

# Funktionserweiterung eines Schaltwalzenprüfstandes

Bachelor Thesis am Institut für Mechatronische Systeme im Maschinenbau  
Technische Universität Darmstadt



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Diese Arbeit wurde vorgelegt von

**Michael Heroth**

Betreuer:                   Andreas Bieseowski, M. Sc.  
                                  Ruben König, M. Sc.  
                                  Andreas Viehmann, M. Sc.  
Bearbeitungszeitraum:   20.04.2015 bis 10.08.2015

Darmstadt, den 10.08.2015

---

## Kurzfassung

---

**Schlagwörter:** Schaltaktorik, Getriebestufe, mechanische Synchronisierung, elektrische Synchronisierung, Schaltgabelposition, BLDC Motor, Wegmesssystem

In der vorliegenden Bachelor-Thesis werden die benötigten Schritte für die Entwicklung eines Konzeptes zur Abbildung einer Synchronisierung in Automobilgetrieben an einem Prüfstand und zur Erfassung von Messgrößen an der Schaltaktorik erläutert. Zu Beginn werden die Motivation und der aktuelle Stand der Technik dargestellt. Dem schließt sich der Ausgangszustand des Schaltwalzenprüfstandes und das geplante Grundkonzept der Prüfstandserweiterung an. Die Anforderungen an die Hardware werden zusammengefasst und anschließend die benötigten Komponenten ausgewählt. Dem folgen die Beschreibung der Montage und Inbetriebnahme sowie der Programmablauf des kompletten Prüfstands in dSPACE. Des Weiteren werden zusätzliche Erweiterungen des Gesamtkonzeptes dargestellt, die während der Bearbeitung der Bachelor-Thesis aufgekommen sind. Abschließend folgt eine Zusammenfassung mit Ausblick auf Arbeiten, die am Schaltwalzenprüfstand noch umgesetzt werden.

---

## Abstract

---

**Keywords:** shifting system, gear speed, mechanical synchronization, electrical synchronization, shift fork position, BLDC motor, position measuring system

In this bachelor thesis, the necessary steps for the development of the concept for picturing a synchronization at the test rig and for the entry of indicators are being described. First, the motivation and the state of technology are presented. Subsequently the initial state and the planned basic concept of the shift drum test rig are described. The hardware requirements are summarized and suitable hardware is chosen. The procedure of putting the system into operation and the technical implementation are stated. Furthermore, the program sequence of the whole test rig in dSPACE is described and an additional expansion of the overall concept is shown. In conclusion, a summary of the results and an overlook to further work on the shift drum test rig are given.

---

## Aufgabenstellung

---

---

## Erklärungen

---

Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 22 Abs. 7 APB der TU Darmstadt

Hiermit versichere ich, Michael Heroth, die vorliegende Bachelor-Thesis ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

In der abgegebenen Thesis stimmen die schriftliche und elektronische Fassung überein.

---

Datum

---

Unterschrift

---

Thesis Statement pursuant to § 22 paragraph 7 of APB TU Darmstadt

I herewith formally declare that I have written the submitted thesis independently. I did not use any outside support except for the quoted literature and other sources mentioned in the paper. I clearly marked and separately listed all of the literature and all of the other sources which I employed when producing this academic work, either literally or in content. This thesis has not been handed in or published before in the same or similar form.

In the submitted thesis the written copies and the electronic version are identical in content.

---

Date

---

Signature



---

Ich bin damit einverstanden, dass das Urheberrecht an meiner Arbeit zu wissenschaftlichen Zwecken genutzt werden kann.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift

---

# Inhaltsverzeichnis

---

KURZFASSUNG .....	II
ABSTRACT .....	II
AUFGABENSTELLUNG .....	III
ERKLÄRUNGEN .....	IV
INHALTSVERZEICHNIS .....	VI
ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	VIII
TABELLENVERZEICHNIS .....	IX
FORMELZEICHEN UND SYMBOLE .....	IX
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....	XI
<b>1 MOTIVATION UND ZIEL DER ARBEIT .....</b>	<b>12</b>
<b>2 STAND DER TECHNIK .....</b>	<b>13</b>
2.1 GETRIEBEAKTORIK .....	13
2.2 SYNCHRONISIERUNG .....	14
2.2.1 Mechanische Synchronisierung .....	15
2.2.2 Elektrische Synchronisierung .....	16
2.3 BÜRSTENLOSER GLEICHSTROMMOTOR .....	17
2.3.1 Aufbau .....	17
2.3.2 Funktionsprinzip und Grundgleichungen .....	18
2.3.3 Vier-Quadranten Betrieb .....	19
2.4 DSPACE - DS1104 R&D CONTROLLER BOARD .....	20
<b>3 AUSGANGSZUSTAND DES PRÜFSTANDS .....</b>	<b>21</b>
<b>4 GRUNDKONZEPT DER PRÜFSTANDSERWEITERUNG .....</b>	<b>23</b>
4.1 REALER TRIEBSTRANG .....	23
4.2 VEREINFACHTES KONZEPT ZUR PRÜFSTANDSERWEITERUNG .....	24
<b>5 ANFORDERUNGEN AN DIE EINZELNEN KOMPONENTEN .....</b>	<b>28</b>
5.1 GETRIEBESTUFE .....	28
5.2 PRÜFSTANDSMOTOR .....	28
5.3 MOTORCONTROLLER 2 .....	29
5.4 ABZUBILDENDE MASSENTRÄGHEIT .....	29
5.5 WEGMESSSYSTEM .....	29
5.6 BAUTEILE ZUR BEFESTIGUNG UND VERBINDUNGSELEMENTE .....	29

5.6.1	Lagerung der Getriebestufe.....	30
5.6.2	Befestigung der abzubildenden Massenträgheit.....	30
5.6.3	Aufhängung des Motors.....	30
<b>6</b>	<b>AUSWAHL GEEIGNETER HARDWARE.....</b>	<b>31</b>
6.1	GETRIEBESTUFE .....	31
6.2	PRÜFSTANDSMOTOR.....	34
6.2.1	Ergebene Rahmenbedingungen.....	34
6.2.2	Gegenüberstellung und Auswahl BLDC Motor und Schrittmotor.....	35
6.2.3	Angebotsauswahl Prüfstandsmotor.....	36
6.3	BAUTEILE ZUR BEFESTIGUNG .....	39
6.3.1	Lagerung der Getriebestufe.....	39
6.3.2	Aufhängung des Motors.....	40
6.3.3	Befestigung der abzubildenden Massenträgheit.....	42
6.4	WEGMESSSYSTEM .....	43
6.4.1	Prüfstandseinsatz .....	43
6.4.2	Fahrzeugeinsatz für die Referenzfahrt.....	45
6.4.3	Fahrzeugeinsatz zur absoluten Positionsmessung .....	45
<b>7</b>	<b>MONTAGE UND INBETRIEBNAHME .....</b>	<b>47</b>
7.1	ANSCHLUSS UND PROGRAMMIERUNG DES MOTORCONTROLLERS 2.....	47
7.2	UMBAU DER HARDWARE AM PRÜFSTAND.....	47
7.3	MONTAGE DER PRÜFSTANDSERWEITERUNG .....	48
<b>8</b>	<b>PROGRAMMIERUNG DES DSPACE CONTROLLERBOARDS .....</b>	<b>50</b>
8.1	PROGRAMMABLAUFPLAN .....	50
8.2	DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER UNTERPROGRAMME .....	51
8.2.1	Drehzahlregelung.....	52
8.2.2	Drehmomentregelung.....	52
8.2.3	RS-232 Kommunikation.....	53
<b>9</b>	<b>ERWEITERTERUNG DES GESAMTKONZEPTS .....</b>	<b>54</b>
9.1	ZUSÄTZLICHE PIEZOELEMENTE.....	54
9.2	SCHMIERUNG DER LAGER .....	55
9.3	ABDECKUNG DES PRÜFSTANDS .....	55
9.4	NOT-AUS-SCHALTER .....	56
<b>10</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>57</b>
<b>11</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>58</b>

---

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 2.1 Schaltaktorik eines automatisierten Schaltgetriebes [3].....	14
Abbildung 2.2 Aufgabe der Synchronisierung.....	14
Abbildung 2.3 Aufbau der Borg-Warner Synchronisierungseinheit .....	15
Abbildung 2.4 möglicher Aufbau einer elektrischen Synchronisierung.....	16
Abbildung 2.5 Aufbau eines BLDC Motors der Firma maxon [7] .....	17
Abbildung 2.6 Vier-Quadranten Betrieb [8] .....	19
Abbildung 3.1 aktueller Aufbau des Prüfstands, Mechanik.....	21
Abbildung 3.2 aktueller Aufbau des Prüfstands, Ansteuerung [11].....	22
Abbildung 4.1 schematische Darstellung des Triebstrangs mit realen Komponenten .....	23
Abbildung 4.2 Vereinfachtes Grundkonzept der Prüfstandserweiterung, Mechanik .....	25
Abbildung 4.3 Grundkonzept der Prüfstandserweiterung, Ansteuerung.....	26
Abbildung 6.1: 7DCT300 [3] .....	31
Abbildung 6.2 Umsetzung der mechanischen und elektrischen Synchronisierung.....	33
Abbildung 6.3 Verlauf des Schleppmoments an einer mechanischen Synchronisierung [4].....	34
Abbildung 6.4 Drehzahl über Drehmoment.....	38
Abbildung 6.5 Getriebestufe mit Seitenteilen .....	39
Abbildung 6.6 Anbindung an den Motor mittels gedrehtem Verbindungselement.....	41
Abbildung 6.7 Verbindungselement in Schnittdarstellung .....	41
Abbildung 6.8 Montage der Massenträgheit mittels Kegelspannsatz.....	42
Abbildung 6.9 Wegmessung, Messprinzipien mit Beispielen.....	43
Abbildung 6.10 Anordnung Lasersensor.....	44
Abbildung 6.11 Referenzfahrt, Magnetsensor .....	45
Abbildung 6.12 absolutes Magnetwegmesssystem der Firma Willtec [14].....	46
Abbildung 7.1 aktueller Hardwareaufbau .....	48
Abbildung 7.2 reale Prüfstandserweiterung .....	49
Abbildung 8.1 Programmablaufplan in dSPACE.....	51
Abbildung 8.2 Regelkreis der Drehzahlregelung.....	52
Abbildung 8.3 Regelkreis der Drehmomentregelung.....	53
Abbildung 9.1 Montageort der Piezoelemente.....	54
Abbildung 9.2 Ölkreislauf [15] .....	55
Abbildung 9.3 Plexiglasabdeckung mit Not-Aus-Schalter.....	56



---

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 6.1 Unterschiede zwischen den einzelnen Motorvarianten .....	35
Tabelle 6.2 Motordaten des EC45 250W aus dem Datenblatt.....	36

---

## Formelzeichen und Symbole

---

F	Kraft
I	Strom
s	Weg
B	magnetische Flussdichte
l	Länge
M	Moment
r	Radius
$\varphi$	Drehwinkel des Motors
$k_M$	Drehmomentkonstante
N	Anzahl der Windungen
$U_{ind}$	induzierte Spannung
$\Phi$	magnetischer Fluss
t	Zeit
$k_E$	Spannungskonstante
$n_{krit}$	biegekritische Drehzahl
f	Biegeauslenkung
E	Elasizitätsmodul
m	Masse
g	Erdbeschleunigung
d	Durchmesser
$M_{Synchro}$	Moment an der Synchronisierung
$M_{gefordert, Motor}$	vom Motor gefordertes Moment
i	Übersetzung

---

$P_{\min}$	minimal geforderte Leistung
$\tau_s$	thermische Zeitkonstante
$U$	Spannung
$n_0$	Leerlaufdrehzahl
$M_{\max}$	Haltemoment
$I_{\max}$	Anlaufstrom
$R$	ohmscher Widerstand
$\Theta_{\text{Motor}}$	Rotorträgheitsmoment des Motors
$\Theta_{\text{Last}}$	Massenträgheitsmoment der Last

---

## Abkürzungsverzeichnis

---

IMS	Institut für mechatronische Systeme im Maschinenbau
DC Motor	Gleichstrommotor
BLDC Motor	bürstenloser Gleichstrommotor
Gl.	Gleichung
HRS	<i>High Resolution Signal</i>
TG	Teilgetriebe
DKG	Doppelkupplungsgetriebe
NVH	<i>Noise, Vibration, Harshness</i>
A/D Wandler	Analog/Digital Wandler
D/A Wandler	Digital/Analog Wandler
I/O	<i>Input/Output</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
Kfz	Kraftfahrzeug
PKW	Personenkraftwagen
RS-232	Standard für eine serielle Schnittstelle
R	Rückwärtsgang
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
&	logische UND-Verknüpfung
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
D-Sub	<i>D-Subminiature</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>

---

## 1 Motivation und Ziel der Arbeit

---

Zu den größten Entwicklungszielen der Automobilindustrie zählen aktuell die CO<sub>2</sub>- und Kraftstoffverbrauchsreduzierung. Dieser Trend wird vor allem durch die Erwartungen des Verbrauchers und durch politische Vorgaben gestärkt. Die Entwicklung alternativer Fahrzeugantriebe wurde hierdurch vorangetrieben und aktuell liegt eine Koexistenz von Elektro- und Hybridantrieben am Markt vor [1]. Durch die Hybridisierung können Getriebeverluste mittels elektrischer Synchronisierungen reduziert und so der CO<sub>2</sub>- und Kraftstoffverbrauch gesenkt werden. Zur Optimierung der elektrischen Synchronisierung ist eine umfassende Untersuchung des Schaltvorgangs mit elektrischer Synchronisierung notwendig. Dieses Ziel verfolgt aktuell das Institut für mechatronische Systeme im Maschinenbau (IMS) der TU Darmstadt.

Außerdem wird an dem übergeordneten Projekt „Optimierung der Schaltaktorik“ eines Doppelkuppelungsgetriebes (DKG) gearbeitet. Hierbei soll das DKG im Hinblick auf verschiedene Zielfunktionen, wie beispielsweise *Noise*, *Vibration*, *Harshness* (NVH) sowie Schaltdynamik und Kosten, mit Hilfe eines Simulationsmodells, untersucht werden. Zum Abgleich des Simulationsmodells und zur Verifizierung der Ergebnisse sollen praktische Versuche an einem Schaltwalzenprüfstand durchgeführt werden.

Es existiert bereits ein institutseigener Schaltwalzenprüfstand, an welchem Wirkungsgradmessungen durchgeführt und Prozessgrößen in Echtzeit aufgezeichnet werden können. Mit diesem aktuellen Prüfstandkonzept ist es allerdings nicht möglich eine definierte Last, welche beispielsweise durch den Synchronisierungsvorgang entsteht, an der Schaltgabel aufzubringen. Bisher fährt die Schaltgabel gegen einen Anschlag, was den realen Vorgang nicht genau genug abbildet.

Ziel dieser Arbeit ist es, den Prüfstand funktionell so zu erweitern, dass ein synchronisierter Schaltvorgang an der Schaltgabel abgebildet werden kann und es somit möglich ist, für beide Projekte Untersuchungen durchzuführen. Neben der elektrischen Synchronisierung soll deshalb auch eine mechanische Synchronisierung abgebildet werden. Weiterhin sollen Konzepte zur Erfassung zusätzlicher Messgrößen, wie beispielsweise die aktuelle Position der Schaltgabel, entwickelt werden, um so viele Daten wie möglich zu erfassen. Abschließend sollen einzelne Erweiterungen am bereits vorhandenen Prüfstandsaufbau umgesetzt werden. Dazu gehört neben dem Hardwareaufbau auch die Ansteuerung mit Hilfe des eingesetzten Controllerboards.

---

## 2 Stand der Technik

---

In diesem Kapitel sollen die Grundlagen für das Verständnis dieser Arbeit gelegt werden. Zu Beginn wird ein kuzer Einblick in die Getriebeaktuatorik gegeben und gezeigt, wie eine rotatorische Bewegung in eine translatorische Bewegung, die zum Schalten eines Gangs benötigt wird, umgewandelt wird. Anschließend werden die zwei Möglichkeiten der Drehzahlanpassung aufgezeigt, welche vor dem Einlegen eines Gangs notwendig ist. In den weiteren Unterkapiteln wird die Funktion der wichtigsten Komponenten, die später in der Prüfstandserweiterung ihren Einsatz finden, erläutert und mit Formeln beschrieben. Hierzu gehören der bürstenlose Gleichstrommotor (BLDC) sowie das DS1104 R&D Controller Board von dSPACE.

---

### 2.1 Getriebeaktuatorik

---

Getriebe werden im Automobil dem Triebstrang zugeordnet und befinden sich zwischen dem Motor und dem Achsantrieb. Die Aufgabe eines Getriebes ist es, die Drehzahl und das Drehmoment zu wandeln. Deshalb wird ein Getriebe auch als Drehzahl-Drehmoment-Wandler bezeichnet [2].

