



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

Vienna University of Technology

# DIPLOMARBEIT

„Entwicklung eines Sensorgriffes zur Erfassung der auftretenden Kräfte an der  
Hand bei der Benutzung eines alternativen Rollstuhlantriebssystems“

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs  
unter der Leitung von

Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Margit Gföhler

E 307

Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik

eingereicht an der Technischen Universität Wien

**Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften**

von

Florian Stadler

0326349

Brückenstraße 21/2/07

2100 Korneuburg

Wien, im Jänner 2015

## Kurzfassung

Gegenstand der hier vorgestellten Arbeit ist die Entwicklung, Fertigung und Testung einer Vorrichtung, die bei der Ermittlung auftretender Gelenkskräfte bei der Benutzung eines Rollstuhles helfen soll. Diese Vorrichtung soll keinesfalls mit vorhandenen Messvorrichtungen für Greifring-Rollstühle in Konkurrenz treten, sondern wurde speziell für den Gebrauch im Zusammenhang mit alternativen Rollstuhlantrieben konzipiert.

Der dabei entstandene, sogenannte Sensorgriff misst die Kontaktkräfte zwischen Hand und Antriebsmechanismus, verarbeitet die Signale mit einem integrierten Messverstärker und leitet diese kabellos mittels Bluetooth an einen mit der Messsoftware ausgestatteten Computer weiter. Bei der Entwicklung wurde speziell darauf geachtet, dass der Sensorgriff möglichst kompakt gestaltet und universell einsetzbar ist, um zukünftig bei einer Vielzahl an unterschiedlichen Anwendungen von Nutzen zu sein.

**Schlagwörter:** Werkzeug, Gelenkskräfte, Rollstuhl, Hebelantriebssystem, Kraftmessung, kabellos

## Abstract

Aim of the present study is the development, fabrication and testing of a device, which will help to determine occurring joint forces during wheelchair propulsion. This device has been developed especially for usage with alternative wheel propulsion systems and tries not to compete with existing measurement devices for push rim wheelchairs.

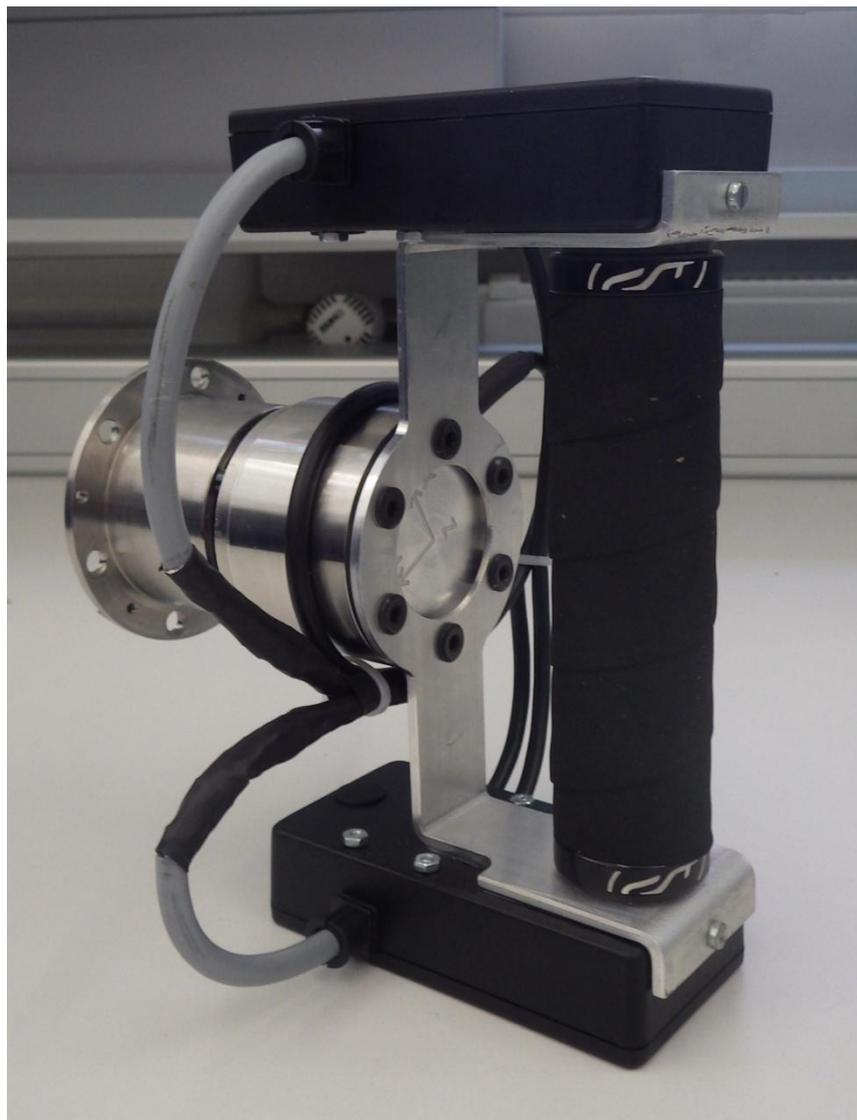
The so called sensor handle measures contact forces between hand and propulsion device, process the signals with an integrated amplifier and transmit them wirelessly via Bluetooth to a computer equipped with the proper measurement software. During development there was a focus on compact design and universal applicability, to give the sensor handle the potential to be used in many different future applications.

**Keywords:** tool, joint forces, wheelchair, lever-propelled system, force measurement, wireless

## Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>2</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>2</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>3</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>Vorwort</b> .....	<b>7</b>
<b>1 Überblick</b> .....	<b>8</b>
<b>2 Stand der Technik</b> .....	<b>10</b>
<b>3 Aufgabenstellung</b> .....	<b>11</b>
<b>4 Eingeschlagener Realisierungsweg</b> .....	<b>12</b>
4.1 Verwendete Messelektronik.....	12
4.1.1 Kraftsensor K6D40.....	12
4.1.2 Drehgeber ENA22K.....	17
4.1.3 Messverstärker GSV-4BT .....	19
4.2 Konstruktion, Zusammenbau und Wirkungsweise.....	19
4.2.1 Antriebseitige Baugruppe.....	22
4.2.2 Griffseitige Baugruppe.....	29
4.2.3 Stromversorgung.....	34
4.2.4 Verkabelung der Messelektronik.....	36
4.3 Berechnungen .....	38
4.3.1 Lagerauslegung.....	38
4.3.2 Festigkeitsberechnung.....	41
<b>5 Ergebnisse</b> .....	<b>49</b>
5.1 Erfüllung der Anforderungen.....	49
5.2 Einsatzfähigkeit des Sensorgriffes.....	52
5.2.1 Überprüfung der Kalibriermatrix .....	52

5.2.2	Testaufbau 1.....	54
5.2.3	Testaufbau 2.....	60
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>65</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>66</b>
	<b>Anhang A: Stücklisten.....</b>	<b>68</b>
	<b>Anhang B: Informationen zu verwendeten Komponenten .....</b>	<b>70</b>
	<b>Anhang C: Technische Zeichnungen .....</b>	<b>72</b>



Fertig zusammengebauter Sensorgriff  
(Testversion mit Griffbogen aus Aluminium statt Memory-Carbon)

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kraftsensor K6D40 .....	13
<i><a href="http://www.me-systeme.de/sensorik/kraftsensoren/k6d40.html">http://www.me-systeme.de/sensorik/kraftsensoren/k6d40.html</a> [15.10.2014]</i>	
Abbildung 2: Sensoreigenes Koordinatensystem .....	14
<i><a href="http://www.me-systeme.de/sensorik/kraftsensoren/k6d40.html">http://www.me-systeme.de/sensorik/kraftsensoren/k6d40.html</a> [15.10.2014]</i>	
Abbildung 3: Wheatstone-Brücke .....	16
Abbildung 4: Drehgeber ENA22K .....	17
<i><a href="http://www.megatron.de/kategorie/winkelsensoren.html">http://www.megatron.de/kategorie/winkelsensoren.html</a> [19.12.2014]</i>	
Abbildung 5: Hall-Effekt .....	18
Abbildung 6: Hall-Effekt-Drehgeber mit dazugehörigem Spannungsverlauf.....	19
<i><a href="http://ichaus.de/upload/pdf/MH8_datasheet_A1en.pdf">http://ichaus.de/upload/pdf/MH8_datasheet_A1en.pdf</a> [21.10.2014]</i>	
Abbildung 7: Messverstärker GSV-4BT (mit Akkumulator für den Größenvergleich) .....	19
<i><a href="http://www.me-systeme.de/elektronik/gsv-4/gsv-4bt.html">http://www.me-systeme.de/elektronik/gsv-4/gsv-4bt.html</a> [19.12.2014]</i>	
Abbildung 8: Baugruppen des Sensorgriffes .....	20
Abbildung 9: Achsen des Sensorgriffes ([1] Sensorgriffachse / [2] Griffstückachse).....	21
Abbildung 10: Befestigung der Anschlusshülse .....	22
Abbildung 11: Ausführung der Anschlussstelle.....	23
Abbildung 12: Einbau der Kugellager (Klebestellen rot markiert) .....	24
Abbildung 13: Zusammenbau der antriebseitigen Baugruppe .....	25
Abbildung 14: Neigung der Griffstückachse.....	26
Abbildung 15: Mögliche Bahnverläufe .....	26
Abbildung 16: Einbau des Drehgebers und des Permanentmagneten.....	28
Abbildung 17: Komplette antriebseitige Baugruppe (Drehgeber und Magnet blau markiert) ....	29
Abbildung 18: Bearbeitung des Schutzgehäuses ([1]-[5] Materialabnahme).....	31
Abbildung 19: Befestigung und Sicherung der Schutzgehäuse (Klebestellen rot markiert).....	31
Abbildung 20: Fixation eines Messverstärkers .....	32
Abbildung 21: Griffstück (Gleitlagerbuchsen grün markiert).....	33
Abbildung 22: Verdrehsicherung .....	34
Abbildung 23: Akku-Pack.....	35
Abbildung 24: IU-Ladeverfahren .....	36

Abbildung 25: Verkabelung ([1] Kraftsensor-Messverstärker / [2] Messverstärker – Messverstärker / [3] Drehgeber – Messverstärker).....	37
Abbildung 26: Lagerauslegung .....	39
Abbildung 27: Akku-Pack im Griffstück .....	42
Abbildung 28: Zwei Belastungsfälle .....	43
Abbildung 29: Einspannungen und Krafteinleitung - 1. Belastungsfall.....	44
Abbildung 30: Spannungsverteilung - 1. Belastungsfall.....	44
Abbildung 31: Lage und Querschnitt der am stärksten belasteten Stelle – 1. Belastungsfall .....	45
Abbildung 32: Krafteinleitung Griffbogen – 2. Belastungsfall.....	47
Abbildung 33: Spannungsverteilung – 2. Belastungsfall .....	48
Abbildung 34: Eckmaße des Sensorgriffes .....	50
Abbildung 35: Versuchsaufbauten A und B für die Überprüfung der Kalibriermatrix ([1] Einspannung / [2] Metallscheibe).....	53
Abbildung 36: Lage des sensorfesten Koordinatensystems.....	53
Abbildung 37: Hebellängen bei Testaufbau B für die Überprüfung der Kalibriermatrix .....	54
Abbildung 38: Testaufbau 1 ([1] Rollstuhlrad / [2] Aluminiumleiste / [3] Rollrad / [4] Manschette).....	55
Abbildung 39: Kraftverläufe (grün, rot) und Verdrehwinkel (blau) über die Zeit - Testaufbau 1.....	56
Abbildung 40: Kraftverläufe ungefiltert und geglättet – Testaufbau 1 .....	57
Abbildung 41: Aufbereitete Kraftverläufe – Testaufbau 1.....	58
Abbildung 42: Erwartete Kraftverläufe – Testaufbau 1 .....	59
Abbildung 43: Kraftverläufe mit Zusatzgewicht – Testaufbau 1.....	59
Abbildung 44: Testaufbau 2 ([1] Spannbock / [2] Metallscheibe / [3] Metallstange) .....	61
Abbildung 45: Erwartete Kraftverläufe – Testaufbau 2 .....	62
Abbildung 46: Auflagekraft S (gelb) mit Gegenkraft F (grau).....	63
Abbildung 47: Aufbereitete gemessene Kraftverläufe (blau, grün und rot) mit errechneten Kraftverläufen (schwarz) .....	64

## Vorwort

Die vorliegende Diplomarbeit entstand in den Jahren 2013 und 2014 im Rahmen meines Maschinenbau Diplomstudiums an der TU Wien.

Da ich für den dritten Abschnitt meines Diplomstudiums den Schwerpunkt „Biomedizinische Technik“ gewählt hatte, ging meine Suche für ein Diplomarbeitsthema natürlich auch in diese Richtung. Passenderweise hatte Frau Prof. Margit Gföhler, die mich in dieser Zeit der Themensuche bei einer Projektarbeit betreute, eine Diplomarbeit im Rahmen der Entwicklung eines neuartigen Rollstuhlantriebssystems zu vergeben. Nach kurzem Überlegen sagte ich zu, diese zu übernehmen, da ich sehr an einer praxisorientierten Arbeit interessiert war.

Der Hilfe von Frau Prof. Margit Gföhler, die die Rolle der Betreuerin für meine Diplomarbeit übernahm, sowie der von Projektassistent Markus Puchinger, der mir mit Rat und Tat zur Seite stand, ist es zu verdanken, dass diese Arbeit so entstehen konnte, wie sie schlussendlich entstanden ist. Für ihre Geduld und ihre Unterstützung möchte ich mich herzlichst bedanken.

Weiterer Dank gilt auch meiner Familie und meiner Freundin, auf deren Hilfe ich während der Entstehungszeit der Arbeit immer zählen konnte, sowie allen Freunden und Bekannten, die mir bei etwaigen Fragen und Unklarheiten zur Seite standen.

Korneuburg, im Dezember 2014

Florian Stadler

# 1 Überblick

Weltweit ist eine große Zahl an Menschen auf die Benutzung eines Rollstuhles angewiesen. Einige davon nur kurzfristig, beispielsweise während der Regeneration von einem Unfall oder einer Operation, andere aber für eine längere Zeitdauer, über Monate und Jahre hinweg, oder sogar für den Rest ihres Lebens.

Alleine in Österreich gibt es, laut der Mikrozensus-Zusatzfragen der Statistik Austria zum Thema „Menschen mit Beeinträchtigungen“, 50.000 Rollstuhlfahrer (das entspricht einem Bevölkerungsanteil von ungefähr 0,6%). Der größte Teil (über 90%) dieser Rollstuhlbenutzer verwendet dabei ein manuell betriebenes Rollstuhlmodell (vgl. Leitner & Baldaszi 2008, S.12).

Um einen Rollstuhl manuell anzutreiben gibt es verschieden Möglichkeiten. Die gebräuchlichste Antriebsform ist die, mittels eines Greifringes. Dieser Greifring, oder Greifreifen (engl. „pushrim“), ist durch mehrere Stege mit der Felge des Rollstuhlrades verbunden. Er ist je nach Art und Funktion des Rollstuhles (Standard-Rollstuhl, Renn-Rollstuhl, Rollstuhl für Tetraplegiker, etc.) unterschiedlich groß, aus unterschiedlichen Materialien und mit unterschiedlichen Beschichtungen ausgeführt. Zur Fortbewegung mit dieser Art von Rollstuhl wird der Greifring umfasst, oder mit den Daumen beziehungsweise den Handballen Druck darauf ausgeübt, um daraufhin das Rad mit einer dafür charakteristischen Armbewegung anzutreiben. Wird ein Rad abgebremst, während das andere angetrieben wird, kann dadurch eine Kurve in die Richtung des abgebremsten Rades eingeschlagen werden.

Diese Art des Antriebes genießt einige Vorzüge, lässt sich relativ schnell erlernen und dominiert auch den sportlichen Sektor des Rollstuhlfahrens. Jedoch stechen, bei genauerer Betrachtung, auch zwei gravierende Nachteile dieser Methode ins Auge.

Zum einen gibt es viele Rollstuhlbenutzer, die aufgrund ihrer körperlichen Einschränkungen nicht in der Lage sind, die für die Fortbewegung benötigte Druckkraft auf den Greifring auszuüben. Darunter fallen vor allem Tetraplegiker aber auch anders beeinträchtigte Menschen, die die für einen Greifringrollstuhl notwendige Antriebsbewegung nicht ausführen können.

Das andere und weitaus gewichtigere Problem jedoch, stellt die unnatürliche Belastung der Gelenke in den oberen Extremitäten während der für den Greifringrollstuhl charakteristischen Bewegung dar. Daraus können, über die Jahre hinweg, erhebliche Gelenkablütungen entstehen, die letztendlich zu dauerhaften Gelenkschäden und daraus resultierenden chronischen Schmerzen führen können.

Da in der Regel jeder Mensch, der dauerhaft auf den Gebrauch eines Rollstuhles angewiesen ist, von Seiten der Ärzte und Therapeuten dazu angehalten wird, möglichst viel und regelmäßig Bewegung zu machen, stellt dieser Punkt nicht nur für ambitionierte Hobby- oder Leistungssportler ein Problem dar. In manchen Fällen, wie bei Zerebralparetikern, hilft die körperliche Betätigung dabei, das Auftreten von Spasmen zu reduzieren. Bei allen Rollstuhlbenutzern jedoch werden dadurch die Durchblutung und der Kreislauf angeregt, was unter anderem das Risiko einer Thrombose und anderer Erkrankungen deutlich herabsenkt.

Treten allerdings schon nach wenigen Jahren übernatürlich starke Gelenkablütungserscheinungen auf, werden viele Rollstuhlfahrer gezwungen sein, aufgrund der einsetzenden Schmerzen, die sportliche Betätigung drastisch zu reduzieren und sich eventuell sogar einer Operation zu unterziehen. Das führt dann wiederum zu einem Mobilitätsverlust mit allen daraus resultierenden Gesundheitsrisiken und Nebenwirkungen.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wird an der TU Wien an einer Lösung für das genannte Problem gearbeitet. Im Zuge dessen wird ein alternatives manuelles Rollstuhlantriebssystem entwickelt, das einen für die Gelenke weniger belastenden Bewegungsablauf gewährleisten soll.

## 2 Stand der Technik

Um zu verstehen, wie die Schäden an den Hand-, Ellbogen- und Schultergelenken entstehen können, gibt es bereits verschiedene Methoden, die dort auftretenden Kräfte zu bestimmen. In zahlreichen Studien (vgl. z.B. Robertson et al. 1996) wurden Kraft- und Momentenverlauf für den Antrieb eines handelsüblichen Greifringrollstuhles ermittelt.

Das SMART<sup>Wheel</sup> (vgl. Asato et al. 1993) oder auch das OptiPush Biofeedback System (vgl. Guo et al. 2011), die oft für solche Studien herangezogen werden, sind spezielle Rollstuhlräder, die an einem Standardrollstuhl angebracht werden. Gemessen wird in beiden Fällen die Kraft, die an dem Greifring aufgebracht wird. Das geschieht mit Hilfe von Kraftsensoren die auf unterschiedliche Art und Weise im System verbaut sind. Kombiniert mit optisch gewonnenen Daten über den Bewegungsablauf und einem mathematischen Berechnungsmodell, lassen sich so fundierte Aussagen über die Größe und den Verlauf der auftretenden Kräfte in den Gelenken tätigen.

Diese recht gut funktionierenden Messsysteme lassen sich jedoch nicht für andere Antriebssysteme als den Greifringrollstuhl verwenden. Speziell für hebelbetriebene Rollstühle gibt es kaum brauchbare, vorhandene Methoden, um die dabei auftretenden Kräfte und Kraftverläufe aufzuzeichnen.

In manchen Untersuchungen werden die am Antriebshebel auftretenden Kräfte direkt über daran applizierte Dehnungsmessstreifen erfasst (vgl. Requejo et al. 2008). In anderen Untersuchungen, jedoch wieder für Greifringrollstühle, werden mit Drucksensoren ausgestattete Handschuhe (engl. „force gloves“) verwendet (vgl. Morrow et al. 2013), was sich jedoch auch für andere Antriebssysteme adaptieren ließe.

Wie auch im Falle des SMART<sup>Wheel</sup> lassen sich so, teilweise unter Verwendung optisch ermittelter Bewegungsdaten, durch Bewegungsmodelle die Gelenkskräfte mehr oder weniger gut darstellen.

### 3 Aufgabenstellung

Die Kontaktkräfte, die zwischen Hand und Antriebssystem auftreten, werden benötigt, um die durch Muskelkräfte entstehenden Gelenkbelastungen zu ermitteln. Die beim Bedienen des neuartigen Antriebssystems ermittelten Belastungen sollen mit jenen Belastungen verglichen werden, die bei einem Standard-Rollstuhl mit Greifring auftreten. Für diese Vergleichswerte werden sowohl vorhandene Datensätze von früheren Untersuchungen herangezogen, als auch eigene Daten, mit einem eigens dafür angeschafften Smart<sup>Wheel</sup>, gesammelt. Für die Erfassung der Kontaktkräfte bei dem neuartigen Antriebssystem fehlt jedoch eine passende Lösung.

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, für genau diese Anwendung ein geeignetes Werkzeug zu konzipieren, zu konstruieren und anzufertigen. An dieses Werkzeug, das im weiteren Verlauf der Diplomarbeit nur noch als „Sensorgriff“ bezeichnet wird, werden unterschiedliche Anforderungen gestellt.

Zum einen sollen die an der Hand wirkenden Kräfte in alle drei Richtungen des Raumes sowie die Momente um diese erfasst werden. Diese Daten können dann im Rahmen eines anderen Projektes dazu verwendet werden, um mittels eines dafür geeigneten Modells, die auftretenden Kräfte in sämtlichen Gelenken der oberen Extremitäten zu ermitteln.

Zum anderen soll das Gewicht des Sensorgriffes gering gehalten werden, sowie die Bauform möglichst kompakt ausgeführt sein. Das soll dafür sorgen, dass die Bedienung des neuen Antriebssystems durch den Anschluss des Sensorgriffs nicht beeinträchtigt oder verfälscht wird. Priorität hat dabei, dass der Abstand zwischen dem Griffstück und der Antriebsebene möglichst gering gehalten wird. Das bedeutet, dass ein möglichst kurzer Teil des Sensorgriffes von der Anschlussstelle am Antrieb in den Raum absteht.

Da noch nicht feststeht, auf welche Art und Weise (zum Beispiel mit Hebeln beziehungsweise einem Gestänge-System) der neue Antrieb umgesetzt wird, muss der Sensorgriff sehr flexibel einsetzbar sein. Dabei wird speziell darauf geachtet, dass der Griff einfach und schnell an den Antrieb angeschlossen werden kann. Auch die kabellose Weiterleitung der Sensordaten, wie im Falle des Sensorgriffs per Bluetooth, erhöht die universelle Einsetzbarkeit. Zusammen mit einer ausreichenden Stromversorgung über integrierte Akkumulatoren soll der Sensorgriff dadurch eine komplett autarke Einheit bilden.

## 4 Eingeschlagener Realisierungsweg

Im Folgenden soll ein Überblick verschafft werden, welche elektronischen Bauteile beim Bau des Sensorgriffes verwendet wurden, welche Überlegungen und Arbeitsschritte hinter der Konstruktion desselbigen stecken und welche Berechnungen im Vorhinein und parallel zur Konstruktion durchgeführt werden mussten.

### 4.1 Verwendete Messelektronik

Ein wichtiger Punkt bei der Planung des Sensorgriffes war die passende Auswahl der Messelektronik, wobei fertig konzipierte Sensoren von externen Anbietern angekauft wurden. Es wurde darauf verzichtet, eigene Sensoren zu entwerfen oder selbst Dehnungsmessstreifen zu applizieren. Das hätte zum einen den zeitlichen Rahmen der Diplomarbeit gesprengt und erscheint, da geeignete Sensoren am Markt erhältlich sind, als wenig zweckmäßig.

#### 4.1.1 Kraftsensor K6D40

Zur Messung der entstehenden Kräfte und Momente, die bei der Bedienung des neuen Antriebssystems auf die Hand wirken, wird der Mehrachsen-DMS-Sensor K6D40 eingesetzt. Dieser Sensor vereinigt alle gewünschten Eigenschaften in einer kompakten Einheit. Gerade deswegen, aber auch wegen des, im Vergleich zu anderen Sensoren dieser Art, relativ geringen Eigengewichtes von 160 g und des angemessenen Kaufpreises, wurde der K6D40 ausgewählt.

Der Sensor besteht aus sechs unabhängigen Kraftsensoren, die mit Dehnungsmessstreifen-Vollbrücken ausgestattet sind. Diese Sensoren werden über ein geschirmtes Kabel mit 24 Litzen mit dem Messverstärker verbunden, wobei jeweils 4 Litzen (zwei für die Versorgungsspannung und zwei für die Differenzspannung) pro Sensor und Messverstärkerkanal verwendet werden.



Abbildung 1: Kraftsensor K6D40

Aus den sechs Sensorsignalen werden durch eine Berechnungsvorschrift die Kräfte in die drei Richtungen des Raumes, sowie die drei Momente um die drei Achsen berechnet. Die Berechnungsvorschrift ergibt sich aus dem entstehenden Kreuzprodukt der Kalibriermatrix mit dem Vektor der Sensorsignale. Dadurch ergeben sich für den Sensor die Vorteile einer besonders hohen Steifigkeit und einer besonders guten Trennung der sechs Komponenten, also ein geringes Übersprechen.

