



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

*Fakultät Technik und Informatik
Department Informatik*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Computer Science*

Nicolas Bänisch
Druckmessung für den Zweifingergreifer eines
Assistenzroboters

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Technische Informatik
am Department Informatik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr.Ing. Andreas Meisel
Zweitgutachter : Prof. Dr.Ing. Franz Korf

Abgegeben am 22. August 2011

Nicolas Bänisch

Thema der Bachelorarbeit

Druckmessung für den Zweifingergreifer eines Assistenzroboters

Stichworte

Assistenzroboter, Druckkraftsensor, Intelligentes Greifen, 2-Finger-Greifer, FSR-Sensor

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit dem Entwurf und der Implementierung eines Sensorkonzeptes für einen Zwei-Finger-Greifer eines Assistenzroboters. Das vorgestellte System verwendet einen Mikrocontroller, um die einzelnen Sensoren abzufragen und ihre Werte über einen seriellen Port in das restliche Robotersystem zu übertragen. Es wurde Wert auf eine einfache und robuste Konstruktion gelegt. Dabei wurden ausschließlich Komponenten vorgesehen, die ohne größere Schwierigkeiten im Fachhandel zu beschaffen sind. Ergebnisse von Test-Griffen werden zur Darstellung der Leistungsfähigkeit grafisch und textuell vorgestellt.

Nicolas Bänisch

Title of the paper

Pressure measurement for the two-finger gripper of a assistant robot

Keywords

robot assistant, force sensor, intelligent grasping, two-finger gripper, FSR sensor

Abstract

This bachelor's thesis describes the design and implementation of a sensor concept for a two-finger gripper of a robot assistant. The proposed system uses a microcontroller to retrieve the single sensors and transmit their values via a serial port to the rest of the robot system. The emphasis was placed on simple and robust construction. Results of the capabilities will be displayed textually and graphically.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	6
1. Einführung	8
1.1. Zielsetzung	9
1.2. Stand der Technik	9
1.3. Gliederung	12
2. Grundlagen	13
2.1. Assistenzroboter SCITOS G5	13
2.1.1. Hardware	14
2.1.2. Software	16
2.2. Drucksensor	16
2.2.1. Prinzipien der elektronischen Druckmessung	17
2.2.2. Resistive Druckmessung	17
2.2.3. FSR-Sensor	20
3. Anforderungsanalyse	22
3.1. Anforderungen	22
3.1.1. Notwendige Anforderungen	22
3.1.2. Wünschenswerte Anforderungen	22
3.2. Analyse und Erläuterung der Anforderungen	23
4. Entwurf	25
4.1. Hardwareauswahl	25
4.1.1. Sensor	25
4.1.2. Mikrocontroller	26
4.2. Konzept der Sensorabfrage	28
4.2.1. Datenfluss	30
4.2.2. Zeitaufwand einer Messung	31
4.3. Entwurf der Finger	32
4.3.1. Platzierung und Optimierung der FSR-Sensoren	32
4.3.2. Gehäuse	35

5. Mechanischer Aufbau	36
5.1. Finger	36
5.1.1. Gehäuse	37
5.1.2. Sensorplatte	38
5.1.3. Druckfläche aus Silikon	40
5.2. Sensorplatine	41
5.2.1. Aufbau	41
5.2.2. Verbindung zu den Sensoren und dem Mikrocontrollerboard	42
5.3. Mikrocontrollerplatine Arduino MEGA2650	43
5.4. Gehäuse der Elektronik	43
6. Softwareentwicklung	44
6.1. Software auf dem Mikrocontroller	44
6.1.1. Entwicklungsumgebung	44
6.1.2. Konfiguration des A/D Wandlers	45
6.1.3. Auslesen der Sensordaten	45
6.1.4. Umrechnung der Sensordaten	46
6.1.5. Kommunikation und Ausgabe	48
6.2. Visuelle Darstellung mit MatLab	50
7. Auswertung	52
7.1. Geschwindigkeit	52
7.2. Präzision	54
7.3. Positionserfassung	55
7.4. Kraftklassen	57
7.5. Test-Griffe von verschiedenen Objekten	57
7.5.1. Geometrische Objekte	58
7.5.2. Komplexe Objekte	60
8. Zusammenfassung	62
Literaturverzeichnis	63
A. Inhalt der beiliegenden DVD	66

Abbildungsverzeichnis

1.1. Der "Care-O-bot 3", ein vom Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung in Stuttgart entwickelter Serviceroboter [12]	8
1.2. Beispiele für Greifer: Zwei-Finger-Greifer Schnuk PG70 [24], Dreifingergreifhand Schunk Dextrous Hand SDH-2 [23] und i-Limb ProDigits von Touch Bionics [23] (v.l.n.r)	10
1.3. Künstliche Haut (bislang nur als Computergrafik [13])	11
2.1. Der Assistenzroboterarm	13
2.2. Gelenke des Assistenzroboterarm	15
2.3. Greifkraft in Abhängigkeit der Fingerlänge [24]	16
2.4. Verformung der Sensormembran unter Druck	18
2.5. Kapazitives Druckmessungsprinzip	19
2.6. Pizoelektrische Druckmessungsprinzip	19
2.7. Aufbau des FSR-Sensors [11]	20
2.8. Kraft- Widerstandskennlinie eines FSR-Sensors [11]	21
4.1. Draufsicht des Mikrocontrollerboards Arduino MEGA2650 [1]	26
4.2. Blockdiagramm des ATmega2560 [4]	27
4.3. FSR-Matrix eines Fingers	28
4.4. Messung mit Hilfe des Spannungsteilers	29
4.5. Kennlinien der Widerstandswerte eines FSR400, bei Verwendung verschiedener Vorwiderstände ($3K\Omega$, $10K\Omega$, $30K\Omega$, $47K\Omega$, $100K\Omega$) [10]	30
4.6. Vereinfachter Aufbau des Datenflusses	30
4.7. FSR400 Drucksensor der Firma Interlink Electronics [11]	32
4.8. Silikonmatte zur Druckverteilung und Optimierung	33
4.9. Kennlinie des FSR400 mit unterschiedlichen Silikon Konstruktionen	34
5.1. Das Gesamtsystem des Zwei-Finger-Greifers	36
5.2. Aufbau eines Fingers des Zwei-Finger-Greifers	37
5.3. Die acht Platten eines Fingers	37
5.4. Sensorplatte mit Schächten für die Anschlussfäden der FSR-Sensoren	38
5.5. Eingebaute Sensorplatte mit aufgeklebten Sensoren	39
5.6. Silikonmatte zur Druckverteilung	40

5.7. (A) Oberseite der Sensorplatine erstellt mit Lochmaster 3.0 (B) Oberseite der Sensorplatine (C) Unterseite der Sensorplatine	41
5.8. Durch die Stapelbaren Buchsenleisten nach oben gelegte Ports	42
5.9. Mikrocontrollerboard mit aufgesteckter Sensorplatine	43
6.1. Angenährte Funktion und Geraden an die Kennlinie des FSR400	48
6.2. Programmablaufplan der Software des Mikrocontrollers	50
6.3. Visuelle Darstellung mit MATLAB	51
7.1. Messung der Datenübertragungsgeschwindigkeit zwischen dem Mikrocontroller und einem Zielsystem	53
7.2. Messung der Präzisionen bei vier unterschiedlichen Kräfte mit jeweils 10 Messungen	54
7.3. Zylinderförmiges Glas	55
7.4. Visuelle Darstellung von Griffen eines Glases an vier verschiedenen Positionen des Greifers	56
7.5. Darstellung der Kräfte von Griffen verschiedener Objekte an verschiedenen Stellen des Greifers mit jeweils den gleichen Ausgangskräften 1 N, 5 N, 10 N, 15 N und 20 N	57
7.6. Geometrischen Objekten: Würfel, Quader, Kugel und Zylinder	58
7.7. Visuelle Darstellung von den gegriffenen geometrischen Objekten: Würfel, Quader, Kugel und Zylinder	59
7.8. Komplexe Objekten: Glas und Plastikhut	60
7.9. Visuelle Darstellung von den gegriffenen komplexen Objekten: Glas und Plastikhut	61

1. Einführung

Das heutige Leben ist umgeben von Robotern, welche in allen möglichen Bereichen eingesetzt werden [22]. Zwar ersetzen diese die menschlichen Tätigkeiten noch nicht, können aber manuell ausgeführte Prozesse wesentlich unterstützen.

Die rasante Entwicklung zeigt die Tendenz zu Assistenzrobotern. "Man schätzt, dass in ca. 30 Jahren mehr persönliche Roboter produziert werden als persönliche Computer." [21, S. 7] Denn gerade diesen Robotern, die unter dem Begriff 'Assistenzroboter' firmieren, wird ein enormes Entwicklungspotential bescheinigt. Besonders im Bereich des Gesundheitsmarktes sehen Experten großes Potential. So sollen die Roboter den Senioren bei der Arbeit im Haushalt helfen, wie zum Beispiel Staub saugen, an Medikamente erinnern, aber auch im Notfall den Arzt verständigen. Auch schwerbehinderte Menschen sind hier eine Zielgruppe für die Ingenieure der Robotik.



Abbildung 1.1.: Der "Care-O-bot 3", ein vom Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung in Stuttgart entwickelter Serviceroboter [12]

Um einem Assistenzroboter die Möglichkeit zu geben, in seiner Umwelt zu agieren, ist eine Hand eine zwingende Voraussetzung. Denn erst mit der Hand ist er in der Lage, wie der

Mensch, vielfältige Wahrnehmungsmöglichkeiten zu entwickeln. Ebenso können sie hierdurch zur aktiven Erkundung der Umwelt eingesetzt werden. Denn: nur das Wissen über den Zustand der Hand ermöglicht die Regelung ihres Verhaltens und damit die kontrollierte Reaktion auf Umwelteinflüsse. [vgl. 25] Unter diesen Aspekten, werden in dieser Arbeit Finger für einen Zwei-Finger-Parallelgreifer entwickelt, die dem Assistenzroboter zum intelligenterem Greifen verhelfen sollen.

1.1. Zielsetzung

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es ein System zu entwickeln, welches die Fähigkeiten eines Assistenzroboters erweitert. Es soll dem Assistenzroboter helfen, kraftabhängig zu greifen. Der Roboter merkt also mit Hilfe gescheiter Sensoren an seinen Fingern des Zwei-Finger-Greifers, mit welcher Kraft er gerade greift. Dabei sollen die Finger des Greifers die Unterscheidung mehrerer Kraftklassen (sehr klein, klein, mittel,) ermöglichen. So ist der Assistenzroboter, in der Lage eine Zuordnung einer Kraftklasse mit einem zugreifenden Objekt herzustellen. Durch den Einsatz des Roboters im menschlichen Umfeld, sollte der Kraftbereich der Klassen auch dem der menschlichen Hand bzw. Finger ähnlich sein. So entspricht der Bereich der Klassen in etwa 1 N - 60 N.

Des Weiteren sollen die Finger des Roboters ein Objektprofil erstellen. Dieses soll durch eine Sensor-Matrix realisiert werden, die es dann möglich macht, den Ort der wirkenden Kräfte zu lokalisieren und so die Position des gegriffenen Objektes ermitteln. Außerdem soll der Roboter durch das Objektprofil in der Lage sein, Rückschlüsse auf die Form des Objektes zu schließen und so bekannte Objekte wiedererkennen. Diese Informationen können dazu beitragen, kombiniert mit anderen Systemen, das Agieren in der Umwelt wesentlich zu verbessern.

Die Konstruktion der Finger, die so konstruiert werden müssen, dass Objekte sicher greifbar sind, die Messung des Druckes optimal möglich ist und genug Platz für die Elektronik zur Verfügung steht, sind außerdem wichtige Bestandteile der Arbeit. Es wird auch angestrebt die Datenübertragung und Datenverarbeitung möglichst schnell, einfach und zuverlässig durchzuführen.

1.2. Stand der Technik

Es wird viel im Bereich Robotik erforscht und entwickelt. Auch auf dem Gebiet der taktilen Erfassung gibt es bereits viele Lösungen und Verfahren, Objekte zu greifen und Druckkräfte zu messen. Oft ist die technische Umsetzung schon so gut, dass sie mit den menschlichen

Fähigkeiten verglichen wird. [vgl. 8] Allerdings ist die menschliche Hand bei der Entwicklung künstlicher Hände für die Robotik immer noch ein unerreichtes Vorbild an Beweglichkeit, Geschick und Greifsicherheit. Oft sind diese Fähigkeiten auch gar nicht gefordert. Guckt man in die Industrie, bei der häufig wiederholende Aufgaben in streng abgegrenzten und genau definierten Aufgaben zu lösen sind, handelt es sich hierbei oft um spezialisierte Greifer mit wenigen Freiheitsgraden und minimaler Sensorik. Hier sind Greifer und zu greifendes Objekt genau aufeinander abgestimmt, um so die Produktion optimal und zuverlässig auszuführen. [vgl. 14, S.14-16]

Greifer mit mehr Freiheitsgraden, die sich durch mehrere Finger und Gelenke ergeben und so der menschlichen Hand schon deutlich ähnlicher sind, dienen nicht nur einer Aufgabe. Das Ziel dieser Entwicklung sind individuelle Objektmanipulationen und kontrollierte Bewegungen verschiedener Objekte.



Abbildung 1.2.: Beispiele für Greifer: Zwei-Finger-Greifer Schnuk PG70 [24], Dreifingergreifhand Schunk Dextrous Hand SDH-2 [23] und i-Limb ProDigits von Touch Bionics [23] (v.l.n.r)

Geht man noch einen Schritt weiter, landet man früher oder später bei den Handprothesen. Hier geht es darum Menschen, den durch einen schweren Unfall oder bereits seit Geburt Teile der Hand oder auch Teile des Arms fehlen, die fehlenden Gliedmaßen durch bionische Prothesen (Siehe Abb. 1.2) zu ersetzen. Dabei spielt der kosmetische Effekt nur eine nebensächliche Rolle. Der Fokus geht auf den exakten Nachbau einer menschlichen Hand, um so dem Menschen einen optimalen Ersatz zu bieten und den Alltag ohne Handicap zu bewältigen. Natürlich ist man von diesen perfekten bionischen Prothesen noch weit entfernt, aber es existieren schon viele gute Modelle, die jetzt schon dem Menschen den Alltag deutlich erleichtern.

Wie weit man bei der Entwicklung menschlicher Hände schon ist, zeigt auch die Stanford University. Diese haben eine künstliche Haut entwickelt (siehe Abb. 1.3), die der Menschlichen, bezogen auf das Druckempfinden, sehr ähnlich ist. Hiermit soll es möglich sein auch sehr empfindliche Objekte, wie Gläser oder auch Eier zu greifen, ohne diese zu beschädigen [vgl. 13, S.862].

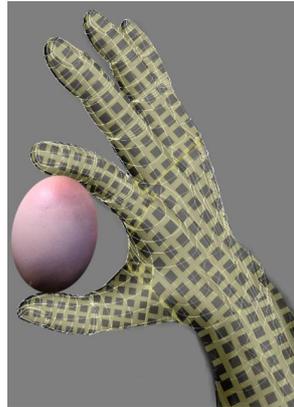


Abbildung 1.3.: Künstliche Haut (bislang nur als Computergrafik [13])

Auf taktile Sensorik, die Teil dieser Arbeit ist, hat sich die Firma Weiss Robotics spezialisiert. Diese bieten sogenannte taktile Aufnehmer für Parallelbackengreifer an, die für Handhabungstechnik konzipiert sind. [26]

1.3. Gliederung

Die vorliegende Bachelorarbeit ist in 8 Kapitel gegliedert. Die folgende Gliederung gibt zu jedem dieser Kapitel eine kurze Zusammenfassung der Inhalte wieder.

- 1. Einführung:** Hier wird eine kurze Einführung in das Thema der Bachelorarbeit gegeben. Dabei wird der heutigen Stand der Technik, bezogen auf Assistenzroboter und Greifer, vorgestellt. Desweiteren werden die Ziele der Arbeit festgehalten.
- 2. Grundlagen:** In diesem Kapitel werden die Komponenten, auf die die Bachelorarbeit aufbaut beschrieben und es wird eine Einführung in das Thema Druckmessung und Drucksensoren gegeben.
- 3. Anforderungsanalyse:** In diesem Kapitel werden anhand der gesetzten Ziele aus Kapitel 1, die Anforderungen der Architektur spezifiziert und analysiert.
- 4. Entwurf:** Dieses Kapitel beinhaltet den Entwurf des zu entwickelnden Systems unter Berücksichtigung der Anforderungen. Dazu wird eine Hardwareauswahl getroffen und ein Konzept der Sensorabfrage entwickelt.
- 5. Mechanischer Aufbau:** Kapitel 5 befasst sich mit dem mechanischem Aufbau. Es werden die entwickelten Komponenten ausführlich beschrieben und durch Skizzen veranschaulicht.
- 6. Softwareentwicklung:** Das Kapitel der Softwareentwicklung beschreibt die Software für den Mikrocontroller. Außerdem beinhaltet es eine mit MATLAB Entwickelte Visualisierung, welche auf jedem MATLAB-fähigem Computer ausführbar ist.
- 7. Auswertung:** Hier wird der Zwei-Finger-Greifer auf seine Funktionsweise getestet. Außerdem werden die Ergebnisse dieser Tests ausgewertet.
- 8. Zusammenfassung:** In dem letzten Kapitel wird die Bachelorarbeit zusammengefasst. Dabei wird das System kurz beschrieben und auf die erfolgreich umgesetzten Funktionen eingegangen.

2. Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Komponenten, auf die die Bachelorarbeit aufbaut beschrieben. Des Weiteren gibt es eine Einführung in das Thema Druck und Druckmessung und beschreibt die Funktionsweise des FSR-Sensors.

2.1. Assistenzroboter SCITOS G5

Der Assistenzroboter besteht aus einer Mobilen Plattform 'SCITOS G5' der Firma MetraLabs GmbH und einem 5-DOF-Roboterarm mit einem Zwei-Finger-Greifer der Firma SCHUNK (siehe [Abb.2.1](#)).



Abbildung 2.1.: Der Assistenzroboterarm

Er ist darauf ausgelegt, sich in einem menschengepägten Umfeld zu bewegen und dort Hilfstätigkeiten auszuführen (z.B. Servieren, Anreichen, Suchen, Bringen, etc.) [vgl. 16]. Nachfolgend wird zuerst auf die Hardware eingegangen und anschließend das Software System beschrieben.

2.1.1. Hardware

Hier werden die technischen Daten der Mobilen Plattform 'SCITOS G5', des Roboterarms und des Greifers aufgeführt.

Mobile Plattform SCITOS G5

Der SCITOS G5 wurde als multifunktionale Industrie- und Forschungsplattform entwickelt und kann in Abhängigkeit vom Einsatzgebiet mit unterschiedlichen Aufbauten bestückt werden. Die Plattform wiegt 60kg und verfügt über eine Nutzlast von 50kg. Der integrierte On-Board-Computer, ein Mini-ITX PC mit x86-Architektur, hat folgende technische Daten:

- 2.048 MB DDR2-RAM
- 250 GB HDD, SATA
- RS232, VGA, LVDI
- Ethernet 10/100 RJ-45
- 5 x USB 2.0
- 2 x Firewire
- WLAN: On-board IEEE 802.11a/b/g

Zur Energieversorgung sind zwei Batterien mit jeweils 12 Volt und 38/42 Amperestunden in Reihe geschaltet und ergeben eine Hauptbetriebsspannung von 25,2 bis 25.8 Volt bei voller Batterie. Das Ladegerät ist in die Mobile Plattform integriert. Des Weiteren verfügt der Scitos G5 über 24 integrierte Ultraschallsensoren zur Distanzmessung. Die Reichweite dieser beträgt ca. 20 - 300 cm. Die drei Räder zur Fortbewegung erreichen eine maximale Geschwindigkeit von 1,4 m/s. Die Rotationsgeschwindigkeit beträgt bis zu 360°/s. Hierbei ist aber zu bedenken, dass diese Werte sich nur auf die Mobile Plattform beziehen, ohne zusätzliche anbauten. Um die Geschwindigkeit und zurückgelegte Strecke zu bestimmen, steht ein Tickzähler zur Verfügung der pro Radumdrehung 460 Signale für die Messung bereitstellt. Für die Kollisionserkennung besitzt er einen umlaufenden Bumper.

