



Zur Erlangung des Grades  
eines  
Bachelor of Engineering (B.Eng.)

von Herrn Alexander Böhm

geboren am: 20.12.1989

in: Halle (Saale)

Fachbereich: Ingenieur- und Naturwissenschaften

Studiengang: Mechatronik, Industrie- und Physiktechnik

Vorgelegte Abschlussarbeit: Bachelorarbeit

Thema:

Bau und Inbetriebnahme eines Prüfstands für elektrische Radnabenmotoren

Erstprüfer: Herr Prof. Dr. rer. nat. Uwe Heuert

Zweitprüfer: Herr Dipl. Ing. (FH) Peter Klotz

Merseburg, 30.10.2013

## Inhaltsverzeichnis

SYMBOLVERZEICHNIS .....	6
FORMELVERZEICHNIS .....	7
1. EINLEITUNG .....	9
2. ZIEL DER ARBEIT .....	10
3. AUFGABENSTELLUNG.....	10
3.1. AUFGABE .....	10
3.2. ANFORDERUNGEN .....	11
3.3. RANDBEDINGUNGEN.....	12
4. THEORETISCHE GRUNDLAGEN.....	13
4.1. MÖGLICHKEITEN DER DREHMOMENTMESSUNG .....	13
4.2. ARTEN VON BELASTUNGSMASCHINEN .....	15
5. ANLAGENÜBERSICHT .....	16
5.1. SCHEMATISCH .....	16
5.2. PRÜFSTAND.....	17
6. AUFBAU DES PRÜFSTANDES.....	18
6.1. GESTELL / BASIS.....	18
6.2. SCHUTZ .....	18
6.3. ELEKTRISCHE STEUERUNG DES PRÜFLINGS .....	19
6.3.1. ROBOTEQ – LBL1360C .....	19
6.3.2. KELLY CONTROLS – KBL48101X.....	19
6.4. BELASTUNGSMASCHINE UND ZUSÄTZLICHE HARDWARE .....	20
6.4.1. AUSWAHL DER GEEIGNETEN BELASTUNGSMASCHINE .....	20
6.4.2. GETRIEBEMOTOR.....	21
6.4.3. FREQUENZUMRICHTER - STEUERUNG DES GETRIEBEMOTORS .....	22
6.4.4. ZUSÄTZLICHE HARDWARE .....	23
6.4.4.1. BREMSCHOPPER UND BREMSWIDERSTAND .....	23
6.4.4.2. NETZFILTER.....	23
6.4.4.3. FREMDLÜFTER.....	23
6.5. MESS- UND STEUERUNGSTECHNIK .....	24
6.5.1. ELEKTRONIK ZUR MESSWERTAUFNahme UND STEUERAUSGABE .....	24
6.5.2. DREHZAHl-DREHMOMENTMESSWELLE .....	25
6.5.3. STROMMESSER .....	26
6.5.4. SPANNUNGSMESSER.....	27
6.6. MECHANISCHE ELEMENTE .....	28
6.6.1. KOMPONENTEN ZUR MOTORENAUFNAHME .....	28
6.6.2. MOTORHALTER UND FÜHRUNGSSCHIENEN.....	29
6.6.3. KUPPLUNGEN ZUR KRAFTÜBERTRAGUNG.....	29
6.6.3.1. STAHLlamellenKUPPLUNG .....	30

6.6.3.2. KLAUENKUPPLUNG MIT KUNSTSTOFFZAHNKRANZ.....	31
6.7. BLOCKDIAGRAMM ZUR ABLAUFSTRUKTUR.....	32
7. PROGRAMMIERUNG DES PRÜFSTANDES .....	33
7.1. VERWENDETE PROGRAMMIERSOFTWARE .....	33
7.2. MESS- UND STEUERUNGSPROGRAMM.....	33
7.2.1. ANFORDERUNGEN .....	33
7.2.2. PROGRAMMIERUMGEBUNG UND DIE WICHTIGSTEN FUNKTIONEN .....	34
7.2.3. PROGRAMMSTRUKTUR (ABLAUFPLAN) .....	35
7.2.4. DETAILLIERTE PROGRAMMBESCHREIBUNG.....	37
7.2.4.1. DAS EINGABEFENSTER.....	37
7.2.4.2. DIE PRÜFOBERFLÄCHE .....	39
7.2.5. PROTOKOLLIERUNG DER GEMESSENEN DATEN.....	40
8. GETESTETE MOTOREN .....	41
8.1. KOMPONENTEN – AUFBAU UND FUNKTIONSPRINZIP.....	41
8.1.1. RADNABENMOTOR .....	41
8.1.2. VERGLEICH ZU BÜRSTENBEHAFTETEN MOTOREN.....	41
8.1.3. MAGNETBREMSE .....	43
8.2. ERGEBNISSE.....	44
8.2.1. GEGENÜBERSTELLUNG ERRECHNETER UND GEMESSENER DATEN ..	44
8.2.2. AUSWERTUNG .....	44
9. FAZIT .....	47
9.1. FUNKTIONSTEST DES MOTORS .....	47
9.2. BEURTEILUNG DES PRÜFSTANDES .....	47
9.3. PROBLEME – BEHEBUNG .....	49
10. FEHLERBETRACHTUNG .....	50
11. MÖGLICHE ERWEITERUNGEN DES PRÜFSTANDES.....	51
QUELLENVERZEICHNIS .....	52
TABELLENVERZEICHNIS .....	52
ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	52
ANLAGENVERZEICHNIS .....	52

## Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Physikalische Größe
M	Nm (Newtonmeter)	Drehmoment
n	min <sup>-1</sup>	Drehzahl
U	V (Volt)	Spannung
I	A (Ampere)	Strom
$\eta$		Wirkungsgrad
P	W (Watt)	Leistung
P <sub>zu</sub>	W (Watt)	Zugeführte Leistung
P <sub>ab</sub>	W (Watt)	Abgegebene Leistung
$\omega$	Rad/s	Winkelgeschwindigkeit
W	J (Joule)	Mechanische Arbeit
t	s (Sekunden)	Zeit

## Formelverzeichnis

Um einen Radnabenmotor mit Hilfe einer Belastungsuntersuchung ausreichend detailgenau zu charakterisieren, sind maßgebende physikalische Kenngrößen notwendig.

Hierzu gehört:

- Wirkungsgrad  $\eta$

welcher sich ergibt aus:

- abgegebener Leistung  $P_{ab}$  (mechanische Leistung)
- zugeführter Leistung  $P_{zu}$  (elektrische Leistung)

berechnet werden diese mit Hilfe von:

- Strom  $I$
- Spannung  $U$
- Drehzahl  $n$
- Drehmoment  $M$

Folgende Formeln werden zur Berechnung heran gezogen:

Der Wirkungsgrad ergibt sich aus dem Verhältnis der abgegebenen Leistung und der zugeführten Leistung:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$$

Die abgegebene Leistung errechnet sich aus den dem gemessenen Drehmoment und der gemessenen Drehzahl. Die Grundformel für die Leistung ist die verrichtete Arbeit durch die dafür aufgebrauchte Zeit.

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{2\pi * M}{\Delta t} = 2\pi * M * n \quad \rightarrow \quad P_{ab} = \frac{M * n}{9550}$$

Die Leistung wird in diesem Fall in kW, das Drehmoment in Nm und die Drehzahl in 1/min angegeben. Der Faktor 9550 kann wie folgt hergeleitet werden.

$$\begin{array}{ccc}
 P = M * \omega & \leftarrow & \omega = 2\pi * \frac{n}{60} \\
 \downarrow & & \\
 P = \frac{M * 2\pi * n}{60 * 1000} = M * n * \frac{2\pi}{60000} & \rightarrow & P = M * n * 1,0472 * 10^{-4} = \frac{M * n}{9550}
 \end{array}$$

Der Faktor 9550 ist ein gerundeter Wert.

Der exakte Wert lautet 9549,2965855137201461330258023509. Durch die Verwendung des gerundeten Wertes kommt es zu einem Mess- bzw. Berechnungsfehler, welcher in der Fehlerbetrachtung berücksichtigt werden muss. Um diesen Fehler auszuschließen besteht die Möglichkeit den korrekten Wert in einer Konstante oder Variable innerhalb der Berechnungssoftware zu hinterlegen. Die zugeführte Leistung wird aus den Messdaten des verbrauchten Stroms und der Betriebsspannung errechnet.

$$P_{zu} = U * I$$

Für die Spannung kann nicht der Ausgangswert angenommen werden. Die Verluste durch die verwendete Zuleitung zu vernachlässigen würde das Ergebnis erheblich verfälschen.

## 1. Einleitung

Die Verwendung elektrischer Antriebe nimmt immer mehr Einzug in unser Leben. Der Einsatz erfolgt in der Automobilbranche, in der Spielzeugindustrie, in Haushaltsgeräten, in elektronischen Geräten wie dem Videorecorder oder dem Ventilator, in Robotern und in vielen weiteren Bereichen. Doch gerade im Bereich der Rehabilitation sind Elektromotoren ein wichtiger und geradezu essentieller Bestandteil des Alltags geworden, denn sie geben vielen Menschen ein Stück weit Lebensqualität zurück und was besonders wichtig für diese Menschen ist: Es macht Sie unabhängig. Außerdem wird ein eventuell völliger Ausschluss aus der Öffentlichkeit verhindert. Doch Elektromobilität soll nicht nur eine Entlastung für Menschen sein die sie benötigen, sondern auch Spaß machen und für jeden zugänglich sein, der daran Teil haben möchte.

Die Antera Motoren GmbH ist ein junges mittelständisches Unternehmen. Bereits seit vielen Jahren im Bereich der elektrischen Antriebe tätig, hat sich die Firma nun auf elektrische Radnabenmotoren spezialisiert. Diese kommen in Scootern und Rollstühlen zum Einsatz, aber auch in Fahrrädern und anderen Fahrzeugen. Die Motoren haben einen sehr hohen Wirkungsgrad und ordnen sich daher im Wettbewerb mit anderen elektrischen Antrieben nahe der Spitze ein. Die berechneten Daten sollen mit Hilfe eines Prüfstandes nachgewiesen werden.

Die nachfolgende Arbeit beschäftigt sich mit der Konzeption, der Auslegung, dem Aufbau, der Programmierung und der Inbetriebnahme eines Motorenprüfstandes für elektrische Radnabenmotoren.

Sie teilt sich in mehrere große Abschnitte. Zunächst wird die Aufgabenstellung erfasst, analysiert und die zugehörigen Anforderungen und Rahmenbedingungen ermittelt. Anschließend erfolgt die Recherche zum derzeitigen Stand der Technik.

Im nächsten Abschnitt sind alle einzelnen Komponenten des Prüfstandes aufgelistet und werden in ihren Eigenschaften und ihrer Funktion näher erläutert.

Das folgende Kapitel zeigt nach einer Darstellung der Ablaufstruktur die Programmierung des Prüfstandes.

Der nächste Abschnitt präsentiert die Elemente des Motors und den Motor selbst, der auf dem Prüfstand getestet wurde. Danach sind die Ergebnisse der Tests in einer Tabelle aufgelistet und ausgewertet worden.

Der letzte Teil beschreibt durch eine abschließende Beurteilung die Funktion des getesteten Motors und des Prüfstandes und zeigt Probleme mit entsprechender Lösung. Dem schließen sich noch eine Fehlerbetrachtung und Anregungen zur möglichen Erweiterung des Prüfstandes an.

## **2. Ziel der Arbeit**

Die Antera Motoren GmbH ist ein aufgehender Stern im Bereich der elektrischen, getriebelosen Antriebe. Es ist sicher, dass Sie gerade im Sektor der Rehabilitation einmal ein führendes Unternehmen sein werden. Mit ihren eigens entwickelten Radnabenmotoren bringt Antera die Kraft genau dort zum Einsatz, wo sie gebraucht wird. Durch den hohen Wirkungsgrad der Motoren sind diese an Effizienz kaum zu übertreffen. Um die Qualität zu gewährleisten und die technischen Daten widerspiegeln zu können, wird ein Prüfstand für die Motoren benötigt.

Ziel der Bachelorarbeit ist es den Prüfstand zu konzipieren, das Konzept umzusetzen, den Prüfstand in Betrieb zu nehmen und die elektrischen Radnabenmotoren zu testen. Neben den hardwaretechnischen Forderungen ist die automatische Leistungsmessung über eine Software zu programmieren, die den Ablauf nicht nur steuert, sondern auch eine Protokollausgabe beinhaltet.

## **3. Aufgabenstellung**

### **3.1. Aufgabe**

In der Bachelorarbeit wird ein Prüfstand für elektrische Radnabenmotoren konzipiert, aufgebaut und in Betrieb genommen. Die Bestandteile des Prüfstandes werden von verschiedenen Firmen bezogen. Die zu testenden Motoren werden von der Antera Motoren GmbH gebaut und geliefert. Die Antera Motoren GmbH ist ebenfalls der Auftraggeber für dieses Projekt. Der Prüfstand wird in der Firma aufgebaut und in Betrieb genommen.

Folgende Aufgaben sind also Bestandteile der Bachelorarbeit:

- Konzeption des Prüfstandes
- Erstellen von Konstruktions- und Zusammenstellungszeichnungen
- Erstellen von Fertigungszeichnungen
- Auswahl der einzelnen Komponenten (Belastungsmaschine, Hardware zur Messwertaufnahme und -verarbeitung)
- Auswahl eines geeigneten Messsystems
- Programmierung und Darstellung der Messwerte als Diagramme und Tabellen
- Verfolgen der Fertigungs- und Lieferaufträge
- Montage und Inbetriebnahme
- Prüfen der Testmotoren
- Analyse und Auswertung der Testprotokolle

## 3.2. Anforderungen

Zur Auslegung der einzelnen Elemente des Prüfstandes sind vom Auftraggeber einige geforderte Kriterien zu berücksichtigen.

Der Prüfstand ist so zu konzipieren, dass er für verschiedene Motorengrößen verwendet werden kann und zukunftsorientiert auch noch für spätere Entwicklungen brauchbar ist. Demnach sollen Drehmomente bis circa 200 Nm erfasst werden, wobei die Messung schon ab dem Stillstand erfolgt, da das Anfahrmoment ein wesentlicher Parameter für die Bewertung der Motoren ist und eine entscheidende Aussage über mögliche Verwendungszwecke liefert.

Voraussichtlich sollen Motordrehzahlen im Bereich bis zu 1000 Umdrehungen abgefahren werden.

Neben dem Drehmoment und der Umdrehungszahl sollen auch Strom und Spannung während des Betriebs erfasst werden. Diese beiden elektrischen Kenngrößen werden dazu verwendet werden, die zugeführte Leistung zu ermitteln. Der Zusammenhang zwischen Drehzahl und Drehmoment liefert den Wert der abgegebenen Leistung. Durch Gegenüberstellung der zugeführten und abgegebenen Leistung lässt sich der Wirkungsgrad der Motoren berechnen.

Der Prüfstand ist in erster Hinsicht dazu gedacht, die Motoren der Antera Motoren GmbH zu charakterisieren und ein Datenblatt erstellen zu können.

Im Zuge der Serienproduktion sollen dann die Motoren stichprobenartig kontrolliert werden. Um auch hier den Montageaufwand bei der Einbindung des Prüflings in den Prüfstand so gering wie möglich zu halten, ist eine Schnellspannung vorgesehen durch die der Motor lagefixiert und eine axiale Verschiebung verhindert wird.

Die Messwertaufnehmer des Prüfstands sind über eine Datenverarbeitungshardware mit einem Computer verbunden. Eine Software auf dem Computer analysiert die Daten und stellt sie in Diagrammen und Tabellen dar. Gleichzeitig gibt die Software Befehle an die Steuerungshardware, die sowohl für die Regelung des Prüflings als auch für die der Belastungsmaschine verantwortlich ist.

Um verschiedene Anwendungsfälle zu simulieren, sollen unterschiedliche Prüfzyklen zur Auswahl gestellt werden. Die Anfangsprozedur wird so sein, dass aus dem Stillstand mit maximalem Drehmoment die Maximaldrehzahl angefahren wird, um so die höchst möglich Drehzahl mit Maximalmoment zu ermitteln. Eine Prüfung soll nach einmaligem, manuellen Starten selbstständig ablaufen. Allerdings kann sie jederzeit mittels einer Stoptaste beendet werden. Sollten sich gravierendere Fehler ankündigen, weil beispielsweise die Software einen unvorhergesehenen Defekt aufweist, kann über einen Notausschalter die Stromzufuhr zu dem Prüfling und der Belastungsmaschine unterbrochen werden, um schwerwiegendere mechanische Schäden zu vermeiden.

Zusammenfassend ergeben sich folgende Punkte:

- Auslegung für verschiedene Motorengrößen
- Drehmomentmessung bis 200 Nm bei einer Drehzahl bis zu 1000 Umdrehungen/Minute
- Messung ab Stillstand
- Erfassung von Strom und Spannung
- Berechnung von zugeführte und abgegebener Leistung
- Ermittlung des Wirkungsgrades
- Bereitstellung der Daten in einem Protokoll
- Automatischer Ablauf der Prüfung
- Möglichkeit zum Eingriff in den Vorgang (Bsp.: Notausschalter)

### **3.3. Randbedingungen**

- Die Firma Antera Motoren GmbH hat für den Versuchsstand ein Budget von 15000€ eingeplant.
- Die Spannungsversorgung für die zu testenden Motoren ist derzeit nur an einer Stelle im Betrieb gegeben. Es werden demnach vorhandene Spannungsquellen genutzt.
- Das zur Verfügung stehende Platzangebot ist aufgrund der schon vorhandenen technischen Anlagen begrenzt. Dem zufolge ist auch die Größe des Prüfstandes zu begrenzen.

## 4. Theoretische Grundlagen

### 4.1. Möglichkeiten der Drehmomentmessung

Es gibt viele Formen das Drehmoment zu erfassen. Dabei wird zwischen dem statischen und dem dynamischen Drehmoment unterschieden. Das statische Moment ist im Fall eines Motorenprüfstandes das Anlauf- beziehungsweise Anfahrmoment.

Als Urprinzip der Drehmomentmessung für das statische Moment gilt der Pronysche Zaum. Er stellt ein Bremsdynamometer dar und wird auch als Holz- oder Backenbremse bezeichnet.