Die Berechnungsvorschrift lautet:

$$\underline{L} = \underline{A} \times \underline{U} \quad . \quad (4.1)$$

Die Kalibriermatrix  $\underline{A}$  ist gegeben mit:

	Kanal					
	1	2	3	4	5	6
Fx	-155,313	-154,100	2,809	158,445	159,889	-1,102
Fy	89,463	-85,832	-188,099	-86,541	93,518	176,927
Fz	-216,193	217,598	-228,919	222,134	-220,955	212,899
Mx	5,731	-5,528	-2,793	3,099	-3,018	2,686
My	-0,433	-0,0062	4,880	-4,649	-5,089	5,145
Mz	-3,972	-3,894	-4,085	-3,860	-4,030	-3,948

Die Einheit der Matrixelemente ist N/(mV/V) in den Zeilen 1 bis 3 und Nm/(mV/V) in den Zeilen 4 bis 6 der Matrix. Die Spannungsverhältnisse (mV/V), die jeder der zwei Messverstärker an den Kanälen 1 bis 3 ermittelt, werden in einem Vektor der sechs Sensorsignale  $\underline{u}$  erfasst, wobei die drei Signale des einen Messverstärkers ( $u_1, u_2, u_3$ ) im Lastvektor  $\underline{L}$  die Kräfte ( $F_x, F_y, F_z$ ) und die drei Signale des zweiten Messverstärkers ( $u_4, u_5, u_6$ ) im Lastvektor die Momente ( $M_x, M_y, M_z$ ) bilden.

Misst man zum Beispiel auf jedem Kanal ein Signal von 1 mV/V, so ergibt das für die Kraft in x-Richtung:

$$F_x = 1 * (-155,313) + 1 * (-154,100) + 1 * (2,809) + 1 * (158,445) + \\ + 1 * (159,889) + 1 * (-1,102) = 10,628 \text{ N}$$

Das sensoreigene Koordinatensystem, das für die Berechnung von Momenten ausschlaggebend ist, hat seinen Ursprung auf der Schnittfläche der z-Achse mit der einen Stirnseite des K6D40 und ist durch eine Gravur gekennzeichnet (siehe Abb. 2).

Die Bauteilgruppe in die die Kraft eingeleitet wird, die man messen möchte, sollte auch an dieser Seitenfläche montiert werden.



Abbildung 2: Sensoreigenes Koordinatensystem

Der Nennmessbereich für die Kraft in x- und y-Richtung des sensoreigenen Koordinatensystems erstreckt sich bis 200 N, der in z-Richtung sogar bis 400 N. Die Nennmomente sind im Datenblatt mit 5 Nm um die x- und y-Achse, beziehungsweise mit 10 Nm um die z-Achse angegeben.

Dabei können laut Hersteller während des Startvorganges, oder auch für Perioden zwischendurch, 150% der Nennkräfte und Nennmomente, ohne Gefahr für den Sensor, aufgebracht und auch gemessen werden. Erst ab Belastungen, die 300% der Nennkräfte und Nennmomente übersteigen, kommt es zu unwiderruflichen Schäden im und am Sensor.

Da, für den laufenden Betrieb, eine maximal auftretende Kraft von 150 N in eine Richtung angenommen wird, reicht der Nennmessbereich des K6D40 in dieser Hinsicht vollkommen aus. Damit der Sensor aufgrund zu hoher auftretender Momente nicht beschädigt wird, muss darauf geachtet werden, dass der Krafteinleitungspunkt in der „griffseitigen Baugruppe“ nicht zu weit von der Sensorstirnseite entfernt liegt. Die Grenzwerte  $l_G$  (für 150% des Nennmomentes) und  $l_B$  (für die kritischen 300% des Nennmomentes) berechnen sich zu:

$$l_G = \frac{7,5 \text{ Nm}}{150 \text{ N}} = 0,05 \text{ m}$$

und

$$l_B = \frac{15 \text{ Nm}}{150 \text{ N}} = 0,10 \text{ m} .$$

#### Dehnungsmessstreifen und Wheatstonebrücke

Das Funktionsprinzip von Dehnungsmessstreifen (DMS) ist im Allgemeinen bekannt, soll aber an dieser Stelle gemeinsam mit der im Sensor K6D40 vorliegenden Vollbrückenschaltung abermals kurz erläutert werden (vgl. Schrüfer 2007, S. 251 ff.). Für elektrische Leiter gilt der Zusammenhang:

$$R = \frac{l}{q} * \rho , \quad (4.2)$$

wobei R für den elektrischen Widerstand, l für die Länge, q für den Querschnitt und  $\rho$  für den spezifischen Widerstand steht. Wird dieser Leiter gedehnt oder gestaucht, ändern sich die Parameter des Zusammenhanges zu:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta q}{q} + \frac{\Delta \rho}{\rho} . \quad (4.3)$$

Durch diverse Umformungsschritte gelangt man zu dem Zusammenhang:

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = 1 + 2 * \mu + \frac{\Delta \rho/\rho}{\Delta l/l} . \quad (4.4)$$

Da sich der spezifische Widerstand  $\rho$  von Metallen kaum ändert, ist der „K-Faktor“ also hauptsächlich von der Poisson’schen Zahl  $\mu$  abhängig und kann verkürzt wie folgt dargestellt werden:

$$K = 1 + 2 * \mu . \quad (4.5)$$

Daraus ergibt sich die für Dehnungsmessstreifen übliche Berechnungsformel:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta R}{R_0} = K * \epsilon . \quad (4.6)$$

Der Dehnungsmessstreifen, der in der Regel ein auf einem Träger sitzendes, aus einer dünnen Metallfolie ausgeätztes Messgitter ist, wird auf unterschiedliche Art auf einem Werkstück appliziert. Eine der meist genutzten Applikationen ist die Vollbrücke, eine Form der Wheatstone-Brücke, bei der 4 Dehnungsmessstreifen eingesetzt werden. Dadurch lassen sich je nach Anordnung und Anbringung unterschiedliche Belastungsfälle (Biegung, Torsion, etc.) in unterschiedlichen Richtungen messen. Außerdem können so auch etwaige Temperatureinflüsse kompensiert werden. Abb. 3 stellt eine solche Messbrücke schematisch dar.

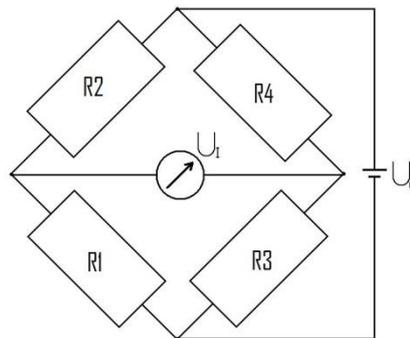


Abbildung 3: Wheatstone-Brücke

Für das Verhältnis der Spannungen  $U_1$  und  $U_0$  kommt man nach diversen Rechenschritten zu:

$$\frac{U_1}{U_0} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} = \frac{R_1 * R_4 - R_2 * R_3}{(R_1 + R_2) * (R_3 + R_4)} . \quad (4.7)$$

Für die richtig applizierte Vollbrücke gilt:

$$R_1 = R_4 = R + \Delta R \quad (4.8 a)$$

und

$$R_2 = R_3 = R - \Delta R . \quad (4.8 b)$$

Das, eingesetzt in die Formel für das Verhältnis der Spannungen, ergibt:

$$\frac{U_I}{U_0} = \frac{(R + \Delta R)^2 - (R - \Delta R)^2}{(R + \Delta R + R - \Delta R)^2} = \dots = \frac{\Delta R}{R} = K * \varepsilon \quad . \quad (4.9)$$

Misst man die Spannungen  $U_I$  und  $U_0$  und ist der K-Faktor des DMS bekannt, so kann sofort die Dehnung  $\varepsilon$  berechnet werden. Bei bekanntem Materialverhalten für den Bauteil an dem der DMS appliziert ist, lässt sich mittels Hook'schem Gesetz die vorhandene Spannung und darüber wiederum die eingeleitete Kraft ermitteln.

#### 4.1.2 Drehgeber ENA22K

Der im Sensorgriff verwendete Drehgeber ENA22K arbeitet nach dem Prinzip des Hall-Effektes, wobei die Verdrehung eines Permanentmagneten im Bezug auf den Drehgeber gemessen wird. Im Gegensatz zu Potentiometern ist er dabei beliebig oft verdrehbar und besitzt keinen Anschlag. Die eben genannte Eigenschaft, der relativ geringe Preis und die Kompatibilität mit dem verwendeten Messverstärker, haben zur Auswahl dieses Winkelsensors geführt.

Im Betrieb wird der Sensor mit der internen Versorgungsspannung des Messverstärkers von 4,7 V verbunden. Als Ausgangssignal liefert er ein ratiometrisches Spannungssignal zwischen 0 und 4,7 V, welches an einem Kanal des Messverstärkers über den 0-5 V Eingang angeschlossen ist. „Ratiometrisches Spannungssignal“ bedeutet in diesem Fall, dass der Verlauf des Spannungssignales linear abhängig vom dazugehörigen Drehwinkel ist. So beträgt das Ausgangssignal bei 0° Drehwinkel 0 V und steigt bei zunehmendem Drehwinkel linear bis 4,7 V bei 360° an. Wird die 360° Grenze überschritten, fällt das Signal in kürzester Zeit (<0,04 Sekunden) wieder auf 0 V herab und steigt bei weiterer Drehung wieder linear an. Das funktioniert genauso bei Umkehrung der Drehrichtung, nur, dass das Ausgangssignal in diesem Fall natürlich zwischen 4,7 – 0 V linear absinkt.



Abbildung 4: Drehgeber ENA22K

### Hall-Effekt

Der Hall-Effekt tritt auf, wenn ein dünnes Halbleiterplättchen von Strom durchflossen wird und sich dabei in einem magnetischen Feld befindet (siehe Abb. 5).

Durch die Lorentzkraft werden die Elektronen abgelenkt und sammeln sich an einer Seite des Metallplättchens. Dadurch entsteht eine Spannung zwischen den Rändern des Plättchens, die sogenannte Hall-Spannung.

Mit der vom Halbleitermaterial abhängigen Hall-Konstante  $R_H$ , der Dicke  $d$  des Halbleiterplättchens, des Stromes  $I$  der durch das Halbleiterplättchen fließt und der magnetischen Flussdichte  $B$  lässt sich die Hall-Spannung  $U_H$  berechnen:

$$U_H = \frac{R_H * B * I}{d} \quad . \quad (4.10)$$

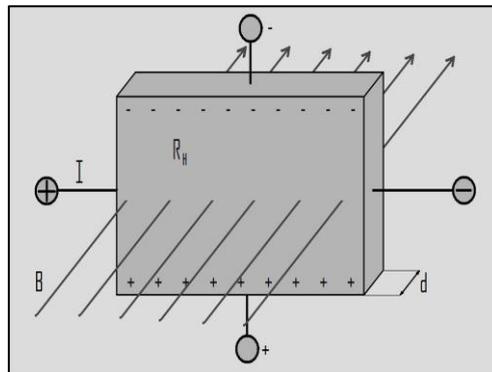


Abbildung 5: Hall-Effekt

Um dieses Prinzip für einen Drehgeber nutzen zu können, werden vier Hallensoren und ein diametral magnetisierter, zylindrischer Permanentmagnet benötigt. In Abb. 6 sieht man die Anordnung der Hall-Sensoren in einem Chip und das magnetische Feld, das von dem Permanentmagneten gebildet wird. Die sich schräg gegenüber liegenden Hall-Sensoren liefern jeweils ein differenziertes Hall-Signal. Dadurch entstehen bei Drehung des Magneten um die z-Achse sinusförmige Spannungssignale, die abhängig vom Drehwinkel  $\omega$  sind.

Diese werden chipintern in eine Ausgangsspannung gewandelt, welche bei zunehmendem Drehwinkel bis zur Versorgungsspannung ansteigt und bei Überschreitung der 360°-Grenze wieder auf 0 V zurückfällt (siehe Abb. 6).

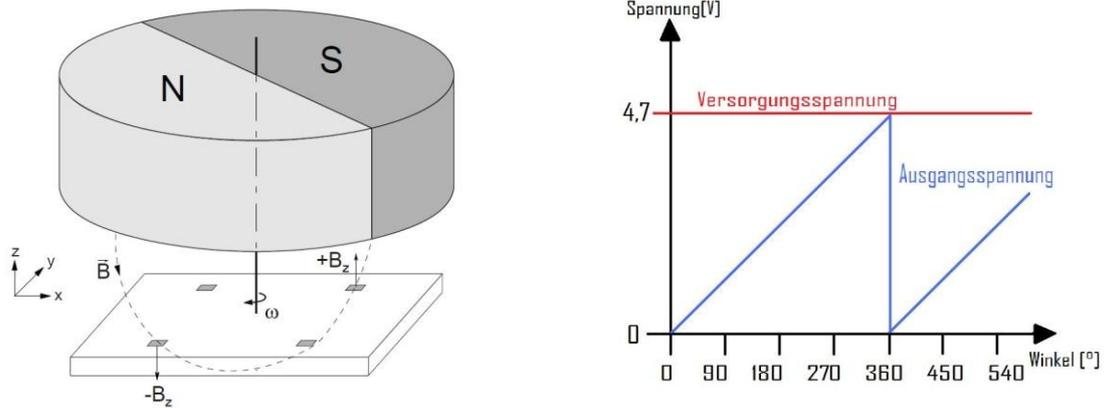


Abbildung 6: Hall-Effekt-Drehgeber mit dazugehörigem Spannungsverlauf

### 4.1.3 Messverstärker GSV-4BT

Um die Signale des Kraft- und Momentensensors K6D40 und des Winkelsensors ENA22K an den PC übermitteln zu können, wurde eine möglichst praktische und platzsparende Methode gesucht. Der Messverstärker GSV-4BT vereint diese beiden Eigenschaften.

Zusätzlich wird von der Herstellerfirma die Software GSVmulti zur Verfügung gestellt, mit deren Hilfe es schnell und einfach möglich ist, den Kontakt zwischen Messverstärker und Computer herzustellen.



Abbildung 7: Messverstärker GSV-4BT (mit Akkumulator für den Größenvergleich)

Der GSV-4BT verfügt über vier Messkanäle, die sich für den Anschluss von Dehnungsmessstreifen Voll-, Halb- oder Viertelbrücken eignen. Es können ebenfalls Temperatursensoren (z.B. PT-1000) oder Thermokabel angeschlossen werden, sowie Sensoren, die ein analoges Messsignal zwischen 0-5 V oder 0-10 V ausgeben.

Der größte Vorteil des GSV-4BT liegt darin, dass es möglich ist, die Messsignale kabellos via Bluetooth 2.0 zu übertragen. Das, zusammen mit der integrierten Energieversorgung, macht den Sensorgriff zu einer vollkommen autarken Einheit. Außerdem ist der Messverstärker mit

seinen geringen Abmaßen (60x33x10 mm) eines der kleinsten am Markt erhältlichen Modelle mit 4 unabhängigen Eingangskanälen.

Ein weiterer Punkt, der für die Auswahl des GSV-4BT spricht, ist die Tatsache, dass er von derselben Herstellerfirma wie das Herzstück des Sensorgriffes, der Kraftsensor K6D40, stammt. Damit werden etwaige Kompatibilitätsprobleme von vornherein ausgeschlossen.

Im Sensorgriff sind insgesamt zwei Stück des GSV-4BT verbaut, um genügend Kanäle für die sechs Signale des K6D40 (Kräfte in und Momente um die X- Y- und Z-Achse des sensorfesten Koordinatensystems) und das Spannungssignal des ENA22K (Verdrehung der Griffachse) zur Verfügung zu stellen. Theoretisch steht also noch ein freier Kanal bereit, sollte sich herausstellen, dass es sinnvoll oder notwendig wäre, einen weiteren Sensor im Sensorgriff zu verbauen.

Die zwei Messverstärker sind miteinander über die Platinen und eine Kabelverbindung synchronisiert und wechselwirken in einem „Master/Slave“ Verhältnis. Dabei übernimmt der „Master“ die Stromversorgung des „Slave“.

## 4.2 Konstruktion, Zusammenbau und Wirkungsweise

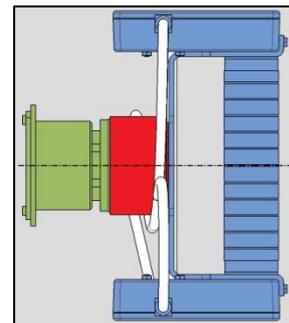


Abbildung 8: Baugruppen des Sensorgriffes

Der Sensorgriff besteht aus zwei Baugruppen (siehe Abb. 8) in deren Mitte sich der Kraftsensor K6D40 (rot) befindet. Die „griffseitige Baugruppe“ (blau) befindet sich dort, wo das Griffstück des Sensorgriffes angebracht ist. Die „antriebsseitige Baugruppe“ (grün) befindet sich dort, wo der Sensorgriff mit dem Antrieb verbunden wird. Beide Baugruppen werden mit dem Kraftsensor fest verschraubt (über den Griffbogen bzw. über den Sensoranschluss).

Im Folgenden sollen der Aufbau und die Funktionen dieser Baugruppen verdeutlicht werden. Um diese Beschreibungen verständlicher zu machen, wird ein sensorfestes Koordinatensystem eingeführt. Neben diesem Koordinatensystem sind in Abb. 9 auch noch zwei Achsen eingezeichnet, die im weiteren Verlauf der schriftlichen Arbeit als Sensorgriffachse [1] und Griffstückachse [2] bezeichnet werden. Die Ausdehnung des Sensorgriffes in z-Richtung wird ab sofort Länge, die in y-Richtung Höhe und die in x-Richtung Breite desselben genannt.

Um den Sensorgriff ausreichend stabil dimensionieren und konstruieren zu können, wurden Obergrenzen für die zu erwartenden Belastungen definiert. Dafür wurden Fachliteratur und Fachartikel durchsucht, die sich mit dem manuellen Antrieb eines Rollstuhles und den dabei auftretenden Kräften beschäftigen. Die am höchsten ausfallende Kraft, die in den genannten Artikeln vermerkt wird, beträgt 152 N, bei einer Antriebsgeschwindigkeit von 1,67 m/s (vgl. Veeger et al. 1991).

Für die Auslegung der einzelnen Bauteile in Bezug auf Lebensdauer und Festigkeit, wird daher mit einer zu erwartenden Maximalkraft von 150 N gerechnet und den eventuell daraus resultierenden Drehmomenten.

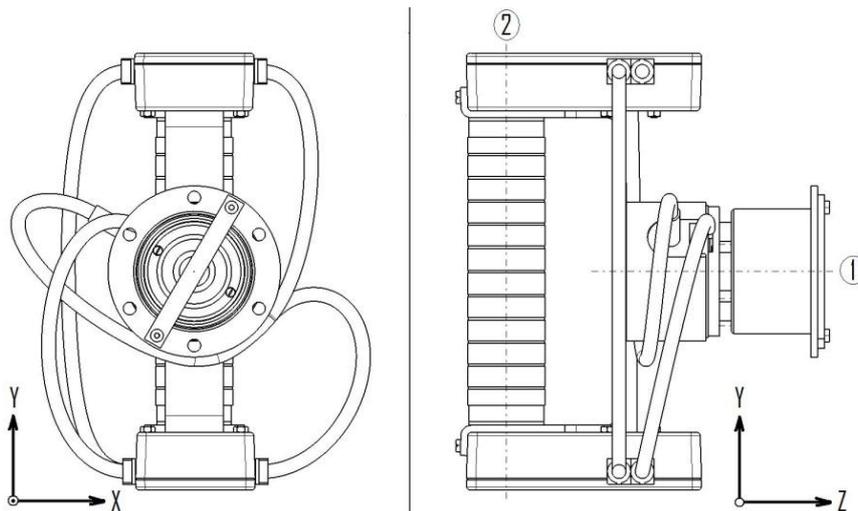
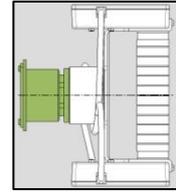


Abbildung 9: Achsen des Sensorgriffes  
([1] Sensorgriffachse / [2] Griffstückachse)

### 4.2.1 Antriebseitige Baugruppe



Diese Baugruppe befindet sich zwischen dem Antrieb und dem Kraftsensor K6D40 und ihr fallen folgende Hauptaufgaben und Funktionen zu:

- Anschluss- beziehungsweise Verbindungsstück zwischen Sensorgriff und Antrieb
- unlimitierte Rotationsmöglichkeit um die Sensorgriffachse
- Erfassung der Verdrehung beziehungsweise Neigung des Sensorgriffes zum raumfesten Koordinatensystem

Die in dieser Baugruppe verwendeten Komponenten sind im Anhang A in der Stückliste A1 aufgelistet.

#### **Anschluss- bzw. Verbindungsstück**

Die Anschlusshülse ist der Teil des Sensorgriffes, der mit dem Antrieb verbunden ist. Dafür besitzt die Anschlusshülse einen Flansch mit einem darauf gefertigten Lochkranz von sechs Bohrungen mit dem jeweiligen Durchmesser von 5,5 mm. Am Antrieb sollte idealerweise ein gleich großer Lochkreis von sechs Bohrungen mit Gewinde vorhanden sein, sodass die Anschlusshülse daran mit M5 Schrauben befestigt werden kann, wie in Abb. 10 veranschaulicht wird.

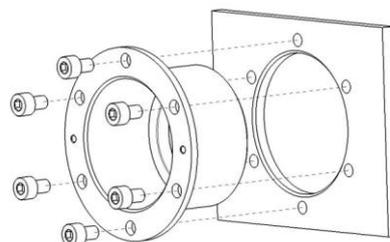


Abbildung 10: Befestigung der Anschlusshülse

Um den Abstand der Griffstückachse zur Antriebsebene zu verringern, ist es vorgesehen, die Anschlusshülse nach „innen“, also Richtung Rollstuhl versetzt, einzubauen. Dadurch können,

vorausgesetzt, dass dadurch keine Kollision mit dem Antriebsmechanismus, dem Rollstuhlrاد oder dem Rollstuhl selber auftritt, wertvolle Millimeter gespart werden, um die der Griff, vom Antrieb aus gesehen, weniger absteht.

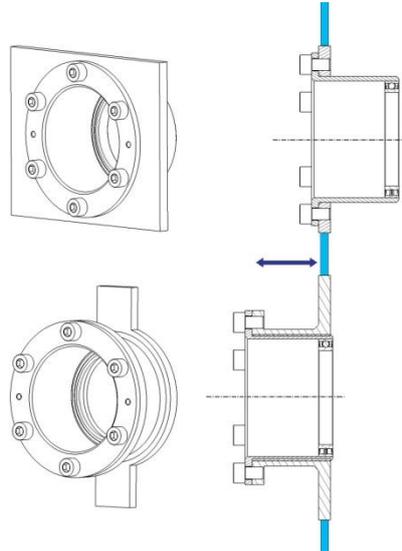


Abbildung 11: Ausführung der Anschlussstelle

In Abb. 11 sieht man zwei unterschiedliche Möglichkeiten, wie die Montagestelle am Antrieb ausgeführt werden kann, wobei die Antriebsebene hier hellblau dargestellt ist. Die dabei mögliche Platzersparnis in z-Richtung beträgt in diesem Beispiel ca. 30 mm.

#### **Verdrehbarkeit um die Sensorgriffachse**

Die Anschlusshülse, die mit dem Antrieb verbunden ist, erfährt bei jedem Antriebszyklus eine Verdrehung, solange sich dieser nicht auf eine rein translatorische Bewegung beschränkt. Läuft die Anschlusshülse dabei auf einer geschlossenen Bahnkurve, beträgt diese Verdrehung pro Zyklus 360°.

Es ist daher notwendig zwischen Anschlusshülse und dem restlichen Sensorgriff eine Lagerung einzubauen, die bewirkt, dass die Anschlusshülse beliebig um die Sensorgriffachse rotieren kann.

Um das zu ermöglichen, befinden sich zwischen dem Sensoranschluss und der Anschlusshülse zwei Kugellager der Bauart 61708 2RS. Diese speziellen Dünnring-Kugellager weisen einen erheblich geringeren Außendurchmesser als normale Kugellager mit

demselben Innendurchmesser auf, was wiederum dazu führt, dass die Anschlusshülse kleiner ausgeführt werden kann. Die Kugellager sind mit beidseitig schleifenden Lagerdichtungen ausgestattet und daher weitestgehend wartungsfrei.

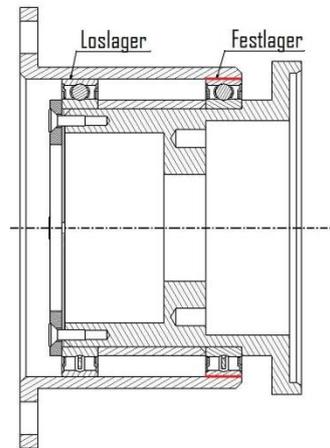


Abbildung 12: Einbau der Kugellager (Klebestellen rot markiert)

Das Kugellager, das näher am Antrieb liegt, wird als Loslager ausgeführt, wohingegen das Lager, das näher am Kraftsensor liegt, als Festlager dient und aus diesem Grund in der Anschlusshülse fest verklebt ist. Dafür wurde der speziell für diesen Zweck ausgelegte Lagerkleber Loctite 648 verwendet, der in der Lage ist, ein Spiel zwischen Kugellageraußenring und Anschlusshülse von bis zu 0,15 mm zu überbrücken. Abb. 12 zeigt die eingebauten Lager im Schnitt, wobei die rot markierte Fläche die Klebverbindung darstellt. Diese Klebverbindung weist eine für den Betrieb des Sensorgriffes ausreichend hohe Belastbarkeit auf und ist auch gegenüber Umwelteinflüssen, wie erhöhten Temperaturen oder Feuchtigkeit, extrem resistent.

