

Diplomstudiengang
Physik

DIplomARBEIT

Titel:

Entwicklung und Erprobung eines Messsystems zum Erfassen von dynamischen Leistungsparametern an Krafttrainingsgeräten

vorgelegt von: Heie Ludewig <Ludewig.Heie@Uni-Oldenburg.de>

Betreuender Gutachter: Priv.-Doz. Dr. Achim Kittel

Zweiter Gutachter: Priv.-Doz. Dr. Andreas Bund

Oldenburg, 21. September 2010

Kurzfassung

Dies Arbeit zeigt, dass es möglich ist, mit Hilfe eines IR-Abstandssensors und eines Optokopplers herkömmliche Krafttrainingsgeräte so zu modifizieren, dass über den Weg Kraft-Zeit-Verläufe erfasst werden können. Es können Kraftmaxima, Kraftanstiege und Explosivkräfte bestimmt werden. Der Aufbau ist mobil, berührungslos, verschleißfrei und mit einem Kostenaufwand von unter 100 € zu realisieren. Für den Einsatz zur Dokumentation und Kontrolle von Trainingsmethoden in einem Fitnessstudio ist er ausreichend. Für eine wissenschaftliche Nutzung werden Vorschläge präsentiert, die Genauigkeit zu verfeinern.

Abstract

By writing this thesis, it becomes evident that it is in deed possible to modify gym equipment by using a infrared-distance-sensor and opto-coupler to measure a time-force-curve. Though it is possible to measure force maxima, increase in force and explosive strength. The test set-up is mobil, non-contact, free from wear and can easily be realized below 100 €. The use in Fitness studios in terms to record and evaluate the data at an appropriate level is possible. For scientific reseach it is, however, necessary to modify the devices to increase the accuracy. Suggestions for these modifications can be found below.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theorie	3
2.1	Einordnung der Arbeit in die Sportwissenschaft	3
2.1.1	Trainingsgerätegruppen	4
2.2	Bestimmung der Leistungsparameter	6
2.2.1	Kraft	6
2.2.2	Leistung	8
2.2.3	Ausdauer	9
2.3	Muskelaufbau	9
2.3.1	Muskeltypen beim Menschen	9
2.4	Krafttraining und Krafttrainingsmethoden	12
2.4.1	Leistungsparameter	14
2.4.2	Messgrößen	14
3	Physikalische Theorie	16
3.1	Methoden zum Erfassen von Kräften und Massen	16
3.1.1	Kraftmessung durch den piezoelektrischen Effekt	16
3.1.2	Kraftmessung durch Widerstandsänderung	17
3.2	Methoden zur Erfassung von Positionen und Abständen	19
3.2.1	Abstandsmessung durch Strahlung	19
3.2.2	Abstandsmessung durch Feldveränderung	25
4	Parameter für den Messaufbau	29
4.1	Umgebungsbedingungen und Struktur eines Fitnessstudios	29
4.2	Rahmenbedingungen	31
4.2.1	Allgemeine Parameter	31
4.2.2	Spezielle Parameter	32
5	Sensoren	34
5.1	Kraftsensoren	34
5.2	Weg- und Abstandssensoren	36
5.2.1	Optoelektronische Abstandssensoren	40

5.2.2	Motioncapturing	44
5.2.3	PC-Maus	44
5.3	Beschleunigungsmessung mit Beschleunigungssensor	45
5.4	Gewichtsmessung	45
5.5	Zusammenfassung der Diskussion	45
6	Versuchsaufbau	47
6.1	Long-Pully am 4-Stationen-Zugturm	47
6.2	Verwendete Bauteile	49
6.2.1	Optokoppler CNY-70	49
6.2.2	Piezoelement Kistler 9251A	51
6.2.3	IR-Abstandssensor GP2Y0A02YK0F	52
6.2.4	IR-Abstandssensor GP2Y3A002K0F	53
6.2.5	A/D-Wandler	54
6.2.6	Weitere Teile	56
6.3	Anschluss der Bauteile	58
6.3.1	Anschluss des IR-Abstandssensors GP2Y3A002K0F	59
6.3.2	Anschluss des IR-Abstandssensor GP2Y0A02YK0F	59
6.3.3	Anschluss des Optokoppler CNY-70	60
6.3.4	Verkabelung des Piezoelement Kistler 9251A und Einstellung des Ladungsverstärkers	61
6.3.5	Anschluss der A/D-Wandler an den PC	61
6.4	Anbau der einzelnen Komponenten am Ruderzug	62
6.4.1	Anbauposition des IR-Abstandssensors	62
6.4.2	Anbau des Optokopplers	63
6.4.3	Anbau der Kabel, der Reflektoren und weiterer Kleinteile	64
6.5	Datenaufnahme mit Software	65
6.6	Versuchsaufbau I	65
6.7	Versuchsaufbau II	65
7	Durchführung der Messungen	66
7.1	Messung im Rehabilitationszentrum Oldenburg	66
7.1.1	Ablauf einer Messung	66
7.2	Messung im Gesundheitszentrum	67
7.2.1	Ablauf einer Messung	67
8	Auswertung der erhobenen Daten	68
8.1	Darstellung der Rohdaten	68

8.2	Kalibrierung der Sensoren und Berechnen der Ausgleichsfunktionen	72
8.2.1	Kalibrierung des Optokopplers CNY-70	73
8.2.2	Umrechnungsfunktion für den IR-Sensor GP2Y3A002K0F	75
8.2.3	Umrechnungsfunktion für den IR-Sensor GP2Y0A02YK0F	78
8.2.4	Kalibrierung des Piezoelements	78
8.3	Mögliche Filter	79
8.3.1	Peakfilterung	80
8.3.2	Tiefpassfilterung	81
8.3.3	Andere Filter	82
8.4	Berechnung der Kraftwerte aus Messwerten des IR-Sensors und des Piezoelements	82
8.4.1	Die Zeitreihe und das Basisintervall	82
8.4.2	Die Spannungsreihe des Piezoelement und des IR-Sensors	83
8.4.3	Berechnung der Kraftreihe aus der Spannungsreihe des Piezoelements	83
8.4.4	Berechnung der Kraftreihe aus der Spannungsreihe des IR-Sensors	83
8.5	Vergleich der Kraftkurven des IR-Sensors und des Piezoelements	86
8.6	Genauigkeit der IR-Messung im Bezug auf sportwissenschaftliche Größen	90
8.6.1	Maximalkraft	91
8.6.2	Schnellkraft und Explosivkraft	94
8.6.3	Leistung	97
8.6.4	Reaktivkraft	99
8.6.5	Kraftkurven verschiedener Probanden im Vergleich	100
8.6.6	Andere Messreihen	101
9	Diskussion der Ergebnisse	102
9.1	Vergleich mit Literaturwerten	102
9.2	Fehlerdiskussion	103
9.3	Ausblick	103
9.3.1	Verbesserung der Auflösung des IR-Sensors	103
9.3.2	Krafterfassung mit Dehnungsmessstreifen	104
9.3.3	Abstandserfassung mit einem Laser	104
9.3.4	Gewichtserfassung über Induktion	104
9.4	Resümee	104

Abbildungsverzeichnis

2.1	Kräfte-, Hebel- und Drehmomentbetrachtung bei 90° Armbeugung.	11
3.1	Veränderung der Polarisierung bei einem Siliziumquarz durch eine äussere Kraft.	17
3.2	Aufbau eines mehrschichtigen Piezoelements.	17
3.3	Winkel und Strecken in einem Dreieck.	19
3.4	Vereinfachte Darstellung des Ultraschallprinzips.	20
3.5	Längenmessung mit einem Michelson-Laserinterferometer.	22
3.6	Veränderung von Größe, Intensität und Ort des Lichts durch Reflektion.	24
3.7	Schaltung eines Induktiven Abstandssensors.	25
3.8	Ladungsbewegung beim Hall-Effekt.	27
3.9	Kapazitive Abstandsmessung mit Kondensatorplatten.	28
4.1	Funktionsweise von Kraftgeräten am Beispiel des Latzugs.	30
5.1	Induktionssensor mit langer Spule.	37
5.2	Prinzip Laser-Distanz-Sensor mit Triangulation.	42
5.3	Schematische Darstellung eines Optokopplers.	43
6.1	Photo vom 4-Stationen-Zugturm mit Ruderzug.	48
6.2	Photo Optokoppler CNY-70.	49
6.3	Foto CNY-70 inklusive Platine, verbaut in Gehäuse.	50
6.4	Seitenansicht und Achsenausrichtung Kistlerelement 9251A	52
6.5	Kraftadapter mit eingebautem Kistlerelement.	53
6.6	IR-Abstandssensoren: GP2Y0A02K0F und GP2Y3A002K0F.	54
6.7	Phidget Interface Kit 8/8/8 mit Verbindungskabeln.	56
6.8	Ladungsverstärker 5005 und Labor-Netzteil EA4003 in Frontansicht.	57
6.9	Pinbelegung und Blockdiagramm des IR-Sensor GP2Y3A002K0F.	60
6.10	Anschlussschaltung Optokoppler CNY-70.	61
6.11	Anbauposition der Sensoren am Long Pully.	62

6.12	Befestigungsvorrichtung des IR-Abstandssensors.	63
6.13	Optokoppler in Versuchsaufbau.	64
8.1	Darstellung <i>SPI</i> über Δt aus dem Datensatz GHZ-P17	69
8.2	Darstellung von <i>SIR</i> über Δt aus dem Datensatz GHZ-P17.	70
8.3	Darstellung von <i>SIR</i> über Δt vergrößert 2. - 5. s.	71
8.4	Rohdatensatzes Optokoppler CNY-70.	74
8.5	Spannung der einzelnen Plateaus bei Gewichtserfassung mit dem Optokoppler.	74
8.6	Spannungs-Abstandswerte des GP2Y3A002K0F aus Kalibrierungs- messung.	76
8.7	Spannungs-Abstands-Kurve aus Datenblatt GP2Y3A002K0F.	76
8.8	Abstands-Spannungs-Kurve GP2Y3A002K0F aus Kalibrierungs- messung.	77
8.9	Spannungs-Abstands-Kurve des GP2Y0A02YK0F im Bereich 20 - 120 cm.	78
8.10	Linearitätsmessung des Piezoelementes.	79
8.11	Spannung IR-Sensor vor und nach der Peakfilterung.	80
8.12	Vergleich Spannung IR-Sensor vor und nach tiefpassgefiltertung bei 6 Hz.	81
8.13	Bestimmung der minimalen Abweichung für GHZ-P17.	87
8.14	Vergleich KIR-Graphen bei verschiedenen κ -Werten.	88
8.15	Vergleich KPIE-Kurven mit verschiedenen gleitenden Mitteln.	89
8.16	Drei Darstellungsebenen der Messwerte.	90
8.17	Kraftkurve KPIE und PIR mit Maxima aus Messung GHZ-P17.	92
8.18	Kraftkurve KPIE und PIR mit Minima aus Messung GHZ-P17.	93
8.19	Schnellkraftkurven KAP und KAI für GHZ-P17.	95
8.20	Darstellung der KPIE- und KIR-Kurve mit Explosifkräften.	96
8.21	Kurve der Leistung aus GHZ-P17.	98
8.22	Reaktivkraft an lokalem Minimum von GHZ-P17 über 400 ms.	99
8.23	Kraftverläufe dreier Probanden im Vergleich.	100

Abkürzungen

Abbildung	Abb.
Abschnitt	Abschn.
Analog/Digital	A/D
beziehungsweise	bzw.
dass heißt	d. h.
Dehnungsmessstreifen	DMS
folgende	ff.
Gleichung	Gl.
Infrarot	IR
Kapitel	Kap.
Seite	S.
Tabelle	Tab.
Unterabschnitt	Unterabschn.
vergleiche	vgl.

1 Einleitung

Ein immer größer werdender Teil der Bevölkerung deckt seinen Bedarf nach Bewegung und einem trainierten Körper durch Besuche in einem Fitnessstudio. In den letzten Jahren ist der Fitnesssektor zur mitgliederstärksten Sparte im Sport geworden. Hierfür lassen sich verschiedene Gründe finden. Ein Grund ist der Glaube, dass dort in kurzer Zeit mehr für die eigene Gesundheit und seine körperliche Fitness erreicht werden kann, als mit herkömmlichen Methoden. In diesem Sinne ist es Ziel dieser Arbeit, die Effizienz von Fitnessgeräten zu erhöhen. Das Fitnessstudio hat in einigen Bereichen den Sport als gesundheitsfördernde Maßnahme und zum Ausbilden von Körperidealen abgelöst. Für viele Menschen ist es nicht mehr zeitgemäß, sich beim Sport nach anderen Menschen oder festen Zeiten richten zu müssen. Bei einem Besuch in einem Fitnessstudio treten diese Probleme nicht auf. Viele Studios haben von früh morgens bis spät in die Nacht geöffnet und es kann alleine trainiert werden.

Das Training an Fitnessgeräten ist meist zielgerichtet. Es können einzelne Körperpartien trainiert werden, zum Beispiel die Beinmuskulatur in der Beinpresse.

Um gezielt zu trainieren, sind genaue Kenntnisse der Anatomie und der Funktionsweise der Geräte, sowohl beim Trainer als auch beim Trainierenden, nötig. Um dies für die Trainierenden zu vereinfachen und den Trainern eine bessere Diagnose zu ermöglichen, wird in dieser Arbeit eine Möglichkeit gezeigt, Fitnessgeräte so zu optimieren, dass sie dem Trainierenden Aufgaben abnehmen. So lässt sich das Training individualisieren, ohne den Trainierenden mit mehr Aufgaben zu belasten. Dies wird möglich, wenn die Stärke und Dauer von Muskelkontraktionen genauer erfasst wird. Dadurch kann das Training dichter am optimalen Bewegungsablauf stattfinden.

Beim Trainieren der Muskulatur, einzelner Muskeln oder Muskelgruppen, gibt es die zwei grundlegend unterschiedlichen Trainingsziele: Kraft aufbauen und Ausdauer verbessern. Ihr Training unterscheidet sich in Umfang, Widerstand, Häufigkeit und Geschwindigkeit der Bewegung. Um die Effizienz für den Trainierenden zu erhöhen, wäre es ein Vorteil, alle vier zu erfassen und daraus eine Rückmeldung für den Trainierenden oder den Trainer zu erstellen.

Die Effizienz der Trainer wird ebenfalls erhöht. Wird die Bewegungsausfüh-

rung von Sensoren überwacht, muss dies kein Trainer übernehmen. Die Daten über Bewegungsausführung, Dauer des Trainings und Erfüllen des Trainingsplanes können zentral gespeichert werden. Es wird möglich, mehrere Geräte zentral zu überwachen und im Nachhinein die Daten auszuwerten, um einen neuen Trainingsplan oder ein Leistungsprofil zu erstellen. Ein weiterer Vorteil ist die Kosteneinsparung, wird das Training elektronisch überwacht, müssen weniger Trainer gleichzeitig im Studio sein. Kraftfitnessgeräte sind weitgehend wartungsfrei und haben eine lange Lebensdauer. Darum ist es kostengünstiger die bereits vorhandenen Geräte aufzurüsten, als neue anzuschaffen.

2 Theorie

In dieser Arbeit wird zunächst ein Anforderungsprofil an den Messaufbau, aus trainingswissenschaftlicher Sicht im Abschn. 2.1 und dann aus technischer Sicht im Kap. 3, erstellt. Es werden in Kap. 5 mögliche Sensoren vorgestellt und diskutiert. Im Kap. 6 werden die benutzten Sensoren genauer beschrieben und der mit ihnen entwickelte Versuchsaufbau dargelegt. Danach werden verschiedene Messreihen aufgenommen und ausgewertet.

2.1 Einordnung der Arbeit in die Sportwissenschaft

Für eine Einordnung gibt es zwei Perspektiven, aus denen sich dem Thema genähert werden kann: zum einen die Sportmedizin, welche sich mit Fragen des Stoffwechsels und des Muskelaufbaus beschäftigt, und zum anderen die Seite der Trainingslehre, die sich mit der Verbesserung von Trainingsplänen zum Optimieren von zielsportartgebundener Leistung befasst. Von beiden Punkten aus können die Funktionsweise und der Nutzen von Krastrainingsgeräten beschrieben werden, wobei es problematisch ist, die beiden aneinander anzuschließen. Die Bruchstelle, zu der es eine Vielzahl an Forschungen gibt, lautet: welche Art von Trainingsbelastung führt zu einem Zuwachs eines bestimmten Muskelfasertypus? Aufgrund von technischen Problemen gibt es zahlreiche Ansätze, aber noch kein einheitliches Modell. Die Problematik besteht darin, eine nicht invasive Messmethode zu finden, die die Veränderung einzelner Muskelfasern nach dem Krastraining erfasst. Dazu wird zum einen mit neuen bildgebenden Verfahren wie Kernspinresonanz gearbeitet, um Veränderungen im Muskel sichtbar zu machen. Zum anderen muss erfasst werden, welche Kräfte zu welchem Zeitpunkt von außen auf den Trainierenden wirken. Für diesen Fall wird ein Messaufbau benötigt, der dynamische Kräfte erfassen kann. Dabei ist zu beachten, dass neben der Stärke auch die Richtung und der Ansatzpunkt der Kraft eine Rolle spielen. Um diese drei Komponenten genau zu ermitteln, existieren bereits Labor-Messaufbauten, die die Bewegungen beim Training soweit einschränken, dass jede Komponente einzeln erfasst werden

kann. Die Fragestellung dieser Arbeit geht über einen solchen Ansatz hinaus. Die auftretenden Kräfte sollen unter realen Bedingungen erfasst werden. Dies gibt die Möglichkeit, nicht genormte Bewegungen, wie sie beim realen Training auftreten, zu untersuchen. Es soll nicht nur erfasst werden, welche Kraft-Zeit-Verläufe auftreten, es soll auch möglich sein, dem Trainierenden eine genaue Bewegungsausführung vorzugeben. Für ein gezieltes Training ist es nach anerkannten Theorien von Interesse für die Sportwissenschaft und den Trainierenden, zu erfassen, was die maximale Belastung beim Training ist, mit welcher Geschwindigkeit und Frequenz die Bewegungen ausgeführt werden, an welcher Stelle der maximale Kraftanstieg stattfindet und zu erfassen, welche Kraft wie oft auftritt. In diesem Sinne wird im Folgenden zunächst erläutert, was ein Krafttrainingsgerät ist und welche Faktoren nach dem Stand der Forschung eine Rolle beim Training mit ihnen spielen. Danach werden Leistungsparameter umrissen und medizinische und trainingswissenschaftliche Grundlagen dargelegt.

2.1.1 Trainingsgerätegruppen

Um sich dem Thema von der sportwissenschaftlichen Seite zu nähern, werden Fitnessgeräte in Gruppen eingeteilt. Zunächst gibt es drei Anwendungsbereiche, in denen Fitnessgeräte eingesetzt werden.

Rehabilitation: Fitnessgeräte werden zu Rehabilitation und Prävention von Verletzungen und Krankheiten eingesetzt. Dieser Bereich zeichnet sich durch intensiv betreutes Üben mit leichten Gewichten aus. Ziel ist es, muskuläre und koordinative Defizite zu beheben.

Training: Das Arbeiten mit Geräten dient dazu, gezielt Muskulatur oder Ausdauer aufzubauen. Ziel kann es sein, durch Bodybuilding ein Körperideal zu erreichen. Auch Leistungssportler aus anderen Disziplinen nutzen das Training an Fitnessgeräten zum gezielten Verbessern ihrer Kraft.

Fitness: Hauptsächlich werden Geräte zum Erhalt und zur Verbesserung von Ausdauer, Kraft, Beweglichkeit, Schnelligkeit und Koordination genutzt. Ziel ist es, die Gesundheit, das Wohlbefinden oder das körperliche Leistungsvermögen zu erhöhen oder zu erhalten. Es wird somit auch der Bereich der Gewichtsreduktion abgedeckt (vgl. [1] S. 164 ff.).

Auf dieser Grundlage lassen sich die Geräte in die zwei Gruppen einteilen: Ausdauer- und Kraftgeräte. In die Gruppe der Ausdauergeräte fallen alle Arten von Ergometern, Laufbändern, Steppern und ähnliche. Sie stellen alle eine Form von Fortbewegung (Laufen, Fahrradfahren, Treppensteigen) dar, die

durch den Aufbau der Geräte in einer Endlosschleife reproduziert werden. Die Belastung wird durch Verstärken des Widerstandes oder durch Erhöhen der Geschwindigkeit erreicht. Neben den Geräten, die mit Rotation arbeiten, gibt es welche, die mit Gewichten arbeiten, die per Hand eingestellt werden, dieses sind die Kraftgeräte. Die bei ihnen angestrebte Belastung zielt meist auf eine festgelegte Muskelgruppe ab. Dabei wird im Verlauf des Trainings gegen einen zunehmenden Widerstand gearbeitet. Diese Kraftgeräte lassen sich weiter in zwei hier relevante Gruppen einteilen: Geräte mit und ohne elektronisch geregelten Widerstand. Bei neueren Kraftgeräten ist es zum Standard geworden, den Widerstand elektronisch zu regeln. Dies hat den Vorteil, dass exzentrische und konzentrische Bewegungen unter verschiedenen Belastungen stattfinden können und es ermöglicht über die eingebaute Elektronik, Daten über die Bewegung zu erfassen. Am weitesten verbreitet sind zur Zeit Kraftgeräte ohne elektronische Steuerung. Bei diesen wird gegen die Schwerkraft eines Gewichts und nicht gegen die Reibung oder eine Wirbelstrombremse gearbeitet. Die Gewichte werden durch zwei zentral am Gerät angebrachte Stangen geführt, die Bewegung nur in eine Richtung, parallel zur Erdanziehung, zulassen. Das Gewicht stellt einen Widerstand dar, der über ein Seil und Rollen auf einen Griff oder eine Platte übertragen werden kann. Durch unterschiedliche Anordnung von Rollen und Griffen sind viele verschiedene Ausführungen der Geräte möglich, je nachdem, welche Muskelgruppe angesprochen werden soll. Diese Kraftgeräte unterscheiden sich von den Ausdauergeräten also darin, dass der Trainierende mit der Gewichtskraft einer Masse arbeitet mit dem Ziel, einzelne Muskeln aufzubauen.

Aus diesem Problem heraus ergibt sich die Frage, wie mit den heutigen technischen Möglichkeiten ein Kraftgerät aufzurüsten kann, um eine bessere Bewegungserfassung zu erzielen. Ein Aufbau, der dynamische Parameter erfassen kann, hat verschiedene Vorteile. Er kann die Trainingskontrolle verbessern, vielleicht sogar als Instrument der Diagnose im sportwissenschaftlichen oder Rehabilitationsbereich dienen. Fast alle Fitnessstudios und Rehabilitations-einrichtungen sind mit diesen Krafttrainingsgeräten ausgestattet, weil sie ein flexibles und individuelles Training erlauben. Im Gegensatz zu den stärker geführten und kontrollierten Geräten kann an den Kraftgeräten die Bewegung an die individuellen Bedürfnisse angepasst werden. Dies ist auf der anderen Seite ein Nachteil: Da der Bewegungsradius größer ist, steigt zwar die Eigenverantwortung, aber auch das Risiko einer Falschbelastung. Dies spielt vor allem im Rehabilitationssektor eine Rolle. Die Patienten sollen lernen, selbständig die Grenzen ihrer Bewegung und ihrer Belastung zu erkennen. Dabei kann es zu Überlastungen oder Verletzungen kommen. Das hier vorgestellte

Messverfahren könnte in einem solchen Fall einen optischen oder akustischen Alarm ausgeben. In einem kommerziellen Fitnessstudio ließe sich mit dem hier vorgestellten Aufbau kontrollieren, ob Trainingspläne in Bezug auf Gewicht, Ausführungsgeschwindigkeit und Anzahl der Bewegungen eingehalten werden. Eine Möglichkeit, zusätzlich auch die Bewegungsausführung anhand von Winkeln zu bestimmen, wird im Abschn. 5.1 diskutiert. Werden die Daten von Bewegung und Gewichten zentral erfasst, können sie den Trainern als Informationsquelle dienen. Der Trainer kann nachvollziehen, ob und wann der Kunde selbständig sein Gewicht erhöht hat und daraus Schlüsse ziehen für den weiteren Trainingsverlauf.

2.2 Bestimmung der Leistungsparameter

Um die Leistungsparameter zu bestimmen, wird das Training an Geräten aus der Sicht der Sportmedizin oder Trainingswissenschaften betrachtet. Zunächst müssen ein paar Begriffe eingeführt und abgegrenzt werden. Für die Sportwissenschaft ist neben der Kraft selbst auch der Verlauf und die Kraftänderung wichtig, d. h., die maximale Kraft, der Kraftanstieg und die Dauer der Kraftwirkung. Können diese Variablen erfasst oder aus den Kraft-Zeit-Verläufen berechnet werden, lassen sie Rückschlüsse auf Muskelaufbau und Muskelwachstum zu. Dazu werden die entsprechenden Größen beschrieben.

2.2.1 Kraft

Der Begriff Kraft muss in dieser Arbeit in zwei Auslegungen unterschieden werden. Zum Einen in eine physikalische und zum Anderen in eine sportwissenschaftliche Definition. Im sportwissenschaftlichen Lexikon ([2] S. 316 ff.) wird unterschieden...

“... zwischen Kraft als physikalischer Größe und Kraft als motorischer Eigenschaft.”

Kraft als physikalische Größe

Die umfassende Definition der Kraft ist die physikalische ([3] S. 12).

*“Um einen Körper zu veranlassen, seine geradlinige gleichförmige Bewegung aufzugeben, also um ihn zu beschleunigen, muss eine **Kraft** auf ihn wirken.”*

Diese Kräfte, die auf einen Körper wirken, lassen sich als Vektoren darstellen. Wobei der Vektor in die Richtung zeigt, welche die durch die Kraft F

hervorgerufene Beschleunigung a hat und seine Länge zu der Größe der Kraft proportional ist. Der Zusammenhang

$$F = m \cdot a \quad (2.1)$$

von Größe der Kraft und der von ihr hervorgerufenen Beschleunigung wird durch die Masse m hergestellt. Aus dieser Gleichung lassen sich Kraft, Beschleunigung oder Masse bestimmen, falls die jeweils anderen bekannt sind. Dabei ist zu beachten, dass F und a die gleiche Richtung haben.

Kraft als motorische Eigenschaft

Kraft im sportwissenschaftlichen Sinne bezeichnet folgende Merkmale des neuromuskulären Systems:

- Isometrische Arbeitsweise: Muskel kontrahiert gegen einen Widerstand, ohne dass sich der Ansatz und der Ursprung des Muskels annähern.
- Konzentrische Arbeitsweise: Muskel kann den Widerstand, gegen den er arbeitet, überwinden, Ansatz und Ursprung nähern sich an.
- Exzentrische Arbeitsweise: Muskel gibt einem Widerstand nach, so dass sich Ansatz und Ursprung voneinander entfernen.
- Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus: Brems- und Beschleunigungsarbeit des Muskels gehen ineinander über, größere Leistungsfähigkeit als bei konzentrischer Arbeitsweise.

Dabei ist die isometrische Arbeitsweise quasi statisch und die andern dynamisch. Es gibt verschiedene Erscheinungsformen der Kraft in der Sportwissenschaft: Maximalkraft, Schnellkraft, Kraftausdauer, Reaktivkraft, etc.

Maximalkraft Zur Bestimmung von Trainingseffekten ist die Maximalkraft ein wichtiger Faktor. Die Maximalkraft ist die maximale Kraft, die ein Muskel oder eine Muskelgruppe bei einem standardisierten Test aufbringen kann. Dabei wird nicht die reale vom Muskel aufgebrauchte Kraft bestimmt, sondern die von ihm auf eine Fläche über das Skelett ausgeübte Kraft. Wird dieser Wert vor und nach einer Trainingseinheit erfasst, lassen sich daran Leistungsveränderungen erkennen. Dies wird auch in der Medizin benutzt, um beispielsweise Disbalancen zwischen dem linken und dem rechten Bein vor oder nach einer Operation zu erfassen.

Schnellkraft und Explosivkraft Die Schnellkraft bezeichnet die Kraftzunahme pro Zeit und wird indirekt gemessen. Sie ist dann von Interesse, wenn in einer vorgegebenen Zeit eine möglichst große Kraft erreicht werden soll. Der Kraftimpuls

$$p = \frac{\Delta F}{\Delta t} \quad (2.2)$$

ist das Produkt aus Kraftdifferenz ΔF und Zeitdifferenz Δt . Der größte Kraftanstieg einer Kraftkurve wird als Explosivkraft bezeichnet. Die Schnellkraft ist abhängig von dem aktiven Muskelquerschnitt und damit von der Maximalkraft, von der Muskelfaserzusammensetzung, von der maximale Ansteuerungsfrequenz und der sportmechanischen Situation. Die Schnellkraft ist abhängig von der Maximalkraft, die Maximalkraft begrenzt die maximale Schnellkraft. Deshalb ist es sinnvoll, Maximalkrafttraining und Schnellkrafttraining miteinander zu verbinden ([4] S. 191 ff.).

Reaktivkraft Der rasche, möglichst effektive Wechsel von einer konzentrischen zu einer exzentrischen Bewegung wird als Reaktivkraft bezeichnet. Dies spielt bei Bewegungen, die nur eine begrenzte Zeit haben, eine Kraft zu übertragen, eine Rolle, zum Beispiel beim Sprint. Die entsprechende Messgröße ist dabei die Kraft pro Kontaktzeit.

Kraftausdauer Die Kraftausdauer wird bestimmt durch die Zeitspanne, über die eine Kraftentwicklung statisch oder dynamisch, zyklisch oder azyklisch bei möglichst geringem Abfall der Kraftwerte aufrechterhalten werden kann. Dies ist für bestimmte Sportarten mit lang andauernder Maximalbelastung wichtig ([4] S. 192).

Die Dimensionen von Kraft, Schnellkraft, Explosivkraft, Kraftausdauer und Reaktivkraft sind in unterschiedlicher Weise von der Maximalkraft abhängig [4].

2.2.2 Leistung

Leistung ist die erbrachte Arbeit pro Zeit, und damit ein Messwert für die Effizienz der verrichteten Arbeit. Darum wird Leistung als Messgröße beim Gerätetraining verwendet, um eine Rückmeldung über die Effizienz des Trainings zu haben. Leistung kann auch aus dem Quotienten aus Kraft und Geschwindigkeit errechnet werden.

2.2.3 Ausdauer

Ausdauer ist neben der Kraft die bedeutendste motorische Eigenschaft. Sie bezeichnet ([5] S. 42)

“... die maximale Dauer, die ein Individuum eine bestimmte Aktivität durchführen kann.”

Es gibt drei Formen von Ausdauer:

- Die Fähigkeit, eine Belastung ohne nennenswerte Ermüdung über einen möglichst langen Zeitraum ertragen zu können.
- Die Fähigkeit, trotz deutlicher Ermüdung die Tätigkeit bis zur individuellen Belastungsgrenze fortzusetzen.
- Die Fähigkeit, nach Phasen starker Beanspruchung schnell zu regenerieren.

Sportwissenschaftlich wird zusätzlich in Kurz-, Mittel- und Langzeitausdauer unterschieden.

2.3 Muskelaufbau

Kraftfitnessgeräte dienen dem Training der Muskulatur. Es soll erklärt werden, wie ein Muskel aufgebaut ist, wie er arbeitet und wie er wirkungsvoll trainiert werden kann. Daraus lassen sich die Leistungsparameter ableiten, die von Interesse sind. Zu diesen Parametern können passende Messgrößen gefunden werden, von denen sich die Anforderungen an den Messaufbau ableiten lassen.

2.3.1 Muskeltypen beim Menschen

Es können drei Muskelgewebsarten unterschieden werden: Glatte Muskelzellen, quergestreifte Herzmuskelzellen und quergestreifte Skelettmuskelzellen. Muskeln, die aus den glatten Muskelzellen aufgebaut sind, kommen nur in der Wand von Organen und Blutgefäßen vor. Sie sind nicht willentlich beeinflussbar und werden vom vegetativen Nervensystem gesteuert. Die Herzmuskelzellen bilden die Herzmuskulatur. Sie sind ebenfalls nicht willentlich steuerbar und haben eine quergestreifte Struktur. Der größte Teil der Muskeln ist aus den quergestreiften Skelettmuskelzellen aufgebaut. Sie dienen der willentlichen raschen

Kontraktion, d. h. sie bilden die Grundlage für Bewegung. Neben den Muskelzellen enthalten Muskeln auch einen beträchtlichen Anteil an Bindegewebe, Blutgefäßen und Nerven. Die quergestreiften Skelettmuskulatur bildet den Haltungs- und Bewegungsapparat, der beim Trainieren der Muskeln benutzt und trainiert wird (vgl. [4] S. 25). Dabei wird unterschieden zwischen langsamen und schnellen Skelettmuskelfasern. Stark vereinfacht sind mehr langsame Skelettmuskelfasern an den Stellen zu finden, wo lang andauernde, langsame Kontraktionen stattfinden, wie in der Muskulatur mit vorwiegend stützmotorischen Funktionen. Sie sind schwerer zu ermüden, feiner ansteuerbar und effizienter. Die schnelle Skelettmuskelfasern dagegen sind überwiegend dort zu finden, wo Schnelligkeit der Kontraktion und die Größe der Kraft eine Rolle spielt. Sie verbraucht wesentlich mehr Energie pro Zeit und ermüden rasch. In jedem Teil Skelettmuskulatur sind beide Arten von Muskelfasertypen zu finden. Je nach Belastung wird im Muskel in einem gewissen Maße, das Verhältnis der Muskelfasertypen verändert. Dieser Anpassungsprozess kann durch Training beeinflusst werden.

Wirkungsweise eines Muskels

Die quergestreifte Skelettmuskulatur kann ihre Kontraktion nur mit Hilfe des Skeletts in Bewegung umsetzen. Ein Muskel hat immer mindestens zwei Verbindungen mit dem Skelett. Diese Verbindungen werden Ursprung und Ansatz genannt. Die meisten Skelettmuskeln ziehen über ein Gelenk. Dadurch wird die von ihnen durch Verkürzung aufgebrachte Kraft zu einem Drehmoment. Die reale Kraft, die der Muskel aufbringen kann, hängt also vom Hebel ab. Daher ist die gemessene Kraft eines Muskels wesentlich geringer, als die am Ansatz oder Ursprung wirkende.

Neuromuskuläre Anpassung durch Krafttraining

Durch das planmäßige wiederholte Ausführen von Bewegungsabläufen und Übungen (Training) lässt sich die körperliche Leistungsfähigkeit steigern oder konservieren sowie altersbedingten Minderungen entgegenwirken. Der Anstieg der Leistung hängt dabei von der Qualität und Quantität des Trainings ab. Die Trainingsqualität beschreibt die Art des Trainings, wie zum Beispiel Schnellkrafttraining oder Ausdauertraining. Dem entgegen meint die Trainingsquantität Umfang, Intensität und Häufigkeit der Belastung. Zusätzlich spielen das Erlernen oder Verfeinern zweckmäßiger Bewegungsabläufe wie sportartspezifische Techniken und die individuelle Konstitution des Trainierenden eine Rolle. Ziel des Krafttrainings ist die Steigerung der Maximalkraft, das Erhöhen der

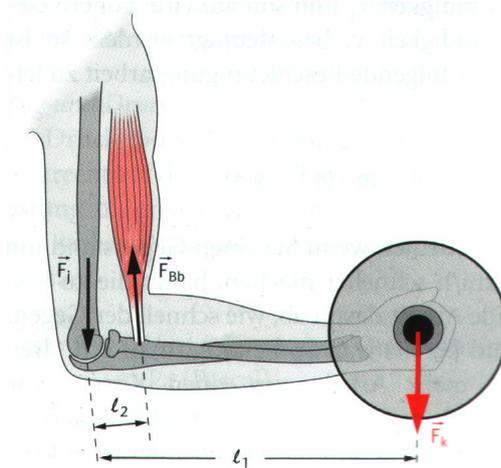


Abbildung 2.1: Kräfte-, Hebel- und Drehmoment- Betrachtung bei 90° Armbeugung. Zu sehen sind die Hebelstrecken l_1 und l_2 , die Kräfte \vec{F}_{Bb} (Muskelkraft), \vec{F}_l (Haltekraft des Drehpunktes) und \vec{F}_k (Gewichtskraft der Hantel) ([6] s. 43).

Verkürzungsgeschwindigkeit und das Verbessern der Ermüdungswiderstandsfähigkeit. Dabei soll das Verhältnis der Muskelfasertypen zugunsten der schnellen Muskelfasern verändert werden. Dem gegenüber steht das Ausdauertraining, das zum Ziel hat, Bewegungen effizienter zu machen und das Verhältnis zugunsten der langsamen sparsamen Muskelfasern zu verändern.

Muskelquerschnitt und Muskelkraft

Die maximale Kraft, die ein Muskel aufbringen kann, ist von seinem Muskelquerschnitt abhängig. Mit steigendem Muskelquerschnitt steigt die maximal entwickelbare Muskelkraft. Neben dem Muskelquerschnitt spielt die Zunahme der Muskelfasern und die intermuskuläre und intramuskuläre Koordination eine Rolle. Die muskuläre Koordination wird verbessert durch das bessere Ansteuern von Muskelfasern. Dies kann durch besseres Ansteuern der Muskeln durch das Gehirn (durch Erfahrung) oder durch ein verbessertes Verhältnis von Motoneuronen zu Muskelfaser geschehen. Die Motoneuronen steuern die Muskelfasern an. Je weniger Muskelfasern von einem Neuron angesteuert werden, desto präziser ist die Bewegung. Die koordinativen Effekte erreichen nach zwei bis drei Wochen ein relatives Plateau. Erst wenn dieses Maximum erreicht ist, entsteht der Kraftzuwachs vermehrt durch eine Muskelquerschnittsvergrößerung. Dieses Dickenwachstum der Muskelfasern wird Hypertrophie genannt. Die Stoffwechselprozesse, die das Dickenwachstum auslösen, sind zur Zeit nicht vollständig bekannt. Es wird davon ausgegangen, dass ATP- und Sauerstoff-Mangel eine Rolle spielen.