Die eigentliche Wandlung wird mit Hilfe von verschiedenen Gängen in einem Getriebe realisiert. Um die Gänge einzulegen beziehungsweise zu wechseln gibt es zwei grundlegende Möglichkeiten:

- per Hand (Handschatgetriebe)
- automatisiert über einen Aktor (Schaltaktorik)

Da am vorhandenen Prüfstand nur automatisierte Schaltgetriebe mit einer Schaltaktorik abgebildet werden sollen, wird auf das Handschatgetriebe hier nicht weiter eingegangen.

Der Aufbau einer Schaltaktorik, wie sie in automatisierten Schaltgetrieben eingesetzt wird, ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Der Schaltaktorikmotor treibt über ein Stirnradgetriebe die Schaltwalze an. Die Schaltwalze selbst ist mit einer Nut ausgestattet, in welcher sich ein Gleitstein bewegt. Dieser Gleitstein ist wiederum mit der Schaltstange und diese mit der Schaltgabel verbunden. Dreht sich nun der Schaltaktorikmotor, wird die rotatorische Bewegung, über die Kurve der Nut und den Gleitstein, in eine translatorische Bewegung umgewandelt (Kulissengetriebe). Mit diesem Aufbau ist es möglich, die Schaltgabel, welche letztendlich den Gang ein bzw. auslegt, über den Schaltaktorikmotor translatorisch zu verfahren.

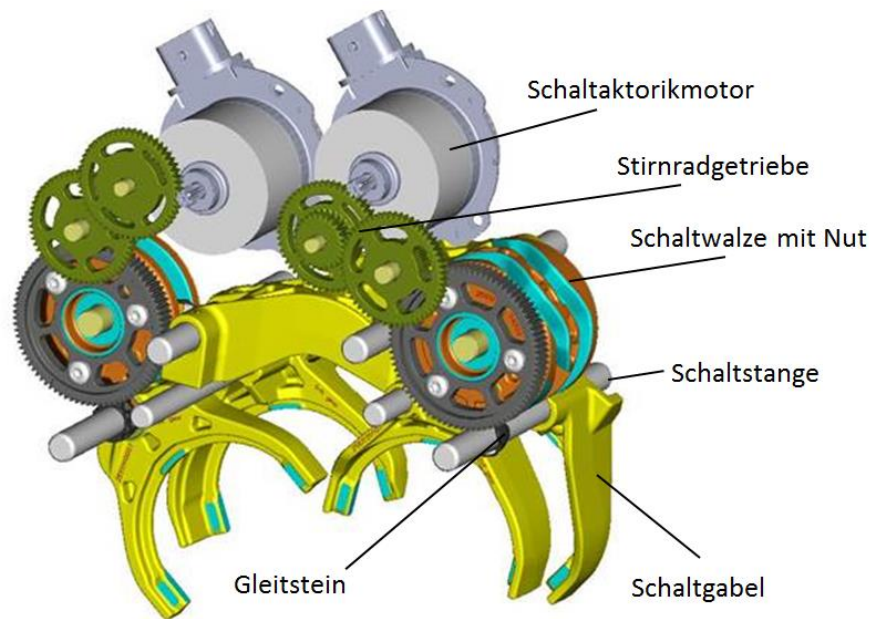


Abbildung 2.1 Schaltaktorik eines automatisierten Schaltgetriebes [3]

## 2.2 Synchronisierung

Das Einlegen eines Ganges besteht darin, das vom Antriebsmotor angetriebene Schaltrad (Abbildung 2.2) formschlüssig mit der Schaltmuffe, welche das Drehmoment anschließend an die Abtriebsachse weiterleitet, zu verbinden. Die translatorische Bewegung der Schaltmuffe übernimmt hierbei die Schaltgabel, welche wie in Kapitel 2.1 beschrieben von einem Schaltaktorikmotor angetrieben wird. Zur Vereinfachung wird im Weiteren die Schaltstange und die Schaltgabel nur noch als Schaltgabel bezeichnet. Da die Schaltmuffe und das Schaltrad vor dem Einlegen eines Gangs verschiedene Drehzahlen besitzen und nur nahe dem Gleichlauf geschaltet werden kann, müssen diese zuvor angeglichen werden. Diese Aufgabe übernimmt im Getriebe die Synchronisierung. Im Folgenden wird hier zwischen der mechanischen und der elektrischen Synchronisierung unterschieden.

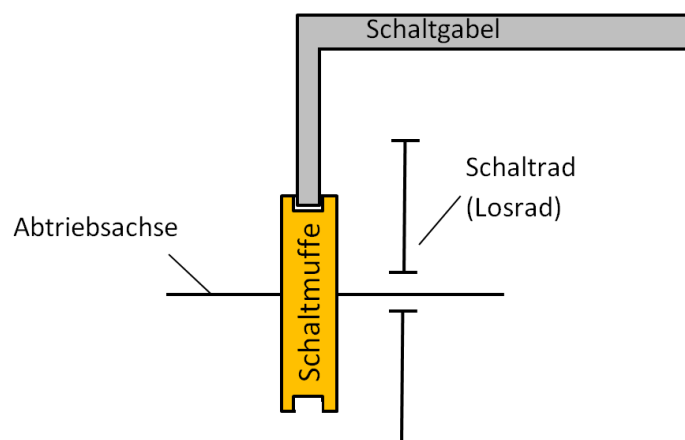


Abbildung 2.2 Aufgabe der Synchronisierung

---

### 2.2.1 Mechanische Synchronisierung

---

Die mechanische Synchronisierung wird in Handschaltgetrieben und automatisierten Schaltgetrieben am häufigsten eingesetzt. Es existieren verschiedene Bauformen, wobei die Grundform, wie in Abbildung 2.3 dargestellt, die Borg-Warner Synchronisierungseinheit ist [4].

Im Ausgangszustand vor dem Einlegen eines Gangs dreht das Schaltrad (Abbildung 2.3) mit einer anderen Drehzahl als die Schaltmuffe und der Synchronkörper. Wird das Schalten eines Gangs von dem Schaltaktorikmotor gestartet, drückt die Schaltgabel die Schaltmuffe gegen den Synchronring und verschiebt diesen gegen den Kupplungskörper des Schaltrads. Die Angleichung der beiden Drehzahlen wird nun mittels Reibung zwischen dem Synchronring und dem Kupplungskörper erreicht. Sind Schaltrad und Schaltmuffe im Gleichlauf, erfolgt eine mechanische Entriegelung und es kann durchgeschaltet werden. Nun ist das Schaltrad formschlüssig über die Schaltmuffe und den Synchronkörper mit der Abtriebswelle verbunden.

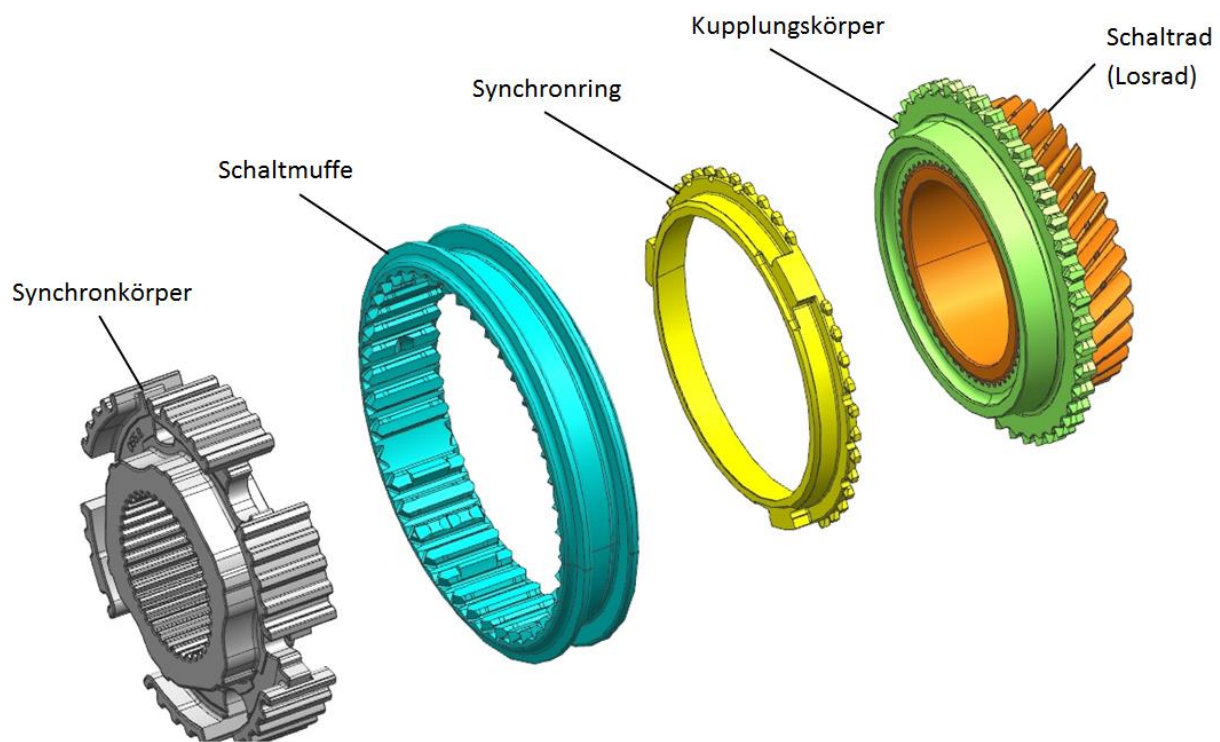


Abbildung 2.3 Aufbau der Borg-Warner Synchronisierungseinheit

---

### 2.2.2 Elektrische Synchronisierung

---

Wird ein Elektromotor anstatt eines Verbrennungsmotors als Antrieb verwendet, ist es möglich, die Gänge elektrisch zu synchronisieren. Die Anpassung der Drehzahlen zwischen Schaltmuffe und Schaltrad wird hierbei nicht durch Reibung, sondern durch die Drehzahlregelung der elektrischen Maschine realisiert. Deshalb kann bei der elektrischen Synchronisierung der Synchronring entfallen (Abbildung 2.4). Die aktuellen Drehzahlen von Schaltmuffe und Losrad werden über Sensoren ermittelt und der Motor anschließend auf die notwendige Drehzahl geregelt. Es liegt nach erfolgreicher Regelung des Motors keine bzw. in der Praxis nur noch eine sehr kleine Differenzdrehzahl vor. Die Schaltmuffe kann nun Ein- und Ausgangsseite formschlüssig verbinden.

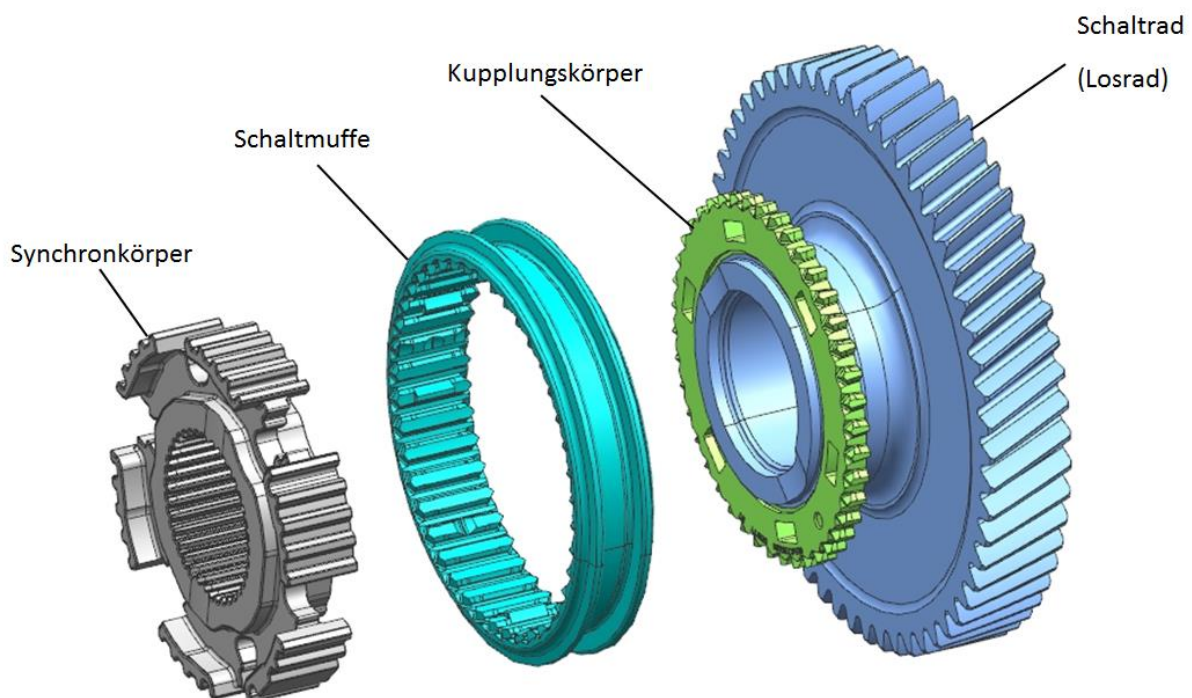


Abbildung 2.4 möglicher Aufbau einer elektrischen Synchronisierung



---

## 2.3 Bürstenloser Gleichstrommotor

---

Da im aktuellen Aufbau und auch in der Prüfstandserweiterung jeweils ein Bürstenloser Gleichstrommotor (BLDC) verwendet wird, soll dieses Kapitel die Grundlagen dieses Motors erläutern. Zu Beginn werden der Aufbau und der Unterschied zum bürstenbehafteten Gleichstrommotor dargestellt. Dem schließt sich das Funktionsprinzip, welches mit der Herleitung der Grundgleichungen erläutert wird, an. Abschließend wird der 4-Quadrantenbetrieb erklärt.

---

### 2.3.1 Aufbau

---

Im Gegensatz zum bürstenbehafteten Gleichstrommotor wird die Umkehr der Stromrichtung (Kommutierung) in den einzelnen Wicklungen beim BLDC Motor nicht durch einen mechanischen Kommutator, auf welchem Bürsten gleiten, durchgeführt, sondern elektronisch. Der BLDC ist deshalb wartungsfrei, da keine verschleißbehaftete Kommutierung vorhanden ist. Der große Nachteil des Gleichstrommotors wurde dadurch eliminiert [5].

Vergleicht man den bürstenbehafteten Gleichstrommotor mit dem BLDC Motor erkennt man, dass die Anordnung der aktiven Teile vertauscht wurde. Der Rotor besteht beim BLDC aus Permanentmagneten und die um  $120^\circ$  versetzten Wicklungen sind im Stator platziert. Dieser Aufbau entspricht dem des Synchronmotors, weshalb er auch von Binder als polradlagegesteuerte Synchronmaschine [6] bezeichnet wird. Allerdings hat sich die Zuordnung zu den Gleichstrommotoren weitgehend durchgesetzt.

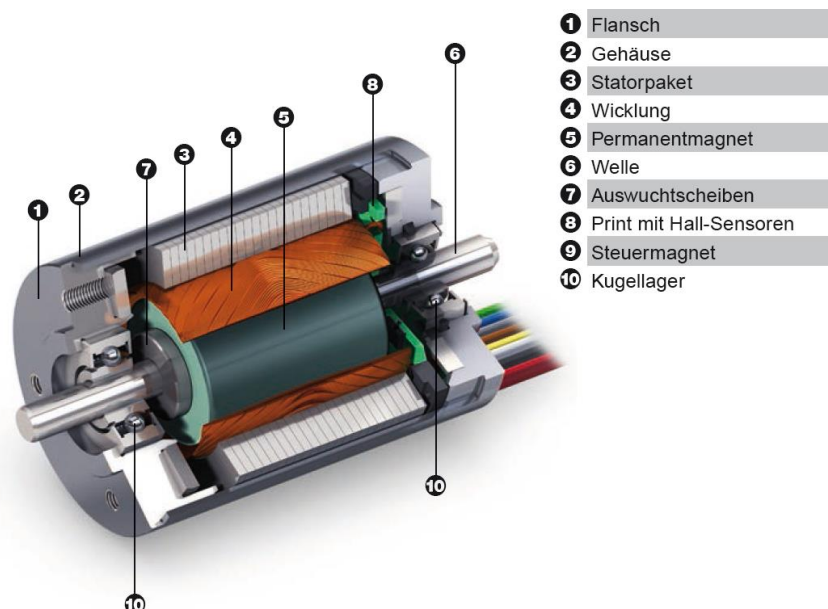


Abbildung 2.5 Aufbau eines BLDC Motors der Firma maxon [7]

In Abbildung 2.5 ist ein BLDC Motor der Firma maxon im Schnitt dargestellt. Man erkennt das Statorpaket (3) mit der festen Wicklung (4), den rotierenden Permanentmagneten (5) als Rotor und die Hallsensoren (8).