Sollte es jedoch notwendig werden, ein defektes Lager zu demontieren, ist das mit geeignetem Werkzeug, verbunden mit einer Erhitzung der Klebestelle auf 250°C, durchaus möglich.

In Abb. 13 sieht man, wie die antriebseitige Baugruppe (jedoch ohne den Winkelsensor und die dazugehörigen Teilstücke, wie den Magnethalter) richtig zusammengebaut wird. Dafür wird der bereits mit dem Sensor verschraubte Sensoranschluss durch das festgeklebte Lager, der mit dem Antrieb verschraubten Anschlusshülse, geschoben. Danach wird die Lagerabstandshülse auf den Sensoranschluss aufgeschoben und im Anschluss daran, das

zweite Dünnringlager. Der Lagersicherungsring, der mit M2 Senkschrauben im Sensoranschluss verschraubt wird, fixiert die inneren Schalen der Kugellager gegen axiale Verschiebung und zum größten Teil auch gegen radiales Gleiten.

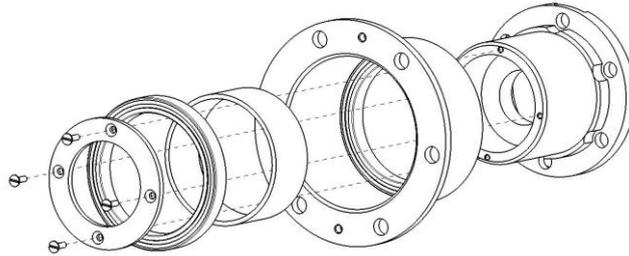


Abbildung 13: Zusammenbau der antriebsseitigen Baugruppe

Da es sich bei dem Sensorgriff um einen Prototypen handelt, der eventuell mehrmals auseinander und wieder zusammen gebaut werden muss, wurden die ansonsten im Maschinenbau gültigen Passungen für Wälzlager einbauten bewusst nicht überall eingehalten. So befindet sich sowohl zwischen Anschlusshülse und Außenring der Kugellager, als auch zwischen Sensoranschluss und Innenring der Kugellager, ein Spiel.

Im vorliegenden Fall stehen die Innenringe der Kugellager nahezu still, während die Außenringe kontinuierlich rotieren. Die Lastrichtung rotiert ebenfalls, wenn beim neuartigen Antrieb von einer geschlossenen Bahnkurve ausgegangen wird. Korrekterweise sollte, daraus resultierend, zwischen dem Innenring eines Kugellagers und dem Sensoranschluss eine Übergangs- bis mittlere Übermaßpassung vorhanden sein, zwischen dem Außenring und der Anschlusshülse jedoch eine enge Spiel- bis weite Übergangspassung.

Die Spielpassung bei den Außenringen fällt nicht weiter ins Gewicht, da das Festlager sowieso eingeklebt ist, und das Loslager das Spiel braucht, um in axiale Richtung ausweichen zu können. Bei den Innenringen aber sorgt die Fixation durch den Lagersicherungsring und die Lagerabstandshülse trotz der Spielpassung dafür, dass es zu keinem ausgeprägten Gleiten zwischen Sensoranschluss und Innenringen kommen kann. Das sollte, vor allem im Hinblick auf die bei dieser Anwendung doch relativ gering ausfallenden Belastungen und Drehzahlen, ausreichen, um dennoch eine vernünftige Lagerlebensdauer zu gewährleisten.

## Neigung des Sensorgriffes

Durch die Veränderung der Armstellung während des Bedienens des neuen Antriebssystems, passiert es, dass die Griffstückachse aus der senkrechten Position heraus mehrere Grad in, als auch gegen die Drehrichtung geneigt wird.

Wird diese Neigung sensorisch erfasst und protokolliert, kann sie für die spätere Analyse wertvolle Daten über die Position und Haltung des Handgelenkes und der gesamten oberen Extremitäten während der einzelnen Phasen des Bewegungsablaufes liefern. Um das zu bewerkstelligen, wird der Drehgeber ENA22K eingesetzt.

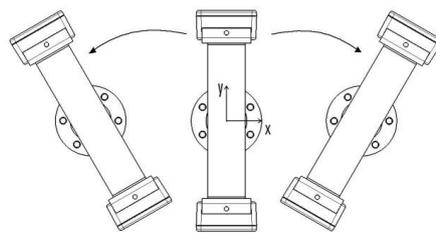


Abbildung 14: Neigung der Griffstückachse

## Feststellung der Neigung

Zur Feststellung der Neigung der Griffachse des Sensorgriffes gibt es zwei Möglichkeiten, je nach Art der Bahn, den die Anschlusschülse, die mit dem Antrieb verschraubt ist, zurücklegt.

Dabei kann es sich entweder um eine Gerade oder eine offene Kurve handeln, die abwechselnd in beide Richtungen durchfahren wird, oder aber um eine geschlossene Kurve, bei der sich die Anschlusschülse pro Antriebszyklus um  $360^\circ$  verdreht. Diese drei Bahnverläufe werden in Abb. 15 exemplarisch dargestellt.

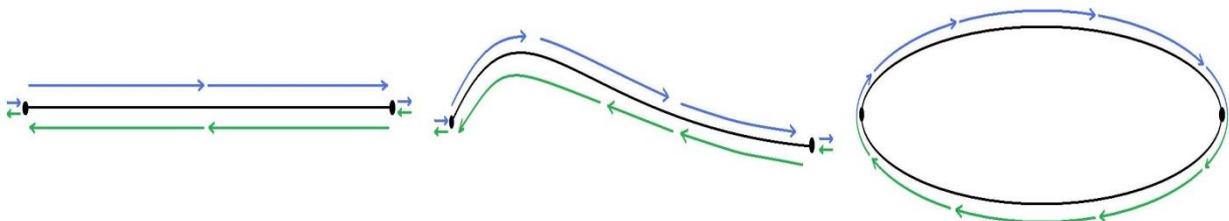


Abbildung 15: Mögliche Bahnverläufe

##### Gerade

Die Bahn der Anschlusshülse kann eine Gerade sein, egal ob senkrecht, waagrecht oder diagonal. In diesem Fall wird für die Griffstückachse des Sensorgriffes in einer beliebigen Position die Nullstellung des ENA22K festgelegt und das dabei ausgegebene Spannungssignal als Wert für 0° Neigung definiert. Jede Erhöhung oder Verminderung der Sensorausgangsspannung im Betrieb des Sensorgriffes kann direkt in eine Neigung in positive oder negative Drehrichtung umgerechnet werden.

##### Offene oder geschlossene Kurve

Wenn die Bahn der Anschlusshülse eine Kurve ist, wird die Hülse beim Durchlaufen dieser Kurve verdreht. Bei einer geschlossenen Kurve, wie beispielsweise einer Kreisbahn, beträgt diese Verdrehung, pro vollständig durchlaufenem Antriebszyklus, 360°.

Der ENA22K registriert diese Verdrehung, jedoch inklusive eventueller Neigungen der Griffachse, die während des Durchlaufens der Bahnkurve auftreten können. Daher muss von der Seite des Antriebes die Information bereit gestellt werden, wo genau auf der Bahnkurve sich die Anschlusshülse gerade befindet. Diese Information kann auf die dazugehörige Verdrehung der Anschlusshülse zurückgerechnet werden. Wird im Anschluss daran dieser Wert von der vom ENA22K gemessenen Verdrehung abgezogen, bleibt die reine Neigung der Griffstückachse des Sensorgriffes übrig.

##### Position des Sensorgriffes auf einer geschlossenen Bahnkurve

Gibt es von der Antriebsseite keine Informationen über die Lage der Anschlusshülse, kann der Drehgeber auch dafür genutzt werden, die Position des Sensorgriffes auf der Bahnkurve zu bestimmen.

In diesem Fall sollte bei der Bedienung des Antriebes darauf geachtet werden, die Griffstückachse möglichst senkrecht zu halten. Dadurch minimieren sich die Abweichungen

der gemessenen, von der tatsächlichen Position der Anschlusshülse auf der Kurve, die durch die Neigung der Griffstückachse zustande kommen.

Bei entsprechender Nachbearbeitung der so ermittelten Daten mit einer geeigneten Software, die die kleinen Schwankungen des gemessenen Drehwinkels glätten kann, können bei dieser Art der Positionsbestimmung durchaus brauchbare Ergebnisse erwartet werden.

### Einbau des Drehgebers

Um Platz zu sparen und so eine kleinere Bauform für den Sensoranschluss zu ermöglichen, wurde der ENA22K beidseitig beschnitten. In Abb. 16 ist zu erkennen, dass der Sensor durch zwei Zentrierstifte in Position gehalten wird, die in den Sensoranschluss gesteckt werden. Der ENA22K kann dadurch weder verdreht, noch verschoben werden und ist, solange der Sensoranschluss an den Kraftsensor angeschraubt ist, in alle Richtungen fixiert.

Der Permanentmagnet, der mit dem Drehgeber mitgeliefert wurde, sitzt an der Spitze eines Magnethalters, der aus einem nicht magnetisierbaren Material gefertigt sein muss. In diesem Fall wurde er aus Kunststoff gefräst, um das Gewicht zu minimieren, zumal keine besonderen Anforderungen an die Festigkeit des Magnethalters gestellt werden.

Der Magnethalter ist mit der Anschlusshülse verschraubt (siehe Abb. 16) und durch eine Schulter mit Presspassung in dieser zentriert. Er wird als letzter Teil der antriebseitigen Bauteilgruppe eingebaut, da sonst das Einschieben des Loslagers, der Lagerabstandshülse und des Lagersicherungsringes nicht möglich wäre.

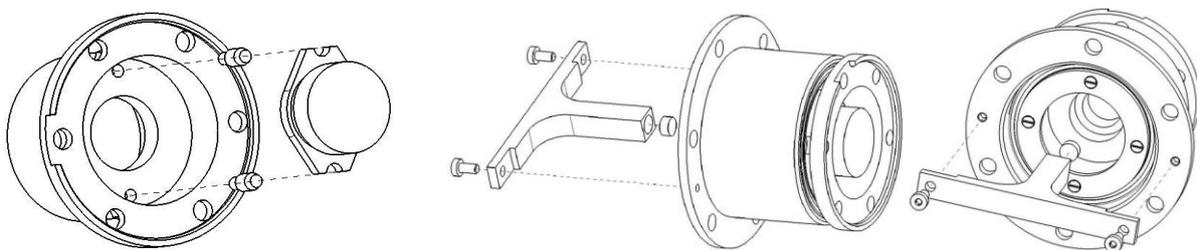


Abbildung 16: Einbau des Drehgebers und des Permanentmagneten

Abb. 17 zeigt die komplett zusammengebaute antriebseitige Baugruppe, wobei der Winkelsensor ENA22K und der dazugehörige Magnet blau eingezeichnet sind. Der Abstand zwischen Magnet und Sensorfläche beträgt 1,4 mm, was innerhalb der vom Hersteller geforderten Spanne von  $1 \pm 0,5$  mm liegt. Zum Zusammenbau der antriebseitigen Baugruppe sei noch einmal erwähnt, dass zuerst die Anschlusschülse mit dem Antrieb und der Sensoranschluss (mit eingesetzten Zentrierstiften und Winkelsensor ENA22K) mit dem Sensor verschraubt werden müssen, bevor die Einzelteile zusammengesteckt werden können und der Lagersicherungsring alles in axiale Richtung fixiert.

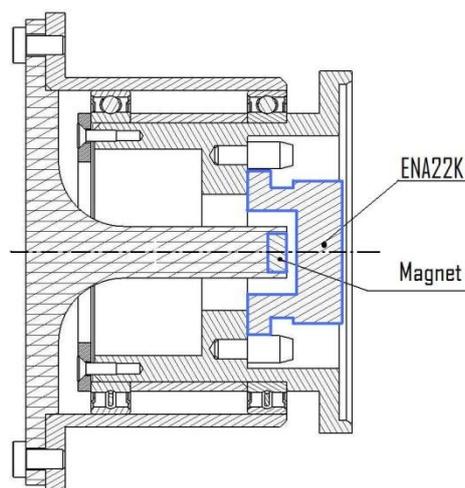
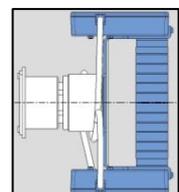


Abbildung 17: Komplette antriebseitige Baugruppe (Drehgeber und Magnet blau markiert)

#### 4.2.2 Griffseitige Baugruppe



Diese Baugruppe befindet sich zwischen dem Kraftsensor K6D40 und der den Sensorgriff bedienenden Hand. Der Baugruppe fallen folgende Funktionen zu:

- Unterbringung der Messelektronik
- Messdaten-Erfassung und kabellose Weiterleitung
- Griffstück (Berührungspunkt zwischen Mensch und Sensorgriff)
- Energieversorgung der elektrischen Bauteile

Die in dieser Baugruppe verwendeten Komponenten sind im Anhang A in der Stückliste A3 aufgelistet.

### **Unterbringung der Messelektronik**

In der griffseitigen Baugruppe muss die Messelektronik, möglichst sicher vor äußeren Einflüssen, untergebracht werden. Vor allem der Schutz vor Staub, Flüssigkeiten und ungewollten Berührungen der Platine und Lötstellen stehen dabei im Vordergrund.

Dieser Schutz wird durch zwei Schutzgehäuse gewährt, die jeweils am oberen und am unteren Ende des Griffbogens angebracht sind. Die Schutzgehäuse bestehen aus ABS Kunststoff und sind für die sichere Verwahrung von Platinen und elektrischen Bauteilen im Handel erhältlich. Nach diversen Ausfräsungen und Bohrungen findet jeweils ein GSV-4BT Messverstärker, inklusive der dazugehörenden Verkabelung, in einem der Gehäuse Platz. Für eine Optimierung hinsichtlich der Größe wäre es selbstverständlich günstiger ein eigens dafür abgestimmtes Gehäuse zu entwerfen und komplett anzufertigen. Aus Kostengründen und um Arbeitszeit zu sparen, wurde jedoch dieser Gehäusotyp einem individuell gefertigten Gehäuse vorgezogen.

### Bearbeitung und Montage der Schutzgehäuse

An den fertig gekauften ABS Gehäusen mussten noch diverse Änderungen vorgenommen werden, damit sie ihre Funktion erfüllen können. In Abb. 18 wird ein Schutzgehäuse mit Materialabnahme an den Innenseiten der Fortsätze für die Deckelschrauben [1] dargestellt. Diese Materialabnahme ist notwendig, um genügend Platz für die Unterbringung des Messverstärkers zu schaffen. Die seitlichen U-förmigen Ausnehmungen [2] dienen der Anbringung von Kabelzugentlastungen, durch die die Kabel in das Innere der Schutzgehäuse gelangen. Außerdem wurden noch eine große Bohrung durch den Boden [3] für die Durchführung des Griffrohres und den Zugang zu den Akkumulatoren, eine kleine Bohrung an der Stirnseite [4] für die Sicherheitsverschraubung und vier kleine Bohrungen durch den Boden [5] für die Fixation des Messverstärkers (teilweise verdeckt) gesetzt.

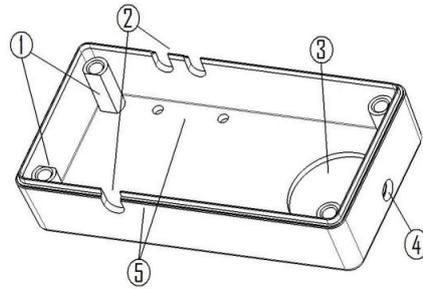


Abbildung 18: Bearbeitung des Schutzgehäuses ([1]-[5] Materialabnahme)

Nach der Bearbeitung wurden die Schutzgehäuse mit dem Griffbogen verklebt, wie in Abb. 19 zu sehen ist. Dafür wurde ein Epoxidharzkleber auf die in der Abbildung rot markierten Flächen aufgetragen. Die Festigkeit dieser Klebstelle sollte im Betrieb mehr als ausreichend dimensioniert sein, da sie keinerlei nennenswerter Belastung ausgesetzt ist. Für den unwahrscheinlichen Fall, dass sich dennoch eine der Klebverbindungen lösen sollte, gibt es jedoch bei jedem Schutzgehäuse an der Stirnseite eine Sicherheitsverschraubung mit dem Griffbogen. Damit wird gewährleistet, dass sich die Schutzgehäuse im laufenden Betrieb, bei Versagen der Klebverbindung, nicht lösen können und dabei die in ihnen enthaltene, sehr kostspielige Messelektronik beschädigen.

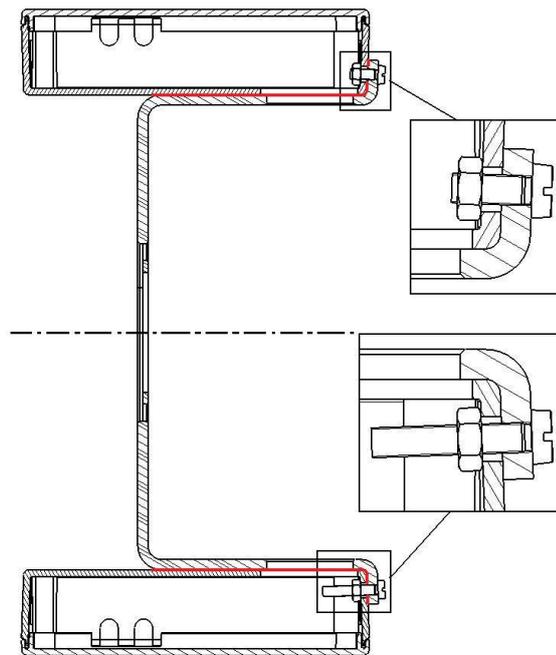


Abbildung 19: Befestigung und Sicherung der Schutzgehäuse (Klebestellen rot markiert)

##### Fixation der Messverstärker

Die GSV-4BT Messverstärker müssen in den Schutzgehäusen fixiert werden, da sie sonst während des Betriebes des Sensorgriffes hin und her geschüttelt werden würden. Diese Fixation geschieht jeweils durch eine kleine Kunststoffplatte, die zwischen Messverstärker und der daran angeschlossenen Platine liegt (siehe dazu Abb. 20). Die Platte ist durch Schrauben fest mit dem Unterteil des Schutzgehäuses verbunden und hält so den Messverstärker an seiner Position.

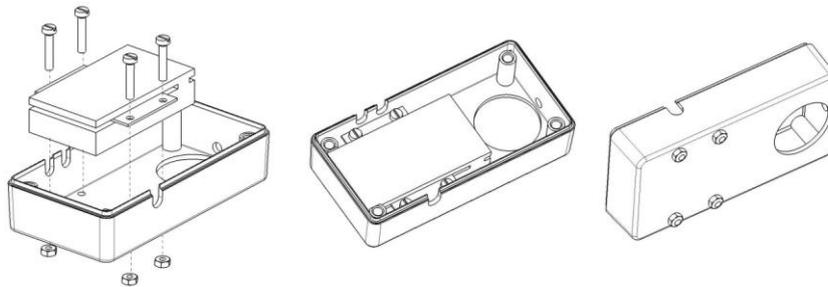


Abbildung 20: Fixation eines Messverstärkers

##### **Griffstück**

Das tatsächliche Griffstück des Sensorgriffes besteht aus einem Rohr, das von einem handelsüblichen Fahrradgriff mit Innendurchmesser von 7/8 Zoll (das entspricht in etwa 22,2 mm) umschlossen wird. Der Fahrradgriff ist mit einer rutschfesten Oberfläche ausgestattet und wird an beiden Enden über Metallmanschetten fixiert.

Das Rohr besteht aus gewickeltem Carbon, da es dadurch leichter als ein Metallrohr ist und bei ausreichender Festigkeit auch mit einer geringen Wandstärke ausgeführt werden kann. Ein Aluminium- oder Edelstahlrohr mit einem Außendurchmesser von 22 mm wird mit einer minimalen Wandstärke von 1 mm ausgeführt, wodurch ein Innendurchmesser von 20 mm zustande kommt. Da die sich im Rohr befindlichen Lilo-Akkus einen Durchmesser von 18,4 mm haben und auch noch ein Verbindungskabel für die Parallelschaltung der Akkus daran vorbeilaufen muss, würde der Platz bei einem Metallrohr nicht ausreichen. Das Carbon-Rohr hingegen weist bei einer Wandstärke von 0,5 mm und einem Innendurchmesser von 21 mm auch noch eine weitaus höhere Festigkeit gegen jegliche Art von Beanspruchung auf.

Das Carbonrohr ragt beidseitig über den Fahrradgriff hinaus und ist mittels zweier Gleitlagerbuchsen aus Kunststoff im Griffbogen gelagert, sodass das Griffstück um die eigene Achse verdreht werden kann. Diese Lagerung entfernt die Auswirkung jenes Momentes, das durch das Verdrehen des Griffstückes entstehen würde, also durch die Palmarflexion und die Dorsalextension des Handgelenkes. In Abb. 21 ist ein Schnitt durch Griffbogen, Griffrohr und Fahrradgriff gelegt, wobei die Gleitlagerbuchsen grün markiert sind.

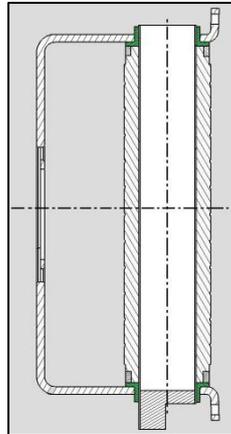


Abbildung 21: Griffstück (Gleitlagerbuchsen grün markiert)

Als Angriffspunkt des Menschen an den Sensorgriff werden besondere ergonomische Anforderungen an das Griffstück gestellt. Speziell aus diesem Grund wurde kein eigener Griff gefertigt, sondern ein qualitativ hochwertiger Fahrradgriff verwendet. Da sich Form und Materialien eines solchen Griffes unter täglicher Belastung bewährt haben, wird davon ausgegangen, dass er auch für den Einsatz im Sensorgriff ausreichend gut geeignet ist.

#### Verdrehsicherung

Um zu verhindern, dass das Griffstück des Sensorgriffes um mehr als 360° verdreht werden kann, ist es dagegen abgesichert. Diese Verdrehsicherung dient dem Schutz der Kabel, die die Lilo-Akkus mit dem Messverstärker verbinden, und der Kabelanschlussstellen an Akkus und Messverstärker.

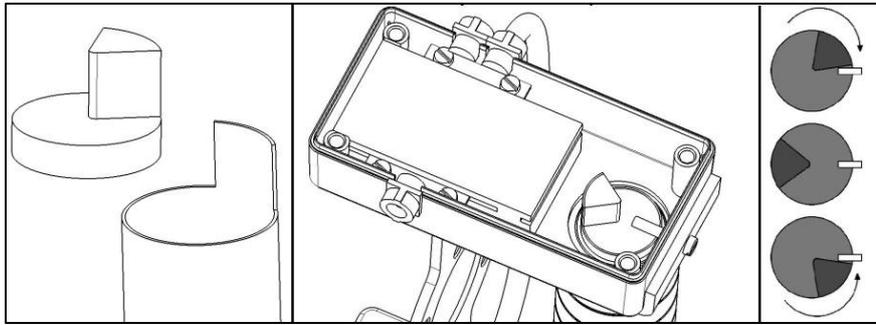


Abbildung 22: Verdrehsicherung

In Abb. 22 sieht man das untere Schutzgehäuse mit der darin befindlichen Verdrehsicherung. Dafür wurde am unteren Ende des Carbon-Rohres bewusst ein Steg stehen gelassen, der ab einem bestimmten Verdrehwinkel der Griffstückachse, sowohl in positiver als auch negativer Drehrichtung, an der unteren, länger ausgeführten, Sicherungsschraube anstößt. Um diesem Steg, des doch recht dünnwandigen Rohres, mehr Stabilität zu verleihen, wurde ein Rohrverschluss aus Kunststoff in das untere Ende des Rohres mit Epoxidharzkleber eingeklebt. Der keilförmige Fortsatz des Rohrverschlusses unterstützt dabei den Steg und verhindert das Wegbrechen desselben, sollte einmal ein übermäßig großes Drehmoment auf die Griffstückachse aufgebracht werden.

Bedingt durch die zwei Anschläge lässt sich der Griff, ausgehend von einer Mittellage, in beide Drehrichtungen um ca.  $123^\circ$  verdrehen, was eine gesamte zulässige Verdrehung von  $246^\circ$  ergibt. Das sollte im Betrieb ausreichen, sodass die Verdrehsicherung eine reine Vorsichtsmaßnahme bleibt.

### 4.2.3 Stromversorgung

Die Stromversorgung der Sensoren erfolgt über die GSV-4BT Messverstärker, welche durch Lithium-Ionen-Akkumulatoren gespeist werden. Dafür wurden zwei Stück der Lilo-Akkus (3,7 V und 3400 mAh) hintereinander angeordnet und mit einem Schrumpfschlauch überzogen (siehe Abb. 23).

Im Anschluss daran wurden sie parallel geschaltet um ein Akku-Pack mit erhöhter Kapazität zu erhalten und somit die Einsatzzeit des Sensorgriffes zu verlängern. Die gesamte Kapazität dieses Akku-Packs beträgt demnach 6800 mAh, wobei die Spannung mit 3,7 V gleich bleibt.



Abbildung 23: Akku-Pack

Das Akku-Pack passt mit seiner Länge von 142 mm und dem Durchmesser von 20,5 mm genau in das Griffrohr. Durch den Rohrverschluss im unteren Teil des Carbon Rohres wird verhindert, dass das Akku-Pack bis in das unten liegende Schutzgehäuse rutschen kann.

