



DIPLOMARBEIT

Sensortechnik für Schlagmessungen im Kampfsport

Ausgeführt am Institut

„ZENTRUM FÜR BIOMEDIZINISCHE TECHNIK & PHYSIK“

MEDIZINISCHE UNIVERSITÄT WIEN, AKH-4L

WÄHRINGER GÜRTEL 18-20

unter der Anleitung von

A.O.UNIV. PROF. DI. DR. WINFRIED MAYR

durch

MELANIE FRAUNSCHIEL BAKK.TECHN.

MATRIKELNUMMER: 0325232

1190 WIEN, OBKIRCHERGASSE 25/12

Wien, 20. Oktober 2008

Danksagung

Mein Dank gilt besonders a.o.Univ. Prof. DI. Dr. Winfried Mayr, ohne den die Realisierung des Projektes nicht möglich gewesen wäre und Ing. Ewald Unger, dessen Hilfe, Wissen- und Ideenreichtum, für den Aufbau das Projekt unentbehrlich waren.

Ich bedanke mich bei dem Mechanik-Team des Instituts, das mir bei der Verwirklichung der mechanischen Komponenten des Projektes zur Seite gestanden ist, vor allem bei Bernhard Bliem. Bedanken möchte ich mich weiters bei meinem Freund Alexander Brezina, der mich in jeder Hinsicht unterstützt hat und meinen Eltern, die mir für mein Studium und mein Training einen finanziellen Rückhalt gegeben haben, und ohne deren Motivation und Toleranz ich nicht solche Fortschritte im Studium und im Kyokushin-Karate gemacht hätte.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplom- bzw. Masterarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt bzw. die wörtlich oder sinngemäß entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Wien am 20.Oktober.2008

Kurzfassung

Die Leistungsdiagnostik hat in der Kampfsportart Kyokushin-Karate bisher kaum Beachtung gefunden. Die trainingswissenschaftlichen Untersuchungen, die im europäischen Raum durchgeführt werden, beschränken sich vor allem auf Breitensportarten. Im Bereich der biomechanischen Technikanalyse im Kampfsport existieren einige Publikationen über Boxsport und Semi-Kontakt Karate. Keiner der Verfasser geht jedoch näher auf den Vollkontakt-Kampfsport Kyokushin-Karate ein, obwohl gerade in diesem traditionellen Kampfsport die Stärke und Präzision der Schläge zu einem KO des Gegners führen.

Ziel dieser Arbeit ist es eine Instrumentierung für die Kraft- und Beschleunigungsmessung von Faustschlägen bzw. Beintechniken zu entwickeln. Sie soll den Kämpfern eine Rückmeldung über die Wirkung ihrer Schläge liefern, wodurch diese ihre Schlagtechniken perfektionieren können. Im Zuge dieser Arbeit werden fünf Sensoren analysiert, und falls sie sich als wertvoll erweisen, hergestellt und kalibriert. Drei von fünf Sensoren mussten im Laufe der Arbeit verworfen werden, da sie nicht den geforderten Ansprüchen gerecht wurden.

Abstract

The performance-diagnostic in the full-contact martial art Kyokushin-Karate hasn't attracted attention so far. In the range of the scientific technique-analysis in martial arts exist some publications about boxing and semi-contact Karate. No one of the authors goes into the full-contact martial art, Kyokushin-Karate, even though the force of punches leads to a KO in this traditional martial art. The aim of this diploma thesis is to create an instrumentation to bring the martial artists' techniques to perfection. Due to responses of an advice, which shows the fighters how energetic their punches are, punch and kick techniques can be sophisticated. In the course of this work five sensors are analysed and furthermore, if they have turned out to be valuable, built and calibrated. Three of five sensors have unfortunately been condemned because of uselessness.

Vorwort

Die Teilnahme an nationalen und internationalen Turnieren, sowie langjähriges Training der Kampfsportart Kyokushin-Karate erweckte das Interesse einer wissenschaftlichen Betrachtung der Schlagwirkung. Dieser Kampfstil ist, vom Shotokan-Karate abstammend, eine der härtesten traditionellen Kampfsportarten, welche von Masutatsu Oyama gegründet wurde. Der große Unterschied zu anderen Karate-Stilen ist, dass mit voller Schlagkraft gekämpft wird. Obwohl gerade in diesem Kampfsport diagnostische Tests das Training unterstützen sollten, haben leistungsorientierte Kampfsportler in Österreich nicht die Möglichkeit ihre Schlagwirkung auf Messsystemen, wie den Crashtest Hybrid 3 Dummy zu testen. [vgl.: Stern, 2006] Im Zuge dieser Arbeit wurden verschiedene Sensormodule für die Messung der physikalischen Wirkungskomponente von Kyokushin-Karatekas entwickelt, um im nächsten Schritt diese zu messen.

Inhaltsverzeichnis

1	<u>ZEICHENERKLÄRUNG</u>	<u>1</u>
1.1	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	1
1.2	TABELLENVERZEICHNIS	3
1.3	DIAGRAMMVERZEICHNIS	3
1.4	ABKÜRZUNGS- UND EINHEITS-VERZEICHNIS	4
2	<u>EINLEITUNG</u>	<u>5</u>
2.1	MOTIVATION	5
3	<u>AUFGABENSTELLUNG UND KONZEPT</u>	<u>8</u>
3.1	AUFGABENSTELLUNG	8
3.1.1	SENSOR-WESTE	8
3.1.2	BESCHLEUNIGUNGSMODUL	9
3.2	KONZEPT	9
3.2.1	KRAFT BZW. DRUCKSENSOREN	10
3.2.2	BESCHLEUNIGUNGSMODUL	11
4	<u>METHODEN</u>	<u>12</u>
4.1	GRUNDLAGEN DER SENSORTECHNIK UND MESSWERTAUFNahme	12
4.1.1	SIGNALFORMEN	12
4.1.2	DAS SENSORSYSTEM	13
4.2	BESCHLEUNIGUNGSENSOREN	16
4.2.1	VERSCHIEDENE WIRKUNGSPRINZIPIEN DER BESCHLEUNIGUNGSENSOREN	16
4.2.2	BESCHLEUNIGUNGSMODUL	20
4.3	DRUCK BZW. KRAFTSENSOREN	28
4.3.1	ARTEN VON DRUCK- BZW. KRAFTSENSOREN	29
4.3.2	DRUCKMESSUNG MIT WASSERGEFÜLTEM LUFTSCHALTER	30
4.3.3	DRUCKMESSUNG MIT DEHNMESSSTREIFEN (MANGANIN)	40
4.3.4	FLEXI-FORCE KRAFTSENSOR	44
4.3.5	KRAFTMESSUNG MIT TRIAXIALEM DMS-KRAFTSENSOR	53

4.4	DATENERFASSUNG	59
4.4.1	ADAPTER	60
4.4.2	NIDAQ 6024 DATENERFASSUNGSKARTE	61
4.4.3	VISUALISIERUNGSSOFTWARE DASYLAB 9.0	62
5	ERGEBNISSE	64
5.1	LUFTSCHALTER	64
5.2	MANGANIN	64
5.3	FLEXI-FORCE-SENSOR	65
5.4	TRIAXIALER DMS-KRAFTSENSOR	65
5.5	BESCHLEUNIGUNGSSENSOR	67
6	FAZIT UND AUSBLICK	68
7	LITERATUR	69
8	ANHANG	71
8.1	MECHANISCHE KONSTRUKTIONEN	71
8.1.1	BESCHLEUNIGUNGSSENSOR	71
8.1.2	KRAFTSENSOR	72
8.1.3	KRAFTMESSDOSENGEHÄUSE	74
8.2	TEST-AUFBAUTEN	75
8.2.1	PROTOTYP DES DRUCKSENSORS	75
8.2.2	ERSTER PROTOTYP DES BESCHLEUNIGUNGSSENSORS	77
8.2.3	ZWEITER PROTOTYP DES BESCHLEUNIGUNGSSENSORS	78
8.2.4	ERSTER PROTOTYP DES FLEXI-FORCE SENSORS	79
8.3	FINALE SCHALTPLÄNE	80
8.3.1	KRAFT UND BESCHLEUNIGUNGSSENSOR	80
8.3.2	FLEXI FORCE SENSOR	81
8.3.3	ADAPTER	82

1 Zeichenerklärung

1.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Blockschaltbild	8
Abbildung 2: schematische Darstellung des Messplatzaufbaus	10
Abbildung 3: Sensor	13
Abbildung 4: a) Longitudinaleffekt, b) Transversaleffekt	14
Abbildung 5: Piezoresistiver Beschleunigungssensor mit Halbbrücke [vgl.: Schmidt, 2002]	18
Abbildung 6: Kapazitiver Beschleunigungssensor [vgl.: Schmidt, 2002]	19
Abbildung 7: Dimensionen (Inch) des Beschleunigungssensors [vgl.: „Measurement Specialities“ Datasheet]	21
Abbildung 8: Achsenorientierung des Beschleunigungssensors	21
Abbildung 9: Befestigungsvorrichtung der Beschleunigungssensoren	21
Abbildung 10: Innenleben des Moduls	22
Abbildung 11: Gehäuse des Beschleunigungssensors	22
Abbildung 12: Anbringungsmöglichkeit des Beschleunigungsmoduls	22
Abbildung 13: Schaltbildschema des Beschleunigungssensors	24
Abbildung 14: Platine des Beschleunigung,- und Kraftsensors	24
Abbildung 15: Schaltbildschema mit Funktionsgenerator	25
Abbildung 16: Einheitskreis [vgl.: Hilbert A., 1997, S262]	26
Abbildung 17: Sinusfunktion [vgl.: Hilbert A., 1997, S262]	26
Abbildung 18: eingespanntes Sensormodul in Richtung der y-Achse	27
Abbildung 19: Aufbau des „Force Sensitive Resistor“ [vgl.: „Interlink Electronics“ 2006-2008]	29
Abbildung 20: Luftscharter [vgl.: „Hergair“ Datasheet]	31
Abbildung 21: Signalverlauf bei einem Winkel von 45°	31
Abbildung 22: Tae-Kwon-Do Weste	35
Abbildung 23: Signal des Sensors mit weichem Hintergrund bei 45°	35
Abbildung 24: ELA Kraftmessdose [vgl.: „Entran Sensoren GmbH“, Datasheet]	38
Abbildung 25: Messaufbau für die statische Druckmessung	39
Abbildung 26: Einspannung der Kraftmessdose auf der Presse	39
Abbildung 27: Kraftmessdose eingebettet in einer Stahlkonstruktion	39
Abbildung 28: Stahlkonstruktion für die Kraftmessdose (eingebaute Kraftmessdose)	39
Abbildung 29: Nierengurt mit eingenähten Taschen	40
Abbildung 30: Nierengurt mit Luftscharter am Boxsack (Ansicht von vorne)	40
Abbildung 31: Nierengurt mit Luftscharter am Boxsack (Ansicht von der Seite)	40
Abbildung 32: Funktionsweise des Manganin [vgl.: „Vishay“, document:11524]	41
Abbildung 33: Uniaxiale Manganinfolie [vgl.: „Vishay“, uniaxial pattern]	41
Abbildung 34: mit Manganin bestückte untere Platte des Sensorgehäuses	42
Abbildung 35: Sandgestrahlte obere Platte des Drucksensors	42
Abbildung 36: Silikonschlagpilz	43

Abbildung 37: „Hottinger Baldwin System“	43
Abbildung 38: Flexi-Force Sensor der Firma „Tekscan“	45
Abbildung 39: Gekürzter FSR Sensor mit Drähten	45
Abbildung 40: Geklebte Drähte am FSR Sensor	45
Abbildung 41: Sensorgehäuse und Sensorauflage	46
Abbildung 42: Sensor (seitliche Ansicht)	46
Abbildung 43: Sensorgehäuse angenäht auf dem Nierengürtel (Ansicht von oben ohne Silikonschlagpilz)	47
Abbildung 44: Kraftsensor auf Makiwara (Holzbrett mit Hartgummi, Ansicht von vorne)	47
Abbildung 45: Schaltbild des Flexi-Force-Sensors in der Applikation	47
Abbildung 46: Schaltplanschema des Flexi-Force Sensors	48
Abbildung 47: Finales Board der Flexi-Force-Schaltung	49
Abbildung 48: Kraftmessdose KM26z [vgl.: Me-systeme Datasheet]	51
Abbildung 49: Schlag auf den „Flexi-Force“ Sensor	52
Abbildung 50: Halbleiter-DMS [vgl.: Untersweg, 1999]	54
Abbildung 51: Folien-DMS [vgl.: Untersweg, 1999]	54
Abbildung 52: Wheatstonesche Messbrücke	55
Abbildung 53: Brückenschaltung für die horizontalen Kraftwerte	56
Abbildung 54: Brückenschaltung der x- und y-Achse	57
Abbildung 55: 3D Modell in „Unigraphix“ (Ansicht von unten)	57
Abbildung 56: Kraftsensor (Ansicht von unten)	57
Abbildung 57: 3D Modell in „Unigraphix“ (Ansicht von Oben)	57
Abbildung 58: Kraftsensor (Ansicht von oben)	57
Abbildung 59: 3D Modell in „Unigraphix“ (Ansicht von der Seite)	58
Abbildung 60: Kraftsensor (Ansicht von der Seite)	58
Abbildung 61: Gehäuse des Kraftsensors	58
Abbildung 62: Kraftsensor im Gehäuse integriert	58
Abbildung 63: Platine im Gehäuse	59
Abbildung 64: Gehäuse des Sensors (seitliche Ansicht)	59
Abbildung 65: Relation zwischen NiDAQ-Karte, Software und Hardware	60
Abbildung 66: Adapter	61
Abbildung 67: Messkarte NiDAQ 6024	61
Abbildung 68: DASyLab Schaltplan zum Einlesen der Daten	62
Abbildung 69: DASyLab Schaltplan zum Ausgeben der Daten	63
Abbildung 70: Messwerte des Beschleunigungsmoduls	63
Abbildung 71: Messwerte des Kraftsensors	63
Abbildung 72: Kragträger	66

1.2 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Eigenschaften piezoelektrischer bzw. piezoresistiver Beschleunigungssensoren</i>	18
<i>Tabelle 2: Daten des Beschleunigungssensors Modell 52</i>	20
<i>Tabelle 3: Drucksensor auf Holzpflock</i>	32
<i>Tabelle 4: Messwerte des Drucksensors auf einem weichen Hintergrund</i>	35
<i>Tabelle 5: Messwerte der Kalibrierung des „Flexi-Force“ Sensors bis 1000N</i>	50
<i>Tabelle 6: „Flexi-Force“ Sensorwerte bei der Kalibrierung</i>	51
<i>Tabelle 7: Kalibrierwerte der Flexi-Force Sensoren</i>	52

1.3 Diagrammverzeichnis

<i>Diagramm 1: Amplitudengang der OPV-Schaltung</i>	26
<i>Diagramm 2: Phasengang der OPV-Schaltung</i>	27
<i>Diagramm 3: Streuung der Messungen des Drucksensors mit hartem Hintergrund</i>	32
<i>Diagramm 4: Druckwerte und Zeitwerte der gemessenen Signale mit hartem Hintergrund</i>	33
<i>Diagramm 5: Streuung der Messungen des Drucksensors auf einem weichen Hintergrund</i>	36
<i>Diagramm 6: Druckwerte und Zeitwerte der gemessenen Signale auf einem weichen Hintergrund</i>	36
<i>Diagramm 7: Messwerte der statischen Messung</i>	38
<i>Diagramm 8: Kalibrierungskurve des Manganisensors [vgl.: Rosenberg, 1980]</i>	44
<i>Diagramm 9: Kalibrierungskurve des Manganisensors im niedrigeren Druckbereich [vgl.: Rosenberg, 1980]</i>	44
<i>Diagramm 10: Kraft als Funktion der Spannung</i>	50
<i>Diagramm 11: Kalibrierungskurve der „Flexi-Force“ Sensoren bis 5000N</i>	52

1.4 Abkürzungs- und Einheits-Verzeichnis

Abkürzung	Erklärung	Einheit
a	Beschleunigung	g 1g=9,81m/s ²
dB	Dezibel	$1dB = 20 \log\left(\frac{U_e}{U_a}\right)$
F	Kraft	Newton [N]
g	Erdbeschleunigung	1g=9,81m/s ²
h	Höhe	[cm], [m], [mm]
lb	Pfund	1lb=37,32kg
m	Masse	[kg]
p	Druck	Pascal, Bar, Psi 1Bar = 10 ⁵ Pascal = 14,514 psi
t	Zeit	Sekunden [s] oder Millisekunden [ms]
v	Geschwindigkeit	[m/s]

2 Einleitung

2.1 Motivation

Die meisten trainingswissenschaftlichen Untersuchungen, die im europäischen Raum durchgeführt werden, beschränken sich auf Breitensportarten, wie Skifahren, Leichtathletik oder Radfahren. Obwohl Leistungsdiagnosen auch im Kampfsport für die Weiterentwicklung leistungsorientierter Kampfsportler an der Tagesordnung stehen sollten, hat die Leistungsdiagnostik in der Kampfsportart Kyokushin-Karate bisher kaum Beachtung gefunden. Die wenigen leistungsdiagnostischen Analysen, die im Kampfsport durchgeführt werden, beziehen sich vor allem auf westliche Kampfsportarten wie Boxen oder populäre Semi-Kontakt Karate-Stile. Es wurden bereits einige Versuche unternommen, um die Schlagkraft und Beschleunigung der Extremitäten von Kampfsportlern zu messen und zu analysieren.

Sportwissenschaftler nahmen in der Vergangenheit statische Messungen mit an der Wand befestigten Platten vor. Matsushita et al. (1989) und Pfeiffer (2006) verwendeten Kistler-Kraftmessplatten, mit integrierten Dehnmessstreifen, um die Schlagkraft zu messen.

Pierce (2006) nimmt als einer der wenigen Verfasser dynamische Messungen mit dem „bestshot System“ vor. In den Boxhandschuhen der Kämpfer werden Sensoren integriert, welche mit einer im Handschuh befestigten Elektronikeinheit verbunden sind. Sie erhält das Signal vom Sensor und übermittelt es mittels Radiofrequenz an einen Receiver außerhalb der Kampffläche. Das untere Kraft-Limit, das vom System aufgenommen werden kann beträgt 500N. Pierce lässt Boxer verschiedener Gewichtsklassen gegeneinander kämpfen und misst Werte zwischen 866 und 5300N.

Walilko et al. (2005) misst die Beschleunigung der Fäuste mit Beschleunigungssensoren der Firma „Endevko“. Die Signale wurden mittels des „IDDAS data acquisition system“ aufgenommen und mit 14,7kHz gesampelt. Ein Tekscan Kraftsensor des Modells 9500 wurde am Kinn eines Dummys eingebaut, um die Schlagkraft der Probanden zu messen. Dabei kam eine High Speed Kamera des Typs Kodak HG2000 für die Videoanalyse zur Verwendung.

Joch et al. (1981) füllte einen Schlagball mit Wasser, um den Druck von Schlägen zu messen. Wasserbälle sind jedoch auf Grund ihrer Unwucht schwer zu handhaben und deshalb nicht besonders geeignet für Messungen dieser Art. Nien (2004) stellt eine Applikation aus einem Box-Dummy her, um die Reaktionszeit und Beschleunigung von Tae-Kwon-Do Kämpfern zu analysieren. Ein dreiachsiger piezoelektrischer Beschleunigungssensor CXL100HF3 der Firma „Crossbow“ wurde im Inneren und eine LED auf der Oberfläche des Dummys angebracht. Beide Signale wurden mittels einer

6024 NiDAQ Karte in ein digitales Signal umgewandelt. Der Proband steht mit einem Fuß auf einer Switch Box, die ein Signal sendet, wenn er den Fuß anhebt, weil das LED Licht am Dummy aufleuchtet. Die Reaktionszeit wurde durch die Subtraktion der Zeit vom Abheben des Fußes und des Aufleuchtens der LED Lampe berechnet. Synchron dazu wurden die Signale des Beschleunigungssensors aufgenommen.

Für die Leistungsdiagnostik im Shotokan Karate wurde ein Messplatz, bestehend aus einem Infrarotmesssystem AS 200, basierend auf Infrarotmarkern, deren in bestimmter Frequenz aufleuchtende Signale von drei Infrarotkameras aufgenommen werden, aufgebaut. Die Marker werden an relevanten Körperpunkten angebracht, um die dreidimensionalen Bewegungsdaten dieser Punkte automatisch zu erfassen. Zusätzlich dazu wurden piezoresistive Beschleunigungssensoren, um die Beschleunigung der Stoßfaust zu erhalten und Elektroden, für eine bipolare Ableitung in der Elektromyographie für die intermuskuläre Koordination, verwendet. Eine mit 200Hz aufnehmende Kamera wurde für die Aufzeichnung von dreidimensionalen Bewegungen aufgestellt. Für die Synchronisation der Videokameras untereinander war der Einsatz eines Triggers, welcher durch die gleichzeitige Aktivierung eines Licht- und Spannungssignals die Synchronisation garantiert, unabdingbar. Ein Problem beim Aufzeichnen der Infrarotsignale hat sich durch einen nicht ständigen Sendekontakt zwischen Kamera und Marker dargestellt. [vgl.: Hofman, 2005]

Derselbe Messplatz wurde verwendet, um mehrere Beschleunigungssensoren zu vergleichen und den besten Sensor für die Aufzeichnung des zeitlichen Verlaufes der Beschleunigung einzelner Körperteile herauszufinden. Es wurde ein dreiachsiger kapazitiver Beschleunigungssensor der Firma „XSENS“ mit einem zweiachsigen piezoresistiven der Firma „BIOVISION“, und einem einachsigen piezoelektrischen „Kistler“-Sensor verglichen. [vgl.: Langenbeck, 2005]

Hashimoto (2004) machte eine Studie über die Aufprallkräfte und Reaktionskraft von Kampfsportlern. Durch mehrere, in einer mit Gummi umhüllten Stahlplatte eingearbeiteten, Dehnmessstreifen wird der Aufprall gemessen. Ein dreidimensionaler „Gyro Sensor“ wurde für die Bewegungsanalyse verwendet, der wegen seiner Größe leicht an den Probanden angebracht werden konnte ohne diese in ihrer Bewegungsfreiheit einzuschränken.

Ziel dieser Arbeit ist es, mit Hilfe moderner Sensortechnik, einen Messplatz aufzubauen, der Kyokushin-Karatekas bei der kämpferischen Weiterentwicklung unterstützt. Sie soll sich an Trainer im Kyokushin-Karate richten, um für die Trainingsgestaltung eine bessere wissenschaftliche Basis zu erhalten. Trainer in anderen Sportarten werden durch die Rückmeldung von Messsystemen unterstützt, indem sie zu den betrachteten Technikausführungen Messwerte erhalten. Für die Technikanalyse leistungsorientierter

Kyokushin-Karatekas ist man derzeit auf die visuelle Auffassungsgabe des Trainers angewiesen, da noch keine weiteren Analysemöglichkeiten vorhanden sind.

Der Messaufbau, der aus dieser Arbeit hervor geht, wird für die Signalaufnahme der Schlagkraft und Beschleunigungsmessungen in der Diplomarbeit „Biomechanische Schlaganalyse im Kyokushin-Karate“ [vgl.: Fraunschiel, 2008] herangezogen und kann zusätzlich von Sportwissenschaftlern verwendet werden, um damit z.B. Verletzungsanalysen vorzunehmen.

3 Aufgabenstellung und Konzept

3.1 Aufgabenstellung

Es soll ein Messplatz aufgebaut werden, bei dem Sensoren, die sowohl die Kraft als auch die Beschleunigung von Schlägen messen, zum Einsatz kommen. Die Versuchsanordnungen, ersichtlich in Abbildung 1, sollten aus einer oder mehreren Westen mit integrierten Kraftsensoren und einem am Akteur angebrachten Beschleunigungsmessgerät bestehen. Die analogen Signale sollen mittels eines geeigneten A/D-Wandlers diskretisiert, quantisiert und am Computer dargestellt und ausgewertet werden.

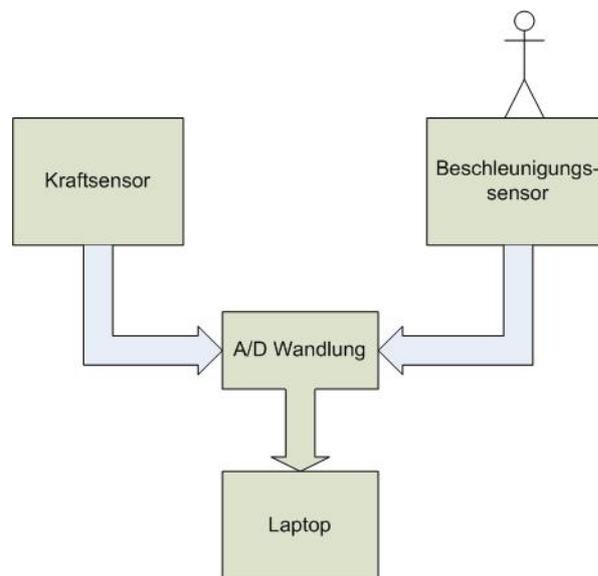


Abbildung 1: Blockschaltbild

3.1.1 Sensor-Weste

Die Weste soll so konzipiert sein, dass man an ihr Sensoren befestigen kann, die Schlagkraft bzw. Druck messen können. Sie soll mobil und größenverstellbar sein, sodass sie von verschiedenen Personen getragen oder an einem Sandsack platziert werden kann. Ob sie mit oder ohne Schaumstoff ausgefüllt sein sollte, muss im Zuge dieser Arbeit analysiert werden. Die Positionen der KO-Punkte des menschlichen Körpers sollen das Ziel der Sensoranbringung darstellen. Befestigungs-Punkte sind entweder der Solar Plexus¹, die Leber oder die Milz. Um den Gegner kampfunfähig zu machen, muss man ihn

¹ Nervenbündel in der Mitte des Abdomen, unter dem Brustbein

im richtigen Moment an den gerade genannten Punkten, treffen. [vgl.: Fraunschiel, 2008, 3.2 Physiologie]

Würde man eine Schlagplatte wie die „Kistler“ Kraftmessplatte Modell 9261A mit der Elektronikeinheit 9805 zur Messung von Schlagkraft [vgl.: Pfeifer, 2006] verwenden, hätte man keine Aussage darüber, ob man auf einen Punkt getroffen hat, der auch eine Kampfunfähigkeit des Gegners auslöst. Als Richtwert für den Messbereich der Sensoren gilt der Bereich zwischen 500 und 7000 Newton. [vgl.: Stern M, 2006]

Es muss darauf geachtet werden, dass das Sensorgehäuse möglichst flach und in seinem Durchmesser so groß wie eine durchschnittliche Faust ist. Die Schaltung für die Sensorsignalverarbeitung ist im Gehäuse zu integrieren. Die Sensoren sollen in drei Achsen die Kraft messen, um eine Aussage über die Schlagrichtung der Technik des Probanden zu erhalten.

3.1.2 Beschleunigungsmodul

Um die Beschleunigung beim Aufprall eines Faustschlages oder Kicks zu messen, soll ein Gerät entwickelt werden, das auf dem Handgelenk oder dem Fuß der schlagenden Person angebracht werden kann, ohne diese in ihrer Bewegungsfreiheit einzuschränken. Es soll die Größe einer Uhr nicht überschreiten, und den darin integrierten Sensoren muss es möglich sein eine Beschleunigung bis zu 100g zu messen. Die Platine soll im Sensorgehäuse direkt integriert sein, um so nah wie möglich bei der Signalquelle zu sein, damit das Sensorsignal direkt verarbeitet werden kann. Das Sensormodul soll die longitudinale, transversale und sagittale Bewegung der Extremitäten nachvollziehen können.

3.2 Konzept

Der Messaufbau für die Leistungsdiagnostik im Kyokushin-Karate besteht aus einer Kraftsensor-Weste und einem uhrenähnlichen Beschleunigungsmessgerät. (Abbildung 2) Für die mobile, größenverstellbare Schlagweste wird ein Nierengürtel verwendet, da dieser stabil genug ist, um Sensoren aus verschiedenen Materialien daran zu befestigen. Er ist leicht anzuschallen, größenverstellbar und kann somit an verschiedenen Targets, wie z.B.: dem Boxsack, angebracht werden.

Als dreiachsiger Beschleunigungssensor fungieren drei einachsige Sensoren, die anhand ihrer Befestigungsvorrichtung die longitudinale, transversale und sagittale Schlagrichtung der Extremitäten abdecken.

