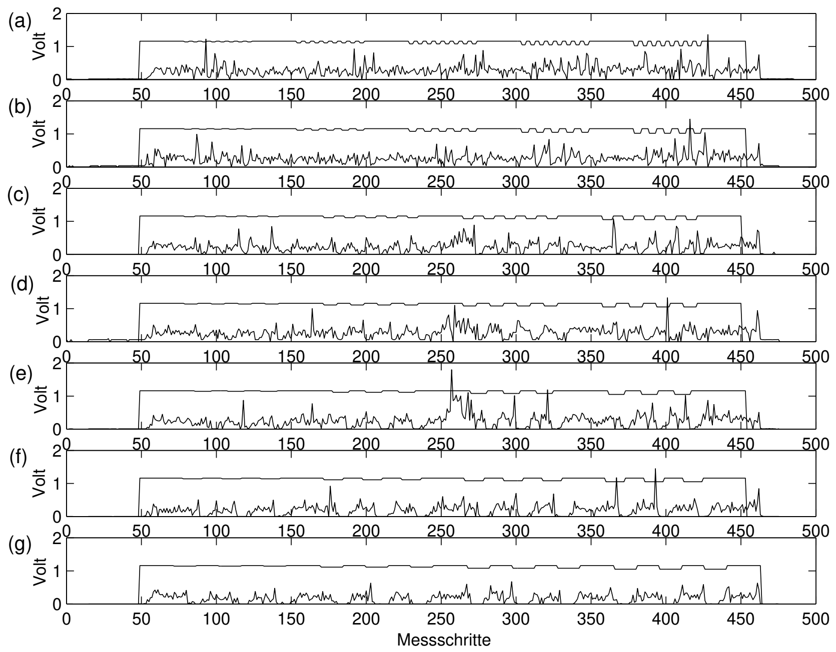


Abbildung 26: Messwerte auf den sieben Metallplatten

werden. Dadurch erhöht sich die Messfrequenz um den Faktor fünf. Abbildung 28 zeigt die Messergebnisse von fünf Versuchen mit der Metallplatte mit 3 mm breiten Einkerbungen. Messreihe (a) zeigt die reinen Messwerte. Für Messreihe (b) wurde über drei Messwerte und für (c) über fünf Messwerte mit Einermasken der Länge drei bzw. fünf gemittelt und dadurch ein Glättung bewirkt. Bei allen drei Messreihen lässt sich die Oberflächenstruktur der Platte ablesen. Die einzelnen Einkerbungen sind fast alle deutlich sichbar. Das Anwachsen der Tiefe der Einkerbungen hat keinen erkennbaren Effekt. Die Mittelungen bewirken, dass die Kurvenverläufe deutlicher werden und besser abgelesen werden können. Für die Messreihen (d) und (e) wurde die Messfrequenz weiter erhöht. Zu sehen sind eine Messreihe ohne Mittelung, (d) und eine Messreihe mit Mittelung über fünf Werte (e). Beide Reihen zeigen, dass die weiter erhöhte Frequenz die Ergebnisqualität nicht stärker verbessert als die erste Frequenzerhöhung. Eine Erhöhung der Messfrequenz um den Faktor fünf ist also für diese Aufgabe ausreichend.

Die Versuche machen deutlich, dass die Erhöhung der Messfrequenz einen ähnlichen Effekt wie die Mittelung über mehrere Messreihen hat, man spart allerdings das mehrmalige Abtasten. Durch eine Verbesserung der Messapparatur, speziell eine beschleunigte Übertragung von Daten vom Mikrocon-

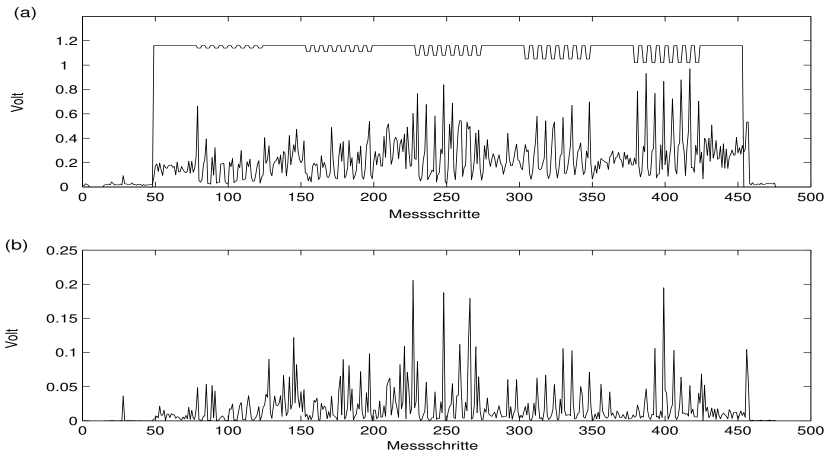


Abbildung 27: (a) Arithmetisches Mittel über 8 Messungen auf der Metallplatte mit 3 mm breiten Einkerbungen
(b) Mittlere quadratische Abweichung

troller zur Workstation, lassen sich also bessere Messergebnisse erzielen, weil die Auflösungsfähigkeit der Haarsensoren dann besser ausgenutzt wird. Man erreicht also eine deutlich höhere Messgenauigkeit, wenn die Übertragungsgeschwindigkeit und damit die Messfrequenz um den Faktor 3-5 erhöht wird.

3.6.5 Frequenzanalyse

Die als Testobjekte verwendeten Metallplatten haben eine regelmäßige Oberflächenstruktur. Auf jeder Platte gibt es eine Breite der Einkerbungen, von 3 mm bis 15 mm. Aufgrund der Regelmäßigkeit der Einkerbungen ist eine Analyse der Signale im Frequenzraum naheliegend. Als Grundlage dienen die Messwerte, die in Abbildung 26 dargestellt sind. Dafür wurden alle sieben Platten mit demselben Haarsensor abgetastet und dabei nach jeder Bewegung um einen Millimeter ein Messwert aufgenommen. Betrachtet man die Platte mit 3 mm breiten Einkerbungen, ergibt sich für die Frequenz

$$\frac{Veränderung}{Zeiteinheit} \quad = \quad \frac{1}{3} Hz \quad , \tag{3}$$

weil in diesem Fall alle drei Millimeter eine Veränderung der Kontaktsituation des verwendeten Haarsensors auftritt, wobei die Zeiteinheit in diesem Fall die Anzahl der Bewegungen ist. Die Veränderungen der Kontaktsituation werden durch den regelmäßigen Wechsel von Einkerbungen und Zwischenräumen zwischen den Einkerbungen verursacht. Daher ist zu erwarten, dass im Frequenzspektrum der Messreihe zu der hier betrachteten Platte die Frequenz

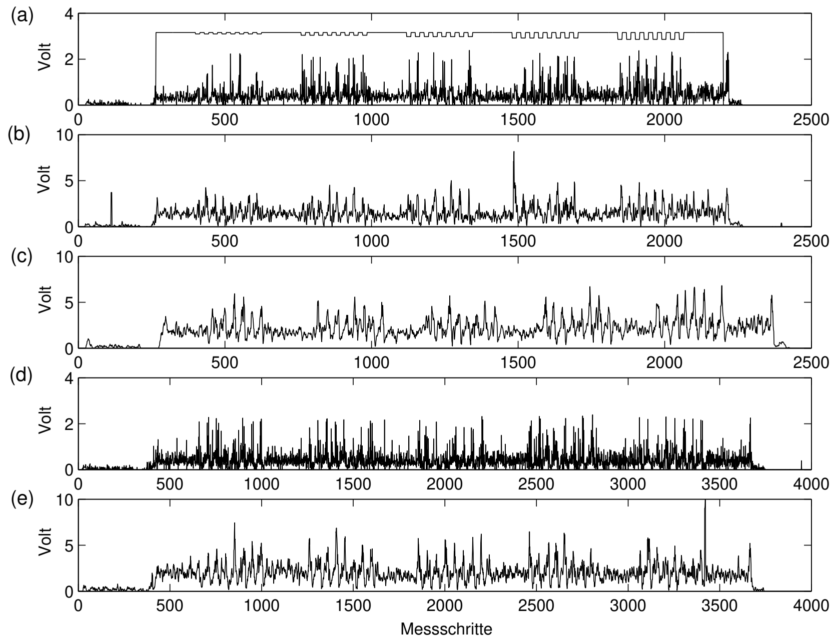


Abbildung 28: Verbesserung der Messergebnisse auf der Platte mit 3 mm breiten Einkerbungen durch Messfrequenzerhöhung um den Faktor 5
(a) normale Messung
(b) zeitliche Mittelung über 3 Werte
(c) zeitliche Mittelung über 5 Werte
(d) normale Messung bei weiter erhöhter Messfrequenz
(e) Mittelung über 5 Werte bei weiter erhöhter Messfrequenz

$\frac{1}{3}$ Hz am stärksten vertreten ist. Für die weiteren Platten ergibt sich auch jeweils der Kehrwert der Breite der Einkerbungen als die Frequenz, die im Frequenzspektrum am stärksten vertreten sein müsste.
Zur Betrachtung des Frequenzraumes wird das *Powerspektrum* der Messreihen bestimmt, auch *PSD* (Power Spectral Density) oder Spektraldichtenschätzung genannt (siehe Abschnitt 2.6). Abbildung 29 zeigt die Ergebnisse des Versuchs. In jedem Frequenzspektrum ist die erwartete Frequenz eingezeichnet. Weil die Länge des Datenvektors 256 ist, liegen die erwarteten Frequenzen bei $\frac{256}{3} = 85\ Hz$, $\frac{256}{5} = 51\ Hz$, usw. In allen sieben Fällen liegt die erwartete Frequenz auf einem lokalen Maximum oder zwischen zwei lokalen Maxima des Frequenzspektrums. Die Amplitude dieser lokalen Maxima wächst dabei mit der Breite der Einkerbungen auf der Platte. Es ist also möglich, Texturfrequenzen in Oberflächen mit dem Frequenzspektrum zu

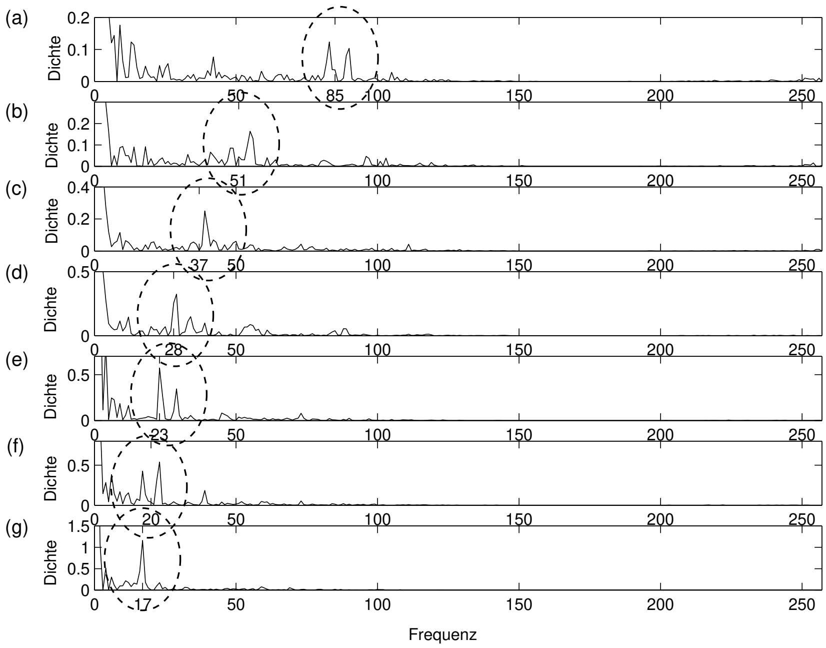


Abbildung 29: Frequenzanalyse der Messergebnisse auf den verschiedenen Metallplatten

analysieren und auch zu detektieren. Allerding erschweren Rauschen und Nebenmaxima besonders bei hohen Frequenzen (Abbildung 29 (a) und (b)) die Detektion. Das Grundrauschen der Haarsensoren bildet sich im Frequenzspektrum nur sehr gering ab, und seine Amplitude liegt unter 10 Prozent der Amplituden der betrachteten lokalen Maxima.

Weiterhin wurden noch Versuche durchgeführt, um charakteristische Frequenzen für unterschiedliche Oberflächen wie Papier, Styropor oder groben Stoff zu bestimmen. Obwohl auch Versuche mit erhöhter Messfrequenz (vgl. Abschnitt 3.6.4) gemacht wurden, gab es keine brauchbaren Ergebnisse, die präsentiert werden können. Dies lässt darauf schließen, dass die Frequenzen in den untersuchten Oberflächen für die verwendeten Messmethoden zu hoch sind oder die untersuchten Strukturen zu unregelmäßig sind.

Die Frequenzanalyse lässt sich auf die Messdaten sinnvoll anwenden, wenn die untersuchten Oberflächen regelmäßige Strukturen aufweisen. Der Rauheitsgrad einer Oberfläche lässt sich an den hochpassgefilterten Signalen der Haarsensoren ablesen (siehe 3.6.1), charakteristische Frequenzbilder für be-

stimmte Rauheitsgrade oder nichtregelmäßige Oberflächenstrukturen wurden aber nicht gefunden. Im Signalraum kann man die Rauheit von abgetasteten Flächen an der Amplitude der Signale unterscheiden und im Frequenzraum können regelmäßige Strukturen wie die Einkerbungen auf den verwendeten Metallplatten abgelesen werden.

4 Beschreibung und Einordnung des haptischen Sensors

In diesem Kapitel werden haptische Sensoren hinsichtlich ihrer Form und Funktion beschrieben. Dabei werden zunächst die verwendeten Sensoren betrachtet und später ein Überblick über andere Tastsensoren gegeben.

4.1 Der Bochumer Zwei-Backen-Greifer mit haptischen Sensoren

Peer Schmidt konstruierte für seine Diplomarbeit [29] an der Ruhr-Universität Bochum die für diese Arbeit verwendeten Haarsensoren. Das Ergebnis seiner Arbeit ist ein Robotergreifer, der mit den Haarsensoren ausgestattet ist.

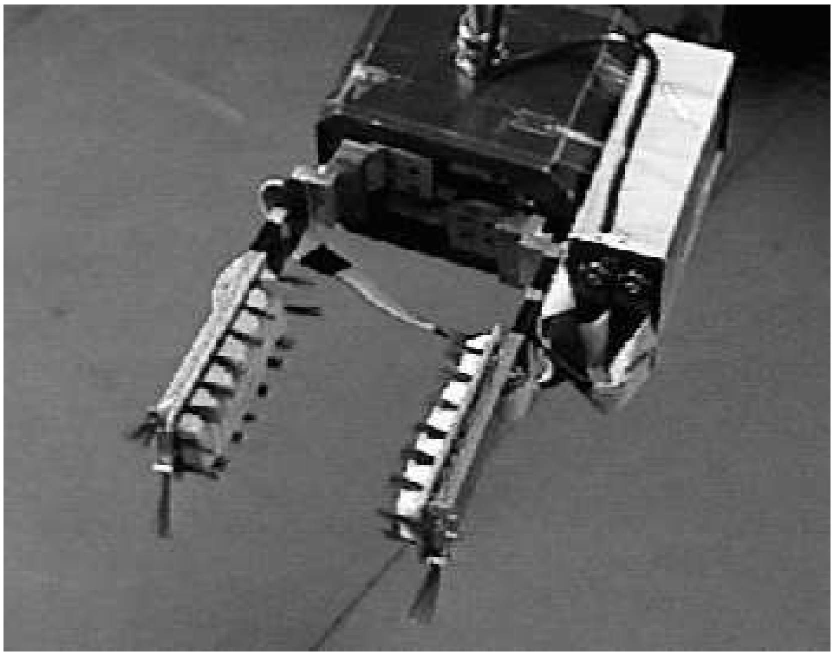


Abbildung 30: Zwei-Backen-Greifer aus Bochum [18]

Die Haarsensoren erleichtern das Greifen, indem sich mit ihnen die Position oder die Bewegung eines Objektes zwischen den Greiferfingern bestimmen lässt. Es ist damit möglich, mit den Haarsensoren die Position des Greifers genau an ein zu greifendes Objekt anzupassen oder ein Herausrutschen eines Objektes aus dem Griff der Hand festzustellen. Damit ist auch das Verfolgen einer menschlichen Hand möglich, die zwischen die Greiferfinger gehalten wird. Auf diese Weise wird in Bochum z.B. ein mobiler Roboter von einem Menschen geführt. Abbildung 30 zeigt den von Peer Schmidt mit taktiler Sensorik ausgerüsteten Robotergreifer. Er besteht aus zwei Greiferfingern, auf denen an der Innenseite einige Haarsensoren für Vibrations- und Geschwindigkeitsmessungen angebracht sind. An der Spitze der Finger sitzen weitere Haarsensoren, die zum Tasten dienen. An der Innenseite sind zusätzlich zwei Drucksensoren befestigt, die die Griffstärke und -position messen. Der gesamte Aufbau ist für das Greifen ausgelegt. Dadurch ist die haptische Exploration zwar prinzipiell möglich, sie ist aber aufgrund der Form der Greiferfinger und der Anordnung der Haarsensoren schwierig.

