



TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ

Fakultät für Elektro- und Informationstechnik

Professur für Mikrosystem- und Gerätetechnik

# Projektarbeit

im Bachelorstudiengang Mikrotechnik / Mechatronik

zum Thema

Entwurf, Aufbau und Test eines Versuchsstandes zur Untersuchung  
von Magnetkupplungen

Sebastian Weidlich

209197

Chemnitz, 09. Juli 2011

**verantwortlicher Hochschullehrer:** Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jan Mehner

**Betreuer:** Dipl.-Ing. Christian Auerswald

Tag der Ausgabe: 28.03.2011

Abgabetermin: 29.07.2011

Tag der Abgabe: 29.07.2011



TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
CHEMNITZ

## **Aufgabenstellung**

zur

Projektarbeit  
im Bachelorstudiengang Mikrotechnik / Mechatronik

für

**Herrn Sebastian Weidlich**  
**geb. am 03.08.1988**

zum Thema

**Entwurf, Aufbau und Test eines Versuchsstandes zur Untersuchung von  
Magnetkupplungen**

Verantwortlicher Hochschullehrer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jan Mehner

Betreuer: Dipl.-Ing Christian Auerswald

Tag der Ausgabe: 28.03.2011

Abgabetermin: 29.07.2011

Tag der Abgabe: 29.07.2011

## Entwurf, Aufbau und Test eines Versuchsstandes zur Untersuchung von Magnetkupplungen

In der Gerätetechnik spielen schaltbare und nichtschaltbare Kupplungen sowie Bremsen nach wie vor eine nicht zu unterschätzende Rolle.

Im Rahmen dieser Projektarbeit soll ein Versuchsaufbau entstehen, mithilfe dessen verschiedene statische und dynamische Parameter einer Magnetkupplung ermittelt werden können. Von besonderem Interesse sind der Einschaltvorgang der Kupplung sowie der Überlastfall.

Der Versuchsaufbau soll einen Motor sowie einen Generator beinhalten. Dazwischen ist die Magnetkupplung angeordnet. Auf geeignete Weise sollen sowohl der An- als auch der Abtrieb drehzahl- und leistungsmäßig an die verwendete Kupplung angepasst werden. Die Messung von Drehmoment und Drehzahl soll auf geeignete Weise (direkt oder indirekt) am Eingang und am Ausgang ermöglicht werden.

Zusammenfassung der Aufgaben:

- Recherche und Auswahl einer geeigneten Kupplung
- Recherche und Auswahl einer geeigneten Antriebs- sowie Bremseinheit
- Berechnung, Konstruktion und Dokumentation des Versuchsaufbaus
- Realisierung einer Drehzahl- und Drehmomentmessung direkt oder indirekt
- Testmessungen an geeigneten Arbeitspunkten

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>iii</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Gleichstrommaschine .....</b>	<b>2</b>
2.1 Gleichstrommotor.....	2
2.1.1 Aufbau .....	2
2.1.2 Funktionsweise .....	4
2.1.3 Betriebseigenschaften .....	6
2.2 Gleichstromgenerator.....	7
<b>3 Riementrieb.....</b>	<b>8</b>
<b>4 Kupplung .....</b>	<b>9</b>
4.1 Aufgabe.....	9
4.2 Ausführungsformen .....	9
4.3 Elektromagnetische Kupplung .....	10
4.3.1 Aufbau und Funktionsweise .....	10
4.3.2 Charakteristische Größen .....	11
<b>5 Entwurf und Auslegung des Versuchsstandes.....</b>	<b>13</b>
5.1 Grundkonzept .....	13
5.2 Leistung am Gleichstrommotor .....	15
5.3 Auslegung des Riemengetriebes .....	16
5.4 Auslegung der Wellen .....	18
5.4.1 Fall 1: Kupplung ist geöffnet.....	18
5.4.2 Fall 2: Kupplung ist geschlossen.....	19
5.5 Lagerberechnung .....	24
5.6 Auslegung der Zusatzmasse und Berechnung der Durchbiegung der Welle .....	24
5.7 Auslegung der Kupplung .....	26
<b>6 Praktische Versuchsergebnisse.....</b>	<b>27</b>
6.1 Aufnahme Motorkennwerte .....	27
6.2 Aufnahme von Kennwerten im Betrieb.....	30

<b>7. Ausblick .....</b>	<b>33</b>
<b>8. Zusammenfassung .....</b>	<b>34</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>36</b>
<b>Diagrammverzeichnis .....</b>	<b>37</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>38</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>39</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>40</b>

# Abkürzungsverzeichnis

## Lateinische Buchstaben

Zeichen	Bedeutung
$A_S$	Riemenquerschnitt
$b$	Breite
$B$	Magnetfeld
$c_{0r}$	statische Tragzahl
$c_M$	Maschinenkonstante
$c_r$	dynamische Tragzahl
$d_a$	Teilkreisdurchmesser/Wirkdurchmesser
$d_W$	Durchmesser der Welle
$e$	tatsächlicher Wellenabstand
$E$	Elastizitätsmodul
$f_z$	Faktor für Rillenkugellager
$F$	Kraft
$F_1, F_2$	Trumkräfte
$F_N$	Normalkraft
$F_r$	Radialkraft
$F_R$	Reibkraft
$F_t, F_u$	Tangentialkraft/Umfangskraft
$F_w$	Wellenbelastung im Betriebszustand
$F_{w0}$	Wellenbelastung im Stillstand
$F_z$	Zentrifugalkraft/Fliehkraft
$i$	Drehzahl
$i_A$	Ankerstrom
$i_e$	Erregerstrom
$I$	Strom, Flächenträgheitsmoment
$J$	Trägheitsmoment
$K_A$	Anwendungsfaktor/Betriebsfaktor
$l$	Länge
$L_{10}, L_{10h}$	Lebensdauer in $10^6$ Umdrehungen bzw. in Stunden
$m$	Trumkraftverhältnis, Masse
$M$	Drehmoment
$M_b$	Biegemoment
$M_i$	Inneres Drehmoment
$M_k$	Kennmoment (von Kupplung oder Motor)
$M_L$	Lastmoment
$M_t$	Torsionsmoment
$n$	Drehzahl
$n_{Rmax}$	maximale Drehzahl des Zahnflachriemens
$N$	Normalkraft/Kraft in x-Richtung
$p$	Polpaarzahl, Riementeilung
$p_L$	Lebensdauerexponent
$P$	Leistung, dynamisch äquivalente Lagerbelastung
$P_0$	statisch äquivalente Last
$P_{el}$	elektrische Leistung
$P_{mech}$	mechanische Leistung
$P_{nenn}$	Nennleistung
$P_{Rmax}$	maximal übertragbare Leistung des Zahnflachriemens
$Q$	Querkraft

$r$	Radius
$R_{eN}$	Streckgrenze
$R_i$	Innenwiderstand
$s$	Seitenlänge, Schlupf
$S_0$	statische Tragsicherheit
$S_D$	Sicherheit gegen Dauerbruch
$S_F$	Sicherheit gegen Fließen
$t$	Verzögerungszeit, Dicke
$u$	Durchbiegung
$U$	Spannung
$U_i$	induzierte Spannung
$U_q$	Quellenspannung
$v$	Geschwindigkeit
$W_b$	Widerstandsmoment gegen Biegung
$W_t$	Widerstandsmoment gegen Torsion
$x$	Verstellweg
$z$	Zähnezahl
$z_e$	Anzahl der im Eingriff befindlichen Zähne des Zahnflachriemens
$z_A$	Gesamtleiterzahl im Anker
$z_R$	Zähnezahl des Zahnflachriemens

### Griechische Buchstaben

Zeichen	Bedeutung
$\alpha$	Winkelbeschleunigung
$\alpha_k$	Formzahl
$\beta_k$	Umschlingungswinkel
$\eta$	Wirkungsgrad
$\mu$	Reibwert
$\varrho$	Dichte
$\sigma_b$	Biegespannung
$\sigma_V$	Vergleichsspannung
$\sigma_Z$	Zugspannung
$\tau_t$	Torsionsspannung
$\phi$	Erregerfluss
$\omega$	Kreisfrequenz

### Indizes

Index	Bedeutung
$A, B, C$	Kugellager A, B bzw. C
$ertr$	ertragbar
$G$	Generator
$M$	Motor
$max$	maximal
$min$	minimal
$R$	Riemen
$vorh$	vorhanden
$x, y, z$	x-, y-, bzw. z-Richtung



---

# 1 Einleitung

Diese Projektarbeit beschäftigt sich mit dem Entwurf, der Auslegung und der praktischen Versuchsdurchführung eines Motor-Generator-Systems, welches über eine elektromagnetisch betätigte Wellenkupplung miteinander verbunden ist.

Motor-Generator-Systeme wandeln zunächst Energie (z.B. fluidische, thermische oder magnetische Energie) in mechanische Rotationsenergie, welche anschließend im Generator über elektromagnetische Induktion in elektrische Energie umgewandelt wird. Ein Teil der Energie (Leistung) wird dabei in thermische Verlustenergie umgewandelt. Diese Systeme dienen zumeist der Energierückgewinnung. Ein Anwendungsbeispiel hierfür ist die noch in der Entwicklungsphase befindliche Hybridsystemtechnologie KERS (Kinetic Energy Recovery System) in der Automobilindustrie. Hierbei wird die zurückgewonnene Energie in Hochleistungs-Lithium-Ionen-Batterien gespeichert, die bei Bedarf wieder in den Antriebsstrang zurückgeführt werden kann.

Im Versuchsaufbau liefert ein Gleichstrommotor die Antriebsleistung, die über einen Riemen auf eine Welle übertragen wird. Die beiden Riemenscheiben haben ein Durchmesser-Verhältnis von 1:3, wodurch sich eine Übersetzung ins Langsame ergibt. Die Welle ist über Kugellager gelagert, die in Lagerblöcken eingepresst sind. Zwischen dem ersten und zweiten Lagerblock ist die Welle geteilt (Primär- und Sekundärwelle). Dort befindet sich eine elektromagnetische Kupplung. Weiterhin befindet sich auf der Sekundärwelle eine Befestigungsmöglichkeit, um zusätzliche Massekörper als Schwungmasse anbringen zu können, bzw. um das Trägheitsmoment der Welle variieren zu können. Dabei wurde auf eine einfache und sichere Befestigung der Masseelemente geachtet. In umgekehrter Weise wird über einen zweiten Riemen das Drehmoment zu einer Gleichstrommaschine gleicher Bauart übertragen, die als Generator betrieben wird. An den Wellenenden der Gleichstrommaschinen befindet sich jeweils eine mit Magneten beklebte Scheibe zur Drehzahlmessung mittels Hall-Sensoren.

Aus Sicherheitsgründen wurde um den Versuchsaufbau ein Kasten aus transparentem Acrylglas gebaut, der über einen Deckel komplett verschlossen werden kann.

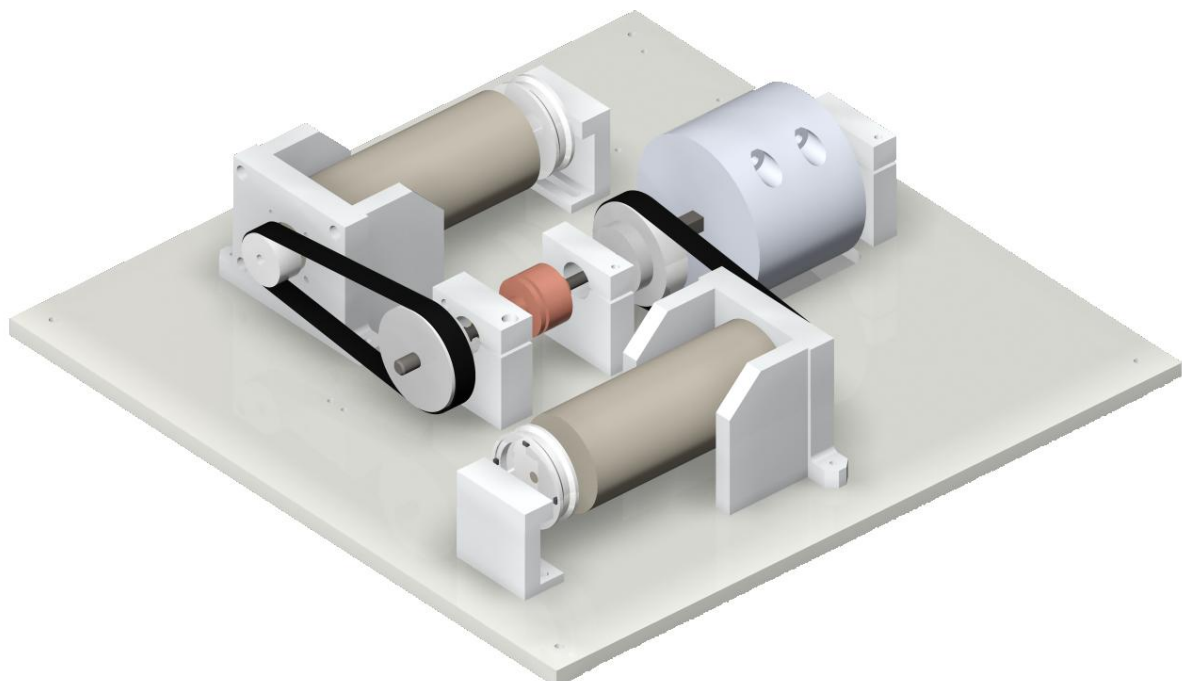


Abb. 01: Aufbau des Versuchstandes

## 2 Gleichstrommaschine

### 2.1 Gleichstrommotor

Gleichstrommaschinen können je nach Anwendungsfall als Generator oder Motor betrieben werden.

Gleichstrommotoren gehören auch heute noch zu den am weitesten verbreiteten Antriebselementen in der Gerätetechnik. Dies liegt in ihren positiven Betriebseigenschaften begründet, wie zum Beispiel dem guten Anlaufverhalten und der guten Regelbarkeit, aufgrund der Möglichkeit der getrennten Steuerung des Stromes sowohl durch die Ankerwicklung als auch durch die Rotorwicklung. Ein weiterer Vorteil ist der hohe stellbare Drehzahlbereich. Hinzu kommt die weitgehende strukturelle und funktionelle Anpassung der Motoreigenschaften an einen vorgegebenen Anwendungsfall.

#### 2.1.1 Aufbau

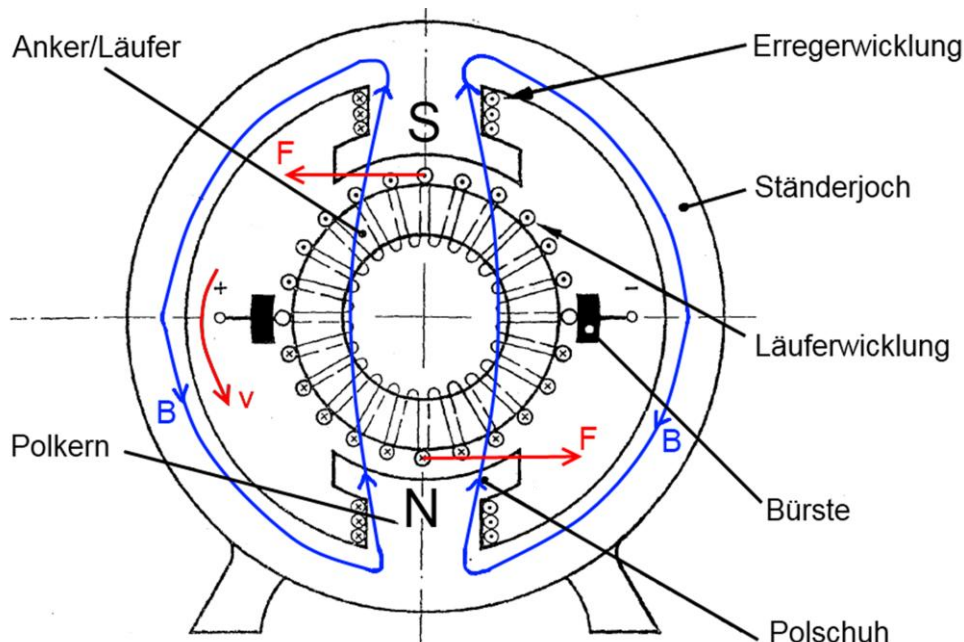


Abb. 02: Aufbau eines Gleichstrommotors nach [Ilea11]

Jeder Gleichstrommotor ist aus drei grundlegenden Bauteilen aufgebaut: einem äußeren unbeweglichen Teil, dem *Stator*, einem im Inneren befindlichen, beweglich gelagerten *Rotor*, auch Anker genannt, und dem dazwischen befindlichen *Kommutator* (Polwender).

Der Stator, auch Ständer genannt, besteht aus den feststehenden Komponenten Joch, Polkernen (Hauptpole) und Polschuhen, sowie der Erregerwicklung. Je nach Motortyp werden anstatt der Erregerwicklung auch Dauermagnete verwendet. Das Joch besteht zumeist aus massivem Eisen. Da sich die Pole im äußeren Bereich des Gleichstrommotors befinden, bildet dieser ein sog. Außenpolssystem und wird daher auch oft als Außenpolmaschine bezeichnet.

Auf dem Rotor, auch Läufer genannt, sitzt die Läuferwicklung. Der Rotor ist aus lamellierten Blechen aufgebaut (und ebenso die Polschuhe), da sonst durch die auftretenden Ummagnetisierungen (schnelle örtliche Magnetflusswechsel) große Wirbelstromverluste auftreten würden.

Der Kommutator, auch Kollektor genannt, besteht aus den Kommutatorlamellen und bildet über die Kohlebürsten, die i.d.R. aus gesintertem Graphit gefertigt sind, die Verbindung zwischen Rotor und Stator. Daher wird der Gleichstrommotor auch oft als Gleichstrom-Kommutatormotor bezeichnet.

### **Elektrisch erregte Reihenschlussmaschine (auch Hauptschlussmaschine)**

Das Magnetfeld des Stators wird durch einen Elektromagneten erzeugt, Erregerwicklung und Ankerwicklung sind in Reihe geschaltet. Die Besonderheit dieser Maschine ist zum einen das sehr große Anlaufmoment und zum anderen das stark von der Drehzahl abhängige Drehmoment, das sog. Reihenschlussverhalten. Reihenschlussmaschinen dürfen nie ohne Last betrieben werden, da sich im Leerlauf extrem hohe Drehzahlen ergeben würden (siehe Abb. 05). Daher verbietet sich die Verbindung mit einem Riemen.

Die Reihenschlussmaschine wird, aufgrund des hohen Anlaufmomentes, nur in Sonderfällen als Generator betrieben. Wird eine Reihenschlussmaschine als Generator betrieben, so muss die Erregerwicklung umgepolt werden, da sonst der durch die Feldwicklung fließende Strom das Erregerfeld aufheben würde.

### **Elektrisch erregte Nebenschlussmaschine**

Im Gegensatz zur Reihenschlussmaschine sind bei der Nebenschlussmaschine Erregerwicklung und Ankerwicklung parallel geschaltet. Die Eigenschaft dieser Maschine ist die drehmomentenunabhängige und zur Versorgungsspannung proportional einstellbare Drehzahl. Das maximal erreichbare Drehmoment wird durch den zulässigen Ankerstrom begrenzt.

Möchte man eine Nebenschlussmaschine als Generator betreiben, so muss eine Restmagnetisierung oder eine Hilfsspannungsquelle dafür sorgen, dass beim Starten des Bremsvorganges eine Erregung vorhanden ist.