Folgendes Schema zeigt den Aufbau eines Pronyschen Zaums:

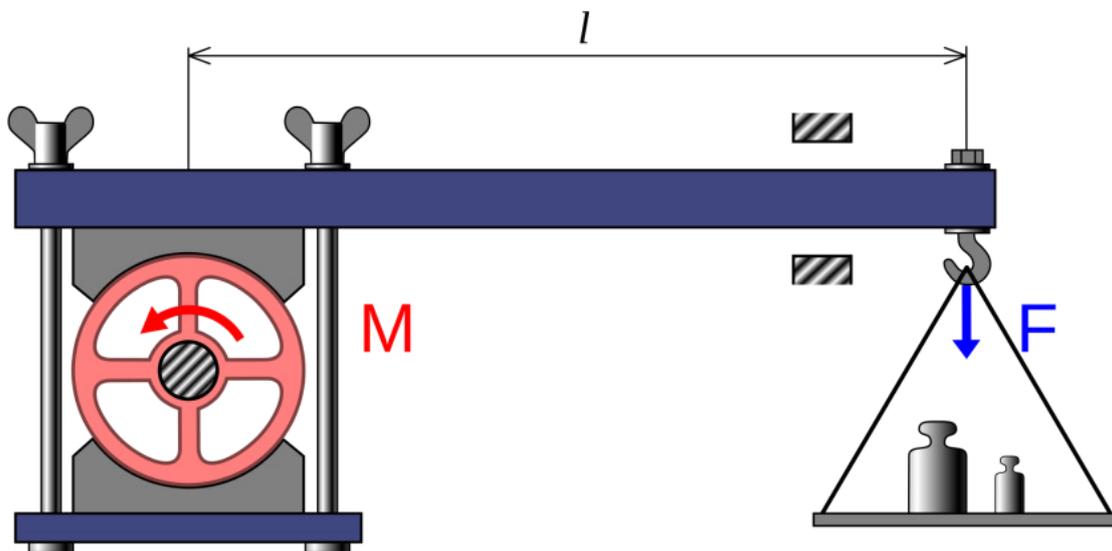


Abbildung 1: Pronyscher Zaum

(Quelle: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Prony\\_brake.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Prony_brake.svg))

Durch die Gewichte wird der Druck auf die Bremsbacken erhöht. Dadurch wird versucht eine definierte Drehzahl einzustellen. Da diese Bremskraft im dynamischen Betrieb sehr schwer zu dosieren ist, wird dieses Prinzip vorwiegend zur Erfassung des statischen Moments verwendet. Das Bremsmoment errechnet sich dem zufolge aus der Länge des Hebelarms und der auf den Hebelarm wirkende Kraft durch die Massen.

$$M = l * F$$

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{2\pi * M}{\Delta t} = 2\pi * M * n$$

Heutzutage gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten Drehmomente zu erfassen und sehr genau zu bestimmen. Elektrische Messwertnehmer gehören heute zum Standard. Dabei kann nicht mehr genau gesagt werden welches Verfahren das gängigste ist.

Weit verbreitet ist die Anwendung von Dehnungsmessstreifen kurz DMS. Sie sind meistens auf Torsionswellen angebracht. Durch Verdrehung der Welle kommt es zur Dehnung beziehungsweise Stauchung der DMS. Diese geben dem entsprechend eine Spannung aus, welche proportional gegenüber dem anliegenden Drehmoment ist.

Eine weitere Form ist die Messung durch induktive oder kapazitive Wegsensoren. Zwischen einer feststehenden Scheibe und einer Scheibe auf der Torsionswelle, kommt es zu einer Relativbewegung. Die Torsion wird also in einen Weg umgewandelt und die zurückgelegte Strecke von den Wegsensoren erfasst.

Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung piezoelektrischer und piezoresistiver Sensoren.

In beiden Fällen erfolgt auf die Sensoren eine Krafteinwirkung. Piezoelektrische Sensoren ändern dabei ihre Spannung, da durch die Verschiebung des Piezokristallgitters an der Kristalloberfläche ein Ladungsunterschied auftritt. Durch ihre sehr hohe mechanische Steifigkeit sind sie jedoch nur für dynamische Messungen geeignet.

Piezoresistive Sensoren hingegen verändern ihren Widerstandswert unter Krafteinfluss.

Drehmomentmessung ist auch über optische Sensoren möglich. Mit Hilfe von digitalen Inkrementensensoren, die an zwei verschiedenen Stellen der Welle angebracht sind, wird der Verdrehwinkel erfasst. Durch die Verdrehung kommt es bei den 2 aufgenommenen Rechtecksignalen zu einem Zeitversatz. Dieser Zeitversatz ist proportional dem anliegenden Drehmoment.

## 4.2. Arten von Belastungsmaschinen

Im Bereich der Prüfstandtechnik gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten ein zu prüfendes Objekt zu belasten, um so seine maximale Leistung zu ermitteln. Das geschieht entweder über passive oder aktive Belastungsmaschinen, Pendel- oder Ständermaschinen.

Der Unterschied zwischen Pendel- und Ständermaschinen ist, dass bei Verwendung einer Ständermaschine eine Drehmomentmesswelle erforderlich ist. Im Falle einer Pendelmaschine ist der Stator nicht fest mit dem Rahmen verbunden sondern drehbar gelagert. Er drückt dabei über einen Hebelarm auf einer Kraftmessdose. Bei einer Belastung kann über den Hebelarm und die gemessene Kraft das Drehmoment ermittelt werden.

Zu den passiven Belastungsmaschinen gehören unter anderem hydraulische Bremsen in Form einer Wasserwirbelbremse und elektrische Bremsen wie die Wirbelstrombremse oder die Magnetpulverbremse. Sie sind nur für den reinen generatorischen Betrieb geeignet, wie es in den meisten Motorenprüfständen auch nur erforderlich ist.

Eine Wasserwirbelbremse steuert das Bremsmoment entweder über die Menge der Wasserfüllung oder verstellbare Leitschaufeln. Da die Wasserwirbelbremse wie eine Flüssigkeitskupplung funktioniert und die anliegende Kraft auf den beweglichen Stator überträgt gehört sie zu den Pendelmaschinen.

Ähnlich funktioniert auch die Magnetpulverbremse.

*„Zwischen dem rotierenden Innenteil und dem feststehenden Außenteil befindet sich ein spezielles loses Eisenpulver. Das Innenteil trägt eine Erregerwicklung, die über Schleifringe mit einem Erregergleichstrom beaufschlagt wird. Bei eingeschalteter Erregung bildet sich zwischen dem Innen- und Außenteil ein Magnetfeld heraus, das auch das Eisenpulver durchsetzt. Das Eisenpulver verfestigt sich und bildet eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Innen- und Außenteil aus.*

*Damit entsteht die gewünschte Bremswirkung. Das übertragene Drehmoment ist nahezu linear zum Erregerstrom und unabhängig von der Differenzdrehzahl zwischen Innen- und Außenteil. Die Bremswirkung kann also über den Erregerstrom gesteuert werden.“*

*(Quelle: [http://www.servotechnik.de/forum/themen/th\\_0033.htm](http://www.servotechnik.de/forum/themen/th_0033.htm))*

Bei der Wirbelstrombremse wird ebenfalls ein Magnetfeld erzeugt. Durch die Verzahnung einer mit der Welle verbundenen Scheibe, entstehen Wirbelströme, durch die eine Kräfte auf den Stator wirken. Trivial zur Magnetpulverbremse ist der Erregerstrom nahezu linear zum Drehmoment.

Aktive Belastungsmaschinen sind zum Beispiel eine Gleichstrom- oder eine Asynchronmaschine. Beide haben den Vorteil, dass sie sowohl als Bremse als auch als Antrieb genutzt werden können, um beispielsweise Generatoren zu testen. Es gibt sie beide in der starrer oder pendelt gelagerter Ausführung. Die beim Bremsen erzeugte Energie wird entweder durch Widerstände in Wärme umgesetzt oder in das Netz zurückgespeist. Der große Vorteil der Asynchronmaschine ist, dass sie direkt an das Drehstromnetz angeschlossen werden kann und gegenüber der Gleichstrommaschine keine Bürsten und keinen Kollektor besitzt. Allerdings macht die Regelung der Asynchronmaschine eine Verwendung aufwändiger Leistungselektronik notwendig, in Form eines Frequenzumrichters.

## 5. Anlagenübersicht

### 5.1. Schematisch

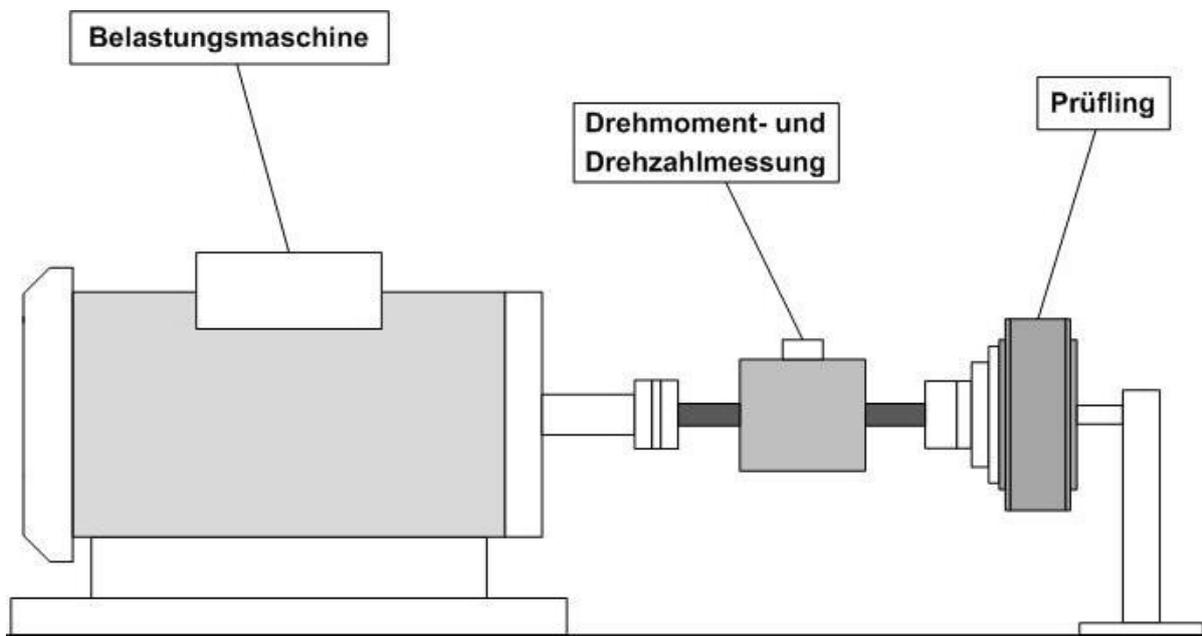


Abbildung 2 : Schematischer Aufbau des Prüfstands

Die schematische Abbildung des Prüfstands zeigt sehr stark vereinfacht den Aufbau des sonst sehr komplexen Systems. Es wird lediglich die Anordnung der grundlegendsten Bauelemente dargestellt. Neben den schon gekennzeichneten Komponenten sind außerdem die Kupplungen zur mechanischen Kraftübertragung erkennbar. Die elektronischen Bauteile wie Motorsteuerung, Messhardware oder Computer werden hier außer Acht gelassen, da durch eine zu detaillierte Darstellung die Übersichtlichkeit verloren gehen würde.

## 5.2. Prüfstand



Abbildung 3: Prüfstand

Verwendete Komponenten:

- Getriebemotor (1)
- Messwelle (2)
- Spannungswandler
- Stromwandler
- Stahllamellenkupplung
- Klauenkupplung
- Motoradapter
- Prüfling (3)
- Motorhalter
- Führungsschienen
- Frequenzumrichter
- Bremschopper
- Bremswiderstand
- Mess-/Steuerhardware
- Schutzhaube
- Elektrische Versorgungseinrichtung
- Notausschalter
- Steuerung Prüfling

## **6. Aufbau des Prüfstandes**

### **6.1. Gestell / Basis**

Für das Grundgestell und somit die Basis des Prüfstands wird eine alte Werkbank verwendet. Sie besteht aus einem soliden Stahlrahmen und einer massiven Arbeitsplatte aus Holz. Aufgrund der doch sehr hohen Last durch die übrigen Bestandteile des Prüfstandes ist zur Unterstützung in der Mitte des Tisches eine Stütze angebracht.

Die Werkbank wird verwendet um die Kosten für die Anschaffung eines massiven Maschinentisches zu sparen, damit das Budget für die Prüfeinrichtung nicht überreizt wird.

### **6.2. Schutz**

Die Schutzhaube setzt sich aus mehreren Elementen unterschiedlichen Materials zusammen. Das Grundgestell ist eine quaderförmige Konstruktion aus Aluminiumprofilen der Firma SMT Montagetechnik. Die Aluminiumstreben werden durch Aluminiumwinkel miteinander verbunden und fixiert. Die unteren auf dem Tisch aufliegenden Streben, werden durch M10 Stahlschrauben mit der Platte fest verschraubt. Rund um die rotierenden Teile, wie Messwelle, Kupplungen und Prüfling werden an die Profilschienen farblose, durchsichtige Platten aus Polycarbonat geschraubt um vor eventuell sich ablösenden Teilen zu schützen, die sonst ungebremst wegfliegen könnten. Die hochbruchfesten 8mm starken Platten bieten genügend Schutz. Die vorderste Platte ist durch 3 Messingscharniere beweglich und kann somit wie eine Klappe geöffnet werden, um den Zugang zum Motorhalter, für beispielsweise einen Prüflingswechsel zu ermöglichen. Die Klappe ist durch 2 Schiebelbolzen fest verankert. Damit der gesamte Bereich, der rotierende Teile beinhaltet, während des Betriebs unzugänglich ist, wurden die Stirnseiten mit einem Gitter verschlossen.

### 6.3. Elektrische Steuerung des Prüflings

Für die Durchführung der Testreihen wurden 2 verschiedene Steuerungen verwendet, die beide die Verwendung digitaler Hallsensoren erfordern. Zunächst wird dadurch festgestellt, welche Steuerung am effektivsten mit den Motoren funktioniert. Anhand der Testergebnisse wird sich für eine Hardware entschieden, die dann fest in den Prüfstand integriert wird.

#### 6.3.1. RoboteQ – LBL1360C

Die LBL 1360C ist das Produkt des amerikanischen Herstellers RoboteQ. Der Preis für diesen bürstenlosen Gleichstrommotorcontroller liegt bei 275 US-\$. Die maximale Versorgungsspannung ist auf 60 V und der maximale Strom auf 75 A begrenzt. Kontinuierlich können aber nur 60 A abgerufen werden, da der Strom von 75 A von der Steuerung zeitlich begrenzt ist. Aus diesen Werten ergibt sich eine Leistung von 3000 – 3900 Watt. Die Vorgabe der Steuerspannung erfolgt über den analogen oder seriellen Anschluss. Für den Prüfvorgang wurde der analoge Eingang mit einer Spannung von 0 – 5 Volt gewählt.

#### 6.3.2. Kelly Controls – KBL48101X

Kelly ist ebenfalls ein amerikanischer Hersteller für bürstenlose Gleichstrommotorcontroller. Die technischen Kenndaten sind denen der RoboteQ sehr ähnlich. Die Spannungsversorgung beläuft sich von 18 - 60 V. Der kontinuierlich verwendbare Strom ist ebenfalls auf 60 A begrenzt, jedoch können kurzzeitig 150 A verarbeitet werden. Hieraus ergibt sich ein Leistungsbereich von 3600 – 9000 W, wobei noch einmal zu betonen ist, dass die maximale effektive Leistung bei 3600 W liegt. Der Kellycontroller verfügt über einen analogen Eingang für die Steuerspannung ebenfalls mit 0 – 5 V. Der Preis für diese Controller liegt zwischen 199 und 249 US-\$.  
  
The image shows a black, rectangular motor controller with a silver front panel. It has a D-sub connector on the left, a small switch labeled 'Switche', and a status indicator labeled 'Stat'. The top of the unit has a label that reads 'RoboteQ' and 'Model: LBL 1360C'.

Abbildung 4: RoboteQ LBL1360C



Abbildung 5: Kelly Controller KBL 48101X

## **6.4. Belastungsmaschine und zusätzliche Hardware**

### **6.4.1. Auswahl der geeigneten Belastungsmaschine**

Anhand der Anforderungen in 4.2. wurde die notwendige Leistungsfähigkeit der Belastungsmaschine bestimmt. Gefordert ist ein Drehmoment von 200 Nm bei einer Drehzahl von 1000 1/min. Aus diesen Daten lässt sich mit Hilfe der Formel aus 5. die Leistung bestimmen.

$$P = \frac{M * n}{9550} = \frac{200 * 1000}{9550} \approx 20,94$$

Nach der Ermittlung der erforderlichen Leistung und unter Berücksichtigung der zu erfüllenden Anforderungen, wurde als Belastungsmaschine eine Asynchronmaschine gewählt. Asynchronmaschinen stehen in gewissen Abstufungen zur Verfügung. Nach einem Motor mit 18,5 kW Leistung ist der nächst größere ein Motor mit 22 kW Leistung. Demnach wurde dieser Motor gewählt. Des Weiteren ist es wichtig den Antrieb ab dem Stillstand stufenlos regeln zu können, um jede gewünschte Drehzahl anzufahren.

Die Auswahl einer solchen Belastungsmaschine macht die Verwendung einer aufwändigen Leistungselektronik und der dazu zusätzlich erforderlichen Hardware notwendig. Demnach werden noch ein Frequenzumrichter, ein Fremdlüfter, ein Netzfilter, ein Bremschopper und der dazugehörige Bremswiderstand benötigt.

Die Belastungsmaschine ist für die derzeitigen Einsatzfälle überdimensioniert, jedoch sollte durch die oben vorgegebenen Werte, Raum für neue und größere Motoren geschaffen werden.

## 6.4.2. Getriebemotor

Die für den Prüfstand eingesetzte Belastungsmaschine ist ein Stirnradgetriebemotor der von der GEMOTEG GmbH + Co. KG vertrieben wird.

Der Getriebemotor setzt sich aus zwei Komponenten zusammen. Dem Elektromotor und dem daran angeflanschten Getriebe.

Der Elektromotor ist ein von Techtop hergestellter, 3-Phasen Asynchronmotor mit einer Leistung von 22 kW. Die genaue Bezeichnung lautet IE1 MSF 180M2.

Er ist an eine Starkstromversorgung angeschlossen und somit sternverschaltet. Kontinuierlich kann von ihm ein Nennstrom von 39,2 A aufgenommen werden, bei einer maximalen Ausgangsdrehzahl von 2950 1/min. Er arbeitet in der Betriebsart S6 was einen ununterbrochenen periodischen Betrieb beschreibt.

Damit der Motor bei niederen Drehzahlen nicht überhitzt, wird an der Lüfterhaube ein Fremdlüfter zur zusätzlichen Kühlung installiert mit einer Leistung von 165 W. Dieser ist ebenfalls an eine Drehstromleitung 3x230/400V angeschlossen.

Die italienische Firma HYDRO-MEC S.r.l. liefert das angeflanschte Getriebe. Das innere wird durch ein Gehäuse aus Gusseisen geschützt. In das sonst so rustikale Gehäuse sind unter hoher Präzision Öffnungen für die Lager und das eigentliche Getriebe gefräst. Es besteht aus 2 gehärteten und geschliffenen Zahnrädern. Durch ihren großen Achsversatz und der daraus resultierenden Untersetzung, mit einem Faktor von  $i=2,65$ , kann das große Drehmoment von maximal 550Nm übertragen werden.