4.2 Erste Version des haptischen Sensors aus Kiel

Im Gegensatz zur Arbeit von Peer Schmidt [29] ist es das Ziel dieser Arbeit, mit den Haarsensoren Objektformen zu ertasten. Der dabei zuerst verwendete haptische Sensor soll als Sensor I bezeichnet werden. Da er konstruiert wurde, bevor seine Verwendung feststand, wurde ein Aufbau gewählt, der einerseits das Greifen mit Tastunterstützung ermöglichte und andererseits auch für reine Tastaufgaben geeignet war. Abbildung 31 zeigt diese erste Version des für diese Arbeit verwendten Tastwerkzeugs. Sie entspricht einem Greiferfinger des Bochumer Sensors, die Haarsensoren sind aber auf mehrere Seiten verteilt. Diese Abwandlung des Bochumer Greifers ist daher als Greiferfinger nutzbar, ist aber auch zur einfachen taktilen Erkundung von Objekten geeignet, wie es für die hier vorgesehene Aufgabe nötig ist, da in mehr als eine Richtungen getastet werden kann. Dieser haptische Sensor hat den Vorteil, dass er vielseitig ist und dass einzelne Sensoren sehr gut auf ihre Eigenschaften hin untersucht werden können. Dies ermöglicht die genaue Untersuchung der Haarsensoren in Kapitel 3.

4.3 Der weiterentwickelte haptische Sensor aus Kiel

Abbildung 32 zeigt eine schematische Ansicht von Sensor I. Dabei ist ein Bereich des Sensors markiert, an dem keine Haarsensoren sitzen, ein toter Winkel. Durch ungünstige Bewegungen des Sensors oder ungünstige Objektformen ist es möglich, dass der Sensor gegen ein Objekt stößt, ohne dass die Haarsensoren berührt werden. Um das Ziel der haptischen Exploration von Objekten zu erreichen, soll ein Sensor konstruiert werden, der besser zum Tasten geeignet ist als Sensor I, weil er ein Tastsensor ist, und nicht Tastsensor und Greifer in einem. Bei der Neukonstruktion sollen z.B. tote Winkel wegen der oben genannten Nachteile vermieden werden. Die folgenden Abschnitte

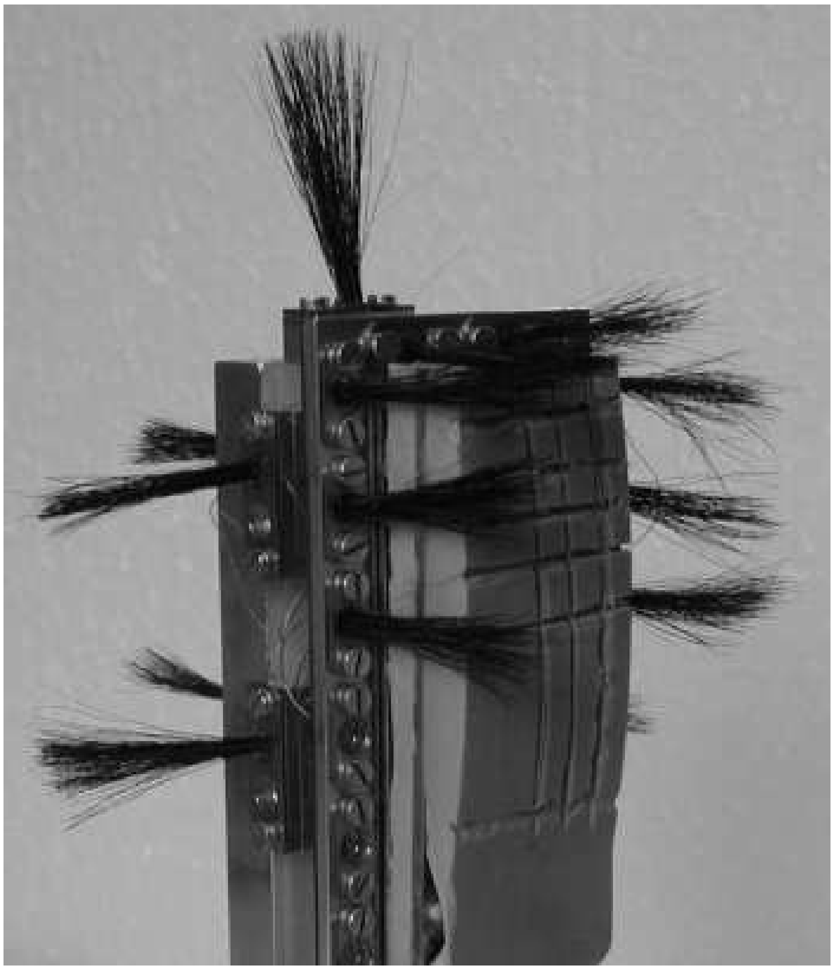


Abbildung 31: Haptischer Sensor I

dokumentieren die Anforderungen (Kapitel 4.3.1) und Ergebnisse (Kapitel 4.3.2) der Veränderungen.

4.3.1 Anforderungen an einen neuen Sensor

Der neue Sensor (siehe Abbildung 34), er soll als Sensor II bezeichnet werden, wird nach den Erfahrungen aus den Experimenten in Kapitel 3 hergestellt. Dabei gibt es verschiedene Anforderungen an einen neuen Sensor.

Das Tasten soll durch die Sensorform unterstützt werden, indem die Haarsensoren möglichst gleichmäßig auf dem Sensor verteilt werden, um keine toten Winkel wie bei Sensor I zu erhalten und den Tastprozess richtungsunabhängig zu machen, d.h in alle Richtungen gleichmäßig gut tasten zu

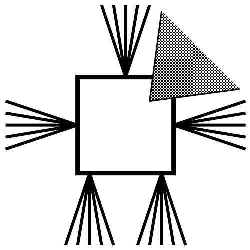


Abbildung 32: Toter Winkel an Sensor I

können. Die Richtungsunabhängigkeit vereinfacht die Steuerung, weil Dreh- oder Kippbewegungen, die einseitig plazierte Haarsensoren in die gewünschte Tastposition bringen, unnötig werden.

Die Möglichkeit, die Haarsensoren an verschiedenen Stellen auf dem Sensor zu plazieren, erlaubt es, den Sensor in seiner Form an unterschiedliche Explorationsaufgaben anzupassen.

Während der Konstruktion des neuen Sensors wurde ein Konzept erstellt, dass die Haarsensoren in Gruppen einteilt, die verschiedene Aufgaben erfüllen. Diese Gruppen werden in den Abschnitten 4.3.3, 4.3.4 und 4.3.5 dargestellt. Ein Ziel war es, die Haarsensoren so zu plazieren, dass immer mindestens zwei Sensoren für dieselbe Aufgabe benutzt werden, z.B. den Kontakt zu einer Fläche zu überwachen. Durch diese Redundanz der einzelnen Signale wird das Gesamtsystem robuster, weil dann ein Fehler an einem Haarsensor durch einen anderen Haarsensor, der für dieselbe Aufgabe benutzt wird, ausgeglichen wird.

Eine weitere Anforderung an einen neuen Sensor ist eine möglichst geringe Größe des Grundgerüsts, auf dem die Haarsensoren angebracht werden, um auch kleinere Objekte ertasten zu können und ausreichend Bewegungsfreiheit zu haben.

Alle Haarsensoren auf Sensor I wurden zum Tasten verwendet. Der neue Sensor wird mit zusätzlichen Haarsensoren ausgestattet, deren einzige Funktion es ist, einen Mindestabstand von haptischem Sensor und Objekten zu sichern, um eine Beschädigung von Sensor oder Objekten zu vermeiden.

Die verschiedenen Ziele, die mit der Konstruktion des neuen Sensors erreicht werden sollen, sind:

- Unterstützung der Exploration durch die Sensorform
- Flexible Plazierung der Haarsensoren
- Mehr Sicherheit durch Redundanz

- Möglichst geringe Größe des Grundgerüsts
- Hinzunahme von Schutzsensoren

4.3.2 Die Ergebnisse der Neukonstruktion

Der neue Sensor hat als Grundgerüst eine Halbkugel mit einem Durchmesser von 30 mm. Diese Form wurde gewählt, um den Sensor in beinahe jede Richtung mit Haarsensoren ausstatten zu können. Die Richtungen werden durch die Befestigungsmöglichkeiten für Haarsensoren auf der Halbkugel vorgegeben.

Die bisher verwendeten Haarsensoren haben Sockel, die mit jeweils zwei Schrauben befestigt werden. Für Sensor II wurden neue Sockel entwickelt, die kleiner sind und nur mit einer Schraube befestigt werden. Abbildung 33 zeigt die verschiedenen Sockelarten im Vergleich. Die kleineren Sockel ermöglichen aufgrund ihrer geringeren Größe eine höhere Dichte der Haarsensoren pro Fläche. Die Befestigung mit nur einer Schraube erlaubt eine flexiblere Plazierung der Haarsensoren.

Abbildung 33: Sockel für Haarsensoren in drei verschiedenen Größen

Die Halbkugel hat in regelmäßigen Abständen 36 Löcher, in welche jeweils ein Haarsensor mit kleinem Sockel geschraubt werden kann. Aufgrund der beschränkten Kapazität des Mikrocontrollers sind aber nur 16 Haarsensoren an der Halbkugel befestigt. Es gibt damit mehr als doppelt so viele Positionen für Haarsensoren als gleichzeitigt auf der Halbkugel sind. Dies ermöglicht eine flexible Plazierung der Haarsensoren, die das Tasten vereinfacht, weil die

Haarsensoren so angeordnet werden können, dass die Tastrichtung beliebig ist. Die regelmäßige Anordnung der Befestigungsmöglichkeiten für die Haarsensoren erlaubt eine Positionierung entsprechend der Aufteilung der Sensoren in Gruppen, weil Sensoren mit gleichen Aufgaben an ähnliche Positionen gesetzt werden können (siehe Abbildung 36, Anordnung der Hauptsensoren).

Sensor II hat etwa dieselbe Größe wie Sensor I. Diese Größe stellt einen Kompromiss zwischen der Variabilität der Plazierung der Haarsensoren und der geringen Größe des Sensors da. Sensor II kann nicht als Greiferfinger eingesetzt werden, aber er ist besser zur Exploration durch Tasten geeignet, weil er nicht nur in den fünf Hauptrichtungen Links, Rechts, Vorne, Hinten und Unten Haarsensoren besitzt. Damit hat er wesentlich kleinere tote Winkel, in denen keine Haarbüschel sitzen. Der neue Sensor kann nicht mehr gegen ein Objekt bewegt werden, ohne dass ein Haarsensor die Kontaktaufnahme anzeigt. Insgesamt wird der neue Sensor den gestellten Anforderungen gerecht, er bietet gute Voraussetzungen für die vorgesehene Aufgabe, die haptische Exploration von Objekten. Abbildung 34 zeigt den neu konstruierten Sensor.

Abbildung 34: Sensor II

Er besteht aus einer Halbkugel, an der 16 Haarsensoren befestigt sind. Im unteren Bildteil sieht man die Signalleitungen der Haarsensoren. In den folgenden drei Abschnitten werden drei Klassen beschrieben, in die die Haarsensoren auf Sensor II eingeteilt sind: Hauptsensoren, Nebensensoren und Schutzsensoren.

4.3.3 Hauptsensoren

Die vier Hauptsensoren zeigen nach unten und haben die Aufgaben (i) der Signalisierung der Kontaktaufnahme bei Bewegungen senkrecht nach unten und (ii) der Kontrolle des Kontaktes zu einem Objekt bei waagerechten Bewegungen über ein Objekt. Im Fall (i) wird der Kontakt vom Sensor zu einem Objekt hergestellt. Diese Kontaktaufnahme ist die Voraussetzung für jeden Explorationsvorgang und wird beim Start durchgeführt. Im Fall (ii) wird gemessen, ob der Kontakt bei waagerechten Bewegungen bestehen bleibt. Der Vorgang der Kontakterhaltung ist die Grundlage jeder haptischen Exploration, weil ohne Berührung nichts registriert wird. Daher ist diese Aufgabe auf 4 Sensoren verteilt, die gleichzeitig arbeiten, und so durch Redundanz der Signale eine sehr große Sicherheit gegenüber Störungen und Messfehlern bieten. Die Hauptsensoren haben also folgende Aufgaben:

(i) Signalisierung der Kontaktaufnahme.

(ii) Kontrolle des Kontaktes zu einem Objekt.

4.3.4 Nebensensoren

Die Nebensensoren sind um die Hauptsensoren herum angeordnet und haben zwei Aufgaben, (i) Signalisierung von Hindernissen bei waagerechten Bewegungen und (ii) Kontrolle des Abstandes zu Hindernissen bei senkrechten Bewegungen. Beide Funktionen spiegeln sich in der Anordnung der Nebensensoren auf dem haptischen Sensor wider. Durch eine regelmäßige Anordnung der Nebensensoren gibt es auch hier eine höhere Ausfallsicherheit durch Redundanz, weil mehrere Sensoren gleichzeitig für dieselbe Aufgabe vorgesehen sind. Für die Funktion (ii) werden die Nebensensoren zusätzlich zu den eigentlichen Aufgaben verwendet, weil auf dem haptischen Sensor nicht genug Haarsensoren angebracht sind, um mehr als einen als Schutzsensor (Abschnitt 4.3.5) zu benutzen. Die Funktionen der Nebensensoren sind:

(i) Signalisierung von Hindernissen.

(ii) Kontrolle des Abstandes zu Hindernissen.

4.3.5 Schutzsensoren

Die Schutzsensoren sind kürzer als die Hauptsensoren und Nebensensoren. Sie berühren ein betastetes Objekt im Normalfall nicht. Wenn sie es doch tun, ist der Sensor so nahe am Objekt oder an einer Fläche, dass die längeren Sensoren beschädigt werden könnten. Die kurzen Haarsensoren schützen also Sensor und Objekte vor Beschädigung. Auf Sensor II ist nur ein Schutzsensor angebracht, bei Bedarf können aber noch mehr Haarsensoren für diese Aufgabe umfunktioniert werden bzw. neu angebracht werden. Der einzige Schutzsensor zeigt nach unten, weil hier auch die wichtigsten Haarsensoren liegen, die Hauptsensoren. Schutzsensoren haben also nur eine Aufgabe:

(i) Überwachung eines Mindestabstands von Sensor und Objekt.

Abbildung 35 zeigt einen Schutzsensor, durch den verhindert wird, dass der haptische Sensor zu dicht an ein kleines Objekt heranbewegt wird.