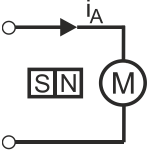
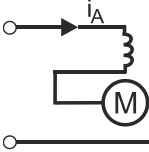
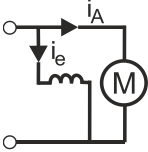
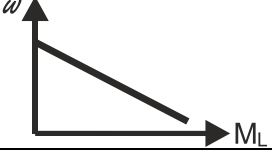
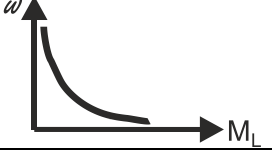
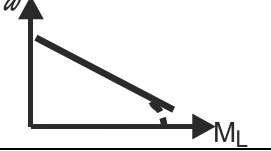
### **Permanenterregte Gleichstrommaschine**

Die permanenterregte Gleichstrommaschine ist ein Sonderfall der elektrisch erregten Nebenschlussmaschine, da hier das Magnetfeld des Stators durch Permanentmagnete erzeugt wird. Das hat den Vorteil, dass zur Magnetfelderzeugung keine elektrische Energie benötigt wird, wodurch sich vor allem bei Maschinen mit kleiner Gesamtleistung der Wirkungsgrad verbessert. Nachteilig ist jedoch der sich durch das unveränderbare Magnetfeld ergebene kleine Drehzahlbereich.

Im Versuchsaufbau werden zwei permanenterregte Gleichstrommaschinen mit Nebenschlusscharakteristik verwendet.

### **Elektrisch fremderregte Maschine**

Im Unterschied zur Nebenschluss- und Reihenschlussmaschine werden bei der elektrisch fremderregten Maschine die Erreger- und Ankerwicklung aus verschiedenen Spannungsquellen gespeist. So ergibt sich durch Verringerung des Erregerstromes (Feldschwächung) und/oder Steigerung der Ankerspannung eine Erhöhung der Drehzahl.

<b>Bezeichnung</b>	<b>Permanentmagnetmotor</b>	<b>Reihenschlussmotor</b>	<b>Nebenschlussmotor</b>
<b>Erregungsart</b>	permanentmagnetisch	elektrisch	elektrisch
<b>Schaltung und Schaltbild</b>			
<b>Kennlinie <math>\omega(M)</math></b>			
<b>Merkmale</b>	keine Erregerverluste; hoher Wirkungsgrad	Erregerverluste lastab- hängig; Drehzahl stark lastab- hängig; Belastungsmoment nicht unter $M_{Lmin}$	Erregerverluste nicht lastabhängig; Drehzahlstellen auch über Erregerfeld

Tab. 01: Eigenschaften von Gleichstrommotoren [Kal91]

### 2.1.2 Funktionsweise

Die Wirkungsweise eines Gleichstrommotors beruht auf der Kraftwirkung, die in einem magnetischen Feld auf stromdurchflossene Leiter ausgeübt wird.

#### Kraftwirkung auf einen Leiter (elektrodynamisches Gesetz)

Auf einen Leiter der Länge  $l$ , der vom Strom  $I$  durchflossen wird und sich in einem Magnetfeld  $\vec{B}$  befindet, wirkt eine Kraft  $\vec{F}$ , die sich zu

$$\vec{F} = I \cdot (\vec{l} \times \vec{B}) \quad (01)$$

berechnet. Dabei zeigt der Vektor  $l$  in Richtung des Stromes  $I$ . Werden mehrere Leiter als Spule ausgebildet und drehbar angeordnet, so erhält man damit einen Motor.

Fließt durch die Erregerwicklung ein Gleichstrom, so entsteht der Erregerfluss  $\phi$ . Dieser wird durch die Polschuhe zum Läufer geleitet, wo er im Bereich des Luftspaltes die konstante Induktion  $B$  hervorruft.

#### Induktionsgesetz der Bewegung

Bewegt sich ein Leiter der Länge  $l$  mit der Geschwindigkeit  $\vec{v}$  in einem Magnetfeld  $\vec{B}$ , so wird in ihm eine Spannung  $U_i$  induziert. Diese ergibt sich zu:

$$U_i = \int_l (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{s} \quad (02)$$

Über die Kohlebürsten wird der im Anker befindlichen Spule der Ankerstrom  $I_A$  zugeführt. Es entsteht ein auf den Anker wirkendes Drehmoment der Größe [Böhm89]:

$$M_i = c_{M1} \cdot \phi \cdot I_A \quad (03)$$

$c_{M1}$  ist die Maschinenkonstante. Sie wird ermittelt aus der Polpaarzahl  $p$  und der Gesamtleiterzahl  $z_A$  im Anker:

$$c_{M1} = \frac{c_{M2}}{2 \cdot \pi} \quad (04)$$

$$\text{und} \quad c_{M2} = z_A \cdot p \quad (05)$$

Beginnt der Anker zu rotieren, so wird in der Ankerwicklung eine Spannung nach Gleichung (02) induziert. Die dadurch am Anker anliegende Quellenspannung  $U_q$  beträgt:

$$U_q = c_{M2} \cdot \phi \cdot \omega \quad (06)$$

$$\text{mit} \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot n \quad (07)$$

$n$  ist die Drehzahl des Läufers.

Das elektrodynamische Gesetz besagt, dass der stromdurchflossene Leiter immer nur *quer* zur Richtung des magnetischen Feldes abgelenkt werden kann. Bewegt sich der Leiter jedoch zwangsweise längs des magnetischen Feldes, nämlich in der neutralen Zone, so kann in Bewegungsrichtung des Leiters keine Kraft mehr wirksam werden. Deshalb wird in dieser Lage des Leiters am Kommutator der Strom gewendet, damit die Richtung der Kraft  $F$ , die den Leiter antreibt, mit der Drehrichtung des Rotors übereinstimmt.

In Abb. 03 ist der Drehmomentenverlauf in Abhängigkeit des Drehwinkels  $\varphi$  für einen zweipolpaarigen Läufer dargestellt. In diesen Läufern sind die Leiterschleifen um  $90^\circ$  versetzt und so geschaltet, dass sie sich jeweils an den Kreuzungspunkten der Drehmomentenkennlinien abwechseln. Damit wird erreicht, dass der Unterschied zwischen maximalen und minimalen Drehmoment verringert wird (schwarze Linie). Die Gleichmäßigkeit des resultierenden Drehmomentenverlaufes kann durch Erhöhung der Polpaarzahl weiter gesteigert werden.

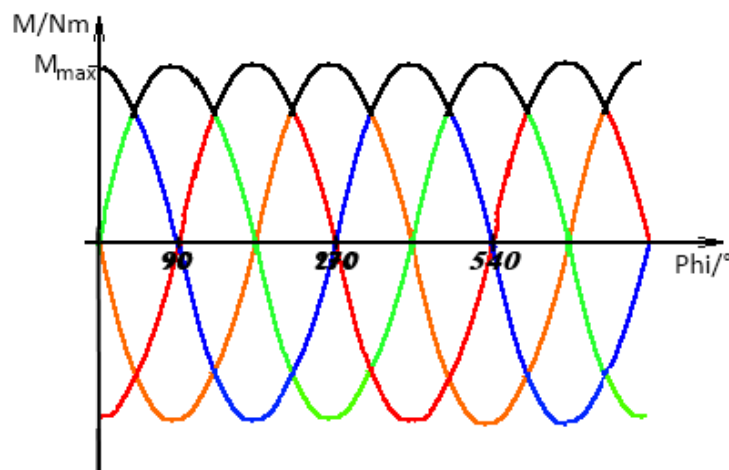


Abb. 03: Drehmomenten-Drehwinkel Verlauf eines zweipolpaarigen Gleichstrommotors

Die Gleichungen (03) und (06) gelten unabhängig von der Art der Erregung der Maschine.

### 2.1.3 Betriebseigenschaften

Die Betriebseigenschaften der Motoren werden durch die bereits beschriebenen physikalischen Eigenschaften bestimmt.

1. Nach Gleichung (03) kann die folgende Proportionalitätsgleichung aufgestellt werden:

$$M_i \sim I_A \cdot \phi \quad (08)$$

2. Bewegt sich ein Leiter mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  in einem Magnetischen Feld  $\phi$  so wird eine Quellenspannung gemäß Gleichung (04) erzeugt. Daraus kann folgende Proportionalitätsgleichung aufgestellt werden:

$$U_q \sim n \cdot \phi \quad (09)$$

3. Für den Ankerkreis kann folgende Gleichung aufgestellt werden:

$$U = U_q \pm I_A \cdot R_i \quad (10)$$

+ bei Motorbetrieb

– bei Generatorbetrieb

$R_i$  ist der gesamte Innenwiderstand des Ankerkreises.

Aus diesen 3 Gleichungen lassen sich zwei charakteristische Betriebsverhalten von Gleichstrommotoren und deren zugehörige Kennlinien  $I_A = f(M)$  und  $n = f(M)$  ableiten.

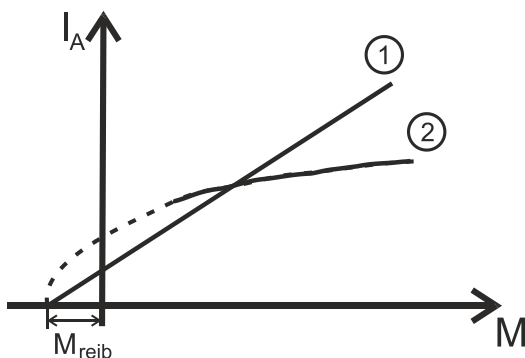


Abb. 04: Kennlinien  $I_A = f(M)$

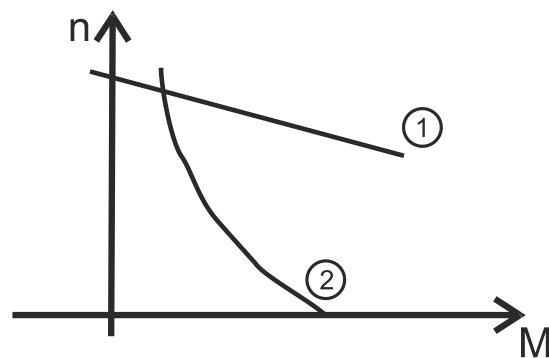


Abb. 05: Kennlinien  $n = f(M)$

① Nebenschlussmaschine, fremderregte Maschine

② Reihenschluss-Maschine

## 2.2 Gleichstromgenerator

Der elektrische Gleichstromgenerator wandelt mittels elektrischer Induktion mechanische Leistung in elektrische Leistung um.

Bei dem Gleichstromgenerator befindet sich die Feldspule bzw. der Dauermagnet am Ständer (Außenpolgenerator), sodass der Strom im Läufer induziert wird. Der so generierte Wechselstrom wird mittels eines Kommutators gleichgerichtet, wodurch man einen pulsierenden Gleichstrom erhält. Um diesen zu glätten, werden auf den Anker mehrere getrennte Wicklungen angebracht, deren Induktionsspannung zeitlich verschoben ihr Maximum erreichen. Die Überlagerung dieser verschiedenen Phasen ergibt einen nur noch leicht schwankenden Gleichstrom.

Das Ständerfeld wird entweder von einer getrennten Gleichstromquelle erregt oder von der Ankerspannung selbst, wobei sich das Feld und die induzierte Spannung gegenseitig verstärken bis der stationäre Betriebspunkt erreicht ist.

### 3 Riementrieb

Riementriebe bestehen aus mindestens zwei Riemscheiben, die durch einen Triebriemen miteinander verbunden sind. Meist werden zusätzliche Vorrichtungen zum Spannen des Riemens benötigt, um die erforderliche Riemen­spannung zu erzeugen.

Riementriebe haben die Aufgabe Leistungen – Drehmoment und Drehzahl – zu übertragen. Dabei ist die Leistungsübertragung über weite Strecken möglich. Zudem kann durch Veränderung des Riemen­scheibendurchmessers die Drehzahl und das Drehmoment variiert werden.

Die Leistungsübertragung erfolgt entweder rein kraftschlüssig (z.B. Flachriemen) oder kraft- und formschlüssig (z.B. Zahnriemen, Keilriemen). Sie ist abhängig von:

- der Vorspannkraft
- der Reibungszahl (abhängig vom Werkstoff und der Oberflächengestalt der Reibpaarung)
- und dem Umschlingungswinkel  $\beta_k$  (abhängig vom Scheibendurchmesser, Achsabstand und den Spannvorrichtungen)

Im Versuchsaufbau wird ein Zahnflachriemen verwendet. Der Vorteil dieser Riemenart ist, dass durch die formschlüssige Leistungsübertragung kein Schlupf auftritt.

Die notwendige Vorspannkraft des Riemens wird durch Verschieben des Motorblocks in einem Langloch der Grundplatte realisiert.

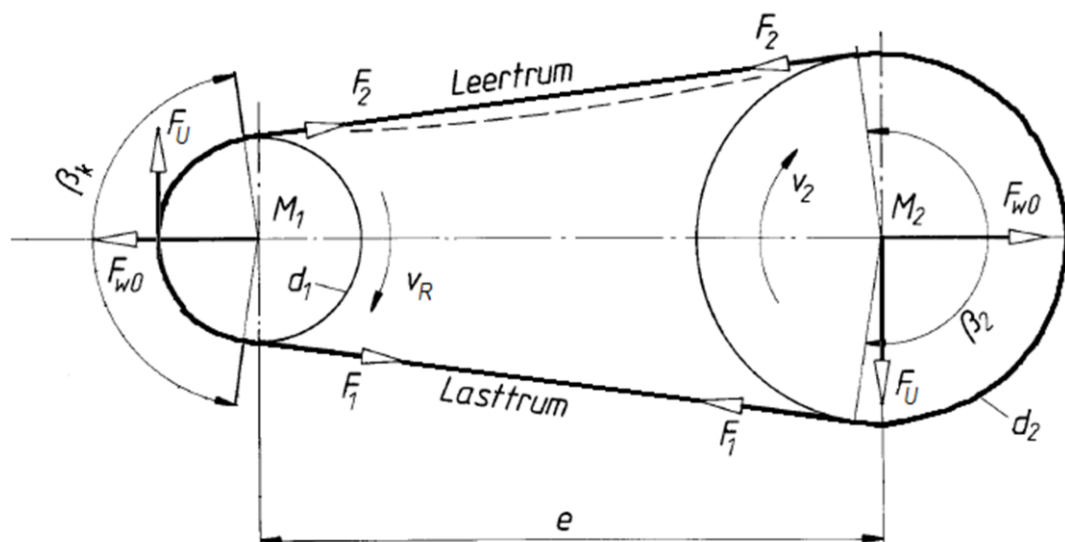


Abb. 06: Winkel und Kräfte an einem Riementrieb [Rol09]

## 4 Kupplung

### 4.1 Aufgabe

Kupplungen besitzen zwei Grundaufgaben. Zum einen stellen sie eine Verbindung von Wellen bzw. verschiedenen Maschinenelementen her und zum anderen haben sie die Aufgabe Leistungen sicher zu übertragen.

Die Übertragung der Kräfte zwischen den zu kuppelnden Bauelementen kann

- formschlüssig (durch Bolzen, Klauen, Verzahnungen, ...)
- kraftschlüssig (durch Schrauben, elastische Federn, ...)
- oder hydrostatisch, hydrodynamisch oder elektromagnetisch (elektrostatistisch bzw. elektrodynamisch)
- stoffschlüssig (durch Verformelemente, z.B. Federn, Gummipuffer, ...)

erfolgen.

Darüber hinaus ergeben sich erweiterte Funktionen, die jedoch zur Erfüllung der Grundfunktionen nicht zwingend erforderlich sind. Eine erweiterte Funktion von Kupplungen ist die Schaltfunktion, die den Leistungsfluss bei Bedarf unterbrechen oder schließen kann. Daher werden Kupplungen auch Wellenschalter genannt. Eine zweite erweiterte Funktion von Kupplungen ist das Ausgleichen eines Wellenversatzes zwischen nahezu fluchtenden Wellenenden, zwischen parallelen oder sich kreuzenden Wellen.

### 4.2 Ausführungsformen

Kupplungen werden in die 2 Hauptgruppen „schaltbare Kupplungen“ und „nicht schaltbare Kupplungen“ unterteilt.

**Nicht schaltbare Kupplungen** können entweder *starr* (z.B. Schalen- oder Scheibenkupplung) oder *elastisch/beweglich* (z.B. Gummifederkupplung) ausgeführt sein. Bewegliche Kupplungen gleichen Längs-, Quer- oder Winkelbewegungen von Wellen aus. Hingegen verbinden starre Kupplungen Wellen ohne mögliche Relativbewegung zueinander.

**Schaltbare Kupplungen** können zum einen *fremdbetätigt* werden, entweder formschlüssig oder kraftschlüssig (z.B. reibschlüssig oder elektromagnetisch), und zum anderen können sie *selbstbetätigt* ausgeführt sein. Letzteres geschieht entweder momentenabhängig (bei Sicherheitskupplungen), drehzahlabhängig (bei Fliehkraftkupplungen) oder richtungsabhängig (bei Freilaufkupplungen). Fremdbetätigte Kupplungen können unterteilt werden in *synchron schaltende* und *asynchron schaltende* Kupplungen. Synchron schaltbare Kupplungen erlauben das Verbinden oder Trennen von Wellen nur im Stillstand oder bei annähernd gleichen Winkelgeschwindigkeiten, wohingegen asynchron schaltbare Kupplungen unabhängig von ihrer Winkelgeschwindigkeit das Verbinden und Trennen ermöglichen.

Kupplungen können sowohl *schließend* (verbindend – Beginn der Leistungsübertragung) als auch *öffnend* (trennend – Unterbrechung des Leistungsflusses) agieren.

Bei schließenden Kupplungen wird durch das Einschalten die erforderliche Anpresskraft erzeugt. Hin- gegen wird ein Öffnen der Kupplung in entgegengesetzter Weise, durch Aufhebung des Kraftschlus- ses realisiert (z.B. Federdruck- oder Permanentmagnet-Systeme).

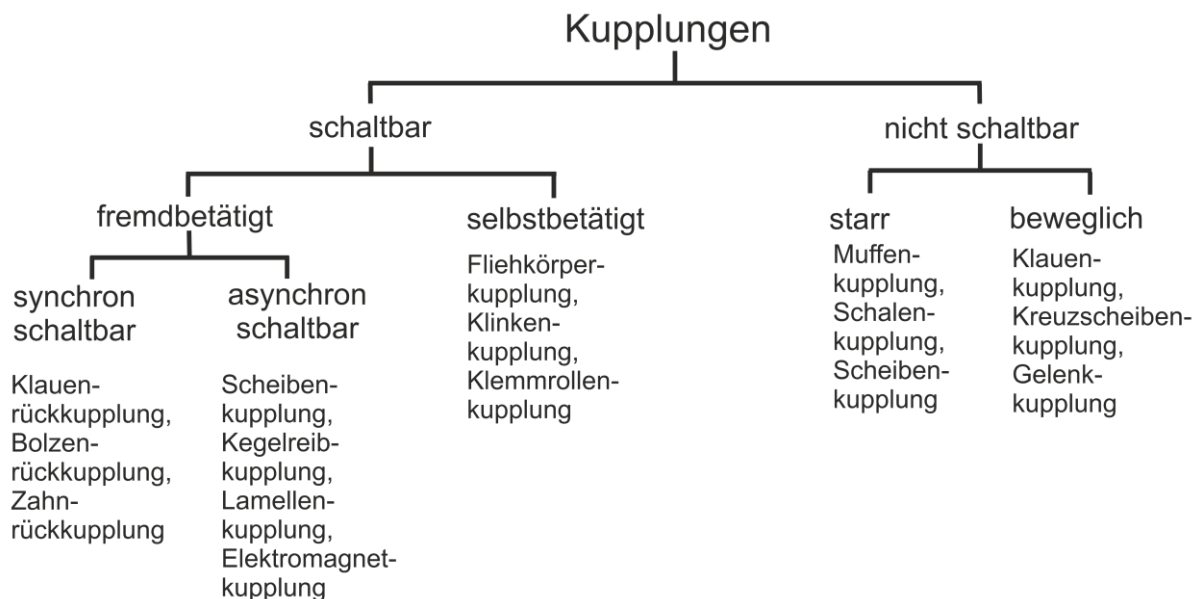


Abb. 07: Übersicht über Kupplungsarten

## 4.3 Elektromagnetische Kupplung

### 4.3.1 Aufbau und Funktionsweise

Im Versuchsaufbau wird eine elektromagnetisch betätigte Wellenkupplung verwendet. Diese Kupp- lung ist eine schaltbare, schließende Einscheibenkupplung, da ein Kraftschluss bei Erregung des elektromagnetischen Systems hergestellt wird.