### **6.4.3. Frequenzumrichter - Steuerung des Getriebemotors**

Damit von der Belastungsmaschine sowohl ein geregeltes Bremsmoment aufgebracht als auch eine beliebige Drehzahl eingestellt werden kann, wird ein Frequenzumrichter verwendet. Die Firma Hitachi bietet mit dem für den Prüfstand verwendeten SJ700 eine hohe Qualität und Genauigkeit in Bezug auf die Regelung der gewünschten Parameter. Eine Besonderheit dieses Frequenzumrichters ist die Möglichkeit ein Haltemoment aufzubauen um beispielsweise ein Anfahrmoment an einer mit Steigung behafteter Ebene zu simulieren. Viele Frequenzumrichter haben diese Funktion nicht, da die enthaltene Schutzschaltung das System abschalten lässt wenn der Strom in einem bestimmten Zeitintervall zu groß wird. Sein Signal bekommt der Frequenzumrichter über einen der 3 Analogen Eingänge durch ein Einheitssignal von 0 – 10V. Über eine entsprechende Skalierung kann damit das gesamte Drehzahlband vom Stillstand bis zur Maximaldrehzahl eingestellt werden. Der SJ700 ist für Motoren mit einer maximalen Leistung von 22kW ausgelegt. Der Ausgangsnennstrom beträgt 48 A was ein hohes Drehmoment erwarten lässt. Die Maße des Gehäuses sind im Gegensatz zu dem hohen Aufkommen an Technik und deren Leistung verhältnismäßig klein. So ist er gerade mal 250mm breit, 390mm hoch und 190mm tief. Die Verwendung einer Asynchronmaschine und somit eines Frequenzumrichters bringen einen großen Kostenfaktor mit sich. Jedoch ist der Preis durch das hohe Leistungsvermögen und die Vielfältigkeit gerechtfertigt. Der SJ700 hat, um einige Beispiele zu nennen, vorprogrammierte Ablaufstrukturen wie Anfahr- und Bremsrampen, einen integrierten PID-Regler und eine integrierte SPS-Funktion Easy Sequence wodurch eine SPS komplett ersetzt werden kann.

## **6.4.4. Zusätzliche Hardware**

### **6.4.4.1. Bremschopper und Bremswiderstand**

Bei Verwendung größerer Motoren als Belastungsmaschine beziehungsweise Bremse ist es notwendig einen sogenannten Bremschopper zu verwenden. An den Chopper ist zudem noch ein Bremswiderstand angeschlossen.

Diese Komponenten haben in diesem Falle folgende Funktion:

*„Ein Bremschopper dient zur Überwachung der Zwischenkreisspannung in einem Frequenzumrichter. Diese Überwachung ist erforderlich, da es im Zwischenkreis zu Überspannungen kommen kann. Sie entstehen bei Bremsvorgängen des Motors. Am Bremschopper ist dabei der sogenannte Bremswiderstand angeschlossen, der die überschüssige Energie im Zwischenkreis in thermische Energie umwandelt. Als elektronischer Schalter (Chopper = Zerhacker) schaltet der Bremschopper den Widerstand ein, bevor die Zwischenkreisspannung eine für die Komponenten gefährliche Höhe erreicht. Sobald die Zwischenkreisspannung wieder abnimmt und kleiner als die Einschaltspannung wird, aber größer als die Netzspannung, schaltet der Chopper den Widerstand wieder ab. Der Vorgang wiederholt sich, sobald die Spannung wieder ansteigt.“*

(Quelle: <http://www.sourcetric.com/glossar/bremschopper.html>)

### **6.4.4.2. Netzfilter**

Neben dem Bremschopper ist ein Netzfilter ebenso wichtig für den fehlerfreien Betrieb. Dieser dient nämlich dazu, dass System vor hochfrequenten Störgrößen aus der Netzleitung zu schützen. Die Störfestigkeit ist somit gewährleistet.

Durch das System erzeugte hochfrequente Störgrößen können auf benachbarte Baugruppen sowohl direkt, als auch durch Abstrahlung einwirken. Durch den Netzfilter werden diese eben genannten Größen auf ein gesetzlich vorgeschriebenes Maß reduziert. Dabei handelt es sich um die sogenannte Funkentstörung.

(Quelle: <http://www.schaffner.com/de/downloads/file-download/file/emc-installation-guidelines-for-motor-drives.html>, Seite 3)

### **6.4.4.3. Fremdlüfter**

Der Asynchronmotor, der ein Teil der Belastungsmaschine ist, sorgt bei hochfrequentem Betrieb durch seine Drehzahl für eine Selbstkühlung. Da jedoch auch der niedere Drehzahlbereich häufig zum Anwendungsgebiet gehört, ist ein Fremdlüfter notwendig um eine Überhitzung zu verhindern. Der Fremdlüfter wird anstatt der Lüfterhaube montiert.

## **6.5. Mess- und Steuerungstechnik**

### **6.5.1. Elektronik zur Messwertaufnahme und Steuerausgabe**

National Instruments liefert Hardware um analoge und digitale Signale auszugeben als auch aufzunehmen.

Um den Prüfstand zu steuern und die Prüfvorgänge zu analysieren wird das sogenannte

„NI cDAQ-9178“ verwendet. Dies ist eine Basiseinheit die dazu verwendet wird, die Komponenten zur elektronische Wertaus- und eingabe mit der Computereinheit zu verbinden.

Folgende NI-Bauteile werden verwendet:

- Das NI 9215 dient zur Aufnahme analoger Eingangssignale in einem Spannungsbereich von -10 bis +10 Volt in einer 16-Bit Auflösung. Gleichzeitig können 4 Eingangssignale aufgenommen und verarbeitet werden. Eine weite Möglichkeit ist es die Eingänge gegeneinander zu schalten um beispielsweise Differenzspannungen zu ermitteln.
- Das NI 9263 verfügt über 4 analoge Ausgänge, welche Zeitgleich arbeiten. Diese verfügen ebenfalls über eine 16-Bit Auflösung in einem Spannungsbereich von -10 bis +10 Volt.
- Das NI-9401 hat 8 digitale Ein- beziehungsweise Ausgänge die mit einer Spannung von 0 bis 5 Volt arbeiten. Die Form des Signals ist TTL, also ein logisches Signal 0/1. Da es sich um ein Hochgeschwindigkeits-Digital-I/O handelt werden Signale mit einer maximalen Frequenz von 10 MHz also in 100 ns verarbeitet.

### **6.5.2. Drehzahl-Drehmomentmesswelle**

Zur Erfassung der Drehzahl und des Drehmoments wird eine Messwelle der Firma KTR Kupplungstechnik GmbH verwendet. Die Bezeichnung DATAFLEX 42/200 beschreibt die wichtigsten Daten der Messwelle. Die Ausgangswelle hat einen Durchmesser von 42 mm. Dabei kann die Messwelle in einer maximalen Radialverlagerung von 4,2 mm verbaut werden.

Sie ist für einen Drehmomentbereich von bis zu 200Nm bei einer Drehzahl von maximal 6000 1/min ausgelegt. Die Messung der Drehzahl erfolgt über einen einfachen Drehzahlsensor der mit einer Auflösung von 60 Impulsen pro Umdrehung arbeitet.

Die Erfassung des Drehmoments wird über eine Lichtmengenmessung realisiert. Auf der Torsionswelle befinden sich 2 Scheiben durch die das Licht geführt wird. Bei Verdrehung der Torsionswelle ändert sich die Lichtdurchlässigkeit proportional mit dem anliegenden Drehmoment. Da sich die gesamte Elektronik mit im Gehäuse befindet, kann die Messung lückenlos mit einer Bandbreite von 16 kHz durchgeführt werden. Die Ungenauigkeit bei der Messung des Drehmoments liegt dabei unter  $\pm 0.5\%$ .

Über einen 15-poligen Stecker wird die Messwelle mit dem Anschlussgehäuse DF2 von KTR verbunden. Dieses verfügt über wichtige Funktionen wie die Filterung des Drehmomentausgangs in 5 Stufen um kurze Drehmomentspitzen auf der Anzeige zu reduzieren. Für das Drehzahlsignal ist ein Frequenz-Spannungs-Filter integriert der eine der Drehzahl proportionale Gleichspannung von 0-10 Volt liefert und dessen Skalierung sich beliebig anpassen lässt.

### 6.5.3. Strommesser

Zur Erfassung des Stromverbrauchs des Motors, welcher zur Berechnung der zugeführten Leistung erforderlich ist, wird ein Stromwandler der Firma LEM verwendet. Die genaue Bezeichnung lautet DHR 200 C10. Der Wandler hat einen effektiven Messbereich von 200 A und kann kurzzeitig 600A verarbeiten. Der Wandler arbeitet mit einer Hall-Effekt-Messung und glättet das Signal zusätzlich. Für den Messbereich von 0-200A gibt der Wandler ein analoges Ausgangssignal in Form einer Gleichspannung von 0-10V aus. Dabei besitzt er einen absoluten Fehler von maximal 1%.

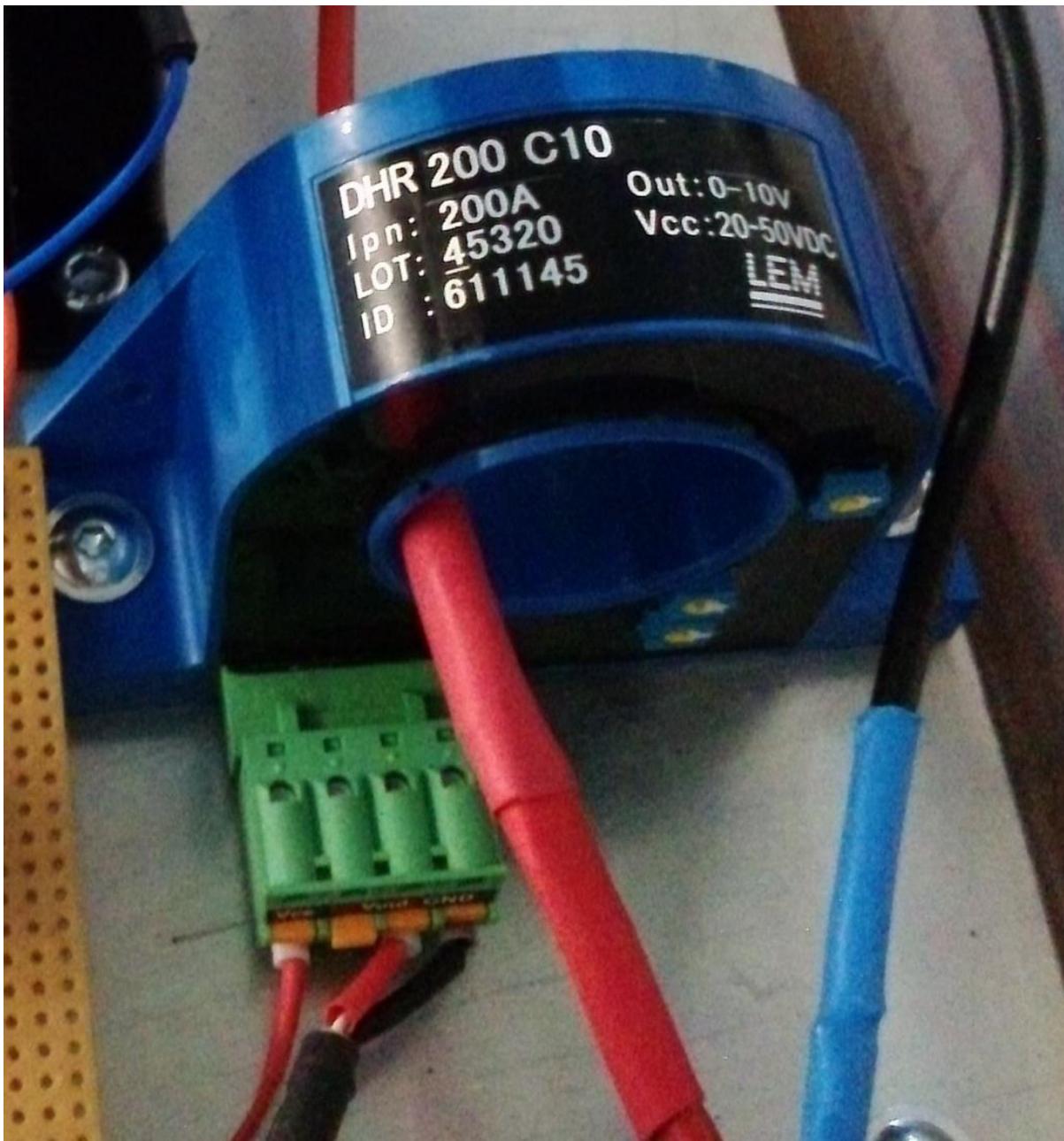


Abbildung 6: Stromwandler DHR 200 C10

## 6.5.4. Spannungsmesser

Die Versorgungsspannung für die Steuerung des Prüflings ist nicht exakt. Liegt eine Spannung von 24V an, kommt es durch die Zuleitung zu Verlusten und durch den Verbraucher zu einem Spannungsabfall auf beispielsweise 23,7 V. Auch wenn dies für den Betrieb des Prüflings nahezu vernachlässigbar ist, so verfälscht der Spannungsabfall die Berechnung der zugeführten Leistung und damit auch den Wirkungsgrad erheblich, wird er nicht mit einbezogen.

Deshalb ist es notwendig die Spannung kurz vor dem Verbraucher zu messen, um einen Berechnungsfehler auszuschließen. Dafür wird ein Spannungswandler verwendet. Zum Einsatz kommt der CV 3-200 der Firma LEM. Der Messbereich beläuft sich von 0 bis 200 V, wobei der Effektivwert des Messbereichs bei 140 V liegt. Linear über den Messbereich gibt der Wandler ein analoges Gleichspannungssignal von 0 bis 10 V aus.

Die Genauigkeit für diesen Wandler liegt bei 0,2%.

Der CV 3-200 bekommt als Versorgungsspannung +15 beziehungsweise -15 V. Deshalb wurde ein DCDC-Wandler vor die Messeinheit geschaltet der aus 24V Eingangssignal ein +15 und -15 V Ausgangssignal macht.



Abbildung 7: Spannungswandler CV3-200

## 6.6. Mechanische Elemente

### 6.6.1. Komponenten zur Motorenaufnahme

KTR bietet ein Flanschelement an, das die Anbindung „fremder“ Elemente an die Messwelle ermöglicht. Die Motoren der Antera Motoren GmbH bieten leider keine vielfältigen Möglichkeiten zur Anbindung. Deshalb muss ein Zwischenstück erstellt werden. Zunächst werden Maße des Flansches und des Motors ermittelt. Mit Hilfe von AutoCAD kann nun ein Adapter konstruiert werden. Der einzige Weg zur Kraftübertragung geht über die Vertiefungen im Lagerschild der Motoren. Zunächst wird ein alter Rotor abgedreht. Die vorhandenen Gewindebohrungen werden aufgebohrt und mit Stahlstiften versehen, damit später mit den Testmotoren eine formschlüssige Verbindung realisiert werden kann. An den Rotor wird zusätzlich ein altes Lagerschild angeschraubt. Um das Flanschelement von KTR mit dem Lagerschild zu verbinden wird der in AutoCAD konstruierte Adapter aus Aluminium gefertigt.

Alle Elemente werden formschlüssig und durch Verschraubung auch kraftschlüssig miteinander verbunden.

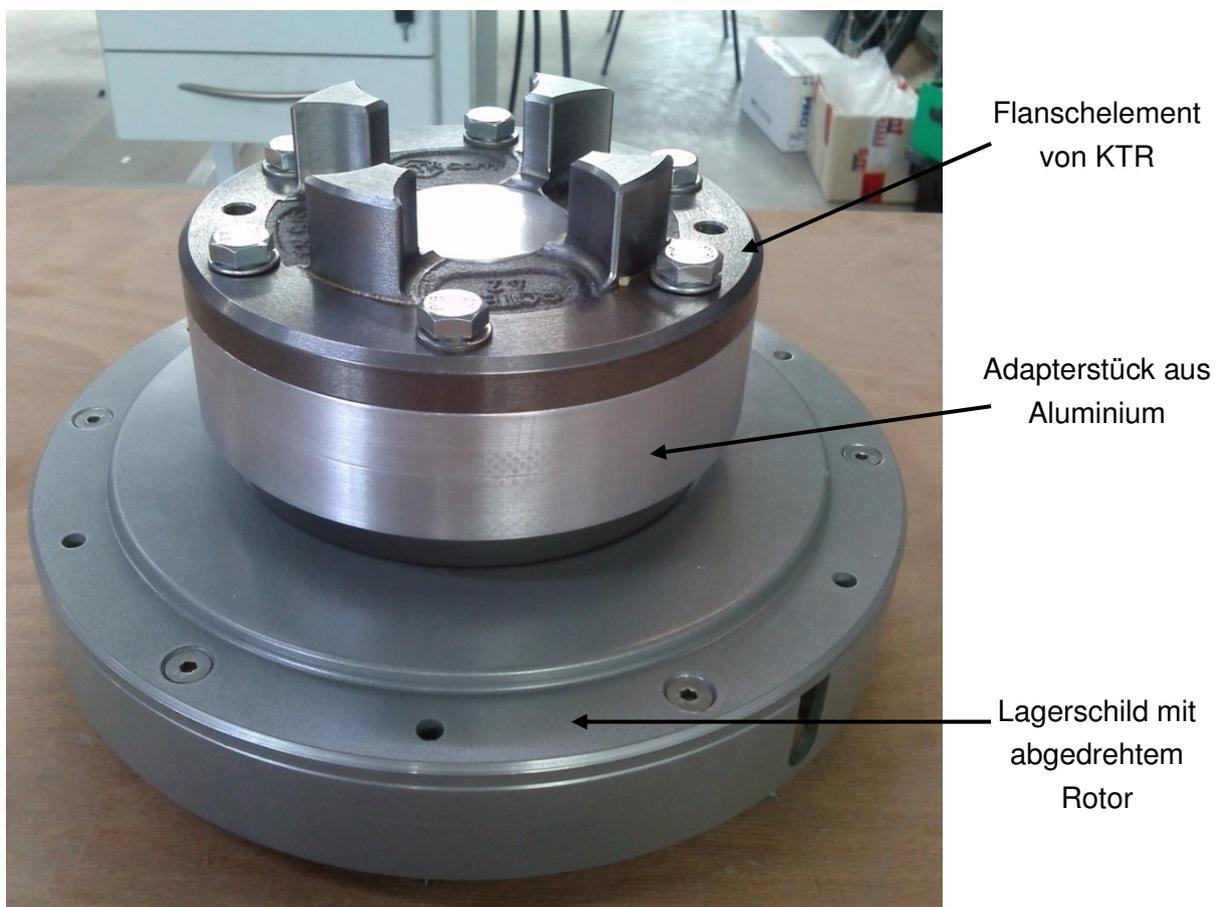


Abbildung 8: Koppereinheit zwischen Prüfling und Messwelle

### 6.6.2. Motorhalter und Führungsschienen

Damit der Motor an den Adapter und somit an die Messwelle gekoppelt werden kann, muss er erst Lagefixiert werden. Dazu wurde extra ein Halter gefertigt. Der Halter besteht aus Stahlplatten die miteinander verschweißt wurden. An die Platte ist eine Stahlachse mit einer Passfeder geschraubt. Auf diese Achse kann der Motor fixiert werden. Um einen schnellen Austausch von Prüfmotoren zu ermöglichen wird der Motoralter auf Stahlschienen geführt. Mittels Schnellspannschrauben und Nutensteinen wird der Halter dann befestigt.