2.4 Krafttraining und Krafttrainingsmethoden

Nach [4] kann ein effektives Krafttraining Einfluss auf verschiedene neurophysiologische Größen haben. Es kann:

- eine Verbesserung der Maximalkraft durch eine Veränderung des Muskelfaserquerschnittes (Hypertrophie) oder durch neuronale Aktivierung (verbesserte Ansteuerung der Muskelfasern) erreicht werden.
- die Schnellkraft verbessert werden, d.h. auch die Kontraktionsgeschwindigkeit.
- das reaktive Kraftvermögen verändert werden.
- die sportartspezifische Koordination (Technik) in kraftlimitierten Bewegungsabläufen verbessert werden.
- die lokale Muskelausdauer erhöhen.

Jede dieser Größen kann durch eine oder mehrere Krafttrainingsmethoden beeinflusst werden. Die Vergrößerung der Maximalkraft lässt sich durch das statische oder dynamische Arbeiten gegen unüberwindbare oder hohe Lastwiderstände sowohl exzentrisch, als auch konzentrisch erreichen. Zur Verbesserung der reaktiven Kraft sind Übungen geeignet, die einen schnellen Wechsel von exzentrischen und konzentrischen Belastungen ermöglichen. Ein Beispiel dafür ist Hüpfen mit kurzen Bodenkontaktzeiten. Um die Kraftausdauer zu trainieren, wird die Zielbewegung mit einem erhöhtem Lastengewicht trainiert. Dies entspricht einem Ausdauertraining mit zusätzlicher Last. Die neuronalen Veränderungen, wie das bessere Ansteuern der Muskelfasern, werden schon alleine durch den häufigeren Gebrauch der Muskelfasern erreicht, dies trifft auf jede Art von Training zu. Zusammengefasst gibt es drei Formen von Krafttraining: Maximalkrafttraining, Schnellkrafttraining und Maximalkraftausdauertraining. Im Folgenden werden nur Trainingsmethoden vorgestellt die nicht statisch sind.

Maximalkrafttraining

Das Maximalkrafttraining ist ein Krafttraining mit Widerständen, die mindestens 70 % der individuellen Maximalkraft entsprechen. Ziel dieses Trainings ist die unmittelbare Steigerung der Maximalkraft. Dies wird durch Muskelquerschnittsvergrößerung und durch Verbesserung der intramuskulären Koordination erreicht. Bei der Hypertrophiemethode, auch Methode erschöpfender submaximal Kräfteinsätze genannt, werden bis zur Ausbelastung Hübe mit 70 - 90 % der Maximalkraft absolviert. Es werden 3 - 5 Serien mit jeweils 2

- 3 Minuten Pause gemacht. Da die Erholungsphase nicht ausreicht um vollständig zu regenerieren, die Anzahl der Gewichte oder der Hübe wird bei jeder Serie reduziert. Bei der Methode der maximalen Krafteinsätze liegt der Schwerpunkt bei einer explosiven Ausführung der Bewegung, die mit 85 - 100 % der Maximalkraft durchgeführt werden. Es werden Hübe bis zur Ausbelastung gemacht. Bei 2 - 8 Serien sind 2 - 3 Minuten Pause zwischen den Serien eingeplant. Beim Durchführen der Serien wird das Gewicht nicht verringert, aber die Anzahl der Hübe nimmt ab. Ziel ist die Verbesserung der intramuskulären Koordination, wobei ebenfalls Maximalkraft und Schnellkraft gefördert werden. Zum Trainieren von Sprüngen wird die exzentrische Methode verwendet. Hier wird das Abfangen von Gewichten bei exzentrischer arbeitender Muskulatur mit zusätzlichen Gewichten geübt. Dem gegenüber wird in der Rehabilitation die isokinetische Methode verwendet, bei der im Vordergrund steht, dass die Bewegungsgeschwindigkeit und damit auch die Belastung gleich bleibt. Um eine verbesserte Aktivierung der Muskeln bei geringere Hypertrophie zu erreichen, wird die Pyramiden Methode verwendet. Hier wird die Belastung von Serie zu Serie bis auf 100 % erhöht, um sie dann wieder stufenweise auf den Anfangswert abzusenken. Eine Erweiterung dieser Methode ist die Kontrast Methode, wobei jede Serie im Bezug auf Anzahl und Gewicht im Kontrast zu der vorangegangenen steht. Ein üblicher Übergang wäre: Serie I mit 5 Hüben bei 80 % und Serie II mit 4 Hüben bei 40 %. Hierbei ist ein Vorteil der Lerneffekt, die selbe Bewegung mit verschiedenen Gewichten absolvieren zu können, was bei Wurfdisziplinen eine Rolle spielt. Im Fitnessstudio wird am meisten das Stationstraining angewendet. Hierbei werden mehrere Übungen nacheinander ausgeführt, um zum Beispiel den ganzen Oberkörper zu trainieren. [7]

Schnellkrafttraining

Als Schnellkrafttraining werden Übungen, die mit explosiven Krafteinsätzen ausgeführt werden, bezeichnet. Da Schnellkraft und Maximalkraft zusammenhängen, ist diese Trainingsmethode massgebend für Personen, die bereits über eine hohe Maximalkraft verfügen, aber für das Verbessern ihrer Leistung in einer Zieldisziplin ihre Schnellkraft verbessern wollen. Die erste Schnellkraftmethode arbeitet explosiv mit 30 - 60 % der Maximalkraft. Es werden 2 - 5 Serien mit je 5 - 10 Hüben absolviert. Zwischen den einzelnen Hüben werden 5 Sekunden und zwischen den Serien 2 - 3 Minuten Pause gemacht. Je nach Zielbewegung kann nach möglichst schneller Anfangsphase der Bewegung oder nach langem Anhalten der Beschleunigung differenziert werden. In der zweiten Schnellkraftmethode, wird wettkampfspezifisch mit vom Wettkapfgewicht nach oben oder unten abweichenden Gewichten trainiert.

Maximalkraftausdauertraining

Die Maximalkraftausdauer kann als Variation des Maximalkrafttrainings verstanden werden. Ziel ist es, eine sportartorientierte Bewegung bei maximaler Belastung aufrechtzuerhalten. Sinnvoll ist es dabei, die Zielbewegung mit Gewichten zu trainieren.

Ausdauertraining

Der Vollständigkeit halber soll hier auch der Effekt von Ausdauertraining kurz beschrieben werden. Die primäre Wirkung von Ausdauertraining ist eine deutliche Anpassung des Herz-Kreislauf-Systems. Sekundär führt es zu einer Verbesserung der Koordination und des Muskelaufbaus. Ausdauertraining zeichnet sich dadurch aus, dass es mindestens 10 Minuten dauert, dabei mehr als ein sechstel der Skelettmuskulatur beteiligt ist und mindestens 50 % der maximalen Kreislauffähigkeit beansprucht werden. Eine zusätzliche Belastung durch Gewicht wird vermieden. Ziel von Ausdauer ist neben den gesundheitsfördernden Aspekten oft auch die Fettverbrennung.

2.4.1 Leistungsparameter

Für die in dieser Arbeit betrachteten Krafttrainingsgeräte spielen die Aspekte des Ausdauertrainings kaum eine Rolle. Von Interesse ist der Muskelzuwachs, der anhand von Maximalkraft oder über die Zunahme des Trainingsgewichts ermittelt wird. Für die Reaktivkraft ist der Wechsel von konzentrischer zu exzentrischer Arbeit von Interesse, dazu muss die Bewegungsausführung dokumentiert werden. Um einen Zusammenhang zwischen Muskelzuwachs und Training aufzuzeigen, ist es notwendig, Intensität und Häufigkeit der Belastung zu erfassen. Für die Auswertung des Trainings ist es interessant, Leistung, Explosivkraft und maximale Kraft und deren Veränderungen mit der Zeit zu erfassen.

2.4.2 Messgrößen

Die zentrale Messgröße ist somit die Kraft, bzw. der Kraft-Zeit-Verlauf. Diese lassen sich nicht immer direkt messen. Alternativ gibt es verschiedene Methoden, sie aus anderen Größen zu berechnen. Dafür sind weitere Messgrößen nötig, wie Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Masse. Geschwindigkeit, Beschleunigung und Weg lassen sich mit Hilfe der Zeit meistens ineinander umrechnen. Welche Messgrößen die entscheidenden sind, hängt von der Wahl des

Sensors ab. Primär sind folgende Messgrößen zu nennen: Zeit, Masse, Weg -
Alternativ: Kraft, Beschleunigung, Geschwindigkeit.

3 Physikalische Theorie

In der Physik gibt es eine Vielzahl an Modellen, die beschreiben, wie Messgrößen bestimmt werden können. Die in Unterabschn. 2.4.2 genannten Messgrößen lassen sich nicht alle direkt bestimmen. Die meisten werden über Weg, Zeit und Veränderung von elektrischen Eigenschaften bestimmt. Ein Ziel ist es, die zu bestimmende Größe in eine Spannung oder einen Strom umzuwandeln, der mit einem Computer erfasst und ausgewertet werden kann.

3.1 Methoden zum Erfassen von Kräften und Massen

Kraft wird immer durch eine Verformung eines Körpers in ein elektrisches Signal umgewandelt. In diesem Kapitel werden die Verfahren beschrieben, die Kräfte ohne den Umweg über die Abstandsmessung bestimmen.

3.1.1 Kraftmessung durch den piezoelektrischen Effekt

Festkörper aus besonderen Materialien ändern bei mechanischer Verformung ihre elektrische Polarisation. Dieser Vorgang wird der direkte piezoelektrische Effekt genannt. Die Stärke der elektrischen Polarisation hängt von der Richtung der Verformung und dem Material ab. Es werden vier verschiedene Arten des piezoelektrischen Effekts unterschieden. Transversaleffekt, Longitudinaleffekt, transversaler Schubeffekt und longitudinaler Schubeffekt. Sie unterscheiden sich darin, dass der ausgeübte Druck parallel oder senkrecht zur Polarisation wirkt. Die durch die Polarisation frei werdende Ladung kann an den Seitenflächen entnommen werden, sie ist ein Maß für die Stärke des Drucks. Als Material eignet sich am besten Quarz in verschiedenen Modifikationen. Bei ihm ist die Temperaturempfindlichkeit unter normalen Bedingungen sehr gering, die Linearität und die Empfindlichkeit gegenüber Krafteinwirkung sehr groß [8]. Synthetisch erzeugte Quarze kristallisieren in sechseckigen Prismen. Wird ein Quarzkristall (SiO_2) in einer der elektrischen Achsen mit einer me-

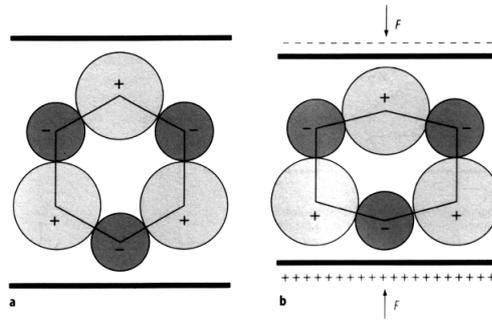


Abbildung 3.1: Veränderung der Polarisation bei Quarz durch eine äußere Kraft \vec{F} .
a) Einheit zelle eines Quarzkristalls aus positiv geladenen Silizium- und negativ geladenen Sauerstoffatomen.
b) Eine Verformung durch die Kraft \vec{F} führt zu einer Verschiebung der Ladungen gegeneinander ([9] S. 37).

chanischen Kraft F belastet, so tritt an dessen Oberflächen elektrische Ladung

$$Q = k_p \cdot F \quad (3.1)$$

auf. Dabei ist k_p die piezoelektrische Konstante des sogenannten Piezoelementes. Sie beträgt für Quarz (SiO_2): $k_p = 2,3 \cdot 10^{-12} \frac{As}{N}$ ([9] s.207).

3.1.2 Kraftmessung durch Widerstandsänderung

Wird bei einem Leiter die Struktur durch eine Kraft verändert, ändert sich sein Widerstand. Dies lässt sich nutzen, um Verformungen messbar zu machen. Dazu wird ein Draht auf einer Oberfläche angebracht, die sich unter Druck- oder Krafteinwirkung verformt. Um das Verhältnis von Widerstandsänderung zur Biegung der Oberfläche zu erhöhen, kann der Draht mäanderförmig verlegt werden. Wird der Draht gedehnt, ändert sich der Widerstand

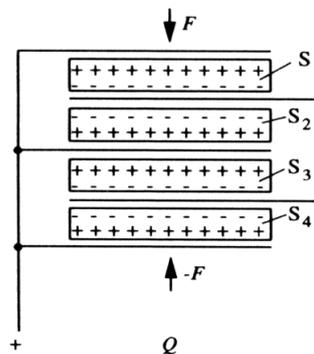


Abbildung 3.2: Aufbau eines Elements aus mehreren piezoelektrischer Schichten S_1, S_2, S_3, S_4 ([8] S. 96).

R . Die mechanische Dehnung ϵ wird in eine elektrische Widerstandsänderung ΔR umgewandelt.

$$\Delta R = R \cdot k \cdot \epsilon \quad (3.2)$$

Diese Änderung ist abhängig von einer Materialkonstante k [10]. Zusätzlich muss das Objekt, auf dessen Oberfläche der Draht befestigt ist, besondere Eigenschaften aufweisen. Wenn auf einen Körper der Länge l_0 eine Kraft F wirkt, bewirkt dies eine Längenänderung Δl . Ist die Beanspruchung des Körpers rein elastisch und bleibt weit unter der Grenze, an der makroskopische plastische Verformung auftreten (Streckgrenze $(0,5 \cdot R_{p0,2})$), kehrt der Körper hinterher in seine Ausgangsform zurück. Dann ist dieser Vorgang beliebig oft wiederholbar. Bei Überschreiten der Streckgrenze kehrt das Material nach Entlastung nicht mehr in die ursprüngliche Form zurück, sondern eine Probenverlängerung verbleibt. Für den eindimensionalen Fall eines zylindrischen Körpers der Länge l_0 und der Querschnittfläche A gilt demzufolge unter einachsiger Zug- oder Druckbelastung entlang der x-Achse

$$\sigma_x = E \cdot \varepsilon_x \quad (3.3)$$

Die Proportionalitätskonstante E heißt Elastizitätsmodul. Mit der Spannung $\sigma_x = \frac{F_x}{A}$ und der Dehnung $\varepsilon_x = \frac{\Delta l}{l_0}$ ergibt sich die Darstellung

$$F_x = \frac{E \cdot A}{l_0} \cdot \Delta l \quad (3.4)$$

Das Hookesche Gesetz kommt zur Anwendung, wo die wirkende Kraft nahezu linear von der Auslenkung oder Ausdehnung abhängt. Das kann für sehr kleine Δl der Fall sein oder beispielsweise auch für einen großen Dehnungsbereich bei Zug- und Druckfedern. In diesem Spezialfall einer eindimensionalen, linearen und elastischen Deformation wird die Proportionalitätskonstante Federkonstante D genannt. Der Zusammenhang zwischen der Federkraft F und der Längenänderung Δl kann dann in der einfachen Form

$$F = D \cdot \Delta l \quad (3.5)$$

dargestellt werden. Die Ausdehnung einer Feder durch eine Kraft ist eine lineare Funktion der Kraft. Diese Verformung des Körpers kann zusätzlich durch Abstandsmessung bestimmt werden, wie in Abschn. 3.2 beschrieben wird.

3.2 Methoden zur Erfassung von Positionen und Abständen

Ein Abstand soll in eine Spannung umgewandelt werden. Dabei muss unterschieden werden zwischen Positionsbestimmung und Abstandsbestimmung. Ist die Position eines Objekts und die eigene Position im Raum bekannt, lässt sich daraus der Abstand berechnen. Ist der Abstand zweier Punkte bekannt, ist damit nicht die Position im Raum erfassbar. Für die meisten Anwendungen genügt es, den relativen Abstand und dessen Veränderung in einer Ebene, nicht die absolute Position zu erfassen.

3.2.1 Abstandsmessung durch Strahlung

Unter Abstandsmessung durch Strahlung fallen alle Verfahren, die Strahlung aussenden und detektieren. Dies kann eine Druck- oder elektromagnetische Welle, wie zum Beispiel Schall-, Licht- oder Funkwellen sein. Alle Verfahren haben gemeinsam, dass ein reflektierter und ein ausgesannter Strahl verglichen wird. Die Veränderung des reflektierten Strahls kann in Intensität, Richtung, Zeitverzögerung oder Breite bestehen.

Triangulation

Das Prinzip der Triangulation macht sich zu nutze, dass der Ort, auf den der reflektierte Strahl trifft, abhängig ist von der Entfernung. Neben dem Ort, an dem der Strahl ausgesandt wird, wird der Rückkehrort des reflektierten Strahls benötigt. In zwei Dimensionen kann aus der bekannten Lage zweier Punkte die Lage eines dritten bestimmen werden (Abb. 3.3). Es existieren zwei Punkte A und B deren Koordinaten, und somit deren Abstand bekannt ist. Die Lage

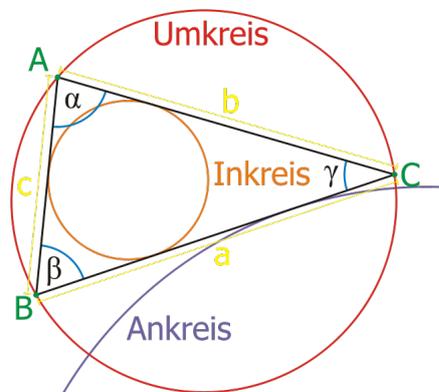


Abbildung 3.3: Zur Berechnung des Abstands notwendige Winkel und Strecken in einem Dreieck.

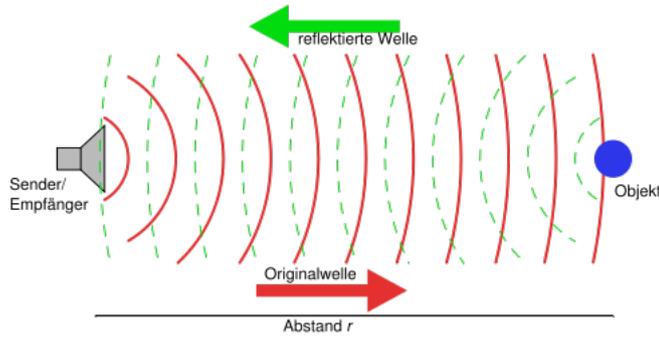


Abbildung 3.4: Darstellung des Ultraschallprinzips. Die rote vom Sender ausgehende Welle wird vom Objekt reflektiert (grüne dargestellt) und vom Empfänger wieder empfangen. Die Entfernung ergibt sich aus der Zeit, die die Welle für Hin- und Rückweg benötigt, wenn die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle bekannt ist [11].

eines Punktes C kann dadurch bestimmt werden, dass die Winkel α und β bestimmt werden. Da die gesamte Innenwinkelsumme in einem Dreieck 180° beträgt, ergibt sich für den Winkel

$$\gamma = 180 - (\alpha + \beta). \quad (3.6)$$

Mit Hilfe des Sinussatzes aus der Trigonometrie ergeben sich die Abstände

$$\overline{AC} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} \cdot \overline{AB} \quad (3.7)$$

und

$$\overline{BC} = \frac{\sin \beta}{\sin \gamma} \cdot \overline{AB}. \quad (3.8)$$

Ist α ein rechter Winkel, ergibt sich damit direkt der Abstand h von C zu \overline{AB} .

$$h = \overline{AC} \quad (3.9)$$

Falls nicht, lässt sich h durch erneutes Anwenden des Sinussatzes aus

$$h = \sin \delta \cdot \overline{AC} \quad (3.10)$$

mit

$$\delta = 180 - 90 - \alpha \quad (3.11)$$

bestimmen. In drei Dimensionen funktioniert es entsprechend mit drei bekannten Punkten und drei Winkeln.

Laufzeitmessung

Die bekannteste Anwendung der Laufzeitmessung in der Natur ist der Ultraschall bei Fledermäusen. Die Tiere senden eine Schallwelle A_S aus, die von Objekten reflektiert wird. Im zeitlichen Vergleich der ausgesandten und der reflektiert Welle A_E ergibt sich die Laufzeit τ des Signals. Ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit c der Welle bekannt, lässt sich die Entfernung d des reflektierenden Objekts bestimmen durch

$$d = c \cdot \frac{\tau}{2}. \quad (3.12)$$

Da eine Welle kein punktuelles Ereignis ist, ergibt sich beim Vergleichen der Ein- und Ausgangswelle das Problem, welcher Teil der Welle zum Vergleichen genommen werden soll. In der Physik wird darum die Phase $\Delta\varphi$ der ausgehenden und eingehenden Welle verglichen, also die Verschiebung der ganzen Welle. Bei Lichtwellen, die eine höhere Ausbreitungsgeschwindigkeit haben, reicht dies nicht aus. Die Verschiebung kann mehr als eine Wellenlänge betragen. So kann nicht bestimmt werden, um wie viele Durchgänge (vielfaches der Wellenlänge λ) das Eingangssignal verschoben ist. Darum wird das Signal amplitudenmoduliert oder gepulst. Die Wellenlänge der modulierenden Welle muss größer sein, als der zu messende Abstand. Durch die Modulation erhält jeder Teil der Welle eine zusätzliche Information darüber, wo sie sich in der Gesamtwelle befindet. Gepulste Wellen können nur dann eingesetzt werden, wenn die An- und Abklingzeit des Pulses gegenüber der Messgenauigkeit des Abstands klein ist.

Innerer photoelektrischer Effekt

Trifft Licht einer bestimmten Wellenlänge auf einen Leiter, ist es möglich, dass ein Lichtquant absorbiert wird. Das Quant regt dabei ein Elektron an, in einen energetisch höheren Zustand zu wechseln, dies verändert die elektrischen Eigenschaften des Leiters. Im Regelfall werden die Elektronen vom Valenzband in das Leiterband gehoben, wo sie sich frei bewegen können. Ist der bestrahlte Bereich ein pn-Übergang, verändern die so erzeugten Elektronen-Loch-Paare die Barrierhöhe. Dies resultiert in einem Photostrom. Die Höhe des Photostroms ist proportional zur Menge der absorbierten Quanten.

Interferometrie

Eine besonders genaue Methode ist die Laser-Interferometrie. Hier wird nicht der Laufzeitunterschied direkt gemessen, sondern aus der Überlagerung von

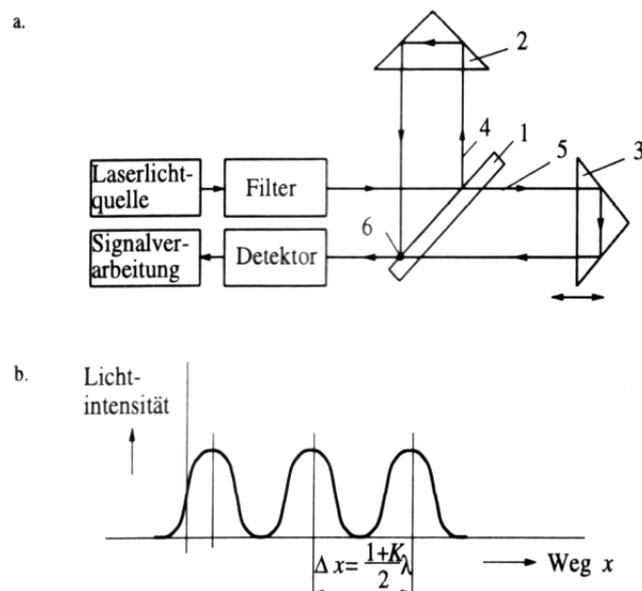


Abbildung 3.5: Längenmessung mittels eines Michelson-Laserinterferometers.

a. Prinzip der Messanordnung mit 1 Halbdurchlässiger Spiegel, 2 Referenz-Reflektor, 3 Messreflektor, 4 Referenz-Teilstrahl, 5 Mess-Teilstrahl, 6 Überlagerung von Teilstrahlen 4 und 5.

b. Intensitätsverlauf im Punkt 6 bei Bewegung des Messobjektes ([8] S. 224).

ausgehender und zurückkehrender Welle bestimmt. Monochromatisches Laserlicht wird durch einen halbdurchlässigen Spiegel in zwei Strahlen geteilt. Der eine durchläuft die Messstrecke, der andere einen festen Referenzweg. Nach der Reflektion werden die beiden zurückkehrenden Strahlen überlagert. Je nach Verschiebung der Strahlen gegeneinander bildet sich ein Interferenzmuster. Das heißt, an einem festen Punkt ändert sich die Intensität. Hiermit lässt sich theoretisch eine Genauigkeit von einer halben Wellenlänge erreichen. Um auch Verschiebungen über eine Wellenlänge hinaus, bzw. die Richtung der Verschiebung zu bestimmen, kann eine Phasenverschiebung hinzugefügt werden. Der Abstand d berechnet sich mit

$$d = \frac{\lambda_0 N}{2} (1 + K_a). \quad (3.13)$$

λ_0 ist die Wellenlänge des Lichts bei Normalbedingungen und N ist die Anzahl der Interferenzstreifen. K_a ist ein Korrekturfaktor, der die Abweichung der Luft berücksichtigt. Er setzt sich aus Druck, Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit zusammen [9].

Lichtintensität, Ort und Größe der Reflexion

Neben der Triangulation und der Laufzeitmessung gibt es noch weitere Verfahren, um aus einem reflektierten Lichtstrahl den Abstand zu bestimmen. In Abb. 3.6 ist die Aufnahme eines reflektierten Lichtstrahls bei drei unterschiedlichen Abständen zum Objekt zu sehen. Die erste Veränderung des reflektierten Strahls ist, dass der Ort, an dem der reflektierte Lichtstrahl auftrifft, sich verschiebt. Mit Hilfe der Triangulation (Unterabschn. 3.2.1) lässt sich daraus der Abstand berechnen. Die zweite Veränderung ist die Zunahme oder Abnahme der Intensität des reflektierten Lichts. Bei zunehmendem Abstand fällt weniger des emittierten Lichts wieder auf den Detektor. Die Intensität lässt einen Rückschluss auf den Abstand zu. Der Zusammenhang von Intensität und Abstand ist nicht linear und wird durch eine individuelle Funktion hergestellt. Daneben hängt die Genauigkeit der Abstandsbestimmung von der Intensität der Lichtquelle, der Empfindlichkeit des Detektors, der Teilchendichte zwischen Emitter und Detektor und dem Reflexionskoeffizienten des Reflektors ab. Die dritte Veränderung ist die Größe der von dem reflektierten Licht angestrahlten Fläche A . Um daraus Rückschlüsse auf den Abstand zu erhalten, wird ein CCD-Array verwendet. Aus der Anzahl der ausgeleuchteten Pixel N lässt sich schließen, wie groß der Abstand ist. Die Größe der ausgeleuchteten Fläche nimmt quadratisch zu, daher ist das Verhältnis von Abstand zur ausgeleuchteten Fläche nicht linear. Sie bestimmt sich aus der Kreisfläche

$$A = N \cdot P = r^2 \cdot \pi, \quad (3.14)$$

mit P als Fläche eines einzelnen Pixel. Die Anzahl der ausgeleuchteten Pixel ist damit abhängig vom Radius, der wiederum von der Aufweitung des Lichtstrahls abhängt. Die Aufweitung des Strahls B_E lässt sich aus der Anfangsbreite des Strahls B_A , des Streuwinkels α und des Abstands d bestimmen.

$$2r = B_E = B_A + 2d \cdot \sin\alpha \quad (3.15)$$

Der Abstand zum Objekt ergibt sich dann durch Einsetzen und Umformen

$$d = \frac{\sqrt{\frac{NP}{\pi} - \frac{B_A^2}{4}}}{\sin\alpha}. \quad (3.16)$$

Wegbestimmung durch kodierte Messflächen

Auf einer Fläche werden in regelmäßigen und fest definierten Abständen reflektierende und nicht reflektierende Flächen angebracht, die sogenannten Co-

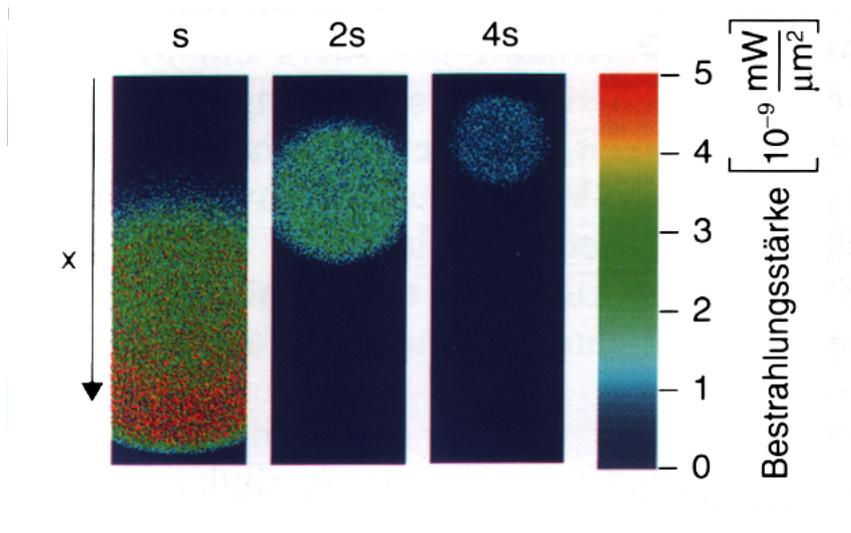


Abbildung 3.6: Mit zunehmendem Abstand s des Reflektors verändert sich Größe des bestrahlten Bereichs, die Bestrahlungsstärke und der Ort x ([13] S. 47).

destreifen. Wird ein Teil der Fläche beleuchtet und das reflektierte bzw. das nicht reflektierte Licht aufgefangen, lässt sich aus dem Wechsel von hell und dunkel unter anderem die Geschwindigkeit berechnen. Ist der Abstand d von einem hell/dunkel-Übergang zu einem dunkel/hell-Übergang bekannt, ergibt sich die Geschwindigkeit v mit

$$v = \frac{N \cdot d}{\delta t}. \quad (3.17)$$

Dabei ist N die Anzahl der Übergänge und δt die vergangene Zeit. Es können zusätzliche Codestreifen parallel leicht versetzt hinzugefügt werden. Wird jeder Streifen von einem eigenen Detektor überwacht, lässt sich die Genauigkeit vergrößern und die Bewegungsrichtung erfassen [9].

Dreipunkt Peilung

Ein Punkt P im dreidimensionalen Raum kann bestimmt werden, wenn er von drei Punkten angepeilt wird. Dazu werden von drei bekannten Punkten A, B, C aus die Richtung oder die Entfernung bestimmt. Im Gegensatz zur Triangulation (Unterabschn. 3.2.1) werden keine Winkel benötigt.

1. Peilung über Richtung Ist die die Richtung der Vektoren $\vec{AP}, \vec{BP}, \vec{CP}$, aber nicht ihre Länge bekannt, lassen die Vektoren sich als Geraden darstellen, die sich im Punkt P schneiden.

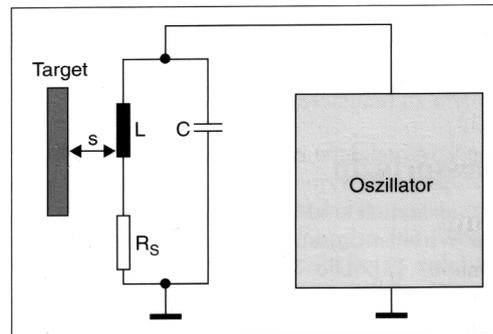


Abbildung 3.7: Jordan-Reihenschaltung: Das Sensorelement ist durch die Reihenschaltung von L und R_s dargestellt und wird durch den Oszillator angeregt. Die elektrischen Verluste an der Spule L ist proportional zum Abstand s ([13] S. 8).

2. Peilung über Entfernung Sind die Abstände $r_{AP} = \overline{AP}$, $r_{BP} = \overline{BP}$, $r_{CP} = \overline{CP}$ bekannt, findet sich der Punkt P in dem gemeinsamen Schnittpunkt der drei Kugeln $K(r_{AP})$, $K(r_{BP})$, $K(r_{CP})$ um die dazugehörigen Punkte A , B , C .

3.2.2 Abstandsmessung durch Feldveränderung

Durch Veränderungen an oder in elektrischen oder magnetischen Feldern lassen sich Abstände bestimmen. Elektromagnetische Felder interagieren mit Ladungen oder anderen elektromagnetischen Feldern, die sich in ihrer Reichweite befinden.

Induktion

Eine Sensorspule wird durch einen hochfrequenten Strom angeregt, dieser erzeugt ein elektrisches Feld, das in dem zu detektierenden Objekt Wirbelströme induziert. Die Verteilung und Stärke des elektrischen Feldes hängen von der Art der Spule, so wie von der Stärke und Frequenz des Stromes ab. Tritt ein Objekt in dieses Feld, bilden sich Wirbelströme, die zu elektrischen Verlusten führen. Wie stark diese sind, hängt neben der Feldstärke und den Materialeigenschaften (elektrische oder magnetische Leitfähigkeit) des Objekts vor allem vom Abstand zwischen Spule und Objekt ab. In Abb. 3.7 ist ein einfacher Aufbau eines induktiven Abstandssensors dargestellt. Der Oszillator regt den Schwingkreis aus Spule L , Kondensator C und Serienwiderstand R_s mit einer

hohen Frequenz an. Nähert sich nun das Objekt (Target) der Spule, treten vom Abstand s abhängig elektrische Verluste auf [13]. Der Verlust entspricht der im Objekt induzierten Spannung U_{ind} . Dies hängt von der Leitfähigkeit, der Ausrichtung und dem Magnetfeld des Objekts ab. Der allgemeine Zusammenhang wird durch das Induktionsgesetz

$$U_{ind} = -N \left(\frac{dB}{dt} A_n + \frac{dA_n}{dt} B \right) \quad (3.18)$$

dargestellt, wobei N die Anzahl der Windungen auf der Spule ist, A_n der Flächenanteil senkrecht zur Feldlinie und B die Richtung der magnetischen Induktion [14].

Magnetoinduktiver Effekt

Für magnetoinduktive Abstandserfassung besteht das Objekt im Regelfall aus einem kooperativen Permanentmagneten. Das erzeugte magnetische Feld wirkt auf eine durch hochfrequenten Strom angeregte Spule. Durch die Lageänderung des Magneten ändert sich die Spuleninduktivität (vgl. Unterabschn. 3.2.2). Die punktuelle Veränderung des Magnetfelds senkt die Induktivität direkt proportional zur Schnittfläche der durch das Magnetfeld gesättigten Zone [13]. Das Induktionsgesetz Gl. 3.18 wird dann zu

$$U_{ind} = N A_n \mu_0 \frac{dH}{dt}, \quad (3.19)$$

mit μ_0 als magnetischer Leitfähigkeit und H als magnetischem Fluss.

Hall-Effekt

Unter dem Hall-Effekt wird das Auftreten einer quer gerichteten elektromotorischen Kraft auf Elektronen verstanden, wenn senkrecht zum stromdurchflossenen Leiter eine magnetische Induktion gerichtet ist (Abb. 3.8). Durch einen rechteckigen Leiter der Breite b und der Dicke d fließt ein Strom I_x in x -Richtung. Herrscht senkrecht hierzu ein Magnetfeld B_z , dann wirkt die Lorenz-Kraft auf jedes Elektron. Die Kraft auf die Ladung F_L resultiert dann in y -Richtung mit

$$F_{Ly} = -e \cdot v_x \cdot B_z. \quad (3.20)$$

Dabei ist e ein Elektron und v_x seine Geschwindigkeit in x -Richtung. Durch die Lorenzkraft kommt es zu einer Verschiebung der Elektronen in y -Richtung und an der linken Stirnseite des Leiters entsteht ein Elektronenüberschuss. Vis versa entsteht auf der rechten Stirnseite ein Mangel. Stirnseiten sind die

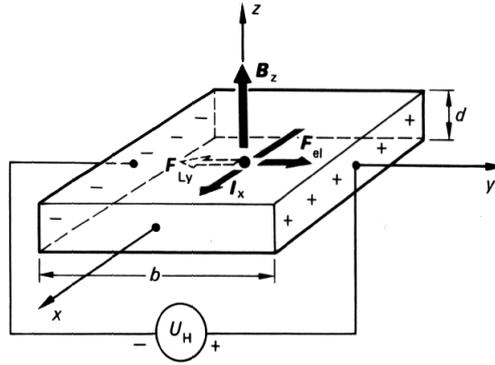


Abbildung 3.8: Auf einen x -Richtung stromdurchflossener Leiter der Breite b und Höhe d wirkt in z -Richtung ein Magnetfeld B_z . Die so induzierte Ladungsverschiebung in y -Richtung wird als Hall-Effekt bezeichnet ([14] s.298).

Flächen, auf denen die y -Achse senkrecht steht. Dies erzeugt das elektrische Gegenfeld mit der Krafteinwirkung

$$F_{el} = -e \cdot E_y. \quad (3.21)$$

Die Bewegung der Elektronen in y -Richtung kommt dann zum Stehen, wenn $F_{Ly} = F_{el}$ ist. Daraus folgt die zwischen den Stirnseiten messbare Spannung

$$U_y = B_z \cdot v_x \cdot b = U_H \quad (3.22)$$

mit $E_y = \frac{U_y}{b}$. Die Spannung U_H wird Hall-Spannung genannt. Die Hall-Spannung ist proportional zur magnetischen Induktion. Damit lassen sich Abstände oder Positionen zu einem Permanentmagneten als Objekt bestimmen [14].