Die Vorteile elektromagnetischer Kupplungen sind das einfach über die elektrische Spannung zu be- einflussende Schaltverhalten und die vielfältigen Einsatzfelder, nicht zuletzt durch die Möglichkeit der Verwendung dieser Kupplungsart in Kombination mit Bremsen.

Elektromagnetische Kupplungen, auch Magnetkupplungen genannte, bestehen i.d.R. aus vier charak- teristischen Bauteilen [Lin92]:

- aus der *Erregerwicklung*, die die elektrische Energie aufnimmt und das Magnetfeld erzeugt,
- aus dem, in der Regel ortsfesten, *Magnetkörper* der die Erregerwicklung trägt,
- dem beweglich gelagerten *Anker*, der von dem Magnetkörper angezogen wird,
- und aus dem *Polschuh*, jener Teil des Magnetkörpers, der die Aufgabe hat, den magnetischen Fluss in Richtung des Ankers zu lenken

Abbildung 08 verdeutlicht den Aufbau und die Funktionsweise der verwendeten Magnetkupplung: Das feststehende Magnetgehäuse (Stator) enthält die Erregerwicklung (Spule). Der Rotor ist antriebs- seitig über eine Madenschraube (M3) fest mit der Antriebswelle verbunden. Zwischen Stator und Rotor befindet sich ein Gleitlager. Die Stromversorgung erfolgt über freie Drahtenden. Der Magnet-

körper enthält stirnseitig einen Reibbelag, der mit den Polflächen bündig abschließt. Zwischen Rotor und Anker (abtriebsseitig) befindet sich ein Spalt von 0,1mm. Der Anker ist ebenfalls über eine Madschraube mit der Abtriebswelle verbunden. Bei Erregung wird der Anker durch das erzeugte Magnetfeld gegen den Reibbelag gezogen und kraftschlüssig vom Magnetkörper mitgenommen. Bei Abfall des Magnetfeldes sorgt die vorgespannte Feder am Anker für das Ablösen des Ankers von der Reibfläche des Rotors.

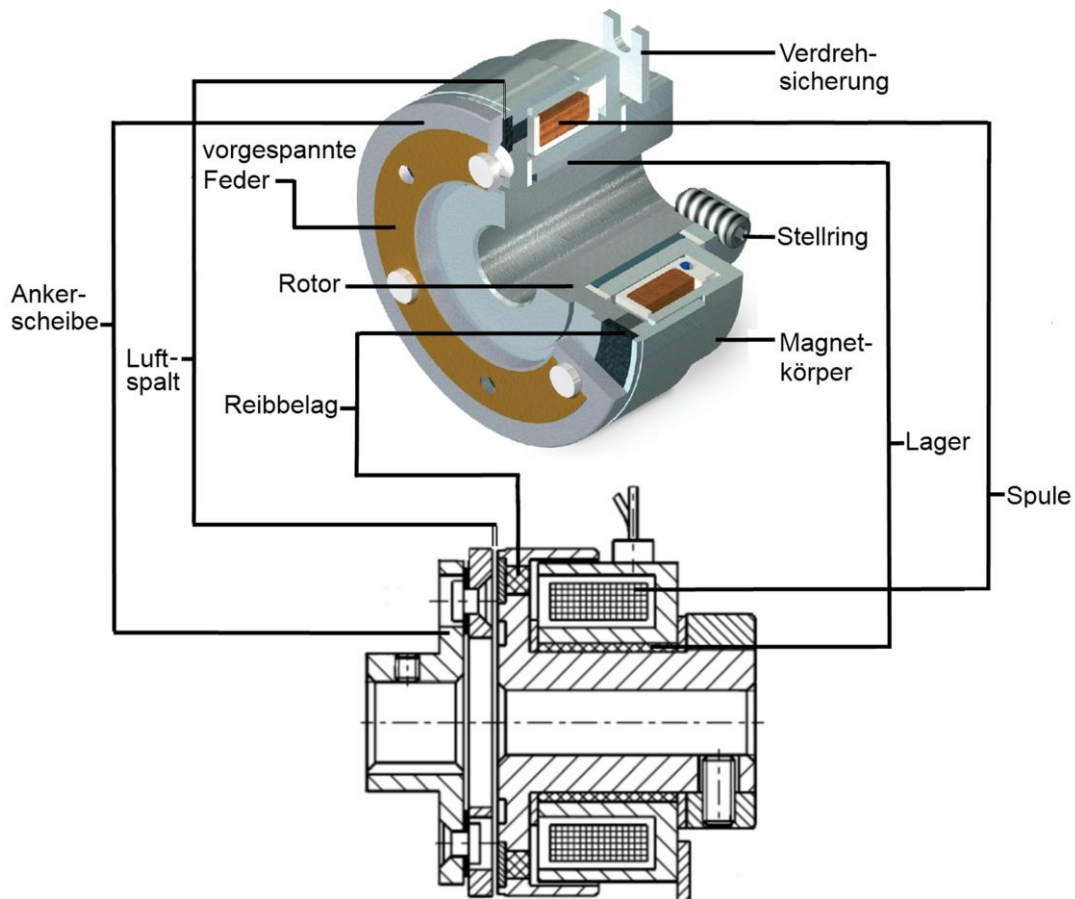


Abb. 08: Aufbau der wellenmontierten Elektromagnetkupplung nach [Mag11]

Die Magnetkupplung wurde in den Versuchsstand so eingebaut, dass die Ankerscheibe mit der Primärwelle verbunden ist, um das Gleitlager im geöffneten Zustand der Kupplung nicht abzunutzen. Zwischen den beiden Kupplungselementen befindet sich ein geforderter Spalt von 0,1mm.

#### 4.3.2 Charakteristische Größen

**Ansprechverzug  $t_{11}$ :** ist die Zeit, die vom Einschalten des Stromes bis zum Beginn der Leistungsübertragung vergeht.

**Anstiegszeit  $t_{12}$ :** ist die Zeit, die vom Beginn der Leistungsübertragung bis zum Erreichen des schaltbaren Nenn Drehmomentes  $0,9M_k$  vergeht.

**Einschaltzeit  $t_1$ :** ist die Summe aus Ansprechverzug und Anstiegszeit.

**Ausschaltzeit  $t_2$ :** ist die Zeit, die vom Ausschalten des Stromes bis zum Abklingen des Drehmoments auf 10% vergeht.

**Kenmoment  $M_K$ :** Moment, mit dem die Kupplung maximal belastbar ist

**Maximale Drehzahl  $n_{max}$ :** Eine Überschreitung der Höchstdrehzahl führt zur Zerstörung der Kupplung

**Thermische Belastung:** Die Kupplung wird u.a. thermisch belastet durch auftretenden Schlupf am Reibbelag, durch Reibung im Gleitlager und durch den fließenden Spulenstrom in der Kupplung

**Zulässige Schalthäufigkeit  $S_{hzul}$ :** maximale Anzahl der Schaltungen pro Zeiteinheit, u.a. abhängig vom Massenträgheitsmoment und der Drehzahl der Kupplungswelle

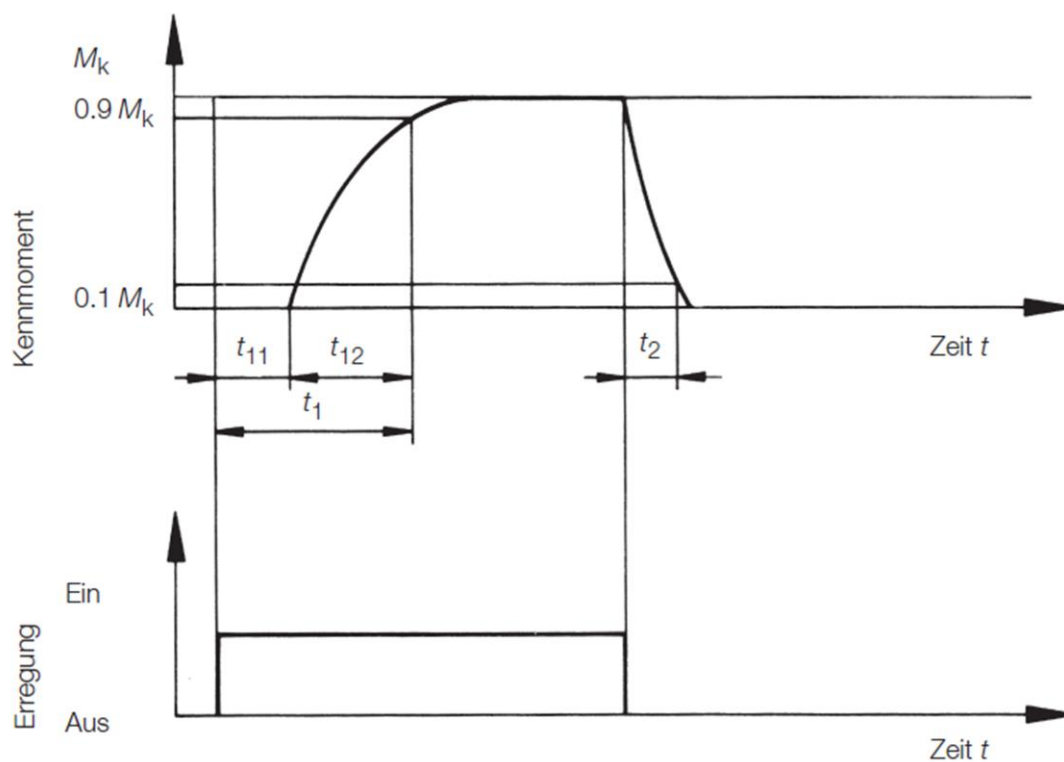


Abb. 09: Schaltzeiten beim Öffnen und Schließen der Magnetkupplung [Mag11]

## 5 Entwurf und Auslegung des Versuchsstandes

### 5.1 Grundkonzept

Gegeben waren zwei baugleiche, permanenterregte Gleichstrommaschinen, nach denen der Versuchsstand dimensioniert werden sollte. Dabei sollte einer als Motor und einer als Generator fungieren. Beide Maschinen wurden gewählt, da sie aus Sicherheitsgründen mit einer Betriebsspannung von nur 24V arbeiten.

Um die Drehzahl und das Drehmoment der beiden Kupplungswellen variieren zu können, wurde ein Zahnflachriemen zur Leistungsübertragung gewählt. Dieser Riemen überträgt die Leistung kraft- und formschlüssig, wodurch kein Schlupf am Riemen entstehen kann, der zu Leistungsverlust führt.

Um eine platzsparende Variante zu schaffen, wurden die beiden Maschinen wechselseitig platziert (siehe Abb. 10).

Zwischen den Maschinen befindet sich eine elektromagnetische Kupplung. Sie wurde für den Praktikumsversuchsstand gewählt, da sie einfach über Spannungsregulation zu öffnen und zu schließen ist. Nach der Berechnung des maximalen Drehmomentes auf der Primärwelle, konnte eine geeignete Kupplung ausgewählt werden. Diese gab den Durchmesser der Primär- und Sekundärwelle vor.

Beide Wellen müssen jeweils mit zwei Wälzlagern gelagert sein, damit ein statisch bestimmtest System für die Nachrechnung der Wellen zu Grunde liegt. Für die Lager wurden Rillenkugellager gewählt, da diese zum einen Axial- und Radialkräfte aufnehmen können und zum anderen kostengünstig zu erwerben sind. Um etwas Freiraum auf der Seite der Primärwelle nach außen zu erlangen, wurde hier eine fliegende Lagerung gewählt (siehe 5.4.1).

Um weitere interessante Messungen am Versuchsstand durchführen zu können, wurde die Möglichkeit geschaffen, auf der Primärwelle eine oder mehrere Schwungmassen befestigen zu können. Diese sollte einfach und sicher zu montieren und zu demontieren sein. Dazu wurde die runde Welle in diesem Bereich auf einen quadratischen Querschnitt umgearbeitet, um auf diese Weise eine formschlüssige Verbindung von Zusatzmasse und Welle zu bekommen. Die Zusatzmasse selbst besteht aus zwei baugleichen Teilen, die über vier Schrauben miteinander verbunden wird.

Nach den Befestigungsmöglichkeiten am Motor wurde die Motorhalterung modelliert. Der Zentrier-ring am Motor sollte dabei passgenau in den Motorblock passen, um eine senkrechte Ausrichtung des Motors zu garantieren. Des Weiteren ist der Motorblock durch das in der Basisplatte befindliche Langloch um einige Zentimeter verschiebbar, um den Riemen zu spannen. Damit werden zusätzliche Riemenspanner, wie z.B. Spannrollen, nicht benötigt.

Alle Bauteile sind auf einer aus Aluminium gefertigten Grundplatte mit Schrauben von unten befestigt. Die meisten Abmessungen der Bauteile wurden nach handhabungstechnischen Gesichtspunkten gewählt. Die technischen Zeichnungen der einzelnen Bauteile sind dem Anhang beigelegt.

Um den Motor mit verschiedenen Lastmomenten belasten zu können, wurde auf der Motorwelle an der Rückseite des Motors eine Seilbremsscheibe befestigt. Zudem dient diese zur Drehzahlmessung – dazu wurden auf die Außenseite der Scheibe vier kleine Magnete im Winkel von 90° geklebt. Ein ge-

genüber, an einer verstellbaren Sensorhalterung, befestigter Hall-Sensor detektiert so die Magnetfeldänderung, die über eine Frequenzmessgerät ausgewertet und in eine Drehzahl umgerechnet werden kann. Auf diese Weise lassen sich sehr einfach und genau über Mittelwertbildung Drehzahlen ermitteln, allerdings nur statisch.

Aus Sicherheitsgründen wurde um den gesamten Versuchsstand ein Kasten mit Deckel aus transparentem Acrylglas gebaut.

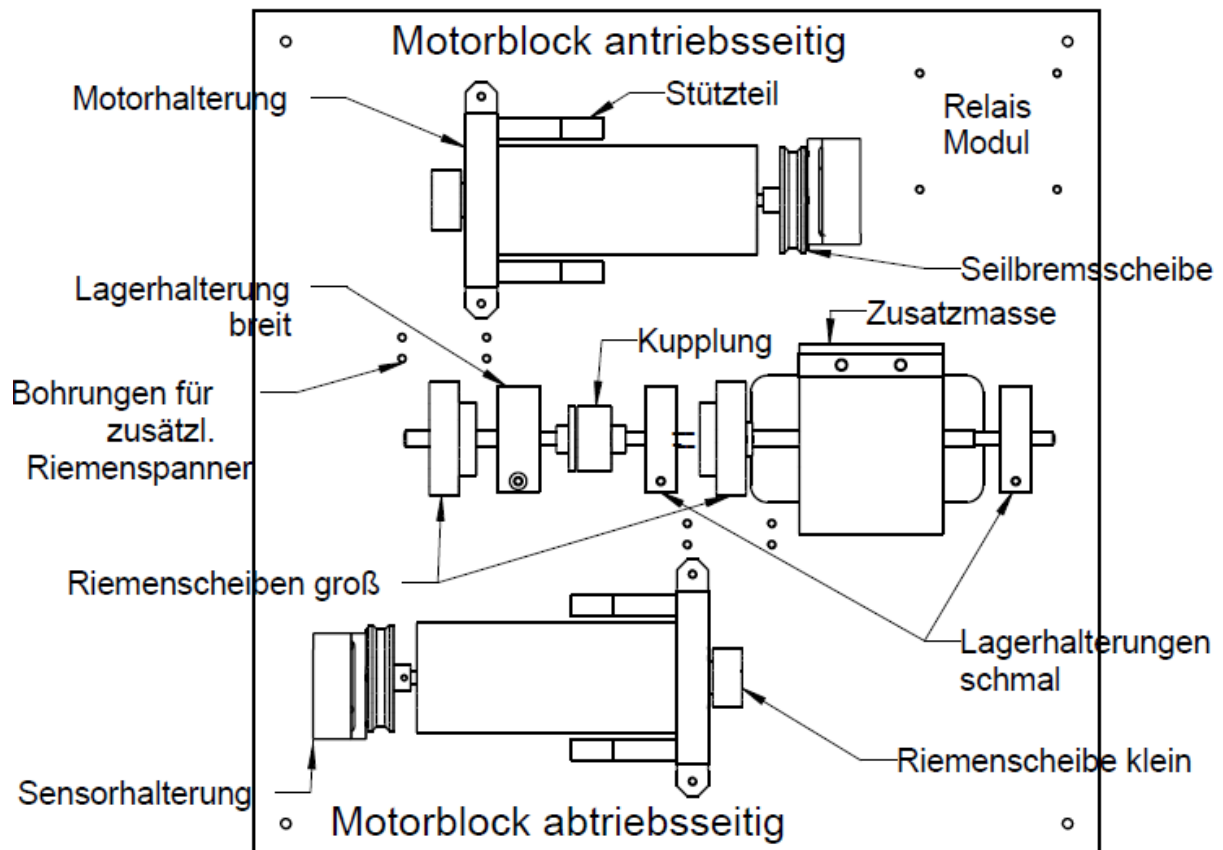


Abb. 10: Draufsicht auf den Praktikumsversuchsstand

## 5.2 Leistung am Gleichstrommotor

Der vorliegende Gleichstrommotor (VEB Elektromaschinenbau Dresden DDR, Typ QMP52/63SL) besitzt folgende Kennwerte:

$$n_{Mot} = n_1 = 4000 \text{min}^{-1}, U = 24V \text{ und } M_n = 15 \text{Ncm}$$

Der Durchmesser der Antriebswelle ist mit  $d_{W_{Mot}} = 6 \text{mm}$  vorgegeben. Es soll eine Übersetzung ins Langsame von  $i = 3$  realisiert werden, um die maximal zulässige Drehzahl der Kupplung von  $1500 \text{min}^{-1}$  nicht zu überschreiben. Das Kennmoment der Kupplung beträgt laut Herstellerangabe:  $M_{k_{Kup}} = 0,6 \text{Nm}$  [Mag11].

Die elektrische Leistung  $P_{el}$  wird in dem Gleichstrommotor unter Verlustleistung in mechanische Leistung umgewandelt. Für die elektrische Leistung bei Gleichstrom gilt:

$$P_{el} = U \cdot I \quad (11)$$

Die mechanische Leistung  $P_{mech}$  bei rotatorischer Bewegung ergibt sich zu:

$$P_{mech} = M \cdot 2\pi \cdot n \quad (12)$$

Das Drehmoment für eine am Punkt  $r$  angreifende Kraft  $F$  ergibt sich zu:

$$M = F \cdot r = F \cdot \frac{d}{2} \quad (13)$$

Aus dem Verhältnis  $P_{mech} : P_{el}$  bzw.  $P_{el} : P_{mech}$  kann der Wirkungsgrad  $\eta$  errechnet:

○ motorischer Betrieb: 
$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_{el}} \quad (14)$$

○ generatorischer Betrieb: 
$$\eta = \frac{P_{el}}{P_{mech}} \quad (15)$$

Es gilt für die Berechnung der **maximalen Drehzahl der Welle**  $n_2$  auf der die Kupplung sitzt bei einem Übersetzungsverhältnis von 3:

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{M_2}{M_1} \quad (16)$$

Daraus folgt: 
$$n_2 = \frac{n_1}{i} = \underline{1333 \text{min}^{-1}}$$

Somit ist das Übersetzungsverhältnis von  $i = 3$  zulässig, da die maximale Drehzahl der Kupplung von  $n_{Kup_{max}} = 1500 \text{min}^{-1}$  nicht überschritten wird.