Zusätzlich zur Grundausstattung verfügt er noch über einen an der Front montierten 2D-Laserscanner des Herstellers 'Leuze Electronis' (Modell ROTOSCAN RS4-2E). Dieser wird für präzise Entfernungsmessungen in der Ebene verwendet.

Roboterarm

Der auf der Mobilien Plattform montierte Roboterarm besteht aus Gelenkmodulen und Verbindungsstücken der Firma Schunk. Er besitzt zwei Rotationsgelenke, drei Knickgelenke und einen Zwei-Finger-Greifer (siehe Abb. 2.2).

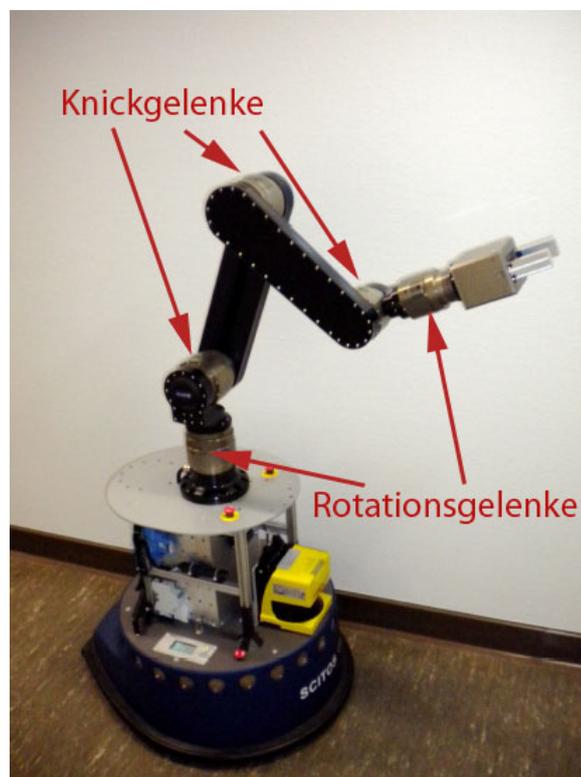


Abbildung 2.2.: Gelenke des Assistenzroboterarm

Der Arm ist vom Typ LWA¹ wiegt circa 13 kg, hat eine max. Nutzlast von 5 kg und besitzt eine Wiederholgenauigkeit² von 0.01 mm.

Der Arm verfügt über eine getrennte Energieversorgung für die Steuerelektronik und die Antriebsmotoren des Arms. Im Falle eines Spannungsabfalls greifen selbstständig die integrierten Magnetbremsen.

¹Lightweight Arm, auf Deutsch Leichtbauarm

²Die Wiederholgenauigkeit ist wie die Positioniergenauigkeit ein Genauigkeitskennwert von Robotern[18]

Zwei-Finger-Greifer

Bei dem Greifer handelt es sich um einen servoelektrischen 2-Finger-Parallelgreifer, Typ PG Baugröße 70 der Firma Schunk. Er hat ein Eigengewicht von 1,7 kg. Das empfohlene Werkstückgewicht beträgt 1 Kg. Die Greifkraft beläuft sich zwischen minimal 30 N und maximal 200 N, wobei diese von der Fingerlänge abhängig ist (siehe Abb. 2.3). Daraus resultiert auch die maximal zulässige Fingerlänge von 140 mm. Die maximale Greifbreite ist 7 cm. Die Wiederholgenauigkeit beträgt hier 0.05 mm. Die maximale Geschwindigkeit ist 82 mm/s mit einer maximalen Beschleunigung von 328 mm/s². [24]

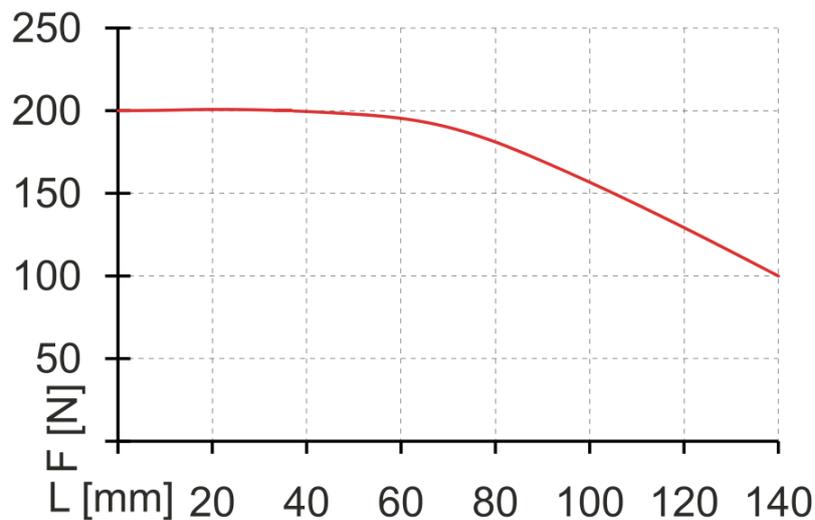


Abbildung 2.3.: Greifkraft in Abhängigkeit der Fingerlänge [24]

2.1.2. Software

Wie im Abschnitt Hardware beschrieben handelt es sich bei dem On-Board-Computer des SCITOS G5 um ein übliches System mit x86-Architektur. Auf diesem System ist das Betriebssystem Fedora, eine Linux Distribution, installiert. Um mit eigener Software auf die Funktionen der mobilen Plattform zuzugreifen, stellt MetraLabs eine Reihe von Bibliotheken zur Verfügung.

2.2. Drucksensor

Ein Sensor (Messfühler) erfasst zeitvariable physikalische nichtelektrische Zustandsgrößen. Der Sensor ist also ein technisches Bauteil, das eine physikalische nichtelektrische Zu-

standsgröße in eine elektrische Zustandsgröße umwandelt.[vgl. 19, S. 11] In diesem Fall wird der Druck, von den Drucksensoren erfasst und in elektrische Zustände umgewandelt.

Der Drucksensor gehört zu der Gruppe der Druckmessgeräte, welche die physikalische Größe Druck in eine elektrische Ausgangsgröße umwandelt. Dabei lässt sich Druck wie folgt beschreiben: Wirkt eine Kraft senkrecht und gleichmäßig verteilt auf eine Fläche, dann bezeichnet man den Quotienten aus dem Betrag der Kraft F zur Größe der Fläche A als Druck p .

$$p = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Die SI-Einheit von Druck ist Pascal (Einheitszeichen Pa), welche sich gemäß der Formel 2.1 als N/m^2 darstellen lässt.

Stellt man die Formel zur Kraft F um, lässt sich mithilfe eines Drucksensors auch die Kraft messen. Dabei muss die Sensorfläche A gleichmäßigem mit Druck p beaufschlagt werden. So wirkt auf den Sensor eine Kraft $F = p \cdot A$. Die Einheit von Kraft wird in Newton angegeben $N = \frac{kg \cdot m}{s^2}$. Welche Kraft welchem Druck entspricht, ist dabei allerdings von dem jeweiligen Drucksensor abhängig.

2.2.1. Prinzipien der elektronischen Druckmessung

Im folgenden werden vier Messtechniken und ihre Umsetzung vorgestellt.

2.2.2. Resistive Druckmessung

Das Prinzip der resistive Druckmessung beruht auf der Messung der Widerstandsänderung elektrischer Widerstände durch druckabhängige Verformung [7]. Hier wird ausgenutzt, dass sich der Widerstand eines Leiters bei Dehnung und Stauchung ändert.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

Umgesetzt wird das Prinzip meist mit einem Grundkörper, der sich unter Druck kontrolliert verformt. Auf diesem Grundkörper befinden sich dann Dehnungsmessstreifen (DMS), die die Verformung messen (siehe Abb. 2.4).

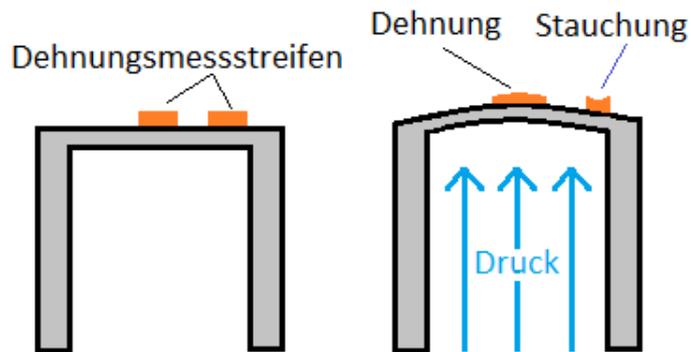


Abbildung 2.4.: Verformung der Sensormembran unter Druck

Piezoresistive Druckmessung

Piezo ist griechisch und steht für Druck. Bei der Piezoresistiven Druckmessung ändert sich aufgrund einer Kräfteinwirkung der spezifische Widerstand. Das Prinzip entspricht der des resistiven Druckmessungsverfahrens, allerdings bestehen die DMS aus Halbleitermaterial, überwiegend aus Silizium. Das Widerstandsmaterial befindet sich in einer dünnen Silizium-Membran. Durch eine druckabhängige Verformung der Membran und darauf ein diffundierte verformungsabhängige Widerstände, kommt es zur Ausbildung einer elektrischen Spannung. Piezoresistive Sensoren aus Silizium lassen sich sehr klein und preiswert herstellen. [20]

Kapazitive Druckmessung

Das Prinzip der kapazitiven Druckmessung beruht auf der Messung der vom Plattenabstand d abhängigen Kapazität C eines Kondensators. Die Kapazität eines Zweiplattenkondensators ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$C = \epsilon * \frac{A}{d}$$

Umgesetzt wird das Prinzip der kapazitiven Druckmessung mit einem Grundkörper, dessen metallische oder leitend beschichtete Membran eine der beiden Platten eines Plattenkondensators bildet. Wird die Membran unter Druck ausgelenkt, verringert sich der Plattenabstand des Kondensators, wodurch dessen Kapazität - bei bleibender Plattenfläche A und Dielektrizitätskonstante ϵ - zunimmt (siehe Abb. 2.5). Auf diese Weise lassen sich Drücke mit hoher Empfindlichkeit messen. [7]

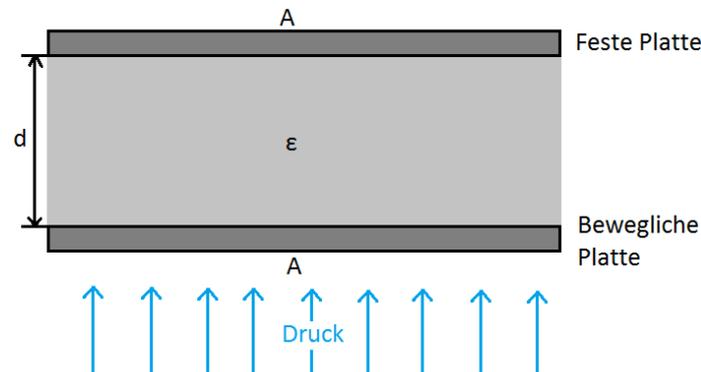


Abbildung 2.5.: Kapazitives Druckmessprinzip

Piezoelektrische Druckmessung

Die piezoelektrische Druckmessung beruht auf dem gleichnamigen kristallphysikalischen Effekt, der z.B. bei Quarzkristallen auftritt. Der Druck, der auf ein piezoelektrisches Material ausgeübt wird, verursacht eine mechanische Deformation und somit eine Verschiebung der Ionen im Kristall, wodurch sich an der Oberfläche elektrische Ladung proportional zur Kraft bildet. Allerdings zeigen die Messelemente nahezu keine Verformung (typischer Weise werden die Messelemente nur um wenige Mikrometer komprimiert). Die dabei entstandene Ladung wird durch einen Ladungsverstärker in eine proportionale elektrische Spannung umgeformt.

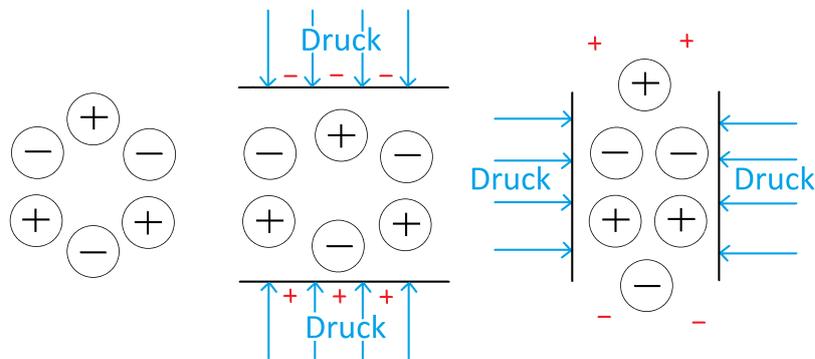


Abbildung 2.6.: Piezoelektrische Druckmessungsprinzip

Besonders vorteilhaft sind die hohe Empfindlichkeit und der Einsatz bei hohen Temperaturen, was einen Messbereich piezoelektrischer Sensoren bis zu 1000°C ermöglicht. Der wohl einzige Nachteil piezoelektrischer Sensoren, ist der Einsatz für rein statische Messungen. Eine statische Kraft führt zu einer definierten Ladungsmenge an der Oberfläche des piezoelektrischen Materials. Durch den Einsatz konventioneller Elektronik und nicht perfekt

isolierender Materialien, gehen kontinuierlich Ladungen verloren, was letztendlich zu einem kontinuierlichen Signalabfall führt. [7]

2.2.3. FSR-Sensor

Der Force Sensing Resistor, kurz FSR-Sensor, ist ein kraftabhängiger Widerstand und gehört zu der Gruppe der piezoresistiven Druckmessung. Er ändert in Abhängigkeit der auf ihn lastenden Kraft seine elektrische Leitfähigkeit. Er ist aus drei Komponenten bzw. Schichten aufgebaut (siehe Abb. 2.7), die nachfolgend aufgelistet und beschrieben werden:

1. Die **Trägerfolie**, auf ihrer Innenseite ist die schwarze FSR-Schicht aufgedruckt, ein halbleitendes Polymer.
2. Die **Klebeschicht**, eine doppelseitig klebende Folie genau definierter Dicke. Ihre Aufgaben bestehen darin, die Komponenten des Sensors fest miteinander zu verbinden und einen konstanten Abstand zwischen den Trägerfolien sicherzustellen.
3. Die **Trägerfolie** für die Elektroden. Auf ihrer Innenseite sind die Elektroden aufgedruckt, deren Finger ineinander verschachtelt sind, sich aber nicht berühren.

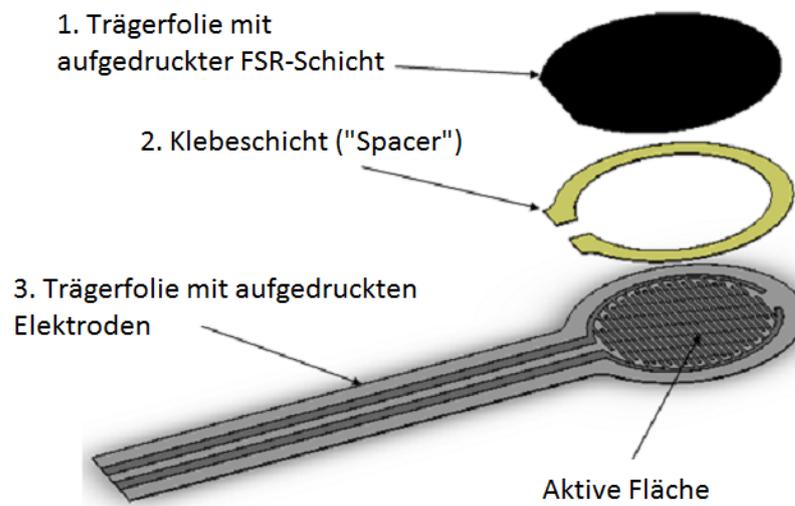


Abbildung 2.7.: Aufbau des FSR-Sensors [11]

Der FSR-Sensor ändert seinen elektrischen Widerstand in Abhängigkeit von der auf die aktive Oberfläche eingeleiteten Kraft. Die Elektroden kontaktieren dann die FSR-Schicht und

zwischen den Kontaktfingern werden Widerstandsbrücken aufgebaut. Je höher die eingeleitete Kraft ist, desto mehr Widerstandsbrücken werden geschlossen und parallel geschaltet.

Kraft und Widerstand

Die Kraft- Widerstandskennlinie in Abb. 2.8 verdeutlicht das grundsätzliche Verhalten des FSR-Sensors. Um den Kurvenverlauf besser interpretieren zu können, ist die Kurve im doppelt logarithmischen Maßstab gezeichnet. Die Kennlinie eines FSR-Sensor verläuft ähnlich einer invertierten Exponentialfunktion (siehe Abb. 2.8).

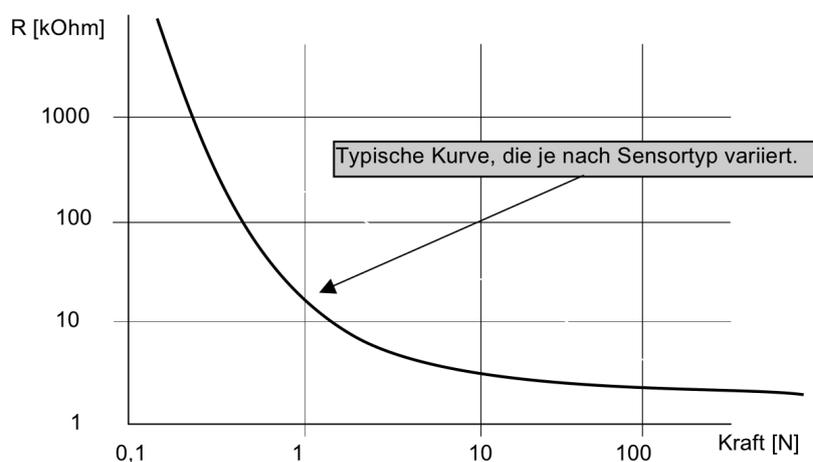


Abbildung 2.8.: Kraft- Widerstandskennlinie eines FSR-Sensors [11]

Im Bereich niedriger Kräfte verhält sich der FSR - Sensor fast wie ein Schalter. Die Einschaltchwelle ist dadurch gekennzeichnet, dass der Widerstand ziemlich rasch von über $1M\Omega$ auf ca. $100k\Omega$ abfällt. Das ist der Beginn des dynamischen Bereichs, der ähnlich einer Exponentialkurve verläuft.