Bestimmung des Abstands über die Kapazitätsänderung zweier Kondensatorplatten

Der Abstand zweier leitender Platten kann durch ihre Kapazität bestimmt werden. Ist die eine Platte positiv und die andere relativ dazu negativ geladen, bilden sie einen Kondensator

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}. \quad (3.23)$$

Die Kapazität des Kondensators hängt von der Dielektrizitätskonstante $\epsilon_0 = \frac{1}{3,6\pi} \frac{\text{pF}}{\text{cm}}$, der relativen Dielektrizitätskonstante ϵ_r , vom Abstand d und der Fläche der Platten A ab. In Abb. 3.9 ist gezeigt, wie sich der Abstand x verändern kann. Die in Abb. 3.9 (a) aus einer Änderung von x resultierende Kapazität ist näherungsweise umgekehrt proportional zu x . Bei Abb. 3.9 (b) ergibt sich

hingegen ein näherungsweise linearer Zusammenhang, da sich der überschneidende Anteil der Plattenfläche verändert [9].

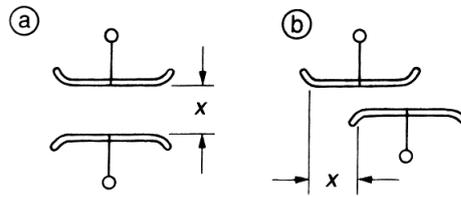


Abbildung 3.9: Kapazitive Abstandsmessung durch (a) Annähern der Platten oder (b) paralleles Verschieben der Platten, x jeweils als Verschieberichtung [9].

4 Parameter für den Messaufbau

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem Bedarf an sensorischen Funktionen. Es wird ein Anforderungsprofil der benötigten Sensoren erarbeitet. Zunächst werden die Umgebungsbedingungen und die Eigenschaften der als Basis dienenden Kraftfitnessgeräte beschrieben. Danach werden die resultierenden Rahmenbedingungen in allgemeine und spezielle Parameter zusammengefasst. Aus diesen Parametern und den Messgrößen lassen sich Anforderungsprofile für die Sensoren ableiten. Diese werden mit den physikalischen Möglichkeiten aus Kap. 3 verglichen und im Kap. 5 die technische Machbarkeit diskutiert.

4.1 Umgebungsbedingungen und Struktur eines Fitnessstudios

Die Umgebungsbedingungen in einem Fitnessstudio oder Reha-Zentrum können sehr unterschiedlich sein. Dies hängt unter anderem von Bauweise, Organisation und Zielsetzung der Einrichtung ab. Es gibt keine einheitlichen Richtlinien für Raumgröße, Anzahl und Aufbau der Geräte oder Temperatur. Jede Einrichtung setzt ihre eigenen Vorstellungen um. Der gemeinsame Nenner ist, dass sich die Kunden wohlfühlen sollen. Darum gibt es selten Einrichtungen mit Temperaturen unter 18 °C oder über 24 °C. Neben der Temperatur wird auf eine gute Belüftung Wert gelegt, um eventuelle Gerüche, die durch das Schwitzen entstehen, zu verringern. Die klimatischen Bedingungen entsprechen denen einer Turnhalle oder eines Gymnastikraums. Die Temperatur ist ein bis zwei Grad kälter als in einem Büro. Manche Einrichtungen haben eine elektronisch gesteuerte Klimakontrolle, um möglichst konstante Bedingungen zu erreichen. Die Klimawerte lassen sich angeben mit Temperaturen von 10 - 40 °C und eine Luftfeuchtigkeit von 0 - 60 %. Dies sind Extremwerte, die im Normalbetrieb nicht erreicht werden. Im Durchschnitt liegt die Temperatur 20 °C und die Luftfeuchtigkeit bei 40 %.

Krafttrainingsgeräte

Für die Aufstellung der Fitnessgeräte in einem Studio gibt es keine Regeln. Meistens sind sie nach Trainingszielen wie Ausdauer oder Muskelzuwachs gruppiert. Im Unterabschn. 2.1.1 wurden unterschiedliche Fitnessgeräte beschrieben. Der hier vorgestellte Messaufbau bezieht sich ausschließlich auf Kraftfitnessgeräte, die mechanisch arbeiten, und mit einstellbaren Gewichten ausgestattet sind. Daneben gibt es noch Krafttrainingsgeräte, die mit dem Körpergewicht arbeiten oder das Arbeiten mit freien Gewichten an der Hantelbank. Die geführten Krafttrainingsgeräte arbeiten nach dem gleichen Schema wie in Abb. 4.1 (a). Ein Gewicht wird über einen Seilzug und Rollen gehoben. Die Griffe und Hebel, mit denen der Trainierende arbeitet, gibt es in unterschiedlichen Variationen. Neben den eben genannten gibt es Geräte wie in Abb. 4.1 (c), wo die Kraft auf einen Hebel oder eine Platte umgelenkt wird. Die Gemeinsamkeit aller Geräte sind die vertikal geführten Gewichte. Diese sind auf Führungsschienen aufgefädelt. Am Zugseil hängt eine Stange, an der die Gewichte eingehängt werden können. Die Führungsstangen sind in einem Stahlrahmen befestigt, der den festen Stand des Gerätes ermöglicht. Die meisten Geräte sind nicht im Boden verschraubt und können bei heftigen Bewegungen der Trainierenden oder beim rabiaten Absetzen der Gewichte ins Schwanken geraten. Diese Erschütterungen können die Beschleunigungen, die beim normalen Betrieb auftreten, um ein vielfaches übersteigen. Durch die relativ starke mechanische Beanspruchung des ganzen Geräts, kommen mechanische Messapparaturen weniger in Frage. Der zu messende Höhenhub der Gewichte liegt je nach Gerät zwischen 0 und 200 cm. Die Kraft, die auf die mit den Gewichten verbundenen Teile bei einem Fall aus einer Meter Höhe wirkt, kann das Vierfache dessen betragen, was die Gewichte in Ruhe aufbringen. Es kann bei Gewichten von 5 bis 250 kg eine Kraft von über 8.000 N erreicht werden. Um diese Stöße abzufangen, lagern die Gewichte auf Federn oder Gummipuffern.

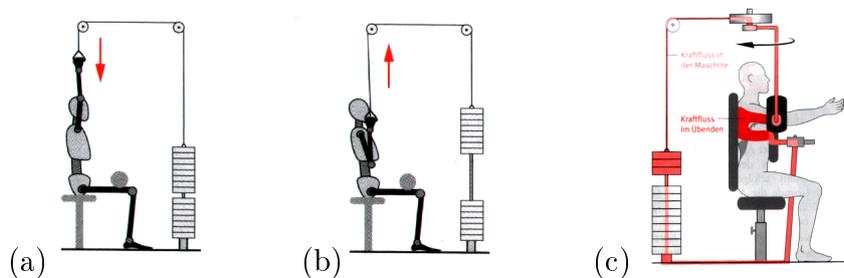


Abbildung 4.1: Funktionsweise von Kraftgeräten am Beispiel des Latzugs in Bild (a) und (b). Bild (c) zeigt die Umlenkung der Kraft am Beispiel des Butterfly ([6] S. 104).

4.2 Rahmenbedingungen

Neben den in Unterabschn. 2.4.2 festgelegten Messgrößen werden die Parameter benötigt, in denen sie erfasst werden. Diese Parameter bilden die Rahmenbedingungen, unter denen die Sensoren später arbeiten müssen. Die Parameter setzen sich zusammen aus allgemein gültigen Werten, wie Raumtemperatur und Luftfeuchtigkeit, und speziellen wie dem Maximalgewicht. Diese Parameter ergeben sich aus den Umgebungsbedingungen und den technischen Charakteristika der Krafttrainingsgeräte. Während die allgemeinen Parameter im Unterabschn. 4.2.1 zusammengefasst werden, sind die speziellen Parameter im Unterabschn. 4.2.2 mit der dazu gehörenden Messgröße angegeben.

4.2.1 Allgemeine Parameter

Es sollen mehrere Größen gemessen werden: Zeit, Länge, Kraft und Gewicht. Im Einzelnen soll das Gewicht bestimmt werden, das an einem Stahlseil hängt. Weiter soll die Kraft pro Zeit gemessen werden, die auf das Seil wirkt. Als drittes soll der Weg bestimmt werden, den das Seil zurücklegt. Daraus ergeben sich drei Grundanforderungen, die betrachtet werden. Gemeinsame Anforderungen an die Sensoren, die die Messgrößen erfassen, sind, dass sie bei Raumtemperatur berührungslos, verschleißfrei und mit der erwarteten Genauigkeit arbeiten. Klimatische Bedingungen wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit sollen keinen Einfluss auf den Sensor haben. Im Extremfall soll der Sensor 24 Stunden am Tag über mehrere Jahre verschleiß- und verlustfrei arbeiten. Er soll die Möglichkeit bieten, sich selber zu kalibrieren oder mit geringem Aufwand kalibriert zu werden. Es muss eine hohe Reproduzierbarkeit der Messwerte vorliegen. Beim Überschreiten der angegebenen Grenzwerte darf der Sensor keinen Schaden nehmen. Alle Sensoren sollen die Messgröße so ausgeben, dass sie am PC verarbeitet werden können. Die Daten vom Sensor können über Kabel übertragen werden, daher kann eine zusätzliche Stromversorgung vermieden werden, die Sensoren können mit der bei einem PC üblichen Spannung versorgt werden. Die Abmessung der einzelnen Sensoren darf 10x10x10 cm nicht überschreiten, um den Aufbau mobil zu halten. Im Idealfall kann der Aufbau innerhalb von 30 Minuten mit einer Person montiert werden. Der Sensor soll für den direkten Kontakt mit Menschen geeignet und sicher sein. Im Folgenden werden die drei Fälle (Länge, Gewicht, Kraft) einzeln betrachtet.

4.2.2 Spezielle Parameter

Die Ansprüche, die an die Sensoren gestellt werden, unterscheiden sich zum einen in der Messgröße, die sie bestimmen sollen, und zum anderen in der Messmethode. Die Messmethode mit der ein Sensor arbeiten, kann sich je nach Messbereich unterscheiden. Der zurückgelegte Weg lässt sich an jeder Stelle des Seiles, welches die Gewichte mit dem Griff verbindet, und am Griff oder Gewicht selber erfassen. Theoretisch ist es möglich, den Weg durch die Rotation der Umlenkrollen zu erfassen. Die Kräfte können erfasst werden, indem der Sensor zwischen Griff und Seil oder Gewichte und Seil montiert wird. Alternativ kann die Verbiegung des Geräts als Anzeiger für die wirkenden Kräfte genommen werden. Sinnvoll sind dafür Stellen, an denen die Kräfte punktuell angreifen. Dafür bieten sich die Umlenkrollen und Ausleger des Geräts an. Es ist bedingt möglich, die Kräfte an den Bauteilen des Gerätes zu erfassen, die dem Trainierenden Halt geben. Die Anzahl der angehängten Gewichte kann über die Kraft gemessen werden, die die in Ruhelage Verbleibenden aufbringen, über eine Markierung, die beim Umstecken des Einstellpins mit versetzt wird oder durch eine statische Messung der Kraft am Seil. Dies ergibt eine Vielzahl an Kombinationen der Messmethoden.

Anforderungsprofil für einen Abstandssensor

Der Sensor, der die Bewegung des Seils erfassen soll, muss mehrere Bedingungen erfüllen. Er sollte eine Strecke bis zwei Metern erfassen können, dies entspricht der maximalen Auslenkung. Der minimale Abstand liegt in der Größenordnung der Auflösungsgenauigkeit, die bei einem Zentimeter liegt. Da an dem Seil erst eine Spannung aufgebaut werden muss, bevor die eigentliche Bewegung beginnt, liegt der Mindestabstand der Längenmessung je nach Messort zwischen 0 - 10 cm. Der Sensor muss die Bewegung des Seils erfassen können, ohne dass sich der Sensor mitbewegt. Es dürfen keine mechanischen Teile verwendet werden, die einem Verschleiß unterliegen. Der Sensor soll fest montiert sein, so dass weder auf ihn noch auf die dazugehörigen Kabel mechanische Kräfte wirken. Dabei werden Umbauten am Gerät vermieden. Auch ist es gut, wenn er unempfindlich gegenüber Stößen und Erschütterungen ist. Die Stöße können kleine Schwingungen im Millimeterbereich sein, bis hin zu einigen Zentimetern. Die dabei auftretenden Beschleunigungen entsprechen den Werten aus Abschn. 4.1. Auch Bewegungsänderungen, die in nicht Messrichtung am Seil auftreten, soll der Sensor tolerieren, so dass er die Position genau misst, auch wenn sich das Seil seitlich verschiebt. Dies legt einen notwendigen seitlichen Mindestabstand von 5 cm zwischen Sensor und Seil fest. Wird

das Gewicht um einen Meter in einer Sekunde gehoben, reicht eine Abtastfrequenz von 200 Hz aus, um pro Zentimeter zwei Messwerte zu haben. Die der Abtastfrequenz entsprechenden Datenmengen sollen ohne großen Zeitverlust auf die zentrale Recheneinheit übertragen werden. Um einen zusätzlichen A/D-Wandel zu vermeiden, ist ein digitales Signal von Vorteil, aber nicht notwendig.

Anforderungsprofil für einen Sensor zur Gewichtsbestimmung

Es wird ein Sensor benötigt, der das variable Gewicht, welches an das Seil angehängt wird, messen kann. Es gelten die gleichen Raum- und Verarbeitungsbedingungen wie zuvor. Die Messgenauigkeit muss bei einem halben Kilo liegen, da die angehängten Gewichte genormt sind und sich um mindestens ein Kilo unterscheiden. Das minimale Gewicht liegt bei 10 kg, das größte bei 200 kg. Die Gewichte unterscheiden sich je nach Gerät um 2, 5 oder 20 kg. Wird das angehängte Gewicht mit einem Abstandssensor erfasst, muss er wenige Millimeter in etwa 100 Schritten erfassen können. Dabei darf die ungewollte Bewegung des Geräts keine Rolle spielen. Es ist ausreichend, wenn das Gewicht statisch erfasst wird. Die Abtastfrequenz kann wesentlich niedriger liegen, als bei den anderen Sensoren, da das Gewicht nur einmal während eines Trainingsdurchgangs erfasst werden muss.

Anforderungsprofil für einen Sensor zur Kraftmessung

Die klimatischen Anforderungen für den Sensor zur Krafterfassung stimmen mit denen für den Bewegungssensor überein. Identisch sind auch die Betriebsdauer, die Sensorgröße, die Art des ausgehenden Signals und der Signalweiterleitung, die Stromversorgung und das Fehlen von mechanischen Teilen. Unterschiedliche Eigenschaften sind, Kräfte mit einer Auflösung von zirka 200 Hz und mit einer Genauigkeit von maximal 10 N messen zu können. Er soll so in das System integrierbar sein, dass er keinen oder einen vernachlässigbar kleinen Beitrag zum Gewicht gibt. Es soll das System nicht durch Reibung oder andere Effekte beeinflussen. Besonderen Wert wird auf die Erschütterungsresistenz gelegt, da der Sensor im Zweifelsfall direkt am Gewicht befestigt wird. Von Vorteil ist es, wenn die Kraft direkt am Seil erfasst wird. So werden Störungen durch die Bewegung des Rahmens und Verluste durch Übertragen der Kraft auf andere Bauteile minimiert.

5 Sensoren

Nachdem die Messgrößen festgelegt sind und ein Anforderungsprofil an die Sensoren erstellt ist, werden mögliche Sensoren und Messverfahren vorgestellt und diskutiert. Dazu werden verschiedenen Wege und Sensortypen, die eine Messgröße erfassen, vorgestellt. Es wird nach Messprinzipien differenziert und es werden die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten beschrieben. Dabei wird diskutiert, wie praktikabel der jeweilige Sensor für das geschilderte Problem ist. Aufgrund der Vielzahl möglicher Sensoren werden hier die gängigen und jene Sensoren beschrieben, die für den Aufbau in Erwägung gezogen wurden. Im darauffolgenden Kap. 6 werden die verwendeten Sensoren beschrieben. Ziel des Senorenvergleichs ist es, eine Möglichkeit zu finden, Kraft, Weg und das angehängtes Gewicht mit einer entsprechenden Auflösung, zu erfassen. Hier sind sie nach den zugrundeliegenden Sensortypen und physikalischen Zusammenhängen sortiert. Es werden Beispiele gebracht, wie sie eingesetzt werden können, und es wird erklärt, welcher Eigenschaften ein Messprinzip oder Sensor ausschliesst.

5.1 Kraftsensoren

Es werden nur Messverfahren dargestellt, die es ermöglichen, Kräfte dynamisch zu erfassen. Grundlegend werden Kräfte immer über eine Abstandsveränderung bestimmt. Hier werden die zwei Methoden vorgestellt, die die unmittelbarste Umsetzung von Kraft in ein elektrisches Signal bieten.

Kraftmessung durch einen Dehnungsmessstreifen

Die Funktionsweise von Dehnungsmessstreifen (DMS) wird im Unterabschn. 3.1.2 beschrieben. Es ist möglich, zwischen den Gewichten und dem Seil, das die Kraft überträgt, einen Messkörper, einen Biegering oder Biegebalken, zu befestigen. Auf diesem werden dann 4 DMS in einer Brückenschaltung befestigt und verdrahtet. Abhängig vom Gerät können die DMS an einem der Stahlträger befestigt werden, der eine einzelne Rolle trägt. Die Biegung des Trägers durch das angehängte Gewicht an der belasteten Rolle gibt Rückschluss darüber,

welche Kraft wirkt. Ein Aufbau aus mehreren Brückenschaltungen ermöglicht es ebenfalls, auf den Träger wirkende Kräfte in anderen Raumrichtungen zu erfassen. Es kann bestimmt werden, in welchem Winkel das Seil die Rolle verlässt. Dies gibt eine zusätzliche Information über die Bewegungsausführung. Das Verwenden von DMS hat den Nachteil, dass sie nur an Geräten verwendet werden können, an denen ein Träger als Biegebalken genutzt werden kann. Alternativ kann die Aufhängung einer Rolle durch einen Biegebalken ersetzt werden und somit die auf die Rolle wirkenden Kräfte bestimmt werden. Der technische Aufwand bei den derzeit gängigen Geräten ist hoch, da die Rollen meist in den Stahlrahmen eingebettet sind und eine neue Halterung montiert werden muss. Wird der DMS am Stahlrahmen befestigt, muss die Oberfläche abgeschliffen werden, um dem DMS direkt auf den Stahl zu befestigen. Es muss für jedes Gerät eine individuelle Lösung gefunden werden, die meistens einen Umbau nötig macht. Damit ist die Mobilität nicht mehr gegeben. Der Einbau eines Biegebalkens zwischen Seil und Gewicht hat zusätzlich das Problem, dass die Verkabelung mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt ist. Ein fester Aufbau an einem einzelnen Gerät mit DMS bleibt, wegen der höherer Auflösung und genaueren Messwerten, interessant für die Sportwissenschaft.

Messung der Kraft mit einem piezoelektrischen Sensor

Piezoelektrische Sensoren arbeiten mit dem piezoelektrischen Effekt, wie in Unterabschn. 3.1.1 beschrieben. Es wird unterschieden, wie genau die Kraft und welche Kraft maximal erfasst werden kann. Es gibt Sensoren, die genauer als 1 N bis hin zu 10 kN messen und die Maximalkraft reicht von unter ± 1 N bis über ± 500 kN. Die Messergebnisse eines piezoelektrischen Sensors haben einen geringen Rauschanteil, sind sehr genau und linear. Die mit der Kraft zunehmende Abweichung ist ebenfalls linear. Der Messbereich piezoelektrischer Sensoren reicht infolge der mechanischen Stabilität der Piezoquarze bis zu höchsten Kräften im Meganewtonbereich. Die Messunsicherheit liegt bei $\pm(1-3)\%$ des Messbereichswerts. Aus diesem Grund wird ein piezoelektrischer Sensor (vgl. Unterabschn. 6.2.2) verwendet, um Referenzwerte zu erhalten. Durch die extrem hohen Elastizitätswerte erlauben Piezosensoren eine annähernd weglose Kraftmessung, da sie sich auch bei großen Kräften kaum verformen. Sie können in einem großen Temperaturbereich arbeiten und sind für Messungen schneller Kraftänderungen besonders geeignet, da die Ladungsverschiebung praktisch ohne Zeitverzögerung stattfindet. Nachteil eines piezoelektrischen Sensors ist, dass beim überschreiten der Maximalbelastung der Quarzkristall irreperabel beschädigt werden kann. Dies ist bei den gegenwärtigen Preisen ein zu großes Risiko. Zusätzlich sind die Kabel, die das Element mit dem Verstärker ver-

binden, sehr teuer und empfindlich gegenüber mechanischer Beanspruchung. Ladungen sind nicht direkt messbar, sie müssen über eine Kapazität in eine proportionale Spannung überführt werden. Geeignet für diese Aufgabe sind Spannungsverstärker mit sehr hochohmigem Eingang und Ladungsverstärker. Für die Messung sind alle Kapazitäten von Sensor, Kabel und Verstärker mit einzubeziehen. Sie sind empfindliche Bauteile, bei denen mechanische Arbeit, bis auf die gewollte Belastung am Sensor vermieden, werden sollte. Für einen mobilen Aufbau eignet sich dieser Sensor nicht. Ein weiterer Nachteil ist, dass der Sensor direkt da eingebaut werden muss, wo die Kräfte auftreten: entweder am Zuggriff oder zwischen Gewichten und Seil. Hier ist die Stoßbelastung am größten.

5.2 Weg- und Abstandssensoren

Im Gegensatz zur Kraft gibt es beim Messen von Abständen eine Vielzahl von Sensoren und Messprinzipien. Das Messprinzip hängt dabei direkt von der erwarteten Auflösung ab. So sind mit Feldern arbeitende Sensoren auf die nahe Umgebung beschränkt. Für die Abstandserfassung oder Bewegungserfassung gibt es verschiedene Ansatzpunkte. Es kann die Bewegung der Gewichte oder die des Seils, an ihm selbst oder an einer Rolle, erfasst werden. Das Erfassen der zurückgelegten Strecke am Seil ist mit dem Problem verbunden, dass ein Sensor oder dessen Verkabelung mechanischer Beanspruchung ausgesetzt sind, falls sie am Seil befestigt werden. Dies ist keine dauerhaft sinnvolle Lösung. Die Bewegung an den Rollen zu erfassen ist nicht ausreichend genau, da das Seil auf den Rollen rutscht. Durch die Stöße und Reibung an den Rollen wird die Bewegung des Seils nicht eins zu eins auf die Rolle übertragen. Dieser Versatz kann mehrere Zentimeter betragen und ist nicht vorhersagbar. Am Sinnvollsten ist das Erfassen der Bewegung der Gewichte, da sie durch ihre Masse eine gewisse Trägheit und nicht die räumliche Flexibilität des Seils besitzen.

Induktiver Sensor

Ein induktiver Sensor reagiert wie in Unterabschn. 3.2.2 beschrieben auf die elektrischen Verluste in einer Spule. Dies geschieht dadurch, dass das magnetische Feld des Sensors durch einen Körper gedämpft wird. Durch die Stärke der Dämpfung kann der Abstand bestimmt werden. Vorteil ist, dass der Sensor berührungsfrei arbeitet. Er kann so montiert werden, dass er nicht mit bewegt wird. Ein Problem ist die geringe Reichweite von wenigen Zentimetern. Es gibt Bauformen (Abb. 5.1) mit einer langen Spule, die von einem Rohr umgeben

sind, welches bewegt werden kann. Dadurch lassen sich Strecken in Rohrlänge erfassen und der Abstandssensor erhält eine Blickrichtung. Der Kern kann so gewählt werden, dass er beweglich ist und als Objekt dient. Es kann durch die elektrischen Verluste die Eintauchtiefe des Kerns bestimmt werden. Wird eine Spule verwendet, deren Reichweite größer ist, als die des Feldes, können auch größere Abstände bestimmt werden [13]. Die derzeit größte Version liegt



Abbildung 5.1: Induktionssensor mit langer Spule. Die Länge der Spule gibt den Messbereich vor. Um die Spule herum befindet sich ein Rohr aus Metal, das als zu erfassendes Objekt dient und verschoben werden kann. Die längste Version kann einen Abstand von 65 cm messen.[12]

bei einer maximal zu messenden Weglänge von 65 cm. Dies ist für den vorliegenden Zweck nicht ausreichend. Daher kommen Induktionssensoren hier nicht oder nur bedingt als Annäherungssensor in Frage. Zusätzlich sind die Sensoren nicht für Bewegung senkrecht zu Messrichtung ausgelegt. Bei dem geplanten Aufbau sind Stöße und Verschiebungen bis zu 1 cm in dieser Richtung zu erwarten. Die Stoßempfindlichkeit der Achse ist mit maximal 100 g angegeben, was hier leicht überschritten wird. Ein induktiv arbeitender Sensor kann zur Wegbestimmung eingesetzt werden, wenn an ihm ein Streifen mit unterschiedlichen Materialien oder Abständen vorbei bewegt wird, also eine Kombination aus Induktionssensor und Codierung (Unterabschn. 3.2.1). Problematisch ist dabei, dass an Fitnessgeräten der Bewegungsumfang von Person zu Person variiert. Es gibt keine Position am Rahmen, an der sich immer alle zu messenden Punkt vorbeibewegen würden. Ein induktiver Annäherungssensor bietet sich als Alternative zu dem in Unterabschn. 6.2.1 vorgeschlagenen Sensor zur Gewichtsbestimmung an.

Kapazitiver Sensor

Ein kapazitiver Sensor funktioniert im Grunde darüber, dass die Kapazität eines Kondensators sich mit der Größe des parallelen Anteils der Platten verändert. Wird nun eine Platte parallel verschoben, so ändert sich die Kapazität mit dem Anteil der überlappenden Fläche. Ein solcher Sensor wäre berührungsfrei. Er muss gegen Fremdfelder abgeschirmt werden. Der Abstand der Platten beträgt in der Regel unter einem Zentimeter, dies liegt in der Größenordnung der Schwankungen am Gerät, die senkrecht zu den Plattenoberflächen aufritt. Da eine solche Schwankung die Kapazität ändert und einen Zusammenstoß der Platten erzeugen könnte, ist diese Art des Sensors nicht geeignet. Die Länge der einzelnen Platten müsste bis zu 70 cm betragen. Zwei Platten dieser Länge an einem Kraftgerät zu befestigen und dabei eine absolut parallel Verschiebung zu garantieren und sie gegen Fremdfelder abzuschirmen, ist nicht möglich. Da die mit bewegte Platte geladen sein muss, um einen konstanten Wert zu garantieren, müsste sie verkabelt werden. Das heißt die Kabel wären mechanischer Beanspruchung ausgesetzt.

Drehkondensator

Mit einem Drehkondensator wird eine Drehung erfasst, in diesem Fall die Drehung einer Umlenkrolle. Störungen werden dadurch vermieden, dass die Rolle und die Platten des Kondensators eine gemeinsame Achse haben. Ein Problem bei diesem Aufbau ist, dass eine der Platten mit bewegt wird. Da sie aber geladen sein muss, muss ein Schleifkontakt oder ein mitbewegtes Kabel verwendet werden, was anfällig für Verschleiß ist. Das Messen der Bewegung an den Rollen ist, wie in der Einleitung zum Abschn. 5.2 erklärt wurde, nicht sinnvoll.

Potenziometer

Alternativ dazu gibt es eine schon umgesetzte Methode mit einem Potenziometer. Hierbei wird um die Achse des Potenziometers ein Draht gewickelt, der mit einem Ende an den Gewichten befestigt ist. Bewegen sich die Gewichte, wird der Draht abgewickelt. Eine Feder sorgt dafür, dass der Draht wieder aufgewickelt wird. Eine Umdrehung des Potenziometers entspricht dann einem festen Abstand. Nachteil ist, dass der Draht immer direkt auf die Achse aufgewickelt werden muss und nicht übereinander liegen darf, da sich sonst das Verhältnis von Drahtlänge zu Umdrehung ändert. Zusätzlich ist das Potenziometer einem mechanischen Verschleiß ausgesetzt, so dass es nach spätestens drei Jahren oder einigen tausend Umdrehungen ersetzt werden muss, wobei es

kontinuierlich an Genauigkeit verliert. Auch die Feder leiert mit der Zeit aus und gibt keine kontinuierliche Spannung auf den Draht.

Magnetfeld Sensoren

In den meisten Fällen tritt neben dem elektrischen auch ein magnetisches Feld auf. Hier werden einige Sensoren vorgestellt, die mit elektromagnetischen Feldern arbeiten. Diese haben eine größere Reichweite und Genauigkeit als die induktiven, auch wenn einige unter anderem mit Induktion arbeiten. Sensoren, die mit Magnetfeldern arbeiten, haben ähnliche Schwachstellen wie induktiv arbeitende Sensoren (Abschn. 5.2).

1. Magnetoinduktiver Wegsensor Mit diesem Sensor kann die Lage eines kooperativen permamagnetischen Targets bezogen auf eine Sensorfläche erfasst werden. Mit der Lage des Magneten ändert sich die Spuleninduktivität. Dabei wirkt der Magnet auf eine als Kern fungierenden weichmagnetische Folie, auf der sich eine mit hochfrequentem Strom angeregte Planarspule befindet. Die Folie ist formbar, sie kann in einem Kreis geformt werden, um damit Drehbewegungen zu erfassen. Je nach Größe der Spule und der Stärke des Magneten lassen sich so berührungslose Sensoren im Bereich von 10 bis 200 mm bauen. Bewegungen senkrecht zur Messrichtung, wenn sich der Magnet weiter entfernt, sind problematisch, da sich der Messwert verändert. Das bedeutet, dass der Magnet und die Sensorfläche parallel geführt werden müssen. Dies wird bei dem hier angestrebten Aufbau nicht möglich sein, da eine Bewegungserfassung an den Rollen aus den oben genannten Gründen nicht sinnvoll ist. Auch das Erfassen der Bewegung der Gewicht mit Hilfe eines Magneten ist problematisch, da die Gewichte nicht stark genug geführt sind und sich in Nichtmessrichtung bewegen können.

2. Magnetostruktive Sensoren Unter Magnetoristktion wird die Änderung der geometrischen Abmessungen, insbesondere Ferro-, Antiferro- und Ferrimagneten, die durch einen Magnetisierungsprozess herrühren, verstanden. In einer Röhre aus magnetostruktiver Legierung, die als Wellenleiter fungiert, befindet sich ein Leiter. Wird durch diesen Leiter ein Strompuls geschickt, entsteht in dem Wellenleiter ein axialgerichtetes rotatives Magnetfeld. Trifft dieses nun auf das radial gerichtete Magnetfeld des Positionsgebers, der sich in der Nähe des Wellenleiters befindet, entsteht eine Überlagerung, die einen Torsionsimpuls auslöst. Diese zurücklaufende Torsionswelle wird mit einer Spule aufgenommen und der Zeitunterschied bestimmt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit liegt bei $v_s = 2700 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ der Schallgeschwindigkeit. Die Wiederholungsrate

des Strompulses liegt bei 2,7 kHz bei einem Meter Messlänge. Auf diese Weise können Bewegungen mit einer Genauigkeit im μm -Bereich erfasst werden. Dieser Sensor ist leider nicht für den Fall geeignet, in dem der Magnet sich auch senkrecht zu Messrichtung bewegt. Um genaue Werte zu erhalten muss, der Magnet am Sensor geführt werden. Dies ist aufgrund der Eigenbewegung des Messobjektes schwierig und bringt ein mechanisches Verschleißteil in den Aufbau. Dieser Sensor gehört zum Preissegment über 500 €.

3. Hall Sensor Hall Sensoren basieren auf dem Halleffekt. In einem stromdurchflossenen Leiter, der einem Magnetfeld ausgesetzt ist, wirkt die Lorenzkraft senkrecht zum Strom und Magnetfeld auf die Elektronen, wobei das Magnetfeld senkrecht zum Strom anliegt. Die auf die Elektronen resultierende Kraft führt dazu, dass Ladungen getrennt werden, bis entstehende elektrische Felder die Lorenzkraft kompensieren. Die Ladungstrennung ist vergleichbar mit der eines Kondensators. Es kann eine Spannung abgegriffen werden, die hier als Hall-Spannung bezeichnet wird. Sie gibt einen Wert für die Lage des Magnetfeldes. Die Hall-Spannung ändert sich mit dem Abstand und der Ausrichtung des Magnetfeldes. Diese Art von Sensor hat eine bessere Auflösung, als die vorangegangenen. Er hat eine geringe maximale Reichweite von unter zwei Zentimetern und ist somit für die diesen Aufbau ungeeignet.

4. Magnetische Drehcoder Beim magnetischen Drehcoder wird ausgenutzt, dass sich die Hall-Spannung mit der Ausrichtung des Magneten ändert. Dreht sich der Magnet um eine Achse so, dass das Magnetfeld entweder senkrecht oder parallel zum stromdurchflossenen Leiter ist, ändert sich die Hall-Spannung sinus- bzw. cosinusförmig. Dies reicht zur genauen Positionsbestimmung nicht aus. Werden vier Hall-Sensoren gekoppelt, läßt sich durch die Überlagerung der Signale eine wesentlich höhere Genauigkeit erreichen. Dieser Sensor ist geeignet, um Winkel von Rotationen zu bestimmen. Da die Rollen an Kraftgeräten keine geeigneter Punkte sind, um die Bewegung zu erfassen, wird der Sensor hier nicht verwendet. Er bietet aber eine Möglichkeit, den Drehkondensator aus Abschn. 5.2 zu verbessern und von mechanischen Bauteilen zu befreien.

5.2.1 Optoelektronische Abstandsensoren

Um auf optischem Weg Bewegungen zu erfassen, gibt es mehrere Ansatzpunkte. Es ist möglich, den Pin, der die Gewichtseinstellung vornimmt, räumlich zu erfassen. Dabei wird der Pin angestrahlt und das reflektierte Licht ausgewertet. So wird neben der Bewegung auch das eingestellte Gewicht bestimmt. Dafür darf das Gerät während der Gewichtserfassung nicht bewegt werden,

da sich sonst Gewichtserfassung und die Messung der Bewegung überlagern. Zusätzlich muss der Pin mit einem Reflektor ergänzt werden. Dieser wird bei jeder Gewichtseinstellung vom Trainierenden mit der Hand angefasst. Damit ändert sich im Zweifelsfall die reflektive Eigenschaft des Reflektors jedesmal oder er muss gereinigt werden. Auch muss die reflektierende Fläche des Pins jedes mal wieder passend zum Sensor ausgerichtet werden, diese kann vom Trainierenden nicht erwartet werden. Alternativ kann ein Reflektor am obersten Gewicht befestigt werden. Das reflektierte Licht kann genutzt werden, um nur die Bewegung zu erfassen. Das angehängte Gewicht kann über den Abstand von verbleibenden Gewichten zum Rahmen oder Boden bestimmt werden, da die verbleibenden Gewichte auf sich linear ausdehnenden Federn lagern.

IR- und Lasertriangulationssensoren Bei der Triangulation wird aus dem Winkel zwischen emittiertem und reflektiertem Strahl die Entfernung zum Target bestimmt. Dies wird in Unterabschn. 3.2.1 beschrieben. Ein großer Vorteil dieser Methode ist die Berührungsfreiheit. Der Sensor muss nicht in Kontakt mit der sich bewegenden Fläche kommen, nur der Reflektor. Dadurch treten keine mechanischen Beanspruchungen auf. Auch Stöße sind kein Problem, da der Sensor vom Kraftfitnessgerät entkoppelt werden kann. Je nach Reichweite kann er am Boden oder an der Decke befestigt werden. Wird der Reflektor groß genug gewählt, spielen Verschiebungen senkrecht zu Messrichtung keine Rolle. Probleme treten auf, wenn Emitter, Sensor und Reflektor nicht mehr in einer Ebene sind oder sich der Winkel ihrer Ausrichtung ändert. Solange der Mindestwert an Intensität nicht durch Verunreinigungen des Reflektors oder des Mediums zwischen Reflektor und Sensor unterschritten wird, spielen Intensitätsverluste keine Rolle. Die Empfindlichkeit eines Triangulationssensors nimmt mit größer werdendem Abstand ab, da mit dem Abstand die Winkeländerung pro Zentimeter abnimmt. Der Messbereich der erhältlichen mit Laserlicht arbeitenden Sensoren reicht von 20 mm bis 2.000 mm. Die Genauigkeit liegt zwischen 1 μm und 250 μm entsprechend ihres Arbeitsabstandes. Allgemein liegt die Genauigkeit der Abstandsinformation unter dem 0,001-fachen des Messbereiches. Im Infrarotbereich ist die Genauigkeit aufgrund der schlechteren Fokussierung, inkohärentem Licht und schwächerer Intensität um einiges geringer. Der Messbereich liegt ebenfalls im Bereich von 20 mm bis 2.000 mm. Die Genauigkeit kann im Nahbereich bei 1 mm liegen und im Fernbereich über 1 cm.

Laserlicht- und Ultraschalllaufzeitmessungssensoren Bei der Lichtlaufzeitmessung wird die Entfernung aus der Laufzeit des Lichtes zwischen Emitter,

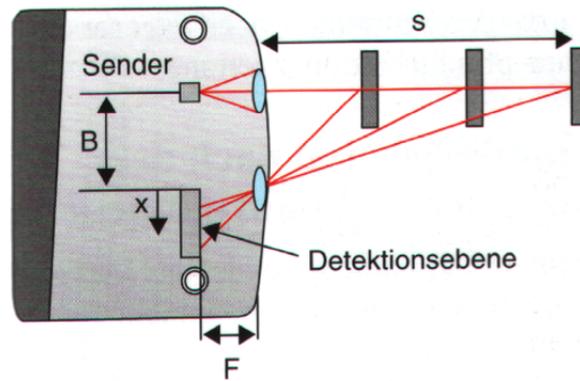


Abbildung 5.2: Prinzip eines mit Triangulation arbeitenden Laser-Distanz-Sensors. Das vom Sender ausgesandte und gebündelte Licht trifft im Abstand s auf ein reflektierendes Objekt. Ein Teil des Lichtes fällt durch eine Linse auf die Detektionsebene. Sind die Abstände F und B bekannt kann aus dem Auftreffpunkt x die Strecke s bestimmt werden ([13] S. 47).

