

**Entwicklung eines Systems zum Messen
von handbetätigten Kurzhubtasten und
Untersuchung deren Schaltverhaltens**

THOMAS WEGER

MASTERARBEIT

eingereicht am
Masterstudiengang

MECHATRONIK UND FEINWERKTECHNIK

an der Hochschule München

im Februar 2015

© Copyright 2015 Thomas Weger

Alle Rechte vorbehalten

Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den benutzten Quellen entnommenen Stellen als solche gekennzeichnet habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Hochschule München, am 4. Februar 2015

Thomas Weger

Inhaltsverzeichnis

Erklärung	iii
Vorwort	xi
Kurzfassung	xii
Abstract	xiii
1 Einleitung	1
2 Aufgabenstellung	3
2.1 Aufgabenstellung - Aufgabendefinition	3
2.2 Anforderungen an das Messsystem	3
3 Stand der Technik	7
3.1 Entwicklungsumgebung	7
3.1.1 V-Modell	8
3.1.2 Analyse und Entwurf-Prozess	9
3.2 Haptik	10
3.3 Taster	10
3.3.1 Tastschalter	11
3.3.2 Kurzhubtaster	12
3.3.3 Bedeutung von haptischen Stellteilen im Automobil .	12
3.3.4 Prüfling	14
3.4 Haptikkurve	15
3.5 Kraf-Weg-Messgeräte	16
3.6 Grundlagen Messtechnik	18
3.6.1 Messunsicherheit	19
3.6.2 Fehlerarten	20
3.6.3 Wiederhol- und Messgenauigkeit	21
4 Lösung	22
4.1 Entwurf-System	22
4.2 Gestell	23

4.2.1	Portalsystem	24
4.2.2	Aufnehmer	26
4.3	Führung	26
4.3.1	Lineareinheit	27
4.3.2	Auswahl Lineareinheit Z-Richtung	28
4.3.3	Auswahl Lineareinheit X-Richtung	35
4.3.4	Auswahl Lineareinheit Y-Richtung	40
4.3.5	Kupplung	40
4.4	Antrieb - Motoreinheit	41
4.4.1	Auswahl Schrittmotor Z-Achse	42
4.4.2	Auswahl Schrittmotor X-Achse	46
4.4.3	Auswahl Schrittmotor Y-Achse	49
4.4.4	Controller und Driver	51
4.4.5	Modbus	51
4.5	Positionserfassung	53
4.6	Krafterfassung	54
4.6.1	Kraftsensor	55
4.6.2	Signalkonditionierung	57
4.6.3	Datenerfassungsgerät	58
4.7	Überlastschutz	60
4.8	LIN/CAN - Adapter	63
4.9	Systemsteuerung	64
4.10	Gesamtsystem	65
4.10.1	Konstruktion	65
4.10.2	Verkabelung	67
4.10.3	Programmierung	69
4.11	Komponententest	78
4.11.1	Genauigkeit Antriebssystem	78
4.11.2	Kalibriermessung mit verschiedenen Prüfmassen	79
4.11.3	Vergleich mit Briefwaage	80
4.12	Fähigkeit Messsystem	82
4.12.1	Normalteil	82
4.12.2	Messung statischer Steifigkeit	82
4.13	Schaltverhalten	83
4.13.1	Audi-Messung	83
4.13.2	Messort	84
4.13.3	Geschwindigkeitsmessungen	85
4.13.4	Temperaturmessung	87
5	Diskussion	89
6	Zusammenfassung und Ausblick	91
A	Technische Informationen	I

Inhaltsverzeichnis	vi
A.1 Abkürzungen	I
A.2 Begriffe	III
A.3 Tabellen und Grafiken	IV
B Technische Zeichnungen	XIII
C Inhalt DVD	XXXIII
C.1 Masterarbeit	XXXIII
C.2 Datenblätter	XXXIII
C.3 Technische Zeichnungen	XXXIII
C.4 Programme	XXXIV
C.5 Bilder und Videos	XXXIV
Quellenverzeichnis	XXXV
Literatur	XXXV
Online-Quellen	XXXVI

Abbildungsverzeichnis

2.1	Kraft-Weg-Diagramm von Audi [14]	4
3.1	V-Modell [20]	8
3.2	Analyse und Entwurf-Prozess	9
3.3	Aufteilung der Sinne [10]	10
3.4	Taktschalter SKHUPJE010	12
3.5	Audi MMI mit Kurzhubtasten	14
3.6	Typischer Kraft-Weg-Verlauf [2]	15
3.7	Manuelle Kraft-Weg-Messung [27]	18
3.8	Manuelle Kraft-Weg-Messung 2 [27]	18
3.9	Kraft-Weg-Messung mit Motor [12]	19
3.10	Kraft-Weg-Messung mit Motor 2 [2]	19
3.11	Kraft-Weg-Messung System [24]	19
3.12	Kraft-Weg-Messung System [25]	19
3.13	Wiederholgenauigkeit	21
4.1	Blockschaltbild Messsystem	23
4.2	Blockschaltbild Tischsystem	24
4.3	Anordnung 1 [7]	25
4.4	Anordnung 2 [7]	25
4.5	Anordnung 3 [7]	25
4.6	Anordnung 4 [7]	25
4.7	Belastungsfall	26
4.8	Aufnehmer MMI	27
4.9	ServoPresseMISUMI	28
4.10	Bewegungsprofil Z-Achse	29
4.11	Einbaulage	29
4.12	Bewegungsprofil X-Achse	35
4.13	Einbaulage X-Achse	35
4.14	Blockschaltbild Führung	43
4.15	Arbeitspunkt Motor	46
4.16	Schrittmotor mit closed-loop	46
4.17	Skizze X-Y-Achse	47

4.18	Blockschaltbild Signalerfassung	55
4.19	KD45	57
4.20	NI xSerie	61
4.21	NI cRIO	61
4.22	Variante 1	62
4.23	Variante 2	62
4.24	Federkraft	63
4.25	BabyLin und Peak Adapter	64
4.26	System Skizze CAD	67
4.27	Blockschaltbild der Verkabelung	68
4.28	Programmausschnitt von Orientalmotor	70
4.29	Ablaufdiagramm Motorsteuerung	72
4.30	Frontpanel der manuellen Bedienung	73
4.31	Programmierung Motorfahrt	73
4.32	TTL Signal	74
4.33	Umsetzung der Krafterfassung in LabVIEW	75
4.34	TDMS Viewer	76
4.35	Ablaufdiagramm Messung	77
4.36	Hand	78
4.37	Hand	81
4.38	DMS und Waage	81
4.39	Messsystem	82
4.40	Messung statischer Steifigkeit	83
4.41	Haptikkurve	85
4.42	Kraft-Weg-Verlauf Tasten A-D	85
4.43	diverse Positionen	86
4.44	diverse Positionen Snap	86
4.45	diverse Betätigungsgeschwindigkeiten	87
4.46	diverse Betätigungsgeschwindigkeite Snap	87
4.47	diverse Temperaturen	88
4.48	diverse Temp. Snap	88
A.1	Fehlereinflüsse bei direkter und indirekter Messung [11]	VIII
A.2	Prinzip der analogen und digitalen Messwerterfassung [11]	VIII
A.3	Tastenhaptiknormal	VIII
A.4	Druckpositionen	X
A.5	Rückstellkurve Tasten A-D	X

Tabellenverzeichnis

2.1	Sollvorgaben Standard-Drucktaste [14]	4
2.2	Anforderungsliste	5
2.3	Anforderungsliste Fortsetzung	6
3.1	Verwendete Software	7
3.2	Begriffserklärung [16]	11
3.3	Merkmale unterschiedlichen Tastschalter	12
4.1	Technische Daten LX2001 und LX2605 [4]	29
4.2	Zusammenfassung Berechnungen	33
4.3	Zusammenfassung Berechnungen	38
4.4	Technische Daten SCPW No. 16	41
4.5	Eigenschaften unterschiedlicher Motortypen	42
4.6	Technische Daten des AR26SAKD	46
4.7	Aufbau einer Botschaft RTU	52
4.8	Gegenüberstellung von Längenmessgeräten	55
4.9	Technische Daten des KD 45	57
4.10	Technische Daten des GSV-1	58
4.11	Eigenschaften unterschiedlicher Bus-Übertragung [21]	59
4.12	Technische Daten des NI x-Serie USB-6341	61
4.13	Vergleichstabelle Computer [22]	65
4.14	Schrittauflösung	79
4.15	Messprotokoll Hersteller	80
4.16	k-Faktor	81
4.17	Messpunkte Taste wird gedrückt	84
A.1	Begriffserklärung für Haptikkurve 3.6 entnommen aus [2]	V
A.2	Gewichtung von Merkmalen	VI
A.3	Vergleich der unterschiedlichen Kraft-Weg-Systeme	VII
A.4	Komponenten	IX
A.5	Messung DMS und Briefwaage	X
A.6	Wiederholgenauigkeit Linearsystem LX2001P	XI
A.7	Messung Kraft-Weg-Verlauf	XII
A.8	Rückstellkurve Messpunkte	XII

Tabellenverzeichnis

x

A.9 Charakteristische Messpunkte XII

Vorwort

Die hier vorliegende Arbeit entstand im Unternehmen ALPS Electric Europe GmbH in München im Zeitraum von September 2014 bis Februar 2015.

Das Thema umfasst weite Bereiche der Elektronik, Mechanik und Informatik. Es wird davon ausgegangen, dass der Leser über technisches Hintergrundwissen verfügt, dennoch wird aufgrund des breiten Themenspektrums jeweils eine kurze Themeneinführung vermittelt, Verständlichkeit und Nachvollziehbarkeit von Folgekapiteln sollen dadurch sichergestellt werden.

Hiermit möchte ich mich bei ALPS für die Möglichkeit, die vorliegende *Masterarbeit* im Unternehmen erarbeiten zu dürfen, bedanken. Besonderer Dank gilt meinen Betreuern Georg Prokein und Lorcan O’beirne für ihre hervorragende fachliche Unterstützung. Ebenfalls danke ich allen Kollegen, welche mir bei Fragen und Problemen stets hilfsbereit zur Seite standen, darunter besonders Peter Aichem. Bei der Firma Systec haben mich Herbert Pichlik und Matthias Leiniger unterstützt.

Zudem danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Leibl, meinem betreuenden Professor an der Fachhochschule München sowie meinem Zweitbetreuer Herrn Dipl.-Ing. Peter Sedlmeier. Speziell danke ich meiner Schwester Hildegard für sorgfältiges Korrekturlesen und konstruktive Verbesserungsvorschläge. Als Fachfremde zeigte Sie auf, an welchen Stellen noch Erklärungsbedarf besteht. Besonders danke ich meiner Familie und meinen Freunden, die mir während meines gesamten Studiums Sicherheit und Rückhalt gaben; meiner Mutter Barbara und meinem Vater Walter für ihre Geduld und Mühen.

I would like to thank my arms for always being by my side, my legs for always supporting me, and my fingers because I can always count on them.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines automatisierten Systems zum Messen von handbetätigten Kurzhubtasten zur Qualitätssicherung und -steigerung. Mit dem entwickelten Messsystem werden Haptikkurven von Bedienteilen aus dem Automotive-Bereich aufgezeichnet und untersucht.

Dafür wird im ersten Teil der Arbeit (*Stand der Technik*) beschrieben, welche Methoden zur effizienten und strukturierten Entwicklung eingesetzt werden. Anschließend werden der Begriff der Haptik sowie das Messobjekt (Audi MMI) beschrieben. Anhand einer Gegenüberstellung von verschiedenen Kraft-Weg-Messsystemen wird aufgezeigt, dass sich durch die Vorgaben aus dem Lastenheft die Notwendigkeit ergibt, eine Sonderlösung zu entwickeln.

Im zweiten Teil *Lösung* wird die im vorhergehenden Kapitel beschriebene Methode zur strukturierten Entwicklung konkret angewandt. Es wird ein komplettes Messsystem mit drei linearen Achsen, einem Kraftsensor, Längenmessgeräten, einem Datenerfassungsgerät und einem Adapter zur Auswertung von CAN/LIN-Botschaften entwickelt. Die Steuerung der Motoren sowie die Datenaufzeichnung, Auswertung und Darstellung der Daten und Bedienoberfläche werden durch LabVIEW realisiert. Mit der erstellten Messeinrichtung werden Kraft-Weg-Kurven eines Audi MMI aufgezeichnet. Es wird getestet, ob sich die Haptik der Tasten innerhalb der in der Spezifikation festgelegten Toleranzfenster befindet. Weiters erfolgt eine Untersuchung über den Einfluss der Betätigungsposition auf die Haptik und über den Einfluss der Betätigungsgeschwindigkeit und der Bauteiltemperatur auf das Schaltverhalten.

In den abschließenden Kapiteln *Diskussion* und *Zusammenfassung und Ausblick* werden die Ergebnisse miteinander verglichen und diskutiert. Mögliche Schritte bei der Weiterentwicklung des Messsystems werden erörtert.

Abstract

This Master's thesis focuses on the creation of an automated test system to measure hand-operated short-stroke keys to ensure and enhance quality standards. The developed measuring system enables haptic data from automotive control units to be recorded and analyzed.

The first theoretical part of the thesis introduces the methods used to develop the system in a structured and efficient way (V-Model). The subsequent sections provide the definition of the term haptics and a description of short-stroke key followed by a comparison of different force-distance measuring systems leading the conclusion that only a customized solution could meet the specified requirements.

The practical part of the thesis is dedicated to the actual application of the previously introduced structured development approach. The aim is to create a system consisting of three linear axes which are moved by stepper motors. A force sensor will measure the applied force with its signals being increased by an operational amplifier. The control of the motors as well as the data acquisition will be done using LabVIEW. The created measuring system makes it possible to measure the force-distance of any short-stroke key used in automotive control units. In this thesis the device under investigation is an Audi MMI.

The tests are to determine if the push buttons are within the Audi specifications, which influence the test position has on the haptic curve, which influence the push velocity has and which influence the temperature of the device has. The final chapter summarizes the findings of the thesis and offers suggestions of how to further improve the measuring system.

Kapitel 1

Einleitung

Die zentrale Aufgabe des Fahrers im Automobil ist das Steuern des Fahrzeuges. Die ersten Anzeigeelemente im Fahrzeug wurden entwickelt, um den Fahrer bei dieser Aufgabe zu unterstützen [16]. Mit der Weiterentwicklung des Automobils entstanden zusätzliche Bedienelemente, diese unterstützen den Fahrer nicht mehr notwendigerweise bei der Fahrzeuglenkung, sondern steigern lediglich den Komfort. Automobilhersteller müssen gewährleisten, dass die Bedienung der Komfortelemente erfolgen kann ohne den Fahrer von seiner Primäraufgabe abzulenken. Touchscreens sind zwar flexibel und intuitiv bedienbar, beanspruchen aber in hohem Maße den ohnehin stark ausgelasteten visuellen Kanal des Fahrers. Blinde Bedienung kann aufgrund fehlender haptischer Rückmeldung nur unzureichend erfolgen. In Zukunft werden deshalb haptische Bedienelemente weiterhin eine entscheidende Bedeutung im Fahrzeug haben. Fahrzeuglenker wünschen sich, dass sich die Bedienung im Fahrzeug hochwertig und markenspezifisch anfühlt. Folgend legen Hersteller großen Wert darauf, den Bedienelementen ihrer Philosophie entsprechend eine genau definierte Haptik zu geben. Zulieferer müssen gewährleisten, dass ihre Produkte den OEM-Spezifikationen entsprechen. Dazu gehört neben dem Messen auch die Untersuchung der Produkte unter unterschiedlichen Bedingungen. Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung eines automatisierten Prüfsystems zur Qualitätssicherung und -steigerung haptischer Bedienelemente. Durch das Prüfsystem wird die Reproduzierbarkeit von Messungen gewährleistet. Daneben kann durch entsprechende Programmierung das haptische Schaltverhalten genau analysiert werden.

In Kapitel 2 wird die Aufgabenstellung erörtert, aus dem Lastenheft eines Automobilherstellers abgeleitet, wird die Anforderungsliste für das Messsystem erstellt. In Kapitel 3 wird beschrieben, wie anhand des V-Modells strukturiert und effizient entwickelt werden kann. In Kapitel 3.2 wird der Begriff Haptik erläutert und die Bedeutung der Haptik im Automobil aufgezeigt. Danach werden im Kapitel 3.3 typische Kraftverläufe und Charakteristika

von Tasten erläutert. Anhand einer Gegenüberstellung von verschiedenen Kraft-Weg-Messsystemen (Kapitel 3.5) wird aufgezeigt, dass sich durch die Vorgaben aus dem Lastenheft die Notwendigkeit eine Sonderlösung zu entwickeln ergibt. Anschließend werden in Kapitel 3.6 Grundlagen der Messtechnik beschrieben, wodurch der Leser einen Überblick über die gängigen Methoden erhält.

Im Kapitel 4.1 wird der Systementwurf beschrieben, anhand dessen die einzelnen Komponenten ausgewählt werden. Anschließend werden systematisch die einzelnen Komponenten analysiert und ausgelegt. Zu Beginn das Gestell, Kapitel 4.2, die Führung in Kapitel 4.3, die verwendeten Motoren in Kapitel 4.4, die Positionserfassung in Kapitel 4.5, die Krafterfassung in Kapitel 4.6, der Überlastschutz in 4.7, LIN- und CAN-Adapter in 4.8; Kapitel 4.9 beschreibt die Systemsteuerung. Das Kapitel 4.10 zeigt die Ausarbeitung der technischen Zeichnungen. Nach der Aufbaubeschreibung wird anschließend die Fähigkeit des Systems nachgewiesen, siehe Kapitel 4.11. Kapitel 4.12 zeigt die Messung des Gesamtsystems mit einem Tastenhaptiknormal. Nach Feststellung der Prüfmittelfähigkeit werden im Kapitel 4.13 MMI-Eingabegeräte von Audi nach Spezifikation getestet. Mit dem Messsystem werden Versuchsreihen gefahren, um zu beurteilen, welchen Einfluss die Betätigungsgeschwindigkeit, Betätigungsposition und Bauteiltemperatur auf die Haptik des Prüfkörpers haben (Kapitel 4.13).

In Kapitel 5 werden die Resultate diskutiert und beurteilt.

In Kapitel 6 wird die gesamte Arbeit zusammengefasst. Vorschläge zur Verbesserung des Messsystems werden angeführt.

Kapitel 2

Aufgabenstellung

2.1 Aufgabenstellung - Aufgabendefinition

Im Rahmen der Masterarbeit bei ALPS soll ein stationäres Messsystem für Kurzhubtasten (siehe Kapitel 3.3.2) entwickelt, getestet und validiert werden. Das Messsystem soll den Kraft-Weg Verlauf einer Hubtaste aufzeichnen können. Die Auflösung der Messung muss so gewählt werden, dass sie die Schaltkurve mit ausreichender Genauigkeit wiedergibt, siehe Kapitel 2.2. Das System ist in drei Achsen beweglich, zwei Achsen zur Positionierung und eine Achse zur Kraftaufzeichnung. Mit dem Messsystem müssen Kurzhubtasten nach OEM-Spezifikation getestet werden können (2.2). Die Signalaufzeichnung und Auswertung erfolgen durch LabVIEW. Die Schaltauswertung der Prüflinge geschieht über einen CAN/LIN-Adapter. Daneben wird untersucht, welchen Einfluss die Betätigungsgeschwindigkeit auf das Schaltverhalten der Taster hat.

2.2 Anforderungen an das Messsystem

Abgeleitet von den Audivorgaben wird die Anforderungsliste für das System erstellt. Die Abbildung 2.1 zeigt ein Kraft-Weg-Diagramm aus dem Lastenheft von [14]. Dieses, vom OEM vorgegebene Schaltbild, muss vom Zulieferer eingehalten werden. Das Diagramm zeigt deutlich das Hystereseverhalten von Kurzhubtastern. Die grüne Linie zeigt die Kraftverläufe beim Betätigen der Taste, die Blaue die Verläufe beim Loslassen. Die Tabelle 2.1 gibt die charakteristischen Punkte quantitativ wieder. Die Rückstellkurve soll laut [14] in ihrer Form der Betätigungskurve entsprechen und die Kraftwerte müssen mindestens 50 % der Betätigungskurve entsprechen. Der Betätigungspunkt liegt auf der Tastenoberfläche, mittig auf dem Symbol oder im Tastenschwerpunkt. Bei translatorischen Haptikmessungen erfolgt der Vorschub parallel zur Führung. Von Audi vorgegeben ist eine Vorschubgeschwindigkeit von 1.6 mm/s , die Schrittweite der Messpunkte soll 0.01 mm betragen.

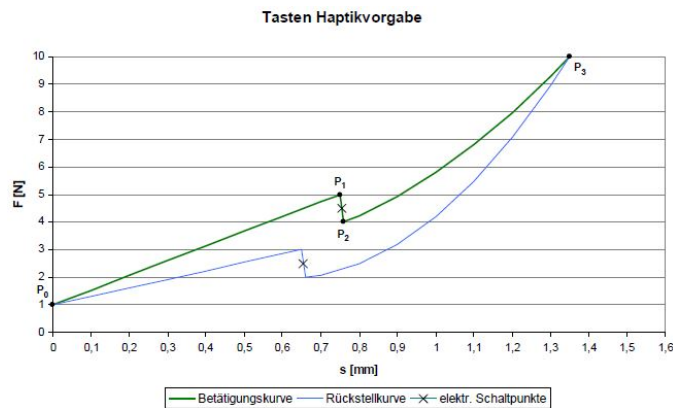


Abbildung 2.1: Kraft-Weg-Diagramm von Audi [14]

Tabelle 2.1: Sollvorgaben Standard-Drucktaste [14]

Wert	Sollvorgaben			
	Weg [mm]	Toleranz [mm]	Kraft [N]	Toleranz [N]
P_0	0.00	+ 0.10	1.0	± 0.2
P_1	0.75	+ 0.15	5.0	+ 1.0
$ P_2 - P_1 $	0.01	+ 0.01	1.0	± 0.2
P_3	1.35	+ 0.20	10	± 0.2

Für das Tastengefühl ist das Verhalten des Snaps von entscheidender Bedeutung (siehe Kapitel 3.3) und muss entsprechend aufgelöst werden. Aus Tabelle 2.1 ist ersichtlich, dass zwischen P_2 und P_1 ein Delta von 0.01 mm liegt. Das System soll diese Strecke mit mindestens zehn Messpunkten auflösen. Daraus ergibt sich die Anforderung einer Schrittweite von $1 \mu\text{m}$. Der Hub des Audischalters liegt bei rund 1.5 mm bei einer Maximalkraft von 10 N , da neben den Audischaltern auch andere Schalter getestet werden sollen, z.B. Schalter mit Gummimatten. Der maximale Hub wird deshalb auf 20 mm und die maximale Kraft auf 20 N spezifiziert. Die Vorschubgeschwindigkeit liegt bei Audi bei 1.6 mm/s . Damit auch andere Herstellerspezifikationen eingehalten werden können und um zu untersuchen, welchen Einfluss die Vorschubgeschwindigkeit auf das Auslöseverhalten der Taster hat, wird eine Vorschubgeschwindigkeit von $0.1 - 10 \text{ mm/s}$ spezifiziert. Die Kraft soll mit 0.1 N aufgelöst werden. Die Tabelle 2.2 zeigt strukturiert die Gesamtanforderungsliste.

Tabelle 2.2: Anforderungsliste

Nummer	Anforderung	Mindest	Soll	Ideal	Einheit
Physikalisch - technische Funktion					
	Messachse				
P01	Maximalen Hub	10	20	60	mm
P02	Minimaler Hub	5	1	0.5	μm
P03	Positionsgenauigkeit	50	20	10	μm
P04	Wiederholgenauigkeit	± 5	± 3	± 2	μm
P05	Minimale Vorschubgeschwindigkeit	0.2	0.1	0.05	mm/s
P06	Maximale Vorschubgeschwindigkeit	10	20	30	mm/s
P07	Maximal Kraft	10	20	50	N
P08	Bewegungsart	trans.	trans.	trans.	
P09	Endanschlag	soft	mech.	induk.	
P10	Positionierart	elek.	elek.	elek.	
	Positioniereinheit				
P11	Betätigungsfläche	100	200	400	cm ²
P12	Minimaler Hub	10	5	1	μm
P13	Positionsgenauigkeit	80	60	20	μm
P14	Wiederholgenauigkeit	± 10	± 5	± 2	μm
P15	Minimale Vorschubgeschwindigkeit	0.2	0.1	0.05	mm/s
P16	Maximale Vorschubgeschwindigkeit	20	40	60	mm/s
P17	Maximal Kraft	10	20	50	N
P18	Bewegungsart	trans.	trans.	trans. und rot.	
P19	Endanschlag	soft	mech.	induk.	
P20	Positionierart	manuell	elek.	elek.	
	Datenerfassung				
P21	Echtzeitfähigkeit	nein	nein	ja	
P22	Abtastrate	10	20	40	kS/sec
	Kraftsensor				
P23	Überlastschutz	nein	ja	ja	
P24	Messbereich Kraftsensor	± 5	± 20	± 40	N
P25	Genauigkeitsklasse	0.4	0.2	0.1	
P26	Kraftauflösung	0.1	0.05	0.01	N

Tabelle 2.3: Anforderungsliste Fortsetzung

Nummer	Anforderung	Mindest	Soll	Ideal	Einheit
Technologie					
T01	Montage	in Haus	in Haus	extern	
T02	Zusammenbau a) Entwickler, b) eingewiesene Person, c) beliebige Person	a	b	c	
T03	Anzahl Bauteillieferanten	10	5	1	
T04	Verwendung von Zukaufteilen	keine	teilw.	kompl.	
T05	Verwendung von Zukaufteilen	keine	teilw.	kompl.	
T05	Elektronische Baugruppen als Zukaufteile	keine	teilw.	kompl.	
Wirtschaftlichkeit					
W01	Fertigungskosten pro Stück	15000	10000	8000	€
W02	Betriebsstunden	1-2	2-4	6-8	Tsd. Stunden
W03	Wartungskosten pro Jahr	200	100	50	€
W04	Austauschbarkeit einzelner Komponenten	ja	ja	ja	
W05	Abgabetermin	03.2015	02.2015	01.2015	
Mensch-Produkt-Beziehung					
M01	Montagefreundlich a) Entwickler, b) eingewiesene Person, c) beliebige Person	a	b	c	
M02	Bedienungsanleitung	1	10	20	S.
M03	Inbetriebnahme a) Entwickler, b) eingewiesene Person, c) beliebige Person	a	b	c	
M04	Programmierung a) Entwickler, b) eingewiesene Person, c) beliebige Person	a	b	c	
M05	Bedienung a) Entwickler, b) eingewiesene Person, c) beliebige Person	a	b	c	

Kapitel 3

Stand der Technik

Um den Leser an die Thematik der Arbeit heranzuführen wird in Kapitel 3.2 zuerst der Begriff Haptik erläutert und aufgezeigt, welche Bedeutung die Haptik im Automobil hat. Typische Kräfteverläufe eines Schalters werden dargestellt und deren Charakteristika anhand einer exemplarischen Kurve erläutert.

Anschließend werden im Kapitel 3.6 Grundlagen der Messtechnik beschrieben, wodurch der Leser einen Überblick über die gängigen Methoden erhält.

3.1 Entwicklungsumgebung

Neben der strukturierten Bearbeitung eines wissenschaftlichen Themas ist es wichtig, die Thesis als Projekt anzusehen, welches in einem gesetzten Rahmen zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Dabei kommen Entwicklungsmethoden wie das V-Modell zum Einsatz. Nachfolgender Abschnitt erläutert die Entwicklungsmethoden und -umgebung [18]. Die Abbildung 3.1 zeigt die Software, welche in diesem Projekt verwendet wurde.

Tabelle 3.1: Verwendete Software

Software	Version	Bemerkung
Notepad++	6.4.5	Texteditor
CATIA	5.19	CAD-Programm
LabVIEW	8.5	Grafisches Programmiersystem
Texmaker	4.1.1	Latex-Editor
Mexe02	3.11	Motorparametrierung
CANoe	8.0.71	Entwicklungswerkzeug

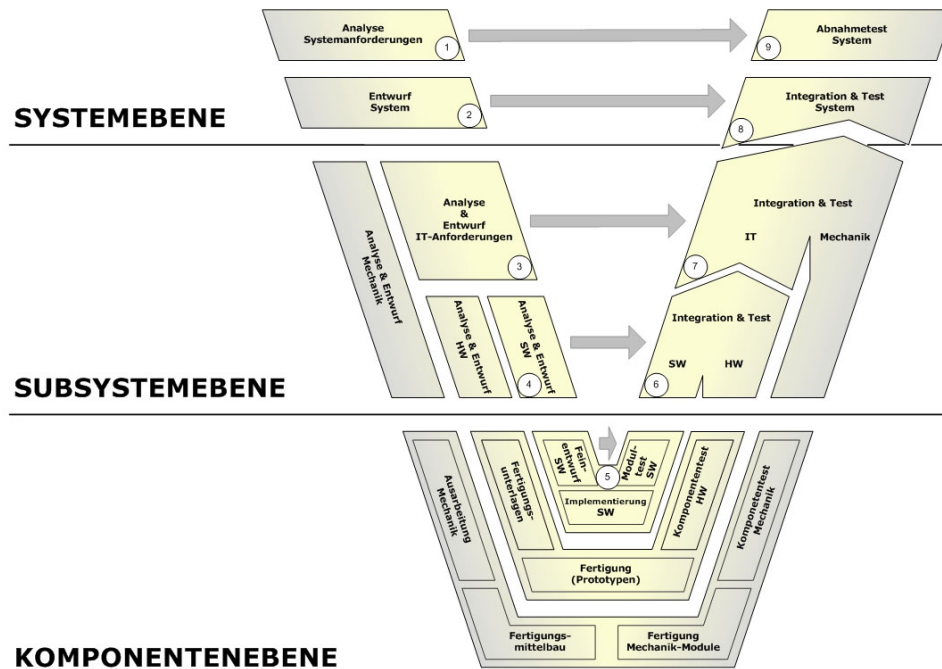


Abbildung 3.1: V-Modell [20]

3.1.1 V-Modell

Um Produkte von hoher und konstanter Qualität zu erzeugen werden gewisse Strategien und Methoden benötigt. In der Softwareentwicklung hat sich das V-Modell bewährt. Dieses Modell beschreibt, wie Projekte geplant und durchgeführt werden und dient als Leitfaden für Entwicklungsprojekte [18]. Die Abbildung 3.1 zeigt das V-Modell für mechatronische Systeme. Auf der linken Seite des V liegen die Anforderungen, auf der rechten Seite befinden sich die dazugehörigen Tests. Zu jeder Anforderung gibt es entsprechende Tests. Testziele und Testfälle basieren auf den jeweiligen Spezifikationen. Die Systemebene besteht aus der Analyse der Anforderungen, dies wird in Kapitel 2 behandelt. Darauf aufbauend wird im Kapitel 4.1 ein Gesamtsystem entworfen. In der Subsystemebene finden die Analyse und der Entwurf der einzelnen Komponenten statt; das theoretische Vorgehen in dieser Ebene wird in Kapitel 3.1.2 beschrieben und in Kapitel 4, bei der Auslegung der Bauteile, konkret angewandt. In der Komponentenebene finden die Ausarbeitung der gewählten Komponenten bzw. Software statt. Die einzelnen Komponenten werden einzeln getestet, siehe Kapitel 4.11. In der Subsystemebene findet die Integrationstests statt, diese testen die Zusammenarbeit voneinander abhängiger Komponenten. Beim Systemtest wird das Gesamtsystem gegen die gesamten Anforderungen getestet, siehe Kapitel 4.12.

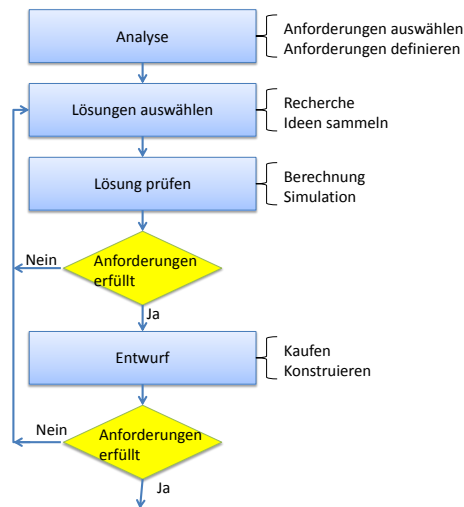


Abbildung 3.2: Analyse und Entwurf-Prozess

3.1.2 Analyse und Entwurf-Prozess

In diesem Abschnitt wird die Herangehensweise an die Analyse und an den Entwurf einzelner Teilkomponenten der Messmaschine erläutert, um strukturiert von einer Anforderung zu einer entsprechenden Komponente zu gelangen. Die Auswahl und Analyse in einem Entwicklungsprozess bilden einen Zyklus mit in der Regel mehreren Iterationsschleifen. Die Abbildung 3.2 stellt diesen Kreislauf grafisch dar und wird konkret bei der Auswahl der Komponenten in Kapitel 4 angewandt.

Analyse: Zu Beginn werden die Anforderungen an das Bauteil analysiert, indem sie aus der Anforderungsliste herausgesucht oder aus dieser abgeleitet werden. Es werden Ziele und Rahmenbedingungen beschrieben.

Lösung auswählen: Anschließend werden durch Ideensammlung (Brainstorming) oder Literaturrecherche verschiedene Lösungsalternativen für die Aufgabe gesucht. Die Lösungen werden verglichen und die Lösung, welche für die Aufgabe am geeignetsten erscheint, wird einer detaillierten Prüfung unterzogen.

Lösung prüfen: Abschätzen und Reduzieren von Risiken beispielsweise durch Berechnungen, Simulationen oder Prototyping.

Entwurf: Realisierung der Komponente durch Konstruktion und Fertigung, Kauf, Programmierung oder Ähnlichem. Abschließend wird die Komponente entsprechend dem V-Modell überprüft.

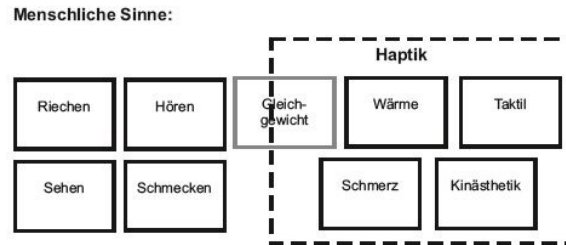


Abbildung 3.3: Aufteilung der Sinne [10]

3.2 Haptik

Haptik ist die Lehre vom Tastsinn und beschreibt, wie sich etwas anfühlt. Der Begriff entstammt dem griechischen *haptos* „fühlbar“. Um einen Gegenstand haptisch zu begreifen, besitzt der Mensch mehrere Sinne. Die Abbildung 3.3 zeigt eine Übersicht der menschlichen Sinne mit Hervorhebung der Haptik. Besonders an der Haptik ist, dass sie nicht ausschließlich über die Gesichts-Sinnesorgane, sondern über den ganzen Körper erfahrbar ist. Die Sinne der haptischen Wahrnehmung sind:

- Taktile: mechanische Interaktion mit der Haut, z.B. Kräfte und Bewegungen.
- Kinästhetik: aktorische wie sensorische Eigenschaften der Muskel und Gelenke, Tiefensensibilität (Propriozeption)¹.
- Wärme: zur Erfassung der Temperatur durch Thermorezeptoren (Thermorezeption).
- Schmerz: Schmerzwahrnehmung (Nozizeption).

Laut [10] ist der Tastsinn da, um Oberflächenrauigkeiten² wahrzunehmen und zu unterscheiden, daneben dient er zum Registrieren von Körpergrenzen. Für die folgende Arbeit ist lediglich das Ertasten der Schalter mit den Händen von Relevanz. Es werden das Betätigungsgefühl, die Taktilität für Tasten im Fahrzeuginterieur untersucht.

3.3 Taster

Taster sind elektromechanische Bedienelemente, sie wandeln die mechanische Position in ein elektrisches Signal um [16]. Diese Bedienelemente sind

¹ Jede externe kinästhetische Interaktion besitzt eine taktile Komponente, da sie Kräfte, Momente, Bewegung, Position und Winkeländerung hervorruft.

² Als Oberflächensensibilität bezeichnet man die Wahrnehmung von Reizen über in der Haut liegende Rezeptoren. Diese Rezeptoren werden in Mechano-, Thermo- und Schmerzrezeptoren unterteilt, mit deren Hilfe Druck, Berührung und Vibrationen sowie Temperatur und Schmerz wahrgenommen werden können [10].

Tabelle 3.2: Begriffserklärung [16]

		Bewegung	
		rotatorisch	translatorisch
Schaltform	rastend	Drehschalter	Rastschalter
	tastend	Drehtaster	Drucktaster, Tastschalter, Push button, Tact switch

am Markt weit verbreitet und es existiert eine Vielzahl an Varianten, je nach Betätigungsrichtung werden diese eingeteilt in

- translatorisch (3 Freiheitsgrade),
- rotatorisch (3 Freiheitsgrade).

Daraus ergibt sich, dass ein Stellteil maximal sechs Freiheitsgrade im Raum besitzen kann. In den meisten Anwendungsfällen nutzt das Bedienelement in einem Fahrzeug einen Freiheitsgrad. Die Bedienelemente können tastend oder rastend sein. Die Tabelle 3.2 zeigt, wie die verschiedenen Typen bezeichnet werden. Die elektrische Auswertung der Signale kann mechanisch, magnetisch oder optisch erfolgen.

3.3.1 Tastschalter

Laut [16] findet in der Automobil-Branche ein Trend zu Drucktastern statt, da diese kein dauerhaftes elektrisches Signal benötigen und kostengünstig sind. Als Nachteil bewertet [16] die fehlende haptische Kodierung, dies bedeutet, Informationen über den Zustand werden nicht in Form von Position gespeichert. [16] teilt translatorische Tastschalter in folgende Untergruppen ein:

- Langhubtaster: der lange Hubweg wird meist durch eine Spiralfeder erzeugt.
- Kurzhubtaster: eine detaillierte Beschreibung dieser Tastenart findet sich in 3.3.2.
- Silikontasten und Schaltmatten: neben den Miniaturtasten findet diese Art am häufigsten Verwendung im Interieur des Fahrzeuges. Als Federelement dient ein Dom aus elastischem Material, wie etwa Silikonkautschuk. Durch die Form und die Materialeigenschaften des Doms wird eine entsprechende Haptik erzeugt.
- Folientasten: Folientastaturen werden in Umgebungen, welche eine erhöhte Staubdichte aufweisen, eingesetzt oder dort, wo Schmutz- und Wasserresistenz gefordert ist, z.B. in Krankenhäusern, um die Reinigbarkeit sicherzustellen.

Die Tabelle 3.3 zeigt charakteristische Kennwerte von den unterschiedlichen Typen translatorischer Tastschalter. Die Werte sollen lediglich als Anhaltspunkte dienen, damit die Größenordnung der gängigen Typen abgeschätzt

Tabelle 3.3: Merkmale unterschiedlichen Tastschalter

	Betätigungsweg [mm]	Betätigungskraft [N]	Schaltspannung [V]	Schaltstrom [mA]
Langhubtaster	2-4	0.5-20	2-42	0.001 - 100
Kurzhubtaster	0,5-2	0.5-20	0.02 - 42	0.1-100
Silikontasten und Schaltmatten	1-3	2-6	0.02 - 42	0.1-100
Folientasten	0.5	3	10	50

**Abbildung 3.4:** Taktschalter SKHUPJE010

werden kann.

3.3.2 Kurzhubtaster

Kurzhubtaster stellen das Messobjekt dieser Arbeit dar. Die Abbildung 3.4 zeigt den Aufbau eines ALPS Kurzhubtasters (tact switch). Rechts befindet sich der untere Teil des Gehäuses mit den drei Kontakten. Links davon ist das Federelement, wofür ein Schnappfrosch aus Metall verwendet wird. Durch Drücken wird das Metallplättchen plastisch verformt bis es sich schlagartig verbiegt (snap) und dadurch eine leitende Verbindung mit dem Kontakt in der Mitte herstellt. Links von der Feder befindet sich ein Plastik-Stößel, welcher die Kraft auf das Federelement überträgt. Links davon ist die obere Abdeckung und nochmals links davon der zusammengebaute Taster.

Der Kraft-Weg-Verlauf ist bei Kurzhubtasten wesentlich steiler als bei Gummischaltmatten; dieses Schaltverhalten wird von Bedienern als „knackig“ empfunden. Die akustische Rückmeldung des Schaltvorgangs ist hierbei auch ausgeprägter als bei Schaltmatten und trägt wesentlich zum Erlebnis des Tastendrucks bei.

3.3.3 Bedeutung von haptischen Stellteilen im Automobil

Im Automobil hat der Fahrer primäre, sekundäre und tertiäre Aufgaben zu bewältigen. Folgend die Beschreibung der Aufgaben gemäß [16].

Die primären Aufgaben stehen im direktem Zusammenhang mit der Fahraufgabe, die Längs- Querführung des Fahrzeuges. Diese Aufgabe wird bisher

mittels Gaspedal, Bremspedal und Lenkrad bewältigt. Technisch-historisch treten bei diesen Elementen die größten Kräfte auf, die erhöhten Kräfte unterstreichen die Bedeutung dieser Aufgabe. Sekundäre Aufgaben unterstützen den Fahrer bei seiner Regeltätigkeit und verbessern die Ausführungsqualität der Primäraufgabe, indem sie beispielsweise die Sichtbedingungen (Scheibenwischer, Licht), die Fahrzeugstabilität (z.B. Kupplungspedal, Schalthebel oder Drehzahlbereich) im Fahrzeug optimieren. Tertiäre Aufgaben sind entkoppelt von der Fahraufgabe und umfassen Bereiche wie Komfort, Unterhaltung, Kommunikation und Information.

Für sekundäre und tertiäre Aufgaben werden vor allem Tasten, Schalter, Hebel und Drehsteller verwendet. Die Betätigungskraft liegt dabei unter dem Niveau von Stellteilen für primäre Aufgaben; auch dies hat technisch-historische Gründe, da bei der Betätigung häufig lediglich Stromkreise geschlossen werden. Daneben unterstreicht das geringe Kraftniveau auch die Wichtigkeit der Aufgabe. Neben den klassischen Stellteilen finden auch immer mehr kraftlose Eingabegeräte (Touchscreens) Einzug ins Automobil. Gegenüber den klassischen Bedieneinheiten haben sie den Nachteil, dass sie sich lediglich mit Hilfe des visuellen Sinnkanals bedienen lassen. Eine „blinde“ Bedienung ist nicht möglich. Dies kann als negativ bewertet werden, da der visuelle und auditive Sinneskanal des Menschen bereits durch die primäre Aufgabe des Fahrzeuglenkens ausgelastet ist. Demgegenüber bietet der haptische Kanal noch Kapazitäten [5].