Im Bereich hoher Kräfte verläßt die Kennlinie die Exponentialkurve und nähert sich der Sättigung, wo eine Erhöhung der Kraft nur noch eine sehr geringe oder gar keine Änderung des Widerstands mehr zur Folge hat. Für den in Abb. 2.8 vermessenen FSR-Sensor liegt diese Kraft jenseits von 100 N. [11]

3. Anforderungsanalyse

In diesem Kapitel werden anhand der gesetzten Ziele (siehe [1.1](#)) die Anforderungen der Architektur aufgelistet. Anschließend werden diese erläutert und analysiert.

3.1. Anforderungen

Die Anforderungen werden in notwendige und wünschenswerte Anforderungen eingeteilt. Notwendige Anforderungen an den Greifen müssen erfüllt werden, während die wünschenswerten Anforderungen als Option zu verstehen sind.

3.1.1. Notwendige Anforderungen

1. Aufnahme von verschiedenen Druckstärken.
2. Es soll eine gute Präzision erzielt werden.
3. Eine Positionserfassung von Objekten in dem Greifer sollte möglich sein.
4. Es sollten 50 Messergebnisse pro Sekunde verfügbar sein.
5. Die Belastbarkeit des Gehäuses der Finger muss eine Greifkraft von mindestens 200 N (maximal Kraft des Greifers) standhalten.
6. Schnelle und zuverlässige Übertragung der Sensordaten.

3.1.2. Wünschenswerte Anforderungen

1. Der Greifer sollte eine große Masse an Objekten greifen können.
2. Die Größe der Finger des Greifers sollten sich an den menschlichen orientieren.
3. Die Greiffläche sollte flexibel und robust sein und eine rutschfeste Eigenschaft haben.

4. Die Hardware und Verbindungsleitung zur Datenübertragung sollte den Roboterarm in seiner Beweglichkeit nicht einschränken.
5. Der Mikrocontoller sollte noch Ressourcen für evtl. spätere Komponenten am Greifer, über haben.
6. Die einzelnen Komponenten sollten einfach ausgetauscht werden können.

3.2. Analyse und Erläuterung der Anforderungen

Durch die Erläuterung der Anforderungen soll zum einen ausgeschlossen werden, dass es zu Missverständnissen kommt und zum anderen soll es dem Verständnis der gewählten Anforderungen dienen.

Da es sich hier nicht um einen Greifer handelt, der speziell für eine Aufgabe vorgesehen ist, sondern einen, der den Menschen im Alltag assistieren soll, muss die Größe und Form der Finger so gewählt werden, dass möglichst eine vielfältige Masse an Gegenstände gegriffen werden kann [W1]. Deshalb sollten sich diese an dem menschlichen Fingern orientieren [W2]. Da die Größe und Form allerdings auch sehr von der Wahl der Sensoren abhängt, um den benötigten Platz für die Installation und Montage zu schaffen, kann auf diese Anforderungen nur bedingt Rücksicht genommen werden. Wichtig bei dem Entwurf der Finger ist allerdings, dass das Gehäuse die maximale Greifkraft des Greifers von 200 N standhalten muss [N5].

Die Greiffläche, die Fläche mit dem Objekte gegriffen werden, sollte flexibel und elastisch sein, um beim Greifen den zu greifenden Gegenstand nicht zu beschädigen. Um auch eine Beschädigung des Greifers und dessen Finger auszuschließen, sollte das Material des Gehäuses, sowie die Greifflächen robust und widerstandsfähig gehalten werden. Um das Greifen und Halten eines Objektes zu erleichtern, sollten die Greifflächen außerdem rutschfeste Eigenschaften besitzen [W3].

Der Kern der Bachelorarbeit ist die Sensorik, da diese die Umwandlung der physikalischen Größe Druck bzw. Kraft in elektrische Signale wandelt. Dadurch nimmt die Auswahl des Sensors, mit den dazugehörenden Anforderungen, großen Einfluss auf das Design und den Systemaufbau. Als Grundvoraussetzung für die Bestimmung verschiedener Drücke, müssen die Sensoren auch in der Lage sein einen größeren Messbereich von Drücken abzudecken und verschiedene Druckstärken wahrzunehmen [N1]. Da sich der Assitenzroboter im menschlichen Umfeld bewegt, sollte der Druckbereich auch dem der menschlichen Hände ähneln. Dieser beläuft sich zwischen $< 1\text{N}$ bis ca. 60 N . [3] Um die Druckmessung mit Hilfe des Sensors anständig durchzuführen, muss nicht nur der Sensor mit einer guten Präzision

arbeiten **[N2]**, sondern auch die Anzahl der Messungen pro Sekunde sollte hoch sein. Angestrebt werden 50 Messungen pro Sekunde. So ist auch bei maximaler Geschwindigkeit des Greifers (siehe. 2.1.1) eine Reaktion möglich **[N4]**. Des Weiteren muss die Verbindung zum Roboter diese Anzahl an Messungen zuverlässig übertragen können **[N6]**.

Damit der Nutzer des Greifers die Möglichkeit hat, anhand der Sensoren und deren Messwerten ein Objektprofil zu erzeugen und die Lage des Objektes am Greifer zu bestimmen, werden mehrere Sensoren pro Druckfläche benötigt **[N3]**. Durch die Tatsache, dass mehrere Sensoren benötigt werden, ist die Größe eines Sensors möglichst klein zu halten, um eine hohe Dichte der Sensoren auf eine möglichst kleine Fläche zu erhalten.

Eine einfache Installation und Montage ist anzustreben, damit zum Beispiel im Falle eines Defektes, auch ohne viel Hintergrundwissen, Teile erneuert werden können **[W6]**. Die Komponenten sollten den Roboter in seiner Beweglichkeit nicht einschränken **[W4]**.

4. Entwurf

Nachdem nun die Anforderungen an den Zwei-Finger-Greifer festgelegt sind, muss eine Hardwareauswahl getroffen werden. Hier steht besonders die Auswahl des Sensors im Vordergrund. Des Weiteren wird ein geeignetes Konzept zur Sensorabfrage erarbeitet. Stehen die eben genannten Dinge fest, wird ein Entwurf der Finger erstellt, der im Kapitel „[Mechanischer Aufbau](#)“ umgesetzt wird.

4.1. Hardwareauswahl

In diesem Kapitel wurde entschieden, welche Sensoren zur Druckmessung eingesetzt werden (siehe [4.1.1](#)). Außerdem wurde ein geeigneter Mikrocontoller (siehe [4.1.2](#)) zur Datenverarbeitung ausgewählt.

4.1.1. Sensor

Mit der Auswahl des Sensors werden zugleich viele weitere Designentscheidungen getroffen. Der Aufbau des Greifers, das Verfahren zum Erfassen der Sensordaten und auch was in der späteren Software realisierbar ist, sind Dinge, die stark von der Wahl des Sensors abhängig sind. In dieser Arbeit fällt die Entscheidung auf den FSR-Sensor. Der FSR-Sensor ist durch seine kleine Oberfläche und seine gerade mal 0.3 mm Dicke optimal geeignet, um eine hohe Anzahl Sensoren zu verbauen. Der Messbereich liegt zwischen 1 N und 100 N. Da es sich hier um zwei Finger handelt und im Normalfall auch beide Finger zum Greifen benutzt werden, können auch Drücke von bis zu 200 N aufgenommen werden und ist somit in der Lage die Druckkraft des Greifers voll auszuschöpfen. Als Nachteil ist hier zu erwähnen, dass die Druckmessung nicht linear verläuft (vgl. [2.2.3](#)). Allerdings werden hierdurch keine Anforderungen verletzt.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass sich die Werte des FSR-Sensoren über eine einfache Matrix-Schaltung und A/D Wandler aufnehmen lassen. Auch der Aspekt, dass diese Sensoren relativ preiswert (unter 10 €) und einfach zu beschaffen sind, ist gerade bei hoher Stückzahl vorteilhaft.

Aber nicht nur aus den eben genannten Gründen spricht einiges für diese Sensoren, auch durch schon vorhandener Arbeiten, wie [2], [15] und [17], die ähnliche Aufgaben mit Hilfe dieser Sensoren gelöst haben, ist ein Grund zu dieser Wahl.

4.1.2. Mikrocontroller

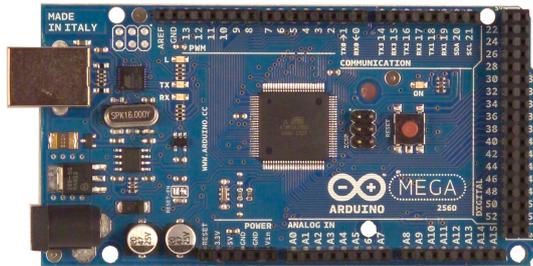


Abbildung 4.1.: Draufsicht des Mikrocontrollerboards Arduino MEGA2560 [1]

Der Mikrocontroller hat die Aufgabe die Daten der Sensoren zu erfassen und an den On-Board-Computer des SCITOS G5 zu übertragen. Aus diesem Grund ist die Wahl des Mikrocontrollers stark beeinflusst durch die verwendeten Sensoren.

In dieser Arbeit wird für die eben genannten Aufgaben der Arduino MEGA2560 eingesetzt. Hierbei handelt es sich um ein Mikrocontroller Board basierend auf einem ATmega2560. Das Blockschaltbild des ATmega2560 ist in Abbildung 4.2 zu sehen. Durch seine hohe Anzahl an 54 digitalen I/O Ports und 16 analogen Eingängen ist er bestens ausgerüstet, um die vielen Sensoren zu steuern und die Sensordaten zu erfassen. Der integrierte A/D Wandler hat eine Auflösung von 10-Bit, d.h. er liefert Messwerte im Bereich 0 bis 1023.

Durch die Verwendung eines solchen Boards, entfällt nicht nur das sonst anfällige löten, sondern man baut auf ein stabil funktionierendes Board auf. Des Weiteren bietet es für zusätzliche Arbeiten am Greifer Kapazitäten für den Anschluss von weiteren Komponenten. Das zwischenspeichern der Messdaten, welche sich pro Messung auf 48 Werte (siehe 4.2) mit jeweils 4 Byte beläuft, können ohne Probleme im 8000 Byte großem SRAM abgelegt werden. Als weiterer Vorteil sollte erwähnt werden, dass die Ports über Buchsenleisten „offen gelegt“ sind. So lassen sich die Ein- und Ausgänge des Boards, mit den dazugehörigen Stecker (Stiftsteckern), einfach nutzen.

Als Kommunikation bietet der Arduino MEGA2560 eine Serielle Schnittstelle mit einer Baudrate von bis zu 115200 *Bit/s* an. [4] Die nachfolgende Rechnung zeigt, dass diese Geschwindigkeit für die Übertragung von 50 Messungen ausreichend ist: Mit der folgende Einstellungen von 8 Datenbits, no Parity, 1 Stopbit, werden bei der Übertragung von einem

Byte 10 Bit benötigt. Rechnet man das Start und Stoppbit raus, erhält man einen maximalen Datendurchsatz von 92.160 Bit/s . Da es sich bei den Messwerten um 10-Bit Werte handelt und somit meist um dreistellige Zahlen, werden inklusive Trennzeichen 4 Byte also 32 Bit pro Wert bei der Übertragung benötigt. Bei 50 Messungen die Sekunde ergibt das die Rechnung: $50 \text{ Messungen} * 48 \text{ Werte} * 32 \text{ Bit} = 76800 \text{ Bit/s}$. Damit ist die geforderte Datenrate bezogen auf die Übertragung gewährleistet.

Für die Stromversorgung verfügt das Board über drei Möglichkeiten, den USB-Port, einem AC/DC Adapter oder eine Batterie. In dieser Arbeit wird auf die Stromversorgung über den USB-Port zurückgegriffen. Dieses bietet sich an, da über den USB-Port auch die Verbindung zum On-Board-Computer des SCITOS G5 hergestellt wird.

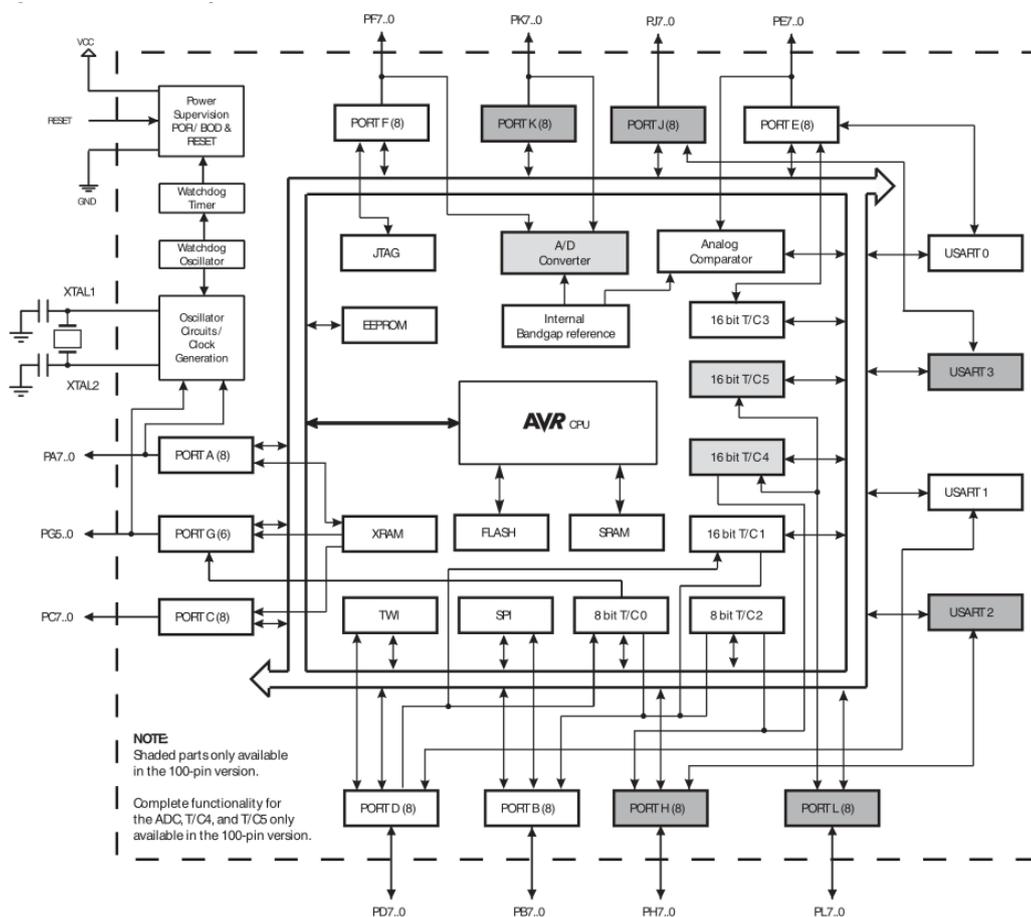


Abbildung 4.2.: Blockdiagramm des ATmega2560 [4]

4.2. Konzept der Sensorabfrage

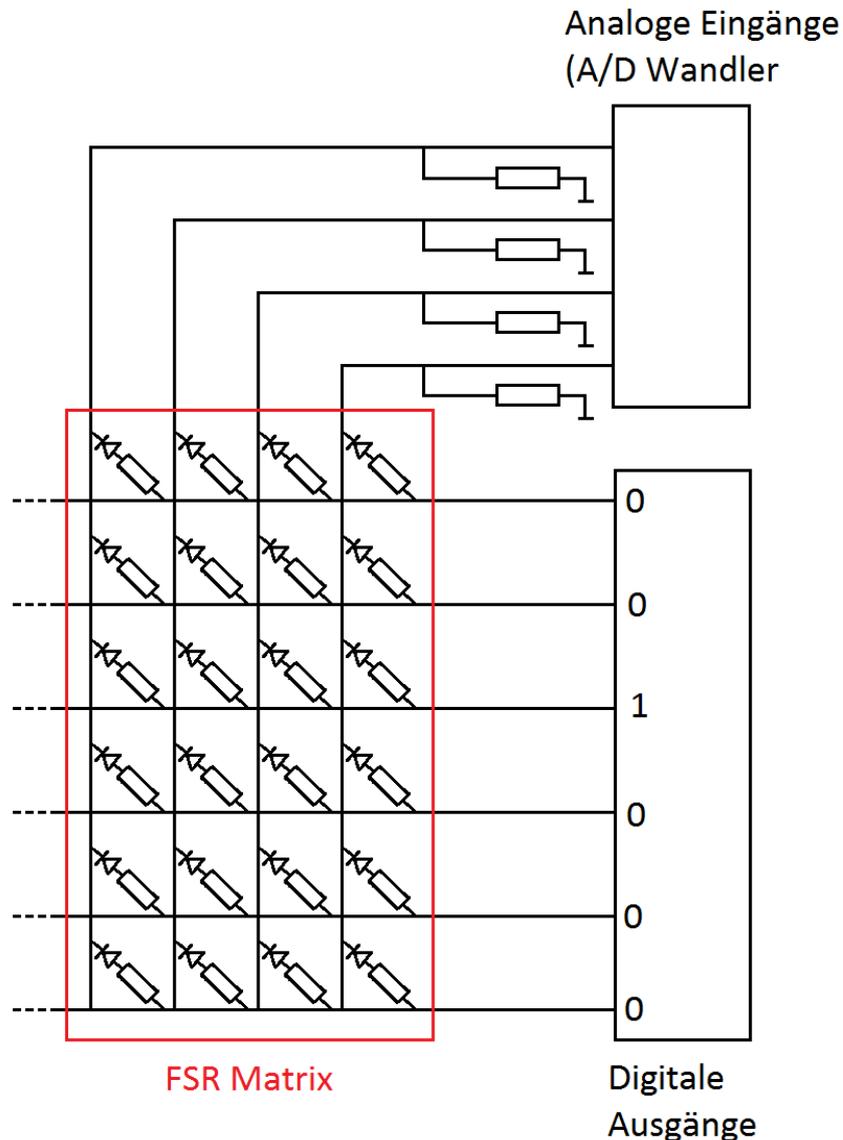


Abbildung 4.3.: FSR-Matrix eines Fingers

Um eine hohe Dichte aktiver Sensorflächen zu erreichen, damit die Erstellung eines Objekt Profils und die Positionsbestimmung des Objektes möglich sind, werden die Sensoren in einer Matrix angeordnet. Zur Auswertung dieser werden mithilfe von Zeilen und Spalten die einzelnen Sensoren ausgewählt. Durch die digitalen Ports des Mikrocontrollers wird eine Zeile auf Spannung gesetzt. Hierzu wird an den Ausgänge eine „Logische Eins“ durch eine

Reihe von „Logische Nullen“ geschoben, so dass jeweils immer nur ein Ausgang und somit nur eine Zeile aktiviert wird. Die einzelnen Sensoren der aktiven Zeile werden nun iterativ durch den A/D Wandler, dessen Ports sich in den Spalten befinden, ausgelesen. Wurden alle Werte der Sensoren einer Zeile digitalisiert, wird die nächste Zeile, durch das weiter schieben der „Logische Eins“, aktiv geschaltet.