Abbildung 35: Schutzsensor auf Sensor II, der ein kleines Objekt berührt. Dieser Haarsensor ist deutlich kürzer als die anderen Haarsensoren

Abbildung 36 zeigt die Anordnung der Haarsensoren auf Sensor II. Die drei Klassen von Sensoren sind markiert: Hauptsensoren, Nebensensoren und Schutzsensoren. In der Seitenansicht ist die unterschiedliche Ausrichtung der Sensoren erkennbar. Die Hauptsensoren zeigen nach unten, weil sie für den Kontakt zu waagerechten Flächen benutzt werden. Die Nebensensoren zeigen mehr zur Seite, sie sind auf eher senkrechte Flächen eingerichtet. Der Schutzsensor ist dazu da, den Abstand zu waagerechten Flächen nicht zu gering werden zu lassen, daher zeigt er nach unten. Abbildung 36 zeigt die Einteilung der Sensoren und ihre Verteilung auf dem Sensorkörper. Der Schutzsensor liegt in der Mitte, um ihn herum die Hauptsensoren und am Rand die Nebensensoren.

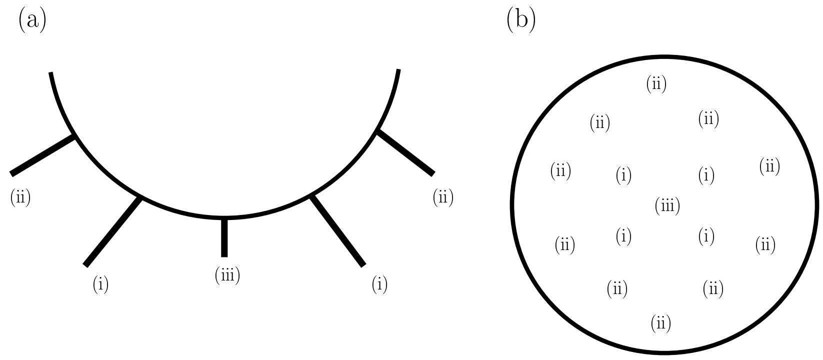


Abbildung 36: Anordnung der Hauptsensoren (i), Nebensensoren (ii) und Schutzsensoren (iii) auf Sensor II:
(a) Seitenansicht
(b) Sicht von oben

4.4 Andere haptische Sensoren in der Fachliteratur

In den folgenden Abschnitten soll der Artikel von Mark H. Lee [17] zusammengefasst werden, der einen Überblick über die Situation auf dem Gebiet der taktilen Sensorik gegeben hat. Außerdem werden verschiedene haptische Sensoren und Aufgaben für haptische Sensoren dargestellt, mit denen sich andere Arbeiten beschäftigt haben. Damit soll einerseits ein Überblick über die verwendete Literatur gegeben werden und andererseits der verwendete Sensor eingeordnet werden.

In [17] beschreibt Mark H. Lee die Situation der taktilen Sensorik. Seiner Meinung nach gibt es seit langem die weit verbreitete Erwartung, taktile Sensoren würden einen starken Einfluss auf industrielle Robotik und Automation haben. Stattdessen fänden sich kaum taktile Sensoren in Fabrikationsanlagen. Der Autor sieht den Grund darin, dass die technischen Schwierigkeiten mit taktilen Sensoren noch immer größer seien als der erwartete Nutzen. Ein wichtiger Nachteil sei, dass beispielsweise visuelle oder Ultraschall-basierte Systeme auf Distanz arbeiten, während taktile Sensoren direkten Kontakt brauchen. Dies sei nur dann von Vorteil, wenn direkter Kontakt von der Anwendung vorgegeben werde und es einen gewissen Grad an Unsicherheit gäbe, den taktile Sensoren am besten verringern könnten. Mark H. Lee erkennt den Fortschritt vor allem auf dem Gebiet der Mehrfinger-Hände. Testsysteme in Labors könnten mittlerweile Kontrolle über bei der Manipulation rutschende oder rollende Objekte halten. In der Medizintechnik, wie z.B. bei einer ferngesteuerten Operation, habe die Verlässlichkeit von neuen taktile Sensoren zu weitergehenden Forschungen geführt [13]. Aber auch in der Landwirtschaft oder Nahrungsmittelindustrie, wo unregelmäßige Waren bearbeitet oder transportiert werden, seien taktile Sensoren durch ihre Verbesserung der Anpassung an unregelmäßige Objekte sinnvoll einsetzbar. Insgesamt wird in dem Artikel deutlich, dass der Autor alten Vorstellungen, taktile Sensoren seien universell einsetzbar, widerspricht. Er sieht aber sehr positive Ansätze, wo taktile Sensoren mit anderen Sensoren kombiniert werden oder direkter Kontakt zu unregelmäßigen Objekten notwendig ist.

4.4.1 Die Greifhand von Cutkosky und Hyde

Mark R. Cutkosky und James M. Hyde beschreiben in [8] ihre Arbeit. Sie beschäftigen sich mit ereignisorientierter geschickter Manipulation von Objekten mit einer Hand aus Tastfingern. Die einzelnen Tastfinger, siehe Abbildung 37, besitzen Sensoren zur Messung von Vibrationen und Beschleunigungen beim Greifen und Tasten von Objekten oder dessen Abrutschen aus dem Griff sowie Kraftsensoren, über die die Griffstärke reguliert wird. Die betrachteten Ereignisse sind hier vor allem die Änderungen der Kontaktsituation zwischen Greifer und Objekt oder Objekt und Umwelt. Daher werden taktile und Kraft/Drehmoment-Sensoren verwendet, weil diese besonders gut die Berührungsintensitäten und Vibrationen messen, die charakteristisch sind für Änderungen der Kontaktsituation. Bei der Kontrolle von Manipulationsvorgängen an Objekten wurde besonderen Wert auf das weiche Umschalten zwischen einzelnen Phasen dieser Vorgänge gelegt. Die Phasen sehen z.B. folgendermaßen aus:

- Die Finger berühren ein Glas
- Die Finger schließen sich um das Glas
- Der Fingerdruck wird erhöht und die Hand angehoben, bis sich das Glas vom Untergrund löst
- Das Glas wird angehoben und bewegt

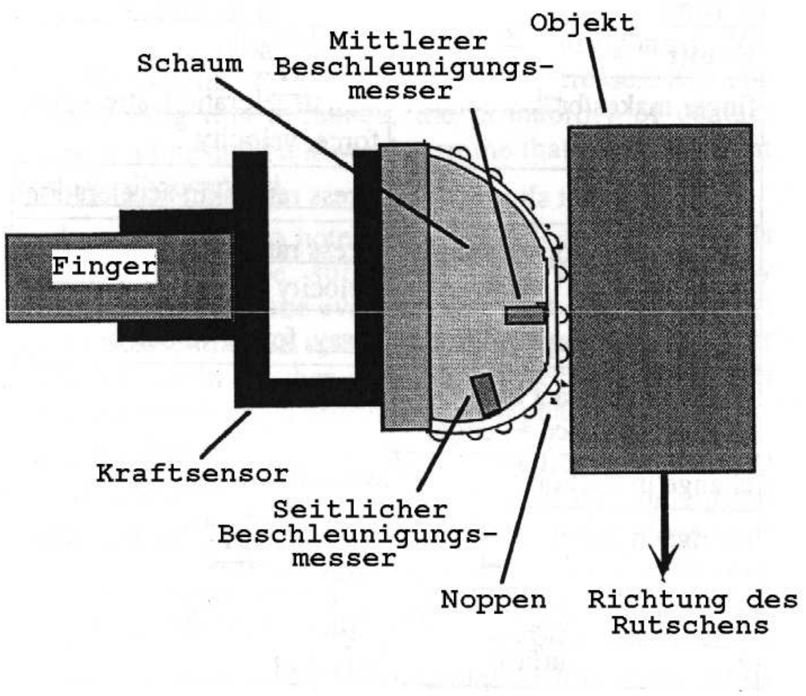


Abbildung 37: Tastfinger von Cutkosky und Hyde [8]

- Das Glas wird an einer neuen Position abgesetzt

Dabei sind weiche Übergänge zwischen den einzelnen Phasen sehr wichtig, da die Objekte meist eine sehr geringe Trägheit besitzen und die taktilen Sensoren an den Fingern sehr störungsanfällig sind. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass sie nun ein Werkzeug besitzen, dessen Kombination von taktilen Sensoren die meisten Manipulationsereignisse registriert.

4.4.2 Der Tastsensor von Rucci und Dario

Der Artikel [25] enthält eine Einschätzung der Situation in der Robotik von 1993 und die Beschreibung eines multifunktionalen, taktilen Tastkopfes, der in Abbildung 38 dargestellt ist. Die Autoren haben den Eindruck, dass nach Jahren der Erwartung und Aufregung ein Rückgang des Interesses an taktiler Wahrnehmung in der Robotik aufgrund technologischer und theoretischer Probleme stattgefunden hat. Die Entwicklung neuer Technologien und das bessere Verständnis der taktilen Wahrnehmung von Primaten hätten jedoch zu neuen Forschungen geführt, weil sich daraus neue Ansätze ergeben hätten.

Daher haben Rucci und Dario einen biologischen Ansatz zur automatisier-

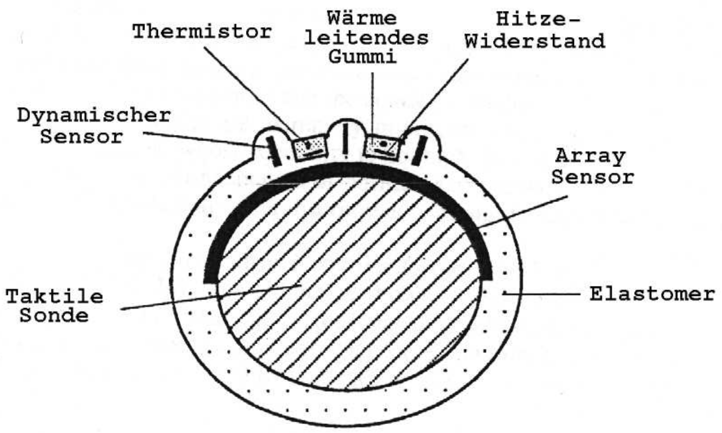


Abbildung 38: Schema des Tastsensors von Rucci und Dario [25]

ten taktilen Wahrnehmung verfolgt. Mit ihrem Tastkopf, der taktile Sensoren zur Feststellung von Form, Rauheit, Vibrationen und Kraft sowie Drehmoment enthält, wurde die Krümmung von Flächen geschätzt. Anhand dieser konkreten Problemstellung wurde auch das grundsätzliche Problem der Korrelation von Motorbewegungen und taktilen Mustern betrachtet. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass ihr Ansatz, vorhandene Werkzeuge zur taktilen Wahrnehmung durch den Einsatz von neuronalen Netzen zu optimieren, viele Verbesserungen bringt. Viel Aufgaben, die auf Wahrnehmung und der Weiterverarbeitung von Sensordaten basieren, könnten mit Techniken erfolgreich bearbeitet werden, die das Lernen, wie man vorhandene nicht unbedingt perfekte Werkzeuge optimiert, beinhalten. In der Kombination herkömmlicher taktiler Sensoren und Neuronaler Netze gäbe es eine Parallele zu vielen biologischen Systemen, die erfolgreich mit der Umwelt interagierten.

4.4.3 Der Tastfinger von Jokusch, Walter und Ritter

Der Artikel [16] von Jan Jokusch, Jörg Walter und Helge Ritter enthält die Beschreibung eines taktilen Sensors, der in Form und Funktion einer Fingerspitze entspricht. Der Sensor ist in Abbildung 39 dargestellt. Er ist auf den Fingern einer Drei-Finger-Roboterhand montiert und besitzt taktile Sensoren zur Messung von Kraft, Position und Schlupf, die gleichzeitig und in

Echtzeit verwendet werden können. Die Autoren sehen taktile Sensoren als eine Grundvoraussetzung für komplexe Manipulations- und Explorationsaufgaben von Robotern an. Bisher seien taktile Sensoren aber weniger verbreitet, da sie technisch aufwendig und teuer seien. Daher wurde bei der Entwicklung des verwendeten Tastfingers auf kostengünstiges Design Wert gelegt, aber gleichzeitig auch auf Echtzeitkontrolle und Mustererkennung mit taktilen Sensoren.

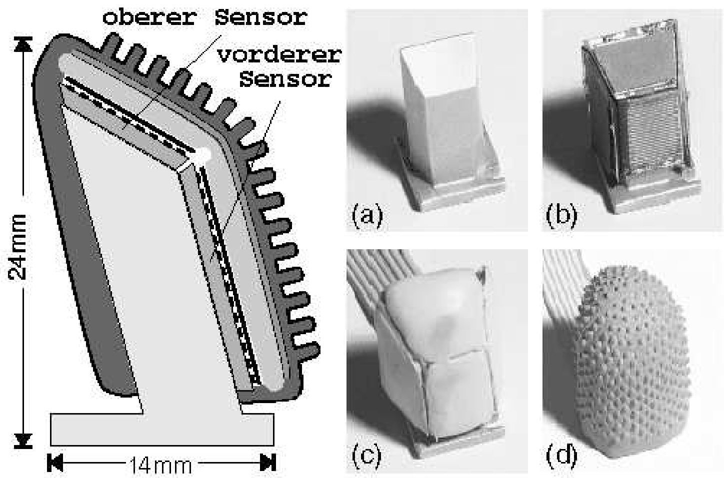


Abbildung 39: Tastfinger von Jokusch, Walter und Ritter [16]

4.4.4 Die Haarsensoren von Schmidt, Maël und Würtz

Peer Schmidt, Eric Maël und Rolf P. Würtz fassen in dem Artikel [30] ihre Forschungsergebnisse mit einem neu entwickelten Sensortyp zusammen. Es handelt sich um den Haarsensor, der auch für diese Arbeit benutzt wird, allerdings für andere Aufgaben. Die Autoren verwenden die Haarsensoren an einem Zwei-Backen-Greifer zur Kontrolle der Bewegungen, während die Haarsensoren in dieser Arbeit zur Exploration durch Ertasten benutzt werden. Bei der Kontrolle der Greifer-Bewegungen seien die Eigenschaften der Haarsensoren von Vorteil, sehr empfindlich gegenüber Berührungen und gleichzeitig robust genug für das Greifen zu sein. Der Zwei-Backen-Greifer ist Teil eines humanoiden Roboters, an dem ähnlich wie bei einem Menschen die taktilen Sensoren als Unterstützung für die visuelle Sensorik dienen. Die Verfasser sehen weitere Einsatzmöglichkeiten der Haarsensoren an ihrem Roboter

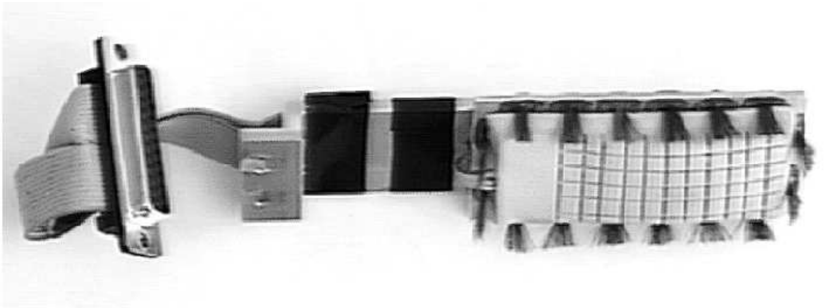


Abbildung 40: Greiferfinger mit Haarsensoren von Schmidt, Maël und Würtz [30]

in der aktiven Erfassung von Oberflächeneigenschaften, der Exploration von Objektformen und der Erkennung von unerwarteten Objektkontakten. Automatische Herstellung, d.h. Sensoren von gleichmäßiger Qualität, und Miniaturisierung könnten zur Entwicklung einer empfindlichen künstlichen Haut mit hoher örtlicher Auflösung führen.