Generell muss bei Tasten zwischen Oberflächen- und Betätigungshaptik unterschieden werden, diese können jedoch wegen wechselseitiger Beeinflussung nicht voneinander getrennt betrachtet werden. Trotzdem konzentriert sich diese Arbeit auf die Betätigungshaptik; Oberflächenhaptik ist nicht Gegenstand dieser Arbeit und wird nicht genauer erläutert.

Automobilhersteller legen verstärkt Wert darauf, sich durch eine genau definierte Haptik ihrer Bedienelemente von ihren Konkurrenten abzugrenzen. Klimaanlage, Warnblicker, Dreh- /Drücksteller, die Betätigung aller Tasten soll sich identisch anfühlen und anhören. Audi prägte in diesem Sinne den Begriff des Audi-Klicks, welcher auch von den Medien aufgegriffen wurde [26]. Für die exakte Spezifikation müssen die qualitativen Werte mittels quantitativ messbarer Parameter beschrieben werden. Dies geschieht durch die Beschreibung der Kraft-Weg-Verläufe. Nachteilig bei dieser Methode ist, dass die Betätigungsbeschleunigung nicht berücksichtigt wird. Dies führt laut [19] zu einem unvollständigen Haptikbild, da sich das Verhalten der Taster mit der Betätigungsgeschwindigkeit ändert. Trotzdem wird diese Darstellungsform von den Automobilherstellern bevorzugt, die Einhaltung von den Zulieferern gefordert und deshalb in dieser Arbeit verwendet.



Abbildung 3.5: Audi MMI mit Kurzhubtasten

3.3.4 Prüfling

Die Firma ALPS stellt eine Vielzahl von Produkten für die Automobilbranche her, dazu gehören z.B. Fensterheber, Lenkstockmodule oder auch komplexe Eingabemodule wie das MMI-Modul (Mensch Maschine Interface) von Audi, siehe Abbildung 3.5. Es wird in der Mittelkonsole des Fahrzeuges verbaut und dient der Navigation durch das Infotainmentmenu. Das Modul besitzt zwei Dreh-Drücksteller, die restlichen Taster sind als Kurzhubtaster ausgeführt. Wie bereits erwähnt, möchten sich die Automobilhersteller voneinander abgrenzen, wichtiges Element dieser Strategie ist die Haptik bzw. das Erlebnis beim Bedienen des Fahrzeuges. Aus diesem Grund müssen alle Tasten eine definierte Haptik besitzen. Um dies zu gewährleisten, muss die Qualitätssicherung laufend die Haptik der Teile testen, z.B. nach einem Temperaturtest oder nachdem die Bauteile über Monate im Feld extremen Bedingungen ausgesetzt wurden (Sand, Meeresluft usw.). Auch bei Beanstandungen müssen die Teile akribisch untersucht werden. Für die Qualitätssicherung ist es deshalb äußerst wichtig eine Messmaschine zu besitzen, welche zuverlässig das Testen der Teile sicherstellt. ALPS produziert unterschiedliche Bauteile für die Automobilbranche. Geometrie und Anforderungen unterscheiden sich dabei teilweise erheblich. Die Messmaschine muss deshalb möglichst flexibel gebaut werden.

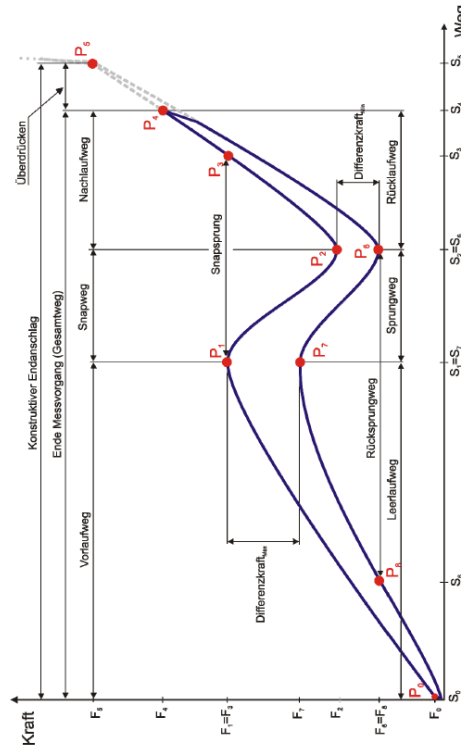


Abbildung 3.6: Typischer Kraft-Weg-Verlauf [2]

3.4 Haptikkurve

Die Taktilität, also das Empfinden des Anwenders bei Betätigung der Taste, wird im Wesentlichen durch den Kraft-Weg-Verlauf beschrieben. Der OEM gibt die Haptikkurve mit gewissen Toleranzfenstern, vor innerhalb diesen müssen die Produkte liegen. Die Abbildung 3.6 zeigt einen typischen Kraft-Weg-Verlauf einer Schaltungskurve.

Für die Rückmeldung entscheidend ist die Lage und Größe von P_1 und P_2 . Diese Kräfte und Wege werden deshalb vom Automobilhersteller spezifiziert. Dadurch soll erreicht werden, dass alle Tasten der verschiedenen Komponenten innerhalb ihrer Fahrzeuge ein einheitliches Schaltempfinden aufweisen. Um eine Taste zu betätigen muss eine größer werdende Kraft bis zum Erreichen der Betätigungskraft F_1 am Ort S_1 überwunden werden. Danach fällt die Kraft ab, das Minimum liegt bei P_2 . Das Schaltempfinden, auch Snap genannt, lässt sich wie folgt berechnen:

$$Snap = \frac{F_1 - F_2}{F_2} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Wenn $Snap \geq 60 \%$, dann wird die Rückmeldung im Allgemeinen als an-

genehm empfunden. Neben dem Snap ist die Hysterese ein weiteres Merkmal, beim Loslassen der Taste geht diese, aufgrund der Elastizität des Federelements, in ihre Ausgangsposition zurück. Der Verlauf der Rückstellkraft ist niedriger als der Kraftverlauf zum Betätigen der Taste.

3.5 Kraf-Weg-Messgeräte

Die Kraft-Weg-Messung ist ein wesentlicher Bestandteil der Qualitätssicherung, beispielsweise wird mit ihrer Hilfe bei Servopressen der Fügevorgang aufgezeichnet. Deshalb existieren auf dem Markt bereits unterschiedliche Kraft-Weg-Messgeräte. In diesem Kapitel wird ein Überblick über bereits existierende Lösungen gegeben, sie werden klassifiziert, ihre Defizite werden erläutert und es wird aufgezeigt, warum nicht auf eine Kauflösung zurückgegriffen wurde. Folgend werden einige typische Messgeräte und ihre wesentlichen Eigenschaften vorgestellt.

Für die Haptikmessung in Labor werden häufig manuelle Kraft-Weg-Messmaschinen eingesetzt. Die Abbildungen 3.7 und 3.8 zeigen eine herkömmliche Kraftmessdose in Verbindung mit einem Prüfstand. Die lineare Bewegung wird durch ein Handrad mit Spindel realisiert. Der Weg wird von einem digitalen Weg-Messstab angezeigt. Vorteil bei diesem System sind die geringen Investitionskosten, mit dem Prüfstand können personenbezogene Fehler weitestgehend eliminiert werden, da der Prüfstand gleichbleibende Rahmenbedingungen unterstützt. Allerdings ist dieses System nur für Messungen mit geringen Stückzahlen geeignet, die Reproduzierbarkeit der Positionierung ist nicht gewährleistet, da sie manuell erfolgt. Die Korrelation Kraft-Weg ist für die Anforderungen unzureichend. Geschwindigkeitssteuerung ist nicht möglich. Die Speicherung und Verarbeitung der Messdaten gestalten sich aufwändig (zeitintensiv).

Eine Weiterentwicklung ist der Austausch des Handrades mit einer motorisierten Lineareinheit. In der Abbildung 3.9 treibt ein Schrittmotor eine Lineareinheit an, die Position wird durch Schrittzahl bestimmt. Einen ähnlichen Aufbau zeigt die Abbildung 3.10. Hierbei wurde ein Gleichstrommotor der Firma newport mit einem Kraftaufnehmer verbunden. Die Ermittlung der Position erfolgt über einen Rotationsencoders. Bei beiden System erfolgt die Positionierung des Prüflings per Hand. Dies reduziert die Reproduzierbarkeit als auch den Durchsatz. Die Auswertung der Messdaten und die Ansteuerung der Motoren muss durch ein externes System erfolgen. Die oben genannten Lösungen können als *Off-the-shelf* Lösungen bezeichnet werden, sie sind nicht zielführend, da sie oft nicht universell genug sind, beispielsweise keine automatische Positionierung beinhalten oder Einschränkungen bei der Datenerfassung in Kauf genommen werden müssen.

Robuste mechanische Umsetzung des Messprinzips sowie die Messdatenerfassung und -auswertung können nur durch eine Sonderlösung realisiert

werden. Ein solches Messsystem müsste von einer externen Ingenieursfirma extra gebaut werden. Dadurch wird diese Kauflösung zu teuer, die Programmierung kann nur vom geschulten Personal des jeweiligen Herstellers erfolgen. Die Abbildung 3.11 zeigt eine Messsystemsonderlösung der Firma *NOFFZ ComputerTechnik GmbH*. Der Versuchsstand nimmt die Kraft-Weg-Messungen an unterschiedlichen Heckklappen- und Deckelschlossern mit mechanischer oder elektrischer Entriegelung in verschiedenen Bauformen auf. Eine weitere Sonderlösung ist in Abbildung 3.12, welche einen roboterbasierten Prüfplatz zeigt. Dadurch wird der Prüfplatz universell, demgegenüber stehen die sehr hohen Investitionskosten.

Die Tabelle A.3 vergleicht verschiedene Messsysteme miteinander. Dafür wurden charakteristische Merkmale gesucht, im Anhang (Tabelle A.2) findet sich die Gewichtung der Merkmale. Folgend die gefundenen Merkmale und eine kurze Beschreibung:

- Messfehlerwahrscheinlichkeit: beispielsweise muss das System ausreichend steif sein, damit der Einfluss des Systems auf die Messung möglichst gering bleibt. Zudem erfolgt die Wegaufnahme extern, beispielsweise durch einen Maßstab.
- Einfache Programmierung und Bedienung: Einarbeitungszeit in bestehenden Code soll möglichst gering sein. Bedienung auch von Laien möglich.
- Automatisierung: Bauteil wird automatisch durch motorisierte Achsen in die zur Prüfung optimale bzw. durch Spezifikation vorgegebene Position verfahren. System fährt Testzyklen selbstständig ab und speichert die Daten.
- Modular: schnelle und einfache Erweiterung, beispielsweise Echtzeitfähigkeit, Kamerasystem oder LIN/CAN-Adapter.
- LabVIEW basierend: Datenerfassung, Steuerung der Motoren und Signalauswertung (Fenster, Schwellen, Trapeze oder Hüllkurven) erfolgt über LabVIEW.
- Preis pro Messung: sollte möglichst gering sein, durch geringe Taktzeiten, hohe Lebensdauer, geringe Investitionskosten.
- Anpassungsfähigkeit: neue Prüfobjekte schnell und einfach integrieren.
- Überlastschutz: verhindert, dass durch eine zu hohe Prüfkraft das Messsystem oder der Prüfling zerstört wird.
- Herstellerunabhängigkeit: direkte Kontrolle über Prüfstand, Programmierung und Wartung kann z.B. von firmeninternen Personen durchgeführt werden.
- Gewinn von Know-how: Wissen über Herstellung von Prüfsystemen innerhalb der Firma generieren.

Die gefundenen Lösungen wurden anhand der Merkmale bewertet³. Die Punkte werden mit dem Wichtungsfaktor aus Tabelle A.2 multipliziert. Aus den Ergebnissen aus der Tabelle A.3 ist ersichtlich, dass ein Eigenbau als Speziallösung für einen mehrachsigen Kraft-Weg-Messplatz, welcher den speziellen Anforderungen von Kurzhubtastern angepasst wird, am besten geeignet ist. Mithilfe von Wechseladapter können unterschiedliche Eingabemodule auf einem verfahrbaren Tisch montiert werden. Über zwei Achsen wird die Testposition reproduzierbar angefahren. Für jedes Eingabemodul muss in das System einmalig die Prüfposition und der Prüfparameter programmiert werden. Anschließend kann durch Aufrufen des entsprechenden Prüfdatei die Prüfung des Messgerätes vollständig automatisiert ablaufen. Durch die Verwendung von LabVIEW kann die Kraft-Weg-Messung grafisch dargestellt werden sowie die Schaltkurve automatisiert ausgewertet werden. Durch einen Adapter können LIN/CAN-Signale erfasst werden, die Schaltsignale können durch LabVIEW grafisch dargestellt werden.



Abbildung 3.7: Manuelle Kraft-Weg-Messung [27]

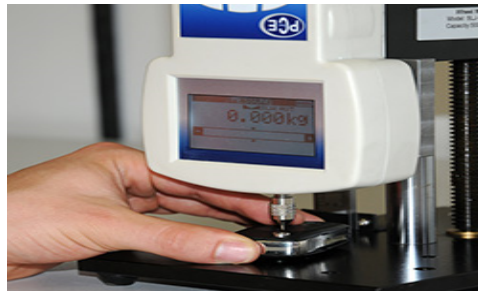


Abbildung 3.8: Manuelle Kraft-Weg-Messung 2 [27]

3.6 Grundlagen Messtechnik

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Aufbau eines Messgerätes. Deshalb wird im folgenden Kapitel dem Leser ein Überblick über grundlegende Konzepte der Messtechnik gegeben. Wichtige Begriffserklärungen befinden sich im Anhang, siehe Abschnitt A.2. In Kapitel werden Begriffe der Messunsicherheit beschrieben 3.6.1. In Kapitel 3.6.2 werden die verschiedenen Fehlerarten beschrieben.

³Punkte von 1 bis 10, wobei 10 Punkte für eine ideale Lösung stehen.

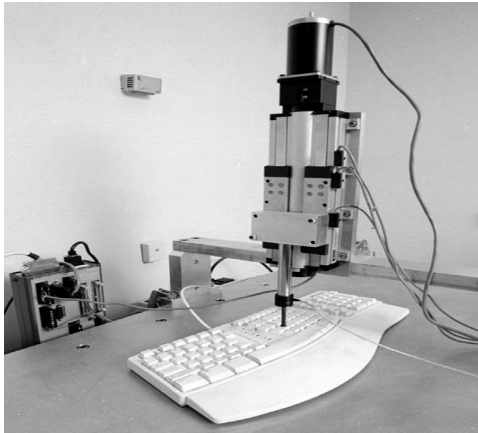


Abbildung 3.9: Kraft-Weg-Messung mit Motor [12]



Abbildung 3.10: Kraft-Weg-Messung mit Motor 2 [2]



Abbildung 3.11: Kraft-Weg-Messung System [24]



Abbildung 3.12: Kraft-Weg-Messung System [25]

3.6.1 Messunsicherheit

Bei der Auslegung eines Messsystems muss darauf geachtet werden, welche potenziellen Fehler das Messsystem beeinflussen, verursacht z.B. durch den Aufbau des Messsystems oder dessen Bedienung [6]. Bei einer Messung findet stets ein Energie- oder Informationsfluss statt. Es muss darauf geachtet werden, dass das Messsystem keine störenden Rückwirkungen auf das Messobjekt erzeugt. Der absolut „reine“ Wert einer Messgröße lässt sich demnach nicht ermitteln. Das Messergebnis x_W ist der Messwert (angezeigter Wert) x_a mit einer Unsicherheit $u(x)$. Daraus ergibt sich $x_W = x_a \pm u(x)$ [6]. x_r ist der richtige Wert, auch Referenzwert genannt. Seine Abweichung zum „reinen“ Wert kann als vernachlässigbar klein betrachtet werden.

Absolute Abweichung F :

$$F = x_a - x_r \quad (3.2)$$

Relative Abweichung f :

$$f = \frac{F}{x_r} = \frac{x_a - x_r}{x_r} \quad (3.3)$$

Bei der Klassifizierung von Messgeräten wird häufig nicht wie in der Formel 3.3 der richtige Wert im Zähler als Bezug verwendet, sondern der Messbereichsendwert. Ein Messgerät der Klasse 0.5 mit einem Messbereich von 500V besitzt einen abs. max. Fehler von $500V \cdot 0.5 \% / 100 \% = \pm 2.5V$. Manche Hersteller geben auch direkt den abs. max. Fehler bei ihren Produkten an.

3.6.2 Fehlerarten

Bei der Auslegung eines Messsystems müssen Beeinflussungen durch Messunsicherheit, Fehler und Störungen berücksichtigt werden. Man unterscheidet systematische und zufällige Messfehler.

Bei den systematischen Fehlern mit bekannten Einflüssen besitzt die Messung immer dieselbe Abweichung und wird durch häufiges Messen nicht verringert. Sollte der Fehler zu groß sein, kann er entsprechend korrigiert werden. Hierzu kann der Messfehler ermittelt werden, indem der richtige Wert durch ein Messnormal ermittelt wird oder durch eine Parallelmessung mit einem Referenzmessgerät.

Bei systematischen Fehlern mit unbekanntem Einflüssen liegt die Ungenauigkeit innerhalb der vom Hersteller spezifizierten Grenzen, man kennt aber nicht ihre Größe und Vorzeichen [6]. Bei zufälligen Fehlern mit unbekanntem Einflüssen entstehen die Unsicherheiten durch nicht erfassbare und nicht beeinflussbare Änderungen der Messgeräte, des Beobachters und der Umwelt [6]. Da der Messfehler zufällig ist müssen zur Fehlerabschätzung Methoden der Statistik angewandt werden. Eine der wichtigsten Methoden ist die Berechnung des Mittelwertes mit der bekannten Formel:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.4)$$

Zur Beurteilung der Streuung der Einzelmesswerte wird die Standardabweichung s berechnet.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.5)$$

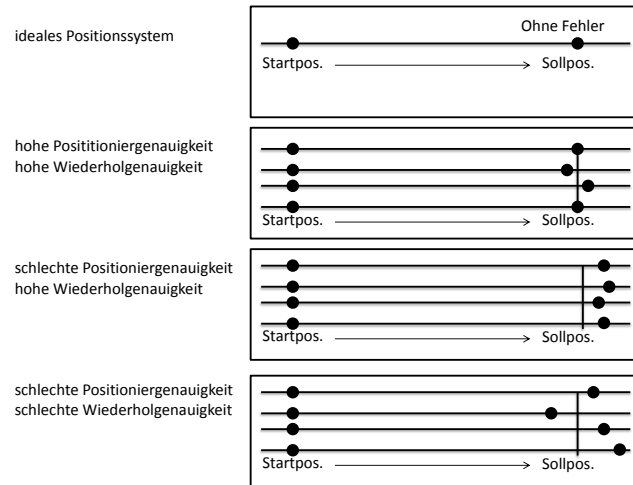


Abbildung 3.13: Wiederholgenauigkeit

In einem Vertrauensbereich abgegrenzten Intervall befindet sich der gesuchte wahre Wert x_W . Dafür wird der Vertrauensfaktor benötigt, dieser fließt ein, da nicht unendlich oft gemessen werden.

$$x_W = \bar{x} \pm t \cdot \left(2 \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \right) \quad (3.6)$$

Die Normalverteilung nach Gauß $p(x)$ berechnet sich mit der Varianz σ^4 , dem Erwartungswert X und dem Messwert x :

$$p(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - X}{\sigma} \right)^2} \quad (3.7)$$

3.6.3 Wiederhol- und Messgenauigkeit

Für eine qualitativ hochwertige Messung muss das System eine hohe Wiederholgenauigkeit besitzen. Die Wiederholgenauigkeit ist die Streuung um den Mittelwert bei einer großen Anzahl von Messungen. Die Varianz sollte möglichst gering sein. Die Wiederholgenauigkeit ist ein wichtiges Maß, um die Qualität einer Messung zu beurteilen. Die Abbildung 3.13 verdeutlicht die Begriffe Positioniergenauigkeit und Wiederholgenauigkeit.

⁴Die Wurzel der Standardabweichung s ist die Varianz σ .

Kapitel 4

Lösung

Im Kapitel 4.1 wird der Systementwurf beschrieben. Anschließend werden systematisch die einzelnen Komponenten analysiert und ausgelegt: zu Beginn das Gestell, Kapitel 4.2, die Führung in Kapitel 4.3, die verwendeten Motoren in Kapitel 4.4, die Positionserfassung in Kapitel 4.5, die Krafterfassung in Kapitel 4.6, der Überlastschutz in 4.7, LIN- und CAN-Adapter in 4.8, das Kapitel 4.9 beschreibt, wie das System gesteuert wird. Das Kapitel 4.10 zeigt die Ausarbeitung der technischen Zeichnungen. Nachdem der Aufbau des Messsystems beschrieben wurde, wird anschließend seine Fähigkeit nachgewiesen, siehe Kapitel 4.11. Kapitel 4.12 zeigt die Messung des Gesamtsystems mit einem Haptiknormal. Nach Feststellung der Prüfmittelfähigkeit werden in Kapitel 4.13 MMI-Eingabegeräte von Audi nach Spezifikation getestet und das Verhalten der Tasten bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten untersucht.

Laut [1] besteht eine Maschine im Prinzip aus folgenden Elementen:

- Gestell: fixiert die Maschine und überträgt Kräfte (Kapitel 4.2).
- Führungen: Kraftübertragung, aus der Genauigkeit der Führungen resultiert auch die Genauigkeit der Maschine (Kapitel 4.3).
- Antrieb: Wandlung von elektrischer, hydraulischer oder pneumatischer Energie in mechanische Bewegung (Kapitel 4.4).
- Steuerung: Koordination der Bewegungen der Maschine (Kapitel 4.4.5, 4.4.4).

4.1 Entwurf-System

Dem V-Modell zugeordnet befindet sich dieser Abschnitt im Bereich der Subsystemebene. Die Hardware- und Software-Komponenten werden anhand der Anforderungen ausgewählt und analysiert. Das Bild 4.1 zeigt das Blockschaltbild des Messsystems. Die Steuerung des Gesamtsystems erfolgt durch die Software LabVIEW. Diese steuert den Antrieb des Messsystems beste-

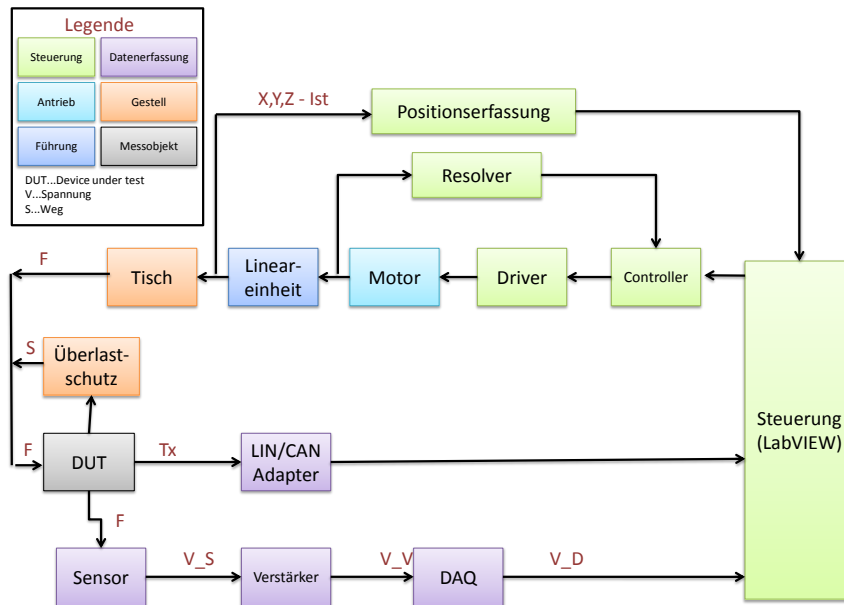


Abbildung 4.1: Blockschaltbild Messsystem

hend aus drei Motoren mit Driver und Controller. Intern besitzt jede Antriebseinheit einen Resolver, wodurch ein geschlossener Regelkreis entsteht. Die aktuelle Ist-Position wird erfasst und an die übergeordnete Steuerung gegeben, damit die Position angezeigt wird und ggf. nachgeregelt wird. Zwei Achsen des Antriebes sind für die Positionierung des Messbauteils zuständig. Lediglich eine Achse dient zur Messung des Kraftverlaufes. Die aufgebrauchte Kraft der Lineareinheit führt dazu, dass die Taste am Bauteil gedrückt wird. Die mechanische Betätigung wird durch das Bauteil in ein elektrisches Signal gewandelt und entsprechend aufgearbeitet, am Ausgang des Bauteils steht das Schaltsignal entweder als CAN- oder LIN-Botschaft zur Verfügung.

4.2 Gestell

Die Aufgabe des Messtisches ist die Fixierung und Positionierung der Messeinheit und des Messobjektes, sodass der Kraft-Weg Verlauf aufgezeichnet werden kann. Dafür muss das System eine hohe Steifigkeit aufweisen, ansonsten wird das Messergebnis verfälscht.

Das Blockschaltbild 4.2 zeigt die einzelnen Komponenten des Tischsystems, welches das Gestell der Messmaschine bildet. Der Arbeitsbereich wurde bereits in der Anforderungsliste (2.2) festgelegt, $X \cdot Y \cdot Z = 150 \cdot 150 \cdot 20 \text{ mm}$ die Auflösung in den entsprechenden Achsen beträgt $X = 5 \mu\text{m}$, $Y = 5 \mu\text{m}$, $Z = 1 \mu\text{m}$ gelegt. Die Positionierung des Bauteiles erfolgt mit zwei Lineareinheiten in X- und Y-Richtung, welche von einem Motor angetrie-

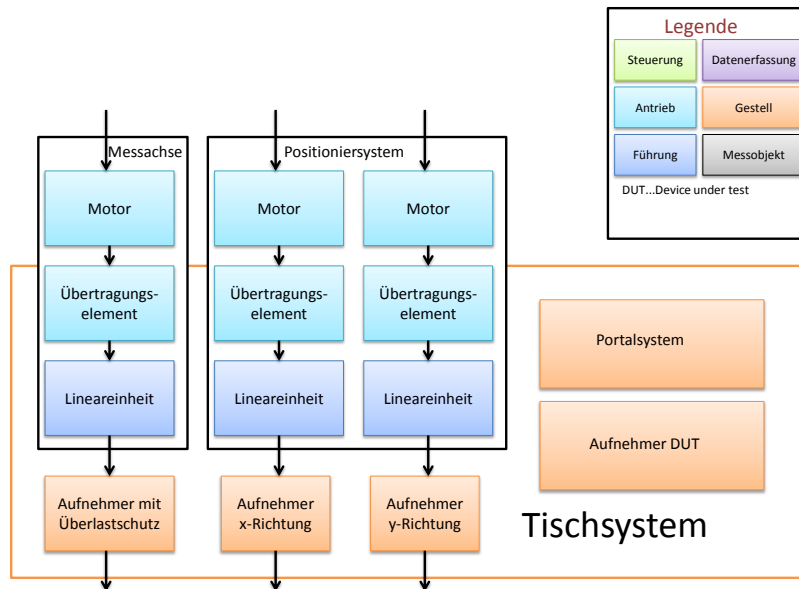


Abbildung 4.2: Blockschaftbild Tischsystem

ben werden. Die Verbindung der Lineareinheiten zur Messmaschine wird durch Aufnehmer realisiert. Die Aufnahme des Device Under Test (DUT) wird ebenfalls durch einen Aufnehmer, siehe Kapitel 4.2.2, realisiert. Die Abbildungen 4.3 bis 4.6 zeigen einige prinzipielle Aufbaumöglichkeiten von Positioniersystemen, entnommen aus [7]. Für die geplante Messapertur bietet sich als Positioniersystem ein Portalsystem an, ähnlich der Abbildung 4.5. Zudem sind in der Abbildung die Bezeichnung der Koordinaten angegeben wie sie bei dieser Arbeit verwendet werden. Für die Konstruktion des Portalsystems werden Aluminiumprofile verwendet. Diese können einfach bearbeitet und schnell montiert werden und sind einfach erweiter- und umrüstbar. Das Portal wird in Kapitel 4.2.1 analysiert.

4.2.1 Portalsystem

Zur Sicherstellung der Funktion muss überprüft werden, ob die Konstruktion bei Belastung nicht unzulässig hohen Verformungen unterliegt. Die Durchbiegung ist abhängig von den äußeren Lasten, den elastischen Eigenschaften des Materials und dem Belastungsfall. Die Abbildung 4.7 zeigt den zu erwartenden Belastungsfall. Die Durchbiegung f für diesen Fall berechnet sich laut [8] wie folgt:

$$f = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot J} \quad (4.1)$$



Abbildung 4.3: Anordnung 1 [7]



Abbildung 4.4: Anordnung 2 [7]

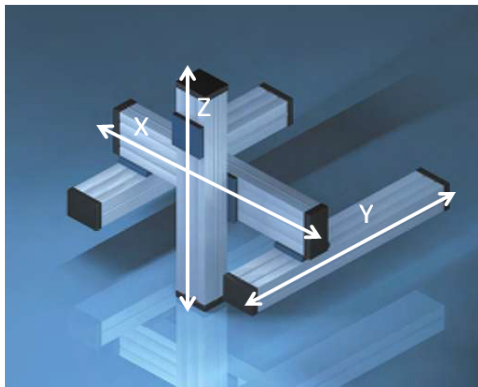


Abbildung 4.5: Anordnung 3 [7]



Abbildung 4.6: Anordnung 4 [7]

Es wird angenommen, dass die Einspannlänge $I = 450 \text{ mm}$ beträgt. Das Elastizitätsmodul von Aluminium beträgt 70000 N/mm^2 . Aus dem Produktkatalog [8] wird entnommen, dass das Trägheitsmoment J für ein Profil mit Kantenlänge 50 mm bei 19.2 cm^4 ¹ liegt. Vereinfacht wird angenommen, dass die Last, welche die Biegebeanspruchung verursacht und somit den Körper krümmt, mittig auf dem Balken liegt. Sie berechnet sich aus den Massen der Lineareinheiten plus deren Motoren $F_L = F_{Lin1} + F_{Lin2} = (0.58 \text{ kg} + 0.22 \text{ kg} + 1.58 \text{ kg} + 0.22 \text{ kg}) \cdot 9.81 \text{ m/s}^2$ ². Dazu kommt die Masse von Verbindungsplatten F_P ³, des Messkopfes F_M , geschätzt 1 kg der Längenmessgeräte F_L , auch geschätzt ca. 1.5 kg . Somit ergibt sich: $F = F_L + F_P + F_M + F_L = 25.5 \text{ N} + 12,75 \text{ N} + 9.81 \text{ N} + 14.75 \text{ N} = 62.81 \text{ N}$ multipliziert mit einem Sicherheitsfaktor von 2 ergibt sich eine Gesamtkraft

¹Profil 50 x 50 4E, L von MayTec.

²Die Beträge entstammen den Auslegungen aus Kapitel 4.3.1.

³Bei einer Platte aus Stahl über die gesamte Querlänge beträgt die Masse $m_P = 35 \cdot 35 \text{ cm} \cdot 5 \text{ cm} \cdot 1 \text{ cm} \cdot 7,87 \text{ g/m}^3 = 1.3 \text{ kg}$.

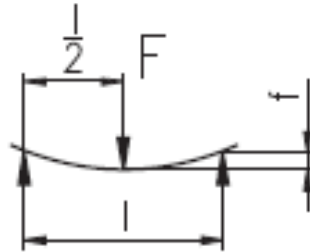


Abbildung 4.7: Belastungsfall

$F = 120 \text{ N}$. Die Parameter in die Gleichung 4.1 eingesetzt ergibt:

$$f = \frac{120 \text{ N} \cdot (450 \text{ mm})^3}{48 \cdot 70000 \text{ N/mm}^2 \cdot 19.2 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} = 0.017 \text{ mm} \quad (4.2)$$

Eine Durchbiegung von $17 \mu\text{m}$ liegt im zulässigen Bereich. Durch die Messung reduziert sich die Kraft F um rund 20 N , erneute Berechnung der Formel 4.1 mit einer Kraft von 100 N ergibt die Durchbiegung von $14 \mu\text{m}$. Somit bewegt sich das System um $3 \mu\text{m}$ bei der Messung. Diese Länge fließt in die Messung als Fehler ein, trotzdem ist die Konstruktion des Portalsystems mit dem Profil $50 \times 50 \text{ 4E, L}$ ausreichend steif und kann verwendet werden, da mit einem großen Sicherheitsfaktor gerechnet wurde.

4.2.2 Aufnehmer

Neben der Aufnahme der Messeinheit muss auch der Prüfling selbst aufgenommen und steif fixiert werden. Die Abbildung 4.8 zeigt einen MMI-Aufnehmer, welcher im ALPS Labor verwendet wird. Der Aufnehmer besteht aus einer Adapterplatte und einem Modul zum Aufnehmen des Messobjektes; jenes besitzt Federelemente, welche in die Langlöcher des Aufnehmers gesteckt werden und dadurch das Bauteil fixieren. Die kleineren Stifte im Aufnehmer sorgen für die Reproduzierbarkeit der Lage des Messobjektes.

4.3 Führung

In Richtung der Z-Achse wird gemessen, entsprechend muss diese Achse durch einen Antrieb bewegt und die Bewegung aufgezeichnet werden. Zwei weitere Achsen werden zur Positionierung benötigt. Auf dem Markt existieren diverse Arten von Antrieben:

- Elektrischer Antrieb: z.B. Linearmotor
- Elektromechanischer Antrieb: z.B. Servomotor mit Gewindetrieb
- Pneumatischer Antrieb: z.B. Pneumatikzylinder

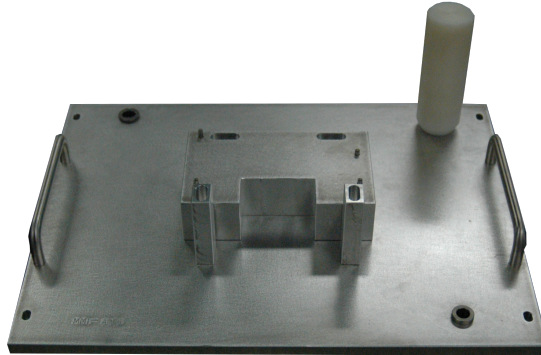


Abbildung 4.8: Aufnehmer MMI

- Hydraulischer Antrieb: z.B. Hydraulikzylinder

Wesentliche Kriterien für die Wahl des günstigsten Antriebsstranges sind laut [11]: Positioniergenauigkeit, Verfahrenweg, Verfahrengeschwindigkeit und Verfahrenbeschleunigung, geforderte statische und dynamische Steifigkeit. Bei korrekter Auslegung kann ein elektromechanischer Antrieb diese Anforderungen bei verhältnismäßig geringen Kosten bewältigen.

Deshalb wird beim Messsystem zur Realisierung der Linearbewegung ein elektromechanischer Antrieb verwendet, bestehend aus:

- Lineareinheit (Kapitel 4.3.1)
- Übertragungseinheit/Kupplung (Kapitel 4.3.5)
- Motor (Kapitel 4.4)

Das Bild 4.9 zeigt eine Servopresse mit einem elektromechanischen Antrieb.

4.3.1 Lineareinheit

Die Lineareinheit erzeugt die Vorschubbewegung, indem sie die Rotationsbewegung des Motors in eine lineare Bewegung wandelt. Zudem nimmt sie die Messeinheit und Kräfte auf. Typische Aufgaben von Linearsystemen:

- Pick and Place - Aufgaben
- Montage - Aufgaben
- Messaufgaben

Als Vorschubmechanismus kommen Zahnstangentriebe oder Gewindetriebe (Spindel-Mutter-System) zum Einsatz. Ein Kugelgewindetrieb besteht aus der Kugelgewindetriebspindel, der Kugelgewindetriebmutter mit

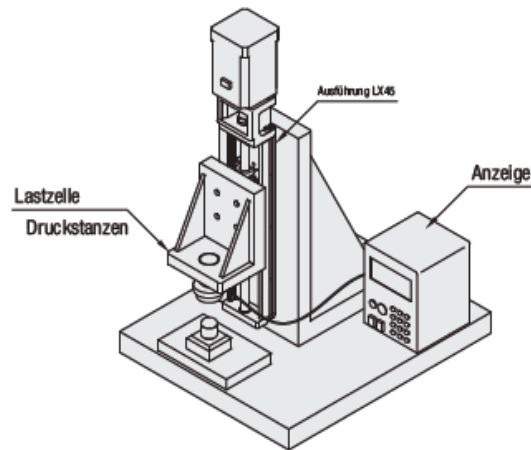


Abbildung 4.9: ServoPressMISUMI

Kugelrückführungssystem und den Kugeln als Wälzmente. Auf der Spindel sitzt der Schlitten, welcher durch Schienen geführt die Bewegung ausführt. Gelagert wird die Spindel durch Schrägkugellager. Solche Systeme können von diversen Herstellern bezogen werden und sind deshalb relativ preisgünstig.

4.3.2 Auswahl Lineareinheit Z-Richtung

Beim Entwicklungsprozess liegen anfangs keine sicheren Daten über die zu bewegend Massen, statische und dynamische Nachgiebigkeit der Gesamtmaschine und ihren Einzelkomponenten vor. Die Grundlage der Dimensionierung bilden daher die Angaben aus dem Pflichtenheft [11]. Folgend aus der Anforderungsliste abgeleitete Parameter, anhand derer die Lineareinheit ausgewählt wird.

Max. Geschwindigkeit (V_{MAX})	= 20 mm/s
Lastmasse (m_L)	= 10 kg
Beschleunigung (a)	= 40 mm/s ²
Hub (h)	= 80 mm
Gravitation (g)	= 9.81 m/s ²
Position (pos)	= vertikal
Lastkoeffizient (f_W)	= 1.2
Spindelsteigung (l)	= 1 mm

Die Abbildung 4.10 stellt einen Bewegungsablauf der entsprechenden Achse dar.

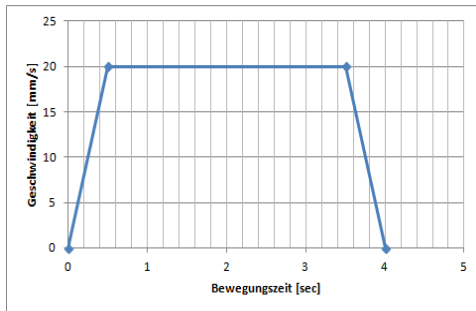


Abbildung 4.10: Bewegungsprofil Z-Achse

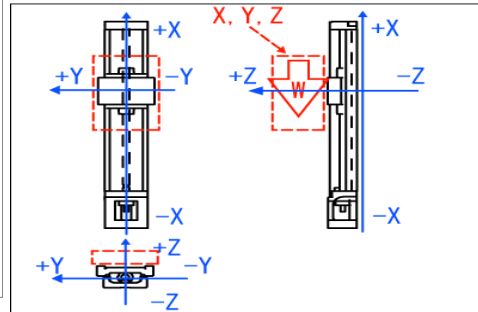


Abbildung 4.11: Einbaulage

Tabelle 4.1: Technische Daten LX2001 und LX2605 [4]

Messgröße		LX2001	LX2605	Einheit
Führungsschiene	Dynamische Tragzahl Ca	3277	6522	N
	Statische Tragzahl Coa	6199	11871	N
Kugelgewindetrieb	Dynamische Tragzahl Ca	482	1712	N
	Statische Tragzahl Coa	642	2251	N
	Gewindewellendurchmesser	6	8	mm
	Steigung	1	5	mm
Lager (Axiallast)	Kerndurchmesser	5.3	6.46	mm
	Dynamische Tragzahl Ca	730	1637	N
Lager (Statisches Moment)	Statische Tragzahl Coa	461	1205	N
	Steigungsmoment Ma	27	70	Nm
	Giermoment Mb	27	70	Nm
	Rollmoment Mc	93	225	Nm

Vorübergehende Auswahl

Die Auswahl der Lineareinheit besitzt einen iterativen Charakter, anhand der Angaben aus der Anforderungsliste wird eine Lineareinheit ausgewählt und berechnet, ob diese den Anforderungen standhält. Bei der Lineareinheit ist vor allem die Gewindespindel einer kritischen Betrachtung zu unterziehen. Der Spindeldurchmesser muss auf Steifigkeit, Knickung und kritische Biegefrequenz untersucht werden [11].

Ein Fahrweg von 80 mm mit einer a von 40 mm/s^2 und einer Höchstgeschwindigkeit von 20 mm/s ist zu verwenden. Aufgrund dieser Bedingungen wird die Serie $LX2001P$ von $MiSUMi$ verwendet. Eine Zusammenfassung der technischen Daten der Lineareinheit befindet sich in 4.1. Die Formeln entstammen aus [4].

Kugelwindetrieb - Last

Auf die Gewindewelle wirkende Axiallasten variieren in Abhängigkeit vom Bewegungsprofil. Axiallast bei konstanter Geschwindigkeit⁴:

$$\begin{aligned} F_{e1} &= \mu \cdot m_L \cdot g \\ &= 10 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \\ &= 98.1 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Axiallast bei Beschleunigung:

$$\begin{aligned} F_{e2} &= F_{e1} + m_L \cdot a \\ &= 98.1 \text{ N} + 10 \text{ kg} \cdot 0.040 \text{ m/s}^2 \\ &= 98.5 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Beim Abbremsen:

$$\begin{aligned} F_{e2} &= F_{e1} - W \cdot a \\ &= 98.1 \text{ N} - 10 \text{ kg} \cdot 0.040 \text{ m/s}^2 \\ &= 97.7 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Mithilfe der maximalen Kraft aus Gleichung 4.4 und der Statische Tragzahl (C_{oa})⁵ Dynamische Tragzahl berechnet sich der statische Sicherheitskoeffizient:

$$\begin{aligned} f_s &= \frac{C_{oa}}{F_{e_{max}}} \\ &= \frac{642 \text{ N}}{98.5 \text{ N}} = 6.518 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Kugelgewindetrieb - Nennnutzungsdauer

Mit Hilfe der Ergebnisse aus 4.3, 4.4, 4.5 und der Strecke mit konstanter Geschwindigkeit (L_1), der Strecke zum Beschleunigen (L_2) und der Strecke zum Entschleunigen (L_3) wird die Mittlere Axiallast (F_m) berechnet:

$$\begin{aligned} F_m &= \sqrt[3]{\frac{1}{h} \cdot (F_{e1}^3 \cdot L_1 + F_{e2}^3 \cdot L_2 + F_{e2}^3 \cdot L_3)} \\ &= \sqrt[3]{\frac{1}{80 \text{ mm}} \cdot ((98.1 \text{ N})^3 \cdot 10 \text{ mm} + (98.5 \text{ N})^3 \cdot 60 \text{ mm} + (97.7 \text{ N})^3 \cdot 10 \text{ mm})} \\ &= 98.34 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.7)$$

⁴ μ wird bei vertikalem Einbau ausgelassen.