Um an das Akku-Pack heranzukommen, muss die Abdeckung des oberen Schutzgehäuses für den Messverstärker abgeschraubt werden. Die leeren Akkus, die über ein BEC-Steckersystem mit dem Messverstärker verbunden sind, können dann schnell und einfach gegen ein vorhandenes Ersatz-Akku-Pack getauscht werden.

Im Einsatz verbrauchen die zwei Messverstärker GSV-4BT bei maximaler Belegung, also angeschlossenen Sensoren an allen acht Kanälen, laut Hersteller ca. 400 mA. Dadurch kommt man mit einem Akku-Pack mit 6800 mAh theoretisch auf eine Einsatzzeit von 17 Stunden.

Für den Verbrauch im Standby-Modus werden vom Hersteller der Messverstärker 10 mA angegeben. Wenn man also nach einer Testung vergessen sollte, die Verbindung zwischen Stromversorgung und Messverstärker zu trennen, verliert das Akku-Pack dennoch nur 240 mAh Kapazität pro Tag und würde demnach, bei anfänglich vollem Ladestand, noch über 28 Tage einsatzfähig bleiben.

Die Lilo-Akkus können mit dafür vorgesehenen Ladegeräten geladen werden, solange diese mit dem IU-Ladefahren arbeiten. Dieses Ladefahren wird auch CCCV (constant current constant voltage) genannt und ist speziell auf die Bedürfnisse von Lilo-Akkus abgestimmt. In Abb. 24 wird eine charakteristische Ladekurve für das IU-Ladefahren dargestellt.

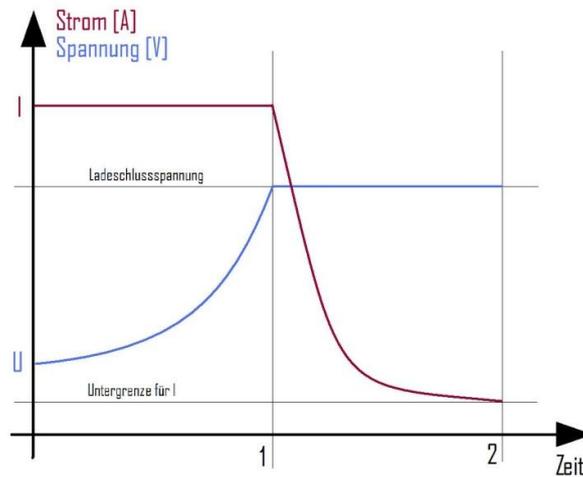


Abbildung 24: IU-Ladeverfahren

Dabei wird zuerst mit einem konstanten Strom geladen, bis die Ladeschlussspannung [1] von 4,2 V erreicht ist. Für den Rest der Ladezeit wird die Spannung konstant gehalten, wobei der Ladestrom immer weiter absinkt, bis eine vorher definierte Untergrenze [2] unterschritten wird und das Laden des Akku-Packs abgeschlossen ist.

Da sich Lithium-Ionen-Akkumulatoren sehr stark erhitzen, Feuer fangen und sogar explodieren können, wenn die Ladeschlussspannung überschritten wird, besitzt jeder Akku eine speziell ausgelegte Sicherungselektronik, die dieses Überladen verhindern soll. Zusätzlich darf nur das im Zuge der Diplomarbeit dafür angekaufte Ladegerät verwendet werden.

#### 4.2.4 Verkabelung der Messelektronik

Wie in Abb. 25 zu sehen ist, mussten am Sensorgriff nach Zusammenbau der mechanischen Komponenten, diverse elektrische Verbindungen vorgenommen werden.

Das 24-polige Kabel des Kraftsensors [1] wurde auf zwei 12-polige Kabel aufgesplittet wobei eines zum oberen und eines zum unteren Schutzgehäuse verläuft. Jeweils vier der im Kabel enthaltenen Litzen gehören zu einem Kanal des Kraftsensors. Für die Inbetriebnahme des K6D40 wurden am oberen Messverstärker an den Kanälen eins bis drei jeweils die Litzen für Versorgungsspannung ( $U_{0+}$  und  $U_{0-}$ ) und die Litzen für die Differenzspannung ( $U_{d+}$  und  $U_{d-}$ ) an die passenden Lötäugen angelötet. Am unteren Messverstärker wurden die 12 Litzen des zweiten Kabels in gleicher Weise an die Kanäle eins bis drei angelötet.

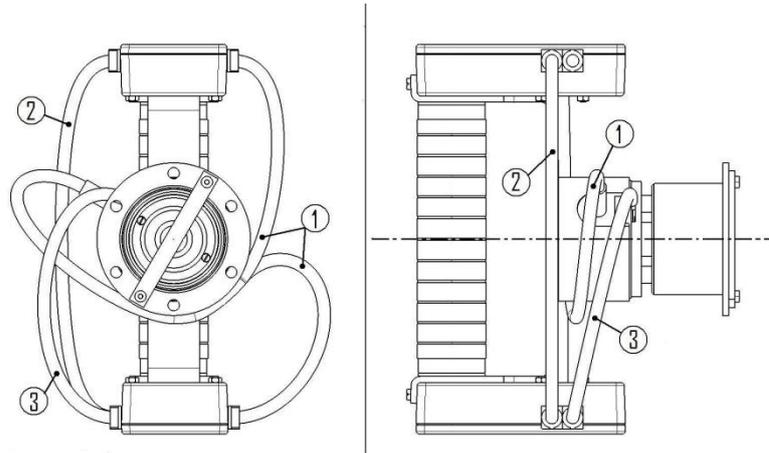


Abbildung 25: Verkabelung ([1] Kraftsensor-Messverstärker / [2] Messverstärker – Messverstärker / [3] Drehgeber – Messverstärker)

Ein 4-poliges Kabel verbindet den oberen mit dem unteren Messverstärker [2]. Dabei werden zwei Litzen für die Energieversorgung des zweiten Messverstärkers benötigt, eine Litze für die Synchronisation der Messverstärker und eine Litze des Kabels bleibt unbelegt.

Ein weiteres 4-poliges Kabel verbindet den Drehgeber mit dem unteren Messverstärker [3], wobei ebenfalls nur drei Litzen benötigt werden. Zwei Litzen dienen dabei der Stromversorgung des Sensors und sind an die interne Versorgungsspannung des oberen Messverstärkers angeschlossen. Die dritte Litze liefert das ratiometrische Spannungssignal und wurde am unteren Messverstärker am vierten Kanal an der „0-5 V“-Lötstelle angeschlossen.

Alle dafür verwendeten Kabel besitzen eine Abschirmung, um das durch Umwelteinflüsse entstehende Rauschen so klein wie möglich zu halten, wenngleich das bei diesen geringen Kabellängen nicht zwingend notwendig wäre.

Außerdem wurden an den Durchgangsöffnungen der Schutzgehäuse Kabelzugentlastungen mit den Kabeln verklebt. Dies soll davor schützen, dass durch zu starken Zug an den Kabeln, die Lötstellen auf den Messverstärkerplatinen beschädigt beziehungsweise gelöst werden können.

An die, bereits vom Hersteller angebrachten, Kabel für die Energieversorgung des oberen Messverstärkers wurde ein BEC-Stecksystem gelötet, das mit dem Stecker des Akkupacks kompatibel ist. Dieses Stecksystem findet aufgrund seiner geringen Größe genügend Platz im oberen Schutzgehäuse.

## 4.3 Berechnungen

Um die Konstruktion ausreichend stabil auslegen zu können, muss zuerst festgelegt werden, welche am Griff auftretenden Maximalkräfte zu erwarten sind. Da zu diesem Thema nicht besonders viele Datensätze zur Verfügung stehen, wurden die wenigen verfügbaren Studien verglichen und eine maximal auftretende Kraft  $F_H = 150 \text{ N}$  angenommen. Diese Kraft  $F_H$  kann sowohl in die x- als auch y-Richtung des Kraftsensor-Koordinatensystems auftreten. Für die in die z-Richtung auftretenden Kräfte stehen keinerlei Datensätze zur Verfügung. Es wird jedoch erwartet und davon ausgegangen, dass diese Kräfte so gering ausfallen, dass sie im Verlauf der Messungen keine nennenswerte Rolle spielen.

In den vorhandenen Datensätzen, die sich mit Greifring-Rollstühlen befassen, ist von einer maximal gemessenen Antriebsgeschwindigkeit  $v_R$  von 1,67 m/s die Rede. Geht man davon aus, dass ein durchschnittliches Rollstuhlrاد einen Durchmesser  $d_R$  von 24 Zoll besitzt, was ungefähr 610 mm entspricht, so kann man daraus die zu erwartende Drehzahl  $n_R$  des Rades bestimmen:

$$n_R = \frac{v_R}{\pi * d_R} = 0,87 \frac{1}{s} \quad . \quad (4.11)$$

Da zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Diplomarbeit noch keine konkreten Daten über den Verlauf der Antriebskurve vorliegen und die zu erwartende Drehzahl mit ca. 53 U/min, im Vergleich mit anderen Maschinenbau-Applikationen, sehr gering ausfällt, werden die Berechnungen im Folgenden nur für statische Belastungsfälle durchgeführt.

### 4.3.1 Lagerauslegung

Die im Sensorgriff verbauten Dünnringlager vom Typ 61708-2RS wurden primär aufgrund ihrer passenden Abmaße ausgewählt. Die Dünnring-Bauweise bietet sich dabei besonders an, da sie einen weitaus kleineren Außendurchmesser (50 mm statt 68 mm) und eine geringere Breite (6 mm statt 9 mm) als Standard-Rillenkugellager aufweist. Der Nachteil

dieser Bauweise liegt jedoch ganz klar in der deutlich verminderten Tragzahl, sowohl im statischen als auch im dynamischen Bereich.

Die nachfolgende Berechnung soll zeigen, dass die verbauten Dünnringlager den auftretenden Belastungen standhalten können und daher eine passende Auswahl darstellen. Zur Ermittlung der in den Lagern maximal auftretenden Radialkräfte, wird ein einfaches Balken-Modell herangezogen.

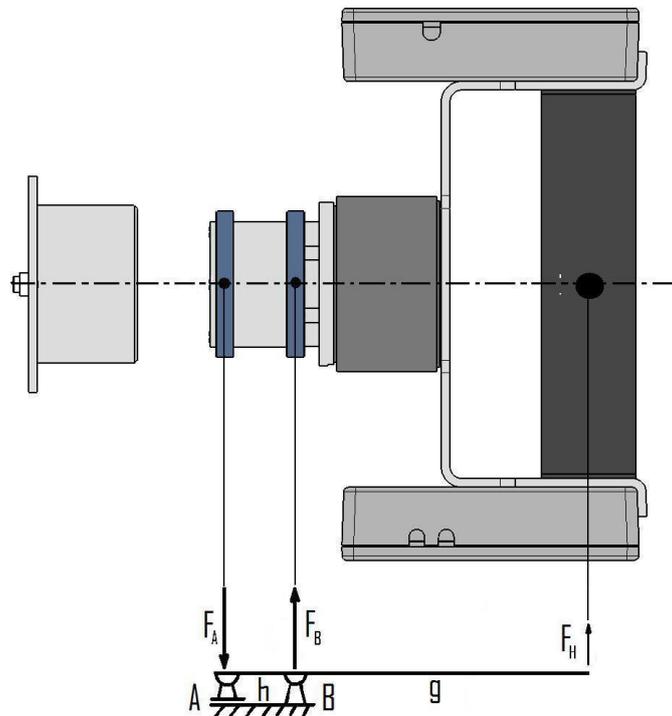


Abbildung 26: Lagerauslegung

Abb. 26 zeigt den Sensorgriff mit abgezogener Anschlusschülse. Die Kraft  $F_H$  greift dabei genau im Zentrum des Griffstückes an und bewirkt dabei das Entstehen der Kräfte  $F_A$  auf das weiter vom Kraftsensor entfernte, beziehungsweise  $F_B$ , auf das dem Kraftsensor näher gelegene Lager. Die Entfernung  $h$ , zwischen den Lagermittelpunkten, beträgt dabei 24 mm und die Entfernung  $g$ , zwischen Angriffspunkt der Kraft  $F_H$  und dem nahe dem Kraftsensor gelegenen Lager, beträgt 100 mm.

Mit der Vereinfachung einer statischen Gleichgewichtslage und der Annahme, dass die Summe aller Kräfte im System, sowie die Summe aller Momente um einen Punkt im System gleich null ist, ergibt die Berechnung:

$$\sum M_A: F_B * h - F_H * (h + g) = 0 \quad (4.12)$$

$$\Leftrightarrow F_B = F_H * \frac{(h+g)}{h} = 775 \text{ N}$$

$$\sum F: F_A - F_B + F_H = 0 \quad (4.13)$$

$$\Leftrightarrow F_A = F_B - F_H = F_H * \frac{(h+g)}{h} - F_H = F * \frac{g}{h} = 625 \text{ N}$$

Da beide Lager der gleichen Bauart entsprechen, wird im weiteren Verlauf der Berechnung nur das stärker belastete Lager B berücksichtigt.

Die die Lagerauslegung betreffenden Berechnungen wurden mit Hilfe des Fachbuches „Roloff/Matek – Maschinenelemente, 16. Auflage“ durchgeführt.

Die dynamische Tragzahl C eines Dünnringlagers 61708-2RS beträgt laut Hersteller 2516 N. Die dynamisch äquivalente Lagerbelastung P ergibt sich aus:

$$P = X * F_r + Y * F_a \quad . \quad (4.14)$$

Da, wie bereits erwähnt, die Axialkräfte  $F_a$  vernachlässigbar gering ausfallen, wird für die Berechnung der Kugellager eine rein radiale Belastung  $F_r$  angenommen. Dadurch ergibt sich bei der Verwendung eines Rillenkugellagers der Radialfaktor  $X=1$  und der Axialfaktor  $Y = 0$ . Mit der Lagerkraft A als  $F_r$  ergibt sich  $P = 775 \text{ N}$ .

Die Kennzahl der dynamischen Beanspruchung  $f_L$  berechnet sich aus:

$$f_L = \frac{C}{P} * f_n \quad , \quad (4.15)$$

wobei der Drehzahlfaktor  $f_n$  wie folgt ermittelt wird:

$$f_n = \sqrt[p]{\frac{33\frac{1}{3}}{n}} \quad , \quad (4.16)$$

mit dem Lebensdauerexponent  $p = 3$  für Kugellager und der Drehzahl  $n = 53 \text{ U/min}$  des Lagers.

$$\Leftrightarrow f_n = 0,857$$

$$\Leftrightarrow f_L = 2,782$$

Da es sich beim Sensorgriff um eine Spezialanwendung handelt, gibt es jedoch weder einen Richtwert noch einen angestrebten Erfahrungswert für  $f_L$ , wodurch die nominelle Lebensdauer des Lagers weitaus mehr Aussagekraft besitzt.

Die nominelle Lebensdauer in  $10^6$  Umdrehungen  $L_{10}$  und die nominelle Lebensdauer in Betriebsstunden  $L_{10h}$  berechnen sich zu:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p = 34,22 \quad [10^6 \text{ Umdr.}] \quad (4.17)$$

und:

$$L_{10h} = \frac{10^6 * L_{10}}{60 * n} = 10761 \quad [h] \quad (4.18)$$

Die Lebenserwartung des Lagers A von über 10000 Stunden ist ausreichend groß, da es sich bei dem Sensorgriff um eine Konstruktion handelt, die nicht durchgehend in Verwendung steht, sondern nur für relativ kurze Messungen zum Einsatz kommt. Außerdem ist die Kraft  $F_H$  sehr groß gewählt, wodurch sich unter realen Bedingungen voraussichtlich eine weitaus längere Lebensdauer ergeben wird.

Treten dennoch nach Ablauf der Lebensdauer, oder auch schon davor, Lagerschäden auf, so sind die Dünnringlager mit nicht allzu großem Aufwand auswechselbar.

### 4.3.2 Festigkeitsberechnung

Da der Sensorgriff möglichst materialsparend ausgeführt ist, um Gewicht und Abmaße gering zu halten, muss an kritischen Stellen überprüft werden, ob das Material den Beanspruchungen standhalten kann.

Von den tatsächlich durch die Antriebskraft belasteten Bauteilen zu denen das Griffstück, der Griffbogen, der Kraftsensor, der Sensoranschluss, die Wälzlager und die Anschlusshülse zählen, wurde die Auswahl der Wälzlager bereits bestätigt. Der Sensoranschluss und die Anschlusshülse weisen durch ihre hohlzylindrische Form, die konstruktionsbedingten Abmaße und durch den für die Fertigung verwendeten Edelstahl eine ohnehin sehr hohe Festigkeit auf und müssen daher nicht genauer überprüft werden. Die zulässigen Kräfte und Momente die auf den Kraftsensor K6D40 wirken dürfen, ohne diesen zu beschädigen,

werden bei sachgerechter Bedienung des Sensorgriffes nicht überschritten, weswegen dieser Bauteil ebenfalls als ausreichend dimensioniert anzusehen ist.

Im Griffstück, das aus einem Carbon-Rohr besteht und von einem Fahrradgriff ummantelt ist, befinden sich die Akkumulatoren, die sehr passgenau darin untergebracht sind, wie in Abb. 27 schematisch dargestellt wird. Dadurch kann das gesamte Griffstück als Balken mit zylinderförmigem Querschnitt betrachtet werden. Der Durchmesser und das daraus resultierende Widerstandsmoment und die Querschnittsfläche sind jedoch so groß, dass die auftretenden Biege- und Schubspannungen verschwindend gering ausfallen und daher nicht explizit berechnet werden.

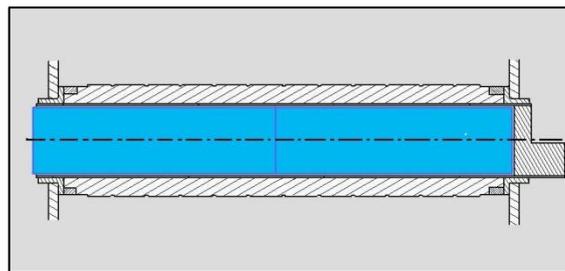


Abbildung 27: Akku-Pack im Griffstück

Im Folgenden wird also nur der Griffbogen näher betrachtet und die Festigkeit desselben für zwei spezielle Belastungsfälle nachgeprüft. Belastungsfall 1 (in Abb. 28 mit blauem Pfeil dargestellt) geht von einer Belastung  $H_x$  genau in der Mitte des Griffstückes, rein in  $x$ -Richtung des sensorgriffesten Koordinatensystems, aus. Belastungsfall 2 (in Abb. 28 mit rotem Pfeil dargestellt) geht von einer Belastung  $H_y$  des Griffstückes, rein in  $y$ -Richtung des sensorgriffesten Koordinatensystems, aus. In beiden Fällen wird für die Belastung die maximal auftretende Kraft  $F_H = 150 \text{ N}$  angenommen. Es gilt also:

$$F_H = H_x = H_y = 150 \text{ N} .$$

Der Griffbogen weist eine komplexere Geometrie auf und es ist daher nicht sofort ersichtlich, wo die größten Spannungen auftreten können. Aus diesem Grund wurde für die zwei Belastungsfälle, mit der im Konstruktionsprogramm Catia v5 enthaltenen Finite Elemente Methode (FEM), eine Analyse durchgeführt. Für die damit ermittelten Stellen höchster Belastung wurden im Anschluss daran analytische Berechnungen angestellt, um die Ergebnisse der FEM zu bestätigen und zu überprüfen.

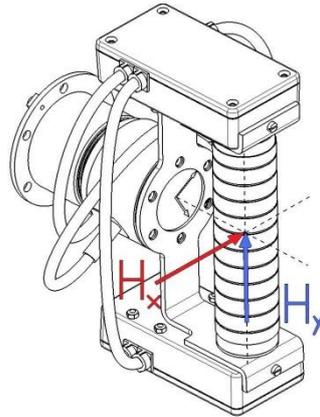


Abbildung 28: Zwei Belastungsfälle

Da zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Diplomarbeit noch keinerlei konkrete Auskünfte über den Bewegungszyklus des neuartigen Antriebssystems vorliegen, werden im Folgenden nur statische Belastungen überprüft. Da die Kraft  $F_H$  mit 150 N jedoch recht hoch angenommen ist und die Antriebsfrequenz mit  $<1$  Hz (nicht einmal ein voller Antriebszyklus pro Sekunde) recht niedrig ausfällt, sollten die in der statischen Überprüfung ermittelten Ergebnisse über genug Aussagekraft verfügen.

### Belastungsfall 1

Die maximal auftretende Kraft  $H_x = F_H$  tritt normal zur Griffstückachse, rein in x-Richtung des ortsfesten Koordinatensystems, auf, wie in Abb. 28 zu sehen ist. Dabei wird angenommen, dass vom Griffstück über die Gleitlagerbuchsen jeweils eine Kraft von  $H_x/2$  auf den oberen und den unteren Teil des Griffbogens wirkt.

Für die FEM Analyse mussten zuerst die Randbedingungen, wie Einspannungen und am Bauteil ansetzende Kräfte, definiert werden. Abb. 29 zeigt die gewählten Einspannungen.

Dabei wurde die Zentrierbohrung, mit der der Griffbogen über eine ringförmige Erhebung des Kraftsensors geschoben wird, für radiale Verschiebungen und für die Verdrehung um die Sensorgriffachse gesperrt. Weiters wurde die Fläche mit der der Griffbogen auf dem Sensor aufliegt für Verschiebungen entlang der Sensorgriffachse gesperrt. Ebenso wurden die Schraubendurchgangslöcher des Griffbogens für Verschiebungen in alle drei Richtungen des Raumes gesperrt.

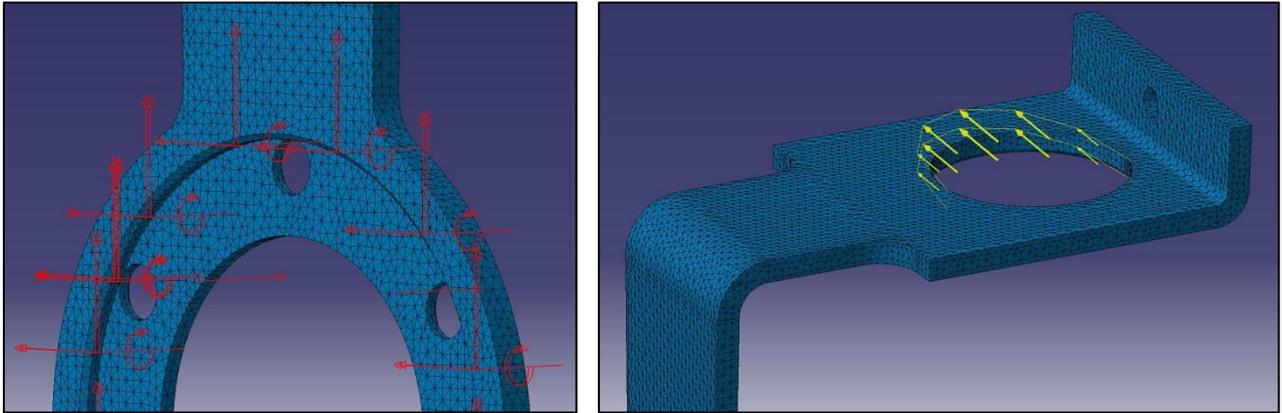


Abbildung 29: Einspannungen und Krafteinleitung - 1. Belastungsfall

An die Bohrungen, in denen im Griffbogen die Gleitlagerbuchsen sitzen, wurden Lagerlasten von jeweils 75 N mit parabolischer Lastverteilung gelegt (siehe Abb. 29). Für das Netz, das für die Finite Elemente Methode notwendig ist, wurden parabolische Elemente mit einer Seitenlänge von 1 mm verwendet.

Die Durchführung der FEM ergibt eine Spannungsverteilung, wie in Abb. 30 dargestellt ist (aufgrund der Symmetrie wird hier nur die obere Hälfte des Griffbogens gezeigt). Dabei sind die blau eingefärbten Bereiche weitestgehend spannungsfrei, wohingegen die grüne Fläche ein Spannungsfeld anzeigt. Die Maximalspannung tritt dabei in der Mitte des grünen Bereichs, mit einem Abstand von 47,5 mm zum Lochkreismittelpunkt, auf und beträgt  $89,58 \text{ N/mm}^2$ .

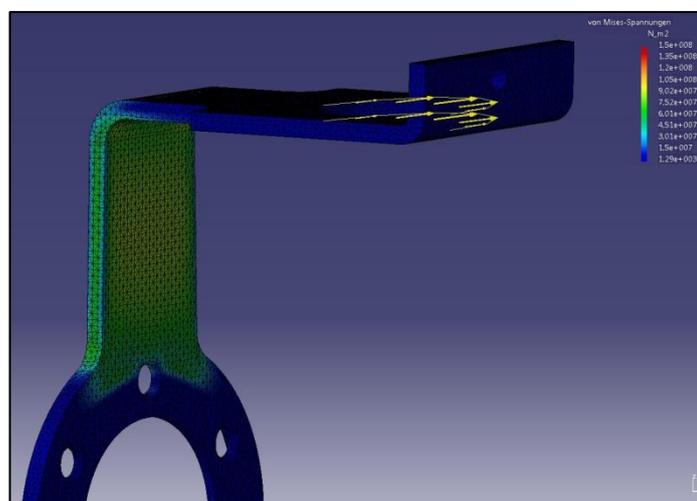


Abbildung 30: Spannungsverteilung - 1. Belastungsfall

Für die rechnerische Überprüfung wird, wie in Abb. 31 zu erkennen ist, ein einfaches Balkenmodell herangezogen. Der Kraftangriffspunkt befindet sich dabei im Mittelpunkt des (in Abb. 31 nicht dargestellten) Griffstückes. Es wird angenommen, dass jeweils die Hälfte der Kraft  $F$  an der oberen und unteren Bohrung [1 & 2], in denen die Gleitlagerbuchsen stecken, ansetzt. Da der Griffbogen absolut symmetrisch ist, wird im Folgenden die Überprüfung auf Festigkeit nur für den gefährdeten Punkt P [3] im oberen Spannungsfeld durchgeführt. Die Länge  $w$  ergibt sich aus der Konstruktion mit 47 mm und der Abstand  $v$  ergibt sich aus der FEM Analyse mit 20,5 mm. Für die folgende Berechnung gilt das in Abb. 31 eingezeichnete Koordinatensystem.