### 6.6.3. Kupplungen zur Kraftübertragung

Um Verbindungen der Messwelle mit der Belastungsmaschine und dem Prüfmotor herzustellen, die sowohl Kräfte aufnehmen als auch Achsversatz ausgleichen können, werden Kupplungen verwendet. Diese Kupplungen sind von der Firma KTR Kupplungstechnik für diesen Anwendungsfall gewählt und ausgelegt worden. Da Messwelle und Kupplungen vom selben Hersteller kommen, ist eine ideale Abstimmung der Komponenten gegeben.

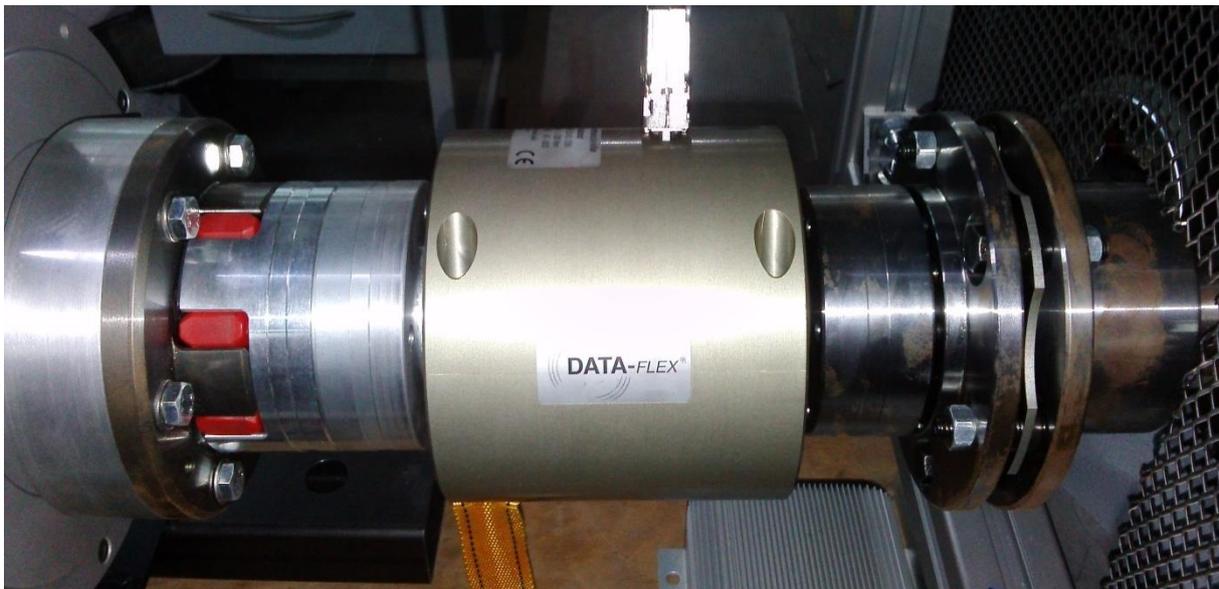


Abbildung 9: Klauenkupplung - Messwelle - Stahllamellenkupplung

### 6.6.3.1. Stahllamellenkupplung

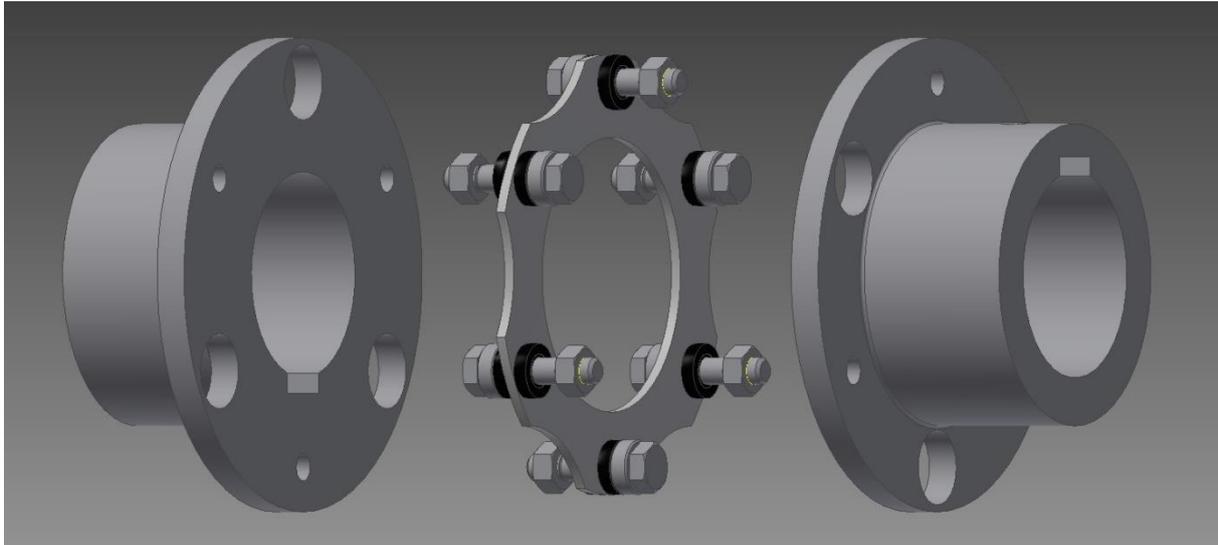


Abbildung 10: 3D-Modell Stahllamellenkupplung

Die Stahllamellenkupplung RADEX-N ist die Verbindung zwischen Belastungsmaschine und Messwelle. Alle Elemente sind aus Stahl. Die Kupplung ist völlig wartungsfrei und die Lamelle aus Federstahl ermöglicht einen hohen Verlagerungsausgleich. Die durch FEM-Berechnung optimierte Stahllamelle wird abwechselnd mit den beiden Naben verschraubt. Es entstehen sowohl ein Reib- als auch ein Formschluss. Durch die Verschraubung wird sie in sich vorgespannt. Dies bringt den Vorteil, dass die Axialschwingungen des Zwischenstückes verhindert werden. Die Nabe zur Anbindung an die Belastungsmaschine ist die Ausführung 1.0. Es ist eine Nabe mit Passfedernut und Feststellschraube. Das Drehmoment wird formschlüssig übertragen. Durch die Drehsteifigkeit der Kupplung werden Drehmomentschwankungen ausgeschlossen. Der stark reversierende Betrieb ist bei dieser Ausführung jedoch zu vermeiden. Die Seite zur Messwelle ist eine Spannringnabe Ausführung 6.0. Im Gegensatz zur Ausführung 1.0 wird das Drehmoment durch eine reibschlüssige Verbindung übertragen. Durch Anziehen der Schrauben wird der äußere Teil herangezogen und verspannt die Nabe mit der Welle. Innen- und Außenteil sind konisch zueinander. Mittels der Radex-N kann ein Winkelversatz von  $1^\circ$  ausgeglichen werden.

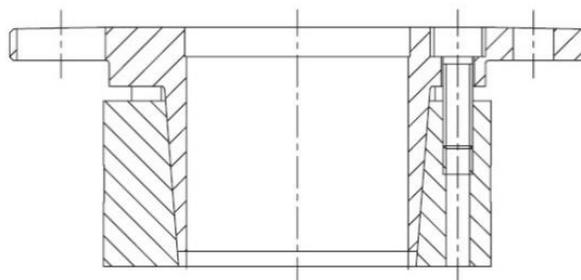


Abbildung 11: Schnitt Spannringnabe

### 6.6.3.2. Klauenkupplung mit Kunststoffzahnkranz

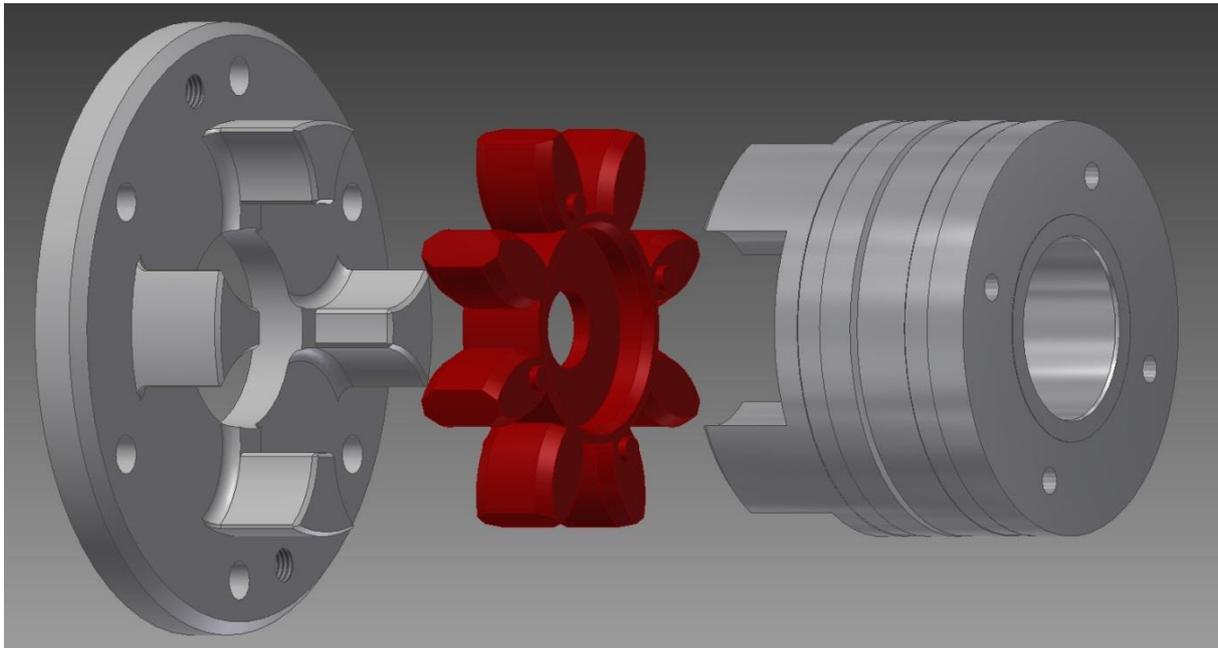


Abbildung 12: 3D-Modell Klauenkupplung

Zwischen Motor und Messwelle kommt eine ROTEX-Kupplung zum Einsatz. Eine ROTEX-Kupplung ist eine drehelastische Klauenkupplung. Die Drehmomentübertragung erfolgt formschlüssig. Die Klauen der linken und rechten Komponente sind kongruent jedoch um  $1/8$  Drehung zueinander versetzt. In die Zwischenräume passt ein Kunststoffzahnkranz aus Polyurethan mit stark dämpfenden Eigenschaften. Schwingungen und Stöße werden so auf ein unerhebliches Minimum reduziert. Im Unterschied zu herkömmlichen elastischen Kupplungen werden die Glieder einer ROTEX-Kupplung lediglich auf Druck und nicht auf Biegung beansprucht. Die Haltbarkeit und vor allem die Belastbarkeit sind dadurch wesentlich höher. Die linke Komponente ist ein Mitnehmerflansch Ausführung 3b aus Gusseisen mit Kugelgraphit. Dieser wurde gewählt um eine Anbindung an die Motoren der Antera Motoren GmbH zu realisieren. Die rechte Komponente zur Anbindung an die Messwelle ist eine Spannringnabe light 6.0 ähnlich wie bei der RADEX-N. Auch hier wird durch anziehen der Schrauben eine reibschlüssige Verbindung hergestellt. Ebenfalls kann die ROTEX-Kupplung einen Winkelversatz von  $1^\circ$  und zusätzlich einen Achsversatz von 0,32 mm ausgleichen.

## 6.7. Blockdiagramm zur Ablaufstruktur

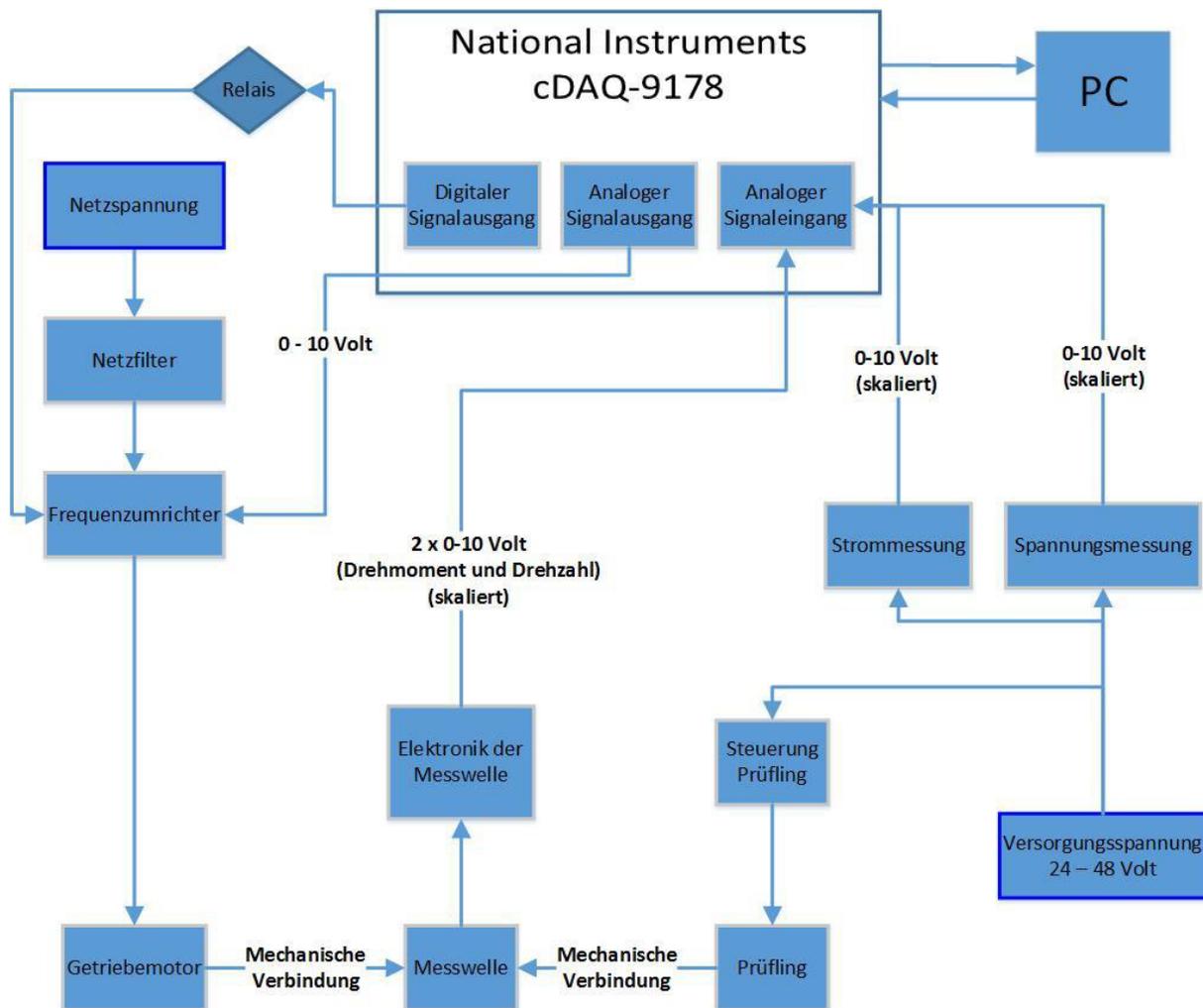


Abbildung 13: Blockdiagramm zum Prüfablauf

Die zentrale Einheit des Prüfstandes ist die Hardware von National Instruments. Sie steht in ständiger Korrelation mit dem PC.

Die Pfeile zeigen den Verlauf der Einheitssignale, der Spannung, des Stroms und der mechanischen Wechselwirkungen zwischen den Elementen innerhalb des Blockdiagramms.

## **7. Programmierung des Prüfstandes**

### **7.1. Verwendete Programmiersoftware**

Die Software zur Erstellung des Prüfprogramms ist von National Instruments.

Da von National Instruments ebenfalls die Hardware verwendet wird, entstehen keine Kompatibilitätsprobleme.

Zur Programmierung wird LabVIEW 2011 SP1 verwendet.

LabVIEW ist ein grafisches Programmiersystem, und steht für „**L**aboratory **V**irtual **I**nstrumentation **E**ngineering **W**orkbench“.

Das Programm besitzt eine sehr einfach zu handhabende Oberfläche. Es wird im Gegensatz zu anderen Programmiersprachen datenflussorientiert programmiert.

Die Hardware kann ohne Aufwand integriert werden. Durch die virtuelle Simulation innerhalb des Programms, können sehr realitätsnahe Systeme erstellt werden. Da es sich um eine grafische Programmierung handelt, werden komplexe und teils sehr komplizierte Quelltexte in Form eines vereinfachten Blockdiagramms dargestellt.

### **7.2. Mess- und Steuerungsprogramm**

#### **7.2.1. Anforderungen**

Im Vordergrund der Darstellung steht die Einfachheit der Programmoberfläche bei gleichzeitig sehr komplexen Anwendungsmöglichkeiten.

Das Programm soll jederzeit Auskunft über die aktuell ablaufenden Vorgänge geben und sowohl über ordnungsgemäßen, als auch über fehlerhaften Ablauf informieren.

Im Falle eines Fehlers soll das Programm beendet werden. Die Stromzufuhr schaltet demzufolge aus und der Bremsmotor wird langsam herunter gefahren.

Die Vermeidung von mechanischen Beschädigungen durch fehlerhafte Software ist ein besonders wichtiger sicherheitstechnischer Aspekt. Demzufolge ist es wichtig in das Prüfverfahren jederzeit eingreifen zu können. Dies dient einmal dazu Schäden zu vermeiden aber auch zur Problemfeststellung am Prüfling und zu dessen Weiterentwicklung.

Signale die die Hardware an das Programm weiterleitet, sollen dort tabellarisch geordnet und weiterverarbeitet werden. Das passiert in Form von reiner Zahlentechnischer Darstellung, Gegenüberstellung der Ergebnisse in einem Diagramm oder durch Berechnung weiterer notwendiger Größen anhand der gemessenen Werte.

Zuletzt hat das Programm die Aufgabe ein Protokoll zu generieren, in dem übersichtliche alle relevanten Daten zusammengestellt sind und das Protokoll ausgedruckt werden kann.

## 7.2.2. Programmierumgebung und die wichtigsten Funktionen

Die Programmierung erfolgt über sogenannte VI's (Virtuelle Instrumente). Sowohl das gesamte Programm als auch die Funktionsblöcke werden als VI's bezeichnet. Fertige Programme können als Unterprogramme (Sub-VI) in anderen Programmen wieder verwendet werden. Einzelne Funktionsblöcke werden durch Verbindungslinien miteinander verknüpft. Da die Reihenfolge der Abarbeitung durch die Bereitstellung der Daten bestimmt wird, ist eine grobe Ablaufstruktur bereits vorhanden. Daten am Ausgang eines VI's liegen auch dann erst an, wenn das gesamte Unterprogramm abgearbeitet ist.

Um dem Programm eine eindeutigere Ablaufstruktur zu verleihen, gibt es die Möglichkeit Sequenzen einzubauen, Bedingungen einzufügen oder einzelne VI's direkt voneinander abhängig zu machen.

Die sequenzielle Struktur ist insofern von Vorteil, dass die Ausgangsdaten erst dann bereitgestellt werden, wenn alle VI's in der Sequenz abgearbeitet sind. Es ist somit prinzipiell eine parallele Verarbeitung unterschiedlicher Eingangssignale und die „gleichzeitige“ Bearbeitung mehrerer Arbeitsschritte möglich.