4.4.5 Die DLR-Hand von Butterfaß

Jörg Butterfaß beschreibt in seiner Dissertation [6] seine Arbeit an einer menschenähnlichen Roboterhand am DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt [5]), siehe Abbildung 41. Dabei hat er sich auch mit taktilen Sensoren befasst. Nach seiner Meinung können diese Sensoren auf der Oberfläche der Fingerglieder und der Handfläche hilfreiche Informationen über die Art eines eingesetzten Griffs liefern. Neben Informationen über Qualität und Stabilität eines Griffs könne man auch Informationen über Größe und Form der berührten Objekte gewinnen. Daher seien taktile Sensoren für die Objekterkennung und die Bestimmung der Beschaffenheit von Oberflächen geeignet. Außerdem könne man dadurch mit einer Roboterhand auch sehr fragile Objekte manipulieren, ohne sie zu beschädigen oder fallen zu lassen. Aktuelle Handentwicklungen seien der menschliche Hand in Form und Grösse sehr ähnlich. Nach Johansson [15] hat die menschliche Hand ca. 17000 Mechanorezeptoren unterschiedlicher Art, die taktile Informationen liefern. Aufgrund der Schwiergkeit der Miniaturisierung könne vorläufig eine der menschlichen Sensorik vergleichbare künstliche Sensorik als unrealistisch angesehen werden. Realistische Größen, die bestimmt werden können, seien:

- Kontakt zwischen Finger und Objekt
- Kontaktkräfte zwischen Finger und Objekt

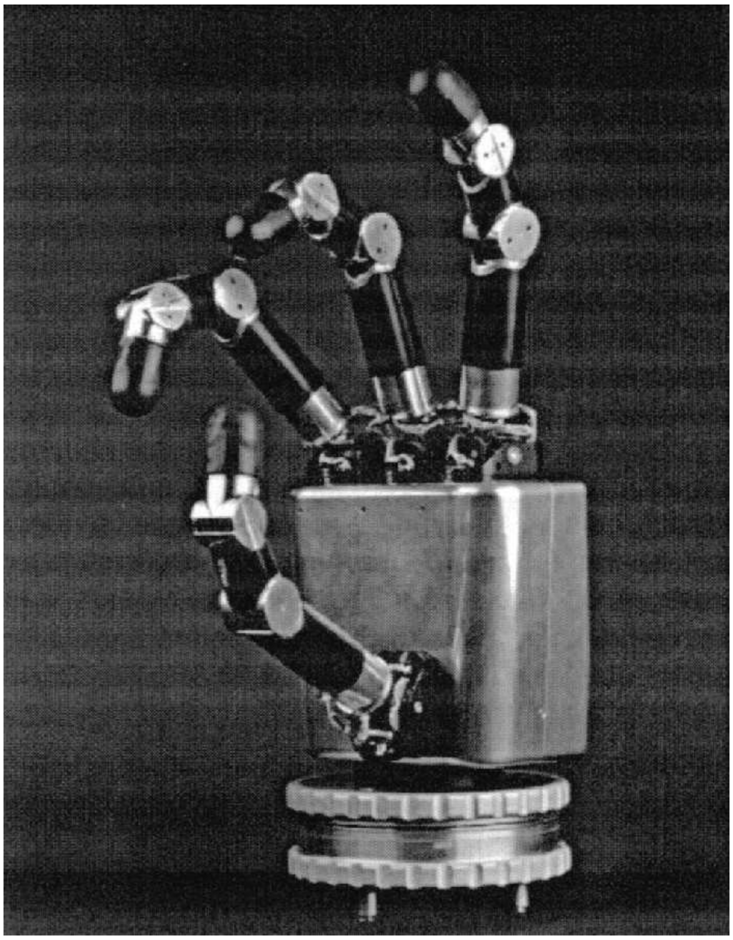


Abbildung 41: 4-Finger-Hand von Butterfaß [6]

- Ort und Orientierung einer Kontaktkraft
- Kräfte entlang der Oberfläche des Fingers (Rutschen)

Diese Vorgaben seien allerdings schwer zu erfüllen, da die Gelenkbeweglichkeit und die dadurch eingeschränkte für Sensoren nutzbare Fläche und die Verkabelung erhebliche Schwierigeiten bereiteten. Für diese Hand wurden Foliensensoren verwendet, mit denen sich Schwerpunkt und Betrag der auftreffenden Kräfte messen lassen. Da nur der Schwerpunkt messbar ist, können keine Kontaktflächen bestimmt werden. Damit ist die Objektform nur schwer zu bestimmen. Der Autor sieht in seiner Wahl der Sensoren einen geeigneten Kompromiss zwischen Aufwand und Ergebnis.

4.4.6 Einordnung der Haarsensoren

Die in dieser Arbeit verwendeten Haarsensoren entsprechen den Haarsensoren auf dem Zwei-Backen-Greifer von Schmidt, Maël und Würtz. Sie sind sehr gut zum Abtasten von Objekten geeignet, weil sie auf sehr geringe Krafteinwirkung reagieren. Dies ist insbesondere bei der Abtastung von Objekten mit geringer Masse und damit auch geringer Trägheit von Vorteil. Für die Steuerung eines Greifprozesses sind die Haarsensoren alleine nicht ausreichend, man braucht dazu auch Drucksensoren, wie sie Schmidt, Maël und Würtz [30] verwendet haben. Für einen reinen Tastvorgang sind diese Sensoren sicher geeignet, wie die Ergebnisse von Kapitel 3 zeigen. Abbildung 42 fasst noch einmal die betrachteten Sensoren und Roboterhände zusammen und beschreibt ihre Besonderheiten.

Konstrukteur	Sensortyp	messbare Daten	Besonderheiten
Cutkosky, Hyde	Greifhand	Beschleunigung, Vibrationen, Kraft	Kombination verschiedener Sensoren
Rucci, Dario	Tastsensor	Drehmoment, Vibrationen, Kraft	Temperatursensoren
Jokusch, Walter, Ritter	Tastfinger	Kraft, Position, Schlupf	Fingerähnlich
Schmidt, Maël, Würtz	Zwei-Backen-Greifer	Vibrationen, Kraft, Position	Berührungsmessung mit geringer Krafteinwirkung
Butterfaß	4-Finger-Hand	Schwerpunkt und Betrag einwirkender Kraft	menschenähnliche Hand
Ehmcke, Krüger, Diesner	Tastsensor (entspricht dem Bochumer Sensor)	Berührung, Vibrationen, Position	Berührungsmessung mit geringer Krafteinwirkung

Abbildung 42: Überblick über die beschriebenen Sensoren

5 Ein Verfahren zur haptischen Exploration von Objekten

In diesem Kapitel werden die Anforderungen an eine Strategie diskutiert, die automatische Exploration ermöglicht. Weiter wird das entwickelte System von Explorationsregeln vorgestellt und elementare Teile dieser Regeln werden näher betrachtet.

5.1 Anforderungen an eine Explorationsstrategie

Ein herkömmliches Computersystem besitzt a priori kein Wissen über die Aussenwelt. Ein Explorationsvorgang, der automatisch ablaufen soll, sollte daher möglichst wenig Information voraussetzen. Die Aufgabe ist es, wenige *einfache Anweisungen*, die in Abhängigkeit von den Sensorsignalen ausgeführt werden, zu formulieren. Dabei sind Mehrdeutigkeiten zu vermeiden, um Entscheidungen zwischen verschiedenen Anweisungen zu erleichtern. Eine weitere Anforderung an eine Explorationsstrategie ist die *Allgemeinheit*, d.h. es sollte möglichst keine Anpassung an eine spezielle Situation geben. Außerdem sollten die Anweisungen so formuliert sein, dass es einfach ist, die gefundene Strategie auf dem Computer umzusetzen und die Aufgaben so zu *kodieren*, dass der Vorgang automatisch ablaufen kann. Dies soll die Programmierung erleichtern und spätere Änderungen ermöglichen, ohne die ganze Strategie verändern zu müssen. Damit gibt es drei Anforderungen, die eine Strategie erfüllen muss:

- Einfachheit
- Allgemeinheit
- Kodierbarkeit

5.2 Der Ablauf der Exploration

Um das Problem der haptischen Exploration eines Objektes zu vereinfachen, wird die Aufgabe der Steuerung des Ablaufes der Exploration zweigeteilt:

1. Vorgabe einer Richtung und einer zurückzulegenden Entfernung.
2. Bewegen des Sensors in die vorgegebene Richtung über die angegebene Entfernung, möglicherweise Ausweichen bei Berührung eines Schutzsensors.

Der erste Teil umfasst das Festlegen einer Richtung, in die der Sensor bewegt werden soll und einer Entfernung, die der Sensor in diese Richtung zurücklegen soll. Die Richtungs- und Enfernungsfindung wurde in dieser Arbeit möglichst einfach gehalten und stellt einen Punkt der Arbeit dar, der in zukünftigen Arbeiten optimiert werden kann. Dabei besteht die Schwierigkeit in erster Linie darin, nur aus den vorliegenden Messwerten Richtung und Entfernung so zu berechnen, dass der Explorationsvorgang effektiv vorangebracht wird.

Der zweite Teil der Aufgabe ist die Bewegung des Sensors in die im ersten Schritt vorgegebe Richtung über die vorgegebene Entfernung. Hindernissen, die Schutzsensoren berühren, muss dabei ausgewichen werden. Für den zweiten Teil wurde ein Regelsystem entwickelt, das die Aufgabe der Erkundung formalisiert. Abbildung 43 zeigt dieses Regelsystem. Die absichtlich grob formulierten Regeln sollen beschreiben, wie man aus einer Menge von möglichen Zuständen und einem aktuellen Signal die nächste Aktion berechnen kann, die das System dem gestellten Ziel der Objekterforschung näher bringt. Die in Abbildung 43 dargestellten Regeln werden im folgenden Text beschrieben.

5.2.1 Start der Exploration

Mit dem Startvorgang wird Kontakt zu einem Objekt hergestellt. Dazu wird die Entfernung 0 vorgegeben und dann die Signale der Haarsensoren ausgelesen. Falls noch kein Kontakt vorliegt, wird der Sensor senkrecht nach unten bewegt, bis er Kontakt zu einem Objekt hat. Da für den Start die Entfernung 0 vorgegeben war, ist der Startvorgang damit abgeschlossen. Der Sensor ist nun in einer Position, von der aus das berührte Objekt erkundet werden kann.

5.2.2 Der Explorationsvorgang

An diesem Punkt hat der Sensor Kontakt zu einem Objekt, und eine Bewegung kann abhängig von der Kontaktsituation, d.h. welche Haarsensoren Kontakt haben, ausgeführt werden. Nun wird von außen eine neue Richtung $r \in \mathbb{R}^2$ und eine Entfernung $d \in \mathbb{N}$ vorgegeben und die Signale der Haarsensoren werden gemessen.

Zuerst werden die Signale der Schutzsensoren ausgelesen, um einen zu geringen Abstand des Sensors zu einem Objekt schnell feststellen zu können. Hat ein Schutzsensor Kontakt, muss der haptische Sensor ein wenig vom Objekt entfernt werden. Er wird eine kleine Strecke nach oben bewegt. Danach wird die Exploration mit einer kleinen Korrektur der Position des haptischen

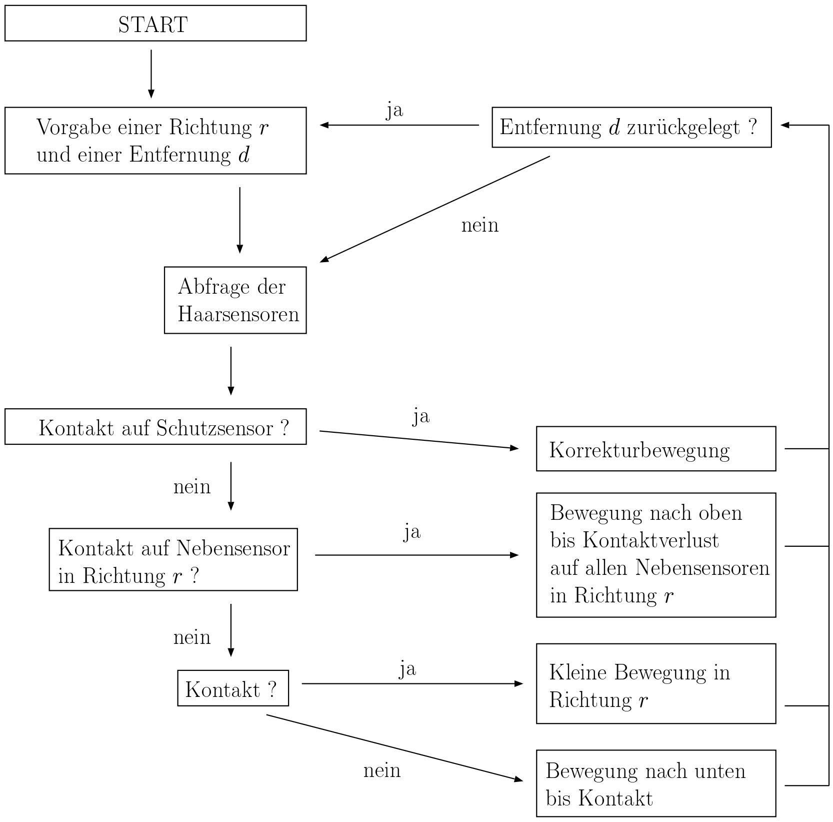


Abbildung 43: Explorationsregeln

Sensors mit einer Suchbewegung nach unten fortgesetzt, um das mit einem Schutzsensor berührte Hindernis mit einem Haupt- oder Nebensensor zu erfassen.

Hat kein Schutzsensor Kontakt, werden die Signale der Haarsensoren gemessen, die in Bewegungsrichtung r liegen, da nur in diese Richtung neuer Kontakt auftreten kann. Liegt an einem Nebensensor in Richtung r Kontakt vor, bedeutet dies also, dass ein Hindernis vor dem Sensor liegt, daher wird er nach oben bewegt.

Liegt an keinem Nebensensor in Richtung r Kontakt vor, aber an anderen Haarsensoren, dann wird der Sensor horizontal eine kurze Strecke bewegt. Liegt danach Kontakt vor, wird der Sensor weiterbewegt.

Liegt kein Kontakt mehr vor, wird der Sensor nach unten bewegt, um den Kontakt wiederherzustellen. Danach werden die Signale der Haarsensoren gemessen. Ist die vorgegebene Entfernung zurückgelegt, beginnt der Kreislauf wieder mit einer neuen Richtung und Entfernung. Auf diese Weise lassen sich mit geeigneter Richtungs- und Entfernungsvorgabe Objekte ertasten. Die hier vorgestellten Regeln lassen sich als Grundlage für andere Verfahren verwenden, z.B. zur Initialisierung neuronaler Netze [2], um noch besser angepasste Explorationsabläufe zu erreichen.

5.3 Bewegungsfolgen

Das Diagramm in Abbildung 43 beschreibt den Ablauf des Explorationsvorgangs mit dem haptischen Sensor. Die Grundidee hinter dieser Eplorationsstrategie besteht darin, dass eine Richtung vorgegeben wird, in die der Sensor mit Hilfe der Regeln über eine vorgegebene Entfernung bewegt wird. Dabei kann die Entfernung auch in mehreren Schritten zurückgelegt werden, wenn zum Beispiel ein Hindernis vor dem Sensor liegt und er erst nach oben bewegt werden muss, bevor er die Entfernung hinter sich bringen kann. Die Summe dieser Einzelschritte soll als Bewegungsfolge bezeichnet werden. Die Bewegungsfolgen können beliebig lang werden, wenn man die Entfernung groß genug wählt und das abgetastete Objekt viele Kanten hat, wie z.B. eine Treppe.

5.3.1 Elemente von Bewegungsfolgen

Es gibt drei Bewegungsfolgen, aus denen sich alle anderen zusammensetzen lassen. Zunächst gibt es die Bewegungsfolge in horizontaler Richtung, dann die Bewegungsfolge nach oben und die Bewegungsfolge nach unten. Die Bewegungfolge nach oben z.B. ist u.a. zusammengesetzt aus folgenden Einzelschritten:

- Bewegung in vorgegebene Richtung
- Kontaktaufnahme an einem Nebensensor in vorgegebener Richtung
- Bewegung nach oben bis zum Kontaktverlust an den Nebensensoren in vorgegebener Richtung
- Bewegung in vorgegebene Richtung

Eine derartige Bewegung tritt auf, wenn das zu untersuchende Objekt rechts vom Sensor höher ist als an der Position des Sensors, sie ist in Abbildung 49 dargestellt. Um den Ablauf der drei grundlegenden Bewegungsfolgen zu verdeutlichen und die Form der Messergebnisse zu beschreiben, sollen sie durch drei Versuche dargestellt werden.