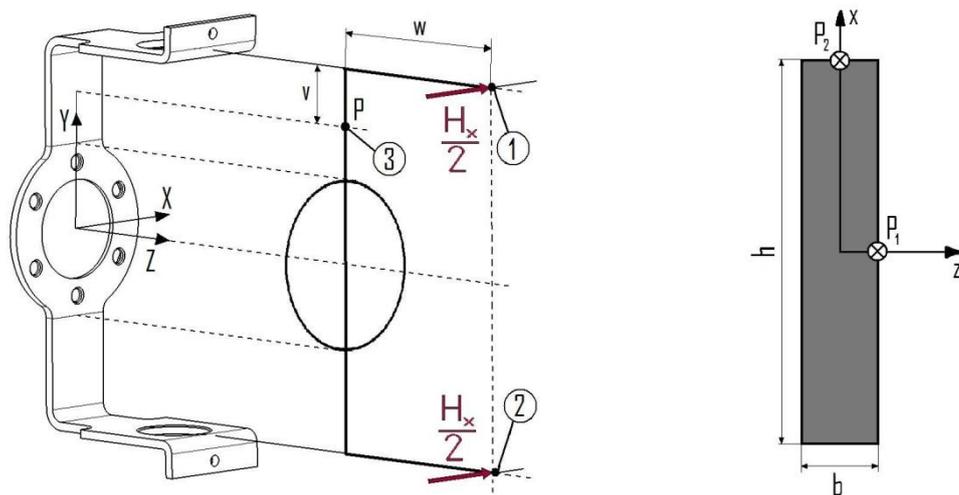


Abbildung 31: Lage und Querschnitt der am stärksten belasteten Stelle – 1. Belastungsfall

Auf den Punkt P wirkt eine kombinierte Belastung aus Biege-, Torsions- und Schubspannung. Dabei berechnet sich das Biegemoment  $M_b$  in P zu:

$$M_b = \frac{H_x}{2} * v = 1537,5 \text{ N} * \text{mm} \quad (4.19)$$

und das Torsionsmoment  $M_t$  in P zu:

$$M_t = \frac{H_x}{2} * w = 3525 \text{ N} * \text{mm} \quad (4.20)$$

Für die Biege- und Torsionsspannung im Punkt P fehlen noch das Widerstandsmoment und das polare Widerstandsmoment für einen rechteckigen Querschnitt mit einer Breite  $b$  von 3 mm und einer Höhe  $h$  von 25 mm (siehe Abb. 31).

Das Widerstandsmoment  $W_z$  berechnet sich dabei zu:

$$W_z = \frac{b * h^2}{6} = 312,5 \text{ mm}^3 \quad (4.21)$$

und das polare Widerstandsmoment  $W_t$  mit einem  $h/b$ -Verhältnis von 8,33 und einem daraus resultierenden  $c_1$  von 2,57 berechnet sich zu:

$$W_t = c_1 * b^3 = 69,39 \text{ mm}^3 \quad . \quad (4.22)$$

Damit lässt sich die maximale Biegespannung  $\sigma_{bmax}$  in P an der Stelle  $P_2$  (in der Randfaser) ermitteln:

$$\sigma_{bmax} = \frac{M_b}{W_z} = 4,92 \frac{N}{\text{mm}^2} \quad , \quad (4.23)$$

so wie auch die maximale Torsionsspannung  $\tau_{tmax}$  in P an der Stelle  $P_1$  (in der Mitte der längeren Seite des rechteckigen Querschnittes):

$$\tau_{tmax} = \frac{M_t}{W_t} = 50,80 \frac{N}{\text{mm}^2} \quad . \quad (4.24)$$

Die Schubspannung  $\tau_{smax}$ , erzeugt durch die Querkraftbelastung, ist bei einem rechteckigen Querschnitt bei  $P_1$  (siehe Abb. 31) am höchsten und beträgt in diesem Fall, mit einer Querschnittsfläche A von  $75 \text{ mm}^2$ :

$$\tau_{smax} = \frac{3}{2} * \frac{H_x}{2 * A} = 1,5 \frac{N}{\text{mm}^2} \quad . \quad (4.25)$$

In die Hypothese für die größte Gestaltänderungstheorie (von-Mises Vergleichsspannung) eingesetzt ergibt das:

$$\sigma_{Vmax} = \sqrt{\sigma_{bP_1}^2 + 3 * (\tau_{tmax} + \tau_{smax})^2} = 90,59 \frac{N}{\text{mm}^2} \quad , \quad (4.26)$$

wobei hier an der Stelle  $P_1$  gerechnet wird, wo die wenig ins Gewicht fallende Biegespannung  $\sigma_{bP_1}$  gleich Null ist, die Torsions- und Schubspannung jedoch den größten Wert annehmen.

Vergleicht man die Werte aus FEM und rechnerischer Überprüfung, ergibt sich ein Unterschied von ca. 1%. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Randbedingungen für die FEM passend gewählt wurden.

Daraus folgt, dass der Griffbogen für diesen Lastfall ausreichend stark dimensioniert worden ist, da das dafür verwendete Memory-Carbon Verbundmaterial eine minimale Biege- als auch Zugfestigkeit von  $900 \text{ N/mm}^2$  aufweist. Da bei dieser statischen Belastung zwischen zu erwartender Spannung und zulässiger Spannungsgrenze eine relativ große Sicherheit vorliegt, kann davon ausgegangen werden, dass die Festigkeit im laufenden Betrieb ebenfalls ausreichend hoch ist.

## Belastungsfall 2

Im zweiten Fall tritt die Maximalkraft  $F$  rein in positive  $y$ -Richtung auf (siehe Abb. 28).

Durch die zwei Schultern am Griffstück, die durch den Fahrradgriff entstehen, der über das Carbon-Rohr geschoben ist, wird dieses zwischen den zwei Durchgangsbohrungen im Griffbogen in Position gehalten. Diese Schultern verhindern das Durchrutschen durch die obere Bohrung in positive, nicht jedoch in negative  $y$ -Richtung, wie in Abb. 32 zu sehen ist. Wird daher das Griffstück rein in positive  $y$ -Richtung belastet, wie im 2. Belastungsfall, tritt an der oberen Bohrung des Griffbogens die Kraft  $H_y = F_H$  auf, an der unteren Bohrung jedoch keine Kraft.

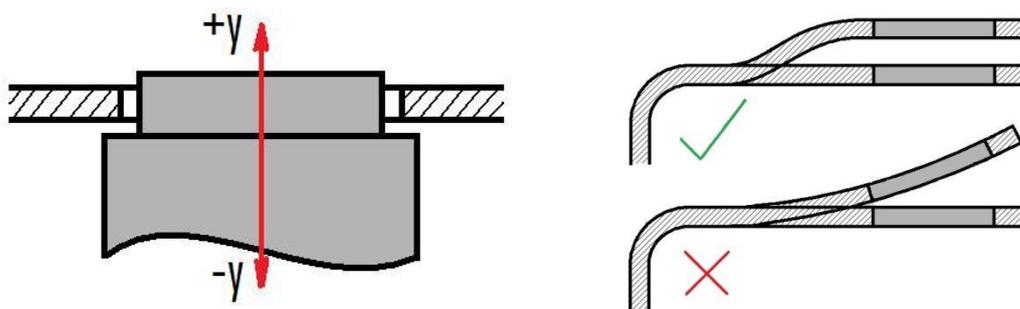


Abbildung 32: Krafteinleitung Griffbogen – 2. Belastungsfall

Für die FEM Analyse wurden dieselben Einspannungen wie im ersten Belastungsfall vorgenommen. Zusätzlich wurde jedoch noch ein virtueller Körper erzeugt, der mit der Innenfläche der oberen Durchgangsbohrung in Kontakt steht und gegen Verdrehungen gesperrt ist. Das simuliert das Carbon-Rohr, das in der Durchgangsbohrung steckt, so dass sich die Bohrung nur entlang dieses Rohres nach oben oder unten verschieben, jedoch nicht neigen kann (in Abb. 32 schematisch dargestellt).

Die Kraft  $H_y$  mit 150 N wurde auf einer ringförmigen Fläche, die in ihren Abmaßen dem Flansch der Gleitlagerbuchse entspricht, um die obere Durchgangsbohrung herum als verteilte Last angebracht. Für das Netz wurden parabolische Elemente mit einer Größe von 1,5 mm verwendet.

Die durch die FEM Analyse ermittelte Spannungsverteilung wird in Abb. 33 dargestellt. Dabei erkennt man, dass nur am Bohrungsrand Spannungsspitzen von bis zu  $265 \text{ N/mm}^2$  entstehen und zwar genau dort, wo das virtuelle Rohr verkantet. In der oberen Beuge des Griffbogens entsteht eine Maximalspannung von  $65 \text{ N/mm}^2$ .

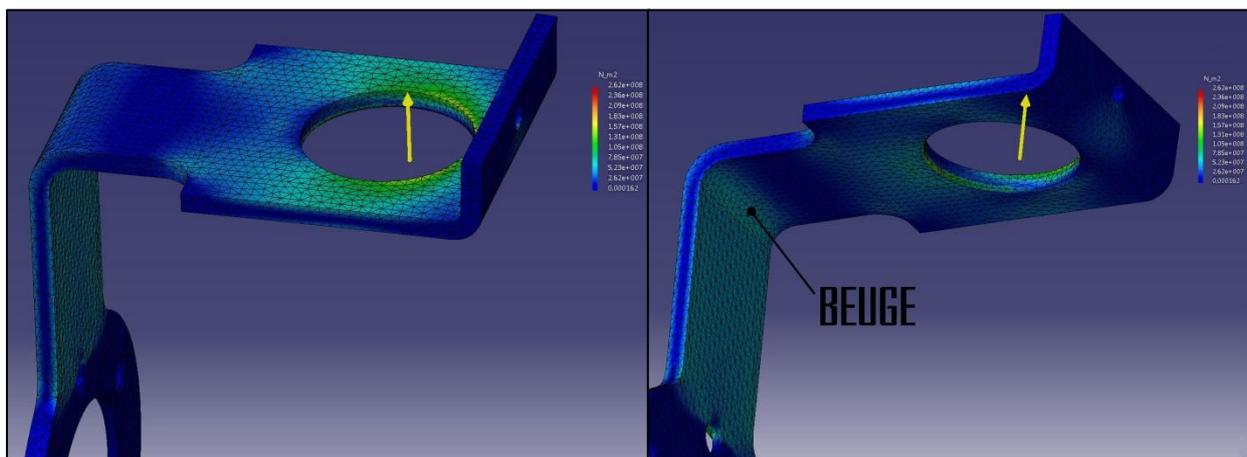


Abbildung 33: Spannungsverteilung – 2. Belastungsfall

Auf die Durchführung einer rechnerischen Nachprüfung wurde im zweiten Belastungsfall verzichtet, da sich die Einspannungen und Randbedingungen für den ersten Fall schon als passend herausgestellt hatten und, da die mit der FEM ermittelten Spannungen auch in diesem Fall weit unter den zulässigen Spannungsgrenzen des Materials liegen.

Auch für diesen Belastungsfall kann, im Bezug auf die Dimensionierung und Festigkeit im dynamischen Fall, dieselbe Schlussfolgerung wie für den Belastungsfall 1 gezogen werden.

## 5 Ergebnisse

Nach Konstruktion, Anfertigung und Zusammenbau des Sensorgriffes soll dargestellt werden, in welchem Maße die an den Sensorgriff gestellten Anforderungen, konstruktiver (kompaktes Design) und funktioneller (lange Laufzeit, kabellose Datenübertragung) Art, erfüllt wurden.

Weiters soll mit Hilfe von unterschiedlichen Testaufbauten gezeigt werden, dass der Sensorgriff einsatzfähig ist und brauchbare Messdaten liefert.

### 5.1 Erfüllung der Anforderungen

Die zu Beginn der Diplomarbeit festgelegten Anforderungen an den Sensorgriff, wurden in der Aufgabenstellung dargelegt. Wichtig sind dabei (neben der Einsatzfähigkeit) das kompakte Design, die lange Laufzeit und die kabellose Datenübertragung.

Das Design und die Datenübertragung werden im Folgenden kurz analysiert, über die Laufzeit des Sensorgriffes wurde jedoch schon im Absatz über die Stromversorgung ausreichend informiert.

#### Kompaktes Design

Der Versuch, den Sensorgriff möglichst klein und leicht zu gestalten, ist im Wesentlichen recht gut gelungen. Mit einem Gesamtgewicht von 1,067 kg und einer Länge von 150 mm (siehe Abb. 34) wird die Bedienung eines beliebigen Antriebssystems, bei Anschluss und Verwendung des Sensorgriffes, nicht signifikant verändert beziehungsweise beeinträchtigt.

Wie in Abb. 33 zu sehen ist, wird die Anschlusshülse in den Antrieb hinein versetzt verbaut, sodass der Griff weniger als die Gesamtlänge von 150 mm vom Antrieb absteht. In Abb. 33 beträgt der Abstand zwischen Antrieb und Griffstückachse, also der Unterschied zwischen Kraftansatzpunkt bei angeschlossenem Messsystem und Kraftansatzpunkt bei regulärer Bedienung (ohne Sensorgriff), nur 110 mm.

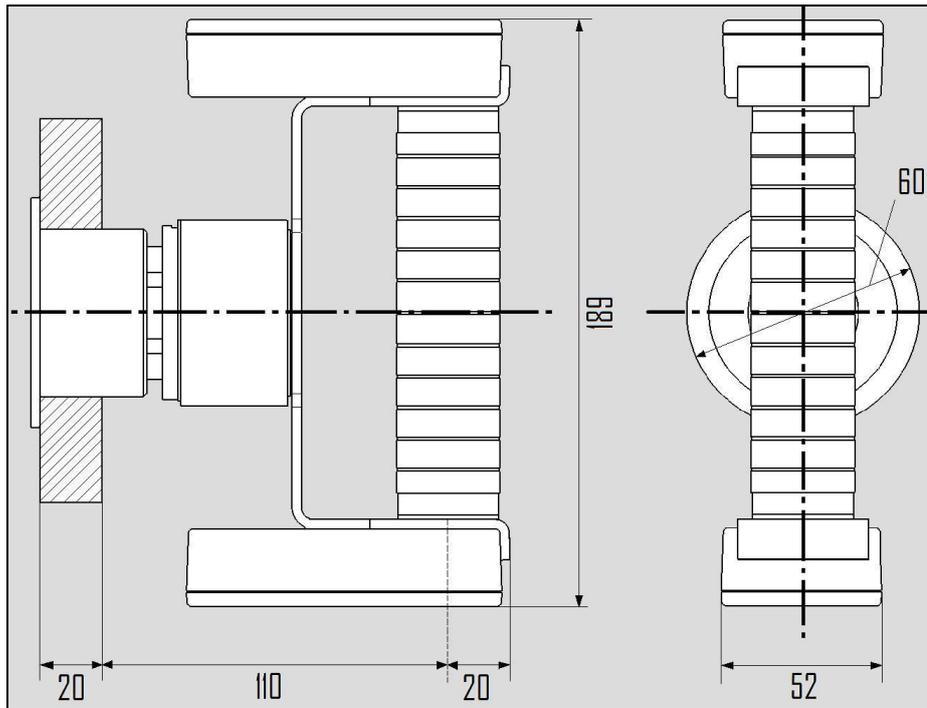


Abbildung 34: Eckmaße des Sensorgriffes

Das Gewicht des Sensorgriffes wirkt sich ebenfalls nur marginal auf das Messergebnis aus. Bei einem Gewicht von  $m = 1,1 \text{ kg}$ , einer ungefähren Winkelgeschwindigkeit von  $\omega = 2 \text{ rad/s}$  (entspricht  $60 \text{ U/min}$ ) und einem ungefähren Abstand  $r = 270 \text{ mm}$  zwischen Massenmittelpunkt des Griffes und der Rotationsachse (gemessen für einen Rollstuhl-Greifring) berechnet sich die Zentripetalkraft  $F_{ZG}$ , die durch die Rotation des gesamten Sensorgriffes entsteht, zu:

$$F_{ZG} = m * \omega^2 * r \approx 1,19 \text{ N} \quad . \quad (5.1)$$

Die tatsächlich in die Messung einwirkende Zentripetalkraft, in Abhängigkeit vom Gewicht der „griffseitigen Baugruppe“ (ca.  $516 \text{ g}$ ), fällt dabei sogar noch geringer aus und beläuft sich auf ungefähr  $0,56 \text{ N}$ . Sie fällt damit so gering aus, dass sie ohne Weiteres vernachlässigt werden kann, zumal der Kraftsensor ohnedies eine Messungengenauigkeit von  $\pm 1 \text{ N}$  aufweist.

## Kabellose Datenübertragung

Wie gefordert, ist der Sensorgriff dazu in der Lage, alle gesammelten Messdaten via Bluetooth 2.0 an einen PC oder Laptop mit geeignetem Empfänger, zu übertragen. Die Reichweite dafür beträgt laut Hersteller des GSV-4BT ca. 10 Meter, wobei sich keine massiven Wände oder starke Störquellen zwischen Griff und Empfänger befinden sollten.

Zusätzlich wird vom Hersteller die dafür benötigte Software zur Verfügung gestellt. Auf einer mit dem Messverstärker mitgelieferten CD werden die für das Übertragen der Daten notwendigen USB Treiber und auch das auf LabVIEW basierende Bedienungsprogramm namens GSVmulti mitgeliefert.

### GSVmulti

Mit der Anwendung GSVmulti ist es schnell und ohne großen Aufwand möglich, die gewünschten Messdaten verfügbar zu machen. Im Programm lassen sich Kanäle für einen oder mehrere Messverstärker einrichten, die anschließend bezüglich Einheit und Skalierung modifiziert werden können. Zusätzlich kann in diesem Programm die Messfrequenz bis zu einem Maximum von 250 Hz (effektiv jedoch nur ca. 210 Hz) festgelegt werden. Für Kanäle, an denen eine DMS Messbrücke angeschlossen ist, besteht die Möglichkeit, vor jedem Messdurchgang einen Nullpunkt-Abgleich durchzuführen.

Zwei Arten der Messung stehen zur Verfügung:

- Zum einen können die an den Kanälen gemessenen Signale über die verstrichene Zeit gemessen werden. So erhält man für jeden Zeitpunkt  $t$ , im Abstand von ca. 0,005 s (entspricht der effektiven Messfrequenz von 210 Hz) die dazugehörigen Sensorsignale. Beim Sensorgriff handelt es sich dabei um sechs Spannungsverhältnisse (mV/V) für die Kanäle an denen die DMS Messbrücken des K6D40 angeschlossen sind und um ein ratiometrisches Spannungssignal (V) zwischen 0 – 4,7 V vom Hall-Effekt Drehgeber.
- Als zweite Variante ist es möglich, die Abhängigkeit von einem Signal gegenüber den restlichen Signalen darzustellen. Hierbei kann man beispielsweise beim Sensorgriff

für jeden Spannungswert des Drehgebers (entspricht einem Winkelwert) die dazugehörigen Spannungsverhältnisse des Kraftsensors darstellen. Da die Spannungsverhältnisse aber erst über eine Kalibriermatrix in Kräfte und Momente umgewandelt werden müssen und davor wenig Aussagekraft besitzen, bietet sich diese Variante im Fall des Sensorgriffes nicht an.

Die so gemessenen Werte können im Datenmonitor angezeigt werden und von hier aus in einem \*.txt Dokument abgespeichert werden. Dabei finden sich, bei Ausübung der ersten Messvariante, in diesem Dokument die sieben Eingangssignale der belegten Kanäle der zwei GSV-4BT, denen jeweils ein Zeitstempel mit Datum und exakter Uhrzeit zugewiesen ist.

## **5.2 Einsatzfähigkeit des Sensorgriffes**

Da zum Zeitpunkt der Fertigstellung des Sensorgriffes noch kein alternatives Antriebssystem für etwaige Testdurchläufe zur Verfügung stand, mussten Testaufbauten herangezogen werden, um die Einsatzfähigkeit des Sensorgriffes zu überprüfen und zu demonstrieren.

Dafür wurde zuerst überprüft, ob die vom Hersteller des Kraftsensors mitgelieferte Kalibriermatrix, mit der die Spannungssignale in Kräfte und Momente umgewandelt werden können, anwendbar und korrekt ist. Dann wurde der Sensorgriff in zwei unterschiedlichen Testaufbauten eingesetzt und überprüft, ob die daraus resultierenden Ergebnisse den Erwartungen entsprechen.

### **5.2.1 Nachprüfung der Kalibriermatrix**

Mit den in Abb. 35 zu sehenden Versuchsaufbauten wurde nachgeprüft, ob die Kalibriermatrix korrekt aufgestellt wurde und ob sie, wie in der Beschreibung des Sensors K6D40 angegeben, anwendbar ist.

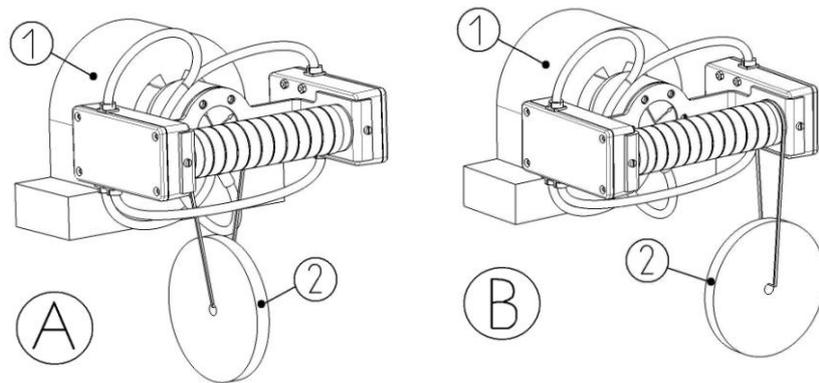


Abbildung 35: Versuchsaufbauten A und B für die Überprüfung der Kalibriermatrix  
([1] Einspannung / [2] Metallscheibe)

Für die Versuchsaufbauten wurde dafür die Anschlusschülse inklusive der Wälzlager abgezogen und der Sensoranschluss in einem Drei-Backen-Futter eines Teilapparates [1] fixiert. Dann wurde die Griffstückachse mit Hilfe einer Wasserwaage möglichst waagrecht ausgerichtet. Anschließend wurde eine vorher abgewogene Metallscheibe [2] mit einer Schlaufe an den Griff angehängt. Bei Testaufbau A genau an der Stelle wo der Griffbogen mit dem Sensor K6D40 über Schrauben verbunden ist und bei Testaufbau B seitlich am Griffstück, wo dieses an der Gleitlagerbuchse ansteht (siehe Abb. 35).

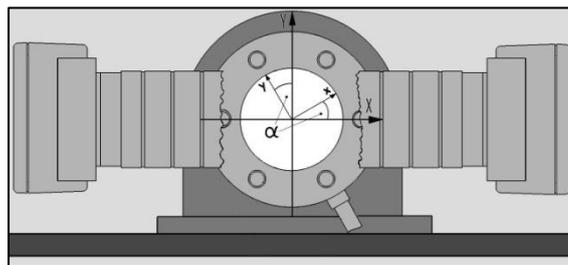


Abbildung 36: Lage des sensorfesten Koordinatensystems

In Abb. 36 ist die Lage des sensorfesten Koordinatensystems für die oben genannten Versuchsaufbauten dargestellt. Die gemessene Masse  $m$  (in kg) der Metallscheibe in Versuchsaufbau A berechnet sich somit, mit bekanntem Winkel  $\alpha$  von  $30^\circ$  und der Erdbeschleunigung  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  zu:

$$m = \frac{F_y * \cos \alpha + F_x * \sin \alpha}{g} , \quad (5.2)$$

wobei man  $F_x$  und  $F_y$  mittels Einsetzen der Signale, von den sechs Kraftsensor-Ausgängen, in die dafür vorgesehene Kalibriermatrix erhält.

Das Gewicht der für den Versuchsaufbau verwendeten Metallscheiben, mit den vorab auf einer Präzisionswaage ermittelten Massen von 0,53 kg und 2,05 kg, konnte in beiden Fällen mit <5% Ungenauigkeit bestimmt werden.