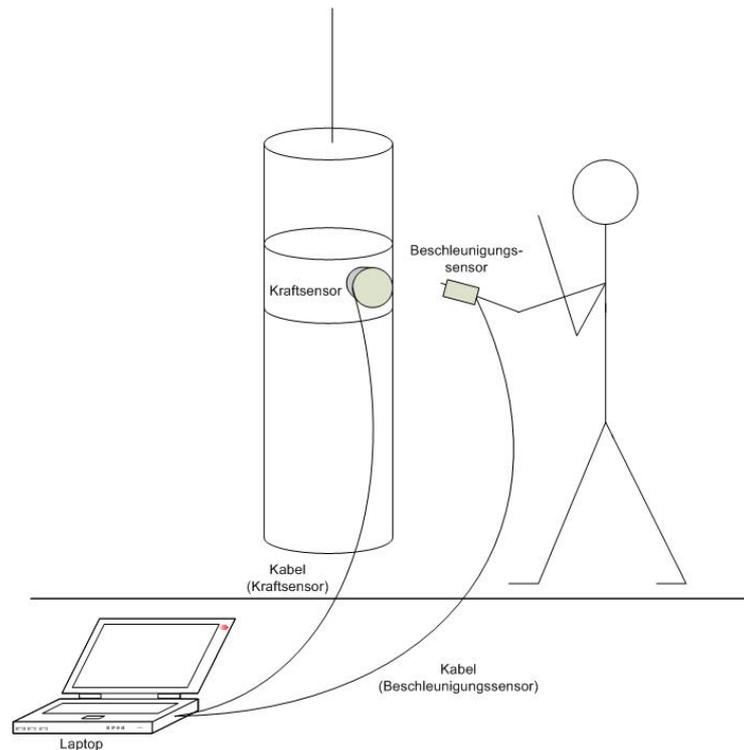


Abbildung 2: schematische Darstellung des Messplatzaufbaus

Im Folgenden werden überblicksmäßig die Funktionalitäten der einzelnen Sensoren vorgestellt, welche im Zuge dieser Arbeit getestet wurden.

3.2.1 Kraft bzw. Drucksensoren

Der erste Drucksensor besteht aus einem mit Wasser gefüllten Luftschalter. Die Kissen werden punktuell an KO-Punkten am Abdomen, dem Solar Plexus, der Leber und der Milz, auf einem Nierengürtel angebracht. Durch Schläge auf die Luftpolster wird das Wasser komprimiert und die daraus resultierende Druckänderung wird von einem Drucksensor gemessen und als Spannung wieder gegeben.

Der zweite Drucksensor besteht aus drei druckempfindlichen DMS²-Manganin Folien, die auf einer Aluminiumscheibe angebracht sind. Eine zweite Scheibe drückt mit Bolzen auf die Manganin-Folien. Wird auf die Folien gedrückt, weisen sie eine Widerstandsänderung auf und messen somit den Druck, der auf sie wirkt.

Ein aus Stahl gefertigter Kraftsensor misst die auf ihn aufgebrachte Kraft in drei Achsen. Er befindet sich in einem teils aus Alu, teils aus Stahl gefertigten Gehäuse. Um die Kraft der z-Achse zu messen, sind vier DMS an der Unterseite auf den Kragträgern des Umsatzelements befestigt. Um die Kräfte der x- und y-Achse zu messen, werden vier DMS, welche die Bewegung in der horizontalen Ebene aufnehmen, seitlich am Sensor

² Dehnmessstreifen

angebracht. Durch die Biegung an den Stahlbalken weisen die DMS eine Widerstandsänderung auf und messen somit die Kraft die auf den Stahlsensor gebracht wird.

FSR³ Sensoren der Firma „Tekscan“ werden in ein Alu-Gehäuse eingebaut und auf einen Nierengürtel im Bereich des bereits erwähnten KO-Punkt, dem Solar-Plexus, des Probanden angebracht. Die Sensoren ändern ihren Widerstand proportional zum aufgetragenen Druck, wodurch eine Änderung des Signals hervorgerufen wird.

3.2.2 Beschleunigungsmodul

Auf Grund der hohen Beschleunigung der Faustbewegung ist darauf zu achten, Sensoren mit einem hohen Messbereich zu wählen. Deshalb werden bis zu 1000g messende piezoresistive Beschleunigungssensoren, der Firma „Measurement Specialities“ in einer Aluminium-Ummantelung integriert, die man durch einen Klettverschluss an den Stellen befestigen kann, an denen man das Auftreten negativer Beschleunigungen messen will. Es werden drei einachsige Beschleunigungssensoren verwendet, die durch ihre Befestigungsvorrichtung einen triaxialen Sensor ergeben. Die Platine befindet sich unter dem Sensor und ist in dessen Gehäuse eingebettet.

³ Force-Sensitive-Resistor

4 Methoden

4.1 Grundlagen der Sensortechnik und Messwertaufnahme

Der technische Vorgang zur Gewinnung von Informationen (Messwerten) über den physikalischen oder chemischen Zustand von Systemen oder Prozessen, wird der Begriff Messwertaufnahme verstanden. Die zeitliche Folge von Messwerten nennt man Signal, welches eine zeitvariable physikalische Zustandsgröße darstellt. Die Sensortechnik befasst sich mit der Entwicklung technischer Mittel (Sensoren) zur Erfassung der zeitvariablen physikalischen nichtelektrischen Zustandsgrößen. [vgl.: Schiessle, 1992]

4.1.1 Signalformen

Der Sensor gibt ein elektrisches Signal ab, welches als Spannung oder Strom dargestellt wird. Seine Amplitude oder Frequenz dient als Informationsparameter, durch den man den physikalischen Zustand eines zu steuernden Prozesses in seinem zeitlichen Verlauf erfahren kann. In der Signaltheorie werden die möglichen Signalformen nach deterministischen und stochastischen Signalen systematisiert. Der zu erwartende Signalwert deterministischer Signale ist zu jedem beliebigen Zeitpunkt angebar. Stochastische Signale haben einen regellosen, zufälligen Signalverlauf.

Signale werden unterteilt in:

- analoge Signale
 - Diese sind zeitkontinuierliche Signale, welche innerhalb des Messbereichs jeden Wert annehmen können. Analoge Signale sind somit stetig und werden unterteilt in:
 - statische Signale: Der Amplituden-Signalwert ist innerhalb des Messbereichs über die Zeit konstant
 - dynamische Signale: ihr Amplituden-Signalwert ist eine Funktion der Zeit
 - ein Signalgemisch: eine Überlagerung des statischen und dynamischen Signals
- diskrete Signale
 - sind im Messbereich quantisiert und werden in eine endliche Zahl von diskreten Einzelwerten unterteilt. Es wird unterschieden zwischen:
 - amplitudenquantisierte Signalen
 - amplituden- und zeitquantisierte Signalen
 - digitalen Signalen (nur zeitquantisierten Signalen)

In der Praxis treten immer deterministische Signalformen mit einem stochastischen Anteil, dem Rauschen, auf. Das Rauschen ist im Allgemeinen unerwünscht und muss mit technischen Mitteln unterdrückt werden. [vgl.: Schiessle, 1992]

4.1.2 Das Sensorsystem

Der Sensor ist ein technischer Bauteil, der eine physikalische nichtelektrische Zustandsgröße in ein elektrisches Signal umwandelt.

Sensoren lassen sich anhand der Energieverwendung in aktive und passive Sensoren einteilen. Aktive Sensoren enthalten passive Bauelemente, deren Parameter durch das Messsignal verändert werden. Diese Parameter werden, durch die Hilfe von zugeführter Hilfsenergie, in elektrische Signale umgeformt. Dadurch ist es möglich sowohl statische als auch quasistatische Zustände, also eine Abfolge von Gleichgewichtszuständen, zu bestimmen. Passive Sensoren beinhalten einen Wandler, der den Messparameter ohne die Hilfe von elektrischer Energie, in ein elektrisches Signal umwandelt. Auf Grund dieser physikalischen Prinzipien ist es nur möglich eine Änderung der Messwerte zu detektieren. [vgl.: Tränkler, 1998]

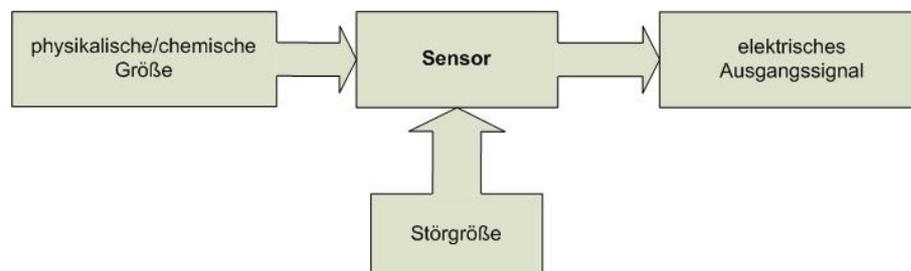


Abbildung 3: Sensor

Der Sensor besteht aus verschiedenen Baueinheiten. Die physikalische nichtelektrische Messgröße wird von einem Umsatzelement aufgenommen und in eine elektrisch aufnehmbare Größe mittels einem elektrische Sensorelement umgewandelt.

Das mechanische Umsatzelement kann z.B. ein Biegebalken, eine Membran oder eine seismische Masse sein. Das elektrische Sensorelement kann entweder ein Dehnmessstreifen, ein Widerstand, eine Induktivität, eine Piezokeramik oder eine Kapazität sein. [vgl.: Schiessle, 1992] Die wichtigsten der unterschiedlichen Effekte auf denen die Sensorelemente beruhen werden in den nächsten Absätzen erklärt.

- Piezoelektrischer Effekt:

Das Wort „piezo“ stammt aus dem Griechischen und bedeutet „drücken“. Übt man auf einen ferroelektrischen Kristall eine Druckkraft aus, werden die Ladungen der Kristallatome gegeneinander verschoben. Ein Dielektrikum mit spontan polarisierten Bereichen wird als Ferroelektrikum bezeichnet. Diese Ladungsverschiebung ist nach außen hin als Oberflächenladung messbar. Im Kristallinneren wird sie durch die Polarisation beschrieben. Die Ladungsmenge ist proportional zur Druckkraft und kann durch Kondensatorelektroden mit Hilfe der elektrischen Influenz abgenommen werden.

Der piezoelektrische Effekt ist eine lineare elektromechanische Wechselwirkung zwischen dem mechanischen und dem elektrischen Zustand in Kristallen, die kein Symmetriezentrum besitzen. Dieser Effekt ist umkehrbar (reziproker piezoelektrischer Effekt), denn legt man an die Kristallflächen eine elektrische Spannung an, so bewirkt diese eine Dehnung des Kristalls. Der piezoelektrische Effekt lässt sich in unterschiedliche Klassen, die sich je nach Stellung der Vektoren, Kräfte, Polarisation und Oberflächennormalen zueinander unterscheiden, einteilen. [vgl.: Tränkler, 1998]

- Piezoelektrischer Longitudinaleffekt:
Die elektrische Polarisation des Kristalls und die auf ihn wirkende mechanische Kraft weisen dieselbe Richtung auf (Abbildung 4)
- Piezoelektrischer Transversaleffekt:
Die auf den Kristall einwirkende Kraft steht senkrecht auf der elektrischen Polarisation (Abbildung 4)
- Piezoelektrischer Schereffekt: Es wirken Scherspannungen, die senkrecht zu den Oberflächennormalen wirken.

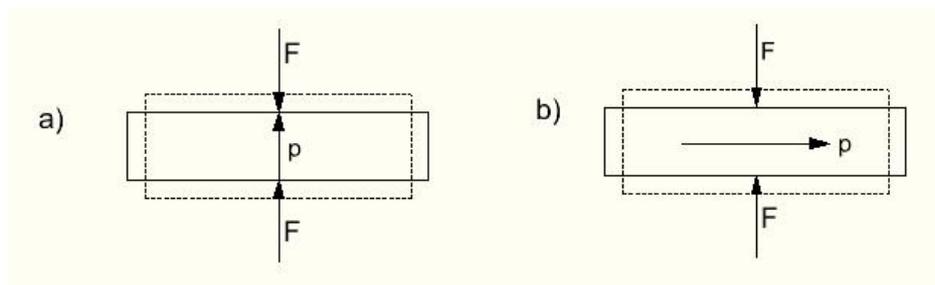


Abbildung 4: a) Longitudinaleffekt, b) Transversaleffekt

- Piezoresistiver Effekt:

Wirken äußere mechanische Kräfte auf einen elektrisch leitfähigen Werkstoff ein, so kommt es zu einer Deformation. Die damit verbundene Widerstandsänderung wird als piezoresistiver Effekt bezeichnet. Der Widerstand R eines leitfähigen Materials wird durch nachfolgende Formel beschrieben, wobei δ den spezifischen Widerstand darstellt. [vgl.: Prechtl, 1995]

$$R = \frac{\delta \cdot l}{A} \quad (4.1)$$

Nach Gleichung (4.1) ist ersichtlich, dass bei einer Änderung der Fläche A oder Länge l des Materials eine Widerstandsänderung auftritt.

Werden z.B. auf einem Biegebalken Widerstandsbahnen angebracht, so lässt sich über die infolge mechanischer Spannung auftretende Veränderung des Widerstandswertes ein Maß für die Auslenkung des Biegebalkens und damit für die einwirkende Größe ermitteln. Viele piezoresistive Sensoren, die auf dem piezoresistiven Effekt beruhen sind aus Halbleitern aufgebaut. Die Ursache dieses Effekts in Halbleitern liegt in der Beeinflussung

der Bandstruktur, die sich durch die Verschiebung der Gitteratome aufgrund der ausgeübten Kräfte ergibt. Die isotrope Verteilung der Ladungsträger auf die Leitungsbandminima bzw. Valenzbandmaxima wird durch mechanische Spannung gestört. Dadurch wird die ursprüngliche Isotropie der Leitfähigkeit aufgehoben. [vgl.: Riedel, 1995]

- Kapazitiver Effekt:

Beim kapazitiven Effekt werden Kondensatoren eingesetzt, welche auf äußere Krafteinwirkung mit einer Kapazitätsveränderung reagieren. Das einfachste Modell eines kapazitiven Aufnehmers ist das Modell des Plattenkondensators. Dabei wird die Kapazität durch den Abstand d der gleich großen, ebenen, parallelen Platten, mit der Fläche A , und den Eigenschaften des Dielektrikums, mit der relativen ϵ_r und absoluten ϵ_0 Dielektrizitätskonstante, zwischen den Platten bestimmt. Für die elektrische Kapazität C des Flächenkondensators mit Dielektrikum gilt: [vgl.: Schiessle, 1992]

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad (4.2)$$

Bei äußerer Krafteinwirkung verändert sich der Abstand der Platten und damit die Kapazität des Plattenkondensators.

- Induktiver Effekt:

Der induktive Effekt basiert auf den physikalischen Effekten des Elektromagnetismus. Das einfachste Modell des induktiven Effekts kann durch eine Spule mit einem weichen magnetischen Kern beschrieben werden. Wenn sich der magnetische Fluss zeitlich ändert wird nach dem Induktionsgesetz eine Spannung induziert.

$$u_{ind}(t) = -n \cdot \frac{d}{dt} \cdot \Phi(t) \quad (4.3)$$

Wobei $u_{ind}(t)$ die elektrische Umlaufspannung, $\Phi(t)$ der magnetische Fluss und n die Windungszahl der Spule ist. Nach dem Induktionsgesetz ist somit die Summe der Spannung in einem geschlossenen Kreis ungleich Null. [vgl.: Schiessle, 1992]

Im Laufe des Projektes haben sich neue Möglichkeiten, die Schlagkraft zu messen, dargeboten. Es entstanden vier Druck bzw. Kraftsensoren und ein Beschleunigungssensor. Die verschiedenen Sensoren dienen unter anderem dazu, auch die Richtigkeit der Messwerte zu überprüfen. Trotz der fünf zur Verfügung stehenden

Sensoren musste bei der Schlagkraftmessung auf drei verzichtet werden, da sie sich in dieser Hinsicht als unbrauchbar herausgestellt hatten⁴.

4.2 Beschleunigungssensoren

Ein Beschleunigungssensor ist ein Sensor, der die positive oder negative Beschleunigung durch eine, zur Beschleunigung a proportionale, elektrische Ausgangsgröße, anzeigt. Messgröße ist die Beschleunigung a , die auch oftmals als Vielfaches der Erdbeschleunigung g angegeben wird. [vgl.: Ebel, 2005]

$$a = m \cdot g \quad (4.4)$$

Unter der Beschleunigung a versteht man die Änderung der Geschwindigkeit Δv eines Körpers in einem bestimmten Zeitabschnitt Δt . Bei einer linearen Bewegung lässt sich die Beschleunigung als skalare Größe a angeben. [vgl.: Ebel, 2005]

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (4.5)$$

Nach dem newtonschen Kraftgesetz ist das Produkt aus Körpermasse m und Beschleunigung a gleich der einwirkenden Kraft F . [vgl.: Ebel, 2005]

$$F = m \cdot a \quad (4.6)$$

4.2.1 Verschiedene Wirkungsprinzipien der Beschleunigungssensoren

4.2.1.1 Das Feder-Masse-System

Das Grundprinzip aller Sensoren zur absoluten Messung der Beschleunigung besteht darin, die Wirkung der Beschleunigung auf ein gedämpftes Feder-Masse-System zu messen. Diese Wirkung besteht darin, dass die elastisch an das Gehäuse angekoppelte seismische Masse sich bei Beschleunigung des Gehäuses gegenüber dem Gehäuse verschiebt. Die Masse bewegt sich dabei in einem Medium, durch dessen Viskosität bei Bewegung der Masse eine Bremskraft proportional zu ihrer Geschwindigkeit im Gehäuse hervorgerufen wird. Bei sich sprungartig ändernder Beschleunigung wird so die Bewegung der Masse zu ihrer Endlage hin gedämpft. Bei harmonischen Verläufen der Beschleunigung wird die Schwingung der Masse gedämpft.

⁴ Siehe Kapitel 5

Beschleunigungssensoren lassen sich hinsichtlich ihres Wirkprinzips in piezoresistive, piezoelektrische, kapazitive, induktive, thermische und optische Sensoren einteilen. Abhängig von ihrem Wirkungsprinzip können die Sensoren statische oder dynamische Beschleunigungen erfassen. Bei der Messung einer statischen Beschleunigung wird davon ausgegangen, dass das Sensorgehäuse eine konstante Beschleunigung in eine Richtung erfährt und dass die Masse ihre stationäre Endlage erreicht hat. Bei der Erfassung des dynamischen Verhaltens wird der beliebige zeitliche Verlauf der Beschleunigung des Sensorgehäuses gemessen. [vgl.: Tränkler, 1998]

In den folgenden Absätzen wird näher auf die verschiedenen Prinzipien der Beschleunigungssensoren eingegangen und jene an Beispielen erklärt.

4.2.1.2 Piezoelektrischer Beschleunigungssensor

Ein piezoelektrischer Beschleunigungssensor besteht aus einer seismischen Masse, die mit einem Quarzkristall verbunden ist. Beim Auftreten einer Beschleunigung übt die Masse aufgrund ihrer Trägheit eine Kraft aus, die als Scherkraft auf den Quarzkristall wirkt. Der piezoelektrische Kristall erzeugt an den Elektroden eine Ladung, die proportional zur Scherkraft ist. Diese wird über einen internen Ladungsverstärker durch Impedanzwandlung in eine belastbare Spannung gewandelt, und über ein Verbindungskabel einem Messverstärker zugeführt. [vgl.: Stockhausen, 2008] Bevorzugte piezoelektrische Materialien sind Keramiken wie Barium- oder Blei-Zirkonium-Titan, Quarz, Zinkoxid, aber auch Polymere wie PVDF.

Sie können Schwingungen bis zu 100g in einem weiten Temperaturbereich aufnehmen und sind zudem sehr robust gegenüber unterschiedlichen Umwelteinflüssen. Des Weiteren sind hohe Linearitäten, keine Hysteresen und gute Ladungsausbeuten wichtige Eigenschaften. [vgl.: Langenbeck, 2004]

Ein weiterer Vorzug der Aufnehmer besteht darin, dass die Federkonstante des Feder-Masse-Systems dem Elastizitätsmodul entspricht, sodass die Resonanzfrequenz besonders hoch ist. Der Nachteil besteht darin, dass wegen des endlichen Isolationswiderstandes, die durch die Beschleunigung erzeugte Ladung, nach endlicher Zeit abfließt, sodass statische Beschleunigungen nur für kurze Zeit stabil gemessen werden können. [vgl.: Tränkler, 1998]

4.2.1.3 Piezoresistiver Beschleunigungssensor

Bei piezoresistiven Beschleunigungssensoren wird die, bei der Auslenkung der seismischen Masse in der Aufhängung auftretende, Materialdehnung verwendet, um die Auslenkung zu messen. Im einfachsten Fall (Abbildung 5) besteht die Aufhängung aus einem Biegebalken auf dem eine Masse aus Silizium angebracht ist. Wird der Sensor beschleunigt, lenkt die Masse aus Silizium den Biegebalken aufgrund ihrer Trägheit aus

seiner Ruhelage aus. Auf diesem Biegebalken, der besonders dehnungsempfindlich ist, sind Piezowiderstände durch Ionenimplantation angebracht. Diese Piezowiderstände ändern, wegen der entstehenden Spannungen und der daraus resultierenden Biegung, ihren elektrischen Widerstand. In Abbildung 5 sind die Widerstände in Brückenform zusammengeschaltet. Mit Hilfe dieses Aufbaus lassen sich die wirkenden Beschleunigungswerte bestimmen. [vgl.: Spick, 2004]

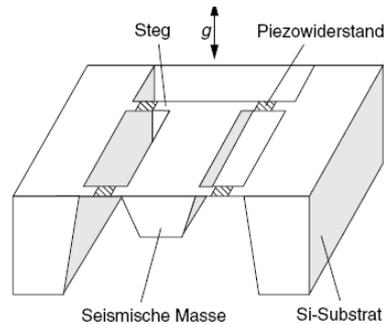


Abbildung 5: Piezoresistiver Beschleunigungssensor mit Halbbrücke [vgl.: Schmidt, 2002]

Um den Vergleich zwischen piezoresistiven und piezoelektrischen Sensoren anschaulich darzustellen, werden die wichtigsten Eigenschaften in einer Tabelle 1 [vgl.: Schanz, 1988] aufgelistet.

Sensoreigenschaften	Piezoelektrisch	Piezoresistiv
Hilfsenergie erforderlich	Nein	Ja
Statische Messung möglich	Nein	Ja
Empfindlich gegen Umwelteinflüsse	Gering	Kaum
Ausgangsimpedanz	Hoch	Niedrig

Tabelle 1: Eigenschaften piezoelektrischer bzw. piezoresistiver Beschleunigungssensoren

4.2.1.4 Kapazitiver Beschleunigungssensor

Der kapazitive Beschleunigungssensor besteht in Abbildung 6 aus zwei nebeneinander liegenden, H-förmig angeordneten Plattenkondensatoren, die eine gemeinsame mittlere Platte verwenden, auch Differenzialkondensator genannt.

Die bewegliche mittlere Platte wird als federndes Pendel konstruiert. Wird der Sensor beschleunigt, verschiebt sich die mittlere Platte, die als träge seismische Masse fungiert, nach links oder nach rechts. Dadurch erhöhen bzw. verringern sich die Abstände zu den festen Kondensatorelektroden, die zum Mittelteil die Kapazitäten $(C1 + \Delta C)$ bzw. $(C2 - \Delta C)$ bilden, und das Kapazitätsverhältnis der beiden Kondensatoren ändert sich. Die Kapazitätsänderung ΔC ist in dieser Differentialanordnung proportional zur Wegänderung Δl und damit auch proportional zur Beschleunigung a . Der Zusammenhang zwischen

Auslenkung und Kapazitätsänderung, bedingt durch die übliche exponentielle Kapazitätsänderung eines Kondensators, ist nicht linear. [vgl.: Schmidt, 2002]

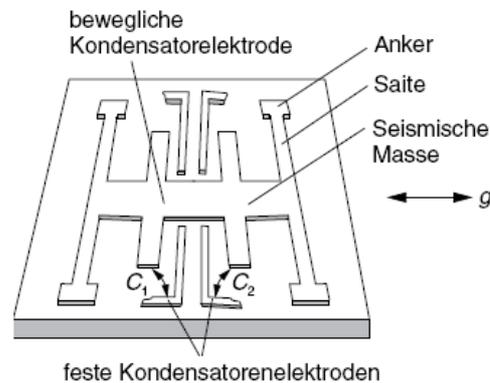


Abbildung 6: Kapazitiver Beschleunigungssensor [vgl.: Schmidt, 2002]

4.2.1.5 Induktiver Beschleunigungssensor

Induktive Beschleunigungssensoren verwenden induktive Wegaufnehmer bzw. Differentialtransformatoren zur Messung der Verschiebung der seismischen Masse. Die seismische Masse ist elastisch an das Gehäuse angekoppelt und verschiebt sich bei Beschleunigung gegenüber dem Gehäuse. [vgl.: Untersweg, 1999]

Die seismische Masse wird durch einen elastisch aufgehängten Permanentmagneten gebildet, der durch die Beschleunigung seinen Abstand gegenüber einem Widerstand ändert.

4.2.1.6 Thermische Beschleunigungssensoren

Thermische Beschleunigungen nutzen den Effekt der Wärmeleitung. Die Wärmeleitung ändert ihren Wert in Abhängigkeit vom Abstand einer Wärmequelle zu einer Wärmesenke. Wenn die seismische Masse durch Wärme als Wärmequelle ausgebildet wird, die sich unter der Wirkung der Beschleunigung zwischen zwei als Wärmesenken wirkenden Platten bewegt, stellt sich eine Gleichgewichtstemperatur der Masse ein, die von der Größe der Beschleunigung abhängt. Die Bandbreite dieser Sensoren ist relativ gering, die Störsicherheit jedoch hoch. [vgl.: Tränkler, 1998]

4.2.1.7 Optische Beschleunigungssensoren

Optische Beschleunigungssensoren nutzen die Änderungen von Lichtintensitäten, die Zählung des Durchlaufes der Interferenzstreifen bei Laserinterferometern oder den Laser-Doppler-Effekt. Um die Änderung der Lichtintensität nachvollziehen zu können, wird der Biegebalken des Sensors als Spiegel ausgebildet, der durch einen gegenüber liegenden monochromatischen Lichtwellenleiter beleuchtet wird. Die Intensität der Reflexion ist somit von der Neigung des Biegebalkens abhängig. Erfolgt die Beleuchtung

des Biegebalkens durch kohärentes Licht, entstehen bei der Verschiebung Interferenzstreifen, deren Anzahl zur Verschiebung proportional ist. Bei Nutzung des Doppler-Effektes entsteht eine Verschiebung der Lichtwellenlänge, die von der Geschwindigkeit des reflektierenden Teiles abhängt. Aus der Geschwindigkeit kann dann die Beschleunigung berechnet werden. Dieses Verfahren eignet sich vor allem zur Messung der Beschleunigung auf nicht berührten Oberflächen z.B. auf Maschinenteilen. [vgl.: Tränkler, 1998]

4.2.2 Beschleunigungsmodul

Für die Beschleunigungsmessung werden drei einachsige Beschleunigungssensoren des Modells 52 der Firma „Measurement Specialities“ verwendet. Diese basieren auf einem piezoresistiven MEMS (Micro-Elektro-Mechanical System). Ein Micro-Electro-Mechanical System ist die Kombination aus mechanischen Elementen, Sensoren und elektronischen Schaltungen auf einem Chip und wird aus Silizium hergestellt. Die Dimensionen des Sensors sind in Abbildung 7 dargestellt. Der Sensor ist vertikal zu seiner Längsachse sensibel. Die Auswahl der Beschleunigungssensoren ist nach folgenden wesentlichen Eigenschaften getroffen worden:

- kleine Dimensionen
- hoher Messbereich
- außerordentliche Erschütterungsstabilität

Eigenschaften des Beschleunigungssensors:

Sensitivität	0,15mV/g
Versorgungsspannung	2V-10V
Eingangswiderstand	3500Ω - 4800Ω
Ausgangswiderstand	2700Ω - 4800Ω
Kabelausgangsverbindungen	+EXC...rot -EXC...schwarz +OUT...grün -OUT...weiß
Gewicht	0,5 Gramm
Arbeitstemperatur	-40° - 121°C

Tabelle 2: Daten des Beschleunigungssensors Modell 52

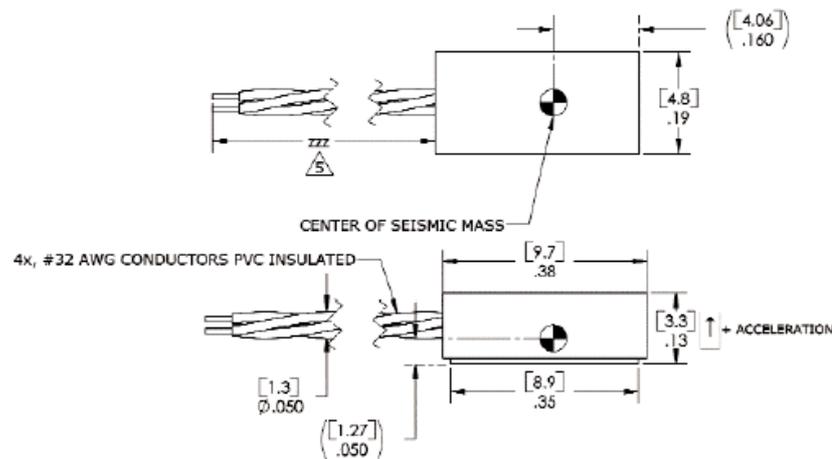


Abbildung 7: Dimensionen (Inch) des Beschleunigungssensors [vgl.: „Measurement Specialties“ Datasheet]

4.2.2.1 Befestigungsvorrichtung

Damit die vertikale, horizontale und Sagittale Ebene von jeweils einem Sensor abgedeckt ist, werden die drei Beschleunigungssensoren in einem Plastik-Würfel (Abbildung 9) integriert. Jeder Sensor ist einer Achse im kartesischen Koordinatensystem zugeordnet. (Abbildung 8)

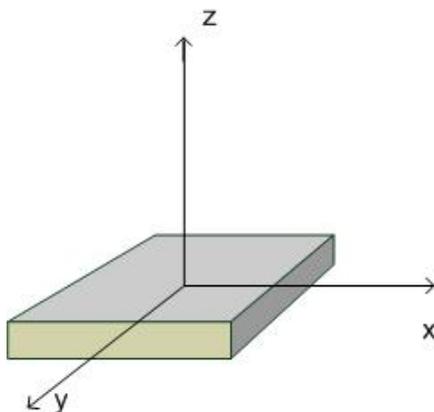


Abbildung 8: Achsenorientierung des Beschleunigungssensors

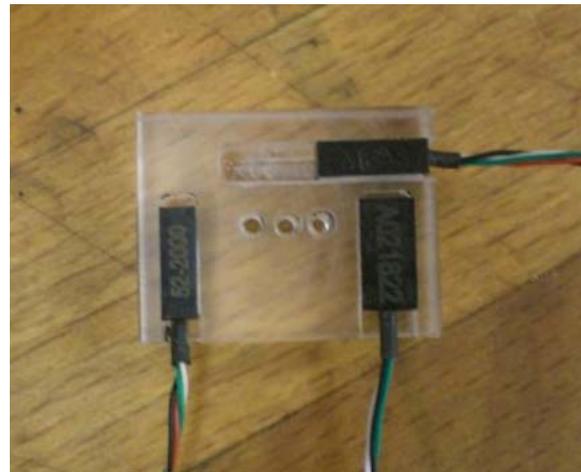


Abbildung 9: Befestigungsvorrichtung der Beschleunigungssensoren

In Abbildung 10 ist der Aufbau des Moduls ersichtlich. Der Würfel ist in einem ausgehöhlten Gehäuse untergebracht, das auf der Basisplatte angeschraubt ist. An der Wand des Stahlzylinders befindet sich die Buchse des vierpoligen Lemosteckers. Unter dem Würfel, direkt auf der Basisplatte befindet sich die Platine, auf der die Ausgänge der Sensoren angelötet sind.