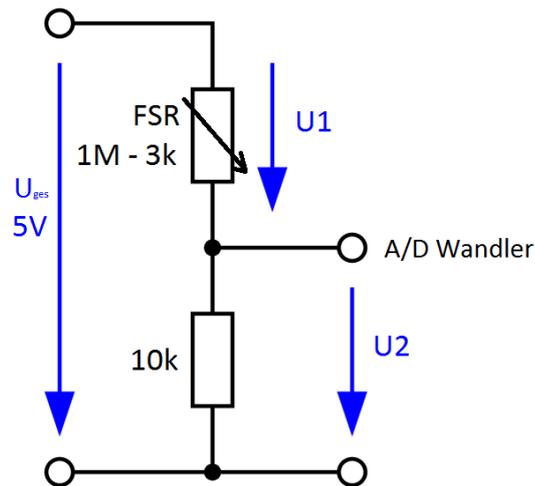


Abbildung 4.4.: Messung mit Hilfe des Spannungsteilers

Die Messung mit dem A/D Wandler geschieht mit Hilfe von einfachen unbelasteten Spannungsteilerschaltungen. In Abbildung 4.4 ist zur Veranschaulichung ein einzelner Spannungsteiler abgebildet. Der Vorwiderstand $R1$ bildet den Eingangswiderstand, mit der Größe von $10 k\Omega$. Mithilfe der zwei Widerstände, wird die Gesamtspannung U_{ges} von $5 V$, abhängig von der Größe des FSR, in zwei Teilspannungen aufgeteilt. Ist der Widerstand an dem FRS sehr hoch $> 1 M\Omega$, fällt fast die gesamte Spannung an diesem ab. Dadurch wird fast keine Spannung mehr von dem A/D Wandler gemessen. Wird nun Kraft auf den FSR-Sensor ausgeübt, verkleinern sich der Widerstand des FSR-Sensors und die Spannung $U1$ sinkt, was zur Folge hat, dass die Spannung $U2$ steigt.

Die Verwendung eines $10 k\Omega$ Widerstandswertes, ist auf die Messwterergebnisse der Abbildung 4.5 zurückzuführen. Da der Verlauf der Kraft, gerade im Anfangsbereich, den Ansprüchen der Anforderungen entspricht. Daraus folgt, dass an $U2$ maximal $4 V$ gemessen werden kann.

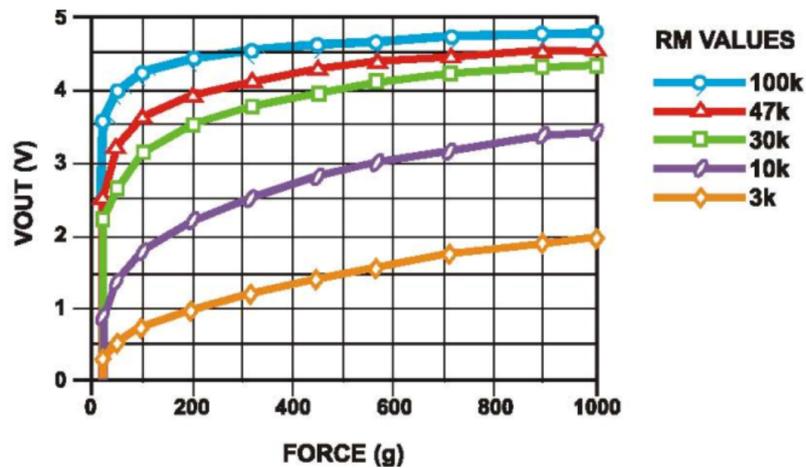


Abbildung 4.5.: Kennlinien der Widerstandswerte eines FSR400, bei Verwendung verschiedener Vorwiderstände ($3K\Omega$, $10K\Omega$, $30K\Omega$, $47K\Omega$, $100K\Omega$) [10]

Um die inaktiven Reihen von der Schaltung abzukoppeln, wird hinter jedem Sensor eine Diode geschaltet. So wird sichergestellt, dass die abgeschalteten Sensoren die Messung nicht beeinflussen. Hierbei ist zu beachten, dass die Diode, in diesem Fall eine Silizium-Diode, eine Verlustspannung von ca. $0,7\text{ V}$ hat.[6] Dementsprechend ist die maximal zu messende Spannung U_2 nur noch ca. $3,3\text{ V}$.

4.2.1. Datenfluss

Der Datenfluss beschreibt den Prozess von der Aufnahme der einzelnen Kräfte, über die Verarbeitung im Mikrocontroller bis hin zum Empfang und Auswertung der Daten im On-Board-Computer des SCITOS G5 (siehe Abb. 4.6). Hierbei handelt es sich um eine vereinfachte Darstellung und zeigt nicht alle Komponenten und Signalpfade des Mikrocontrollers.

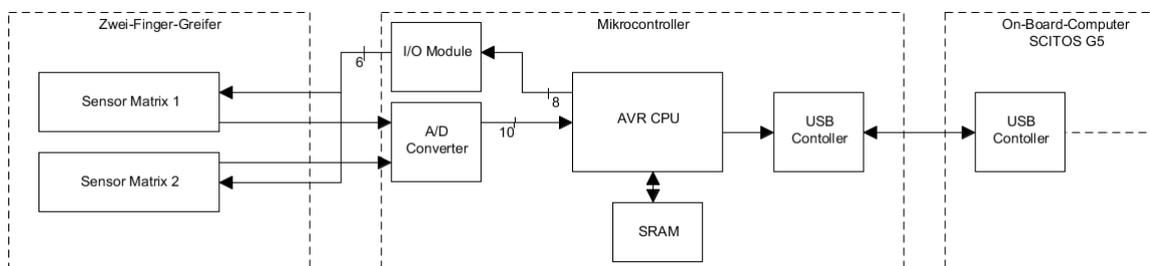


Abbildung 4.6.: Vereinfachter Aufbau des Datenflusses

Die Sensoren der Sensor-Matrizen sind mit einem I/O Modul des Mikrocontrollers verbunden. Durch diese wird ein 6-Bit Steuersignal geschickt, um die einzelnen Sensor-Reihen anzusprechen. In diesem 6-Bit Signal ist immer nur ein Bit auf „1“ gesetzt. Dadurch, dass die beide Matrizen dieselbe Steuerleitung besitzen, ist immer eine Zeile pro Matrix aktiv (vgl. 4.2). Das Abfragen geschieht mit Hilfe des sich auf dem Mikrocontroller befindenden A/D Wandlers (siehe Abb. 4.6). Jede Spalte der Matrix (jeweils vier pro Matrix) ist an einem Port des A/D Wandlers angeschlossen. So kann er iterativ die analogen Signale der Sensoren abfragen und in digitale 10-Bit Werte wandeln.

Die 10-Bit Signale werden im SRAM des Mikrocontrollers abgelegt, bis die Messung aller Sensoren beider Matrizen abgeschlossen sind. Stehen alle 48 Messergebnisse zur Verfügung, werden diese über den USB Controller an den On-Board-Computer des SCITOS G5 verschickt und können dort ausgewertet werden. Alle Prozesse die im Mikrocontroller ablaufen, werden von der AVR CPU gesteuert.

4.2.2. Zeitaufwand einer Messung

Hier wird analysiert, wie lange eine Messung, unter den oben genannten Voraussetzungen, in Anspruch nimmt. Eine Messung bedeutet in diesem Fall, die kompletten 48 Sensoren der beiden Matrizen auszulesen. Sehr Zeitkritisch ist hier die Analog Digital Wandlung, welche laut Datenblatt, abhängig von den Einstellungen, $13 \mu s - 260 \mu s$ dauert.

Um die genaue Zeit der A/D Wandlung zu bestimmen, wird eine Entscheidung getroffen, wie der ADC¹ arbeiten soll und damit ein Kompromiss aus Geschwindig- und Genauigkeit getroffen. Da am jeweiligem analogem Port immer nur eine A/D Wandlung stattfindet, wird der Modus zur Wandlung „*Single Conversion*“ genutzt. Dieser braucht für die Wandlung 13 Zyklen. Allerdings ist hier zu berücksichtigen, dass die Taktfrequenz des Mikrocontrollers (8 MHz) zu schnell ist. Aus diesem Grund gibt es einen „*Prescaler*“ auf Deutsch Vorteiler, der den Takt durch Teilungsfaktoren verringert. Dem Datenblatt des Mikrocontroller zur Folge [4], wird ein Takt zwischen 50 kHz und 200 kHz empfohlen. Die Teilungsfaktoren des Vorteilers sind in Tabelle 4.1 aufgeführt.

Teilungsfaktoren	2	4	8	16	32	64	128
------------------	---	---	---	----	----	----	-----

Tabelle 4.1.: Teilungsfaktoren des Vorteilers

Mit dem Faktor 32 beträgt die Frequenz 250 KHz und liegt so über dem empfohlenen 200 KHz. Aus diesem Grund wird als Vorteil 64 gewählt und damit hat der ADC eine Taktfrequenz von 125 KHz. Dieses entspricht $8 \mu s$ pro Zyklus und $104 \mu s$ für eine Wandlung mit 13

¹Analog Digital Converter (ADC)

Zyklen. Multipliziert man dieses jetzt mit der Anzahl der A/D Wandlungen pro Messung, also $48 * 104 + \mu s$, ergibt sich eine Gesamtzeit für die Wandlung aller analogen Signale von $4,992 ms \approx 5ms$.

Hinzu kommt noch, dass beim Anwählen einer Spalte ca. $1ms$ gewartet werden muss, damit sich das Ausgangssignal stabilisiert. Erst anschließend kann die ganze Reihe am Stück ausgelesen werden. Da es sich um sechs Spalten pro Messvorgang handelt, müssen weitere $6ms$ eingeplant werden. Weitere Arbeiten, die von dem Mikrocontroller ausgeführt werden, sind hier aufgrund der hohen Taktrate von $8MHz$ vernachlässigt.

Als Ergebnis wird $11ms$ pro Messung aller 48 Sensoren festgehalten. Dieses bedeutet, dass pro Sekunde ca. 90 Messungen stattfinden können.

4.3. Entwurf der Finger

Das Fingerpaar des Zwei-Finger-Greifers ist eine Handanfertigung und besteht aus zwei Klötzen die jeweils als Finger dienen. Diese sind parallel zueinander angebracht und identisch aufgebaut. In den Fingern sind alle Sensoren untergebracht, die zur Druckmessung verwendet werden.

4.3.1. Platzierung und Optimierung der FSR-Sensoren

In diesem Abschnitt, geht es um die in Abbildung 4.7 dargestellten FSR-Sensoren. Um das Konzept der Sensorabfrage, welches unter 4.2 vorgestellt wird, umzusetzen und die gestellten Anforderungen zu erfüllen, benötigt es einer guten Platzierung der Sensoren und optimale Bedingungen.

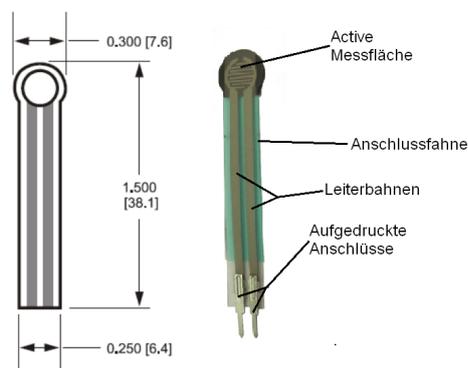


Abbildung 4.7.: FSR400 Drucksensor der Firma Interlink Electronics [11]

Platzierung

Um eine hohe Dichte an Sensoren, in diesem Fall 6×4 , auf engstem Raum zu erzeugen, sollten die aktiven Flächen² am besten direkt aneinander grenzen. Da der FSR400, wie auch seine verwandten Modelle, eine runde Bauform besitzt und nicht nur aus der aktiven Fläche besteht, ist dieses leider nicht möglich. Legt man die Sensoren direkt nebeneinander, entsteht zwischen den Sensoren ein Abstand von $2,6 \text{ mm}$, an der keine Kräfte gemessen werden können. Des Weiteren entsteht eine tote Fläche jeweils über und unter den Sensoren. Hinzu kommt in diesem Fall noch, dass die Anschlussfahne des jeweiligen Sensors weggeführt werden muss. Berücksichtigt man hier den maximalen Biegeradius der Sensoren [vgl. 11], entsteht zwischen zwei übereinander liegenden eine weitere tote Fläche mit der Breite von 5 mm . Um das damit entstehende Problem, dass Kräfte nicht wahrgenommen werden können, zu lösen, wird über die Sensoren eine Silikonmatte, hier auch als Druckmatte bezeichnet, gelegt (siehe Abb. 4.8 (A) u. (B)). Diese ermöglicht es auch Kräfte über den toten Flächen wahrzunehmen, indem sie die Kraft auf die umliegenden Sensoren verteilt.

Auf Silikon wird zurückgegriffen, da es nicht nur elastisch ist und sich somit gut für die Druckverteilung eignet, sondern auch da es eine gewollte rutschfeste Eigenschaft besitzt. Auch in den Arbeiten [15] und [17] wurde dieses Material verwendet.

Aus den oben erwähnten Maßen ergibt sich eine aktive Gesamtfläche pro Finger, die zur Druckaufnahme in der Lage ist, von $60 \text{ mm} \times 33 \text{ mm}$. So entspricht die Breite der von zwei Finger eines Menschen³.

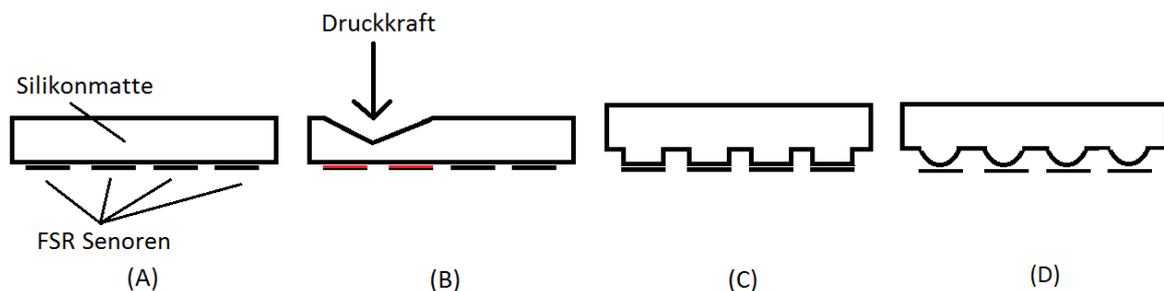


Abbildung 4.8.: Silikonmatte zur Druckverteilung und Optimierung

²Bezeichnet die Fläche die zur Druckaufnahme verwendet werden kann.

³Menschliche Fingerbreite ist in etwa $1,85 \text{ cm}$

Optimierung des Ansprechverhaltens

Zur Aufnahme von Sensorkennlinien, wurde mithilfe einer Waage die Kraft, die auf den Sensor wirkt, bestimmt. In die Formel der Kraft $F = m * g$ wurde für g die Fallbeschleunigung der Erde $= 9,80665 m/s^2$ eingesetzt, so dass die Masse, welche die Waage anzeigt, durch einsetzen in die Formel die Kraft in Newton heraus gibt. Durch dieses Verfahren konnte einem analogem Wert eine Kraft zugeordnet werden.

Um das Ansprechverhalten der Sensoren zu optimieren, ist die Silikonmatte um Noppen erweitert (siehe Abb. 4.8 (C)). So befinden sich unter der Matte 24 Noppen, pro Sensor eine. Diese Noppen sind dem Sensor angepasst und bewirken das der Druck besser auf die Sensoren übertragen werden kann. Besonders wenn sich der Druckpunkt zwischen zwei Sensoren befindet, sind die Werte ohne Noppen schwächer und variieren stark. Da es sich hauptsächlich um greifbare Objekte im menschlichen Umfeld handeln soll, wurde versucht das Ansprechverhalten gerade bei geringem Druck noch zu verbessern. Hierzu wurden die Noppen Versuchsweise als eine Halbkugel (siehe Abb. 4.8 (D)) hergestellt. Da sich hier allerdings, wie in Abbildung 4.9 zu erkennen ist, kein großer Vorteil ergeben hat und die Herstellung deutlich aufwendiger ist, sind die Noppen Flach gehalten.

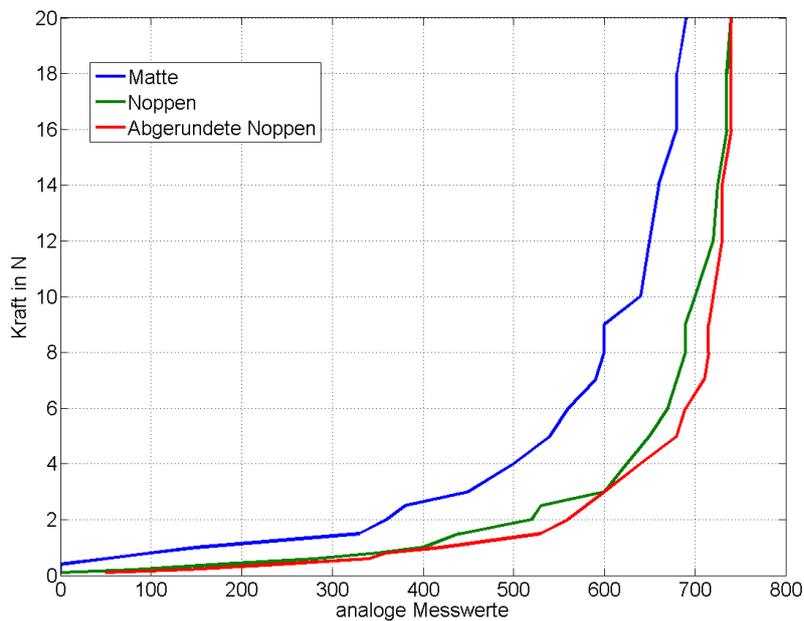


Abbildung 4.9.: Kennlinie des FSR400 mit unterschiedlichen Silikon Konstruktionen

4.3.2. Gehäuse

Das Gehäuse der Finger ist so konstruiert, dass es die eben beschriebene Sensor-Matrix befestigen kann. Da die Größe der Sensor-Matrix bereits feststeht, gibt es nicht viel Spielraum bei der Entwicklung des Gehäuses. Die Maße des Gehäuses betragen $45 \text{ mm} * 89 \text{ mm} * 24 \text{ mm}$. Die Breite beträgt somit 12 mm mehr als die der Sensor-Matrix. Der Höhenunterschied der Finger, bezogen auf die Sensor-Matrix, kommt zustande, da sich die Halterung für die Montage an dem Greifer, unter der aktiven Fläche befindet. Außerdem wird noch Platz für die fast 40 mm langen Anschlussfahnen benötigt, die auch maßgeblich zur Tiefe des Finger beitragen.

Die Halterung der Finger, für die Montage an den Greifer, ist so gefertigt, dass bei der Zusammenführung der beiden Finger ein 2 mm breiter Spalt zwischen den zwei Gehäusen entsteht. Dieser Spalt ist als Spielraum für die Silikonmatten vorgesehen.

Damit sich das Gehäuse nicht verformt und auch der Kraft des Greifers von 200 N standhält, wird das komplette Gehäuse aus Aluminium gefertigt.

Die Schaltungselektronik der Sensoren befindet sich nicht mit im Finger, sondern wie im Kapitel „[Mechanischer Aufbau](#)“ in der Abbildung [5.9](#) zu sehen ist, zusammen mit dem Mikrocontrollerboard in einer Box. Der hauptsächliche Grund hierfür ist, dass die Finger, wie schon erwähnt, so klein wie möglich zu halten sind.

5. Mechanischer Aufbau

In diesem Kapitel geht es ausschließlich darum, wie das System zur Druckaufnahme, welches in dem vorigem Kapitel vorgestellt wurde, aufgebaut ist. Es wird auf die verwendeten Baumaterialien, Bauteilen und Hardwarekomponenten eingegangen, die für das vollständige System verbaut sind. Diese detailgetreue Darstellung, in Form eines Bauplanes, ermöglicht es anderen Personen den mechanischen Aufbau besser zu verstehen, die Bauweise nachzuvollziehen und dient als Hilfestellung bei ähnlichen Projekten oder Reparaturen und Erweiterungen.