---

### 2.3.2 Funktionsprinzip und Grundgleichungen

---

Der BLDC Motor arbeitet, genauso wie der bürstenbehaftete Gleichstrommotor, nach dem elektrodynamischen Prinzip. Der einzige Unterschied besteht darin, dass beim BLDC sich der Permanentmagnet relativ zur festen Leiterschleife bewegt und beim DC Motor sich die Leiterschleife relativ zum festen Permanentmagneten bewegt. Dieser Unterschied hat bei der Bildung der Lorentzkraft allerdings keinen Einfluss, da nur die Relativbewegung beider Komponenten zueinander von Bedeutung ist. Die Lorentzkraft berechnet sich nach Gl. (2.1) [6].

$$\vec{F} = \int_l I \cdot (d\vec{s} \times \vec{B}) \quad (2.1)$$

Hierbei entspricht  $\vec{F}$  der Lorentzkraft,  $I$  dem Strom, welcher durch den Leiter mit der Länge  $l$  fließt und  $d\vec{s}$  beschreibt ein differentiell kurzes Leiterstück, welches sich im Magnetfeld  $\vec{B}$  befindet.

Aus dieser Grundgleichung lässt sich Gl.(2.2) herleiten. Diese beschreibt den Zusammenhang zwischen Motormoment und Statorstrom.

$$M = k_M \cdot I \quad (2.2)$$

Zwischen Motormoment und Statorstrom ist eine direkte Proportionalität zu erkennen. Die Drehmomentkonstante  $k_M$  ist direkt proportional zur magnetischen Flussdichte  $B$ , der Anzahl der Windungen  $N$  und zur Geometrie des Motors.

Um ein zeitlich konstantes bzw. regelbares Moment am Motor zu erhalten muss der Statorstrom über die elektrische Kommutierung mit der Rotorposition abgestimmt werden. Diese Aufgabe übernimmt im realen System der Motorcontroller, welcher die aktuelle Position über die Hallsensoren ermittelt und den Motor mit blockförmigem Gleichstrom speist (Blockstromspeisung). Da die genaue Funktion der Blockstromspeisung für diese Arbeit von geringerer Bedeutung ist, wird hier nicht näher darauf eingegangen. Weitere Informationen über die Blockstromspeisung und zur alternativen Sinusstromspeisung sind in [6] zu finden.

Einen ähnlichen Zusammenhang wie zwischen Statorstrom und Drehmoment lässt sich auch zwischen der induzierten Spannung im Stator und dem Drehwinkel  $\phi$  herleiten. Zur Berechnung wird die Betrachtungsweise der Ruhinduktion verwendet und somit die induzierte Spannung mit Hilfe des Induktionsgesetzes, nach Gl. (2.3), berechnet.

$$U_{ind} = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.3)$$

Hierbei entspricht  $U_{ind}$  der induzierten Spannung,  $N$  der Anzahl der Wicklungen im Stator und  $\phi$  dem magnetischen Fluss.

Die gesamte induzierte Spannung lässt sich nach Gl. (2.4) bestimmen.

$$U_{ind} = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} = k_E \cdot \omega \quad (2.4)$$

Die Grundaussage dieser Gleichung ist, dass die induzierte Spannung proportional zur Drehzahl des Motors ansteigt. Die Proportionalitätskonstante  $k_E$  wird als Spannungskonstante bezeichnet und entspricht der Drehmomentkonstanten aus Gl. (2.2).

### 2.3.3 Vier-Quadranten Betrieb

Der spätere Aufbau der Prüfstandserweiterung erfordert, dass ein BLDC Motor eine Massenträgheit auf eine einstellbare Drehzahl beschleunigt. Da hier die Drehzahl und das Moment des Motors in die gleiche Richtung zeigen, spricht man von Motorbetrieb. Anschließend soll der BLDC Motor mit einem konstanten Moment gegen diese Drehzahl arbeiten. Hier spricht man von Generatorbetrieb, da Moment und Drehzahl unterschiedliche Drehrichtungen aufweisen. Dieser Ablauf soll in beide Richtungen funktionieren, weshalb vier verschiedene Fälle eintreten können. Trägt man diese in einem Koordinatensystem auf, entstehen vier Quadranten (Abbildung 2.6) und man spricht deshalb auch vom Vier-Quadranten Betrieb.

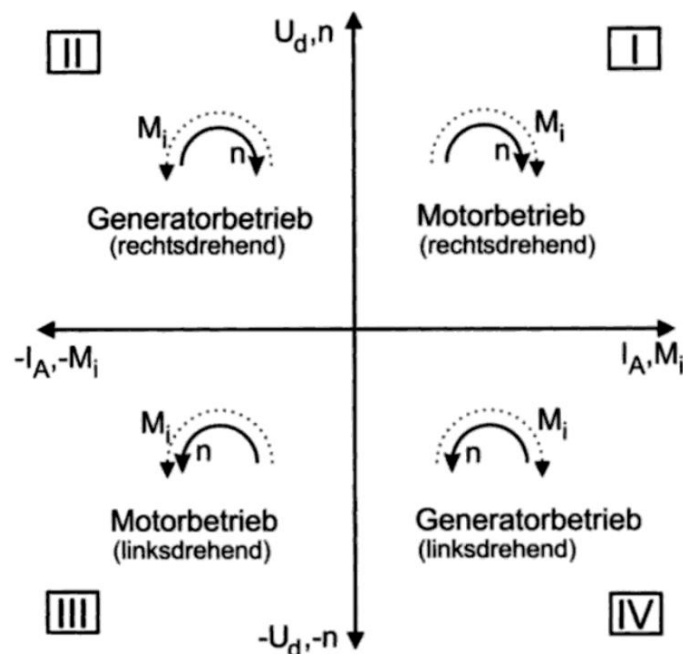


Abbildung 2.6 Vier-Quadranten Betrieb [8]

Das Beschleunigen auf eine bestimmten Drehzahl entspricht in Abbildung 2.6 den Quadranten I und III (Motorbetrieb) und das Abbremsen durch ein Moment den Quadranten II und IV (Generatorbetrieb). Im Motorbetrieb wird dem Motor Energie zugeführt und im Generatorbetrieb Energie entzogen.

Es gibt verschieden Möglichkeiten um den Generatorbetrieb umzusetzen. Die geeignetste Methode für die Erweiterung des Prüfstands ist das regenerative Bremsen. Hierbei wird dem sich drehenden Motor Energie entzogen und kann in einem Akkumulator oder Elektrolytkondensator gespeichert werden [8].

---

## 2.4 dSPACE - DS1104 R&D Controller Board

---

Im vorhandenen Prüfstand wird das dSPACE – DS1104 Modul für die Erstellung eines Positionsreglers und der Messung verschiedener Prozessgrößen verwendet. Es handelt sich hierbei um eine Messwert-Erfassungskarte mit 8 A/D-Wandlern, 8 D/A Wandlern, 20 Digital I/O Channels und weiteren Schnittstellen [9]. Der PC kommuniziert über das Programm dSPACE Control Desk 5.3 mit dem Mikroprozessor auf dem DS1104, auf welchem letztlich das Mess- und Regelprogramm läuft [10].

Das Mess- und Regelprogramm wird zuvor mit MATLAB/SIMULINK als Blockschaltbild erstellt, für den Mikrocontroller übersetzt und auf den Prozessor geladen. Das Programm Controll Desk kommuniziert mit dem DS1104 und tauscht Daten aus. Außerdem ist es möglich, Eingänge sowie Ausgänge der Messwert-Erfassungskarte grafisch am PC anzuzeigen und beispielsweise analoge Ausgänge der Karte mit Hilfe von Schiebern oder Drehrädern am PC zu variieren.

Im aktuellen Aufbau des Prüfstands ist mit Hilfe von MATLAB/SIMULINK ein Regler für die Position entworfen, anschließend übersetzt und auf den Prozessor geladen worden. Nun kann über einen grafischen Schieber am PC, welcher eine analoge Ausgangsspannung zwischen 0V und 10V verändert, die Position der Schaltgabel über den Motorcontroller eingestellt werden. Dieser Vorgang kann auch automatisiert über ein Testprogramm vorgenommen werden. Außerdem werden verschiedene Prozessgrößen in Echtzeit vom DS1104 Controller Board erfasst und aufgezeichnet. Diese können anschließend am PC ausgewertet werden.

---

### 3 Ausgangszustand des Prüfstands

---

Dieses Kapitel beschreibt den Aufbau, die Funktion und den daraus resultierenden Nutzen des aktuell vorliegenden Prüfstands. Dieser Prüfstand stellt den Ausgangszustand für das Konzept der Erweiterung dar.

Mit dem aktuellen Prüfstand ist es möglich, die Schaltgabel gegen einen Anschlag zu fahren. Der Schaltaktorikmotor (BLDC) treibt über ein Stirnradgetriebe, wie es in Abbildung 3.1 zu erkennen ist, die Schaltwalze an. Anschließend wird, wie schon in Kapitel 2.1 beschrieben, die rotatorische in eine translatorische Bewegung mittels eines Kulissengetriebes umgewandelt. Die Schaltgabel stößt nun gegen einen Anschlag, welcher eine Last simulieren soll.

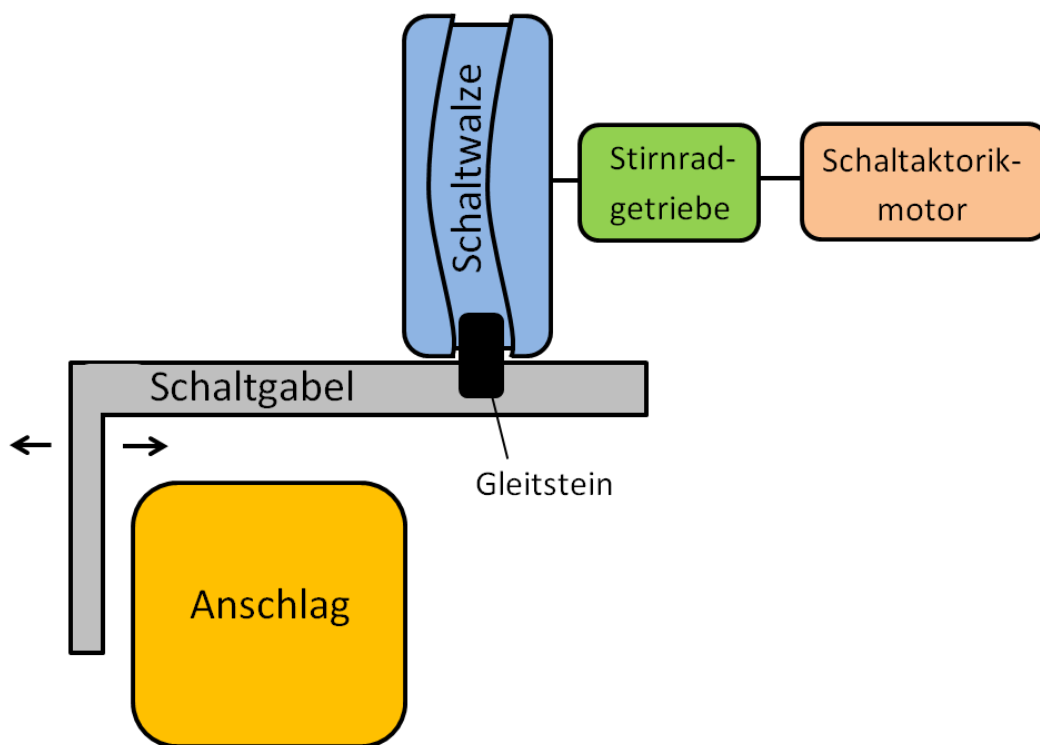


Abbildung 3.1 aktueller Aufbau des Prüfstands, Mechanik

Die Ansteuerung des aktuellen Aufbaus ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Der Schaltaktorikmotor und dessen Hallsensoren sind direkt am Motorcontroller 1 angeschlossen, welcher für die Kommutierung, die Kalibrierung und den Betriebsmodus zuständig ist. Aktuell wird der von einem 12 V Kfz-Akkumulator gespeiste Motorcontroller im Open-Loop-Modus betrieben, das heißt, es wird dem Motorcontroller eine analoge Eingangsspannung vorgegeben und dieser stellt zu der Eingangsspannung proportional eine Ausgangsspannung am Motor. Die eigentliche Regelung erfolgt über das dSPACE Controller Board, welches über einen PC programmiert wird und Werte für die Visualisierung an den PC ausgibt. Um die Regelung auf dem dSPACE Controller Board umsetzen zu können,

werden noch Istwerte von Drehwinkel und Strom benötigt. Diese Aufgabe erfüllen drei Stromsensoren, wobei hier jeweils einer an jeder Motorphase misst, und ein Drehwinkelsensor, welcher direkt im Motor integriert ist. Des Weiteren dient die Strommessung dazu eine Referenzfahrt durchzuführen.

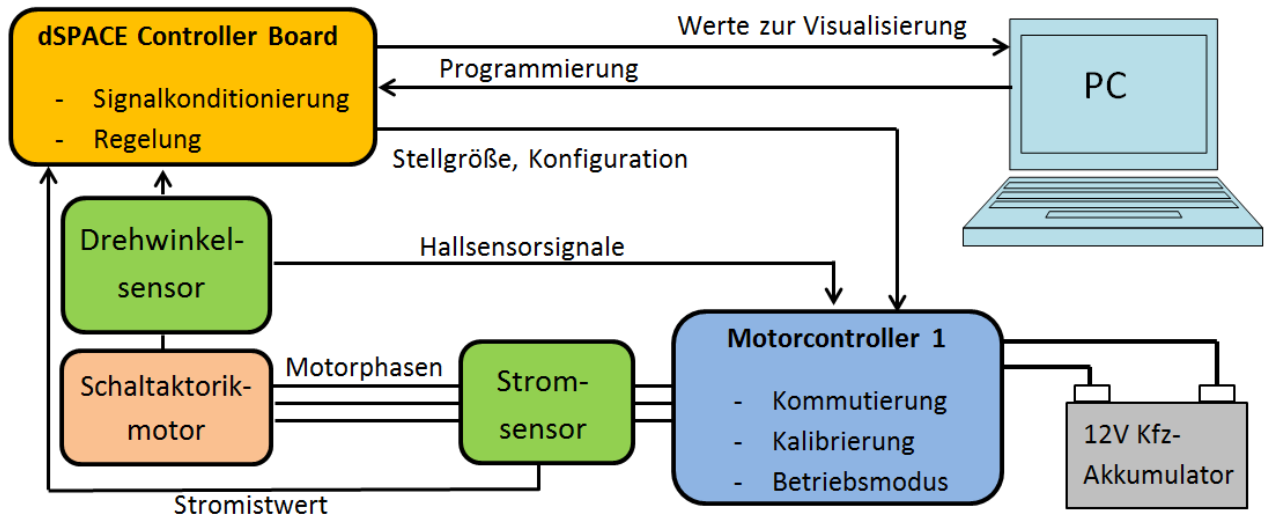


Abbildung 3.2 aktueller Aufbau des Prüfstands, Ansteuerung [11]

Dieser Aufbau ermöglicht es Wirkungsgradmessungen durchzuführen. Die Ergebnisse können anschließend mit dem mathematischen Modell abgeglichen und zur Optimierung genutzt werden.

Eine detailliertere Darstellung des aktuellen Prüfstandskonzeptes ist der Bachelorarbeit „Entwicklung einer Ansteuerung für die Schaltaktorik im Doppelkupplungsgetriebe“ von Felix Bert zu entnehmen [11].

---

## 4 Grundkonzept der Prüfstandserweiterung

---

In diesem Kapitel erhalten Sie einen Überblick über das Grundkonzept der Prüfstandserweiterung, welches in den anschließenden Kapiteln umgesetzt wird. Zu Beginn wird die Realität dargestellt und anschließend hieraus das am Prüfstand abzubildende Modell mit Vereinfachungen abgeleitet. Außerdem wird die geplante Ansteuerung des gesamten Prüfstands, welche auch die bisherige Ansteuerung beinhaltet, erläutert.

---

### 4.1 Realer Triebstrang

---

Ziel der Prüfstandserweiterung ist es, eine Synchronisierung realitätsnah abzubilden. Hier wird der Anschlag am bisherigen Prüfstand entfernt und durch eine serienmäßig eingesetzte Getriebestufe ersetzt. Dieses Grundkonzept ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Es sind die realen Bauteile wie die geöffnete Kupplung und den PKW, welcher eine große Massenträgheit darstellt, zu erkennen. Da die Kupplung geöffnet ist, muss nur eine Hälfte der Kupplung am Prüfstand abgebildet werden und die Massenträgheit des Antriebsmotors entfällt komplett. Er dient in dieser Abbildung nur zur Veranschaulichung.