Die **maximal benötigte Leistung des Gleichstrommotors**, um das Kennmoment der Kupplung zu erreichen, ergibt sich damit nach Formel (12):

$$P_{mot_{max}} = M_{k_{Kup}} \cdot 2\pi \cdot n_2 = \underline{83,78W \approx 85W}$$

Bei dieser maximal benötigten Leistung liefert der Motor nach (16) ein **maximales Drehmoment** von:

$$M_{mot,max} = \frac{M_k}{i} = \underline{0,2Nm}$$

### 5.3 Auslegung des Riemengetriebes

Da ein Übertragungsverhältnis von  $i = 3$  ins Langsame gefordert ist, kann ein günstiges Zähnezahlverhältnis für die Zahnriemenscheiben nach (16) von  $z_1 = 10$ ,  $z_2 = 30$  aus dem Conrad-Katalog gewählt werden. Beide Zahnriemenscheiben sind aus Aluminium gefertigt. Die Kennwerte der Riemenscheiben sind:

$$d_{1_i} = 6mm, d_{2_i} = 8mm, p = \frac{1}{5}z_{oll} \triangleq 5,08mm \text{ (T5 Riemenprofil)}$$

Der **Teilkreisdurchmesser** (Wirkdurchmesser) der Zahnriemenscheiben berechnet sich aus der Zähnezahl  $z$  und der Riementeilung  $p$ :

$$d_a = \frac{z \cdot p}{\pi} \quad (17)$$

Damit ergeben sich:  $d_{a_1} = 16,2mm$  und  $d_{a_2} = 48,5mm$

Aus konstruktiven Begebenheiten müssen diese Scheiben in einem Abstand von:

$$100mm \leq e \leq 150mm \text{ stehen.}$$

Ein dafür geeigneter Zahnflachriemen hat laut Datenblatt des Conrad-Kataloges einen äußeren Umfang von  $l_R = 330mm$ . Der **tatsächliche Wellenabstand**  $e$  ergibt sich nach [Rol09] zu:

$$e \approx \frac{l_R}{4} - \frac{\pi}{8} \cdot (d_{a_1} + d_{a_2}) + \sqrt{\left[\frac{l_R}{4} - \frac{\pi}{8} \cdot (d_{a_1} + d_{a_2})\right]^2 - \frac{(d_{a_2} - d_{a_1})^2}{8}} = \underline{113mm} \quad (18)$$

Der Riemen kann durch Verschieben der Motorhalterung in einem Langloch gespannt werden. Der dafür erforderliche Verstellweg  $x$  kann nach [Rol09] für einen Synchronriemen abgeschätzt werden:

$$x \geq 0,005 \cdot l_R = \underline{1,65mm} \quad (19)$$

Die weiteren Kenndaten des Zahnflachriemens sind:

$$z_R = 65, l_R = 330mm, b_R = 9,5mm, t_R = 2mm, n_{Rmax} = 5000min^{-1}, P_{Rmax} = 300W$$

Der **Umschlingungswinkel** für die kleine Zahnriemenscheibe errechnet sich nach [Rol09] zu:

$$\beta_k^\circ = 2 \cdot \arccos\left(\frac{d_{a_2} - d_{a_1}}{2 \cdot e}\right) = \underline{163,6^\circ} \quad (20)$$

Die Anzahl der im Eingriff befindlichen Zähne  $z_e$ , sowie die zulässige Flächenpressung an den Zahnflanken sind maßgebend für Größe der zu übertragenden Kraft. Die **eingreifende Zähnezahl**  $z_e$  ergibt sich aus (auf ganze Zähnezahl abgerundet):

$$z_e = \frac{z_1 \cdot \beta_k^\circ}{360^\circ} = \underline{4} \quad (21)$$

Eine wichtige Größe zur Kontrolle der Riemengetriebedimensionierung ist die **Riemengeschwindigkeit**  $v_R$ . Mit zunehmender Riemengeschwindigkeit  $v_R$  nimmt, aufgrund des Fliehkraftanteils, die übertragbare Leistung deutlich ab [Rol09]. Sie muss mit einer maximal zulässigen Riemengeschwindigkeit  $v_{max}$  verglichen werden:

$$v_R = d_{a1} \cdot \pi \cdot n_1 \leq v_{max} \quad (22)$$

Daraus ergibt sich eine Riemengeschwindigkeit von  $v_R = 3,4 \frac{m}{s} \leq 80 \frac{m}{s}$ <sup>1</sup>.

### Kräfte am Riemetrieb

Die Umfangskraft  $F_t$  (Nutzkraft) errechnet sich aus der Differenz der beiden Trumkräfte  $F_1$  und  $F_2$  zu:

$$F_t = F_1 - F_2 \quad (23)$$

Die **größte zu übertragende Umfangskraft**  $F_{t1}$  unter Berücksichtigung der dynamischen Betriebsverhältnisse berechnet sich zu:

$$F_t = F_{t1} = F_u = \frac{K_A \cdot P_{nenn}}{v_R} \approx \underline{25N} \quad (24)$$

Durch Einsetzen der *Eytelweinschen Beziehung* (unter Vernachlässigung der Fliehkkräfte)

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = e^{\mu \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \beta_k^\circ} = m \quad (25)$$

in (23) kann die **Trumkraft**  $F_1$  wie folgt berechnet werden:

$$F_1 = \frac{F_t \cdot m}{m - 1} = \underline{32,9N} \quad (26)$$

**Trumkraft**  $F_2$  ergibt sich dann nach (23) bzw. (25) zu:  $F_2 = \underline{7,9N}$

Die **Wellenbelastung** gewährleistet im **Betriebszustand** den notwendigen Anpressdruck zwischen Riemen und Scheibe und kann nach dem Cosinussatz berechnet werden [Rol09]:

$$F_w = F_r = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 - 2 \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot \cos \beta_k^\circ} = \underline{40,5N} \quad (27)$$

Die **theoretische Wellenbelastung im Ruhezustand**  $F_{w0}$  ist um den Betrag der Fliehkraft  $F_z$  größer:

$$F_{w0} = F_w + F_z = F_w + A_S \cdot \rho \cdot v_R^2 = \underline{40,76N} \quad (28)$$

<sup>1</sup>  $v_{max}$  aus [RolT09] TB 16-19a

<sup>2</sup>  $K_A = 1$  aus [RolT09] TB 3-5

<sup>3</sup>  $m = 4,17$  berechnet nach (23) mit  $\mu = 0,5$  aus [RolT09] TB 16-1

<sup>4</sup>  $A_S = b_R + t_R = 19mm^2$ ,  $\rho = 1,2 \frac{kg}{dm^3}$  aus [RolT09] TB 16-1

## 5.4 Auslegung der Wellen

### 5.4.1 Fall 1: Kupplung ist geöffnet

Ist die Kupplung geöffnet, so wird die Radialkraft und die Umfangskraft des Riemens auf die Welle I übertragen. Es wird ideal keine Axialkraft auf die Welle übertragen. Im Folgenden werden die Lagerkräfte der beiden Kugellager A1 und A2 ermittelt und die Schnittgrößenverläufe der Welle I dargestellt.

Freikörperbild:

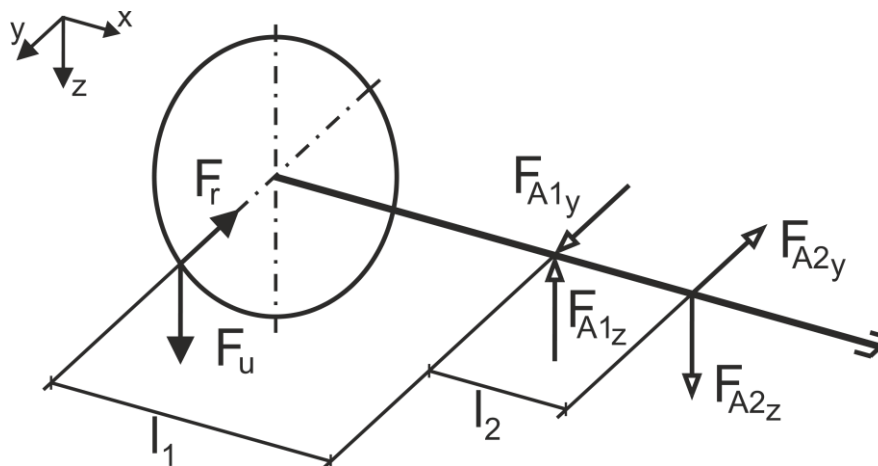


Abb. 11: Freikörperbild der Welle I

Der Abstand zwischen Zahnriemenscheibe und Kugellager A1 beträgt  $l_1 = 25\text{mm}$  und der Abstand zwischen den beiden Kugellagern beträgt  $l_2 = 12\text{mm}$ .

Gleichgewichtsbedingungen:

$$\left. \begin{array}{l} \swarrow y: F_r = F_{A1y} - F_{A2y} \\ \downarrow z: F_u = F_{A1z} - F_{A2z} \\ \swarrow y: 0 = F_{A1z} \cdot l_1 - F_{A2z} \cdot (l_1 + l_2) \\ \downarrow z: 0 = F_{A1y} \cdot l_1 - F_{A2y} \cdot (l_1 + l_2) \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} F_{A1y} = 124,9\text{N} \\ F_{A1z} = 77,1\text{N} \\ F_{A2y} = 84,4\text{N} \\ F_{A2z} = 52,1\text{N} \end{array}$$

$$\text{Radialkraft Kugellager A1: } F_{A1rad} = \sqrt{F_{A1y}^2 + F_{A1z}^2} = \underline{146,8\text{N}}$$

$$\text{Radialkraft Kugellager A2: } F_{A2rad} = \sqrt{F_{A2y}^2 + F_{A2z}^2} = \underline{99,2\text{N}}$$

Für das antriebsseitige Riemenrad wurde aus Platzgründen eine sog. fliegende Lagerung gewählt. Die Kräfte in den Lagern werden umso kleiner, je weiter die Kugellager vom Riemenrad entfernt sind und je größer der Abstand zwischen den Lagern ist.

## Schnittreaktionen

Bereich	Schnittreaktion	Werte an Bereichsgrenzen für $x_i$	
$0 \leq x_1 \leq l_1$		0	$l_1 = 25\text{mm}$
	$N_1 = 0$	0N	0N
	$Q_{y1} = F_r$	40,5N	40,5N
	$Q_{z1} = -F_u$	-25N	-25N
	$M_{x1} = -F_u \cdot r$	0Nmm	-606,25Nmm
	$M_{y1} = -F_u \cdot x_1$	0Nmm	-625,25Nmm
	$M_{z1} = -F_r \cdot x_1$	0Nmm	-1012,5Nmm
$0 \leq x_2 \leq l_2$		0	$l_2 = 12\text{mm}$
	$N_2 = 0$	0N	0N
	$Q_{y2} = F_r - F_{A1y}$	-84,4N	-84,4N
	$Q_{z2} = F_{A1z} - F_u$	52,1N	52,1N
	$M_{x2} = -F_u \cdot r$	-606,25Nmm	-606,25Nmm
	$M_{y2} = -F_u \cdot (l_1 + x_2) + F_{A1z} \cdot x_2$	-625Nmm	0Nmm
	$M_{z2} = -F_r \cdot (l_1 + x_2) + F_{A1y} \cdot x_2$	-1012,5Nmm	0Nmm
$0 \leq x_3 \leq l_3$		0	$l_3 = 23\text{mm}$
	$N_3 = 0$	0N	0N
	$Q_{y3} = F_r - F_{A1y} + F_{A2y}$	0N	0N
	$Q_{z3} = F_{A1z} - F_{A2z} - F_u$	0N	0N
	$M_{x3} = -F_u \cdot r$	-606,25Nmm	-606,25Nmm
	$M_{y3} = -F_u \cdot (l_1 + l_2 + x_3) + F_{A1z} \cdot (l_2 + x_3) - F_{A2z} \cdot x_3$	0N	0N
	$M_{z3} = -F_r \cdot (l_1 + l_2 + x_3) + F_{A1y} \cdot (l_2 + x_3) - F_{A2y} \cdot x_3$	0N	0N

## 5.4.2 Fall 2: Kupplung ist geschlossen

Im zweiten Fall ist die Kupplung geschaltet, wodurch die Leistung der Welle I (Primärwelle) auf die Welle II (Sekundärwelle) übertragen wird. Dafür werden im Weiteren wieder die Lagerkräfte aufgestellt (für die Kugellager B und C) und die Schnittgrößenverläufe der Welle II dargestellt.

Es wurde dafür die Annahme getroffen, dass die Kupplung ausschließlich ein Drehmoment (Torsionsmoment  $M_t$ ) übertragen kann und keine Biegemomente ( $M_y$  bzw.  $M_z$ ), da der Anker durch die Feder beweglich gelagert ist und so kleine Winkelversätze ausgleichen kann.

Freikörperbild:

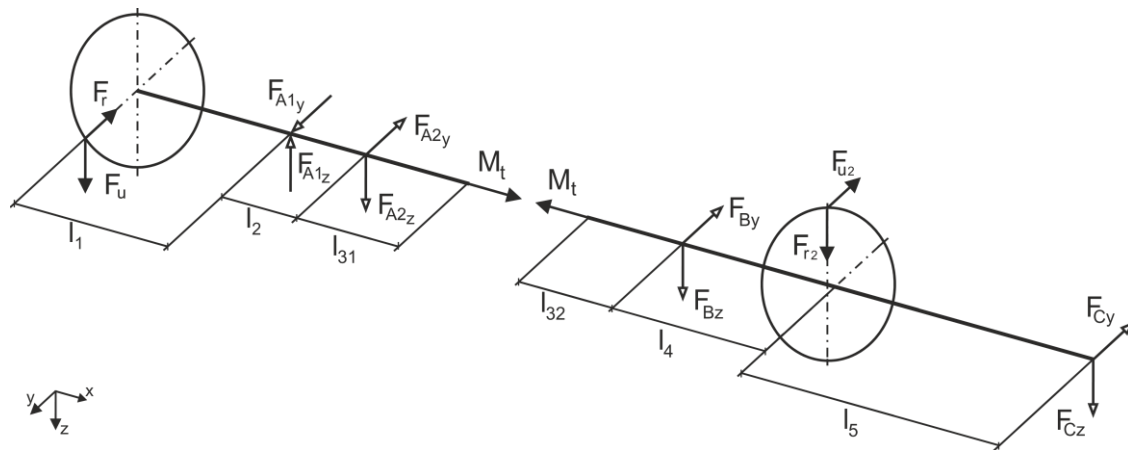


Abb. 12: Freikörperbild von Welle I und Welle II

Gleichgewichtsbedingungen:

Für die Welle I und Welle II liegt bei gleichförmiger Drehbewegung und reibungsfrei angenommener Lagerung statisches Gleichgewicht vor, d.h. es gilt:

o Gesamtsystem  $\rightarrow x$ :  $F_u \cdot r - F_{u2} \cdot r = 0 \quad \Leftrightarrow \underline{F_u = F_{u2}}$   
 ebenso:  $\underline{F_r = F_{r2}}$

Dabei sind bei einem angenommenen Leistungsfluss von Rad 1 nach Rad 2:

$F_u$ ... Aktionskraft

$F_{u2}$ ...Reaktionskraft

o Welle I

$$\begin{aligned} \nearrow y: & F_{A1y} - F_{A2y} - F_r = 0 \\ \downarrow z: & F_{A1z} - F_{A2z} - F_u = 0 \\ \nearrow y: & 25 \cdot F_u - 12 \cdot F_{A2z} = 0 \\ \downarrow z: & 25 \cdot F_r - 12 \cdot F_{A2y} = 0 \end{aligned}$$

o Welle II

$$\begin{aligned} \nearrow y: & F_{By} - F_{u2} + F_{Cy} = 0 \\ \downarrow z: & -F_{Bz} + F_{r2} - F_{Cz} = 0 \\ \nearrow y: & 175 \cdot F_{Cz} - 35 \cdot F_{r2} = 0 \\ \downarrow z: & 175 \cdot F_{Cy} - 35 \cdot F_{u2} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 175 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 175 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{A1y} \\ F_{A1z} \\ F_{A2y} \\ F_{A2z} \\ F_{By} \\ F_{Bz} \\ F_{Cy} \\ F_{Cz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 40,5 \\ 25 \\ -625 \\ -1012,5 \\ -1498,5 \\ 25 \\ 1417,5 \\ 875 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{aligned} F_{A1y} &= 124,9N \\ F_{A1z} &= 77,1N \\ F_{A2y} &= 84,4N \\ F_{A2z} &= 52,1N \\ F_{By} &= 20N \\ F_{Bz} &= 32,4N \\ F_{Cy} &= 5N \\ F_{Cz} &= 8,1N \end{aligned}$$



### Minstdurchmesser der Welle

Aus dem nun bekannten Biegemomentenverlauf kann das resultierende maximale Biegemoment errechnet werden:

$$M_{b_{max}} = \sqrt{M_{y_{max}}^2 + M_{z_{max}}^2} = \sqrt{(1134Nmm)^2 + (-1012,5Nmm)^2} = \underline{1520,2Nmm} \quad (29)$$

Die zulässige Spannung ergibt sich für eine vorgegebene Mindestsicherheit gegen Dauerbruch von  $S_{D_{min}} = 2,5$  zu:

$$\sigma_{b_{zul}} = \frac{\sigma_D}{S_{D_{min}}} = \frac{R_{eN}}{S_{D_{min}}} = \frac{275 \frac{N}{mm}}{2,5} = \underline{110 \frac{N}{mm}} \quad (30)$$

Aus diesen beiden Werten lässt sich der Minstdurchmesser der Welle berechnen:

$$d_{min} \geq \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_{b_{max}}}{\pi \cdot \sigma_{b_{zul}}}} = \underline{5,2mm} < d_{vorh} = 6mm \quad (31)$$

Damit ist der real vorhandene minimalste Durchmesser von  $d_{vorh} = 6mm$  größer als der berechnete Minstdurchmesser.

### Sicherheit gegen Fließen

Auf der Welle existieren zwei kritische Stellen: das sind zum einen die Orte mit den größten Querschnittsänderungen (z.B. Kerben und Absätze) und zum anderen die Orte mit den höchsten auftretenden Biegemomenten. Für beide Stellen soll im Folgenden die Sicherheit gegen Fließen berechnet werden.

#### am Ort mit der größten Kerbspannung

Auf den beiden Wellen treten insgesamt drei Querschnittsänderung auf, deren Durchmesser sich jeweils um 2mm ändert (Übergang von  $d_0 = 8mm$  auf  $d = 6mm$ ). Dabei treten auf Welle I (antriebsseitig zur Kupplung) bei  $l = 22mm$  zudem die größten Biegemomente auf (siehe Abb. 13). Das resultierende Biegemoment hat an dieser Stelle eine Größe von:

$$M_{b_K} = \sqrt{M_{y_K}^2 + M_{z_K}^2} = \sqrt{(-550Nmm)^2 + (-891Nmm)^2} = \underline{1047Nmm}$$

Das Torsionsmoment:  $|M_{t_K}| = 606,25Nmm$ .