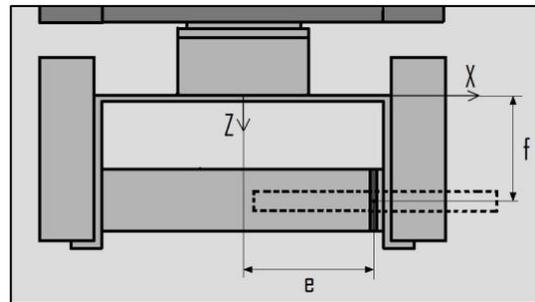


Abbildung 37: Hebellängen bei Testaufbau B für die Überprüfung der Kalibriermatrix

Um zu überprüfen, ob Momente durch Kombination der gemessenen Signale mit der Kalibriermatrix ebenfalls hinreichend genau gemessen werden, wurde die Metallscheibe (mit einer Masse  $m$  von 2,05 kg) in Testaufbau B so aufgehängt, dass durch die Hebellängen  $e$  und  $f$  Momente um alle drei sensorfesten Koordinatenachsen entstehen (Abb. 37):

$$M_z = (m * g) * e , \quad (5.3 a)$$

$$M_x = (m * g) * f * \cos \alpha , \quad (5.3 b)$$

$$M_y = (m * g) * f * \sin \alpha . \quad (5.3 c)$$

Auch hierbei korrelierten die zuvor berechneten Momente in zufriedenstellendem Maße mit den gemessenen Momenten, die über die Messsignale des Kraftsensors in Verbindung mit der Kalibriermatrix erstellt wurden.

Somit kann angenommen werden, dass die Kalibriermatrix korrekt aufgestellt wurde und sie kann für alle weiteren Tests und Anwendungen herangezogen werden.

### 5.2.2 Testaufbau 1

Für diesen Testaufbau wurde (Abb. 38) eine lange Schraube durch die Nabe eines bereits vorhandenen Rollstuhlrades [1] vom Typus  $24 \times 1^{3/8}$  U1 37-540 geführt und in einer Aluminiumleiste [2] verschraubt. Ein kleines Rollrad [3] mit ca. 60 mm Durchmesser wurde

ebenfalls mit der Aluminiumleiste verschraubt und zwar so, dass es einen gewissen Druck auf den Rollstuhlreifen ausübt und dabei wie eine Bremse wirkt. Der Sensorgriff selbst wurde mit einer dafür angefertigten Manschette [4] aus Aluminium am Greifring montiert (in Abb. 38 genauer dargestellt).

Um das Rad anzutreiben, musste das Griffstück des Sensorgriffes umfasst und eine kontinuierliche Kraft aufgebracht werden, die der Bremswirkung des kleinen Rades entgegen wirkte. Dieser Testaufbau entspricht somit relativ gut dem Einsatz des Sensorgriffes unter Realbedingungen bei einem alternativen Antriebssystem, da hier eine 360° Kurve durchlaufen wird. Offensichtlich ist der Sensorgriff jedoch nicht dafür ausgelegt, für Messungen an einem normalen Greifringrollstuhl verwendet zu werden, da die Bedienung desselbigen eine ganz andere Antriebsbewegung erfordert und der Sensorgriff außerdem mit dem Boden kollidieren würde.

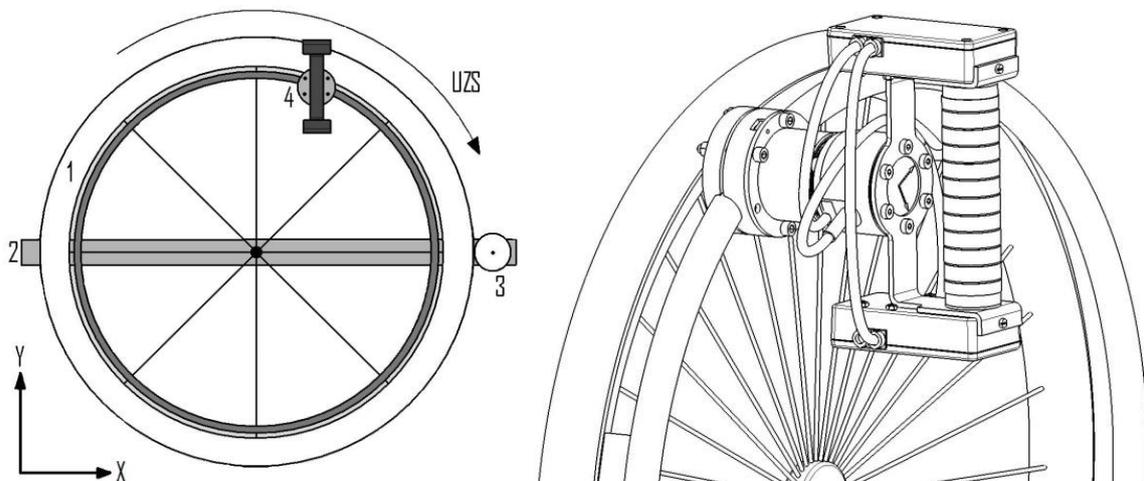


Abbildung 38: Testaufbau 1

([1] Rollstuhlrاد / [2] Aluminiumleiste / [3] Rollrad / [4] Manschette)

Wurde der Sensorgriff während der Bewegung in diesem Testaufbau möglichst senkrecht gehalten, können die auftretenden Neigungen der Griffstückachse vernachlässigt werden. Dadurch entspricht die am Drehgeber gemessene Verdrehung der Anschluss-hülse der Verdrehung des gesamten Rollstuhlrades. Aus den während der Testdurchläufe gewonnenen Daten, lässt sich somit ein Kraftverlauf über die Zeit und auch über den Verdrehwinkel des Rades darstellen

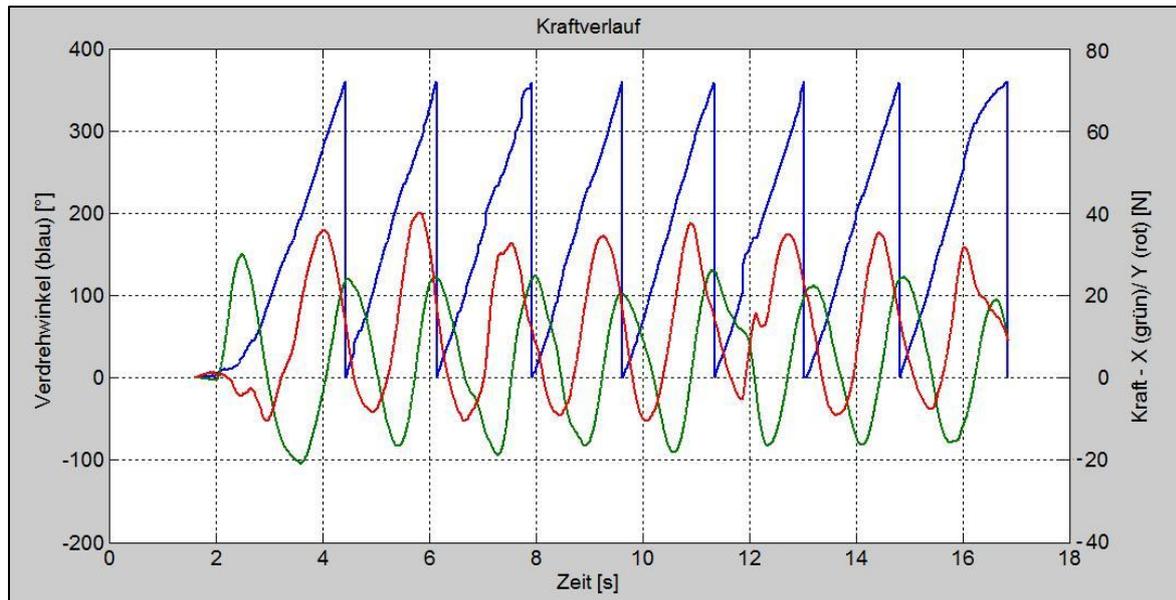


Abbildung 39: Kraftverläufe (grün, rot) und Verdrehwinkel (blau) über die Zeit – Testaufbau 1

In Abb. 39 werden für einen Testlauf die Kräfte in x- (grün) und in y-Richtung (rot) des raumfesten Koordinatensystems und der Drehwinkel des Rades (blau), über einem zeitlichen Verlauf, dargestellt. Dabei wurden die Kräfte mit dem Faktor 2 multipliziert, um eine aussagekräftigere Darstellung zu ermöglichen.

Startpunkt für jede volle Umdrehung war dabei der obere Scheitelpunkt des Rades, wobei acht volle Umdrehungen mit einer ungefähren Geschwindigkeit von 30 U/min durchgeführt wurden. Vor dem Testlauf wurde ein Nullpunktgleich durchgeführt und während des Testlaufes wurde versucht, die Griffstückachse möglichst senkrecht zu führen.

Die durch das Programm GSVmulti an den Computer übermittelten Datensätze, wurden als \*.txt abgespeichert und in MS Excel Tabellen umgewandelt.

Im Anschluss daran wurden die Spannungsverhältnisse von den sechs Kanälen des K6D40 mit den Werten der Kalibriermatrix verknüpft, um die Kräfte in x- und y-Richtung im sensorfesten Koordinatensystem zu erhalten. Diese wurden wiederum mittels einer Transformation in ein raumfestes Koordinatensystem (wie in Abb. 38 eingezeichnet) überführt.

Das Spannungssignal des Drehgebers, welches zwischen 0 - 4,7 Volt lag, wurde in einen Winkel umgerechnet, der der Verdrehung der Anschlusshülse im Vergleich zur Startposition entspricht.

## Graphische Darstellung

Mit dem Programm Matlab ist es möglich, die vorhandenen Datensätze graphisch darzustellen. Es stehen außerdem Funktionen und Filter zur Verfügung um die erhaltenen Kurven aufzubereiten und so eine Interpretation der Werte zu erleichtern.

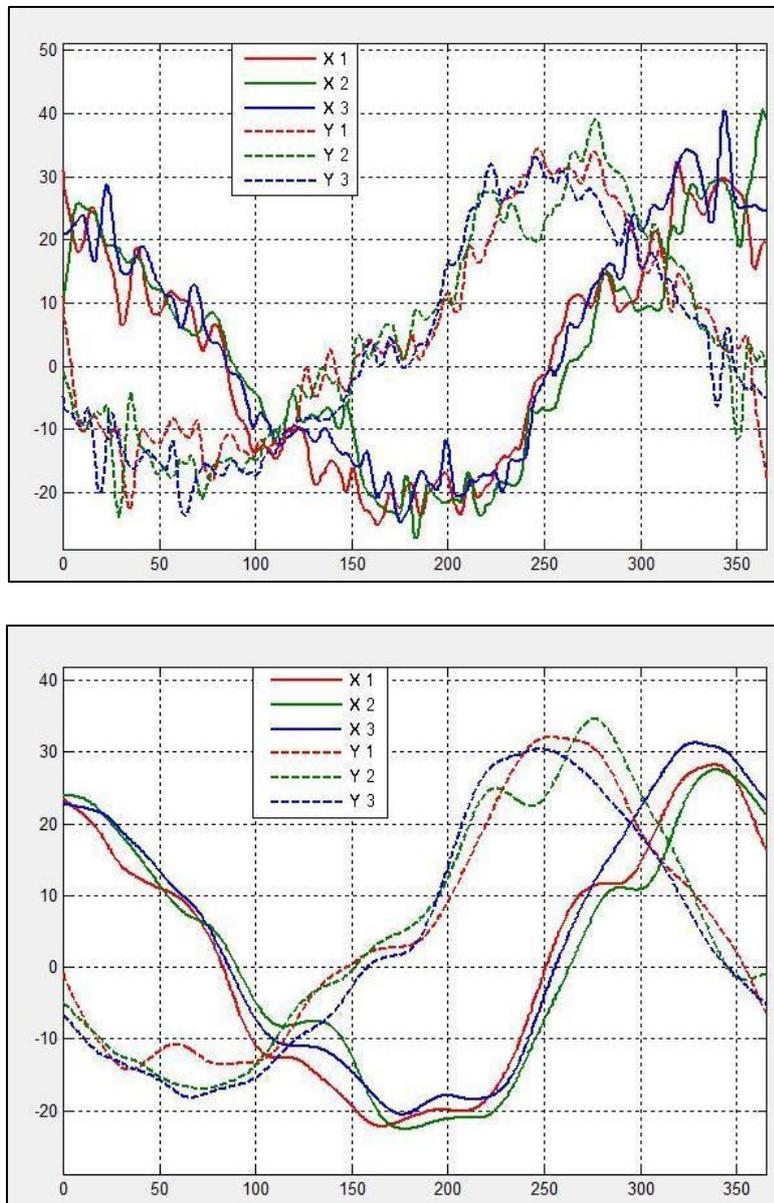


Abbildung 40: Kraftverläufe ungefiltert und geglättet – Testaufbau 1

Die vorhergegangene Abbildung zeigt, wie die Kräfte in x- und y-Richtung des raumfesten Koordinatensystems für drei volle Umdrehungen miteinander verglichen werden. Dabei ist auf der Abszisse die Verdrehung in  $^{\circ}$  aufgetragen und auf der Ordinate die Kraft in N.

Abb. 40 zeigt die Messdaten einmal rein und ungefiltert und einmal nach durchlaufen einer einfachen Kurvenglättung, bei der über lokale Maxima und Minima interpoliert wird.

In der Abb. 41 sind dieselben Messdaten noch einmal dargestellt, jedoch nachdem sie mit einem in Matlab integrierten Werkzeug namens „cftool“ geglättet und der Kurvenverlauf durch ein Polynom vierten Grades angenähert worden ist.

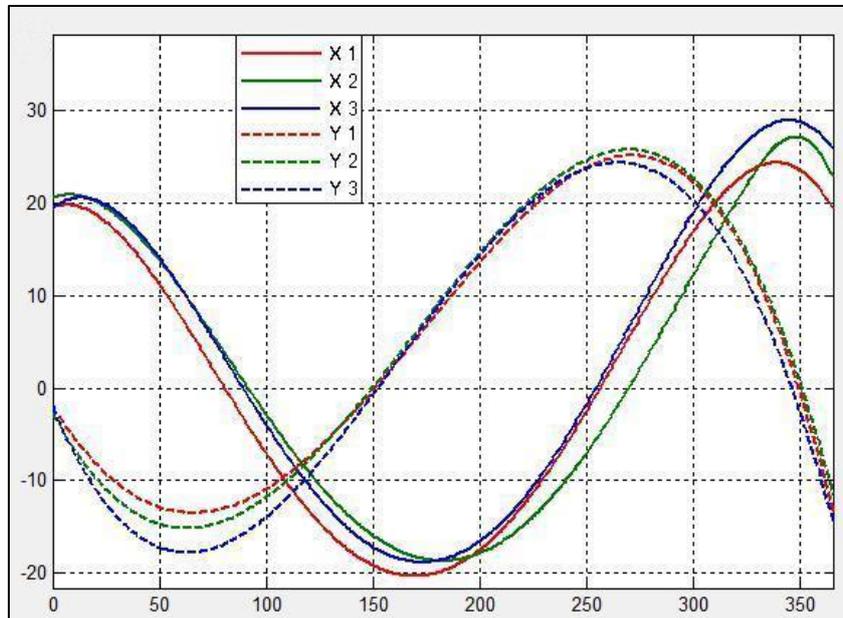


Abbildung 41: Aufbereitete Kraftverläufe – Testaufbau 1

### Interpretation der Messdaten

Die nähere Betrachtung der Kurven in den vorhergegangenen Abbildungen gibt über die Funktionalität des Sensorgriffes Auskunft und hilft dabei die Einsatzfähigkeit desselben zu demonstrieren.

In Abb. 41, die für die weitere Untersuchung herangezogen wird, sind die auftretenden Kräfte in x-Richtung des raumfesten Koordinatensystems als durchgehende Linien und die Kräfte in y-Richtung als strichlierte Linien eingetragen.

Die x-Kurve weist dabei das Verhalten und die Form einer Kosinusfunktion auf, mit dem Minimum bei ungefähr  $180^\circ$ .

Die y-Kurve lässt sich annähernd mit einer Sinusfunktion (mit negativem Vorzeichen) beschreiben, mit dem Minimum bei  $90^\circ$  und dem Maximum nahe  $270^\circ$ .

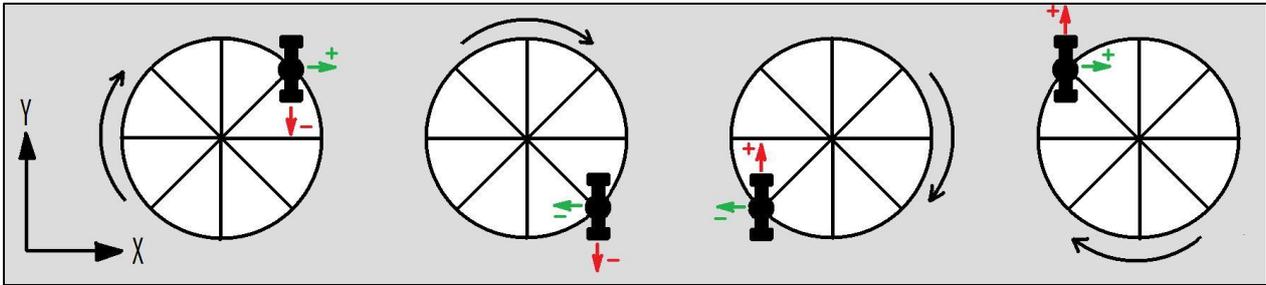


Abbildung 42: Erwartete Kraftverläufe – Testaufbau 1

Diese Kraftverläufe entsprechen, wie durch Abb. 42 verdeutlicht werden soll, genau den Erwartungen. Dabei wird der Griff vom oberen bis zum unteren Scheitelpunkt des Rades in negative y-Richtung, beziehungsweise räumlich gesehen nach unten, geschoben und die restliche Hälfte des Antriebszyklus in positive y-Richtung, oder auch nach oben, gezogen. In positive x-Richtung wird der Griff das erste Viertel der Umdrehung geschoben, ab dann für eine halbe Umdrehung in negative x-Richtung zurückgezogen und für das letzte Viertel wieder in positive x-Richtung geschoben.

Die leichte Verschiebung der y-Kurve, die daran zu erkennen ist, dass der 180° Wendepunkt bei ungefähr 12 N anstatt bei 0 N liegt, erklärt sich durch das Eigengewicht von Sensorgriff und der für diesen Versuchsaufbau verwendeten Greifring-Montagevorrichtung. Dabei unterstützt dieses Gewicht die Bewegung des Griffes nach unten (geringerer Kraftaufwand) und erschwert die Bewegung des Griffes nach oben (höherer Kraftaufwand).

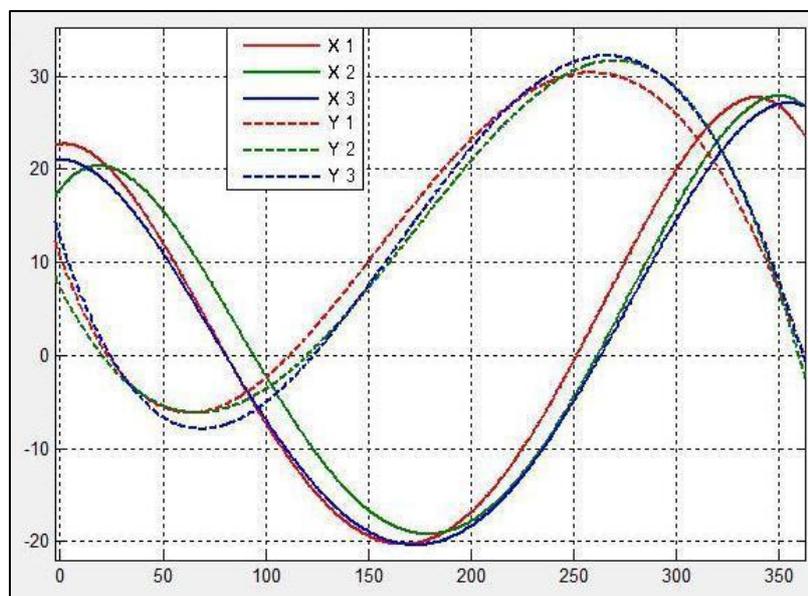


Abbildung 43: Kraftverläufe mit Zusatzgewicht – Testaufbau 1

In Abb. 43 ist im Vergleich dazu ein Testlauf abgebildet, bei dem zusätzlich ein Gewicht von 0,53 kg am Sensorgriff montiert worden ist. Darauf lässt sich erkennen, dass sich am Verlauf der x-Kurve nichts ändert, die y-Kurve aber noch ein Stück mehr verschoben wird. Speziell im Minimum der y-Kurve macht sich ein Unterschied von ca. 5 N im Vergleich zu Abb. 40 bemerkbar, was ungefähr der Gewichtskraft von 0,53 kg entspricht.

Der Testaufbau 1 bietet, wie bereits erwähnt, durchaus realitätsgetreue Rahmenbedingungen für den Einsatz des Sensorgriffes. Hierbei wird eine geschlossene 360° Kurve durchlaufen, wie wahrscheinlich auch beim alternativen Rollstuhlantriebssystem und auch mit annähernd gleicher Antriebsgeschwindigkeit.

Da die dabei aufgezeichneten Messwerte und daraus resultierende Kraftverläufe, sehr gut mit den zu erwartenden Ergebnissen korrelieren, liefert der Testaufbau einen wichtigen Beitrag für die Überprüfung der Einsatzfähigkeit des Sensorgriffes.

### 5.2.3 Testaufbau 2

Bei einem weiteren Testaufbau (siehe Abb. 44), wurde die Anschlusshülse des Sensors in einem Spannbock [1] fixiert, sodass der Griff um die Sensorgriffachse beliebig verdreht werden konnte. Im Anschluss daran wurde eine Metallscheibe [2] mit einer Masse von 0,53 kg am unteren Schutzgehäuse des Sensorgriffes montiert, sowie eine dünne Metallstange [3], die als Kurbelgriff diente, am oberen Schutzgehäuse befestigt.

Während der Testdurchläufe wurde die Metallstange umfasst und der Griff sehr langsam und mit möglichst gleichmäßiger Geschwindigkeit im Uhrzeigersinn gedreht, wie bei einer Handkurbel.

Für den Testaufbau wurde ein sensorgrifffestes Koordinatensystem festgelegt, welches jedoch nicht mit dem sensorfesten Koordinatensystem des K6D40 übereinstimmt. Dabei liegt die y-Achse parallel zur Griffstückachse. Die x-Achse liegt darauf und auch auf die Sensorgriffachse normal (siehe Abb. 46).

Anders als bei Testaufbau 1 rotiert in Testaufbau 2 nicht die Anschlusshülse um die Sensorgriffachse, sondern alle anderen Bauteile des Sensorgriffes (inklusive der gesamten Messelektronik). Durch diesen Testaufbau soll demnach überprüft werden, ob auftretende Kräfte auch unter diesen Rahmenbedingungen mit entsprechender Qualität gemessen werden können.

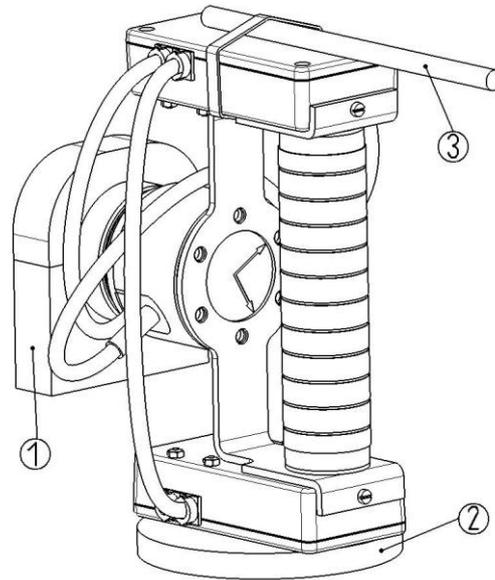


Abbildung 44: Testaufbau 2

([1] Spannbock / [2] Metallscheibe / [3] Metallstange)

### Rechnerische Ermittlung des x- und y-Kraftverlaufs

Da die auftretenden Kräfte im Testaufbau 2 hinreichend bekannt sind, kann mit Hilfe eines vereinfachten Modells (siehe Abb. 45) der zu erwartende x- beziehungsweise y-Kraftverlauf berechnet werden, um diese mit den gemessenen Kraftverläufen vergleichen zu können.

Auf die griffseitige Baugruppe wirken bei jedem Verdrehwinkel  $\varphi$  (Winkel zwischen y-Achse und Ausgangsstellung) die Gewichtskraft  $G$  der Baugruppe, die Gewichtskraft  $M$  der Metallscheibe und die Kraft  $H$ , die durch die Hand entsteht, die die Metallstange umfasst und die Kurbelbewegung ausführt. Diesen Kräften entgegen gerichtet wirkt die Auflagekraft  $S$  an der Stelle wo der Griffbogen am Kraftsensor befestigt ist.