Abbildung 10: Innenleben des Moduls

Das Gehäuse hat einen Durchmesser von 45mm und ist 24mm hoch. Das Modul (Abbildung 11) kann mittels eines Klettverschlussbandes entweder am Handgelenk oder am Bein befestigt werden, ohne den Probanden in seiner Bewegungsfreiheit einzuschränken.



Abbildung 11: Gehäuse des Beschleunigungssensors



Abbildung 12: Anbringungsmöglichkeit des Beschleunigungsmoduls

4.2.2.2 Schaltung der Beschleunigungssensoren

Die Schaltung ist eine analoge Verstärkerschaltung, bei der viel Wert auf besonders schnelle Operationsverstärker gelegt wurde. Als Vorverstärker fungiert der AD8221, der Firma „Analog Devices“, dessen Verstärkung von 1 bis 1000 durch einen externen Widerstand geregelt wird. Durch den Widerstand R_G (ersichtlich in Abbildung 13) zwischen Pin zwei und drei weist er auf Grund der Formel (4.7) eine Verstärkung von 5,1 auf. Für die Mittenspannung, zwischen der positiven und negativen Versorgungsspannung, ist ein eigener Pin vorgesehen. Die Aufgabe dieses speziellen OPVs ist es, den Spannungsabfall der Brückenschaltung zu verarbeiten und zu

verstärken. Seine Schnelligkeit zeichnet sich durch eine Slewrate von $2\text{V}/\mu\text{s}$ aus. Es wurde das platzsparende MSOP Gehäuse für die Platinenbestückung verwendet. Die Ausgänge der im Sensor integrierten Brücken werden in den positiven und negativen Eingang des OPVs eingeschleust. Die Formel der Verstärkung G des AD8221 lautet:

$$G = \frac{49,4\text{k}\Omega}{R_G} + 1 \quad (4.7)$$

Das Ausgangssignal des Vorverstärkers wird in den nicht invertierenden Eingang des Verstärkers LT6220, der Firma „Linear Technology“ gespeist. Dieser OPV ist ein Rail to Rail-Verstärker, der eine Slew Rate⁵ von $20\text{V}/\mu\text{s}$ aufweist. Er ist für die erforderliche Nachverstärkung von $V_u=38,5$ verantwortlich. Die Gesamtverstärkung V_{ges} der beiden OPVs ergibt sich aus nachstehender Formel und beträgt 196.

$$V_{ges} = G \cdot V_u \quad (4.8)$$

Beide Verstärker werden „single supply“ zwischen 0 und 5V versorgt. Die Versorgung übernimmt ein Laptop, der über die NiDAQ Karte 5V in die Schaltung einspeist. Die Referenz von 2,5V wurde durch einen Fixspannungsregler, des Typs LP2980, realisiert.

Die Dimensionierung einer derartigen piezoresistiven Accelerometer-Nachweisschaltung ist für den Bereich von 4,8Hz bis 1461Hz mit jeweils einem Tief- bzw. Hochpass-Filter erster Ordnung beschrieben. Indem ein 3k3 Widerstand und ein 33nF Kondensator verwendet wird, lässt der Tiefpassfilter nur tiefe Frequenzen unter 1461Hz durch. Der Hochpassfilter lässt, durch die Beschaltung eines 33nF Kondensator und 1M Ω Widerstandes, nur hohe Frequenzen ab 4,8Hz passieren. Die Grenzfrequenz f_g eines Hoch bzw. Tiefpasses erster Ordnung errechnet sich aus folgender Formel, wobei R der zu verwendende Widerstand und C der Kondensator ist. [vgl.: Prechtl, 1995]

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (4.9)$$

⁵ Als Slew Rate wird die Anstiegsrate, Flankensteilheit oder die maximale Anstiegs- oder Abfallgeschwindigkeit eines Operationsverstärkers, bezeichnet.

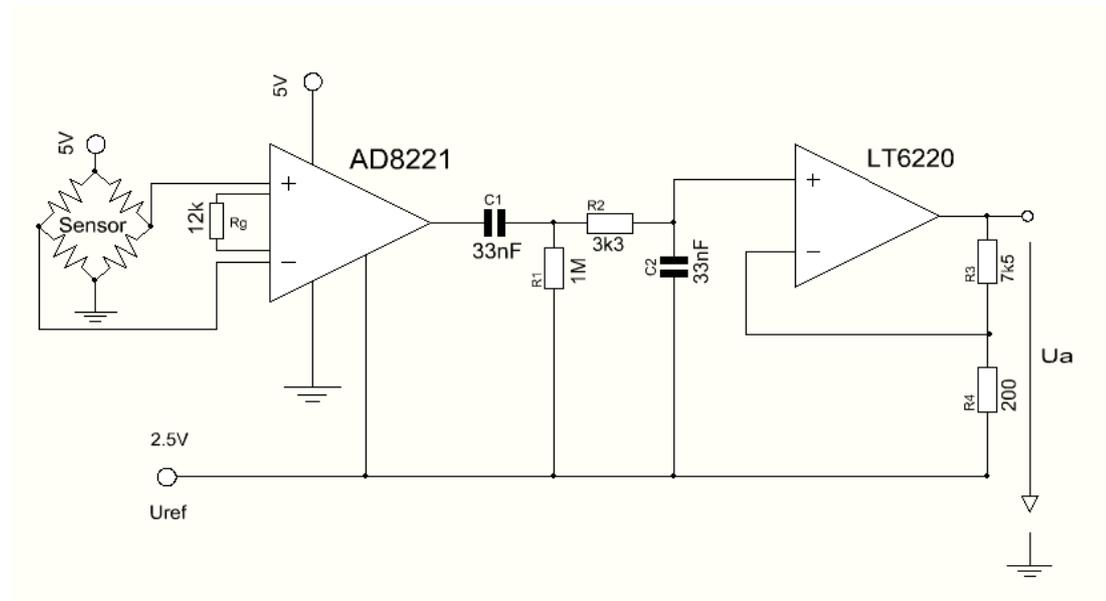


Abbildung 13: Schaltbildschema des Beschleunigungssensors

Der Schaltplan und das Board der Verstärkerschaltung wurde in einem einfach anzuwendenden graphischen Layout Editor (EAGLE 4.16r2) designed. Das Programm erzeugt aus einem schematischen Schaltplan eine Platine. Bauteile, die nicht zur Verfügung gestellt werden, können in einem dafür vorgesehenem Modul selbst gebaut und im Anschluss in den Schaltplan integriert werden. Die erstellte Platine hat einen Durchmesser von 37,7mm und eine Dicke von 1mm.

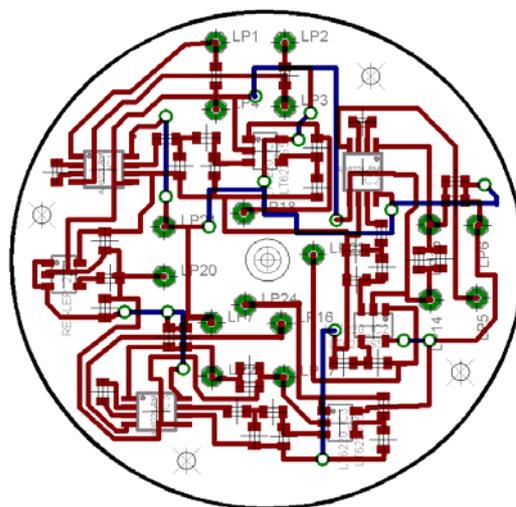


Abbildung 14: Platine des Beschleunigung,- und Kraftsensors

Der Frequenzgang

Der Frequenzgang wird graphisch durch das Bode-Diagramm dargestellt. Es ist ein spezieller Funktionsgraph, der aus einem Graphen für die Amplitudenverstärkung und einem für die Phasenverschiebung, besteht. Das Diagramm der Amplitudenverstärkung gibt an, wie stark die Verstärkung bei wechselnder Frequenz ist. Das Diagramm der Phasenverschiebung zeigt, dass der gleiche Zustand bei zwei Sinusschwingungen mit

gleicher Frequenz, zu jeweils einem zeitlich versetzten Moment auftritt. Die Vorgänge verlaufen synchron, jedoch phasenverschoben. Um den Winkel γ , aus Messdaten zu berechnen wird die nachstehende Formel verwendet. [vgl.: Prechtl, 1995]

$$\gamma = \frac{\Delta t}{T} \cdot 360 \quad (4.10)$$

Die Periodendauer T wird durch die Frequenz f definiert.

$$T = \frac{1}{f} \quad (4.11)$$

Auf der x-Achse ist die Frequenz in Diagramm 1 und Diagramm 2 logarithmisch angegeben. Beim Amplitudengang wird die z-Achse in dB (Dezibel) angegeben. [vgl.: Prechtl, 1995]

$$1dB = 20 \log\left(\frac{U_e}{U_a}\right) \quad (4.12)$$

Um das Bodediagramm darstellen zu können, wurde ein bekanntes Sinus-Signal ($V_{pp}:2mV$) aus dem Frequenzgenerator in die Schaltung eingespeist. (Abbildung 15)

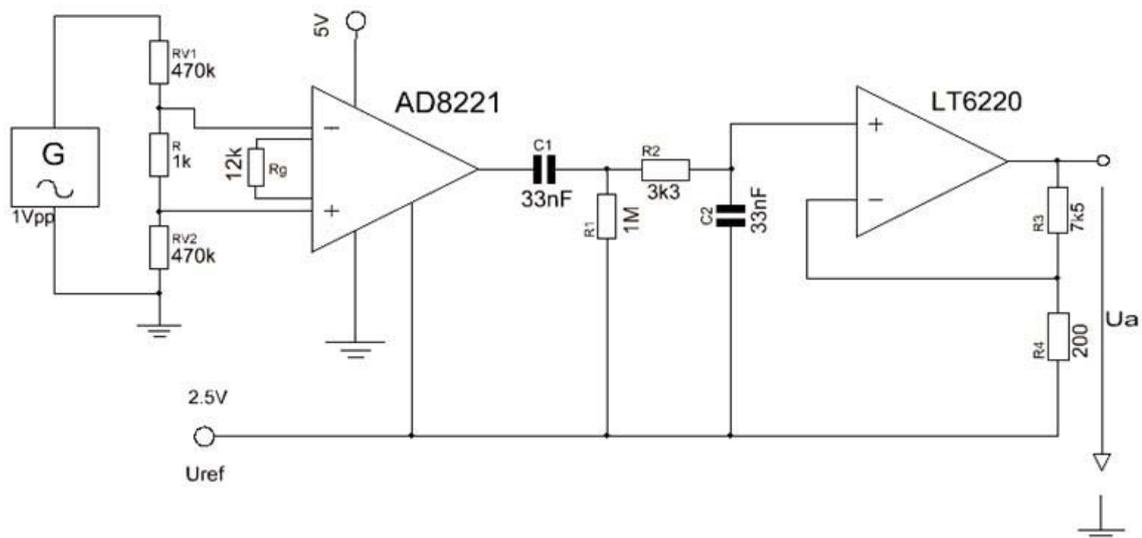


Abbildung 15: Schaltbildschema mit Funktionsgenerator

Der Sinus ist eine Funktion, die auch durch den Einheitskreis beschrieben werden kann. (Abbildung 16) Bei $\pi/2$ oder 90° ist die Sinusfunktion auf ihrem Maximum, nämlich 1, bei π (180°) und 2π (360°) schneidet die Funktion die x-Achse und beträgt somit 0.

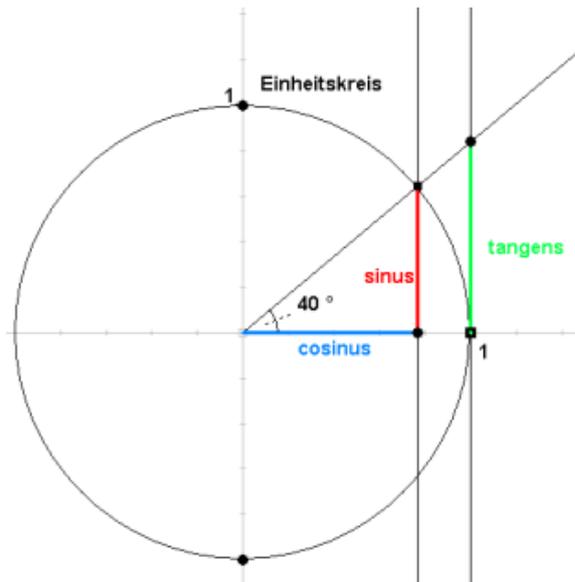


Abbildung 16: Einheitskreis [vgl.: Hilbert A., 1997, S262]

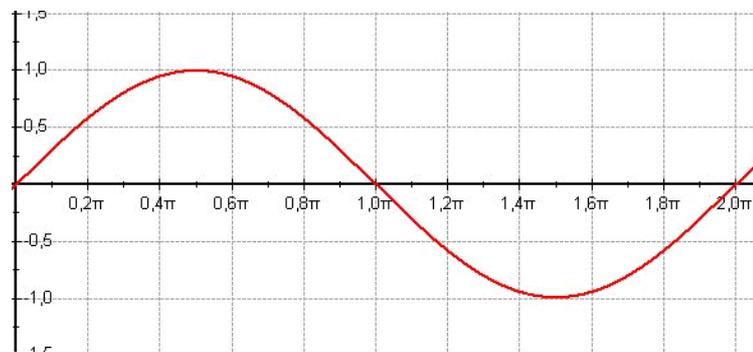


Abbildung 17: Sinusfunktion [vgl.: Hilbert A., 1997, S262]

Amplitudenfrequenzgang

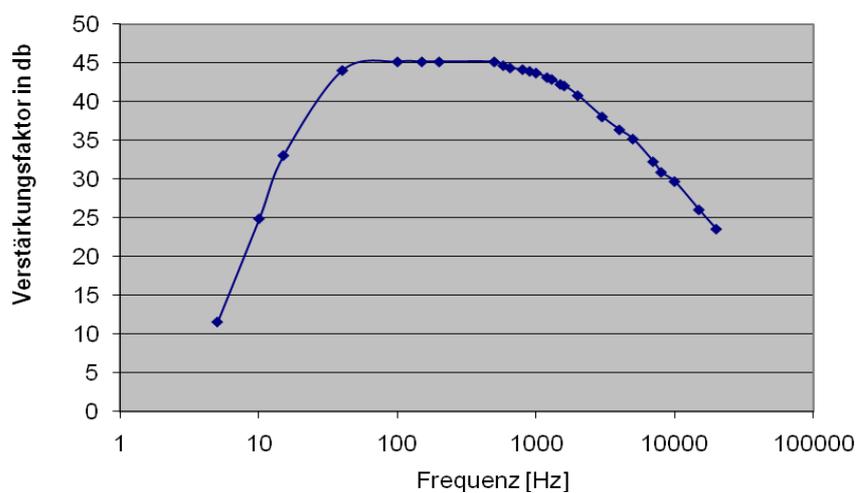


Diagramm 1: Amplitudengang der OPV-Schaltung

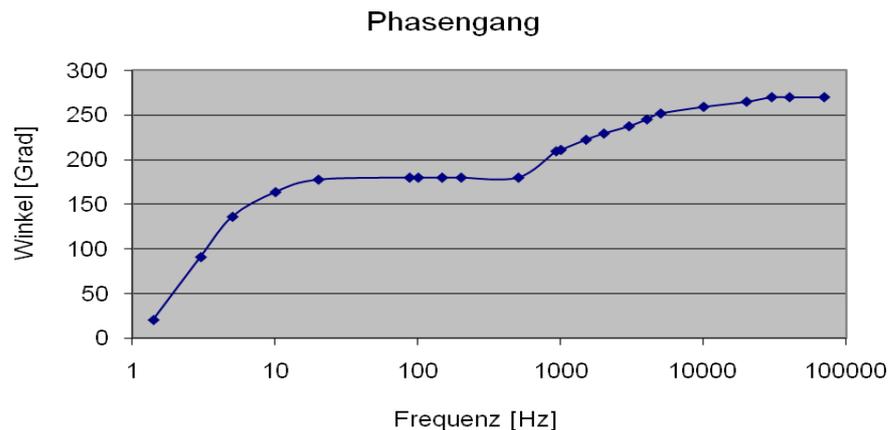


Diagramm 2: Phasengang der OPV-Schaltung

4.2.2.3 Funktionsanalyse

Da eine Grundkalibrierung vom Hersteller gewährleistet ist und bereits bekannt ist, welche Sensitivität s der Sensor aufweist, nämlich $0,15\text{mV/g}$, muss lediglich eine Funktionsanalyse vor jeder Messung durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass der Sensor intakt ist. Der Beschleunigungssensor wird auf seine Funktion getestet, indem er an einer Welle befestigt und aus unterschiedlichen Höhen auf den Boden fallen gelassen wird. Es muss bei jedem der 3 Sensoren die gleiche Differenz zwischen Ruhe und Aktionsspannung herrschen. Das Sensormodul wird in jeder Achsenrichtung auf der Welle eingespannt. Zur Veranschaulichung dient das in Abbildung 18 eingespannte Sensormodul auf der eigens dafür angefertigten Welle in der y -Ebene.



Abbildung 18: eingespanntes Sensormodul in Richtung der y -Achse

Um die Richtigkeit der Messwerte zu gewährleisten, wird der gemessene Wert mit dem, durch die potentielle und kinetische Energie berechneten Wert, verglichen. Dafür muss

die gemessene Spannung U_{ges} mittels folgender Formel in die Einheit der Beschleunigung a umgerechnet werden.

$$a = \frac{U_{ges} - U_{Ref}}{s \cdot V_{ges}} \quad (4.13)$$

Wobei U_{Ref} die Referenzspannung, s die Sensitivität und V_{ges} die Gesamtverstärkung beschreiben.

Die gemessene Spannung ist bei der Testmessung 5,06V, somit beträgt die Beschleunigung 47g oder 567m/s². Um den gemessenen Wert mit dem berechneten Wert der kinetischen Energie zu vergleichen muss die Beschleunigung in die Einheit der Geschwindigkeit umgerechnet werden. Dafür ist die Dauer des Signals ($t=5,5ms$) von Bedeutung. Die Geschwindigkeit v errechnet sich aus folgender Formel. [vgl.: Ebel, 2005]

$$v = a \cdot t \quad (4.14)$$

Als Resultat ergibt sich 3,11m/s für die berechnete Geschwindigkeit des Sensors.

Die Höhe aus der der Sensor nach unten fällt beträgt 52cm. Dieser Wert wird als h und 9,81m/s² als g in die Formel der potentiellen Energie eingesetzt. Die Masse kürzt sich bei der Gleichsetzung der beiden Energien weg. [vgl.: Ebel, 2005]

$$m \cdot g \cdot h = m \cdot \frac{v^2}{2} \quad (4.15)$$

Die berechnete Geschwindigkeit v der auf den Boden fallenden Welle beträgt 3,1m/s.

Die gemessene und theoretisch berechneten Geschwindigkeiten stimmen überein.

4.3 Druck bzw. Kraftsensoren

Kraft und Druck sind über die Auftrefffläche zueinander proportional. Der Druck p wird als skalare Größe, als eine Kraft F , die senkrecht auf eine Fläche A wirkt, definiert. [vgl.: Ebel, 2005]

$$p = \frac{F}{A} \quad (4.16)$$

Die international gültige Einheit des Druckes ergibt sich aus den SI-Einheiten von Kraft und Fläche, und wird nach dem französischen Physiker Blaise Pascal mit Pascal [Pa] bezeichnet. Vor allem im industriellen Bereich wird die Einheit Bar [bar] verwendet, im englischsprachigen Raum wird Druck auch in psi angegeben.

Kraft kann des Weiteren als Produkt von Masse m und Beschleunigung a angesehen werden. Die Einheit der Kraft F wird in Newton angegeben. Für das bessere Verständnis kann man die Einheit Newton über die Erdbeschleunigung in die Einheit kg umrechnen. [vgl.: Ebel, 1005]

$$m = \frac{F}{9,81\text{m/s}^2} \quad (4.17)$$

4.3.1 Arten von Druck- bzw. Kraftsensoren

Der piezoresistive, piezoelektrische, kapazitive, induktive und FSR Druck/Kraftsensor sind die am weitest verbreiteten Kraft bzw. Drucksensoren. Genauso wie für piezoelektrische, piezoresistive, kapazitive und induktive Beschleunigungssensoren, werden diese Funktionsweisen auch für Druck und Kraftsensoren verwendet. Auf die Funktionsweise der letzten vier Sensoren wurde im Kapitel 4.2 genau eingegangen. Der einzige Unterschied ist die auf den Sensor einwirkende Größe, die anstatt durch die Beschleunigung durch den Druck oder die Kraft beschrieben wird.

4.3.1.1 Force sensitive resistor (FSR-Sensor)

FSR-Kraftsensoren („Force Sensitive Resistors“ oder „Force Sensing Resistors“) stellen einen variablen Widerstand als eine Funktion von aufgebrachtem Druck dar. Der Output des Sensors ist abhängig von der Fläche auf seiner Oberfläche, auf der die Kraft wirkt. Diese Art von Sensoren wird aus einem elastischen Material, bestehend aus vier Schichten, hergestellt. Eine Schicht besteht aus einem isolierenden Plastik, die zweite besteht aus Leitungen, die zu den äußeren Anschlüssen führen. Um keinen direkten Kontakt zu dem vierten Layer, dem Substratlayer, der auf den aktiven Bereich abgestimmt ist, zu haben, wird dazwischen ein dritter Layer eingearbeitet, welcher mit dem aktiven Bereich verbunden ist und eine Art Lüftung beinhaltet.

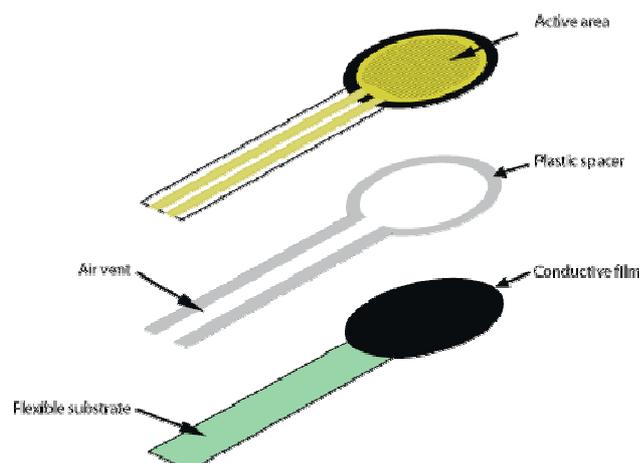


Abbildung 19: Aufbau des „Force Sensitive Resistor“ [vgl.: „Interlink Electronics“ 2006-2008]

Wenn Druck auf den Sensor aufgebracht wird, deformiert sich das Widerstandselement gegen das Substrat. Vom dritten Layer wird Luft durch den Sensor durchgelassen. Somit kommt das leitende Material am Substrat in Berührung mit Teilen des aktiven Bereiches. Je mehr vom aktiven Bereich das leitende Element berührt, desto kleiner ist der Widerstand.

Der FSR kann entweder in einen Spannungsteiler, oder als Eingangswiderstand eines invertierenden Verstärkers, integriert werden.

Da der Response des Sensors von seiner Deformation abhängt, arbeitet er am besten, wenn er auf einer glatten, harten Oberfläche angebracht ist. Wird der Sensor verbogen, reagiert er mit einer Widerstandsänderung. Somit sollte vor allem darauf geachtet werden, ihn nicht zu bewegen und zu verbiegen, um nicht gewollte Signale zu vermeiden. Wird das Ende zu stark verbogen, kann es vorkommen, dass die darin eingearbeiteten Leiter brechen und der Sensor nicht mehr zu gebrauchen ist. [vgl.: Interlink Electronics, 2006-2008]

4.3.2 Druckmessung mit wassergefülltem Luftschalter

Die Druckmessung wird mit Luftschaltern, die an piezoresistiven Drucksensoren, der Firma „Honeywell“ des Typs 40PC500G2A angekoppelt sind, durchgeführt. Die Drucksensoren weisen einen Messbereich von 0 bis 500psi und eine Sensitivität von 8mV/psi auf. Der maximal mögliche Druck, der auf den Sensor aufgebracht werden kann, ohne ihn zu zerstören, ist 1000psi. Der Sensor hat ein 6Pin DIP Package, eine Versorgungsspannung von 5V und eine Ausgangsspannung zwischen 0,5 und 4,5V. Die Luftschalter der Firma „Hergair“ haben einen Durchmesser von 93mm und sind aus einem steifen PVC Boden und einem weichen PVC Mantel aufgebaut. (Abbildung 20) Dieser Messaufbau misst den aufgebrauchten Druck nur in einer Dimension. Unabhängig von der Art des Schlages, der auf dem Luftschalter ankommt, wird Wasser komprimiert und der Sensor reagiert auf eine Druckänderung mit einer Spannungsänderung.