⁵Die statische Tragzahl C_0 ist die statische Belastung in Belastungsrichtung, die in der Mitte der am höchsten belasteten Berührfläche zwischen Kugel und Laufbahn eine bleibende Gesamtverformung erzeugt, die dem 0,0001-fachen des Kugeldurchmessers entspricht.

Mithilfe von Dynamische Tragzahl (C_a)⁶, F_m , f_w und l wird die Nennnutzungsdauer (L) berechnet:

$$\begin{aligned} L &= \left(\frac{C_a}{f_w \cdot F_m} \right)^3 \cdot l \\ &= \left(\frac{482 \text{ N}}{1.2 \cdot 98.34 \text{ N}} \right)^3 \cdot 1 \text{ mm} \cdot 10^6 \\ &= 68.14 \text{ km} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Kugelgewindetrieb - Knicklast

Ein Sonderfall der Druckbeanspruchung: Wird die Spindel auf Druck beansprucht, kommt es zu einem seitlichen Ausbiegen [1]. Die folgende Berechnung entstammt [4]:

$$P_1 = \frac{n \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{l_a} \cdot s \quad (4.9)$$

Knicklast (P_1)

Abstand zwischen den Befestigungspunkten (l_a)

Elastizitätsmodul (E)

Koeffizient entsprechend der Befestigungsmethode (n)

Sicherheitsfaktor (s)

Minimum Flächenträgheitsmoment der Gewindewelle (I)

Der Abstand zwischen den Befestigungspunkten beträgt beim Modell LX2001P 150 mm. Die Spindel ist aus 16CrMo4 gefertigt, der Werkstoff besitzt ein E-Modul von $2.06 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$. Der Koeffizient beträgt entsprechend der Befestigungsmethode 4. Der Sicherheitsfaktor wird auf 0.5 gelegt. I berechnet sich mit folgender Gleichung: $\frac{\pi \cdot d_1^4}{64}$. Mit einem gegebenen Kerndurchmesser von 5.3 mm liegt das Flächenträgheitsmoment bei $\frac{\pi \cdot 5.3 \text{ mm}}{64} = 38.73 \text{ mm}^4$. Die Werte in Gleichung 4.9 eingesetzt ergibt:

$$\frac{3.927 \cdot \pi^2 \cdot 2.06 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2 \cdot 38.73 \text{ mm}^4}{150^2 \text{ mm}^2} \cdot 0.5 = 6999.42 \text{ N} \quad (4.10)$$

Kugelgewindetrieb - Zulässige Zugbelastung/Kompressionsbelastung

Für die Berechnung der Zulässige Zugbelastung/Kompressionsbelastung (P_2) wird die zulässige Zugspannung/Druckspannung (δ) benötigt, diese liegt bei

⁶Die dynamische Tragzahl C ist die in Größe und Richtung unveränderliche axiale Belastung, die ein Kugelgewindetrieb theoretisch für eine nominelle Lebensdauer von 10^6 Umdrehungen aufnehmen kann [1].

147 N/mm^2 :

$$\begin{aligned}
 P_2 &= \frac{\delta \cdot \pi \cdot d_1^2}{4} \\
 &= \frac{147 \text{ N/mm}^2 \cdot \pi \cdot (5.3 \text{ mm})^2}{4} \\
 &= 3243.09 \text{ N}
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

Kugelgewindetrieb - Kritische Geschwindigkeit

Wird die Spindel mit der Drehzahl betrieben, welche gleich der ersten Biegeeigenfrequenz der Spindel ist, tritt Resonanz auf, was zur Zerstörung des Systems führen kann. Diese Drehzahl wird kritische Drehzahl genannt und sollte vermieden werden [1]:

$$N_1 = \frac{60 \cdot \lambda^2}{2 \cdot \pi \cdot l_a} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot 10^3 \cdot I}{\gamma \cdot A}} \cdot s \tag{4.12}$$

Kritische Geschwindigkeit (N_1)

Abstand zwischen den Befestigungspunkten (l_a)

Elastizitätsmodul (E)

Koeffizient entsprechend der Befestigungsmethode (n)

Dichte (γ)

s

Die Dichte von 16CrMo4 beträgt $7.85 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ und hat ein Elastizitätsmodul von $2.06 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$. Der Abstand zwischen den Befestigungspunkten ist 150 mm , es wird mit einem Sicherheitsfaktor von 0.8 gerechnet, der Koeffizient λ ist bei einer festen Halterung 3.927, die Parameter in 4.12 eingesetzt ergibt:

$$\begin{aligned}
 N_1 &= \frac{60 \cdot 3.927^2}{2 \cdot \pi \cdot (150 \text{ mm})^2} \cdot \sqrt{\frac{2.06 \cdot 10^5 \text{ N/mm} \cdot 10^3 \cdot 38.73 \text{ mm}^4}{7.85 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mm}^3 \cdot \frac{5.3^3 \cdot \pi}{4}}} \cdot 0.8 \\
 &= 15437.11 / \text{rpm} \\
 &= 257.285 \text{ 1/s}
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

Die biegekritische Drehzahl sollte nicht überschritten werden.

Lagereinheit - Last

Die berechneten Kräfte der Spindel wirken auf die Lager, somit $F_{e1} = 98.1 \text{ N}$, $F_{e2} = 98.5$ und $F_{e3} = 97.7 \text{ N}$ der statische Sicherheitskoeffizient der Lager

Tabelle 4.2: Zusammenfassung Berechnungen

LX26005		Führungsschiene	Kugelwindtrieb	Lagereinheit
Statischer	Sicherheitsfaktor	91.8	6.518	4.68
	Knicklast [N]	-	6999.42	-
	Kompressionsbelastung [N]	-	3243.09	-
Kritische	Geschwindigkeit [rpm]	-	42611	-
	Nennnutzungsdauer [km]	$1.713 \cdot 10^6$	68.14	236
	Maximale Axiallast [N]	-	4.864	-

liegt bei:

$$\begin{aligned}
 f_s &= \frac{C_{oa}}{F_{eMAX}} \\
 &= \frac{461}{98.5} = 4.68
 \end{aligned}
 \tag{4.14}$$

Lagereinheit - Nennnutzungsdauer

Die Berechnung Nennnutzungsdauer Lager berechnet wie 4.28:

$$\begin{aligned}
 L &= \left(\frac{Ca}{f_w \cdot F_m} \right)^3 \cdot l \\
 &= \left(\frac{730 \text{ N}}{1.2 \cdot 98.34 \text{ N}} \right)^3 \cdot 1 \text{ mm} \cdot 10^6 \\
 &= 236 \text{ km}
 \end{aligned}
 \tag{4.15}$$

Führungsschiene - Last

Die Formeln entstammen [4]. Bei konstanter Geschwindigkeit und der gegebenen Montagerichtung:

$$\begin{aligned}
 F_{e1} &= Y_V \cdot F_V \\
 &= 0.5 \cdot 10 \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \\
 &= 49 \text{ N}
 \end{aligned}
 \tag{4.16}$$

Bei Beschleunigung: Multiplikation des Führungsmoments mit dem Koeffizienten addiert mit der Kraft.

Momentenkoeffizient der Führungsschiene (Neigung) (K_P)= 0.228 1/m

Momentenkoeffizient der Führungsschiene (Gieren) (K_Y)	=0.228 1/m
Momentenkoeffizient der Führungsschiene (Rollen) (K_R)	=0.0667 1/m
Zulässiges statisches Moment (Neigung) (M_a)	=27.00 Nm
Zulässiges statisches Moment (Gieren) (M_b)	=27.00 Nm
Zulässiges statisches Moment (Rollen) (M_c)	=93.00 Nm

$$\begin{aligned}
 F_{e2} &= Y_V \cdot F_V + K_p \cdot M_a + M_b \cdot K_y + M_c \cdot K_r \\
 &= 0.5 \cdot 10 \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 6.156 \text{ N} + 6.156 \text{ N} + 6.2031 \text{ N} \quad (4.17) \\
 &= 67.5151 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Bei Abbremsen:

$$\begin{aligned}
 F_{e2} &= Y_V \cdot F_V + K_p \cdot M_a + M_b \cdot K_y + M_c \cdot K_r \\
 &= 0.5 \cdot 10 \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 6.156 \text{ N} + 6.156 \text{ N} + 6.2031 \text{ N} \quad (4.18) \\
 &= 67.5151 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Daraus kann der statische Sicherheitsfaktor berechnet werden:

$$\begin{aligned}
 f_s &= \frac{C_0}{F_{e_{max}}} \\
 &= \frac{6199}{67.5151} \\
 &= 91.8
 \end{aligned} \quad (4.19)$$

Führungsschiene - Nennnutzungsdauer

Dafür muss zuerst die mittlere Axiallast aus den Kräften aus 4.16, 4.17, 4.36 berechnet werden:

$$\begin{aligned}
 F_m &= \sqrt[3]{\frac{1}{L_S} \cdot (F_{e1}^3 \cdot L_1 + F_{e2}^3 \cdot L_2 + F_{e2}^3 \cdot L_3)} \\
 &= \sqrt[3]{\frac{1}{80 \text{ mm}} \cdot ((67.515 \text{ N})^3 \cdot 10 \text{ mm} + (49 \text{ N})^3 \cdot 60 \text{ mm} + (67.515 \text{ N})^3 \cdot 10 \text{ mm})} \\
 &= 54.87 \text{ N}
 \end{aligned} \quad (4.20)$$

Mithilfe der mittleren Last wird die Nennnutzungsdauer berechnet:

$$\begin{aligned}
 L &= \left(\frac{C_a}{f_w \cdot F_m} \right)^3 \cdot h \\
 &= \left(\frac{3277 \text{ N}}{1.2 \cdot 54.87 \text{ N}} \right)^3 \cdot 80 \text{ mm} \cdot 10^6 \\
 &= 1.71310^6 \text{ km}
 \end{aligned} \quad (4.21)$$

Lineareinheit - Neigmoment

Das zu erwartende Neigmoment M_N berechnet sich durch:

$$\begin{aligned}
 M_K &= m_L \cdot g \cdot (L_Z + p) + m_L \cdot a \cdot (L_Z + p) \\
 &= 10 \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (7 \text{ mm} + 40 \text{ mm}) + 10 \text{ kg} \cdot 40 \frac{\text{mm}}{\text{s}^2} \cdot (7 \text{ mm} + 40 \text{ mm}) \\
 &= 4.6107 \text{ Nm} + 0.0188 \text{ Nm} \\
 &= 4.63 \text{ Nm}
 \end{aligned}
 \tag{4.22}$$

L_Z = Abstand Tisch zum Schwerpunkt
 p = Höhe Tisch der Lineareinheit

Aus 4.1 ersichtlich $Ma > M_N$.

4.3.3 Auswahl Lineareinheit X-Richtung

Entsprechend der überschlägigen Berechnung von 4.3.2 müssen auch die Achse in X-Richtung und die Achse in Y-Richtung überschlägig berechnet werden:

$$\begin{aligned}
 V_{MAX} &= 40 \text{ mm/s} \\
 m_L &= 20 \text{ kg} \\
 a &= 47 \text{ mm/s}^2 \\
 h &= 220 \text{ mm} \\
 g &= 9.81 \text{ m/s}^2 \\
 pos &= \text{horizontal}
 \end{aligned}$$

Die Abbildung 4.10 stellt einen Bewegungsablauf der entsprechenden Achse dar.

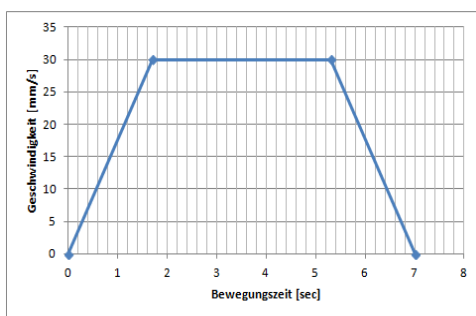


Abbildung 4.12: Bewegungsprofil X-Achse

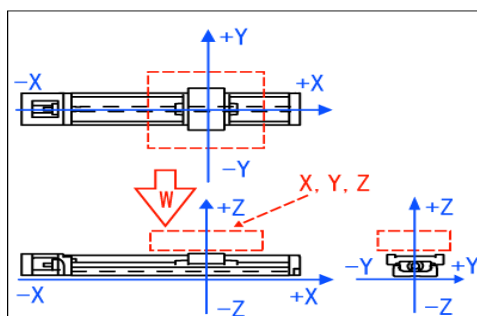


Abbildung 4.13: Einbaulage X-Achse

Vorübergehende Auswahl

Ein Fahrweg von 220 mm mit einer Beschleunigung von 47 mm/s^2 und einer Höchstgeschwindigkeit von 40 mm/s sind gegeben. Aufgrund dieser Bedingungen wird die Serie *LX2605* von *MiSUMi* verwendet. Eine Zusammenfassung der technischen Daten der Lineareinheit befindet sich in [4.1](#).

Kugelgewindetrieb - Last

$$\begin{aligned} F_{e1} &= \mu \cdot W \cdot g \\ &= 0.005 \cdot 20 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 = \\ &= 0.981 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.23)$$

Axiallast bei Beschleunigung:

$$\begin{aligned} F_{e2} &= F_{e1} + W \cdot a \\ &= 0.981 \text{ N} + 20 \text{ kg} \cdot 0.047 \text{ m/s}^2 = \\ &= 1.921 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.24)$$

Beim Abbremsen:

$$\begin{aligned} F_{e2} &= F_{e1} - W \cdot a \\ &= 0.981 \text{ N} - 20 \text{ kg} \cdot 0.047 \text{ m/s}^2 = \\ &= 0.041 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.25)$$

Mit Hilfe der maximalen Kraft aus [4.24](#) und der statische Tragzahl (C_{oa}) berechnet sich der statische Sicherheitskoeffizient:

$$\begin{aligned} f_s &= \frac{C_{oa}}{F_{e_{max}}} \\ &= \frac{2097 \text{ N}}{1.921 \text{ N}} = 1091 \end{aligned} \quad (4.26)$$

Kugelgewindetrieb - Nennnutzungsdauer

Mithilfe der Gleichungen [4.23](#), [4.24](#) und [4.25](#) wird die mittlere Axiallast F_m berechnet:

$$\begin{aligned} F_m &= \sqrt[3]{\frac{1}{h} \cdot (F_{e1}^3 \cdot L_1 + F_{e2}^3 \cdot L_2 + F_{e2}^3 \cdot L_3)} \\ &= \sqrt[3]{\frac{1}{220 \text{ mm}} \cdot ((1.921 \text{ N})^3 \cdot 17 \text{ mm} + (0.981 \text{ N})^3 \cdot 186 \text{ mm} + (0.041 \text{ N})^3 \cdot 17 \text{ mm})} \\ &= 1.104 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.27)$$

Anhand der mittleren Axiallast wird die Nennnutzungsdauer berechnet:

$$\begin{aligned}
 L &= \left(\frac{Ca}{fw \cdot Fm} \right)^3 \cdot l \\
 &= \left(\frac{1600 \text{ N}}{1.2 \cdot 1.052 \text{ N}} \right)^3 \cdot 5 \text{ mm} \cdot 10^6 \\
 &= 8.808 \cdot 10^9 \text{ km}
 \end{aligned} \tag{4.28}$$

Kugelgewindetrieb - Knicklast

Die folgende Berechnung entstammt [4]: Der Abstand zwischen den Befestigungspunkten beträgt beim Modell LX2005 300 mm. Die Spindel ist aus 16CrMo4 gefertigt, der Werkstoff besitzt ein E-Modul von $2.06 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$. Der Koeffizient entsprechend der Befestigungsmethode ist 3.927 [3]. Der Sicherheitsfaktor wird auf 0.5 gelegt. I berechnet sich mit folgender Gleichung: $\frac{\pi \cdot d_1^4}{64}$ mit einem gegebenen Kerndurchmesser von 6.46 mm liegt das Flächenträgheitsmoment bei $\frac{\pi \cdot (6.46 \text{ mm})^4}{64} = 85.5 \text{ mm}^4$. Die Werte in 4.9 eingesetzt ergibt:

$$\frac{3.927 \cdot \pi^2 \cdot 2.06 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2 \cdot 85.5 \text{ mm}^4}{300^2 \text{ mm}^2} \cdot 0.5 = 3863 \text{ N} \tag{4.29}$$

Kugelgewindetrieb - Zulässige Zugbelastung/Kompressionsbelastung

Entsprechend der Formel 4.11:

$$\frac{147 \text{ N/mm}^2 \cdot \pi \cdot (6.46 \text{ mm})^2}{4} = 4818 \text{ N} \tag{4.30}$$

Kugelgewindetrieb - Kritische Geschwindigkeit

Der Abstand zwischen den Befestigungspunkten ist 300 mm, als Sicherheitsfaktor wird mit 0.8 gerechnet, der Koeffizient λ ist bei einer festen Halterung 3.927, die Parameter in 4.12 eingesetzt ergibt:

$$\frac{60 \cdot 3.927^2}{2 \cdot \pi \cdot (300 \text{ mm})^2} \cdot \sqrt{\frac{2.06 \cdot 10^5 \text{ N/mm} \cdot 10^3 \cdot 85.5 \text{ mm}^4}{7.85 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mm}^3 \cdot \frac{6.46^3 \text{ mm}^3 \cdot \pi}{4}}} \cdot 0.8 = 42611 / \text{rpm} \tag{4.31}$$

Die biegekritische Drehzahl sollte nicht überschritten werden.

Tabelle 4.3: Zusammenfassung Berechnungen

LX26005		Führungsschiene	Kugelgewindetrieb	Lagereinheit
Statischer Sicherheitsfaktor		60.56	1091	627
Knicklast [N]		-	3863	-
Kompressionsbelastung [N]		-	4818	-
Kritische Geschwindigkeit [rpm]		-	42611	-
Nennnutzungsdauer [km]		$5.244 \cdot 10^6$	$8.808 \cdot 10^9$	$9.433 \cdot 10^6$
Maximale Axiallast [N]		-	4.864	-

Lagereinheit - Last

Die berechneten Kräfte der Spindel wirken auch auf die Lager, somit $F_{e1} = 0.981 N$, $F_{e2} = 1.921$ und $F_{e3} = 0.041 N$. Der statische Sicherheitskoeffizient der Lager liegt bei:

$$\frac{1205}{1.921} = 627 \quad (4.32)$$

Lagereinheit - Nennnutzungsdauer

Die Berechnung Nennnutzungsdauer Lager aus Gleichung 4.28:

$$\left(\frac{1637 N}{1.2 \cdot 1.104 N} \right)^3 \cdot 5 mm \cdot 10^6 = 9.433 \cdot 10^6 km \quad (4.33)$$

Führungsschiene - Last

Bei konstanter Geschwindigkeit:

$$\begin{aligned} F_{e1} &= Y_V \cdot F_V \\ &= 0.5 \cdot 20 kg \cdot 9.81 \frac{m}{s^2} \\ &= 196 N \end{aligned} \quad (4.34)$$

Bei Beschleunigung: Multiplikation des Führungsmoments mit dem Koeffizienten addiert mit der Kraft:

$$\begin{aligned} F_{e2} &= Y_V \cdot F_V + Kp \cdot Ma + Mb \cdot Ky + Mc \cdot Kr \\ &= 0.5 \cdot 20 kg \cdot 9.81 \frac{m}{s^2} + 11.9 N + 11.9 N + 11.857 N \\ &= 133.65 N \end{aligned} \quad (4.35)$$

Bei Abbremsen:

$$\begin{aligned}
 F_{e2} &= Y_V \cdot F_V + K_p \cdot M_a + M_b \cdot K_y + M_c \cdot K_r \\
 &= 0.5 \cdot 20 \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 11.9 \text{ N} + 11.9 \text{ N} + 11.857 \text{ N} \\
 &= 133.65 \text{ N}
 \end{aligned} \tag{4.36}$$

Daraus kann der statische Sicherheitsfaktor berechnet werden:

$$\begin{aligned}
 f_s &= \frac{C_0}{F_{e_{max}}} \\
 &= \frac{11871 \text{ N}}{198 \text{ N}} \\
 &= 60.56
 \end{aligned} \tag{4.37}$$

Führungsschiene - Nennnutzungsdauer

Berechnung mittlere Axiallast und daraus die Nennnutzungsdauer:

$$\begin{aligned}
 F_m &= \sqrt[3]{\frac{1}{L_S} \cdot (F_{e1}^3 \cdot L_1 + F_{e2}^3 \cdot L_2 + F_{e2}^3 \cdot L_3)} \\
 &= \sqrt[3]{\frac{1}{220 \text{ mm}} \cdot ((133.65 \text{ N})^3 \cdot 17 \text{ mm} + (196 \text{ N})^3 \cdot 186 \text{ mm} + (133.65 \text{ N})^3 \cdot 17 \text{ mm})} \\
 &= 188.846 \text{ N}
 \end{aligned} \tag{4.38}$$

Mit Hilfe der mittleren Last wird die Nennnutzungsdauer berechnet:

$$\begin{aligned}
 L &= \left(\frac{C_a}{f_w \cdot F_m} \right)^3 \cdot l \\
 &= \left(\frac{6522 \text{ N}}{1.2 \cdot 188.846 \text{ N}} \right)^3 \cdot 220 \text{ mm} \cdot 10^6 \\
 &= 5.244 \cdot 10^6 \text{ km}
 \end{aligned} \tag{4.39}$$

Lineareinheit - Neigmoment

Das zu erwartende Neigmoment M_N berechnet sich durch:

$$\begin{aligned}
 M_K &= m_L \cdot a \cdot (L_Z + p) \\
 &= 20 \text{ kg} \cdot 47 \frac{\text{mm}}{\text{s}^2} \cdot (10 \text{ mm} + 50 \text{ mm}) \\
 &= 0.0564 \text{ Nm}
 \end{aligned} \tag{4.40}$$

L_Z = Abstand Tisch zum Schwerpunkt

p = Höhe Tisch der Lineareinheit

Aus 4.1 ersichtlich $M_a > M_N$.

4.3.4 Auswahl Lineareinheit Y-Richtung

Für die Bewegung in Y-Richtung soll wiederum eine LX2605 verwendet werden, da von einer Belastung von lediglich 15 kg auf den Wagen ausgegangen wird. Aufnahme der Grundplatte und des Bauteils sowie die Kraft, welche von der Z-Achse eingebracht wird; auf eine exakte Berechnung wird verzichtet und auf das vorherige Kapitel 4.3.3 verwiesen.

4.3.5 Kupplung

Die Aufgabe der Kupplung ist die Verbindung von zwei rotierenden Elementen und die möglichst verlustfreie Übertragung des Drehmomentes, Absorption von Fehlstellungen und unkomplizierte Verbindung [4]. Eigenschaften von Scheibenkupplung:

- Absorption von Fehlausrichtung,
- Spielfreiheit für hohe Winkelgenauigkeit, damit präzise Positionierung möglich wird,
- hohe Torsionsteifigkeit.

Für die in 4.3.1 gewählten Lineareinheiten wird eine Kupplung vom selben Hersteller verwendet. Das Modell *SCPW*, die Kupplung ist eine Lamellenkupplung mit zwei Scheiben (Reibbeläge), durch die Anpresskraft auf die Reibelemente wird das Drehmoment übertragen. Lamellenkupplungen zeichnen sich durch kleine Baudurchmesser aus. Die Tabelle 4.4 zeigt eine Zusammenfassung der technischen Daten.

Die Drehmomentkapazität bei Kupplungen sollte das 5-10-fache des Spitzendrehmomentes des Motors betragen. Dem Abschnitt 4.4.1 wird entnommen, dass das maximale Drehmoment des Motors 0.12 Nm beträgt, somit berechnet sich die Drehmomentkapazität $\frac{1 \text{ Nm}}{0.12 \text{ Nm}} = 8.333$ und liegt im zulässigen Bereich.

Im Folgenden wird der resultierende Positionsfehler berechnet. Der maximale Winkelversatz resultiert aus dem Verhältnis maximales Drehmoment zu Torsionssteifigkeit der Kupplung:

$$\theta_{Max} = \frac{M_{Max}}{C_j} \quad (4.41)$$

Positionsfehler pro Umdrehung multipliziert mit der Spindelsteigung ergibt den maximalen Positionsfehler:

Tabelle 4.4: Technische Daten SCPW No. 16

Bezeichnung	Wert	Einheit
Zulässiges Drehmoment	1.0	Nm
Zulässiger Winkelversatz	1.0	$^{\circ}$
Zulässiger Radialversatz	0.1	mm
Torsionsfeder	500	Nm
Max. Drehzahl	10000	$1/min$
Trägheitsmomente	$4.22 \cdot 10^{-7}$	$kg \cdot m^2$
Zulässiges Axialspiel	± 0.20	mm
Gewicht	11	mm

$$P_{Max} = \frac{\theta_{Max}}{360^{\circ}} \cdot P_B \quad (4.42)$$

Für alle drei Achsen werden dieselben Motoren (siehe Kapitel 4.4.1) und Kupplungen verwendet. Somit ist auch der maximale Winkelversatz bei allen drei Achsen identisch:

$$\theta_{Max} = \frac{0.12 \text{ Nm}}{500 \text{ Nm/rad}} = 0.00024 \text{ rad} = 0.013751^{\circ} \quad (4.43)$$

Mit der Formel 4.42 berechnet sich der Positionsfehler der Z-Achse:

$$P_{Max} = \frac{0.013751^{\circ}}{360^{\circ}} \cdot 1 = 0.0382 \text{ } \mu m \quad (4.44)$$

Der Positionsfehler der X- und Y-Achse ist:

$$P_{Max} = \frac{0.013751^{\circ}}{360^{\circ}} \cdot 5 = 0.19 \text{ } \mu m \quad (4.45)$$

4.4 Antrieb - Motoreinheit

Der Motor für eine Lineareinheit wird entsprechend seiner Aufgabe ausgewählt, dabei kommen entweder Servomotoren, Schrittmotoren oder Drehstrommotoren zum Einsatz. Die Tabelle 4.11, entnommen aus [1], zeigt Hauptmerkmale bei den unterschiedlichen Motoren auf.

Für diese Anwendung wird ein Schrittmotor verwendet, da Schrittmotoren preisgünstig und robust sind. Die geforderte Positioniergenauigkeit und minimaler Hub können mit einem entsprechend ausgelegtem Schrittmotor erreicht werden. Schrittmotoren (stepping motor) zeichnen sich dadurch aus, bestimmte definierte Schritte mit dem Schrittwinkel α_s auszuführen. Die Umdrehung wird somit in eine definierte Anzahl von Schritten aufgelöst. Schrittmotoren erreichen ein hohes Drehmoment bei kompakter Bauweise,

Tabelle 4.5: Eigenschaften unterschiedlicher Motortypen

Motor	Drehmoment	Drehzahl	Dynamik	Genauigkeit	Geräuschverhalten	Handhabung	Kosten
Servomotor (inkl. Linearmotor)	+++	+++	+++	+++	+++	++	+
Drehstrommotor	+	+++	+	0	+++	+++	+++
Schrittmotor	++	+	++	++	0	++	+++
Legende: +++ sehr gut, ++ gut, + befriedigend, 0 ausreichend							

jedoch fällt das Drehmoment bei höheren Drehzahlen ab, was bei der Anwendung berücksichtigt werden muss. Solange Schrittmotoren nicht überlastet werden, kann man auch ohne Positionsrückmelder im open-loop die Position exakt bestimmen. Die geringe Rotorträgheit führt zu einem gutem dynamischen Verhalten, was sich positiv auf die Beschleunigung auswirkt und Schrittmotoren ideal für Aufgaben mit häufigen Start-Stopp-Vorgängen macht. Die präzise schrittweise Drehbewegung wird von einer Positioniersteuerung vorgegeben. Schrittmotoren wandeln elektrische Impulse in einen analogen Winkel oder Weg bzw. eine Impulsfrequenz in einen Vorschubwert um [9], [1]. Folgend eine kurze Übersicht von Anwendungen, bei denen Schrittmotoren zum Einsatz kommen [9]:

- Drucker, Plotter,
- CD-ROM-Laufwerke,
- Lüftungs- und Klimatechnik,
- in der Fahrzeugtechnik bei Rückspiegel, Sitzeinstellung.

Die Abbildung 4.14 zeigt das Blockschaltbild der Motoren zusammen mit ihrem Driver und Controller im closed-loop-Betrieb durch den Resolver. Zusätzlich wird die exakte Position der Lineareinheit durch ein Messgerät erfasst, siehe Kapitel 4.5, und an eine übergeordnete Softwareebene geleitet.

4.4.1 Auswahl Schrittmotor Z-Achse

Im Folgenden wird das Gesamtdrehmoment überschlägig berechnet, dieses wird neben der Drehgeschwindigkeit verwendet um den Arbeitspunkt zu bestimmen und damit den Motor auszuwählen.⁷ Wie in der Anforderungsliste 2.2 beschrieben, soll der Motor pro Schritt um $1 \mu m$ verfahren. Bei einer

⁷Die Berechnung erfolgte in Zusammenarbeit mit Orientalmotor.

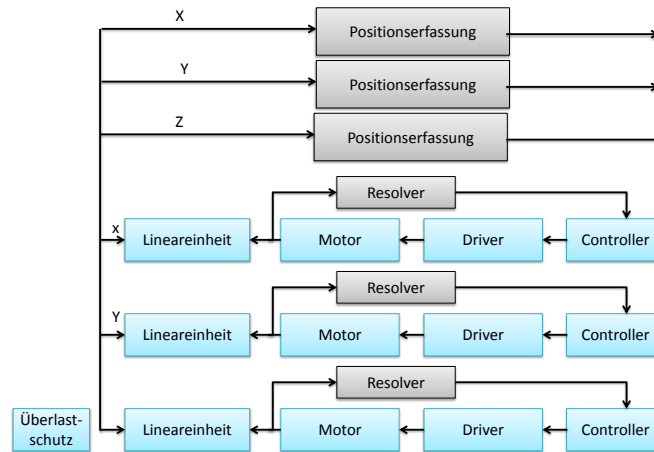


Abbildung 4.14: Blockschaltbild Führung

Spindelsteigung von 1 ergibt sich, dass der Motor eine Basisschrittwinkel von 0.36° haben muss. Folgend gegebene Parameter:

Durchmesser der Spindel (D_B)	= 6 mm
Spindelsteigung (P_B)	= 1 mm/rev
Gesamtlänge der Spindel (L_B)	= 150 mm
Dichte der Spindel (ρ)	= 7900 kg/m ³
Gesamte Masse (m)	= 10 kg
Äußere Kräfte (F_a)	= 30 N
Anstellwinkel (α)	= 90°
Verfahrweg (L)	= 60 mm
Verfahrzeit (t_0)	= 4 sec
Beschleunigungszeit (t_1)	= 0.5 sec
Effizienz (η)	= 0.6
Reibungskoeffizient 0 (μ_0)	= 0.3
Reibungskoeffizient 1 (μ)	= 0.1

Das Gesamtdrehmoment (T_{total}) ist die Summe aus dem Lastmoment (T_L) und dem Beschleunigungsdrehmoment (T_A). Zunächst wird das Lastmoment mit folgender Gleichung bestimmt:

$$T_L = \frac{F \cdot P_B}{2 \cdot \pi \cdot \eta} + \frac{\mu_0 \cdot F_0}{2 \cdot \pi} \quad (4.46)$$

Die Kraft F verursacht durch die Äußere Kräfte (F_a) und der Gesamte Masse (m) kann mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$\begin{aligned} F &= F_a + m \cdot g \cdot (\sin(\alpha) + \mu \cdot \cos(\alpha)) \\ &= 30 \text{ N} + 10 \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (\sin(90^\circ) + 0.1 \cdot \cos(90^\circ)) \\ &= 128.1 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.47)$$

Die Kraft F_0 errechnet sich aus F :

$$\begin{aligned} F_0 &= \frac{F}{3} \\ &= \frac{128.1 \text{ N}}{3} = 42.7 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.48)$$

Werden in Gleichung 4.46 die Ergebnisse aus den Gleichungen 4.47 und 4.48 mit den Parametern eingesetzt, ergibt sich:

$$\begin{aligned} T_L &= \frac{128.1 \text{ N} \cdot 1 \text{ mm}}{2 \cdot \pi \cdot 0.6} + \frac{0.3 \cdot 42.7 \text{ N} \cdot 1 \text{ mm}}{2 \cdot \pi} \\ &= 0.036 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (4.49)$$

Zur Berechnung des Beschleunigungsdrehmoments werden die Massenträgheit der Spindel (J_B) und die Massenträgheit der Last (J_L) benötigt:

$$\begin{aligned} J_B &= \frac{\pi}{32} \cdot \rho \cdot L_B \cdot D_B^4 \\ &= \frac{\pi}{32} \cdot 7900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.15 \text{ m} \cdot (0.006 \text{ m})^4 \\ &= 1.51 \cdot 10^{-7} \text{ kgm}^2 \end{aligned} \quad (4.50)$$

Das Trägheitsmoment verursacht durch die Last:

$$\begin{aligned} J_L &= m \cdot \left(\frac{P_B}{2 \cdot \pi} \right)^2 \\ &= 10 \text{ kg} \cdot \left(\frac{0.001 \text{ m}}{2 \cdot \pi} \right)^2 \\ &= 2.533 \cdot 10^{-7} \text{ kgm}^2 \end{aligned} \quad (4.51)$$

Werden die Trägheiten aus den Gleichungen 4.50 und 4.51 summiert, ergibt sich die Gesamtträgheit (J_{total}) = $4.043 \cdot 10^{-7} \text{ kgm}^2$

Die Gesamtzahl der Pulse über den Verfahrenweg:

$$\begin{aligned} A &= \frac{L}{P_B} \cdot \frac{360^\circ}{\alpha_s} \\ &= \frac{80 \text{ mm}}{1 \text{ mm}} \cdot 1000 \\ &= 80000 \text{ Pulse} \end{aligned} \quad (4.52)$$

Mit Hilfe von Gleichung 4.52 kann die maximale Frequenz abgeschätzt werden:

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{A}{t_0 - t_1} \\ &= \frac{80000}{4 \text{ sec} - 0.5 \text{ sec}} \\ &= 22857 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (4.53)$$

Die Drehzahl (v) bei einem linearen Vorschub von 20 mm/s liegt somit bei

$$\begin{aligned} v &= \frac{\alpha}{360^\circ} \cdot f_1 \cdot 60 \\ &= \frac{0.36^\circ}{360^\circ} \cdot 17142 \text{ Hz} \cdot 60 \\ &= 1371.42 \text{ r/min} \end{aligned} \quad (4.54)$$

Die Ergebnisse aus Gleichung 4.50, 4.51 und 4.54 werden benötigt, um das Beschleunigungsdrehmoment abschätzen zu können:

$$\begin{aligned} T_A &= (J_{total} + J_{motor}) \cdot \frac{(\pi \cdot \alpha_s)}{180^\circ} \cdot \frac{f_1}{t_1} \\ &= 4.043 \cdot 10^{-7} \text{ kgm}^2 + 2.0 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2 \frac{(\pi \cdot 0.36^\circ)}{180^\circ} \cdot \frac{22857 \text{ Hz}}{1 \text{ sec}} \\ &= 0,000287 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (4.55)$$

Mit Gleichung 4.74 und 4.49 wird das Gesamtdrehmoment berechnet:

$$\begin{aligned} T_{total} &= (T_L + T_A) \cdot K_{safe} \\ &= (0.036 \text{ Nm} + 0.000287 \text{ Nm}) \cdot 1.5 \\ &= 0.0544 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (4.56)$$

Mit dem berechneten Drehmoment wird ein Motor ausgewählt, welcher die Anforderung erfüllen kann. Neben dem Drehmoment ist auch der Basiswinkel entscheidend. Dieser bestimmt mit der Spindelsteigung den Verfahrensweg; gefordert ist ein minimaler Hub von $1 \mu\text{m}$, der Motor muss, damit kein Getriebe dazwischen geschaltet werden muss, 1000 Schritte pro Umdrehung machen und also einen Basiswinkel von 0.36° haben. Von der Firma Oriental-motors bietet sich die AR-Serie an: ein Schrittmotor mit einem Basisschritt-winkel von 0.36° , welcher auch im closes-loop betrieben werden kann. Der Typ AR26SAKD besitzt ein Motorträgheitsmoment $J_{motor} = 2.0 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2$, das Verhältnis der Trägheitsmomente soll ≤ 30 sein. In diesem Fall ergibt die Berechnung $\frac{J_{to}}{J_{Motor}} = 0.2$. Dies liegt weit unter 30, der Motor ist somit für diese Applikation geeignet. Die Abbildung 4.15 zeigt das Drehmoment-Drehgeschwindigkeits-Diagramm des Schrittmotors. Bei steigender Rotationsgeschwindigkeit nimmt das Haltemoment ab. Wie aus der Anforderungsliste ersichtlich, soll das Linearsystem mit $5 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ verfahren. Bei einer Spindelsteigung von 1 entspricht dies $5 \frac{\text{r}}{\text{s}} = 300 \frac{\text{r}}{\text{min}}$. Diese Anforderung kann der

Tabelle 4.6: Technische Daten des AR26SAKD

Beschreibung	Wert	Einheit
Maximales Haltemoment	0.12	Nm
Haltemoment bei Motorstillstand	0.06	Nm
Trägheit Rotor	$20 \cdot 10^{-7}$	kgm^2
Auflösung	0.36	$^\circ/Puls$
Schutzklasse	IP20	
Spannungsaufnahme	24	VDC
Maximale Stromaufnahme	0.9	A

ausgewählte Motor erfüllen. Die Tabelle 4.6 zeigt einen Auszug der wichtigsten Parameter des Motors.

Speed-Torque Characteristics

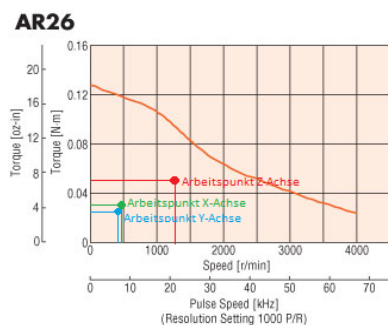


Abbildung 4.15: Arbeitspunkt Motor

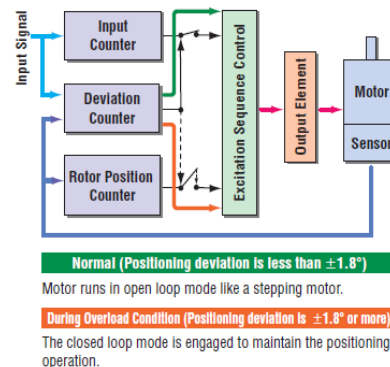


Abbildung 4.16: Schrittmotor mit closed-loop

Im Normalfall werden Schrittmotoren im open-loop betrieben. Bei Überlastung des Motors kommt es zu Schrittverlust. Die genaue Position des Motors ist dann nicht mehr bestimmt. Ein Sensor am Motor misst die Änderung der Induktivität, hervorgerufen durch die Distanzänderung zwischen Statorzähne und den Zähnen am Sensor, wodurch die exakte Position des Motors bestimmt wird. Die Abbildung 4.16 zeigt, dass in dieser Konstellation der Motor bei Überlastung im closed-loop betrieben wird, damit die Position nicht verloren geht.