Unter der Annahme einer sehr langsamen, quasistatischen Bewegung kann in jedem Punkt der Bewegung ein Kräftegleichgewicht aufgestellt werden:

$$\sum F: G + H + M = S \quad (5.4)$$

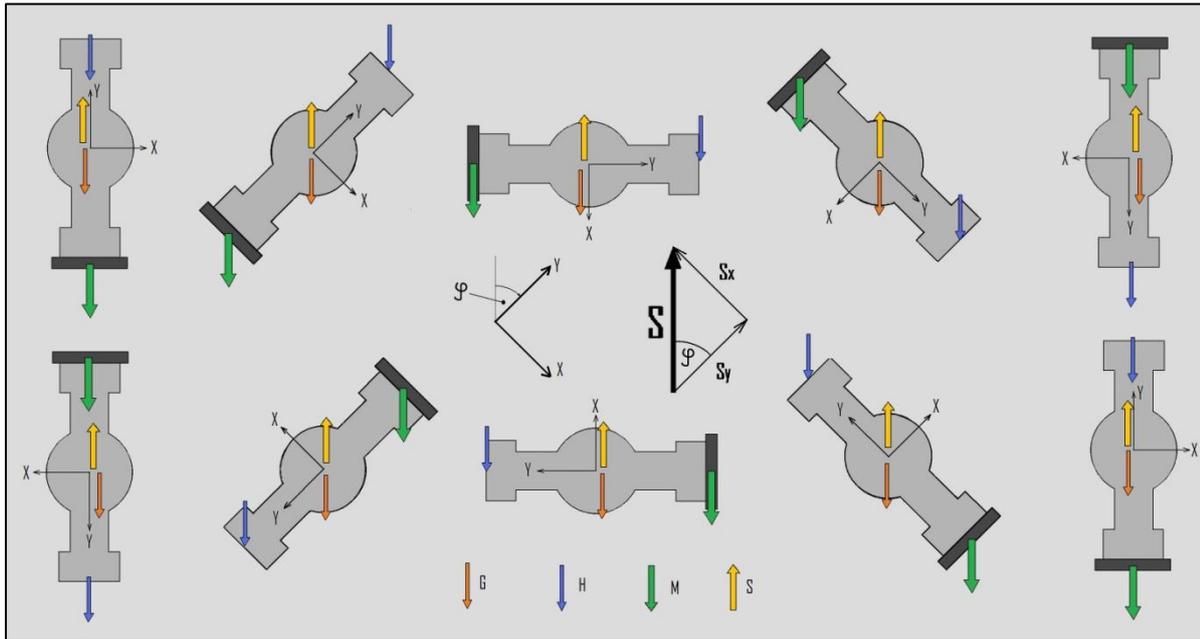


Abbildung 45: Erwartete Kraftverläufe – Testaufbau 2

Die Komponenten der Auflagekraft  $S$ , entsprechend dem verwendeten Koordinatensystem (siehe Abb. 45), berechnen sich zu:

$$S_x = -\sin \varphi * (H + M + G) \quad (5.5)$$

und

$$S_y = \cos \varphi * (H + M + G) \quad (5.6)$$

Aus dem Momentengleichgewicht um den Mittelpunkt des Koordinatensystems folgt, dass bei jeder Winkelstellung  $H = M$  sein muss. Dadurch lassen sich die Gleichungen 5.5 und 5.6 wie folgt vereinfachen:

$$S_x = -\sin \varphi * (2 * M + G) \quad (5.7)$$

und

$$S_y = \cos \varphi * (2 * M + G) \quad (5.8)$$

Die vom Sensor ausgeübte Gewichtskraft  $G$  beträgt dabei 7,36 N (entspricht einer Masse von ca. 0,75 kg) und die von der Metallscheibe ausgeübte Gewichtskraft  $M$  beträgt dabei 5,20 N (was wiederum einer Masse von 0,53 kg entspricht).

Die vom Kraftsensor ausgegebenen Verläufe für  $F_x$  und  $F_y$  entsprechen genau den errechneten Verläufen der Auflagekraftkomponenten  $S_x$  und  $S_y$  jedoch mit umgekehrten Vorzeichen, da die gemessene Kraft  $F$  die Gegenkraft zu  $S$  ist (siehe Abb. 46).

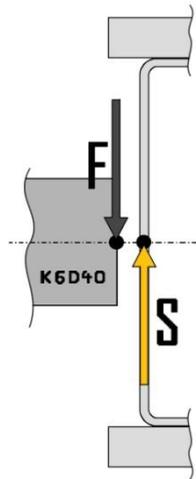


Abbildung 46: Auflagekraft  $S$  (gelb) mit Gegenkraft  $F$  (grau)

## Ergebnisse

Die gemessenen Kräfte in  $x$ - und  $y$ -Richtung des sensorgriffesten Koordinatensystems werden in Abb. 47 dargestellt. Dabei wurden drei volle Zyklen (blau, grün und rot) herangezogen, mit Hilfe von Funktionen im Programm Matlab geglättet und mit errechneten Kurvenverläufen für die  $x$ - sowie  $y$ -Kraft verglichen. Dabei sind die  $x$ -Kraftverläufe ( $F_{x1}$ ,  $F_{x2}$ ,  $F_{x3}$  und  $F_{xREF}$ ) mit durchgehenden und die  $y$ -Kraftverläufe ( $F_{y1}$ ,  $F_{y2}$ ,  $F_{y3}$  und  $F_{yREF}$ ) mit strichlierten Linien dargestellt, wobei der errechnete Verlauf für die  $x$ - beziehungsweise die  $y$ -Kraft ( $F_{xREF}$  und  $F_{yREF}$ ) schwarz dargestellt ist.

Der Verlauf der  $x$ -Kräfte verhält sich erwartungsgemäß wie eine Sinuskurve. Wie aus Abb. 47 ersichtlich ist, wirken bei  $0^\circ$  sowie  $180^\circ$  keine Kräfte in  $x$ -Richtung des sensorfesten Koordinatensystems. Das Maximum des  $x$ -Kraftverlaufes beträgt  $17,76\text{ N}$  und liegt bei  $90^\circ$ , wo sowohl die Gewichtskraft des Sensorgriffes  $G$  und der Metallscheibe  $M$ , als auch die von der Hand aufgebraachte Kraft  $H$  in  $x$ -Richtung wirken. Dementsprechend liegt das Minimum des  $x$ -Kraftverlaufes bei  $270^\circ$  und entspricht in Betrag und Zusammensetzung dem Maximum, wobei hier die Kräfte in negative  $x$ -Richtung wirken. Die drei Kurven für den  $x$ -

Kraftverlauf aus den Testdurchläufen (blau, grün und rot) stimmen sehr gut mit dem errechneten Verlauf der x-Kraft (schwarz) überein.

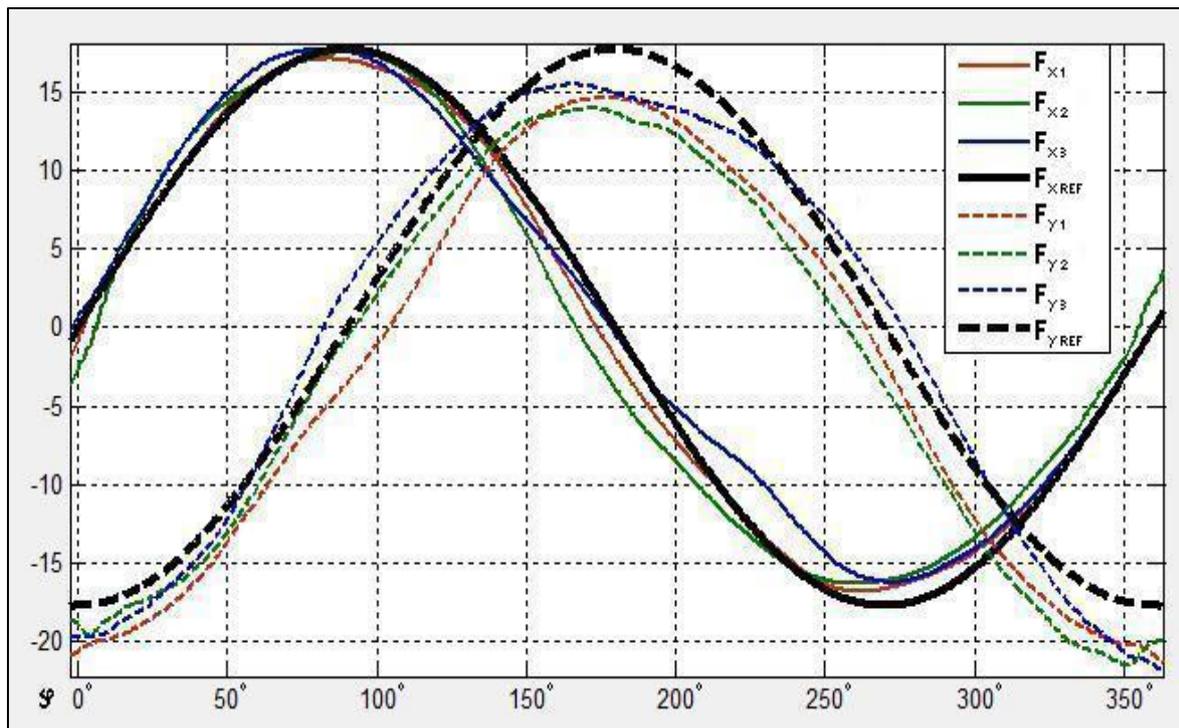


Abbildung 47: Aufbereitete gemessene Kraftverläufe (blau, grün und rot) mit errechneten Kraftverläufen (schwarz)

Der Verlauf der y-Kräfte verhält sich wie eine Kosinuskurve mit umgekehrtem Vorzeichen (siehe Abb.45). Die Kurve startet bei 0° bei ihrem Minimum, wo Handkraft H, Gewichtskraft M der Metallscheibe und die Gewichtskraft G des Sensorgriffes in entgegengesetzte y-Richtung wirken. In weiterer Folge steigt die Kraft kontinuierlich bis zum Maximum, das bei 180° erreicht wird, an. Hier wirken alle am Sensorgriff auftretenden Kräfte in y-Richtung. Anschließend fällt der Kraftverlauf bis 360° wieder auf das Minimum herab. Die drei Kurven für den y-Kraftverlauf aus den Testdurchläufen (blau, grün und rot) stimmen ebenfalls recht gut mit dem errechneten Verlauf der y-Kraft (schwarz) überein, wobei die leichten Abweichungen bei Minimum und Maximum aus den getroffenen Vereinfachungen resultieren.

Dieser Testaufbau trägt wie auch Testaufbau 1 dazu bei die Einsatzfähigkeit des Sensorgriffes zu unterstreichen, da die Qualität der gemessenen Kraftverläufe unter den vordefinierten Rahmenbedingungen relativ gut ausgefallen ist.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde eine Messvorrichtung entwickelt, die in allen Belangen den geforderten Voraussetzungen entspricht.

Für weitere Untersuchungen im Bereich „alternative Rollstuhlantriebssysteme“ steht nun ein „Werkzeug“ zur Verfügung, das als Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine wichtige Daten liefern kann. So ist es dem Sensorgriff in dieser Funktion möglich, Kräfte und Momente zu messen und kabellos zu übermitteln, die von der Hand auf einen passenden Antrieb ausgeübt werden. Die Kompaktheit des Designs, die bei der gesamten Entwicklung immer eine wichtige Rolle eingenommen hat, ermöglicht einen Einsatz des Sensorgriffes, der die Messergebnisse, durch Eigengewichtseinflüsse oder veränderten Bewegungsablauf, möglichst wenig verfälscht. Diese Eigenschaften ermöglichen es, in Zukunft den Sensorgriff eventuell auch für andere Anwendungen in den Bereichen Rehabilitationstechnik, Ergonomie oder auch Sportwissenschaften einzusetzen.

Die gesetzten Ziele sind somit erreicht worden, was jedoch nicht bedeutet, dass die Entwicklung des Sensorgriffes damit abgeschlossen sein muss. Diverse zukünftige Adaptierungen sollten durchaus in Betracht gezogen werden, zumal gerade am Sektor der Sensortechnologie jedes Jahr neue, kleinere und leistungsstärkere Komponenten auf den Markt kommen. Obwohl die Entwicklung des Sensorgriffes eine vergleichbar kurze Zeit in Anspruch genommen hat, gibt es zum Abschluss dieser Arbeit schon ein oder zwei elektronische Komponenten, von denen bereits eine neuere Version erhältlich ist.

Des Weiteren wäre es sinnvoll, möglicherweise im Rahmen einer weiteren studentischen Arbeit, eine eigens für den Sensorgriff zugeschnittene Software zu entwickeln, beziehungsweise ein Programm zur Aufbereitung der gemessenen Daten zu schreiben. Auf diese Art und Weise würde jedem, auch mit dem Sensorgriff unvertrautem, Benutzer, eine rasche Lösung zur Verfügung stehen, mit der die gemessenen Daten in möglichst praktischer Form dargestellt und ausgegeben werden können.

Nichtsdestotrotz ist der Sensorgriff zum Abschluss der Diplomarbeit voll funktionsfähig, wie in diversen bereits durchgeführten Testdurchläufen bewiesen wurde. Dem Einsatz desselben in Verbindung mit dem alternativen Rollstuhlantriebssystem steht demnach nichts im Wege.

## Literaturverzeichnis

### Bücher

MUHS, Dieter, WITTEL, Herbert, BECKER, Manfred, JANNASCH, Dieter, VOßIEK, Joachim (2003): *Roloff/Matek Maschinenelemente. Normung, Berechnung, Gestaltung* (16. Auflage). Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH

SCHRÜFER, Elmar (2007): *Elektrische Messtechnik: Messung elektrischer und nichtelektrischer Größen* (9., aktualisierte Auflage). München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.

### Wissenschaftliche Artikel und Forschungsberichte

ASATO, KT, COOPER, RA, ROBERTSON, RN, STER, JF (1993): SMART<sup>Wheels</sup>: Development and Testing of a System for Measuring Manual Wheelchair Propulsion Dynamics. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1993, 40(12): 1320–1324.

GUO, Liyun, KWARCIAK, Andrew M., RODRIGUEZ, Russel, SARKAR, Nilanjan, RICHTER, Mark W. (2011): Validation of a Biofeedback System for Wheelchair Propulsion Training. *Rehabilitation Research and Practice*, Volume 2011, Article ID 590780, 7 pages.

LEITNER, Barbara, BALDASZTI, Erika (2008): Menschen mit Beeinträchtigungen. *Statistik Austria - Ergebnisse der Mikrozensus-Zusatzfragen*, 4. Quartal 2007, 12 f.

MORROW, Melissa M.B., VAN STRAATEN, Meegan P., ZHAO, Kristin D., CLOUD, Beth A., KAUFMAN, Kenton R. (2013): Manual Wheelchair User Hand Force Measurement In The Field: A Preliminary Report. *Resna Annual Conference 2013*.

REQUEJO, Philip, BONTRAGER, Ernest, MULROY, Sara (2008): UPPER EXTREMITY KINETICS DURING WHEELCHAIR LEVER PROPULSION. NIDRR funded research project at the Rancho Los Amigos National Rehabilitation Center.

ROBERTSON, RN, BONINGER, ML, COOPER RA, SHIMADA, SD (1996): Pushrim forces and joint kinetics during wheelchair propulsion. *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, 1996; 77:856-64.

VEEGER, HE, VAN DER WOUDE, LH, ROZENDAL, RH (1991): Within-cycle characteristics of the wheelchair push in sprinting on a wheelchair ergometer. *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 1991; 23:264-71.

## ANHANG A: Stücklisten

### A1 - Antriebseitige Baugruppe

Anzahl (in Stk.)	Bezeichnung	E ... Eigenfertigung A ... Ankauf	Zeichnungs-Nr. / Datenblatt
1	Anschlusschülse	E	1
6	Innensechskantschraube mit kleinem Kopf M5 x 8	A	-
1	Magnethalter	E	2
2	Senkschraube mit Kreuzschlitz M3 x 6	A	-
1	Sensoranschluss	E	3
6	Innensechskantschraube M5 x 8	A	-
1	Lagerabstandhülse	E	4
2	Dünnringlager Typ 61708 2RS	A	-
1	Lagersicherungsring	E	5
4	Senkschraube mit Schlitz M2 x 6	A	-
1	Hall-Effekt Drehgeber ENA22K	A	-
1	Permanentmagnet $\varnothing 6 \times 3$ mm	A	-
2	Zentrierstift $\varnothing 3\text{-}\varnothing 4,2 \times 10$ mm	A	-
	Lagerkleber Loctite 648	A	-

### A2 – Kraftsensor

Anzahl (in Stk.)	Bezeichnung	E ... Eigenfertigung A ... Ankauf	Zeichnungs-Nr. / Datenblatt
1	Kraftsensor K6D40	A	-

**A3 – Griffseitige Baugruppe**

Anzahl (in Stk.)	Bezeichnung	E ... Eigenfertigung A ... Ankauf	Zeichnungs-Nr. / Datenblatt
1	Griffbogen	E	6
6	Innensechskantschraube mit sehr flachem Kopf M5 x 8	A	-
2	Kunststoff-Gleitlagerbuchsen mit Bund iØ22-aØ25 x 4,5 mm	A	-
9	Zylinderschraube mit Schlitz M3 x 16	A	-
1	Zylinderschraube mit Schlitz M3 x 8	A	-
10	Sechskantmutter M3	A	-
1	Griffrohr	E	-
1	Rohrverschluss	E	-
1	Fahrradgriff iØ22-aØ32 x 130 mm	A	-
2	Messverstärker GSV-4BT	A	-
1	BEC-Steckersystem	A	-
2	Lilo-Akku 3,7 V / 3400mAh Ø18,4 x 70 mm	A	-
2	ABS Schutzgehäuse 100 x 51 x 26 mm	A	-
2	Fixationsplättchen	E	-
6	Kabelzugentlastung	A	-
	UHU Plus schnellfest 2-K-Epoxidharzkleber	A	-
	div. Kabel, Schrumpfschläuche und Abschirmungsmaterial	A	-

## **ANHANG B: Informationen zu verwendeten Komponenten**

### Kraftsensor K6D40

Anbieter: ME-Meßsysteme GmbH

Ausführung: 200N/5Nm

Hyperlink: <http://www.me-systeme.de/sensorik/kraftsensoren/k6d40.html>  
[23.12.2014]

### Drehgeber ENA22K

Anbieter: MEGATRON Elektronik GmbH & Co. KG

Ausführung: Kit-Version ohne Stopp

Versorgungsspannung/Ausgangssignal 4,5 – 5,5 V / 0-5 V ratiom.

Hyperlink: <http://www.megatron.de/produkte/hall-effekt-singleturn-drehgeber/kontaktlose-hall-drehgeber-serie-ena22-ecoturnR.html>  
[23.12.2014]

### Messverstärker GSV-4BT

Anbieter: ME-Meßsysteme GmbH

Ausführung: SD Variante mit Versorgungsspannungsausgang für Drehgeber  
2 GSV-4BT über Verbindungskabel synchronisiert

Hyperlink: <http://www.me-systeme.de/elektronik/gsv-4/gsv-4bt.html?id=0>  
[23.12.2014]

### Carbon für Griffbogen und Griffrohr

Anbieter: Carbon Team Germany GmbH

Ausführung: 3,0 x 400 x 500 mm Memory-Carbon-Platte beidseitig glatt  
22,0 x 20,0 x 1000 mm Carbon-Rohr

Hyperlink: <http://www.carbon-team.de/kohlefaserplatten+cfk.htm>  
[23.12.2014]

<http://www.carbon-team.de/karbonrohr+100.htm>

[23.12.2014]

Dünnring-Kugellager

Anbieter: SBN Wälzlager GmbH & Co. KG

Ausführung: 61708 2RS

Hyperlink: <http://www.sbn.de/de/produkte/artikel/9/duennringlager-617.html?pg=2>

[23.12.2013]

Gleitlagerbuchsen

Anbieter: igus® GmbH

Ausführung: GFM-222529-045

Hyperlink: [http://www.igus.de/iPro/iPro\\_02\\_0001\\_0000\\_DEde.htm?c=DE&l=de](http://www.igus.de/iPro/iPro_02_0001_0000_DEde.htm?c=DE&l=de)

[23.12.2013]

## **ANHANG C: Technische Zeichnungen**

Im Folgenden werden technische Zeichnungen als Anhang der Diplomarbeit zugefügt. Hierbei handelt es sich um Zeichnungen jener Bauteile die, wie bereits in den Stücklisten ausgewiesen, selbst entworfen und anschließend durch den Autor der Diplomarbeit oder durch die Mitarbeiter der Maschinenbauwerkstatt gefertigt worden sind.

Als Konstruktionsprogramm wurde die CAD-Software CATIA v5R20 verwendet.

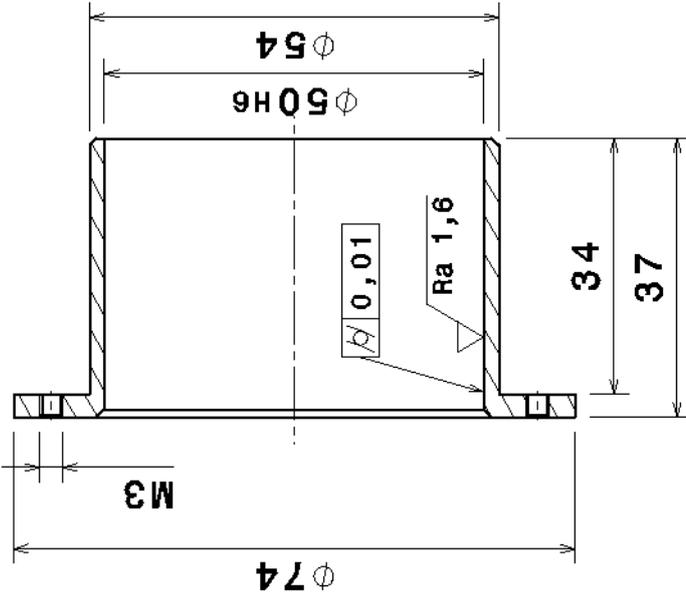
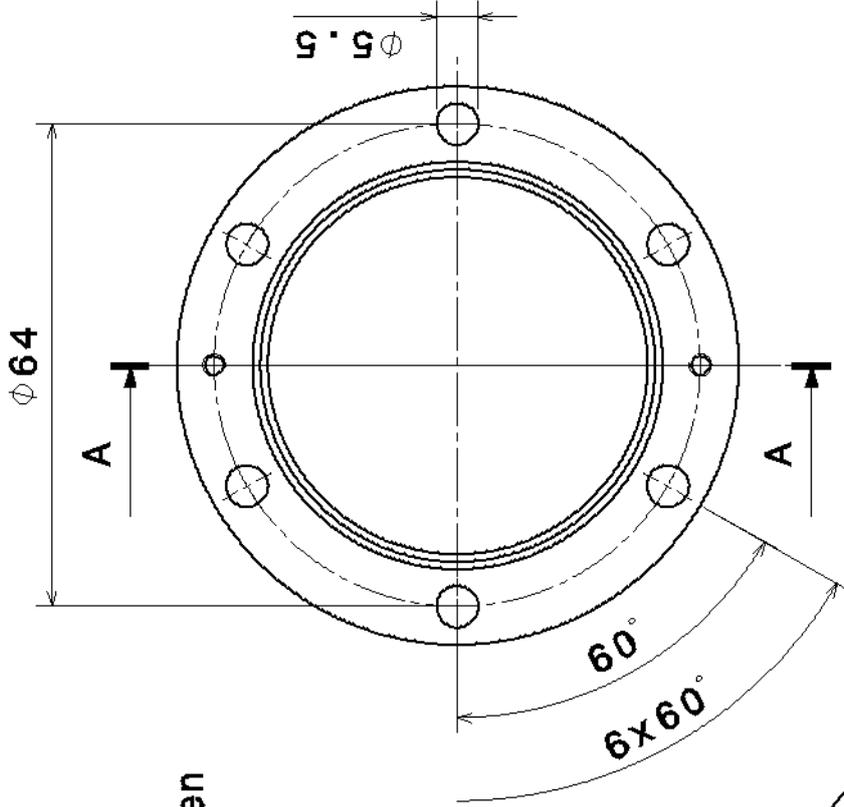
Für das Griffrohr, den Rohrverschluss und die Fixationsplättchen wurden keine gesonderten Konstruktionszeichnungen angefertigt, da für die Fertigung derselben nur wenige, einfache Arbeitsschritte notwendig waren. Ebenso verhält es sich auch mit den Schutzgehäusen, an denen leichte Veränderungen vorgenommen wurden.

Auf eine Zusammenstellungszeichnung des gesamten Sensorgriffes wurde verzichtet, da zum einen die Stücklisten für die einzelnen Baugruppen gesondert in Anhang A vorliegen, und zum anderen Details zum Zusammenbau des Griffes unter Abschnitt 4 „Eingeschlagener Realisierungsweg“ erörtert werden.

Anschlussmaße für den Sensorgriff lassen sich aus der Konstruktionszeichnung für den Bauteil 1 (Anschlusschülse) entnehmen.

Die Lochkreise in Bauteil 3 (Sensoranschluss) und Bauteil 6 (Griffbogen) dienen jeweils der Schraubenverbindung des entsprechenden Teiles mit dem Kraftsensor K6D40.