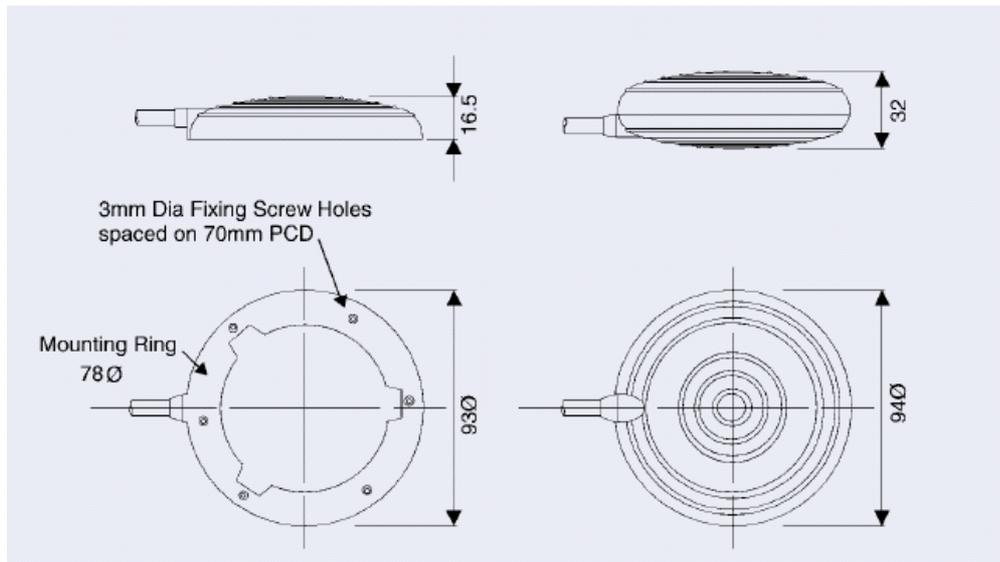


Abbildung 20: Luftschalter [vgl.: „Hergair“ Datasheet]

4.3.2.1 Kalibrierung mittels dynamischer Druckmessung

Zur Kalibrierung wird ein 3kg schweres Messingpendel, das 90cm über dem Boden auf einer Stange befestigt ist, in verschiedenen Winkelausrichtungen (von 10° bis 90°) auf den Drucksensor fallen gelassen. Vorher wurde der Drucksensor mit Wasser gefüllt und anschließend vakuumisiert. $0,002827\text{m}^2$ beträgt die Fläche des Luftschalters, auf den das Kugelsegment bei der Kalibrierung auftrifft. Somit wäre die berechnete Kraft aus dem Druckwert und der Fläche des Luftschalters im Randbereich 1949N.

a) Druckmessung mit hartem Hintergrund

Der erste Messaufbau besteht aus einem Luftschalter, der an einem mit Hartgummi ummantelten Holzpflock angebracht ist. In Abbildung 21 wird Signal des Drucksensors bei einem Pendelwinkel von 45° dargestellt. Das Signal steigt schnell und steil an, danach zeigt es einen Unterdruck und schwingt aus.

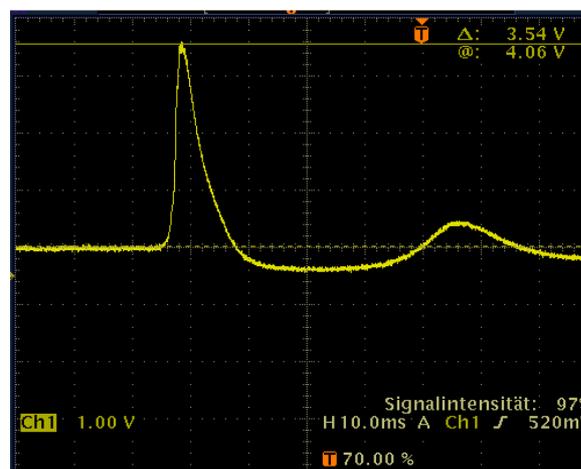


Abbildung 21: Signalverlauf bei einem Winkel von 45°

Die gemessenen Werte sind in Tabelle 3, Diagramm 3 und Diagramm 4 dargestellt. Diagramm 3 zeigt jeweils das Maximum und das Minimum der gemessenen Werte (in Pascal) pro Winkeleinstellung des Pendels an. Schließlich erhält man eine Fläche, die davon eingegrenzt wird und den Messbereich angibt.

Durch den kurzen Bremsweg des Pendels, wurden dementsprechend hohe Druckwerte vom Sensor gemessen. Die Messungen werden jedoch nur bis 55° durchgeführt, da ein höherer Winkel zum Zerplatzen des Luftschalters führt. Die Zeit, gemessen in Millisekunden, ist die Zeitangabe des Anstieges der Signalkurve.

Winkel [Grad]	Druck [Pascal]									Mittelwert [Pascal]	Zeit [ms]
10	125484	117210	113073	132379	119279	124105	127552	119968	116521	121730	11
15	172368	224079	212013	210289	203394	199947	189605	182710	199947	199372	8
25	310263	293026	268894	256829	256829	282684	291302	260276	286131	278470	7
35	386105	444710	430921	386105	429197	405065	422302	386105	372315	406981	5
45	534342	544684	520552	524000	558473	558473	551579	534342	527447	539321	4
55	710158	665342	651552	603289	648105	655000	603289	668789	623973	647722	3

Tabelle 3: Drucksensor auf Holzpflock

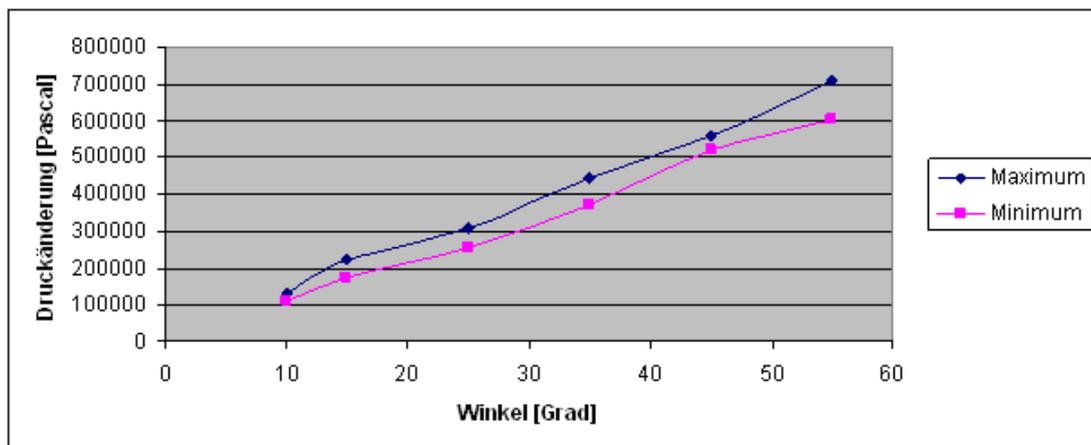


Diagramm 3: Streuung der Messungen des Drucksensors mit hartem Hintergrund

Die schwarze Linie im nachfolgenden Diagramm 2 stellt die gemessenen Druckwerte in Pascal pro Winkeleinstellung dar. Die gemessenen Werte befinden sich zwischen 1 und 8 Bar. Die Linie ist annähernd linear mit $y = 11631x + 6960,9$. Die Mediane wurden verbunden und die restlichen Punkte veranschaulichen die Streuung. Auf der sekundären y-Achse ist die Dauer des Signals aufgetragen. Man kann ein exponentiell absteigendes Verhalten der blauen Linie erkennen. Die Dauer der Signale befindet sich zwischen 11 und 3 ms. Je höher der Winkel ist, aus dem das Pendel fallen gelassen wird, desto schneller ist der Aufprall.

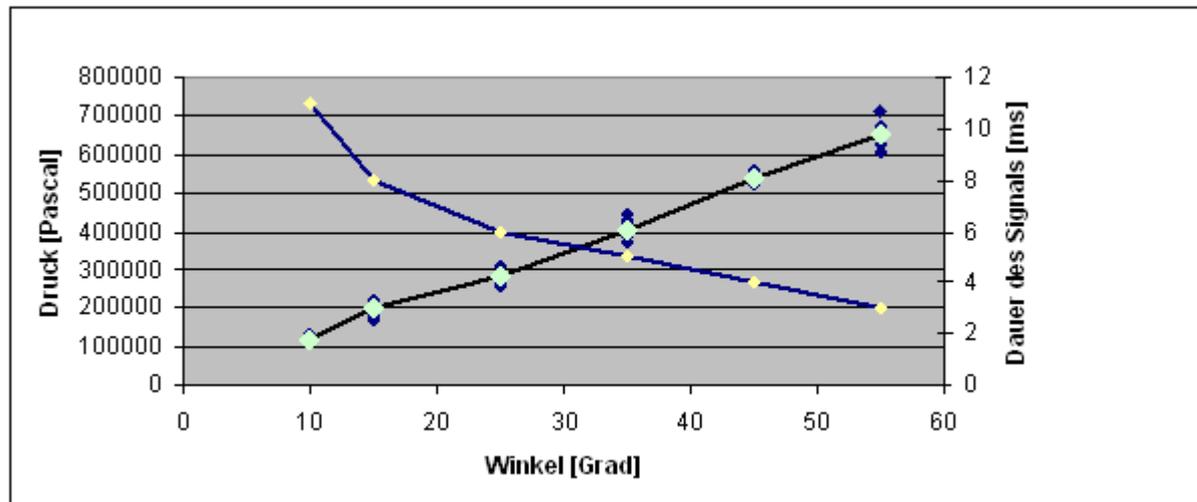


Diagramm 4: Druckwerte und Zeitwerte der gemessenen Signale mit hartem Hintergrund

In den folgenden zwei Berechnungen werden die Kräfte verglichen, welche sowohl aus dem gemessenen Druck als auch durch die gemessene Zeit der Sensorantwort berechnet werden. Bei dem Messaufbau mit dem Holzpflöck wird der Mittelwert der gemessenen Werte bei 35° genommen, der einer Höhe von 20cm entspricht.

Die Oberfläche des Kugelsegments A , das auf dem Luftschalter auftrifft, wird mit nachstehender Formel berechnet, wobei r den Radius der Kugel darstellt und h entlang des Durchmessers verläuft. Die Oberfläche der Kugelkalotte beträgt $0,002827\text{m}^2$. [vgl.: Walser, 2007]

$$A = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot h \quad (4.18)$$

Um die Kraft aus dem gemessenen Druck des Sensors zu berechnen muss in Formel (4.16) die Oberfläche des Kugelsegments und der Druck in der Einheit Pascal eingesetzt werden.

$$\frac{2361}{40} = 59 \text{ psi} = 4,067899 \text{ Bar} = 406789,9 \text{ Pa}$$

Die daraus resultierende Kraft beträgt 1150N.

Um die berechnete Kraft F durch die gemessene Zeit t des Drucksensors darzustellen, wird die Formel der kinetischen Energie mit der der potentiellen Energie gleichgesetzt. Für g wird die Erdbeschleunigung $9,81\text{m/s}^2$ und für h die Höhe von 20cm eingesetzt.

$$m \cdot g \cdot h = m \cdot \frac{v^2}{2} \quad (4.19)$$

Die berechnete Geschwindigkeit v beträgt 1,981m/s. Um die Beschleunigung zu berechnen muss die Dauer des Signals ($t=5\text{ms}$) mit eingebunden werden und in folgende Formel eingesetzt werden. [vgl.: Ebel, 2005]

$$a = \frac{v}{t} \quad (4.20)$$

$$a = 396,18\text{m} / \text{s}^2$$

Die Kraft F ergibt sich aus der Multiplikation der Beschleunigung a und der Masse m des Messingpendels ($m=3\text{kg}$). [vgl.: Ebel, 2005]

$$F = m \cdot a \quad (4.21)$$

$$F = 1188\text{N}$$

Die berechneten Kräfte unterscheiden sich um 35N. Diese Abweichung kann aus dem Grund hervorgehen, dass die Höhe aus der das Pendel fallen gelassen wird, bei diesem Messaufbau, trotz der Verwendung eines Winkelmessers, nicht auf den Millimeter genau eingehalten werden konnte. Obwohl eine geringe Abweichung besteht, kann man davon ausgehen, dass der Drucksensor richtige Messwerte liefert.

b) Druckmessung mit weichem Hintergrund

Der Drucksensor verhält sich beim zweiten Messaufbau anders als beim ersten. Der Holzpflöck wird mit einer Tae-Kwon-Do Weste (Abbildung 22) umhüllt, und das Pendel wird wiederum auf den darauf befestigten Luftschalter fallen gelassen. Diesmal kann man Werte bis zu 90° erfassen, da die Weste nachgibt und die Schläge abdämpft. Dies lässt zwar den Luftschalter heil, aber die gemessenen Werte sind viel geringer als jene, die mit dem Holzpflöck gemessen wurden (Tabelle 2, Diagramm 3 und Diagramm 4). Diese Messung wurde durchgeführt um auszutesten, in wie weit eine derartige Weste brauchbar für die Sensoraufbringung ist. Man kann die zwei Messaufbauten mit Schlägen auf einen stählernen und einen weichen Körper vergleichen. Die Menge des Fettgewebes beeinflusst die Absorption der Schläge. Ein starker Schlag wird bei beleibten Kämpfern besser aufgenommen als bei dünnen. Dünne Kämpfer haben jedoch den Vorteil, schneller zu sein als Gewichtige und werden somit oft gar nicht mit voller Wucht getroffen.



Abbildung 22: Tae-Kwon-Do Weste

Das Signal aus dieser Messung in Abbildung 23 unterscheidet sich stark von dem in Abbildung 21. Der Anstieg dauert länger und die gemessene Spannung ist deutlich geringer. Die Zeit, gemessen in Millisekunden, ist die Zeitangabe des Anstiegs der Signalkurve. Die gemessenen Werte sind in Tabelle 4, Diagramm 5 und Diagramm 6 angegeben.

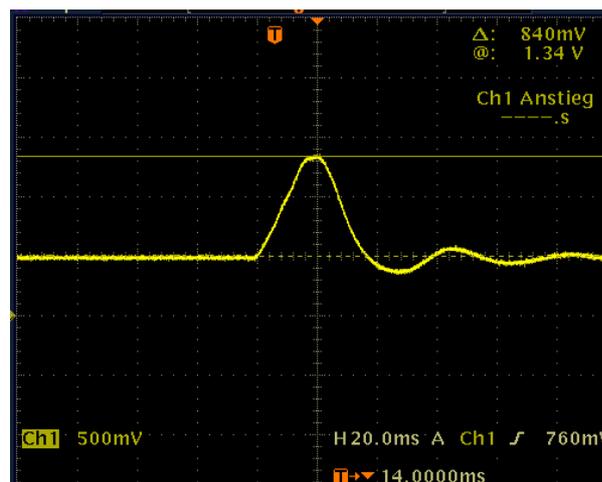


Abbildung 23: Signal des Sensors mit weichem Hintergrund bei 45°

Winkel [Grad]	Druck [Pascal]									Mittelwert [Pascal]	Zeit [ms]
15	63431	56536	55157	56536	57226	655003	61363	57226	60673	59294	24
25	79978	79978	73084	72394	82047	85150	82736	79978	79978	79481	24
35	116521	105489	112384	111005	103421	103421	109626	111694	109626	1092435	20
45	149960	136171	144789	141342	143065	139618	139618	141342	141342	141916	16
55	167197	167197	168921	175815	170644	170644	168921	170644	168921	169878	14
65	220631	215460	213736	213736	213736	225802	225802	225802	227526	220248	14
90	367144	308539	394723	387829	361973	394723	367144	387829	403342	374805	12

Tabelle 4: Messwerte des Drucksensors auf einem weichen Hintergrund

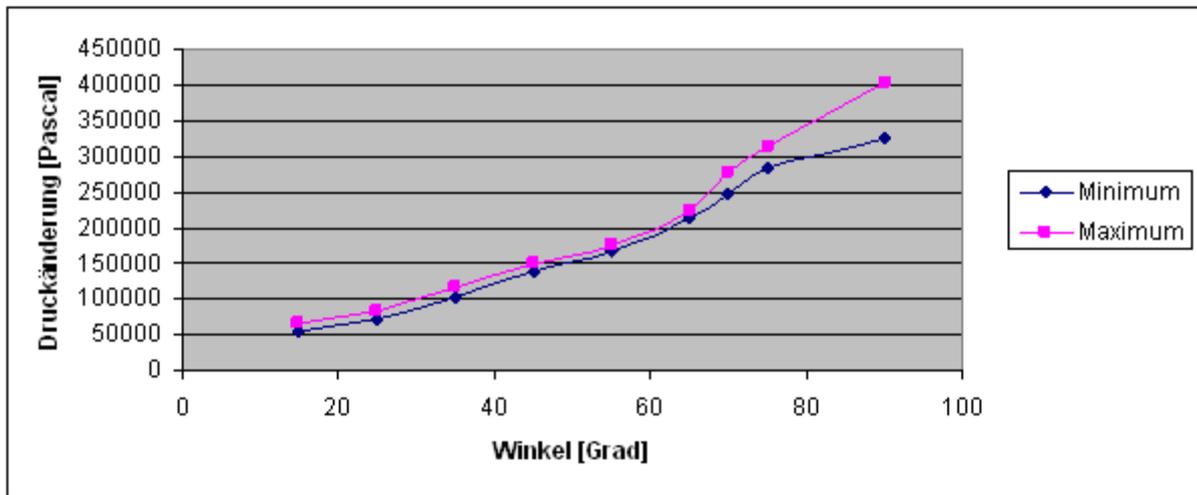


Diagramm 5: Streuung der Messungen des Drucksensors auf einem weichen Hintergrund

Die schwarze Linie im nachfolgende Diagramm 6 stellt die gemessenen Druckwerte pro Winkeleinstellung dar. Die gemessenen Werte befinden sich zwischen 0,5 und 4,5 Bar. Die Mediane wurden miteinander verbunden, die restlichen Punkte zeigen die Streuung auf. Die Gerade hat annähernd eine Steigung mit $y = 4275,5x - 35051$. Auf der sekundären y-Achse ist die Dauer des Signals aufgetragen. Dadurch, dass der Schaumgummi der Weste nachgibt, kann man nicht wie beim Holzpflock ein exponentiell absteigendes sondern nur ein absteigendes Verhalten der blauen Linie erkennen. Durch dieses nachteilige Verhalten der Weste wurde beschlossen die Sensoren für die Schlagkraftmessung nicht auf einer Weste mit Schaumgummi anzubringen, da die Messwerte zu sehr verfälscht werden.

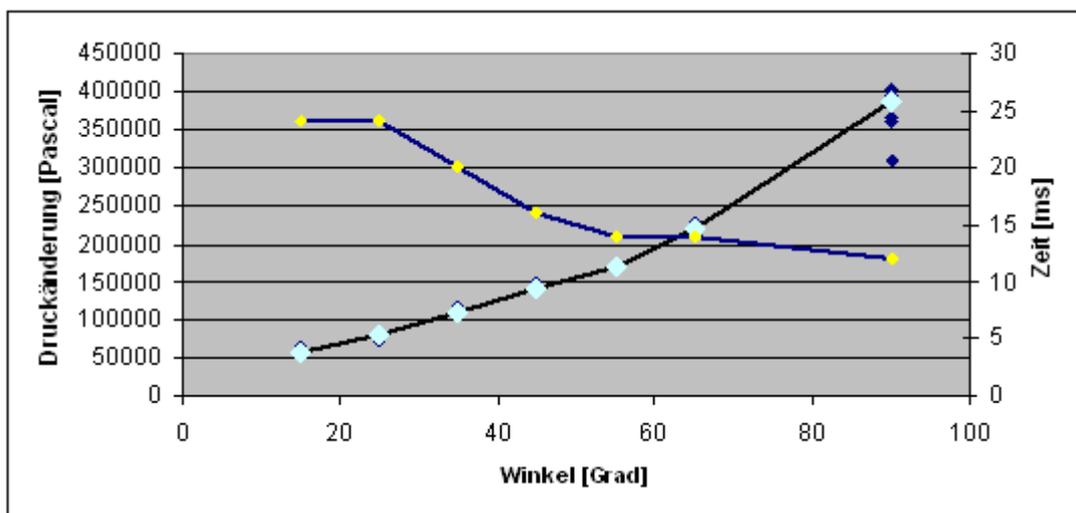


Diagramm 6: Druckwerte und Zeitwerte der gemessenen Signale auf einem weichen Hintergrund

In den folgenden zwei Berechnungen werden die Kräfte verglichen, welche sowohl aus dem gemessenen Druck als auch durch die gemessene Zeit der Sensorantwort berechnet werden. Bei diesem Messaufbau wird der Mittelwert der gemessenen Werte bei 90°

herangezogen, der einer Höhe von 90cm entspricht. Der vom Sensor gemessene Druck beträgt 374729,4Pa. Die Kraft wird aus der Formel (4.16) berechnet und ist 1059,5N hoch.

Um die berechnete Kraft durch die gemessene Zeit des Drucksensors darzustellen, wird die Formel (4.19) der kinetischen Energie mit der potentiellen Energie gleichgesetzt. Für g wird die Erdbeschleunigung $9,81\text{m/s}^2$ und für h die Höhe von 90cm eingesetzt. Die Geschwindigkeit v beträgt $4,2\text{m/s}$.

Um die Beschleunigung zu berechnen wird die Geschwindigkeit v durch die Dauer des Signals t von 12ms dividiert und berechnet sich auf $350,18\text{m/s}^2$. Die Kraft F von 1050N ergibt sich auf Grund der Multiplikation des 3kg schweren Messingpendels mit der vorher berechneten Beschleunigung a .

Die Berechnungen unterscheiden sich nur um 9N. Daraus kann man schließen, dass der Drucksensor richtige Messwerte liefert.

4.3.2.2 Kalibrierung mittels statischer Druckmessung

Für die statische Druckmessung wird der Luftschalter in eine Presse (Abbildung 26) eingespannt und mittels einer Kraftmessdose, die an einem „Hottinger Baldwin System“ (Abbildung 37) angeschlossen ist, beschwert. Die von „Entran Sensoren GmbH“ hergestellte Kraftmessdose ELA-B20-1.25KN hält einer Kraft von 1250N (ca. 125kg) stand. (Abbildung 24) Die Kraftmessdose wird in eine Stahlvorrichtung (Abbildung 27, Abbildung 28 und im Anhang) eingebaut und mittels eines 15 Pin Steckers für DMS Vollbrücken an das „Hottinger Baldwin System“ angeschlossen. Das „Hottinger Baldwin System“ misst das darauf wirkende Gewicht auf bis zu vier Nachkommastellen genau (Abbildung 25). Die Stahlvorrichtung wird auf die Presse montiert, und das Gewicht auf den Drucksensor aufgebracht. Der Sensor wurde bis 1250N kalibriert.

Der Verlauf, der gemessenen Werte der Druckänderung, ist im nachfolgenden Diagramm 7 nachzuvollziehen. Durch die Verbindung der Messwerte erkennt man ein lineares Verhalten des Drucksensors. Je höher Gewicht ist, das auf den Sensor aufgebracht wird, desto größer wird der Druck. Die Steigung der Geraden wird durch die Formel $y = 2342x + 9339$ ausgedrückt.

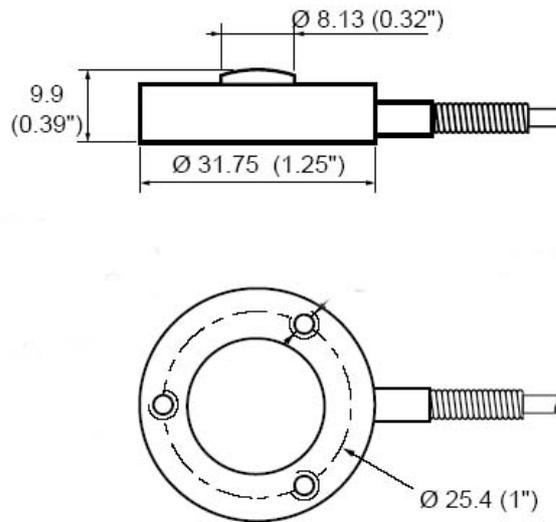


Abbildung 24: ELA Kraftmessdose [vgl.: „Entran Sensoren GmbH“, Datasheet]

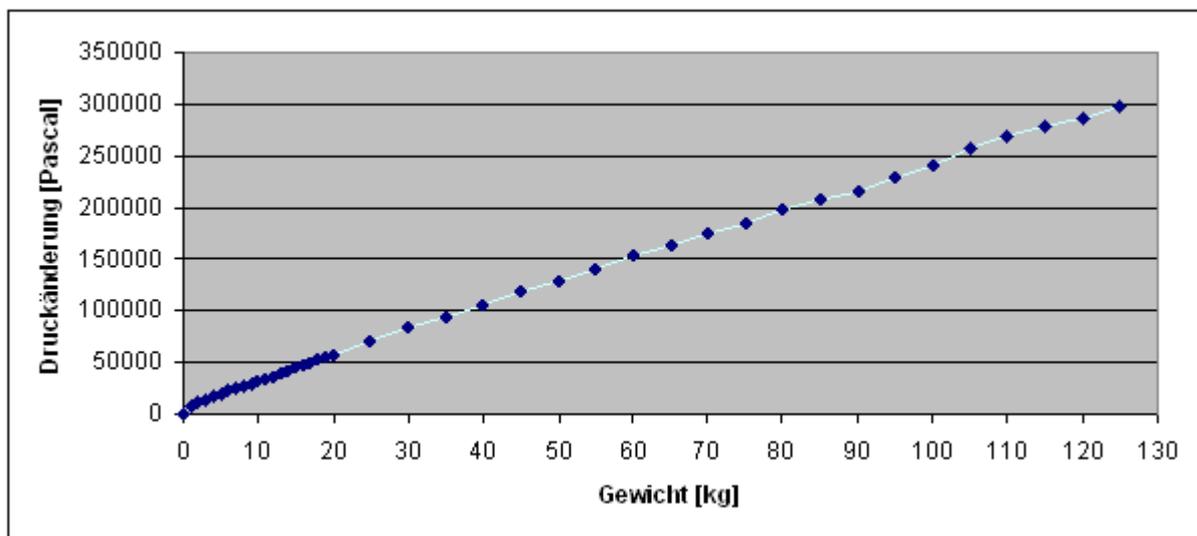


Diagramm 7: Messwerte der statischen Messung



Abbildung 25: Messaufbau für die statische Druckmessung

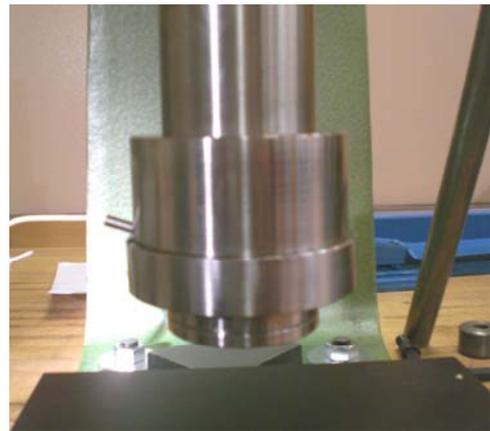


Abbildung 26: Einspannung der Kraftmessdose auf der Presse



Abbildung 27: Kraftmessdose eingebettet in einer Stahlkonstruktion



Abbildung 28: Stahlkonstruktion für die Kraftmessdose (eingebaute Kraftmessdose)

4.3.2.3 Befestigungsvorrichtung

Es werden drei Drucksensoren in einen Nierengürtel (Abbildung 29) integriert, um sie nahe am Körper oder Boxsack ohne jegliche absorbierende Materialien wie Schaumstoff anzubringen. Ein Luftschalter wird im Bereich des Solar-Plexus, einer auf der Leber und einer in der Nähe der Milz angebracht. Die Luftschalter können ohne großen Aufwand in die Taschen gesteckt werden. Um die Schläuche zu fixieren, werden diese mit Bändern befestigt. In Abbildung 30 und Abbildung 31 wird der Nierengurt mit Luftschaltern bestückt auf dem Boxsack dargestellt.

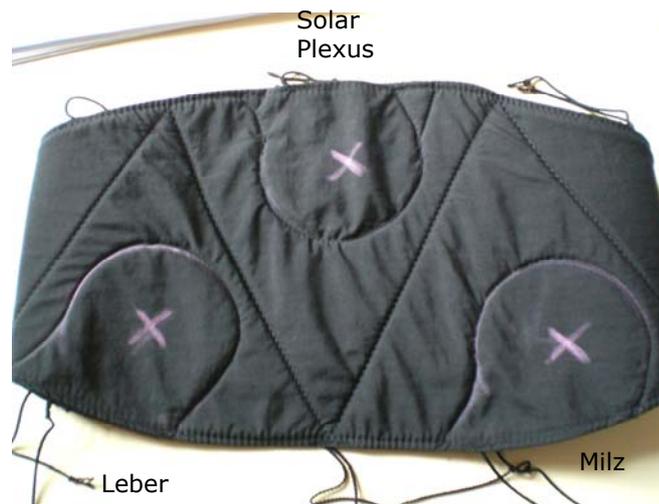


Abbildung 29: Nierengurt mit eingenähten Taschen



Abbildung 30: Nierengurt mit Luftschalter am Boxsack
(Ansicht von vorne)



Abbildung 31: Nierengurt mit Luftschalter am Boxsack
(Ansicht von der Seite)

4.3.3 Druckmessung mit Dehnmessstreifen (Manganin)

Manganin-gages funktionieren nach dem Prinzip der DMS (siehe 4.3.5.1). Ihr Widerstand verändert sich jedoch nicht auf Grund von Dehnung, sondern durch Druck. Manganin (Cu_{84}, Ni_4, Mn_{12}) ist eine Kupfer-Mangan-Nickel-Legierung mit einer Zusammensetzung von 82-84 % Kupfer, 12-15 % Mangan und 2-4 % Nickel. Das Manganin für diesen Zweck wird von der Firma „Vishay“ hergestellt. (Abbildung 33) Es hat eine niedrige Belastungssensitivität aber eine relativ hohe Sensitivität für hydrostatischen Druck. Die Widerstandsänderung agiert als Funktion vom angelegten Druck. Es wird vor allem für Hochdruck-Schockwellen-Messungen, die von 1-400 kBar reichen, verwendet. In herkömmlichen Anwendungen befindet sich das Gitter aus der Legierung zwischen zwei Polymer-Folien. Diese bestehen aus semitransparentem, bernsteinfarbenem Kapton-Plastik.