5.3.2 Horizontale Bewegung

Zuerst wird der einfachste Fall betrachtet, die horizontale Bewegung über eine Fläche mit dem Abbruch der Bewegung bei Kontaktverlust. Abbildung 44

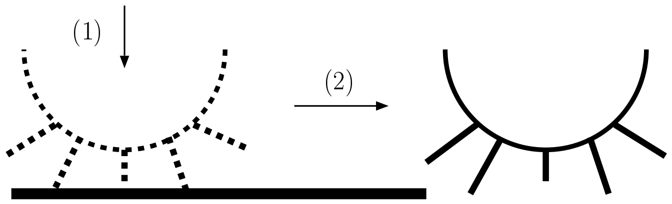


Abbildung 44: Horizontale Bewegungsfolge

zeigt den Versuchsablauf. Die Startbewegung (1), in der der haptische Sensor an eine Fläche herangeführt wird, ist in allen Schemata die erste Bewegung. Danach wird bei dieser Bewegungsfolge der Sensor über eine Fläche nach rechts bewegt, bis kein Haarsensor mehr Kontakt hat (2). Wenn mehrere Be-

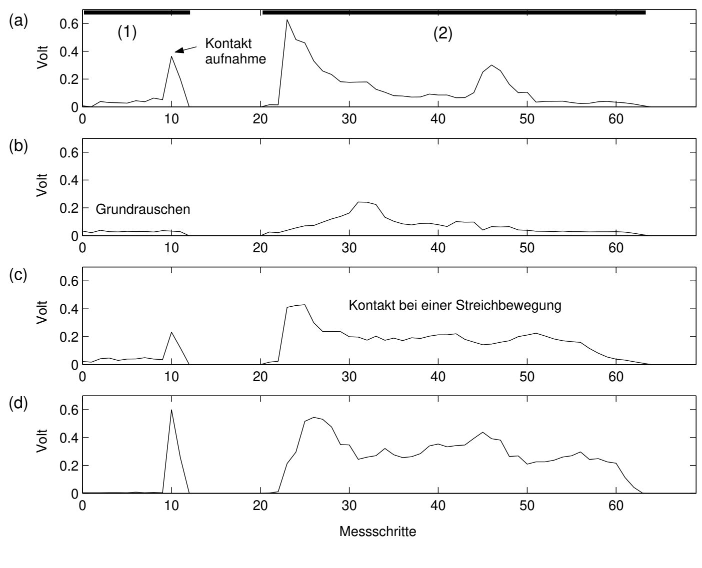


Abbildung 45: Durchschnittliche Messwerte an den vier Hauptsensoren bei einer horizontalen Bewegung des haptischen Sensors

wegungsfolgen hintereinander durchgeführt werden, fällt die Startbewegung häufig weg, wenn für eine Bewegungsfolge die vorhergehende Bewegungsfolge den haptischen Sensor mit Kontakt zu einem Objekt hinterlässt. Abbildung 45 zeigt die durchschnittlichen hochpassgefilterten Messwerte an den vier

Hauptsensoren. Auf der x-Achse sind die Messbewegungen des haptischen Sensors von jeweils 2 mm aufgetragen und auf den y-Achse die jeweiligen Messwerte. Die ersten 10 Messwerte stammen von der Bewegung des Sensors nach unten zur Kontaktherstellung (1), die Maxima bei drei der vier Kurven zeigen die Berührung der Fläche an. Zur besseren Übersicht wurde hier und in den folgenden Diagrammen zwischen den einzelnen Bewegungen eine Lücke von 10 Werten eingfügt. Die Messwerte zur horizontalen Bewegung (2) beginnen bei 20. Man kann ablesen, dass die Messwerte der Anordnung der Hauptsensoren (siehe auch Abbildung 36) entsprechen, da die Haarsensoren (a) und (b) etwa bei 50 Messschritten den Kontakt verlieren und die in Bezug auf Abbildung 44 weiter links liegenden Hauptsensoren (c) und (d) bei ca. 65. Dies entspricht dem Abstand der linken und rechten Haarsensoren von etwa 30 mm. Bei den Haarsensoren (c) und (d) liegen die gemessenen Werte deut-

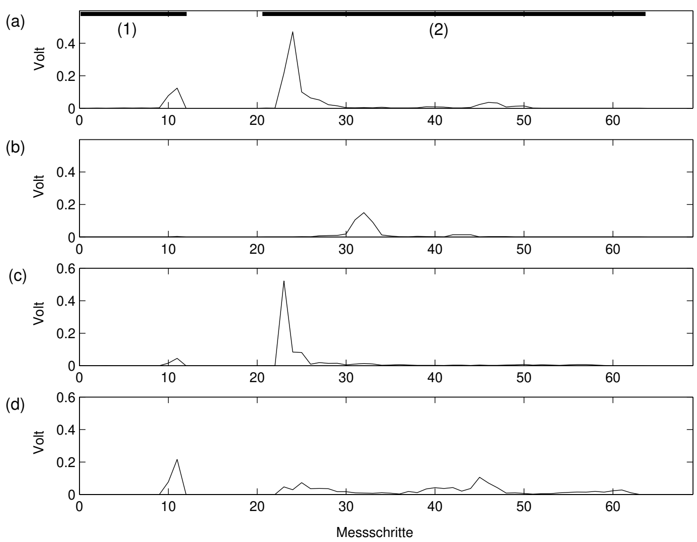


Abbildung 46: Mittlere quadratische Abweichung an den Hauptsensoren bei einer horizontalen Bewegung

lich über dem Grundrauschen, dass man an den ersten 8 Messwerten ablesen kann. Bei Sensor (a) und besonders bei Sensor (b) liegen die Werte teilweise nur knapp über dem Grundrauschen, was die Unzuverlässigkeit der Messwerte und die Schwankungen der Qualität zwischen den einzelnen Haarsensoren dokumentiert. Daher ist es nützlich, dass in alle vier Hauptrichtungen jeweils zwei Sensoren parallel liegen. Diese Redundanz erhöht die die Sicherheit der Interpretation der Messwerte. Abbildung 46 zeigt die mittleren quadratischen Abweichungen der Werte aus Abbildung 45. Abgesehen von wenigen Schwankungen ist die mittlere quadratische Abweichung sehr gering, was auf eine große Gleichmäßigkeit über verschiedene Versuche hinweg hindeutet.

5.3.3 Bewegungsfolge nach unten

Der Ablauf der Bewegungsfolge nach unten ist in Abbildung 47 dargestellt. Der Sensor wird zunächst nach unten bewegt (1), bis er Kontakt zur Fläche

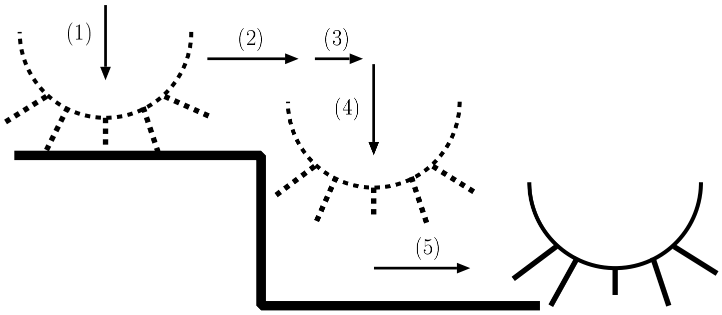


Abbildung 47: Bewegungsfolge nach unten

hat. Danach wird er unter Erhaltung des Kontaktes nach recht über die Fläche bewegt (2), bis alle Haarsensoren den Kontakt verlieren. Sind die Hauptsensoren über die Kante hinweg bewegt worden, hat kein Haarsensor mehr Kontakt. Die Nebensensoren weiter links am haptischen Sensor sind aber noch nicht über die Kante hinaus bewegt worden. Daher wird eine kleine Bewegung (3) nach rechts gemacht, die alle Haarsensoren über die Kante hinwegbewegt. Diese Zwischenbewegung ist aus den Messdaten in Abbildung 48 zu Bewegung (3) ersichtlich. Derartige Zwischenbewegungen sind immer Suchbewegungen, weil der haptische Sensor dabei auf ein Objekt stossen kann. Danach wird der haptische Sensor in einer Suchbewegung (4) nach unten bewegt. Nach der Kontaktaufnahme an den Hauptsensoren wird der Sensor weiter nach rechts bewegt (5), bis wieder alle Haarsensoren den Kontakt verloren haben. Bei der ersten Bewegung nach rechts haben nur die Hauptsensoren Kontakt.

Abbildung 48 zeigt die Messdaten zu diesem Versuch. Sie zeigt die duchschnittlichen hochpassgefilterten Signale aus 5 Versuchen an den beiden Hauptsensoren, die weiter links liegen, und die zugehörige mittlere quadratische Abweichung. Obwohl der Durchschnitt aus den Signalen von zwei verschiedenen Sensoren gebildet wurde, sind die Ergebnisse sehr gleichmäßig, wie auch die mittlere quadratische Abweichung belegt. Dies deutet darauf hin, dass die beiden betrachteten Sensoren sehr ähnlich reagieren. Die betrachtete Bewegungsfolge besteht aus 5 Einzelbewegungen. Zunächst findet die

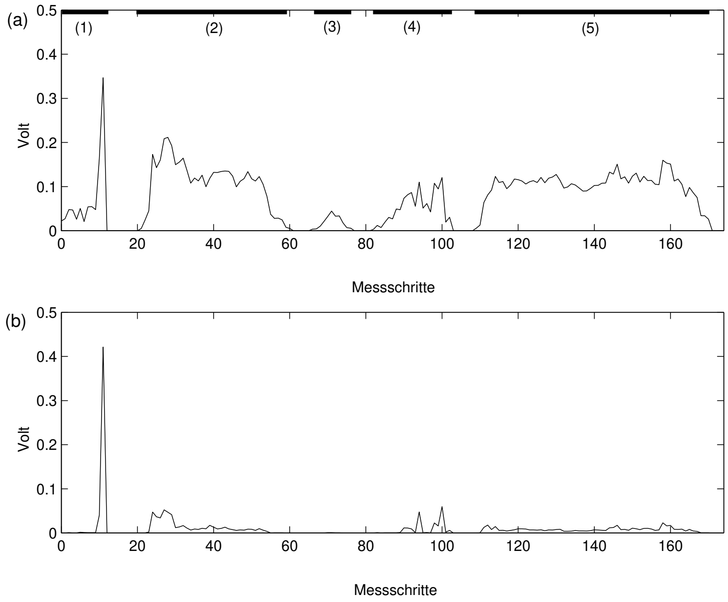


Abbildung 48: Durchschnittliche hochpassgefilterte Messwerte und zugehörige mittlere quadratische Abweichung bei einer Bewegung nach unten

Suchbewegung (1) nach unten statt, dann die kontakterhaltende Bewegung nach rechts (2). Als Drittes folgt die bereits erwähnte Suchbewegung nach rechts (3), dann eine Suchbewegung (4) nach unten und zuletzt das Kontakthalten bei einer Rechtsbewegung (5). Bei der ersten Suchbewegung ist die Kontaktaufnahme sehr deutlich, bei der zweiten nicht, hier ist die Amplitude während der ganzen Bewegung sehr hoch für eine Bewegung, bei der kein Kontakt vorliegt. Dies hat den Grund, dass in diesem Fall die hochpassgefilterten Signale betrachtet werden, die besser zur Messung von Vibrationen als zum Feststellen von neuem Kontakt geeignet sind. Dass die grosse Amplitude bei der ersten Kontaktaufnahme bei etwa 10 Iterationen eine Ausnahme ist, belegt die große mittlere quadratische Abweichung an dieser Stelle. Die beiden kontakthaltenden Bewegungen (2) und (5) von Messschritt 20 bis 60 und Messschritt 110 bis 175 in Abbildung 48 zeichnen sich durch gleichbleibend hohe Amplitude des Signals aus, was die Detektion von Kontaktverlust vereinfacht. Insgesamt lassen die Messergebnisse gute Rückschlüsse auf die Kontaktsituation zu.

5.3.4 Bewegungsfolge nach oben

Die dritte betrachtete Bewegungsfolge führt den Sensor nach rechts über eine Kante hinweg nach oben. Der Ablauf ist in Abbildung 49 skizziert. Abbildung

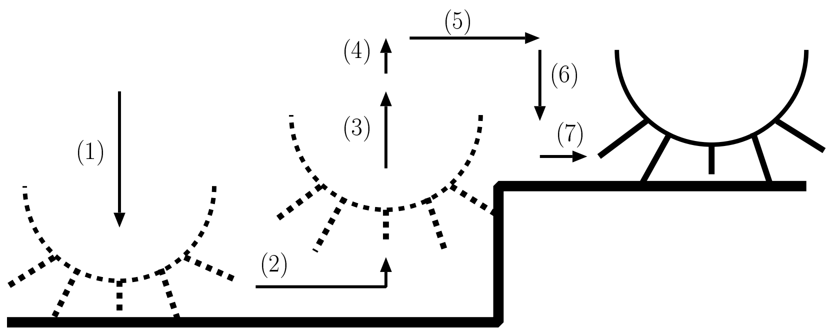


Abbildung 49: Bewegungsfolge nach oben

50 zeigt die durchschnittlichen Messwerte an 2 Haarsensoren, jeweils Originalsignal und hochpassgefiltertes Signal, die während 8 Wiederholungen des des Versuchs aufgenommen wurden. Die Messreihen (a) und (b) stammen von einem Hauptsensor, die Messreihen (c) und (d) von einem Nebensensor in Bewegungsrichtung. Dabei sind (a) und (c) die Originalsignale, die zur Detektion von Kontaktaufnahme benutzt werden, und (b) und (d) die hochpassgefilterten Signale, die zur Kontrolle vorhandenen Kontaktes benutzt werden. Die Bewegungsfolge besteht aus 7 Einzelbewegungen, die z.B. in Messreihe (d) sehr gut erkennbar sind. Die Einzelbewegungen wurden für größere Übersichtlichkeit durch künstliche Lücken in den Messreihen voneinander getrennt. Die einzelnen Schritte sind:

(1) Suchbewegung nach unten zur Kontaktaufnahme

(2) kontakterhaltende Bewegung nach rechts über das Objekt hinweg bis zur seitlichen Kontaktaufnahme

(3) kontakterhaltende Bewegung nach oben am Objekt entlang

(4) Suchbewegung nach oben

(5) Suchbewegung nach rechts

(6) Suchbewegung nach unten

(7) kontakterhaltende Bewegung nach rechts

Bewegung (3) wird bis zum Kontaktverlust durchgeführt. Die beiden Suchbewegungen (4) und (5) bringen den Sensor von der Position neben dem Objekt über das Objekt. Sie vereinfachen den Tastvorgang, weil an dieser Stelle Wissen über die Form des haptischen Sensors ausgenutzt wird anstatt weiterzutasten. Sie sind als Suchbewegung realisiert, d.h. bei Objektkontakt während dieser Bewegungen wird den Explorationsregeln entsprechend verfahren. Die

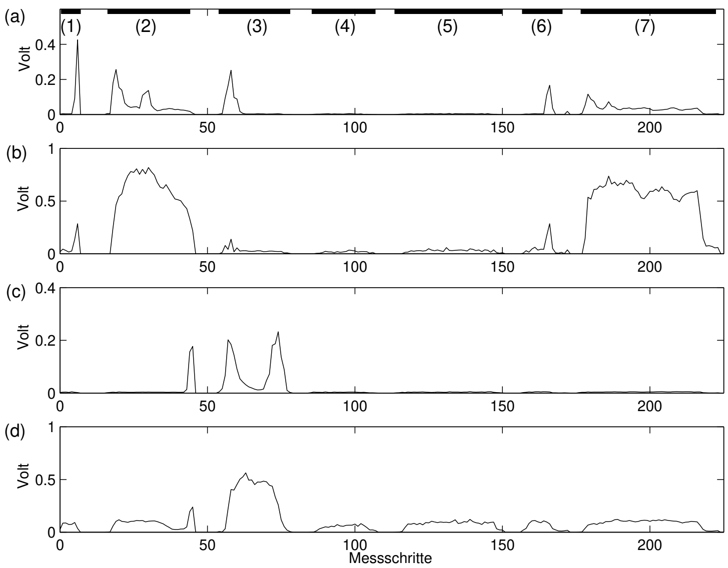


Abbildung 50: Arithmetisches Mittel der Messwerte aus 8 Versuchen an 2 Haarsensoren (Bewegungsfolge nach oben):
(a) Hauptsensor, Originalsignal
(b) Hauptsensor, hochpassgefiltertes Signal
(c) Nebensensor, Originalsignal
(d) Nebensensor, hochpassgefiltertes Signal

Signale in Abbildung 50 sind dabei wie folgt zu interpretieren. Bei Bewegung (1) zeigt sich in Messreihe (a) und (b), also am Hauptsensor, nach etwa 5 Iterationen ein lokales Maximum, das die Berührung der Fläche anzeigt. Danach wird der Sensor über die Fläche nach rechts bewegt (2). Der Kontakt während dieser Bewegung wird in Messreihe (b) deutlich, dem hochpassgefilterten Signal eines Hauptsensors, von etwa 15 bis 45 Iterationsschritten. Am Ende dieses Abschnittes gibt es ein lokales Maximum in Messreihe (c), dem Originalsignal eines Nebensensors. Hier wird die Berührung der senkrechten Kante angezeigt. Bewegung (3) ist nach oben gerichtet. Der Kontakt zur senkrechten Kante wird in Messreihe (d) deutlich, dem hochpassgefilterten Signal eines Nebensensors, der rechts am Sensor ist. Danach folgen die beiden Ausgleichsbewegungen (4) und (5). Bewegung (6) ist wieder eine Suchbewegung nach unten, die Kontaktaufnahme wird wieder in den Signalen (a) und (b) deutlich. Den Abschluss bildet die Bewegung nach rechts (7), während der das hochpassgefilterte Signal des Hauptsensors Kontakt anzeigt (Messreihe (b)).