Target und Empfänger durch Interferenz zwischen einfallenden und ausgehenden Wellen bestimmt. Die mit Ultraschall arbeitenden Sensoren sind anfällig für Reflexionen der Schallwellen im Raum oder für andere Ultraschallquellen. Deshalb können nicht mehrere Ultraschallsensoren dicht beieinander verwendet werden. Durch das Pulsen haben die Ultraschallsensoren eine An- und Abklingzeit des Tones von jeweils 160 ms bei einem Messbereich von 40 - 250 cm und somit liefern sie gerade mal 2 - 3 Messwerte pro Sekunde, was nicht für den angestrebten Zweck ausreicht. Laufzeitsensoren die mit Laserlicht arbeiten haben diese Probleme nicht. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit und Länge des Pulses ist wesentlich kleiner. Sie messen bei Entfernungen bis zu 100 m auf 1 cm genau. Die Genauigkeit hängt dabei von der Messzeit ab. Je genauer ein Abstand erfasst werden soll, um so länger dauert die Messung. Laserlaufzeitsensoren gibt es für jeden Abstandsbereich. Für den hier benötigten Bereich von 10 - 200 cm mit einer Auflösung von 1 cm gibt es jedoch wenige. Dieser Bereich wird in der Regel von Sensoren mit größerer Reichweite abgedeckt und die Auflösung wird durch eine länger Messzeit erreicht. Dies hat zur Folge, dass ein passender Sensor sehr kostenintensiv ist. Während der Vorbereitung für die Versuchsdurchführung wurde angedacht einen Laser-Distanz-Sensor (LDS 400) der Firma Eltrotec zu verwenden [15]. Dieser Sensor hat einen Messbereich von 30 - 400 cm bei einer Auflösung von zirka 1 mm bei einer Schaltfrequenz von 100 Hz. Auch wenn die grundlegenden technischen Spezifikationen den erwarteten entsprechen, war es nicht ohne weiteres möglich, ein Modell mit der passenden Einstellung zu bekommen. Weiter ergaben sich erhebliche Schwierigkeiten bei der technischen Integration in den

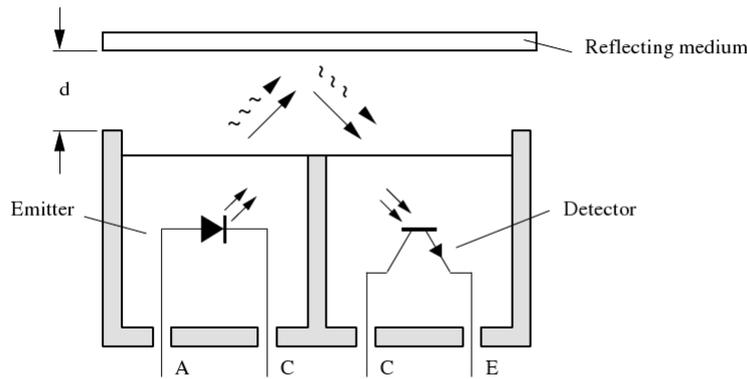


Abbildung 5.3: Prinzip eines Optokopplers. Das vom Emitter ausgesandte Licht wird nach der Reflexion am Objekt im Abstand d vom Detektor aufgefangen und erzeugt einen der Menge an reflektiertem Licht entsprechenden Strom [16].

Messaufbau und dem Übertragen der Messwert auf den PC. Im Zusammenhang mit den Kosten von über 1000 € wurde aus diesen Gründen von einem Aufbau mit diesem Sensor Abstand genommen. Dennoch bietet er sich für die Verfeinerung des Messaufbaus an.

Lichtschanke Das grundlegende Prinzip einer Lichtschranke besteht darin, dass Licht ausgesandt, reflektiert und dann auf einen Detektor trifft. Der Detektor arbeitet mit dem inneren Photoeffekt (vgl. Unterabschn. 3.2.1). Je nach dem ob der Detektor vom Licht getroffen wird oder nicht, lässt sich daraus schliessen, ob der Reflektor in Reichweite ist oder nicht. Ist der Reflektor identisch mit einem Objekt, kann so bestimmt werden ob ein Objekt in Reichweite ist oder nicht. Werden mehrere Reflektoren vorbei bewegt gibt jeder eine Signal, aus dem sich die Anzahl der Objekte und bei festem Abstand der Reflektoren zu einander, die Geschwindigkeit bestimmen lässt. Sind die Gewichte eines Kraftgerätes mit Reflektoren ausgestattet, lässt sich so erfassen, wie viele Gewichte angehängt sind. Dazu muss der Sensor so angebracht sind, das beim Anheben alle angehängten Gewichte an ihm vorbeibewegt werden. Da die gesamt Höhe der angehobenen Gewichte mit ihrer Anzahl zunimmt, ist das vollständige Vorbeibewegen an der Lichtschranke irgendwann nicht mehr möglich. Lösbar wäre dieses Problem, wenn jedes Gewicht eine eigene Lichtschranke erhält.

Reflexionsoptokoppler Die meisten Optokoppler sind technische identisch mit Lichtschranken. Mit ihnen ist es nicht nur möglich, die Anwesenheit eines Objektes zu bestimmen, sondern auch im gewissen Rahmen den Abstand des Objektes zu bestimmen. Die Menge des reflektierten Lichts ist abhängig vom

Abstand, damit ist auch die Menge des Lichtes, die auf den Detektor trifft, abhängig vom Abstand. Als Lichtquelle dient in der Regel eine LED und als Detektor ein Phototransistor. Je nach Anschluß geben Optokoppler ein digitales oder ein analoges Signal aus. Für die kontinuierliche Abstandsbestimmung wird das analoge Signal benötigt. Der Phototransistor gibt der einfallenden Lichtmenge entsprechend eine Spannung aus. Durch die kleine Bauweise und die leistungsschwachen LED ist ihr Messbereich auf 1 - 2 cm beschränkt. Sie sind anfällig für Fremdlicht, auch wenn sie durch einen Filter geschützt sind. Das Abschirmen gegen Fremdlicht ist aufgrund des geringen Messabstands relativ einfach. Das von der LED ausgesandte Licht ist nicht moduliert, dadurch sind Optokoppler mit einer Frequenz von bis zu 200 kHz auszulesen. Die Abstands-Spannungs-Kurve ist nicht linear.

5.2.2 Motioncapturing

Mit einem Motioncapturing-System ist es möglich, dreidimensionale Bewegungen im Raum zu erfassen. Im Grunde ist es eine dreidimensionale Erweiterung des Triangulationsprinzips. Das zu erfassende Objekt wird mit im Infrarotlicht reflektierenden Punkten ausgestattet. Es werden Infrarotlichtquellen und mehrere Infrarotkameras benötigt. Das von den Punkten reflektierte Infrarotlicht wird von Kameras erfasst und an den PC weitergeleitet, der aus den Einzelbildern eine dreidimensionale Animation erstellt. Der Aufbau lässt sich verfeinern, wenn kodierte Punkte verwendet werden, wie bei der Version der Firma Lukotronic. Hier sind die Punkte die Infrarotlichtquellen, deren Licht kodiert ist. Damit lassen sich mehrere Punkte eindeutig zuordnen und so zum Beispiel die Gewichte unterscheiden. Limitierender Faktor dieser Systeme ist der räumlich ausgedehnte Aufbau. Die Kamera muss vom Objekt so weit entfernt sein, dass die gesamte Bewegung mit auf dem Bild ist. Nicht hinter jedem Gerät ist Platz und es ist von hinten zugänglich. Ein weiteres Problem ist die Störung durch Fremdlichtquellen. Insgesamt ist das System aufwendig, arbeits- und kostenintensiv, ohne dass eine entsprechende Genauigkeit erreicht würde.

5.2.3 PC-Maus

Eine Lösung, die Bewegung mit einem fertigen Modul zu erfassen, ist es, eine optische PC-Maus zu verwenden. Die verbaute Elektronik ist mit der Photozelle in der Lage durch Abgleich von Bildern Bewegung zu erfassen. Die Photozelle könnte so befestigt werden, dass sie die Vorbeibewegung des Seiles erfasst. Nachteil dabei ist die Abtastrate der Maus. Auch kann die Elektronik nur Bewegungen in einer Ebene erfassen. Ändert sich der Abstand von Maus

zu Oberfläche, schaltet die Elektronik ab. Diese Bewegung lässt sich in diesem Aufbau nicht verhindern. Weiter ist die Bewegung des Seiles nicht identisch mit der der Gewichte, da das Seil elastisch ist.

5.3 Beschleunigungsmessung mit Beschleunigungssensor

Beschleunigungssensoren arbeiten nach dem Prinzip der Kondensatorplatten. Sie bestehen aus einer festen und einer beweglichen Platte, die abhängig von der Beschleunigung ihren Abstand ändern. Auch wenn sie sehr klein sind und fest in einem Gehäuse verbaut sind, teilen sie die Probleme der kapazitiven Sensoren in Abschn. 5.2. Um die Beschleunigung der Gewichte zu erfassen, müssten sie an den beweglichen Teilen des Gerätes befestigt und verkabelt werden, was problematisch ist.

5.4 Gewichtsmessung

Gewichte werden in der Regel über eine Abstandsänderung bestimmt. Dazu können alle Sensortypen aus Abschn. 5.2 verwendet werden. Im Alltag finden sie Anwendung in Waagen. Dazu wird die Abstandsänderung einer Stahlfeder bestimmt. In dem hier beschriebenen Aufbau kann das angehängt Gewicht durch das Gewicht der in der Ruhelage verbleibenden bestimmt werden. Dies bedeutet, es könnte theoretisch mit einer Art Personenwaage erfasst werden. Dabei fallen alle Messmethoden raus, die durch die harten Schläge beim Aufsetzen der Gewichte Schaden nehmen würden, wie zum Beispiel Piezoelemente. Von Vorteil ist hier eine berührungslose Abstandserfassung, wie mit einem induktiven oder optischen Sensor.

5.5 Zusammenfassung der Diskussion

Nach der Betrachtung der Möglichkeiten scheint der optimale Weg zu sein, optische Sensoren zu verwenden und auf kabelgebundene Sensoren, die am bewegten Objekt befestigt werden müssen, zu verzichten. Um einen kontinuierlichen Betrieb zu ermöglichen, müssen die Sensoren durchgehend mit Strom versorgt werden, darum kommen mit einem Akku betriebene Sensoreinheiten nicht in Frage. Wie bereits beschrieben führen die Bewegung des Gerätes zu einer starken mechanischen Beanspruchung der Kabel. Darum soll auf Sensoren, die an beweglichen Teilen befestigt werden, verzichtet werden. Zuletzt ist

zu sagen, dass bei annähernd gleicher Leistung die kostengünstige Alternative verwendet werden soll.

Als Sensoren werden der IR-Abstandssensor GP2Y3A002K0F von Sharp, der Optokoppler CNY-70 und zur Kontrolle das Kistlerelement 9251A verwendet. Die ausgewählten Sensoren werden im nächsten Kap. 6 beschrieben und in einen Aufbau integriert. Sie arbeiten optisch und sind wartungsfrei, leicht zu installieren und ausreichend genau.

6 Versuchsaufbau

In diesem Kapitel wird der endgültige Versuchsaufbau (Aufbau I) inklusive einer Variation (Aufbau II) vorgestellt. Er wird an einem handelsüblichen Long-Pully oder Ruderzug montiert. Als Sensoren werden der IR-Abstandssensor GP2Y3A002K0F von Sharp, der Optokoppler CNY-70 und zur Kontrolle das Kistlerelement 9251A verwendet. Der Aufbau II wird mit dem IR-Abstandssensor der GP2Y0A02YK0F von Sharp realisiert. Zur Signalumwandlung werden zwei A/D-Wandler benutzt, die PC Steckkarte DAQCard-700 oder das USB-Interfacekit 8/8/8. Im Folgenden werden das Kraftfitnessgerät, die einzelnen Sensoren und andere Geräte vorgestellt. Im Abschn. 6.3 wird der Anschluss der Sensoren an den PC und im darauf folgenden Abschn. 6.4 der Anbau am Gerät dokumentiert.

6.1 Long-Pully am 4-Stationen-Zugturm

Es wird zunächst der 4-Stationen-Zugturm beschrieben, an dem der Ruderzug montiert ist. Für den Aufbau wird ein 4-Stationen-Zugturm der Firma Gym80 aus der Modellreihe Sygnum Type Studio verwendet [17]. Der hier vorgestellte Aufbau kann an allen vier Stationen montiert werden. Der Zugturm funktioniert an allen Stationen nach dem gleichen Prinzip. Er ist in Abb. 6.1 zu erkennen, wobei der Ruderzug im Vordergrund zu sehen ist. Er besteht aus einem aufrecht stehenden, rechteckigen Stahlrahmen, in dem zwei runde Führungsstangen für die Gewichte montiert sind. Auf diese Stangen sind Gewichte mit jeweils 5 kg aufgesteckt. Die Gewichte haben neben der Aussparung für die Stangen noch ein Loch in der Mitte, durch welches die Halterung gesteckt wird, an der das Stahlseil zieht. Auf der Vorderseite ist das Gewicht angegeben und ein weiteres Loch, durch das die Gewichte an der Halterung befestigt werden. Je nachdem, welches Gewicht an der Halterung fixiert wird, werden alle darüber liegenden mit angehoben. Aus diesem Grund ist auf jedem Gewicht die Summe der Gewichte angegeben, die beim Anheben dieses Gewichts gehoben werden. Das unterste Gewicht lagert auf zwei um die Stangen herum liegenden Federn oder Gummipuffern. Dadurch wird verhindert, dass die Gewichte beim Absetzen auf dem Rahmen aufschlagen und beschädigt werden. Das Stahlseil

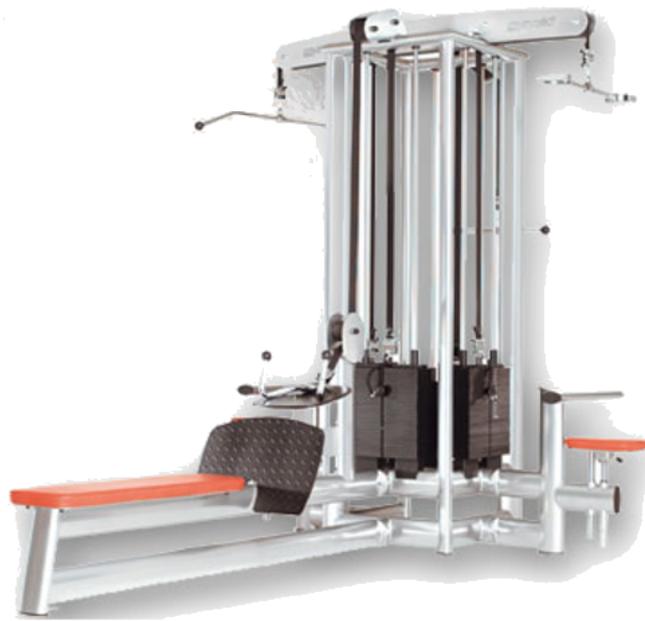


Abbildung 6.1: 4-Stationen-Zugturm mit Ruderzug im Vordergrund. Gut zu erkennen Gewichte, Griff und Fußplatte. Als Hubseil dient ein gummiertes Stahlband [17].

ist bei diesem Modell ein 5 cm breites Stahlgeflecht, dass in Gummi gegossen ist. Dieses verläuft oben, mittig am Stahlrahmen über zwei Rollen, nach vorne vom Turm weg. Je nach Bauweise befindet sich hier noch eine dritte Rolle, die die Zugrichtung umlenkt oder es ist direkt ein Griff an dem Seil befestigt. Beim Ruderzug sorgt die dritte Rolle dafür, dass nur waagrecht und parallel zur Sitzfläche gezogen werden kann. Die Griffe der einzelnen Stationen unterscheiden sich in drei Ausführungen: eine Stange von zirka 120 cm, die quer am Seil befestigt wird, sie ist leicht geriffelt und wird beim Training an den äußeren Enden gefasst. Der zweite Griff ist eine kurze Stange von zirka 50 cm, sie ist geriffelt und leicht geschwungen, um den Bedienkomfort zu erhöhen. Der dritte Griff besteht aus zwei 20 cm langen Stangen, die parallel angeordnet sind. Sie werden durch ein metallenes Dreieck verbunden, an dessen Spitze die Halterung für das Stahlseil ist. Die Griffe sind mit einem Karabiner befestigt und können unter den Stationen getauscht werden. In dem hier beschriebenen Aufbau wurde der dritte Grifftypus verwendet. Die Art des Griffs spielt eine Rolle für die zu trainierende Muskelgruppe, aber keine für den Versuchsaufbau. An dem Stahlrahmen angeschweißt steht längs eine Bank, dazu gehört eine Platte, auf die die Füße gestellt werden können. Die Versuchsperson sitzt beim Trainieren auf der Bank mit den Füßen auf der Fußplatte und zieht mit beiden Händen waagrecht zum Boden an dem Griff. Über die Umlenkrollen

überträgt das Stahlseil die aufgebracht Kraft auf die Gewichte, welche dadurch angehoben werden können. Der Ruderzug wurde gewählt, da hier die größten Gewichte und der größte Hub möglich sind. Der Messaufbau ist auf die anderen Geräte übertragbar, da diese mit kleinerem Hub und weniger Gewichten arbeiten, zudem gehört dieses Gerät zu den meist genutzten.

6.2 Verwendete Bauteile

In diesem Kapitel wird beschrieben, welche Bauteile im Messaufbau verwendet wurden. Es wird erläutert, warum sie ausgewählt wurden und welche Funktionen sie haben. Hinzu kommen weitere Teile wie Kabel und Verstärker. Sie werden explizit erwähnt, wenn ihre Beschaffenheit einen wichtigen Einfluss auf den Aufbau hat. Zunächst werden die verwendeten Sensoren vorgestellt, dann alle anderen Teile. Weil die meisten der Sensoren eine neue Entwicklungen sind, gibt es in der Fachliteratur kaum Dokumentationen über sie. Darum wird im Folgenden häufig auf Referenzen im Internet verwiesen. Sowohl die Datenblätter, wie auch Schaltpläne lassen sich hier problemlos an mehreren Stellen finden.

6.2.1 Optokoppler CNY-70

Der CNY-70 ist ein Optoreflexkoppler der Firma Vishay. Er hat eine sehr kompakte Bauweise, bei der der Lichtemitter (Leuchtdiode) und der Detektor (Phototransistor) nebeneinander in der gleichen Richtung angebracht sind, um Objekte durch das reflektierte Licht wahrzunehmen. Der Emitter strahlt im Infrarotbereich bei einer Wellenlänge von 950 nm. Es können farbliche Unterschiede, Kontraste und unter bestimmten Voraussetzungen auch Abstände gemessen

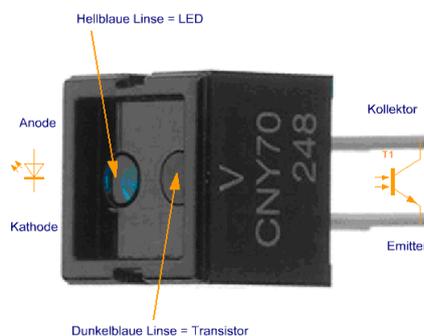


Abbildung 6.2: Mit Reflexion arbeitender Optosensor mit V_{CC} als Transistorausgang. Die Anschlüsse für LED (Anode/Kathode) und Transistor (Kollektor/Emitter) sind beschriftet. Vor der LED und dem Transistor sind die Frequenzfilter zu sehen.

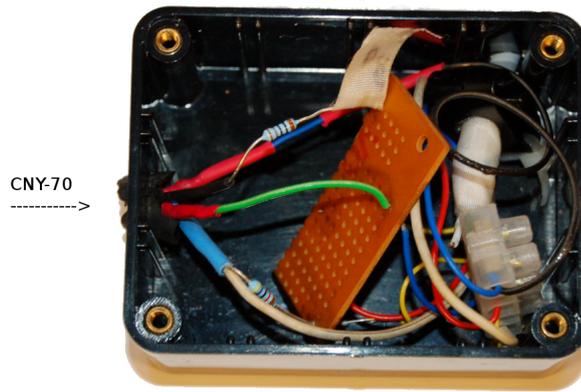


Abbildung 6.3: CNY-70 inklusive Platine, verbaut in Gehäuse. Um den optischen Teil des Sensors ist eine Blende gelegt, die seitliche einfallendes Licht abschirmen soll. Die auf der Platine befindliche Schaltung ist so gewählt, dass sie den Messbereich möglichst aufweitet (vgl. Unterabschn. 6.3.3).

werden. Abstände können nur gemessen werden, wenn Fremd- und Störlichtquellen vermieden werden. Er hat einen hohen Ausgangssignal, einen geringen Temperaturkoeffizienten und ist mit einem optischen Filter ausgestattet. Der Emitter leuchtet kontinuierlich mit konstanter Leistung, sein Licht wird von einer zur Strahlrichtung waagerechten Oberfläche reflektiert. Dieses Licht gelangt in den Detektor und erzeugt dort durch den inneren photoelektrischen Effekt eine der Lichtmenge entsprechende Spannung (Unterabschn. 3.2.1). Damit weniger Licht anderer Frequenzen den Detektor anregt, ist ein grober Filter angebracht. Der Filter verringert die Anzahl der Lichtwellen, die nicht im Wellenlängenbereich von 950 nm liegen. Licht der gleichen Frequenz, wie die des Emitters, ist jedoch weiterhin ein Problem. Ist die Störlichtquelle konstant, führt dies zu einem Offset, ist sie nicht konstant, muss der CNY-70 abgeschirmt werden. In diesem Aufbau wird der CNY-70 so angebracht, dass er nicht von direktem Licht, der im Raum vorhandenen Lichtquellen getroffen wird. Der Sensor ist maximal 1 cm von dem Reflektor entfernt, so dass bei entsprechend großem Reflektor ebenfalls das meiste Streulicht abgeschirmt ist. Es kann davon ausgegangen werden, dass der dennoch zum Detektor gelangende Anteil des Lichts kontinuierlich ist, solange die Lichtbedingungen annähernd gleich bleiben und damit nur ein gleichbleibender Offset erzeugt wird. Um Abstände messen zu können, wird der CNY-70 in einem Gehäuse verbaut (Abb. 6.3). Das Gehäuse und der geringe Abstand zum Reflektor sorgen dafür, dass ein vernachlässigender Anteil an Störlicht in den Detektor gelangt. Die vom CNY-70 abhängige, vom Abstand herausgegebene Spannung ist nicht linear (vgl. [18] S. 4). Dies ist für die hier vorgesehene Nutzung nicht relevant, da

keine kontinuierlichen Abstände gemessen werden. Durch das Kalibrieren werden Spannungsintervalle bestimmt, die einem bestimmten Gewicht zugeordnet werden. In Unterabschn. 8.2.1 wird gezeigt, dass der Zwischenraum der einzelnen Intervalle größer ist, als die Intervalle selbst. Dabei liegen die den einzelnen Gewichten zugeordneten Spannungsintervalle über den ganzen Gewichtsbereich soweit auseinander, dass sie sich sauber trennen lassen. Im Datenblatt des CNY-70 sind die technischen Daten genauer beschrieben, es ist unter [18] zu finden. Dieser Sensor wurde gewählt, weil er eine ausreichende Auflösung hat. Eine verworfene Idee bestand darin, aus einer Reihe von Lichtschranken eine Array zu bauen, das die Anzahl der angehängten Gewichte bei der ersten Bewegung erfasst. Dazu hätte jedem Gewicht ein Sensor zugeordnet, dieser elektronisch verschaltet und von einer Software verwaltet werden müssen. Die Menge der angehängten Gewichte über die Stauchung der Feder durch die verbleibenden Gewichte zu bestimmen, ist eine wesentlich einfachere und weniger anfällige Methode. Zudem ist dieser Teil des Aufbaues mit Materialkosten von unter einem Euro zu realisieren.

6.2.2 Piezoelement Kistler 9251A

Der Kistler 9251A ist ein 3-Komponenten-Kraftsensor aus Quarz. Die drei Kräfte F_x , F_y , F_z werden orthogonal gemessen und können beliebig gerichtet, dynamisch oder quasistatisch sein. In Y- und X-Richtung können Kräfte im Bereich von -2,5 bis +2,5 kN mit einer Empfindlichkeit von etwa -8 pC/N gemessen werden, bei einer Vorspannung von 25 kN. In Z-Richtung können sie im Bereich -5 bis +5 kN liegen, mit einer Empfindlichkeit von ungefähr -4 pC/N bei Vorspannung von 25 kN und im Bereich 0 bis 5 kN ohne Vorspannung. Das Übersprechen der F_y , F_x -Kanäle auf den F_z -Kanal liegt bei $\leq \pm 3\%$. Der Temperaturkoeffizient der Empfindlichkeit liegt bei -0,02 %/C. Der Sensor besteht aus drei Quarzringpaaren, die in einem Gehäuse verbaut sind. Die Schubkraft in Y- und X-Richtung wird von zwei Schubquarzpaaren und die Kraft in Z-Richtung durch ein Druckquarzpaar gemessen. Die entstehenden Ladungen werden über Elektroden zu den entsprechenden Steckanschlüssen geführt. Von hier aus werden sie durch speziell abgeschirmte Koaxialkabel zum Ladungsverstärker übertragen. Das Gehäuse ist rostfrei und wasserfest verschweißt. Die ringförmigen Oberflächen sind parallel zu Y-Richtung und können als Koordinatensystem verwendet werden. Die Z-Richtung liegt senkrecht zur X- und Y-Richtung durch die Ringe (Abb. 6.4). Das Datenblatt ist auf der Homepage der Firma Kistler zu finden [19]. Für den hier beschriebenen Aufbau wurde nur die Z-Komponente des Elementes genutzt. Der Kraftsensor ermöglicht eine

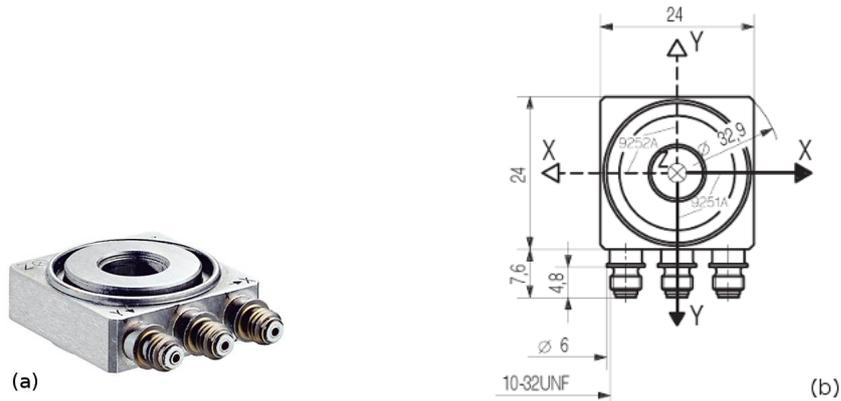


Abbildung 6.4: (a) Seitenansicht Kistlerelement 9251A. Der mittige Ring ist eine plane Fläche auf die die Kraft wirkt. Im Vordergrund sind die Anschlüsse für Signale in X-, Y- und Z-Richtung zu sehen.
 (b) Achsenausrichtung des Kistler 9251A. Mit angegeben sind die Abmessungen in mm [19].

Genauigkeit von 1 N und eine Auflösung bis zu 180 kHz. Darum wurde er als Referenz zu den anderen Sensoren gewählt. Leider eignen sich Piezoelemente, wie beschrieben, nicht für den hier angestrebten Dauerbetrieb (vgl. Abschn. 5.1).

Kraftsensoradapter

Da der Kraftsensor nicht direkt im Aufbau verwendet werden kann, wurde ein Adapter angefertigt. Abbildung 6.5 zeigt diesen Kraftsensoradapter mit eingebautem Kistlerelement 9251A. An den beiden Ringschrauben können Gewichte oder ein Seil eingehängt werden. Der Kraftsensor wird mit einer Vorspannung von einigen kN verschraubt, um später das Messen hoher Zugkräfte möglich zu machen. Da für diese Anwendung nur die F_z -Richtung beachtet wird, ist es nicht wichtig, durch die Vorspannung einen guten Kontakt für die Schubkräfte in F_y - und F_x -Richtung zu sorgen. Darum ist die Vorspannung so gewählt, dass sie größer ist, als die in F_z -Richtung ihr entgegenwirkenden Kräfte, die oben mit bis zu 8 kN angegeben sind. Der Adapter wurde in den technischen Werkstätten der Universität Oldenburg nach eigenen Vorgaben gefertigt.

6.2.3 IR-Abstandssensor GP2Y0A02YK0F

Der GP2Y0A02YK0F von Sharp ist eine IR-Abstandssensor, der mit Triangulation arbeitet. Daher spielt die Farbe des Reflektors zur Abstandsbestimmung keine Rolle. Es ist jedoch von Vorteil, einen im Infrarotbereich möglichst stark reflektierenden Reflektor zu verwenden. Diese Version des Sensors ist für einen



Abbildung 6.5: Kraftadapter mit eingebautem Kistlerelement. Durch Anziehen der zentralen Schraube wird eine Vorspannung erzeugt. Wird später durch Ziehen an den Ringschrauben der Vorspannung entgegengewirkt, wird es möglich Zugkräfte zu messen.

Abstandsbereich von 20 bis 150 cm konstruiert. Sämtliche Bauteile, wie zum Beispiel der Oszillator zur Modulation des Lichtes, sind mit im Gehäuse verbaut. Dieser Sensor ist eine kosten-günstige, leicht anzuschließende Möglichkeit, Bewegungen mit einer Auflösung von bis zu 20 Hz zu erfassen. Er sollte bei Messungen mit einer Spannung von $5\text{ V} \pm 0,5\text{ V}$ versorgt werden. Die ausgegebene Spannung schwankt im verwendeten Messbereich zwischen 0 V und 3 V. Der Sensor hat drei Anschlusskabel V_{cc} in rot, GND in schwarz und V_0 in weiß. Die Verkabelung und Weiterleitung der Signalspannung wird in Abschn. 6.3 näher erläutert. Zwischen den Einzelmessungen des Sensors gibt es eine Schaltpause von 5 ms, in der ein Spannungspeak erzeugt wird. Nach dieser Pause gibt der Sensor für $39,3\text{ ms} \pm 9,6\text{ ms}$ Messwerte heraus. Dieser Sensor wurde im Aufbau II verwendet. Er bietet die Möglichkeit, ihn direkt mit dem Interfacekit von Phidgets zu betreiben.

6.2.4 IR-Abstandssensor GP2Y3A002K0F

Für den Aufbau I wird der GP2Y3A002K0F „Wide Angle Sensor-von Sharp ausgewählt, es handelt sich dabei um einen IR-Sensor zur Abstandsmessung durch Triangulation. Im Gegensatz zu anderen IR-Abstandssensoren von Sharp (GP2Y0A02YK0F, GP2D12, GP2D120) ist dieser Sensor mit fünf LEDs ausgestattet. Diese ermöglichen das Erfassen von Objekte in einem breiteren Winkelbereich. Eine LED sendet ein Signal, das nach der Reflexion am Objekt wieder von einem Detektor empfangen wird. Der Ort, an dem das reflektierte



Abbildung 6.6: Zwei IR-Abstandssensoren. Die jeweils linke Öffnung ist der Emittierer die rechte der Detektor, links und rechts sind Befestigungsösen zu erkennen.

(a) Abstandssensor GP2Y0A02K0F von Sharp in Frontalansicht unten mittig der Steckeranschluss zu sehen.

(b) Weitwinkel Distanz Sensoreinheit GP2Y3A002K0F von Sharp.

Licht wieder den Detektor trifft, gibt die Entfernung an. Die LEDs senden mit einer Wellenlänge von $870 \text{ nm} \pm 70 \text{ nm}$. Die fünf LEDs sind so angeordnet, dass sie verschiedene benachbarte Raumbereiche ausleuchten. Dadurch verbreitert sich der Bereich, in dem sich der Reflektor befinden kann, von 5° auf 25° . Alternativ kann erfasst werden, in welchem der fünf Bereiche sich der Reflektor befindet. Zusätzlich ist der GP2Y3A002K0F mit einer Messzeit von $16,5 \text{ ms} \pm 3,5 \text{ ms}$ schneller als seine Vorgänger. Die Pausen zwischen einzelnen Messungen, in denen von einer LED zur nächsten geschaltet wird, müssen mindestens 5 ms sein. Dies lässt eine effektive Messfrequenz von 50 Hz zu. Der GP2Y3A002K0F hat neun Anschlüsse, fünf für die jeweilige LED LED_x , Masse GND , die Stromversorgung des Sensors V_{cc} , Signalleitung für Messung V_0 und den Eingang zum Ansteuern der LEDs V_{in} (vgl. Unterabschn. 6.3.1). In dem hier vorgestellten Aufbau I wird die Weitwinkelfunktion nicht benötigt, darum wird der Sensor immer auf der mittleren LED betrieben. Daher läuft der Sensor im Dauerbetrieb und muss nicht geschaltet werden. Alle $20 - 25 \text{ ms}$ wird ein Schaltpeak ausgegeben, der herausgefiltert werden muss. Da die Genauigkeit der Abstandsmessung mit der Entfernung abnimmt und nicht linear ist, wird eine Kalibrierungsfunktion erstellt (Unterabschn. 8.2.2), die ein direktes Umrechnen der Spannung in Zentimeter erlaubt. Neben der gegenüber den anderen IR-Abstandssensoren verkürzten Messzeit und der einfachen Handhabung, bietet dieser Sensor den Vorteil eine preisgünstige Lösung zu sein.

6.2.5 A/D-Wandler

Die Signale aller verwendeter Sensoren sind analog. Dies macht den Einsatz eines Analog/Digital-Wandlers notwendig, um die Informationen in einer digi-

talen Form zu erhalten. Im Gegensatz zum letzten Element in der Kette: *Sensor* \rightarrow *A/D-Wandler* \rightarrow *PC*, hat die Bauweise des A/D-Wandlers einen Einfluss auf die Qualität des Signals. Die entscheidenden Faktoren sind die maximale Abtastrate und der maximale Spannungsbereich. Dem gegenüber stehen die Kosten, die mit der Qualität der Signalverarbeitung ansteigen. In jedem Fall ist der Wandler das kostenintensivste Bauteil in diesem Aufbau. Im Folgenden werden zwei A/D-Wandler näher beschrieben, zum einen die DAQCard-700 und das PhidgetsInterfaceKit 8/8/8.

DAQCard-700

Die DAQCard-700 von National Instruments ist ein günstiger und energiesparender A/D-Wandler für den Type II PCMCIA Steckplatz. Er schafft 12 bit, hat 8 analoge Eingänge, es kann in einem Spannungsbereich von ± 10 V gemessen werden. Der Wandler kann vollständig über eine Software eingestellt werden. Die genauen technischen Details finden sich im Datenblatt [20]. Der A/D-Wandler wird mit der Software DaisyLab kontrolliert, dies ist eine ältere Version von LabVIEW der Firma National Instruments. Der Wandler ist ein älteres Modell, das für den hier vorgestellten Aufbau völlig ausreicht. Er wurde gewählt, weil bereits eine funktionierende und erprobte Einbindung von Karte und PC bestand. Der zu erfassende Messbereich wird auf ± 5 V gesetzt und damit an die Spannung der Sensoren angepasst. Die Abtastrate wird den Sensoren angepasst mit 200 Hz, wobei die Karte maximal 100 kS/s bietet.

PhidgetsInterfaceKit 8/8/8

Das PhidgetsInterfaceKit 8/8/8 (PIK) ist eine kostengünstige Alternative zu den A/D-Wandlern die im Allgemeinen in der Wissenschaft verwendet werden. Er findet Anwendung in der Robotik und der privaten Steuerungstechnik. Die hier vorgestellte Version hat acht analoge Eingänge, acht digitale Ausgänge und acht digitale Eingänge (Abb. 6.7). Die analogen Eingänge bestehen aus drei Kabeln, einer Stromversorgung mit 5 V (rot), der Erde (schwarz) und der Datenleitung (weiß). Somit ist für den IR-Sensor GP2Y0A02YK0F keine weitere Verkabelung nötig. Die Sensoren können über das Interface mit 5 V versorgt werden. Für Sensoren mit besonderen Anforderungen sind passende Adapter lieferbar. Weiter technische Details lassen sich auf der Homepage von Phidgets finden [21] & [22]. Zum Ansteuern des PIK gibt es verschiedene Softwaremodule, die für eine sinnvolle Nutzung selber modifiziert und programmiert werden müssen. Es gibt eine Vielzahl an Bibliotheken für alle gängigen Programmiersprachen. Nachteil des PIK ist, dass seine maximale Abtastrate bei 65 Hz liegt,

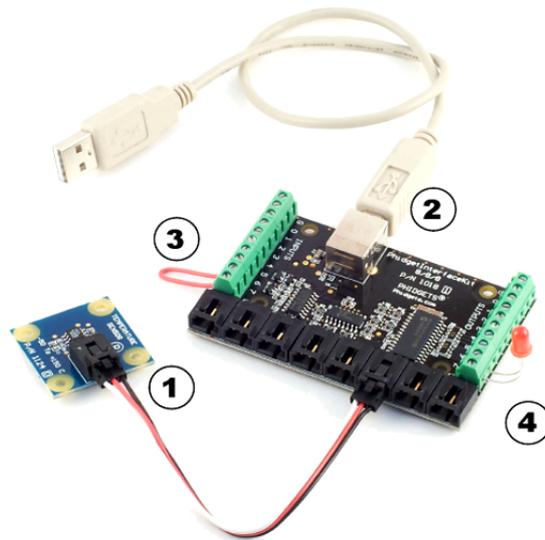


Abbildung 6.7: Phidget Interface Kit 8/8/8 mit Verbindungskabeln. (1) Anschluss eines Sensors (Adapter) an analogen Eingang Nummer fünf. (2) Verbindungskabel zum PC über USB. (3) Acht digitale Eingänge, einer kurzgeschlossen mit der Erde. (4) Acht Digitale Ausgänge mit angeschlossener LED.

daher wird es nur im alternativen Aufbau verwendet.