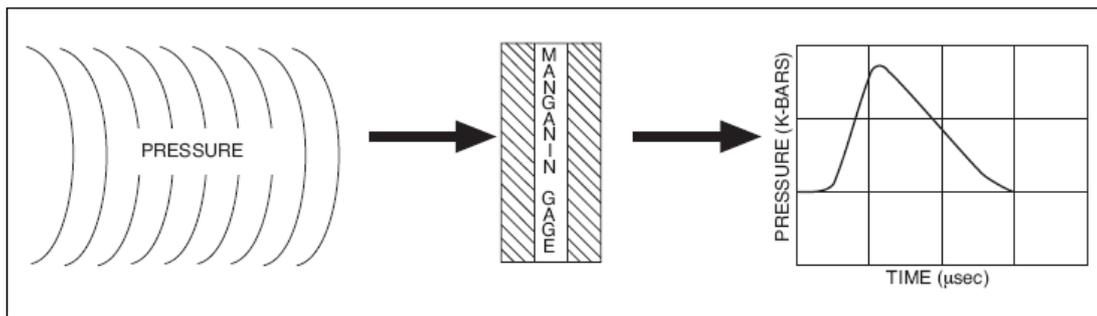


Abbildung 32: Funktionsweise des Manganin [vgl.: „Vishay“, document:11524]

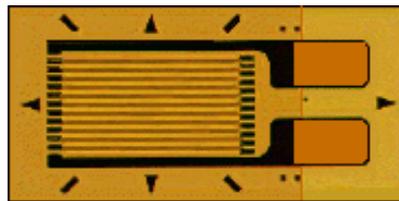


Abbildung 33: Uniaxiale Manganinfolie [vgl.: „Vishay“, uniaxial pattern]

Das uniaxiale Muster wurde designed, um Belastungen in Richtung der Gitternetzlinien zu messen. Gitterlängen für „Micro-Measurements strain gages“ reichen von 0,20mm bis 101,6mm. Das Manganin wird in einem back-and-forward-Muster gedruckt, um die Länge des Schaltkreises in dem kleinen Bereich zu maximieren. Die typische Größe des Gitters ist 1cm groß.

In diversen Experimenten werden Manganinfolien für planare Druckwellenmessungen und Erschütterungsmessungen verwendet. Zusätzlich dazu werden sie gebraucht, um Zustandsgleichungen von Materialien zu bestimmen, die dann in Computerprogrammen verwendet werden, um einen Implusionsprozess zu modellieren. Diese Druckwandler werden auch für die Druckmessungen in Gewehrläufen während der Entwicklung von waffenähnlichen Nuklear-Sprengungsgeräten verwendet. [vgl.: Annex, 1998]

Das Manganin hat eine Sensitivität von $0,0027\Omega/\Omega/\text{kBar}$. Das für diese Messung verwendete Manganin hat einen Widerstandswert von 48Ω und eine Sensitivität von $0,1296\Omega/\text{kBar}$. Die Widerstandssensibilität ist sehr gering, was möglicherweise zu Problemen bei der Schlagkraftmessung führen könnte.⁶

Um von der Ausgangs- U_{out} und Eingangsspannung U_{in} auf den Widerstand des Manganins R_M zu schließen, wird folgende Berechnung verwendet.

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{R_M}{R_M + 48} \quad (4.22)$$

⁶ Siehe Kapitel 5.2

Somit ergibt sich für den Widerstand des Manganins R_M

$$R_M = \frac{48U_{out}}{U_{in} - U_{out}} \quad (4.23)$$

U_{out} ist der geänderte Wert subtrahiert vom Ausgangswert in Ruhe.

Die Fläche des Manganin-grids ist 5mm x 4mm groß, somit beträgt die Fläche 20mm²

Man nehme an, es wird mit 5000N geschlagen, dann ergibt sich der Druck aus Formel (4.19) mit 2,5kBar. Da das Manganin eine Sensitivität von 0,1296Ω/kBar hat weist es eine Widerstandsänderung von 0,324Ω für 2,5kBar auf.

4.3.3.1 Befestigungsvorrichtung

Der Sensor soll im Bereich des Solar Plexus am Nierengurt angebracht werden. Um ihn an den Nierengurt anzunähen, sind in der untersten Aluminiumscheibe Löcher vorgesehen.

Es werden drei Manganinfolien auf einer Aluminiumscheibe befestigt, um aus den drei Messwerten auf die Richtung der Faustschläge schließen zu können. (Abbildung 34) Auf einer zweiten Aluminiumscheibe sind Bolzen angebracht, die über eine Zwischenplatte auf das Gitter des Manganins drücken. (Abbildung 35)

Die Platine wird direkt unter der Scheibe eingebaut, auf der die drei Manganinfolien angebracht sind. Um sich beim Schlag auf den Sensor nicht zu verletzen, wird ein aus Silikon gebrannter Schlagpilz an der Oberseite des Aluminiumdeckels angebracht. Dafür wurden das Silikon und ein Silikonhärter im Verhältnis 9:1 gemischt. (12g Härter und 118g Silikon) (Abbildung 36)

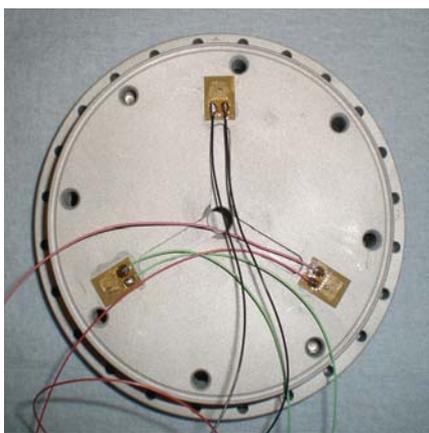


Abbildung 34: mit Manganin bestückte untere Platte des Sensorgehäuses



Abbildung 35: Sandgestrahlte obere Platte des Drucksensors



Abbildung 36: Silikonschlagpilz

4.3.3.2 Schaltung des Drucksensors

Für die Messungen des Drucksensors wird das „Hottinger Baldwin System MGC Plus“ (Abbildung 37) verwendet, da man die Änderung des Widerstandswertes des Manganins, wenn es in der Schaltung integriert ist, nicht messen kann. Das Manganin wurde sowohl in eine Wheatstonebrücke, als auch in die äußere Beschaltung eines invertierenden Verstärkers integriert. Bei beiden Schaltungen konnte man am Ausgang kein Signal messen. Das „Hottinger Baldwin System“ ist im Stande, Kraft, Masse, Druck, Dehnung, mechanische oder elektrische Spannung, Strom, Frequenz und Widerstand sehr genau zu messen. Es ist vor allem für statische Messaufgaben, die eine hohe Auflösung erfordern, anwendbar. Zusätzlich zu statischen Messungen können mit dem System auch dynamische Messungen durchgeführt werden.



Abbildung 37: „Hottinger Baldwin System“

4.3.3.3 Kalibrierung

Rosenberg (1980) berichtet, dass die Kalibrierungskurve für die dünne Manganinfolie ein deutlich elasto-plastisches Verhalten aufweist, mit einem linearen Teil von 0 bis 15kBar. Die Linearität ist abhängig vom elastischen Verhalten des Sensors. Der Anstieg im

elastischen Bereich ist $\sim 5 \text{ kBar}/(\Omega/\Omega)$, wobei Ω/Ω in Prozent angegeben ist. Bei den Messungen verwendet Rosenberg ein 48Ω Manganin vom Typ LM-SS-125CH-048.

Eine Belastung über 15 kBar wurde von einem Polynom vierter Ordnung dargestellt. Das Material des Targets war PMMA (Polymethyl Methacrylat), Kupfer, Magnesium und Aluminium. Der Knick in der Kalibrierungskurve in Diagramm 8 und Diagramm 9 ist daraufhin zurück zu führen, dass der Sensor ein elastisches Verhalten aufweist. [vgl.: Rosenberg, 1980]

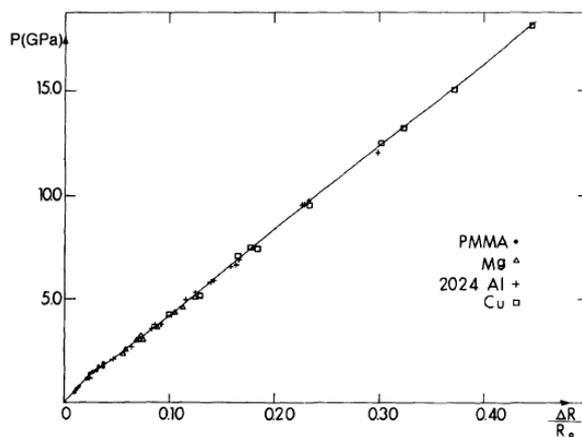


Diagramm 8: Kalibrierungskurve des Manganinsensors [vgl.: Rosenberg, 1980]

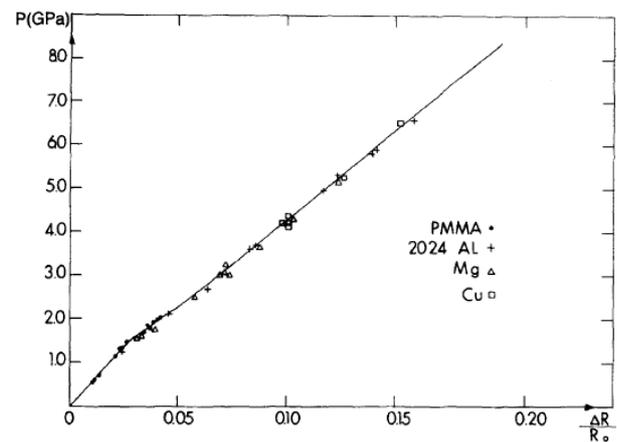


Diagramm 9: Kalibrierungskurve des Manganinsensors im niedrigeren Druckbereich [vgl.: Rosenberg, 1980]

4.3.4 Flexi-Force Kraftsensor

Der FlexiForce Sensor vom Modell A201-100 ist ein papierdünner Schaltkreis, der leicht in verschiedene Anwendungen integriert werden kann. (Abbildung 38) Sein Messbereich reicht von $0\text{-}100 \text{ lb}$. Misst man bis zu 1000 lb , muss ein geringerer Rückkoppelwiderstand beim invertierenden Verstärker verwendet werden.

Der Sensor (Abbildung 38) besteht aus 2 Substratlayern, die aus Polyester aufgebaut sind. Auf jedem Layer befindet sich ein leitendes Material (Silber), gefolgt von drucksensitiver Tinte. Die beiden Layer werden durch einen Kleber zusammen gehalten. Der silberne Kreis an einem Ende des Sensors definiert den kraftsensiblen Bereich. Das Silber erstreckt sich vom Messbereich bis an das andere Ende des Sensors, an dem die Anschlüsse befestigt sind. Die beiden äußeren Pins sind aktiv, der innerste ist inaktiv. Der Sensor agiert wie ein variabler Widerstand in einem Schaltkreis. Der Sensor hat, wenn er nicht belastet ist, einen sehr hohen Widerstand von $20 \text{ M}\Omega$, wenn er belastet wird, sinkt sein Widerstandswert bis auf $20 \text{ k}\Omega$. Der maximal empfohlene Strom beträgt $2,5 \text{ mA}$. [vgl.: Tekscan, 2005]



Abbildung 38: Flexi-Force Sensor der Firma „Tekscan“

4.3.4.1 Befestigungsvorrichtung

Das Gehäuse für diesen Sensor wurde vom Manganin-Sensorgehäuse übernommen und adaptiert. Der Sensor soll in der Mitte des Nierengurtes, in Höhe des Solar Plexus, angebracht werden. Um ihn an den Nierengurt annäheren zu können, hat die unterste Aluminiumscheibe Löcher vorgesehen. Die drei Kraftsensoren werden in der Anordnung eines gleichschenkeligen Dreiecks auf einer Aluminiumscheibe befestigt. (Abbildung 41) Auf einer zweiten Aluminiumscheibe sind Bolzen angebracht, die auf eine Platte drücken, welche wiederum auf den Sensor drückt. Diese Platte wurde anfangs für die Manganingages hergestellt und muss für dieses Gehäuse neu hergestellt werden. Die Platine wird direkt unter den 3 Kraftsensoren, die mit jener verbunden sind, angebracht. Um sich beim Schlag auf den Sensor nicht zu verletzen, wird ein aus Silikon gebrannter Schlagpilz an der Oberseite eines Aluminiumdeckels angebracht. (Abbildung 42)

Der Sensor selbst muss für diese Verwendung abgeschnitten werden, da es ihn in dieser Länge nicht zu kaufen gibt. Natürlich werden dadurch auch die Metallkontakte mit abgetrennt und es müssen neue angebracht werden. Durch diese Kontakte wird der Sensor auf der Platine als Eingangswiderstand des nicht invertierenden Verstärkers angebracht. Um die Drähte in die FSR Sensoren einzuarbeiten, wurde mit einer Tackermaschine gearbeitet. Selbst wenn die Drähte angeklemt werden, kann es vorkommen, dass sie sich bewegen und keinen Kontakt zu dem leitenden Material des FSR Sensors haben. (Abbildung 39) Um dieses Problem zu umgehen, wird ein leitfähiger Lack mit Silberpartikeln an den Kontaktstellen angebracht. Um die Bewegung der Drähte zu verhindern und diese zu sichern, wird auf den Lack noch zusätzlich ein leitfähiger Epoxykleber der Firma „Chemotronics“ aufgetragen. (Abbildung 40)

Um jeden der drei Sensoren gleich stark in Ruhe zu belasten, wurden alle Schrauben der obersten Aluminiumscheibe zuerst in Benzin gereinigt und anschließend mit einem Tropfen Kleber angezogen.



Abbildung 39: Gekürzter FSR Sensor mit Drähten



Abbildung 40: Geklebte Drähte am FSR Sensor



Abbildung 41: Sensorgehäuse und Sensorauflage

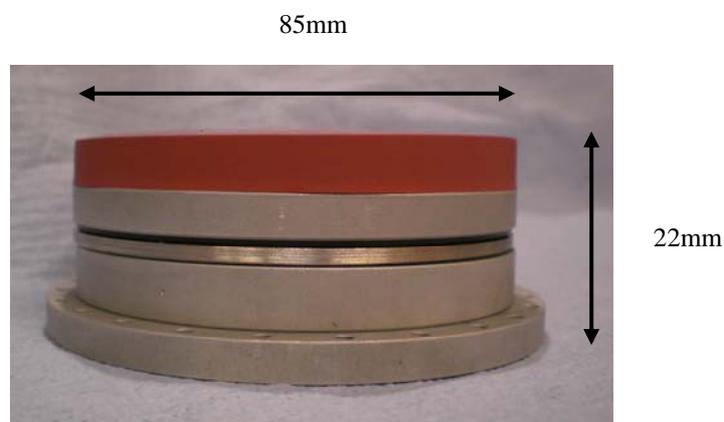


Abbildung 42: Sensor (seitliche Ansicht)

Um den Sensor im Nierengürtel einzubetten, wurde ein Loch in den Gürtel geschnitten, welches im Anschluss vernäht wurde. Durch die Verstärkung eines härteren Schaumstoffes in der Mitte des Gurtes, bleibt der Sensor stabil im Nierengurt befestigt. Die unterste Platte des Sensors wurde mit einem gewachsten Garn auf dem Gurt angebracht. (Abbildung 43) Der Silikon Schlagpilz wird durch einen transparenten „Wacker RTV-1“ Silikonkautschuk E43 auf die Aluplatte angeklebt. Für den Verwendungszweck der Schlagkraftmessung wird dieser auf dem Makiwara, einem mit Hartgummi ummantelten Holzbrett, befestigt. (Abbildung 44)



Abbildung 43: Sensorgehäuse angenäht auf dem Nierengürtel (Ansicht von oben ohne Silikon Schlagpilz)



Abbildung 44: Kraftsensor auf Makiwara (Holzbrett mit Hartgummi, Ansicht von vorne)

4.3.4.2 Schaltung

Der Sensor wird mit einem Kontakt am invertierenden Eingang eines invertierenden Verstärkers verbunden, und mit dem anderen an der Versorgungsspannung angeschlossen. (Abbildung 45) Durch die Widerstandsänderung des Sensors von über $20\text{M}\Omega$ auf $20\text{k}\Omega$ ändert sich die Verstärkung des Verstärkers und somit die Ausgangsspannung.

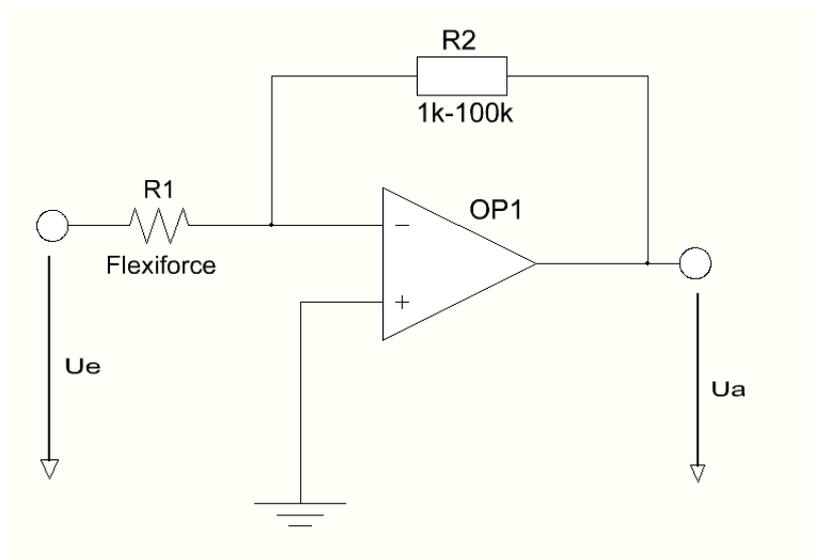


Abbildung 45: Schaltbild des Flexi-Force-Sensors in der Applikation

Die Verstärkung V des invertierenden Verstärkers wird durch nachfolgende Formel definiert, wobei U_a die Ausgangsspannung, U_e die Eingangsspannung, R_2 und R_1 die Widerstände, welche in Abbildung 45 ersichtlich sind, darstellen. [vgl.: Diedrich, 2007]

$$\frac{U_a}{U_e} = -\frac{R_2}{R_1} = V \quad (4.24)$$

Die Übertragungsfunktion des idealen invertierenden Verstärkers, mit zusätzlicher Referenzspannung U_{ref} am nicht invertierenden Eingang, wird durch die nachstehende Formel beschrieben.

$$\frac{U_a - U_{ref}}{U_e - U_{ref}} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (4.25)$$

Somit ergibt sich die Ausgangsspannung U_a zu:

$$U_a = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_e + \frac{R_2}{R_1} \cdot U_{ref} + U_{ref} \quad (4.26)$$

Die finale Schaltung wird mit dem OPV des Typs LT6220 der Firma „Linear Technologies“ realisiert. In dieser Applikation wird der OPV als invertierender Verstärker und als Impedanzwandler, der eine hochohmige Eingangsspannung in eine niederohmige Ausgangsspannung wandelt, verwendet. (Abbildung 46) Der Rückkoppelwiderstand R2 beträgt 100kΩ. Ein Spannungsteiler (R3, R4) mit nachfolgendem Impedanzwandler versorgt den FSR Sensor mit 0,5V. Ein zweiter Spannungsteiler (R5, R6) mit anschließendem Impedanzwandler stellt die Referenzspannung von 1V zur Verfügung.

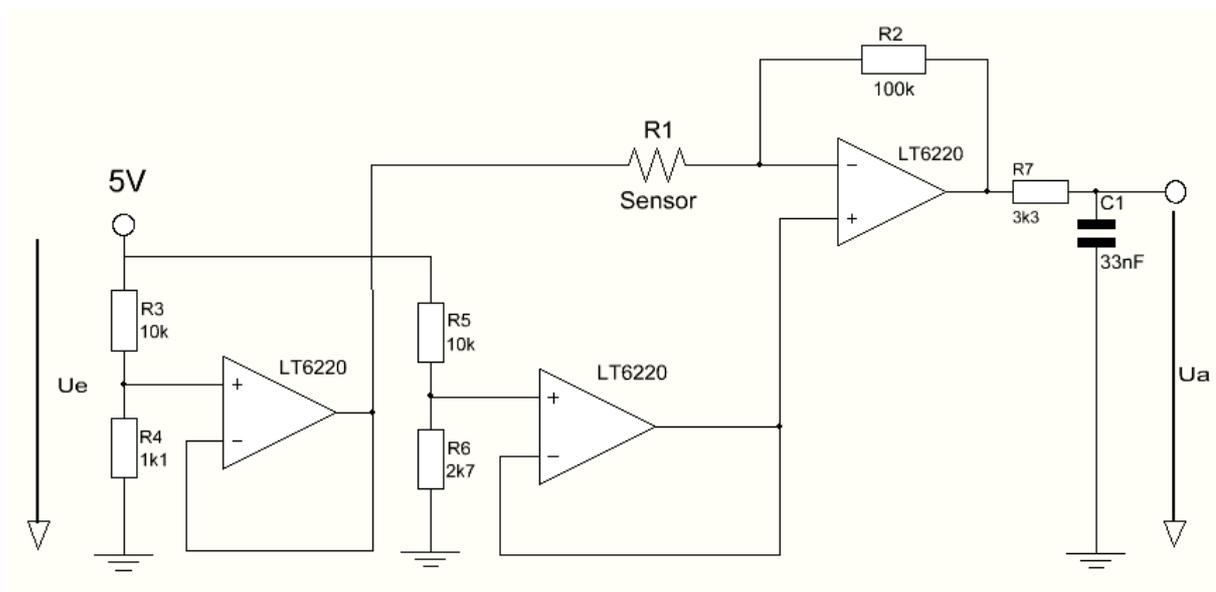


Abbildung 46: Schaltplanschema des Flexi-Force Sensors

Sowohl der Schaltplan als auch die Platine wurde mittels dem Schaltplan und Layout-Editor „EAGLE 4.16r2“ realisiert. Die Platine hat einen Durchmesser von 37,7mm und eine Dicke von 1mm.

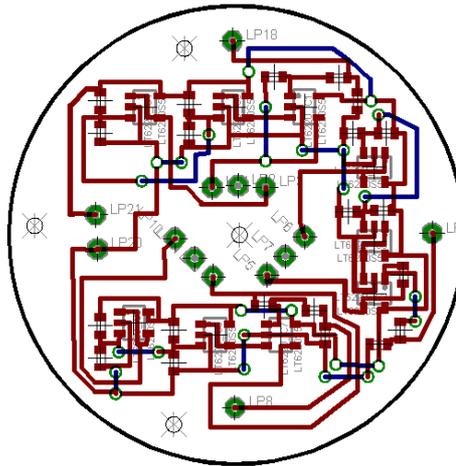


Abbildung 47: Finales Board der Flexi-Force-Schaltung

4.3.4.3 Kalibrierung

Die Firma „Tekscan“ gibt im Datenblatt an, dass der Sensor bei der Kalibrierung eine Linearität vorweist. Bevor man mit der Kalibrierung oder den Messungen beginnt, muss man den Sensor konditionieren. Das heißt, dass man ihn mit 110% des maximalen Gewichts vier- bis fünfmal für fünf Sekunden belasten muss. Danach soll man ihn mit 1/3 des 100%igen Gewichtes, danach mit 2/3 und letztendlich mit dem vollen Gewicht belasten.

Um die Linearität des Sensors nachzuprüfen, wurde er zuerst mit 1100N konditioniert und danach bis 1000N kalibriert. Um das Gewicht zu messen, das mittels einer Presse auf den Sensor gedrückt wird, wird eine Kraftmessdose, die an das „Hottinger Baldwin System“ gekoppelt ist, verwendet. (Abbildung 25 - Abbildung 28) Bei dieser Messung wird ein Testaufbau (Abbildung 46) herangezogen, in den ein $56\text{k}\Omega$ Widerstand als R2 eingebaut wird. Die Versorgungsspannung des Sensors beträgt 0,5V und die Referenz des Verstärkers, der zwischen 0 und 5V (single supply) versorgt wird, liegt auf 1V. Die Messwerte der Testkalibrierung sind in Tabelle 5 nachzuvollziehen. In Diagramm 10 wird die Kraft als Funktion der Spannung dargestellt.

Kraft [Newton]	Spannung [Volt]	Widerstand [Ohm]	Leitwert [Siemens]
10	1,14	200000	0,000005
25	1,22	127272,7273	7,85714E-06
50	1,34	82352,94118	1,21429E-05
100	1,48	58333,33333	1,71429E-05
150	1,64	43750	2,28571E-05
200	1,78	35897,4359	2,78571E-05
333	2,14	24561,40351	4,07143E-05
450	2,52	18421,05263	5,42857E-05
600	2,84	15217,3913	6,57143E-05
666	3	14000	7,14286E-05
800	3,36	11864,40678	8,42857E-05
1000	3,76	10144,92754	9,85714E-05

Tabelle 5: Messwerte der Kalibrierung des „Flexi-Force“ Sensors bis 1000N

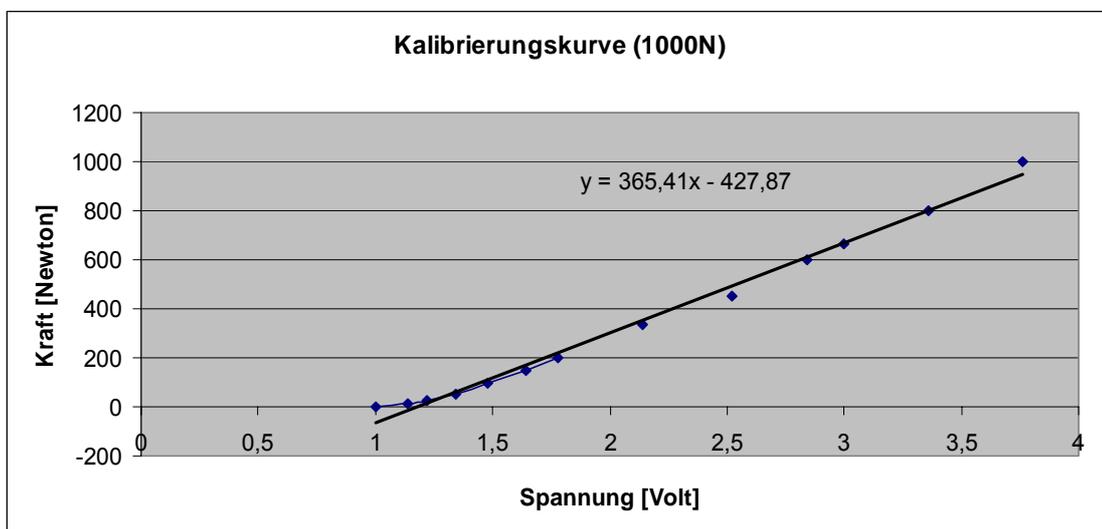


Diagramm 10: Kraft als Funktion der Spannung

Um den Sensor für den Zweck der Kraftmessung bis zu 4400N zu kalibrieren, muss er mit 4840N, also 110% des Höchstgewichts, konditioniert werden. Die bisher verwendete Kraftmessdose ist für diese auf den Sensor drückende Kraft zu schwach. Für diesen Versuchsaufbau wird eine Kraftmessdose der Firma Me-systeme, des Typs KM26z verwendet. Die Presse drückt mit 5kN auf den Sensor. Der Sensor ist ein Membran-Kraftsensor mit kleinen Abmessungen, der zur Messung von Zug- und Druckkräften eingesetzt wird. Der Nennwert der Dose beträgt $1,0 \pm 0,2$ mV/V, der Brückenwiderstand 250Ω und die Speisespannung befindet sich zwischen 2 und 8V.