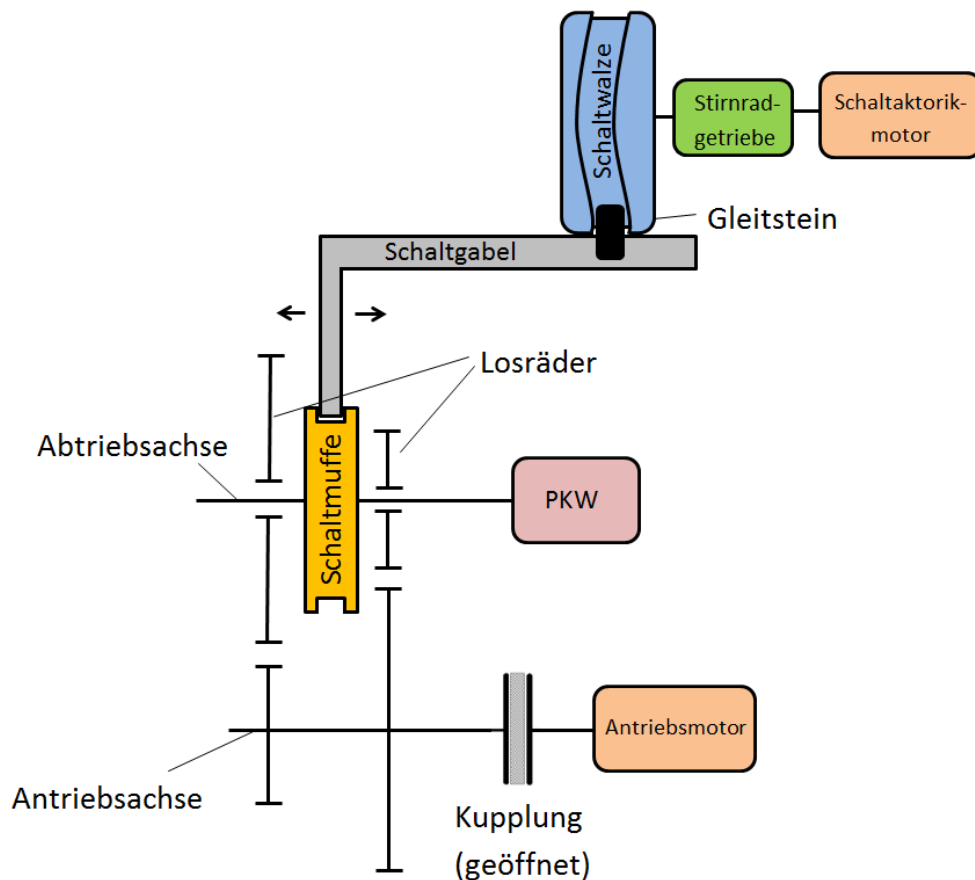


Abbildung 4.1 schematische Darstellung des Triebstrangs mit realen Komponenten

---

Um den Ablauf eines Schaltvorgangs besser zu verstehen, soll dieser an einem Beispiel erläutert werden:

Fährt man in der Realität mit dem 2. Gang und möchte nun in den 3. Gang schalten, wird die Kupplung geöffnet und somit der Antriebsmotor vom restlichen Triebstrang getrennt. Anschließend wird der 2. Gang über den Schaltaktorikmotor und die Schaltgabel ausgelegt. Nun drehen sich die Massenträgheiten der einen Kupplungshälfte, der Antriebsachse und die der Losräder weiter. Da der Schaltvorgang in einer sehr kurzen Zeitspanne abläuft, kann die Reduzierung der Drehzahl durch Schleppverluste hier zur Vereinfachung vernachlässigt werden. Anschließend wird begonnen den 3. Gang einzulegen. Hierfür ist es notwendig, die aktuelle Drehzahl der Massenträgheiten (Kupplung, Antriebsachse, Losräder) mit der Abtriebsachse, an welcher auch die Massenträgheit des PKW angreift, anzugleichen. Hierbei sei erwähnt, dass der PKW eine viel größere Massenträgheit besitzt als die eine Hälfte der Kupplung, die Antriebsachse und die der Losräder zusammen. Deshalb bleibt in der Realität die Drehzahl der Abtriebsachse nahezu konstant und die Drehzahl der Antriebsachse wird abgebremst. Ist der Gleichlauf erreicht, kann durchgeschaltet werden und der 3. Gang ist eingelegt.

---

## 4.2 Vereinfachtes Konzept zur Prüfstandserweiterung

---

Um den Schaltvorgang möglichst realitätsnah abzubilden und trotzdem einen sicheren und kostengünstigen Schaltwalzenprüfstand zu gewährleisten, welcher es zusätzlich ermöglicht verschiedene Getriebe mit unterschiedlichen Synchronisierungen abzubilden, ist es notwendig, die Realität an manchen Stellen zu vereinfachen.

Ein entscheidender Kostenfaktor ist die hohe Massenträgheit des PKWs, welche am Prüfstand abgebildet werden muss. Außerdem liegen in der Realität hohe Drehzahlen vor, welche hohe Umfangsgeschwindigkeiten hervorrufen und somit gegen den Sicherheitsaspekt der geplanten Erweiterung sprechen.

Deshalb wurde das Konzept der Prüfstandserweiterung auf der Idee aufgebaut, nur die Differenzdrehzahlen abzubilden. Das heißt, die Abtriebsachse wird festgebremst und somit die hohe Massenträgheit des PKWs kostengünstig abgebildet (Abbildung 4.2). Außerdem muss die Antriebsachse nicht auf die volle Drehzahl, welche nach dem Auskuppeln noch vorliegt, beschleunigt werden, sondern nur auf die Differenzdrehzahl in Bezug auf die Abtriebsachse. Hierfür ist ein Prüfstandsmotor vorgesehen, welcher auch das Schleppmoment von Kupplung bzw. Elektroantrieb abbilden soll. Somit können gleich zwei Probleme gelöst werden, auf der einen Seite die hohen Umfangsgeschwindigkeiten und auf der anderen Seite die hohe Massenträgheit des PKWs. Zusätzlich ist es möglich ein Schleppmoment abzubilden. Die Fehler, die durch diese Vereinfachungen gemacht werden, sind gering in Bezug auf die daraus resultierenden Vorteile.



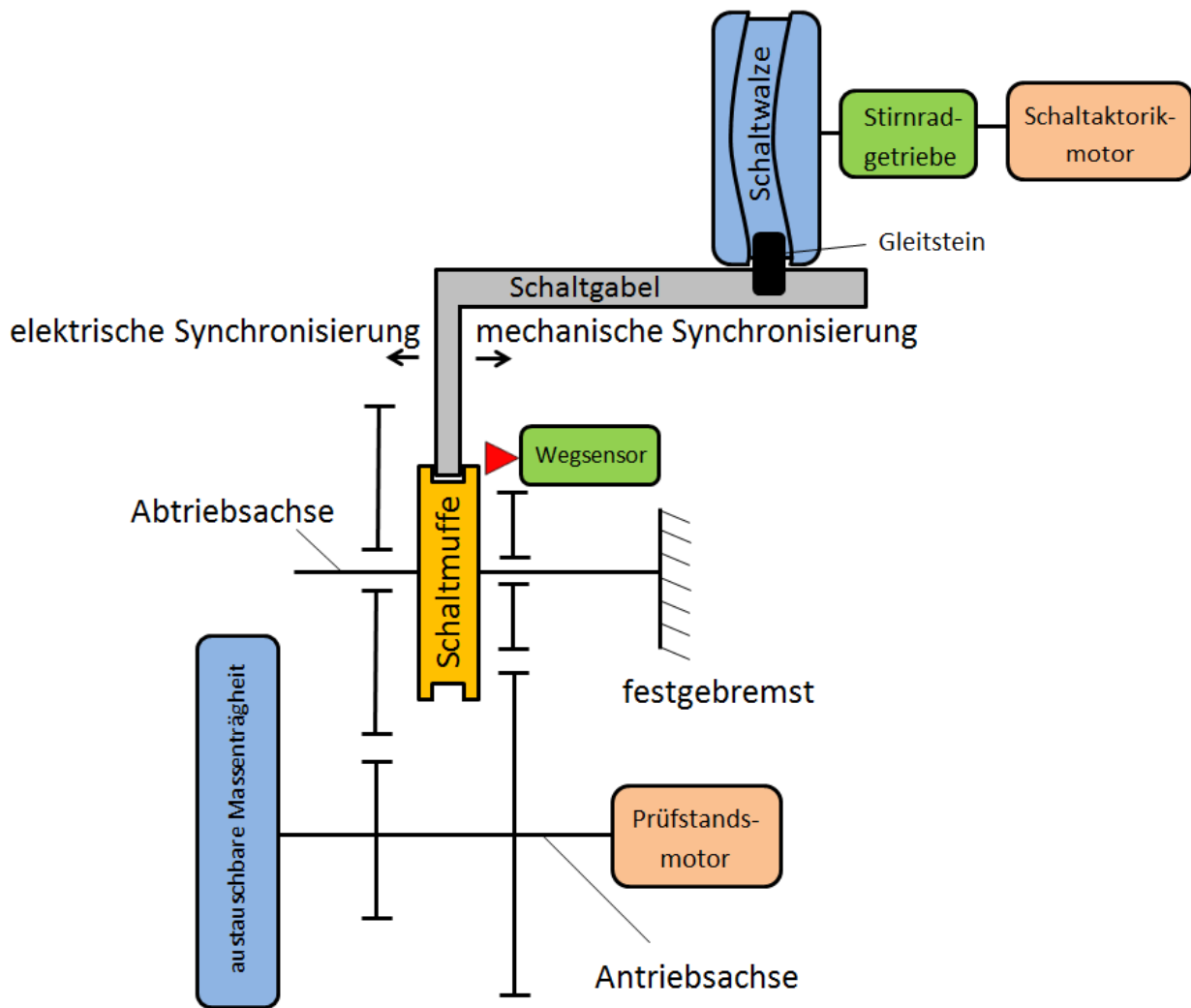


Abbildung 4.2 Vereinfachtes Grundkonzept der Prüfstandserweiterung, Mechanik

In Abbildung 4.2 ist außerdem zu erkennen, dass eine austauschbare Massenträgheit vorgesehen ist. Diese ermöglicht es verschiedene Getriebe mit unterschiedlichen Massenträgheiten abbilden zu können. Um den Prüfstand möglichst kompakt zu halten, soll die Schaltmuffe in eine Richtung einen Gang über eine mechanische Synchronisierung und in die andere Richtung einen Gang über eine elektrische Synchronisierung einlegen. Somit können mit nur einer Getriebestufe und einer Schaltaktorik beide Arten an Synchronisierungen am Prüfstand untersucht werden. Hierbei ist es wichtig darauf zu achten, dass die Differenzdrehzahlen der elektrischen Synchronisierung sehr klein und die der mechanischen Synchronisierung im Vergleich sehr groß sind. Dies liegt daran, dass bei der elektrischen Synchronisierung der Antriebsmotor die Differenzdrehzahlen bereits angeglichen hat. Beide Drehzahlen sollen später mit einer guten Genauigkeit erreicht werden. Zusätzlich enthält das Konzept noch einen Wegsensor, welcher die aktuelle Position der Schaltmuffe bzw. der Schaltgabel erfasst. Dieser hat später die Aufgabe die Referenzfahrt für Getriebe mit elektrischer Synchronisierung zu ermöglichen. Weitere Prozessgrößen, wie Drehzahl und Drehmoment (Schleppmoment) des Prüfstandsmotors, sollen durch zusätzliche Sensoren erfasst werden.

Die geplante Ansteuerung des Gesamtaufbaus ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Im unteren Abschnitt ist die Ansteuerung des bisherigen Prüfstandes mit Schaltaktorikmotor, Motorcontroller 1, 12 V Kfz-Akkumulator und Drehwinkelsensor zu erkennen. Der obere Abschnitt stellt die Erweiterung des Prüfstands dar. Dieser ist dem bisherigen Aufbau sehr ähnlich, da die gleichen Motortypen (Auswahl folgt in Kapitel 6.2) verwendet werden. Der Prüfstandsmotor, welcher später die Massenträgheit auf Differenzdrehzahl beschleunigt und anschließend das Schleppmoment simuliert, ist direkt an Motorcontroller 2 angeschlossen. Dieser übernimmt die gleichen Aufgaben wie Motorcontroller 1 im bisherigen Aufbau und ist an ein 24 V Netzteil angeschlossen, da der hier verwendete Prüfstandsmotor eine Nennspannung von 24 V besitzt. Auch hier ist der Motorcontroller 2 im Open-Loop-Modus und bekommt vom dSPACE Controller Board eine analoge Spannung vorgegeben. Der entscheidende Unterschied zum bisherigen Aufbau ist der Wegfall der Stromsensoren. Zukünftig sollen die im Motorcontroller integrierten Stromsensoren verwendet werden und diese über die RS232-Schnittstelle des Motorcontrollers ausgelesen werden. Diese Erweiterung ist in Abbildung 4.3 auch schon im bisherigen Prüfstandmodell dargestellt. Ein zusätzlicher Vorteil, der sich durch das Auslesen über die RS232-Schnittstelle ergibt, ist, dass man den Encoder direkt am Motorcontroller 2 anschließen und auswerten lassen kann. Es ist nur noch notwendig, die aktuelle Drehzahl über die RS232-Schnittstelle vom Motorcontroller 2 schicken zu lassen. Außerdem ist an einem Analogeingang des dSPACE Controller Boards noch der Wegsensor angeschlossen, welcher proportional zur Position der Schaltgabel eine Spannung ausgibt.

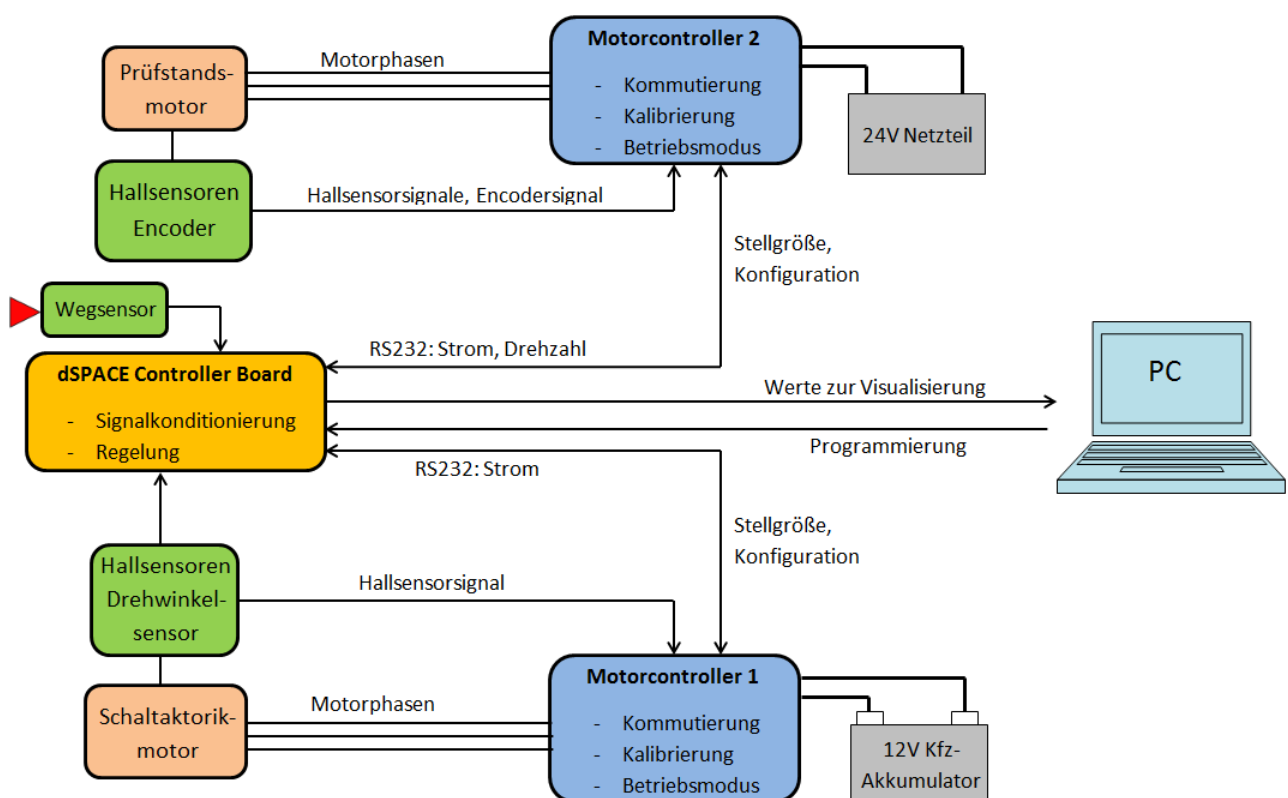


Abbildung 4.3 Grundkonzept der Prüfstandserweiterung, Ansteuerung

---

Mit dieser Ansteuerung ist es nun möglich zuerst über den Prüfstandsmotor die Massenträgheiten auf Differenzdrehzahl zu beschleunigen, anschließend über den Motor ein Schleppmoment zu stellen und gleichzeitig mit Hilfe des Schaltaktorikmotors die Schaltgabel einzurücken. Somit ist es möglich einen kompletten Schaltvorgang mit Synchronisierung abzubilden und gleichzeitig viele Prozessgrößen zu erfassen.