Die Nennspannungen betragen somit:

○ Zug:  $\sigma_{z_{Nenn}} = 0$

○ Biegung:  $\sigma_{b_{Nenn}} = \frac{M_{b_K}}{W_b} = \frac{32 \cdot M_{b_K}}{\pi \cdot d^3} = 49,4 \frac{N}{mm^2} \quad (32)$

<sup>5</sup>  $R_{eN}$  aus [RoIT09] TB 1-1

○ Torsion: 
$$\tau_{tNenn} = \frac{M_{tK}}{W_t} = \frac{16 \cdot M_{tK}}{\pi \cdot d^3} = 14,3 \frac{N}{mm^2} \quad (33)$$

Die *Formzahl*  $\alpha_k$  beschreibt das Verhältnis zwischen höchster Kerbspannung und der Nennspannung am Ort der höchsten Kerbspannung. Sie berechnet sich nach [Ste08] zu:

$$\alpha_k = 1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{A}{\left(\frac{D-d}{2 \cdot r}\right)^k} + E \cdot \left[\frac{1 + \frac{d}{2 \cdot r}}{\left(\sqrt{\frac{d}{2 \cdot r}}\right)^3}\right]^l + G \cdot \frac{d}{D \cdot \left(\frac{D-d}{2 \cdot r}\right)^m}}} \quad (34)$$

Es ergeben sich: für Zug:  $\alpha_z = 0$ , für Biegung:  $\alpha_b = 1,25$  und für Torsion:  $\alpha_t = 1,14$

Daraus lassen sich die maximalen Kerbspannungen berechnen:

$$\sigma_{zmax} = \alpha_z \cdot \sigma_{zNenn} = 0, \sigma_{bmax} = \alpha_b \cdot \sigma_{bNenn} = 61,8 \frac{N}{mm}, \tau_{tmax} = \alpha_t \cdot \tau_{tNenn} = 16,3 \frac{N}{mm}$$

Die *Vergleichsspannung* wird nach der Gestaltänderungshypothese ermittelt:

$$\sigma_{Vmax} = \sqrt{(\sigma_{zmax} + \sigma_{bmax})^2 + 3 \cdot \tau_{tmax}^2} = 67,9 \frac{N}{mm} \quad (35)$$

Damit ergibt sich eine Sicherheit gegen Fließen von:

$$S_F = \frac{\sigma_{ertr}}{\sigma_{vorh}} = \frac{R_e}{\sigma_{Vmax}} = \frac{275 \frac{N}{mm}}{78,8 \frac{N}{mm}} = 4 \quad (36)$$

#### am Ort mit dem größten Biegemoment

Die Stelle mit dem maximalen Biegemoment befindet sich auf Welle II bei  $l_4 = 35mm$  mit einem Durchmesser von  $d_0 = 8mm$ .

$$M_{bmax} = \sqrt{(1134Nmm)^2 + (700Nmm)^2} = 1333Nmm, |M_{tK}| = 606,25Nmm$$

Die maximalen Nennspannungen betragen:

○ Zug: 
$$\sigma_{zmax} = 0$$

○ Biegung: 
$$\sigma_{bmax} = \frac{M_{bK}}{W_b} = \frac{32 \cdot M_{bK}}{\pi \cdot d^3} = 26,5 \frac{N}{mm^2}$$

○ Torsion: 
$$\tau_{tmax} = \frac{M_{tK}}{W_t} = \frac{16 \cdot M_{tK}}{\pi \cdot d^3} = 6 \frac{N}{mm^2}$$

<sup>6</sup> Werte aus [Ste08] Tab 3.6: für Biegung:  $A = 0,40$ ,  $E = 6,00$ ,  $G = 0,80$ ,  $k = 0,40$ ,  $l = 2,75$ ,  $m = 1,50$   
für Torsion:  $A = 0,40$ ,  $E = 25,00$ ,  $G = 0,20$ ,  $k = 0,45$ ,  $l = 2,25$ ,  $m = 2,00$

Die *Vergleichsspannung* wird ebenfalls nach der Gestaltänderungshypothese ermittelt:

$$\sigma_{Vmax} = \sqrt{(\sigma_{zmax} + \sigma_{bmax})^2 + 3 \cdot \tau_{tmax}^2} = 28,5 \frac{N}{mm^2}$$

Damit ergibt sich eine *Sicherheit gegen Fließen* von:

$$S_F = \frac{\sigma_{ertr}}{\sigma_{vorh}} = \frac{R_e}{\sigma_{Vmax}} = \underline{\underline{9,5}}$$

Im Vergleich zur Sicherheit gegen Fließen am Ort der größten Kerbspannung, ist an dieser Stelle, trotz der größer auftretenden Spannungen, die Fliehsicherheit deutlich höher, aufgrund des breiteren Querschnitts an diesem Ort.

## 5.5 Lagerberechnung

Das am stärksten belastete Kugellager ist offensichtlich das Rillenkugellager A1 mit einer Radialkraft von  $F_{A1rad} = 146,8N \approx 150N$ , wenn die Kupplung offen ist (aus 5.3.1). Die Axialkraft ist null.

Die Kennwerte des verwendeten Rillenkugellagers 626-2Z sind laut Datenblatt:  $c_r = 2600N$ ,  $c_{0r} = 1060N$ ,  $f_z = 1$ ,  $n_{max} = 32000min^{-1}$ ,  $p_L = 3$

Aus diesen Werten lassen sich die statische Tragsicherheit  $S_0$  und die Lebensdauer  $L_{10h}$  des Kugellagers berechnen:

$$S_0 = \frac{c_{0r}}{p_0} = \frac{c_{0r}}{F_{A1rad}} \approx \underline{\underline{7}} \quad (37)$$

$$L_{10} = \left(\frac{c_r}{p}\right)^{p_L} = L_{10} = \left(\frac{c_r}{F_{A1rad}}\right)^{p_L} = 5207 \triangleq 5207 \times 10^6 \text{ Umdrehungen} \quad (38)$$

$$L_{10h} = \frac{L_{10} \cdot 10^6}{n_2 \cdot 60} \approx \underline{\underline{65000h}} \quad (39)$$

Die Lebensdauer des Rillenkugellagers A1 beträgt über 65.000 Stunden.

## 5.6 Auslegung der Zusatzmasse und Berechnung der Durchbiegung der Welle

Zwischen dem Kugellager B und dem Kugellager C besitzt die Welle einen quadratischen Querschnitt, um ein einfaches Anbringen und Lösen der Zusatzmasse mit formschlüssigem Halt zu ermöglichen. Die Länge des Vierkantes beträgt  $l_{VK} = 105mm$  mit einer Seitenlänge von  $s = 8mm$ . Im Folgenden werden verschiedenen Maße für die Zusatzmasse ermittelt. Um den Durchmesser der Zusatzmasse zu vergrößern, wurde in die Basisplatte eine Einfräsung von 8mm realisiert. Somit beträgt der maximale Durchmesser des Zusatzgewichtes  $d_{ZMmax} = 90mm$ .

Die Zusatzmasse hat annähernd die Form eines Vollzylinders. Dafür berechnet sich das Trägheitsmoment zu:

$$J_{VZ} = \frac{1}{2} \cdot m_{VZ} \cdot r_{VZ}^2 = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho \cdot r_{VZ}^4 \cdot b \quad (40)$$

Das Grundgesetz der Dynamik für die Rotation besagt:

$$\vec{M} = J \cdot \vec{\alpha} \quad (41)$$

Für die gleichmäßig beschleunigte Rotation gilt:

$$\omega = \alpha \cdot t = 2 \cdot \pi \cdot n \quad (42)$$

Damit ergibt sich eine zweite Gleichung zur Berechnung des Trägheitsmomentes:

$$J = \frac{M \cdot t}{2 \cdot \pi \cdot n} \quad (43)$$

Aus (40), (41) und (42) folgt für die Breite  $b$  der Zusatzmasse:

$$b = \frac{M \cdot t}{\pi^2 \cdot n \cdot \rho \cdot r_{VZ}^4} \quad (44)$$

Es sollen verschiedene Verzögerungszeiten realisiert werden. Nach (43) und (44) ergeben sich folgende Werte für Aluminium und Stahl (mit  $M = 0,6J$ ,  $n = 1333 \text{min}^{-1}$  und  $r_{VZ} = 45 \text{mm}$ ):

	Aluminium $\rho = 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$		Stahl $\rho = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	
<b>Verzögerungszeit</b>	<b><math>b</math> [mm]</b>	<b><math>J</math> [kg · mm<sup>2</sup>]</b>	<b><math>b</math> [mm]</b>	<b><math>J</math> [kg · mm<sup>2</sup>]</b>
<b><math>t_1 = 0,2s</math></b>	33	574	11	557
<b><math>t_2 = 0,4s</math></b>	65	1131	22	1113
<b><math>t_3 = 0,5s</math></b>	81	1409	28	1415
<b><math>t_4 = 0,8s</math></b>	$129 > l_{VK}$	2244	45	2275
<b><math>t_5 = 1,0s</math></b>	-	-	56	2832
<b><math>t_6 = 1,2s</math></b>	-	-	67	3388
<b><math>t_7 = 1,5s</math></b>	-	-	84	4248
<b><math>t_8 = 1,7s</math></b>	-	-	95	4804
<b><math>t_9 = 1,8s</math></b>	-	-	101	5107
<b><math>t_{10} = 2,0s</math></b>	-	-	$111 > l_{VK}$	5613

Tab. 02: Berechnung des Trägheitsmomentes für verschiedene Verzögerungszeiten

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass mit einer Zusatzmasse aus Stahl viel höhere Trägheitsmomente und somit auch höhere Verzögerungszeiten erreichen lassen, als mit Aluminium, aufgrund der größeren Dichte von Stahl.

### Maximale Durchbiegung der Welle

Die größte Durchbiegung wird erreicht, wenn die größte auftretende Kraft in der Mitte der Welle zwischen den Kugellagern B und C angreift. Für diesen Sonderfall des mittigen Kraftangriffspunktes gilt folgende Formel:

$$u_{max} = \frac{1}{48} \cdot \frac{F \cdot l_{VK}^3}{E \cdot I} \quad (45)$$

Das Flächenträgheitsmoment  $I$  für einen Rechteckquerschnitt beträgt:

$$I = \frac{1}{12} \cdot s^4 \quad (46)$$

(46) in (45):

$$u_{max} = \frac{1}{4} \cdot \frac{m \cdot g \cdot l^3}{E \cdot s^4} \quad (47)$$

Die Masse des Stahlgewichtes mit einem Trägheitsmoment von  $J_6 = 3388 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$  beträgt beispielsweise:

$$m = \pi \cdot r^2 \cdot b \cdot \rho = \underline{3,4 \text{ kg}}.$$

Das Elastizitätsmodul von Stahl beträgt etwa:  $E = 210 \text{ GPa} = 2,1 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ .

Aus diesen Parametern ergibt sich eine maximale Durchbiegung der Vierkantwelle von:

$$\underline{\underline{u_{max} \approx 11 \mu\text{m}}}$$

Bemerkung: Von einer zusätzlichen Lagerberechnung wird abgesehen, da der zusätzliche Einfluss durch die Zusatzmasse von 33N kaum Einfluss auf die Lebensdauer der Kugellager hat.

## 5.7 Auslegung der Kupplung

Für die überschlägige Bestimmung des erforderlichen Drehmomentes  $M_{erf}$  kann folgende Gleichung angesetzt werden [Mag11]:

$$M_{erf} = 9550 \cdot \frac{P[\text{kW}]}{n[\text{min}^{-1}]} \cdot K \leq M_k = 0,6 \text{ Nm} \quad (48)$$

Die zu übertragende Nennleistung beträgt etwa 40 Watt (siehe 6.1.b). Damit ergibt sich ein erforderliches Drehmoment bei einer maximalen Drehzahl von  $n_2 = 1333 \text{ min}^{-1}$  und einem Sicherheitsfaktor von  $K = 2,0$ :  $\underline{\underline{M_{erf} = 0,573 \text{ Nm} \leq 0,6 \text{ Nm}}}$ .

Weitere Kennwerte der ausgewählten elektromagnetischen Kupplung sind laut Datenblatt:

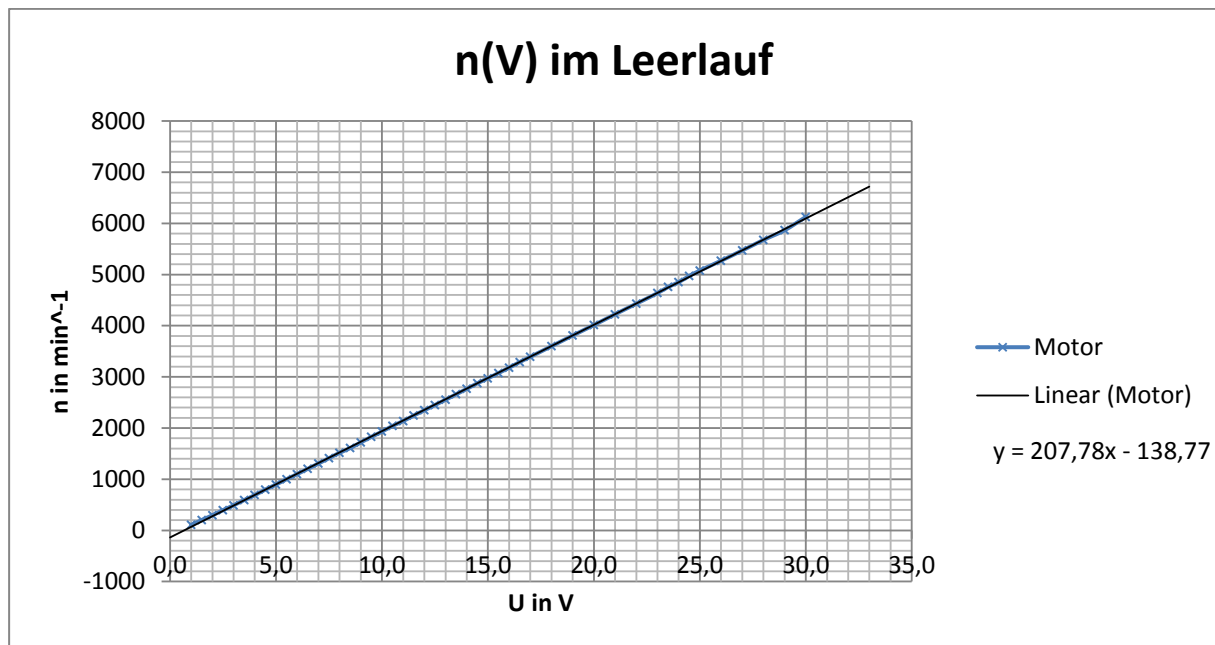
- Ansprechverzug:  $t_{11} = 5 \text{ ms}$
- Anstiegszeit:  $t_{12} = 15 \text{ ms}$
- Ausschaltzeit:  $t_2 = 6 \text{ ms}$

## 6 Praktische Versuchsergebnisse

### 6.1 Aufnahme Motorkennwerte

#### a) Im Leerlaufbetrieb

Es wurde für verschiedene Spannungen die Drehzahl der Motorwelle ermittelt. Die Drehzahlerfassung erfolgte mittels einer Hall-Sonde. Dazu wurden vier kleine Dauermagnete, im gleichen Abstand, kreisförmig auf die Stirnseite der Seilbremscheibe geklebt. Auf diese Weise erfuhr der Hall-Sensor vier Impulse pro Umdrehung, die über ein Frequenzmessgerät ausgewertet wurden.

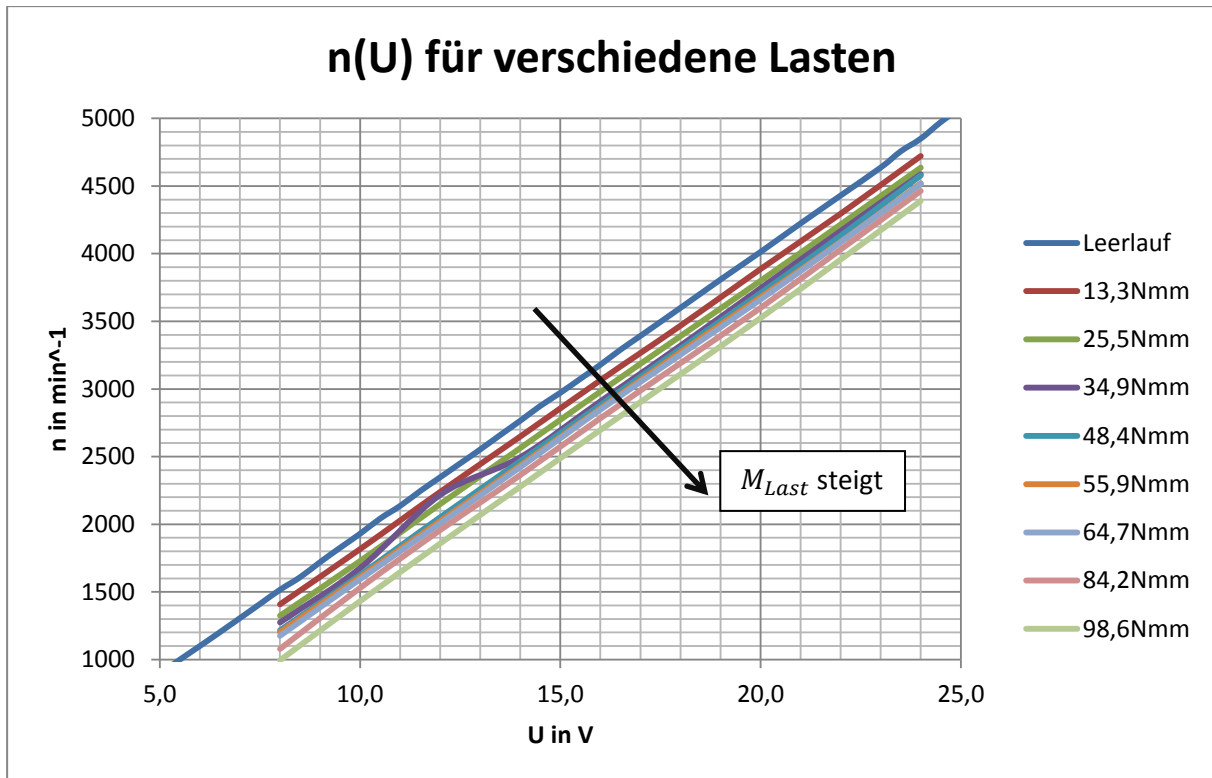


Diag. 01: Spannungs-Drehzahl Diagramm für Gleichstrommotor im Leerlaufbetrieb

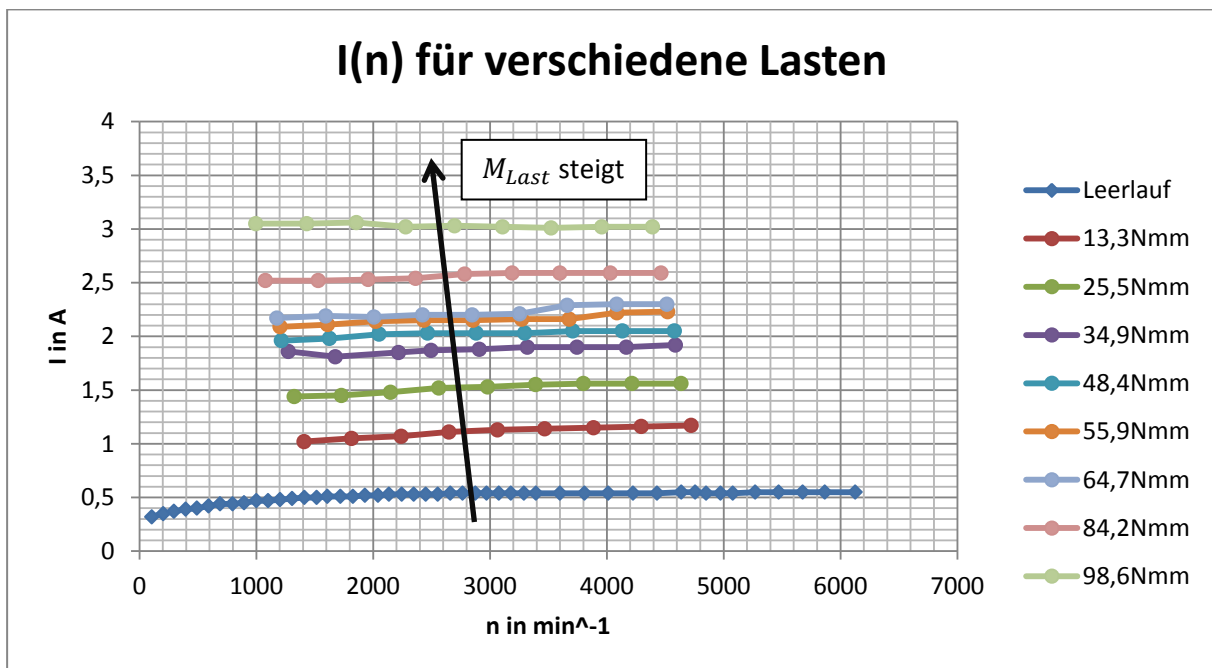
Die Drehzahl ist linear abhängig von der Spannung und mit Erhöhung der Spannung erhöht sich auch die Drehzahl.