4.4.2 Auswahl Schrittmotor X-Achse

Die Berechnung des Motors für die X-Achse erfolgt nach denselben Formeln wie in Kapitel 4.4.1 beschrieben. Die Einbaubedingungen sind jedoch unterschiedlich. Im Gegensatz zur Z-Achse, welche vertikal verbaut wird, wird die X-Achse horizontal verbaut. Das Bild 4.17 zeigt eine Skizze. Folgend die

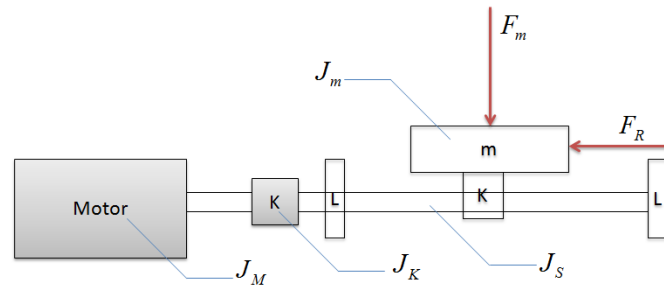


Abbildung 4.17: Skizze X-Y-Achse

gegebenen Parameter für die Berechnung:

$$D_B = 8 \text{ mm}$$

$$P_B = 5 \text{ mm/rev}$$

$$L_B = 300(217\text{eff}) \text{ mm}$$

$$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$$

$$m = 20 \text{ kg}$$

$$F_a = m \cdot \mu_R = 0.1 \cdot 20 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 = 19.62 \text{ N} \approx 25 \text{ N}$$

$$\alpha = 0^\circ$$

$$L = 200 \text{ mm}$$

$$\eta = 0.9$$

$$\mu_0 = 0.3$$

$$\mu = 0.05$$

A) Berechnung der geforderten Auflösung:

Der minimale Schrittwinkel (θ_S) ergibt sich aus dem gewünschten Verfahrensweg (Δl) und der Spindelsteigung (P_B):

$$\begin{aligned} \theta_S &= \frac{360 \cdot l}{P_B} \\ &= \frac{360 \cdot 0.005 \text{ /mm}}{5 \text{ mm/rev}} = 0.36^\circ \end{aligned} \quad (4.57)$$

B) Bewegungsprofil:

Das schnellste Bewegungsprofil wurde bereits bei der Auslegung der Spindel entwickelt, siehe Abbildung 4.12. Gesamtzahl der Impulse:

$$\begin{aligned} A &= \frac{L_{B\text{eff}}}{P_B} \cdot \frac{360^\circ}{\alpha_s} \\ &= \frac{217 \text{ mm}}{5 \text{ mm}} \cdot \frac{360^\circ}{0.36^\circ} = 43400 \end{aligned} \quad (4.58)$$

Die Beschleunigung und die Bremszeiten sollten ideal bei 25 % der Gesamtzeit liegen, bei angenommener Verfahrensgeschwindigkeit von 30 mm/s wird

die 200 mm Strecke in $t_0 = 6.8 \text{ sec} \approx 7 \text{ sec}$ durchfahren. Daraus ergibt sich $t_1 = 25 \% \cdot t_0 = 1.7 \text{ sec}$. Identische Zeit für den Bremsvorgang. Damit wird die maximale Frequenz berechnet:

$$\begin{aligned} f_{MAX} &= \frac{A}{t_0 - t_1} \\ &= \frac{43400}{7 \text{ sec} - 1.7 \text{ sec}} = 8188 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (4.59)$$

Die Verfahrgeschwindigkeit mit dieser Pulsrate beträgt:

$$\begin{aligned} N_M &= \frac{\theta_S}{360} \cdot f_{MAX} \cdot 60 \\ &= \frac{0.36}{360} \cdot 8188 \cdot 60 = 491 \text{ rev/min} \end{aligned} \quad (4.60)$$

C) Berechnung gefordertes Motormoment T_M :

I) Lastmoment:

$$\begin{aligned} F_L &= F_R + m \cdot g \cdot (\sin(\alpha) + \mu \cdot \cos(\alpha)) \\ &= 25 \text{ N} + 20 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot (\sin(0^\circ) + 0.05 \cdot \cos(0^\circ)) \\ &= 34.81 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.61)$$

Die Vorspannkraft $F_0 = 1/3 \cdot F_L = 11.603 \text{ N}$. Damit wird das Lastmoment am Motor berechnet:

$$\begin{aligned} T_L &= \frac{F_L \cdot P_B}{2 \cdot \pi \cdot \eta} + \frac{\mu_0 \cdot F_0}{2 \cdot \pi} \\ &= \frac{34.81 \text{ N} \cdot 5 + 10^{-3} \text{ m}}{2 \cdot \pi \cdot 0.9} + \frac{0.3 \cdot 11.603 \text{ N} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{2 \cdot \pi} \\ &= 0.0328 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (4.62)$$

II) Trägheit: Die Gesamtträgheit ist die Summe aus der Massenträgheit der Spindel J_B und der Massenträgheit der Last J_m . Die Trägheit der Kupplung wird vernachlässigt:

$$\begin{aligned} J_B &= \frac{\pi}{32} \cdot \rho \cdot L_B \cdot D_B^4 \\ &= \frac{\pi}{32} \cdot 7900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.217 \text{ m} \cdot (0.008 \text{ m})^4 \\ &= 6.9 \cdot 10^{-7} \text{ kgm}^2 \end{aligned} \quad (4.63)$$

Das Trägheitsmoment verursacht durch die Last:

$$\begin{aligned} J_L &= m \cdot \left(\frac{P_B}{2 \cdot \pi} \right)^2 \\ &= 20 \text{ kg} \cdot \left(\frac{0.005 \text{ m}}{2 \cdot \pi} \right)^2 \\ &= 12.6 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2 \end{aligned} \quad (4.64)$$

Die Gesamtträgheit $J_{Total} = 13.29 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2$

III) *Beschleunigungsmoment*: Die Ergebnisse aus den Gleichungen 4.63, 4.64 und 4.59 werden benötigt, um das Beschleunigungsdrehmoment abschätzen zu können:

$$\begin{aligned} T_A &= (J_{total} + J_{motor}) \cdot \frac{(\pi \cdot \alpha_s)}{180^\circ} \cdot \frac{f_1}{t_1} \\ &= 12.6 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2 + 2 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2 \cdot \frac{(\pi \cdot 0.36^\circ)}{180^\circ} \cdot \frac{8188 \text{ Hz}}{1.7 \text{ sec}} \quad (4.65) \\ &= 0,000384 \text{ Nm} \end{aligned}$$

IV) *Gesamtdrehmoment*: $0.0328 \text{ Nm} + 0,000384 \text{ Nm} = 0.033184 \text{ Nm}$ multipliziert mit einem Sicherheitsfaktor von 1.5 ergibt ein gefordertes Gesamtdrehmoment von 0.04977 Nm . Das Verhältnis der Trägheit des Systems zu Trägheit Motor sollte laut Hersteller ≤ 30 sein. In diesem Fall liegt das Verhältnis bei $12.6/2 = 6.3$ und erfüllt somit die Bedingung. Anhand der Berechnung ist ersichtlich, dass für die X-Achse der selbe Motor verwendet werden kann wie er bereits für die Z-Achse verwendet wird⁸.

4.4.3 Auswahl Schrittmotor Y-Achse

Die Y-Achse unterscheidet sich nur geringfügig von der X-Achse, die Einbaulage ist identisch (Abbildung 4.17), lediglich die Belastung ändert sich und somit ändern sich die Parameter:

$$\begin{aligned} D_B &= 8 \text{ mm} \\ P_B &= 5 \text{ mm/rev} \\ L_B &= 200(177\text{eff}) \text{ mm} \\ \rho &= 7900 \text{ kg/m}^3 \\ m &= 15 \text{ kg} \\ F_a &= m \cdot \mu_R = 0.1 \cdot 15 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 = 14.72 \text{ N} \approx 20 \text{ N} \\ \alpha &= 0^\circ \\ L &= 170 \text{ mm} \\ \eta &= 0.9 \\ \mu_0 &= 0.3 \\ \mu &= 0.05 \end{aligned}$$

A) Berechnung der geforderten Auflösung:

$$\theta_S = \frac{360 \cdot 0.005 \text{ mm}}{5 \text{ mm/rev}} = 0.36^\circ \quad (4.66)$$

B) Bewegungsprofil:

Beschleunigung und Verzögerung werden von Kapitel 4.4.2 übernommen,

⁸Typ AR26SAKD von Orientalmotor.

die Länge der Spindel wird jedoch angepasst. Gesamtzahl der Impulse:

$$A = \frac{170 \text{ mm}}{5 \text{ mm}} \cdot \frac{360^\circ}{0.36^\circ} = 34000 \quad (4.67)$$

$$f_{MAX} = \frac{34000}{7 \text{ sec} - 1.7 \text{ sec}} = 6420 \text{ Hz} \quad (4.68)$$

Die Verfahrgeschwindigkeit mit dieser Pulsrate beträgt:

$$N_M = \frac{0.36}{360} \cdot 6420 \cdot 60 = 385 \text{ rev/min} \quad (4.69)$$

C) Berechnung gefordertes Motormoment T_M :

I) Lastmoment:

$$\begin{aligned} F_L &= 20 \text{ N} + 15 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot (\sin(0^\circ) + 0.05 \cdot \cos(0^\circ)) \\ &= 27.35 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.70)$$

Die Vorspannkraft $F_0 = 1/3 \cdot F_L = 9.1 \text{ N}$. Damit wird das Lastmoment am Motor berechnet:

$$\begin{aligned} T_L &= \frac{27.35 \text{ N} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{2 \cdot \pi \cdot 0.9} + \frac{0.3 \cdot 9.1 \text{ N} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{2 \cdot \pi} \\ &= 0.0263 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (4.71)$$

II) Trägheit: Die Gesamtträgheit ist die Summe aus der Massenträgheit der Spindel J_B und der Massenträgheit der Last J_m . Die Trägheit der Kupplung wird vernachlässigt:

$$\begin{aligned} J_B &= \frac{\pi}{32} \cdot 7900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.217 \text{ m} \cdot (0.008 \text{ m})^4 \\ &= 6.9 \cdot 10^{-7} \text{ kgm}^2 \end{aligned} \quad (4.72)$$

Das Trägheitsmoment verursacht durch die Last:

$$\begin{aligned} J_L &= 15 \text{ kg} \cdot \left(\frac{0.005 \text{ m}}{2 \cdot \pi} \right)^2 \\ &= 9.5 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2 \end{aligned} \quad (4.73)$$

Die Gesamtträgheit $J_{Total} = 10.19 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2$

III) Beschleunigungsmoment: Die Ergebnisse aus den Gleichungen 4.63, 4.64 und 4.59 werden benötigt, um das Beschleunigungsdrehmoment abschätzen zu können:

$$\begin{aligned} T_A &= 10.19 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2 + 2 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2 \cdot \frac{(\pi \cdot 0.36^\circ)}{180^\circ} \cdot \frac{6420 \text{ Hz}}{1.7 \text{ sec}} \\ &= 0.000289 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (4.74)$$

IV) *Gesamtdrehmoment*: Durch Multiplikation von $0.0263 Nm + 0.000289 Nm = 0.0266 Nm$ mit einem Sicherheitsfaktor von 1.5 ergibt sich ein gefordertes Gesamtdrehmoment von $0.04 Nm$. Das Verhältnis der Trägheit des Systems zu Trägheit des Motors liegt bei $12.6/2 = 6.3$ und erfüllt somit die Bedingung ≤ 30 . Anhand der Berechnung ist ersichtlich, dass für die Y-Achse derselbe Motor wie bei der Z-Achse verwendet werden kann⁹.

4.4.4 Controller und Driver

Schrittmotoren werden mit einem Pulssignal betrieben. Entsprechend der Anzahl von Impulsen (A) dreht sich der Motor um ein Vielfaches seines Basiswinkels (θ_s) ($\theta = \theta_s \cdot A$). Die Drehgeschwindigkeit des Motors (N) ist proportional zur Pulsfrequenz (f). Das Verhältnis lässt sich folgendermaßen beschreiben: $N = \frac{\theta_s}{360} \cdot f \cdot 60$. Das Pulssignal wird vom Controller erzeugt. Der Treiber wandelt das Pulssignal in elektrischen Strom um, wodurch der Schrittmotor betrieben wird.

Auswahl Treiberpaket

Zusammen mit dem gewählten Motor wird das Treiberpaket α Step geliefert; dieses vereint den Treiber und den Controller in einem Gerät. Der interne Controller speichert bis zu 64 Bewegungsabläufe, interne logische Entscheidungen (return home) und generiert die Pulse für den Treiber. So können die einzelnen Bewegungsabläufe durch I/O gestartet werden oder auch durch Modbus-Befehle. Über einen Networkkonverter werden auch andere Bussysteme unterstützt. Folgend eine kurze Übersicht über die wichtigsten Funktionen:

- Closed-loop: Zusammen mit den Sensoren kann der Motor im closed-loop Verfahren betrieben werden. Schnelle Beschleunigungen und abrupte Änderungen von Lasten lassen sich dadurch realisieren.
- Drei Betriebsmuster: Positioniermuster (bis zu 64 Punkte), return-to-home Operation und kontinuierliche Operation.
- Kompatibel mit Modbus: Betriebsdaten und Parameter oder Ausgabe Betrieb-Start/Stop-Befehle von der Master-Steuerung.
- Alarm and Warning-Funktion: Der Treiber kann Alarme und Warnungen ausgeben, um sich vor Überhitzung, schlechter Verbindung, Fehlschlagen einer Operation oder Ähnlichem zu schützen.

4.4.5 Modbus

Der Controller kann mittels der seriellen Schnittstelle RS485 mit dem Laptop kommunizieren. Als gemeinsame *Sprache* wird Modbus verwendet. Das

⁹Typ AR26SAKD von Orientalmotor

Tabelle 4.7: Aufbau einer Botschaft RTU

ADU			
PDU			
Slave Adresse	Function Code	Data	Error check
8 bits	8 bits	Nx8 bits	16 bits

Modbus Protokoll ist einfach, offen und in Industrieapplikationen weit verbreitet. Bei Modbus kann nur der Master eine Kommunikation beginnen (*Query*). Der Slave führt eine Anfrage aus und sendet eine Antwort (*Response*). Dadurch hat der Master die volle Kontrolle über den Datenfluss. Modbus läuft entweder über die RS485 Schnittstelle oder über Ethernet. Bei der Datenübertragung gibt es drei verschiedene Betriebsarten (application data unit - ADU):

- ASCII
- Remote Terminal Unit (RTU)
- TCP/IP

Innerhalb der ADU befindet sich das protocol data unit (PDU), welches den Aufbau einer Botschaft beschreibt. Die Tabelle 4.7 zeigt den Aufbau einer Botschaft bei RTU. Bei RTU werden die Daten in binärer Form verschickt; dies sorgt für einen guten Datendurchsatz, macht aber die Botschaft für den Anwender nicht leserlich. Im Netzwerk können bis zu 31 Controller verbunden werden, jeder davon muss eine eindeutige 8 bits-Adresse besitzen, wobei die Adresse 0 für Broadcast reserviert ist. Modbus Function Code bestimmt, wie auf Daten im Controller zugegriffen und vom Master modifiziert werden. Jeder Function Code ruft ein bestimmtes Verhalten beim Slave hervor. Die verwendeten Function Codes gehören zur Gruppe der *Public Function Codes*. Folgende Function Codes werden verwendet:

- Read from a holding register(s) Code: hx 03
- Write to a holding register Code: hx 06
- Perform diagnosis Code hx 08
- Write to multiple holding registers Code hx 10

Für weitere Beschreibung der Befehle wird auf die Dokumentation verwiesen; exemplarisch wird ein Funktion Code und dessen Umsetzung im Controller beschrieben.

Write to a holding register Cod: Diese Funktion wird verwendet, um Daten in ein Register des Controller (*Remote Device*) zu schreiben. Das PDU beinhaltet die Adresse des Registers; zu beachten ist, dass die Adresse bei 0 beginnt, Registernummer 1 besitzt somit die Adresse 0. Die Antwort besteht aus einem Echo der Anfrage, welche nach Abschluss des Schreibprozesses gesendet wird.

Möchte man zum Beispiel den Motor starten, so kann man ein gespeichertes Bewegungsprofil aufrufen, welches vorher mittels der Software *ME-XE02* in den Controller geladen wurde. Soll die gespeicherte Bewegung Nummer 03 über Modbus ausgeführt werden, so müssen die entsprechenden Register angesprochen werden. In diesem Fall `hx 007C` für das obere Register und `hx007D` für das untere Register. In das obere Register müssen keine Daten geschrieben werden somit, `hx 00`, in das untere Register wird `1011` geschrieben, in Hex ergibt dies `0B`. Wie bereits erwähnt lautet das ADU eines Modbus RTU: SLAVE ADDRESS, FUNCTION CODE, DATA, ERROR CHECK. Angenommen der Slave besitzt die Adresse `hx 02`, so ist der Modbus Frame: `02 06 7C 7D 00 0B F8 6B`.

4.5 Positionserfassung

Für den Lageregelkreis von Bedeutung ist die Erfassung der Ist-Position. Durch die Erfassung von Messsystemen wird eine hohe Positionier- und Wiederholgenauigkeit erreicht, was die Reproduzierbarkeit der Position sicherstellt [11]. Bei Linearsystemen kann theoretisch aus der Anzahl der Umdrehungen die Position des Schlittens berechnet werden, allerdings fließen in diese indirekte Messung die Fehler der Spindel (Erwärmung der Kugelumlaufspindel, Umkehrfehler, kinematischer Fehler durch Steigungsfehler), der Kupplung etc. ein. Zudem kann ohne Referenzmarke nur die relative Position ermittelt werden, d.h. die Position zur Lage zum Einschaltzeitpunkt. Um diese potentiellen Fehlerquellen zu eliminieren, wird ein direktes Positioniersystem in das Messsystem eingebaut¹⁰. Zur direkten Positionserfassung steht eine Reihe von Messprinzipien zur Verfügung, entnommen aus [11]:

- Photoelektrische Messverfahren: besitzen eine hohe Auflösung; bestehen aus einem Maßstab (bei translatorischen Systemen) oder einer Teilscheibe (bei rotatorischen Systemen) und einer Abtasteinheit, welche entweder nach dem Auflicht- oder Durchlichtverfahren arbeitet. Sie sind weitverbreitet und etabliert.
- Interferometrische Wegmesssysteme: monochromatisches Licht wird genutzt um gezielt Interferenzen (Überlagerung von Wellen) zu erzeugen, die Intensitätsschwankungen werden in elektrische Impulse gewandelt. Solche Wegmesssysteme zeichnen sich durch eine hohe Genauigkeit und ein sehr gutes Auflösungsvermögen aus. Sie werden an Präzisionsmaschinen und vereinzelt an Großwerkzeugmaschinen eingesetzt.
- Elektromagnetische Aufnehmer: funktionieren nach dem Induktionsprinzip; mit der Bewegung ändert sich die Amplitude der Spannung,

¹⁰Die Grundprinzipien der direkten und indirekten Messung werden im Anhang A.2 beschrieben.

was als Weginformation ausgewertet wird. Bekannte Systeme dieses Messprinzips: Inductosyn und Resolver.

- Magnetische Aufnehmer: der Maßstab wird periodisch aufgeteilt in Nord- und Südpole. Das Magnetfeld wird durch magnetoresistive Sensoren abgetastet, deren Widerstand sich unter dem Einfluss eines magnetischen Feldes ändert.

Auswahl der Positioniereinheit

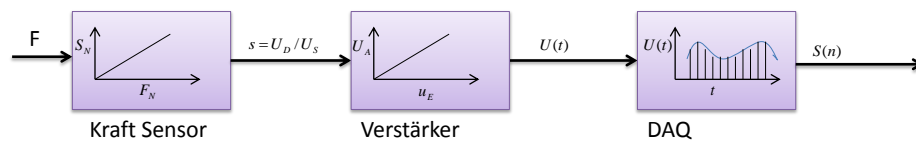
Um die Abweichung zwischen der tatsächlichen und der ermittelten Position festzustellen ist einerseits die Genauigkeit des Messgerätes entscheidend; andererseits hat der Einbauort in der Maschine sowie die Einhaltung von Einbautoleranzen erheblichen Einfluss auf die Genauigkeit des ermittelten Positionswertes. Zur direkten Positionserfassung wird ein Messsystem nach dem photoelektrischen Messverfahren verwendet. Es ist sehr genau, preisgünstig und bei Werkzeugmaschinen weitverbreitet. Die Längenmessgeräte werden in gekapselter und in offener Bauform angeboten. Gekapselte Lösungen eignen sich zum Einsatz an Werkzeugmaschinen, da sie vor Staub, Spänen und Spritzwasser geschützt sind, während offene Bauformen ohne mechanischen Kontakt zwischen Abtastkopf und Maßstab bzw. Maßband auskommen. Typische Einsatzgebiete dieser Geräte sind Messmaschinen, Komparatoren und andere Präzisionsgeräte sowie Fertigungs- und Messeinrichtungen. Um das Messsystem zu schützen und den Einbau des Systems zu vereinfachen, wird ein gekapseltes System verwendet. Ein Hersteller für Längenmessgeräte ist die Firma Heidenhain. Die gekapselten Messgeräte werden in diversen Ausführungen angeboten. Wichtig für die Applikation ist die Genauigkeitsklasse, der Messschritt und die Schnittstelle.

4.6 Krafterfassung

Die Messkette besteht aus einem Sensor, einem Verstärker und einem Datenerfassungsgerät. Das Kapitel 4.6.1 gibt einen Überblick über verschiedene Möglichkeiten der Krafterfassung, anschließend wird auf den Aufbau des Systems und dessen Aufgaben eingegangen. Abschließend werden die Kenndaten des Sensors zusammengefasst. Das nächste Element in der Messkette stellt die Signalkonditionierung dar und wird im Kapitel 4.6.2 beschrieben. Es werden die Aufgaben der Signalkonditionierung erläutert und deren Einfluss auf die Messung. Abschließend wird im Kapitel 4.6.3 erläutert, wie die Wandlung des analogen Signals in ein digitales erfolgt und welche Geräte zum Einsatz kommen.

Tabelle 4.8: Gegenüberstellung von Längenmessgeräten

Beschreibung	Gerät 1	Gerät 2
Hersteller	Heidenhain	Heidenhain
Modell	LS 177	LS 477
Genauigkeitsklasse	$\pm 5\mu m$	$\pm 5\mu m$
Messlänge	240 mm	220 mm
Schnittstelle	TTL	TTL
Signalperiode	$2\mu s$	$2\mu s$
Integrierte Interpolation	10-fach	10-fach
Abtastfrequenz	50 kHz	50 kHz
Flankenabstand	$\geq 0,25\mu s$	$\geq 0,25\mu s$
Messschritt	$0,5\mu s$	$0,5\mu s$
Spannungsversorgung	5 V	5 V
Verfahrensgeschwindigkeit	$\geq 60 m/min$	$\geq 60 m/min$
Vorschubkraft	$\geq 4N$	$\geq 4N$
Preis	496 Euro	541 Euro

**Abbildung 4.18:** Blockschaltbild Signalerfassung

4.6.1 Kraftsensor

Sensoren haben die Aufgabe, die Messgröße mit einem eindeutigen und mathematisch beschreibbaren Zusammenhang in ein weiterverarbeitbares Messsignal umzuformen [13]. Entsprechend dem Messprinzip wird zwischen direkten und indirekten Kraftsensoren unterschieden. Laut [17] wird unterteilt:

- Direkt durch mechano-elektrische Effekte
 - Piezoelektrischer Sensor $\Delta Q = f(F)$
 - Piezoresistiver Sensor $\Delta R = f(F)$
 - Magnetoelastischer Sensor $\Delta L = f(F)$
- Indirekt durch Zwischengrößen
 - Schwingungsseite $f = f(F)$ und Frequenzzählsensor $n = f(F)$
 - Federelement $s = f(F)$ und Wegsensor $U = f(F)$
 - Dehnmessstreifen (DMS) $\varepsilon = f(F)$ und Messbrücke $\delta R = f(F)$

In diesem Messsystem kommt eine Miniatur-Wägezelle zum Einsatz. Diese besteht aus einem Biegebalken (Federkörper), auf welchem DMS in Form einer Vollbrücke platziert wurden. Durch die Krafteinleitung wird das Metall elastisch verformt, die Kraft wird in einen linearen Weg gewandelt. Durch die Verformung ändern die DMS ihren elektrischen Widerstand (Thomson-Effekt), was dazu führt, dass sich die Ausgangsspannung an der Brücke (Wheatston Brücke) ändert. Je kleiner der Messbereich, desto empfindlicher und genauer ist die Messung.

Kennlinie des Sensors

Wie bereits erwähnt ist die Aufgabe des Sensors, die Messgröße (F) in ein Messsignal (s) zu wandeln. Bei einem linearen Zusammenhang wird die Messgröße mit einem Faktor multipliziert und man erhält das Messsignal. Bei der Wägezelle ist dieser Faktor die Steigung der Geraden und berechnet sich aus dem Verhältnis Nennkennwert (S_N) zu Nennkraft (F_N): [13].

$$s = \frac{S_N}{F_N} \cdot F \quad (4.75)$$

Das Ausgangssignal des Sensors ist die Differenzspannung (U_D) der Brückenschaltung, da diese abhängig von der Brückenspeisenspannung ist, wird das Ausgangssignal im Verhältnis zur Speisenspannung (U_S) gesetzt. Daraus resultiert:

$$s = \frac{U_D}{U_S} \quad (4.76)$$

Die Formel zeigt, dass das Ausgangssignal des Kraftsensors von der Speisenspannung abhängt: je höher die Speisenspannung, desto höher das Ausgangssignal. Im unbelasteten Zustand liegt die Ausgangsspannung bei 0 mV/V , bei voller Auslastung (full-scale), liegt die Ausgangsspannung $s = S_N$.

Auswahl Kraftsensor

Als Kraftsensor wird der KD 45 von der Firma ME-Meßsysteme GmbH eingesetzt¹¹. Folgend werden die wichtigsten Eigenschaften und Kennwerte der Wägezelle, entnommen aus dem Datenblatt des KD 45 beschrieben. Am freien Ende des Balkens erfolgt die Einleitung der Kraft. Die Kraftmessung geschieht durch das Doppelbalken-Messprinzip. Dadurch sind diese Kraftsensoren weitgehend unempfindlich gegen Verschiebung der Krafteinleitung. Dieser Sensortyp wurde zur Kraftmessung von Schaltkraft und Betätigungskraft entwickelt. Der Nennkraftbereich¹² liegt bei $\pm 20N$, die Genauigkeitsklasse¹³ wird mit 0.1 beziffert.

¹¹Der Sensor wurde vom Partner Systec empfohlen, welche diesen Sensor bereits seit Jahren bei ihren Produkten verbauen.

¹²Kraftbereich, in welchem der Sensor optimal arbeitet.

¹³Maximale Abweichung von einem gemessenen Wert zum wahren Wert.



Abbildung 4.19: KD45

Tabelle 4.9: Technische Daten des KD 45

Beschreibung	Wert	Einheit
Nennkraft F_N	20	N
Nennmessweg	0,020	mm
Gebrauchskraft	80	N
Bruchkraft	280	N
Nenntemperaturbereich	10...60	°C
Nennkennwert S_N	0,5	mV/V
Max. Speisespannung	10	V
Linearitätsfehler	0.1	% S_N

4.6.2 Signalkonditionierung

Bei der Signalkonditionierung wird das Signal des Sensors in eine Form gebracht, sodass es sich als Eingabe für das Datenerfassungsgerätes eignet. Zu dieser Konditionierung gehört: Verstärkung¹⁴, Dämpfung, Filterung und Isolierung.

Das Ausgangssignal (s) beträgt 0.5 mV bei 20 N Kraftbeaufschlagung. Daher wird ein Messverstärker eingesetzt. Dieser hat mehrere Aufgaben:

- er stellt eine Brückenspeisespannung (U_s) mit höchster Stabilität zur Verfügung,
- er verstärkt die Differenzspannung (U_d) und formt sie in einen geeigneten Anzeigewert um (definiertes Übertragungsverhalten),
- er sorgt für ein gutes dynamisches Verhalten,
- er hat geringe Rückwirkung auf die Messgröße.

Das Ausgangssignal (s) des Sensors ist das Eingangssignal des Verstärkers. Wieder besteht ein linearer Zusammenhang. Die Steigung ist die Dif-

¹⁴Verstärkung = Verhältnis Eingang zu Ausgang

Tabelle 4.10: Technische Daten des GSV-1

Beschreibung	Wert	Einheit
Verstärkungsfaktor A	2, 1, 0.5, 0.2	mV/v
Ausgangssignal	± 10	V
Brückenspeisspannung	5	V
Genauigkeitsklasse	0.1	-
Nenntemperaturbereich	-10...+65	$^{\circ}\text{C}$
Grenzfrequenz	250	Hz

ferenz aus Messbereichsendwert (U_A) zu Eingangsempfindlichkeit (u_E) [13]. Die Ausgangsspannung berechnet sich dann wie folgt:

$$U = \frac{U_A}{u_E} \cdot s \quad (4.77)$$

Wird die Formel 4.76 in die Formel 4.77 eingesetzt ergibt sich:

$$U = \frac{S_N}{F_N} \cdot \frac{U_A}{u_e} \cdot F \quad (4.78)$$

Auswahl Verstärker

Zum Kraftsensor KD 45 muss ein passender Verstärker ausgewählt werden. Die Firma ME-Meßsysteme bietet auch Verstärker mit Analogausgang an. Der Typ GSV-1A ist kompatibel mit dem Sensor und besitzt einen Spannungsausgang $\pm 10\text{V}$. Die wichtigsten technischen Daten können der Tabelle 4.10 entnommen werden. Der Skalierungsfaktor des Gesamtsystems kann nun mit der Formel 4.79 berechnet werden. Der mechanische Messbereich des Kraftsensors ist $F_N = 20 \text{ N}$. Das elektrische Ausgangssignal des DMS ist $S_N = 0.5 \text{ mV/V}$. Der elektrische Messbereich des Verstärkers wird auf $u_E = 1 \text{ mV/V}$ eingestellt. Das elektrische Ausgangssignal des Messverstärkers bei u_E beträgt $U_A = 10 \text{ V}$. Somit ergibt sich folgende Berechnung:

$$U = \frac{0.5 \text{ mV/V}}{20 \text{ N}} \cdot \frac{10 \text{ V}}{1 \text{ mV/V}} \cdot F = 0.25 \text{ V/N} \cdot F \quad (4.79)$$

Der Skalierungsfaktor für die gesamte Messkette beträgt $0.25 \text{ V/N} \cdot F$. Bei voller Auslastung (20 N) liegt somit am Ausgang des Verstärkers 5 V an. Bei der ausgewählten Eingangsmessempfindlichkeit von 1 mV/V wird der Verstärker lediglich zu 50% angesteuert, da der Sensor ein Ausgangssignal von 0.5 mV/V abgibt.

4.6.3 Datenerfassungsgerät

Die Hauptaufgabe des Datenerfassungsgerätes ist die Wandlung des analogen Signals in eine digitale Form, sodass der Computer die Daten verarbeiten kann. Analoge Signale ändern sich im Laufe der Zeit kontinuierlich, ein

Tabelle 4.11: Eigenschaften unterschiedlicher Bus-Übertragung [21]

Bus	Signalverlauf	Einzelpunkt - I/O	Geräte-synchronisation	Mobilität	Verteilte Messungen
PCI	132MB/s	++++	+	++	++
PCI Express	250MB/s	++++	+	++	++
PXI	132MB/s	+++	++++	+	+++
PXI Express	250MB/s	++++	++++	+	+++
USB	60MB/s	+	++	++++	+
Ethernet	125MB/s	++	++	+++	++++
Wireless	6.75MB/s	++	++	++++	++++
Legende: +++ sehr gut, ++ gut, + befriedigend, 0 ausreichend					

A/D-Wandler erfasst mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit regelmäßig das Signal. Diese Punkte werden *Abtastwerte* oder *Samples* genannt. Diese diskretisierten Werte werden an den Computer geschickt und aus ihnen wird das ursprüngliche Signal rekonstruiert. Die erfassten Signale werden über einen Bus an den Rechner gesendet [30]. Ein wichtiger Faktor ist hierbei die Abtastrate, diese gibt an, mit welcher Geschwindigkeit das Signal abgetastet werden soll, um bei der Rekonstruktion einen ausreichend kleinen Fehler zu erhalten. Die Abtastrate einer Anwendung hängt von der Maximalfrequenz des Signals ab, welches gemessen werden soll. Typische Geschwindigkeiten sind rund 2 MS/s [23]. Die Auflösung des Gerätes bestimmt die kleinste noch feststellbare Veränderung eines Signals. Die Auflösung beschreibt die Anzahl der binären Zahlenwerte, die dem A/D-Wandler zur digitalen Repräsentation eines Analogsignals zur Verfügung steht [23]. Die Datenmenge, welche über den Bus läuft, hängt von den Abtastrate und zu erzielbaren Auflösung ab. Die Mindestbandbreite kann ermittelt werden, indem die Anzahl der Bytes pro Abtastwert (aufgerundet auf das nächste Byte) mit der Abtastgeschwindigkeit und anschließend mit der Anzahl der Kanäle multipliziert wird. [21]. Die Tabelle 4.11 gibt einen Überblick über gängige Busse bei DAQ-Geräten.

Auswahl Datenerfassungsgerät

Abtastwerte: In dieser Anwendung soll bei jedem Schritt, also pro Mikrometer, das Signal erfasst werden. Bei einer maximalen Geschwindigkeit von 20 mm/s muss das Signal eine sample-rate von mindestens 20 kS/s besitzen.

Auflösung: Mit der Formel $2^N = Z$ lässt sich die Anzahl der Zustände Z berechnen, welche mit einer gegebenen Anzahl von Bits N möglich sind. Bei

einem 12 bit-Wandler können 4096 Zustände abgebildet werden, mit einem 16 bit-Wandler bereits 65536 Stufen. Die geforderte minimale Kraftauflösung liegt bei $0.005 N$. Dies ergibt $\frac{40 N}{0.005 N} = 8000$. Um 8000 Zustände auflösen zu können, wird die obige Formel auf N gelöst, dies ergibt $N = \log_2(Z) = \log_2(8000) \approx 13 \text{ bit}$. Auf eine gerade Zahl an Bytes aufgerundet bedeutet dies, dass die Auflösung rund 16 bit betragen sollte.

Bus-Übertragung: Bei einer Datenerfassung mit 16 bit-Auflösung (2 Bytes) und einer Abtastung mit 20 kS/s auf ein Kanälen ergibt sich eine Übertragung von mindestens:

$$\frac{2 \text{ bytes}}{S} \cdot \frac{20 \text{ kS}}{s} = 40 \text{ kB/s} \quad (4.80)$$

Spannungsbereich Eingang: Der Ausgewählte Verstärker in Kapitel 4.6.2 besitzt eine analoge Ausgangsspannung von $\pm 10 \text{ V}$; diesen Bereich sollte das Datenerfassungsgerät abdecken können.

Zudem müssen die Signale des Längenmessgerätes erfasst werden. Die Längenmessgeräte aus 4.10.3 besitzen eine Periode von $4 \mu\text{m}$. Der Quadraturencoder besitzt 3 binäre Datenleitungen, welche sich während einer Periode ändern können. Bei einer maximalen Geschwindigkeit von 20 mm/s kann die Datenrate berechnet werden: $\frac{3 \text{ bit}}{4 \mu\text{m}} \cdot \frac{20000 \mu\text{m}}{s} = 15000 \frac{\text{bit}}{s} = 1.875 \frac{\text{kB}}{s}$.

In Zusammenarbeit mit National Instruments wurden zwei Lösungen erarbeitet. Zum einen das cRIO 9030 oder ein Modell der x-Serie (6343).

cRIO ist ein leistungsstarker Controller, welcher sich für anspruchsvolle Steuer-, Regel- und Überwachungssysteme eignet. Auf dem Gerät läuft das Betriebssystem NI Linux Real-Time, ein Echtzeitsystem. Das Gerät ist modular erweiterbar, so können diverse Interface Module erworben werden, zum Beispiel das NI 9237, ein Modul um Brückenschaltungen auszuwerten. Das Gerät besitzt einen HDMI Ausgang, dadurch kann ein Monitor angeschlossen werden und es kann als stand-alone Gerät verwendet werden. Nachteilig bei diesem System sind die relativ hohen Investitionskosten von rund 11000 Euro für Hard- und Software.

Eine weitere Alternative ist die x-Serie von National Instruments, ein relativ einfaches Datenerfassungsgerät. Dieses wird über USB mit einem Rechner verbunden und in ein LabVIEW Programm integriert. Aus dieser Konfiguration ergibt sich, dass das System nicht echtzeitfähig, nicht modular und nicht in stand-alone betrieben werden kann. Die Kosten sind allerdings relativ niedrig (1600 Euro) und für reine Messungen ohne komplexe Regelungsaufgaben ist das Gerät ausreichend.

4.7 Überlastschutz

Zum Schutz des Systems müssen diverse Vorkehrungen getroffen werden. Damit bei falscher Programmierung die Längenmessgeräte nicht zerstört

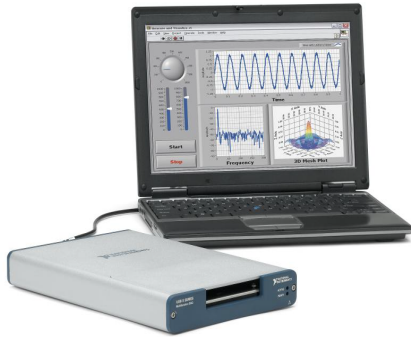


Abbildung 4.20: NI xSerie



Abbildung 4.21: NI cRIO

Tabelle 4.12: Technische Daten des NI x-Serie USB-6341

Beschreibung	Wert	Einheit
ADC Auflösung	16	bit
Max Abtastwerte	500	kS/s
Analog Eingang	± 10	V
DAC Auflösung	16	bit
Max Updatewerte	900	kS/S
Analog Output	± 10	V
Digital I/O	24	LVTTL
Timer	4	/

werden, sind diese etwas länger als die Lineareinheiten. Bei inkorrektur Programmierung fährt der Schlitten mechanisch an die Endanschläge, der Controller erkennt einen Überlast und fährt zurück in eine sichere Position. Um den DMS vor Beschädigung sowie die Taste des Prüflings vor zu hohe Kraft, welche zu einer Beschädigung am Taster führen könnte, zu schützen, wird am Prüfkopf ein Überlastschutz integriert. Dieser besteht aus einer Linearführung und einer Feder. Übersteigt die eingepägte Kraft die Vorspannkraft der Feder, wird der Kopf parallel zur Kraft verschoben. Dafür wurden zwei unterschiedliche Konzepte erstellt:

- Variante 1: Durch die Feder wird eine Rolle in eine Mulde gepresst, der Anpressdruck sorgt dafür, dass sich der Messkopf solange nicht verschiebt, bis die eingeleitete Kraft größer als der Anpressdruck ist. Vorteilhaft bei dieser Konstruktion ist, dass die Dehnung der Feder wesentlich kleiner ist als der Verschiebeweg, wodurch die eingestellte Überlastkraft nicht mehr wesentlich ansteigen wird.
- Variante 2: Die Federn liegen parallel zur Krafteinleitung, damit sum-

mieren sich die Federkonstanten. Durch Schrauben werden die Federn vorgespannt, sodass sie eine Kraft F_C erzeugen. Sobald die eingeleitete Kraft die Federkraft übersteigt, bewegt sich der Messkopf parallel zur Kraft. Anschließend steigt die Kraft nur noch entsprechend der Federkonstante an. Verglichen zu Konstruktion der Variante 1 müssen weniger Bauteile gefertigt werden.

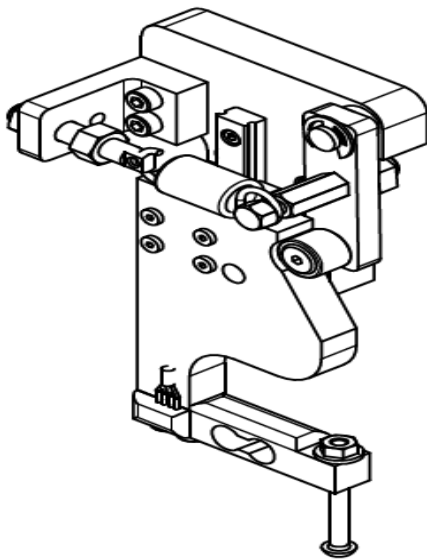


Abbildung 4.22: Variante 1

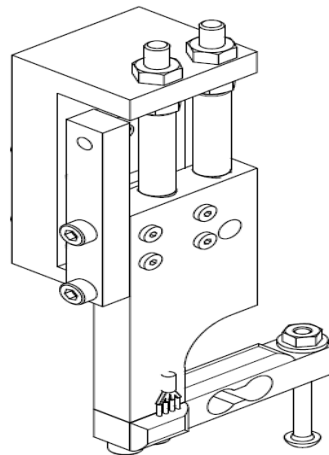


Abbildung 4.23: Variante 2

Ein Nachteil bei Variante 2 ist der relativ starke Anstieg der Federkraft. Durch den begrenzten Platz ergibt sich für die Federn ein Durchmesser von rund 8 mm und eine Länge von ca. 35 mm . Die Federn sollen mindestens eine Kraft von 20 N aufbringen, damit sich das Bauteil nicht vorher bewegt. Wählt man beispielsweise eine Feder mit c von 2 N/mm ergibt sich ein Vorspannweg von $\Delta l = \frac{F}{c_1 + c_2} = \frac{20\text{ N}}{4} = 4\text{ mm}$. Eine Druckfeder kann maximal um eine Länge f zusammengedrückt werden. Bei einer solchen Feder kann mit einem $f = 14\text{ mm}$ gerechnet werden. Abzüglich des Vorspannweges steht lediglich ein Weg von 10 mm zur Verfügung und F_C steigt linear auf 56 N an. Die Kraft liegt zwar unter der Gebrauchskraft des Sensors, aber der Weg ist relativ kurz. Für einen längeren Weg müsste die Konstruktion extrem verlängert werden. Im Gegensatz dazu kann die Länge der Konstruktion bei Variante 2 wesentlich verkürzt werden und die Kraft der Feder ist indirekt mit dem Verschiebeweg gekoppelt. Die Steigung nach der Mulde bestimmt im Wesentlichen den Kraftanstieg, wodurch die Kraftenkoppelung deutlich effektiver ist. Aus diesem Grund wird Variante 1 gewählt.

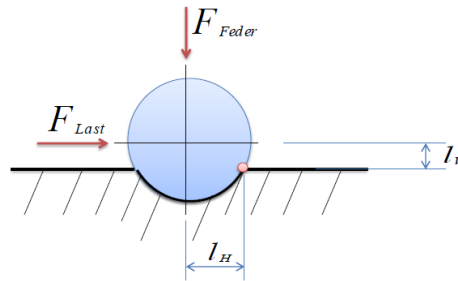


Abbildung 4.24: Federkraft

Folgend eine Berechnung der benötigten Vorspannkraft, welche zur Auslegung des Systems benötigt wird. Die Abbildung 4.24 zeigt eine Prinzipskizze. Die Kraft (F_{Last}) wirkt, wenn das Messgerät auf das Messobjekt trifft. Die Federkraft (F_{Feder}) drückt die Kugel in die Mulde und verhindert, dass sich die Kugel aus ihrer Position bewegt. Sobald das Drehmoment (M_{Last}) verursacht durch die Last größer ist als das Rückhaltemomente (M_{Feder}), dreht sich die Kugel um den rot markierten Punkt aus der Mulde.

$$M_F = M_L \quad (4.81)$$

$$F_F \cdot l_H = F_L \cdot l_V \quad (4.82)$$

Umgeformt auf F_F und angenommen $F_L = 20 \text{ N}$, $l_H = 3.4 \text{ mm}$ und $l_V = 4.0 \text{ mm}$ ergibt sich:

$$F_F = \frac{F_L \cdot l_V}{l_H} = \frac{20 \text{ N} \cdot 4 \text{ mm}}{3.4 \text{ mm}} = 23,529 \text{ N} \quad (4.83)$$

Daraus resultiert, dass bei den angenommen Geometrien eine Federkraft von rund 24 N benötigt wird, danach löst die Feder aus. Mit dieser Berechnung kann der Tastkopf konstruiert werden.

4.8 LIN/CAN - Adapter

Moderne Eingabegeräte verfügen bereits über eine gewisse Intelligenz, d.h. die Schalter werden in den seltensten Fällen widerstandskodiert, sondern die Signale werden bereits im Schalter bzw. der Baugruppe digitalisiert. Zusätzlich erhält die Baugruppe durch einen Microcontroller eine Intelligenz. Damit kann das Gerät komplexere Aufgaben wie z.B. Diagnosefunktionen oder die Auswertung eines Touchpads bewältigen. Entsprechend der Datenmenge, der geforderten Geschwindigkeit und dem Preis der Baugruppen



Abbildung 4.25: BabyLin und Peak Adapter

werden die Systeme mit LIN oder CAN-Bus an ein übergeordnetes Steuergerät (Master) geschlossen. Es ist davon auszugehen, dass das Messsystem auch dazu verwendet wird, automatische Funktionstest durchzuführen. Dazu ist eine Mastersimulation mit dem Laptop notwendig, was eine Kommunikation mit dem Slave ermöglicht und wodurch überprüft werden kann, ob das Bauteil entsprechend der Spezifikationen funktioniert. Für diesen Zweck wird zwischen Laptop und Bauteil ein Adapter geschaltet. Mit der Buskonfiguration können zwar Funktionstests durchgeführt werden, der exakte Schaltzeitpunkt der Tasten lässt sich aufgrund der Latenzzeit nicht mehr exakt bestimmen und sollte deshalb lediglich als Anhaltspunkt verwendet werden. Um LIN-Slaves anzuschließen, wird ein Adapter von der Firma Lipowsky, Modellname Baby-Lin verwendet (siehe Abb. 4.25) um CAN-Slaves anzuschließen, wird ein Adapter von der Firma PEAK verwendet, ebenfalls in der Abbildung.