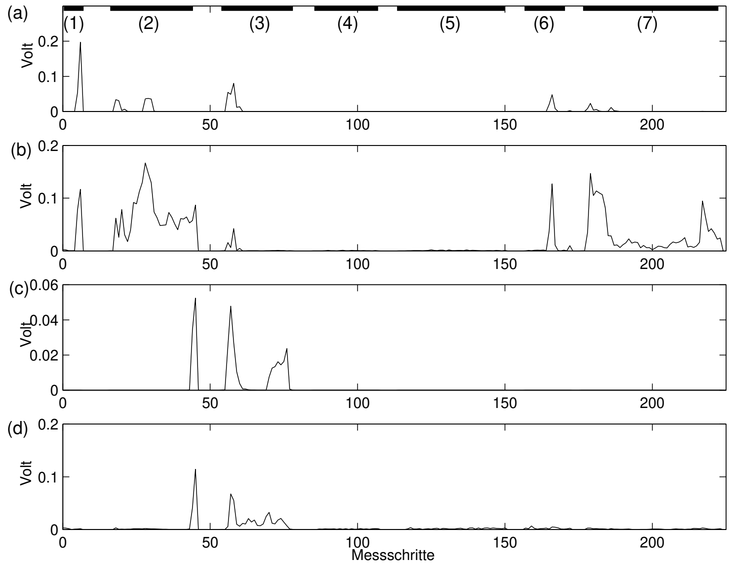


Abbildung 51: Mittlere quadratische Abweichung der durchschnittliche Messwerte an 2 Haarsensoren zu Abbildung 50

Abbildung 51 zeigt die mittleren quadratischen Abweichungen zu den Messreihen aus Abbildung 50. Es gibt fast nur an den Stellen größere Amplituden, an denen Berührungen von Haarsensoren und Flächen stattgefunden haben. Dies zeigt, dass das Rauschen der Haarsensoren gleichmäßig ist, wenn kein Kontakt vorliegt und dass es über mehrere Versuche hinweg unterschiedlich starke Ausschläge an den Haarsensoren für gleiche Kontaktsituationen gibt. Dies kann auch von leicht verschiedenen Kontaktzeitpunkten herrühren, wenn z.B. bei der 1. Bewegung die Kontaktaufnahme bei einer Versuchsdurchführung nach fünf und bei einer anderen Versuchsdurchführung nach sechs Iterationschritten erfolgt, weil die Haarsensoren beim ersten Mal schneller ansprechen.

Insgesamt zeigt sich, dass die Kombination aus Roboterarm, haptischem Sensor und Explorationsregeln bei diesen drei einfachen Versuchen das gewünschte Ziel erreicht. Die aktive Exploration der Testobjekte war erfolgreich.

Mit Hilfe neuronaler Netze lassen sich die Ergebnisse sicher weiter verbessern. In Kapitel 6 werden komplexere Strukturen untersucht.

6 Haptische 3D-Informationsgewinnung

In diesem Kapitel wird in mehreren Experimenten die Leistungsfähigkeit des in dieser Arbeit entstandenen Systems zur haptischen Exploration von Objekten getestet. Dafür werden verschiedene Objekte mit Hilfe des in Kapitel 5 beschriebenen Regelsystems mit dem haptischen Sensor abgetastet. Zur Darstellung der Ergebnisse werden einfache dreidimensionale Graphiken erstellt, die aus den Signalen der Haarsensoren und ihren Positionen berechnet werden. Um die Genauigkeit der entstandenen Graphiken zu veranschaulichen, werden diese zusätzlich auf Bilder der Versuchsszene projiziert. In den ersten beiden Unterkapiteln werden einfache Versuche dargestellt, als Abschluss wird dann in Unterkapitel 6.3 das Verfahren zur haptischen Exploration auf das Modell eines Hauses und auf eine Kaffeedose angewandt. Die Graphiken bestehen aus Mengen von 3D-Punkten, aus denen in zukünftigen Arbeiten mit geeigneten Verfahren Geraden oder Flächen extrahiert werden können. Dabei muss die Genauigkeit der Daten beachtet werden (vergleiche Abschnitt 3.3.3, Abbildung 55).

6.1 Dreidimensionale Darstellung von Sensorsignalen

In diesem Unterkapitel werden 3D-Punktmengen dargestellt, die bei der Exploration von Objekten mit dem haptischen Sensor entstanden sind. Abbildung 52 zeigt die Formen zweier Objekte, die abgetastet wurden. Objekt (a) ist ein Quader, der auf einer ebenen Fläche liegt. Objekt (b) ist ein kleiner Quader, der auf einem grösseren Quader liegt, der auf einer ebenen Fläche liegt.

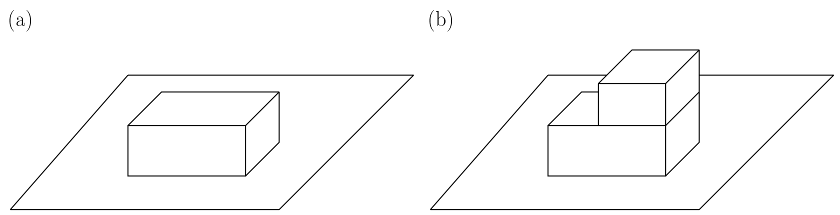


Abbildung 52: Formen zweier abgetasteter Objekte

Abbildung 52 (a) zeigt eine Skizze des ersten Objektes. Der haptische Sensor wird für diesen Versuch einmal über den Quader hinweg bewegt und tastet diesen dabei entsprechend der in Kapitel 5 beschriebenen Explorationsstrategie ab. Bei diesem Vorgang werden die 3D-Koordinaten der Berührungspunkte zwischen Haarsensoren und Quader festgehalten. Diese 3D-Punkte sind in Abbildung 53 dargestellt. Die Fläche unter dem Quader ist zur bes-

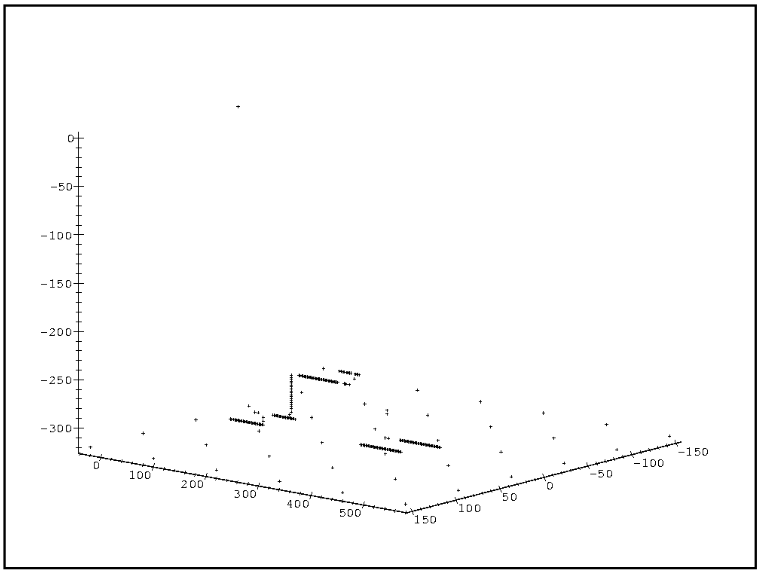


Abbildung 53: Dreidimensionale Darstellung von Sensorsignalen beim Abtasten eines Quaders

seren Orientierung in der Abbildung durch ein Punktgitter dargestellt. Man sieht die Spuren der Berührung von Haarsensoren und Quader deutlich. Da während der für diesen Versuch notwendigen Bewegungen des haptischen Sensors nur wenige Haarsensoren Kontakt zum Quader hatten, sind auch nur wenige Spuren in der Abbildung zu sehen. Links sieht man zwei Linien, die von Hauptsensoren auf der Fläche unter dem Quader verursacht werden. Weiter rechts folgt eine senkrechte Linie, die von einem Nebensensor stammt, mit dessen Hilfe der Sensor am Quader herauf bewegt wurde. An diese Linie schließt eine waagerechte Linie an, die von der Oberfläche des Quaders stammt. Das Herunterbewegen des Sensors von dem Quader ist an dieser Abbildung nicht abzulesen, weil dabei kein Kontakt vorlag. Rechts ist an zwei Linien abzulesen, wie der haptische Sensor hinter dem Quader auf der Grundfläche weiterbewegt wird. Es zeigt sich in diesem Versuch, dass die beabsichtigte automatische haptische Exploration gelingt. Auch wenn das Ergebnis viele Lücken hat, kann man bereits aus diesen Daten auf die Form des abgetasteten Objekts schliessen.

Abbildung 54 zeigt die 3D-Daten, die bei der Abtastung des in Abbildung 52 (b) gezeigten Objektes, zwei aufeinanderliegenden Quadern, aufgezeichnet wurden. In diesem Fall wurde eine Seitenansicht gewählt, um die Lage der 3D-Punkte besser mit der Form der Quader vergleichen zu können.

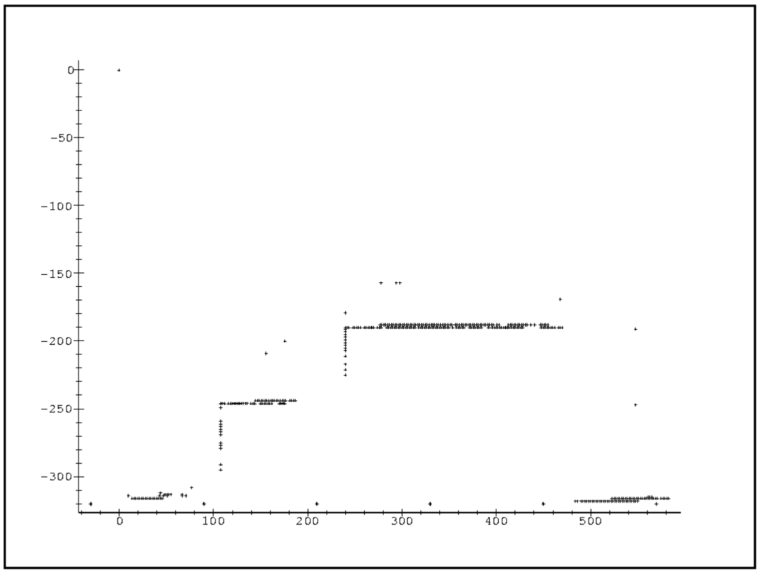


Abbildung 54: Zweidimensionale Darstellung von Sensorsignalen beim Abtasten zweier aufeinanderliegender Quader

Es wird deutlich, dass senkrechte und waagerechte Flächen sehr gut erfasst werden. Die waagerechten Linien sind Überlagerungen der Messpunkte mehrerer Haarsensoren. Dies zeigt, wie genau die dreidimensionalen Positionen der Messpunkte bestimmt worden sind. Die Flexibilität der Haarsensoren führt allerdings zu Ungenauigkeiten, die im nächsten Experiment deutlicher werden. In dieser Abbildung sind einige Lücken zwischen den Kontaktpunkten von Haarsensoren und Objekt deutlich zu erkennen. Die Lücken treten vor allem in Ecken des Objektes auf, die aufgrund der Größe des haptischen Sensors nicht erreichbar sind. Die Form der abgetasteten Quader lässt sich aber trotzdem deutlich ablesen.

In Abbildung 55 ist das Ergebnis der Abtastung einer schrägen Fläche zu sehen. Anhand der Häufungen von Punkten in der Abbildung lässt sich die Steigung der Fläche gut ablesen, allerdings ist auch in diesem Fall die Darstellung lückenhaft. Diese Lücken entstehen aus den Abständen der Haarsensoren untereinander, die ein genaueres Abtasten erschweren. Die Ungenauigkeiten in der Darstellung zeigen sich in waagerechten und senkrechten Linienfragmenten, die bei der Abtastung einer schrägen Fläche nicht auftreten dürften.

Der Grund für diese Fehler ist die Flexibilität der Haarsensoren. Berührt ein Haarsensor ein Objekt, biegen sich die Härchen und die neue Position der Härchenspitzen ist nicht mehr exakt bestimmbar. Daher bleibt zur Bestimmung der Koordinaten des Kontaktpunktes nur die Position der Spitze des Haarsensors, die diese bei ungebogenen Härchen hätte. Die Größe der Ungenauigkeit hängt vom Grad der Verbiegung der Haarsensoren ab. Wegen der Flexibilität der Haarsensoren hängt das Ergebnis, also die Position der 3D-Punkte, auch von den Bewegungsrichtungen des haptischen Sensors ab. Dies wird in Abbildung 55 deutlich.

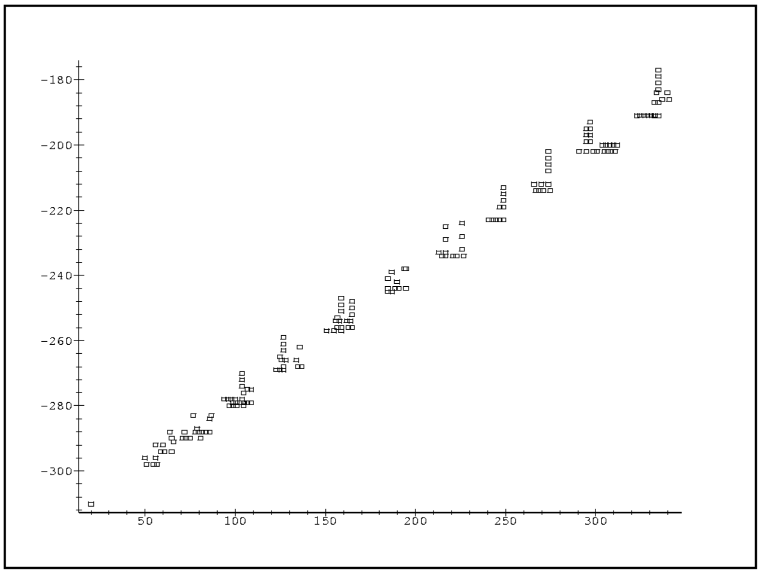


Abbildung 55: Sensorsignale beim Abtasten einer schrägen Fläche

Die senkrechten und waagerechten Sensorbewegungen sind in der Graphik erkennbar, während schräge Linienfragmente nicht auftreten. Eine Lösung des Problems wären schräge Sensorbewegungen, die aber die Kenntnis der Steigung einer Fläche erfordern. Die Steigung ist nicht einfach zu bestimmen, da die Länge der Fläche ebenfalls nicht bekannt ist. Eine andere Möglichkeit, das Problem der flexiblen Härchen zu verkleinern, wäre es, die Haarsensoren zu kürzen, um ihre Flexibilität einzuschränken. Wenn man die Abtastung auf Stossbewegungen beschränken würde, fiele die Flexibilität der Haarsensoren nicht mehr ins Gewicht, weil die Haarsensoren bei Stossbewegungen nach der Kontaktaufnahme nicht mehr bewegt werden und daher nur wenig gebogen werden. Dadurch würde man aber ein wesentliches Element der

Explorationsmethode verlieren, das Kontakthalten zu einem Objekt.