#### b) Mit Last

An der auf der Motorwelle befestigten Seilbremse mit einem Durchmesser von  $d_{SB} = 46\text{mm}$  wurden über ein Seil verschiedene Massekörper gehängt, wodurch der Motor ein Lastmoment erfuhr. Es ergaben sich für die Lastmomente  $M_1 = 13,3\text{Nmm}$ ,  $M_2 = 25,5\text{Nmm}$ ,  $M_3 = 34,9\text{Nmm}$ ,  $M_4 = 48,4\text{Nmm}$ ,  $M_5 = 55,9\text{Nmm}$ ,  $M_6 = 64,7\text{Nmm}$ ,  $M = 84,2\text{Nmm}$  und  $M_8 = 98,6\text{Nmm}$  folgende Spannungs-Drehzahl-Kennlinien und Strom-Drehzahl-Kennlinien:



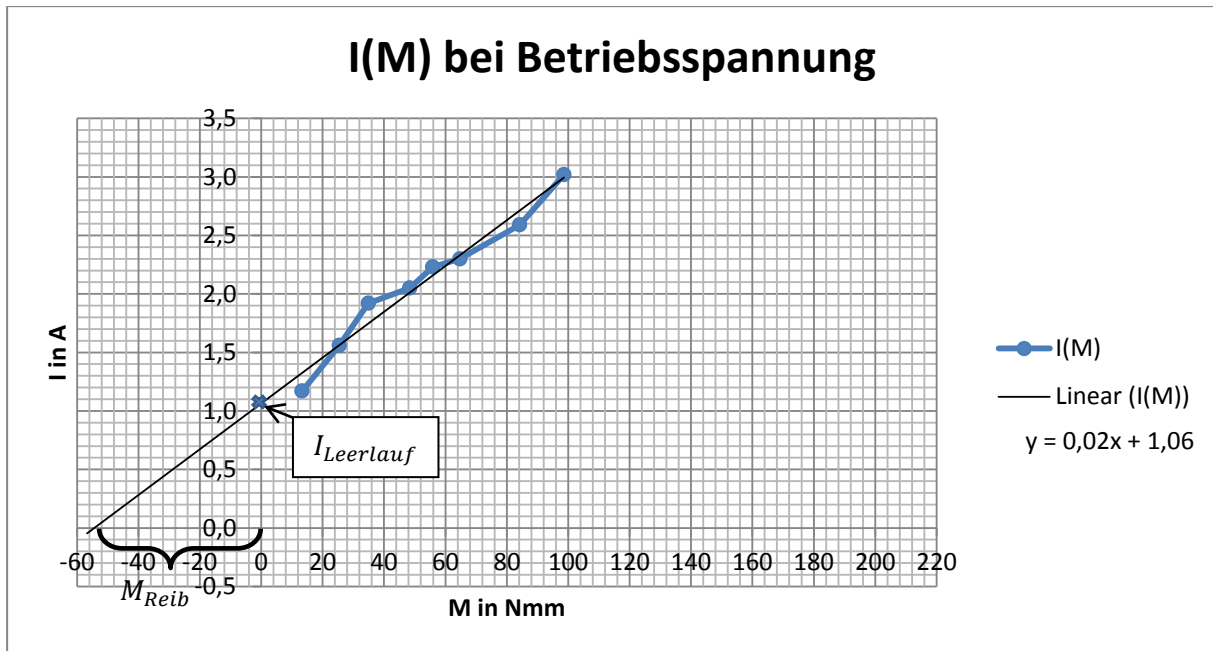
Diag. 02: Spannungs-Drehzahl Diagramm für verschiedene Lasten



Diag. 03: Strom-Drehzahl Diagramm für verschiedene Lasten

Es ist deutlich zu erkennen, dass bei Erhöhung des Lastmomentes, die Drehzahl etwas einbricht (Diag. 02) und die Stromaufnahme des Motors steigt (Diag. 03).

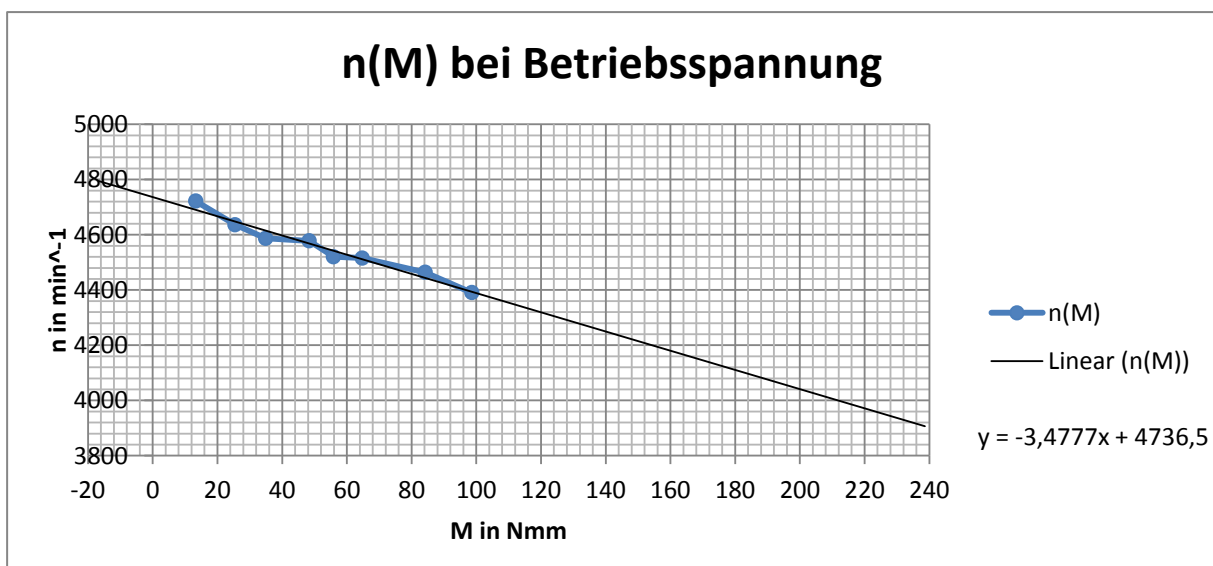
Im Folgenden wurde für die Nennspannung  $U = 24V$  die Drehmomenten-Strom Kennlinie und die Drehmomenten-Drehzahl Kennlinie des Motors ermittelt. Die Berechnung des Drehmomentes erfolgte nach (13).



Diag. 04: Strom-Drehmoment Kennlinie des Gleichstrommotors

Nach Berechnung der linearen Ausgleichsgeraden aus den Messpunkten, kann die Strom-Momenten-Beziehung mit der Funktion  $I[A] = 0,02 \cdot M[Nmm] + 1,06$  beschrieben werden. Die Größe des Reibmomentes entspricht dem Abstand auf der x-Achse vom Nullpunkt bis zum Schnittpunkt der Ausgleichsgeraden mit der x-Achse. So ergibt sich ein Reibmoment des Gleichstrommotors von etwa  $M_{\text{Reib}} = 55 \text{ Nmm}$ .

Nach Umstellung der obigen Gleichung kann die Drehmomenten-Strom-Proportionalität annähernd mit folgender Proportionalitätsgleichung beschrieben werden:  $M[Nmm] \sim 50 \cdot I[A] - 53$ .



Diag. 05: Drehzahl-Drehmoment Kennlinie des Gleichstrommotors mit Nebenschlusscharakteristik

Aus den Diagrammen 04 und 05 ist zu erkennen, dass bei Erhöhung des Lastmomentes die Stromaufnahme des Motors linear steigt und im Gegenzug die Drehzahl linear sinkt. Dies deckt sich mit der Theorie der Betriebseigenschaften eines Motors (siehe (08) und (09)).

Die berechnete Ausgleichsgerade  $n[1/min] = 4736,5[1/min] - 3,48 \cdot M[Nmm]$  entspricht der Drehzahl-Drehmomenten-Funktion  $n = n_0 - k \cdot M$ .

Bei einer Nenndrehzahl von  $n_1 = 4000 min^{-1}$  beträgt das Kennmoment des Motors etwa  $M_{k_{mot}} = 0,21 Nm$  (Vgl. Diag. 05). Somit beträgt die elektrische Leistung des Motors nach (12) mit  $U = 24V$  und  $I \approx 5,2A$  etwa  $P_{el} = 124,8W$ .

Die mechanische Leistung errechnet sich nach (13a) mit  $M_{k_{mot}}$  und  $n_1$  zu  $P_{mech} = 88W$ . Diese Nennleistung ist etwa so groß, wie die maximal aufzuwendende Leistung von  $85W$ , damit das Kennmoment der Kupplung nicht überschritten wird. Die Nenndrehzahl des Motors sollte also nicht überschritten werden.

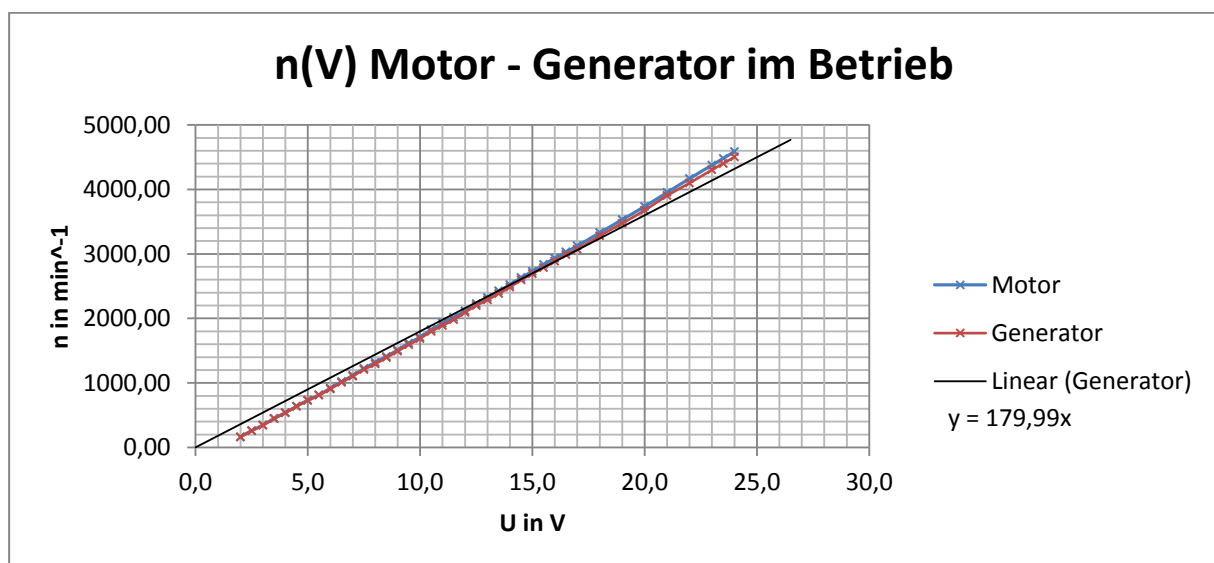
Der Quotient aus abgegebener zu zugeführter Leistung ergibt den Wirkungsgrad eines Motors. So ergibt sich nach (14) ein Wirkungsgrad des Gleichstrommotors von rund 71%.

## 6.2 Aufnahme von Kennwerten im Betrieb

Im Folgenden wurden die Messwerte Spannung, Strom und Frequenz (Drehzahl) für den Betriebszustand aufgenommen, d.h. die Motorwelle ist über einen Riemen mit der Primärwelle verbunden und die Generatorwelle ist ebenfalls über einen Riemen mit der Sekundärwelle verbunden. Zwischen Primär- und Sekundärwelle befindet sich die Kupplung. Auf der Sekundärwelle kann die Zusatzmasse angebracht werden. Die Drehzahlerfassung erfolgte ebenfalls über die Hall-Sensormessung.

Die Messwerte wurden bei der Nennspannung des Motors von  $24V$  und der Nennspannung der Kupplung von  $24V$  ermittelt. Die aus Aluminium gefertigte Zusatzmasse hat einen Durchmesser von  $d_{ZM} = 90mm$ , eine Breite von  $b_{ZM} = 68mm$ , besitzt eine Masse von  $m_{ZM} = 1,1kg$  und hat ein berechnetes Trägheitsmoment (nach (40)) von  $J_{ZM} = 1183kg \cdot mm^2$ .

Bei geschalteter Kupplung und angelegter Zusatzmasse ergibt sich folgende Spannungs-Drehzahl-Kennlinie von Motor und Generator.



Diag. 06: Spannungs-Drehzahl-Kennlinien von Motor und Generator im Betriebszustand

Es ist erkenntlich, dass die Drehzahlen von Motor und Generator nicht genau übereinstimmen. Die Abweichung der Drehzahlen wird mit größer werdender Spannung erheblicher. Die Fehlerursache ist vermutlich der an er Kupplung auftretende Schlupf.

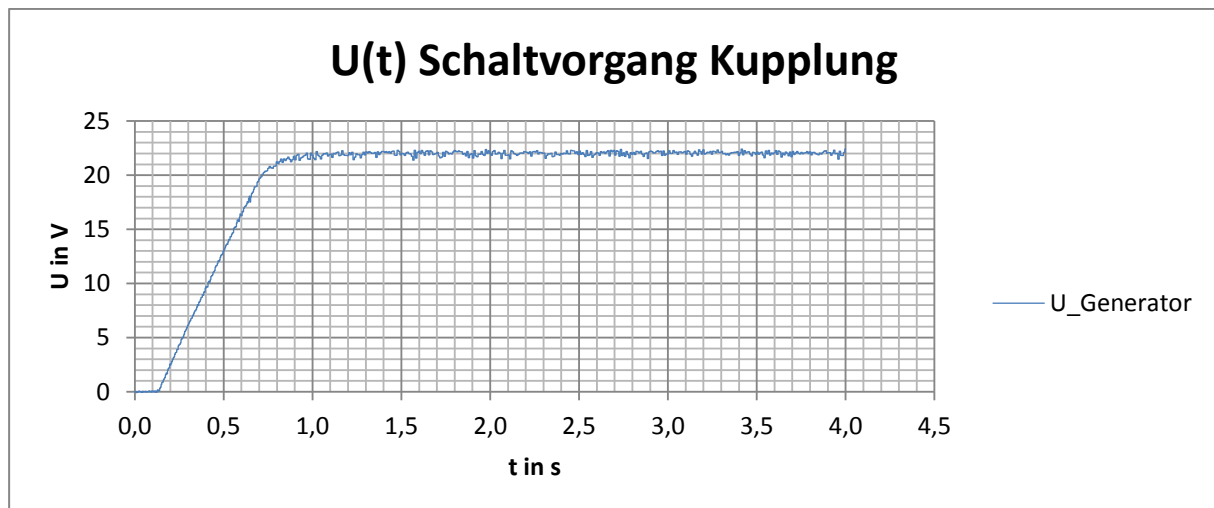
Der Schlupf ist in diesem Fall die Drehzahl-Differenz von Motorwelle und Generatorwelle und berechnet sich zu:

$$s = \frac{n_M - n_G}{n_M} \quad (49)$$

So ergibt sich in einem Messbereich von 0 bis  $4550 \text{ min}^{-1}$  ein Schlupf von 1% bis 2%.

Die Nenndrehzahl des Motors wird bei einer angelegten Spannung von  $U = 21,5V$  erreicht.

Im Weiteren wurde für den Schaltvorgang der Kupplung die (Generator-)Spannung über der Zeit mithilfe eines Oszilloskops aufgenommen.

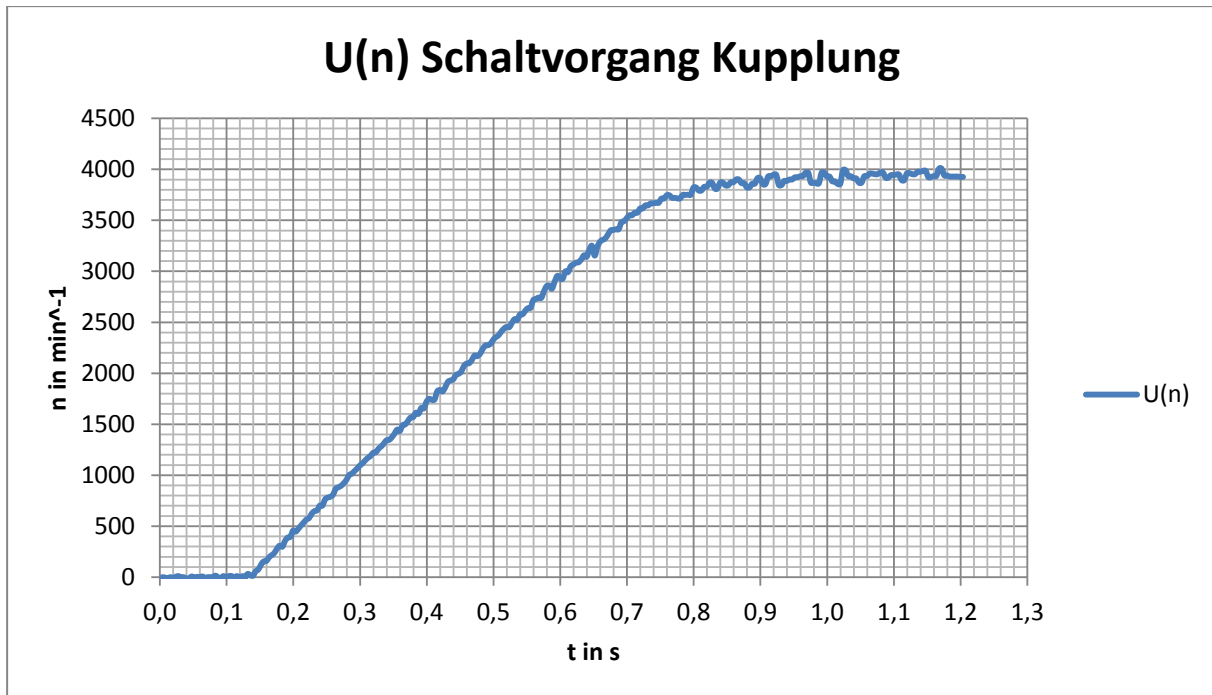


Diag. 07: Spannungsverlauf beim Schalten der Kupplung in Abhängigkeit von der Zeit

Da die Spannungs-Drehzahl-Beziehung aus Diagramm 06 bekannt ist, kann die Spannung in einen drehzahlproportionalen Wert umgewandelt werden. Um diesen Proportionalitätsfaktor zu bestimmen, wird eine Ausgleichsgerade von den Spannungs- und Drehzahl-Messwerten gebildet. Die Ausgleichsgerade muss dabei den Nullpunkt durchlaufen, um eine direkte Umrechnung ohne Offsetanteil zu ermöglichen. Die Spannungs-Drehzahl-Umrechnung beträgt  $n[\text{1}/\text{min}] \approx 180 \cdot U[\text{V}]$ . Damit ergibt sich eine Drehzahlabweichung bei  $U = 24V$  von 4% (Vgl. Diag. 07).

Das Oszilloskop hat bei angelegter Motor-Nennspannung von 24V eine Generatorspannung von etwa 22V gemessen. Das entspricht in etwa einer Drehzahl von  $n = 3960 \text{ min}^{-1}$  auf der Generatorwelle und einer Drehzahl von  $n = 1320 \text{ min}^{-1}$  auf der Kupplungswelle. Bei  $n = 3960 \text{ min}^{-1}$  beträgt das Moment des Motor nach Diag. 05 ca.  $M = 0,24 \text{ Nm}$ .

Mit der Drehzahl der Kupplungswelle, dem Motormoment und dem bekannten Trägheitsmoment der Zusatzmasse lässt sich die Verzögerungszeit der Kupplung beim Schalten nach (43) berechnen. So ergibt sich eine Schaltzeit von  $t = 0,68 \text{ s}$ .



Diag. 08: Drehzahlverlauf beim Schalten der Kupplung in Abhängigkeit von der Zeit

Aus dem Diagramm lässt sich eine Verzögerungszeit von ungefähr  $t = 0,7\text{s}$  für den Schaltvorgang der Kupplung ablesen. Dieser Wert stimmt mit dem zuvor berechneten Wert sehr gut überein.

## 7. Ausblick

Im aktuellen Versuchsaufbau lassen sich schon viele Kennwerte ermitteln.