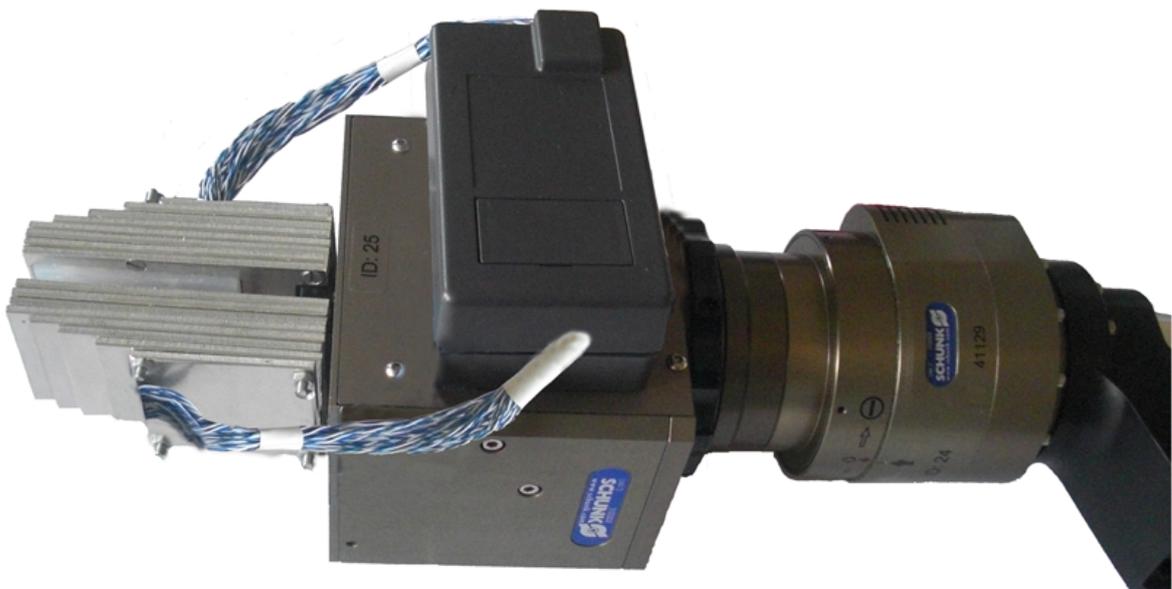


Abbildung 5.1.: Das Gesamtsystem des Zwei-Finger-Greifers

5.1. Finger

Ein Finger besteht aus einem Gehäuse in dem sich eine Sensorplatte befindet, auf der die Sensoren der Sensor-Matrix aufgeklebt sind. Über der Sensorplatte befindet sich eine Sili-

konmatte, welche als Druckfläche dient. An der Rückseite führt der Kabelstrang, zur Steuerung und zum Auslesen der Sensorwerte, zur Sensorplatine.

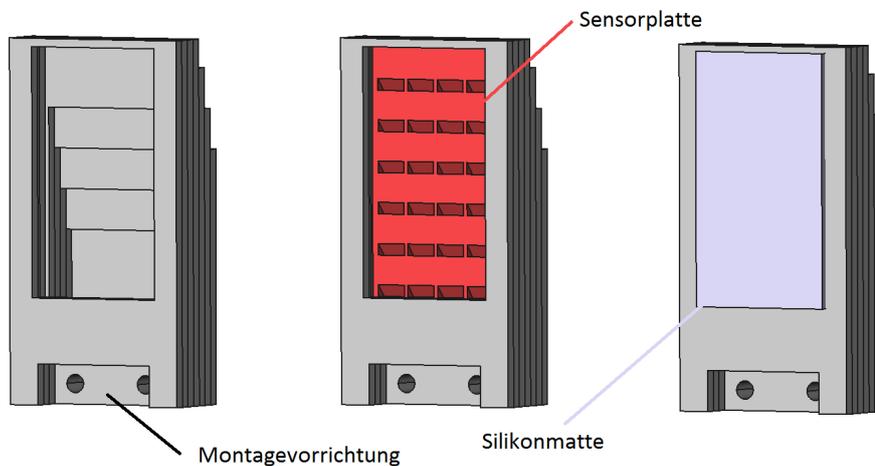


Abbildung 5.2.: Aufbau eines Fingers des Zwei-Finger-Greifers

5.1.1. Gehäuse

Wie dem Entwurf zu entnehmen ist, wird das Gehäuse des Fingers aus Aluminium gefertigt. Dieses bietet nicht nur genügend Stabilität, sondern lässt sich auch leicht verarbeiten. Da es sich wie angesprochen um eine Handanfertigung handelt, ist das von großem Vorteil. Um den Bau des Gehäuses einfach zu gestalten, wird es nicht aus einem Block gefertigt, sondern aus acht aufeinander liegenden Platten mit der Stärke von jeweils 3 mm (siehe Abb. 5.3). Ein weiterer positiver Effekt der Plattenbauweise ist, dass auch die Montage und Verkabelung deutlich vereinfacht wird. Durch die acht Platten kommt man auf die Tiefe des Fingers von 24 mm . Auch die Höhe von 89 mm und Breite von 45 mm , wurden so wie in dem Entwurf unter 4 umgesetzt.

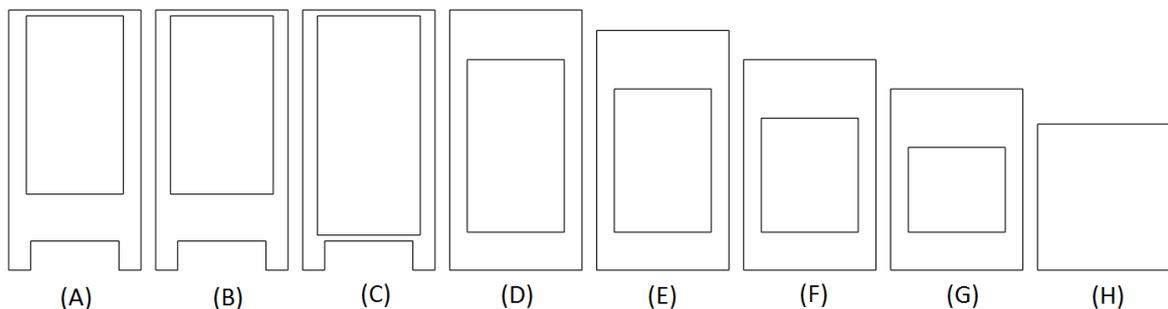


Abbildung 5.3.: Die acht Platten eines Fingers

An der Front befindet sich eine $35\text{ mm} * 61\text{ mm} * 6\text{ mm}$ große Einfassung (siehe 5.3 (A) und (B)), die Platz für die Silikonmatte bietet. Die ersten 3 mm weisen dabei eine Verengung in der Breite von 1 mm auf. Die Verengung diente dazu, die Druckmatte in der Fassung zu halten. Die Platzierung der Druckmatte wurde so weit wie möglich nach oben verlegt, damit das Gehäuse das Greifen nicht beeinträchtigt. So ist ausschließlich noch ein 2 mm breiter Haltesteg vorhanden (siehe 5.3 (A)-(C)).

In die Platte in Abbildung 5.3 (C) wird die Sensorplatte mit den Sensoren eingelassen. Um das Durchrutschen der Sensorplatte zu verhindern, ist die Ausfräsung der Platte (D) im Gegensatz zu (C) nicht nur wie deutlich zu sehen in der Höhe geringer, sondern auch in der Breite um jeweils ein 1 mm schmaler.

Die Ausfräsung der Platten (D) bis (G) dient als Schacht, in dem nicht nur die Anschlussfahnen der FSR-Sensoren Platz finden, sondern auch die Anschlusskabel der Sensoren entlangführen, um an der Rückseite des Gehäuse heraus geführt werden zu können. Hierzu befindet sich oben ein kleiner Schacht zwischen der Abschlussplatte (H) und der letzten Schachtplatte (G), der gerade genug Platz für die Kabel bietet.

Alle Platten sind durch vier M3 Senkschrauben miteinander befestigt. Für die Montage der Finger an dem Greifer, befindet sich an der Front des Fingers eine Fassung mit zwei Bohrungen (siehe 5.3 (A)-(C)), passend zu den Befestigungslöchern des Greifers. So werden die Finger mit dem Greifer durch zwei 5 mm Schrauben verbunden.

5.1.2. Sensorplatte

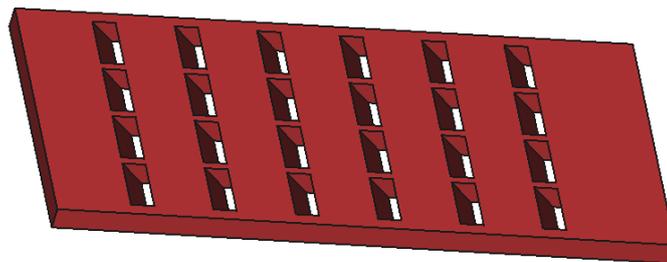


Abbildung 5.4.: Sensorplatte mit Schächten für die Anschlussfahnen der FSR-Sensoren

Die Sensoren der $6 * 4$ Sensor-Matrix werden auf der sogenannte Sensorplatte, die in Abbildung 5.4 zusehen ist, befestigt. Die Platte hat die Maße von $34\text{ mm} * 75\text{ mm} * 3\text{ mm}$ und besteht aus dem Kunststoff Polystyrol. Das Material ist sehr stabil und lässt sich dennoch leicht verarbeiten. Dieses ist besonders wichtig, da in die Sensorplatte 45° geneigte Schächte gearbeitet sind um die Anschlussfahnen der FSR-Sensoren nach hinten zu leiten.

Die Neigung ist in diesem Fall erforderlich, da die FSR-Sensoren einen bestimmten Biegeradius nicht überschreiten dürfen.

Jedem Sensor stehen $8\text{ mm} * 10\text{ mm}$ Platz für die Sensorfläche und dem Schacht zur Abführung der Anschlüsse zur Verfügung. Abgesehen von dem unterem Teil der Platte, wo nochmals 14 mm Platz ist, werden auch an den anderen drei Seiten jeweils 1 mm extra eingeplant.

Die Sensoren besitzen eine Klebende Trägerfolie, die auch zur Befestigung der Sensoren auf der Platte dient. Platziert werden die Sensoren genau an die Kante der Schächte, so dass die Trägerfolie der FSR-Sensoren bis an die Kante des Schachtes reicht. In der Horizontalen, wird der Sensor mittig auf der ihm zu Verfügung stehenden Fläche platziert. Die in den Finger eingebaute und mit Sensoren bestückte Platte ist in [Abbildung 5.5](#) zu erkennen.



Abbildung 5.5.: Eingebaute Sensorplatte mit aufgeklebten Sensoren

5.1.3. Druckfläche aus Silikon

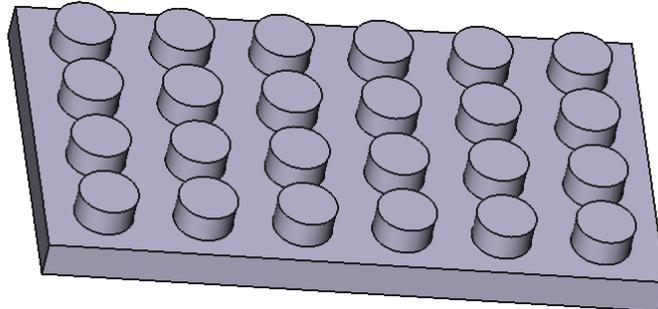


Abbildung 5.6.: Silikonmatte zur Druckverteilung

Die Druckfläche aus Silikon, auch als Silikonmatte bezeichnet, befindet sich an der Innenseite der Finger (siehe Abb. 5.2), in der unter 5.1.1 beschrieben Ausfräsung. Die Angesprochenen Noppen, haben einen Durchmesser von 5 mm , welches der aktiven Fläche des Sensors entspricht. Die Höhe einer Noppe beträgt 3 mm . Da die Noppen sich genau über den Sensoren befinden, ist die Platzierung der Noppen genau die der Sensoren und unter 5.1.2 zu entnehmen. Die Fläche der Matte hat die Maße $34\text{ mm} * 61\text{ mm}$, mit einer Tiefe, von 8 mm (Noppen mit eingerechnet).

Von den 8 mm reichen 2 mm über das Gehäuse der Finger hinaus, da bei der Montage an dem Greifer (siehe 5.1.1) zwei Millimeter Abstand zwischen den Fingern gehalten wird. Der Rest der überstehenden Silikonmatte wird beim zusammenführen der Finger, durch die Elastizität des Silikons, verdrängt. Durch diesen Buffer wird vermieden, dass beim greifen von Objekte bei höheren Kräften, das Objekt nicht auf das Gehäuse aufsetzten und eine weitere Kraftmessung verhindert.

5.2. Sensorplatine

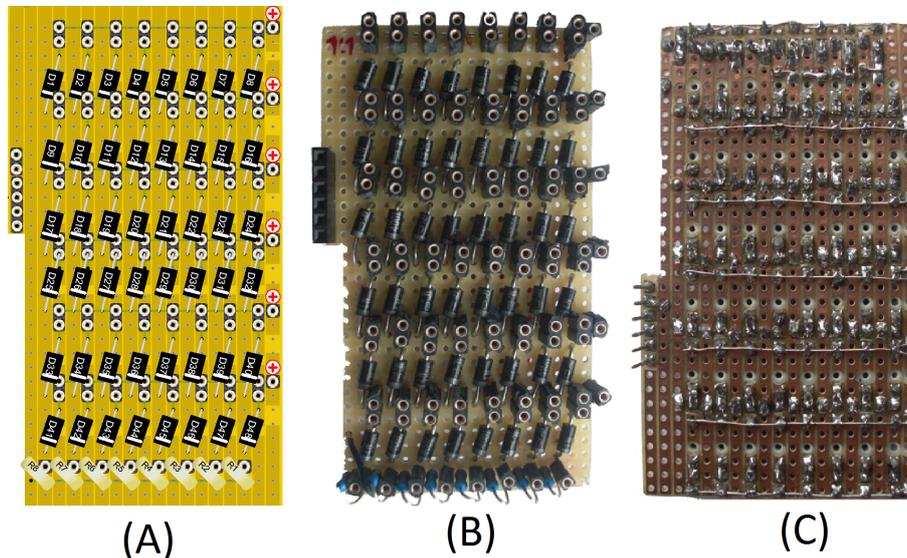


Abbildung 5.7.: (A) Oberseite der Sensorplatine erstellt mit Lochmaster 3.0 (B) Oberseite der Sensorplatine (C) Unterseite der Sensorplatine

Die Sensorplatine dient als Schnittstelle zwischen den Fingern und dem Mikrocontroller und enthält keinerlei Bedienelemente oder Anzeigen. Die Aufgabe der Platine besteht nur darin, die Signale zwischen den Fingern und dem Mikrocontroller zu routen. Bei der Platine handelt es sich um eine Streifenraster-Platine (L x B) 90 mm * 50 mm aus Hartpapier. Alle später erwähnten Bauteile sind auf diese Platine gelötet.

5.2.1. Aufbau

Auf der Sensorplatine befindet sich die, wie unter 4.2 vorgestellte Matrix Schaltung. An der rechten Seite befinden sich die sechs Buchsen zum Anschluss der digitalen Ausgänge des Mikrocontrollers. Die Doppelbuchsen sind jeweils für den Anschluss eines Sensors vorgesehen, die wie folgend beschrieben aufgebaut sind:

$$M_{\text{Buchsen}} = \begin{pmatrix} B_{11} & \dots & B_{18} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{61} & \dots & B_{68} \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

Die Matrix $M_{Buchsen}$ stellt eine Abbildung der 48 Anschlüsse, nummeriert von oben links bis unten rechts, dar. In dieser Matrix sind die beiden Matrizen, $M_{Finger1}$ und $M_{Finger2}$ der Finger enthalten. Wie diese beiden Abgebildet sind, ist in den folgen Matrizen aus 5.2 zu entnehmen.

$$M_{Finger1} = \begin{pmatrix} B_{11} & \dots & B_{14} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{61} & \dots & B_{64} \end{pmatrix}, M_{Finger2} = \begin{pmatrix} B_{15} & \dots & B_{18} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{65} & \dots & B_{68} \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

In der Abbildung 5.7 sind außerdem die Dioden hinter jeder Sensor Anschlussbuchse und am Ende jeder Reihe der $10K\Omega$ Widerstand zu erkennen. Des Weiteren befinden sich am Ende jeder Reihe die Buchsen, die als Messpunkt für den Spannungswert dienen und jeweils mit einem analogen Port des Mikrocontrollers verbunden sind.

5.2.2. Verbindung zu den Sensoren und dem Mikrocontrollerboard

Zur Verbindung der Sensoren, werden zweiadrige Flachbandkabel mit je 0.02 mm^2 Querschnitt verwendet. So verlassen 96 Adern die Sensorplatine Richtung Finger. Um Platz zu sparen, werden die Adern der Kabel an die Sensoren gelötet. Zum Anschluss an der Sensorplatine sind zwei Pins einer Stiftleiste am Kabel angebracht. So lässt sich die Verbindung zu den Fingern ohne Probleme von der Platine demontieren.

Die Verbindung der I/O Ports (rotes Kabel) und analogen Ports (weißes Kabel) zwischen der Platine und dem Mikrocontroller werden mithilfe von jeweils einem Pin einer Stiftleiste hergestellt (siehe Abb. 5.9). Zur Befestigung ist die Sensorplatine mit sogenannten stapelbaren Buchsenleisten auf das Arduino MEGA2650 Board gesteckt. Dadurch wird nicht nur erreicht, dass eine einfache De- und Montage möglich ist, sondern es werden außerdem die Ports die sich sonst unter der Sensorplatine befinden würden, nach oben gereicht. Die Abbildung 5.8 zeigt, welche Ports durch die Buchsenleisten nach Oben gelegten sind. Außerdem wird durch das aufstecken, die Masse zwischen der Platine und dem Mikrocontoller verbunden.



Abbildung 5.8.: Durch die Stapelbaren Buchsenleisten nach oben gelegte Ports

5.3. Mikrocontrollerplatine Arduino MEGA2650

Der Arduino MEGA2650 ist unter [4.1.2](#) ausführlich vorgestellt. Die Verbindungen zur Sensorplatine, wie unter [5.2.2](#) aufgeführt, wird an folgende Ports angeschlossen: Die Verbindung der I/O Ports (rotes Kabel) wird über die Digitalen Ports 37 – 32 hergestellt. Über die analogen Ports A0 – A7 werden die unter [5.2.2](#) angesprochenen Weißen Kabel angeschlossen.

Zur Herstellung einer Verbindung zu dem On-Board-Computer des SCITOS G5, wird ein USB-Kabel seitlich an das Mikrocontrollerboard angeschlossen.

5.4. Gehäuse der Elektronik

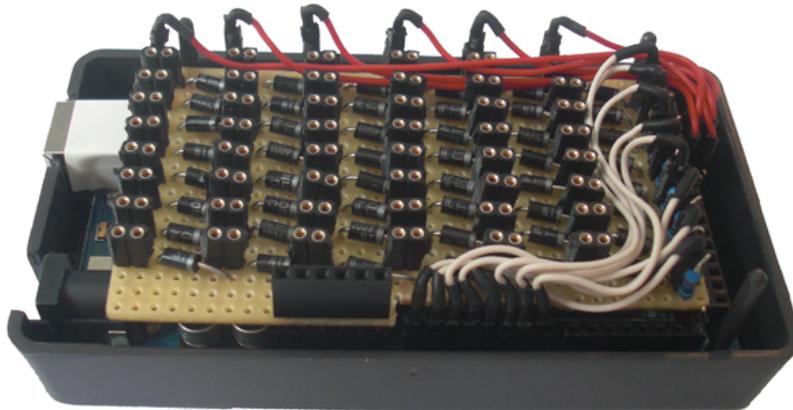


Abbildung 5.9.: Mikrocontrollerboard mit aufgesteckter Sensorplatine

Um die Hardware rund um den Mikrocontroller zu schützen, befinden sich die Komponenten in einer von Arduino hergestellten Box. Da sich, wie in [Abbildung 5.9](#) zu sehen ist, in dieser Box auch die Sensorplatine befindet, ist diese teilweise modifiziert, um der zusätzlichen Hardware und der Kabelage ausreichen Platz zu bieten.