Aus allen Abbildungen lässt sich die abgetastete Objektform rekonstruieren, allerdings gibt es auch Lücken und einige falsche Punkte in den entstandenen dreidimensionalen Darstellungen der Messdaten. Durch mehrfaches Abtasten eines Objektes lassen sich bessere Ergebnisse erzielen. Dabei ist allerdings zu erwähnen, das dies aufgrund der geringen Anzahl der Haarsensoren und ihres großen Abstandes untereinander zeitaufwendig ist. Die Flexibilität der Haarsensoren macht auf waagerechten und senkrechten Flächen keine Probleme.

6.2 Projektionen von 3D-Informationen auf Realbilder

Die Ergebnisse des letzten Unterkapitels werden nun in Bilder der Versuchsszenen projiziert, um die dreidimensionalen Daten anschaulicher darstellen zu können und die Genauigkeit der 3D-Punkte beurteilen zu können. Abbildung 56 zeigt die Projektion der zugehörigen Sensordaten in das Bild eines Quaders.

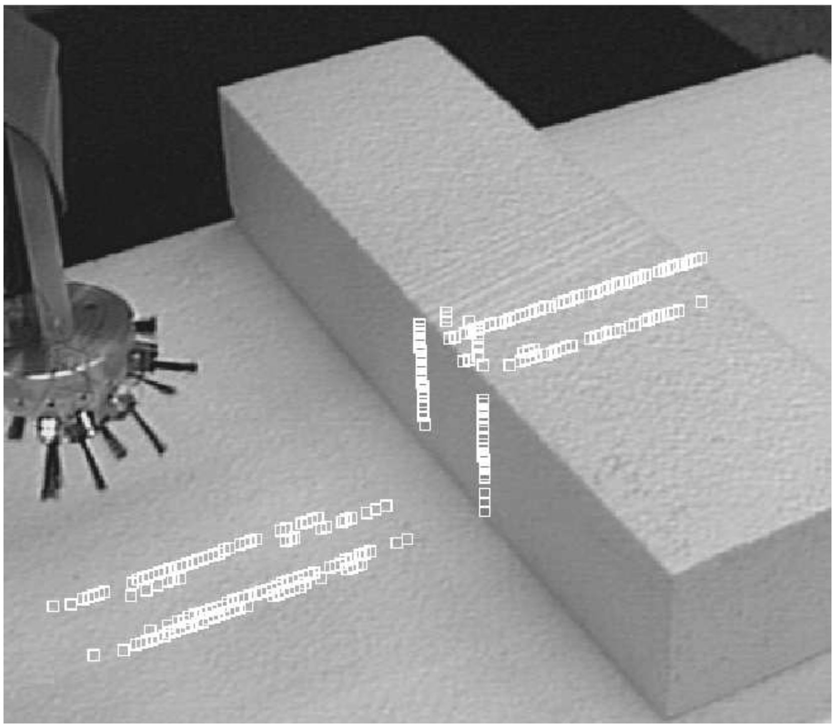


Abbildung 56: Projektion der zugehörigen Sensordaten auf einen Quader

Für diesen Versuch wurde der haptische Sensor einmal automatisch über den

Quader bewegt. Die Messwerte sind lückenhaft, aber die 3D-Positionen, die aus den Sensorsignalen rekonstruiert wurden, stimmen gut mit den Flächen des Quaders überein. Wie in den vorhergehenden Versuchen in diesem Kapitel werden Flächen gut abgetastet, Ecken sind dagegen nicht vollständig mit dem haptischen Sensor erreichbar. Abbildung 57 zeigt die Ergebnisse eines weiteren Versuchs.

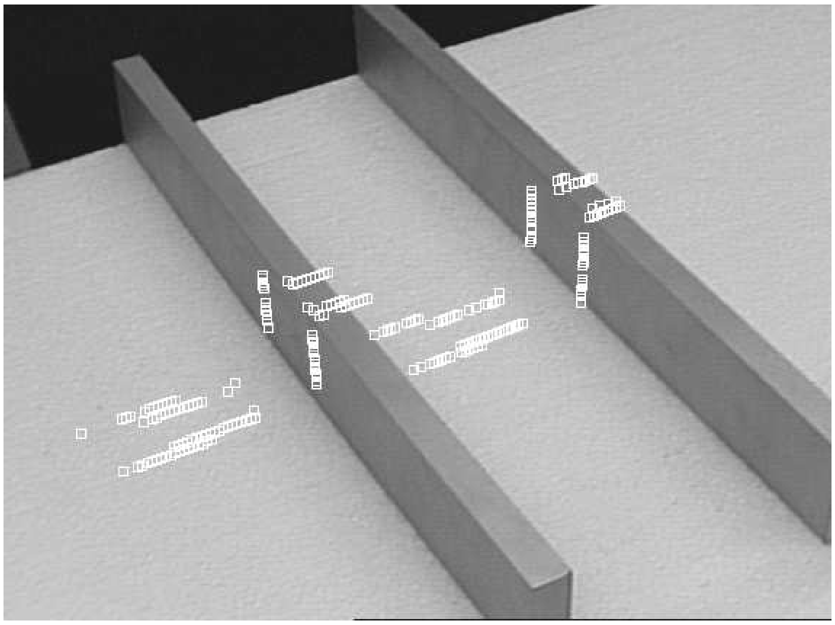


Abbildung 57: Projektion von Sensordaten in ein Bild der Versuchsszene, zwei Hindernisse

Für diese Experiment sind zwei Hindernisse für den haptischen Sensor aufgestellt worden, über die er nur mit den in Kapitel 5 vorgestellten Explorationsregeln hinwegbewegt wird. Die Stärken der Haarsensoren auf Flächen werden auch in diesem Fall deutlich, ebenso wie die Schwächen beim Abtasten von Ecken. Die Objekte werden trotz ihrer im Vergleich zum haptischen Sensor geringen Größe gut erfasst und die Form der Objekte ist an den projizierten Kontaktpunkten gut ablesbar. Auch der schmale Raum zwischen den Objekten wird abgetastet.

6.3 Abtastung komplexerer Objekte

Das in dieser Arbeit entstandene System zur haptischen Exploration von Objekten, bestehend aus dem haptischen Sensor, dem Roboterarm sowie der

Software zur Steuerung des Explorationsvorgangs, wird in diesem Unterkapitel verwendet, um das Modell eines Hauses und eine Kaffeedose abzutasten. Die dabei gewonnenen 3D-Koordinaten werden in verschiedenen Ansichten dargestellt sowie in Bilder der Objekte projiziert.

6.3.1 Abtastung eines Modellhauses

Für diesen Versuch wird eine Seite und eine Front des Hauses komplett mit dem haptischen Sensor abgetastet. Dazu wird der haptische Sensor mit Hilfe des entwickelten Regelsystems mehrfach in parallelen Bahnen über das Haus bewegt. Bei Kontakt eines Haarsensors zur Bodenfläche oder dem Haus werden die 3D-Koordinaten des Kontaktpunktes gespeichert. Aus diesen Daten ist eine 3D-Graphik entstanden, die in Abbildung 58 in vier Ansichten dargestellt ist.

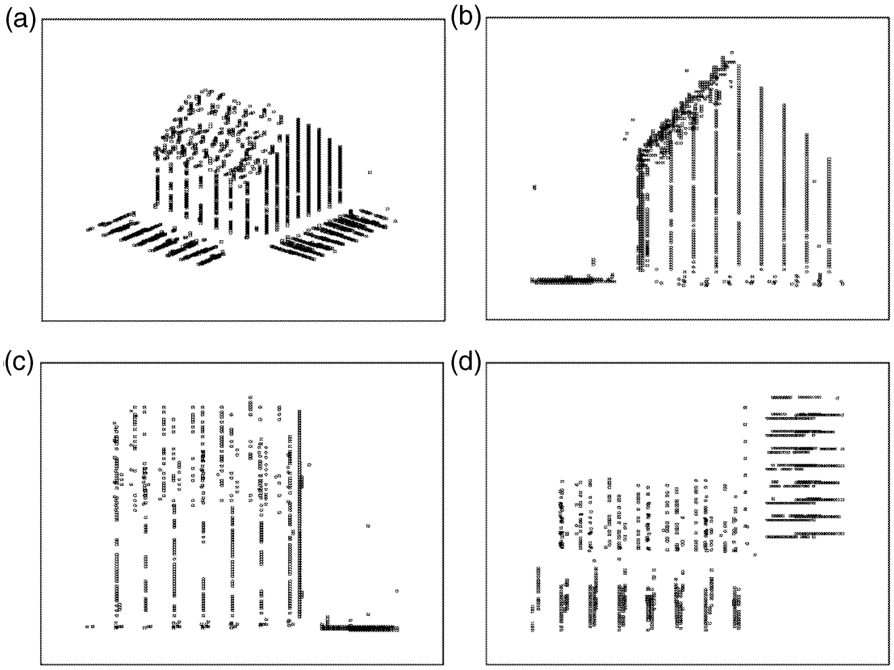


Abbildung 58: (a) Schräg- , (b) Front- und (c) Seitenansicht sowie (d) eine Ansicht von Oben auf 3D-Koordinaten, die bei der Abtastung eines Modellhauses gewonnen wurden

In der Schrägansicht (a) ist die Form des Hauses gut zu erkennen. Die parallelen Bahnen des haptischen Sensors über das Haus spiegeln sich in parallelen Linien wider. Die Flächen des Hauses werden sehr gut erfasst, nur in Ecken und bei der Dachschräge gibt es Probleme. In der Frontansicht (b) erkennt man, dass die schräge Dachfläche verschmiert dargestellt ist. Dies liegt an der Flexibilität der Haarsensoren. Die Ansichten (c) und (d) weisen wie die anderen Ansichten parallele Linien auf. Abbildung 59 zeigt ein Bild der Versuchsszene mit dem Modellhaus, in das die gewonnenen 3D-Koordinaten projiziert worden sind.

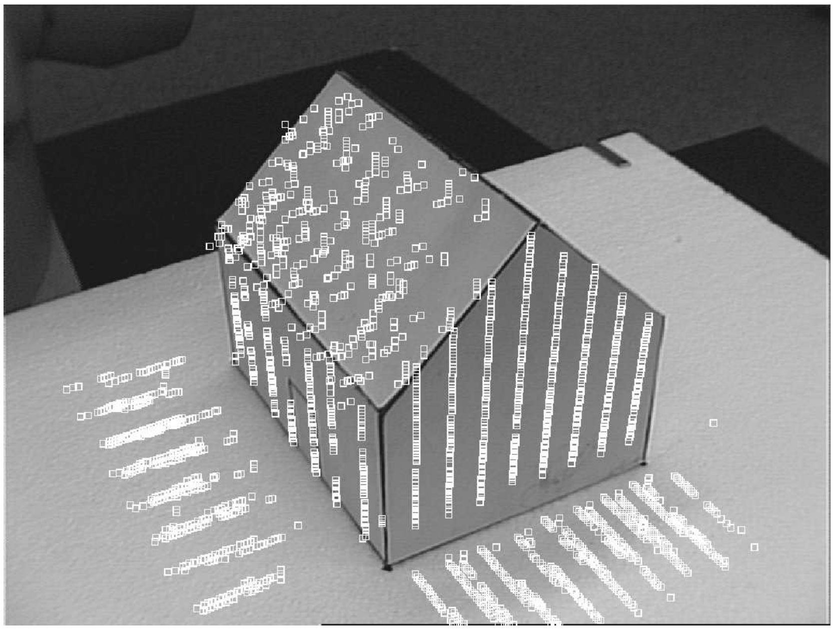


Abbildung 59: Projektion der beim Abtasten erfassten 3D-Koordinaten auf ein Bild des Modellhauses

Es zeigt sich, das die gewonnenen 3D-Punkte gut auf das Modellhaus passen. In dieser Schrägansicht sehen die 3D-Punkte auf dem Dach des Hauses sehr verstreut aus, die Frontansicht in Abbildung 58 (b) belegt dies. Die anderen Flächen und besonders die Frontseite des Hauses weisen aber eine hohe Dichte der Messpunkte auf und sind gut rekonstruierbar.

6.3.2 Abtastung einer Kaffeedose

Für diese Experiment wird eine Kaffeedose aus zwei Richtungen jeweils in mehreren parallelen Bahnen abgetastet. Im Gegensatz zum Versuch mit dem Modellhaus wird der haptische Sensor in diesem Fall über die Dose hinweg- und auch in die Dose hineinbewegt. Der Durchmesser der Kaffeedose ist nicht viel größer als der Durchmesser des haptischen Sensors einschließlich der Härchen. Daher ist der Boden der Dose mit dem Sensor schwer zu erreichen und wird entsprechend wenig abgetastet. Abbildung 60 zeigt vier Ansichten der 3D-Punkte, die bei der Abtastung der Kaffeedose gewonnen wurden.

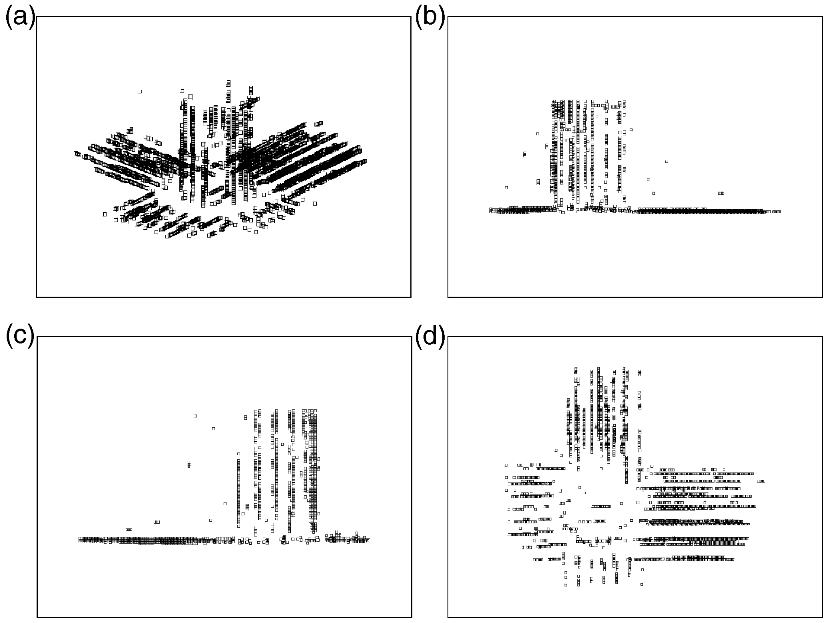


Abbildung 60: (a) Schräg- , (b) Front- und (c) Seitenansicht sowie (d) eine Ansicht von Oben auf 3D-Koordinaten, die bei der Abtastung einer Kaffeedose gewonnen wurden

In der Schrägansicht (a) ist der Untergrund unter der Dose deutlich zu erkennen. Die Seiten der Dose sind ebenfalls gut ablesbar. Sogar der Boden der Dose ist in der Mitte durch zwei schräge Linien aus 3D-Punkten repräsentiert. Die Kante zwischen Untergrund und Kaffedose ist nicht ganz abgetastet, weil der haptische Sensor wegen seiner Größe nicht dichter an diese Kante heranbewegt werden konnte. Die Seiten- (b) und Frontansicht (c) zeigen die Dichte der 3D-Punkte an den Seiten der Kaffeedose. Die Ansicht von oben (d) zeigt parallele Linien von 3D-Punkten vom Untergrund und dem Boden der Kaffeedose in der Mitte. Ausserdem ist die runde Form der Dose in dieser Ansicht an den 3D-Punkten ablesbar.