Abbildung 48: Kraftmessdose KM26z [vgl.: Me-systeme Datasheet]

Die Dose befindet sich in einem Ruhezustand wenn sie in das dafür angefertigte Gehäuse geschraubt, und auf einem Plastikuntergrund abgestellt wird. Wird sie jedoch mit dem Gehäuse auf die Presse montiert, fängt die Dose an zu schwingen. Der Verdacht war ein Wackelkontakt im Kabel, da die Schwingung vom Metall der Presse verursacht wurde. Scheinbar ist dieser Sensor auf äußere elektrische und magnetische Störfelder besonders anfällig, oder die interne Erdung der Dose hat sich gelockert. Das Problem wurde durch Abschirmung der Presse mittels Klarsichtfolie, Teflon und Klebeband gelöst. Der Sensor wurde so kalibriert, wie er auch in der Realität verwendet wird. Es wurden alle drei Flexi-Force Sensoren mit dem Silikonschlagpilz am Sensor belastet. Obwohl eine Platte verwendet wurde, um eine möglichst mittige Druckfläche während der Kalibrierung zu garantieren, haben zwei Sensoren annähernd die gleichen Werte gezeigt, der Dritte (rosa) wurde stärker belastet und hat dadurch einen höheren Wert erreicht. Auch bei einem Schlag trifft man möglicherweise nicht genau die Mitte und belastet deshalb alle drei Sensoren ungleich. Deshalb wird sowohl für die Kalibrierung als auch für die Kraftmessung im Anschluss der Mittelwert der drei Sensoren berechnet. (Tabelle 6) Die Sensoren reagieren linear mit $y=1470x-1450$. (Diagramm 11)

Kraft [Newton]	Sensor1: blau Spannung [Volt]	Sensor2: rosa Spannung [Volt]	Sensor3: gelb Spannung [Volt]	Mittelwert Spannung [Volt]
0	1,12	1,12	1,12	1,12
1500	2,5	2,6	2,4	2,5
3000	3,28	4,3	3,44	3,673333333
4400	4	4,8	4,32	4,373333333

Tabelle 6: „Flexi-Force“ Sensorwerte bei der Kalibrierung

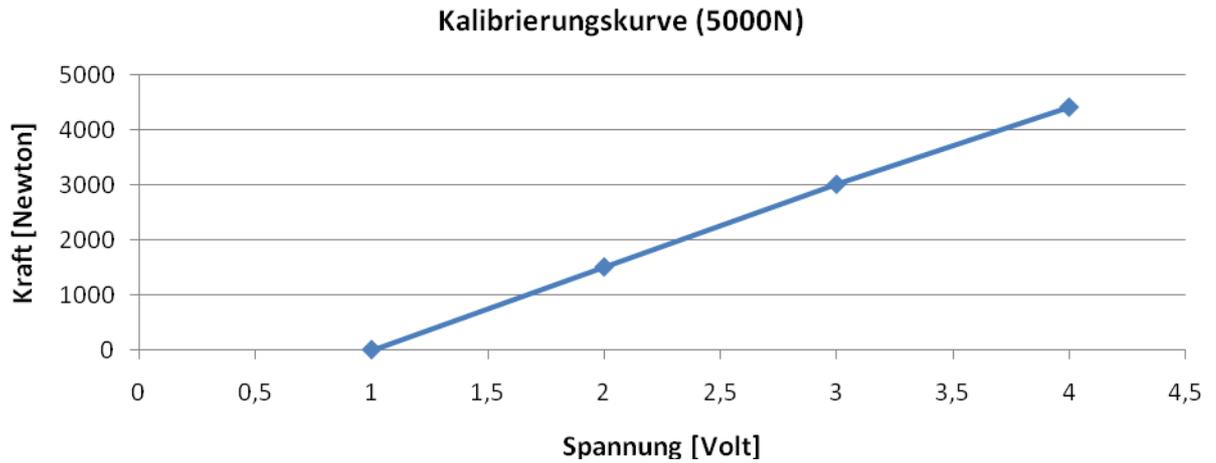


Diagramm 11: Kalibrierungskurve der „Flexi-Force“ Sensoren bis 5000N

In Abbildung 49 wird ein Test-Schlag auf den Sensor dargestellt. Man kann erkennen, dass vor allem ein Sensor (rosa) belastet wurde.

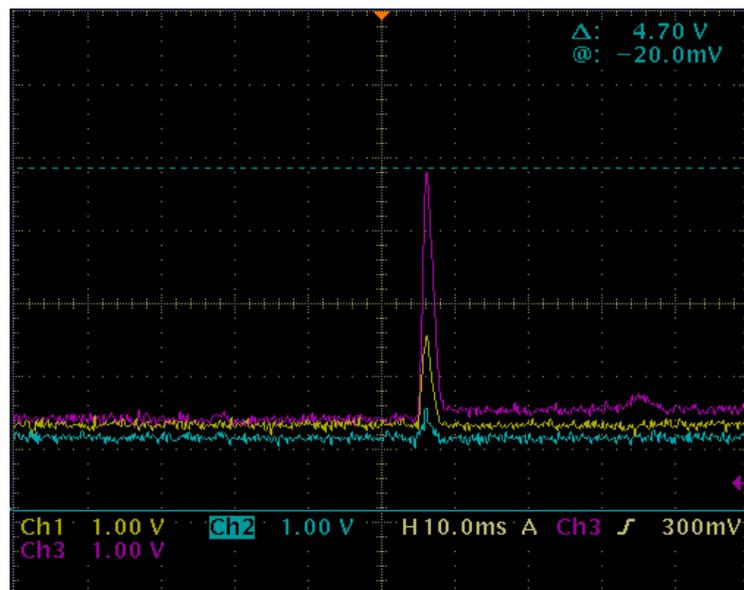


Abbildung 49: Schlag auf den „Flexi-Force“ Sensor

Vor der Messung musste ein zweites Mal kalibriert werden. Diesmal wurde jeder Sensor einzeln kalibriert und die daraus resultierenden Geraden in der Tabelle 7 angegeben.

Kraft[Newton]	Rot Spannung [Volt]	Blau Spannung [Volt]	Rosa Spannung [Volt]
0	1	1	1
1500	1,45	1,87	2,96
3000	1,68	2,6	4,59
4400	1,99	3,68	
Skalierungsgerade	$y = 4514x - 4682$	$y = 1664x - 1581$	$y = 833x - 874$

Tabelle 7: Kalibrierwerte der Flexi-Force Sensoren

4.3.5 Kraftmessung mit triaxialem DMS-Kraftsensor

Der triaxiale Kraftsensor basiert auf einem mechanischen Umsetzelement (Biegebalken) welches die physikalische nichtelektrische Messgröße aufnimmt. Diese wird in eine elektrisch aufnehmbare Größe (mechanische Spannung) umgesetzt. Das elektrische Sensorelement (der Dehnmessstreifen auf dem Biegebalken) erzeugt aus der mechanischen Größe (der Dehnung) eine elektrisch verarbeitete Größe (die Widerstandsänderung eines DMS). Diese, direkt verarbeitete elektrische Größe, wird in einer Signalaufbereitungselektronik (Wheatstonebrücke) in ein elektronisch weiterverarbeitbares Signal umgeformt. [vgl.: Schiessle, 1992]

4.3.5.1 Grundlagen der DMS-Messtechnik

Dehnmessstreifen nutzen den Effekt, des 1856 entdeckten Piezo-Widerstandes, aus. Ein Draht, der eine Längenänderung erfährt, ändert proportional seinen elektrischen Widerstand als Folge der Längenänderung. Die Widerstandsänderung wird durch die Formel (4.1) des spezifischen Widerstandes beschrieben. Bei einigen Metallen ist dieser Zusammenhang in weiten Bereichen linear. Die Proportionalitätsbeziehung zwischen der relativen Widerstandsänderung $\delta R/R$ und der relativen Längenänderung $\delta l/l$ oder ε (Dehnung) wird bei der Anwendung von DMS genützt. Der Begriff Dehnung kann mit positivem als auch mit negativem Vorzeichen verwendet werden, denn die negative Dehnung ist die Stauchung. Mit positiver Dehnung erhöht sich der elektrische Widerstand der DMS, mit negativer Dehnung reduziert sich der elektrische Widerstand. Die Dehnung ist zur Widerstandsänderung proportional, und wird wie folgt dargestellt. [vgl.: Schiessle, 1992]

$$\frac{\delta R}{R} = \varepsilon \cdot k \quad (4.27)$$

Die Widerstandsänderung hat im Wesentlichen zwei Ursachen. Zum einen die geometrische Verformung des metallischen Drahtes in Folge einer mechanischen Spannung, zum anderen die Änderung der Anzahl der Beweglichkeit von Ladungsträgern. Es wird zwischen Halbleiter-DMS und Metall-DMS unterschieden.

Das dehnungsempfindliche Sensorelement bei Halbleiter-DMS besteht aus sehr dünnen schmalen Siliziumstäbchen, p- und n-dotiertem Silizium oder Germanium. (Abbildung 50) Diese DMS haben eine sehr hohe Dehnempfindlichkeit mit einem k-Faktor von 100 bis 200. Die Änderung des elektrischen Widerstandes eines Halbleiters oder Metalls unter dem Einfluss einer mechanischen Spannung wird piezoresistiver Effekt (siehe 4.1.2) genannt. Bei Halbleitermaterialien ist der piezoresistive Effekt um etwa 100-mal stärker ausgeprägt als bei Metallen. Er hängt von der Orientierung des Halbleiterkristalls und von

der Dotierung (Art, Dichte und Verteilung der Fremdatome, welche die Leitfähigkeit bestimmen) ab. [vgl.: Schiessle, 1992]

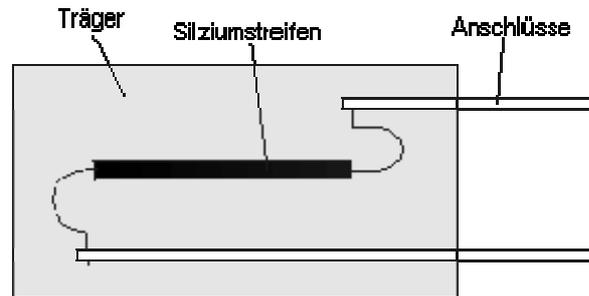


Abbildung 50: Halbleiter-DMS [vgl.: Untersweg, 1999]

Metall-DMS lassen sich nach Herstellungsverfahren unterteilen in

a) Draht DMS

Beim Draht-DMS wird aus einem 15-25 μm dünnen Metalldraht das Messgitter hergestellt. Dieses ältere Herstellungsverfahren wird nur noch für Hochtemperatur-DMS verwendet. Das drahtförmige Messgitter wird direkt auf einem Keramikträger angeordnet.

b) Folien-DMS

Beim Folien-DMS wird das Messgitter aus einer 5-15 μm dünnen Metallfolie heraus geätzt. Dieses Fertigungsverfahren erlaubt auch komplizierte Messgittergeometrien

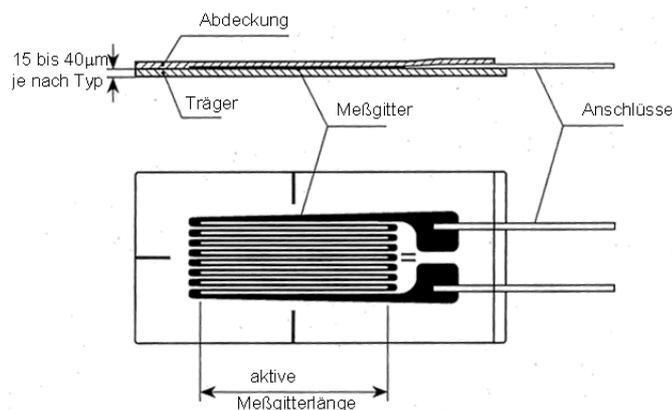


Abbildung 51: Folien-DMS [vgl.: Untersweg, 1999]

c) Dünnschicht-DMS

Es wird zwischen drei technologischen Verfahren zur Herstellung der Dünnschicht-DMS unterschieden. Alle drei Verfahren haben jedoch gemeinsam, dass auf Hochglanz polierte Oberflächen von Sensorelementen zuerst eine Isolationsschicht von einigen Mikrometern Dicke aufgebracht wird. Danach werden die niederohmigen Leiterbahnen zur Verschaltung und Kontaktierung der DMS und zuletzt die DMS selbst angebracht.

Die drei Verfahren sind das „thermische Aufdämpfen“, „Spattern“ und „CVD-Verfahren“. Auf diese Verfahren wird im Zuge dieser Arbeit nicht näher eingegangen.

4.3.5.2 Elektrische Verschaltung von DMS

Die DMS werden mechanisch so angeordnet, dass sie sich elektrisch zu einer Wheatstoneschen Messbrücke zusammen schalten lassen. Die Messbrücke besteht aus zwei Spannungsteilern, die gegeneinander geschaltet sind. Man unterscheidet zwischen Viertelbrücken, Halbbrücken und Vollbrücken. Die Anzahl der veränderlichen Widerstände, die in den jeweiligen Brücken integriert sind, sind für den jeweiligen Brückennamen verantwortlich. In einer Viertelbrücke ist nur ein DMS integriert. In einer Halbbrücke werden zwei und in einer Vollbrücke alle Widerstände als DMS realisiert. [vgl.: Schiessle, 1992]

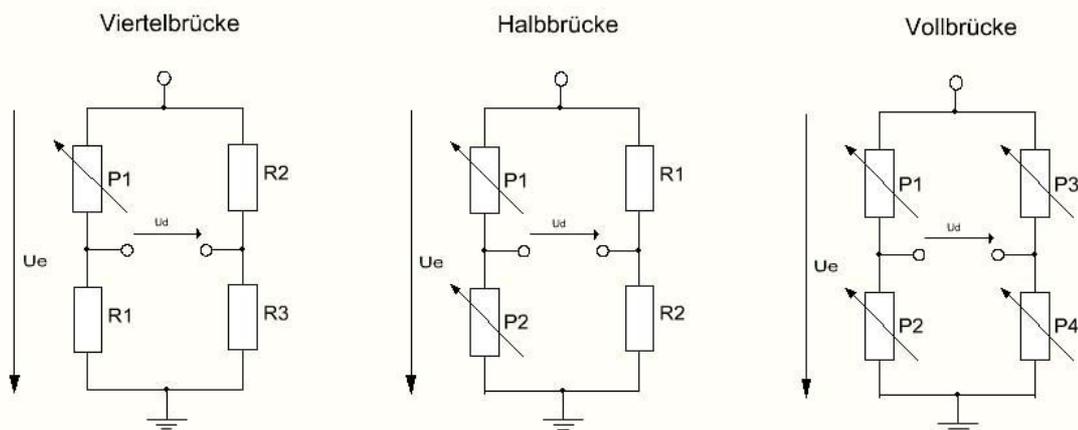


Abbildung 52: Wheatstonesche Messbrücke

Der triaxiale Messwertaufnehmer besteht aus eigens angefertigten mechanischen Umsatzelementen, in diesem Fall acht Stahlbalken der Konstruktion und elektrischen Sensorelementen, den Dehnmessstreifen.

Die Sensorelemente sind physikalisch mit dem Umsatzelement gekoppelt, indem sie an der Stelle maximaler mechanischer Spannung auf dem Biegebalken angebracht sind, und so die mechanische Größe in eine elektrische Größe, also Widerstandsänderung, umwandeln. [vgl.: Schiessle E., 2002] Um die horizontale Kraft in z-Richtung zu messen, werden 2mm große DMS für Stahl mit 120Ω verwendet und in der Brückenschaltung aus Abbildung 53 integriert.

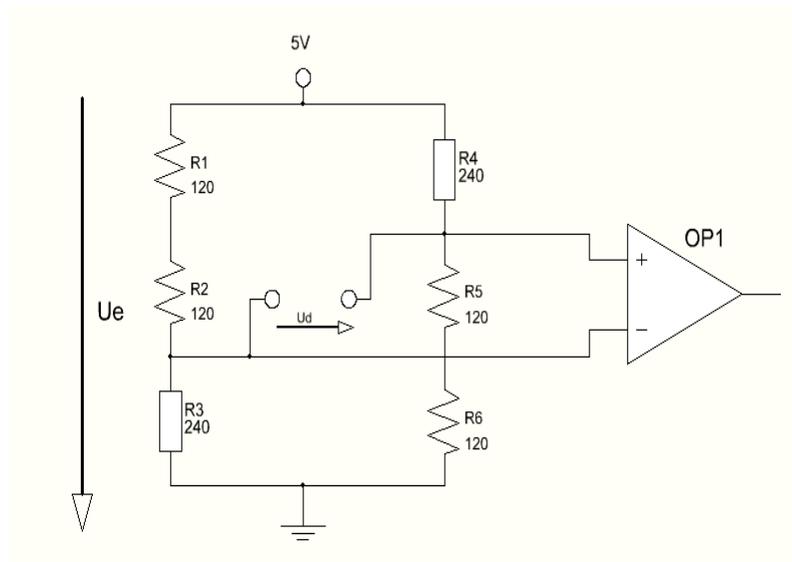


Abbildung 53: Brückenschaltung für die horizontalen Kraftwerte

Die DMS werden mit Klebstoff am Messobjekt appliziert. Die Qualität der Klebstelle ist entscheidend für die erreichbare Messgenauigkeit. Die Oberfläche muss vor der Verklebung entsprechend gereinigt und präpariert werden, und es empfiehlt sich die vom DMS-Hersteller empfohlenen Spezialklebstoffe zu verwenden. Schlechte Klebstellen oder ungeeigneter Klebstoff führen zu Kriechen, Hysterese und anderen Messfehlern.

Es wurden verschiedene Kleber der Hersteller für die Anbringung der DMS auf dem Stahl ausprobiert. Erst ein spezieller DMS-Kleber führte zu einer fixen Haftung der Plättchen. Die Kontakte der DMS sind bereits auf den DMS angebracht. Um einen Kontakt zwischen den Drähten zu verhindern wurden sie mit einem fadendicken Schlauch ummantelt und mit Silikon am Umsatzelement befestigt.

Um die vertikalen Kraftwerte in x- und y-Richtung zu messen, werden 350Ω DMS vom Typ FAE-03W-35-S6E-N von der Firma „Vishay“ verwendet und in der in Abbildung 54 schematisch dargestellten Applikation integriert. FAE-DMS bestehen aus einem Konstantan-Messgitter und einem hochflexiblen Polyimid-Träger. Die FAE-Serie ist sowohl im Sensorenbau, als auch in der Spannungsanalyse, die meistverwendete DMS-Serie. Jeweils zwei DMS werden für eine der beiden Achsen in einer Halbbrücke zusammengeschaltet. (Abbildung 54) Die DMS sind an der Innenseite der seitlichen Stahlbalken angeklebt. Nachdem der DMS-Kleber ausgehärtet war, wurden diesen DMS Kontakte angelötet. Das Anlöten der Kontakte der DMS erwies sich auf Grund ihrer geringen Größe als Problem. Die Kontakte mussten an der Innenseite der Biegebalken unter dem Mikroskop, angelötet werden.

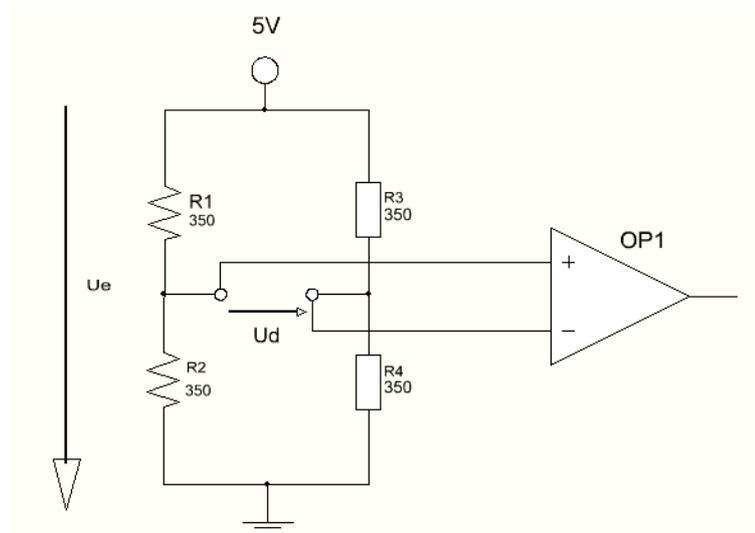


Abbildung 54: Brückenschaltung der x- und y-Achse

Der aus Stahl gefertigte Sensor wurde im Bearbeitungs- und Zeichenprogramm „Unigraphics NX“ konstruiert. Gefräst wurde er von einer 5-achs Werkzeugmaschine „PFM24 Primacon“ mit Steuerung „Heidenhain“. In Abbildung 55 - Abbildung 60 werden die Modelle und der fertige Sensor von verschiedenen Ansichten dargestellt.



Abbildung 55: 3D Modell in „Unigraphics“ (Ansicht von unten)

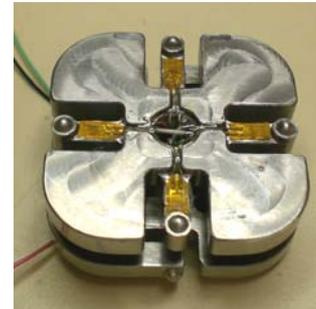


Abbildung 56: Kraftsensor (Ansicht von unten)

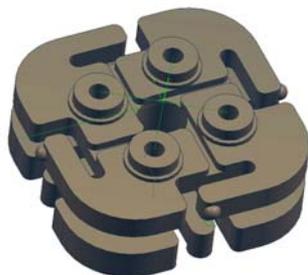


Abbildung 57: 3D Modell in „Unigraphics“ (Ansicht von oben)

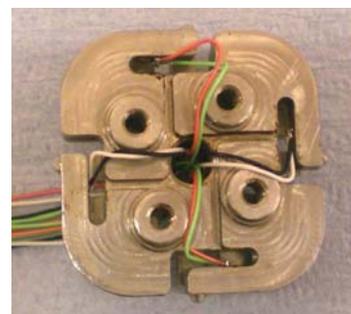


Abbildung 58: Kraftsensor (Ansicht von oben)

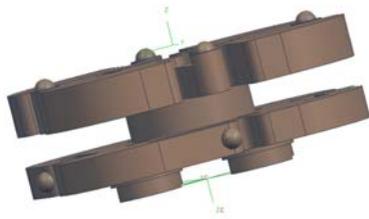


Abbildung 59: 3D Modell in „Unigraphix“ (Ansicht von der Seite)

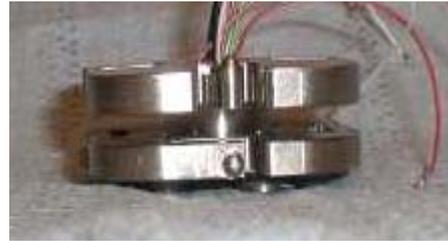


Abbildung 60: Kraftsensor (Ansicht von der Seite)

4.3.5.3 Befestigungsvorrichtung

Der Sensor ist in eine aus Stahl gefräste Ummantelung eingebaut, in der sich auch die Buchse für das Kabel befindet. (Abbildung 61, Abbildung 62) Das Sensorgehäuse ist auf einer Aluminiumplatte befestigt. Diese wird direkt auf einem Nierengürtel am Solar Plexus angebracht. Die Platine befindet sich unter dem Sensor in einem Gehäuse. (Abbildung 63) Die Kontakte der DMS gelangen direkt auf die Platine. An der Oberseite des Sensors befinden sich 4 Gewindelöcher in der die Schrauben der Schlagplatte befestigt werden. Durch den Schlag auf die Platte wird die Kraft komplett auf den Sensor übertragen. Damit der Sensor nicht aus dem Gehäuse fallen kann, ist über dem Sensor und unter der Schlagplatte, unmittelbar auf der Stahlummantelung eine dünne Platte mit vier mittigen Löchern angeschraubt. (Abbildung 64)

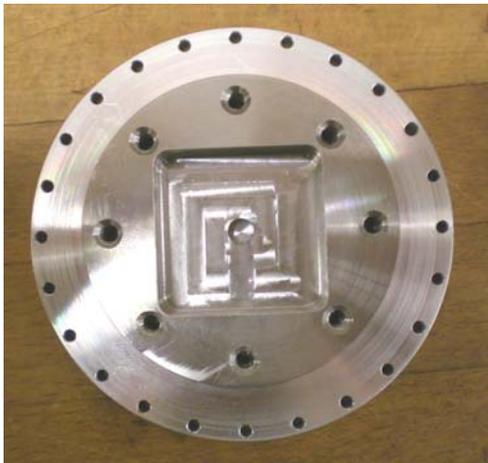


Abbildung 61: Gehäuse des Kraftsensors

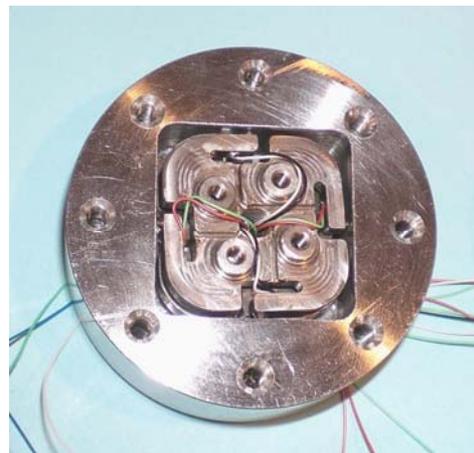


Abbildung 62: Kraftsensor im Gehäuse integriert

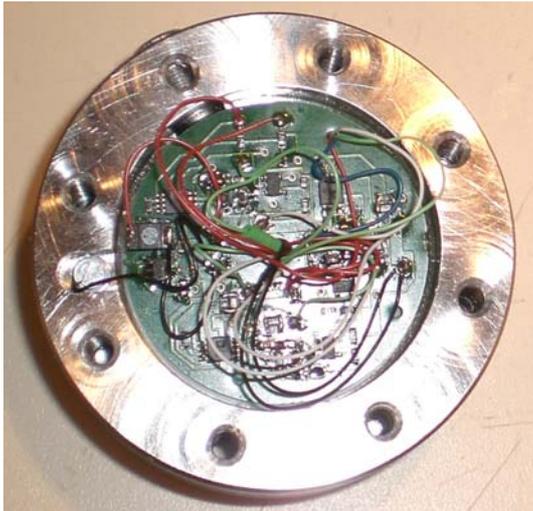


Abbildung 63: Platine im Gehäuse



Abbildung 64: Gehäuse des Sensors (seitliche Ansicht)

4.3.5.4 Schaltung der Kraftsensoren

Die Schaltung des Kraftsensors ist der des Beschleunigungssensors ähnlich. Der Unterschied besteht darin, dass die Vervollständigung der Brückenschaltung für den Kraftsensor auf der Platine realisiert und die Brücke des Beschleunigungssensors bereits im genannten integriert ist. (siehe 4.2.2.2, Abbildung 13) Für die z-Achse wird ein 240Ω Widerstand zur Vervollständigung der Brücke verwendet. Um bei der x und y Achse für die Brückenschaltungen 350Ω zu erlangen, werden zwei Widerstände von $13\text{k}\Omega$ und 360Ω parallel geschaltet. (Abbildung 53, Abbildung 54)

4.3.5.5 Kalibrierung

Um den Sensor zu kalibrieren, muss für den Versuchsaufbau die Kraftmessdose der Firma „Me-systeme“ des Typs KM26z angebracht werden. Mit der Presse wird mit bis zu 5kN auf die oberste Platte des Sensorgehäuses gedrückt. Da diese mit 4 Schrauben direkt am Sensor angebracht ist, kann die Kraft auf das Umsatzelement übertragen werden. Während der Kalibrierung haben sich die Balken des Sensors verbogen und die Kalibrierung musste abgebrochen werden. Der Sensor hat der Kraft wegen seiner mechanischen Beschaffenheit nicht stand gehalten. Für eine genaue Ausführung siehe 5.4)

4.4 Datenerfassung

Von der analogen Verstärkerschaltung werden die analogen Signale an eine PCMCIA-Messkarte weitergeleitet, welche die Analog-Digitalkonvertierung durchführt. Als Schnittstelle zwischen der Hardware und der PC-Workstation fungiert ein eigens

entwickelter Adapter. (Abbildung 66) Er speist eine Spannung von 5V in die Schaltung, die vom Laptop zur Verfügung gestellt wird, und leitet die vom Sensor kommenden analogen Signale in die NiDAQ-Card 6024 ein. (Abbildung 67) Die weiteren Berechnungen und die Visualisierung der Daten wird mit der Software „DasyLab 9.0“ verwirklicht. (siehe Abschnitt 4.4.2)

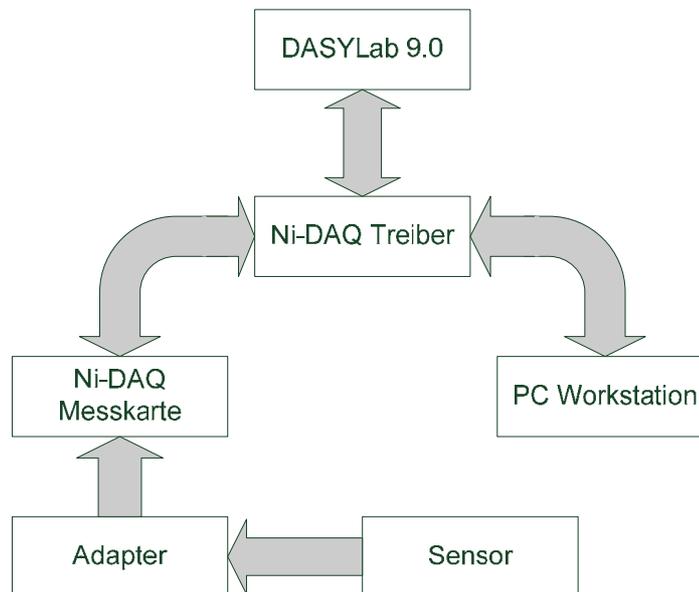


Abbildung 65: Relation zwischen NiDAQ-Karte, Software und Hardware

4.4.1 Adapter

Die Schnittstelle zwischen den analogen Signalen und der PC-Workstation ist eine 38mm x 39mm große Leiterplatte, an der auf einer Seite ein VHDCP Stecker mit 68 Kontakten angebracht wurde um eine Verbindung zur PCMCIA Karte herzustellen. Am anderen Ende befinden sich zwei sechspolige Riedel-Stecker, von denen fünf Pole in Gebrauch sind. Sowohl für den Beschleunigungssensor, als auch für einen Kraftsensor, ist ein Stecker am Adapter vorgesehen. Zwischen dem Adapter und den beiden Sensoren werden zwei ca. 4m lange Kabel angebracht. An einem Ende befindet sich ein vierpoliger Lemo-Stecker, von dem ein Pol für die Versorgung verwendet wird und die anderen drei Pole für die Ausgangssignale zuständig sind. Die Erdung wurde über das Gehäuse realisiert, da ein fünfpoliger Lemo-Stecker einen zu großen Durchmesser für die verwendeten Sensorgehäuse hätte.