Es können Überprüfungsprozesse von Sensoren in einer Sequenz mehrmals ausgeführt werden. Dafür ist es notwendig das gesamte Programmbild in eine Schleife zu implementieren.

Schleifen sind je nach Typ entweder mit einer Abbruchbedingung zu versehen, hauptsächlich bei „While-Schleifen“, oder es ist die Anzahl der Durchläufe festzulegen, bei Verwendung von „For-Schleifen“.

Um auf „Knopfdruck“ eine Funktion zu aktivieren oder ausführen zu lassen, werden „Case-Strukturen“ eingesetzt. Case-Strukturen bestehen aus 2 Teilen, True und False. Am Eingang einer Case-Struktur wird eine Boolesche Variable angefügt, zum Beispiel eine LED oder ein Button. Ist nun die LED eingeschaltet, wird der True-Case ausgeführt. Ist sie ausgeschaltet, so wird der False-Case ausgeführt.

Es gibt die Möglichkeit Befehle von einem Ereignis abhängig zu machen mit Hilfe von Ereignis-Strukturen. Die Bedingungen können dafür unterschiedlicher Art sein. Die Struktur soll ausgeführt werden im Falle einer Zustandsänderung einer Booleschen Variable oder durch Erreichen eines definierten Wertes.

Die Anwendungsmöglichkeiten sind sehr vielfältig.

Ein sehr wichtiger und nützlicher Baustein ist das Express-VI „DAQ-Assistent“. Er ermöglicht es Hardware sehr einfach einzubinden. Die zum Teil sehr auswendige Programmierung mit den Bausteinen der DAQmx – Datenerfassung entfällt, da der DAQ-Assistent schon einen Großteil an Funktionen integriert hat.

Das Express-VI „MS Office Report“ zur Erstellung von Protokollen in Word oder Excel bietet hingegen nicht die gewünschte Benutzerfreundlichkeit. Für die Protokollerstellung des Prüfstands ist der Aufbau eines Sub-VI durch einzelne VI der Protokollerstellung besser geeignet, da dies eine höhere Flexibilität ermöglicht. Zur Gestaltung der Benutzeroberfläche dienen unter anderem Diagramme, Graphen und numerische Anzeigen. Durch Rahmen und Relief kann der Oberfläche eine Struktur verliehen werden.

### **7.2.3. Programmstruktur (Ablaufplan)**

Der Prüfzyklus ist zusammenfassend betrachtet sehr einfach strukturiert. Die Prozedur lässt sich kurz in 6 Stufen beschreiben.

1. Eingabeaufforderung prüfbezogener Daten
2. Hochfahren der Drehzahl unter ständiger Überwachung der Drehmoment-Drehzahl-Entwicklung
3. Messen der Drehmoment und Drehzahlwerte sowie Aufnahme der temporären Strom und Spannungswerte
4. Beenden der Drehzahlsteigerung bei Erreichen der Höchstdrehzahl (Drehmoment  $\leq 0$ )
5. Verarbeitung gemessener und errechneter Daten
6. Protokollierung der Daten

Im Detail sind die Schritte komplexer.

Zu allererst öffnet sich nach Ausführen der .EXE ein Eingabefenster in den der Prüfer seinen Namen, die verwendete Steuerung, die Art der Spulenverschaltung und den Durchmesser des verwendeten Drahtes eingibt. Anschließend wird der Benutzer noch einmal aufgefordert die eingegebenen Parameter zu überprüfen. Durch Bestätigung dieser, schließt sich das Eingabefenster und das Fenster der Prüfstandsteuerung öffnet sich.

Alles wird über den Computer durch die National Instruments Hardware gesteuert. Sowohl die Steuerung des Prüflings als auch die der Belastungsmaschine bekommen ein 0-10V Steuersignal. Beim Start der Prüfung bekommt die Steuerung des Prüflings die maximale Steuerspannung. Der zu prüfende Motor wird also gezwungen, seine Höchstdrehzahl anzufahren. Allerdings steht ihm die Belastungsmaschine gegenüber, die durch ihre wesentlich größere Kraft den Motor in seiner Drehzahl begrenzt. Ein 0-10V Steuersignal lässt nun auch die Drehzahl der Belastungsmaschine ansteigen. Dem zu prüfenden Motor wird also immer mehr Drehzahl zur Verfügung gestellt.

Zwischen dem Prüfling und dem Bremsmotor befindet sich eine Drehzahl-Drehmomentmesswelle. Da der Prüfling der Belastungsmaschine mit der Drehzahl vorausseilt, verdreht sich die Torsionswelle und über die in 6.5.2 beschriebene Lichtmengenmessung wird das anliegende Drehmoment erfasst. Die Messwelle sendet ein Gleichspannungssignal an die Messkarte von NI.

Die Werte werden im Computer tabellarisch protokolliert. Parallel erzeugt auch der Drehzahlsensor ein Gleichspannungssignal welches ebenfalls von der Messkarte aufgenommen wird.

Zeitgleich sammelt das Programm die anliegenden Strom und Spannungswerte, die zur Berechnung des Wirkungsgrades und der Analyse des Motorverhaltens dienen.

In dem Prüfprozess ist eine Abbruchbedingung hinterlegt, die vorgibt wann der Vorgang beendet werden soll. Wenn der Testmotor seine Höchstdrehzahl erreicht hat, steigt die der Belastungsmaschine weiter. Das anliegende Drehmoment verringert sich und nimmt den Wert 0 oder einen negativen Wert an. Tritt dieser Fall ein, so wird die Prüfung beendet. Die Messhardware nimmt keine Werte mehr auf und die Motoren werden langsam herunter gefahren. Die ermittelten Daten werden nun verarbeitet und zusammen mit den daraus resultierenden berechneten Daten in einem Protokoll bereitgestellt.

## 7.2.4. Detaillierte Programmbeschreibung

### 7.2.4.1. Das Eingabefenster

Der Start des Prüfprogramms erfolgt durch das Öffnen einer Sub-Vi die in Form eines Fensters für die Eingabe verschiedener Parameter dargestellt wird.

Das Frontpanel dieses Fensters besteht aus 2 Eingabe-, 2 Auswahlfeldern, einem Anzeigefeld und 4 Schaltflächen von denen 2 erst mit der Aktivierung des „Weiter“-Buttons sichtbar werden, sowie das Anzeigefeld.

Für das Fenstererscheinungsbild ist die Dialogeinstellung gesetzt. Es ist somit nur eine Interaktion mit den Eingabefeldern und Schaltflächen möglich. Über das Kreuz kann das Fenster geschlossen werden.

Symbol-, Menüleiste als auch die Bildlaufleiste sind nicht vorhanden. Ebenfalls ist die vorgegebene Fenstergröße nicht variabel.

Das Eingabefenster ist also unveränderbar.

Abbildung 14: Startbildschirm des Prüfprogramms

Mit einem Klick auf Weiter wird diese Schaltfläche ausgeblendet und 2 neue sichtbar. Zusätzlich sieht man noch ein Anzeigeelement in dem ein String eingeblendet wird. Durch den Reset-Button werden alle Elemente wieder in den Ausgangszustand zurück versetzt. Dies wird durch eine Ereignisstruktur bewirkt die bei Wertänderung des Reset-Buttons alle Standardwerte des VI neu initialisiert. Der Button „Abbrechen“ beendet das gesamte Programm.



Abbildung 15: Startbildschirm des Prüfprogramms mit Eingaben

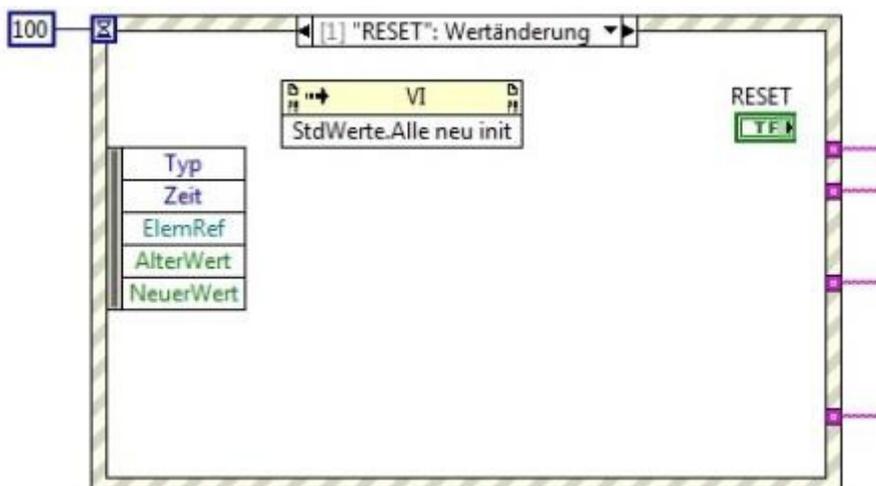


Abbildung 16: Quellcode - Ereignisstruktur zur VI-Initialisierung



### **7.2.5. Protokollierung der gemessenen Daten**

Zur Protokollierung der ermittelten Daten wurde im Rahmen des Projektes ein Sub-Vi entwickelt, welches die Messwerte in einer Excel-Vorlage abspeichert und zum Abruf bereitstellt.

Dazu muss eine Excel Vorlage zur Verfügung stehen, welche für den Eintrag der Daten aufgerufen wird. Diese muss im Labview mit Namen und Pfad angegeben werden.

Im nächsten Schritt initialisiert Labview das Protokoll.

Nun erfolgt das Anfügen der Protokollinhalte. Für die Zeit und das Datum werden die Systemdaten abgefragt und eingefügt. Ebenso werden die eingegebenen Daten aus dem Startbildschirm aus dem Zwischenspeicher eingefügt. Die Messergebnisse werden von einer Zahl in ein String konvertiert.

Um die Daten an der richtigen Stelle im Excel-Protokoll zu positionieren, werden für jede VI eigene MS-Office-Parameter festgelegt. In den sogenannten Clusterkonstanten werden entweder die Koordinaten der Excelzellen oder die Zellennamen angegeben. So wird eine Verbindung zwischen Protokoll und Daten hergestellt.

Zudem wird noch der Drehzahl-Drehmoment-Verlauf, also der XY-Graph als Bild abgespeichert und für das Protokoll neu aufgerufen. Der Pfad muss auch hier eindeutig festgelegt sein. Die Position geschieht auch hier durch Zellangabe oder Bezug durch den Zellennamen.

## **8. Getestete Motoren**

### **8.1. Komponenten – Aufbau und Funktionsprinzip**

#### **8.1.1. Radnabenmotor**

Der Radnabenmotor ist als Außenläufer eine besondere Bauform des bürstenlosen Gleichstrommotors kurz BLDC. Der Rotor ist also außen. In ihm sind die Magnete eingeklebt. Dabei ist es wichtig, dass die Magneten immer abwechselnd gepolt angeordnet sind, also Nord-Süd-Nord-Süd und so weiter. In der Mitte ist der Stator. Auf ihm sind die Stege außen angeordnet auf denen wiederum die Spulen gewickelt sind. 3 Phasen sind nacheinander auf die Spulen aufgeteilt, entweder als Einzelspulen oder als Spulenpakete. Bei der Antera Motoren GmbH handelt es sich um sensorgesteuerte Motoren, mittels Verwendung sogenannter Hallsensoren. Sie ermitteln die aktuelle Rotorposition durch eine Wechselwirkung mit den Magneten. Sensorgesteuerte Motoren sind deutlich teurer, da eine extra Regeleinheit beziehungsweise Steuerung notwendig ist. Der große Vorteil jedoch, der diesen Nachteil überwiegt, ist das schon aus dem Stillstand heraus das volle Drehmoment abgerufen werden kann. Zur Rotation des Motors kommt es folgendermaßen. Die 3 Phasen des Motors sind 120 Grad Phasenverschoben. Sie werden nacheinander mit gepulsten Strömen beaufschlagt. Dadurch entsteht ein magnetisches Drehfeld. Eine Spule die gerade ein nordorientiertes Magnetfeld erzeugt stößt den Nord-Magneten ab und zieht den darauffolgenden Süd-Magneten an. Die benachbarte Spule mit dem südorientierten Magnetfeld zieht den abgestoßenen Nord-Magneten an, wobei sie gerade einen Südmagneten abstößt.

#### **8.1.2. Vergleich zu bürstenbehafteten Motoren**

Der Vergleich zu bürstenbehafteten Gleichstrommotoren legt eine Menge Vorteile für die bürstenlosen Motoren dar. Ein besonders hervorstechendes Merkmal ist das die Funktion von Rotor und Stator vertauscht sind. Zudem liegt keine mechanische Stromwendung mehr vor, sondern eine elektronische Kommutierung.

Ein Großteil der Verlustleistung wird im Stator umgesetzt. Bei bürstenlosen Motoren ist in diesem Bereich eine schnelle Wärmeabfuhr möglich, über den Flansch oder das Gehäuse. Deshalb existiert die Möglichkeit Motoren mit gleicher Leistung in kleineren Dimensionen zu bauen. Diese können außerdem stärker belastet werden als bürstenbehaftete Motoren. BLDC-Motoren besitzen also auf ihr Volumen bezogen eine hohe Drehmomentdichte.

Zu den ganz großen Vorteilen gehört der Wegfall der Bürsten. Diese sind meist sehr wartungsintensiv und störanfällig. BLDC-Motoren sind nahezu wartungsfrei. Ihre Zuverlässigkeit hängt nur noch von Qualität und Lebensdauer der verwendeten

Kugellager ab. Durch den Wegfall der Bürsten besitzt der Motor folglich keine mechanische Kommutierung mehr. Dies führt dazu, dass das Motorengehäuse effektiv gegen Eindringen von Schmutz und Feuchtigkeit geschützt werden kann. Zum Vergleich ist der Aufbau beider Motoren durch folgende Bilder veranschaulicht:

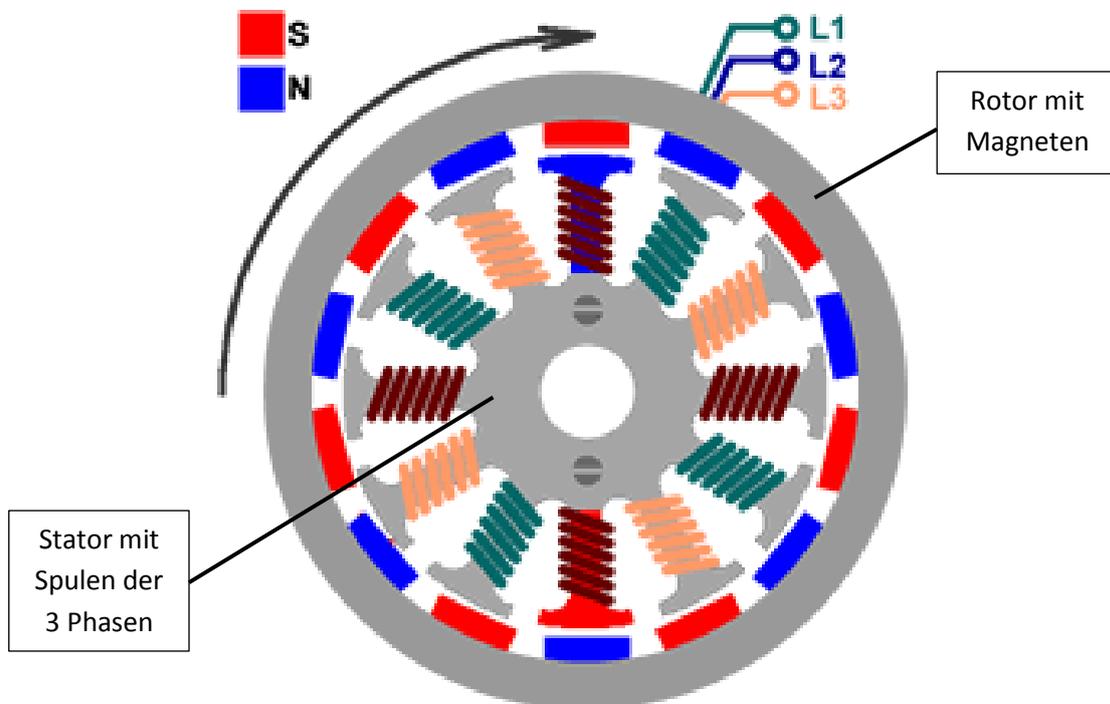


Abbildung 18: Schema eines bürstenlosen Motors – Außenläufer  
(Quelle: [http://www.heli-blog.de/?section=motor\\_und\\_regler](http://www.heli-blog.de/?section=motor_und_regler))

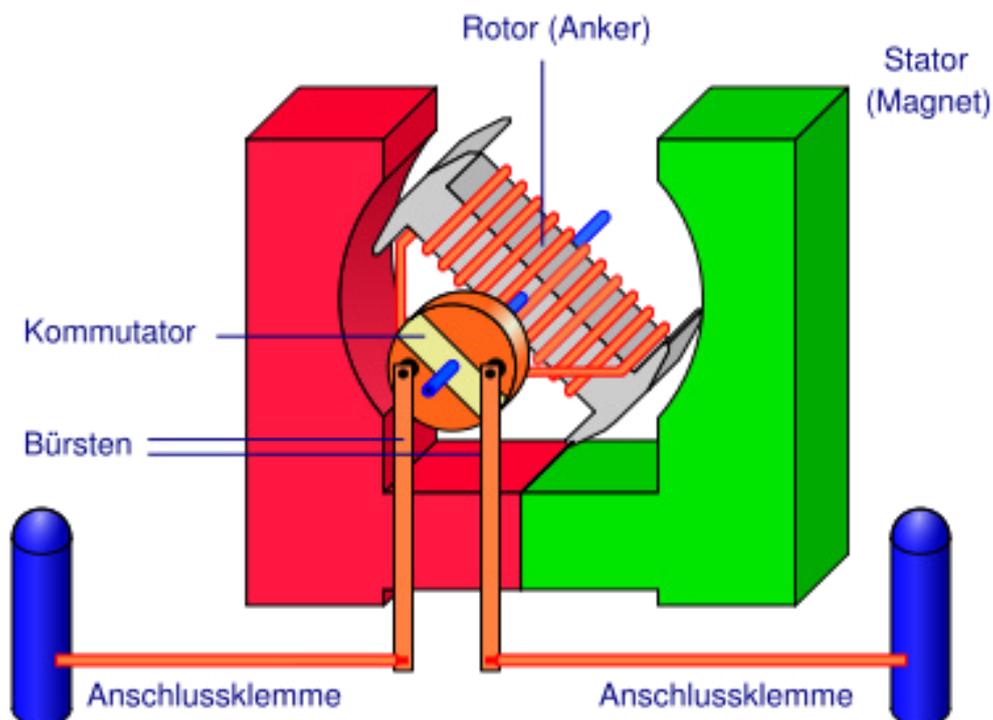


Abbildung 19: Schema eines Bürstenbehafteten Motors  
(Quelle: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gleichstrommaschine.svg>)

### 8.1.3. Magnetbremse

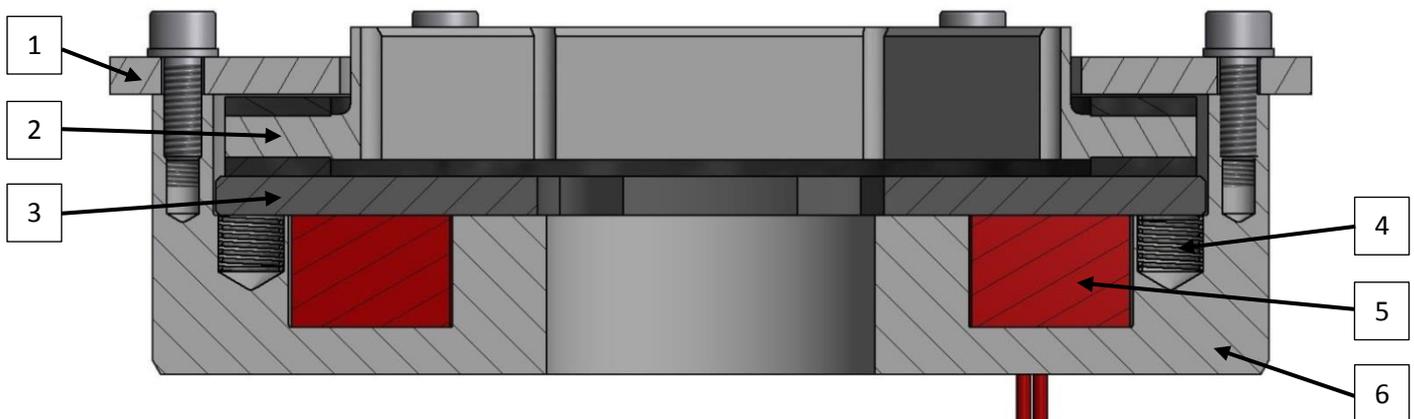


Abbildung 20: Schnitt einer Magnetbremse

- |                 |            |
|-----------------|------------|
| 1. Druckplatte  | 4. Feder   |
| 2. Reibscheibe  | 5. Spule   |
| 3. Ankerscheibe | 6. Gehäuse |

Die Magnetbremse ist in Reha-Fahrzeugen wie Scootern oder Rollstühlen zwingend notwendig und vom TÜV vorgeschrieben. Sie dient jedoch lediglich als Feststellbremse und nicht als Haltebremse. Liegt eine Versorgungsspannung an, so ist die Bremse geöffnet. Das Fahrzeug kann bewegt werden. Sollte die Versorgungsspannung nicht mehr anliegen schließt die Bremse und das Fahrzeug ist gegen unbeabsichtigtes Rollen gesichert.