---

## 5 Anforderungen an die einzelnen Komponenten

---

Um eine möglichst genaue und detaillierte Anfrage beim Hersteller stellen zu können, ist es wichtig, alle Anforderungen an eine bestimmte Komponente zusammenzutragen und diese bei der Anfrage zu nennen. Im Folgenden werden alle Anforderungen der einzelnen Bauteile konkretisiert und erfasst.

---

### 5.1 Getriebestufe

---

Mit der Getriebestufe soll es möglich sein, eine mechanische Synchronisierung sowie eine elektrische Synchronisierung realitätsnah abzubilden. Hierfür ist es notwendig, dass an einer Seite ein Synchronring montiert ist und auf der anderen Seite nicht. Außerdem entsteht hier der Konflikt zwischen den Differenzdrehzahlen. Bei der elektrischen Synchronisierung liegen Differenzdrehzahlen von 10 bis 100 Umdrehungen pro Minute vor und bei der mechanischen Synchronisierung entstehen Drehzahldifferenzen von 600 bis 3300 Umdrehungen pro Minute. Das IMS hat allerdings die maximal abbildbare Differenzdrehzahl der mechanischen Synchronisierung auf 1000 Umdrehungen pro Minute herabgesenkt, weshalb im Weiteren nur noch mit dieser maximalen Differenzdrehzahl gerechnet wird. Über die Getriebestufe soll dieser Konflikt abgemildert werden, um zu ermöglichen, dass ein Motor für beide Anwendungen genutzt werden kann. Hierfür ist es notwendig, beide Differenzdrehzahlen anzugleichen, bzw. die große Differenz zu mindern, um eine möglichst hohe Auflösung für beide Synchronisierungsarten zu gewährleisten.

---

### 5.2 Prüfstandsmotor

---

Der Prüfstandsmotor hat die Aufgabe, die Schwungmasse auf die Differenzdrehzahl zu beschleunigen und anschließend, wenn der Synchronisierungsvorgang eingeleitet wurde, ein funktionsabhängiges Schleppmoment zu stellen. Deshalb sind die Anforderungen an den Motor, dass er verschiedene Drehzahlen (bis zur maximal geforderten Differenzdrehzahl) anfahren und das maximal geforderte Schleppmoment abbilden kann. Zusätzlich wäre es wünschenswert, wenn der Motor die Massenträgheit in einer akzeptablen Zeit (Vorgabe IMS  $t < 10$  s) auf maximale Differenzdrehzahl beschleunigen kann. Außerdem soll es möglich sein, die aktuelle Drehzahl und eventuell auch andere Messgrößen, wie das Drehmoment, zu erfassen.

---

## 5.3 Motorcontroller 2

---

Der Motorcontroller 2 fungiert als Schnittstelle zwischen Prüfstandsmotor und dSPACE Controller Board. Die Leistungsgrenze des Motorcontrollers darf auch bei Volllast des Motors nicht überschritten werden, um eine Zerstörung zu vermeiden. Deshalb ist darauf zu achten, dass die Kenndaten des Motorcontrollers zu denen des Motors passen.

Es muss außerdem möglich sein mit dem Prüfstandsmotor eine bestimmte Drehzahl- und Drehmomentkurve abzufahren. Diese soll vom PC aus über ein dSPACE Modul an den Motorcontroller gegeben werden. Die Möglichkeit, eine bestimmte Drehzahl vorzugeben, wird benötigt, um später die Differenzdrehzahl zwischen Schaltmuffe und Kupplungskörper abzubilden. Die Drehmomentfunktion soll später das Schleppmoment, welches bei der mechanischen Synchronisierung durch die Kupplungen und bei der elektrischen Synchronisierung durch den Elektromotor auftritt, abbilden.

---

## 5.4 Abzubildende Massenträgheit

---

Um den Synchronisierungsvorgang realitätsnah abzubilden ist es notwendig, die Massenträgheitsmomente der einzelnen Getriebestufen auf ein reduziertes Massenträgheitsmoment umzurechnen. Anschließend ist eine Schwungmasse auszuwählen, welche genau dieses reduzierte Massenträgheitsmoment widerspiegelt. Es ist dabei darauf zu achten, dass nicht unnötig viel Material benötigt wird und die verschiedenen Massenträgheiten der einzelnen Getriebe einfach und schnell austauschbar sind.

---

## 5.5 Wegmesssystem

---

Das Wegmesssystem soll später die aktuelle Position der Schaltgabel auswerten um ein Problem mit der Referenzfahrt bei Getrieben mit elektrischer Synchronisierung zu eliminieren. Es soll nach einer Lösung gesucht werden, die später eventuell auch im Fahrzeug eingesetzt werden kann. Deshalb ist es notwendig, dass dieses Wegmesssystem sehr kompakt ausgeführt und resistent gegen Schmutz und Temperaturschwankungen ist. Bei der Messung der Position ist es wünschenswert, die Position der Schaltgabel so weit wie möglich an der Schaltmuffe abzugreifen, um Biegeeinflüsse der Schaltgabel zu eliminieren.

---

## 5.6 Bauteile zur Befestigung und Verbindungselemente

---

Um die vom Hersteller bereitgestellte Getriebestufe, den Motor sowie die Schwungmasse im vorhandenen Prüfstand zu integrieren, werden zusätzliche Bauteile benötigt. Es muss eine Lagerung für die Getriebestufe sowie ein Montagekonzept für die abzubildende Massenträgheit entworfen und eine Aufhängung des Motors konzipiert werden.

---

### **5.6.1 Lagerung der Getriebestufe**

---

Die Bauteile zur Lagerung der Getriebestufe haben zum einen die Aufgabe, die Masse der Getriebestufe zu tragen und zum anderen, einen Drehfreiheitsgrad, der über den Motor angetriebenen Achse, zu ermöglichen. Hierfür sollten bereits montierte Lager, wenn möglich, benutzt werden. Außerdem müssen die Bauteile so konstruiert sein, dass der Rotationsfreiheitsgrad der Abtriebswelle des Getriebes unterbunden werden kann. Dies bildet die hohe Massenträgheit des Fahrzeugs bezogen auf die Abtriebswelle ab. Des Weiteren sollten Bohrungen oder Ähnliches zur Montage an Aluprofilen vorgesehen sein und auf die axiale Wärmeausdehnung (Fest-/Loslagerung) geachtet werden. Eine weitere wichtige Aufgabe der Befestigung der Getriebestufe ist es den Abstand der beiden Wellen zu definieren. Beide Wellen müssen sehr genau zueinander positioniert werden, damit die Zahnräder wie gewünscht kämmen können.

---

### **5.6.2 Befestigung der abzubildenden Massenträgheit**

---

Die Befestigung sollte die Schwungmasse zentriert auf die Welle bringen und diese gegen Verdrehen sichern. Die verschiedenen Massenträgheiten der einzelnen Getriebe sollten schnell austauschbar sein, damit lange Umrüstzeiten vermieden werden können.

---

### **5.6.3 Aufhängung des Motors**

---

Die Aufhängung des Motors muss auf den ausgewählten Motor abgestimmt sein und sollte noch etwas Spiel zur genauen Justierung bieten. Das Verbindungselement zwischen Motor und Getriebestufe muss das maximale Moment vom Motor übertragen können und sollte gegen Überlast schützen.

---

## 6 Auswahl geeigneter Hardware

---

In diesem Kapitel wird beschrieben wie geeignete Komponenten, welche den Anforderungen entsprechen, ausgewählt werden. Zu Beginn wird die Auswahl der Getriebestufe, welche die Grundlage der anderen Komponenten darstellt, beschrieben. Anschließend wird die Auswahl der abzubilden- den Massenträgheit, des Motors, der Bauteile zur Befestigung und des Wegmesssystems erläutert.

---

### 6.1 Getriebestufe

---

Um die geeignete Getriebestufe zu wählen ist zuerst zu überprüfen, welche Getriebestufen beim Hersteller angefragt werden können. Hierfür ist ein Blick in die Ausführung des Getriebes notwendig, um zu sehen, welche Gangstufen mit einer Schaltmuffe synchronisiert werden.

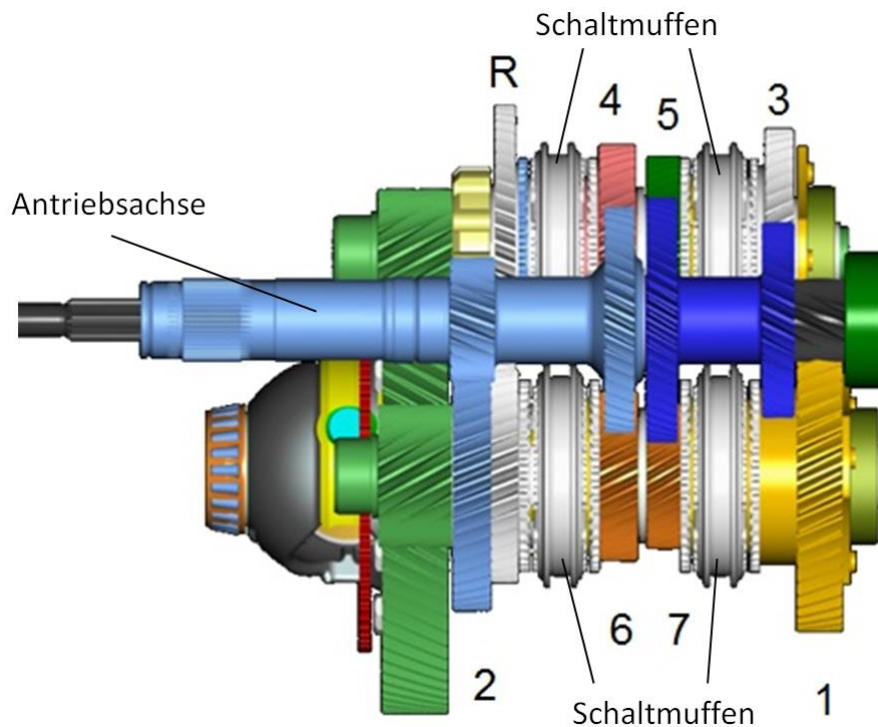


Abbildung 6.1: 7DCT300 [3]

Aus Abbildung 6.1 ist zu erkennen, dass die Gangpaarungen 1-7, 2-6, 3-5 und R-4 zur Verfügung stehen, wobei R für den Rückwärtsgang steht. Zwischen jeder Gangpaarung liegt jeweils eine Schaltmuffe. Es ist nun notwendig aus den vorliegenden Gangpaarungen die geeignete Getriebestufe auszuwählen.

Da beide Differenzdrehzahlen (niedrige bei der elektrischen und höhere bei der mechanischen Synchronisierung) mit einer genügend hohen Auflösung erreicht werden sollen, ist für die mechanische

Synchronisierung eine möglichst kleine Übersetzung (ins Schnelle) zu wählen, somit kann der Motor langsamer drehen als die Differenzdrehzahl. Für die elektrische Synchronisierung ist eine möglichst hohe Übersetzung (ins Langsame) zu wählen, somit kann der Motor mit höherer Drehzahl drehen als die geforderte Differenzdrehzahl an der Synchronisierung. Ziel ist es also eine Getriebestufe mit einer möglichst hohen Spreizung zu finden.

Die größte Spreizung besitzt die Getriebestufe 1-7. Beide Drehzahlbereiche werden am besten angenähert, da sie die minimal geforderte Differenzdrehzahl der elektrischen Synchronisierung von  $10 \text{ min}^{-1}$  am meisten erhöht und die maximal geforderte Differenzdrehzahl der mechanischen Synchronisierung von  $1000 \text{ min}^{-1}$  am meisten senkt. Daraus folgt, dass die maximale Drehzahldifferenz am geringsten ist und somit beide Drehzahlbereiche an der Synchronisierung sehr genau aufgelöst abgebildet werden können.

Mit der ausgewählten Getriebestufe ist auch die maximale Drehzahl des Motors berechenbar. Diese liegt bei ca.  $600 \text{ min}^{-1}$ . Um zu überprüfen, dass in diesem Bereich nicht die Resonanzdrehzahl der Antriebswelle liegt, wird eine grobe Überschlagsrechnung durchgeführt:

$$n_{krit} = 946 \cdot \sqrt{\frac{1}{f}} = 946 \cdot \sqrt{\frac{48\pi \cdot E d^4}{64 \cdot m g l^3}} = 53784 \text{ min}^{-1} \quad (6.1)$$

mit  $E=210 \text{ kN/mm}^2$ ,  $d=27,85 \text{ mm}$ ,  $m=2,1636 \text{ kg}$ ,  $g=9,81 \text{ m/s}^2$ ,  $l=163,1 \text{ mm}$

Bei dieser Berechnung wurde das Zahnrad mittig angenommen und auch die Masse der Welle in die vereinfachte zentrale Masse mit einberechnet [12].

Da die kritische Drehzahl der Antriebswelle weit über der maximal geplanten Drehzahl liegt, kann die Welle problemlos im geplanten Drehzahlbereich betrieben werden.

Wichtig ist es auch darauf zu achten, dass die elektrische Synchronisierung umsetzbar ist. Bei der zur Verfügung stehenden Getriebestufe werden alle Gänge mechanisch synchronisiert. Deshalb war es nötig, den Synchronring auf einer Seite zu entfernen. In Abbildung 6.2 ist die ausgewählte Getriebestufe mit der Umsetzung der beiden Synchronisierungsarten dargestellt. Die mechanische Synchronisierung ist auf der rechten Seite am Synchronring zu erkennen. Dieser wurde auf der linken Seite entfernt, um eine elektrische Synchronisierung abzubilden.



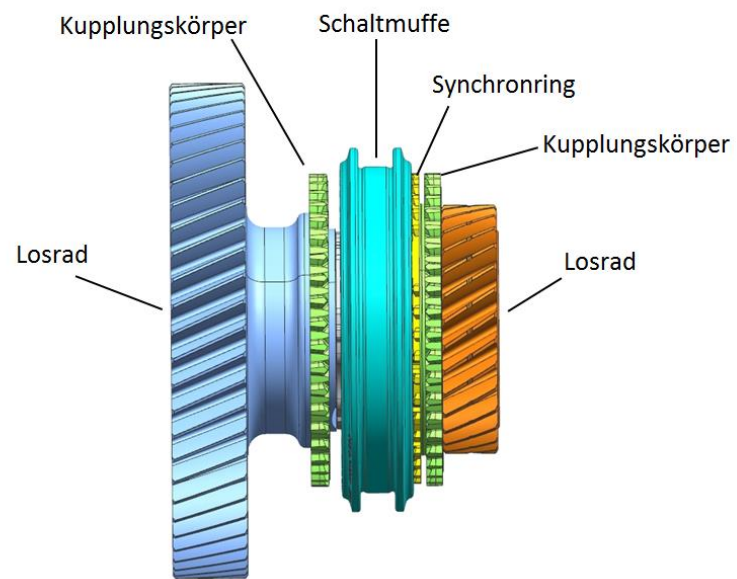


Abbildung 6.2 Umsetzung der mechanischen und elektrischen Synchronisierung

---

## 6.2 Prüfstandsmotor

---

In diesem Kapitel wird die Auswahl des Prüfstandsmotors beschrieben. Zu Beginn werden die neuen Rahmenbedingungen, welche sich durch die Auswahl der Getriebestufe ergeben haben, abgeleitet. Anschließend wird der Unterschied zwischen BLDC- und Schrittmotor erläutert und die Angebotsauswahl, mit den wichtigen Kenndaten des ausgewählten Prüfstandsmotors, wird aufgezeigt.

---

### 6.2.1 Ergebene Rahmenbedingungen

---

Wie in Kapitel 6.1 bereits erläutert, beträgt die maximal geforderte Drehzahl des Prüfstandsmotors ca.  $600 \text{ min}^{-1}$ . Außerdem wurde vom IMS ein maximales Schleppmoment von bis zu  $1 \text{ Nm}$  an der Synchronisierung gefordert. Ein beispielhafter Verlauf des Schleppmoments ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Dieser Verlauf wurde experimentell bestimmt und soll später auch am Prüfstand abgebildet werden. Es ist zu erkennen, dass das Schleppmoment von der Differenzdrehzahl abhängig ist.