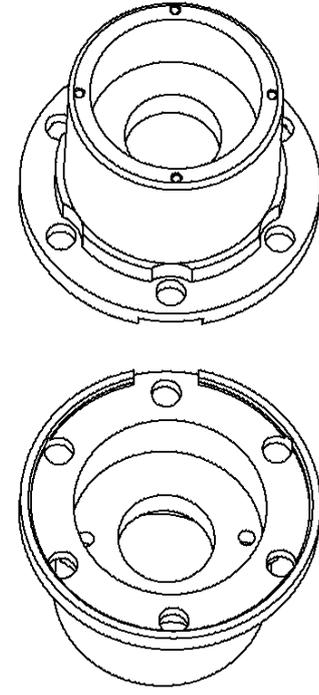
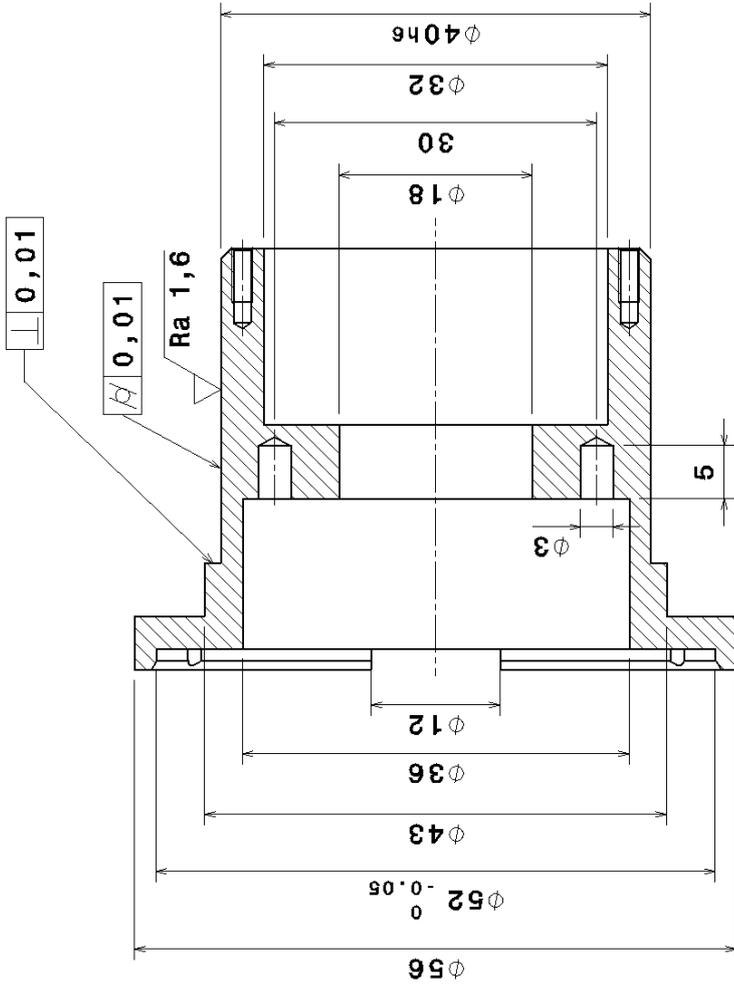
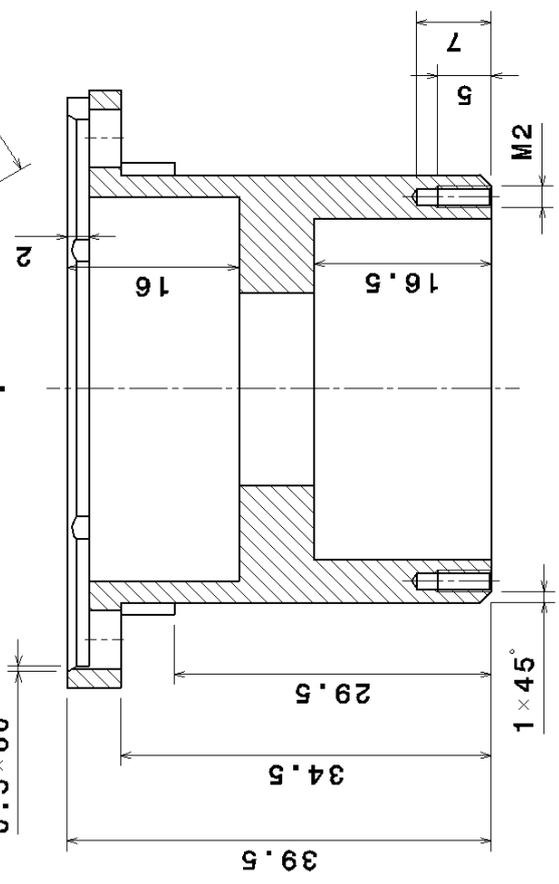
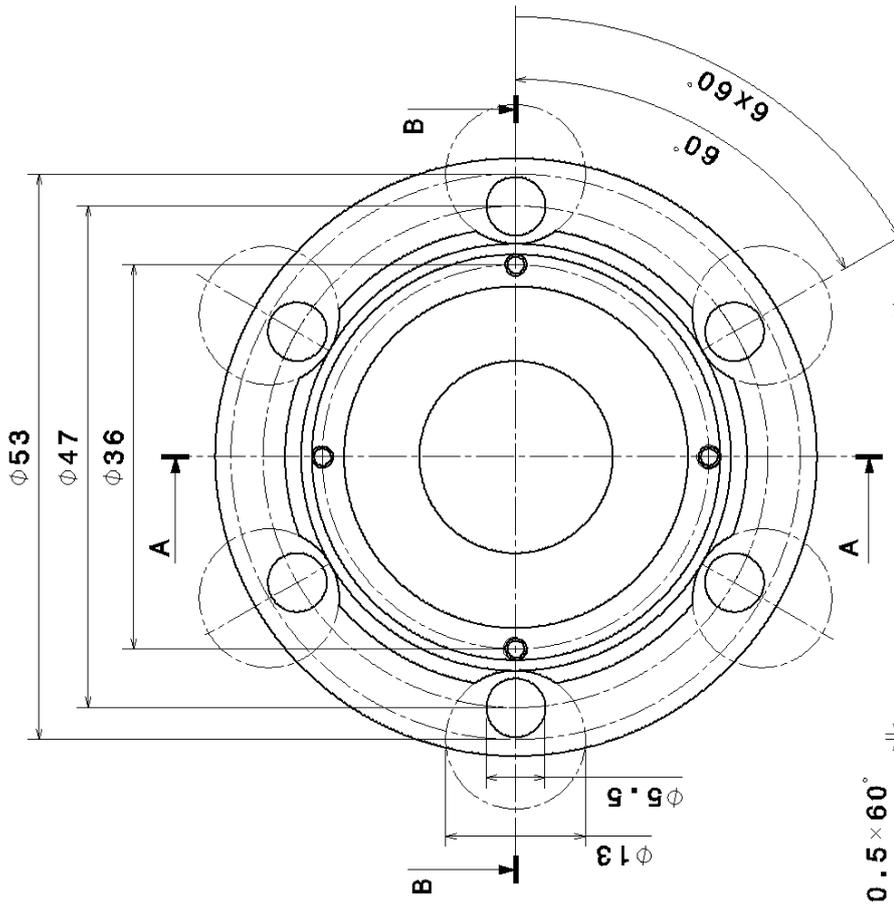
Alle nicht bemaßten  
Fasen 1 mm x 45°



Ø50	H6	+0,016	50,016
		+0,000	50,000
Maß		Passung	

Allgemeintoleranz <b>ISO 2768 - fein</b>	Oberfläche <b>unbehandelt</b>	Werkstoff <b>Edelstahl</b>	Rohmaße <b>d 74 x 35</b>	Gewicht <b>0.138 kg</b>
Verantwortliche Abteilung <b>Inst. f. Konstruktionswissenschaften</b>		Dokumentenart <b>Einzelteil Zeichnung</b>		
Dokumentenstatus <b>-</b>		Sachnummer <b>Bauteil 1</b>		
Erstellt durch: <b>F. Stadler</b>		Maßstab <b>1:1</b>		
Genehmigt von: <b>M. Gföhler</b>		Änderungsdatum <b>15-06-2014</b>		
		Spr. Blatt <b>de 1/1</b>		

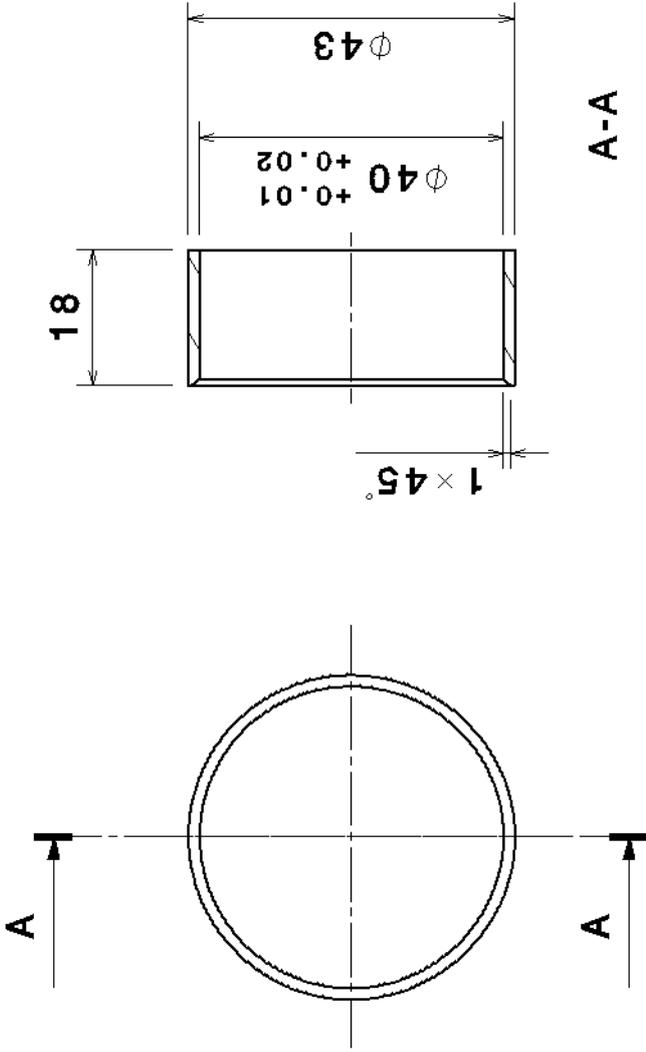




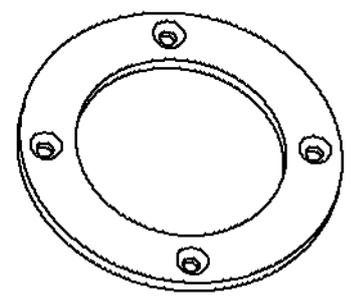
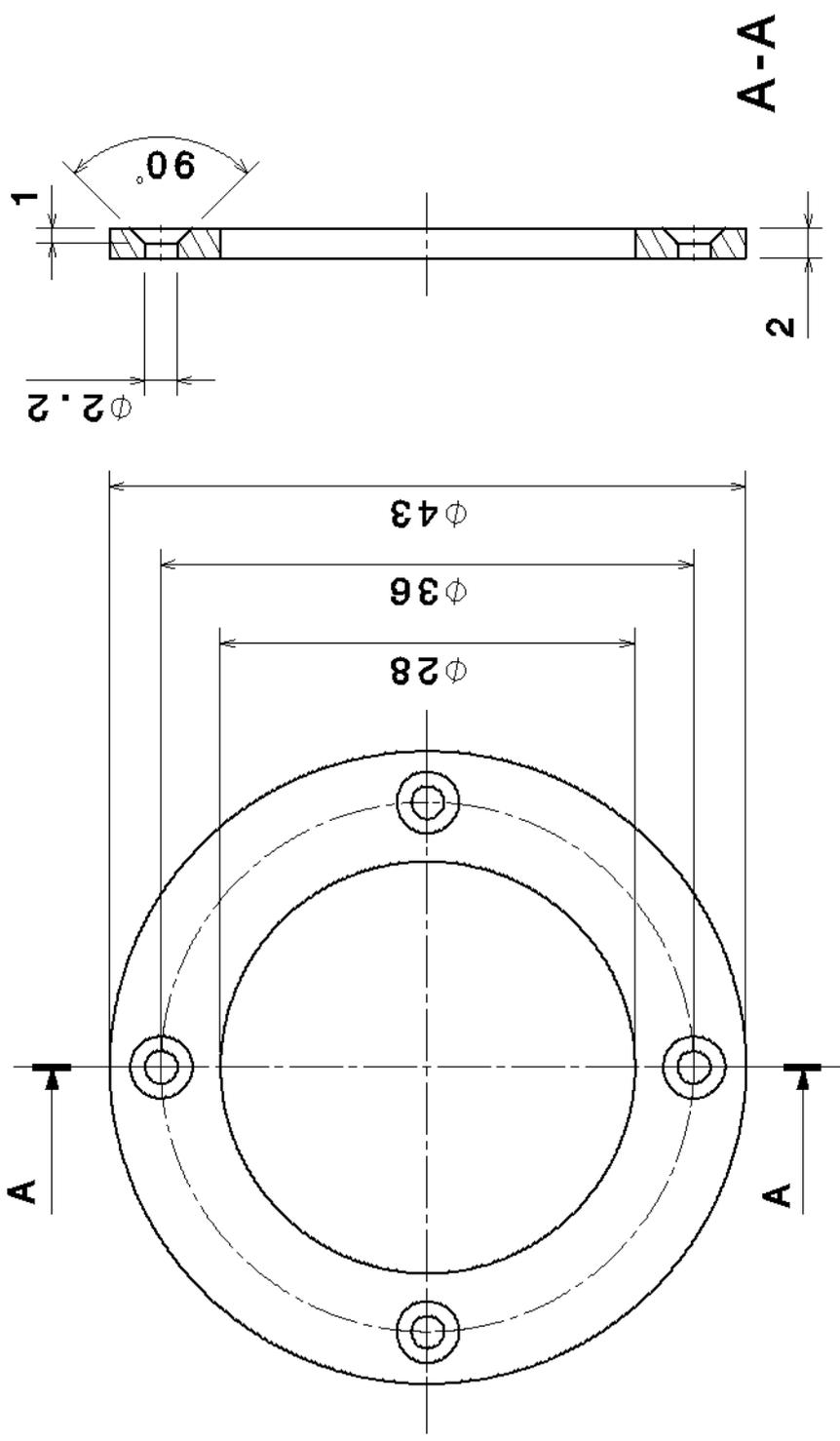
Maß	h6	+0,000	40,000
		-0,016	39,984

Maß	Passung	
Rohmaße	d 56 x 39,5	Gewicht
		0.175 kg
Dokumentenstatus	-	
Sachnummer	Bauteil 3	
Maßstab	Änd.	Ausgabedatum
1:1	A	15-06-2014
		de
		1/1

Allgemeintoleranz	ISO 2768 - fein	Oberfläche	unbehandelt	Werkstoff	Edelstahl
Verantwortliche Abteilung	Inst. f. Konstruktionswissenschaften	Dokumententyp	Einzelteil Zeichnung	Titel, zusätzlicher Titel	Sensoranschluss
Erstellt durch:	F. Stadler	Genehmigt von:	M. Gföhler		Sensorgriff
					

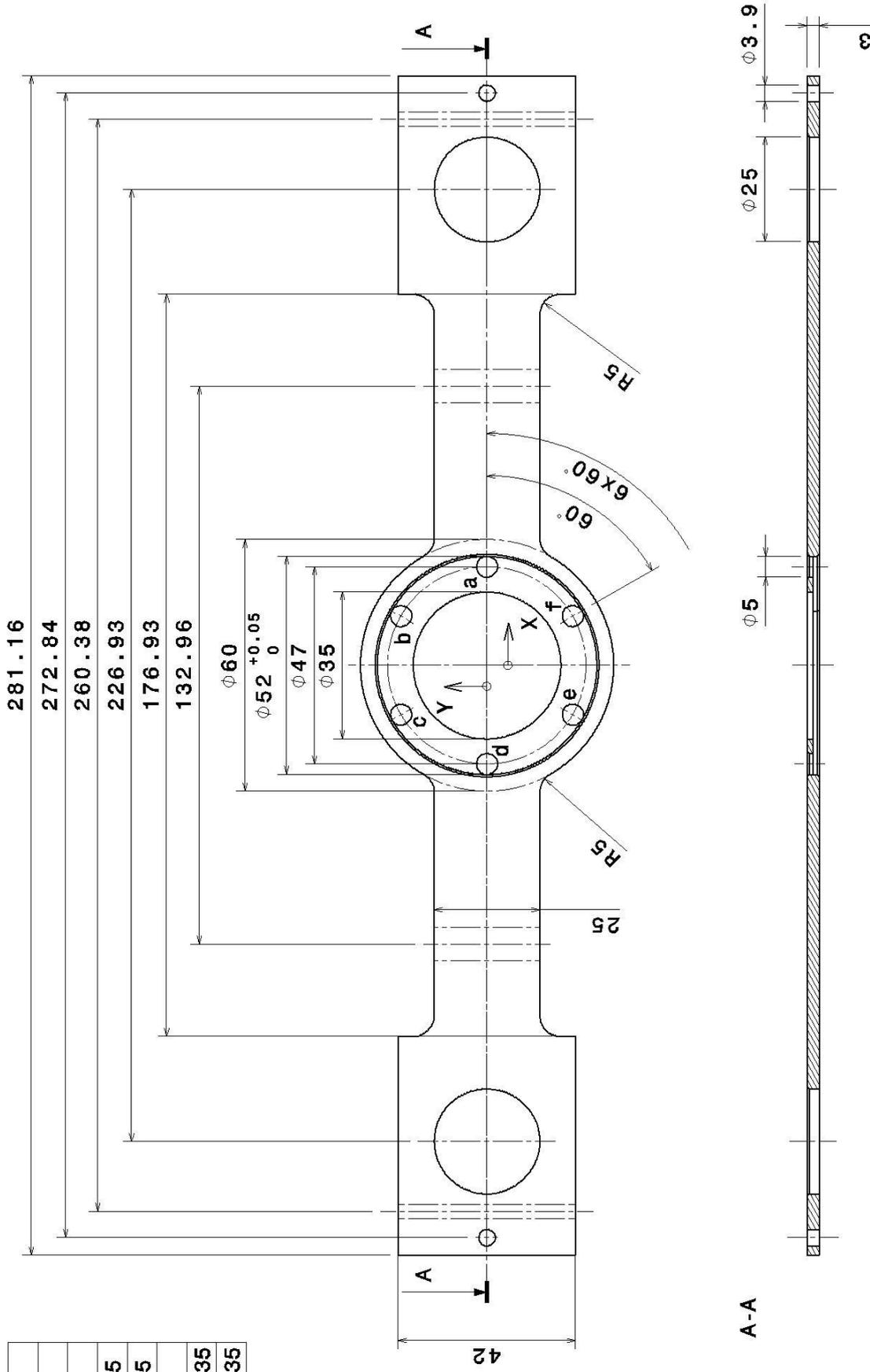


<b>Allgemeintoleranz</b> ISO 2768 - fein	<b>Oberfläche</b> unbehandelt	<b>Werkstoff</b> Edelstahl	<b>Rohmaße</b> d 43x18	<b>Gewicht</b> 0.027 kg
<b>Verantwortliche Abteilung</b> Inst. f. Konstruktionswissenschaften		<b>Dokumententyp</b> Einzelteil Zeichnung	<b>Dokumentenstatus</b> -	
<b>Erstellt durch:</b> F. Stadler		<b>Sachnummer</b> Bauteil 4		
<b>Genehmigt von:</b> M. Gföhler		<b>Maßstab</b> 1:1	<b>Änd.</b> A	<b>Ausgabedatum</b> 15-06-2014
		<b>Titel, Zusätzlicher Titel</b> Lagerabstandshülse Sensorgriff	<b>Spr.</b> de	<b>Blatt</b> 1/1



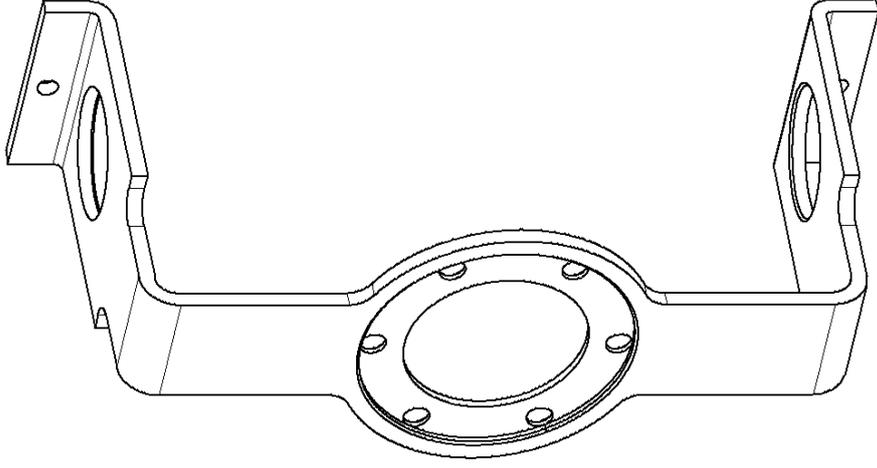
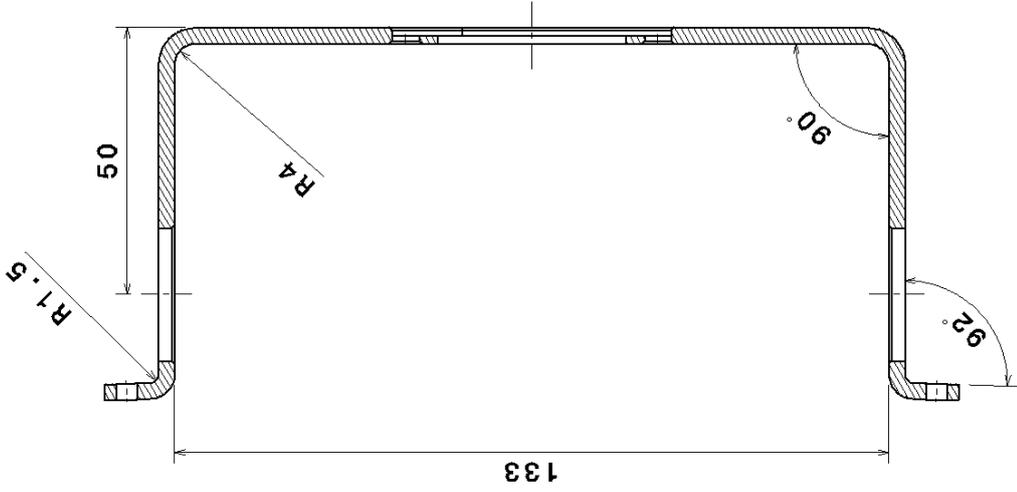
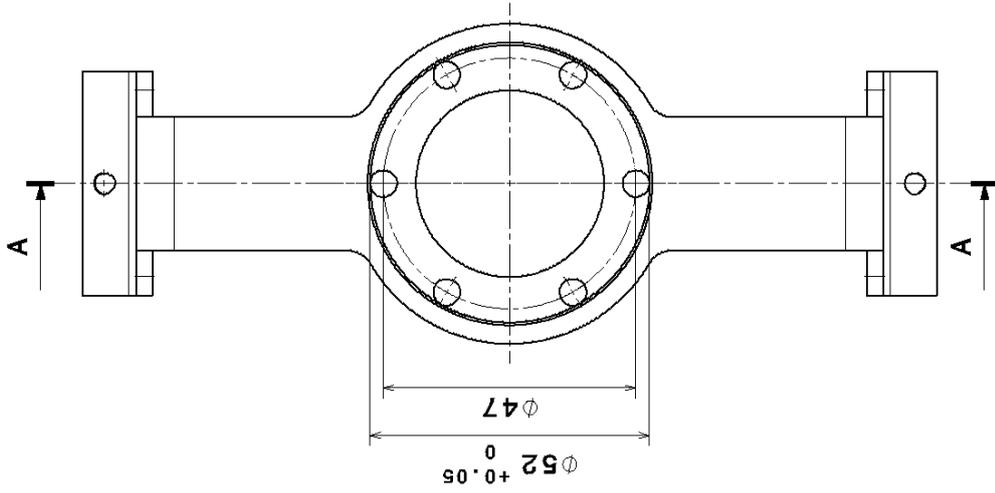
<b>Allgemeintoleranz</b> ISO 2768 - fein	<b>Oberfläche</b> unbehandelt	<b>Werkstoff</b> Edelstahl	<b>Rohrmaße</b> d 43 x 2	<b>Gewicht</b> 0.010 kg
<b>Verantwortliche Abteilung</b> Inst. f. Konstruktionswissenschaften		<b>Dokumentenart</b> Einzelteil Zeichnung	<b>Dokumentenstatus</b> -	
<b>Erstellt durch:</b> F. Stadler		<b>Sachnummer</b> Bauteil 5		
<b>Genehmigt von:</b> M. Gföhler		<b>Maßstab</b> 2:1	<b>Änd.</b> A	<b>Ausgabedatum</b> 2012-04-09
		<b>Spr. Blatt</b> de 1/1		

Bohrungstabelle	
REF. X	Y
a	23,5 0
b	11,75 20,35
c	-11,75 20,35
d	-23,5 0
e	-11,75 -20,35
f	11,75 -20,35



Alle nicht bemaßten Fasen 0,5 mm x 45°

<b>Allgemeintoleranz</b> ISO 2768 - fein	<b>Oberfläche</b> unbehandelt	<b>Werkstoff</b> Carbon	<b>Rohrmaße</b> 282x60x3	<b>Gewicht</b> 0.04 kg
<b>Verantwortliche Abteilung</b> Inst. f. Konstruktionswissenschaften		<b>Dokumentenart</b> Einzelteil Zeichnung	<b>Dokumentenstatus</b> -	
<b>Erstellt durch:</b> F. Stadler		<b>Sachnummer</b> Bauteil 6		
<b>Genehmigt von:</b> M. Gföhler		<b>Maßstab / Änd. / Ausgabedatum</b> 1:2 A 06-07-2014 de		
		<b>Blatt</b> 1/2		



fertig gebogene Ansicht

<b>Allgemeintoleranz</b> ISO 2768 - fein	<b>Oberfläche</b> unbehandelt	<b>Werkstoff</b> Carbon	<b>Rohmaße</b> -	<b>Gewicht</b> -
<b>Verantwortliche Abteilung</b> Inst. f. Konstruktionswissenschaften		<b>Dokumentenart</b> Einzelteil Zeichnung	<b>Dokumentenstatus</b> -	
<b>Erstellt durch:</b> F. Stadler		<b>Sachnummer</b> Bauteil 6		
<b>Genehmigt von:</b> M. Gföhler		<b>Maßstab / Änd. / Ausgabedatum</b> 1:2 A 06-07-2014 de 2/2		
		<b>Teil, Zusätzlicher Titel</b> Griffbogen (gebogen) Sensorgriff		