6.2.6 Weitere Teile

Neben den Sensoren und dem Ruderzug setzt sich der Aufbau aus weiteren Elementen zusammen. Es wird kurz aufgeführt, welche Teile verwendet wurden. Den Teilen in diesem Abschnitt kommt keine besondere Bedeutung im Hinblick auf die Messgrößen zu. Sie haben Einfluss auf die Qualität der Messung und werden aus Vollständigkeitsgründen aufgeführt. Im Allgemeinen lassen sich alle Teile durch gleich- oder höherwertige Teile ersetzen, ohne das Messergebnis zu beeinflussen.

Ladungsverstärker Kistler 5006

Die Ladung, die der Kraftsensor liefert, wird über Spezialkabel an einen Ladungsverstärker der Firma Kistler Modell 5006 weitergeleitet. Der Verstärker gibt eine Spannung im Bereich $\pm 2,5 \text{ V}$, $\pm 5 \text{ V}$ oder $\pm 10 \text{ V}$ heraus. Es gibt die Möglichkeit, zwischen drei verschiedenen Zeitkonstanten und steckbaren Filtern zur Anpassung des Frequenzbereiches an die Messaufgabe zu wählen. Die Zeitkonstante kann gewählt werden zwischen "long" (für statische Messungen), „medium“ (für Messungen bis 1000 Hz) und "short" (für dynamische Messungen über 1000 Hz). Es gibt 12 Bereiche, die einzelnen Aufnahmeempfindlichkeiten

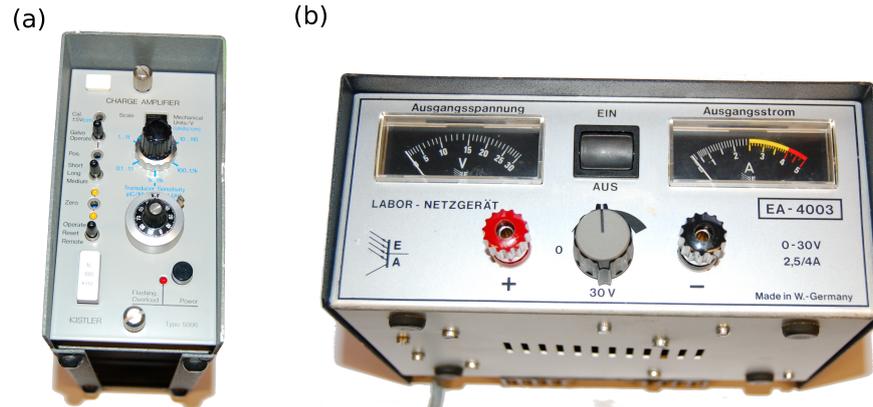


Abbildung 6.8: (a) Ladungsverstärker 5005 der Firma Kistler. Die Belegung der Schalter und ihre Einstellmöglichkeiten sind weiter unten erläutert. (b) Labor-Netzteil EA4003 in Frontansicht. Zu sehen sind Anschlussbuchsen für Plus und Minus, Netzschalter und Messanzeigen für Strom und Spannung.

pro Volt entsprechen. Während einer längeren Laufzeit kann es zu einem Drift kommen, der mit der Reset-Taste zurück gesetzt werden kann. Das Datenblatt zu diesem Verstärker ist nicht im Internet zu finden. Bei Interesse kann es per E-Mail bei Kistler angefordert werden.

EA-4003

Um die Spannungsversorgung des Sensors zu stabilisieren, wird ein externes Labor-Netzgerät, Modell EA-4003 von der Firma EA, verwendet. Es besitzt einen Regler, um die Spannung anzupassen, und jeweils eine Anzeige für Strom und Spannung. Die eingestellte Spannung wird parallel mit einem elektronischen Multimeter kontrolliert, kann von 0 V bis 30 V eingestellt werden und die Stromstärke beträgt im Regelfall 2,5 A, im Extremfall 4 A. Das Gerät hat Anschlussbuchsen für Bananenstecker und Schraubklemmen zum Direktanschluss von Kabeln.

Laptop

Für den Aufbau ist die genaue Konfiguration des PCs nicht relevant. Wichtig ist, dass entweder ein PCMCIA-Schacht oder ein USB-Port vorhanden ist. Als Prozessorgeschwindigkeit sind 750 MHz ausreichend, so lange Daten von nur einem Kraftgerät gleichzeitig erfasst werden. Je nach Wahl des A/D-Wandlers muss die passende Datenerfassungssoftware installiert sein und flüssig laufen.

Kabel, Kleinteile und Reflektoren

Alle Bauteile, mit Ausnahme des Kraftsensors, werden mit niedriger Spannung von unter 10 V und geringem Strom betrieben. Daher können normale mehradrige Kabel ohne Abschirmung verwendet werden. Besondere Kabel wurden verwendet für den Kraftsensor, die Datenleitung vom IR-Sensor und für den Molex-Stecker. Das Kistlerelement benötigt Spezialkabel, deren genaue Beschreibung sich auf der Firmen-Homepage finden lässt [23]. Besonderheit dieser Koaxialkabel ist, dass sie hoch isoliert sind, um der gesamten Messkette einen Isolationswiderstand von $> 10^{15}\Omega$ zu garantieren. Es können nur rauscharme Kabel verwendet werden, die bei Bewegung ein sehr geringe Reibungselektrizität erzeugen. Diese Hochwertigkeit macht die Kabel empfindlich gegen mechanische Beanspruchung. Für die Datenleitung des IR-Sensors wird, soweit möglich, ein normales Laborkoaxialkabel verwendet. Zum einen dient es dazu, die Signalleitung abzuschirmen, zum anderen besitzt der A/D-Wandler Koaxialbuchsen. Auf der Sensorseite müssen für die GP2Y3A002K0F Version des IR-Sensors besonders feine Kabel mit einer Aderdicke von unter 0,3 mm verwendet werden, die in den Molex-Stecker passen. Für die optischen Komponenten werden Reflektoren benötigt, optimal sind möglichst weiße, leicht streuende Flächen. In diesem Fall wurden ein Holzbrett und ein Pappdeckel mit gebleichtem weißen Papier beklebt. Die Oberfläche ist glatt und lässt sich mit dem Trägermedium zusammen ausrichten. Für den CNY-70 kann die Unterseite des Gewichts direkt beklebt werden. Für einen mobilen Aufbau wird der Pappdeckel von 10 x 10 cm verwendet, der unter dem Gewicht befestigt wird. Die beklebte Holzplatte ist 20 x 20 cm groß und wird für die IR-Sensoren verwendet. Damit der Reflektor mit dem Abstandsensor nicht in Berührung kommt, wird an der Führungstange der Gewichte eine Schelle befestigt. Werden die Gewichte über das normale Hub hinweg angehoben, stoppt die Schelle den Hebevorgang. Die Schelle wird in einem Abstand von 20 cm zum Sensor festgeschraubt. So wird dafür gesorgt, dass der Sensor nicht beschädigt und der Mindestabstand zwischen Sensor und Reflektor nicht unterschritten wird.

6.3 Anschluss der Bauteile

In diesem Teil wird beschrieben, wie die einzelnen Elemente des Aufbaus ineinander greifen. Es werden die Versorgung der Sensoren und der Weg des Signales vom Sensor zum PC nach vollzogen.

6.3.1 Anschluss des IR-Abstandssensors GP2Y3A002K0F

An dem GP2Y3A002K0F befindet sich ein neunpoliger Anschluss der Firma Molex mit der Teilenummer 053047-0910. Der passende Stecker hat die Teilenummer 051021-0900 und ist neunpolig [24]. Die Pinbelegung ist in Abb 6.9 (a) dargestellt. Im Datenblatt [25] sind die an den einzelnen Anschlüssen anlegbaren maximalen Nennwerte aufgelistet. Die Versorgungsspannung V_{cc} wird über ein externes Labor-Netzgerät geliefert und beträgt 5 V. Sie kann auch über einen USB-Anschluss geholt werden, ist dann weniger stabil als bei einem externen Netzteil und in der Regel ≤ 5 V. Das Labor-Netzgerät ist von der Firma EA und trägt die Typenbezeichnung EA 4003. Der Analog-/Digital-Wandler ist von der Firma National Instruments und trägt die Typenbezeichnung DAQCard-700. Es ist eine PCMCIA-Karte mit einem 12 bit Wandler und einer maximalen Abtastrate von 100 kS/s (vgl. Unterabschn. 6.2.5). Das Datenblatt lässt sich unter [20] finden. Der Sensor wird wie in Abb. 6.9 (b) angeschlossen, dabei werden die Anschlüsse der LEDs Nummer 1,2 und 4,5 nicht benötigt, weil nur in einem gleichbleibenden Winkelbereich von 5° gemessen werden soll. Die Erde des Sensors (GND) wird gemeinsam mit der GND des A/D-Wandlers auf den Minuspol des Labor-Netzgerätes gelegt. V_{cc} wird an dem Pluspol des Netzgeräts angeschlossen. Der LED-3 Anschluss wird mit dem V_{in} zusammengelegt und dann über einen manuellen I/O-Schalter mit dem Pluspol des Netzgerätes verbunden. Der Schalter hat die Funktion, den Start der Messung im Sensor auszulösen. Dazu reicht meistens das Anschalten des Sensors aus. V_0 wird direkt mit dem Eingang des A/D-Wandlers verbunden. Der Sensor wird an einem Gehäuse befestigt, in welchem die Verbindungskabel und Anschlüsse liegen. Vom Gehäuse laufen die zwei Kabel zum Netzteil und das Koaxialkabel zum A/D-Wandler.

6.3.2 Anschluss des IR-Abstandssensor GP2Y0A02YK0F

Der GP2Y0A02YK0F arbeitet mit der gleichen Technik wie der GP2Y3A002K0F, wird aber für den alternativen Aufbau anders angeschlossen. Dieser Sensor hat drei Anschlüsse V_0 (weiß) für das ausgehende Messsignal, V_{cc} (rot) für die Betriebsspannung und GND (schwarz) als Erde. Die Farben der Kabel sind durch das von Phidgets mitgelieferte Kabel vorbestimmt. Dies vereinfacht die Schaltung für diesen Aufbau. Weiter wird als A/D-Wandler ein PhidgetsInterfaceKit 8/8/8 verwendet [22]. Dieses wird über einen USB-Anschluss an einen PC angeschlossen, der das Interface und alle angeschlossenen Sensoren mit Strom versorgt. Die Firma Phidgets stellt passend für den dreipoligen Anschluss des Distanzsensores der Firma Sharp einen Adapter her, der Sensor und

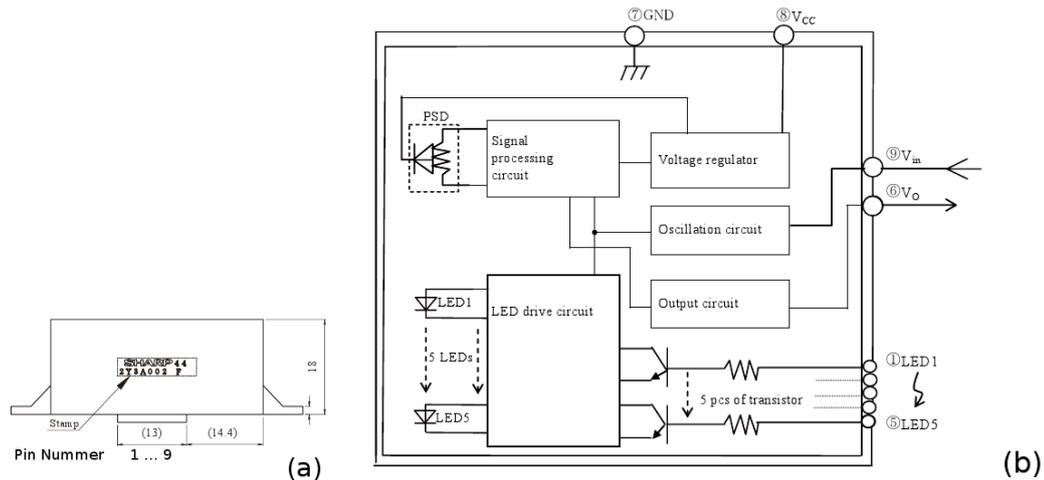


Abbildung 6.9: (a) Seitansicht mit Pinbelegung des GP2Y3A002K0F: (1) - (5) Signaleingang für LED 1 bis 5, (6) Ausgehende Spannung (Messsignal) V_0 , (7) Erdung GND , (8) Versorgungsspannung V_{CC} , (9) Schaltspannung LEDs V_{in} .
 (b) Blockdiagramm mit internen Bauteilen des Sensors. Nummerierung und Benennung ist mit (a) identisch [22].

A/D-Wandler verbindet und die Signalqualität verbessert [26]. Die Stabilität der Spannung und das Ansteuern der Sensoren übernimmt das PIK, es lässt sich über eine Software steuern. Der Sensor wird an einem Gehäuse befestigt, in dem der Adapter von Phidgets liegt. Dieser ist über ein zirka 2 m langes dreiadriges Kabel mit dem PIK verbunden.

6.3.3 Anschluss des Optokoppler CNY-70

Der CNY-70 ist als Schaltsensor für Abstände unter einem Zentimeter gebaut. Als Ausgangssignal wird eine Spannung erzeugt. Im regulären Betrieb ist vorgesehen, dass zwei ausreichend weit von einander entfernt liegende Spannungen als Ein- und Ausschaltwert gewählt werden. Damit kann ein negativ rückgekoppelter Schaltkreis gebaut werden, der dafür sorgt, dass das Objekt im Abstandsbereich zwischen den beiden Schaltwerten bleibt. Die ausgegebene Spannung, in Abhängigkeit von Abstand, ist ein analoges, also kontinuierliches Signal. Durch eine entsprechende Schaltung kann das Intervall zwischen maximaler und minimaler Spannung bis auf $\Delta 3,5$ V ausgeweitet werden. Die Schaltung mit den notwendigen Widerständen wird in Abb. 6.10 gezeigt. Dieser Sensor hat vier Anschlüsse: V_0 (weiß) für das ausgehende Messsignal, zwei mal V_{cc} (rot) für die Betriebsspannung und GND (schwarz) als Erde. Die Farben wurden passend zu den Anschlusskabeln des Phidgets Interface gewählt. Das heißt, die Stromversorgung wird über den A/D-Wandler hergestellt und

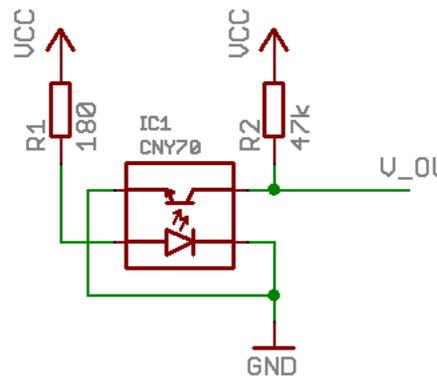


Abbildung 6.10: Anschlussschaltung Optokoppler CNY-70: V_0 = Ausgehende Spannung (Messsignal), GND = Erdung, V_{CC} = Versorgungsspannung, $R_1 = 180\Omega$, $R_2 = 47k\Omega$. [16]

es wird die gleiche Erde als Gegenpol für V_{cc} und V_0 verwendet. Der Sensor und die unmittelbar angeschlossenen Widerstände werden zum Schutz in einem Gehäuse verbaut und mit einem zirka 1 m langen mehrpoligen Kabel versehen (Abb. 6.3). Dieses Kabel endet mit einem Steckeranschluss für das PIK.

6.3.4 Verkabelung des Piezoelement Kistler 9251A und Einstellung des Ladungsverstärkers

Der Sensor wird mit dem in Unterabschn. 6.2.6 beschriebenen Koaxialkabel mit dem Ladungsverstärker verbunden. Das Kabel hat eine Länge von 120 cm. Es wird nur der Z-Kanal angeschlossen. Der Ladungsverstärker bietet die Möglichkeit, die Verstärkung so einzustellen, dass 1 V genau 100 kg oder 1.000 N entsprechen. Dies wird im Unterabschn. 8.2.4 beschrieben. Der Frequenzbereich wird mit 180 kHz gewählt und die Aufnahmeempfindlichkeit von 200 Einheiten pro Volt. Die Zeitkonstante wird auf Short gestellt. Die Reset-Funktion wird zwischen jedem Messdurchgang genutzt. Das Ausgangssignal des Verstärkers wird über ein normales Koaxialkabel an das Anschlussbord des A/D-Wandlers weitergegeben.

6.3.5 Anschluss der A/D-Wandler an den PC

Der A/D-Wandler DAQCard-700 wird auf der einen Seite über den PCMCIA-Slot mit dem PC, auf der anderen Seite mit einem Bord mit Koaxialbuchsen verbunden, an dem mehrere Sensoren angeschlossen werden können. An eine dieser Buchsen wird der GP2Y3A002K0F, an eine weiter der Kraftsensor und an eine dritte der CNY-70 eingesteckt. Wird der CNY-70 über diesen Wandler

ausgelesen, muss er zusätzlich auf die gleiche Weise wie der GP2Y3A002K0F an das Labor-Netzteil angeschlossen werden. Wird für den Aufbau das PIK verwendet, können für alle Sensoren die passende Stecker genutzt werden und es ist kein externes Netzteil nötig. Das PIK wird durch eine USB-Kabel mit dem PC verbunden.

6.4 Anbau der einzelnen Komponenten am Ruderzug

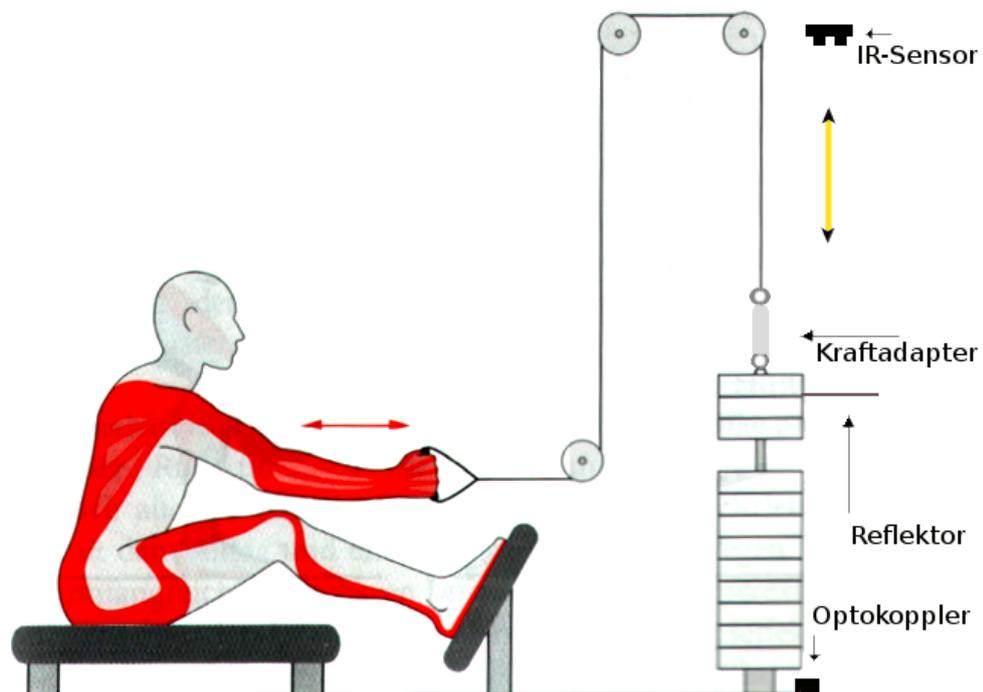


Abbildung 6.11: Schema der Anbaupositionen des Kraftadapters, des IR-Sensors, des Optokopplers und des Reflektors am Long Pully Krafttrainingsgerät ([6] s. 107).

Um die Sensoren und Reflektoren in die optimale Position am Kraftgerät zu bringen, werden Halterungen benötigt. Die Halterung für den IR-Sensor ist in Abb. 6.12 zu sehen, sie kann am Rahmen eingehängt werden und muss dann mit Hilfe von Lot und Wasserwaage justiert werden. Der Optokoppler benötigt keine Halterung, aber ein höhenverstellbares Podest, auf dem sein Gehäuse alleine steht.

6.4.1 Anbauposition des IR-Abstandssensors

Die Halterung für den IR-Sensor, der zum Erfassen der Bewegung der Gewichte dient, wird oben am Rahmen befestigt. Die Halterung besteht aus einem

Metallkorb, in dem sich der Sensor befestigen lässt, einem Verbindungsstück, an dem sich der Abstand vom IR-Sensor zu Rahmen einstellen lässt, und einer Vorrichtung, mit der sich die Halterung am Rahmen einhängen lässt. Am unteren Ende der Halterung lässt sich ein Lot befestigen, mit dem sich der IR-Sensor so ausrichten lässt, dass er senkrecht auf den Reflektor strahlt. Der Reflektor



Abbildung 6.12: Befestigungsvorrichtung des IR-Abstandssensors. Alle hier erwähnten IR-Sensoren können in den unteren Teil des blauen Korbes gestellt werden, so dass die Messrichtung in Richtung Boden zeigt. Der obere Teil kann für verschiedene Geräterahmen per Hand zurecht gebogen werden. Oberer und unterer Teil lassen sich zur Abstandskorrektur durch Schrauben in der Höhe verstellen.

für den IR-Sensor wird auf dem obersten Gewicht befestigt, so dass er flach auf dem Gewicht liegt und sich senkrecht zur Strahlrichtung des IR-Sensors befindet. Der Abstand zwischen IR-Sensor und Reflektor wird so gewählt, dass er in der Ruhelage, wenn alle Gewichte aufliegen, am oberen Bereich des in Unterabschn. 8.2.2 festgelegten optimalen Messbereiches liegt. Das heißt, der Abstand beträgt 120 cm. In diesem Aufbau verringert die Halterung den Abstand zwischen Sensor und Reflektor um zirka 40 cm.

6.4.2 Anbau des Optokopplers

Die Optokoppler wird an den Rahmen unter das unterste Gewicht gestellt (Abb. 6.13). Der Emitter und der Kollektor zeigen nach oben und sind senkrecht zur Oberfläche des untersten Gewichts ausgerichtet. Der Sensor wird soweit erhöht, dass der Abstand zwischen Gewicht und Sensor weniger als 1 cm beträgt. Die genaue Anpassung der Höhe erfolgt später mit Hilfe des PCs. Dabei wird der Optokoppler soweit erhöht, bis der gemessene Ruhewert einem Zahlenwert von über 0,5 V entspricht. Ab zirka 0,5 V sind die Werte die den Gewichten entsprechen klar trennbar (vgl. Unterabschn. 8.2.1). Ein Mindestabstand von 5

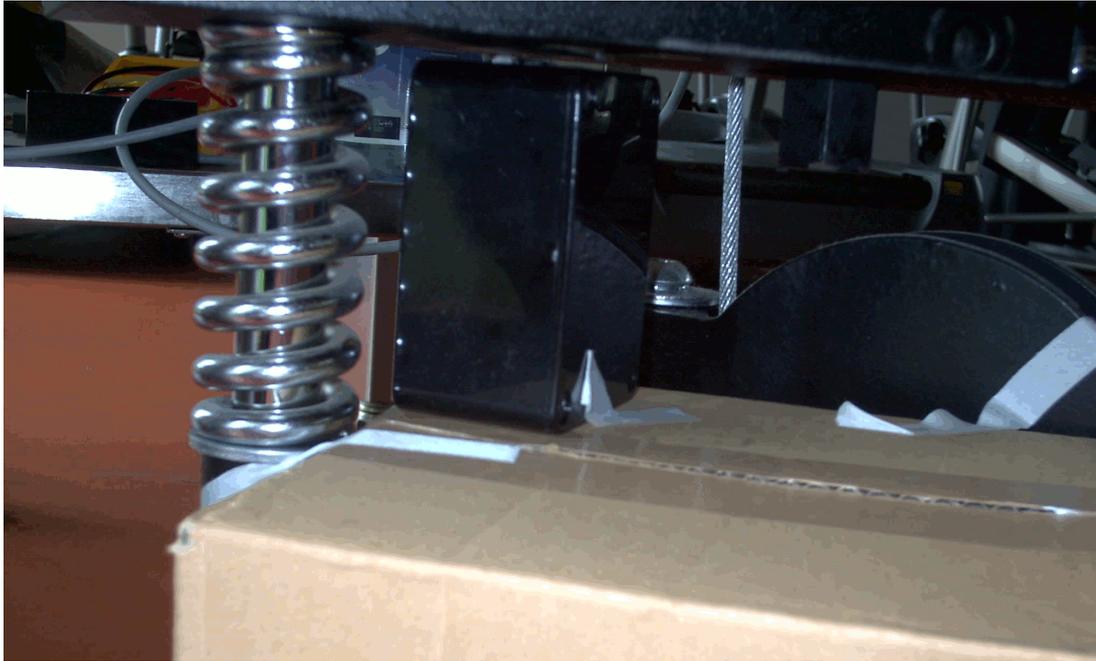


Abbildung 6.13: Optokoppler im Gehäuse aufgestellt unter Gewichten mit einem Abstand unter 1 cm. Die Höhe lässt sich mit Hilfe von Bierdeckeln korrigieren.

mm sollte eingehalten werden, dies verhindert, dass die Gewichte beim Aufsetzen auf die Feder nicht bis zum Sensor durchschlagen. Für diesen Fall ist der Sensor im Gehäuse ausreichend geschützt, zusätzlich wird als Unterlage ein Karton verwendet, der nachgeben kann. Falls die Gewichte auf dem Gehäuse aufsetzen, muss der Sensor neu kalibriert werden. Das Anschlusskabel kann beliebig zum A/D-Wandler geführt werden.

6.4.3 Anbau der Kabel, der Reflektoren und weiterer Kleinteile

Der Reflektor für den CNY-70 wird an der Unterseite des untersten Gewichts befestigt. Dadurch dient das Gewicht als Abschirmung gegen Fremdlicht. Der Reflektor für den IR-Sensor wird am obersten Gewicht befestigt, welches immer mitbewegt wird. Je nach Modell ist es möglich, den Reflektor zwischen den obersten Gewichten zu befestigen oder eine Halterung zu verwenden. Die Verbindungskabel von Sensoren, Verstärker, Netzteil und A/D-Wandler werden, wenn möglich, am Rahmen entlang geführt, um zu vermeiden, dass ein Trainierender oder ein bewegliches Teil sich darin verfängt. Da das Kistlerelement an einem beweglichen Teil befestigt ist, muss besonders darauf geachtet werden, dass das Verbindungskabel nicht in die beweglichen Teil gelangt. Es

kann mit Kabelbindern oder mit Tape fixiert werden.

6.5 Datenaufnahme mit Software

Um die Daten mit dem PC zu erfassen, ist eine Software nötig. Aktuell wird von der Firma National Instruments LabVIEW als Standardsoftware für ihre A/D-Wandler verwendet. Da die aktuelleren LabVIEW Versionen Probleme haben, alte A/D-Wandler zu erkennen, und der verwendete PC nicht leistungsstark genug ist, wird die inzwischen nicht mehr zu erwerbende Software Daisylab verwendet. Es werden alle Kanäle mit 200 Hz erfasst. Sollen später Daten von mehreren Geräten automatisch erfasst werden, gibt es die Möglichkeit, Datenerfassungssoftware selber zu erstellen. Dies sollte an einem Programm gezeigt werden, das verwendet wird, um die Daten mit dem PIK zu erfassen. Das Programm ist in Python geschrieben und basiert auf einem Beispielprogramm, das die Firma Phidget zum Download bereitstellt [22]. Das Programm erfasst alle angeschlossenen Kanäle und die Uhrzeit, zu der ein Messwert erfasst wird. Nach der Messung werden die Daten in einer .asc- oder .scv-Datei erfasst, die mit allen bekannten Datenverarbeitungsprogrammen zu öffnen sind.

6.6 Versuchsaufbau I

Für diesen Aufbau werden der GP2Y3A002K0F IR-Sensor und der CNY-70 Optokoppler verwendet. Als Referenz wird das Piezoelement Kistler 9251A im Kraftadapter verwendet. Alle Sensoren werden wie oben beschrieben mit den dazugehörigen Verstärkern und Netzteilen verbunden und die analogen Signale mit dem D/A-Wandler DAQCard-700 mit 200 Hz erfasst und zusammen mit der vergangenen Messzeit in einer Datei gespeichert. Anbau, Verkabelung und Datenerfassung finden, wie oben beschrieben, statt. Die Anbauorte der Sensoren sind in Abb. 6.11 gezeigt.

6.7 Versuchsaufbau II

Dieser Aufbau besteht aus dem IR-Abstandssensor GP2Y3A002K0F und der CNY-70 Optokoppler. Beide werden wie oben beschrieben an den A/D-Wandler PIK direkt angeschlossen. Der IR-Sensor wird in der Halterung aufgehängt, der Optokoppler unter den Gewichten aufgestellt. Das PIK wird mit dem PC verbunden. Es werden keine weiteren Bauteile benötigt. Die Anbauorte der Sensoren sind in Abb. 6.11 gezeigt.

7 Durchführung der Messungen

Gemessen wurde unter verschiedenen Bedingungen, an verschiedenen Orten und Geräten. Es werden zwei Messreihen im Rehabilitationszentrum Oldenburg mit Patienten aufgenommen, die sich in der Rehabilitationsphase nach einem Krankenhausaufenthalt befinden. Drei weitere Messreihen werden im Gesundheitszentrum (GHZ) der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg mit Kunden des Studios aufgenommen.

7.1 Messung im Rehabilitationszentrum Oldenburg

Die Messreihen im Reha-Zentrum werden mit dem Aufbau II (vgl. Kap. 6), der aus dem IR-Sensor GP2Y0A02YK0F, dem PhidgetsInterfaceKit 8/8/8 und dem Optokoppler CNY-70 besteht, durchgeführt. Es wird an einem Ruderzug der Firma Sanimed gemessen, der fast identisch ist mit dem der Firma Sygnum. Nach dem Anbau und dem Kalibrieren des CNY-70 werden Messungen mit 21 Patienten gemacht. Bevor die Messungen durchgeführt werden, werden der Reihe nach die einzelnen Gewichte angehängt, für 2 - 5 s statisch gehalten und dann wieder abgesetzt. So kann erfasst werden, welche Spannung des Optokopplers zu welchem Gewicht gehört (vgl. Abschn. 8.2). Danach die Messungen mit den Probanden bei ihrem individuell festgelegtem Training gemacht. Jeder Proband macht drei Durchgänge mit gleichbleibendem Gewicht von 15 bis 40 kg. Pro Durchgang werden je 15, 20 oder 30 Hübe gemacht. Der häufigste Fall ist 15 kg Gewicht mit 3 Serien à 20 Hüben. Zwei Messungen bei Patienten mit Schulterproblemen bestehen aus einem Durchgang mit 5 kg und 40 Hüben.

7.1.1 Ablauf einer Messung

Der Proband setzt sich auf die Bank, die am Ruderzug befestigt ist (Abb. 6.11) und wird nach seinem Einverständnis zur Messung und seinem Trainingspensum befragt. Es werden das eingestellte Gewicht, so wie Anzahl der Hübe und

der Durchgänge notiert. Dann wird die Datenerfassung gestartet und der Proband beginnt mit seiner Übung. Zu Beginn der Übung hebt der Proband das Gewicht an und bringt sich in die richtige Position. Dazu setzt er sich aufrecht hin und stellt beide Füße auf die Fußplatte. Jetzt wird das Trainingspensum absolviert, wobei zwischen den Durchführungen und am Ende der Übung die Gewichte abgestzt werden. Die Pausen zwischen den Durchführungen variieren zwischen 10 und 180 Sekunden. Ihre Länge wird von den Physiotherapeuten vorgeschlagen, aber die meisten Patienten entscheiden selber wann sie weitermachen.

7.2 Messung im Gesundheitszentrum

Die Messungen im GHZ werden mit dem Versuchsaufbau I aufgenommen. Die Sensoren GP2Y3A002K0F IR-Sensor, der CNY-70 Optokoppler und das Piezoelement Kistler 9251A im Kraftadapter werden wie in Kap. 6 beschrieben angeschlossen. Der Optokoppler wird kalibriert in dem die Gewichte einzeln angehoben werden und dann statisch 2 - 5 s gehalten werden. Das Piezoelement wird zwischen dem obersten Gewicht und dem Seil befestigt. Es wird ein Long-Puly-Gerät der Firma Gym80 verwendet (Abb. 6.1). Es werden an zwei Tagen 17 Probanden gemessen. Jeder Proband macht drei Durchgänge mit gleichbleibendem Gewicht von 15 bis 50 kg. Pro Durchgang werden je 15, 20 oder 30 Hübe gemacht. Das häufigste Fall ist 25 kg Gewicht mit 3 Serien à 10 Hüben.

7.2.1 Ablauf einer Messung

Die Messungen laufen nach dem gleichen Schema wie im REHA-Zentrum ab. Die Pausen fallen aufgrund des besseren Gesundheitszustands der Probanden wesentlich kürzer aus. Zwischen den Serien wurde keine Pause gemacht, die länger war als 30 s.

8 Auswertung der erhobenen Daten

Im Folgenden werden die in der Versuchsdurchführung erhobenen Daten vorgestellt, verglichen und diskutiert. Zunächst werden die Rohdaten betrachtet, danach werden die gemessenen Spannungen in Kräfte umgerechnet, so dass sie vergleichbar und als Kraft-Zeit-Kurven darstellbar sind. Es werden verschiedene Wege der Datenbearbeitung vorgestellt und verglichen. Im darauffolgenden Abschnitt wird untersucht, wie präzise sich die sportwissenschaftlich relevanten Größen, wie Maximalkraft und Explosivkraft, wiederfinden lassen. Als letztes wird ein kurzer Ausblick auf weiterführende Analysemethoden gegeben.

8.1 Darstellung der Rohdaten

Beim Erstellen der Rohdaten wurden mehrere Datenformate ausprobiert, diese folgen im Wesentlichen einem grundlegenden Schema: Es gibt mehrere Spalten, die voneinander durch Trennzeichen getrennt sind. Die Daten zweier aufeinander folgender Messungen einer Messgröße stehen untereinander. Dies entspricht dem CSV-Format [42]. Grundsätzlich ist in der ersten Spalte die Zeit gespeichert. In weiteren Spalten sind die zu der in der ersten Spalte stehenden Zeit zugehörigen Spannungen der Sensoren aufgeführt. Diese können die Messwerte des Piezosensors, des IR-Sensors und des Optokopplers sein. In weiteren Spalten können sich zusätzliche Informationen oder bereits gefilterte Messwerte, wie zum Beispiel durch einen Tiefpassfilter, befinden. Für die Auswertung gilt eine einheitliche Beschriftung:

Δt : Spalte, in der die seit dem Start der Messung vergangene Zeit in Millisekunden angegeben ist.

SPI: Spalte, in der die vom Piezoelement ausgegebene Spannung in Volt zum Zeitpunkt Δt gespeichert ist.

SIR: Spalte, in der die vom IR-Sensor ausgegebene Spannung in Volt zum Zeitpunkt Δt gespeichert ist.

SOP: Spalte, in der die vom Optokoppler ausgegebene Spannung in Volt zum Zeitpunkt Δt gespeichert ist.

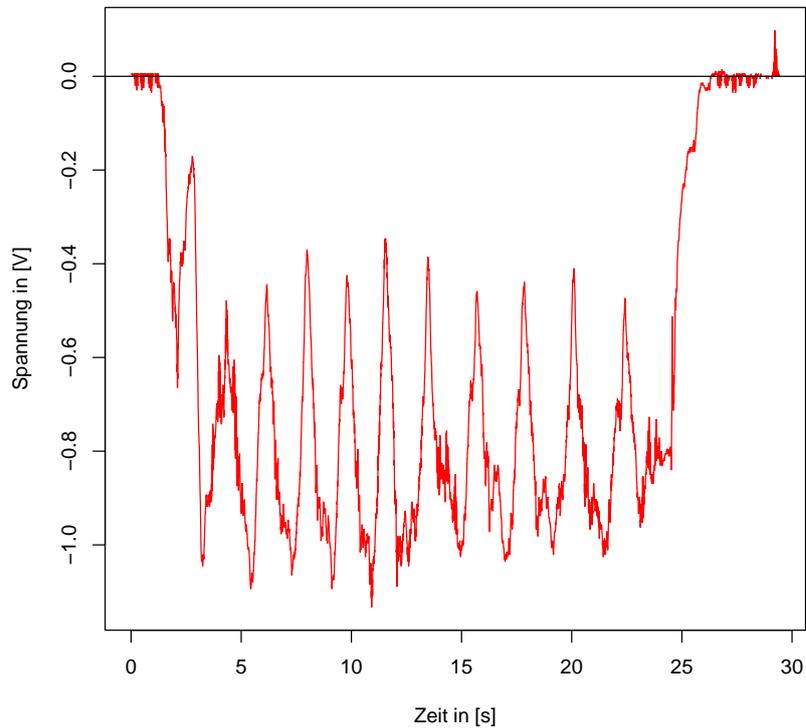


Abbildung 8.1: Darstellung SPI über Δt aus dem Datensatz GHZ-P17. Zu sehen ist eine Serie von 10 HÜben mit 40 kg. In der 0. - 4. Sekunde wird das Gewicht gehoben, in der 24. - 27. Sekunde wird das Gewicht abgesetzt. Beim Anheben der Gewichte wird das vorgespannte Piezoelement um eine der Gewichtskraft entsprechende Spannung entlastet, bevor die Bewegung beginnt.

T – Filter **oder** *P – Filter*: Spalte, in der die tiefpass- oder peakgefilterte Spannung des IR-Sensors in Volt gespeichert ist.

Die Herkunft der Messung ist mit *REHA* für Messungen, die im Rehabilitationszentrum Oldenburg stattgefunden haben, oder mit *GHZ* für Messungen, die im Gesundheitszentrum der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg stattgefunden haben, abgegeben. Die Angabe P^* gibt an, welcher Proband an der Messung teilgenommen hat, dabei steht * für eine laufende Nummer. Teilweise ist mit angegeben, welcher spezielle Sensor für die jeweilige Messung verwendet wurde: *PIE*, *IR* oder *F*.