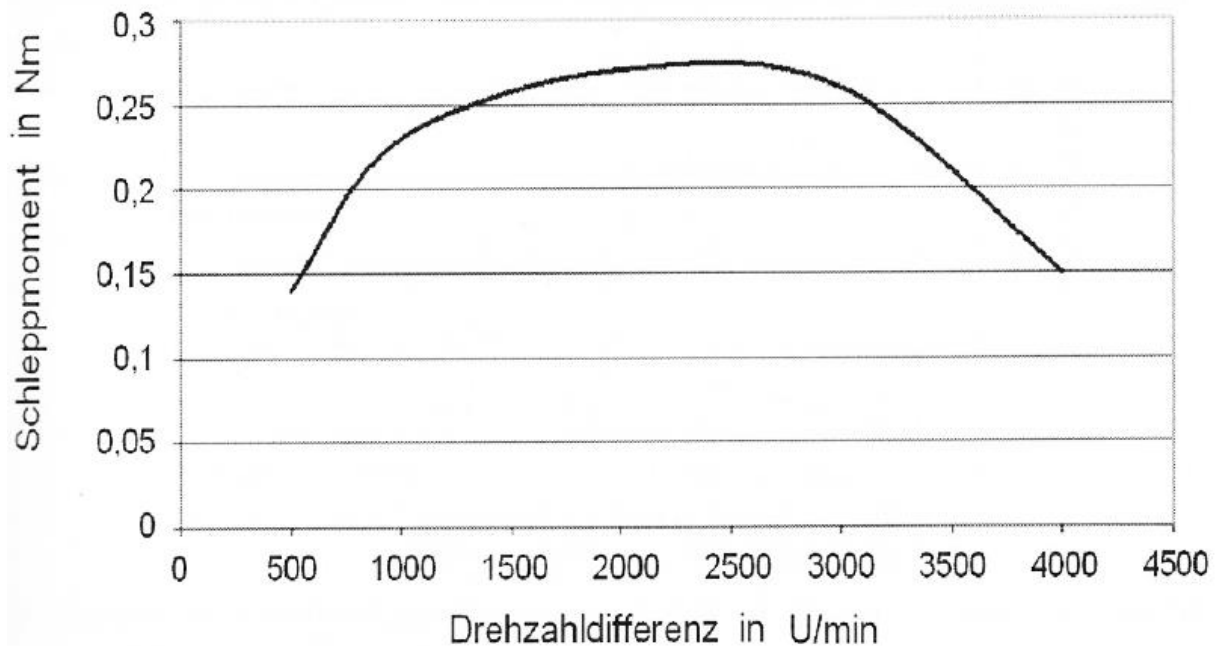


Abbildung 6.3 Verlauf des Schleppmoments an einer mechanischen Synchronisierung [4]

Das geforderte Moment an der Synchronisierung kann mit Gl. (6.2) auf die Antriebswelle, welche der Prüfstandsmotor antreibt, umgerechnet werden. Dieses wird benötigt, um das maximale Moment, welches der Motor stellen soll, zu erhalten.

$$M_{\text{gefordert, Motor}} = \frac{M_{\text{Synchro}}}{i} \quad (6.2)$$

Für die Übersetzung  $i$  wurden die entsprechenden Werte für elektrische und mechanische Synchronisierung der gewählten Getriebestufe vom Getriebehersteller eingesetzt.

Hiermit ergibt sich, für die ausgewählte Getriebestufe, ein maximal gefordertes Moment am Motor für die mechanische Synchronisierung von 1,82 Nm und für die elektrische Synchronisierung ein gefordertes Moment von 0,22 Nm. Hiermit ist ein maximaler Arbeitspunkt für den Motor bei einer Drehzahl von ca.  $600 \text{ min}^{-1}$  und einem Moment von 1,82 Nm bereits vorgegeben.

Für diese Anwendung wird ein drehzahl geregelter Antrieb benötigt, da es sehr wichtig ist die Differenzdrehzahl, unabhängig von Störgrößen, so genau wie möglich anzufahren. Neben der Drehzahlregelung ist eine Drehmomentregelung für die Phase in welcher das Schleppmoment simuliert werden soll, ebenso notwendig. Zusätzlich soll darauf geachtet werden, dass keine hohen Berührspannungen am Prüfstand vorliegen, um die Sicherheit der Anlage zu erhöhen.

## 6.2.2 Gegenüberstellung und Auswahl BLDC Motor und Schrittmotor

Bei der Auswahl des Prüfstandsmotors ist neben dem BLDC-Motor der Schrittmotor als Alternative für diesen Anwendungsfall aufgekommen. Deshalb werden in diesem Kapitel die entscheidenden Unterschiede zwischen den beiden Motorarten dargestellt.

In Tabelle 6.1 sind die wichtigsten Unterschiede zwischen BLDC Motor und Schrittmotor aufgelistet. Der Vorteil des Schrittmotors ist das höhere Moment bei kleinerer Drehzahl. Daraus resultiert, dass tendenziell kein Getriebe notwendig ist. Allerdings hat der Schrittmotor den Nachteil, dass im Gegensatz zum BLDC Motor ein relativ großes Selbsthaltemoment vorliegt.

	BLDC Motor	Schrittmotor
Selbsthaltemoment	nahezu Null	bemerkbar
hohes Moment bei kleinen Drehzahlen	nein	ja
Notwendigkeit Getriebe	tendenziell notwendig	tendenziell nicht notwendig
Kosten	~600€	~300€

Tabelle 6.1 Unterschiede zwischen den einzelnen Motorvarianten

Da das Selbsthaltemoment auch vorliegt, wenn im Stator keine Ströme fließen, ist es nicht möglich, dass der Rotor eines Schrittmotors momentenfrei rotiert. Für diese Anwendung ist es aber notwendig, dass der Motor auch momentenfrei rotieren kann. Dies war letztendlich der entscheidende Punkt, weshalb die Wahl auf einen BLDC Motor gefallen ist.

Zusätzlich steht am IMS ein 30 V Netzteil zur Verfügung und im aktuellen Prüfstand ist bereits ein BLDC Motorcontroller eingesetzt. So ist es möglich, den BLDC-Motor zu Beginn am bereits vorhandenen Motorcontroller zu testen und anschließend, wenn alle Anforderungen mit dieser Kombination erfüllbar sind, den gleichen Motorcontroller käuflich zu erwerben. Des Weiteren liegen zum vorhandenen Motorcontroller schon Informationen über den Anschluss und die Kommunikation mit dem dSPACE Controller Board vor, welche die spätere Umsetzung vermutlich erleichtern werden.

---

### 6.2.3 Angebotsauswahl Prüfstandsmotor

---

Nun wird noch der passende BLDC Motor benötigt, welcher zum einen mindestens mit der maximal benötigten Drehzahl drehen und ein Drehmoment von bestenfalls bis zu 1,82 Nm stellen kann. Um eine grobe Auswahl zu treffen ist es sinnvoll die minimale geforderte Leistung des Antriebs zu berechnen.

$$P_{min} = M \cdot \omega = M \cdot 2\pi \cdot n = 104,25 \text{ W} \quad (6.3)$$

Aus diesem Ergebnis ist zu schließen, dass ein Motor mit einer höheren Leistung von 104,25 W benötigt wird, da die abgegebene Leistung auch vom Arbeitspunkt abhängt.

Bei der weiteren Auswahl des BLDC Motors sind die Drehzahl-Drehmomentkurven verglichen und die am besten geeignetste ausgewählt worden. Hierbei sei erwähnt, dass BLDC Motoren nur mit hohen Leerlaufdrehzahlen hergestellt werden, und somit kein Motor gefunden wurde, der eine Leerlaufdrehzahl im Bereich von der geforderten maximalen Differenzdrehzahl besitzt. Außerdem sind die maximalen Momente, die von einem BLDC Motor gestellt werden können, eher gering, sodass bei vielen Motoren ein Getriebe notwendig ist. Ein Getriebe ist allerdings zu vermeiden, um kein zusätzliches Reibmoment mit in den Aufbau mit einzubringen.

Letztendlich ist die Entscheidung auf einen BLDC Motor von Maxon gefallen, welcher eine Leerlaufdrehzahl von  $5000 \text{ min}^{-1}$  und ein Haltemoment von 2,54 Nm aufweist. Durch diese beiden Betriebspunkte ist auch die Kennlinie des Motors, wie sie in Abbildung 6.4 dargestellt ist, festgelegt. Dieser BLDC-Motor ermöglicht es, kein Getriebe mit zusätzlichem Reibmoment verwenden zu müssen und zusätzlich noch höhere Differenzdrehzahlen als die bisher geforderten  $1000 \text{ min}^{-1}$  am Prüfstand abzubilden.

In Tabelle 6.2 sind alle wichtigen Motordaten des ausgewählten Prüfstandsmotors dargestellt.

Nennspannung U in V	24
Leerlaufdrehzahl $n_0$ in $\text{min}^{-1}$	5000
Anhaltemoment $M_{\max}$ in mNm	2540
Anlaufstrom $I_{\max}$ in A	55,8
Anschlusswiderstand R in $\Omega$	0,43
Rotorträgheitsmoment $\Theta_{\text{Motor}}$ in $\text{gcm}^2$	209
Drehmomentkonstante $k_M$ in $\text{mNm A}^{-1}$	45,5
Nennmoment in mNm	331
thermische Zeitkonstante $\tau_s$ in s	31

Tabelle 6.2 Motordaten des EC45 250W aus dem Datenblatt

Die Motorkennlinie (Drehzahl über Drehmoment) ist in Abbildung 6.4 zu sehen. Man erkennt die Kennlinie für  $U=24 \text{ V}$  und die weitere parallel verschobene Kennlinie für eine geringere Spannung. Durch variieren der Spannung ist jede parallel verschobene Kennlinie, welche unter der Nennspannung von 24 V liegt, realisierbar. Über das Nennmoment, welches bei dem ausgewählten Motor 331 mNm entspricht, wird die Kennlinie in zwei Bereiche, Dauer- und Kurzzeitbetrieb, aufgeteilt.

---

Kurzzeitbetrieb liegt vor, wenn die Einschaltdauer kleiner als die thermische Zeitkonstante  $\tau_s$  geteilt durch zehn ist. Bei dem ausgewählten Motor ergibt sich:

$$\text{maximale Einschaltdauer} = \frac{\tau_s}{10} = \frac{31 \text{ s}}{10} = 3,1 \text{ s} \quad (6.4)$$

Da ein Synchronisierungsvorgang nur einen Bruchteil von einer Sekunde benötigt, ist es möglich, auch den Bereich des Kurzzeitbetriebs zu benutzen.

In Abbildung 6.4 ist zusätzlich zu den parallelverschobenen Spannungskennlinien noch die Drehzahlregelung sowie die anschließende Drehmomentregelung dargestellt. Zu Beginn wird die Schwungmasse mit  $I_{\max}$  auf die geforderte Differenzdrehzahl beschleunigt. Diese Beschleunigung wird mit einem konstanten Moment durchgeführt, da das vorhandene Netzteil einen maximalen Strom von  $I_{\max}=20 \text{ A}$  liefert und deshalb das zur Verfügung stehende Moment begrenzt ist. Anschließend wird der stationäre Arbeitspunkt A erreicht. Bei diesem ist das Moment nicht Null, da noch Reibung und andere Einflüsse ein Moment generieren. Wird nun der Synchronisierungsvorgang eingeleitet, schaltet der Motorcontroller in den Drehmomentmodus und es wird die Schleppmomentkurve (nach Abbildung 6.3) so lange abgefahren, bis die Differenzdrehzahl gleich Null ist und somit der Gang eingelegt werden kann. In Abbildung 6.4 sind zwei parallelverschobene Schleppmomentkurven dargestellt. Die linke zeigt die maximal mögliche Schleppmomentkurve, die mit dem aktuellen Netzteil angefahren werden kann ( $I_{\max}=20 \text{ A}$ ). Alle Schleppmomentkurven, die weiter links von dieser liegen, sind ebenfalls abbildbar. Die rechte Schleppmomentkurve ergibt sich aus dem maximal geforderten Schleppmoment von  $1 \text{ Nm}$ , welches sich durch die Getriebestufe auf ein Moment von  $1,82 \text{ Nm}$  erhöht. Mit dem aktuellen Netzteil kann dieses Moment nicht erreicht werden. Man benötigt ein Netzteil, das einen kurzzeitigen Strom von  $40 \text{ A}$  liefern kann. Vom Hersteller wird ein genügend großer Abstand zur maximalen Kennlinie ( $24 \text{ V}$ ) empfohlen, um eine gute Regelung zu gewährleisten. Dies ist in allen Fällen gewährleistet.

Die Erkenntnis ist nun, dass mit dem aktuellen Netzteil vom Motor ein Moment von  $0,91 \text{ Nm}$ , welches an der Synchronisierung einem Moment von  $0,5 \text{ Nm}$  entspricht, erreicht werden kann. Reicht dieses nicht aus, wird ein Netzteil mit einem maximalen Strom von mindestens  $40 \text{ A}$  benötigt, um ein Moment an der Synchronisierung von  $1 \text{ Nm}$  stellen zu können.

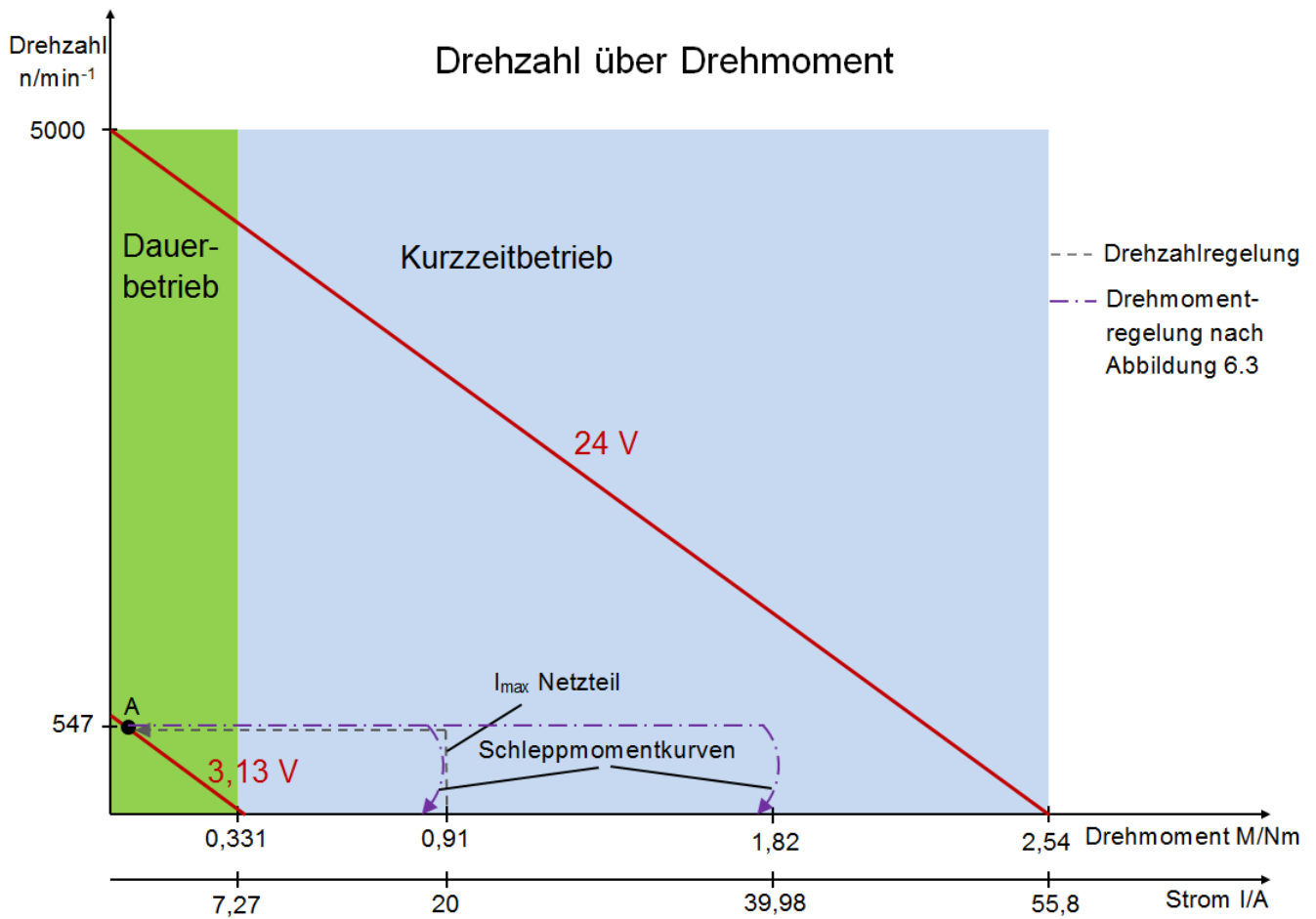


Abbildung 6.4 Drehzahl über Drehmoment

Um die Hochlaufzeit überschlägig zu berechnen, wird die Bewegungsgleichung ohne Lastmoment aufgestellt.

$$\Theta_{\text{gesamt}} \ddot{\varphi} = (\Theta_{\text{Motor}} + \Theta_{\text{Last}}) \ddot{\varphi} = M_{\text{Motor}}(t) \quad (6.5)$$

Da der Anlaufstrom vom Motorcontroller auf  $I_{\text{max}}=20 \text{ A}$  begrenzt wird (Schutz des Netzteils) ist für die Beschleunigung auf die maximale Differenzdrehzahl das Motormoment nach Gl. (2.2) konstant. Die Hochlaufzeit ergibt sich nun durch Integration von Gl. (6.5) und einsetzen der Gl. (2.2) zu

$$\Delta t = \Delta \dot{\varphi} \frac{\Theta_{\text{Motor}} + \Theta_{\text{Last}}}{M_{\text{Motor}}} = 2\pi \Delta n \frac{\Theta_{\text{Motor}} + \Theta_{\text{Last}}}{k_M I_{\text{max}}} = 2,09 \text{ s.} \quad (6.6)$$

Für  $\Delta n$  wurde hier die maximale geplante Drehzahldifferenz und für die Massenträgheit der Last  $\Theta_{\text{Last}}$  das maximal berechnete Massenträgheitsmoment verwendet. Außerdem geht diese Berechnung von ideal reibungsfreien Lagern aus, weshalb in der Realität der Hochlaufvorgang vermutlich etwas länger dauern wird. Nichtsdestotrotz ist aus diesem Ergebnis zu schließen, dass die geforderte Hochlaufzeit von 10 s mit diesem Motor eingehalten werden kann.