An die Zuleitungen der Spule wird eine Gleichspannung angelegt. Dadurch baut sich ein Magnetfeld auf und die Ankerscheibe wird angezogen. Die Reibscheibe kann sich somit zwischen der Ankerscheibe und der Druckplatte frei bewegen. Wird die Spule von der Spannungsversorgung getrennt, erlischt das Magnetfeld. Die Spiralfedern, die kreisförmig im Gehäuse angeordnet sind, drücken nun die Ankerscheibe nach oben und folglich geht die Reibscheibe mit der Ankerscheibe und der Druckplatte eine reibschlüssige Verbindung ein.

## 8.2. Ergebnisse

### 8.2.1. Gegenüberstellung errechneter und gemessener Daten

Tabelle 1: Vergleich Messwerte - Rechenwerte

KenngroÙe	Rechenwert	Messwert RoboteQ (Protokoll)	Messwert Kelly (Tabelle)	Messwert Kelly (Protokoll)
Strom	30	18	35,7	36
Spannung	24	25	22,6	25
Drehmoment	30	15	21,9	22
Drehzahl	200	100	82,3	115
Zugeführte Leistung	720	450	806,82	917
Abgegebene Leistung	628	157	188,73	265
Wirkungsgrad	0,87	0,35	0,23	0,28

### 8.2.2. Auswertung

Für die Durchführung der Tests kam immer derselbe Motor zum Einsatz. In diesem Motor wird ein Draht mit einem Durchmesser von 1,12 mm verwendet. Die Spulen sind parallel zueinander verschaltet. Die Spannungs- und Stromversorgung bilden 2 in Reihe geschaltete Blei-Gel-Batterien mit jeweils 12 V und 18 Ah. Durch die Verschaltung der Batterien in Reihe stehen nun eine Ausgangsspannung von 24 V und ein Strom von 18 A zur Verfügung. Zur Auswertung und zum Vergleich werden die Daten von jeweils einem Messprotokoll je Steuerung heran gezogen. Zusätzlich wird der Vergleich zwischen den Protokolldaten und den zugehörigen Daten der Messwerttabelle angestellt.

Die Inhalte der Protokolle sind unabhängig der verwendeten Steuerung sehr ähnlich. Jedoch lassen sich gravierende Unterschiede zu den berechneten Daten feststellen. Bei den Rechenwerten werden Idealbedingungen angenommen, unter den Voraussetzungen, dass die Steuerungen perfekt mit den Motoren harmonieren und Motorintern die Bauteile in höchster Qualität vorliegen. Der Wirkungsgrad von 87 % könnte gegebenenfalls noch höher sein. Nach den Berechnungen lässt sich die Aussage treffen, dass das Drehmoment linear mit dem Strom steigt. Dieser Hypothese kommt die RoboteQ-Steuerung am nächsten. Mit 15 Nm bei 18 A weicht sie von der Rechnung um 16,7 % ab. Die Kelly-Steuerung ist nicht sehr effektiv den

Strom in Drehmoment umzusetzen. Im Verhältnis stehen 21,9 Nm zu 35,7 A. Somit ist die Abweichung vom Rechenwert noch größer und beträgt 38,7 %. Die gemessenen Daten des Stroms sind gegenüber dem verfügbaren Batteriestrom von 18 A darin begründet, dass die Batterien kurzzeitig mit dem 2 bis 2,5-fachen belastet werden können.

Eine Versorgungsspannung von 24 V ständig zur Verfügung zu haben ist nur in der Theorie möglich. In der Praxis besteht die Möglichkeit mit einer regelbaren Spannungsversorgung den Verlust durch die Leitung und die anliegende Last zu kompensieren. Im Falle einer Batterie als Energiequelle jedoch nicht. Ein minimaler Spannungsabfall ist nicht zu vermeiden. Unter dem Gesichtspunkt ist sofort festzustellen, dass die Protokolldaten sowohl von der RoboteQ als auch von der Kelly mit 25 V sehr unrealistisch sind. Der Tabellenwert der Kelly-Steuerung 22,6 V ist denen gegenüber durchaus vertretbar. An dieser Stelle kommt die Frage auf, ob der Weg für die Berechnung der Protokolldaten im Prüfprogramm der Richtige ist.

Im Drehzahlbereich lassen sich nur schwer eindeutige Aussagen machen. Die Drehzahl von  $200 \text{ min}^{-1}$  ist kein exakt berechneter sondern ein angenommener Wert, quasi ein Erwartungswert, um dem Wirkungsgrad im Bereich der 90 % gerecht zu werden. Grundlegend ist es so das der angestrebte Anwendungsbereich, der nun mal Rollstühle und weitere Reha-Fahrzeug umfasst, nicht die Anforderung stellt möglichst hohe Drehzahlen zu erreichen. Die Aussage 1 Nm / 1 A ist in der tabellarischen Aufstellung mehr oder minder als Mittelwert zu betrachten. Eigentlich ist es so, dass das Zielgebiet im niederen Drehzahlbereich liegt. Rollstühle haben in den meisten Fällen eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 6 km/h. Das entspricht bei einem 24"-Rad einer Umdrehungszahl von  $52,13 \text{ min}^{-1}$ , jedoch wird bei der Fahrt in der Ebene nur ein Strom von etwa 1 A verbraucht, da das erforderliche Drehmoment ebenfalls sehr gering ist. Unter Idealbedingungen, die besonders vom Material abhängig sind, würde ein Motor etwa 9 A benötigen um ein Drehmoment von 34 Nm aufzubauen, ebenfalls bei einer Umdrehungszahl von circa  $52 \text{ min}^{-1}$ . Dies entspricht einer zugeführten Leistung von etwa 216 W gegenüber einer abgegebenen Leistung von circa 185 W. Im Vergleich entspricht das einem Wirkungsgrad von knapp 86 %. Bei näherer Betrachtung erkennt man das das Verhältnis von Moment und Strom sich auf 3,78 Nm / 1 A verändert hat. Für die Berechnung dieser Werte sind eine Menge Faktoren ausschlaggebend. Beispielsweise das Luftspaltmaß zwischen Steg und Magnet, die effektive Kabellänge, die Verlustleistung in dem verwendeten Blech oder die Anzahl der Windungen der Spulenpakete.

Im Gegensatz zu den berechneten Daten sind die gemessenen Daten für die erforderliche zugeführte Leistung laut Protokoll wesentlich höher. Die RoboteQ ist hierbei noch am effizientesten mit einer Leistungsaufnahme von 450 W. Die Kelly-

Steuerung verbraucht mehr als das doppelte. Nun ist die Leistung die der Motor mit der Kelly-Steuerung aufbringen kann höher, steht aber in keiner Relation zur zugeführten Leistung. Die Wirkungsgrade beider Steuerungen sind in Bezug auf die erwarteten Werte sehr enttäuschend. Die Schwierigkeit ist jetzt festzustellen, worauf diese mangelhafte Leistungsabgabe zurückgeführt, beziehungsweise wie dieses Problem behoben werden kann. Dafür gibt es mehrere Ansätze. Eine Möglichkeit besteht darin, dass die Steuerungen die zugeführte Leistung nicht umsetzen können, jedoch sind sie in der Lage diese Leistung aufzunehmen. Es war nicht festzustellen, dass die Steuerungen die Leistung während des Tests in Wärme umgewandelt haben und es somit zu einem Leistungsverlust im Motor kommt. Denkbarer ist es, dass der Motor materialbedingt zu viele Verluste verursacht, in dem der Wickeldraht der Spulen die Leistung begrenzt oder der Stator in seiner Materialstruktur den magnetischen Fluss behindert.

Es ist also allgemein festzustellen, dass die Leistung zur Verfügung steht, aber nicht vollständig umgesetzt werden kann.

**Tabelle 2: Vergleich Protokoll - Messwerttabelle**

Kenngröße	Messwert Kelly (Tabelle)	Messwert Kelly (Protokoll)
Strom	35,7	36
Spannung	22,6	25
Drehmoment	21,9	22
Drehzahl	82,3	115
Zugeführte Leistung	806,82	917
Abgegebene Leistung	188,73	265
Wirkungsgrad	0,23	0,28

Die Zahlenwerte aus Tabelle 2S sind aus demselben Prüfdurchgang. Die Werte „Tabelle“ sind aus einer Messwertaufreihung, in der jedem Zeitpunkt der Abtastung der genaue Wert für Strom, Spannung, Drehmoment und Drehzahl zugeordnet werden kann. Demnach ist die Zeile gewählt worden, in der das höchste Drehmoment verzeichnet war. In der nebenstehenden Spalte sind die Ergebnisse eingetragen, welche das Prüfprogramm berechnet hat. Wie zu erkennen ist, stimmen die Werte für Strom und Drehmoment bis auf eine geringe Abweichung überein, da das Programm die Messwerte auf ganze Zahlen rundet. Nun sollte über die maximal erbrachte Leistung die Drehzahl berechnet werden, die dem maximalen

Drehmomentwert zugeordnet werden kann. Jedoch kann es sich nicht um den richtigen Wert handeln, da er wie schon beschrieben über die Tabelle eindeutig zugeordnet werden kann. Bei der Ermittlung der Spannung ist es ähnlich nur das diese nicht berechnet wird. Es sollte der Maximalwert bestimmt werden, nur das dieser allgemein ermittelt wird und nicht messpunktbezogen.

Drehzahl und Spannung werden nicht korrekt ermittelt und verfälschen somit den Wert der zugeführte und der abgegebenen Leistung. Folglich ist der Wirkungsgrad mehr als ungenau. Die eingetragenen Messdaten im Protokoll lassen keine eindeutige Aussage zur Leistungsbestimmung des Motors zu.

## **9. Fazit**

### **9.1. Funktionstest des Motors**

Der allgemeine Funktionstest hat ergeben, dass der Motor mit beiden Steuerungen anläuft, hohe Drehzahlen erreicht und ein Drehmoment unter Last aufbaut. Der Einbau in Testfahrzeugen und die Bewältigung der daraus hervorgehenden Anforderungen sind zufriedenstellend.

### **9.2. Beurteilung des Prüfstandes**

Die Aufgabe einen Leistungsprüfstand für elektrische Radnabenmotoren zu bauen und in Betrieb zu nehmen wurde erfolgreich gelöst. Der Prüfvorgang läuft automatisiert ab und die gemessenen Daten werden anschließend in einem Protokoll zur Auswertung bereitgestellt. Die Bauteile des Prüfstandes halten den derzeit aufgebrachten Belastungen stand. Die Basis zur Prüfung größerer Motoren ist gegeben und Tests können ohne Bedenken durchgeführt werden. Die Kenntnisse zur Programmierung in LabView wurden zum Großteil selbst und bei schwerwiegenden Problemen durch die Mitarbeiter der Hochschule Merseburg angeeignet. Die Auswahl der Komponenten und deren Montage verliefen ohne nennenswerte Probleme reibungslos. Dennoch hat dies und die Programmierung viel Zeit in Anspruch genommen.

Zum Betrieb des Prüfstands lässt sich sagen, dass die Kommunikation zwischen den elektronischen und mechanischen Bauteilen gut funktioniert. Das Ansteuern der Hardware durch den PC ist bis auf kleine Schwierigkeiten möglich. Das Programm zur Durchführung der Testläufe ist erfolgreich programmiert und implementiert worden. Trotz dass mit dieser Form der Leistungsprüfung Messwerte aufgenommen werden konnten, die eine dennoch mit Abweichungen belastete Aussage zulassen, muss die Reihenfolge des Prüfablaufes überarbeitet werden. Zur Erläuterung noch einmal der jetzige Prüfvorgang. Die Steuerung des Prüflings wird mit der maximalen

Steuerspannung beaufschlagt, so dass der Prüfmotor aufgefordert ist seine maximale Drehzahl anzufahren. Die Belastungsmaschine wird nun mittels einer Rampe angesteuert und soll dem Prüfmotor nun immer mehr Drehzahl zur Verfügung stellen. Während des Vorgangs muss der Prüfmotor die ganze Zeit sein volles Drehmoment aufbauen um die eingestellte Drehzahl zu überwinden. Die irrtümliche Überlegung war also, dass der Prüfling der Belastungsmaschine immer etwas vorausseilt und ständig sein maximales Drehmoment aufbringt, bis seine maximale Drehzahl erreicht ist und das Drehmoment 0 wird. Dem ist anscheinend nicht so, da die Drehmoment-Drehzahl-Kurve einen eigenartigen Verlauf zeigt. Es wird also angenommen, dass der Prüfmotor nicht schnell genug beschleunigen kann um den immer wieder neuen freigegebenen Maximalwert der Drehzahl zu erreichen. Die logische Schlussfolgerung ist es den Prüfvorgang in seinem Ablauf zu verändern. Ziel ist es die Belastungsmaschine und den Prüfmotor auf eine vorgegebene Drehzahl hochfahren zu lassen. Nach Erreichen dieser Drehzahl, startet der Messvorgang. Dabei wird die Drehzahl der Belastungsmaschine nach und nach bis zum Stillstand verringert. Dabei muss der Prüfmotor ständig sein volles Drehmoment aufbringen um eine Drehzahlverminderung zu vermeiden.

### 9.3. Probleme – Behebung

Während der Programmierung und der Durchführung erster Testläufe sind einige Probleme aufgetreten.

Die genaue Berechnung der Drehzahl ist durch die aktuelle Programmierung nicht möglich. Über die Bestimmung der maximal abgegebenen Leistung sollte in Relation zum maximalen Drehmoment die Drehzahl ermittelt werden. Jedoch wurde nicht bedacht, dass das Produkt eines niedrigeren Drehmomentwertes und einem höheren Drehzahlwert, eine höhere Leistung ergibt. Somit ist die berechnete Drehzahl einem anderen Drehmoment zuzuordnen. Folglich muss die Lösung sein, die Messwerttabelle zur Ermittlung der genauen Datensätze heran zuziehen. Es wird ebenfalls nach dem höchsten Drehmomentwert gesucht. Die restlichen Werte dieses Messpunktes werden dann einfach übernommen und zur Berechnung der Leistungen und des Wirkungsgrades verwendet.

Somit erübrigt sich die Ermittlung der verwendeten Spannung. Der Fehler war hier die Annahme eines konstanten Spannungsverlustes. Da die Messung allerdings startet, wenn das System sich noch im Stillstand befindet, ist der Maximalwert größer als 24 V.

Das erheblichste Problem war jedoch das synchrone Herunterfahren nach der Prüfung. Unter der Annahme, dass der Prüfmotor seine maximale Drehzahl erreicht hat, wurden jeweils eine Rampe für den Prüfling, mit seiner maximalen Steuerspannung als Startwert und eine für die Belastungsmaschine mit dem aktuellen Steuerspannungswert als Startwert aufgerufen, um beide synchron auf Drehzahl 0 herunter zu fahren. Dabei ist die Problematik aufgetreten, dass der Prüfmotor vor der Belastungsmaschine zum Stillstand kam. Folglich ging der Prüfmotor, angetrieben durch die Belastungsmaschine in den generatorischen Betrieb über. Die dadurch erzeugte Spannung wird normalerweise über die Steuerung zurück zur Spannungsquelle geleitet. Da die ersten Tests jedoch als Vorsichtsmaßnahme mit einem leistungsschwachen Netzgerät durchgeführt wurden und das Netzgerät bei eingehender Spannung abschaltet, wurde die generatorisch erzeugte Spannung auf die Steuerung geleitet. Die am Eingang Phasenausgang der Steuerung gesetzten Dioden hielten der Spannung nicht stand und brannten durch. Danach konnte die Spannung weiter zu den Transistoren, welche sie ebenfalls zerstörte. Dies passierte unglücklicherweise mit 2 Steuerungen.

Nach Rücksprache mit dem Elektroniker des Betriebes kamen 2 Blei-Gel-Batterien zum Einsatz, die bei generatorischem Betrieb die Spannung und den Strom zum Ladevorgang aufnehmen konnten. So war die Steuerung geschützt. Zukünftig soll jedoch noch eine Schutzschaltung entwickelt werden, die die rückgespeiste Energie in Wärme umwandelt.

## 10. Fehlerbetrachtung

In Anbetracht der Tatsache das für die Messungen von Strom, Spannung, Drehmoment und Drehzahl hochpräzise Elektronik verwendet wird und für die Leistungsbestimmung eines elektrischen Radnabenmotors in Bezug auf sein Anwendungsgebiet die Schwankung des Messwertes um 1 A beziehungsweise 1 Nm eine nahezu vernachlässigbare Bedeutung hat, ist die Fehlerbetrachtung mehr eine Auflistung der möglichen Fehler, als eine ausschlaggebende Berechnung.