In Abb. 8.1 ist die vom Piezoelement gemessene Spannung (SPI) über der Zeit (Δt) aufgetragen. Gemessen wurde eine Serie von 10 HÜben mit 40 kg, laut Gewichtsangabe am Gerät. Da das Piezoelement trotz Vorspannung vor der Messung in der Ruhelage auf Null gesetzt wird, sind alle Spannungen und die entsprechenden Kräfte negativ. Der Proband (P17) muss zum Anheben

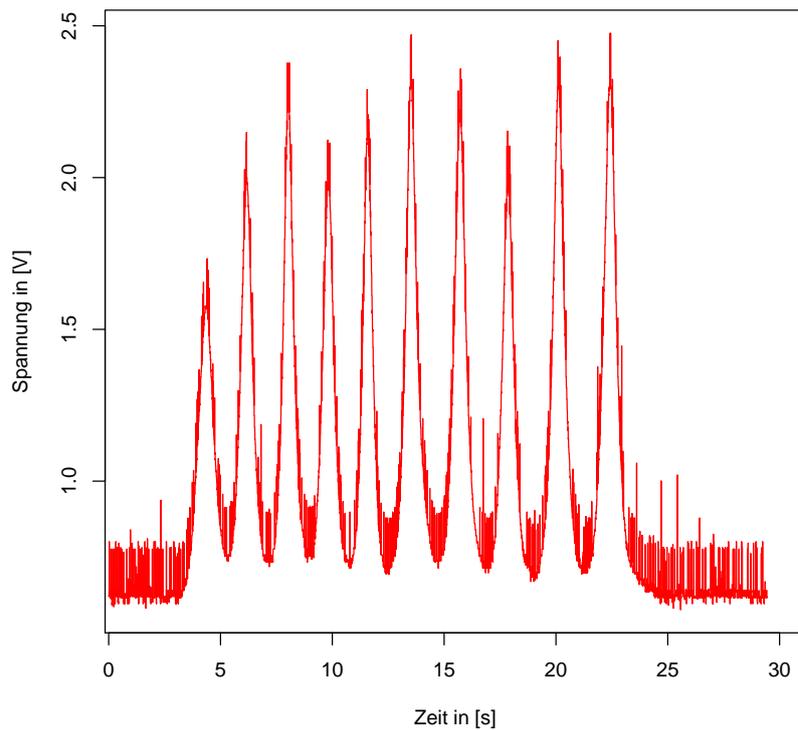


Abbildung 8.2: Darstellung von SIR über Δt aus dem Datensatz GHZ-P17. Zu sehen ist eine Serie von 10 Hüben mit 40 kg. In der 0. - 4. Sekunde wird das Gewicht gehoben, in der 24. - 27. Sekunde wird das Gewicht abgesetzt. Es gibt keine Verschiebung der Kurve, da die Gewichtskraft der angehängten Gewichte keinen Einfluss auf den Abstand hat. Deutlich ist in der Ruhelage ein Rauschen zu erkennen.

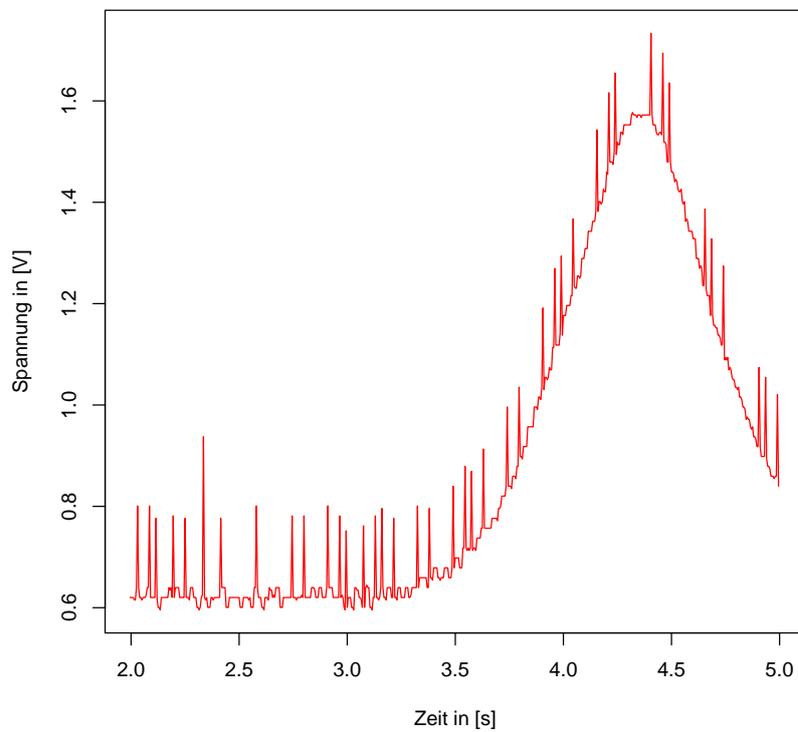


Abbildung 8.3: Vergrößerter Ausschnitt im Bereich 2. - 5. s der Abb. 8.2. Die Peaks tauchen alle 5 bis 6 Messwerte auf und haben einen deutlich höheren Wert als die benachbarten Messwerte.

der Gewichte ihre Gewichtskraft überwinden. Dies führt dazu, dass während der ganzen Übung ein den Gewichten entsprechender Offset mit gemessen wird. Im Abschn. 8.2 wird beschrieben, wie mit der bekannten Gewichts-Spannungskurve aus den SPI-Werten das angehängte Gewicht bestimmt werden kann. Die unregelmäßigen Spitzen in Abb. 8.1 entstehen durch den Probanden und die technischen Gegebenheiten des Kraftfitnessgerätes. Für eine eingehende Betrachtung kann die Kurve nach dem Umrechnen in eine Kraft geglättet oder mit einem Tiefpassfilter bearbeitet werden.

Die Abb. 8.2 zeigt die zu der Kurve des Piezoelements gehörende Zeit-Spannungskurve des GP2Y3A002K0F IR-Sensors. Zu sehen ist, dass das Gewicht am Anfang angehoben wird und erst nach dem Absetzen wieder in die Ruhelage zurückkehrt. Der erste Hub ist kleiner, weil sich der Proband während dieses Hubs erst in die angestrebte Trainingsposition begibt. In der Ruhelage ist deutlich ein Rauschen zu sehen, dieses ist in Abb. 8.3 vergrößert dargestellt. Das Rauschen bilden die Peaks, die alle 5 bis 6 Messwerte (25 - 30 ms) auftreten. Diese Peaks werden vom IR-Sensor ausgegeben. Auch wenn es in keinem Datenblatt angegeben ist, ist davon auszugehen, dass diese Peaks als Schaltpeaks ausgegeben werden. Sie sollen einem externen Controller den Zeitpunkt zum Umschalten auf die nächste LED des IR-Sensors signalisieren. In den gemachten Messungen hat der Schaltpeak keinen Nutzen, da durchgehend mit der selben LED gemessen wird. Aus der Überlagerung der Peakabstände von mindestens 21,5 ms und der Messfrequenz des A/D-Wandlers von 200 Hz ergibt sich, dass jeder 5. bis 6. Wert unbrauchbar ist. Um diese Werte zu ersetzen, kann ein Tiefpassfilter oder ein Peakfilter verwendet werden, der die Werte aus den benachbarten interpoliert (vgl. Abschn. 8.3).

Die Rohdaten des Optokopplers werden in Abb. 8.4 dargestellt. Dabei entspricht ein Plateau und seine Umgebung einer Messung vom Abheben des Gewichts bis zum Absetzen. Während der einzelnen Serien bleibt der Spannungswert des Optokopplers dem angehängten Gewicht entsprechend konstant. Eine Betrachtung der Genauigkeit der Messwerte und deren Weiterverarbeitung wird im Unterabschn. 8.2.1 beschrieben.

8.2 Kalibrierung der Sensoren und Berechnen der Ausgleichsfunktionen

Alle verwendeten Sensoren geben, unabhängig von der zu messenden Größe, als Messsignal eine Spannung heraus. Diese Spannungen hängen mit der Messgröße nicht zwingend linear zusammen. Um aus dem Messsignal wieder die

Messgröße zu erhalten, wird eine Umrechnungsfunktion ermittelt. In diesem Kapitel wird erläutert, auf welche Weise die Umrechnungsfunktionen ermittelt werden, wie sie aussehen und in welchem Rahmen sie gelten.

8.2.1 Kalibrierung des Optokopplers CNY-70

Um zu zeigen, dass sich jedem anhängtem Gewicht ein separater Spannungsbereich zuordnen lässt, wird der Sensor am Gerät wie im regulären Aufbau in Abb. 6.13 befestigt. Der Sensor CNY-70 wird so justiert, dass er in Ruhelage der Gewichte mindestens 0,5 V ausgibt, und es wird mit 50 Hz gemessen. In Abb. 8.4 ist zu sehen, dass die Spannung in Ruhelage über 0,6 V liegt. Die Abbildung zeigt eine Messung von Gewichten zwischen 10 und 55 kg. Höhere Gewichte als 50 kg wurden an diesem Gerät bei keinem Probanden benutzt, somit sind 55 kg als obere Grenze zur Kalibrierung ausreichend. Die entsprechenden Gewichte werden angehoben und für 2 bis 4 Sekunden statisch gehalten. Dazu wurde der Griff, an dem gezogen wird, um das Gewicht zu heben, im gehobenen Zustand an einem Haken eingehängt. Die oberen Plateaus sind jeweils die Zeiten, in denen das Gewicht am Haken hängt. Die unteren Plateaus sind die Zeiten, in denen alle Gewichte aufliegen und auf ein anderes Gewicht umgesteckt wird. Die einzelnen Spannungen, die den verschiedenen Gewichten zugeordnet werden, lassen sich klar trennen. In Abb. 8.5 sind die Mittelwerte der einzelnen Plateaus abgebildet. Der Anfang eines Plateaus wird dazu per Hand bestimmt. Da das Einhängen und Aushängen an den Haken meist einen Peak verursacht, lässt sich der Anfang der Plateaus gut bestimmen. Vom Anfang eines Plateaus an werden die Werte über zwei Sekunden gemittelt und die Standardabweichung bestimmt. Diese Werte lassen sich in der Tab. 8.1 finden. Zusätzlich ist in der Abb. 8.5 die lineare Regression durch die Punkte eingezeichnet und angegeben. Die Geradengleichung ist

$$y = 63,84x - 47,48, \quad (8.1)$$

sie gibt die Lage der Punkte mit einer Genauigkeit von $R^2 = 0,9974$ an. Die Dicke der Punkte ist so gewählt, dass die größte auftretende Abweichung um den Mittelwert eines Plateaus von 0,75 % oder 0,0099 V innerhalb der Punktdicke liegt. Der mittlere Abstand der Spannungsplateaus liegt bei $0,079 \text{ V} \pm 0,014 \text{ V}$, damit ist dieser Abstand um das Achtfache größer als der mittlere Abweichung der Plateaus. Die zu den Spannungsbereichen gehörenden einzelnen Gewichte, lassen sich durch einfaches Runden klar trennen. Die einzelnen Plateaus liegen soweit auseinander, dass selbst bei Messschwankungen die Gewichte eindeutig erkannt werden können. Bei den später durchgeführten

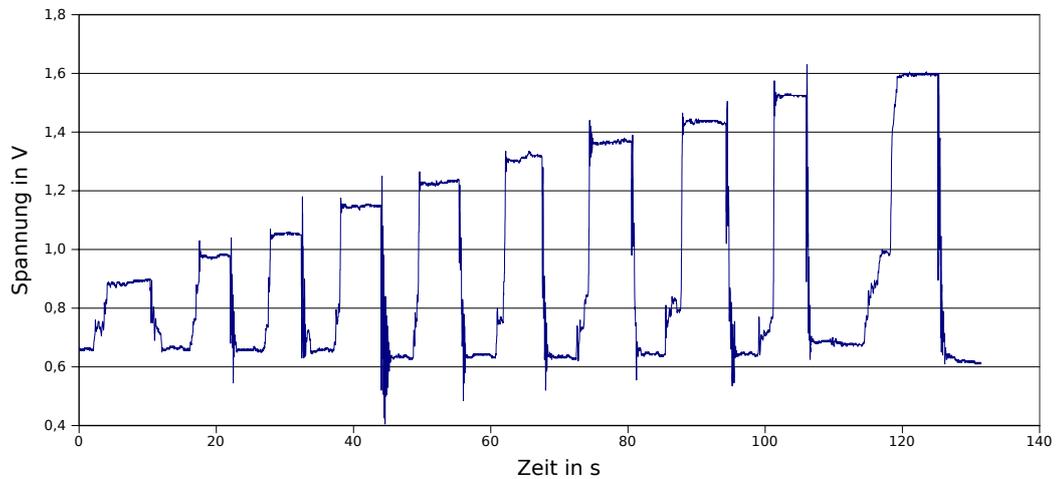


Abbildung 8.4: Darstellung eines Rohdatensatzes, gemessen mit dem Optokoppler CNY-70. Es werden nacheinander Gewichte von 10 bis 55 kg angehängt, angehoben und für mindestens zwei Sekunden gehalten. Es ist zu sehen, dass die Spannung mit dem angehängten Gewicht zunimmt.

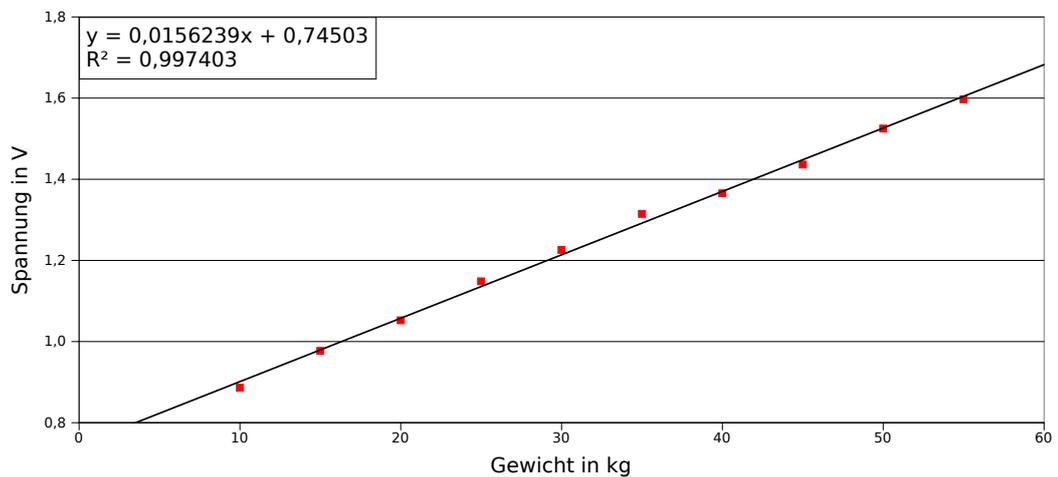


Abbildung 8.5: Darstellung der mittleren Spannung der einzelnen Plateaus, abhängig vom angehängten Gewicht, gemessen mit dem Optokoppler. Die Dicke der Punkte entspricht der maximalen Abweichung um den Mittelwert des jeweiligen Plateaus. Die Gleichung der linearen Regression ist angegeben und die Gerade eingezeichnet.

Angehängtes Gewicht in kg	Mittelwert der Spannung in V	Streuung um Mittelwert in V	Abweichung in %
10	0,88605	0,00547	0,61788
15	0,97617	0,00487	0,49890
20	1,05177	0,00510	0,48448
25	1,14890	0,00314	0,27302
30	1,22597	0,00491	0,40082
35	1,31447	0,00992	0,75457
40	1,36550	0,00524	0,38410
45	1,43752	0,00432	0,30059
50	1,52720	0,00450	0,29474
55	1,59860	0,00348	0,21742
...

Tabelle 8.1: Die mittleren Spannungswerte der einzelnen Gewichte des Optokopplers CNY-70 mit ihrer Streuung um den Mittelwert in Volt und Prozent.

Messreihen wird das angehängte Gewicht bestimmt, indem nach dem Anheben der Gewichte am Beginn der Übung eine halbe Sekunde gewartet wird und dann 30 Messwerte des CNY-70 gemittelt werden. Diese werden gerundet und mit Hilfe der Umrechnungsgleichung (8.1) das dazugehörige Gewicht berechnet. Mit dem CNY-70 ist es möglich, nach einem Kalibrierungsdurchgang das angehängte Gewicht eindeutig zu erfassen.

8.2.2 Umrechnungsfunktion für den IR-Sensor GP2Y3A002K0F

Da die Spannungs-Abstands-Kurve, die der GP2Y3A002K0F ausgibt, nicht linear ist, wird eine Funktion angegeben, mit der die Umrechnung einer Spannung in einen Abstand möglich ist. Mit Hilfe eines optischen Verschiebetisches werden Spannungs-Abstands-Werte aufgenommen. Es wird der gleiche Reflektor verwendet wie bei der Durchführung der Messreihen. Die gemessenen Spannungen bei Abständen von 10 - 200 cm sind in Abb. 8.6 dargestellt, wobei der optimale Messbereich laut Datenblatt [25] des Sensors bei 20 - 150 cm liegt. Bei einem Abstand unter 20 cm sinkt die Spannung wieder, was dazu führt, dass sich Abstände nicht mehr eindeutig zuordnen lassen. Hier folgt die Spannungs-Abstands-Kurve einer anderen Funktion. Bei Abständen über 150 cm liegen die Abweichung der Spannung über 25 %. Um aus der Spannung den Abstand berechnen zu können, wird eine Abstands-Spannungs-Kurve erstellt, d. h. die x- und y- Zuordnung wird vertauscht. Die sich ergebende Abstands-Spannungs-

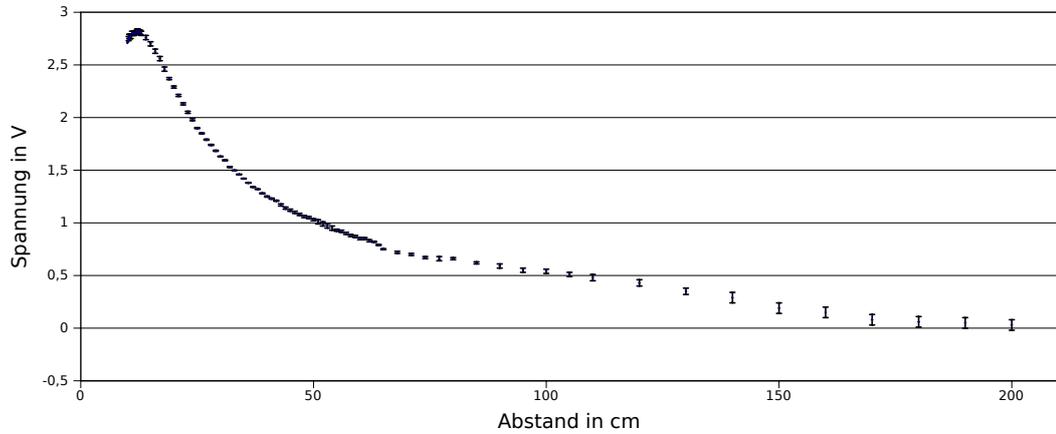


Abbildung 8.6: Darstellung der Messwerte der Spannungs-Abstandswerte des GP2Y3A002K0F IR-Sensors mit eingetragener Messungenauigkeit. Mit zunehmendem Abstand spielt die Messungenauigkeit eine größere Rolle.

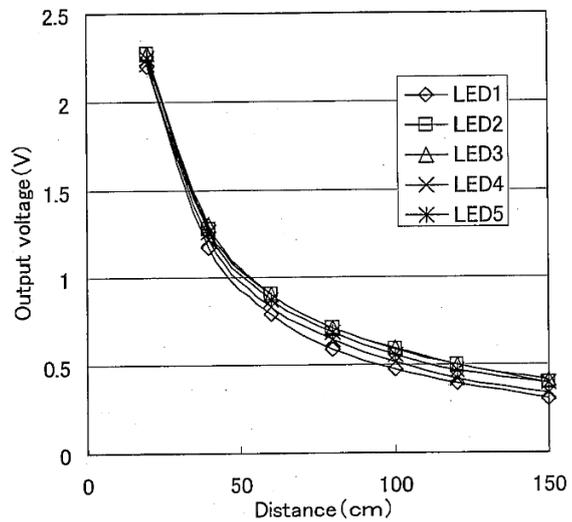


Abbildung 8.7: Spannungs-Abstands-Kurve wie sie im Datenblatt von SHARP für den GP2Y3A002K0F dargestellt wird. Hier die Kurven für alle fünf LEDs. Es wurden über den gesamten Abstandsbereich nur sieben Messungen gemacht.

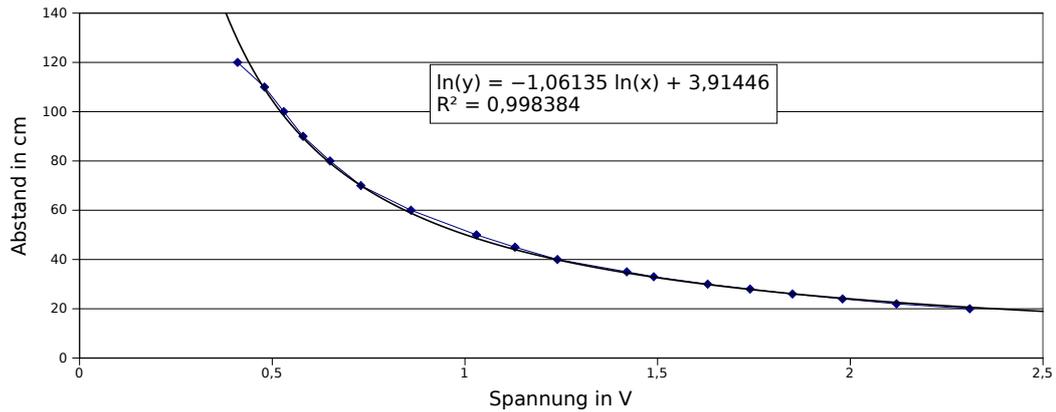


Abbildung 8.8: Abstands-Spannungs-Kurve des IR-Sensors GP2Y3A002K0F im Bereich von 20 - 120 cm. Die Fitkurve ist eingezeichnet, ihre Funktion und ihr Regressionskoeffizient sind angegeben. Sie ermöglicht das kontinuierliche Umrechnen von gemessenen Spannungen in Abstände.

Kurve wird im Bereich 20 - 120 cm mit einer Funktion der Form

$$f(x) = a \cdot x^b \quad (8.2)$$

gefittet (vgl. Abb. 8.8). Der Messbereich wird auf einen Abstand von 120 cm eingeschränkt, damit erhöht die Fitt-Funktion ihre Genauigkeit von 98,12 % auf 99,83 %. Dies ist möglich, da keine Abstände größer als 120 cm gemessen werden, so dass die Schwankungen des Signals unter 12 % liegt. Es ergibt sich die Funktion

$$f(x) = 50,12 \cdot x^{-1,06} \quad (8.3)$$

mit dem Regressionskoeffizienten von $R^2 = 0,9984$. Die maximale in dieser Arbeit mit diesem Sensor auftretende Auslenkung liegt bei 85 cm, dies ist der Abstand zwischen Sensor und Reflektor in Ruhelage, dabei beträgt die Messgenauigkeit 3,39 %, das entspricht $\pm 2,74$ cm. Der Abstandsbereich in dem die Bewegung erfasst wird, liegt bei unter 75 cm, da das Gewicht beim Trainieren mindestens um 10 cm angehoben werden muss. In diesem Bereich liegt der Messgenauigkeit bei 1,49 %, dies entspricht $\pm 1,10$ cm. Die Funktion aus Gl. (8.3) erlaubt das Umrechnen von Spannungen in Abstände im Großteil des Messbereichs mit einer Genauigkeit von 1 cm oder weniger. Eine Möglichkeit, die Genauigkeit mit Hilfe eines zweiten IR-Sensors im ganzen Bereich auf einen Zentimeter zu bringen, wird in Abschn. 9.3.1 erläutert.

8.2.3 Umrechnungsfunktion für den IR-Sensor GP2Y0A02YK0F

Da der IR-Sensor GP2Y0A02YK0F nach dem gleichen Prinzip wie der IR-Sensor GP2Y3A002K0F arbeitet, kann die gleiche Methode verwendet werden, um eine Umrechnungsfunktion von Spannung in Abstand zu erhalten. Die Messwerte im Bereich 20 - 120 cm sind in Abb. 8.9 dargestellt. Für die Regressionskurve wird eine Funktion des Typs

$$f(x) = a + b \cdot \ln(x - c) \quad (8.4)$$

verwendet, um eine möglichst hohe Übereinstimmung zu erreichen. Die Spannungs-Abstands-Umwandlungsfunktion lautet dann

$$f(x) = 44,62 - 34,37 \cdot \ln(x - 0,37), \quad (8.5)$$

mit einem Regressionskoeffizienten von $R^2 = 0,9986$.

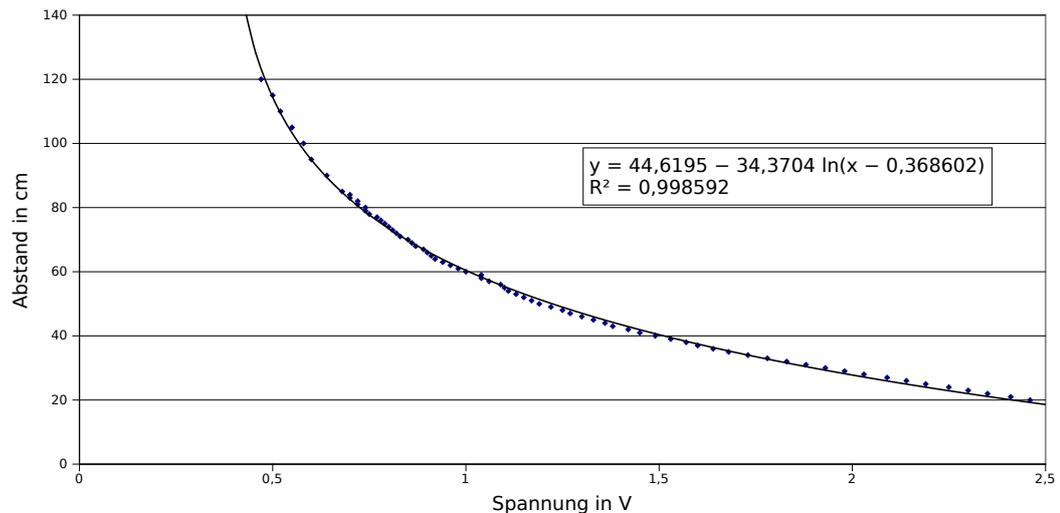


Abbildung 8.9: Darstellung der Spannungs-Abstands-Kurve im Bereich 20 - 120 cm des IR-Sensors GP2Y0A02YK0F, gemessen an einem Verschiebetisch. Die Regressionskurve und ihre Funktion sind mit dargestellt.

8.2.4 Kalibrierung des Piezoelements

Das Piezoelement von Kistler ist in den Kraftadapter eingebaut. Der Verstärker wird bei angehängtem Gewicht von 10 kg auf 0,25 V eingestellt und bis zum Ende aller Messungen nicht verändert. Umgerechnet entspricht 1 N somit 0,025469 V. Daraus ergibt sich, dass bei einem linearen Verhalten die Spannungen der Geradengleichung $y = 0,025484 \cdot x$ lauten müsste. Dies wurde

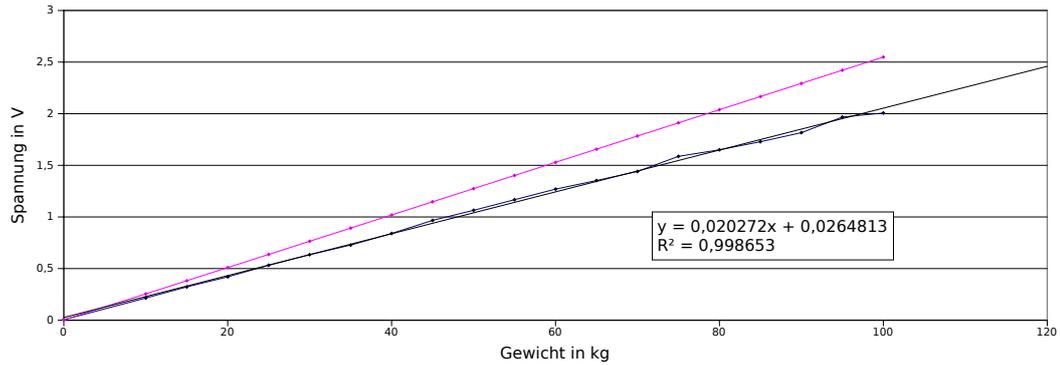


Abbildung 8.10: Darstellung der Linearität des Piezoelementes. Die obere Gerade stellt die erwarteten Werte dar. Die untere Gerade zeigt die gemessene Spannung bei angehängten Gewichten und die dazugehörige Gleichung der linearen Regression.

mit mehreren geeichten 5 kg Scheiben überprüft und bestätigt. Die erwartete Gerade ist in Abb. 8.10 in rot als obere Gerade dargestellt. Um die realen Spannungen, die bei den Gewichten an den Kraftgeräten auftreten, zu bestimmen, werden die Gewichte von 10 - 100 kg, die am Gerät verbaut sind, nacheinander angehängt, angehoben und statisch gehalten. Diese Messwerte sind die Punkte entlang der unteren Geraden in Abb. 8.10. Aus den Messwerten ergibt sich durch lineare Regression eine andere Gleichung, mit

$$g(x) = 0,02027 \cdot x + 0,02648. \tag{8.6}$$

Die Differenz zwischen der erwarteten und der bestimmten Gleichung entsteht dadurch, dass die Beschriftung an den Gewichten nicht dem realen Gewicht entspricht. Für die Umrechnung der Werte wird im Weiteren die Gl. (8.6) verwendet, da das Trainingsgewicht über die Angaben am Gerät erfasst wird. Die ungenaue Angabe auf den Gewichten am Gerät betrifft auch die Gewichtsangaben des Optokopplers. Dies wird aber nur für die Bestimmung des angehängten Gewichts benutzt, sonst wird mit den real auftretenden Kräften gearbeitet.

8.3 Mögliche Filter

Wie in Abschn. 8.1 beschrieben wurde, ist es nicht möglich, aus den Rohdaten der IR-Sensoren brauchbare Kräfte zu berechnen. Die auftretenden Peaks führen, durch die lokal auftretenden enormen Anstiege beim Umrechnen der Abstände in Beschleunigungen, zu extremen Momentanbeschleunigungen. Die lokale Beschleunigung an einer Peakstelle ist in diesem Fall um das Zehnfache größer, als die maximale Beschleunigung der erwünschten Bewegung. Ziel ist es, durch lokales Glätten der Messwerte den globalen Kurvenverlauf hervorzu-

heben.

8.3.1 Peakfilterung

In Abb. 8.3 sind die Schaltpeaks, die vom IR-Sensors erzeugt werden, deutlich zu erkennen. Um diese Ausreißer nicht aus der SIR herausnehmen zu müssen, können sie mit einer einfachen Wenn-Dann-Schleife aus ihren Nachbarwerten interpoliert werden. Ist ein Messwert um den Faktor ψ größer als sein vorangegangener, wird er durch den Mittelwert seines vorangegangenen und nachfolgenden Wertes ersetzt. ψ ergibt sich aus der maximalen Steigung des geglätteten Graphen, die mit $1 \frac{\text{V}}{\text{s}}$ berechnet wird. Das bedeutet, dass der wünschenswerte Anstieg der Werte der SIR Messwerte, von einem Wert auf den nächsten, bei einer Messfrequenz von 200 Hz maximal 0,005 beträgt. Damit kann ψ zwischen 0,005 und 0,1 liegen. Ist $\psi > 0,1$, werden die Peaks nicht mehr während der ganzen Messung erkannt. Für eine eindeutige Filterung der Peaks wurde $\psi = 0,05$ gewählt. In Abb. 8.11 sind die Rohdaten und die peakgefilterten Messwerte der SIR dargestellt. Es ist zu sehen, dass alle Peaks verschwunden sind. Dennoch erzeugt die Peakfilterung keine so gleichmäßige Kurve, wie andere Filter. Das liegt daran, dass zur Bildung des Mittelwerts, der den Peakwert ersetzt, nur die jeweils benachbarten herangezogen werden.

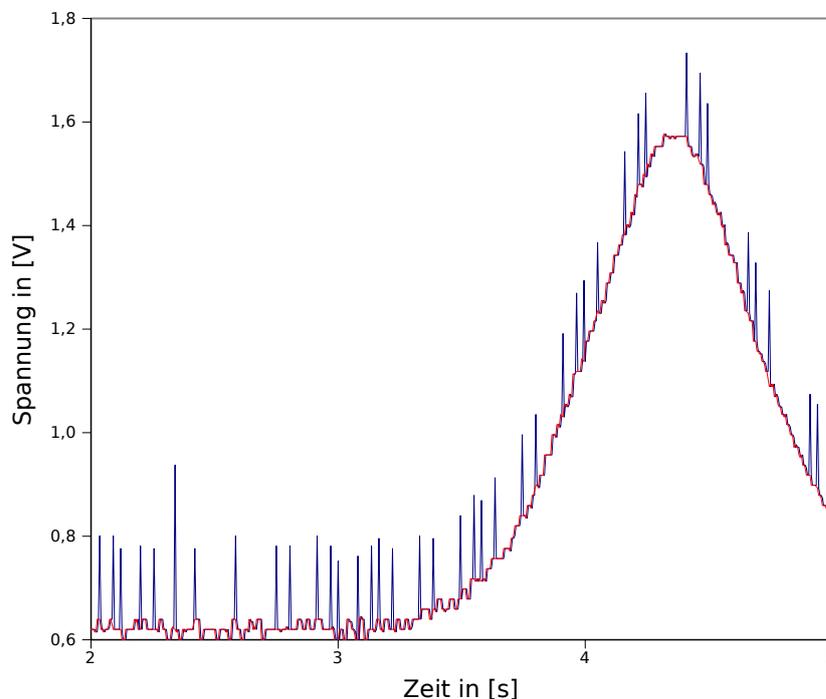


Abbildung 8.11: Darstellung der SIR Werte vor (blau) und nach (rot) der Peakfilterung im Fenster von 2. bis 5. Sekunde. Es ist der gleiche Ausschnitt wie in Abb. 8.3 abgebildet. Die Peakfilterung erzeugt keine gleichmäßige Kurve.

8.3.2 Tiefpassfilterung

Eine weitere Möglichkeit, die Peaks aus den SIR Werten zu filtern, ist ein Tiefpassfilter. Hier werden festgelegte Frequenzbereiche herausgefiltert. Um die Grenzfrequenz zu bestimmen, wird der erwünschte Frequenzbereich der Messung bestimmt. Der Trainierende am Gerät schafft es mit einer maximalen Frequenz von 1 Hz einen Hub zu machen. Sollen neben dieser Bewegung auch noch kleinere Schwingungen, die beim Halten der Gewichte entstehen, erfasst werden, empfiehlt es sich eine Grenzfrequenz von 6 Hz zu wählen. Dabei wird die Steilheit der Flanke mit 40 gewählt. Die gefilterte Kurve ist in Abb. 8.12 rot dargestellt zu sehen. Durch die Tiefpassfilterung entsteht eine glattere Kurve, als bei der Peakfilterung. Dies ist für die weitere Verarbeitung der Daten von Vorteil, darum sind die hier vorgestellten Daten mit dem gerade beschriebenen Tiefpassfilter vorgeglättet.

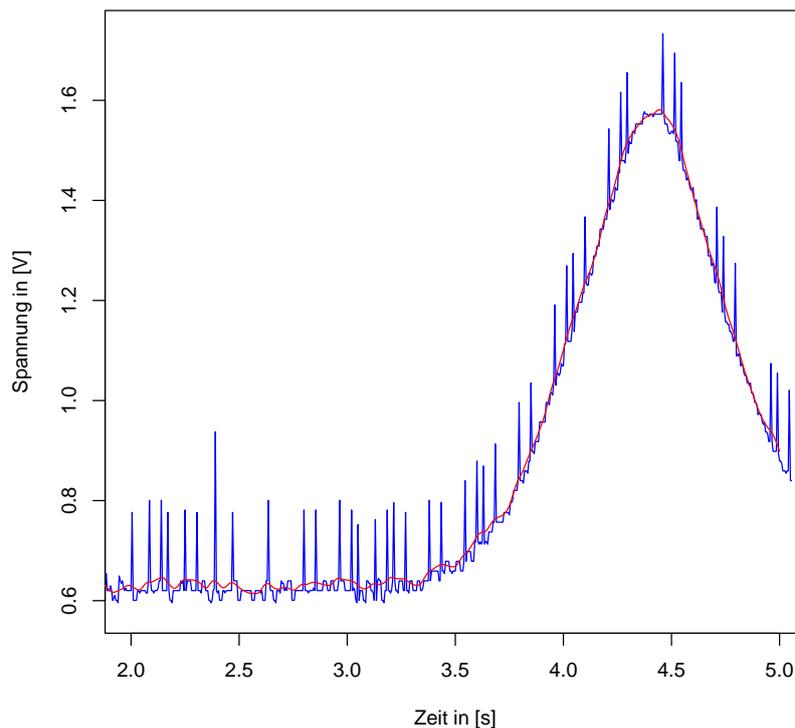


Abbildung 8.12: Vergleich der originalen Kurve SIR (blau) und der Tiefpassgefilterten Werte (rot) bei einer Grenzfrequenz von 6 Hz im Teilbereich 2. bis 5. Sekunde. Alle Peaks sind herausgefiltert, die Kurve ist annähernd deckungsgleich mit den Rohdaten und enthält keine Stufen und Sprünge.