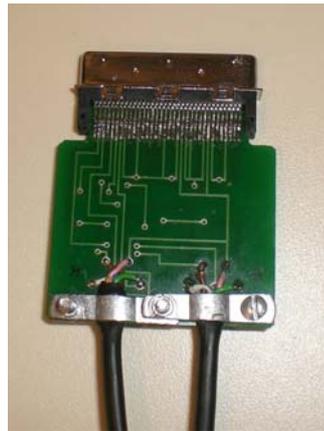


Abbildung 66: Adapter

4.4.2 NiDAQ 6024 Datenerfassungskarte

Zur Datenerfassung wird die Messkarte NiDaqu-6024 der Firma „National Instruments“ eingesetzt. Die Messkarte zeichnet sich durch 16 pseudodifferenzielle Analogeingänge mit 16Bit Auflösung und 250Hz Abtastrate aus. Zusätzlich enthält sie 2 analoge Ausgänge mit 16Bit Auflösung und 24 digitale I/O-Kanäle. Für die Signaleingänge wurden die Analogeingänge ACH0 bis ACH5 verwendet. (Abbildung 67)

AI 8	34	68	AI 0
AI 1	33	67	AI GND
AI GND	32	66	AI 9
AI 10	31	65	AI 2
AI 3	30	64	AI GND
AI GND	29	63	AI 11
AI 4	28	62	AI SENSE
AI GND	27	61	AI 12
AI 13	26	60	AI 5
AI 6	25	59	AI GND
AI GND	24	58	AI 14
AI 15	23	57	AI 7
AO 0	22	56	AI GND
AO 1	21	55	AO GND
AO EXT REF	20	54	AO GND
P0.4	19	53	D GND
D GND	18	52	P0.0
P0.1	17	51	P0.5
P0.6	16	50	D GND
D GND	15	49	P0.2
+5 V	14	48	P0.7
D GND	13	47	P0.3
D GND	12	46	AI HOLD COMP
PFI 0/AI START TRIG	11	45	EXT STROBE
PFI 1/AI REF TRIG	10	44	D GND
D GND	9	43	PFI 2/AI CONV CLK
+5 V	8	42	PFI 3/CTR 1 SRC
D GND	7	41	PFI 4/CTR 1 GATE
PFI 5/AO SAMP CLK	6	40	CTR 1 OUT
PFI 6/AO START TRIG	5	39	D GND
D GND	4	38	PFI 7/AI SAMP CLK
PFI 9/CTR 0 GATE	3	37	PFI 8/CTR 0 SRC
CTR 0 OUT	2	36	D GND
FREQ OUT	1	35	D GND

Abbildung 67: Messkarte NiDAQ 6024

4.4.3 Visualisierungssoftware DASyLab 9.0

Mit DASyLab werden die Daten sowohl in eine Datei gespeichert, als auch online am Bildschirm graphisch dargestellt. DASyLab ist ein Werkzeug zur graphischen Entwicklung für Messapplikationen und beinhaltet diverse Module für On und Offline-Berechnungen wie Mittelungen und Filter oder Mathematik und Statistik-Packages. Für die graphische Darstellung der Messdaten bietet DASyLab Y/t und X/Y-Grafiken, Zeiger oder numerische Anzeigen an. Die Abspeicherung der Daten wird in verschiedenen Datenformaten, z.B. im ASCII Format, ermöglicht. Um Bedienoberflächen und Layouts zu erstellen stehen integrierte Layoutfunktionen im Programm zur Verfügung.

Für die Rohdatenaufnahme wurde ein A/D Wandlungsmodul verwendet, wovon jeweils drei Signale von Linienschreibermodulen dargestellt werden. Um die Signale zu speichern, wird das Speichermodul am Ende des Schaltbildes angeschlossen. (Abbildung 68)

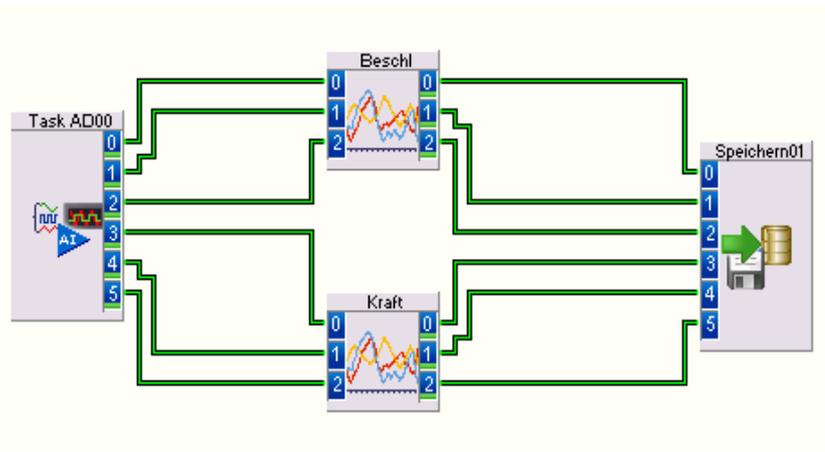


Abbildung 68: DASyLab Schaltplan zum Einlesen der Daten

Um die Daten auszuwerten, müssen die aufgenommenen Signale in den Schaltplan eingelesen und skaliert werden. Die Skalierung übernimmt das Skalierungs- bzw. das Formelmodul. Schlussendlich können die skalierten Daten wieder durch den Linienschreiber graphisch dargestellt und somit mittels eines Vermessungs-Tools ausgewertet werden. (Abbildung 69)

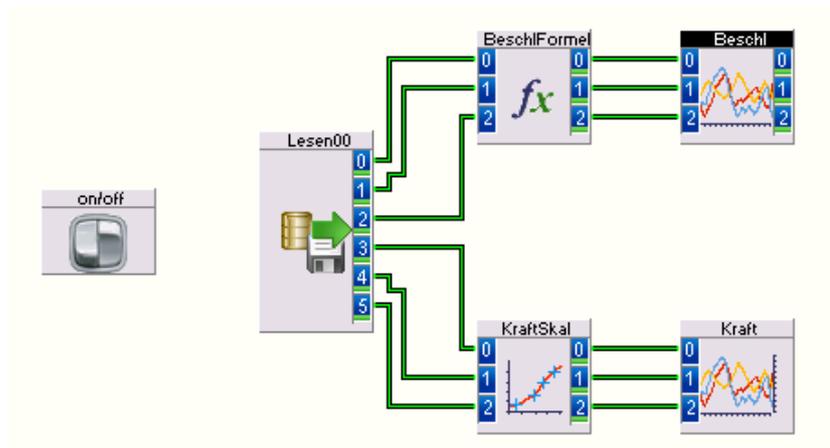


Abbildung 69: DASYLab Schaltplan zum Ausgeben der Daten

Um die Komponenten zu überprüfen wurden Testschläge ausgeführt. Abbildung 70 zeigt die skalierten Messwerte des triaxialen Beschleunigungssensors. Der oberste zeigt die negative Beschleunigung in der y-, der zweite in der x- und der dritte in der z-Achse. In Abbildung 71 werden die Testsignale der drei FSR Sensoren dargestellt.

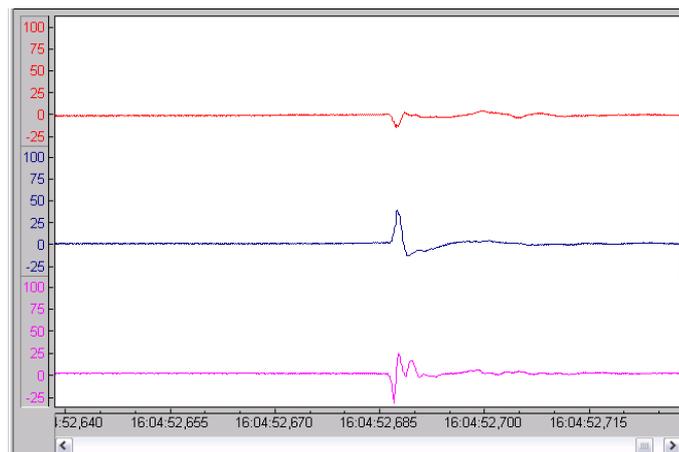


Abbildung 70: Messwerte des Beschleunigungsmoduls

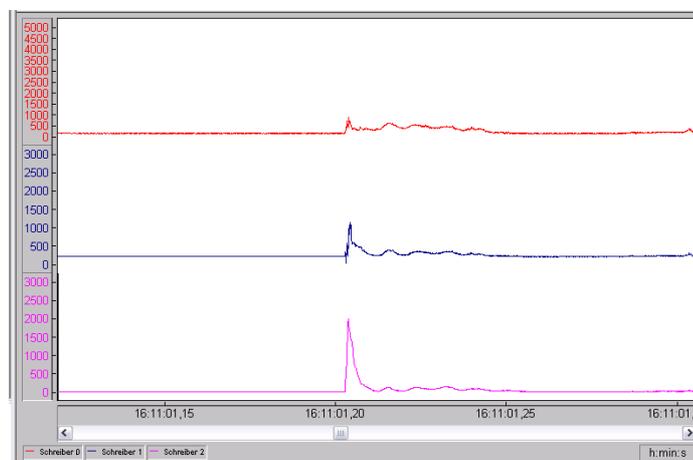


Abbildung 71: Messwerte des Kraftsensors

5 Ergebnisse

In den folgenden Absätzen wird aufgrund der Messergebnisse der Sensoren begründet, welche von ihnen für Schlagmessungen in der Diplomarbeit „Biomechanische Schlaganalyse im Kyokushin-Karate“ [vgl.: Fraunschiel, 2008] weiterverwendet werden. Im Laufe der Arbeit haben sich neue Möglichkeiten herauskristallisiert, Schlaganalysen durchzuführen, jedoch müssen auch einige Sensoren wegen ihrer Untauglichkeit verworfen werden.

5.1 Luftschalter

Der Luftschalter ist in seiner Konstruktion nicht stabil genug um Schläge über 2000N Stand zu halten, wodurch es unmöglich ist eine derart hohe Druckeinleitung zu vollziehen. Außerdem wird Wasser im Sensor verwendet um den Druck zu messen, was zu weiteren Problemen führt. Wasser kann nicht genau genug vakuumisiert werden, um die Bildung von Luftblasen im Luftschalter zu vermeiden. Somit können keine gleichen Luftschalter hergestellt werden, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Der größte Nachteil des Sensors ist, dass man keine triaxiale Aussage durch diesen Messwert treffen kann. Egal ob man den Luftschalter frontal oder seitlich trifft, wird eine Druckänderung gemessen. Der Vorteil der Sensoren ist, dass sich der schlagende Proband daran nicht verletzen kann.

5.2 Manganin

Da das Manganin eine geringe Widerstandssensibilität aufweist, konnte die Widerstandsmessung sowohl mittels einer Wheatstoneschen Brücke als auch mittels eines invertierenden Verstärkers nicht gemessen werden. Der Grund dafür könnten die Toleranzen der brückenvervollständigenden Widerstände sein, weil die Widerstandsänderung des Manganins geringer ist, als die Toleranzen der Widerstände. Der Manganin Sensor wird deshalb hauptsächlich für einmalige Druckwellenmessungen wie Sprengungen verwendet. Daher ist er nicht darauf ausgelegt, reproduzierbare Werte zu liefern. Selbst wenn man ihn an ein Widerstandsmessgerät anschließt, kann man erkennen, dass die Werte nicht reproduzierbar sind. Nun stellt sich jedoch die Frage, wie authentisch die Messergebnisse von Sprengungen sind, da jede Sprengung nur einmal durchgeführt wird.

Während der Arbeit mit dem Sensor stellte sich heraus, dass er für diese Art von Messungen nicht geeignet ist. Solch ein Sensor wird für Druckmessungen verwendet, die um sechs Zehnerpotenzen größer sind, als jene der Schlagkraftanalyse. Im Vergleich zu

Sprengungen, wo ein Druck von mehreren MBar auftritt, wird bei der Schlagkraftmessung lediglich ein Druck von einigen kBar wirksam.

5.3 Flexi-Force-Sensor

Die FSR-Sensoren der Firma „Tekscan“ werden für die nachfolgende Schlagkraftmessung verwendet, da die Kraft als Funktion der Spannung eine Linearität aufweist. Der maximal mögliche aufzubringende Druck von 4400N befindet sich im oberen Bereich der Messwerte von Schlagkraftmessungen. Es stellt sich jedoch die Frage, ob die FSR Sensoren den aufeinanderfolgenden kurzen hohen Impacts stand halten können, ohne beschädigt zu werden. Bei diesen Impacts wird eine Kraft bis zu 4400N in sehr kurzer Zeit auf den Sensor aufgebracht. Es wurden drei FSR-Sensoren für eine dreiaxige Kraftmessung im Gehäuse untergebracht. Die Möglichkeit der inkorrekten Reaktion der FSR Sensoren wegen der zu schnellen Impacts könnte sich auf die Fragestellung über die Analyse der Schlagrichtung auswirken. Theoretische Überlegungen haben zu einer Konstruktion eines Dreipunkt-Sensors geführt. Während der Schlagkraftanalyse wird sich zeigen, ob sich die Theorie bewahrheitet, oder die Sensoren nicht korrekt reagieren.

Darüber hinaus sind die Sensoren nicht einfach zu handhaben, da ein besonderes Augenmerk auf die Konditionierung und Kalibrierung gelegt werden muss. (siehe Abschnitt 4.3.4.3) Wurden sie für eine längere Zeit nicht verwendet, muss man den Vorgang der Konditionierung und Kalibrierung wiederholen.

5.4 Triaxialer DMS-Kraftsensor

Auf Grund der mechanischen Konstruktion würde der triaxiale Kraftsensor den bis zu 5000N starken Schlägen nicht Stand halten. Die folgende Berechnung soll veranschaulichen, wie viel Kraft auf die fest eingespannten Kragträger, auf denen die DMS angebracht sind, aufgebracht werden kann, bis sie sich verbiegen. (Abbildung 72) Um diese zu berechnen, muss das maximale Biegemoment M_{bMax} herausgefunden werden. Dieses ergibt sich durch Multiplikation der höchst zulässigen Spannung δ_{bzul} und dem Querschnitt W des Kragträgers, der sich aus der Kantenlänge a berechnet. Die höchst zulässige Spannung δ_{bzul} errechnet sich aus der Division der Grenzspannung δ_G mit dem Sicherheitsfaktor v , der in diesem Fall 1 beträgt. [vgl.: Steger, 1997]

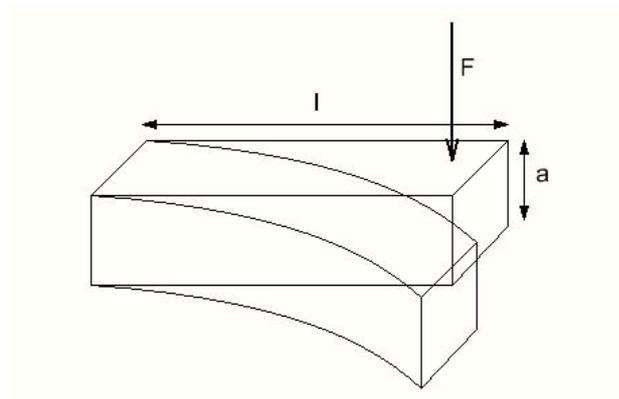


Abbildung 72: Kragträger

Querschnitt:

$$W_x = W_y = \frac{a^3}{6} \quad (5.1)$$

Zulässige mechanische Spannung:

$$\delta_{bzul} = \frac{\delta_G}{\nu} \quad (5.2)$$

Maximales Biegemoment:

$$M_{bMax} = \delta_{bzul} \cdot W \quad (5.3)$$

$$a = 3mm$$

$$\delta_G = 200MPa(N/mm^2)$$

$$M_{bMax} = 200 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,003^3}{6} = 0,9Nm$$

$$M_{bMax} = F \cdot l \quad (5.4)$$

$$l = 8,7mm$$

$$F = \frac{0,9}{0,0087} = 103N$$

Die Kragträger des Messwertaufnehmers würden nur eine Kraft von 103N aushalten.

Damit der Sensor für die Schlagmessungen verwendet werden kann, müsste entweder der Querschnitt erhöht, die Balkenlänge verkürzt oder die Balken beidseitig eingespannt werden. Die Verkürzung der Länge des Kragträgers kann aus dem Grund der DMS-

Anbringung nicht realisiert werden. Die Kragträger müssen mindestens so lang wie die kleinsten erwerbbaaren DMS sein um eine korrekte Messung durchführen zu können.

Die Vergrößerung des Querschnitts ist eine realisierbare Möglichkeit der Verbesserung des Messwertaufnehmers. Obwohl der Querschnitt zur dritten Potenz ansteigt, müsste er um fast das doppelte vergrößert werden. Nimmt man ihn mit einer Kantenlänge von 1cm an, dann hält er einer Kraft von fast 4000N stand.

$$a = 1\text{cm}$$

$$M_{bMax} = 200 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,01^3}{6} = 33,3\text{Nm}$$

$$F = \frac{33,3}{0,0087} = 3831\text{N}$$

5.5 Beschleunigungssensor

Die Kriterien für die Auswahl der Beschleunigungssensoren waren kleine Abmessungen, ein hoher Messbereich und eine außerordentliche Erschütterungsstabilität. Die bis zu 100g messenden piezoresistiven Sensoren des Modells 52 der Firma „Measurement Specialities“ haben sich bei der Analyse bewährt und erfüllen mitunter diese Kriterien. Die Konstruktion des Gehäuses und die Montage des Würfels, der für die triaxiale Anbringung der Sensoren zuständig ist und die der Platine, wurden für eine negative Beschleunigung von 100g ausgelegt und halten diesen Stand. Das Modul ist leicht zu handhaben, und kann an den Extremitäten der schlagenden Probanden angebracht werden, ohne jene in ihrer Bewegungsfreiheit einzuschränken.

6 Fazit und Ausblick

Durch eine Arbeit im Bereich der Entwicklung und Forschung habe ich die Erkenntnis erlangt und erfahren, wie schwierig und komplex der Umgang mit Sensoren ist. Einige der Sensoren und die darüber gewonnenen Erkenntnisse können in der Diplomarbeit „Biomechanische Schlaganalyse im Kyokushin-Karate“ [vgl.: Fraunschiel, 2008] umgesetzt und verwendet werden. Insofern bildet die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem Thema dieser Arbeit die Basis für die erwähnte Diplomarbeit, und hat das dafür notwendige Know-how geschaffen.

Ich kann mir vorstellen, dass diese Arbeit sowohl in der Forschung von Medizintechnikern oder Sportwissenschaftlern für die Analyse von Verletzungsrisiken, als auch von Kampfsportlern, die ihre Techniken verfeinern wollen, verwendet werden kann. Zwei aus dieser Arbeit hervor gehende Messsysteme stellen eine weitere Möglichkeit der Leistungsanalyse von Kämpfern dar, und können als eine zusätzliche Messplatz-Komponente der bereits entwickelten Messplätze für Kampfsportler angesehen werden. Die Datenübertragung, die in diesem Projekt mit einem Kabel realisiert wurde, könnte bei einer Weiterführung des Projektes durch eine Funkübertragung ersetzt werden um die Bewegung der Kämpfer nicht einzuschränken.

7 Literatur

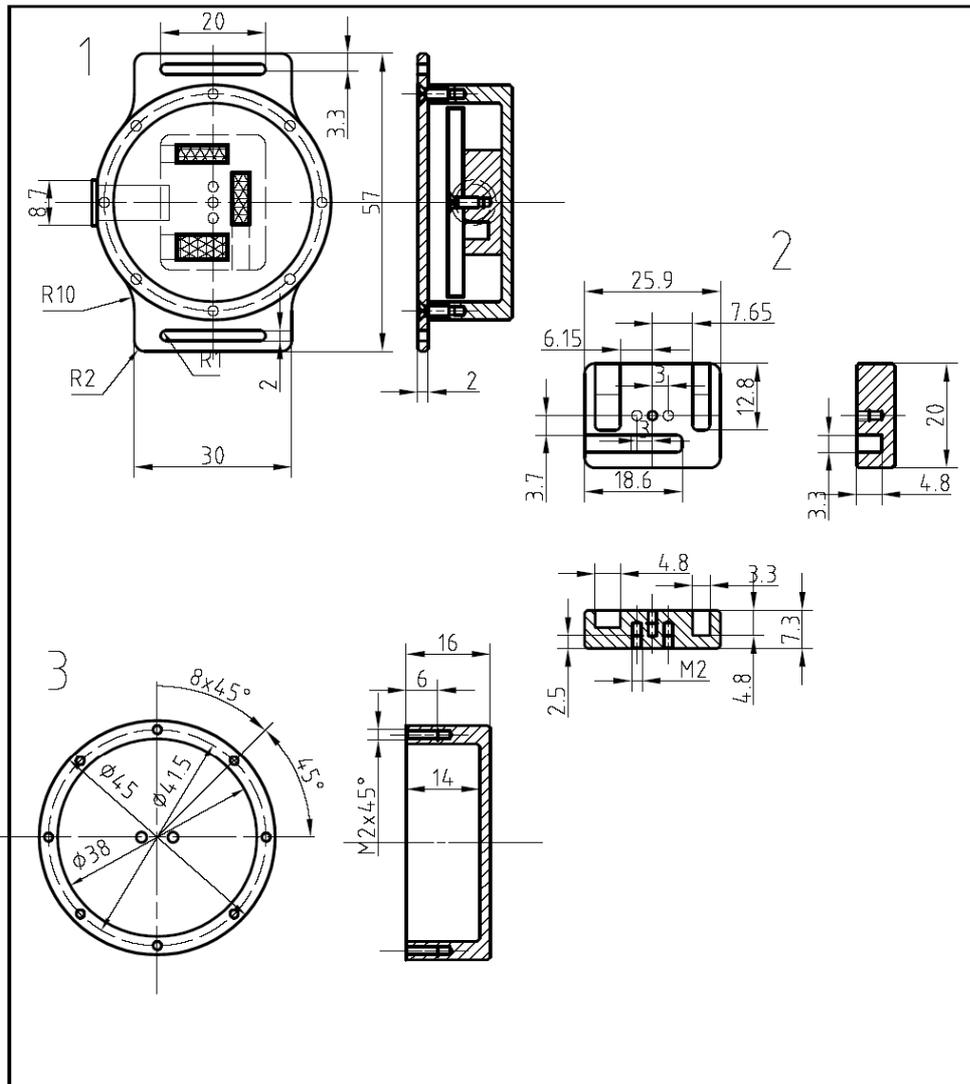
- Annex, 1998, „Specialized equipment for Hydrodynamic experiments“, 63.2: Manganin Gauges
- Bogdahn M., „Elektrisches Messen mechanischer Größen“, Praktikum, Tu-Darmstadt, S2
- Ebel H., Gurker N., 2005, „Physik“
- Diedrich K., 2007, „Elektronik gar nicht schwer“, Experimente mit Operationsverstärkern
- Fraunschiel M., 2008, „Biomechanische Schlaganalyse im Kyokushin-Karate“
- Hashimoto T., Hasegawa H., 2004, „Effective bodily motion on punching technique of Shorinji-Kempo“, The Impact of technology on Sport, S710-711
- Hilbert A., 1997, „Mathematik Grundlagenwissen“, Winkelfunktionen, Weltbildverlag GmbH, Augsburg 1997, S262ff
- Hofmann M., Emmermacher P, 2005, „Entwicklung eines komplexen Messplatzes zur Technikdiagnostik im Sportkarate“, Sporttechnologie 4, S340-343
- Interlink Electronics, 2006-2008,
http://www.interlinkelectronics.com/force_sensors/technologies/fsr.html,
4.Juni.2008, 16:55 Online im Internet
- Langenbeck N., Nowoisky C., 2005, „Beschleunigungsanalyse im Karate-unter Verwendung verschiedener Sensoren“, Sporttechnologie 4, S286-290
- Matsushita M. et al., 1989, „The impact force and arm movement in karate punch“, Japan Journal of Sports Science 8(7), S478-484
- Madou J. Marc, 2002, „Fundamentals of microfabrication: the science of miniaturization, 2nd edition“, CRC press, Florida.
- Nien Y.H, Chuang L.R., 2004, „The design of force and action time measuring device for martial arts“, Journal of Sports Science, S140-142
- Pierce J., Reinbold K., 2006, „Direct Measurement of Punch Force During Six Professional Boxing Matches“, Journal of quantitative Analysis in Sports
- Prectl A., 1995, „Vorlesung über die Grundlagen der Elektrotechnik“, Springer Verlag Wien New York
- Rosenberg Z., Yaziv D., 1980, „Calibration of foil like manganin gauges in planar shock wave experiments“, J.Appl.Physics, Vol 51, No 7
- Schmidt, W.-D., 2002, „Sensorschaltungstechnik“, Würzburg, Vogel Buchverlag, Kapitel 6.1 Halbleiter Beschleunigungssensoren, Seite 119, 120
- Schanz G., 1988, „Sensoren, Fühler der Meßtechnik“, SDV Saarbrücker Druckerei und Verlag GmbH
- Schiessle E., 1992, „Sensortechnik und Meßwertaufnahme“

- Schiessle E., 2002, „Mechatronik 1“, Reihe Elektronik
- Spick N., 2004, „Physik im Auto“
- Steger H., Sieghart J., 1997, „Technische Mechanik 1, Statik, Reibung, Festigkeitslehre“, B.G. Teubner Stuttgart
- Stern M, Brenkus J, Base Production, 2006, KKVI+NGC Network International, LLC and NGC Network US, „Fight Science“, National Geographics
- Stockhausen N., 2008, Praktikum Sensorik
- Technische Universität Hamburg, Praktikum Verfahrenstechnik Messung nichtelektrischer Größen Druck- und Volumenstrom
- Tekscan, 2005, Flexiforce User Manual
- Tränkler H., Obermeier E., 1998, „Sensortechnik Handbuch für Praxis und Wissenschaft“, Springer Verlag
- Untersweg W., 1999, „Prüfstand zur Messung mechanischer Größen“, 2.4 Beschleunigungsmessung
- Untersweg W., 1999, „Prüfstand zur Messung mechanischer Größen“, 2.1 Kraftmessung
- Vishay, http://www.vishay.com/company/brands/measurements-group/strain_gages/mm.htm, 19.Mai.2008, Online im Internet
- Vishay, 2006, „Special Use Sensors-manganin Pressure Sensors“, document number: 11524
- Vos, J.A, 1966, „Velocity and force of some Karate arm movements“, Nature, 211, S89-90
- Walser H., 2007, „Mathematik für die Sekundarstufe“