Folgend sind alle messrelevanten Bauteile aufgeführt:

**Tabelle 3: Abweichungen der Messkomponenten**

Bauteil	Abweichung
Drehmoment-/Drehzahlmesswelle	$< \pm 0,5 \%$
Stromwandler	$< \pm 1 \%$
Spannungswandler	$\pm 0,2 \%$
NI 9215 (Analoge Signalaufnahme)	$\pm 0,015 \%$

Zur Wichtung der Abweichung wird folgendes Beispiel behandelt. Ein Motor mit 24V Versorgungsspannung baut ein Drehmoment von 25 Nm bei einer maximalen Drehzahl von 150 Umdrehungen auf. Dafür benötigt der Motor einen Strom von 18 A. In Einberechnung der Abweichungen ergeben sich schließlich folgende Werte:

**Tabelle 4: Abweichungen der Beispielrechnung**

Kennwert	Abweichung	Minimalwert	Maximalwert
24 V	$\pm 0,2\% + \pm 0,015\%$	23,95 V	24,05 V
18 A	$\pm 1\% + \pm 0,015\%$	17,82 A	18,18 A
25 Nm	$\pm 0,5\% + \pm 0,015\%$	24,87 Nm	25,13 Nm
150 min <sup>-1</sup>	$\pm 0,5\% + \pm 0,015\%$	149,23 min <sup>-1</sup>	150,77 min <sup>-1</sup>

Aus den Werten der maximalen Abweichungen in negativer und positiver Richtung, lassen sich für die Leistungen anschließend entsprechende Werte berechnen:

**Tabelle 5: Auswirkungen der Messabweichungen**

Kennwert	Minimum	Maximum	Ohne Abweichung
Zugeführte Leistung [W]	426,789	437,229	432
Abgegebene Leistung [W]	388,62	396,74	392,67
Wirkungsgrad [%]	88,88	92,96	90,9

Nach gründlicher Betrachtung der einzelnen Werte ist festzustellen, dass sich die Abweichungen im Bereich nach dem Komma bewegen. Die Leistungsabweichungen und die des Wirkungsgrades betragen maximal  $\pm 2,2 \%$ . Es lässt sich die Aussage treffen das diese Messfehler vernachlässigt werden können.

## 11. Mögliche Erweiterungen des Prüfstandes

Eine eventuelle Weiterentwicklung des Prüfstandes beinhaltet folgende Maßnahmen:

- Die Werkbank soll später durch einen massiven Maschinentisch ersetzt werden. Möglich wären integrierte T-Nuten, welche die Montage der Bauteile vereinfachen.
- Durch die Verwendung des Maschinentisches wird es notwendig den Schaltschrank separat zu montieren. Dieser Schritt ermöglicht eine Zentralisierung der gesamten Elektronik, das heißt alle elektronischen Bauteile können in einem Schaltkasten übersichtlich miteinander verbunden werden.
- Eine hardwaretechnische Erweiterung ist die Integrierung einer Temperaturmesseinrichtung zur Überwachung der Temperaturentwicklung beispielsweise beim Dauerbetrieb. Wird es notwendig wird eine größere Drehmomentmesswelle verbaut.
- Die Änderung der Hardware führt auch zur Anpassung der Software. Neue Prüfabläufe sind zu programmieren. Verschiedene Einflussfaktoren wie veränderliche oder konstante Steigungsfahrten können so simuliert werden. Zudem kann der Prüfstand für Generatoren verwendet werden.

## **Tabelleverzeichnis**

Tabelle 1: Vergleich Messwerte - Rechenwerte .....	44
Tabelle 2: Vergleich Protokoll - Messwerttabelle .....	46
Tabelle 3: Abweichungen der Messkomponenten .....	50
Tabelle 4: Abweichungen der Beispielrechnung.....	50
Tabelle 5: Auswirkungen der Messabweichungen.....	50

## **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Pronyscher Zaum .....	13
Abbildung 2 : Schematischer Aufbau des Prüfstands.....	16
Abbildung 3: Prüfstand .....	17
Abbildung 4: RoboteQ LBL1360C .....	19
Abbildung 5: Kelly Controller KBL 48101X .....	19
Abbildung 6: Stromwandler DHR 200 C10 .....	26
Abbildung 7: Spannungswandler CV3-200.....	27
Abbildung 8: Koppereinheit zwischen Prüfling und Messwelle.....	28
Abbildung 9: Klauenkupplung - Messwelle - Stahllamellenkupplung .....	29
Abbildung 10: 3D-Modell Stahllamellenkupplung .....	30
Abbildung 11: Schnitt Spannringnabe .....	30
Abbildung 12: 3D-Modell Klauenkupplung.....	31
Abbildung 13: Blockdiagramm zum Prüfablauf.....	32
Abbildung 14: Startbildschirm des Prüfprogramms.....	37
Abbildung 15: Startbildschirm des Prüfprogramms mit Eingaben.....	38
Abbildung 16: Quellcode - Ereignisstruktur zur VI-Initialisierung .....	38
Abbildung 17: Dialogfenster des Hauptprogramms .....	39
Abbildung 18: Schema eines bürstenlosen Motors – Außenläufer .....	42
Abbildung 19: Schema eines Bürstenbehafteten Motors .....	42
Abbildung 20: Schnitt einer Magnetbremse .....	43

## **Anlagenverzeichnis**

Anlage 1: Messprotokoll RoboteQ .....	-I-
Anlage 2: Messprotokoll Kelly 1 .....	-II-
Anlage 3: Messprotokoll Kelly 2.....	-III-
Anlage 4: Messprotokoll Kelly 3.....	-IV-
Anlage 5: Messprotokoll Kelly 4 mit Messwerttabelle .....	-V-
Anlage 6: Technische Zeichnung - Adapter.....	-X-
Anlage 7: Technische Zeichnung - Motorhalter .....	-XI-
Anlage 8: CD .....	-XII-

# Anlage 1: Messprotokoll RoboteQ



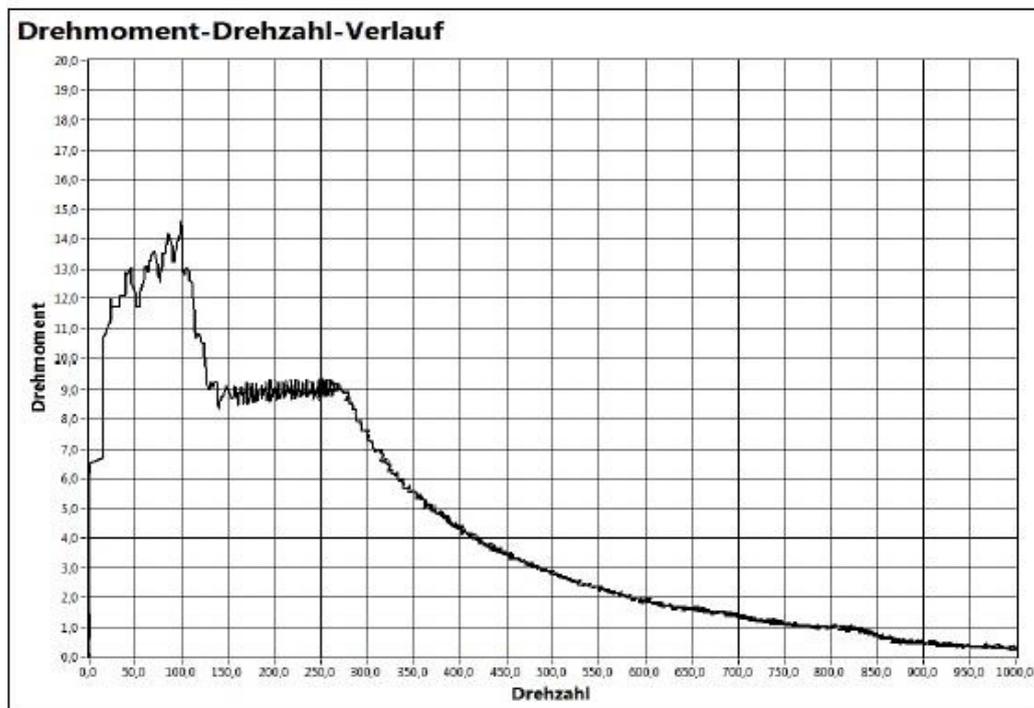
## Datenblatt

Datum	Uhrzeit	Prüfer
07.10.2013	20:29	Alexander Böhm

Verwendete Steuerung	ROBOTEQ LBL1360C
Art der Spulenverschaltung	Parallelschaltung
Verwendeter Drahtdurchmesser [mm]	1,12

Strom [A]	18
Spannung [V]	25
Drehmoment [Nm]	15
Drehzahl [1/min]	170

zugeführte Leistung [W]	435
abgegebene Leistung [W]	258
Wirkungsgrad	0,59



## Anlage 2: Messprotokoll Kelly 1



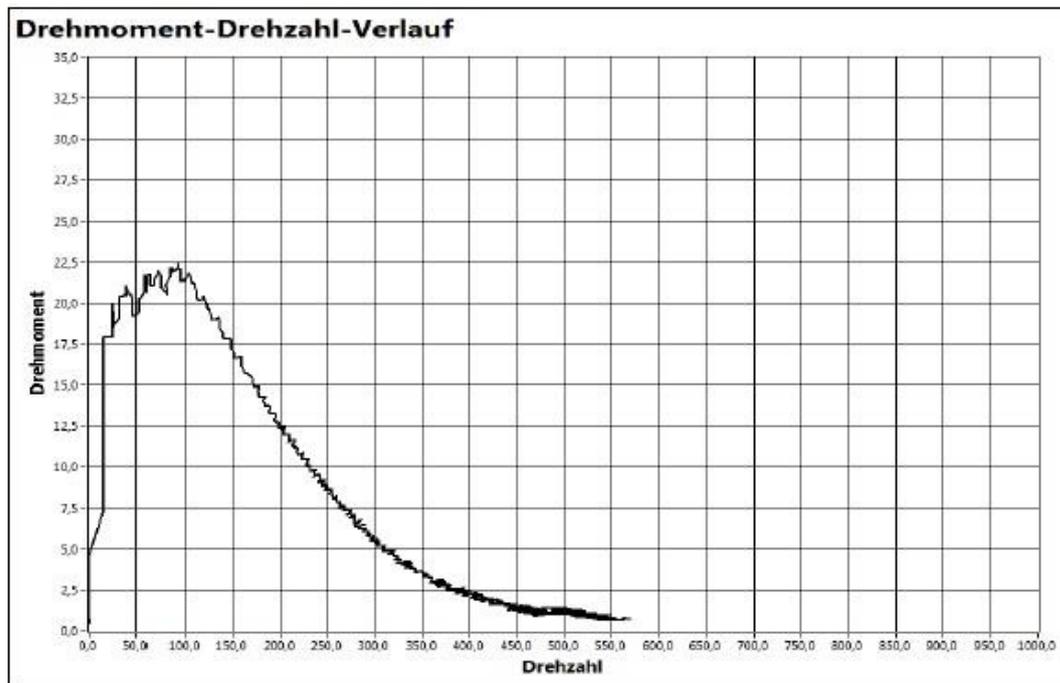
## Datenblatt

Datum	Uhrzeit	Prüfer
09.10.2013	20:17	Alexander Böhm

Verwendete Steuerung	Kelly KBL 48101X
Art der Spulenverschaltung	Parallelschaltung
Verwendeter Drahtdurchmesser [mm]	1,12

Strom [A]	36
Spannung [V]	25
Drehmoment [Nm]	22
Drehzahl [1/min]	119

zugeführte Leistung [W]	911
abgegebene Leistung [W]	279
Wirkungsgrad	0,306



## Anlage 3: Messprotokoll Kelly 2



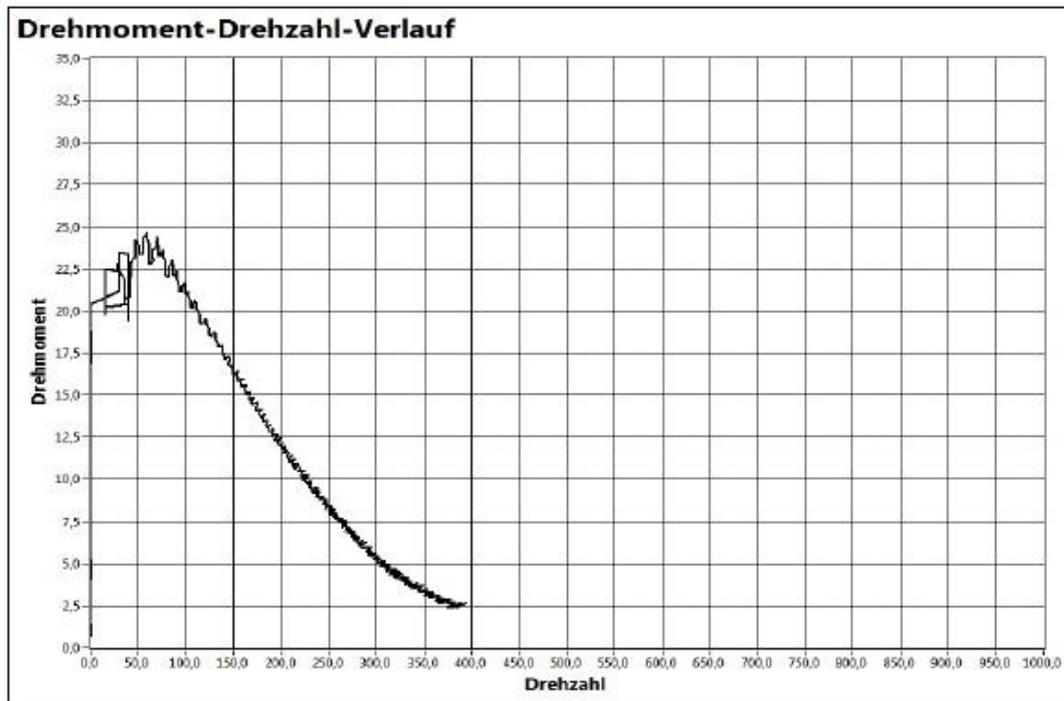
## Datenblatt

Datum	Uhrzeit	Prüfer
09.10.2013	20:45	Alexander Böhm

Verwendete Steuerung	Kelly KBL 48101X
Art der Spulenverschaltung	Parallelschaltung
Verwendeter Drahtdurchmesser [mm]	1,12

Strom [A]	43
Spannung [V]	25
Drehmoment [Nm]	25
Drehzahl [1/min]	104

zugeführte Leistung [W]	1093
abgegebene Leistung [W]	268
Wirkungsgrad	0,245



## Anlage 4: Messprotokoll Kelly 3



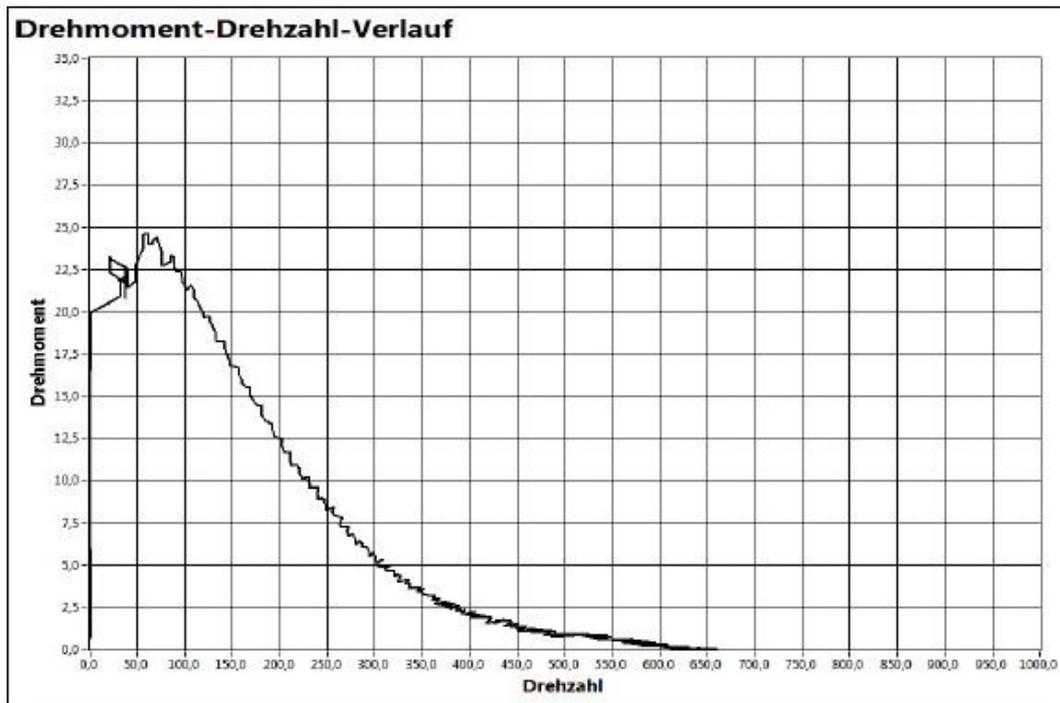
## Datenblatt

Datum	Uhrzeit	Prüfer
09.10.2013	20:50	Alexander Böhm

Verwendete Steuerung	Kelly KBL 48101X
Art der Spulenverschaltung	Parallelschaltung
Verwendeter Drahtdurchmesser [mm]	1,12

Strom [A]	43
Spannung [V]	26
Drehmoment [Nm]	25
Drehzahl [1/min]	106

zugeführte Leistung [W]	1088
abgegebene Leistung [W]	274
Wirkungsgrad	0,252



## Anlage 5: Messprotokoll Kelly 4 mit Messwerttabelle

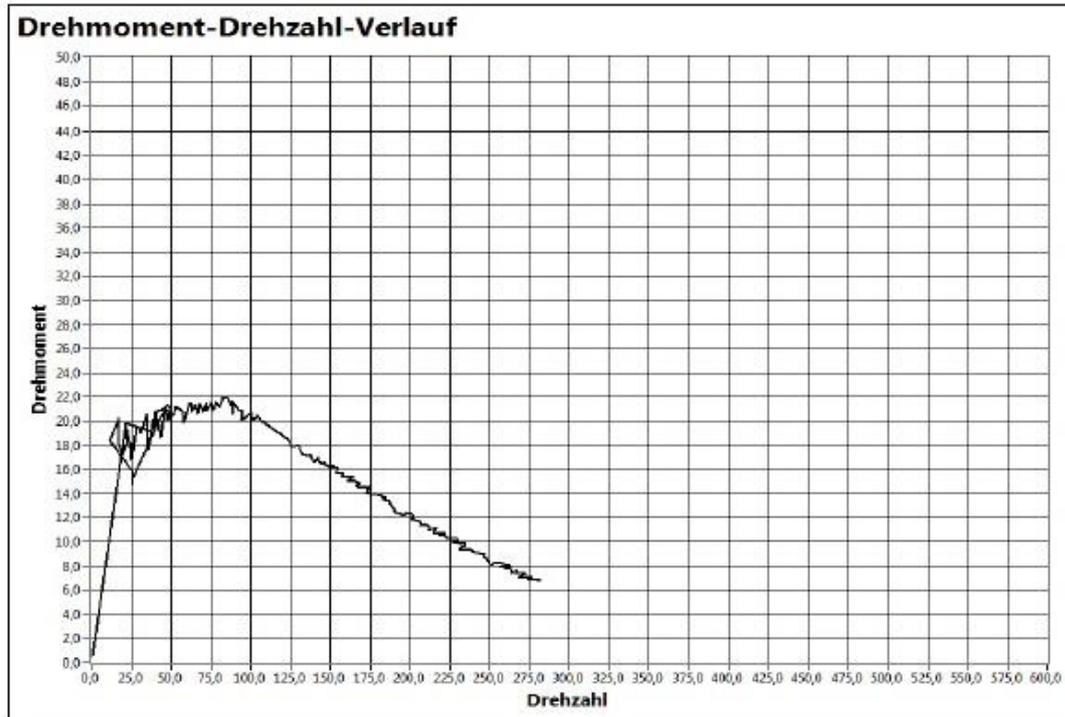


Datum	Uhrzeit	Prüfer
10.10.2013	11:20	Alexander Böhm

Verwendete Steuerung	Kelly KBL 48101X
Art der Spulenverschaltung	Parallelschaltung
Verwendeter Drahtdurchmesser [mm]	1,12 mm