4.9 Systemsteuerung

Der Computer steuert das Messsystem, ist also verantwortlich für die Verarbeitung, Darstellung und Speicherung der Messdaten sowie für die Steuerung des Motors. Die Software stellt die Interaktion zwischen Anwender und Rechner zur Verfügung, sie stellt die Analyse und die Darstellung der Messdaten bereit. Maßgeschneiderte Anwendungen werden häufig eingesetzt, wenn mehrere Funktionen eines Datenerfassungsgeräts automatisiert, Signalverarbeitungsalgorithmen ausgeführt und individuell angepasste Benutzeroberflächen angezeigt werden [30]. Für dieses Messsystem wird ein Laptop mit Betriebssystem Windows 7 64-bit verwendet. Im Laptop befindet sich ein Intel i7 CPU mit einer Taktrate von 2.80 GHz. Die Tabelle 4.13 zeigt eine Gegenüberstellung unterschiedlicher Computer. Als Anwendungssoftware

Tabelle 4.13: Vergleichstabelle Computer [22]

	PXI-System	Desktop	Industrie-PC	Laptop	Netbook
Verarbeitungsleistung	++++	++++	+++	+++	++
Kompatibilität des Betriebssystems	++++	++++	++	+++	++
Modularität	++++	++++	+++	++	++
Robustheit	+++	+++	++++	++	++
Mobilität	+++	++	++	++++	++++
Kosten	++	+++	++	++	++++
Legende: +++ sehr gut, ++ gut, + befriedigend, 0 ausreichend					

wird LabVIEW professional 8.5 verwendet.

4.10 Gesamtsystem

Gemäß dem V-Modell entspricht dieser Abschnitt der Komponentenebene. Im folgenden Kapitel 4.10.1 wird die entwickelte Konstruktion erläutert. Anschließend werden die Verkabelung und die notwendigen Spannungsversorgungen besprochen, Kapitel 4.10.2. Kapitel 4.10.3 beschäftigt sich mit der Programmierung der einzelnen Module und wie diese zusammengefügt wurden.

4.10.1 Konstruktion

Nachdem alle relevanten Komponenten ausgewählt und Berechnungen durchgeführt wurden, anhand derer sich konstruktive Maßnahmen abschätzen lassen, wird ein CAD-Modell erstellt. Viele der Komponenten wie Linearsystem mit Getriebe, Portalsystem, Dehnmessstreifen etc. konnten von den jeweiligen Herstellern bezogen werden und mussten nicht mehr konstruiert werden. Die Abbildung 4.26 zeigt eine isometrische Ansicht des Gesamtsystems. Die Gesamtabmaße des Systems betragen $522 \text{ mm} \cdot 375 \text{ mm} \cdot 466 \text{ mm}$. Auf der Bodenplatte (siehe Anhang B) wird eine Linearführung und die in Kapitel 4.3.3 ausgelegte Lineareinheit LX26 geschraubt, diese wird angetrieben mit dem Motor, der in Kapitel 4.4.2 ausgelegt wird. Verbunden wird der Schlitten der Linearführung mit einer Grundplatte (siehe Anhang B), auf welcher der Aufnehmer für das Messteil gesteckt wird. Dadurch wird sichergestellt, dass verschiedene Aufnehmer schnell gewechselt werden und unterschiedliche Messobjekte einfach und effizient getestet werden können. Auf der Bodenplatte befindet sich zudem das Längenmessgerät der Firma Heidenhain,

womit der Verfahrweg exakt gemessen werden kann, um die Reproduzierbarkeit sicherzustellen. Auf der Bodenplatte wird das Portalsystem verschraubt. Auf dem Portalsystem befinden sich zwei weitere Linearsysteme. Zum einen das Modell LX20, berechnet in Kapitel 4.3.2 und angetrieben durch einen in Kapitel 4.4.1 berechneten Schrittmotor. Zum anderen das Modell LX26. Der Verfahrweg beider Achsen wird von einem Heidenhain Längenmessgerät vom Typ LS477 überwacht. Auf der LX20 Lineareinheit befindet sich der Messkopf (siehe Kapitel 4.7); um ihn vor Beschädigung zu schützen ist er mit einer Überlastsicherung ausgestattet. Die Hand nimmt den Kraftmesser auf, die Kette der Signalerfassung ist in Kapitel 4.6 beschrieben. Die Tabelle A.4 fasst die wichtigsten Komponenten zusammen. Die Fertigungszeichnungen der einzelnen Bauteile befinden sich im Anhang B. Die Datenblätter der Zukaufteile finden sich auf der DVD oder können auf der Website der Hersteller bezogen werden.

Überprüfung der Annahmen

In Kapitel 4.2.1 wurde die Last auf das Portalsystem auf 120 N abgeschätzt. Durch die Konstruktion lässt sich berechnen, dass die Summe der Massen lediglich 2.4 kg also rund 24 N beträgt und das gewählte Profil verwendet werden kann.

In Kapitel 4.3.2 wurde die Lastmasse auf 10 kg geschätzt, tatsächlich liegt lediglich eine Masse von 1.122 kg an. Das System ist also für die Applikation geeignet.

In Kapitel 4.3.3 wurde das Lastmoment auf 20 kg geschätzt. Tatsächlich liegt eine Masse von nur 1.521 kg an. Somit ist validiert, dass das System den Anforderungen genügt.

In Kapitel 4.3.4 wurde davon ausgegangen, dass die Lastmasse wesentlich geringer ist als die Masse auf der X-Achse. Da dieselben Lineareinheiten verwendet werden, wurde nicht erneut eine Berechnung angestellt, diese Behauptung konnte mit der Konstruktion bewiesen werden.

Querbelaastete Schrauben: Die beiden Platten der Z-Halterung werden mittels Durchsteckschrauben verbunden, dies bedeutet, die Querkräfte werden durch Reibung übertragen, erzeugt durch die Längskraft der Schraube. Folgende Berechnung dient zum Überprüfen, ob die gewählte Schraubenzahl und der Schraubendurchmesser ausreicht. Nach [15] lautet die Formel zur benötigten Verschraubkraft:

$$F_V = \frac{F_Q \cdot S_R}{n \cdot m_i \cdot \mu} < F_{M,Zul} \quad (4.84)$$

Querkraft (F_Q)

Schraubenzahl (n)

Schnittzahl (m_i)

Sicherheit gegen Rutschen (n)

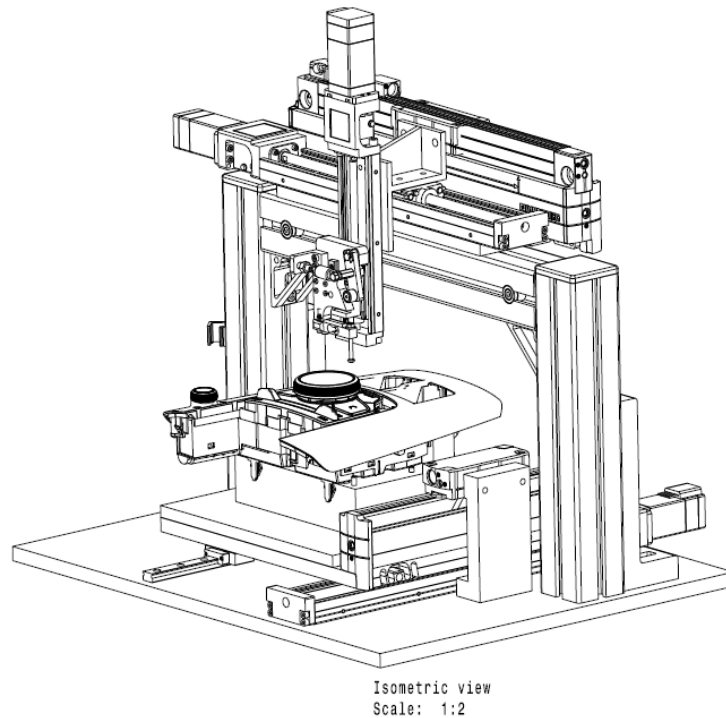


Abbildung 4.26: System Skizze CAD

Reibwert zwischen den Teilen (μ)
 Zulässige Montagevorspannkraft ($F_{M,zul}$)

Wie bereits oben erwähnt liegt die Masse des Messkopfes bei 1.122 kg , damit berechnet sich $F_Q = 1.22 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 = 12 \text{ N}$. Der Sicherheitsfaktor gegen Rutschen, entnommen aus [15] liegt bei 1.25. Der Reibwert zwischen Aluminiumteilen beträgt 1.05. Die Werte in die Gleichung 4.84 eingesetzt ergibt:

$$F_V = \frac{1.22 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 1.25}{1.05 \cdot 6 \cdot 1} = 2.38 \text{ N} \quad (4.85)$$

Die gewählten Schrauben bestehen aus 34CrMo4 und besitzen eine Festigkeitsklasse von 12.9. M2-Schrauben dieser Klasse haben eine zulässige Vorspannkraft von 1.520 kN [28]. Da $1.520 \text{ kN} > 2.38 \text{ N}$ ist die gewählte Schraubverbindung ausreichend.

4.10.2 Verkabelung

Die Abbildung 4.27 zeigt die physikalische Verkabelung des Messsystems. Die Längenmessgeräte besitzen einen 12-Pol-Stecker, von dem 8 Pole ver-

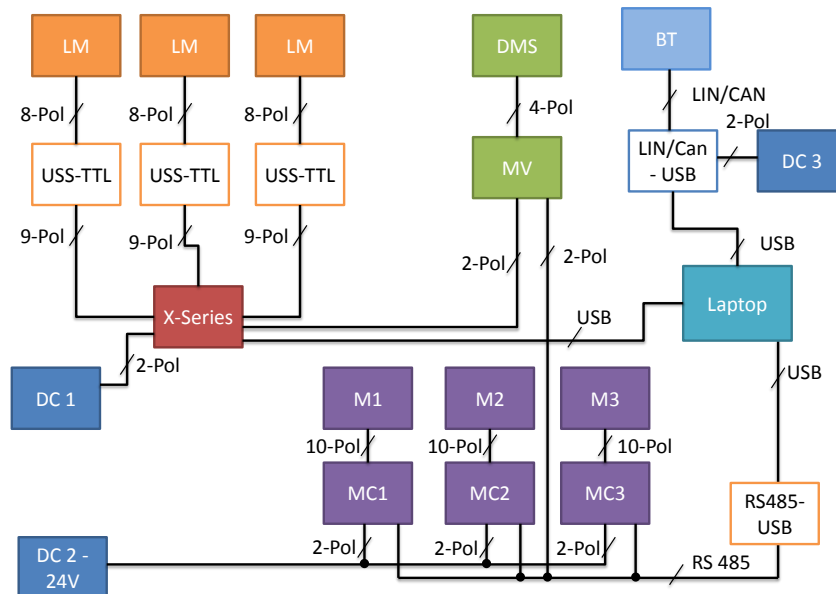


Abbildung 4.27: Blockschaltbild der Verkabelung

wendet werden. Die Längenmessgeräte liefern analoge Ausgangssignale. Diese werden konvertiert in ein digitales Signal. Der Ausgang des Konverters ist ein 15-Pol-Stecker von dem 9 Pole verwendet werden. Die X-Serie unterstützt jedoch keine differentielle Quadratur-Encoder, deshalb werden die negierten Signale nicht in die X-Serie eingeführt. Die X-Serie selbst kann nicht vom USB mit Spannung versorgt werden und benötigt eine eigene Spannungsquelle. Der Dehnmessstreifen (DMS) benötigt aufgrund der Brückenbeschaltung vier Leitungen; diese kommen vom Messverstärker, welcher extern mit Spannung versorgt wird. Die Ausgangsspannung des Messverstärkers (MV) wird an den Analogeingang der X-Serie geschaltet. Die X-Serie ist per USB mit dem Laptop zusammengeschlossen. Zwei weitere USB-Anschlüsse werden benötigt. Einer dient dem Senden und Empfangen von LIN/CAN-Nachrichten. Dafür wandelt ein Adapter die CAN/LIN-Busnachrichten in eine Form, sodass sie über USB laufen können. Die Adapter werden über den USB gespeist, das Bauteil hängt, wie in der Automobilbranche üblich, auf einer 12 V-Spannungsversorgung. Der andere USB wird verwendet, um Modbus-Nachrichten zu versenden. Ein Adapter wandelt USB zu RS485 um, welche in den ersten Motorcontroller geführt wird, die Motorcontroller sind in Reihe geschaltet. Die Modbus-Nachrichten werden vom Controller aufbereitet und durch ein 10-Pol-Kabel an den Motor gesendet. Die Controller müssen mit 24 V-DC versorgt werden.

4.10.3 Programmierung

Motorsteuerung

Wie bereits erwähnt besitzt der Treiber einen eingebauten Controller, in welchem gewisse Bewegungsprofile gespeichert werden können. Natürlich können diese auch während der Laufzeit vom LabVIEW-Programm verändert werden. Im Folgenden werden die wichtigsten Parameter und Modi vorgestellt, damit der Leser versteht, wie der Motor programmiert wurde. Die Beschreibung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern es wird auf die Dokumentation des Herstellers verwiesen. Der Controller kann in verschiedene Betriebsmodi betrieben werden, zu den wichtigsten zählen:

- Positioning Operation: einzelne Positionen werden angefahren, indem der Motor beschleunigt bis die vorgegebene Geschwindigkeit erreicht wird, anschließend abbremst. Position, Geschwindigkeit, Be- und Entschleunigung werden als Parameter im Controller gespeichert.
- Continuous Operation: Motor beschleunigt und behält seine Geschwindigkeit konstant bei bis er durch einen Input gezwungen wird, seinen Betrieb zu verändern.
- Return-to-home Operation: nach Einschalten der Stromversorgung oder nach Erreichen einer bestimmten Position verfährt der Motor an eine vorgegebene Position (home).

Entsprechend dem gewünschten Betrieb müssen diverse Parameter in den Controller geschrieben werden, die Parameter werden eingeteilt in:

- I/O Parameter: in dieser Parameterliste wird beispielsweise eingestellt, wie der Motor reagieren soll, wenn er eine eingestellte Anzahl von Schritten verfahren ist. Dies ist insbesondere bei der Lineareinheit hilfreich, um zu verhindern, dass der Tisch anschlägt.
- Motor Parameter: zum Beispiel *smooth dirve* ein/aus, diese Funktion reduziert das Zittern des Motors beim Schritteverfahren.
- Operation Parameter: zum Beispiel Einheit der Beschleunigung ms/kHz oder s .
- Return-to-home Parameter: hier wird die Art und Weise wie der Motor zur Homeposition verfährt eingestellt. Da in der Konstruktion keine Endanschläge vorgesehen sind, wird die Funktion *Pushing* verwendet. Diese bedeutet, dass der Motor solange fährt, bis er irgendwo auftrifft. Der Motorstrom steigt dadurch über einen angegebenen Schwellenwert, ausgehend von dieser Position fährt der Motor zurück. Dies ist der neue Home-Punkt.
- Alarm/warning Parameter: diverse Einstellungen zur Überwachung des Motors, zum Beispiel Überlastschutz.
- Coordination Parameter: hier wird per Software die maximale Anzahl an Schritten, welcher der Motor verfahren kann, angegeben. Dadurch

Operation data	I/O	I/O function[RS-485]	Motor	Operation	Home operation	Alarm	Warning	Coordinates					
#0	Positioning mode	Position [step]	Operating speed [Hz]	Operating mode	Push current [A]	Dwell time [s]	Sequential positioning	Acceleration [ms⁻²Hz or [s]	Deceleration [ms⁻²Hz or [s]				
#0	ABS	0	10000	Single	20.0	0.000	Disable	0.500	1.000				
#1	INC	55000	10000	Single	20.0	2.000	Disable	1.000	1.000				
#2	INC	2000	500	Single	20.0	0.500	Disable	1.000	1.000				
#3	INC	-2000	500	Single	20.0	0.000	Disable	1.000	1.000				
#4	INC	35000	10000	Single	20.0	0.500	Disable	1.000	1.000				
#5	INC	2000	5000	Single	20.0	0.000	Disable	1.000	1.000				
#6	INC	-2000	5000	Single	20.0	0.000	Disable	1.000	1.000				
#7	INC	10000	10000	Single	20.0	2.000	Disable	1.000	1.000				
#8	INC	1000	500	Single	20.0	0.500	Disable	1.000	1.000				
#9	INC	-1000	500	Single	20.0	0.000	Disable	1.000	1.000				
#10	INC	-1000	500	Single	20.0	0.000	Disable	1.000	1.000				
#11	INC	1000	1000	Single	20.0	0.000	Disable	1.000	1.000				
#12	INC	-1000	1000	Single	20.0	0.000	Disable	1.000	1.000				
#13	INC	1000	2000	Single	20.0	0.000	Disable	1.000	1.000				
#14	INC	-1000	2000	Single	20.0	0.000	Disable	1.000	1.000				

Abbildung 4.28: Programmausschnitt von Orientalmotor

lässt sich auch ohne Endschalter vermeiden, dass der Motor hart auf die Enden der Lineareinheit fährt. Zudem kann die Auflösung (Schritte pro Umdrehung) eingestellt werden, indem die Werte der Parameter *electronic gear A* und *electronic gear B* verändert werden. Die Auflösung berechnet sich wie folgt:

$$Res = 1000 \cdot \frac{ElectronicgearB}{ElectronicgearA} \quad (4.86)$$

Für die Z-Achse wird die Formel 4.86 zu:

$$Res = \frac{360^\circ}{0.36^\circ} = 1000 \quad (4.87)$$

Deshalb werden *electronic gear A* und *electronic gear B* auf 1 gesetzt.

- Communication Parameter: allgemeine Einstellungen für den Modbus.
- I/O function [RS485] Parameter: Controller Register für Modbus können unterschiedlichen Funktionen zugewiesen werden.

Die Abbildung 4.28 zeigt einen Ausschnitt aus dem Programm, welches mit dem Controller von der Firma Orientalmotors geliefert wird. In den Controller können bis zu 64 Positionspunkte gespeichert werden. Für jeden kann die Schrittzahl, Geschwindigkeit, Be- und Entschleunigung etc. eingegeben und gespeichert werden. In der LabVIEW-Anwendung werden diese schließlich aufgerufen und der Motor verfährt entsprechend.

Umsetzung in LabVIEW: Die Abbildung 4.29 beinhaltet das Ablaufprogramm für die Ansteuerung eines Motors in LabVIEW. Nachdem das Programm gestartet wurde, muss der Modbus entsprechend eingestellt werden, dies bedeutet, dass COM-Port, Baud-Rate, Parity, Mode (RTU), Slave-Adresse eingestellt werden müssen. Anschließend kann der Benutzer zwischen manuellem oder automatischem Betrieb wählen. Die Abbildung 4.30 zeigt das Frontpanel in LabVIEW für den manuellen Betrieb. Wie bereits erwähnt werden die Parameter der Positionierung im Controller gespeichert. Jedoch können diese zur Laufzeit verändert werden. Zur Vereinfachung wurde bestimmt, dass der User lediglich die Geschwindigkeit und Anzahl der Schritte verändern darf. Neben der Parametrierung kann auch der

Motor betrieben werden, links oder rechts¹⁵, dafür wird vom User der Slider betätigt. Angezeigt wird die entsprechende Geschwindigkeit und die aktuelle Position. Daneben kann der Motor auch mit einer konstanten Bewegung betrieben werden (siehe Continuous Operation oben). Neben dem manuellen Betrieb wurden automatische Sequenzen programmiert. Es können verschiedenen Sequenzen gewählt werden, z.B. alle Knöpfe auf einem Modul drücken, oder nur eine bestimmte. Daneben kann die Anzahl der Tastendrucke programmiert werden. Anschließend fährt das Programm die gewählte Sequenz automatisch ab. Die Abb. 4.31 stellt einen kleinen Ausschnitt aus der LabVIEW Programmierung dar. Das gesamte LabVIEW Projekt befindet sich auf der DVD im Anhang. Der Codeausschnitt zeigt deutlich die grafische Programmierung von LabVIEW, dieser Ausschnitt lässt den Motor links oder rechts laufen und entspricht also der Aktion hinter dem Slider in Abbildung 4.30 (oben links). Mit dem SubVI¹⁶ *Write Single Register* wird der Modbus-Befehl zum Starten der Bewegung versandt. Das Kapitel 4.4.5 beschreibt den Aufbau einer Modbusnachricht. Solange sich der Motor bewegt, läuft die while-Schleife und liefert die aktuelle Geschwindigkeit des Motors und dessen Position. Die Schleife wird beendet, sobald der Motor stoppt oder ein Not-Aus auf dem Frontpanel gedrückt wird.

Im Allgemeinen soll das Prüfobjekt automatisch getestet werden. Dazu muss eine einfache Sequenz zum Drücken einer Taste programmiert werden, folgend die Erläuterung dafür. Es wird lediglich die Sequenz des Tastendruckes beschrieben. Die Sequenz zur Bauteilpositionierung ist analog und weniger kritisch hinsichtlich timing. Ein Tastendruck besteht aus insgesamt drei Verfahrenspunkten (data operations). Der Finger wird oberhalb der Taste positioniert $P1$. Diese Positionierung kann mit einer beliebigen Geschwindigkeit erfolgen. Anschließend wird die Taste mit einer Prüfgeschwindigkeit v_P gedrückt, wobei die Beschleunigung auf die Prüfgeschwindigkeit beendet sein muss bevor der mechanische Finger die Taste berührt, Berührungspunkt $P2$. Anschließend wird der Finger zu einer Position $P3$ gefahren, bei welcher die maximale Kraft auf den Finger wirkt. Danach wird die Bewegung in umgekehrter Richtung ausgeführt. Für die Programmierung von Bedeutung ist der minimale Abstand, $P1$ zu $P2$, also die Beschleunigungsstrecke.

Max. Beschleunigung a_{Motor} 0.001 ms/kHz
 Geschwindigkeit v_P 1600 Hz

Beschleunigungszeit: $a = \frac{t}{f}$ somit $t = 0.001 \text{ ms/kHz} \cdot 1.6 \text{ kHz} = 0.0016 \text{ ms}$

¹⁵Abhängig von den parametrisierten Daten.

¹⁶In LabVIEW ist SubVI ein Unterprogramm. National Instruments bietet für LabVIEW eine Modbus-Bibliothek an, welche diese SubVIs beinhaltet.

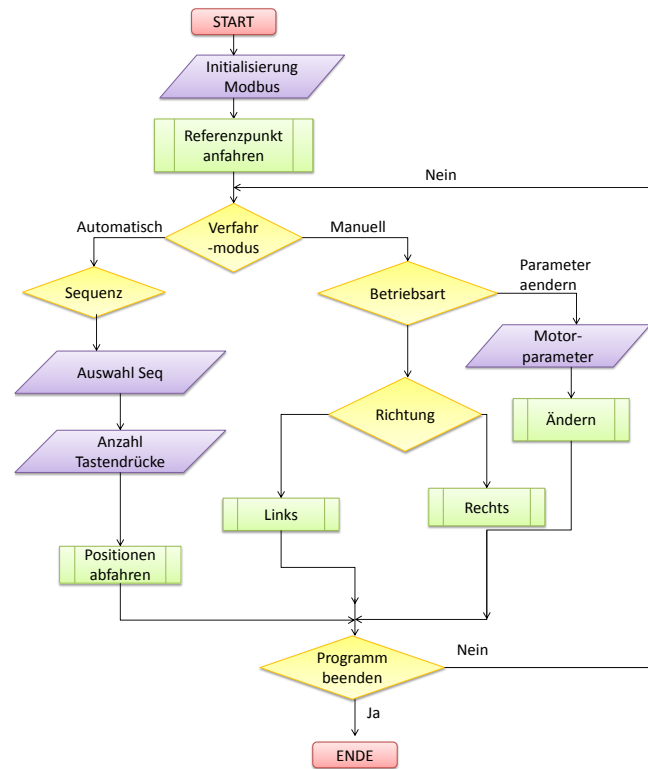


Abbildung 4.29: Ablaufdiagramm Motorsteuerung

$$\text{Umrechnung der Geschwindigkeit: } \frac{0.36}{360} \cdot 1600 \text{ Hz} \cdot 60 = 96 \frac{U}{\text{min}} = 1.6 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Daraus ergibt sich eine Beschleunigung von $a = \frac{1.6 \text{ mm/s}}{0.001 \text{ ms}} = 1000 \text{ m/s}^2$. Die so berechnete Beschleunigung wird verwendet, um den Mindestabstand zu berechnen: $s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 = \frac{1}{2} \cdot 1000 \text{ m/s}^2 \cdot 0.0016 \text{ ms} = 0.00128 \text{ } \mu\text{m}$. Ein Abstand von 5 mm ist somit für alle Geschwindigkeiten ausreichend.

Positionserfassung

Die gewählten Heidenhain Messsysteme wandeln intern die analogen sinusförmigen Messsignale in digitale TTL Signale um. Zusätzlich interpoliert die interface Elektronik die Signale, wodurch feinere Messschritte und damit eine höhere Regelgüte und ein besseres Positionierverhalten erreicht werden. Die Inkrementalsignale werden als Rechteckimpulse U_{a1} und U_{a2} mit 90° Phasenverschiebung ausgegeben, siehe Abbildung. 4.32. Das zweite Signal dient zur Detektierung der Richtung, wenn U_{a1} dem Signal U_{a2} vorausgeht, bewegt sich das System in eine Richtung; z.B. links - Zähler wird inkrementiert, wenn U_{a1} dem Signal U_{a2} nacheilt, so führt das System eine Bewe-

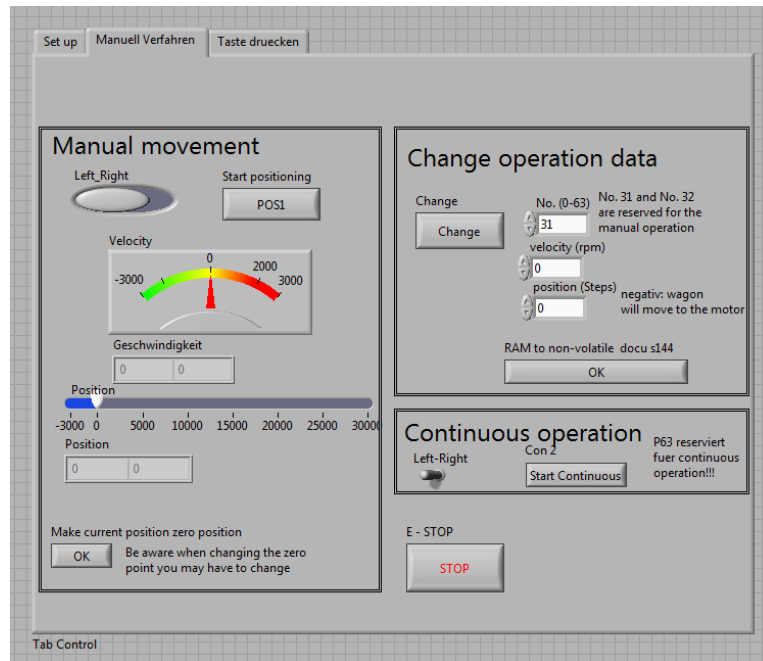


Abbildung 4.30: Frontpanel der manuellen Bedienung

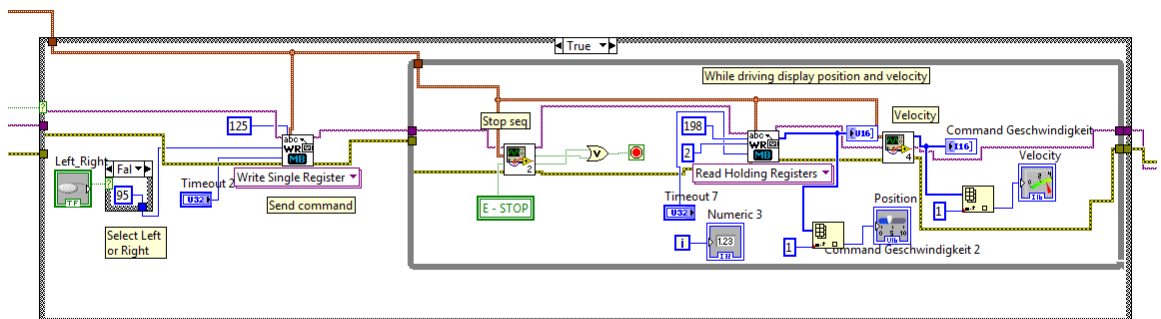


Abbildung 4.31: Programmierung Motorfahrt

gung in die entgegengesetzte Richtung aus - Dekrementierung des Zählers. Das Signal U_{a0} wird als Referenzmarkensignal bezeichnet, beim Überfahren der Referenzmarke geht das Signal auf high. Das Störsignal U_{aS} zeigt Fehlfunktionen an, wie z.B. Ausfall der Lichtquelle etc. Erzeugt die Elektrik des Drehgebers lediglich die Richtungssignale U_{a1} und U_{a2} , so spricht man von einem Inkrementalgeber mit Single-ended-Anschluss. Die Elektronik der Heidenhain Messgeräte erzeugt zusätzlich die inverse Signale von U_{a1} und dem Signal U_{a2} . Diese Konfigurationsart wird auch Gegentakt genannt; da

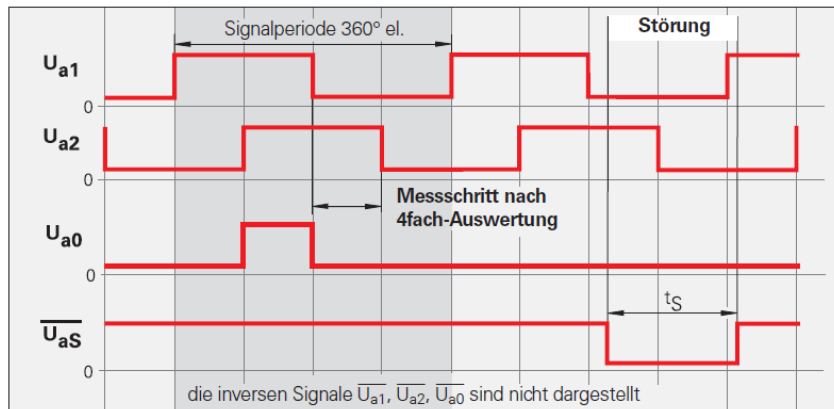


Abbildung 4.32: TTL Signal

alle vier Leitungen immer eine bekannte Spannung liefern, sorgen sie für eine störereichere Übertragung. Ein Messschritt ergibt sich aus der Flankenauswertung der Signale U_{a1} und U_{a2} . Bei der 1-fach Auswertung reagiert der Zähler lediglich auf die steigende Flanke von Signal U_{a1} . Bei der 2-fach Auswertung reagiert der Zähler auf die steigende und fallende Flanke von Signale U_{a1} . Bei der 4-fach-Auswertung, wie sie auch in der Abbildung dargestellt ist, erfolgt die Veränderung des Zählerstandes bei Flankenänderung von U_{a1} oder U_{a2} . Entscheidend für die Folge-Elektronik ist, dass sie jede Flankenänderung registrieren kann. Deshalb wird der minimale Flankenabstand im Datenblatt angegeben, siehe Tabelle 4.8. Das verwendete Datenerfassungsgerät (X-Serie) unterstützt nicht die Gegentaktkonfiguration. Deshalb werden die Signale $\overline{U_{a1}}$ und $\overline{U_{a2}}$ nicht verwendet und das Messgerät als Single-Ended betrieben. Die Signale U_{a1} , U_{a2} und U_{a0} werden an source, AUX und Gate des Zählers des DAQ verbunden. Nach Anbindung des Drehgebers an das Messgerät muss das der Encoder konfiguriert werden. Dazu wird der NI Measurement & Automation Explorer (MAX) verwendet.

Krafterfassung

Die Abbildung 4.18 zeigt die Messkette zum Erfassen der Kraft. Das Signal aus dem DMS wird vom OP verstärkt und vom DAQ digitalisiert. Innerhalb der Software wird die gemessene Spannung in einen Kraftwert umgerechnet.

Umsetzung in LabVIEW: Die Umsetzung des LabVIEW-Programms zeigt die Abbildung 4.33. Im Block *DAQ Assistant* werden Einstellungen für das Datenerfassungsgerät getätigt, neben dem Eingangstyp (Spannung) ist vor allem die Abtastrate entscheidend. Aus den getätigten Einstellungen resultiert der Datenstrom. Der Biegebalken gibt als Ausgangssignal eine Spannung, durch Division mit dem Faktor 0.25 (siehe 4.79) wird daraus die Kraft

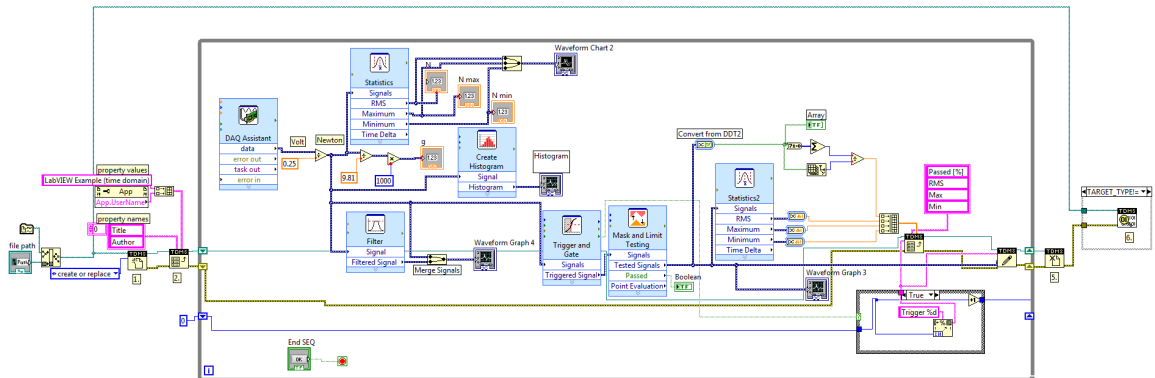


Abbildung 4.33: Umsetzung der Krafterfassung in LabVIEW

in Newton berechnet. Der Block *Statistics* gibt dem Benützer wichtige Informationen über den aktuellen Datenstrom, so werden ihm die Durchschnittskraft sowie Minimal- und Maximal-Wert angezeigt. Ein Histogramm zeigt die häufigsten Werte übersichtlich in einem Balkendiagramm. Zur Reduktion des Signalrauschens wird ein Lowpass-Filter verwendet, welcher Frequenzen über 50 Hz filtert. Gespeichert werden sollen lediglich die Daten, welche beim Tastendruck entstehen, dafür wird der Block *Trigger and Gate* verwendet. Übersteigt die Kraft einen Threshold, werden die Daten weitergeleitet und gespeichert. Nach dem Auslösen des Triggers kommen die Daten in den Block *Mask and Limit Testing*. In diesem wird geprüft, ob die Daten in den spezifizierten Grenzen liegen, dadurch wird analysiert, ob das gemessene Element gut oder Ausschuss ist. Jede Messung wird mit weiteren Angaben wie Messdatum, Durchschnittswert, Minimal- und Maximalwert sowie einer Prozentangabe des Signals, welches innerhalb der gesetzten Grenzen lag, erfasst. Als Speicherformat wird das TDMS-Dateiformat (Technical Data Management Streaming) verwendet. Dieses ist ein leicht austauschbares, strukturiertes Dateiformat mit Hochgeschwindigkeits-Streaming-Fähigkeit, das schnell durchsucht werden kann. LabVIEW bietet einige Tools um die Daten übersichtlich darzustellen, zum Beispiel den TDMS Viewer, der in Abbildung 4.34 mit dem strukturellen Aufbau des TDMS-Formats abgebildet ist. Die einzelnen Messungen werden in sog. Channels (in diesem Fall als Trigger bezeichnet) unterteilt. Jeder Channel ist ausgestattet mit mehreren Eigenschaften, z.B. Upper Limit. Jeder Channel entspricht somit einem Tastendruck.

Zusammenbau der Software

Entsprechend dem V-Modell werden die Komponenten erst isoliert betrachtet und programmiert, anschließend werden die Programmteile zusammen-

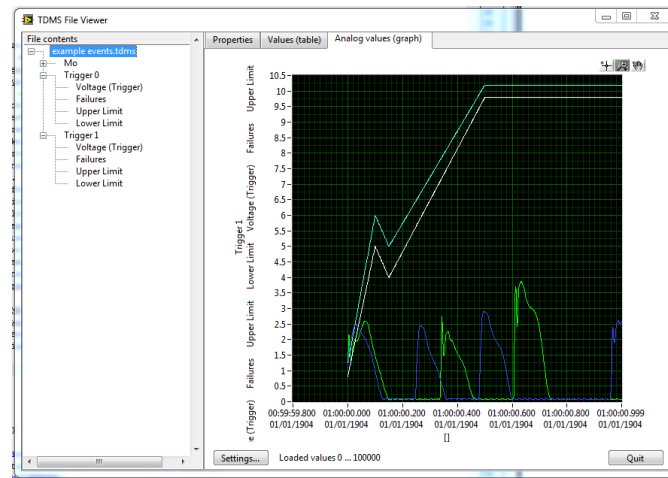


Abbildung 4.34: TDMS Viewer

geführt. Die Abbildung 4.35 zeigt ein *Flow Chart* einer Messung. Nachdem der Modbus und das Datenerfassungsgerät initialisiert wurden, muss ein Referenzpunkt angefahren werden, da nach Unterbrechung der Stromversorgung der Controller die Position verliert. Anschließend kann der Benutzer verschiedene Testsequenzen auswählen, so z.B. eine Sequenz, bei der alle Tasten mittig betätigt werden oder eine Sequenz, bei welcher eine Taste an verschiedenen Positionen gedrückt wird. Bei jeder Sequenz kann der Benutzer die Anzahl der Betätigungen selber festlegen. Anschließend führt das System autonom die Messungen durch. Zuerst wird der Kraftsensor in die entsprechende Messposition verfahren, anschließend verfährt die Messachse (Z-Achse) und betätigt die Taste. Die Kraftwerte werden aufgezeichnet. Nach Beendigung der Messsequenz kann entweder eine neue Sequenz gestartet werden oder es können die Messergebnisse im TDMS-Viewer betrachtet werden.

Reaktionszeit

Die Reaktionszeit ist die Zeit zwischen dem Auftreten eines externen Signals und der Ausgabe einer Reaktion an einem Aktor. Je kürzer die Reaktionszeit, desto schneller kann ein Regler auf Abweichungen vom Sollzustand reagieren. Liegt die Reaktionszeit des Systems garantiert in einem gewissen Zeitfenster, so ist die Echtzeitanforderung erfüllt. Betriebssysteme wie Microsoft Windows erfüllen nicht das Kriterium eines harten Echtzeitsystems, da das Betriebssystem nicht garantiert, wann gewisse Prozesse abgearbeitet werden. Dafür müsste ein Echtzeitbetriebssystem (Real Time Operation System = RTOS) verwendet werden. Für die Entwicklung von nichtkritischen Mess-, Steuer-, Regelanwendungen kann das Betriebssystem

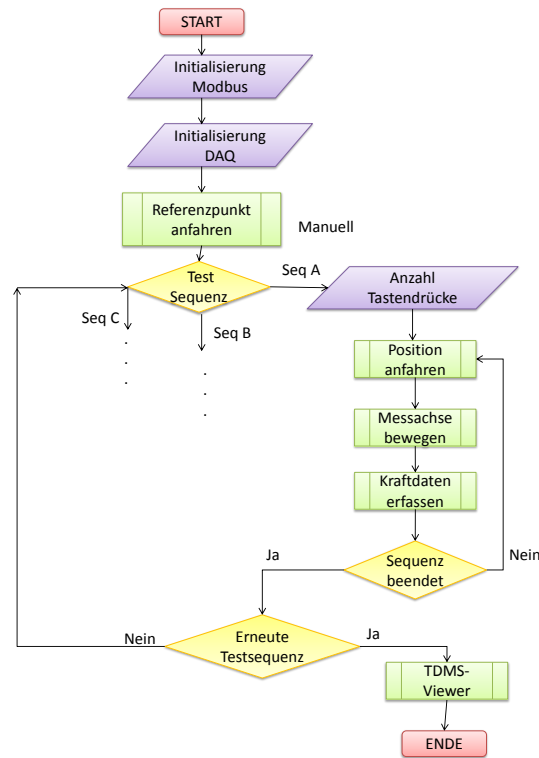


Abbildung 4.35: Ablaufdiagramm Messung

aber durchaus verwendet werden. Im Allgemeinen wird unterschieden zwischen einerseits den bereits erwähnten harten Echtzeitanforderungen; dies impliziert die Garantie, dass alle Prozesse, auch im worst case, innerhalb einer gegebenen Zeit abgearbeitet werden. Demgegenüber steht die weiche Echtzeit, bei dieser muss ein gewisser Prozentsatz der Prozesse innerhalb einer definierten Zeitspanne abgearbeitet werden.

Zusätzlich eignet sich die gewählte USB-Schnittstelle nur bedingt für ein Echtzeitsystem. Bei USB geschieht die Datenübertragung durch verschiedene Modi:

- Isochromer Transfer: garantierte Datenrate.
- Interrupt Transfer: dienen zur Übertragung von kleinen Datenmengen, welche jedoch zu unbestimmten Zeiten zur Verfügung stehen.
- Bulk Transfer: sind für große Datenmengen, welche jedoch nicht zeitkritisch sind.

Für die Datenaufnahme wird der Bulk Transfer verwendet. Dadurch können große Datenmengen übertragen werden, jedoch ohne eine garantierte Datenrate, wodurch das Kriterium der Vorhersehbarkeit (Determinismus)

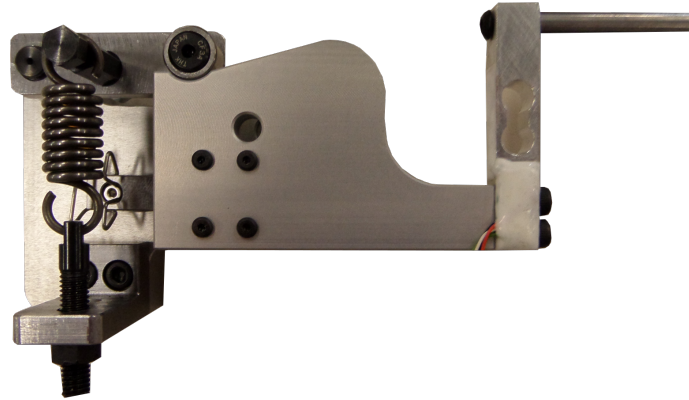


Abbildung 4.36: Hand

nicht erfüllt ist und somit keine harte Echtzeitfähigkeit besteht.