6. Softwareentwicklung

Aufgabe der Software ist es, dem Benutzer oder dem übergeordneten System zuverlässige Sensordaten zu liefern. Umgesetzt wird dieses mit Hilfe eines Programms, das auf dem Arduino MEGA2560 implementiert ist. In diesem Kapitel wird ausführlich auf die Entwicklung der Software eingegangen. Des Weiteren beinhaltet das Kapitel eine Visualisierung der Messdaten mit MATLAB.

6.1. Software auf dem Mikrocontroller

Die zentrale Aufgabe der Software auf dem Mikrocontroller ist es, die Abfrage aller Sensoren zu gewährleisten und die Werte der Sensoren auszulesen. Außerdem beinhaltet sie das Versenden der ermittelten Sensordaten an den On-Board-Computer des SCITOS G5.

6.1.1. Entwicklungsumgebung

Der Mikrocontroller auf dem Arduino Board kann mithilfe der von Arduino gestellten Entwicklungsumgebung programmiert werden. Diese steht dem Benutzer kostenlos zur Verfügung. Als Sprache dient eine Abwandlung von Processing. Diese Sprache macht es auch Nutzern mit wenig Programmierkenntnissen möglich, kleine Programme zu schreiben. Ein Arduino-Programm in Processing basiert auf den beiden Methoden `setup()` und `loop()`. Die `setup()` Methode wird beim Start des Programms aufgerufen. Ist diese Methode abgearbeitet, wird die `loop()` Methode aufgerufen, vergleichbar mit einer `while(1)`-Schleife, die den eigentlichen Programmcode enthält. Da die Sprache wie eben erwähnt sehr einfach gehalten ist und viel dem Compiler überlassen wird, ist der Programmcode zwar in der Entwicklungsumgebung von Arduino geschrieben, allerdings wird hauptsächlich in C programmiert. Dieses ist möglich, da die Arduino Entwicklungsumgebung mit dem AVR-GCC¹ arbeitet.

¹avr-gcc ist ein freier C-Compiler, mit dem C-Programme zu ausführbaren Programmen übersetzt werden können

6.1.2. Konfiguration des A/D Wandlers

Bevor die analogen Signale in digitale umgewandelt werden können, ist eine Konfiguration des A/D Wandlers nötig. Bei einer A/D Wandlung muss eine Referenzspannung vorliegen, auf die sich das Ergebnis beziehen kann. Diese Referenzspannung ist gleich der maximal zu messenden Spannung. Der Atmega2560 bietet hier verschiedene Möglichkeiten, die im *Multiplexer Selection Register* auswählbar sind. Da die Sensoren mit 5 V arbeiten, wird der AVCC, die eigene 5 V Spannungsversorgung des ADC, als Referenzspannung benutzt.

Des Weiteren muss die Auswahl des *Prescalers*, wie schon unter 4.2.2 beschrieben, vorgenommen werden. Hier wird im *Control and Status Register*, der Faktor 64 eingestellt, der zwischen den acht verschiedenen Frequenz Teilungsfaktoren (siehe Tabelle 4.1) ausgewählt wurde.

Da die acht Ports der Reihe nach abgefragt werden und so immer nur eine Wandlung pro Port anliegt, wird die „*Single Conversion*“ Methode verwendet, welche nicht extra konfiguriert werden muss. Damit der ADC in Betrieb genommen werden kann, wird das *ADC Start Conversion Bit* im *Control and Status Register* gesetzt.

Außerdem muss der I/O Port *PORTC*, an dem die Zeilen der Matrix angeschlossen sind, auf Ausgang gestellt werden. Dieses wird durch das Schreiben von sechs Einsen, in das dazugehörige Register (*DDRC*²) getätigt.

6.1.3. Auslesen der Sensordaten

Zum Auslesen wird der eben Konfigurierte A/D Wandler genutzt. Da er ein 10-Bit ADC ist, liefert er Messwerte im Bereich von 0 bis 1023. Liegt am Eingangskanal 0 V an, so liefert der ADC einen Wert von 0. Hat die Spannung am Eingangskanal die Referenzspannung erreicht, so liefert der ADC einen Wert von 1023.

Die entwickelte Software bietet hier zwei verschiedene Methoden des Auslesens der Sensordaten an. Zum einen kann durch die Methode „*read_Sensor()*“, mithilfe von zwei Matrix Koordinaten ein Sensor einzeln ausgelesen werden. Hierzu gibt der erste Parameter an, welche Zeile aktiviert werden soll. Mit dem zweitem Parameter wird der Port des A/D Wandlers ausgewählt, an dem sich der Sensor befindet.

Die zweite Möglichkeit bietet das Auslesen aller 48 Sensoren an. Der Methode „*read_matrix()*“, wird ein Zeiger auf ein Array, mit Platz für 48 Werte, übergeben, in dem die Werte gespeichert werden. Am Anfang der Methode wird das Register von *PORTC*, auf „1“ gesetzt. So ist die erste Zeile ausgewählt. In einer zweifach verschachtelten Schleife

²Data Direction Register C

werden nach dem erarbeiteten Konzept unter 4.2, die einzelnen Sensoren Zeilen- und Reihenweise ausgelesen.

6.1.4. Umrechnung der Sensordaten

Die Software ist in der Lage die Ergebnisse der A/D Wandlung, durch verschiedene Umrechnungen in mehreren Einheiten auszugeben. Folgende Einheiten stehen dabei zur Verfügung, die dem Benutzer wahlweise zur Auswahl stehen:

- Analogen Rohdaten (0 - 1023)
- Spannung (mV)
- Widerstandswert des FSR (Ohm)
- Newton (N)
- Akkumulierte Kraft aller Sensoren (N)

Bei den analogen Rohdaten ist keine Umrechnung notwendig, da es sich um die Ergebnisse der A/D Wandlung handelt. Diese Daten werden direkt aus dem Register ADCL und ADCH des ADC gelesen. Hierbei sind zwei Register notwendig, da das Ergebnis des ADC ein 10 Bit Wert und ein Register nur 8 Bit breit ist. Von den 10 Ergebnisbits sind die niederwertigsten 8 im Register ADCL abgelegt und die noch fehlenden 2 Bits im Register ADCH an den niederwertigsten Bitpositionen.

Zur Bestimmung der Spannung wird die Maximalspannung von 5 V in 1024 Werte geteilt. So steht jedem der 1024 analogen Rohdaten ein Spannungswert zur Verfügung. Um Rechenarbeit zu sparen, befinden sich die Wertepaare in einer Map.

Für die Bestimmung des Widerstandswertes greift die Software auf die eben errechnete Spannung zu, da diese zur Berechnung benötigt wird. Da es sich bei der Sensormessung um einen Spannungsteiler handelt, kann der Widerstand durch Umstellung der Spannungsteilerformel ermittelt werden (siehe 6.1).

$$U_{FSR} = U_{VCC} * \frac{R}{(R_{FSR} + R)} \iff R_{FSR} = R * \frac{U_{(VCC-U_{FSR})}}{U_{FSR}} \quad (6.1)$$

Durch die Abhängigkeit der Spannung bei der Widerstandsberechnung, stehen dem Benutzer immer beide Werte zur Verfügung.

Zur Bestimmung der Kraft in der Einheit Newton, werden auf die ermittelten Daten der Kennlinie unter 4.9 zurückgegriffen. Der einfachste Weg hier wäre den Verlauf der Kennlinie auf

eine Funktion abzubilden und so durch einsetzen der analogen Rohdaten, die dazugehörigen Kraft zu erhalten. Die relativ angenäherte Funktion $f(x) = 10^{-12} * x^{4.2276}$ ist in der Abbildung 6.1 dargestellt. Da diese aber immer noch sehr ungenau und Rechenaufwendig ist, wird die Umrechnung mit drei Geraden (siehe Abb. 6.1) vollzogen. Die folgenden Geraden werden in der Software für die jeweiligen Wertebereich benutzt, um die analogen Werte in die Einheit Newton umzurechnen:

- (1) $g(x) = 0.25 * \frac{x}{100}$
- (2) $g(x) = \frac{x}{100} - 3$
- (3) $g(x) = 0.09 * x - 51$

Die Geraden sind so gewählt, dass sie möglichst leicht zu berechnen sind. Dabei ist diese nicht immer optimal angepasst, aber durch die starke Ungenauigkeit der Sensoren ist eine nahezu exakte Abbildung nicht möglich. Die Auswahl der Geraden für den jeweiligen Wertebereich ist mit Hilfe von einfachen *If-Anweisungen* implementiert. Die erste Gerade wird in dem Bereich unter 400 zur Umrechnung genutzt. Zwischen den analogen Werten von 400 und 600 greift die Software auf die zweite Gerade zurück. Für den Bereich Oberhalb von 600 ist die dritte Gerade eingesetzt.

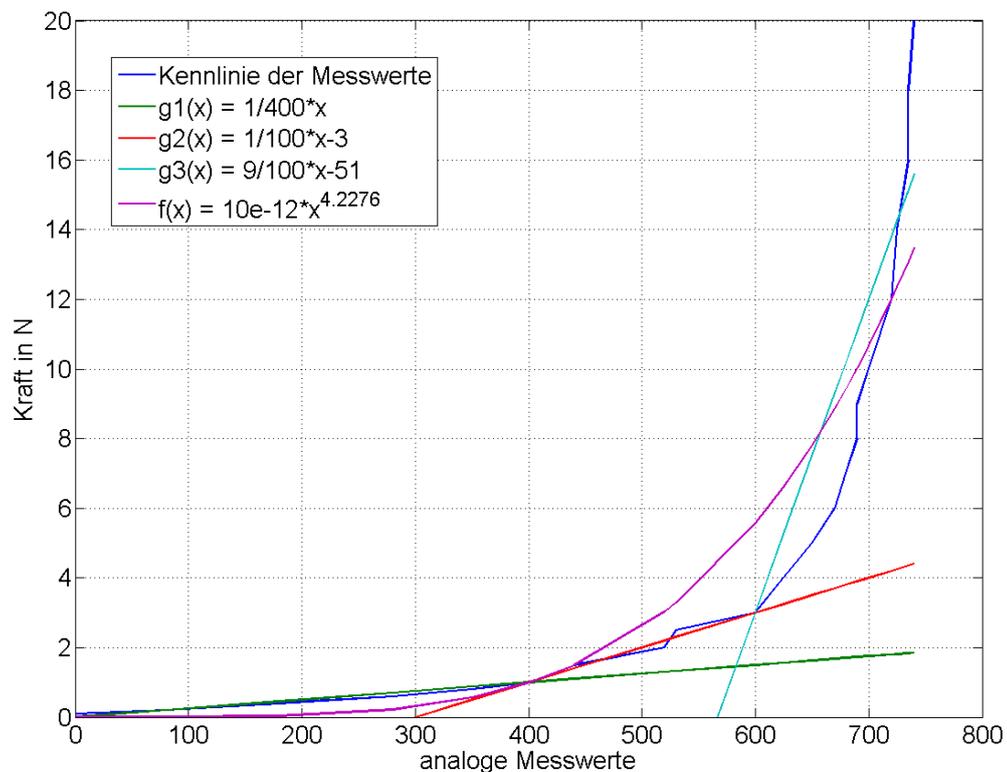


Abbildung 6.1.: Angenährte Funktion und Geraden an die Kennlinie des FSR400

6.1.5. Kommunikation und Ausgabe

Um dem Benutzer oder dem übergeordneten System überhaupt die Möglichkeit zu geben an die Sensordaten zu gelangen, ist eine serielle Schnittstelle via USB konfiguriert. Über diese Verbindung lassen sich die Daten in den verschiedenen Formaten auf einem anderen System empfangen.

Damit die Steuerung der Ausgabemodi von jedem beliebigem System durchzuführen und nicht an eines gebunden ist, ist Kommunikation mithilfe einer kleinen Shell³ entwickelt. Durch diese Vorgehensweise, ist eine einfache Kommunikation mit jedem System, welches über eine serielle Schnittstelle verfügt, denkbar. Dabei stehen folgende Befehle zur Verfügung:

- **read** Gibt anhand des gewählten Parameters die Sensordaten aus
 - **n** Ausgabe aller Sensordaten in Newton

³Eine Benutzerschnittstelle, in der Kommandos des Benutzers ausgeführt werden

- **a** Ausgabe aller Sensordaten in den analogen Rohdaten
- **t** Ausgabe des akkumuliertem Drucks der zwei Finger
- **s <x> <y>** Ausgabe aller bekannten Daten eines Sensors. Als Parameter muss die Position des Sensors übergeben werden
- **stop** Stoppt die Ausgabe
- **help** Gibt eine Information über die vorhandenen Befehle aus

Die serielle Schnittstelle arbeitet mit einer Geschwindigkeit von 115.200 Bit/Sekunde, hat 8 Datenbits, kein Prüfbit und ein Stoppbit. Diese Einstellungen werden direkt beim Start des Programms vorgenommen. Für die Erkennung der eingegebenen Befehle, ist die Methode *parse_modus()* implementiert, die den jeweiligen Ausgabe-Modus zurückgibt. Damit der gewählte Modus auch nach einem ausschalten des Mikrocontrollers oder unerwartetem Stromverlust noch vorhanden bleibt, wird dieser im EEPROM⁴ gespeichert. Beim nächsten Start wird dieser, wenn es sich um einen gültigen Zustand handelt, wieder hergestellt.

Die Ausgabe aller Sensordaten erfolgt in einer Reihe, jeweils durch ein Komma getrennt. Bei der Einheit Newton werden die Daten als Gleitkommazahl, mit zwei Nachkommastellen verschickt. Bei den anderen Einheiten handelt es sich immer um Ganze Zahlen.

Der Programmablaufplan unter [6.2](#) stellt den Ablauf der Software auf der Obersten Ebene dar.

⁴Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory - ein nichtflüchtiger, elektronischer Speicherbaustein

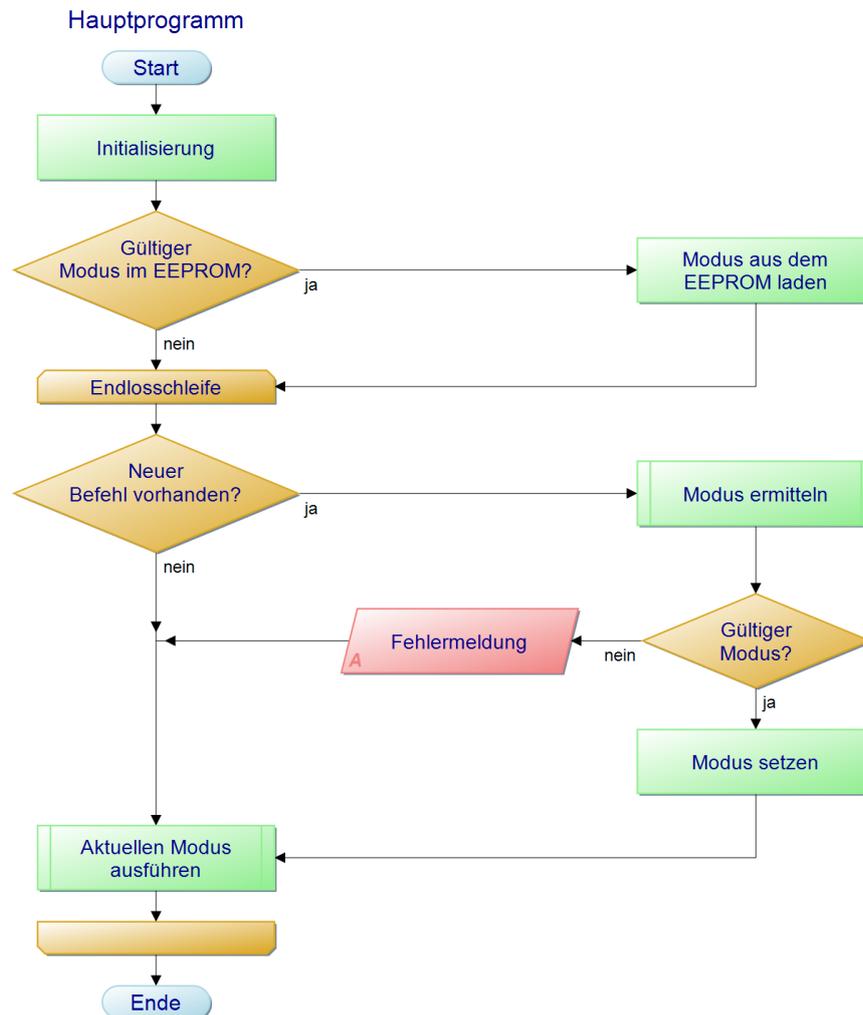


Abbildung 6.2.: Programmablaufplan der Software des Mikrocontrollers

6.2. Visuelle Darstellung mit MatLab

Zur Veranschaulichung der Messdaten, ist mit MATLAB eine Grafische Ausgabe der Sensordaten entwickelt (siehe Abb. 6.3). Hierzu wird eine Verbindung mit dem Mikrocontroller über die Serielle Schnittstelle aufgebaut. Die Sensor Daten werden in der Einheit Newton empfangen und in einem String gespeichert. Anschließend werden die String-Daten mithilfe der Funktion `regexp()` in die Einzelwerte geteilt und mit der Funktion `str2double()` in Zahlenwerte gewandelt. Die Werte werden in einer 6×8 großen Matrix gespeichert. Nachfolgend wird die Matrix in die jeweils enthaltenen 6×4 Finger-Matrizen geteilt. Ausgegeben werden diese bei-

den Matrizen dann unabhängig voneinander, in jeweils zwei Sichten, mit Hilfe zweier Balken Darstellungen, die über die Funktion `bar3()` erstellt werden.

Eine Sicht zeigt dabei eine schräge Perspektive, in der besonders die Druckstärken gut zu erkennen sind. Bei der anderen Sicht, handelt es sich um eine Draufsicht. Durch den Blick von oben lässt sich gut die Positionierung und Form des Objektes analysieren. Dabei wird jedem Sensor ein Balken zugeordnet, in der selben Anordnung, wie unter 5.1.2 beschrieben.

Die Graphische Ausgabe (siehe Abb. 6.3) wird alle 0,5 Sekunden aktualisiert.