8.3.3 Andere Filter

Um eine möglichst gleichmäßige Kurve zu erhalten, gibt es auch die Möglichkeit, die Messwerte mit anderen Filtern zu glätten. Dazu wird ein gleitendes Mittel mit einer Gewichtung benötigt. Um einen dieser Filter zu verwenden, muss ein Fenster angegeben werden, in dem gemittelt wird, und eine Funktion, die die Gewichtung der Werte innerhalb des Fensters angibt. Die Größe des Fensters gibt an, über wieviele Werte gemittelt wird. Die Funktion kann zum Beispiel ein einfaches Dreieck oder eine Gaußfunktion sein. Die verwendete Funktion sollte von der Form her passend zur gewünschten Kurve gewählt werden. Für die hier angewandten Mittelungen wurden keine Gewichtungen verwendet, da Versuche mit den gängigsten Funktionen (Hanning, Hamming, Bartlett, Blackman) keine überzeugenden Ergebnisse brachten. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass die Messergebnisse sich mit entsprechendem Aufwand verbessern lassen. Ein Vorschlag dazu wäre, einen Savitzky-Filter zu verwenden, da dieser in der Biomechanik der Standardfilter für Kraftkurven ist.

8.4 Berechnung der Kraftwerte aus Messwerten des IR-Sensors und des Piezoelements

Um die Messdaten von dem Piezoelement (PIE) und dem IR-Sensor (IRS) vergleichen zu können, müssen die gemessenen Spannungen in Kräfte umgerechnet werden. Die Rohdaten sind Spannungen im Bereich von ± 5 V. Das Ergebnis sollen zwei Datenreihen in Newton sein. Die Rohdaten sind in drei Spalten erfasst, Spalte 1 enthält die Zeitschritte der Einzelmessungen von 0,005 s, das entspricht 200 Hz. In der 2. Spalte sind die Spannungen des PIEs in Volt. Die 3. Spalte enthält die Spannungen des IRSs nach der Tiefpassfilterung in Volt. Die jeweiligen Spalten werden im Folgenden als Reihe verstanden und mit einem \bar{S} gekennzeichnet. Dabei ist s_i das i -te Element der Reihe.

$$\bar{S} = (s_0, s_1, s_2, \dots, s_n) \quad (8.7)$$

8.4.1 Die Zeitreihe und das Basisintervall

Die die erste Spalte enthält Zeitreihe \bar{Z} . Da die Werte einen konstanten Abstand von 0,005 ms haben, lassen sie sich in ein Intervall $I = 0,005$ zusammenfassen. Die vergangene Zeit Δt , die zum Wert s_i gehört, ist

$$\Delta t = I \cdot i \quad (8.8)$$

8.4.2 Die Spannungsreihe des Piezoelement und des IR-Sensors

Die Spannungen des PIEs werden in der Piezoelementspannungsreihe (SPI)

$$\bar{U}_P = (u_{P_0}, u_{P_1}, u_{P_2}, \dots, u_{P_n}) \quad (8.9)$$

und die Spannungen des IRSs in der IR-Sensorspannungsreihe (SIR)

$$\bar{U}_{IRS} = (u_{IRS_0}, u_{IRS_1}, u_{IRS_2}, \dots, u_{IRS_n}) \quad (8.10)$$

dargestellt.

8.4.3 Berechnung der Kraftreihe aus der Spannungsreihe des Piezoelements

Die Kraftreihe

$$\bar{F}_P = (f_{P_0}, f_{P_1}, f_{P_2}, \dots, f_{P_n}) \quad (8.11)$$

lässt sich mit einem Umrechnungsfaktor $v = 0,0025484$ bestimmen. v ergibt sich aus dem Normwert für das PIE. Der Sensor ist so genormt, dass er bei einem Gewicht von 10 kg eine Spannung von 0,25 V anzeigt. Das bedeutet $0,0025484 \text{ V} \hat{=} 1 \text{ N}$, bei einer Erdbeschleunigung von $9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Die Verknüpfung der Spannung mit der Kraft ist linear und ist mit

$$f_{P_i} = \frac{u_{P_i}}{v} \quad (8.12)$$

gegeben.

8.4.4 Berechnung der Kraftreihe aus der Spannungsreihe des IR-Sensors

Um die Kraft aus der Spannung des IRSs zu berechnen, muss erst die Spannung in den ihr entsprechenden Weg umgewandelt werden, dann dieser in eine Geschwindigkeit und diese in eine Beschleunigung. Danach muss die Beschleunigung in eine Kraft umgerechnet werden und die durch die Berechnungen entstandenen Verschiebungen wieder rausgerechnet werden.

Berechnung des Wegs aus der IR-Sensorspannung

Die Spannungs-Weg-Kurve ist nicht linear. Darum muss zur Umrechnung die in Unterabschn. 8.2.2 bestimmte Funktion (Gl. (8.3))

$$f(x) = 50,22 \cdot x^{-1,06}$$

verwendet werden. Die Wegreihe

$$\bar{S} = (s_0, s_1, s_2, \dots, s_n) \quad (8.13)$$

ergibt sich dann aus

$$s_i = \frac{f(u_{IRS_i})}{100}. \quad (8.14)$$

Damit s_i , die Maßzahl für den Weg, die Größenordnung von Metern hat, wird durch 100 dividiert.

Berechnung der Geschwindigkeiten aus den Wegen

Die Geschwindigkeit v berechnet sich aus der Veränderung des Ortes Δl durch die dabei vergangene Zeit $\Delta\tau$ mit

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta\tau} \quad (8.15)$$

An dieser Stelle wird eine Glättung der Kurve durch ein gleitendes Mittel eingeführt.

$$\Delta l_i = \frac{\sum_{j=\kappa+i}^{2 \cdot \kappa - 1 + i} s_j - \sum_{h=i}^{\kappa - 1 + i} s_h}{\kappa} \quad (8.16)$$

Wobei $2 \cdot \kappa$ die Anzahl der Werte ist, über die gemittelt wird. Durch die Mittelung ergibt sich die mittlere Geschwindigkeit über dem Intervall $\Delta\tau = \kappa \cdot I$. Für die Geschwindigkeitsreihe

$$\bar{V} = (v_0, v_1, v_2, \dots, v_n) \quad (8.17)$$

ergibt sich dann

$$v_i = \frac{\Delta l_i}{\Delta\tau} = \frac{\sum_{j=\kappa+i}^{2 \cdot \kappa - 1 + i} s_j - \sum_{h=i}^{\kappa - 1 + i} s_h}{\kappa^2 \cdot I}. \quad (8.18)$$

Berechnung von Beschleunigungen aus Geschwindigkeiten

Die Beschleunigung berechnet sich parallel zur Geschwindigkeit durch

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta \tau} \quad (8.19)$$

Hinzu kommt wiederum ein gleitendes Mittel. Damit ist die Beschleunigungsreihe

$$\overline{A} = (a_0, a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (8.20)$$

mit

$$a_i = \frac{\Delta v_i}{\Delta \tau} = \frac{\sum_{j=\kappa+i}^{2 \cdot \kappa - 1 + i} v_j - \sum_{h=i}^{\kappa - 1 + i} v_h}{\kappa^2 \cdot I} \quad (8.21)$$

Wichtig ist es an dieser Stelle, darauf hinzuweisen, dass für die Berechnung der Geschwindigkeit und der Beschleunigung nicht das gleiche κ verwendet werden muss. Im Abschn. 8.5 wird die optimale Kombination von κ_1 und κ_2 untersucht.

Berechnung der Kraftreihe des IR-Sensors

Kraft berechnet sich mit $F = m \cdot a$, wobei m die angehängt Masse in kg ist. Um die Kraftreihe

$$\overline{F_{IRS}} = (f_{IRS_0}, f_{IRS_1}, f_{IRS_2}, \dots, f_{IRS_n}) \quad (8.22)$$

zu erhalten, muss zusätzlich ein Offset G dem angehängten Gewicht entsprechend addiert werden, da der IRS das Gewicht nicht erfasst. Dazu wird die Spannung des Optokopplers in eine Masse umgerechnet und diese dann in ein Offset in Newton. In Unterabschn. 8.2.1 wird dies erläutert und eine Umrechnungsfunktion Gl. (8.1) angegeben. Der Offset bestimmt sich dann durch $G = \frac{g(x)}{v}$, wobei $g(x)$ der Funktion Gl. (8.6)

$$g(m) = 0,02027 \cdot m + 0,02648 \quad (8.23)$$

entspricht. Für $\overline{F_{IRS}}$ ergibt sich dann

$$f_{IRS_i} = m \cdot a_i + \frac{g(m)}{v} \quad (8.24)$$

8.5 Vergleich der Kraftkurven des IR-Sensors und des Piezoelements

In diesem Kapitel soll verglichen werden, inwieweit die durch den IR-Sensor erhaltene Kraftkurve identisch ist mit der Referenzkurve, die durch das Piezoelement gewonnen wurde. Wie in den vorangegangenen Kapiteln deutlich wird, müssen die SIR-Werte geglättet werden, um eine mit den Kraftwerten des Piezoelements (KPIE) vergleichbare Kraftkurve des IR-Sensors (KIR) zu erhalten. Dabei werden die erfassten Daten verändert und es geht ein Teil der Information verloren. Im Folgenden soll geklärt werden, welche Faktoren einen Einfluss auf die Qualität der Kurven haben und wie die Information rekonstruiert werden kann. Als erste Faktoren, die einen Einfluss auf die Qualität der KIR-Kurve haben, sind die beiden Glättungsfaktoren κ_1 und κ_2 zu nennen, die die Fensterweite bei der Berechnung der Geschwindigkeit und der Beschleunigung angeben. Der zweite Faktor ist der Glättungsfaktor der KPIE-Kurve, bzw. gibt dieser Faktor an, ob überhaupt geglättet wurde. Der dritte Faktor legt fest, welcher Teil der Kraftkurve der entscheidende ist. Sollen die Messwerte in der Ruhelage mit in den Vergleich einbezogen werden, oder erst die Werte, die ab Beginn der Hübe erfasst werden? Für alle drei Faktoren ist entscheidend, mit welchem Ziel die Daten untersucht werden sollen. Da die hier erhobenen Daten dazu dienen sollen, die im Unterabschn. 2.4.1 hergeleiteten Parameter zu erfassen, werden diese als Untersuchungsziele genommen und die drei Faktoren in Bezug auf sie optimiert. Zunächst wird die ungeglättete KPIE-Kurve mit der KIR-Kurve abhängig von $\kappa_{1,2}$ untersucht. Danach werden die Daten in Bezug auf Explosivkraft, Kraftmaxima und -minima, Leistung und Reaktivkraft untersucht.

Glättung der KIR-Werte

Wie genau die KIR-Kurve die KPIE-Kurve wiedergibt, hängt vom Tiefpassfilter und von der Größe der κ_s ab. In Abb. 8.13 ist die Abweichung pro Wert der KIR von der KPIE über κ_1 und κ_2 aufgetragen. Aus dieser Berechnung ergibt sich die von der KPIE-Kurve am wenigsten abweichende Kurve mit $\kappa_1 = 61$ und $\kappa_2 = 62$ und einer Abweichung von 18,70 N pro Wert im Mittel. Wird die angehängte Gewichtskraft von 329,54 N als Normalwert genommen, bedeutet dies eine mittlere Abweichung von 5,68 %. Die κ_s wurden durch Differenzbildern der geglätteten KIR- und der original KPIE-Kurve für alle Kombinationen von κ_1 und κ_2 aus dem Bereich von 10 bis 110 berechnet. Ein Querschnitt verschiedener κ -Werte ist in Abb. 8.14 zu sehen. Hier ist jeweils die KPIE-Kurve über-

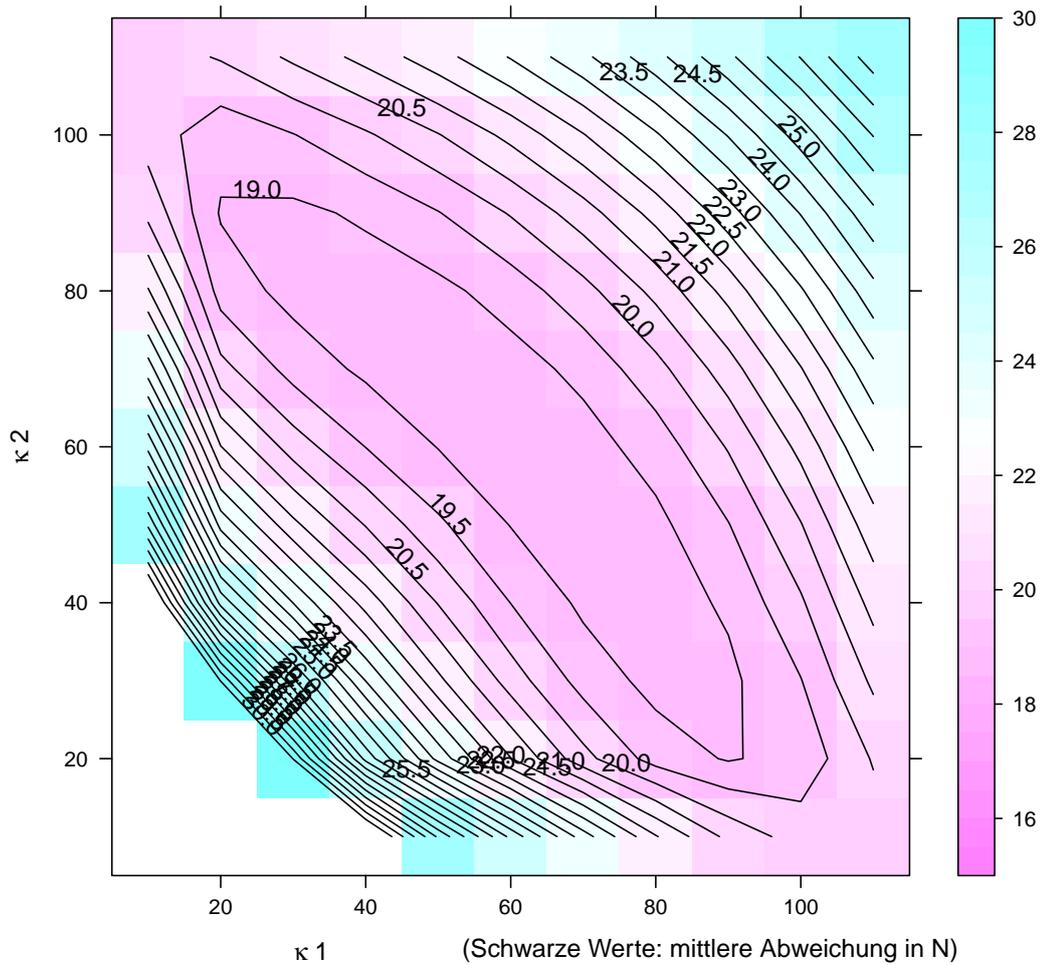


Abbildung 8.13: Konturplot für Werte von $\kappa = 20 - 110$. Darüber aufgetragen die mittlere Abweichung pro Wert in N. Die kleinste Abweichung liegt im Bereich unter 19 N. Rechnerisch wird der Bestwert bei $\kappa = 61/62$ mit 18,70 N angegeben.

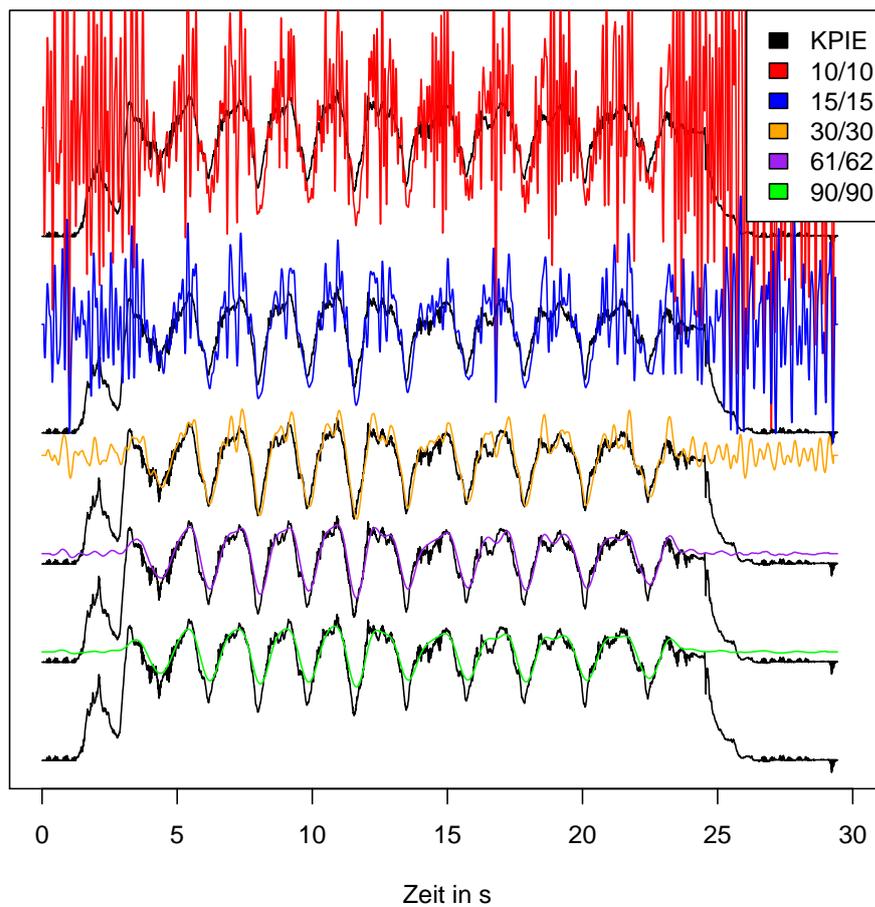


Abbildung 8.14: KIR-Graphen mit verschiedenen κ -Werten über eine Serie mit zehn Hüben. In schwarz jeweils die KPIE-Kurve. Mit zunehmenden κ nimmt das Rauschen und das genaue Erfassen der Spitzen ab. Die mathematisch größte Übereinstimmung mit der KPIE-Kurve hat der purpurne Graph, $\kappa=61/62$.

lagert mit einer gelätteten KIR-Kurve mit unterschiedlichen κ -Werten über eine Serie mit zehn Hüben aufgetragen. Die rote 10/10-Kurve zeigt deutlich, dass bei zu geringer Glättung kaum Informationen aus der KIR-Kurve zu erhalten sind. Bei einer Glättung von 30/30 (oranger Graph) sind die Minima der KPIE-Kurve gut wiedergegeben, dies wird in Unterabschn. 8.6.1 genauer untersucht. Der purpurne Graph bei 61/62 ist die mathematisch Kurve mit der größten Übereinstimmung. Der letzte Graph in grün zeigt, dass bei zu starker Glättung der Kurvenverlauf nicht mehr vergleichbar ist.

Glättung der KPIE-Werte

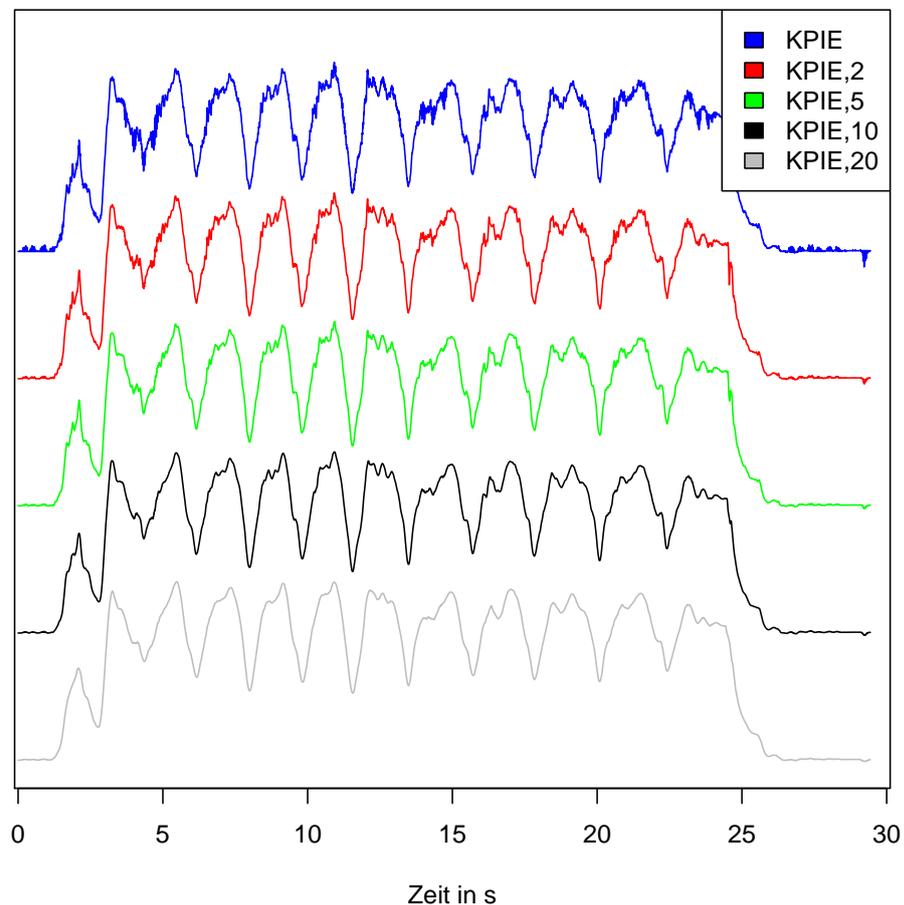


Abbildung 8.15: Darstellung der KPIE-Kurve mit verschiedenen gleitenden Mitteln. Die Zahl nach dem Komma gibt an, über wieviele Werte gemittelt wird. Mit leichten Glättungen bis zu 10 Werten können lokale Spitzen verringert werden. Eine Glättung mit mehr als 10 Werten verringern die Aussagekraft der Kurven zu stark.

Welchen Einfluss das Glätten der KPIE-Kurve hat, ist in Abb. 8.15 zu sehen.

Die rohdaten KPIE-Kurve hat lokal Sprünge, die bei der Weiterverarbeitung der Werte zu Problemen führen. Durch das Glätten entsteht eine gleichmäßige Kurve. Mit zunehmender Glättung gehen Informationen verloren. Für die weitere Verwendung der KPIE-Daten wird eine Glättung von weniger als 10 Werten verwendet.

Bestimmung des relevanten Ausschnittes

Für die Analyse der Kraftkurven gibt es drei relevante Betrachtungsebenen, diese sind in Abb. 8.16 dargestellt. Zuerst den ganzen Trainingsdurchgang mit 10 Hüben (Abb. 8.16 (a)), hier lässt sich sehen, wie viele Hübe gemacht wurden und mit welcher Geschwindigkeit die Übung absolviert wird. Als zweite Ebene (Abb. 8.16 (b)) werden nur die 10 Hübe betrachtet, hier lassen sich die einzelnen Bewegungen nachvollziehen und die Maximas bestimmen. Als dritte Ebene (Abb.:8.16 (c)) wird ein einzelner Hub betrachtet, an ihm lässt sich die Bewegung genauer analysieren, wo zum Beispiel Spitzen auftreten, und es lässt sich der Punkt des größten Kraftanstiegs bestimmen.

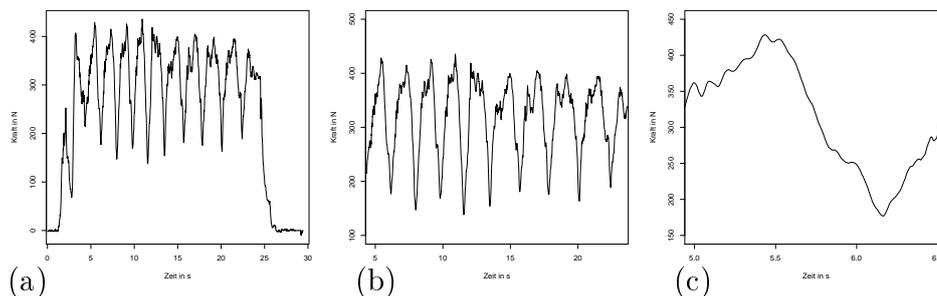


Abbildung 8.16: Drei Ebenen der Darstellung einer Kraft-Kurve. Dargestellt eine KPIE-Kurve, (a) die gesamte Kurve (0. - 30. Sekunde), (b) nur die Hübe (5. - 23. Sekunde) und (c) ein einzelner Hub (5 - 6,5 Sekunde).

Mit den bis hierhin gewonnenen Informationen soll nun überprüft werden, wie genau die KIR-Daten die sportwissenschaftlichen Größen wiedergeben.

8.6 Genauigkeit der IR-Messung im Bezug auf sportwissenschaftliche Größen

Von den im Unterabschn. 2.4.1 vorgestellten Leistungsparametern werden im Folgenden die Maximalkraft anhand der Extremwerte, die Explosivkraft anhand des maximalen Kraftanstiegs und die Leistung aus den erhobenen Daten berechnet und dargestellt. Danach wird der Versuch unternommen, Aussagen

über die Reaktivkraft zu treffen. Als letztes werden einzelne Trainingsdurchgänge einzelner Probanden auf Auffälligkeiten hin untersucht. Es wird jeweils für eine betrachtete Größe die beste Annäherung numerisch bestimmt und das Maß der Abweichung angegeben. Die so gewonnenen Korrekturwerte werden dann auf andere Messreihen übertragen.

8.6.1 Maximalkraft

Es soll verglichen werden, ob die Maxima und Minima, die in den Kraft-Zeit-Kurven des Piezoelements und des IR-Sensors an den gleichen Stellen liegen, den gleichen Wert haben. Um die Kraftspitzen möglichst sauber zu erfassen, wird zunächst der Zeitpunkt bestimmt und danach die Höhe des Extremums. Beide Vorgänge werden nach den drei oben genannten Faktoren aufgeschlüsselt und der optimale Weg vorgestellt.

Bestimmung der Zeitpunkte der Extremstellen

Zunächst werden die Zeitpunkte bestimmt, an denen ein Extremum auftritt. Dabei wird nur der Teil der Messung verwendet, in dem auch Hübe stattfinden; Anheben, Ablegen und Ruhelage werden nicht mit betrachtet. Die Extremstellen der KPIE-Werte werden dadurch bestimmt, dass beim Durchlaufen der Werte, nach jedem Überqueren der Gewichtskraftgenze bei 329,54 N, bis zum nächsten Überqueren der Grenze das lokale Extremum bestimmt wird. Die so gewonnenen Zeitpunkte der Extrema werden nun mit denen der KIR-Werte verglichen, die auf die gleiche Weise gewonnen werden, dabei aber verschiedene κ -Werte durchlaufen. Bei κ -Werten von 40/90 stimmt der mittlere Zeitpunkt der Maxima der beiden Graphen am besten überein. Die mittlere zeitliche Verschiebung der Maxima liegt in diesem Fall bei 0,08 s, das entspricht 16 Werten. Die κ -Werte mit der geringsten mittleren Abweichung der Kraft der Maxima liegen bei 88/10. Für diesen Wert sind die Graphen und ihre Maxima in Abb. 8.17 dargestellt und in der Tab. 8.2 aufgeführt. Die Abstände der Maxima liegen bei 0,24 - 9,47 N, das macht im Durchschnitt 3,71 N und eine mittlere absolute Abweichung von 0,90 %. Für die Bestimmung der Minima wurde ein κ -Wert von 29/25 berechnet und damit wird eine mittlere Abweichung von 6,10 N erreicht, das entspricht 2,70 % (vgl. Abb. 8.18).

Maximalkraftvergleich als Kraftzuwachs

Werden zwei Messreihen so verglichen, als wären sie zwei Trainingsdurchgänge eines Probanden, zwischen denen eine mehrwöchige Trainingsphase liegt, dann lassen sich aus den Maximalkraftwerten, abhängig vom Trainingsgewicht,

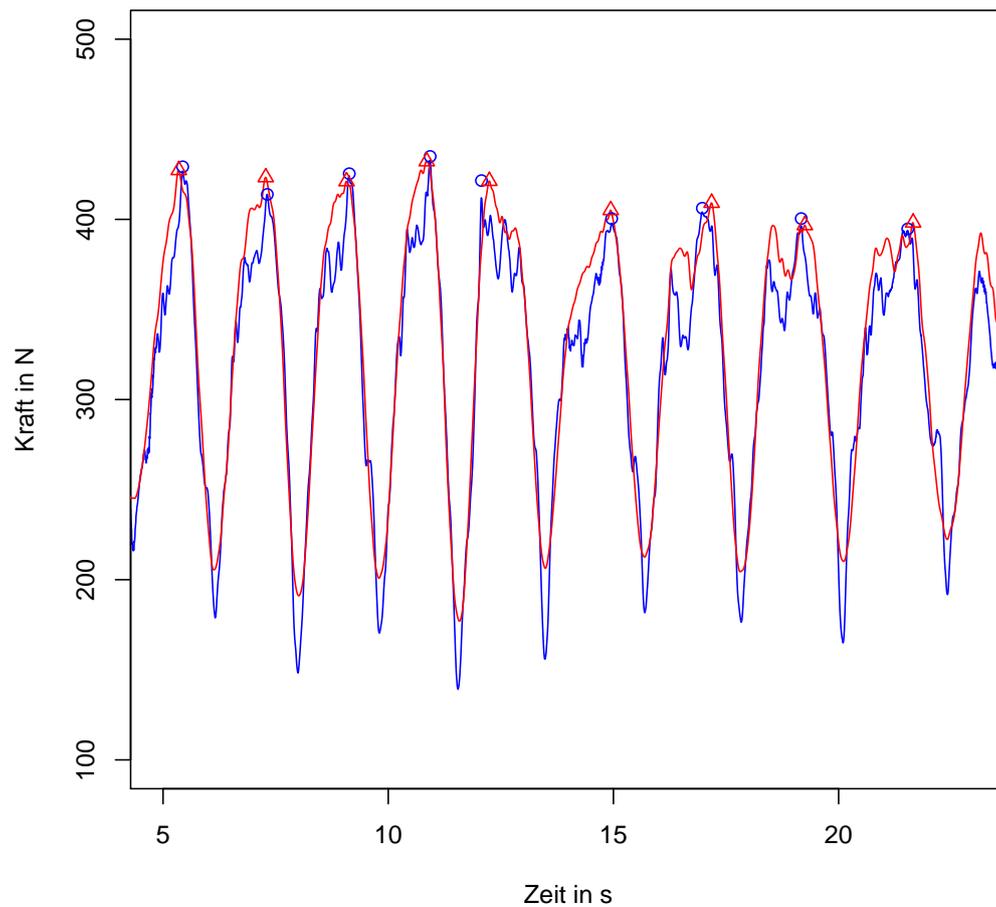


Abbildung 8.17: Aus Messung GHZ-P17 die Kraftkurve KPIE in blau und PIR in rot. Dreiecke markieren die lokalen Maxima der KIR und Kreise die lokalen Maxima der KPIE. Die KIR-Werte sind geglättet mit $\kappa=88/10$, dem Wert der geringsten mittleren Abweichung der Maxima.

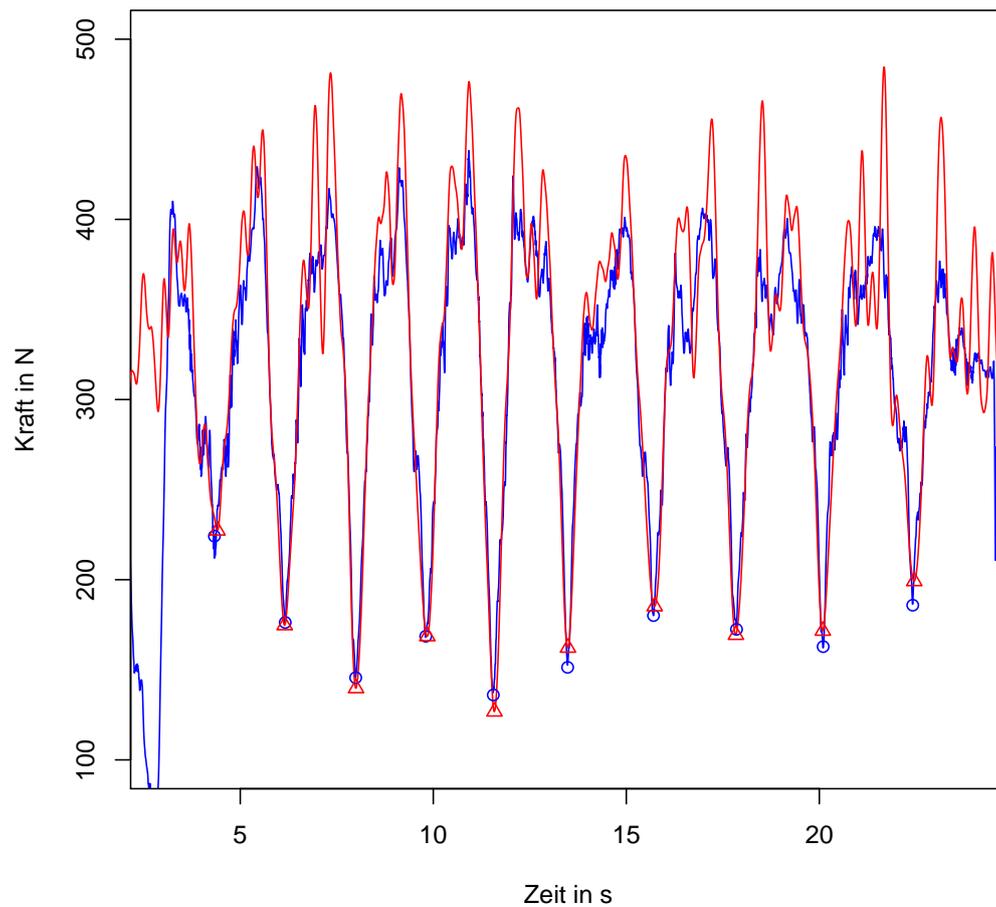


Abbildung 8.18: Aus Messung GHZ-P17 die Kraftkurve KPIE in blau und PIR in rot. Dreiecke markieren die lokalen Minima der KIR und Kreise die lokalen Minima der KPIE. Die KIR-Werte sind geglättet mit $\kappa = 29/25$, dem Wert der geringsten mittleren Abweichung der Minima.

	Maxima KIR in N	Maxima KPIE in N	Abweichung in N	Abweichung in %
	427,31	429,19	1,88	0,44
	423,33	413,86	9,47	2,26
	421,10	425,36	4,26	1,01
	432,17	434,94	2,77	0,64
	421,29	421,53	0,24	0,06
	405,11	400,45	4,66	1,16
	409,12	406,20	2,92	0,72
	396,72	400,45	3,73	0,94
	398,17	394,70	3,47	0,88
Mittel	414,92	414,08	3,71	0,90

Tabelle 8.2: Tabelle der Maxima der KPIE und KIR. Angegeben die Abweichung der Maxima KPIE zu KIR in N und %. Die letzte Zeile gibt die Mittelwerte an.

Kraftzuwächse bestimmen. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Proband immer auf die gleiche Art trainiert. Zunächst werden für beide Kurven (KIR und KPIE) für jeden Trainingstermin die Maximalkraftwerte bestimmt. Dann wird der mittlere Maximalkraftwert am ersten Termin T_1 mit dem Mittelwert vom zweiten Termin T_2 verglichen. Diese Werte sind in Tab. 8.3 aufgelistet. Die Zunahme des Trainingsgewichts beträgt laut Angabe am Gerät 10 kg, dies entspricht 89,94 N. Der mittleren Zuwachs der Maxima der KPIE-Werte von 90,31 N liegt sehr dicht an der des Gewichtszuwachses. Der mittlere Zuwachs der Maxima der KIR-Werte beträgt 81,13 N. Dies ist rund 10 % weniger. Das der Maximalkraftzuwachs dem Gewichtszuwachs entspricht, liegt daran, dass T_1 und T_2 vom gleichen Probanden am gleichen Tag durchgeführt wurden und deshalb kein Kraftzuwachs stattgefunden hat, weil kein Training stattgefunden hat.

8.6.2 Schnellkraft und Explosivkraft

Die Schnellkraft beschreibt den Kraftanstieg pro Zeit, dabei ist die Explosivkraft der Punkt des stärksten Kraftanstiegs (vgl. Unterabschn. 2.2.1). In Abb. 8.19 sind die Kraftanstiegskurven des IR- (KAI) in rot und des Piezosensors (KAP) in blau eingezeichnet. Die Maxima der beiden Kurven im Bereich 4. - 14. s werden bestimmt und dann in Abb. 8.20 als Geraden in die KPIE-Kurve (blau) und KIR-Kurve (rot) eingezeichnet, dabei ist KIR mit 61/61 (Bestwerte) geglättet. Die Explosivkraftwerte der ersten sechs Hübe für KAI und KAP sind in Tab. 8.4 aufgelistet. Es ergibt sich eine durchschnittliche Abweichung zwischen KAP und KAI von 9,80%. Die KAP-Kurve ist für die

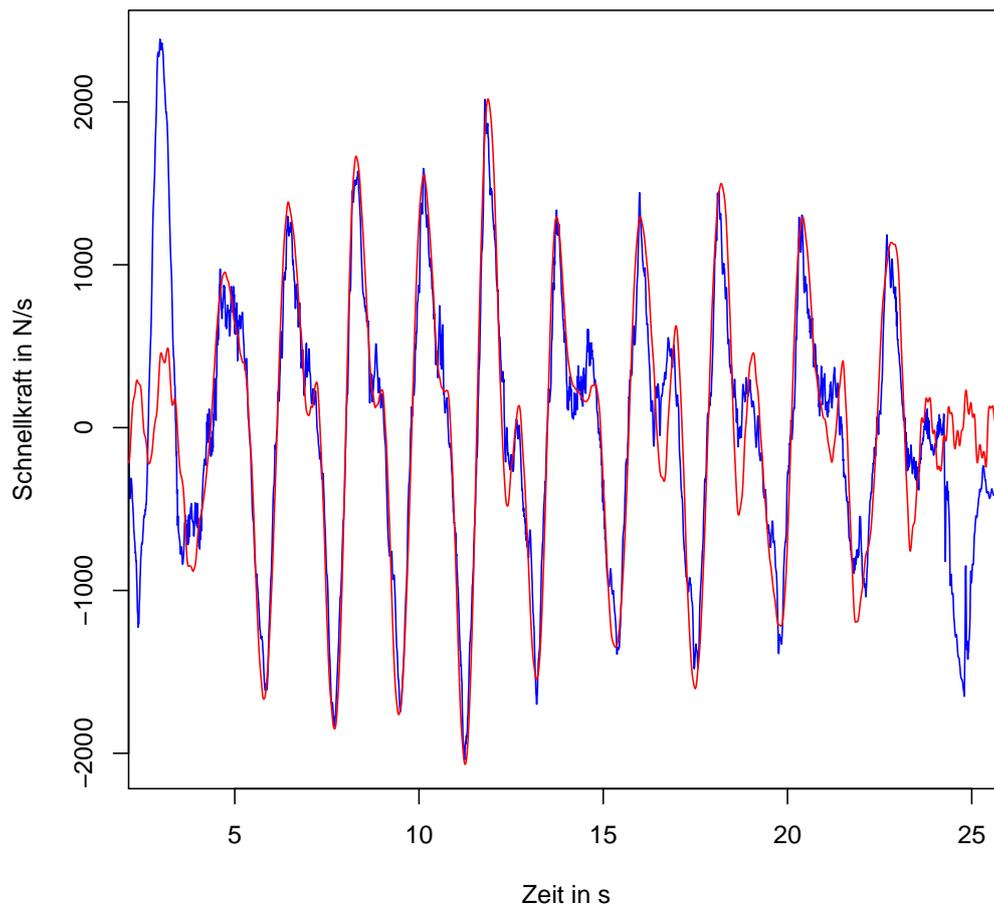


Abbildung 8.19: Schnellkraftkurven KAP (blau) und KAI (rot) für GHZ-P17. Dargestellt sind die Kurven mit der besten Übereinstimmung in den Maxima. Deutlich in der blauen Kurve zu sehen sind die Peaks am Anfang und Ende, diese entstehen durch das Anheben und Absetzen der Gewichte aus der und in die Ruhelage, darum erscheinen sie in der KAI-Kurve nicht.