4.11 Komponententest

Entsprechend dem V-Modell wurden alle Komponenten anhand der Anforderungsliste ausgewählt, danach müssen diese getestet werden. Dieses Kapitel behandelt somit die Komponentenebene auf der rechten Seite des V-Modells.

4.11.1 Genauigkeit Antriebssystem

Durch kinematische Fehler¹⁷, Umkehrspiel¹⁸ und dynamische Fehler¹⁹ verliert das System an Genauigkeit. Mittels Messuhr wird daher die Positionsgenauigkeit, Wiederholgenauigkeit, Auflösung und Umkehrspiel für die Z-Achse, der *LX2001P* Lineareinheit, beurteilt.

Auflösung: Da der Motor $0.36 \text{ }^\circ\text{C}$ pro Schritt auflöst, ergibt sich bei einer Übersetzung von 1 mm pro Umdrehung, dass der Wagen $1 \text{ }\mu\text{m}$ pro Schritt verfahren sollte, dies wird gemessen. Der Durchschnittswert nach Tabelle 4.14 liegt bei $0.993 \frac{\mu}{\text{step}}$.

Wiederholgenauigkeit: Aus Punkt A wird Punkt B angefahren und wieder Punkt A. Die Messuhr misst, inwieweit der Wagen wieder am Ausgangspunkt liegt, siehe Abbildung 3.13. Die Messung erfolgt mit verschiedenen Distanzen und Geschwindigkeiten. Der Mittelwert der Abweichung liegt

¹⁷Z.B. Steigungsfehler der Spindel.

¹⁸Treten beim Positionieren aus unterschiedlichen Richtungen auf, aufgrund von Reibkräften, Steigungsverlusten etc.

¹⁹Massekräfte beim Beschleunigen.

Tabelle 4.14: Schrittauflösung

Schritte [step]	Strecke [μm]	Strecke pro Schritt [μm]
1	1	1
1	0.9	0.9
1	0.4	1.3
1	0.6	0.6
1	1	1
5	5	1
5	4.9	0.98
5	5	1
5	4.8	0.96
5	4.9	0.98
10	11	1.1
10	10.5	1.05
10	9.9	0.99
10	10.1	1.01
10	10.4	1.04
30	29	0.966
30	29.5	0.983
30	30	1
30	29.9	0.997
30	30.1	1.003

bei rund $2.62 \mu m$, laut Prüfprotokoll liegt die gemessene Wiederholgenauigkeit bei $0.19 \mu m$. Die Abweichung kann damit erklärt werden, dass bei der verwendeten Messmethode das Umkehrspiel mit in die Messung fließt, wodurch sich ein gewisser Offset einstellt.

Positionsgenauigkeit: Die maximale Abweichung zwischen Ist- und Soll-Position. Die Positioniergenauigkeit wurde vom Hersteller gemessen, siehe Tabelle 4.15.

Umkehrspiel: Toter Raum zwischen den bewegten Teilen z.B. durch Verschleiß. Mittels Messfühler wurde das Umkehrspiel ermittelt. Dieses lag bei rund 3 Schritten, dies bedeutet bei Richtungsänderung werden 3 Schritte benötigt bis sich die Lineareinheit in die entgegengesetzte Richtung bewegt.

4.11.2 Kalibriermessung mit verschiedenen Prüfmassen

Zur Überprüfung der Linearität wird das Kraftmesssystem mit verschiedenen Gewichten beaufschlagt. Damit lässt sich die Linearität des Systems abschätzen. Für die Messung werden folgende Prüfmassen, der Klasse M1 verwendet:

- $100 g \pm 5 mg$

Tabelle 4.15: Messprotokoll Hersteller

Term	Spezifiziert	Gemessen
Positionsgenauigkeit [μm]	20	3.48
Wiederholgenauigkeit [μm]	± 3	± 0.19
Gegenreaktion [μm]	3	0.25
Parallelität [μm]	10	3
Startmoment [Ncm]	1.2	0.40

- 200 g \pm 10 mg
- 500 g \pm 25 mg
- 1000 g \pm 50 mg
- 1500 g \pm 75 mg
- 2000 g \pm 100 mg

Der Kraftaufnehmer wird mit den oben genannten Massen belastet. Anschließend wird ein Programm gestartet, welches bei einer Abtastrate von $2kHz \approx 5000$ Messungen durchführt. Entsprechend der Formel 3.4 wird der Mittelwert aus den 5000 Messpunkten berechnet. Aus dem Spannungsmittelwert und dem Gewicht der Massen wird der Umrechnungsfaktor (k) berechnet: $k = \frac{\bar{U}}{F_g}$. Die Umrechnungsfaktoren werden gemittelt \bar{k} . Die Abweichung der einzelnen Umrechnungsfaktoren vom Mittelwert wird angegeben und mit folgender Formel berechnet: $\Delta k = \frac{k - \bar{k}}{\bar{k}} \cdot 100$. Aus den 5000 Messwerten wird die maximale Spannung genommen, diese wird multipliziert mit dem durchschnittlichen Umrechnungsfaktor. Das Ergebnis wird mit der Masse subtrahiert. Dadurch ergibt sich der maximale absolute Fehler ΔF .

In der Tabelle 4.16 sind die Messergebnisse eingetragen. Der Umrechnungsfaktor wird zzt. statisch vergeben, d.h. er wird einmalig in die Software geschrieben und bleibt konstant. Anhand der Messungen wird ein Faktor von 0.247 verwendet. Die Abweichung um den gemittelten Faktor liegt zwischen -0.9% und 0.4% und kann somit als linear angesehen werden. Die Grafik 4.37 veranschaulicht den absoluten Fehler, so liegt dieser bei 100 g bei unter 0.2 g, das System kann somit als ausreichend genau eingestuft werden.

4.11.3 Vergleich mit Briefwaage

Gemäß dem mechanischen Prinzip *actio gleich reactio* wird eine Briefwaage mit der mechanischen Hand belastet. Die Belastung wird an der Briefwaage, als auch beim Operationsverstärker abgelesen, dann werden die Messungen miteinander verglichen. Die Abbildung 4.38 zeigt die gemessenen Werte (siehe Tabelle A.5) in grafischer Form. Die Messwerte aus der Waage sind fast

Tabelle 4.16: k-Faktor

Masse [g]	\bar{U} [V]	U_{Max} [V]	k [N/V]	\bar{k} [N/V]	Δk [%]	ΔF [g]
100	0.240	0.2419	0.2446	0.247	-0.9885	0.1949
200	0.483	0.4859	0.2461	0.247	-0.3613	0.4765
500	1.214	1.2159	0.2475	0.247	0.17607	1.6658
1000	2.4329	2.4372	0.248	0.247	0.377	5.5596
1500	3.648	3.659	0.2479	0.247	0.340	9.6597
2000	4.868	4.876	0.2481	0.247	0.440	11.779

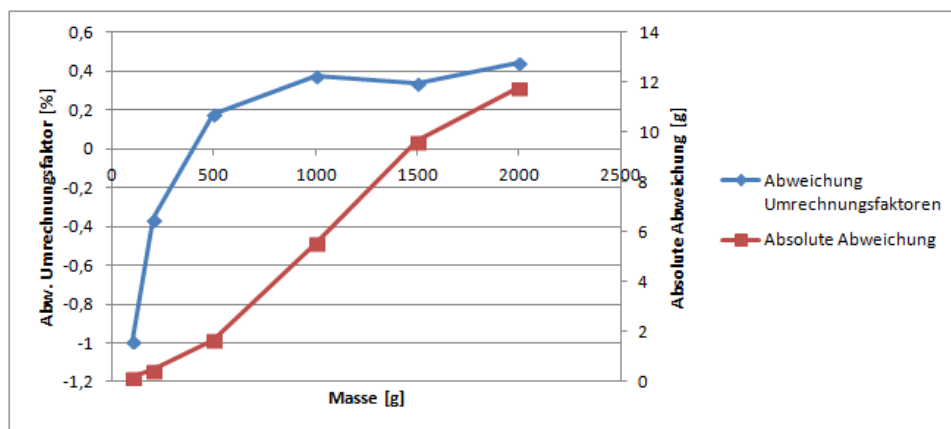


Abbildung 4.37: Hand

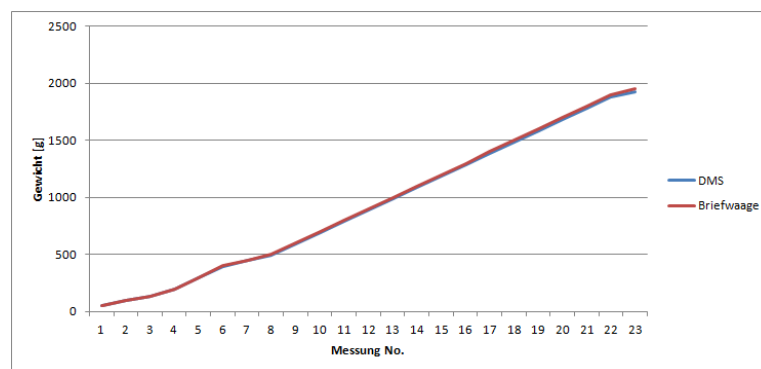


Abbildung 4.38: DMS und Waage

deckungsgleich mit den Messwerten aus dem DMS bzw. Operationsverstärker.

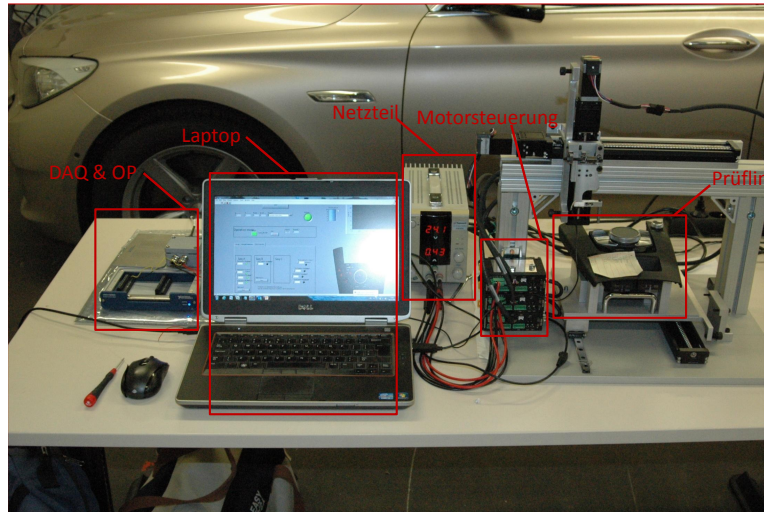


Abbildung 4.39: Messsystem

4.12 Fähigkeit Messsystem

Es erfolgt die Integration und der Test vom Gesamtsystem. Die Abbildung 4.39 zeigt das komplette Messsystem ausschließlich der Längenmessgeräte. Im Bild wurden die wesentlichen Komponenten wie DAQ-System, Operationsvertärker, Laptop, Netzteil, programmierbare Steuerung, Prüfling gekennzeichnet.

4.12.1 Normalteil

Von der Firma Systec wurde ein Tastenhaptiknormal ausgeliehen. Die Abbildung A.3 im Anhang zeigt die gemessene Kurve. Die Kurve ist aus 3 Messungen gemittelt, die durchschnittliche Standardabweichung zwischen den einzelnen Messungen lag bei 0.0047. In der Tabelle A.9 sind die Messwerte der charakteristischen Punkte eingetragen. Systec selbst hat das Tastenhaptiknormal noch nicht vermessen.

4.12.2 Messung statischer Steifigkeit

Die elastische Verformung, welche unter zeitlich konstanter Belastung auftritt, wird als statische Steifigkeit bezeichnet bzw. ihr Reziprokwert als Nachgiebigkeit. Dafür wird die Messhand auf eine Metallplatte verfahren und Strecke sowie Kraft gemessen. Die Messergebnisse befinden sich in der Tabelle A.7, als Grafik befinden sich die Messungen im Bild 4.40. Daraus lässt

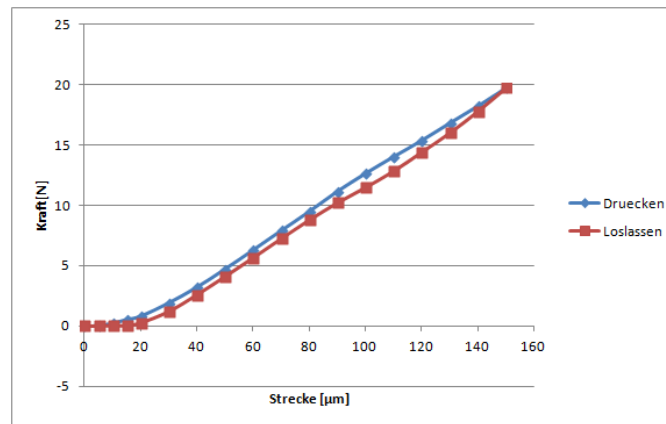


Abbildung 4.40: Messung statischer Steifigkeit

sich die Systemsteifigkeit berechnen:

$$F_{St} = k \cdot x \quad (4.88)$$

Mit Hilfe der Messungen und der obigen Gleichung wird die mittlere Steifigkeit berechnet:

$$\frac{19.74}{0.000150 \text{ m}} = 131.600 \text{ kN/m} \quad (4.89)$$

4.13 Schaltverhalten

4.13.1 Audi-Messung

Der in Kapitel 3.3.4 vorgestellte Prüfling wird vermessen und die Messergebnisse werden mit den Audispezifikationen abgeglichen. Dafür werden die Tasten A, B, C, D (siehe Abb. 3.5) mit einer Geschwindigkeit von 1.6 mm/s mittig betätigt und die Messwerte aufgezeichnet. Jede Taste wurde dafür sechs mal gedrückt und die Messwerte arithmetisch gemittelt. Die durchschnittliche Standardabweichung für die Kraft der Taste A lag bei $0,009 \text{ N}$, der Taste B bei $0,015 \text{ N}$, der Taste C bei $0,020 \text{ N}$ und der Taste D bei $0,009 \text{ N}$. Die Daten zeigen eine hohe Wiederholgenauigkeit beim System, da die Streuung der Messreihen für die jeweilige Taste gering ist. Die Abbildung 4.41 zeigt den gemittelten Kraft-Weg-Verlauf der Taste A. In Blau der Verlauf beim Drücken der Taste. Die Kraft steigt linear an bis zum Betätigungspunkt, dann fällt sie rapide ab. Dieser Kraftsprung, auch Snap genannt, gibt dem Bediener die haptische Rückmeldung, dass die Taste gedrückt wurde. Anschließend steigt die Kraft wieder an, bei 10 N und einer Strecke von 1.35 mm ist der Betätigungsvorgang abgeschlossen. Die rote Linie zeigt die Rückstellkurve. Diese entspricht in der Form der Betätigungskurve, das Kraftniveau ist jedoch niedriger; der Taster unterliegt

Tabelle 4.17: Messpunkte Taste wird gedrückt

	Taste A		Taste B		Taste C		Taste D	
	Kraft F [N]	Strecke s [mm]	F [N]	s [mm]	F [N]	s [mm]	F [N]	s [mm]
P0	1.01	0.083	0.81	0.1	0.81	0.106	0.93	0.1
P1	5.19	0.782	5.31	0.825	5.57	0.887	4.93	0.825
P2	4.58	0.796	4.67	0.841	4.86	0.902	4.27	0.839
P3	10.00	1.293	9.99	1.349	9.98	1.377	10.03	1.388
P1-P2	0.61	0.014	0.68	0.016	0.71	0.015	0.66	0.014

einem Hysterese-Verhalten, dessen Form die haptischen Eigenschaften widerspiegelt. Der Snap bei diesem Taster ist sehr steil, wodurch er als *knackig*, *sportlich* empfunden wird, dieses Verhalten spiegelt den sportlichen Charakter der Audifahrzeuge und ist vom Hersteller gewünscht. In der Tabelle 4.17 sind die relevanten Punkte nach Audispezifikation eingetragen. Die Sollwerte mit den Toleranzen befinden sich in der Tabelle 2.1.

Bei der Taste A liegen Vorspannkraft und Vorspannweg ($P0$) innerhalb der Spezifikation. Der Betätigungspunkt $P1$ liegt hinsichtlich Kraftniveau sowie hinsichtlich der zurückgelegten Strecke innerhalb der Spezifikation. Der Kraftabfall S_w ($P2 - P1$) fällt mit 0.61 N gegenüber einem Mindest-Snap von 0.8 N zu gering aus. Die Snapstrecke $P2 - P1$ liegt mit 0.014 mm innerhalb der Toleranz (max. 0.02 mm). Nach dem Schaltvorgang steigt die Kraftkurve wieder an. Die Endbetätigungskraft $F4$ von 10 N wird bereits nach einem Gesamtweg S_G von 1.29 mm erreicht, laut Spezifikation ist eine Mindeststrecke von 1.35 mm gefordert. Bei den Tasten B, C und D liegen fast alle gemessenen Werte des Druckvorgangs innerhalb der Spezifikationen, der Kraftsprung liegt jedoch bei allen Tasten unterhalb der Toleranzgrenze von 0.8 N .

Im Diagramm 4.42 ist der Druckvorgang der Tasten A bis D sowie die ideale Schaltkurve eingezeichnet. Auffällig ist, dass der Betätigungspunkt bei den Tasten später erreicht wird (jedoch innerhalb der Toleranz). Der Snap liegt bei allen Tasten außerhalb der Toleranz. Für die Rückstellkurve gilt, dass sie in ihrer Form der Betätigungskurve entspricht und in ihren Kraftwerten mindestens 50 % der Betätigungskurve betragen muss. In der Tabelle A.8 sind die Messwerte der Rückstellkurve eingetragen. Aus der Tabelle sowie aus der Grafik A.5 ist ersichtlich, dass hinsichtlich Formtreue sowie Kraftwerte den Erwartungswerten entsprechen.

4.13.2 Messort

Um zu untersuchen, welchen Einfluss die Messposition hat, wurde die Taste A an verschiedenen Positionen betätigt. Dazu wurden fünf verschiedene Betätigungsorte ausgewählt, siehe Abbildung A.4. Pos. A befindet sich, wie

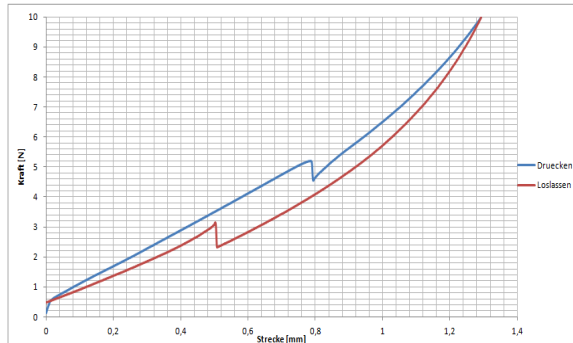


Abbildung 4.41: Haptikkurve

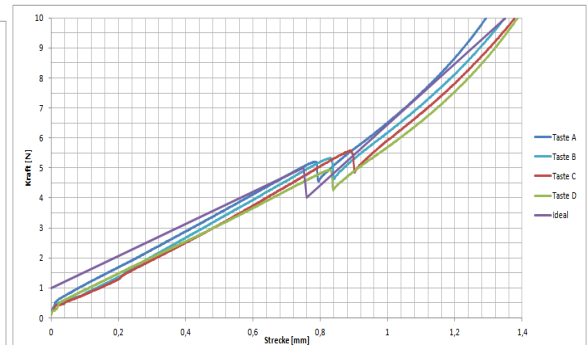


Abbildung 4.42: Kraft-Weg-Verlauf Tasten A-D

in der Spezifikation festgelegt, in der Mitte der Taste. Anschließend wurde die X-Position verändert, sodass der mechanische Finger die Taste am äußeren Rand betätigt (Pos. B). Die dritte Position (Pos. C) befindet sich auf dem Beleuchtungssymbol. Als Viertes wurden die Positionen zwischen Mitte und Rand gewählt (Pos. D und E). Die Messergebnisse befinden sich in den Grafiken 4.43 und 4.44. Die Steigung der Kurve beim Vorlaufweg ist bei allen Positionen nahezu identisch, zwischen den Kurven kann beim Snap ein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Der Kraftsprung ist bei allen drei Messungen ebenfalls fast identisch. Jedoch wird bei zentraler Krafteinleitung ein niedrigeres Kraftniveau und eine kürzere Strecke benötigt. Dies kann damit erklärt werden, dass sich der Kurzhubtaster mittig unter der Taste befindet. Durch dezentrale Krafteinleitung entstehen Momente, deshalb wird mehr Kraft benötigt, um die Taste zu betätigen. Der Wegunterschied zwischen Pos. A und Pos. C liegt bei $0,075 \text{ mm}$. Der Kraftunterschied zwischen den Betätigungskräften dieser Punkte ist rund $0,5 \text{ N}$. Die Snappunkte liegen innerhalb des Toleranzfensters und die Unterschiede zwischen den Positionen sind messbar, jedoch für den Bediener kaum spürbar, es herrscht ein homogenes Tastengefühl vor.

4.13.3 Geschwindigkeitsmessungen

Die Kraft zum drücken einer Taste lässt sich durch die Bewegungsgleichung ausdrücken:

$$F_{Total} = F_{St} + F_{Da} + F_{Ma} \quad (4.90)$$

Der Term F_{St} steht für die Steifigkeit. Rechnerisch erfolgt diese Kraft aus der Multiplikation von Federsteifigkeit k mit der Strecke x :

$$F_{St} = k \cdot x \quad (4.91)$$

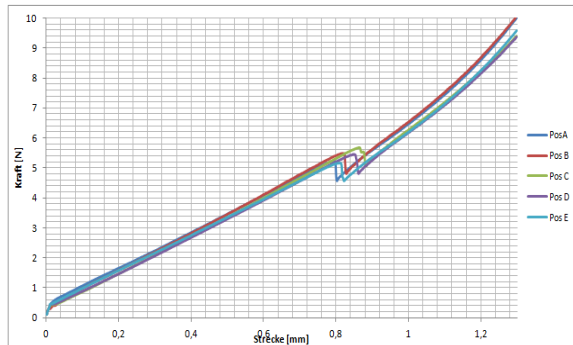


Abbildung 4.43: diverse Positionen

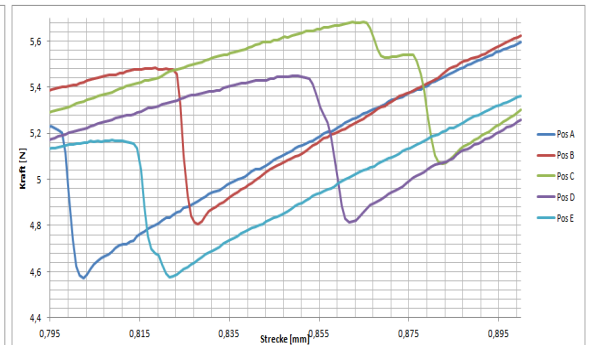


Abbildung 4.44: diverse Positionen Snap

Der Term F_{Da} beschreibt die Dämpfung und berechnet sich aus der Dämpfungskonstanten d mit der Betätigungsgeschwindigkeit \dot{x} :

$$F_{Da} = d \cdot \dot{x} \quad (4.92)$$

Der Term F_{Ma} zeigt, dass eine beschleunigte Masse m eine Kraft verursacht:

$$F_{Ma} = m \cdot \ddot{x} \quad (4.93)$$

Die Formel 4.91, 4.92 und 4.93 in 4.90 eingesetzt ergibt:

$$F_{Total} = k \cdot x + d \cdot \dot{x} + m \cdot \ddot{x} \quad (4.94)$$

Die Gleichung zeigt deutlich, dass F_{Total} abhängig von Beschleunigung, Geschwindigkeit und Strecke ist $F_{Total}(\ddot{x}, \dot{x}, x)$. Im Normalfall sind F_{St} und F_{Da} nichtlineare Funktionen bzw. nur in einem kleinen Bereich linear. Es ist deshalb äußerst wichtig, das Verhalten der Tasten bei verschiedenen Geschwindigkeiten zu kennen. Bei hohen Betätigungsgeschwindigkeiten kann die Dämpfung ggf. sehr stark werden und die Betätigungskraft und somit indirekt das Erlebnis bei der Tastenbetätigung wesentlich beeinflussen.

Es wird untersucht, welchen Einfluss die Betätigungsgeschwindigkeit auf die benötigte Kraft hat. Die Beschleunigung sei hierbei Null, die Gleichung 4.94 wird zu:

$$F_{Total} = k \cdot x + d \cdot \dot{x} \quad (4.95)$$

Dafür wird die Taste E mit vier verschiedenen Geschwindigkeiten betätigt:

- 1000 Hz: entspricht einer Geschwindigkeit von 1 mm/s, dadurch wird der Term F_{Da} vernachlässigbar klein. Die Gleichung 4.94 vereinfacht sich zu: $F_{Total} = k \cdot x$
- 5000 Hz: entspricht einer Geschwindigkeit von 5 mm/s
- 10000 Hz: entspricht einer Geschwindigkeit von 10 mm/s

- 15000 Hz : entspricht einer Geschwindigkeit von 15 mm/s
- 20000 Hz : entspricht einer Geschwindigkeit von 20 mm/s

Die Signale wurden mit 20 kHz abgetastet. Abbildung 4.45 zeigt die verschiedenen Geschwindigkeiten in der Betätigungskurve. Im Gegensatz zu den Tasten A-D zeigt die Taste E einen nichtlinearen Verlauf. Der Kraftverlauf ist zu Beginn steiler und flacht bei 0.8 mm ab, dadurch kommt es bei hoher Betätigungsgeschwindigkeit zu Überschwingern. Die Abbildung 4.46 zeigt den Snap der Taste A bei oben genannten Geschwindigkeiten. Je langsamer die Betätigung desto steiler fällt die Kraftkurve ab. Bei hohen Geschwindigkeiten wird die Kraftkurve zunehmend gedämpft. Bei der Geschwindigkeit von 5000 Hz sind deutliche Schwingungen in der Kurve ersichtlich, welche die Genauigkeit der Ergebnisse beeinflussen, deshalb sollte diese Geschwindigkeit bei Messungen vermieden werden.

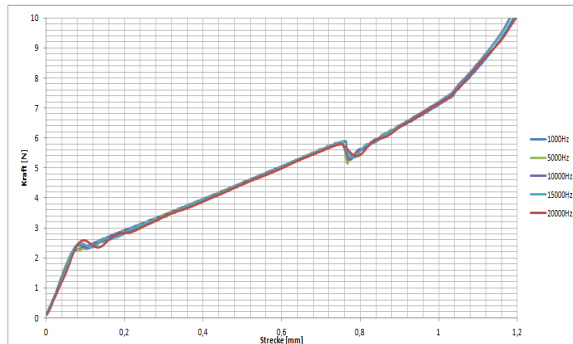


Abbildung 4.45: diverse Betätigungsgeschwindigkeiten

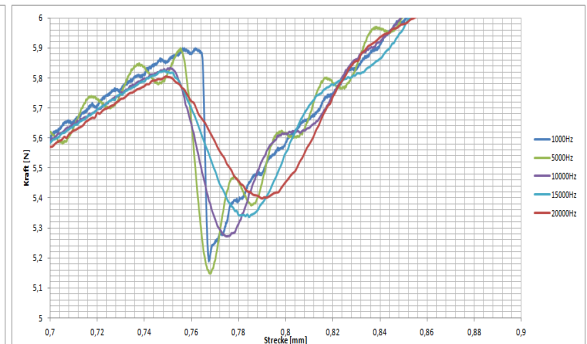


Abbildung 4.46: diverse Betätigungsgeschwindigkeiten Snap

4.13.4 Temperaturmessung

Um den Einfluss von unterschiedlichen Temperaturen auf das Schaltverhalten zu untersuchen, wird das Bauteil auf 80 $^{\circ}C$ erhitzt und anschließend die Haptikkurve aufgezeichnet. Dann wird es auf $-40^{\circ}C$ abgekühlt und die Haptikkurve erneut aufgezeichnet. Bei der Temperaturmessung kann festgestellt werden, dass sich die Kurve mit zunehmender Temperatur gegenüber der Kurve bei Raumtemperatur nach links verschiebt. Dies führt dazu, dass bei $t = 80^{\circ}C$ und $t = 60^{\circ}C$ die Schaltpunkte bereits bei $t = 0.69 mm$ bzw. $t = 0.72 mm$ auftreten. Laut Spezifikation ist der untere Toleranzwert $t = 0.75 mm$. Bei niedrigen Temperaturen verschiebt sich die Kurve gegenüber der Kurve bei Raumtemperatur nach rechts. Der Schaltpunkt findet entsprechend später statt. Bei $t = -40^{\circ}C$ bei $t = 0.9 mm$ und bei $t = -10^{\circ}C$ bei $t = 0.89 mm$. Die Werte liegen noch innerhalb der Toleranz. Die Wegdifferenz zwischen $t = 80^{\circ}C$ und $t = -40^{\circ}C$ liegt bei 0.22 N . Bei

niedrigen Temperaturen zieht sich das Material zusammen, dadurch vergrößert sich das Spiel. Zu Beginn des Tastendrucks wird bei niedrigen Temperaturen kaum Kraft benötigt. Während bei hohen Temperaturen aufgrund der Materialausdehnung ein gewisser Reibwiderstand überwunden werden muss.

Auffällig ist, dass sich die Schaltunkte ändern, das Kraftniveau zum Erreichen des Schaltpunktes sowie die Kraftdifferenz sich aber unwesentlich ändern, siehe Abbildung 4.48. P_1 liegt vom Kraftniveau durchgängig über 5 N und somit innerhalb der Toleranz. Die Abweichungen im Vorlaufweg sind in einem Bereich, welcher von einem Bediener kaum wahrgenommen wird.

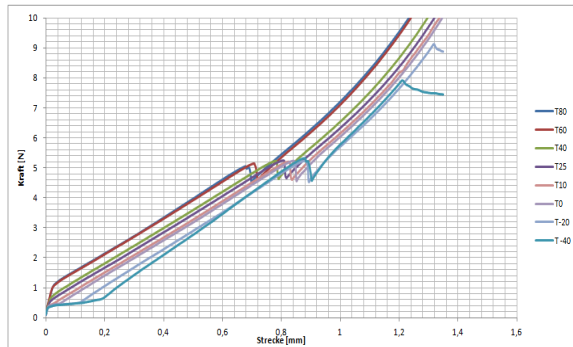


Abbildung 4.47: diverse Temperaturen

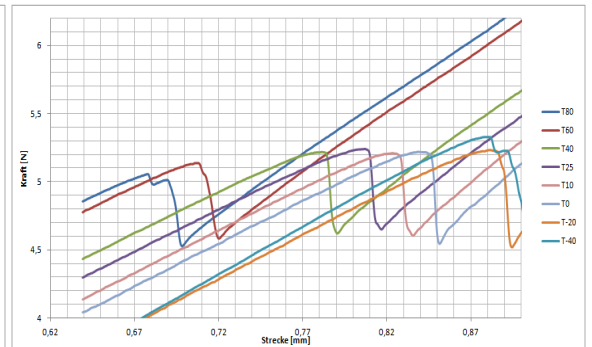


Abbildung 4.48: diverse Temp. Snap

Kapitel 5

Diskussion

In diesem Kapitel werden die charakteristischen Daten der Messmaschine reflektiert und diskutiert, anschließend ebenso die Messergebnisse aus dem Kapitel 4.13.

Die Linearachse der Z-Achse besitzt eine Auflösung von 1μ , eine Wiederholgenauigkeit von $\pm 2.62 \mu m$ sowie eine Positionsgenauigkeit von $3.48 \mu m$. Die Daten liegen im bzw. über dem Soll der Anforderungsliste, siehe Tabelle 2.2. Die Achse hat sich bei den praktischen Messungen bewährt. Die Linearachse der X- und Y-Achse besitzt eine Auflösung von 5μ , eine Wiederholgenauigkeit $\pm 5 \mu m$ und eine Positionsgenauigkeit von $6 \mu m$. Zum Positionieren des Bauteils haben sich die Achsen bewährt.

Da Schrittmotoren verwendet wurden, verändert sich das Drehmoment über die Drehgeschwindigkeit, siehe 4.15, $0.12 Nm$ bei Drehgeschwindigkeiten unter $500 r/min$ und $0.08 Nm$ bei Drehgeschwindigkeiten über $1500 r/min$. Mit dem verwendeten Motor wird die vorgegebene $20 N$ Druckkraft (Z-Achse) auch bei hohen Geschwindigkeiten erreicht, die geforderte Vorschubgeschwindigkeiten kann auch erreicht werden. Bei der Positionierung des Bauteils sollten die Achsen jedoch nicht abrupt be- und entschleunigt werden. Der verwendete Controller α Step von Oriental hat sich bewährt, er besitzt bereits eine Vielzahl von Funktionen, welche den Programmieraufwand für den Anwender erheblich reduzieren. Beim verwendeten Modbus handelt es sich um eine etwas ältere Bussprache; bei Modbus initiiert der Master das *Gespräch*, wodurch der Bus ausreichend schnell ist.

Bei der Krafterfassung wird eine Genauigkeit von $\pm 0.5 \%$ erreicht. Damit lässt sich die benötigte Kraft zum Betätigen einer Taste ausreichend genau erfassen. Zum Umrechnen vom Spannungswert (aus dem OP) in einen Kraftwert wird der ermittelte Faktor 0.247 verwendet. Dieser wird statisch im Programm gespeichert. Eine zukünftige Verbesserung wäre, ihn variabel an das Gewicht anzupassen, wodurch der Fehler durch die Umrechnung geringer ausfällt.

Die statische Steifigkeit für das System beträgt $132 kN/m$. Vor allem die

Federkonstruktion in der Messhand reduziert die statische Steifigkeit. Eine Weiterentwicklung der Messhand könnte die statische Steifigkeit erhöhen.

Für die Positionserfassung wurden Glasmaßstäbe ausgewählt. Für die X- und Y-Achse sind die Glasmaßstäbe die richtige Wahl. Für die Z-Achse könnte auch ein Messtaster eingesetzt werden, diese ist wesentlich genauer.

Das verwendete Datenerfassungsgerät, siehe Kapitel 4.6.3, ist geeignet für das Messsystem. Bei einer Weiterentwicklung würde es sich anbieten auf ein Echtzeitbetriebssystem zu wechseln und ein cRio-Gerät für die Datenerfassung zu verwenden.

In Kapitel 4.13.1 wurden verschiedenen Tasten des MMI betätigt; bis auf den Kraftabfall lagen dabei alle charakteristischen Punkte zur Beschreibung der Haptikkurve innerhalb der vorgegebenen Spezifikationen. Die verschiedenen Tasten auf dem Modul messbar weisen jedoch unterschiedliche Betätigungspunkte auf. In Kapitel 4.13.2 konnte aufgezeigt werden, dass der Betätigungsort einen messbaren Einfluss auf den Betätigungspunkt hat. Die Unterschiede in den Tasten rühren zum einen daher, dass die Tasten unterschiedliche Geometrien aufweisen und sich der innere Aufbau somit unterscheidet und andererseits daher, dass der Betätigungsort sich bei den Tasten unterscheidet. Bei der Untersuchung des Einflusses des Messortes auf die Haptikkurve in Kapitel 4.13.2 konnte gezeigt werden, dass trotz der messbaren Unterschiede die charakteristischen Punkte sich noch innerhalb der Toleranzen befinden und somit ein homogenes Tastengefühl herrscht.

Bei der Untersuchung der Betätigungsgeschwindigkeit auf den Kraft-Weg-Verlauf in Kapitel 4.13.3 wurden Geschwindigkeiten weit oberhalb der 1.5 mm/s verwendet. Je höher die Betätigungsgeschwindigkeit desto gedämpfter fällt der Kraftsprung aus.

Beim Messen der Kraft-Weg-Kurve bei unterschiedlichen Temperaturen in Kapitel 4.13.4 konnte festgestellt werden, dass bei Temperaturen unterhalb der Raumtemperatur der Vorlaufweg zunimmt und bei Temperaturen oberhalb der Raumtemperatur abnimmt. Zudem sinkt bei niedrigen Temperaturen Vorspannkraft die das Spiel erhöht sich und bei hohen Temperaturen steigt die Vorspannkraft an.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Masterarbeit wurde ein stationäres Messsystem zum Messen von Kurzhubtastern in Automotive-Bauteilen entwickelt, getestet und validiert. Die Entwicklung geschah methodisch anhand des V-Modells. Alle verwendeten Bauteile wurden strukturiert durch einen Analyse und Entwurf-Prozess ausgewählt und anschließend getestet. Das System besitzt eine Adapterplatte, wodurch verschiedene Messobjekte schnell und effizient getestet werden können. Zwei Schrittmotoren wurden verwendet um das Messobjekt mit einer hohen Wiederholgenauigkeit zu positionieren. Das System zeichnet den Kraft-Weg-Verlauf der Tasten auf. Dafür wird von einem Schrittmotor Kraft in die Taste eingeleitet und diese von einem Kraftsensor gemessen. Das Signal des Kraftsensors ist über einen Messverstärker an ein Datenerfassungsgerät geschlossen. Gesteuert wird das System mit LabVIEW, zudem werden die gemessenen Daten grafisch in der Software dargestellt. Das System wurde so entwickelt, dass es den Audi-Anforderungen gerecht wird, jedoch können auch Taster für andere Automobilhersteller gemessen werden, es ist flexibel erweiterbar und kann in der Qualitätssicherung eingesetzt werden.

Daneben wurde das Schaltverhalten des Audi MMI analysiert. Dafür wurde ausgewertet, ob die einzelnen Tasten auf dem Modul den Audispezifikationen entsprechen und wie groß die Abweichungen zwischen den Tasten sind. Es konnte gezeigt werden, dass unterschiedliche Tasten auch unterschiedliche Betätigungspunkte aufweisen, die Unterschiede sich jedoch noch innerhalb des vorgegeben Toleranzfenster befinden. Zudem wurde gezeigt, welche Auswirkungen der Betätigungsort auf der Taste auf die Haptikkurve hat; der Betätigungsort verschiebt den Betätigungspunkt, der Unterschied ist messbar, aber fällt so gering aus, dass er nicht fühlbar ist. Daneben wurde untersucht, welchen Einfluss die Betätigungsgeschwindigkeit auf das Schaltverhalten der Taster hat. Je höher die Geschwindigkeit desto gedämpfter fällt der Kraftsprung aus. Zusätzlich wurde die Haptikkurve bei unter-

schiedlichen Temperaturen aufgezeichnet. Extreme Temperaturen können den Kraft-Weg-Verlauf so stark verändern, dass dieser außerhalb der Toleranzen liegt.

Im Folgenden einige Verbesserungsvorschläge:

- Echtzeitanwendung: Umstellung auf ein echtzeitbasiertes Messsystem, dadurch können komplexe Regelungsaufgaben bewältigt und das Schaltverhalten von Tastern detaillierter untersucht werden.
- Signalauswertung: Automatisierte Auswertung aller Signale, dadurch kann ein automatisierter EOL-Tester realisiert werden.
- Erweiterung um eine weitere Achse: Da die Krafteinleitung immer senkrecht zur Tastenoberfläche geschehen sollte, muss der mechanische Finger bei manchen Messobjekten gedreht werden.
- Anschluss Kamera: Um die Funktion von Beleuchtung zu überprüfen.
- Konstruktion Hand: Zur Erhöhung der statischen Steifigkeit, Montage eines Messtasters oder zur Bedienung eines Touchpads.

Anhang A

Technische Informationen

A.1 Abkürzungen

DMS	Dehnmessstreifen
DUT	Device Under Test
C_a	Dynmatische Tragzahl [N]
C_{oa}	Statische Tragzahl [N]
D_B	Durchmesser der Spindel [mm]
E	Elastizitätsmodul [N/mm^2]
F_a	Äußere Kräfte [N]
$F_{M,zul}$	Zulässige Montagevorspannkraft [N]
F_m	Mittlere Axiallast [N]
F_N	Nennkraft [N]
F_Q	Querkraft [N]
I	Minimum Flächenträgheitsmoment der Gewindewelle [mm^4]
K_P	Momentenkoeffizient der Führungsschiene (Neigung) [$1/m$]
K_R	Momentenkoeffizient der Führungsschiene (Rollen) [$1/m$]
K_Y	Momentenkoeffizient der Führungsschiene (Gieren) [$1/m$]
L	Nennnutzungsdauer [km]
L	Verfahrweg [mm]
L_1	Strecke mit konstanter Geschwindigkeit [mm]
L_2	Strecke zum Beschleunigen [mm]
L_3	Strecke zum Entschleunigen [mm]
L_B	Gesamtlänge der Spindel [mm]
M_a	Zulässiges statisches Moment (Neigung) [Nm]
M_b	Zulässiges statisches Moment (Gieren) [Nm]
M_c	Zulässiges statisches Moment (Rollen) [Nm]
N_1	Kritische Geschwindigkeit [$1/s$]
P_1	Knicklast [N]
P_2	Zulässige Zugbelastung/Kompressionsbelastung [N]
P_B	Spindelsteigung [mm]

S_N	Nennkennwert [mV/V]
T_{total}	Gesamtdrehmoment [Nm]
T_L	Lastmoment [Nm]
U_A	Messbereichsendwert [V]
U_D	Differenzspannung [V]
U_S	Speisespannung [V]
T_A	Beschleunigungsdrehmoment [Nm]
V_{MAX}	Max. Geschwindigkeit [m/s]
J_B	Massenträgheit der Spindel [kgm^2]
J_L	Massenträgheit der Last [kgm^2]
J_{total}	Gesamtträgheit [kgm^2]
a	Beschleunigung [m/s^2]
f_W	Lastkoeffizient
g	Gravitation
h	Hub
k	Umrechnungsfaktor
l	Spindelsteigung [mm]
l_a	Abstand zwischen den Befestigungspunkten [mm]
m	Gesamte Masse [kg]
m_L	Lastmasse [kg]
m_i	Schnittzahl
n	Koeffizient entsprechend der Befestigungsmethode
n	Schraubenzahl
n	Sicherheit gegen Rutschen
pos	Position
s	Messsignal [mV/V]
s	Sicherheitsfaktor
t_0	Verfahrzeit [sec]
t_1	Beschleunigungszeit [sec]
u_E	Eingangsempfindlichkeit [mV/V]
v	Drehzahl [r/min]
α	Anstellwinkel [$^\circ$]
γ	Dichte [kg/mm^3]
δ	zulässige Zugspannung/Druckspannung [N/mm^2]
η	Effizienz
θ_S	minimale Schrittwinkel [$^\circ$]
μ_0	Reibungskoeffizient 0
μ	Reibungskoeffizient 1
μ	Reibwert zwischen den Teilen
ρ	Dichte der Spindel [kg/m^3]

A.2 Begriffe

Kennwert: Sensorkennlinie Ausgangssignal bei Nennkraft.