Es ist jedoch noch nicht möglich eine direkte dynamische Drehzahlmessung durchzuführen, um z.B. die Drehzahländerungen beim Hochfahren des Gleichstrommotors mit angelegter Zusatzmasse in Abhängigkeit der Zeit direkt messen zu können. Dies ist im Moment nur über die Spannungs-Drehzahl-Proportionalität möglich, die mit zusätzlichen Messfehlern behaftet ist.

Aktuelle ist eine zeitabhängige Strommessung noch nicht möglich, um z.B. Stromspitzen beim Einschalten des Gleichstrommotors oder den Stromverlauf beim Schalten der Kupplung zu messen.

In der Weiterentwicklung des Versuchsaufbaus ist der Anschluss einer Konstantstromsenke geplant. Damit soll es möglich sein den Generator als Lastmoment betreiben zu können, um so schrittweise die Last erhöhen zu können bis die Kupplung rutscht.

Weiterhin wäre es denkbar den Versuchsaufbau für einen Steuerungs- und Regelungsversuchstand zu nutzen, um z.B. eine Drehzahlregelung für den Gleichstrommotor zu realisieren.

## 8. Zusammenfassung

Kupplungen sind ein häufig genutztes Maschinenelement, da sie Leistungen bei geringem Wellenversatz noch sicher übertragen können. Zu dem kommt der Vorteil, dass diese Energieübertragungsfunktion schaltbar realisiert werden kann, wodurch bei Bedarf der Leistungsfluss unterbrochen werden kann – z.B. bei der verwendeten elektromagnetischen Kupplung durch Abschalten der anliegenden Spannung.

Als Antriebseinheit wurde ein Gleichstrommotor mit Nebenschlusscharakteristik gewählt, der über einen Riemen mit der Primärwelle der Kupplung verbunden ist. Ebenso befindet sich abtriebsseitig ein Gleichstrommotor gleicher Bauart, der als Generator betrieben wird. Diese Motor-Kupplungs-Generator-Systeme werden in der Praxis meist zur Energierückgewinnung genutzt.

Um den Ein- und Ausschaltvorgang zeitlich variieren zu können, ist die Möglichkeit konstruiert worden, auf der Sekundärwelle eine oder mehrere Schwungmassen anbringen zu können. Da es sich um einen Versuchsstand für Praktika handelt, wurde im Entwurf und in der Konstruktion viel Wert auf Sicherheit gelegt. So wurde z.B. auf eine sichere, aber auch zugleich einfache Möglichkeit der Anbringung der Zusatzmasse geachtet. Zudem befindet sich um den Versuchsaufbau ein Kasten aus transparentem Acrylglas.

In den Entwurfsberechnungen wurden die wichtigsten Kennpunkte der statischen Analyse einbezogen. So wurde zur Auslegung der beiden Kupplungswellen zunächst die vom Riemen auf die Primärwelle zu übertragende Radial- und Umfangskraft berechnet. Mithilfe dieser Angriffskräfte war es möglich die Kraft- und Momentenverläufe der Primär- und Sekundärwelle aufzustellen, um daraus den Mindestdurchmesser der Welle und die Sicherheit gegen Fließen berechnen zu können.

Ein weiterer Punkt war die Auslegung der Wälzlager und die Auswahl einer geeigneten Kupplung.

Die Baugruppenmodelle und die Technischen Zeichnungen wurden mit dem CAD-System Creo Elements/Pro 5.0 University Edition erstellt.

Im letzten Teil der Projektarbeit erfolgte die praktische Versuchsauswertung mit einigen Testmessungen. Es wurden die Betriebseigenschaften der beiden Gleichstrommotoren ermittelt und mit der Theorie verglichen. Die statische Messung der Drehzahl erfolgte hierbei über einen Hall-Sensor und wurde mit einem Frequenzmessgerät ausgewertet, die dynamische Drehzahlmessung hingegen wurde über die Spannungs-Drehzahl-Proportionalität realisiert. Damit wurde es möglich den Schaltvorgang der Kupplung in zeitlicher Abhängigkeit aufzunehmen.

Summa summarum eignet sich der entworfene Praktikumsversuchsstand, um ein Motor-Kupplungs-Generator-System genauer kennen zu lernen und daran verschiedene Betriebskennwerte zu ermitteln. Ebenso wäre es denkbar, den Versuchsstand für Steuerungs- und Regelungsversuche zu verwenden, um z.B. eine Drehzahlregelung zu realisieren.

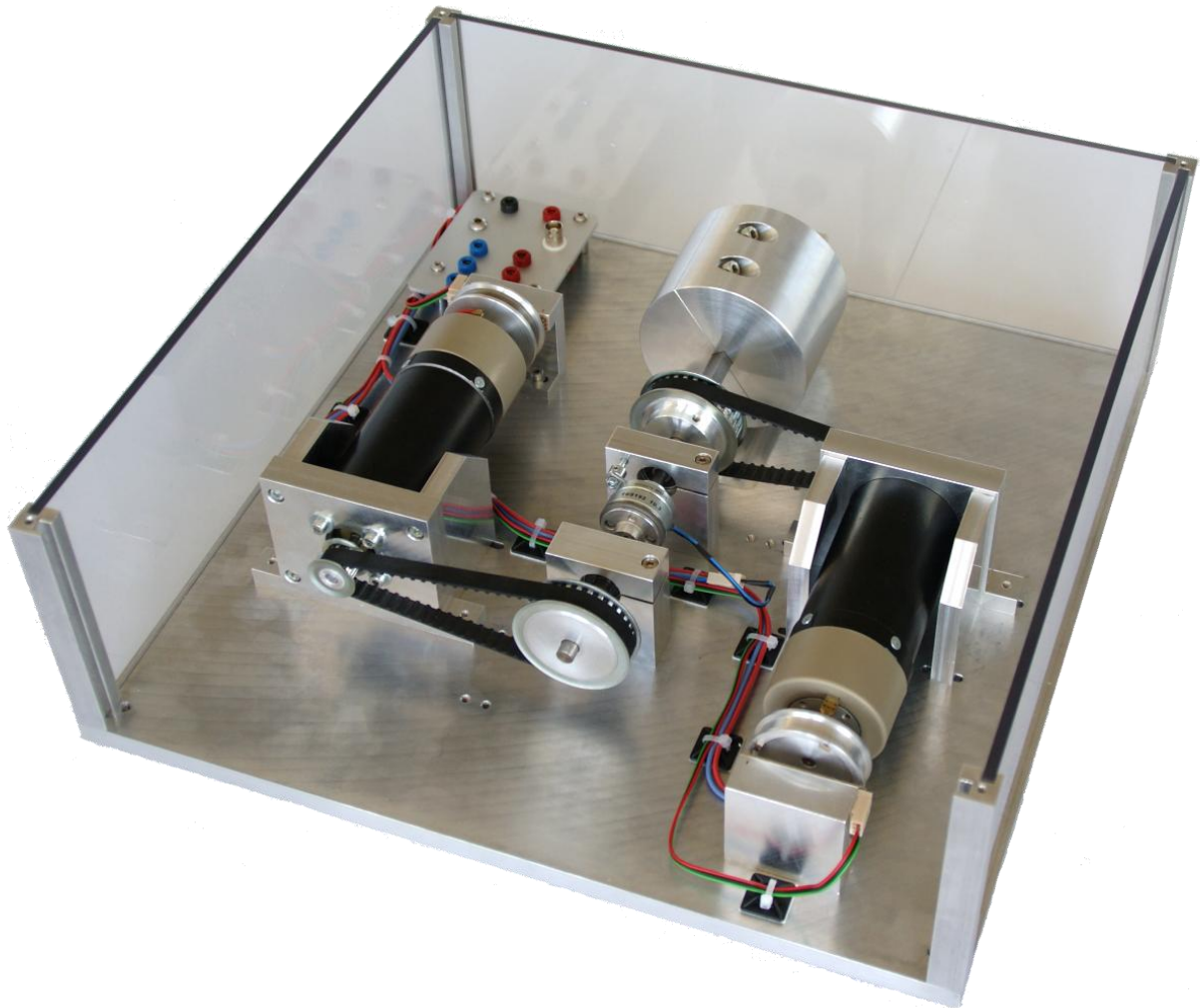


Abb. 14: Der real gefertigte Praktikumsversuchsstand

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 01: Aufbau des Versuchsstandes .....	1
Abb. 02: Aufbau eines Gleichstrommotors nach .....	2
Abb. 03: Drehmomenten-Drehwinkel Verlauf eines zweipolpaarigen Gleichstrommotors .....	5
Abb. 04: Kennlinien $I_A = f(M)$ .....	6
Abb. 05: Kennlinien $n = f(M)$ .....	6
Abb. 06: Winkel und Kräfte an einem Riementrieb .....	8
Abb. 07: Übersicht über Kupplungsarten .....	10
Abb. 08: Aufbau der wellenmontierten Elektromagnetkupplung .....	11
Abb. 09: Schaltzeiten beim Öffnen und Schließen der Magnetkupplung .....	12
Abb. 10: Draufsicht auf den Praktikumsversuchstand .....	14
Abb. 11: Freikörperbild der Welle I .....	18
Abb. 12: Freikörperbild von Welle I und Welle II .....	20
Abb. 13: Kraft- und Momentenverläufe beider Wellen .....	21
Abb. 14: Der real gefertigte Praktikumsversuchsstand .....	35

## Diagrammverzeichnis

Diag. 01: Spannungs-Drehzahl Diagramm für Gleichstrommotor im Leerlaufbetrieb .....	27
Diag. 02: Spannungs-Drehzahl Diagramm für verschiedene Lasten .....	28
Diag. 03: Strom-Drehzahl Diagramm für verschiedene Lasten .....	28
Diag. 04: Strom-Drehmoment Kennlinie des Gleichstrommotors .....	29
Diag. 05: Drehzahl-Drehmoment Kennlinie des Gleichstrommotors mit Nebenschlusscharakteristik.	29
Diag. 06: Spannungs-Drehzahl-Kennlinien von Motor und Generator im Betriebszustand.....	30
Diag. 07: Spannungsverlauf beim Schalten der Kupplung in Abhängigkeit von der Zeit .....	31
Diag. 08: Drehzahlverlauf beim Schalten der Kupplung in Abhängigkeit von der Zeit.....	32

## Tabellenverzeichnis

Tab. 01: Eigenschaften von Gleichstrommotoren .....	4
Tab. 02: Berechnung des Trägheitsmomentes für verschiedene Verzögerungszeiten .....	25

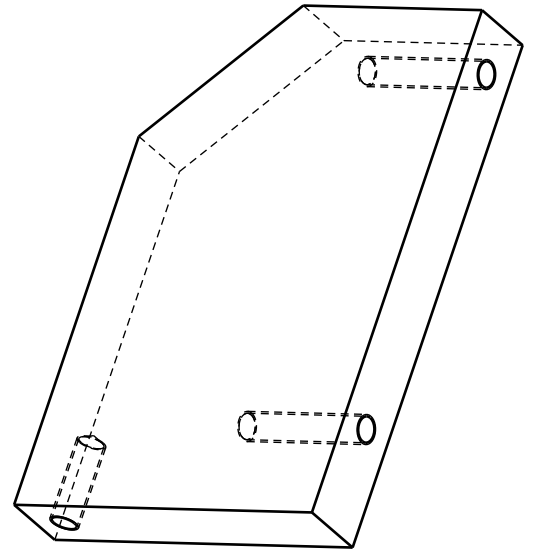
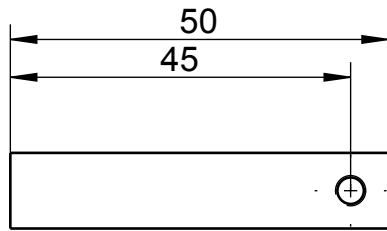
## Literaturverzeichnis

- [Böhm89] Werner Böhm: *Elektrische Antriebe* (Kamprath-Reihe). 3. Auflage. Vogel-Fachbuch 1989,
- [Ilea11] [http://www.ilea.uni-stuttgart.de/dateien/gp/Versuch\\_002\\_Gleichstrommaschine.pdf](http://www.ilea.uni-stuttgart.de/dateien/gp/Versuch_002_Gleichstrommaschine.pdf) (09.07.2011)
- [Kal91] Eberhard Kallenbach, Gerhard Bögelsack (Hrsg.): *Gerätetechnische Antriebe*. Hanser, München 1991.
- [Lin92] Linsmeier, K.-D.: *Elektromagnetische Bremsen und Kupplungen*. Landsberger/Lech: Verlag Moderne Industrie 1992.
- [Mag11] <http://www.magneta.de/index.php> (09.07.2011).
- [Rol09] D. Muhs, H. Wittel, D. Jannasch, J. Voßiek: *Roloff/Matek Maschinenelemente. Normung, Berechnung, Gestaltung*. 19. Auflage. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009.
- [RolT09] D. Muhs, H. Wittel, D. Jannasch, J. Voßiek: *Roloff/Matek Maschinenelemente. Tabellenbuch*. 19. Auflage. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009.
- [Ste08] Waldemar Steinhilper (Hrsg.), Bernd Sauer (Hrsg.): *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2: Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben*. 6. Auflage. Springer 2008.

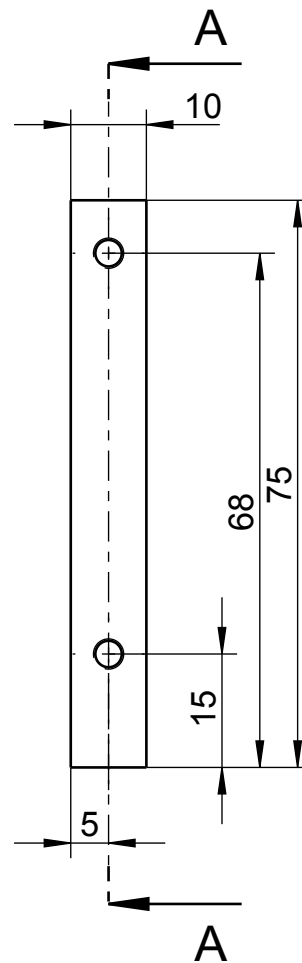
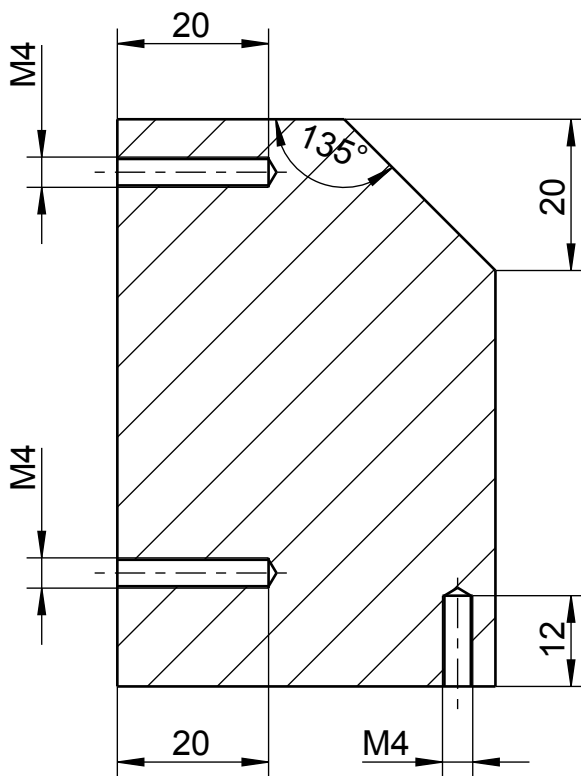
## Anhang

- Technische Zeichnungen
  - Motorhalterung
  - Stützteil Motorhalterung
  - Lagerhalterung (breit)
  - Lagerhalterung (schmal)
  - Primärwelle
  - Sekundärwelle
  - Sensorhalterung
  - Zusatzmasse 1 Variante B
  
- CD mit Projektdaten



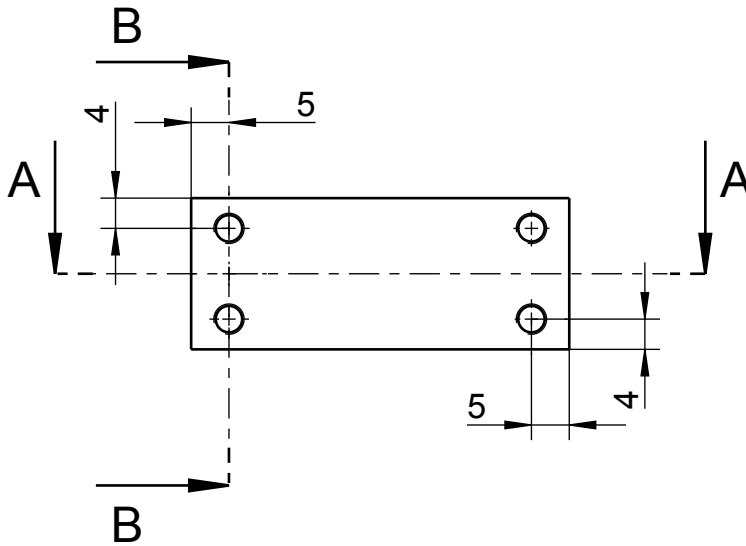
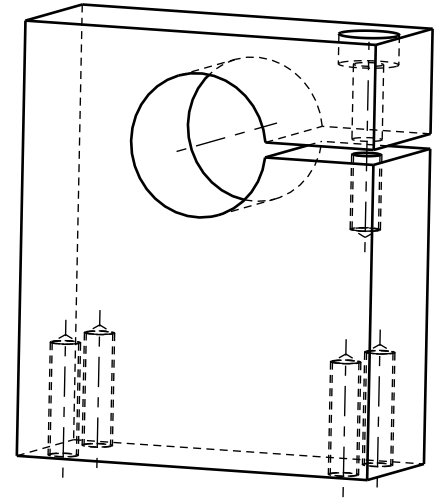


A-A

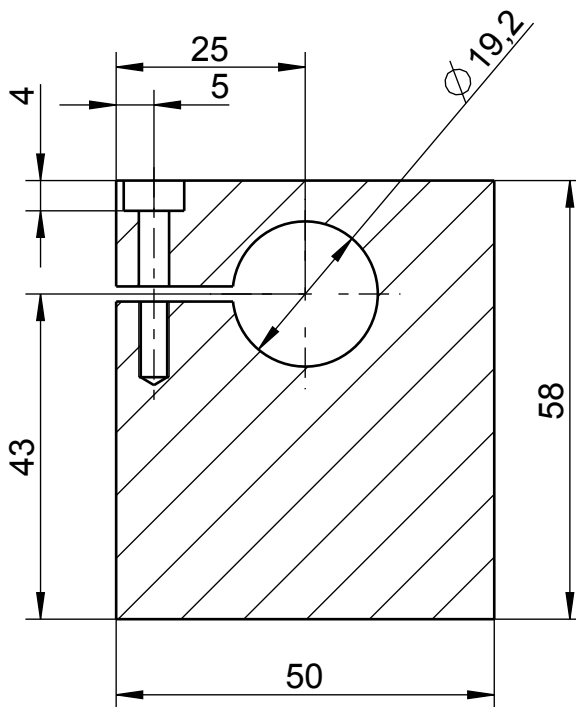


Anzahl: 4x

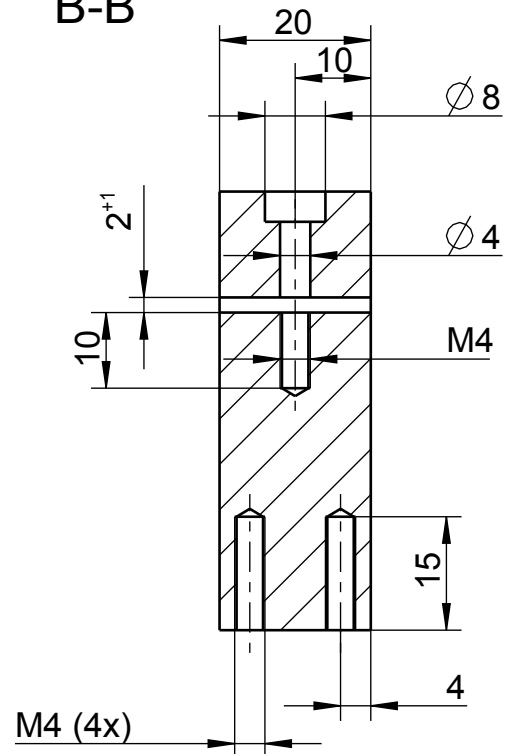
Name	Matrikel	Benennung	Maßstab	Werkstoff
Sebastian Weidlich		Stützteil Motorhalterung	1:1	Aluminium