---

## 6.3 Bauteile zur Befestigung

---

Um die Getriebestufe zu lagern, den Motor anzubinden und die Massenträgheit zu befestigen werden zusätzliche Bauteile benötigt. Die Auswahl dieser Komponenten wird in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

Für alle drei gilt, dass es grundsätzlich zwei Arten von Bauteilen gibt, welche zur Befestigung verwendet werden können:

- Verwendung von Norm- bzw. Fertigteilen
- Herstellung eigener, maßgefertigter Bauteile

Der große Vorteil der Norm-/Fertigteile ist der aus den hohen Stückzahlen resultierende niedrige Preis. Es kommt allerdings sehr auf die Anwendung an, ob passende Norm-/Fertigteile vorhanden sind oder nicht. Dies wird im Folgenden überprüft.

---

### 6.3.1 Lagerung der Getriebestufe

---

Für die Lagerung der Getriebestufe stellt es sich für sehr schwierig heraus, Norm- bzw. Fertigteile für die bereits montierten Lager zu finden, deshalb ist die Entscheidung auf selbst gefertigte Bauteile gefallen. Es ergibt sich der Vorteil, dass man auf jeder Seite nur ein Bauteil benötigt und somit auch den Abstand zwischen den beiden Wellen über den Bohrungsabstand definieren kann. Die erforderlichen Maße werden aus dem CAD-Modell der Getriebestufe des Herstellers übernommen.

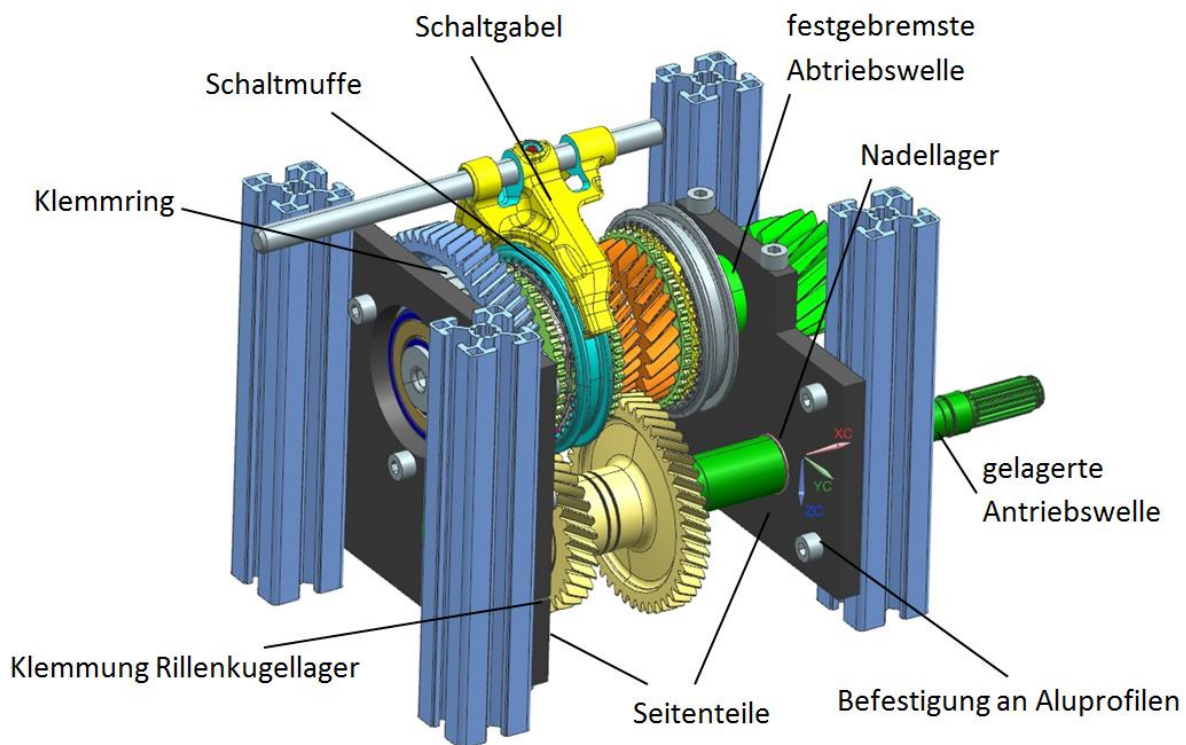


Abbildung 6.5 Getriebestufe mit Seitenteilen



---

In Abbildung 6.5 ist das Grundkonzept der Lagerung der Getriebestufe zu erkennen. Es enthält zwei Seitenteile, welche die Aufgaben der Lagerung der Antriebswelle, die Unterbindung des Drehfreiheitsgrades der Abtriebswelle, die Einhaltung des korrekten Wellenabstands und die Montagemöglichkeit an die Aluminiumprofile übernehmen.

Die Lagerung der Antriebswelle ist mit einem Fest- und einem Loslager in axialer Richtung gelöst. Auf der linken Seite war bereits schon ein Rillenkugellager montiert. Dieses wird mit Hilfe einer Klemmverbindung im Seitenteil gehalten und entspricht dem Festlager. Auf der rechten Seite der Abbildung ist ein Nadellager zu erkennen, welches auch schon auf der Welle montiert war. Dieses Lager ist auf der Antriebswelle axial gesichert und wird benutzt, um das Loslager zu realisieren. Die Nadeln laufen hierbei in einem Ring, welcher später in das Seitenteil eingepresst wird.

Die Unterbindung des Drehfreiheitsgrads der Abtriebswelle wird mit Hilfe einer Klemmverbindung realisiert. Das Seitenteil auf der rechten Seite des Bildes besteht aus zwei Einzelteilen, welche gegeneinander verschraubt werden. Somit entsteht eine Flächenpressung und die Abtriebswelle wird gegen Verdrehen gesichert. Das Seitenteil muss aus zwei Einzelteilen bestehen, da auf beiden Seiten der Abtriebswelle jeweils eine radial größere Komponente bereits montiert ist und man deshalb die Welle nicht durch eine leicht größere Bohrung schieben kann.

Der korrekte Wellenabstand zwischen Antriebs- und Abtriebswelle, welcher aus dem CAD-Modell des Herstellers entnommen werden konnte, ist über den Bohrungsabstand in den Seitenteilen genau festgelegt.

Die linke Seite der Abtriebswelle wird über einen Klemmring, welcher von außen an das Seitenteil geschraubt werden kann, gehalten. Dieser hat die Aufgabe, die Abtriebswelle abzustützen. Der Grund für die zweiteilige Ausführung liegt darin, dass das bereits montierte Lager innerhalb des äußeren Zahnrads liegt und eine Fertigung aus einem großen Aluminiumblock höhere Kosten verursachen würde als es aus zwei Blechteilen zu fertigen. Außerdem hat man zusätzlich noch die Möglichkeit, zuerst die Abtriebswelle festzuspannen und anschließend den Klemmring auszurichten und von außen zu verschrauben. Somit können Verspannungen minimiert werden.

---

### 6.3.2 Aufhängung des Motors

---

Zur Drehmomentübertragung von Motor auf die Antriebswelle des Getriebes gibt es zwei verschiedene Ansätze:

- formschlüssig (Verwendung der vorhandenen Keilwelle mit Normteilen oder selbstgefertigter Keilnabe)
- kraftschlüssig (Drehmomentübertragung über Klemmverbindung)

Da es sich bei der vorhandenen Keilwelle nicht um eine genormte Keilwelle handelt, bzw. keine Norm ausfindig gemacht werden konnte, ist es auch nicht möglich, eine passende Keilnabe mit Flansch als Normteil zu verwenden. Außerdem ist die eigene Fertigung einer passenden Keilnabe nur mit sehr großem Fertigungsaufwand möglich.



Es ist deshalb der Ansatz, mit Hilfe einer Klemmverbindung das Drehmoment zu übertragen, gewählt worden. Es wurde ein selbst zu drehendes Verbindungselement (Abbildung 6.7) entworfen, welches später auf die Antriebswelle des Getriebes geklemmt wird. Außerdem wurde eine Halterung für den Prüfstandsmotor entworfen. Der fertige Aufbau, inklusive Verbindungselement, ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Auf einer Seite ist ein Absatz vorgesehen, welcher später das Drehmoment über eine Wellenkupplung aufnimmt. Anschließend wird das Drehmoment über die andere Seite, mit Hilfe einer Klemmung über Gewindestifte, an die Antriebswelle des Getriebes übertragen. Die Wellenkupplung hat in dieser Anordnung die Aufgaben, eine Winkelabweichung zwischen Motor und Verbindungselement auszugleichen, sowie eine axiale Trennung im Stillstand zu ermöglichen. Die Funktion der Trennung im Stillstand ist nötig, um später die abzubildende Massenträgheit, welche auf dem Verbindungselement montiert wird, schneller wechseln zu können.

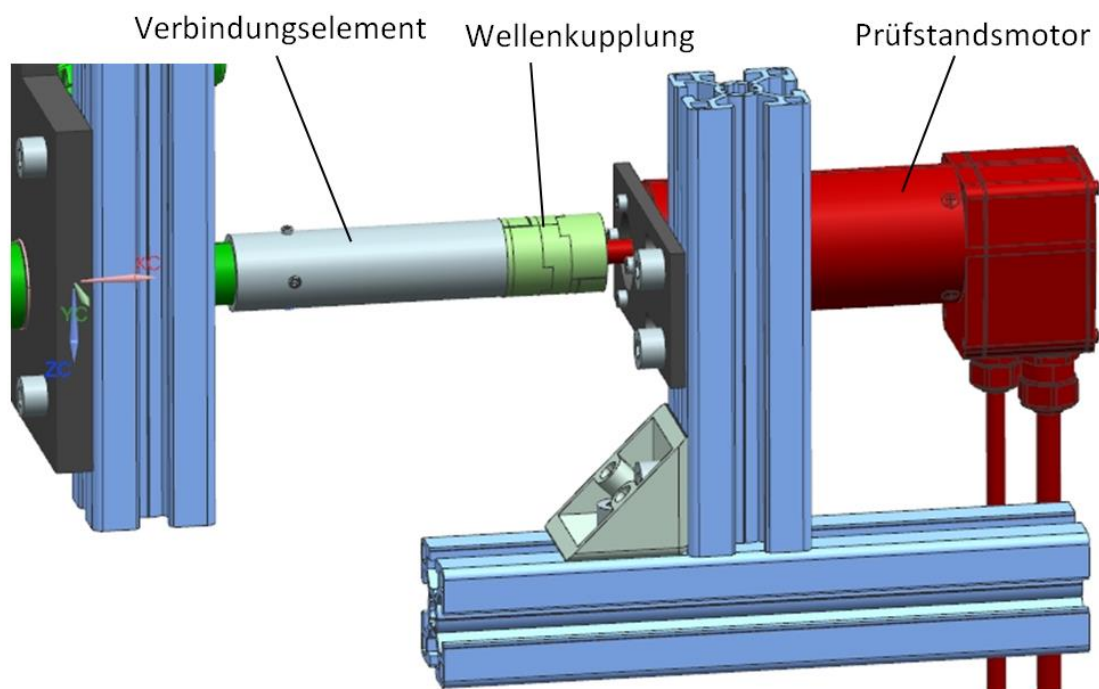


Abbildung 6.6 Anbindung an den Motor mittels gedrehtem Verbindungselement

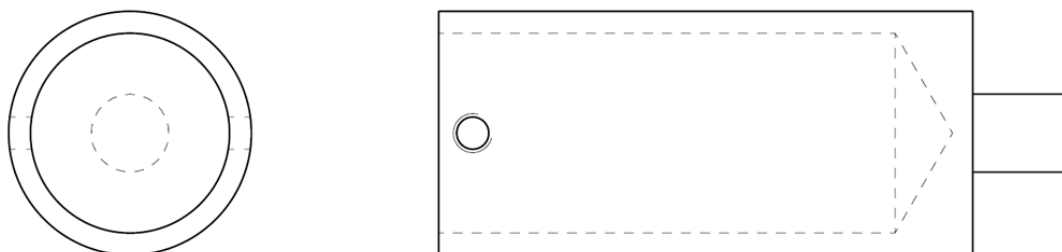


Abbildung 6.7 Verbindungselement in Schnittdarstellung

Das maximal übertragbare Moment der Klemmverbindung mit zwei Schrauben wurde mittels einer Überschlagsrechnung ermittelt und liegt über 20 Nm. Dieses Moment liegt weit über dem Moment, welches vom Motor gestellt und auch über dem, welches von der Wellenkupplung übertragen werden kann. Deshalb ist eine Klemmverbindung für diese Anwendung ausreichend.

### 6.3.3 Befestigung der abzubildenden Massenträgheit

Um die Massenträgheit zentriert und verdrehsicher auf dem Verbindungselement zu befestigen, wird ein Kegelspannsatz verwendet. Das Grundprinzip besteht aus zwei Kegeln, die über Schrauben gegeneinander gedrückt werden und somit eine Aufweitung des Außendurchmessers und eine Verjüngung des Innendurchmessers bewirken. Somit ist es möglich, dass der Spannsatz gegen das Verbindungselement sowie gegen die Bohrung in der Massenträgheit drückt. Es wird eine reibkraftschlüssige Verbindung hergestellt, welche sich automatisch zentriert und somit Unwuchten vermieden werden. In Abbildung 6.8 ist der Aufbau zu erkennen. Die Massenträgheit wird vom Spannsatz zentriert auf das Verbindungselement gespannt. Zum Austauschen der Massenträgheit muss nun nur die Schraube im vorderen Verbindungswinkel gelöst werden und schon kann der komplette rechte Teil (Motor, Motorhalterung) bis zur Wellenkupplung nach rechts verschoben und die Massenträgheit kann ausgetauscht werden.

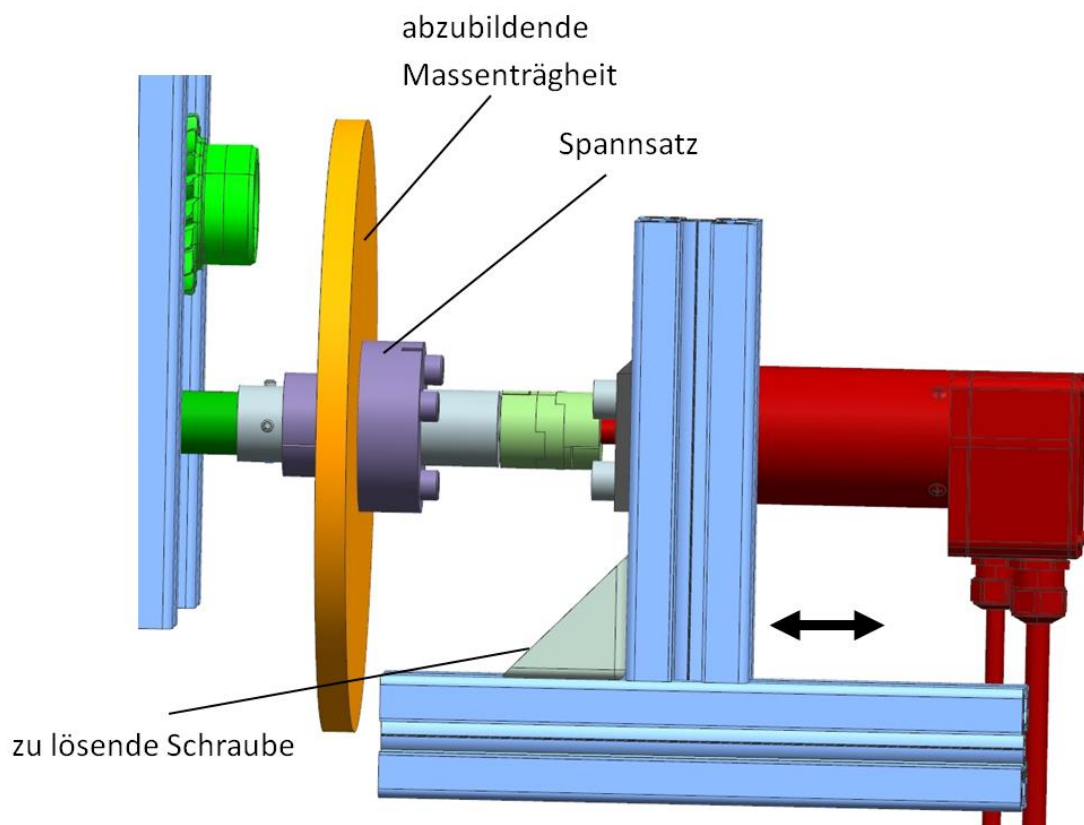


Abbildung 6.8 Montage der Massenträgheit mittels Kegelspannsatz

---

## 6.4 Wegmesssystem

---

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Auswahl von Wegmesssystemen, welche die Referenzfahrt mit elektrischer Synchronisierung realisieren sowie als zusätzliche Informationsquelle dienen sollen. Die Auswahl wird in drei Unterkapitel unterteilt, da die Anforderungen sehr stark vom Einsatzort bzw. von den zu erfüllenden Aufgaben abhängen. Zu Beginn werden Möglichkeiten zur Schaltgabelpositionserfassung beschrieben, die am Prüfstand umsetzbar sind. Dem schließen sich die Konzepte für den Einsatz im Fahrzeug an, wobei hier nochmal zwischen Detektierung für die Referenzfahrt und absoluter Messung der Position unterschieden wird.