In Abbildung 61 ist die Projektion der mit dem haptischen Sensor gewonnenen 3D-Punkte auf ein Bild der Kaffeedose zu sehen. Dabei sind auch 3D-Punkte dargestellt, die in dieser Ansicht auf der Rückseite bzw. hinter der Dose wären. Von den schräg nach links oben verlaufenden Linien von 3D-Punkten liegen einige Punkte hinter der Kaffeedose. Sie stammen vom Untergrund, scheinen aber auf der Seite der Dose zu liegen. In dieser Abbildung sind die Linien, die vom Abtasten des Dosenbodens stammen, deutlich zu erkennen. Sie liegen in der Mitte der Linien bzw. 3D-Punkte, die von Untergrund stammen.

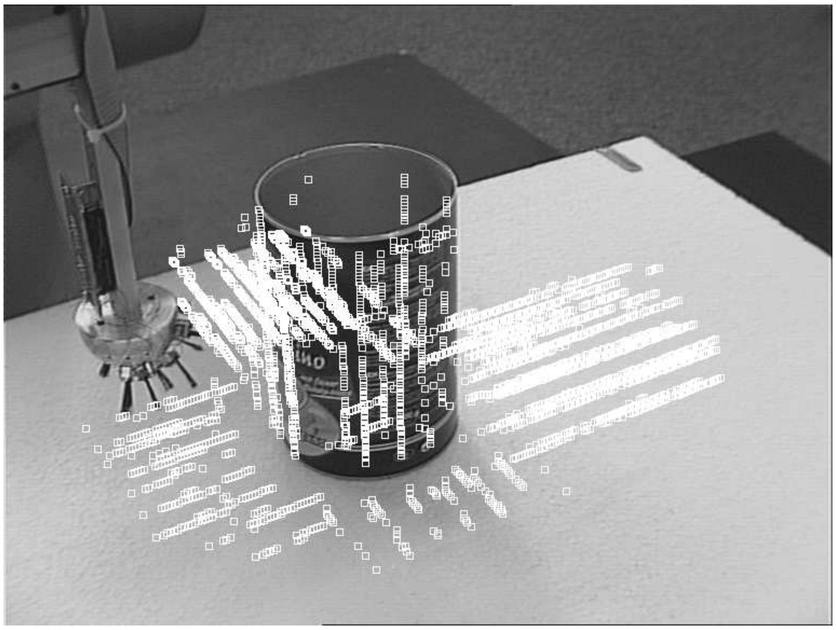


Abbildung 61: Die 3D-Punkte aus Abbildung 60 auf ein Bild der Kaffeedose projiziert

Insgesamt zeigen die in diesem Kapitel dargestellten Experimente die Leistungsfähigkeit des in dieser Arbeit beschriebenen Systems zur haptischen Exploration von Objekten.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse dieser Arbeit noch einmal zusammengefasst und es wird ein Ausblick auf Möglichkeiten zur Verwendung und Weiterentwicklung gegeben.

7.1 Ergebnisse

In Kapitel 3 werden die grundlegenden Eigenschaften der Haarsensoren untersucht. Form und Länge der Haarsensoren wirken sich auf die Messergebnisse aus, dies liegt hauptsächlich an der Flexibilität der Haare, die bei kurzen Haaren weniger Einfluss hat (Abschnitt 3.4). In Abschnitt 3.5 wurden zwei Methoden der Kalibration vorgestellt und untersucht. Die Beschaffenheit von Oberflächen, die mit den Haarsensoren abgetastet werden, haben einen wesentlichen Einfluss auf die Messergebnisse, wie Abschnitt 3.6 zeigt. Dabei wurde gezeigt, wie sich die Rauheit einer Oberfläche auf die Messwerte auswirkt. Damit ließe sich z.B. ein grobe Unterscheidung von Texturen anhand ihrer Rauheit realisieren. Weiterhin wurde deutlich gemacht, wie sich regelmäßige Strukturen auf einer abgetasteten Fläche mit Hilfe einer Frequenzanalyse ablesen lassen. In Kapitel 4 wird die Entwicklung eines neuen haptischen Sensors beschrieben. Dieser hat gegenüber dem alten Sensor die Vorteile, dass er durch seine Form die Exploration von Objekten unterstützt, eine flexible Plazierung der Haarsensoren gestattet und Sicherheit durch Redundanz bietet, weil jeweils mehrere Haarsensoren für dieselbe Aufgabe benutzt werden. Die Vorteile der Haarsensoren selbst werden im Vergleich mit anderen Sensortypen deutlich. Sie sind einfach und kostengünstig herzustellen und üben nur geringen Druck auf betastete Objekte aus. In Kapitel 5 wird ein System von Regeln beschrieben, dass die haptische Exploration mit den Haarsensoren steuert. Die Ergebnisse der Experimente, die in Kapitel 6 gemacht werden, bestätigen, dass das in dieser Arbeit entstandene System zur haptischen Exploration von Objekten gut funktioniert. Die Explorationsregeln können als Grundlage für die Verwendung neuronaler Netze zum Erlernen von Explorationsvorgängen dienen. Einer weitere Möglichkeit der Erweiterung des Systems zur haptischen Exploration ist die bessere Anpassung der Explorationsbewegungen an schräge Flächen. Die Extraktion von Geraden oder Flächen aus den Mengen von 3D-Punkten, die in dieser Arbeit vorliegen, ist kein triviales Problem. Beispielsweise werden in [34] orientierte Partikelsysteme beschrieben, die im 3D-Raum verstreute Daten interpolieren und so durchgängige Oberflächen schaffen.

7.2 Technische Ausstattung des haptischen Sensors

Die Geschwindigkeit der Signalübertragung vom Mikrocontroller zur Workstation ist gering. Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, ist diese Datenübertragung etwa 20 mal langsamer als die Aufnahme der Messdaten. Man könnte die Geschwindigkeit der Datenübertragung auf verschiedene Arten erhöhen. Neben der verbesserten Abtastqualität durch eine höhere Abtastfrequenz (siehe Abschnitt 3.6.4) könnte man durch eine höhere Übertragungsgeschwindigkeit auch die für die Exploration benötigte Zeit verringern (siehe auch 3.1). Mit leistungsstärkerer Hardware zur Übertragung digitaler Daten ließe sich die Geschwindigkeit am deutlichsten steigern. Die Verdoppelung der Übertragungsgeschwindigkeit durch die Verlagerung der Berechnung des Hochpasses aus dem Mikrocontroller auf die Workstation ist nicht möglich, weil bei der Analog/Digital-Wandlung die hohen Frequenzen im Originalsignal durch das Rauschen überdeckt werden. Wenn aus den Haarsensoren immer diejenigen für die Übertragung ausgewählt werden, die für die nächste beabsichtigte Bewegung wichtig sind, ließe sich ebenfalls Übertragungskapazität einsparen. Das Umschalten zwischen verschiedenen Haarsensoren zwischen zwei Bewegungen lässt sich in wenigen Millisekunden realisieren. Man kann also auf verschiedene Weisen die technischen Möglichkeiten der Haarsensoren besser ausnutzen, eine verbesserte Hardware zur Datenübertragung, wie sie in Bochum [29] genutzt wird, wäre sehr effektiv.

7.3 Kombination mit optischer Wahrnehmung

Bildverarbeitung ist gut geeignet, Kanten in Bildern zu detektieren und die Entfernung zu untersuchten Objekten ist in einem gewissen Rahmen nicht fest vorgegeben. D.h. man kann in Abhängigkeit von der Qualität der verwendeten Kameras Objekte auch in größerer Entfernung untersuchen. Der Nachteil haptischer Sensoren ist, dass sie Kontakt zu Objekten benötigen. Allerdings sind sie unabhängig von der Form oder Farbe eines Objektes und von den Lichtverhältnissen, die eine Kamera stark beeinflussen können. Daher kann sich eine Kombination haptischer und optischer Sensoren sehr gut gegenseitig ergänzen. Beispielsweise würde sich die Diplomarbeit von Daniel Wendorff [36] mit dieser Arbeit gut ergänzen. Das Ziel der Arbeit von Daniel Wendorff war es, mit Hilfe von Stereokameras haptischen Kontakt zu einem Objekt herzustellen. Dabei sind zwei Vorteile der Bildverarbeitung gegenüber haptischen Sensoren eingesetzt worden, die im Vergleich relativ große Unabhängigkeit von Entfernungen und die schnellere Erfassung eines großen Versuchsraumes. Für die genauere Erkundung eines Objektes kann nun das in dieser Arbeit entstandene System zur haptischen Exporation von Objekten genutzt werden, das genauere Daten über Form und Position zur Unterstützung der Bildverarbeitung liefert.

Abbildungsverzeichnis

Literatur

[1] Beyer, Hackel, Pieper, and Tiedge. *Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematische Statistik*. Teubner Verlagsgesellschaft Leibzig, 1976.

[2] Christopher M. Bishop. *Neural Networks for Pattern Recognition*. Clarendon Press, Oxford, 1997.

[3] C. Bregler, S. Manke, and A. Waibel. Bimodal sensor integration on the example of speech–reading, 1993. In Proc. of IEEE Int. Conf. on Neural Networks, San Francisco.

[4] Ilja N. Bronstein. *Taschenbuch der Mathematik*. Thun [u.a.] : Deutsch, 2001.

[5] Jörg Butterfaß. http://www.robotic.dlr.de/Joerg.Butterfass/, 2000. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

[6] Jörg Butterfaß. *Eine hochintegrierte multisensorielle Vier-Finger-Hand für Anwendungen in der Servicerobotik*. PhD thesis, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, Technische Universität Darmstadt, 2000.

[7] Claus Bystrom. *Technische Elektronik*. Carl Hanser Verlag München Wien, 1976.

[8] Mark R. Cutkosky and James M. Hyde. Manipulation Control with Dynamic Tactile Sensing. Technical report, Center for Design Research, Stanford University, California, 1993.

[9] Conrad Deutschland. Datenblatt. http://www.produktinfo.conrad.de/datenblaetter/300000-324999/302007-da-01-en-Mikrofonkapsel.pdf, 2002.

[10] Andreas Hierlemann et al. Smart single-chip gas sensor systems. *Nature*, 414:293–296, 2001.

[11] N. Hogan. Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part I - Theory. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol. 107, pp. 1-7*, 1985.

[12] Paul Horowitz and Winfield Hill. *Die hohe Schule der Elektronik, Teil 1, Analogtechnik*. Elektor-Verlag Aachen, 2.Auflage, 1996.

[13] R. D. Howe, W. Peine, D. A. Kontarinis, and J. S. Son. Remote Palpation Technology. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine 14(2), pp. 318-323*, 1995.

[14] Bernd Jaehne. *Digitale Bildverarbeitung, 4. Auflage*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997.

[15] R. S. Johansson et al. Tactile Sensory Coding in the Glabrous Skin of the Human Hand. *Trends in Neuroscience*, 56:550–564, 1984.

[16] Jan Jokusch, Jörg Walter, and Helge Ritter. A Tactile Sensor System for a Three-Fingered Robot Manipulator. In *Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA) IEEE*, 1997.

[17] Mark H. Lee. Tactile Sensing, New Directions, New Challenges. *The International Journal of Robotics Research, Vol. 19, No. 7, pp. 636-643*, July 2000.

[18] Eric Maël. Tactile sensor. http://www.neuroinformatik.ruhr-uni-bochum.de/VDM/research/robotics/Hardware/TactileSensor/contents.html, 1999.

[19] Heyo Mennenga. *Operationsverstärker*. Hüthig Verlag Heidelberg, 1981.

[20] Deutsches Kunststoff Museum. Schellack. http://www.deutsches-kunststoff-museum.de/optimal/dplast06.htm, 1998. NRW Forum für Kultur und Wissenschaft.

[21] American Memory Library of Congress. Edison Sound Recordings. http://memory.loc.gov/ammem/edhtml/edsndhm.html, 1999. Edison Cylinder Phonograph.

[22] Helen Petrie and Carla Harmsworth. Definition of haptic perception. http://phoenix.herts.ac.uk/SDRU/Chetz/haptic.html, 1998.

[23] William H. Press. *Numerical Recipes in C: the art of scientific computing*. Cambridge : Univ. Press, 1996.

[24] A. Riul Jr. et al. Artificial taste sensor: Efficient combination of sensors made from langmuir-blodgett films of conducting polymers and a ruthenium complex and self-assembled films of an azobenzene-containing polymer. *Langmuir, Vol. 18, pp. 239-245*, 2001.

[25] Michele Rucci and Paolo Dario. Active Exploration Procedures in Robotic Tactile Perception. Technical report, Advanced Robotics Technology and Systems Laboratory, Scuola Superiore S. Anna, Pisa, Italy, 1993.

[26] STÄUBLI S.A. *Roboter RX90 - CS7, Bedienungsanleitung*, 1993.

[27] STÄUBLI S.A. *Steuerschrank CS7, Bedienungsanleitung*, 1993.

[28] Uwe Schimpf. Fouriertransformation und spektrale Dichte. http://klimt.iwr.uni-heidelberg.de/PublicFG/ProjectB/CFT /dipluschimpf/node10.html, Fakultät für Physik und Astronomie, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 1996.

[29] Peer Schmidt. Entwicklung und Aufbau von taktiler Sensorik für eine Roboterhand. Diplomarbeit, Ruhr-Universität Bochum, Institut für Neuroinformatik, 1999.

[30] Peer Schmidt, Eric Maël, and Rolf P. Würtz. A Novel Sensor for Dynamic Tactile Information. Technical report, Institut für Neuroinformatik, Ruhr-Universität Bochum, 2000.

[31] Schneider, Kornrumpf, and Mohr. *Statistische Methodenlehre*. Oldenbourg, 2. Auflage, 1995.

[32] Martin Sielaff. Untersuchung grundlegender Methoden zur Integration verschiedenartiger Sensoren am Beispiel einer Kartengenerierung. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, Fakultät Informatik, 1997.

[33] Marketing-Kommunikation Siemens AG, Bereich Halbleiter. *C515C 8-Bit CMOS Microcontroller User's Manual 11.97*, 1997.

[34] Richard Szeliski and David Tonnesen. Surface Modeling with Oriented Particle Systems. *Cambridge Research Laboratory, Technical Report Series 91/14*, 1991.

[35] Ulrich Tietze and Christoph Schenk. *Halbleiter-Schaltungstechnik*. Springer Verlag, 1999.

[36] Daniel Wendorff. Integration visuell-aktorischer Kompetenzen im Wahrnehmungs-Handlungs-Zyklus. Diplomarbeit, Christian-Albrechts-Universität Kiel, Institut für Informatik, 2001.

[37] Jack Wilgus and Beverly Wilgus. Portable box camera obscuras. http://brightbytes.com/cosite/portable.html, 2001.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Zuerst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Gerald Sommer und dem Lehrstuhl für kognitive Systeme für die Ermöglichung dieser Arbeit und die angenehme Arbeitsatmosphäre bedanken.

Meinem Betreuer Norbert Krüger möchte ich für die sehr gute Betreuung und viele hilfreiche Tipps und Anregungen danken. Ebenso möchte ich ihm für die Bereitschaft danken, auch aus Schottland die Betreuung weiterzuführen.

Gerd Diesner möchte ich danken für seine technische Unterstützung und Geduld.

Mein Dank gilt auch Bodo Rosenhahn für viele Anregungen und die sehr hilfreiche Korrekturarbeit.

Weiter möchte ich Oliver Granert und Daniel Grest für ihre Unterstützung bei der Integration dieser Arbeit in die KiViGraP-Umgebung und das Korrekturlesen danken.

Ebenso danke ich Sandra für ihre Korrekturen und Tipps und ihre große Geduld mit mir.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir das Studium und diese Arbeit erst ermöglicht haben.

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Kiel, den 22. Juli 2002

....

Kord Ehmcke