Eingangsempfindlichkeit: Die Steigung der Messverstärkerkennlinie.

Messen: Das Ergebnis der Messung ist im Normalfall ein Messwert oder eine Serie von Messwerten. Ein Messergebnis ist immer ein mehr oder weniger präziser Schätzwert, der eine Messabweichung enthält [29].

Kalibrieren: Das Feststellen und Dokumentieren der Abweichung der Anzeige eines Messgerätes oder einer Steuereinheit vom richtigen Wert der Messgröße [29].

Justieren: Der Vorgang, bei dem ein Messgerät so eingestellt bzw. abgeglichen wird, dass die Messabweichungen vom Sollwert möglichst klein werden und innerhalb der Gerätespezifikationen liegen. Dabei ist Justieren ein Vorgang, der das Messgerät bleibend verändert [29].

Brückenschaltung: Der Zusammenhang zwischen Widerstandsänderung $\Delta R/R$ und der Dehnung ϵ wird durch den k -Faktor des Dehnungsmessstreifen definiert. $\Delta R_1/R_1 = k \cdot \epsilon$

Interpolationsfaktor: Die sinusförmige Messsignale werden je nach gewünschtem Faktor n -fach unterteilt und von einer elektronischen Schaltung in zwei um 90° phasenverschobene Rechtecksignale gewandelt.

Signalperiode: Beim Abtasten der Strichgitterteilung werden sinusförmige Signale erzeugt, deren Periode einem Teilungsintervall entspricht.

Getaktete Ausgangssignale: Flankenabstand a wird aus einer internen Taktquelle abgeleitet. Gleichzeitig definiert die Taktfrequenz auch die zulässige Eingangsfrequenz der Inkrementalsignale und somit die zulässige Verfahrensgeschwindigkeit.

Dynamisches Verhalten der Messgeräte: Aus den physikalischen Bedienungen des Messsystems folgt, dass sich der Ausgang des Systems nicht beliebig schnell mit dem Eingangssignal ändern kann. Um das dynamische Verhalten eines Systems zu beschreiben ist die Differenzialgleichung zwischen dem Eingangs- und dem Ausgangssignal aufzustellen.

Lineare Fehlerfortpflanzung: Die messende Größe f ist abhängig von anderen Größen $f = f(x, y, z)$. Für die Messung relevant ist, wie sich die einzelnen Fehler $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ auf den Fehler Δf der Größe f auswirken.

Direkte und indirekte Messung: Bei der direkten Messwerterfassung ergibt sich unmittelbar der Messwert durch den Vergleich zwischen Messgröße und entsprechender Bezugsgröße. Im Gegensatz dazu steht die indirekte Messung, bei der die gesuchte Messgröße in eine andersartige physikalische Größe umgewandelt wird und aus dieser der Mess-

wert ermittelt wird [11]. Bei der Abbildung A.1 wird die Position des Werkzeugschlittens bei der indirekten Messwerterfassung über die Anzahl der Umdrehungen des Motors ermittelt. Die Messgenauigkeit wird dadurch von der gesamten Kette beeinflusst, wie z.B. Steigungsfehler, Umkehrspiel, statisch und thermisch bedingte elastische Verformung und Verschleiß der Vorschubspindel. Typische Fehler von verschiedenen Messwerterfassungsverfahren sind in der Abbildung A.1 zusammengefasst.

Analoge und digitale Messwerterfassung: Bei der analogen Messwerterfassung liegt jeder Messgröße stetig ein entsprechender Messwert vor, vorausgesetzt es wird innerhalb des Messbereichs gemessen [11]. In der Abbildung A.2 stehen die zwei Prinzipien anschaulich durch Beispiele gegenüber. Beim Schiebepotentiometer besteht stetig die Zuordnung der Messgröße, zum Beispiel der Weg x zur analogen Ausgangsgröße, hier die Spannung U . Bei der digitalen Messwerterfassung wird die zu messende Größe in gleichmäßige Abschnitte aufgeteilt und der Messwert als dessen Vielfaches dargestellt. Entsprechend diesem Prinzip wird bei der Abbildung A.2 der Weg x in Abschnitte mit der Breite Δx unterteilt (Strichabstand). Durch Zählen der einzelnen Wegabschnitte wird der Messwert gewonnen [11]. Bei der digitalen Messung wird unterschieden:

- digital-relative (inkrementale) Messwerterfassung,
- digital-absolute (codierte) Messwerterfassung.

Digital-relativ: Periodische Messsignale werden gezählt und angezeigt. Durch den Zählvorgang kann bei diesem Messverfahren nicht der absolute Wert gemessen werden, sondern nur die relative Lage, beider der Zählvorgang eingeschaltet wird. Bei einer Positionsmessung muss deshalb nach dem Einschalten eine Referenzposition angefahren werden [11].

Digital-absolut: Durch die Erfassung einer kodierten Spur liegt ständig eine feste Zuordnung zwischen dem absoluten Wert und dem Messwert vor. Bei einer Positionsmessung liegt nach dem Einschalten bereits die genaue Position zur Referenzmarke vor [11].

A.3 Tabellen und Grafiken

Tabelle A.1: Begriffserklärung für Haptikkurve 3.6 entnommen aus [2]

Punkt	Merkmal	Zeichen	Beschreibung
P_0	Vorspannkraft	F_0	Kraft, um den Betätiger in Bewegung zu setzen.
	Vorspannweg	S_0	Laut Definition ist P_0 gleich 0 mm.
P_1	Betätigungskraft	F_1	Kraft, um den Betätiger von der Ruhestellung über ein Betätigungspunkt P_1 zu führen.
	Vorlaufweg	S_1	Weg von Ruhestellung bis zum Betätigungspunkt.
P_2	Schaltkraft	F_2	Kraft, bis zu welcher die Betätigungskraft auf dem Hinweg durch den Sprungmechanismus vermindert wird.
	Kraftabfall (Snap)	S_W	Der Weg des Betätigers vom Betätigungspunkt (P_1) bis zum Snappunkt P_2 .
P_3	Snapsprungkraft	F_3	Gleich der Betätigungskraft F_1 .
	Snapsprung	S_3	Der Weg des Betätigers vom Betätigungspunkt P_1 bis zum Snappunkt P_2 .
P_4	Endbetätigungs- kraft	F_4	Empirisch ermittelte Endbetätigungskraft, die zugleich das Ende des Messvorgangs darstellt.
	Nachlaufweg	S_N	Der Weg des Betätigers vom Snappunkt P_2 bis zum Erreichen der Endbetätigungskraft.
	Gesamtweg	S_G	Der Weg des Betätigers von der Ruhestellung P_0 bis zum Ende der Betätigung P_4 .
P_6	Rückstellkraft	F_6	Kraft, bis zu welcher die Endbetätigungskraft auf dem Rückweg vermindert werden muss, damit der Sprungmechanismus in die Ausgangslage zurückgeführt wird.
	Rückstellweg	S_{RS}	Der Weg, bei dem der Sprungmechanismus in die Ausgangslage zurückgeführt wird.
	Differenzkraft	F_{min}	Der Kraftunterschied zwischen der Schaltkraft (F_2) und der Rückstellkraft (F_6).
	Rücklaufweg	S_R	Der Weg des Betätigers von der Endbetätigung (P_4) bis zum Rückstellpunkt (P_6).
P_7	Rücksprungkraft	F_7	Kraft, bis zu welcher die Rückstellkraft durch den Sprungmechanismus auf dem Rückweg erhöht wird.
	Differenzkraft	F_{MAX}	Der Kraftunterschied zwischen der maximalen Betätigungskraft (F_1) und der Rücksprungkraft (F_7).
	Sprungweg	S_{SP}	Der Weg des Betätigers vom Rückstellpunkt (P_6) bis zum Rücksprung (P_7).
	Leerlaufweg	S_L	Der Weg des Betätigers vom Rücksprung (P_7) bis zur Ruhestellung (P_0).
P_8	Rücksprungkraft	F_7	Laut Definition von Rücksprungweg (P_8) ist sie gleich der Rückstellkraft (F_6)
	Rücksprungweg	S_{RS}	Der Weg des Betätigers vom Rückstellpunkt P_6 bis zum Ende des Rücksprungweges P_8 .

Tabelle A.2: Gewichtung von Merkmalen

	Messfehlerwahrscheinlichkeit	Einfachheit	Automatisierung	LabVIEW	Preis	Anpassungsfähigkeit	Überlastschutz	Herstellerunabhängigkeit	Know-how	Summe (+)	Gewichtung
Messfehlerwahrscheinlichkeit	X	+	+	+	+	+	+	+	+	8	0.24
Einfachheit	-	X	0	+	-	-	+	+	0	3	0.09
Automatisierung	-	0	X	+	0	-	+	+	-	3	0.09
LabVIEW	-	-	-	X	-	-	+	-	-	1	0.03
Preis	-	+	0	-	X	+	+	+	-	5	0.15
Anpassungsfähigkeit	-	+	+	+	-	X	+	+	-	5	0.15
Überlastschutz	-	-	-	-	-	-	X	+	-	1	0.03
Herstellerunabhängigkeit	-	-	-	+	-	-	-	X	+	2	0.06
Know-how	-	0	+	+	+	+	+	-	X	5	0.15

Tabelle A.3: Vergleich der unterschiedlichen Kraft-Weg-Systeme

	Manuell (Abb. 3.7)		Motorisiert (Abb. 3.9)		Roboter (Abb. 3.12)		Motorisiert (Abb. 3.12)	
	Ungewichtet	Gewichtet	Ungewichtet	Gewichtet	Ungewichtet	Gewichtet	Ungewichtet	Gewichtet
Messfehlerwahrscheinlichkeit	5	1.21	6	1.45	7	1.69	8	1.93
Einfachheit	10	0.91	9	0.82	6	0.55	8	0.73
Automatisierung	1	0.091	4	0.363	10	0.91	8	0.72
LabVIEW	1	0.091	4	0.36	10	0.91	8	0.73
Preis	10	1.52	9	1.36	2	0.30	7	1.06
Anpassungsfähigkeit	5	0.76	6	0.91	8	1.21	8	1.2
Überlastschutz	1	0.03	1	0.03	7	0.21	9	0.27
Herstellerunabhängigkeit	7	0.42	7	0.42	4	0.24	10	0.60
Know-how	4	0.61	4	0.61	4	0.61	10	1.52
Summe	44	5.58	47	6	57	6	77	8.33

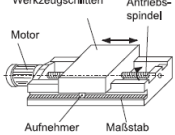
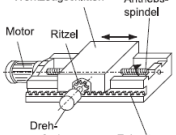

Direkte Messwerterfassung		Indirekte Messwerterfassung
Messsystem arbeitet transitorisch und ist unmittelbar mit der Längsbewegung des Maschinenschlittens gekoppelt	Antriebsselement und Wandler getrennt Umwandlung von Längs- in Drehbewegung über Zahnstange und Ritzel	Antriebsselement und Wandler identisch Erfassung der Längsbewegung über die Drehbewegung der Arbeitsspindel
		
Fehlereinflüsse <ul style="list-style-type: none"> • Temperatur • Teilungsfehler • Abstands- und Winkelfehler • Fehler an den Stoßstellen der Maßstäbe 	Fehlereinflüsse <ul style="list-style-type: none"> • Teilungsfehler der Zahnstange und des Ritzels • Exzentrizität des Ritzels • Fehler im eventuell eingesetzten Getriebe • Temperatur • Fehler des Aufnehmers • Stoßfehler der Zahnstange 	Fehlereinflüsse <ul style="list-style-type: none"> • Elastische Verformung der Spindel • Steigungsfehler • Verschiebungsfehler • Spiel • Verschleiß der Spindel • Fehler des Aufnehmers • Temperatur

Abbildung A.1: Fehlereinflüsse bei direkter und indirekter Messung [11]

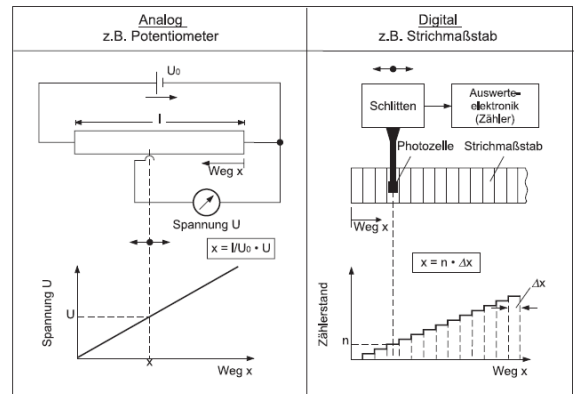


Abbildung A.2: Prinzip der analogen und digitalen Messwerterfassung [11]

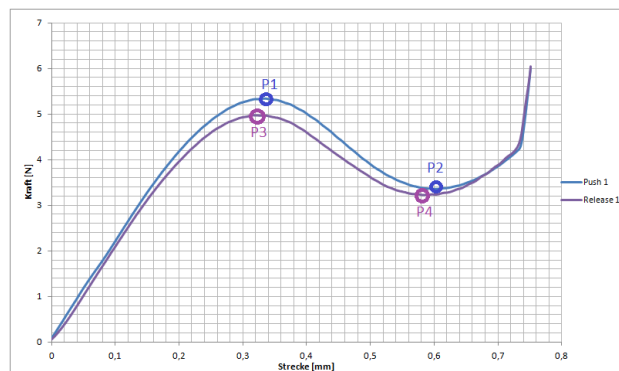


Abbildung A.3: Tastenhaptiknormal

Tabelle A.4: Komponenten

Bezeichnung	Abmessung [mm]	Material	Gewicht [kg]
Grundplatte	470x375x12	EN AW-2007	5.72
Distanzstück	38x19.9x23	EN AW-2007	0.044
Adapterplatte	225x174x8	EN AW-2007	0.84
Mitnehmer	247x24x14	EN AW-2007	0.072
Messhalter	70x70x30	EN AW-2007	0.15
A. Bodenplatte	225x174x4	EN AW-2007	0.419
Aufnahme MMI	150x134x400	EN AW-2007	0.150
Aufnahme MMI 2	68x15x35	EN AW-2007	0.05
Adapterplatte 2	359x62x30	EN AW-2007	0.6
Z-Halter 1	60x55x8	EN AW-2007	0.2
Z-Halter 2	77x70x25	EN AW-2007	0.1
Mitnehmer	60x15x15	EN AW-2007	0.012
Halterung	15x28x15	S235JR	0.022
Aufnehmer 1	40x62x8	EN AW-2007	0.09
Aufnehmer 2	55x60x15	EN AW-2007	0.08
Klemmer	12x37x42	S235JR	0.04
Bezeichnung	Abmessung	Hersteller	Gewicht
LX2001	210x26.2x39.4	MiSUMi	0.58
LX2605	360x32x50	MiSUMi	1.58
LX2605	260x32x50	MiSUMi	1.16
AR26SAKD	75x28x28	Oriental	0.22
LS 4x7-120	214x18.25x46.2	Heidenhain	0.46
LS 4x7-220	314x18.25x46.2	Heidenhain	0.51
Portal	450x260x110	MayTec	3.47
Controller	xx	Oriental	xx
DMS	xx	ME-Messt.	xx
Verstärker	xx	ME-Messt.	xx
DAQ	xx	NI	xx
Laptop	xx	DELL	xx

Tabelle A.5: Messung DMS und Briefwaage

Messung	DMS [g]	Waage
1	54	50
2	102	100
3	132	130
4	201	200
5	299	300
6	399	400
7	445	450
8	497	500
9	597	600
10	694	700
11	794	800
12	894	900
13	993	1000
14	1089	1100
15	1188	1200
16	1287	1300
17	1386	1400
18	1485	1500
19	1584	1600
20	1684	1700
21	1783	1800
22	1882	1900
23	1930	1950

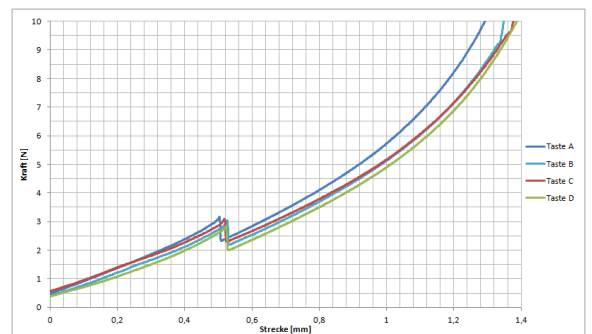
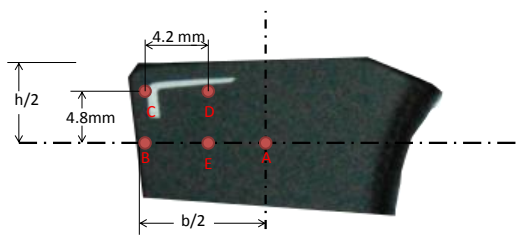


Abbildung A.5: Rückstellkurve Tasten A-D

Abbildung A.4: Druckpositionen

Tabelle A.6: Wiederholgenauigkeit Linearsystem LX2001P

Geschwindigkeit [Hz]	M1 [μm]	M2 [μm]	M3 [μm]	M4 [μm]	M5 [μm]	M_{avg} [μm]
Strecke = 2000 step						
500	2	2	1	3	1.2	1.84
1000	2	6	6	5	1	4
2000	1	0	1	0.8	0.2	0.6
5000	5	1	2	1.5	6.5	3.2
10000	5	1.5	0.2	0.1	0.1	1.38
20000	1	0.7	6	1	0.5	1.84
Strecke = 16000 step						
500	4	3.1	2	5	1	3.02
1000	3.8	1	3.2	6	3	3.4
2000	1	0.9	1	2	1.1	1.2
5000	2	1.5	1	1	7	2.5
10000	0.8	1	0.1	0.3	4.5	1.34
20000	1.9	4	1	1.2	4.7	2.56
Strecke = 80000 step						
500	6	2	6.5	5	3	4.5
1000	4	6	5	6	2	4.6
2000	2	3	4	3	6	3.6
5000	2	7	5	1	1	3.2
10000	3	1	7	3	2	3.2
20000	1	1.2	1.5	1.4	1.5	1.32

Tabelle A.7: Messung Kraft-Weg-Verlauf

Messung	Strecke [μm]	Kraft Hin [N]	Kraft Zurück [N]
1	0	0.003	0.004
2	5	0.01	0.007
3	10	0.22	0.02
4	15	0.52	0.022
5	20	0.8	0.25
6	30	1.90	1.19
7	40	3.2	2.57
8	50	4.70	4.08
9	60	6.29	5.64
10	70	7.90	7.23
11	80	9.49	8.78
12	90	11.16	10.21
13	100	12.65	11.48
14	110	14.04	12.84
15	120	15.39	14.41
16	130	16.83	16.01
17	140	18.25	17.80
18	150	19.74	19.74

Tabelle A.8: Rückstellkurve Messpunkte

	Taste A		Taste B		Taste C		Taste D	
	Kraft F [N]	Strecke s [mm]	F [N]	s [mm]	F [N]	s [mm]	F [N]	s [mm]
P0	0.91	0.1	0.78	0.1	0.96	0.1	0.71	0.1
P1	3.15	0.502	3.01	0.524	3.10	0.518	2.03	0.536
P2	2.38	0.518	2.23	0.54	2.33	0.532	2.83	0.522
P3	10.01	1.293	10.04	1.349	10.01	1.377	10.01	1.388
P1-P2	0.77	0.015	0.78	0.015	0.77	0.015	0.80	0.014

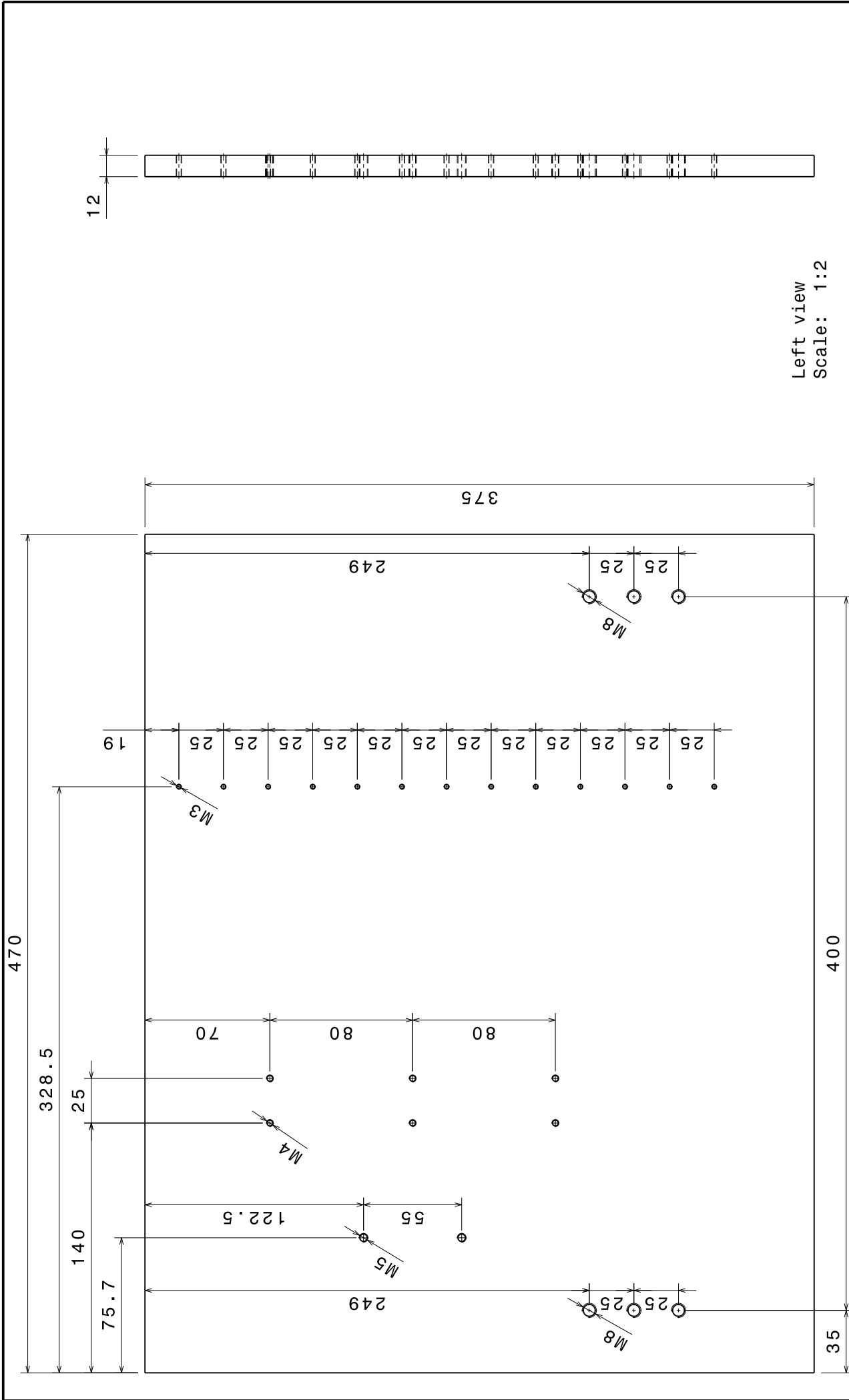
Tabelle A.9: Charakteristische Messpunkte

	P1	P2	Delta
Kraft [N]	5.346	3.359	1.987
Strecke [mm]	0.334	0.600	0.2665
	P3	P4	Delta
Kraft [N]	4.977	3.225	1.751
Strecke [mm]	0.317	0.585	0.268
	P1 - P3	P2 - P4	
Kraft [N]	0.370	0.134	
Strecke [mm]	0.0165	0.015	

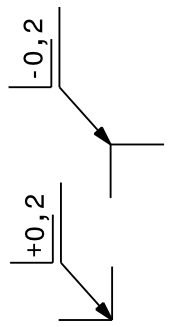
Anhang B

Technische Zeichnungen

Laut Anforderungsliste sollten möglichst viele Zukaufteile verwendet werden, jedoch lies sich nicht vermeiden, dass einige Komponenten gefertigt werden mussten. Folgende technische Zeichnungen wurden erstellt: Grundplatte, Distanztück, Adapterplatte, Mitnehmer, Messhalter, Bodenplatte, Aufnehmer MMI, Aufnehmer MMI 2, Adapterplatte 2, Z-Halter, Z-Halter 2, Z-Halter 3, Hand Mitnehmer, Hand Halter 1, Hand Aufnehmer 2, Hand Aufnehmer 1, Hand Klemmer, Zusammenbau Hand, Zusammenbau komplett.

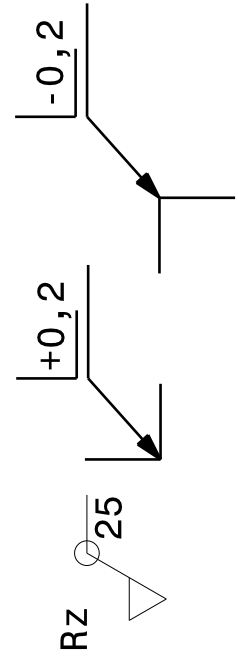
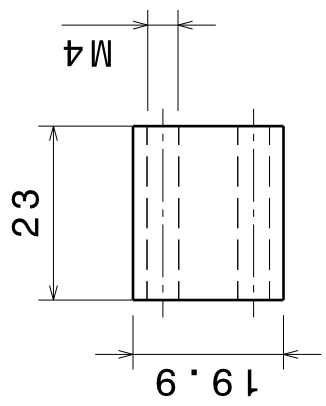
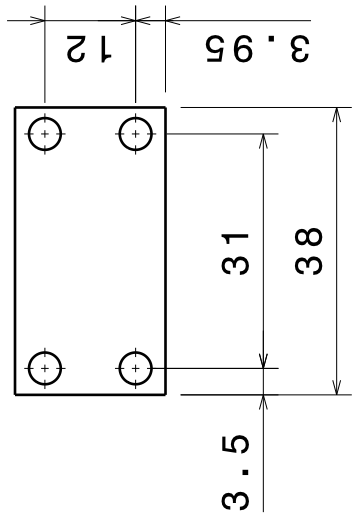


Left view
Scale: 1:2



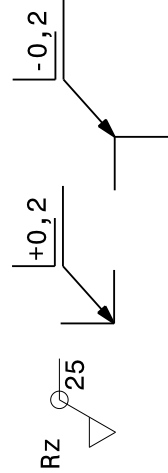
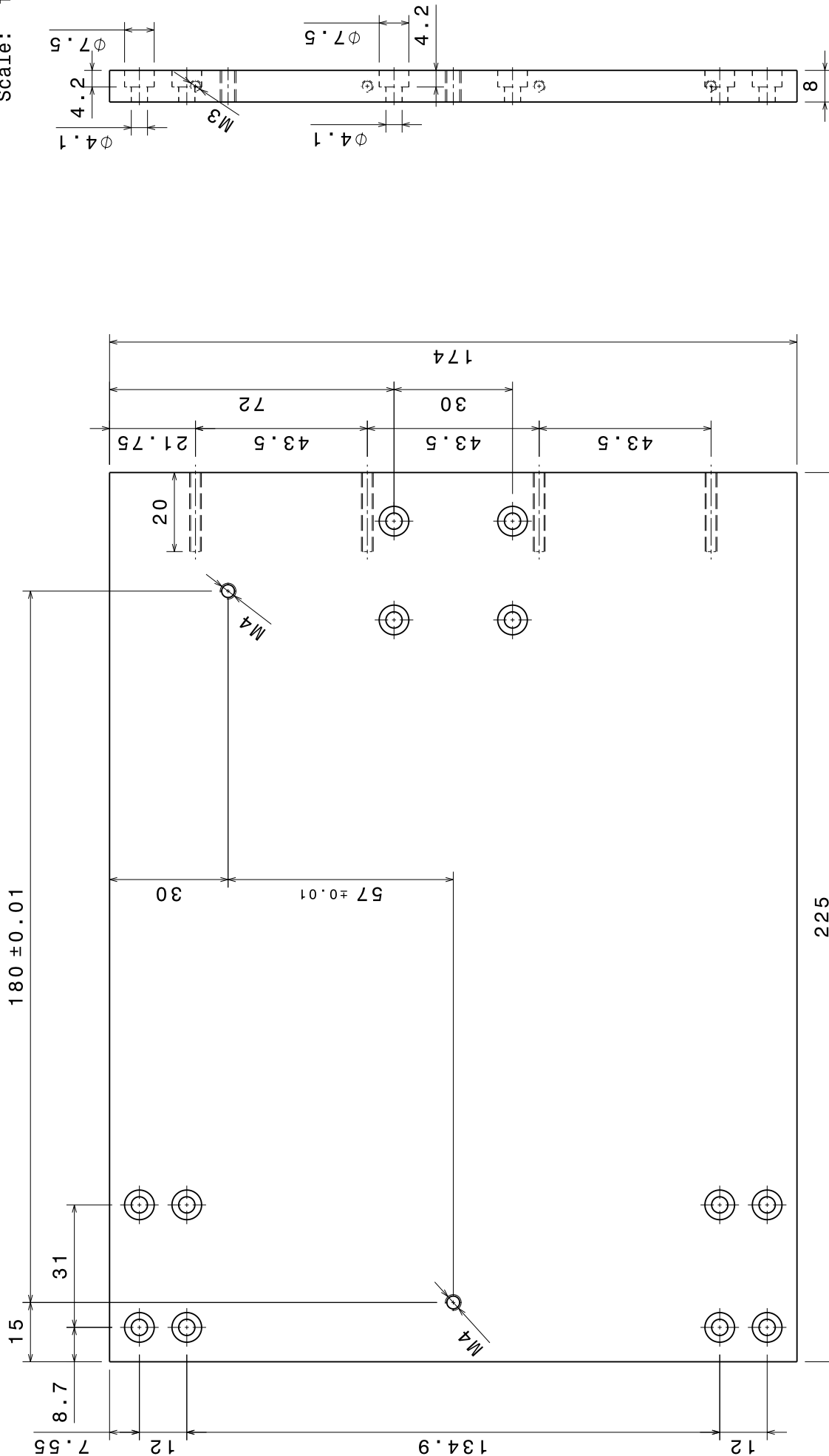
Front view
Scale: 1:2

1	Grundplatte	01	/	01	ALU (ENAW2007)	400x380x15	6
Position	Benennung	Stk.	Zeichnungsnr., Norm	Index	Werkstoff	Rohmass	Gewicht [kg]
Allgemeinreferenz ISO 2768 m	/	Name		Datum		ALPS	
Projektion	gezeichnet	Thomas Weger		29/10/2014		ALPS ELECTRIC EUROPE GmbH	
Maßstab	2D-Dateiname	Grundplatte.CATDrawing	Zeichnungsname:		Messsystem - Grundplatte		
1:2	3D-Dateiname	Grundplatte_3.CATPart			Zeichnungs-Nr.: 01		
					Index: 01		



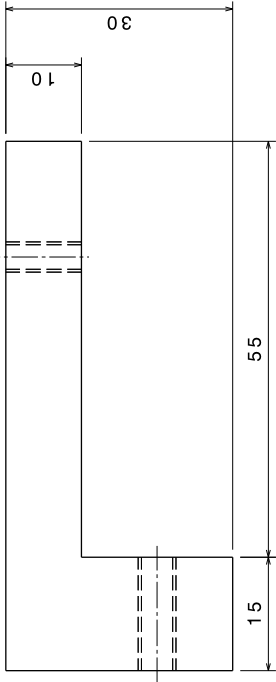
1	Distanzhalter	02	/	01	ALU	40x25x25	0.045	
Position	Benennung		Stk.	Zeichnungsnr., Norm	Index	Werkstoff	Rohmass	Gewicht [kg]
	/						ALPS	
Allgemeintoleranz ISO 2768 m		gezeichnet	Name	Datum	ALPS ELECTRIC EUROPE GmbH			
Projektion Maßstab 1:1		Thomas Weger	Thomas Weger	08/10/2014	Zeichnungsname: Messsystem - Distanzhalter			
		2D-Dateiname Distanzstueck2.CATDrawing	DistanzstueckLinearv2.CATPart		Zeichnungs-Nr.: 02		Index: 01	

Left view
Scale: 1:1

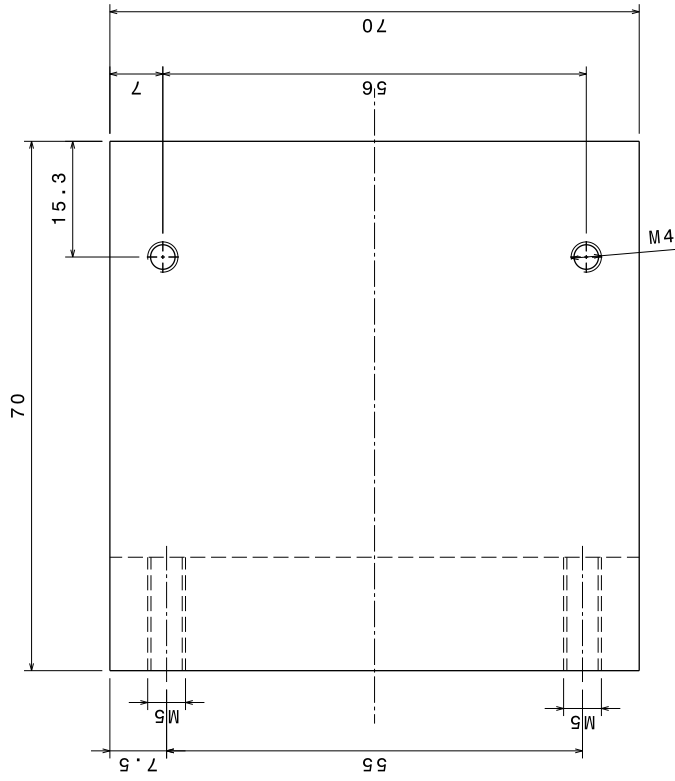


Front view
Scale: 1:1

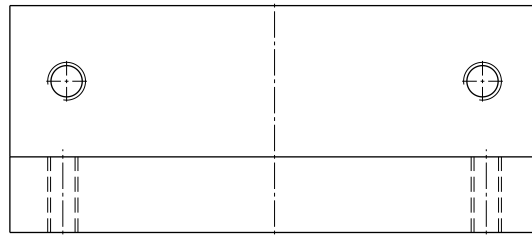
1	Adapterplatte	01	/	01	ALU (ENAW2007)	230x175x10	1	
Position	Benennung	Stk.	Zeichnungsnr., Norm	Index	Werkstoff	Rohmass	Gewicht [kg]	
Allgemeinreferenz ISO 2768 m	/	Name		Datum		ALPS		
Projektion	gezeichnet	Thomas Weger		29/10/2014		ALPS ELECTRIC EUROPE GmbH		
Maßstab	2D-Dateiname	AdapterplatteV2.CATDrawing						
1:1	3D-Dateiname	AdapterplatteV2.CATPart						
Messsystem - Adapterplatte								
Zeichnungs-Nr.: 03								Index: 01



Bottom view
Scale: 2:1



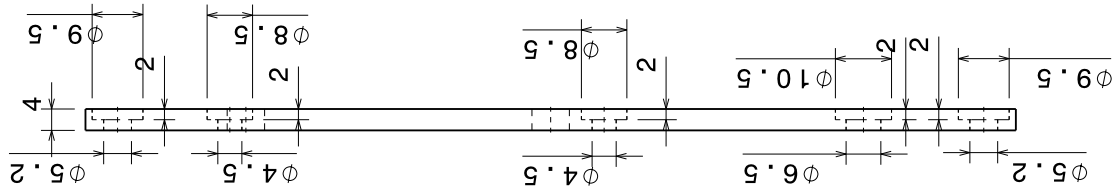
Front view
Scale: 2:1



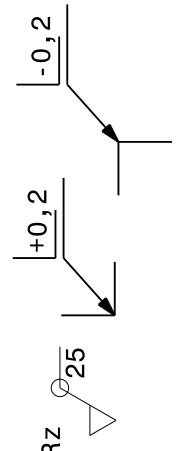
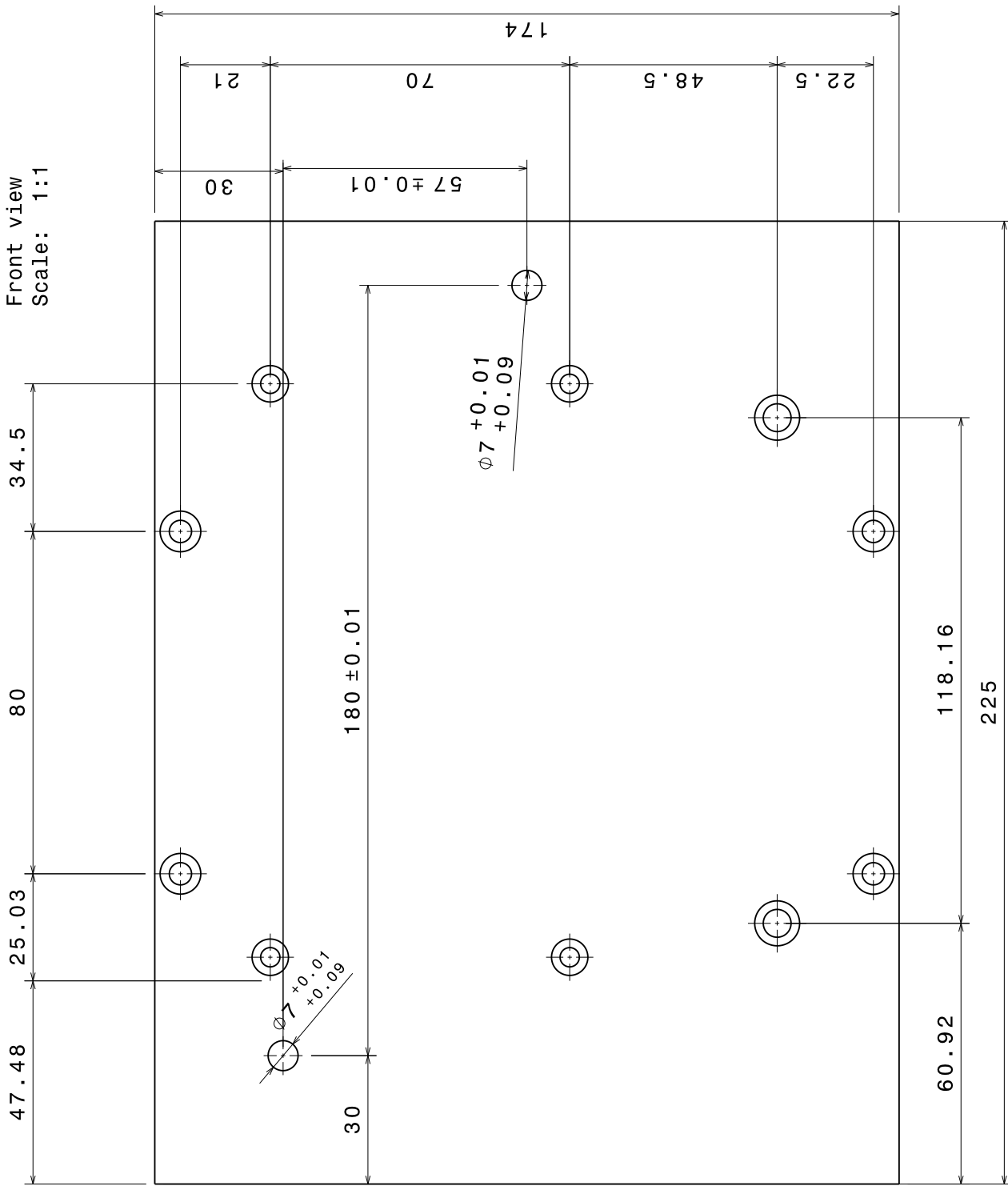
Right view
Scale: 2:1

1	Messhalter	01	/	01	ALU (EN12007)	80x80x40	0.15
Position	Benennung	Stk.	Zzeichnung-Nr.	Norm	Index	Reinhalt	Gewicht (kg)
Allgemeinbezeichnung Vollname	/	Name	Datum	ALPS			
Zeichener 2D-Datensatzname	Thomas Wegger	Messhalter-CATDrawing	29/10/2014	ALPS ELECTRIC EUROPE GmbH			
Projektion	Mastab	Messhalter-CATPart		Messsystem - Messhalter			
	2:1			Zeichnungs-Nr. : 05			
							Index: 01