8 Anhang

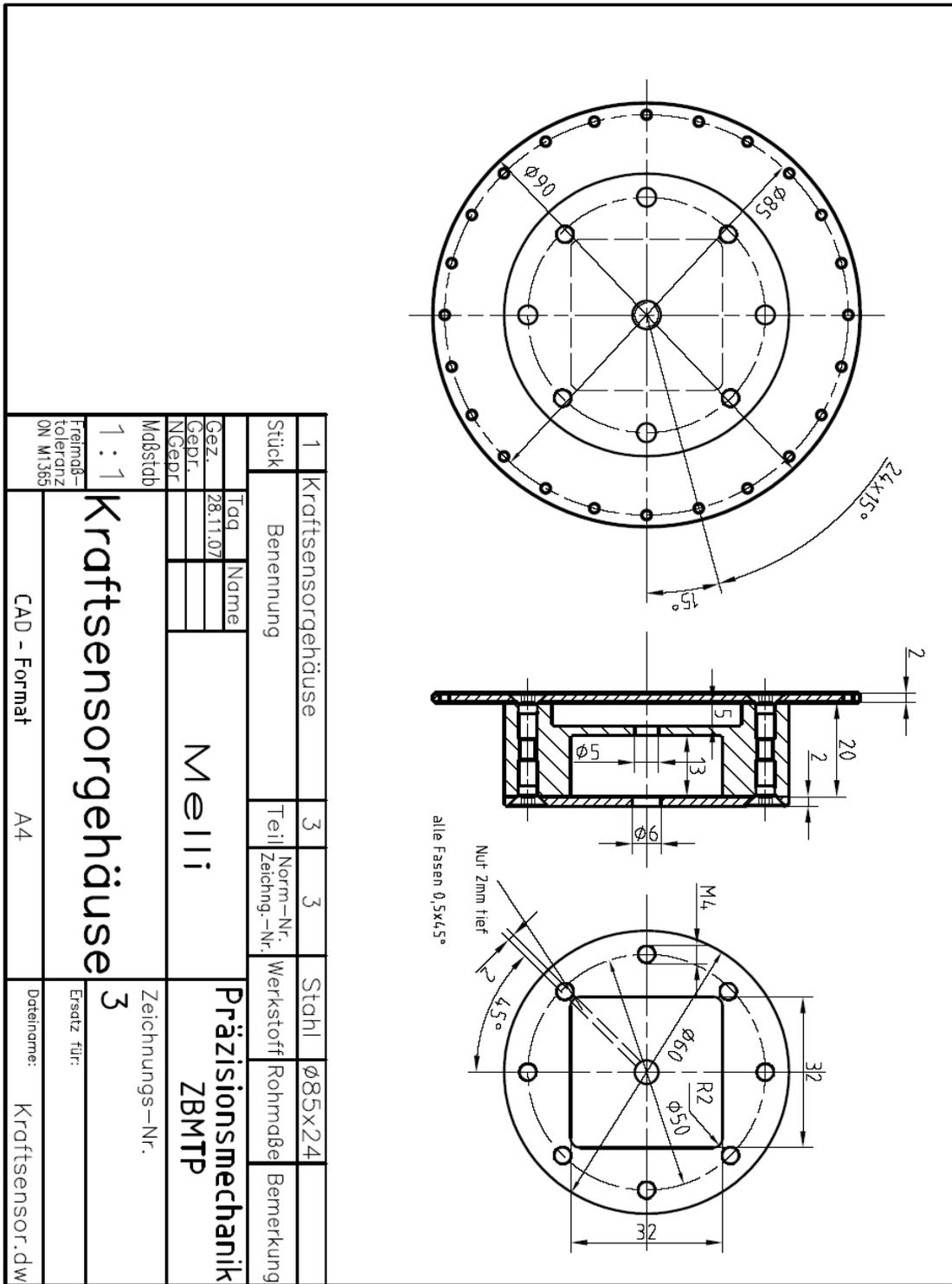
8.1 Mechanische Konstruktionen

8.1.1 Beschleunigungssensor

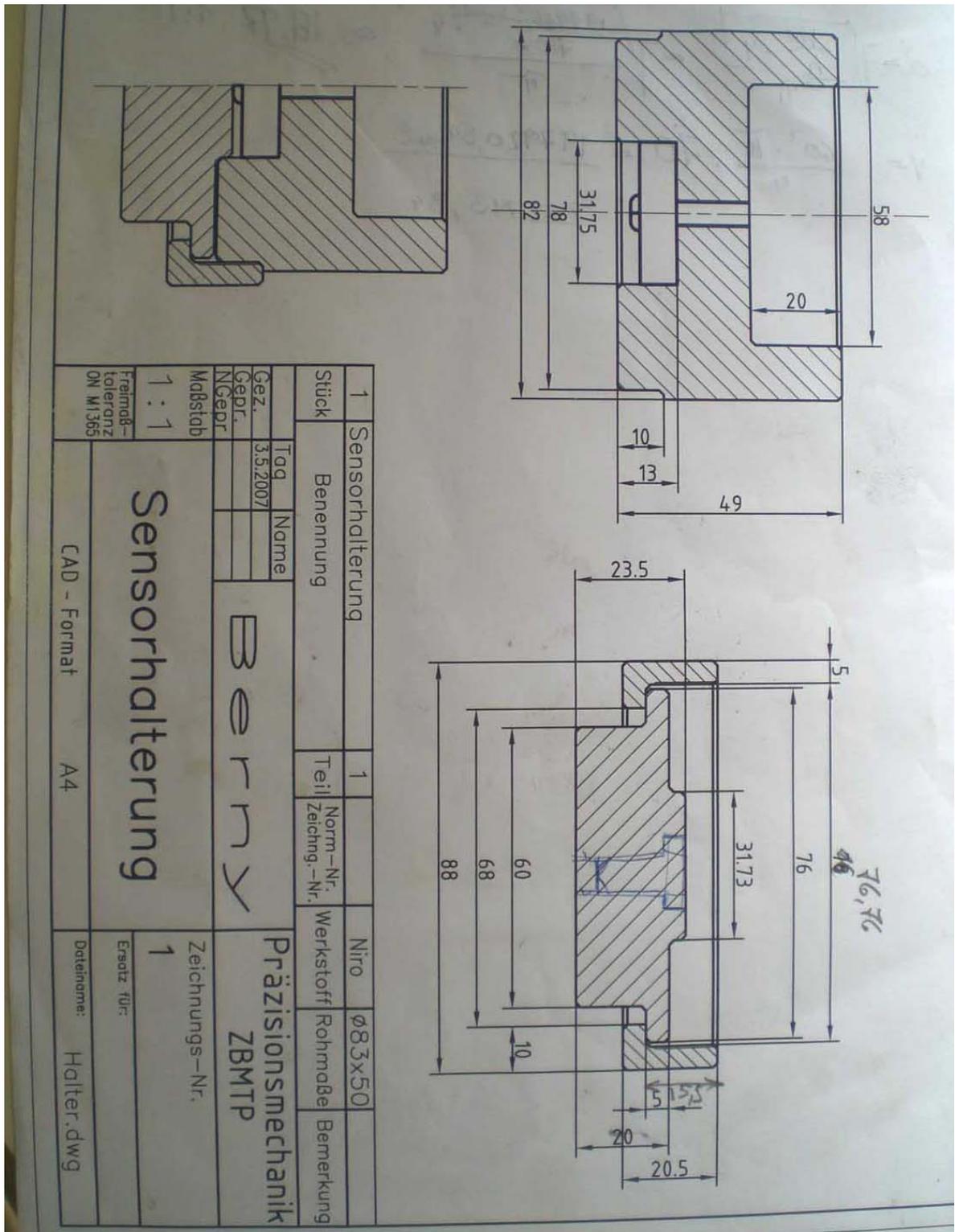


1	Gehäuse	1	1	Stahl	∅45x16			
1	Sensoraufnahme	2	1	Alu	25.9x20x7.3			
1	Accelerator	1	1	Alu/Stahl	57x30x18			
Stück	Benennung	Teil	Norm-Nr. Zeichng.-Nr.	Werkstoff	Rohmaße	Bemerkung		
	Tag	Name	Melli		Präzisionsmechanik ZBMTP			
Gez.	28.11.07							
Gepr.								
NGepr.			Accelerator		Zeichnungs-Nr. 1			
Maßstab	1 : 1						Ersatz für:	
Freimaß- toleranz ON M1365								
CAD - Format		A4						

8.1.2 Kraftsensor

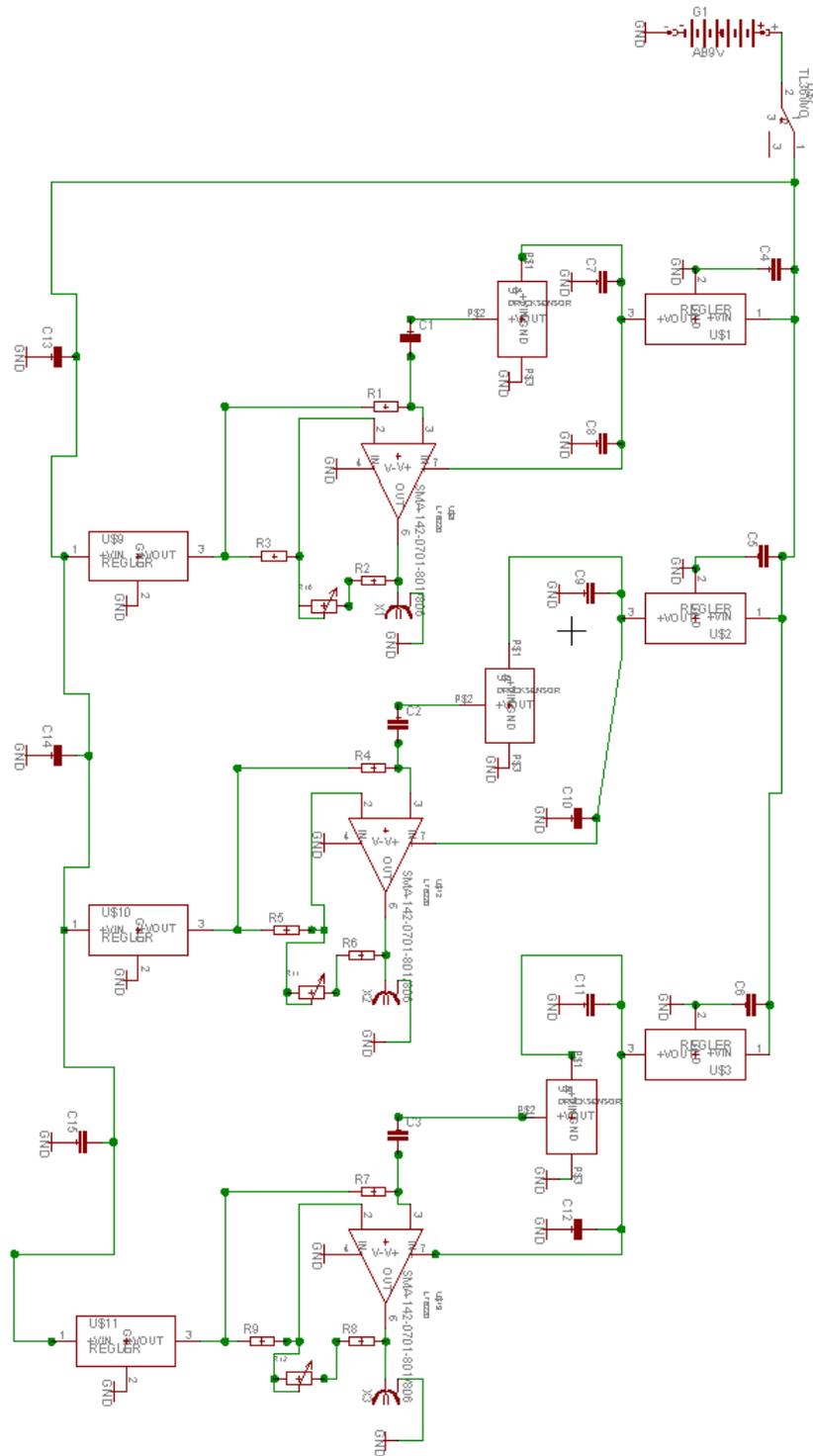


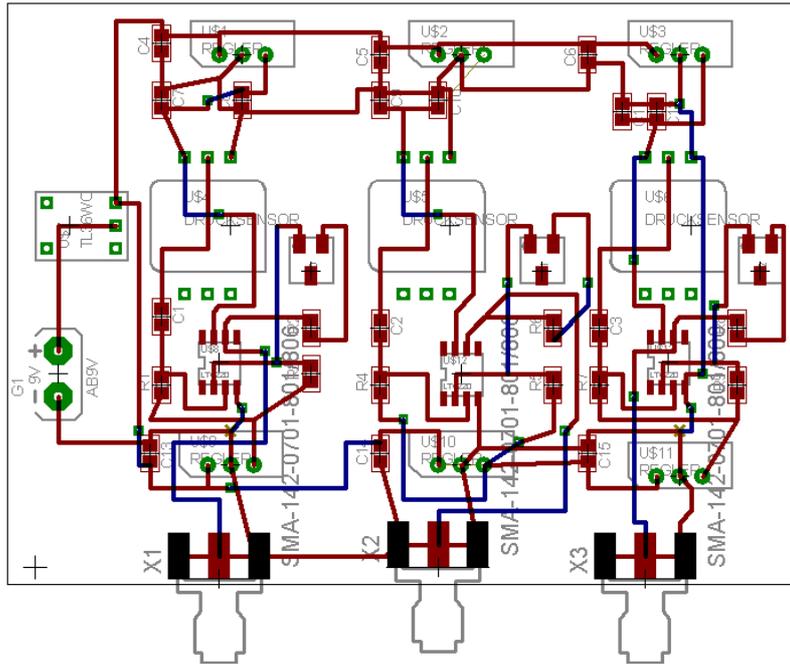
8.1.3 Kraftmessdosengehäuse



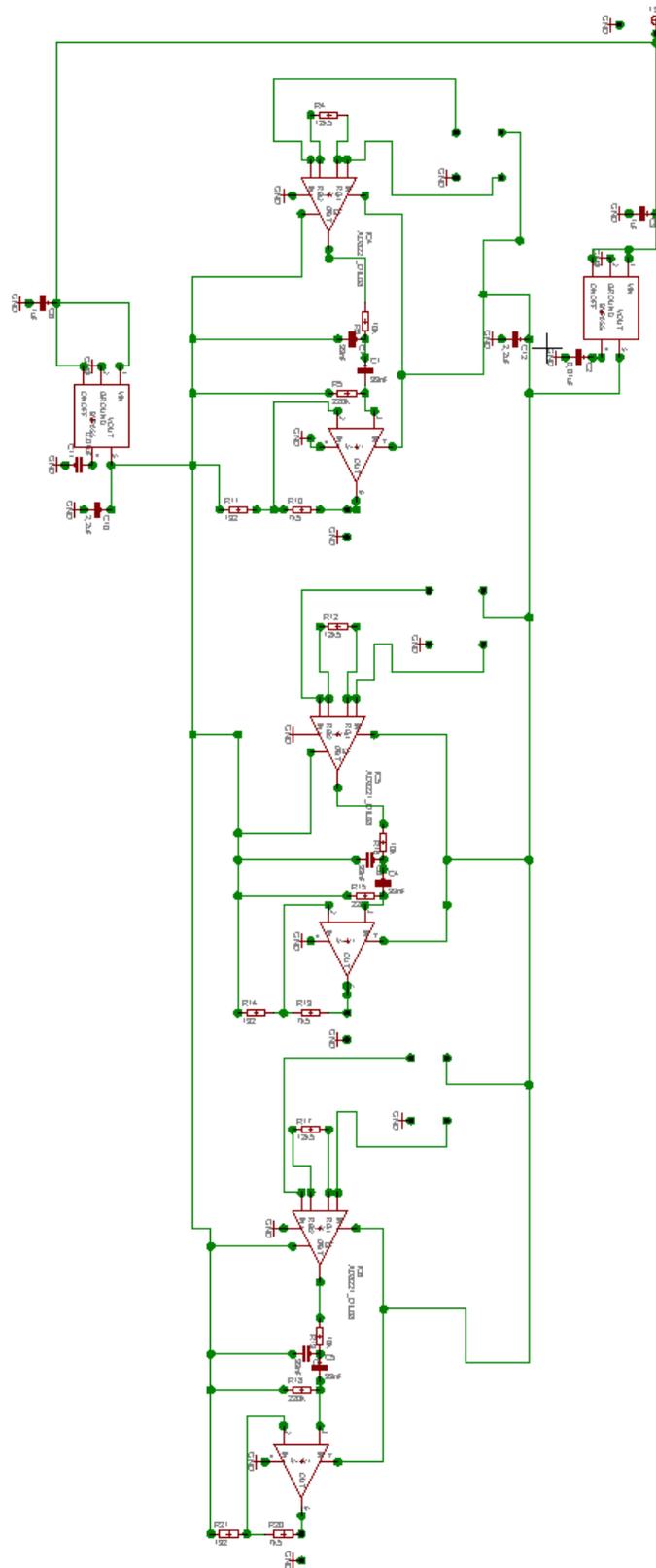
8.2 Test-Aufbauten

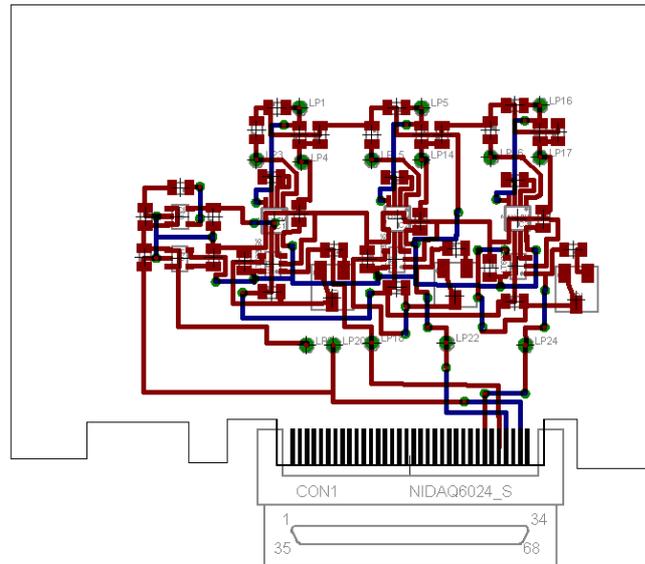
8.2.1 Prototyp des Drucksensors



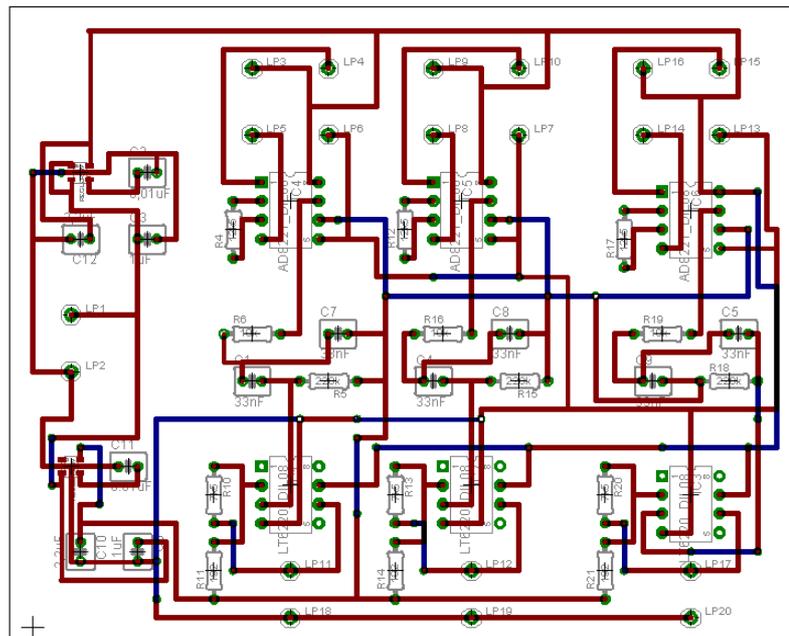


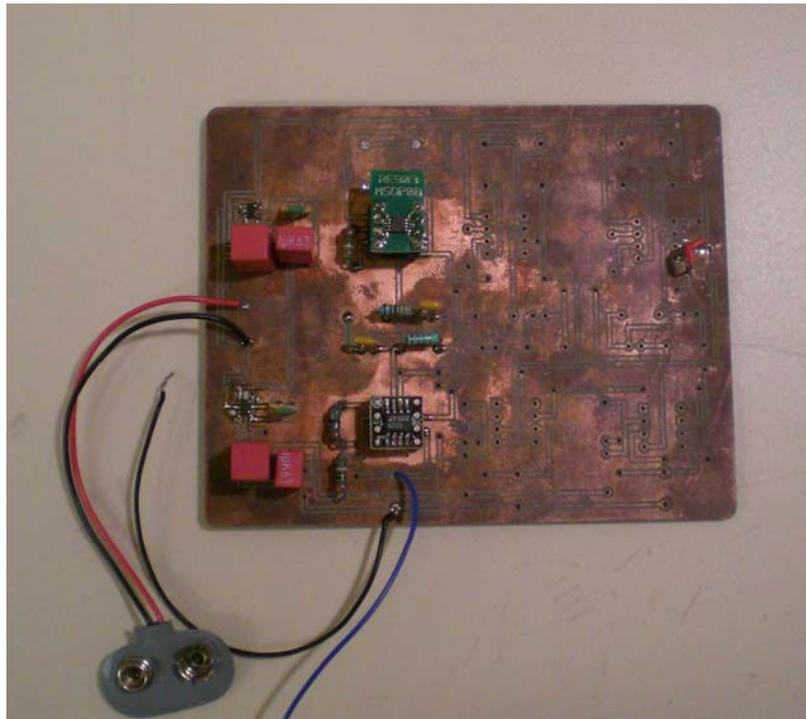
8.2.2 Erster Prototyp des Beschleunigungssensors



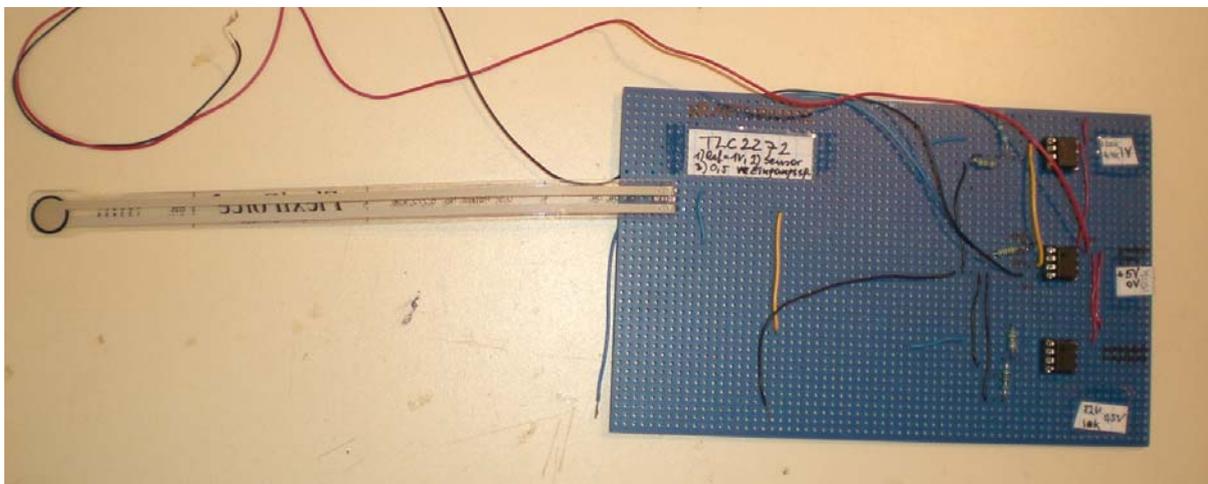


8.2.3 Zweiter Prototyp des Beschleunigungssensors



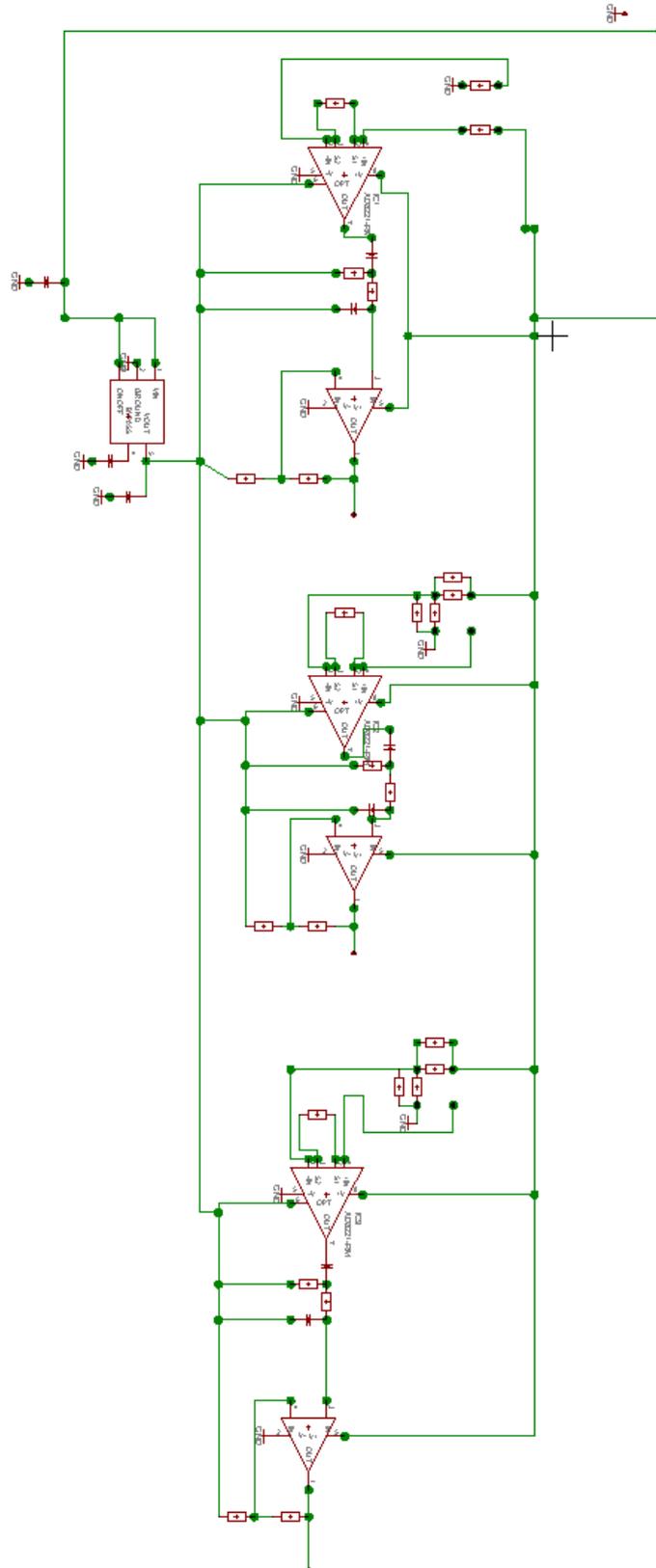


8.2.4 Erster Prototyp des Flexi-Force Sensors

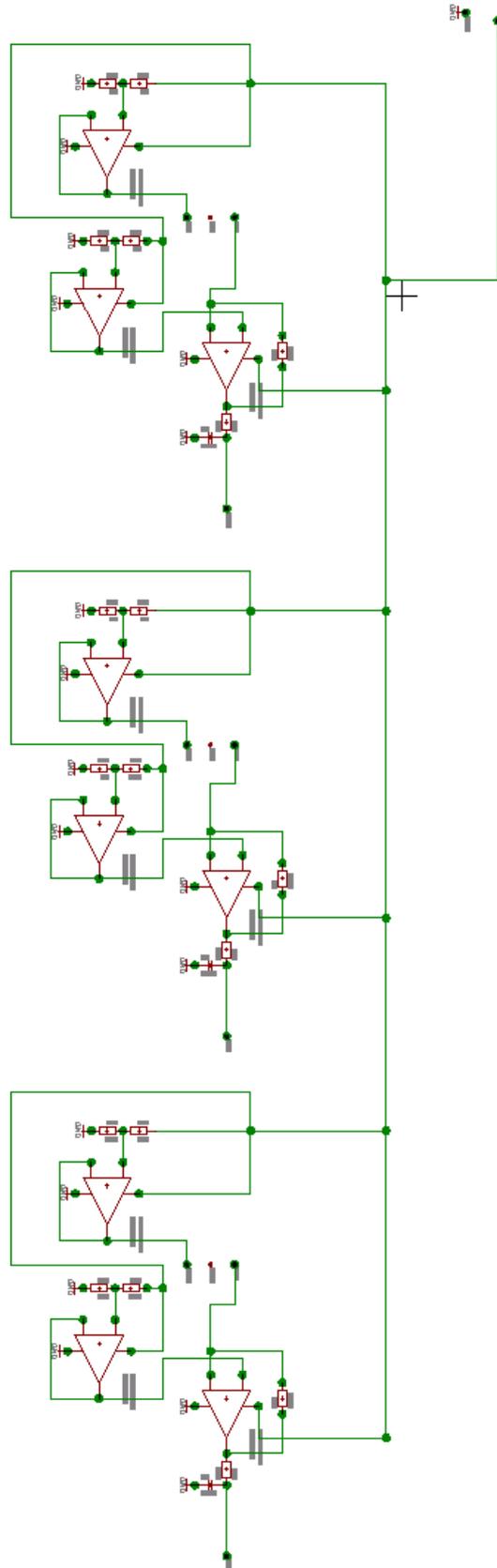


8.3 Finale Schaltpläne

8.3.1 Kraft und Beschleunigungssensor



8.3.2 Flexi Force Sensor



8.3.3 Adapter