Strom [A]	36,00
Spannung [V]	25,00
Drehmoment [Nm]	22,00
Drehzahl [1/min]	115,00

zugeführte Leistung [W]	917,00
abgegebene Leistung [W]	265,00
Wirkungsgrad	0,28



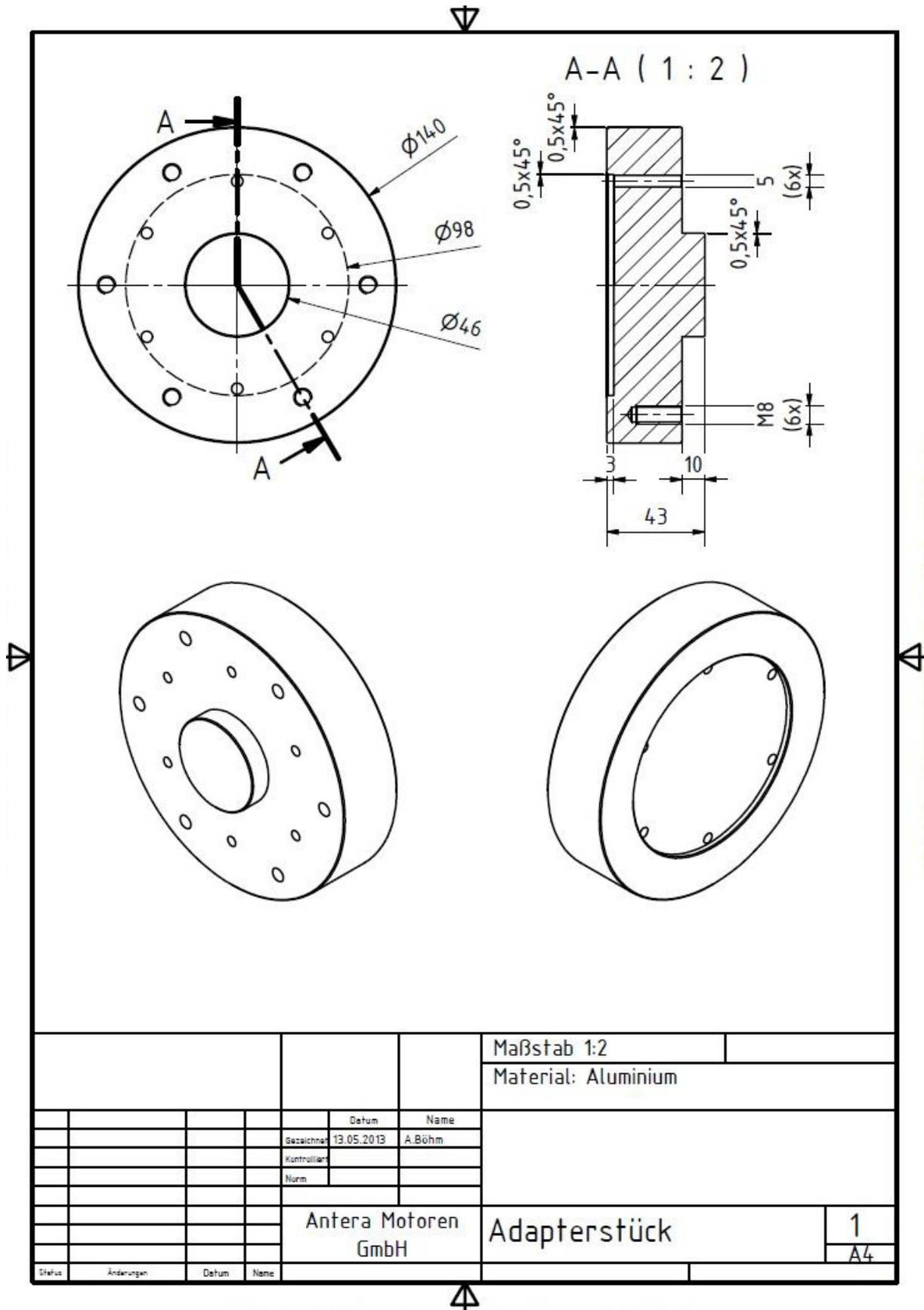
Strom	Spannung	Drehmoment	Drehzahl
0,478354	25.441.900	0,548424	0,628607
26.293.046	24.234.814	19.805.861	21.389.215
27.159.268	23.545.954	19.169.041	37.378.360
28.057.337	23.798.747	20.735.618	39.590.297
28.133.768	23.267.882	21.003.083	46.447.302
30.229.261	23.628.112	20.506.363	50.649.982
28.866.235	23.217.323	20.047.853	48.153.653
30.337.539	23.406.918	21.041.292	50.302.392
29.694.242	23.299.481	21.270.547	48.153.653
28.471.340	23.533.314	20.149.744	42.939.802
28.343.954	23.798.747	15.246.230	26.223.878
25.095.621	23.571.233	14.711.301	26.160.679
25.968.213	23.267.882	15.755.686	26.192.279
26.681.572	23.558.594	18.379.384	11.814.688
25.630.641	23.621.792	20.226.162	17.249.733
25.904.520	23.337.400	18.137.393	17.249.733
26.407.693	23.362.679	17.182.163	19.398.472
26.566.925	23.135.166	18.417.594	22.210.792
27.114.683	23.811.386	19.309.142	22.684.779
27.445.886	23.293.161	17.806.246	24.391.130
27.382.193	23.343.720	16.812.807	25.686.693
27.248.438	23.362.679	19.500.188	28.467.414
27.923.582	23.590.193	19.423.769	31.469.328
28.025.490	23.489.076	19.016.204	31.500.927
27.649.703	23.564.913	20.608.254	35.134.824
27.681.549	23.122.526	17.564.255	35.356.018
28.025.490	23.229.963	19.742.179	38.421.130
28.974.513	23.179.404	19.258.196	40.633.067
28.980.882	23.090.927	20.722.882	40.917.459
29.254.761	23.564.913	18.621.376	43.413.788
29.477.686	23.558.594	21.206.865	46.415.703
29.630.549	23.444.837	20.111.535	47.553.270
31.095.483	22.977.170	20.200.690	47.869.261
30.140.091	23.350.040	20.633.727	50.902.775
31.356.624	23.489.076	20.442.681	51.313.563
32.305.646	22.983.490	21.168.656	53.051.514
31.267.454	23.969.382	20.952.137	55.832.234
31.923.490	24.083.139	20.684.673	58.075.770
32.452.140	22.812.855	19.844.070	58.138.969
32.726.019	23.109.886	21.474.330	61.330.478
33.146.391	22.970.850	21.512.539	62.373.248
32.401.186	23.078.287	20.786.564	63.321.221
33.006.267	22.970.850	21.346.966	65.059.172
33.305.623	23.008.769	20.608.254	66.481.131
34.375.662	23.173.085	21.474.330	67.997.888

34.343.816	24.222.175	20.786.564	70.020.230
34.566.741	22.711.738	21.550.748	72.390.163
34.649.541	24.215.855	20.850.246	72.421.762
36.025.306	23.356.359	21.614.430	75.076.086
34.993.483	22.623.260	20.913.928	76.561.244
35.331.054	22.812.855	21.614.430	77.951.604
34.866.097	23.912.503	21.130.447	80.258.339
35.713.211	22.597.981	21.907.367	82.249.082
34.878.835	23.830.346	21.830.949	85.156.199
35.197.299	22.781.256	21.308.756	87.336.537
34.356.555	23.027.729	21.665.376	88.568.902
34.993.483	23.021.409	20.595.518	89.327.280
34.286.492	22.958.211	21.499.802	89.358.880
34.006.244	23.729.229	20.862.982	92.518.789
33.388.424	22.711.738	20.888.455	94.920.321
33.840.643	22.844.454	20.098.798	94.161.943
33.273.777	22.819.175	20.328.054	97.385.051
32.745.127	22.970.850	20.710.146	100.766.155
32.560.418	23.331.080	20.378.999	100.513.362
33.159.130	22.920.292	19.996.907	101.240.141
31.636.872	23.223.643	20.315.317	103.420.479
31.452.163	23.116.206	20.506.363	104.431.650
30.840.712	22.926.612	20.009.644	106.327.596
31.165.545	23.653.391	19.767.652	109.519.105
30.140.091	22.951.891	19.640.288	110.846.267
30.764.281	22.787.576	19.538.397	111.952.236
29.904.428	23.015.089	19.309.142	114.353.768
29.668.764	23.305.801	19.118.096	116.376.110
29.191.068	23.116.206	19.067.150	116.660.502
29.222.915	23.267.882	18.876.104	119.283.227
28.936.297	23.609.152	18.748.740	121.337.169
28.101.922	23.065.648	18.736.004	121.179.173
27.063.729	23.280.522	18.544.958	123.075.119
28.063.706	23.128.846	18.010.029	125.539.849
28.178.353	22.958.211	17.882.665	126.645.817
27.101.945	23.141.485	18.048.238	130.374.511
26.318.523	23.463.796	17.729.828	131.512.079
26.713.419	23.520.675	17.666.146	130.911.696
26.095.598	23.053.008	17.284.054	132.681.246
26.687.941	24.083.139	17.080.272	137.136.719
25.465.040	23.198.364	17.258.581	137.831.899
25.592.425	24.443.368	16.927.435	138.084.692
25.662.487	23.735.549	16.596.288	140.075.435
24.904.543	23.982.022	17.042.062	142.792.958
25.127.468	23.861.945	16.723.652	142.792.958
25.554.210	23.684.990	16.405.242	145.226.088

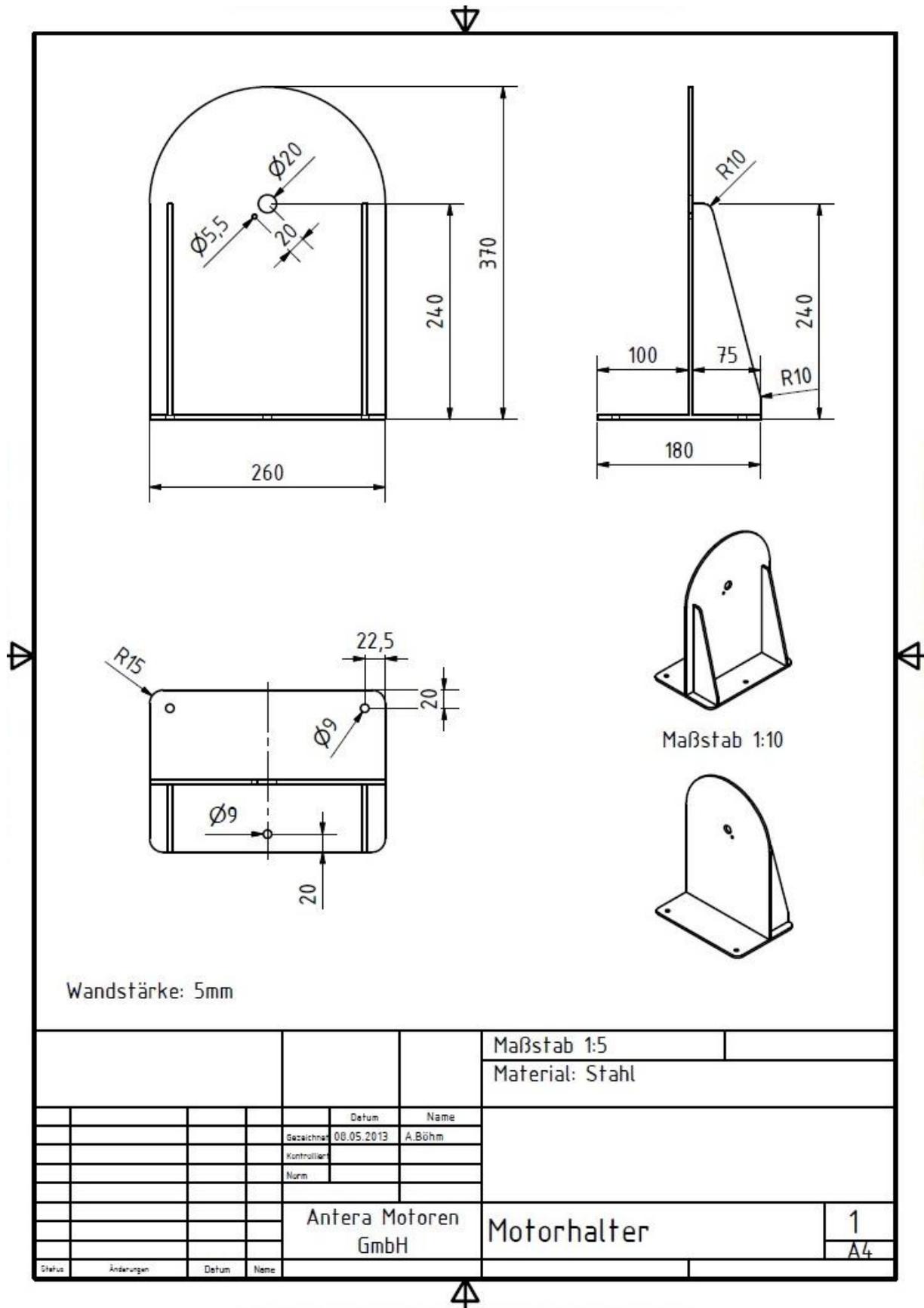
24.560.602	23.691.310	16.596.288	146.395.255
23.993.736	23.274.202	16.341.560	146.900.841
23.770.811	23.735.549	16.277.878	152.525.480
23.095.667	23.368.999	16.074.096	149.333.971
23.337.700	24.190.576	16.086.832	154.895.413
22.910.958	23.855.625	15.666.531	153.852.643
23.082.929	23.647.071	15.692.004	157.865.728
23.165.730	23.792.427	15.462.749	157.075.751
22.547.909	24.399.130	15.373.594	160.994.039
22.936.435	24.209.535	15.360.858	164.153.949
21.433.285	23.710.269	15.067.920	161.025.638
21.942.828	23.489.076	15.016.975	166.018.296
22.070.213	23.672.350	14.851.402	168.514.625
21.649.841	23.255.242	14.634.883	166.239.490
21.668.949	24.215.855	14.532.992	169.494.197
20.688.080	23.508.035	14.469.310	174.802.846
21.981.043	23.741.868	14.392.891	174.044.467
21.063.867	23.684.990	14.036.272	173.096.494
20.426.939	24.038.900	13.870.699	176.035.211
20.420.570	23.621.792	13.959.854	177.393.972
19.961.982	23.792.427	13.845.226	181.881.044
20.000.197	24.493.927	13.666.916	184.503.770
19.923.766	23.912.503	13.539.552	182.607.824
19.490.655	24.203.215	13.361.243	186.810.504
19.656.256	23.678.670	13.030.096	187.726.878
19.592.563	23.754.508	13.068.306	187.474.085
19.254.992	23.748.188	12.877.260	188.832.846
19.083.021	24.449.688	12.673.477	190.918.387
18.675.387	24.190.576	12.507.904	190.065.211
18.114.891	23.748.188	12.380.540	192.087.554
18.662.649	23.754.508	12.240.440	196.258.635
19.038.436	24.348.571	12.367.804	197.996.585
18.133.998	23.666.031	12.253.176	201.472.486
18.159.475	23.792.427	12.011.184	202.483.657
17.299.623	24.468.648	11.756.456	199.955.729
18.140.368	23.659.711	11.794.666	203.937.216
17.229.561	23.874.585	11.603.620	207.097.126
16.739.126	24.026.260	11.361.628	206.844.333
17.618.087	24.392.810	11.412.574	209.688.252
17.006.636	23.830.346	11.272.473	211.994.987
16.452.508	23.975.702	10.966.800	211.236.608
16.777.342	24.070.499	11.145.109	216.387.261
16.140.414	24.190.576	10.686.599	214.206.924
16.095.829	23.925.143	10.750.281	221.601.113
16.395.185	24.449.688	10.597.444	218.378.005
15.917.489	24.354.891	10.533.762	221.885.505

16.146.783	24.070.499	10.304.507	223.275.865
15.987.551	24.424.409	10.329.980	222.169.897
15.898.381	24.146.337	10.228.088	229.469.289
16.127.675	24.386.490	10.037.042	230.164.469
15.509.855	23.988.341	9.986.097	227.036.158
14.993.943	23.950.422	9.845.996	234.714.739
15.783.734	24.190.576	9.744.105	234.967.532
14.407.970	24.279.053	9.425.695	231.460.032
14.204.153	24.076.819	9.298.331	233.987.960
14.548.094	24.405.449	9.323.804	236.895.077
14.490.770	24.563.445	9.298.331	238.411.834
14.204.153	23.988.341	9.120.022	240.781.767
13.936.643	24.234.814	8.979.921	247.133.186
13.923.904	24.146.337	8.979.921	246.880.393
13.802.888	24.323.292	8.814.348	245.869.222
13.624.548	24.177.936	8.623.302	247.891.564
13.783.780	24.184.256	8.636.038	247.859.965
13.548.117	24.272.733	8.381.310	249.629.515
12.783.803	24.266.413	8.075.637	250.861.880
13.076.790	24.424.409	8.228.474	251.999.447
14.153.198	24.689.841	8.253.946	257.371.294
12.841.127	24.209.535	8.011.955	262.174.357
12.802.911	24.222.175	7.922.800	256.612.916
13.165.960	24.538.166	7.897.327	259.362.037
12.369.800	24.140.017	7.769.963	262.932.736
11.834.780	24.298.013	7.362.398	263.564.718
12.968.512	24.582.404	7.719.018	267.483.006
12.229.676	24.323.292	7.413.344	266.471.835
12.503.555	24.437.049	7.362.398	272.128.074
11.618.225	24.367.531	7.056.725	267.956.993
11.497.209	24.228.495	7.094.934	276.931.137
11.624.594	24.279.053	6.878.415	273.771.227
11.783.826	24.272.733	6.903.888	274.150.416
11.580.009	24.140.017	6.878.415	281.765.799
11.898.473	24.437.049	6.738.315	279.743.457

# Anlage 6: Technische Zeichnung – Adapter



# Anlage 7: Technische Zeichnung – Motorhalter



## **Anlage 8: CD**

- Literatur
- Technische Dokumente der Einzelteile
- Prüfstandprogrammierung in LabVIEW
- Bilder des Prüfstandes