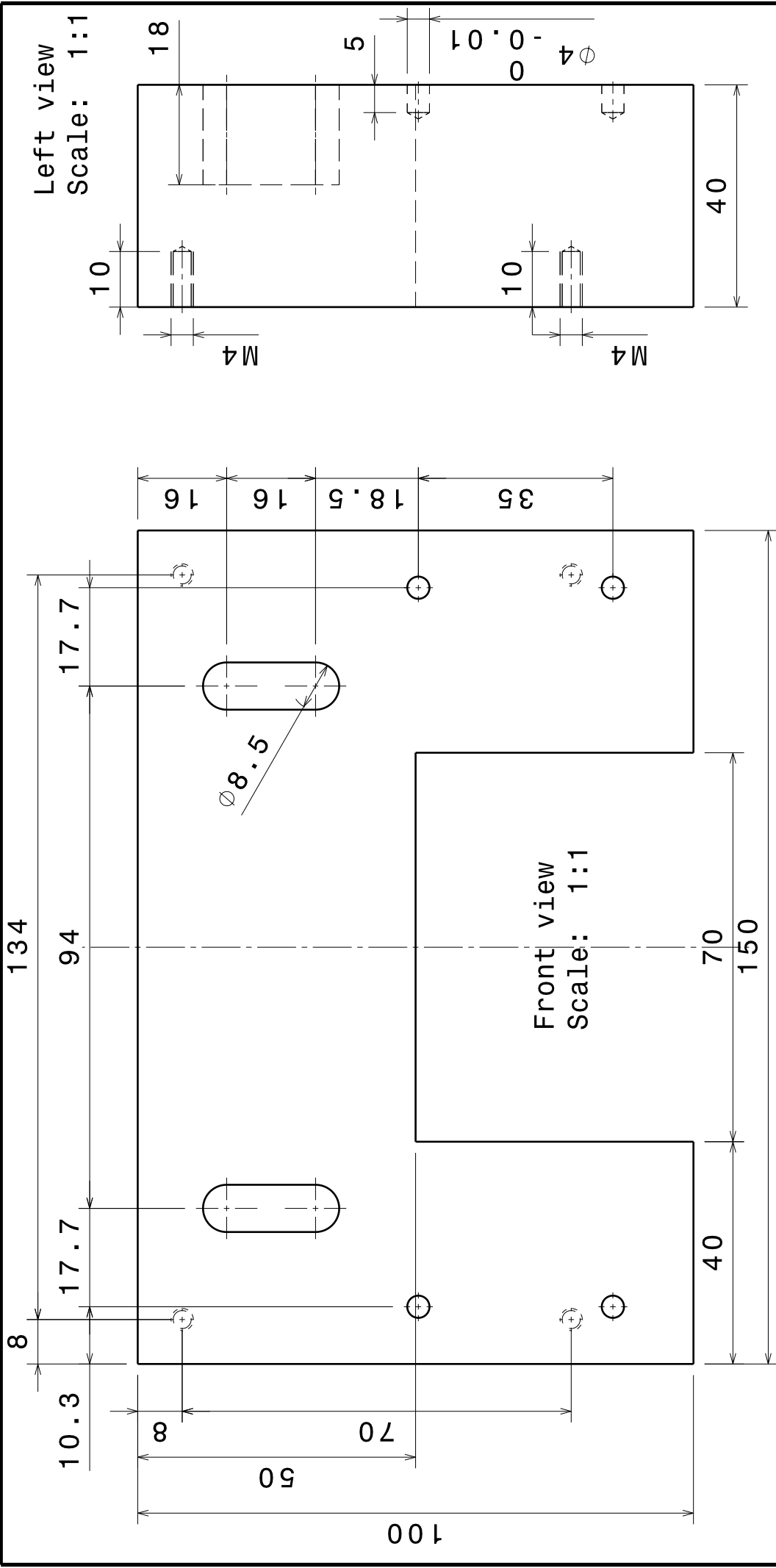
Left view
Scale: 1:1



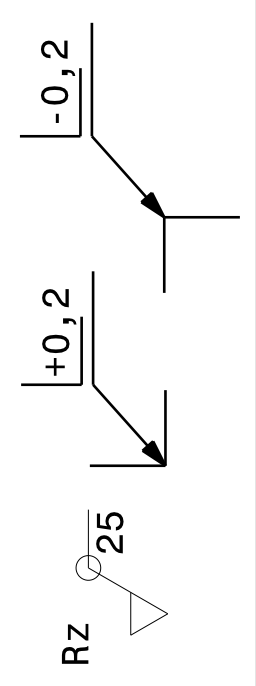
Front view
Scale: 1:1



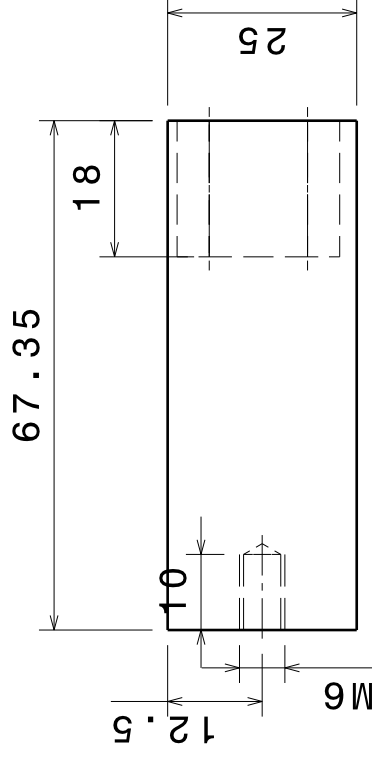
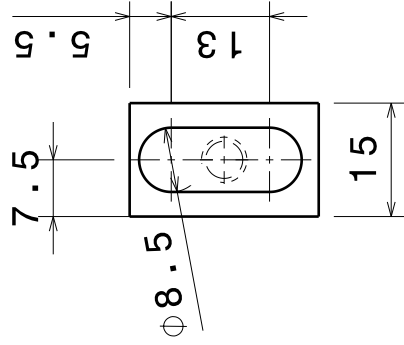
1	A. Bodenplatte	01	/	01	ALU (ENAW2007)	230x175x5	0.419	
Position	Benennung	Stk.	Zeichnungsnr., Norm	Index	Werkstoff	Rohmass	Gewicht [kg]	
Allgemeinspezif.anz ISO 2768 m	/	Name		Datum		ALPS		
Projektion Maßstab 1:1	gezeichnet Thomas Weger			29/10/2014		ALPS ELECTRIC EUROPE GmbH		
	2D-Dateiname AufnahmeBodenplatte.CATDrawing							
	3D-Dateiname Aufnahme-Bodenplatte.CATPart							
Messsystem-A. Bodenplatte								
Zeichnungs-Nr.: 06								Index: 01



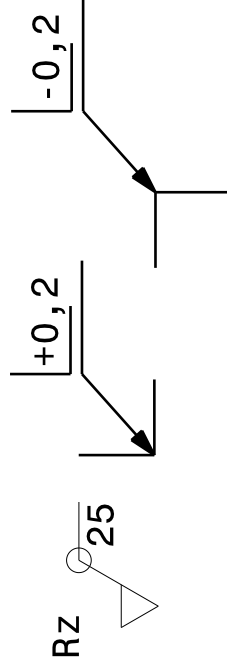
1	Aufnehmer MMI	01	/	01	ALU	160x50x110	0.150
Position	Benennung	Stk.	Zeichnungsnr., Norm	Index	Werkstoff	Rohmass	Gewicht [kg]
Allgemeintoleranz ISO 2768 m	/	Name	Datum		ALPS	ALPS ELECTRIC EUROPE GmbH	
Projektion 	Maßstab 1:1	Thomas Weger	13/10/2014		Zeichnungsname: Messsystem - Aufnehmer MMI		
	2D-Dateiname AufnehmerMMI.CATDrawing	AufnehmerMMI.CATPart			Zeichnungs-Nr.: 07		
	3D-Dateiname AufnehmerMMI.CATPart				Index: 01		



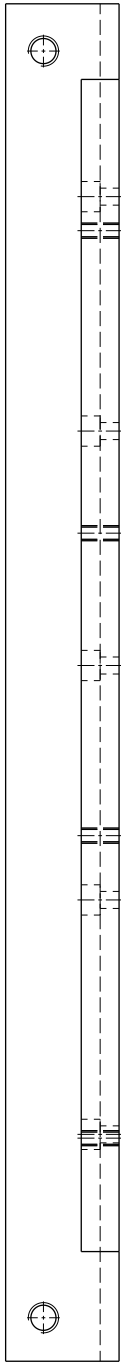
Front view
Scale: 1:1



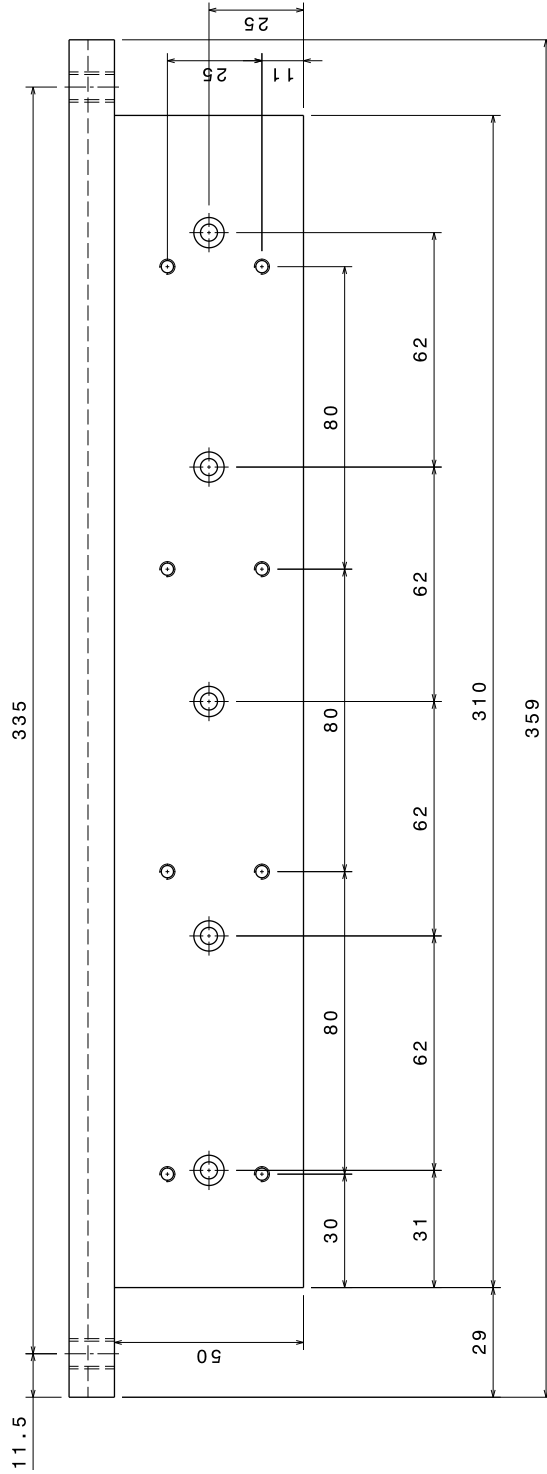
Left view
Scale: 1:1



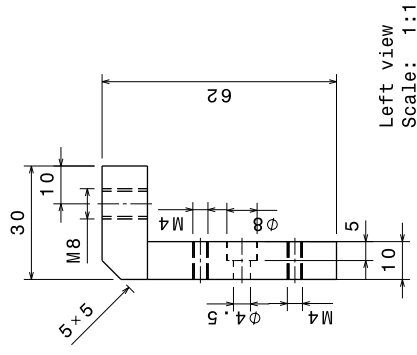
1	Aufnehmer MMI P2	02	/	01	ALU	20x70x30mm	0.02	
Position	Benennung		Stk.	Zeichnungsnr., Norm	Index	Werkstoff	Rohmass	Gewicht [kg]
Allgemeintoleranz ISO 2768 m	/	Name	Datum		ALPS			ALPS ELECTRIC EUROPE GmbH
Projektion	Maßstab 1:1	gezeichnet Thomas Weger	08/10/2014		Messsystem - A. MMI P2			
		2D-Dateiname AufnehmerMMI2P2.CATDrawing			Zeichnungsname:			
		3D-Dateiname Aufnehmer_MMIV3P2.CATPart			Zeichnungs-Nr.: 08			Index: 01



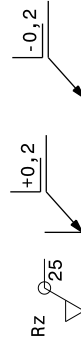
Bottom view
Scale: 1:1



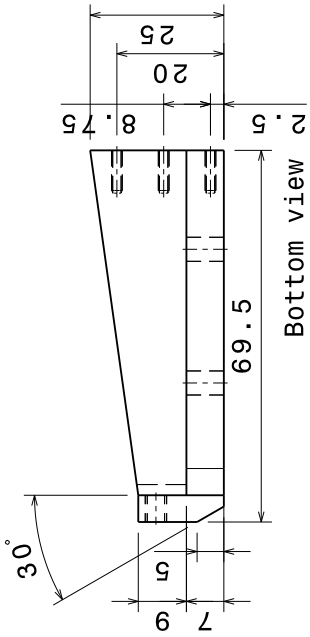
Front view
Scale: 1:1



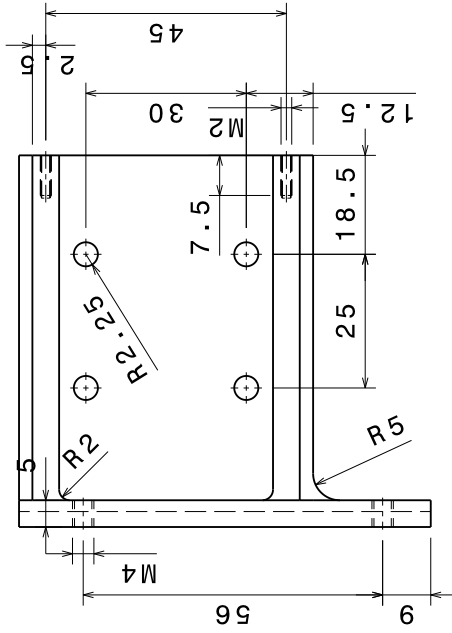
Left view
Scale: 1:1



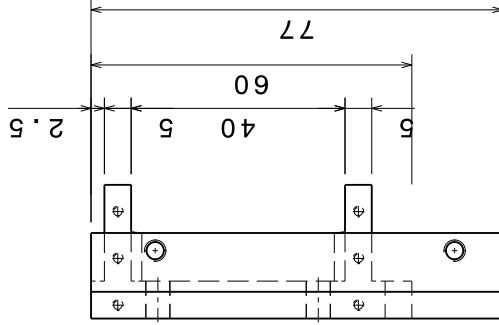
1	Adapterplatte 2	01	/	01	ALU (ENW2007)	365x30x70	0,6
Position	Benennung	Stk.	Zuschungsnr.	Norm	Index	Reinass	Gewicht (kg)
ALLIEMANNSBURG VIERMOT m	/					Werkstoff	
Projektion	Maßstab	Name	Datum	Zeichnungsname:			
1:1	1:1	Thomas Wegger	29/10/2014	ALPS ELECTRIC EUROPE GmbH			
		2D-Datensatz: CADDrawing		Messsystem-Adapterplatte2			
		3D-Datensatz		Adapterplatte-CADPart			
				Zeichnungs-Nr.: 09			
				Index: 01			



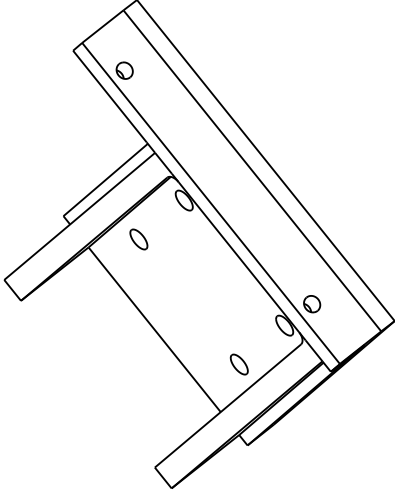
Bottom view
Scale: 1:1



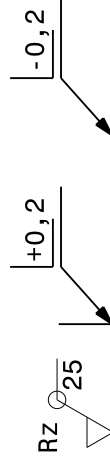
Front view
Scale: 1:1



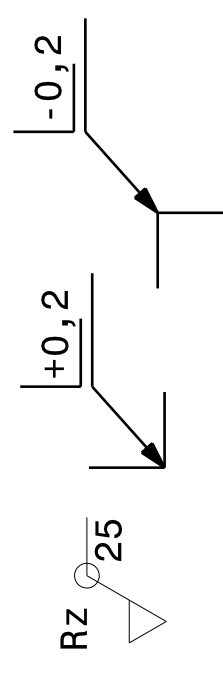
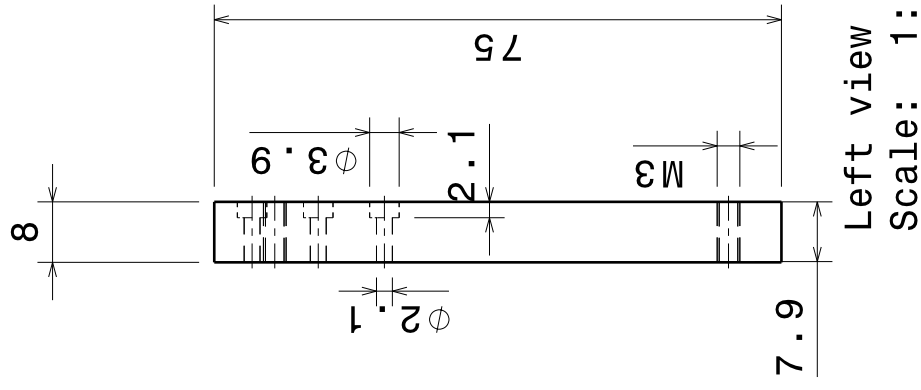
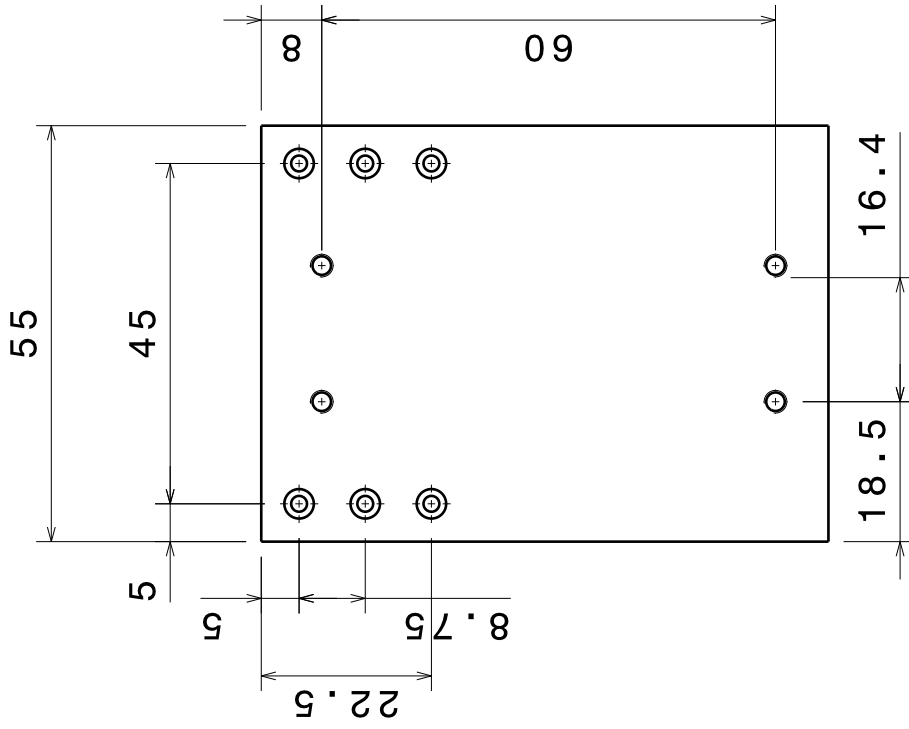
Left view
Scale: 1:1



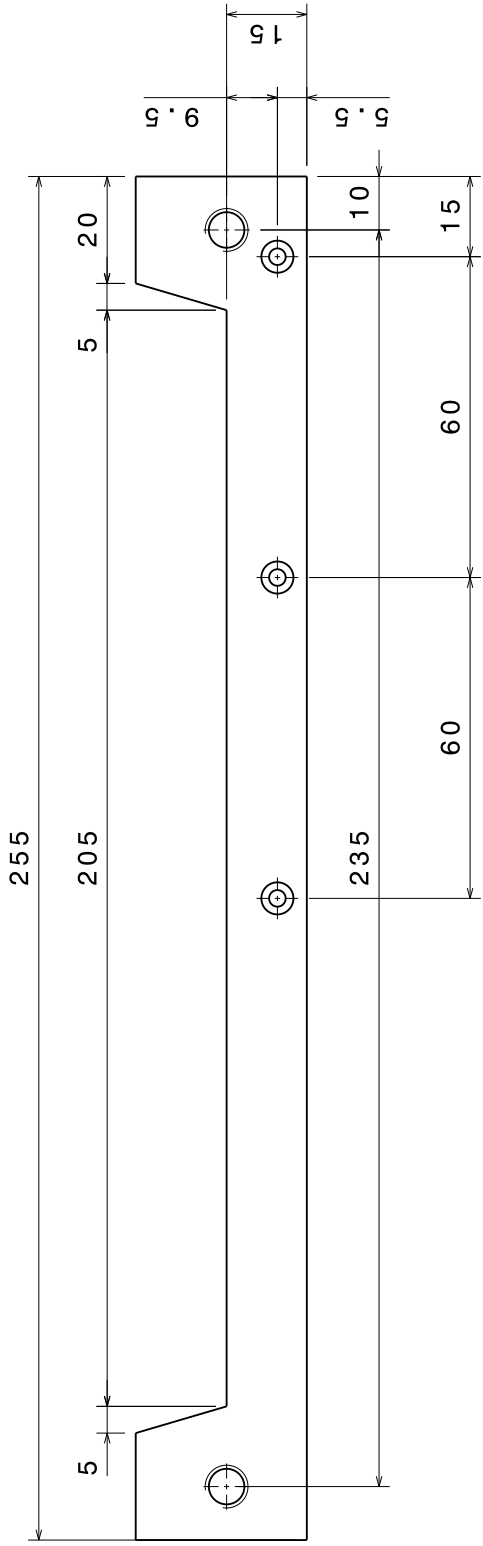
Isometric view
Scale: 1:1



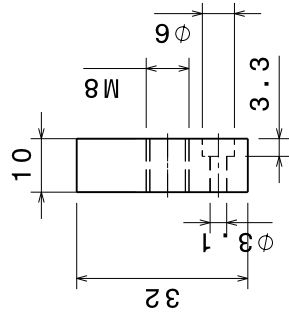
1	Z-Halter 1	01	/	01	ALU (ENAW2007)	80x80x30	0.7
Position	Benennung	Stk.	Zeichnungsnr., Norm	Index	Werkstoff	Rohmass	Gewicht [kg]
Allgemeinreferenz ISO 2768 m	/	Name	Datum		ALPS		
Projektion	Maßstab	gezeichnet	29/10/2014		ALPS ELECTRIC EUROPE GmbH		
1:1	1:1	Thomas Weger	Zeichnungsname:		Messsystem - Z-Halter		
		Zhalter.CATDrawing	3D-Dateiname		Zeichnungs-Nr.: 10		
		ZhalterP1.CATPart	Index:		01		



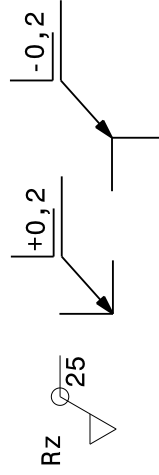
1	Z-Halter 2	01	/	01	ALU (ENAW2007)	80x60x10	0.1		
Position	Benennung		Stk.	Zeichnungsnr., Norm	Index	Werkstoff	Rohmass	Gewicht [kg]	
	/		Name	Datum		ALPS ALPS ELECTRIC EUROPE GmbH			
Allgemeintoleranz ISO 2768 m		gezeichnet	Thomas Weger		Zeichnungsname:			Messsystem - Z-Halter 2	
Projektion	Maßstab	2D-Dateiname		29/10/2014					
	1:1	ZHalte2.CATDrawing							
		3D-Dateiname		ZHalteP2.CATPart		Zeichnungs-Nr.: 11		Index: 01	



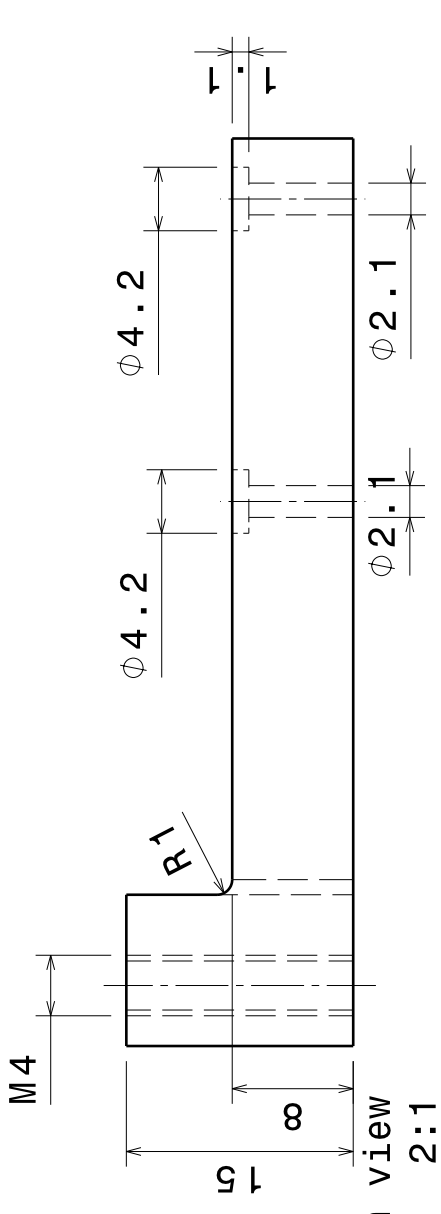
Front view
Scale: 1:1



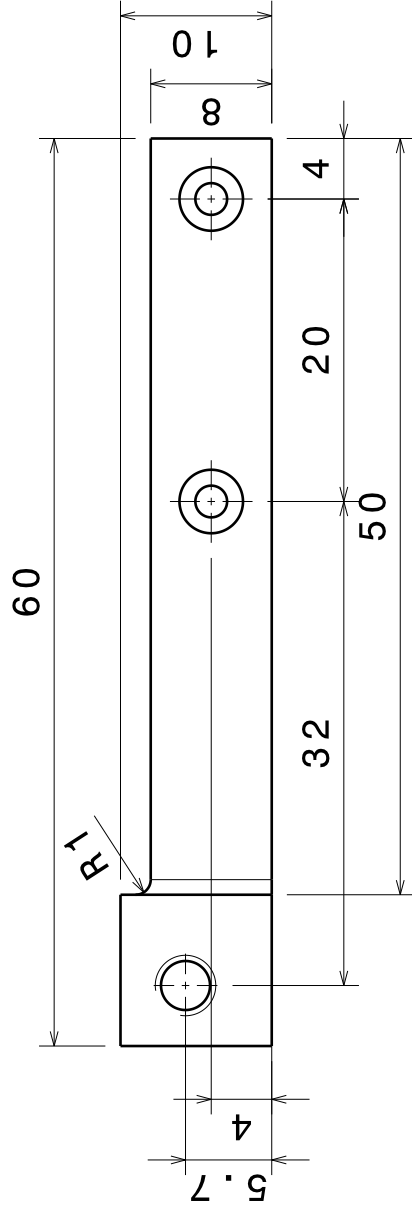
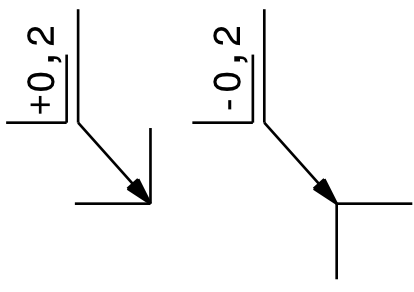
Left view
Scale: 1:1



1	Z Halter Laeng	01	/	01	01	Alu	260x35x15	0.4
Position	Benennung	Stk.	Zeichnungsnr., Norm	Index	Index	Werkstoff	Rohmass	Gewicht [kg]
Allgemeinreferanz ISO 2768 m	/	Name		Datum			ALPS	
Projektion	gezeichnet	Thomas Weger	13/10/2014				ALPS ELECTRIC EUROPE GmbH	
Maßstab	2D-Dateiname	ZhalterLaengmessgeraet.CATDrawing					Messsystem - Z Halter	
1:1	3D-Dateiname	ZhalterLaengmessgeraet.CATPart					Zeichnungs-Nr.: 12	Index: 01



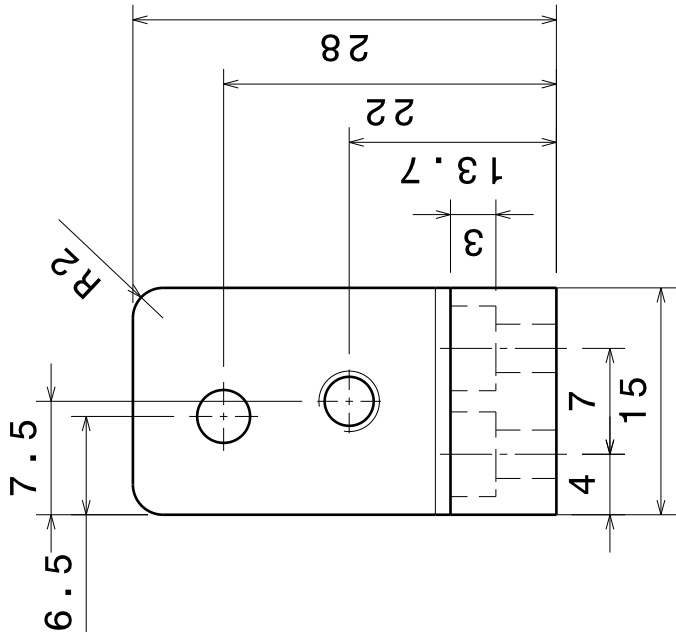
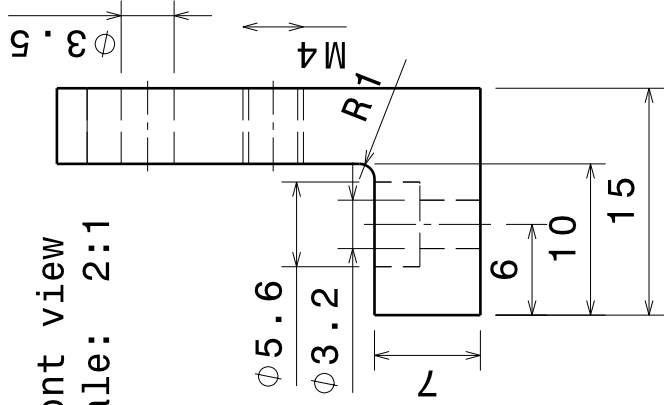
Bottom view
Scale: 2:1



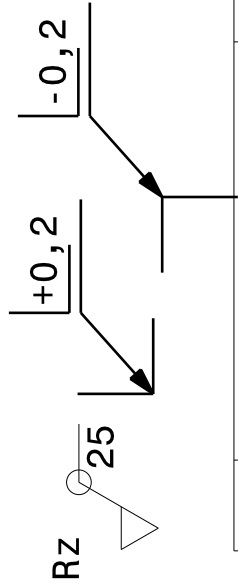
Front view
Scale: 2:1

1	Hand Mitnehmer	01	/	01	ALU(ENAW2007)	70x20x15	0.015
Position	Benennung		Stk.	Zeichnungsnr., Norm	Werkstoff	Rohmass	Gewicht [kg]
Allgemeintoleranz ISO 2768 m	/	Name	Thomas Weger	Datum	ALPS ALPS ELECTRIC EUROPE GmbH		
Projektion	gezeichnet	HandMitnehmer.CATDrawing	2D-Dateiname	29/10/2014	Zeichnungsname:		
Maßstab 2:1	2D-Dateiname	HandMitnehmer.CATPart	3D-Dateiname	Messsystem - H. Mitnehmer			
				Zeichnungs-Nr.:	13	Index:	01

Front view
Scale: 2:1

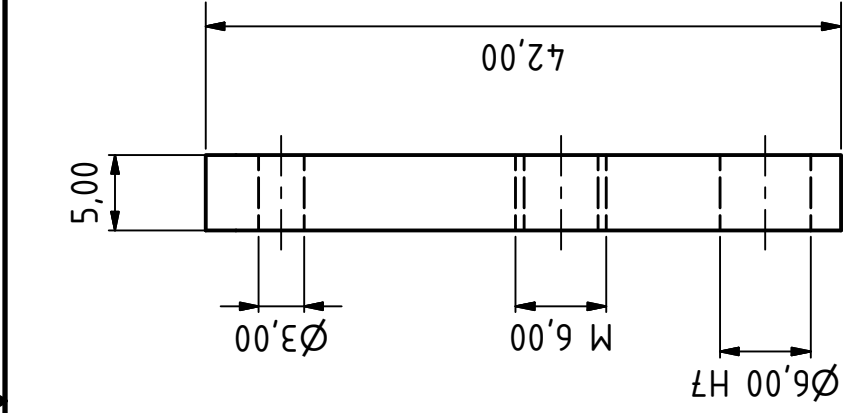
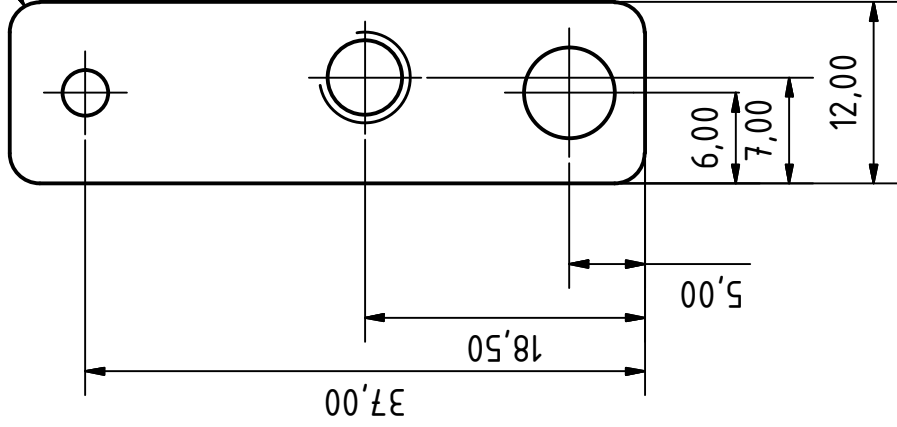


Left view
Scale: 2:1



1	Hand Halter 1	01	/	01	S235JR	30x20x20	0.01	
Position	Benennung		Stk.	Zeichnungsnr., Norm	Index	Werkstoff	Rohmass	Gewicht [kg]
Allgemeintoleranz ISO 2768 m	/	Name	Thomas Weger	Datum	29/10/2014	ALPS ALPS ELECTRIC EUROPE GmbH		
Projektion	Maßstab	2D-Dateiname		Zeichnungsname:				
	2:1	HandHalter1.CATDrawing		Messsystem - H. Halter1				
		3D-Dateiname		Zeichnungs-Nr.: 14				Index: 01
		HandHalter2.CATPart						

R2,00



RZ 25

Stahl		ISO 2768-m	
Maßstab 2:1			
Messsystem			
Gezeichnet		Datum	
03.09.2014		Thomas	
Kontrolliert		Georg Prokrein	
Freigabe			
Name		Name	
Änderungen		Datum	
Status		Name	
1		Klemmer	
A4			

Anhang C

Inhalt DVD

C.1 Masterarbeit

Pfad: /01_Masterarbeit

- [MA_ThomasWeger.pdf](#) Masterarbeit (Gesamtdokument)
- [MA_ThomasWeger_PP.pdf](#) Präsentation der Masterarbeit

C.2 Datenblätter

Pfad: /02_Datenblaetter

- [gsv1a.pdf](#) DMS-Messverstärker GSV-1A
- [Heidenhain.pdf](#) Längenmessgeräte für gesteuerte
Werkzeugmaschinen
- [kd45.pdf](#) Kraftsensor KD45
- [LX20.pdf](#) Single Axis Actuator LX20
- [LX26.pdf](#) Single Axis Actuator LX26
- [MotorARSerier.pdf](#) . . . High-Efficiency AR Series
- [xSerie.pdf](#) Datenerfassungsmodul der X-Serie

C.3 Technische Zeichnungen

Pfad: /03_TechnischeZeichnungen

- [01_Grundplatte.pdf](#) . . Zeichnung der Grundplatte
- [02_Distanzstueck2.pdf](#) Zeichnung der Distanzstücke
- [03_AdapterplatteV2.pdf](#) Zeichnung der Adapterplatte
- [04_Mitnehmer.pdf](#) . . . Zeichnung des Mitnehmers
- [05_Messhalter.pdf](#) . . . Zeichnung des Messhalters

06_AufnahmeBodenplatte.pdf	Zeichnung des Aufnehmers (Bodenplatte)
07_AufnehmerMMI.pdf	Zeichnung des Aufnehmers für MMI
08_AufnehmerMMIP2.pdf	Zeichnung des Aufnehmers für MMI 2
09_Adapterplatte4.pdf	Zeichnung Adapterplatte
10_ZHalteung1.pdf . .	Zeichnung Z-Halterung
11_ZHalteung2.pdf . .	Zeichnung Z-Halterung 2
12_ZHalteLaengenmessgeraet.pdf	Zeichnung Z-Halterung für Messgerät
13_HandMitnehmer.pdf	Zeichnung Mitnehmer
14_Halterung-1.pdf . .	Zeichnung Halterung 1
15_Aufnehmer2.pdf . .	Zeichnung Aufnehmer 2
16_Aufnehmer1.pdf . .	Zeichnung Aufnehmer 1
17_Klemmer.pdf	Zeichnung Klemmer
18_Messkopf_Bau2.pdf	Zusammenbau Messkopf
ZHalteungKomplett.pdf	Zusammenbau Z-Halter
ZusammenbauBodenplatte.pdf	Zusammenbau Bodenplatte
ZusammenbauKomplett.pdf	Zusammenbau Komplettsystem
ZusammenbauMessobjekt.pdf	Zusammenbau Messobjekt
ZusammenbauTraeger.pdf	Zusammenbau Träger

C.4 Programme

Pfad: /04_Programme

LabVIEWSourceFILES.zip Ordner mit den LabVIEW Programmen

C.5 Bilder und Videos

Pfad: /05_FotosVideo

00_Zusammenbau.JPG	Gesamtssystem
01_Zusammenbau.JPG	Gesamtssystem
02_Zusammenbau.JPG	Gesamtssystem
03_Zusammenbau.JPG	Gesamtssystem
04_Grundplatte.JPG . .	Grundplatte
05_Aufnehmer.JPG . .	Aufnehmer
06_Hand.JPG	Messhand
07_Hand.JPG	Messhand
MessungVideo.MP4 . .	Video einer Messung

Quellenverzeichnis

Literatur

- [1] Bosch Rexroth AG. *Handbuch Lineartechnik*. 1. Aufl. Schweinfurt: Bosch Rexroth AG, 2014 (siehe S. 22, 31, 32, 41, 42).
- [2] Nikolay Anguelov. „Haptische und akustische Kenngrößen zur Objektivierung und Optimierung der Wertanmutung von Schaltern und Bedienfeldern für den Kfz-Innenraum“. Dissertation. Dresden: Technische Universität Dresden, Mai 2009 (siehe S. 15, 19, V).
- [3] Alfred Böge. *Handbuch Maschinenbau*. 17. Aufl. Braunschweig: Vieweg Verlag, 2004 (siehe S. 37).
- [4] MISUMI Cooperation. *Produktkatalog: MiSUMi*. Techn. Ber. MiSUMi, Juli 2012 (siehe S. 29, 31, 33, 37, 40).
- [5] Christoph Doerrer. „Entwurf eines elektromechanischen Systems für flexible konfigurierbare Eingabefelder mit haptischer Rueckmeldung“. Dissertation. Hagenberg: Fachhochschule Oberösterreich, Juli 2003 (siehe S. 13).
- [6] Leonhard Reindl Elmar Schrufer und Bernhard Zagar. *Elektrische Mestechnik: Messungen elektrischer und nicht elektrischer Größen*. 10. Aufl. Leipzig: Carl Hanser Verlag, 2012 (siehe S. 19, 20).
- [7] IEF Werner GmbH. *Produktkatalog: Positioniersysteme*. Techn. Ber. IEF Werner, Juli 2014 (siehe S. 24, 25).
- [8] MayTec GmbH. *Produktkatalog: Das Profil System*. Techn. Ber. MayTec, Jan. 2013 (siehe S. 24, 25).
- [9] Eberhard Kallenbach Hans-Dieter Stoelting. *Handbuch elektrische Kleinantriebe*. 1. Aufl. Leipzig: Carl Hanser Verlag, 2001 (siehe S. 42).
- [10] Thomas A. Kern. *Entwicklung haptischer Geraete: Ein Einstieg für Ingenieure*. 1. Aufl. Heidelberg: Springer-Verlag, 2009 (siehe S. 10).
- [11] Christian Brecher Manfred Weck. *Werkzeugmaschinen 3: Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose*. 1. Aufl. Aachen: VDI-Buch, 2005 (siehe S. 27–29, 53, IV, VIII).

- [12] Richard Marklin Mark Nagurka. *Measurement of impedance characteristics of computer keyboard keys*. Techn. Ber. Marquette University, Department of Mechanical und Industrial Engineering, März 2004 (siehe S. 19).
- [13] ME-Meßsysteme. *Skalierung des Ausgangssignals*. Techn. Ber. ME-Meßsysteme GmbH, Jan. 2014 (siehe S. 55, 56, 58).
- [14] Mittermeier Müller. *LAH Haptik und Akustik für Bedienelemente*. Techn. Ber. Audi AG, Feb. 2011 (siehe S. 3, 4).
- [15] Dipl.-Ing. Otto Olbrich Prof. Dr.-Ing. Andreas Ettemeyer. *Konstruktionsselemente*. Techn. Ber. Hochschule München, Fakultät 06, Feb. 2010 (siehe S. 66, 67).
- [16] Joerg Reisinger. „Parametrisierung der Haptik von handbetätigten Stellteilen“. Dissertation. Hagenberg: Fachhochschule Oberösterreich, Juli 2008 (siehe S. 1, 10–12).
- [17] Andreas Stahlhofen. *Kraftsensoren*. Techn. Ber. Universität Koblenz, Aug. 2009 (siehe S. 55).
- [18] Thomas Weger. „Modellierung eines Lenkungssystems“. Bachelor-Thesis. Karlsruhe, Deutschland: Hochschule Karlsruhe, Juli 2012 (siehe S. 7, 8).
- [19] Colgate E Wei D Peshkin M. *Switch Characterization and the Haptic Profile*. Techn. Ber. Northwestern University, Department of Mechanical Engineering, März 2004 (siehe S. 13).

Online-Quellen

- [20] *CK-TEC Ingenieurbüro*. 2014.09.01. URL: <http://s553267174.website-start.de/> (siehe S. 8).
- [21] *Der passende Bus für Ihr Messsystem*. 2014.10.02. URL: <http://www.ni.com/white-paper/9401/de/> (siehe S. 59).
- [22] *Der passende Computer für Ihr Messsystem*. 2014.10.02. URL: <http://www.ni.com/white-paper/13660/de/> (siehe S. 65).
- [23] *Die passende Datenerfassungshardware für Ihr Messsystem*. 2014.10.02. URL: <http://www.ni.com/white-paper/13655/de/#h32> (siehe S. 59).
- [24] *Haptikmessungen an Bedienpanel*. 2014.09.15. URL: http://www.e-wilhelm-gmbh.de/htm_files/lina/applikationen/appli_an15.htm (siehe S. 19).
- [25] *Haptikprüfung*. 2014.09.18. URL: <http://www.seitzinger-popp.de/prueftechnik.html> (siehe S. 19).

- [26] *Horch mal!* 2014.09.01. URL: <http://blog.audi.de/2013/03/21/horch-mal/> (siehe S. 13).
- [27] *Kraft - Teststände.* 2014.09.12. URL: <http://www.warensortiment.de/> (siehe S. 18).
- [28] *Vorspannkräfte und Anziehmomente für Metrische Schrauben.* 2014.12.04. URL: <http://www.schrauben-normen.de/anziehmomente.html> (siehe S. 67).
- [29] *Was bedeuten Kalibrieren, Justieren, Messen und Eichen?* 2015.01.10. URL: <http://www.atlascopco.com/toolservicede/kalibrierung/> (siehe S. III).
- [30] *Was ist Datenerfassung?* 2014.10.02. URL: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/d/> (siehe S. 59, 64).