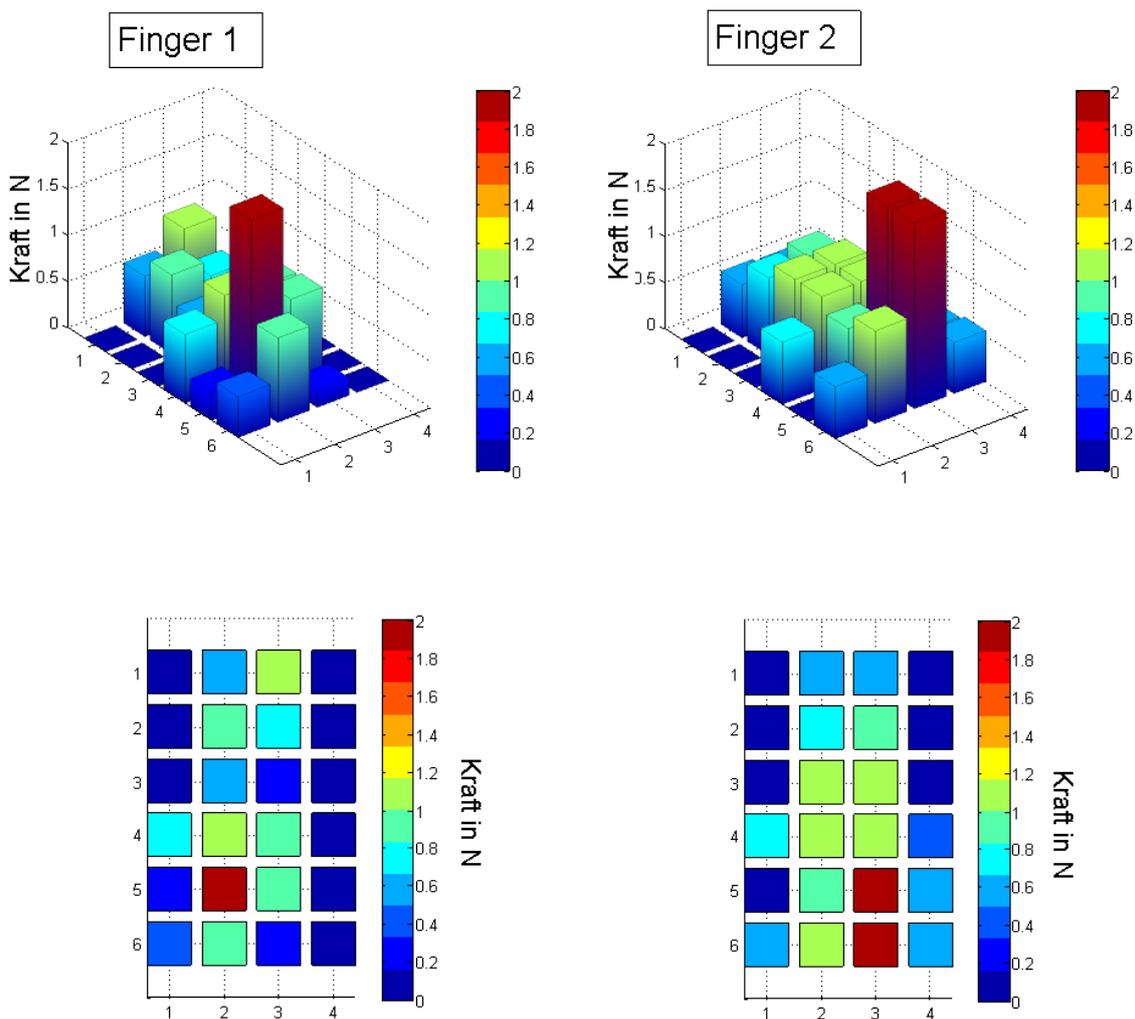


Abbildung 6.3.: Visuelle Darstellung mit MATLAB

7. Auswertung

Dieses Kapitel beschreibt die Leistungsfähigkeit des neuentwickelten Zwei-Finger-Greifers in den Kategorien Geschwindigkeit, Präzision, Positionserfassung, Kraftklassen und das Verhalten beim Greifen verschiedener Objekte.

Die Angaben zur Position am Greifer, an dem das jeweilige Objekt gegriffen wurde, beziehen sich immer auf den Blickwinkel der visuellen Darstellung der Kraftprofile.

7.1. Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit zwischen dem Mikrocontroller und dem Zielsystem ist ein wichtiges Kriterium für die Anwendung. Im Laufe der Entwicklung des Greifers wurde mehrfach das Zeitverhalten beschrieben und analysiert, um die richtige Konfiguration zu treffen (siehe [4.1.2](#) und [4.2.2](#)). Dabei wurden die zwei folgenden Entscheidungen getroffen, die maßgeblich Einfluss auf die Geschwindigkeit nehmen:

- Zum einen die A/D-Wandler Konfiguration. Dabei war die Wahl des *Prescalers* und die Verwendung der *Single-Conversion*, die ausschlaggebenden Einstellungen.
- Zum anderen musste sich auf eine Übertragungsgeschwindigkeit der serielle Schnittstellen festgelegt werden.

Um die Berechnungen des Zeitverhaltens, die im Zusammenhang mit den eben genannten Einstellungen durchgeführt wurden, zu verifizieren, wurde die Übertragungsgeschwindigkeit gemessen. Durch die Messung wurden die Daten gezählt, die mithilfe des Programms `Hterm[9]`, übermittelt wurden. Da die Anzahl der Bits und der Rechenaufwand bei den verschiedenen Ausgaben der Einheiten variiert, wurden diese getrennt getestet. Des Weiteren wurde bei den analogen Werten noch unterschieden zwischen „Belastet“ und „Unbelastet“, da die Messwerte hier von einstelligen auf dreistellige Werte wechseln und so das Datenvolumen stark erhöht wird. In der [Abbildung 7.1](#) sind die Ergebnisse der Messungen aufgeführt.

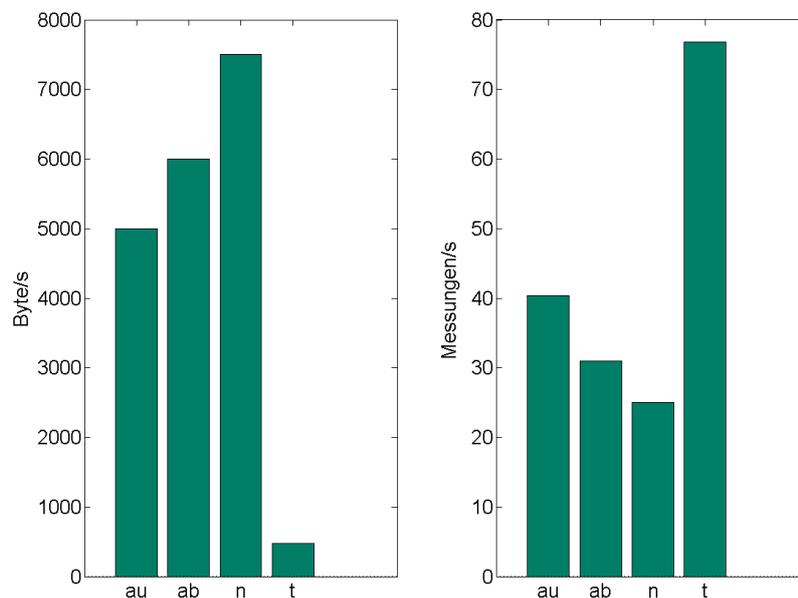


Abbildung 7.1.: Messung der Datenübertragungsgeschwindigkeit zwischen dem Mikrocontroller und einem Zielsystem

Anhand der Ergebnisse ist deutlich zu erkennen, dass die Messdaten mit dem größten Datenvolumen einen höheren Datendurchsatz haben. Dieses geschieht allerdings auf Kosten der übermittelten Anzahl an Messdaten. Dieses ist schon bei dem Vergleich der unbelasteten und belasteten analogen Werten, zu erkennen. Es wurden 20% mehr Bytes empfangen, aber es kommen 25% weniger Messungen an. Am deutlichsten ist der Unterschied zwischen den Werten die als Newton und als akkumulierte Newton verschickt werden. Obwohl der Rechenaufwand bei der akkumulierten Methode höher ist, kamen deutlich mehr Messdaten an. Das Verhalten ist damit zu erklären, dass der Mikrocontroller einen großen Teil der Zeit mit dem verschicken der Daten beschäftigt ist und so die Erfassung der Daten auf der Strecke bleibt.

Bezogen auf die Anforderung (siehe 3), ist das Ergebnis jedoch relative zufrieden stellend. Obwohl lediglich in einem Verfahren die geforderte Anzahl an Messungen erfüllt wurde. Da der Benutzer aber die Möglichkeit hat, zwischen den Methoden zu wechseln, steht bei zeitkritischen Anwendungen, eine laut Anforderungen ausreichende Geschwindigkeit, zur Verfügung.

7.2. Präzision

Präzision beschreibt die Qualität eines Messverfahrens. Dazu wird eine Messung durch oftmaliges Wiederholen, unter gleichen Umständen, durchgeführt.[5] Dabei lässt sich feststellen, wie weit die Werte durchschnittlich voneinander abweichen. In diesem Fall wurde ein Glas (siehe Abb. 7.3) mehrfach mit derselben Kraft und an derselben Position des Greifers gegriffen. Das Messverfahren wurde jeweils mit vier verschiedenen Kräfte, mit jeweils 10 Messungen, durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 7.2 und Tabelle 7.1 dargestellt.

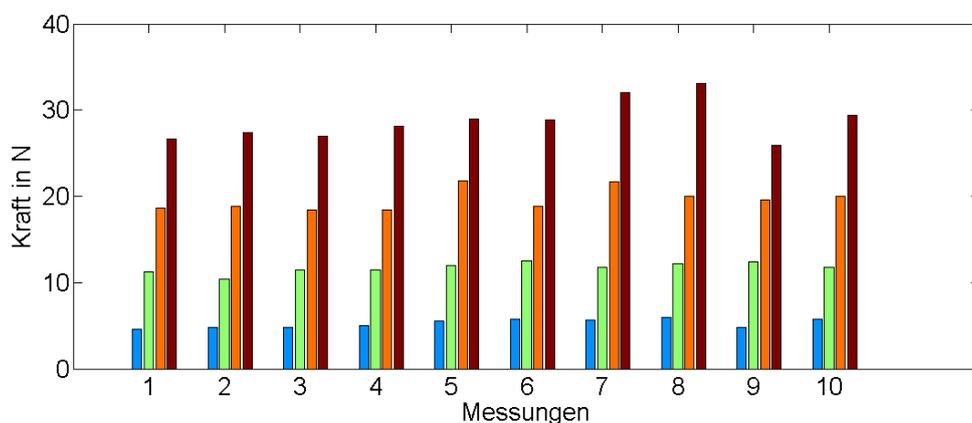


Abbildung 7.2.: Messung der Präzisionen bei vier unterschiedlichen Kräfte mit jeweils 10 Messungen

Zur Berechnung der Präzision, welche als Standardabweichung σ angegeben wird, wurde die Formel 7.1 [5] verwendet. Das Ergebnis spiegelt die erwartete Ungenauigkeit der FSR-Sensoren wieder. Aber bezogen auf die Tatsache, dass es sich hierbei um einen Greifer eines Assistenzroboters handelt, sind die Ergebnisse der Messung ausreichend. Denn bei einer Standardabweichung von ca. 1 – 2 N, lässt sich eine große Anzahl an Objekten im alltäglichen Leben greifen, ohne diese zu beschädigen. Und entspricht somit den Anforderungen.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7.1)$$

x_i = Messwert; \bar{x} = Mittelwert; n = Anzahl der Messwerte

X_{soll}	X_{min}	X_{max}	\bar{X}	σ
5	4.6	6.0	5.26	0.8700
10	10.4	12.5	11.73	1.2341
15	18.4	21.8	19.61	1.8531
20	25.9	33.1	28.74	2.7710

Tabelle 7.1.: Ergebnisse der Präzisions Berechnung

7.3. Positionserfassung

In diesen Abschnitt wurde ein Glas, das in Abbildung 7.3 zu sehen ist, an mehreren Stellen des Greifers gegriffen. Die Ergebnisse der Tests sollen die Genauigkeit der Positionserfassung von Objekten prüfen.

In der Visuellen Darstellung in Abbildung 7.4 ist jeweils zu erkennen, wo das Glas gegriffen wurde. Dieses Ergebnis zeigt, dass sich die Anforderung der Positionserfassung mithilfe der entwickelten Finger für einfache Objekte gut umsetzen lässt.



Abbildung 7.3.: Zylinderförmiges Glas

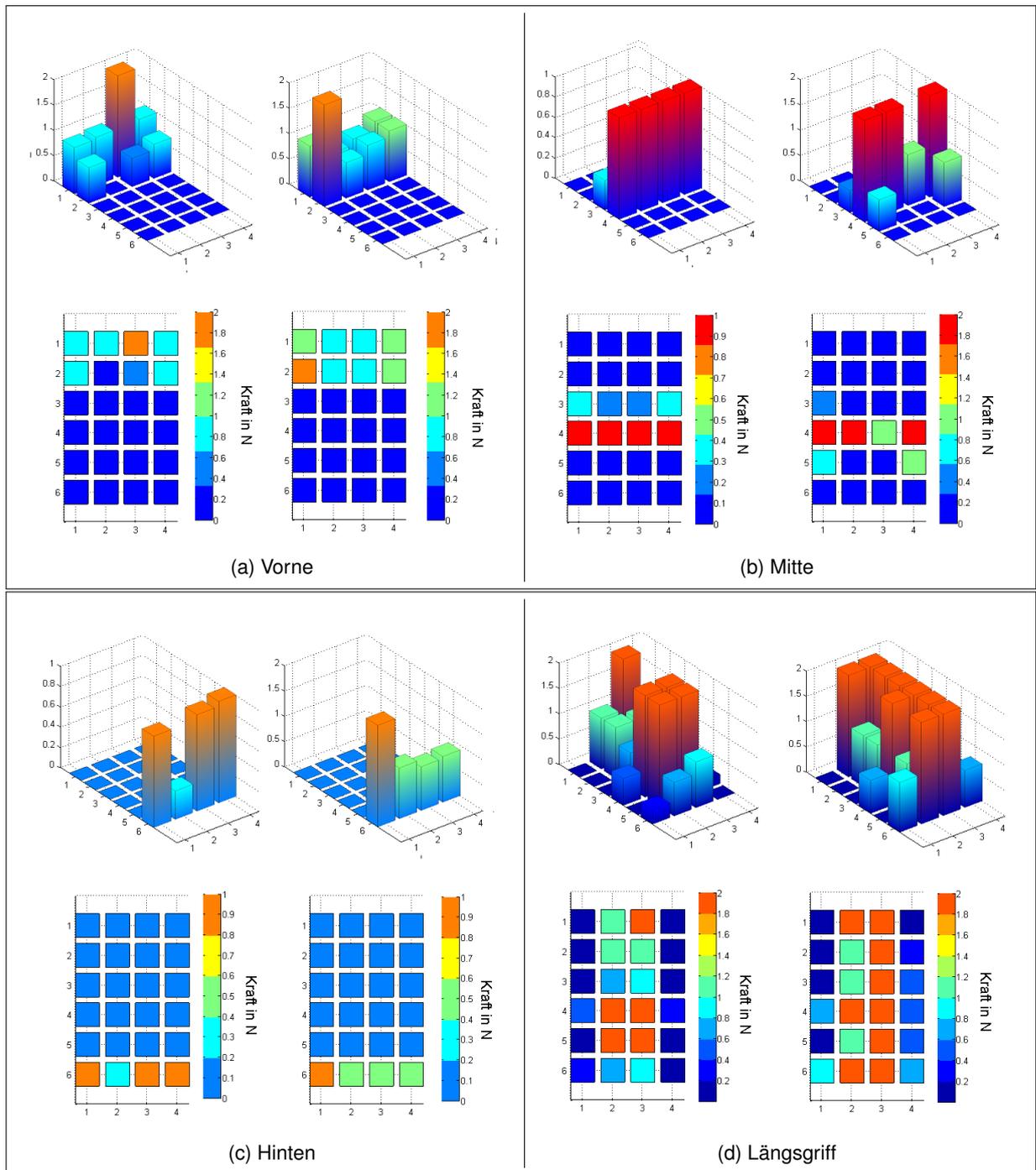


Abbildung 7.4.: Visuelle Darstellung von Griffen eines Glases an vier verschiedenen Positionen des Greifers

7.4. Kraftklassen

Um Kräfte in Klassen einteilen zu können, muss geprüft werden, wie stark sich die Erfassung der Kräfte zwischen verschiedenen Objekten unterscheidet. Um dieses zu Prüfen, wurden eine Vielzahl verschiedener Objekte, mit verschiedenen Kräften, an verschiedenen Positionen des Greifers, gegriffen. Dabei handelt es sich zum großen Teil um die Objekte aus den Abbildungen 7.6 und 7.8. Der Bleistift wurde zusätzlich zu dem mittigen Griff, der bei jedem Objekt durchgeführt wurde, noch an diversen anderen Stellen des Greifers platziert. Diese Positionen sind der Abbildung 7.5 zu entnehmen. Die Kräfte mit denen gegriffen wurde, 1 N, 5 N, 10 N, 15 N und 20 N, hier als Soll-Wert bezeichnet, wurden mit Hilfe der unter 4.8 vorgestellten Methode ermittelt. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 7.5 in einem Balkendiagramm dargestellt.

Als Ergebnis ist festzuhalten, dass sich eine Einteilung in fünf Kraftklassen ohne weiteres Realisieren lässt.

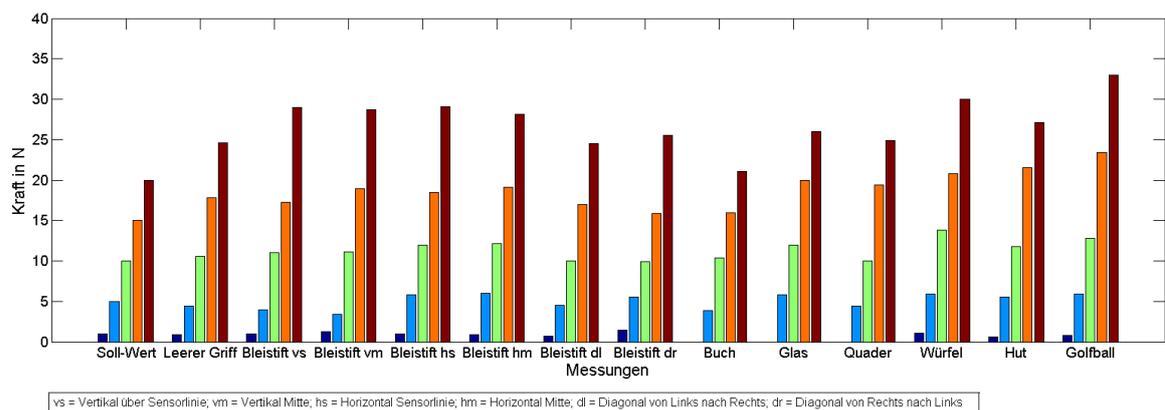


Abbildung 7.5.: Darstellung der Kräfte von Griffen verschiedener Objekte an verschiedenen Stellen des Greifers mit jeweils den gleichen Ausgangskräften 1 N, 5 N, 10 N, 15 N und 20 N

7.5. Test-Griffe von verschiedenen Objekten

In diesem Kapitel wurden verschiedene Objekte gegriffen, um die Kraftmessung, Positionserfassung und das ziehen von Rückschlüssen auf das gegriffene Objekt, auszuwerten. Dabei wurden geometrische und Komplexere Objekte gegriffen und analysiert.

7.5.1. Geometrische Objekte

In den nachfolgenden Test-Griffen wurden einfache geometrische Formen (siehe Abb. 7.6) gegriffen. Alle Gegenstände wurden mittig in Querrichtung im Greifer platziert, um zu sehen wie sich die Objekte beim greifen untereinander unterscheiden. Die Kraftprofile sind in Abbildung 7.7 visuell dargestellt.

Hierbei ist zu erkennen, dass sich die Formen der Objekte, der Abbildung 7.7, in den Kraftprofilen widerspiegeln. Auch die mittigen Griffe der Objekte sind den Kraftprofilen zu entnehmen.