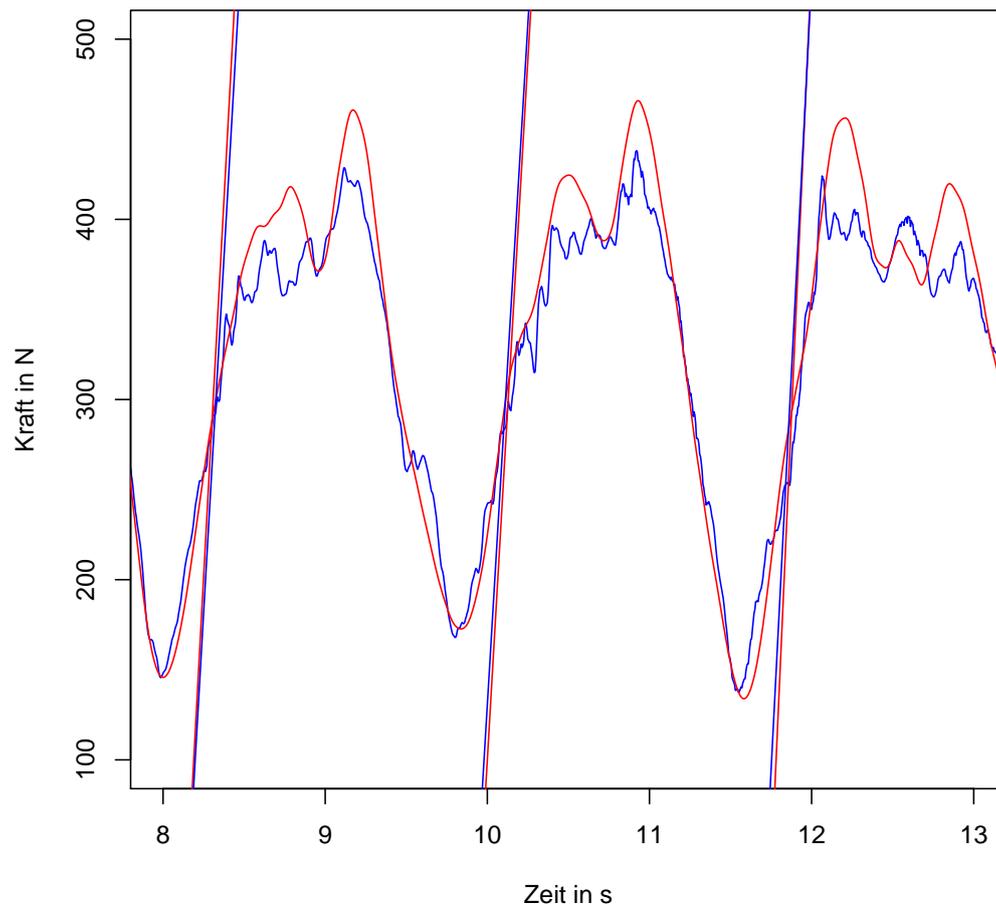


Abbildung 8.20: Darstellung der KPIE- (blau) und KIR-Kurve mit 61/62 (rot), mit Geraden in der dazugehörigen Farbe. Die Geraden schneiden die Graphen an den Stellen, wo sich der lokale maximal Kraftanstieg befindet. Die Steigung der Geraden gibt die Größe des Kraftanstiegs an. Die Geraden liegen so eng, dass sie farblich schlecht zu trennen sind.

T2	40 kg	T1	30 kg			
Maxima KPIE in N	Maxima KIR in N	Maxima KPIE in N	Maxima KIR in N	Zuwachs KPIE in N	Zuwachs KIR in N	ABW in N
426,75	426,35	331,30	309,69	95,45	116,66	21,21
413,86	422,38	321,89	314,05	91,97	108,33	16,36
424,14	420,14	330,08	324,92	94,06	95,22	1,16
432,85	431,21	317,19	325,77	115,66	105,44	10,22
411,95	420,33	326,94	322,66	85,00	97,67	12,67
397,84	404,15	332,00	323,12	65,84	81,03	15,19
404,11	408,16	334,78	335,91	69,33	72,25	2,93
396,44	395,76	338,44	327,65	58,00	68,11	10,10
393,83	397,21	338,96	329,13	54,87	68,09	13,22
Mittel: 411,31	413,97	330,18	323,65	81,13	90,31	11,45

Tabelle 8.3: Werte der ersten sechs Maxima der KPIE- und KIR-Werte im Vergleich beim Training mit 30 bzw. 40 kg. Der mittlere Kraftzuwachs entspricht der Trainingsgewichtszunahme.

	Explosivkraftwert aus KPIE in N/s	Explosivkraftwert aus KIR in N/s	Abweichung in N/s	Abweichung in %
	312,76	252,92	59,84	21,16
	285,45	272,08	13,37	4,80
	280,04	293,15	13,12	4,58
	295,65	279,74	15,91	5,53
	288,38	251,00	37,38	13,86
	271,66	296,98	25,32	8,91
Mittel	288,99	274,31	27,49	9,80

Tabelle 8.4: Explosivkraftwerte aus Abb. 8.20. Sie ergeben sich aus den Schnittpunkten der eingezeichneten senkrechten Geraden mit dem dazugehörigen Graphen.

Bestimmung des Zeitpunktes der Explosivkraft mit dem Faktor fünf geglättet.

8.6.3 Leistung

Leistung beschreibt die Arbeit pro Zeit oder Kraft mal Geschwindigkeit. In Abb. 8.21 sind die Graphen der aus SIR (rot) und SPI (blau) berechneten Leistung aufgetragen. Die SPI-Werte sind mit dem Faktor 10 geglättet. Die Leistung wurde bei beiden Kurve berechnet durch die Multiplikation der Kraft mit der Geschwindigkeit. Auffällig ist die hohe Übereinstimmung der Graphen, ohne dass die SIR-Werte zusätzlich geglättet wurden.

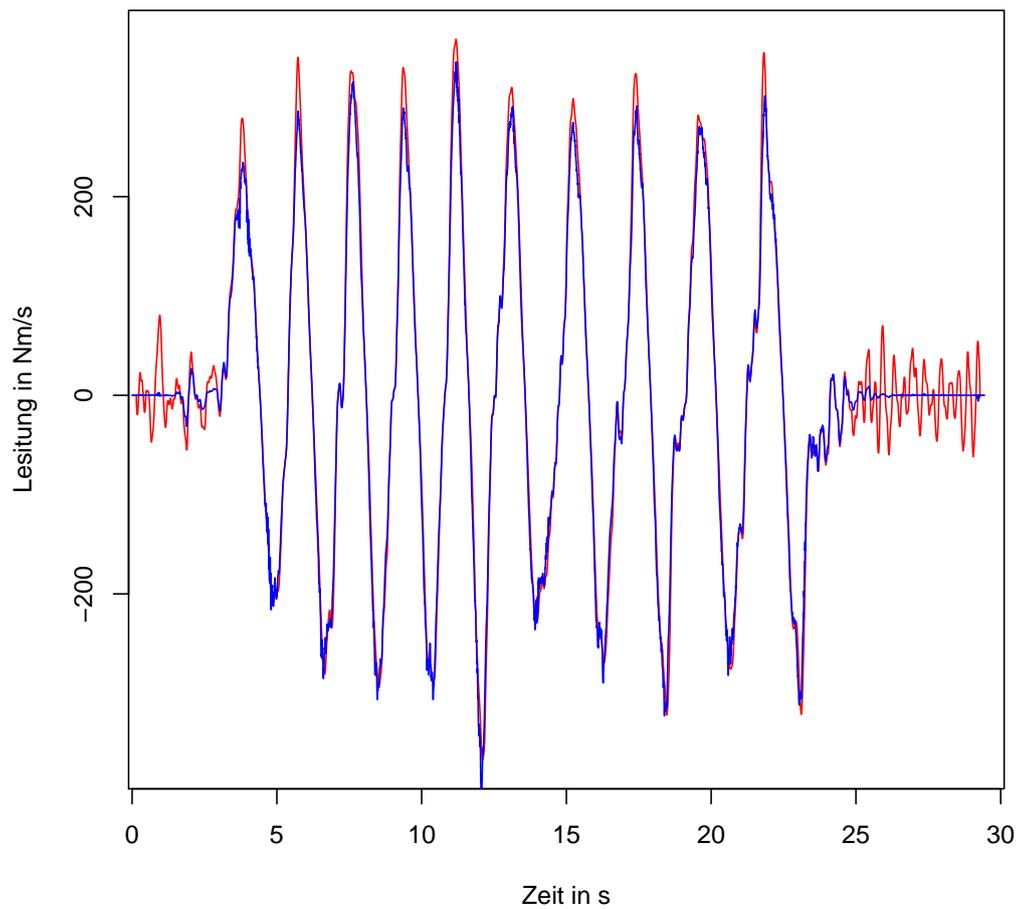


Abbildung 8.21: Leistungskurve aus den SPI (blau) und SIR-Werten (rot). Beide Graphen zeigen eine hohe Übereinstimmung. Abweichungen sind in der Ruhelage und an den Maxima zu erkennen.

8.6.4 Reaktivkraft

Die Reaktivkraft bezeichnet einen kurz andauernden Wechsel zwischen exzentrischer und konzentrischer Muskelarbeit von unter 200 ms. Dies ist am unteren Umkehrpunkt der Hubbewegung gegeben. Der Proband lässt das Gewicht exzentrisch herab um es dann konzentrisch anzuheben. Dazu wird der Bereich um ein Minimum der Kraftkurve von ± 200 ms betrachtet. Auf Grund der effektiven Messfrequenz von 50 Hz bedeutet dies eine Anzahl von 20 Messwerten in der KIR-Kurve. Aus der KPIE-Kurve lassen sich 80 Messwerte verwenden. Der optische Vergleich der Abb. 8.22 lässt erkennen, dass die KIR-Werte nur eine grobe Annäherung darstellen. Ob sich hieraus relevante Informationen ableiten lassen, bleibt zu zeigen.

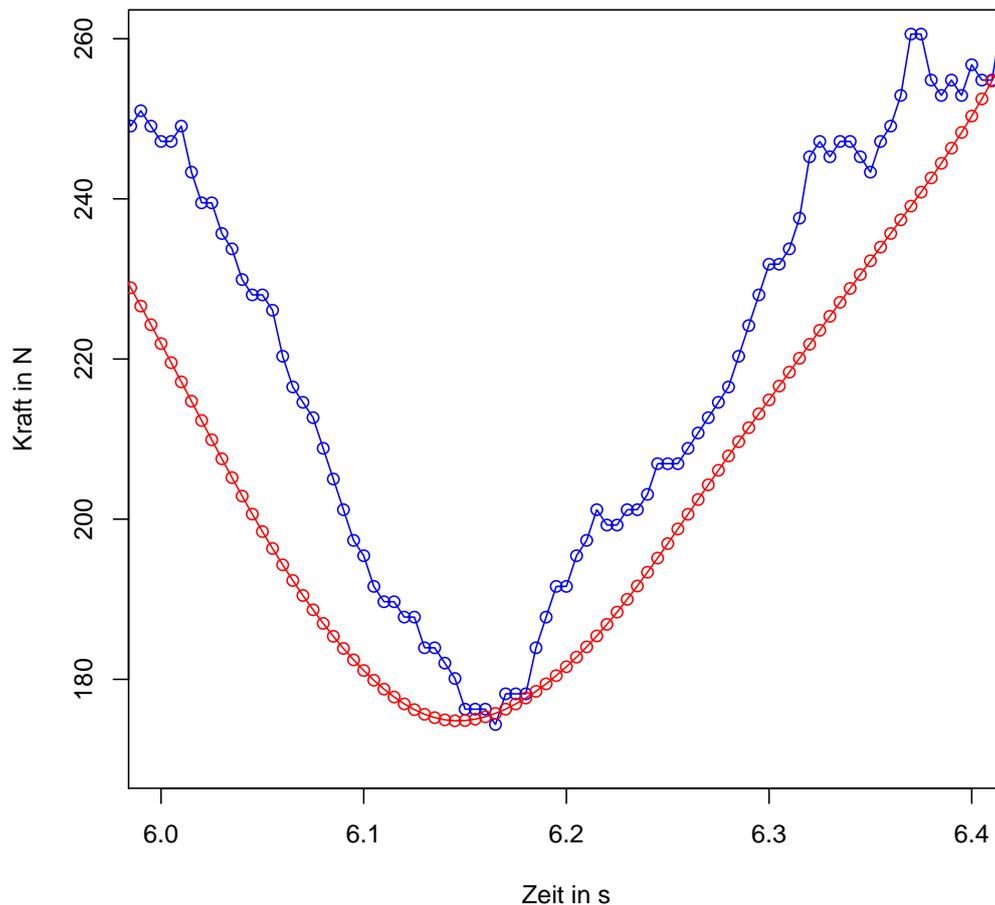


Abbildung 8.22: Darstellung der Messwerte KIR (rot) und KPIE (blau) im Zeitraum von 400 ms des unteren Umkehrpunktes eines Hubs.

8.6.5 Kraftkurven verschiedener Probanden im Vergleich

Beim Betrachten der Kraftkurven verschiedener Probanden fielen verschiedene Dinge auf. Zum einen gibt es grundlegend unterschiedliche Formen der Kraftkurven eines Hubs. Probanden, die mit gleichem Gewicht in der gleichen Zeit das gleiche Training absolvieren, erreichen unterschiedliche Belastungen im Bezug auf Maximalkraft, Explosivkraft und Reaktivkraft. Dies hat zur Folge, dass auch ein anderer Trainingsreiz gesetzt wird. Dies lässt sich in den Kraftkurven nachweisen. In Abb. 8.23 sind die Kraftverläufe von drei Probanden zu sehen, alle drei machen das gleiche Training, eine Serie mit 10 Hüben bei 25 kg. Neben der unterschiedlichen Ausführungsgeschwindigkeit und unterschiedlicher Maximalkraft fällt auf, dass die Form der Kraftkurven unterschiedlich ist. Bei P6 ist es eher eine Glockenform, bei P11 und P7 sind es mehr oder weniger gut definierte Peaks.

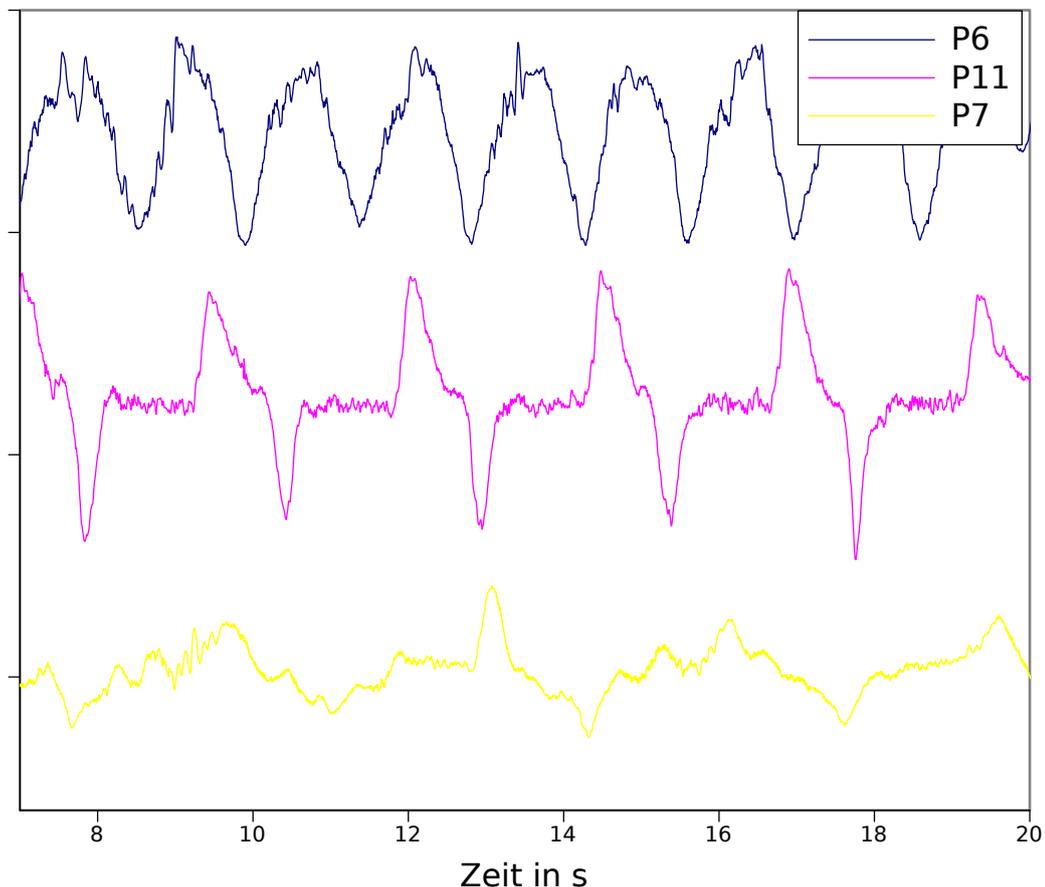


Abbildung 8.23: Es sind die Kraftverläufe von drei Probanden bei der gleichen Übung dargestellt. Sie variieren in Ausführungsgeschwindigkeit, Höhe der Maxima und Form der Kraftkurven.

8.6.6 Andere Messreihen

Die hier verwendeten Methoden zur Bestimmung der Leistungsparameter lassen sich auch auf beliebige andere Datensätze der Messreihen übertragen. Es wurde anhand des bisher beschriebenen Verfahrens eine rudimentäre Software geschrieben, die die Auswertung der Daten übernimmt. Mit ihr lassen sich annähernd die gleichen Ergebnisse erzielen, wie mit per Hand ausgewerteten Messwerten. Einige der Messungen zeigen die gleiche Genauigkeit wie die genannten, andere weisen eine zusätzliche Abweichung von bis zu 5 % der zu messenden Größe auf. Damit erhöht sich die Ungenauigkeit bis auf 10 %.

9 Diskussion der Ergebnisse

Die Betrachtung der gemessenen Daten in Abschn. 8.5 und 8.6 zeigt, dass beide Methoden vergleichbare Kurven produzieren. Die mittlere Abweichung der KIR- von den KPIE-Werten von über 5 % stellt den Einsatz eines IR-Sensors zur Krafterfassung an Kraftgeräten zunächst in Frage. Dem entgegen gibt es zwei Argumente: 1. zeigen die Ergebnisse, dass es möglich ist, Kraftverläufe mit Hilfe eines IR-Abstandssensors zu erfassen, und diese Methode ausbaufähig ist, und 2. es je nach Zweck nicht nötig ist, die Kräfte genauer zu erfassen, zum Beispiel im alltäglichen Trainingsbetrieb. Diese Argumente werden in den nächsten Abschnitten genauer betrachtet. Dann wird ein Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen gegeben.

9.1 Vergleich mit Literaturwerten

Ein direkter Vergleich der hier gewonnen Erkenntnisse mit Literaturwerten fällt schwer. Es gibt keine Veröffentlichungen oder Untersuchungen über die Kräfte an Kraftgeräten. Im Gegensatz dazu gibt es eine Vielzahl an Untersuchungen mit Kraftgeräten. Krafttrainingsgeräte werden nach einem einfachen Erfahrungswert gebaut und benutzt: Bei regelmäßigem Training mit Gewichten erhöht sich der Muskelquerschnitt, bzw. die Maximalkraft.

Diese Effekte sind für die Trainingslehre und den Gesundheitssport von großem Interesse - insbesondere Leistungsparameter, wie Maximalkraft und Leistung. Hier lässt sich ein Vergleich mit der Literatur ziehen. Die geforderte Genauigkeit des Erfassens des Trainingspensums wird von dem hier vorgestellten Aufbau erreicht. Als Beispiel seien hier die Gewichte an den Trainingsgeräten genannt, deren Gewichtsangabe um 10 % von der realen abweicht. Grundsätzlich ist es in der Trainingslehre so, dass nur Relativwerte und keine absoluten erfasst werden. Das Hauptinteresse liegt darin, zu zeigen, dass ein Faktor sich verändert hat. Veränderungen der genannten Leistungsparameter lassen sich mit dem hier beschriebenen Aufbau erreichen.

9.2 Fehlerdiskussion

Der Messfehler wird immer im statischen Aufbau bestimmt, da es schwierig ist, ihn im dynamischen Zustand zu bestimmen. Die grundlegenden Fehler des IR-Sensors, von dem die anderen abhängen, sind seine Messungengenauigkeit im Bezug auf Abstände und seine zu geringe Messfrequenz. Es wurde gezeigt, dass der IR-Sensor bei einer Messfrequenz von 50 Hz eine Genauigkeit von 0,01 m hat. Dies bedeutet bei einem angehängten Gewicht von 40 kg eine Auflösung von 0,4 N, dies entspricht 0,11 %. Der Fehler der Abstandsbestimmung ist, wie in Abschn. 8.2 angegeben, abhängig vom Abstand und liegt im Messbereich bei maximal 2,2 %, dies entspricht $\pm 1,10$ cm. Hinzu kommt die Messfrequenz von 50 Hz (im Vergleich zum Piezoelement mit 200 Hz) und das notwendige Glätten, dass zu einer Abweichung der KIR- zur KPIE-Kurve von 5,68 % führt (vgl. Abschn. 8.5). Die Messgenauigkeit eines Piezoelements oder DMS, wie sie allgemein in der Biomechanik verwendet werden, wird mit diesem Aufbau nicht erreicht, diese haben eine Messgenauigkeit unter 1 %. Beim Arbeiten mit ihnen treten die größten Messfehler der Messung dadurch auf, dass beim Kalibrieren mit ungenauen Gewichten nicht genau gearbeitet wird, oder dadurch, dass Fehler bei der Interaktion der Probanden mit der Messeinheit geschehen. Dabei lässt sich nicht genau sagen, wie groß der probandenindizierte Fehler ist. Aus verschiedenen Untersuchungen ist klar, dass die falsche Bewegungsausführung über 10 % weniger Kraft produziert. Für alle Messungen der Biomechanik gilt deswegen der Grundsatz, dass nur Relativwerte verwendet werden.

9.3 Ausblick

An mehreren Stellen diese Arbeit wurde darauf hingewiesen, dass es zu der gewählten auch eine andere Option gibt. Diese Ideen sollen kurz aufgegriffen werden.

9.3.1 Verbesserung der Auflösung des IR-Sensors

Um die räumliche Abstandsbestimmung zu verbessern, kann ein zweiter IR-Sensor verbaut werden. Der bisher genutzte IR-Sensor beleuchtet den Reflektor von oben, um zu verhindern, dass sich auf den Linsen mit der Zeit Staub sammelt. Liegt der Reflektor nicht auf dem obersten Gewicht, sondern steht nach hinten vom Gewicht in den leeren Raum ab, ist es auch möglich, den Reflektor von unten anzustrahlen. Wird nun der Reflektor von unten und oben mit jeweils einem IR-Sensor beleuchtet, erfasst der untere Sensor den unteren

Teil des Messbereiches und der obere Sensor den oberen Teil des Messbereichs mit einer Genauigkeit von 5 mm, also doppelt so genau.

9.3.2 Krafterfassung mit Dehnungsmessstreifen

Im Abschn. 5.1 wird die Möglichkeit beschrieben Kräfte mit Hilfe von DMS zu erfassen. Wird ein langfristiger Weg gesucht, dann bietet es sich an, ein Kraftgerät in diesem Sinne umzubauen. Wird dabei kein externer Biegebalcken verwendet, sondern die DMS selbst geklebt und beschaltet, wäre es eine kostengünstige Alternative. Dafür muss der ganze Aufbau aufwendig geeicht werden, bietet aber eine Auflösung im Newtonbereich bei einer Abtastfrequenz über 1 kHz.

9.3.3 Abstandserfassung mit einem Laser

Der in Unterabschn. 5.2.1 vorgestellte Laser bietet eine weitere Möglichkeit, die Bewegung zu erfassen. Dies hat den Vorteil, dass im Gegensatz zum DMS die Bewegungen des Geräts weniger mit erfasst werden, insofern der Sensor vom Gerät entkoppelt ist. Die Lasermethode bietet eine Auflösung im Millimeterbereich mit einer Abtastfrequenz von bis zu 500 Hz. Für diesen Aufbau bietet sich der Laser-Distanz-Sensor LDS 400S [15] an. Er ist einer der wenigen, die in diesem Messbereich mit der gesuchten Auflösung arbeiten.

9.3.4 Gewichtserfassung über Induktion

Das Erfassen der angehängten Gewichte durch den Optokoppler kann auch durch einen anderen, entsprechend hoch auflösenden Sensor, erledigt werden. Hier bieten sich Induktions-Annäherungs-Sensoren an. Sie sind sehr stabil, haben im Zentimeterbereich eine hohe Auflösung und sind kostengünstig. Da die Gewichte aus Metall sind, wird kein Reflektor benötigt.

9.4 Resümee

Kraftgeräte werden von den Herstellern selber entwickelt und erprobt. Das bedeutet, dass die technischen Details und ihre Funktion als Betriebsgeheimnis angesehen werden. Auch wenn die Hersteller sich auf anerkannte wissenschaftliche Erkenntnisse der Trainingslehre berufen, leiten sich diese oft aus Erfahrungswerten ab. So ist zum Beispiel der genaue Vorgang, der die Muskelhypertrophie hervorruft, nicht bekannt. In diesem Sinne trägt diese Arbeit dazu bei, die Geschehnisse beim Krafttraining zu erfassen und besser zu verstehen.

Es wird möglich, die Kräfte zu erfassen, die das Gerät auf den Probanden und dieser auf das Gerät ausüben. Dies wiederum bedeutet, dass sich erfassen lässt, welche Kräfte beim Training mit Kraftgeräten auf den Trainierenden wirken. Dies erlaubt ein differenzierteres Training. Für die Anwendung im Fitnessstudio folgt, dass dieser Aufbau eine höhere Genauigkeit bietet, als die bereits auf dem Markt erhältlichen Systeme. Insbesondere aus dem Grund, dass über mehr Parameter Aussagen getroffen werden können, als bei anderen Systemen. Das hier vorgestellte System stellt eine technisch noch nicht ausgereifte, robuste, mobile und kostengünstige Möglichkeit zum Aufwerten von Krafttrainingsgeräten dar. Es bietet die Möglichkeit, den Trainierenden ohne zusätzlichen Personalaufwand stärker zu kontrollieren. Mit der richtigen Vernetzung und Datenauswertung können sogar Trainer eingespart werden, da mehr Kontrolle durch das Gerät selber stattfindet. Über ein Display oder Interface kann Rückmeldung an den Trainierenden gegeben werden. Vorteil des Systems ist, dass es nach dem Kalibrieren nahezu wartungsfrei im Dauerbetrieb genutzt werden kann. Die Ergebnisse dieser Arbeit dürften für die Hersteller von Krafttrainingsgeräten von Interesse sein. Daneben können die Ergebnisse auch von Fitnessstudiobetreibern direkt genutzt werden, um die Validität ihres Trainings zu erfassen und zu untermauern, da das System modellunabhängig anwendbar ist. Weiter könnte das System nach technischer Verfeinerung dazu genutzt werden, in der Sportwissenschaft Studien an Krafttrainingsgeräten zu unterstützen. Es ist denkbar, dass sich das System auch ohne Probleme auf andere mechanische Geräte übertragen ließe.

Literaturverzeichnis

- [1] *Der Brockhaus Sport*. Brockhaus in der Wissenmedia; Auflage: 6., September 2006; ISBN-10: 3765329762
- [2] Prohl, Röthing u.a.: *Sportwissenschaftliches Lexikon*. Verlag Karl Hoffmann, 73614 Schorndorf; Auflage: 7., 2003; ISBN 3-7780-4497-4
- [3] D. Meschede: *Gerthsen Physik*. Springer, Berlin Heidelberg, New York; Auflage: 23., 2006; ISBN 3-540-25421-8
- [4] H. de Marées: *Sportphysiologie* Köln : Sportverl. Strauß, Auflage: 9., 2003; ISBN 3-939390-00-3
- [5] M. Kent: *Wörterbuch Sport und Sportmedizin*. Limpert Verlag GmbH, Wiesbaden; 1994; ISBN 3-7853-1591-0
- [6] A.Gottlob: *Differenziertes Krafttraining: mit Schwerpunkt Wirbelsäule*. Urban & Fischer Verlag München/Jena, 2001; ISBN 3-437-47050-7
- [7] G.Schnabel, D. Harre, J. Krug, A. Borde (Hrsg.): *Trainingswissenschaft: Leistung - Training - Wettkampf*. Berlin : Sportverl., Auflage: 3., 2005; ISBN 3-517-06682-6
- [8] A. Schön: *Meßtechnik*. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg; Auflage: 2., 1997; ISBN 3-540-600957
- [9] H.-R. Tränkler: *Taschenbuch der Meßtechnik*. München; Wien; Oldenbourg, 1989 ; ISBN 3-486-20846-2
- [10] Hofmann & Gatzmanga: *Einführung in die Betriebsmesstechnik*. VEB Verlag Technik, Berlin, 1972; DDR
- [11] Wikipedia Artikel zum Thema Entfernungsmessung:
http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Sonar_Principle_DE.svg&filetimestamp=20051003184427

- [12] Homepage der Firma Micro Epsilon <http://www.micro-epsilon.de>
- [13] T. Burkhardt: *Lineare Weg- und Abstandssensoren: berührungslose Messsysteme für den industriellen Einsatz*. Landsberg/Lech: Verl. Moderne Industrie, 2004; ISBN 3-937889-07-8
- [14] E. Hering, R. Martin, M. Stohrer: *Physik für Ingenieure*. Springer-Verlag, Berlin; Heidelberg; New York; Auflage: 8., 2000; ISBN 3-540-42964-6
- [15] Datenblatt für Laser-Distanz-Sensor LDS 400S: <http://www.eltrotec.com/db/pdf/LDS400D9.pdf>
- [16] Homepage von Fabian Greif <http://www.kreatives-chaos.com/artikel/liniensensor-mit-cny70> vom 02.02.2010
- [17] Homepage des fitnessgeräteherstellers GYM80 international: <http://www.gym80.ne> vom 28.01.2010
- [18] Datenblatt Optokoppler CNY-70 <http://www.vishay.com/docs/83751/cny70.pdf> vom 27.01.2010
- [19] Seite für den 3-Komponenten-Kraftsensor von Kistler http://www.kistler.com/hu_de-ex/131_Productfinder_ForceSensors/F1xxx.9251A/3-Komponenten-Kraftsensor-5-kN.html vom 02.02.2010
- [20] Datenblatt A/D-Wandler DAQ-700 von national Instruments <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/de/nid/5503> vom 02.02.2010
- [21] Homepage der Firma Phidgets <http://www.phidgets.com> vom 02.02.2010
- [22] Anleitung und Datenblatt zum PhidgetInterfaceKit 8/8/8 http://www.phidgets.com/products.php?category=0&product_id=1018 vom 02.02.2010
- [23] Datenblatt für Kistler Koaxialkabel: http://www.kistler.com/hu_de-ex/131_Productfinder_ForceSensors/F1xxx.9251A.10.1631C_BP.1631C1/3-Komponenten-Kraftsensor-5-kN.html vom 02.02.2010

- [24] Anschlußstecker der firma Molex an GP2Y3A002K0F mit neun Polen: http://www.molex.com/molex/products/datasheet.jsp?part=active/0510210900_CRIMP_HOUSINGS.xml&channel=Products&Lang=en-US vom 02.02.2010
- [25] Datenblatt für GP2Y3A002K0F http://sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y3a002k_e.pdf vom 02.02.2010
- [26] Adapter für IR-Sensoren von Sharp an ein Phidget-Interface http://www.phidgets.com/products.php?category=1&product_id=2008 vom 02.02.2010
- [27] S. Hesse, G. Schmel: *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation*. Friedr. Vieweg & Sohn, Wiesbaden, 2004; ISBN 3-528-23370
- [28] W. Weiler (Hrsg.): *Handbuch der physikalisch-technischen Kraftmessung*. Vieweg: Wiesbaden, 1993; ISBN 3-528-08945-8
- [29] R. Kumme: *Untersuchung eines direkten Verfahrens zur dynamischen Kalibrierung von Kraftmessgeräten*. Dissertation, Tech. Uni Braunschweig, 1996; ISBN 3-89429-7441
- [30] G. W. Schanz: *Sensoren. Sensortechnik für Praktiker*. Höthing GmbH & CO.KG Heidelberg, 2004; ISBN 3-7785-2887-4
- [31] U. Gruber & W. Klein: *Messen, Regeln, Steuern*. Weinheim, Basel (Schweiz), Cambridge, N.Y.; Auflage: 1., VCH, 1989; ISBN 3-527-26939-8
- [32] F. Ferber: *Experimentelle Methoden der Spannungsanalyse*. Artikel: *Mechanik/Experimentelle-Methoden-der-Mechanik.PDF* zu finden unter <http://mb-s1.upb.de/LTM/EMM/Themen%20und%20Inhalte%20der%20Experimentellen%20Me>
- [33] R. Parthier: *Messtechnik. Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik für alle technischen Fachrichtungen und Wirtschaftsingenieure*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden; Auflage: 4., 2008; ISBN 978-3-8348-0336-8
- [34] E. Hering, R. Martin (Hrsg.): *Photonik - Grundlagen, Technologie und Anwendung* Springer-Verlag, Berlin; Heidelberg; New York; Auflage: 1., 2006; ISBN 3-540-23438-1

- [35] W. Kieser: *Kieser Krafttraining an Maschinen*. Falken, 1997; ISBN 978-3806818017
- [36] E. Unger: *Guide Fitnessgeräte*. Meyer und Meyer Sport; Auflage: 1., 2000; ISBN 978-3891246313
- [37] F. Delavier: *Muskel Guide*. BLV Verlagsgesellschaft mbH; Auflage: 2., durchgesehene Auflage, 2000; ISBN 978-3405158231
- [38] W.-U. Boeckh-Behrens, W. Buskies: *Fitness-Krafttraining: Die besten Übungen und Methoden für Sport und Gesundheit*. Rowohlt Tb.; Auflage: 11., 2007; ISBN 978-3499194818
- [39] W. Kieser: *Ein starker Körper kennt keinen Schmerz*. Heyne, München; Auflage: 2., 2000; ISBN 3-453-17424-0
- [40] G. Tidow: *Zur Interpretation und Veränderbarkeit von Kraft-ZeitKurven bei explosiv-ballistischen Krafteinsätzen*. In: H.F. Voigt, (Red.) *Bewegungen lesen und antworten*. . Ahrensburg 1993, Seite: 153-192; ISBN 3-88020-235-4
- [41] W. Hollmann, Th. Hettinger: *Sportmedizin : Arbeits- und Trainingsgrundlagen*. Stuttgart, New York: Schattauer, Auflage: 2., 1980; ISBN3-7945-0657-x
- [42] Wikipedia Artikel zum CSV-Daten-Format: http://de.wikipedia.org/wiki/CSV_%28Dateiformat%29

Danksagungen

Zunächst möchte ich hier meinem Betreuer Achim Kittel danken, der die Diplomarbeit ermöglicht hat. Andreas Bund möchte ich für seine Tätigkeit als Zweitgutachter danken.

Martin Hillebrecht, der die Idee zu dieser Arbeit hatte und mich in sportwissenschaftlichen Fragen beraten hat.

Dank geht an das Rehabilitationszentrum Oldenburg, insbesondere an Jörg Heimsoth, der es möglich gemacht hat einen Teil meiner Messungen an den Geräten des Reha-Zentrums durchzuführen.

Ebenso danke ich dem Gesundheitszentrum der C. v. O. Uni Oldenburg und deren Mitarbeitern dafür, dass ich jederzeit an den Trainingsgeräten meinen Aufbau testen durfte.

Ich bedanke mich bei Kornel Rohmeyer, für die Hilfe bei der Datenanalyse und Auswertung, inklusive Speis und Trank. Weiter danke ich Robert Mitschke, Gerrit Freitag und den vielen anderen, die es möglich gemacht haben, trotz meiner unmöglichen Rechtschreibung eine wissenschaftliche Arbeit zu schreiben.

Nochmals danke ich Robert für die hübschen Photos vom Aufbau und den Sensoren.

“Stell dir einfach vor, du hättest diesen Sprung schon einmal gemacht.”

Bernd Volger (vor dem ersten Versuch)