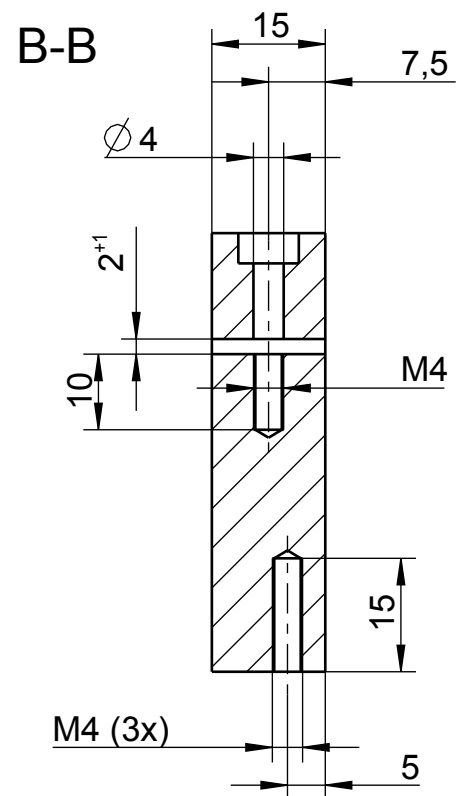
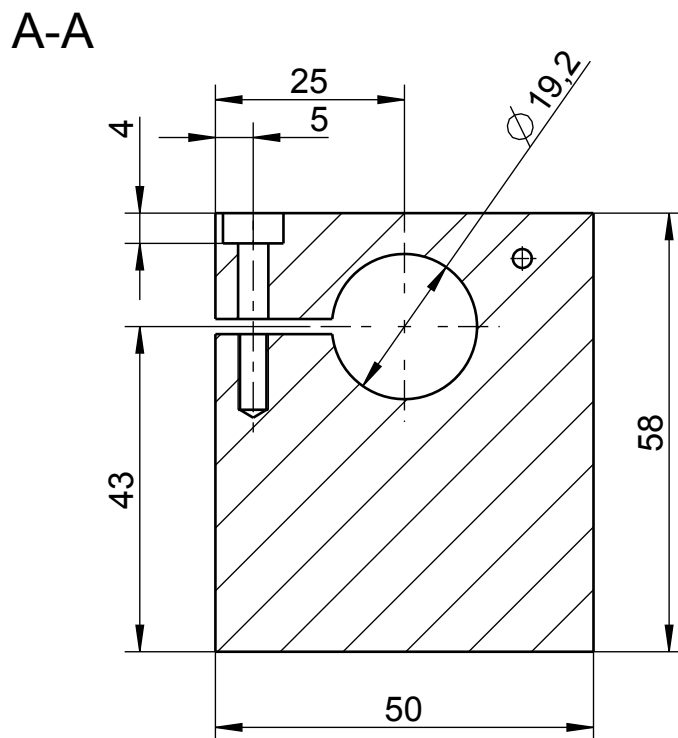
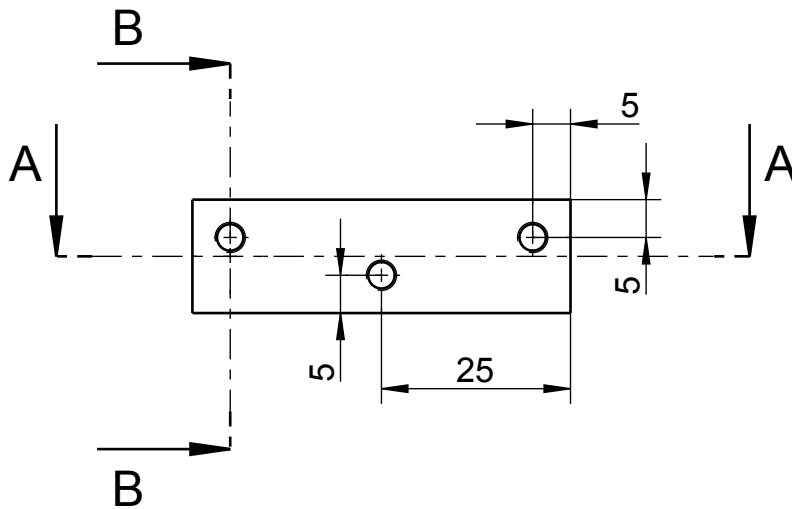
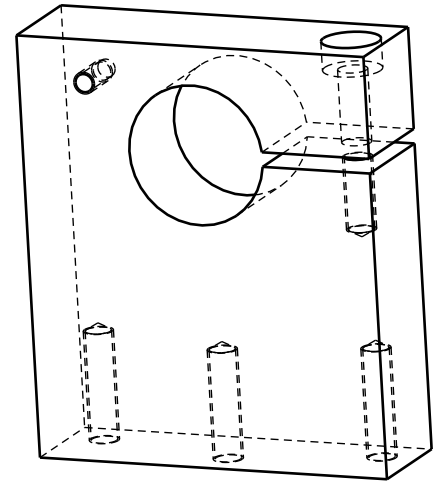
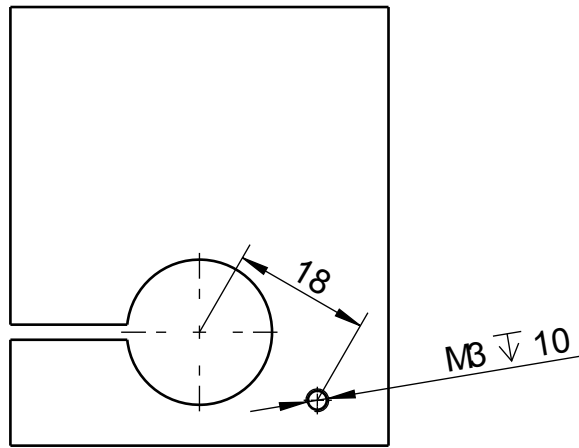
A-A



B-B

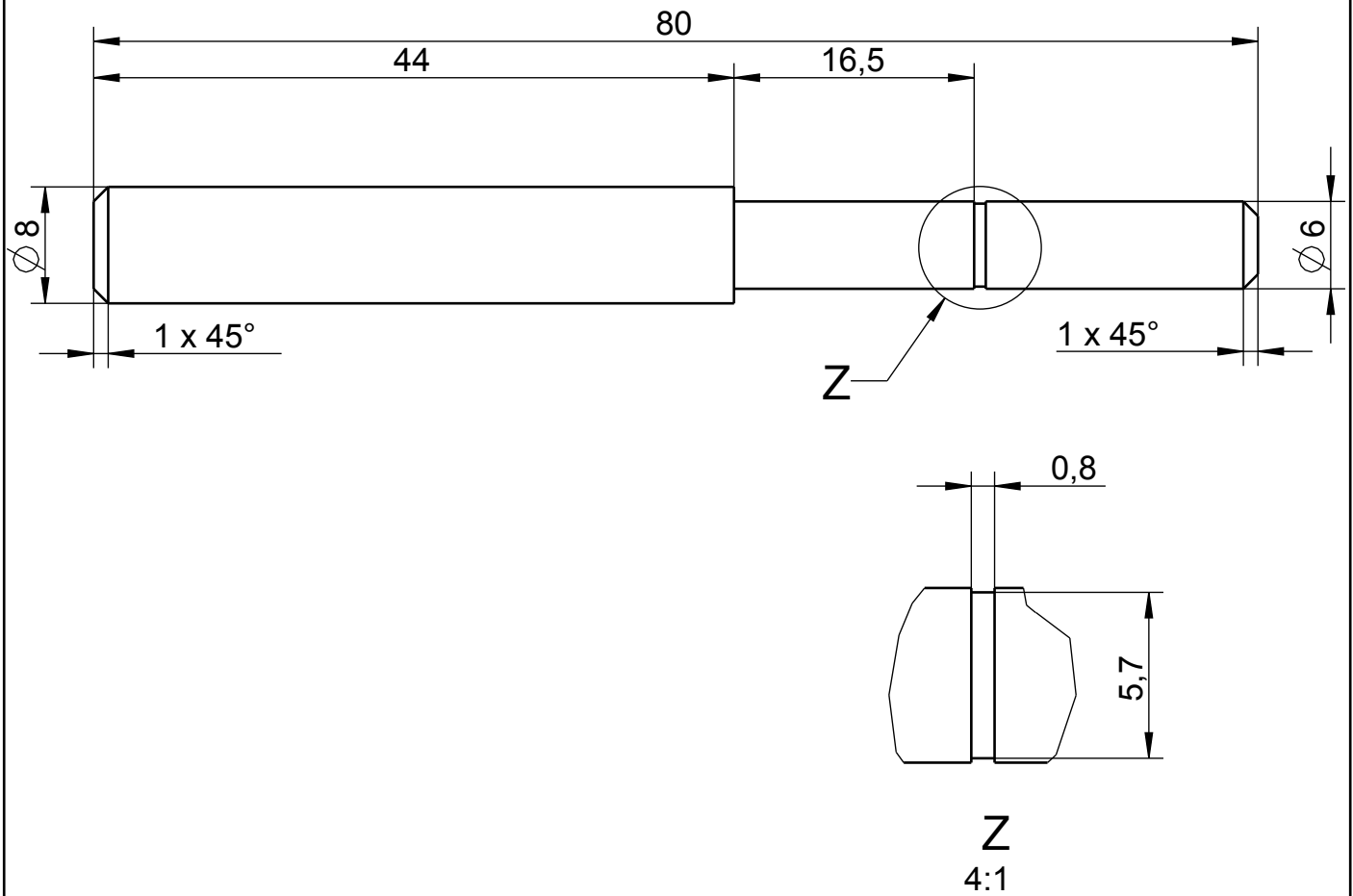
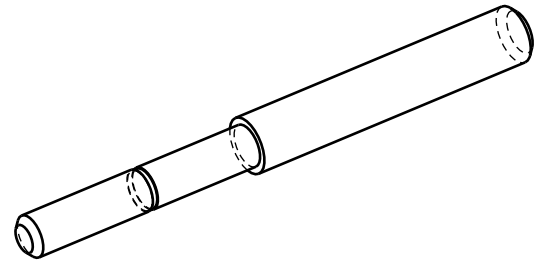


Name	Matrikel	Benennung	Maßstab	Werkstoff
Sebastian Weidlich		Lagerhalterung breit	1:1	Aluminium



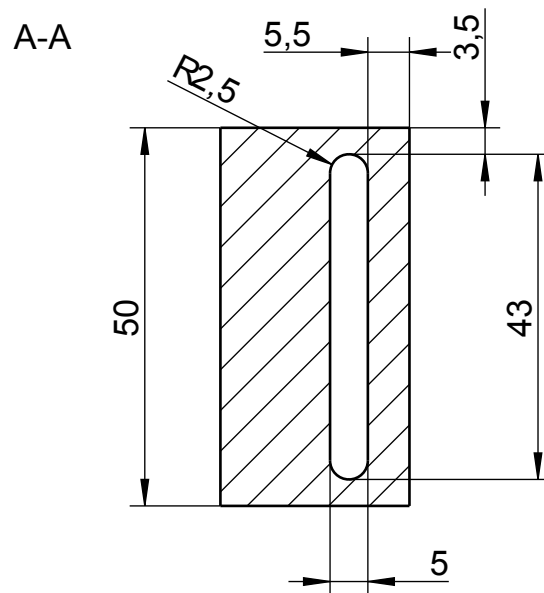
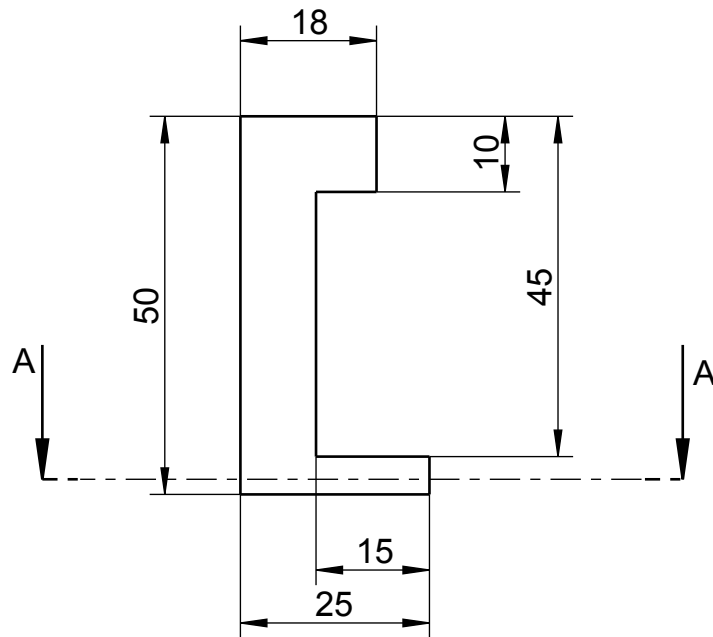
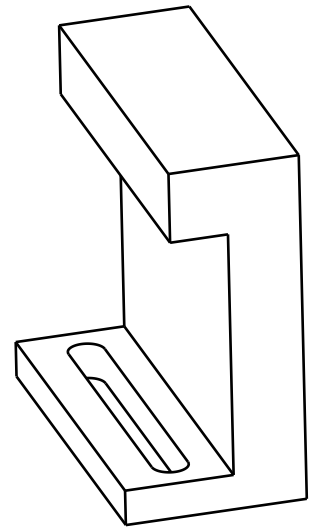
Anzahl: 2x

Name	Matrikel	Benennung	Maßstab	Werkstoff
Sebastian Weidlich		Lagerhalterung schmal	1:1	Aluminium



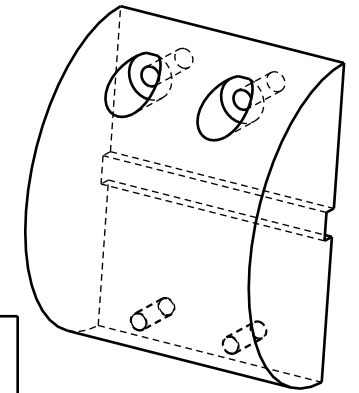
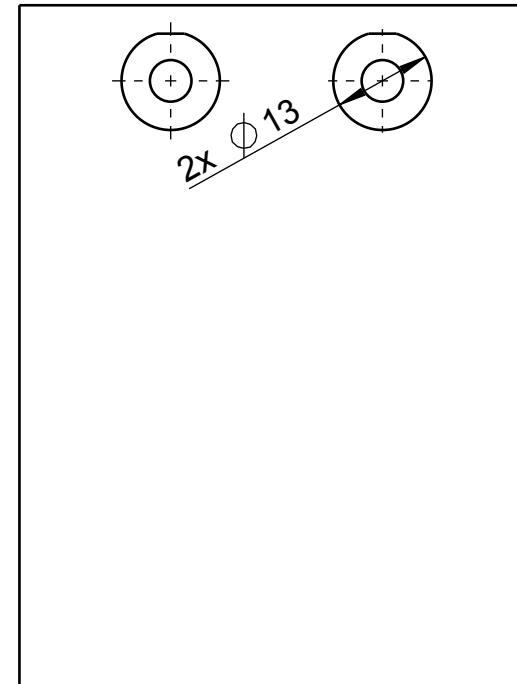
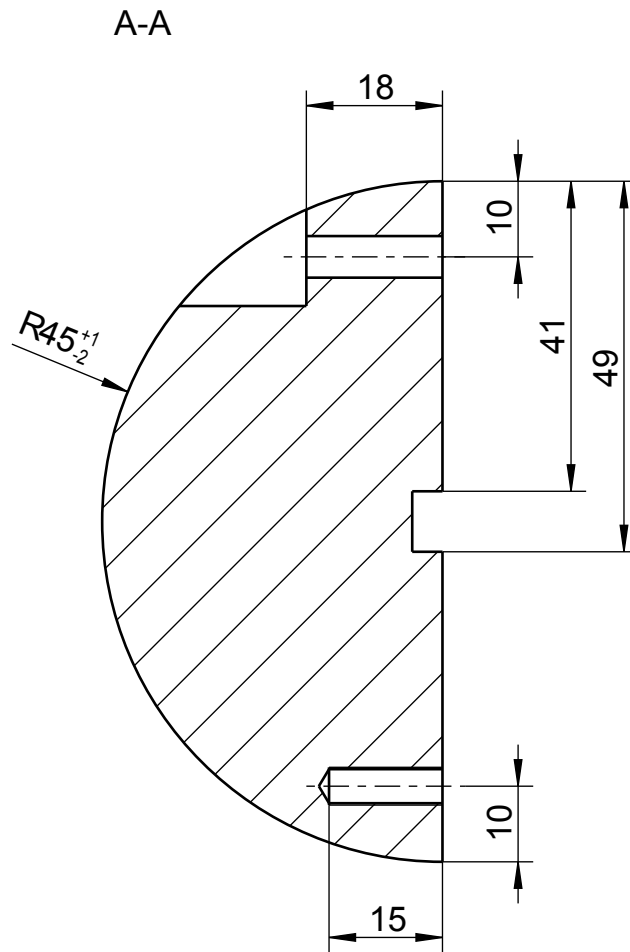
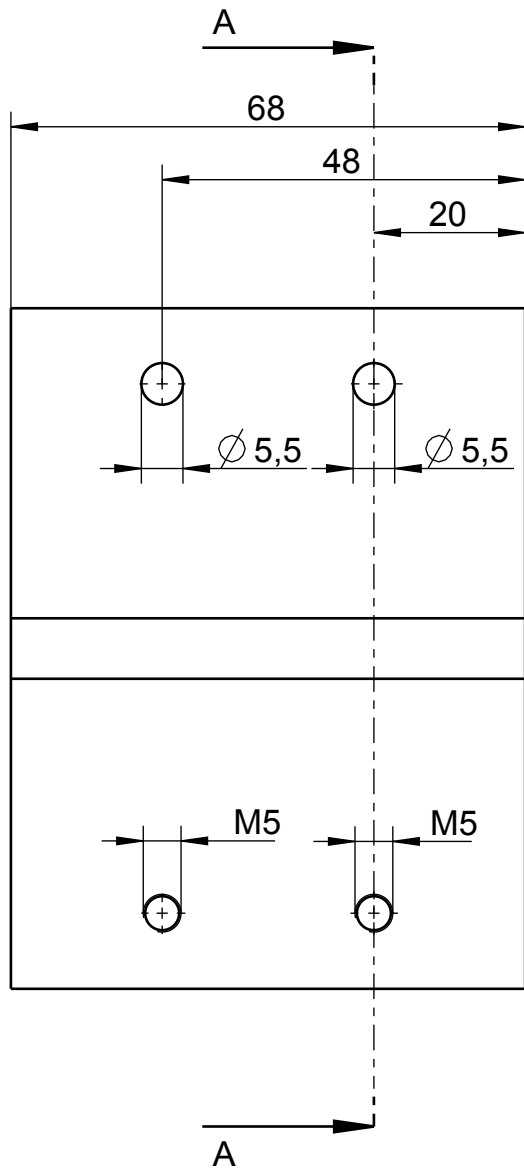
Name	Matrikel	Benennung	Maßstab	Werkstoff
Sebastian Weidlich		Primärwelle	2:1	Stahl





Anzahl: 3x

Name Sebastian Weidlich	Matrikel	Benennung Sensorhalterung	Maßstab 1:1	Werkstoff Aluminium
----------------------------	----------	------------------------------	----------------	------------------------



1:2

Anzahl: 2x

Name	Matrikel	Benennung	Maßstab	Werkstoff
Sebastian Weidlich		Zusatzmasse 1 Variante B	1:1	Stahl

## **Selbstständigkeitserklärung**

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche gekennzeichnet.

Chemnitz, den 29. Juli 2011

---

Sebastian Weidlich