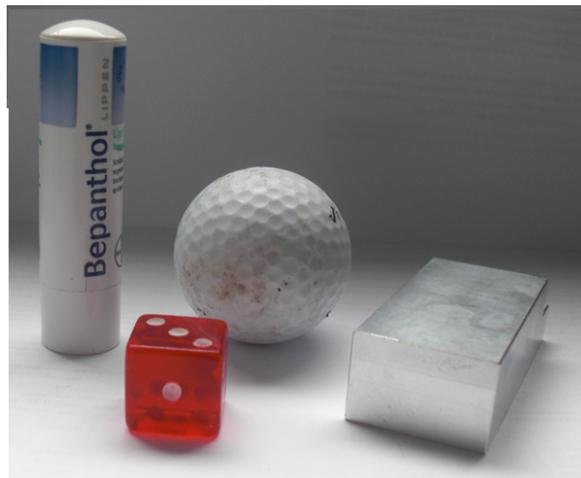


Abbildung 7.6.: Geometrischen Objekten: Würfel, Quader, Kugel und Zylinder

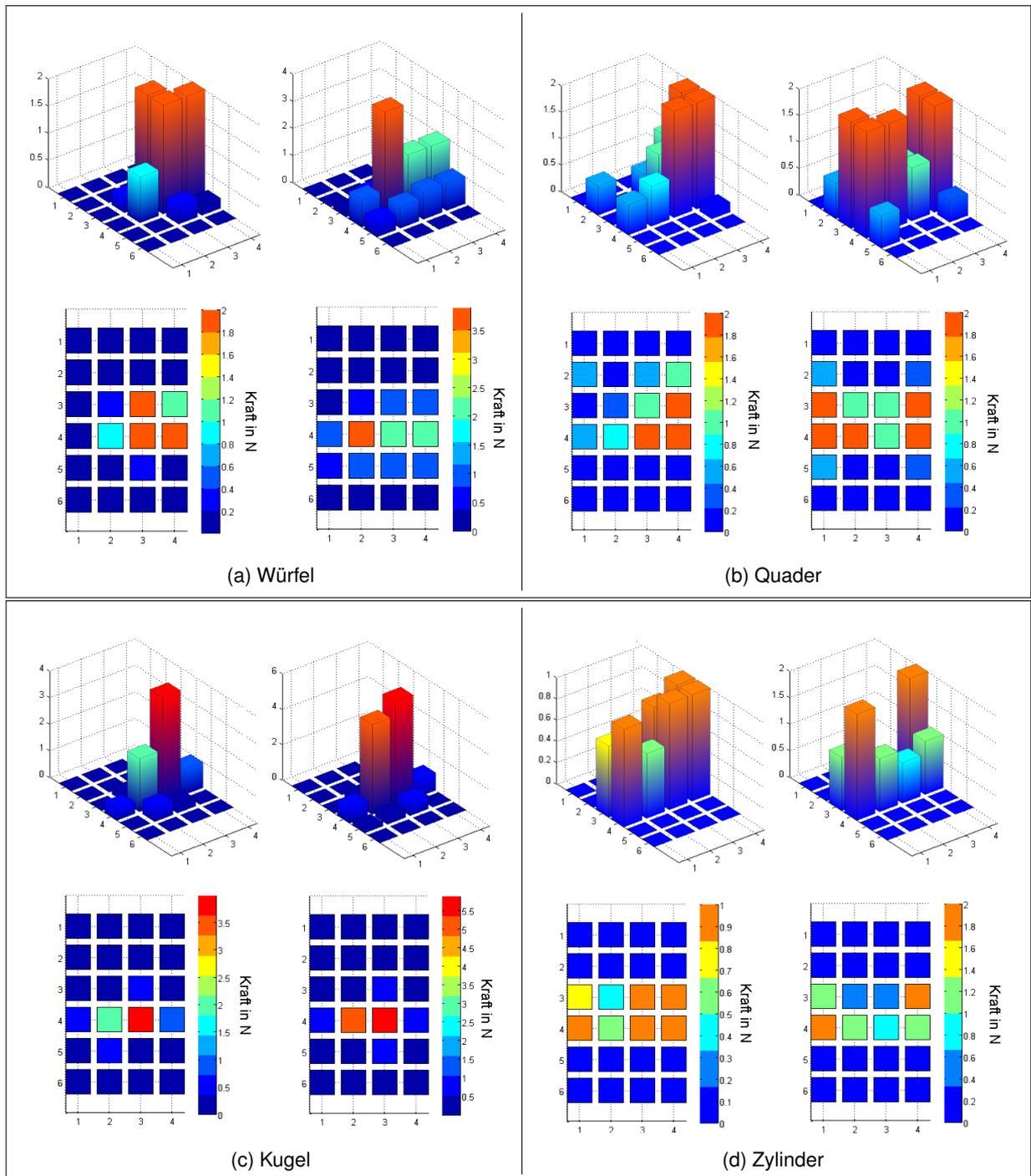


Abbildung 7.7.: Visuelle Darstellung von den gegriffenen geometrischen Objekten: Würfel, Quader, Kugel und Zylinder

7.5.2. Komplexe Objekte

Bei diesen Test-Griffen wurden komplexere Objekte, bezogen auf [7.5.1](#), gegriffen. Dabei handelte es sich um ein Glas, das nach unten hin schmaler wird und einen Plastikhut (siehe [Abb. 7.8](#)). Die beiden Objekte wurden, wie in [Abbildung 7.9a](#) und [7.9c](#) zu sehen ist, gegriffen. Die Kraftprofile sind in [Abbildung 7.9](#) visuell dargestellt.



Abbildung 7.8.: Komplexe Objekten: Glas und Plastikhut

Als relativ positives Ergebnis lässt sich notieren, dass selbst bei komplexen Formen, im Falle des Hutes, eine Objektwiedererkennung möglich ist. Auch die mittige Position ist erfolgreich der [Abbildung 7.9](#) zu entnehmen.

Als negatives Beispiel, lässt sich das Glas nennen, bei dem es beim Greifen zu Problemen kam. Wird das Glas nicht wie in [Abbildung 7.9a](#) gegriffen, sondern mittiger am Glas, liegt es durch seine Form am Gehäuse der Finger auf und eine Messung ist nicht mehr möglich. So ist eine Positionserfassung nur bedingt durchführbar, da durch dieses Verhalten kaum mögliche Greifpositionen zur Verfügung stehen. Auch eine Kraftmessung ist nur in kleinen Bereichen möglich, da es sonst auch zum Kontakt mit dem Gehäuse kommt.

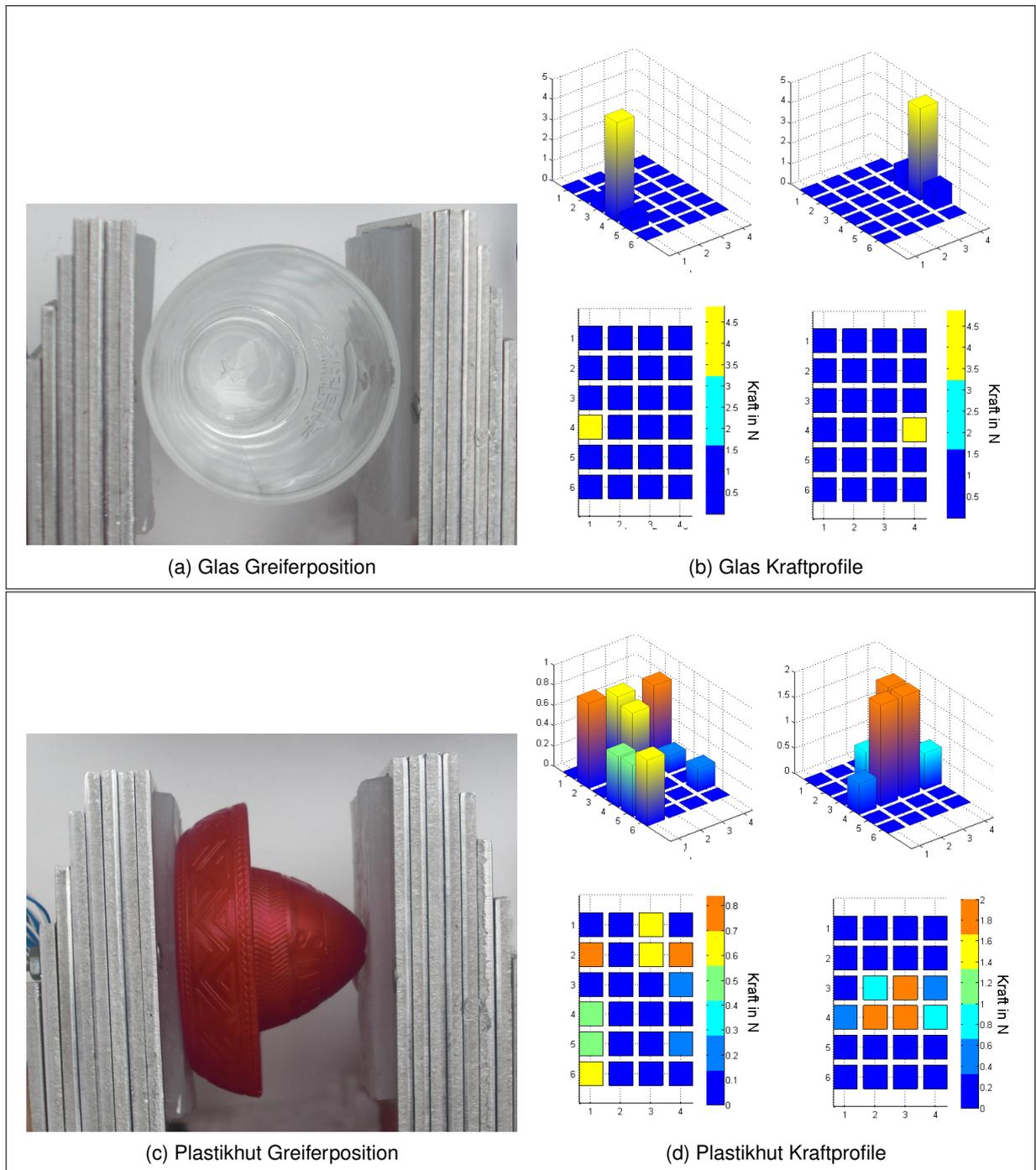


Abbildung 7.9.: Visuelle Darstellung von den gegriffenen komplexen Objekten: Glas und Plastikhut

8. Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es den Greifer des Assistenzroboter SCITOS G5 zu erweitern, um ihm die Möglichkeit zu geben Kraftabhängig zu greifen. Um diese Fähigkeit umzusetzen wurden zwei neue Finger entworfen.

Beim Erarbeiten des Konzepts wurde sich bei der Hardwareauswahl für die FSR-Sensoren entschieden. Hier war besonders ihre Größe und einfache Handhabung ausschlaggebend. Denn so ließ sich mit einer 6 x 4 Matrix aus FSR-Sensoren eine Fläche schaffen, die nicht nur in der Lage ist die Kraft aufzunehmen, sondern auch eine Positionserfassung und eine grobe Objektwiedererkennung ermöglicht.

Die Finger bestehen hauptsächlich aus ihrem robustem aluminium Gehäuse, welches die Sensoren beinhaltet. Die Größe eines Fingers entspricht dabei die von zwei menschlichen. Damit ist der Assistenzroboter, bezogen auf die Finger, optimal für den Einsatz in menschlicher Umgebung ausgestattet. Zu dem System rund um die Finger gehören auch noch ein Mikrocontroller und eine Sensorplatine dazu. Diese beiden Komponenten sorgen für die Ansteuerung der Sensoren und Erfassung der Daten. Um eine hohe Reaktionsgeschwindigkeit zu bieten, können die Daten einer kompletten Messung bis zu 80 mal die Sekunde abgefragt werden.

Die Kommunikation und Inbetriebnahme ist sehr einfach gehalten. Der Benutzer muss lediglich eine Verbindung über den USB-Port herstellen und kann dann über die Serielle Schnittstelle die zur Verfügung stehenden Ausgabemodi wählen.

Des Weiteren umfasst die Arbeit noch eine MATLAB Visualisierung, womit sich die auf die Finger wirkenden Kräfte veranschaulichen lassen.

Zusammenfassend wurde der Greifer um zwei Finger erweitert, die ihm ermöglichen Kraftabhängig und intelligenter zu greifen.

Literaturverzeichnis

- [1] ARDUINO: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>. – zuletzt abgerufen am 2011.08.01
- [2] ARNDT, Matthias: *Entwicklung eines Sensorkonzeptes für eine Roboterhand*, Technische Universität Clausthal, Diplomarbeit, 2007
- [3] ASTIN, Angela D.: *Finger force capability: measurement and prediction using anthropometric and myoelectric measures*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Diplomarbeit, 1999
- [4] Atmel Corporation (Veranst.): *Atmel 2560 Datasheet*. – URL www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2549.pdf. – zuletzt abgerufen am 2011.08.18
- [5] BUDWILL, Dr. D.: *Statistische Maßzahlen*. – URL http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/16/bbz/bbz_statwahr.vlu/Page/vsc/de/ch/16/bbz/bbz_statwahr_statmass.vscml.html
- [6] Diotec Semiconductor (Veranst.): *Silizium Gleichrichter 1N4001 ... 1N4007, 1N4007-1300*. oktober 2004. – URL <http://www.diotec.com>. – zuletzt abgerufen am 2011.08.18
- [7] GASSMANN, Eugen ; GRIES, Anna: *Elektronische Druckmesstechnik: Grundlagen, Anwendungen und Geräteauswahl*. 1. Süddeutscher Verlag onpact, 12 2009. – ISBN 9783937889955
- [8] GWILLIAM, J.C. (Hrsg.) ; PEZZEMENTI, Z. (Hrsg.) ; JANTHO, E. (Hrsg.) ; OKAMURA, A.M. (Hrsg.) ; HSIAO (Hrsg.): *Highly sensitive flexible pressure sensors with microstructured rubber dielectric layers*. Bd. 9. Baltimore, MN, USA : Sch. of Med., Dept. of Biomed. Eng., Johns Hopkins Univ., 2010. – 859–864 S. – URL http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=5444685. – ISBN 978-1-4244-6821-8
- [9] HAMMER, Tobias: *HTerm*. <http://www.der-hammer.info/terminal/>. 2011. – zuletzt abgerufen am 2011.08.20

- [10] Interlink Electronics Sensor Technologies (Veranst.): *FSR 400 Data Sheet*. – URL <http://www.interlinkelec.com/sites/default/files/2010-10-26-DataSheet-FSR400-Layout2.pdf>
- [11] Interlink Electronics Sensor Technologies (Veranst.): *FSR Force Sensing Resistors Integration Guide*. – URL http://www.interlinkelec.com/sites/default/files/94-00004A_FSR_Integration_Guide_1.pdf
- [12] IPA, Fraunhofer: *Care-O-bot*. <http://www.care-o-bot.de/>. 2009. – zuletzt abgerufen am 2011.08.20
- [13] MANNSFELD, Stefan C B. ; TEE, Benjamin C-K ; STOLTENBERG, Randall M. ; CHEN, Christopher V H-H ; BARMAN, Soumendra ; MUIR, Beinn V O. ; SOKOLOV, Anatoliy N. ; REESE, Colin ; BAO, Zhenan: Highly sensitive flexible pressure sensors with microstructured rubber dielectric layers. In: *Nature Materials* 9 (2010), Nr. 10, S. 859–864. – URL <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nmat2834>
- [14] MARTIN, Jan C.: *Ein Beitrag zur Integration von Sensoren in eine anthropomorphe künstliche Hand mit flexiblen Fluidaktoren*. KIT Scientific Publishing, 11 2004. – URL <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1642004>. – ISBN 9783937300245
- [15] MARTIN, J.C.: *Ein Beitrag zur Integration von Sensoren in eine anthropomorphe künstliche Hand mit flexiblen Fluidaktoren*. Univ.-Verl., 2004 (Schriftenreihe des Instituts für Angewandte Informatik, Automatisierungstechnik, Universität Karlsruhe). – URL <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1642004>. – ISBN 9783937300245
- [16] MEISEL, Andreas: <http://www.informatik.haw-hamburg.de/meisel.html>. – zuletzt abgerufen am 2011.06.19
- [17] NEDELA, R. ; NOVAK, M. ; VOLF, J.: New generation of plantograf tactile sensor. In: *Applied Electronics, 2009. AE 2009*, sept. 2009, S. 187–190. – ISSN 1803-7232
- [18] PROSPEKTIV: *Glossar: Wiederholgenauigkeit*. <http://smerobot-tools.prospektiv.de/glossar/deu/wiederholgenauigkeit.html>. 2008. – zuletzt abgerufen am 2011.06.19
- [19] SCHIESSLE, Edmund: *Sensortechnik und Meßwertaufnahme*. Vogel Business Media, 1992. – ISBN 9783802304705
- [20] SCHNABEL, Patrick: *Elektronik-Fibel (German Edition)*. Books On Demand, 7 2007. – ISBN 9783831145904
- [21] SCHRAFT, Rolf D. (Hrsg.): *Handbuch Robotik: Programmieren und Einsatz intelligenter Roboter (VDI-Buch)*. 1. Springer Berlin Heidelberg, 2 2007. – ISBN 9783540255086

- [22] SCHRAFT, Rolf D. (Hrsg.) ; HÄGELE, Martin (Hrsg.) ; WEGENER, Kai (Hrsg.): *Service - Roboter - Visionen*. 1. Carl Hanser Verlag GmbH & CO. KG, 6 2004. – ISBN 9783446228405
- [23] SCHUNK: *MM-Award für industrietaugliche Dreifingergreifhand: Sensibler Griff für vielfältigste Aufgaben in Industrie- und Servicerobotik*. http://www.schunk.com/schunk/schunk_websites/news/news_detail.html?article_id=11050&country=INT&lngCode=DE&lngCode2=DE. 2008. – zuletzt abgerufen am 2011.08.20
- [24] SCHUNK GmbH (Veranst.): *PG 70 Manual*. 2010
- [25] UPASANI A. V., Tesar D.: Survey of Available Sensor Technology for Robotic Hands. In: *Proceedings of The 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers in Engineering Conference*. Las Vegas, Nevada, USA, September 1999. – URL <http://www.nature.com/doi/finder/10.1038/nmat2834>
- [26] WEISS, Karsten: <http://www.weiss-robotics.de/de/produkte/taktile-sensorik/taktile-aufnehmer.html>. – zuletzt abgerufen am 2011.08.17

A. Inhalt der beiliegenden DVD

Dieser Arbeit liegt eine DVD mit folgendem Inhalt bei:

Datenblätter/

- Arduino_mega_schematics.pdf
- Atmel2560.pdf
- Diode.pdf
- FSR_Integration_Guide.pdf
- FSR400_DataSheet_Layout2.pdf
- Schunk_PG70 Greifer.pdf

Software/

- HTerm.exe

Workspace/

- Arduino/
 - FSR_400_2_Finger_Greifer.pde

Lochmaster/

- Sensor_Matrix_Platine.rst

MATLAB/

- fsr_daten_plot.m
- fsr_geschwindigkeits_test.m
- fsr_messungen_total.m
- fsr_visualisierung.m
- fsr_wiederholgenauigkeit.m

Bachelor_Arbeit_Baenisch_Zwei_Finger_Greifer.pdf

Versicherung über Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §24(5) ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Hamburg, 22. August 2011

Ort, Datum

Unterschrift