Einen Überblick über die verschiedenen Messprinzipien, welche sinnvoll eingesetzt werden können, mit jeweils einem Beispiel gibt Abbildung 6.9 wieder.

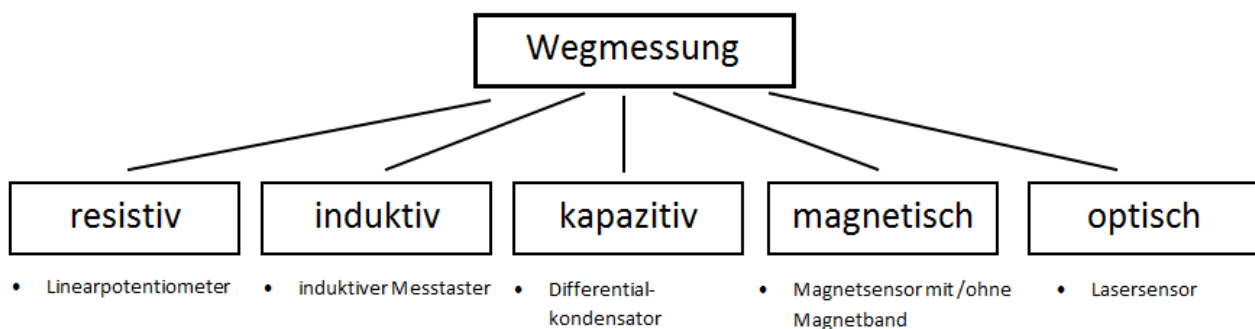


Abbildung 6.9 Wegmessung, Messprinzipien mit Beispielen

Im Folgenden wird aus diesen Messprinzipien die geeignetste Methode ausgewählt und für den Anwendungsfall präzisiert.

---

### 6.4.1 Prüfstandseinsatz

---

Am Prüfstand herrschen andere Bedingungen als im Fahrzeug. Es ist mehr Bauraum verfügbar, da nur eine Schaltgabel verbaut und auch kein Getriebegehäuse vorhanden ist. Außerdem ist die Gefahr durch Verschmutzung geringer und die Umgebungstemperaturen nehmen auch nicht die Werte im Fahrzeug an. Ein weiterer Unterschied zum Fahrzeug ist, dass die Schaltmuffe am Prüfstand fest steht, während sie sich im Fahrzeug dreht. Dies führt dazu, dass einige Sensoren für den Prüfstand einsetzbar sind, allerdings im Fahrzeug keine Bedeutung spielen.

Es soll möglich sein, die absolute Position der Schaltmuffe zu messen, um nicht nur die Referenzfahrt mit elektrischer Synchronisierung zu ermöglichen, sondern auch um weitere Informationen über den Schaltvorgang zu erhalten. Der Bewegungsablauf der Schaltmuffe soll über der Zeit aufgezeichnet werden können. Falls das direkte Messen der Schaltmuffe nicht möglich ist, kann auch die Position der Schaltgabel gemessen werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Position der Schaltgabel so weit wie möglich an der Schaltmuffe gemessen werden soll, um Biegeeinflüsse gering zu halten.

Wegmessung mittels resistiver oder induktiver Sensoren ist für diese Anwendung ungeeignet, da diese einen relativ großen Bauraum benötigen. Die einfachste Methode, die Position der sehr schwer zugänglichen Schaltmuffe direkt zu messen, ist optisch über einen Lasersensor. Dieser ist durch seine kompakte Bauform, die einfache Montage und den einfachen Zugriff auf die Schaltmuffenposition gut geeignet. Die spätere Anordnung ist in Abbildung 6.10 dargestellt.

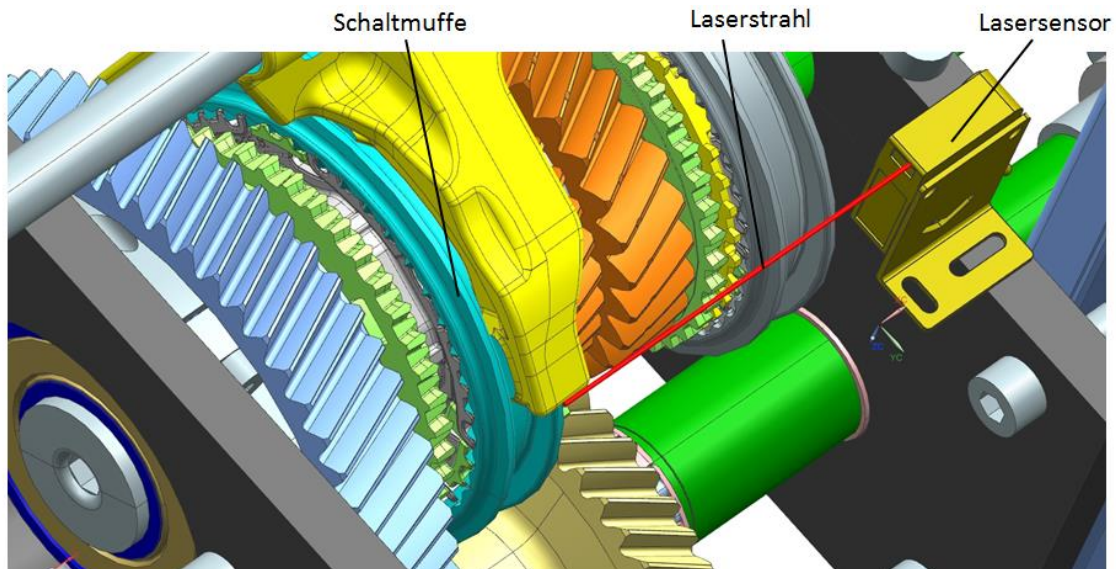


Abbildung 6.10 Anordnung Lasersensor

Der punktuelle Laserstrahl ist auf die Schaltmuffe gerichtet und kann so die genaue Position messen. In Abbildung 6.10 wird auch ersichtlich, wie wenig Bauraum selbst am Prüfstand für die Sensorik vorhanden ist, obwohl hier kein komplettes Getriebe montiert ist. Da auch am Prüfstand noch ein Ölkreislauf geplant ist, ist noch zu prüfen, in welchem Maß das Öl später in das Sichtfeld des Lasersensors gelangen kann. Wird der Sensor zu stark vom Öl beeinflusst, ist es möglich auf zwei weitere Alternativen auszuweichen, welche die Position der Schaltgabel messen. Eine Unabhängigkeit von Verschmutzungen bietet die absolute Wegmessung mit einem Magnetsensor und zusätzlichem Magnetband. Da diese Methode viele Vorteile für den Einsatz im Fahrzeug bietet, wird diese in Kapitel 6.4.3 genauer beschrieben. Außerdem wäre eine Wegmessung mittels Differentialkondensator denkbar. Hierbei wird eine Kapaziätsänderung, welche durch Verschieben zweier gegenüberliegender Platten erreicht wird, in eine Wegänderung umgerechnet. Da bei beiden Alternativen ein Fehler durch Biegeeinflüsse eingeht, ist der Lasersensor vorzuziehen.

---

### 6.4.2 Fahrzeugeinsatz für die Referenzfahrt

---

Im Fahrzeug ergeben sich erschwerte Bedingungen, welche optische Sensoren auf Grund von Verschmutzungen (Öl) komplett ausschließen. Um nur die Referenzfahrt für ein elektrisches Getriebe durchführen zu können, ist es nicht nötig die absolute Position der Schaltmuffe zu messen. Es reicht aus, den mechanischen Anschlag, welcher bei der Referenzfahrt für die mechanische Synchronisierung verwendet wird, gegen einen Magnetsensor auszutauschen. Hierbei muss nur auf den Anschlag ein kleiner Magnet aufgebracht werden, welcher anschließend, bei Erreichen der Endposition vom Magnetsensor, erkannt wird. Somit ist der Fehlerfall, welcher beim elektrischen Getriebe auftritt, ausgeschlossen.

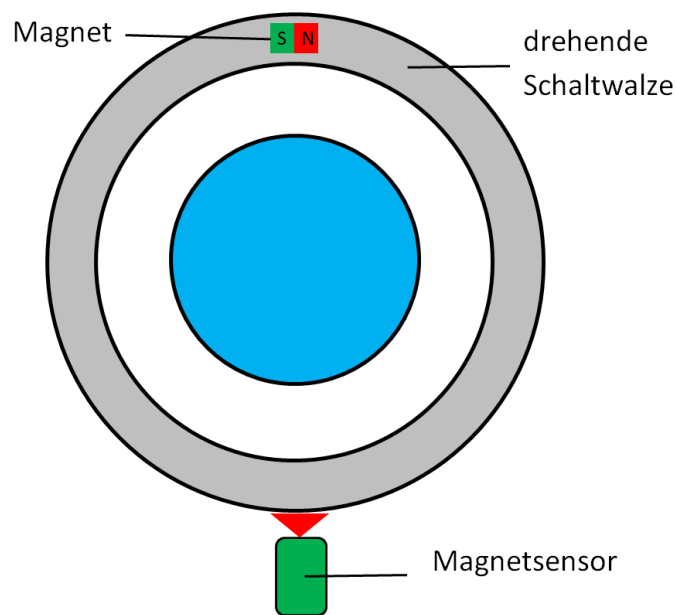


Abbildung 6.11 Referenzfahrt, Magnetsensor

Es wäre ebenfalls denkbar, einen induktiven Sensor zu montieren, welcher ein zusätzlich montiertes Metallstück anstatt eines kleinen Magneten detektiert. Optische Sensoren sind für diese Anwendung auf Grund der höheren Kosten tendenziell ungeeignet.

---

### 6.4.3 Fahrzeugeinsatz zur absoluten Positionsmessung

---

Wünschenswert ist es, im Fahrzeug die absolute Position der Schaltmuffe zu ermitteln. Diese könnte später zur Auswertung des Schaltvorgangs im Bordcomputer verwendet werden. Da es sich als sehr schwierig herausstellte, die drehende, schwer zugängliche Schaltmuffe direkt zu messen, wurde entschieden anstatt der Schaltmuffenposition die Schaltgabelposition zu bestimmen. Dies hat den Vorteil, dass kein drehendes Teil gemessen werden muss. Das Ziel ist es, die Position so nah wie möglich an der Schaltmuffe zu messen, um Biegeeinflüsse gering zu halten.

Die eigentliche Messung der Position soll nun über einen absoluten Magnetsensor mit zugehörigem Magnetband durchgeführt werden. Dieses hat eine kompakte Bauweise und ist resistent gegen

Schmutz sowie Temperatureinflüsse. Hierbei erkennt der Magnetsensor abwechselnd Nord- und Südpole und kann hieraus die aktuelle Position der Schaltmuffe bestimmen. Die genaue Funktionsweise dieses Sensorsystems kann in [13] nachgelesen werden.

In Abbildung 6.12 ist ein solches absolutes Magnetwegmesssystem dargestellt und auch die kompakte Bauweise ist ersichtlich.

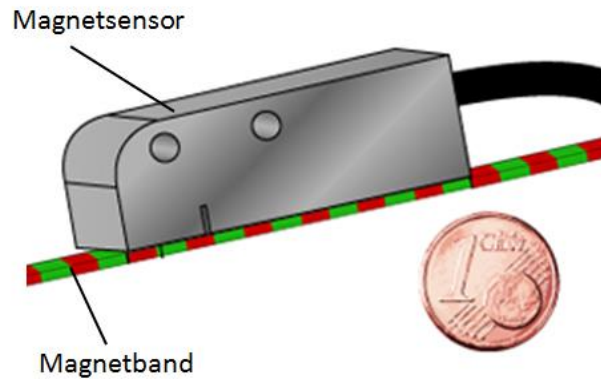


Abbildung 6.12 absolutes Magnetwegmesssystem der Firma Willtec [14]

Das Magnetband soll später auf eine vorgesehene Fläche auf die Schaltgabel aufgebracht und der Magnetsensor in einem bestimmten Abstand zu diesem Band montiert werden. Eine einfache Montage würde ein Magnetsensor ermöglichen, welcher von der Bauform einem Zylinder mit Außengewinde entspricht. Für diesen könnte im Getriebegehäuse eine Gewindebohrung vorgesehen und so eine einfache Montage gewährleistet werden. Außerdem wäre der Abstand zum Magnetband über das Gewinde leicht einstellbar und könnte über eine Kontermutter gesichert werden.

Eine weitere Möglichkeit wäre auch hier der Einsatz eines Differentialkondensators. Dieser ist ebenfalls resistent gegen Verschmutzungen und kann auch sehr kompakt ausgeführt werden. Resistive sowie induktive Sensoren sind für diesen Einsatz, aufgrund der großen Bauform, tendenziell ungeeignet. Optische Sensoren sind ebenfalls tendenziell ungeeignet. Der Grund hierfür ist die starke Verschmutzung im Fahrzeug.



---

## **7 Montage und Inbetriebnahme**

---

In diesem Kapitel wird die Montage und Inbetriebnahme der einzelnen Bauteile beschrieben. Zu Beginn sind der Anschluss und die Programmierung des Motorcontrollers 2 dargestellt. Anschließend wird der nötige Umbau der Hardware am Prüfstand und die Montage der Prüfstandserweiterung beschrieben.

---

### **7.1 Anschluss und Programmierung des Motorcontrollers 2**

---

Der Anschluss des Motors wird nach den Datenblättern von Prüfstandsmotor und Motorcontroller vorgenommen. Es sind die Leitungen der Phasen, der Hallsensoren und die des Encoders an den Motorcontroller anzuschließen. Die Kommunikation zwischen dSPACE Controllerboard und dem Motorcontroller erfolgt über ein analoges Signal und der RS-232-Schnittstelle. Als Spannungsversorgung wird das bereits vorhandene Netzteil verwendet. Es wird der maximale Strom des Motorcontrollers mit dem maximalen Strom des Netzteils abgeglichen, da sonst das Netzteil überlastet wird. Außerdem ist die maximale Ausgangsspannung vom Motorcontroller auf die Nennspannung des Motors zu begrenzen und die Anzahl der Impulse pro Umdrehung, welche der Encoder ausgibt, einzustellen. Nur so ist gewährleistet, dass der Motorcontroller das Signal des Encoders richtig auswertet. Bevor der Prüfstandsmotor am Prüfstand montiert wird, ist eine Funktionsprüfung nötig. Mit dieser wird der richtige Anschluss und das Zusammenwirken von Prüfstandsmotor und Motorcontroller überprüft.

---

### **7.2 Umbau der Hardware am Prüfstand**

---

Um den Prüfstand mit der ausgewählten Hardware zu erweitern sind Umbaumaßnahmen notwendig. In Abbildung 7.1 ist der aktuelle Aufbau der Hardware dargestellt. Da später die Schaltgabel des aktuellen Prüfstands in die Schaltmuffe der ausgewählten Getriebestufe greifen soll, ist es notwendig, den benötigten Bauraum zu schaffen. Hierfür wird der nun nicht mehr benötigte Anschlag entfernt. Außerdem ist es notwendig, die Befestigung der Schaltstangenlagerung nach oben zu verlagern. So ergibt sich der benötigte Bauraum im unteren Bereich um die Getriebestufe mit Aluprofilen in den vorhandenen Prüfstand zu integrieren.

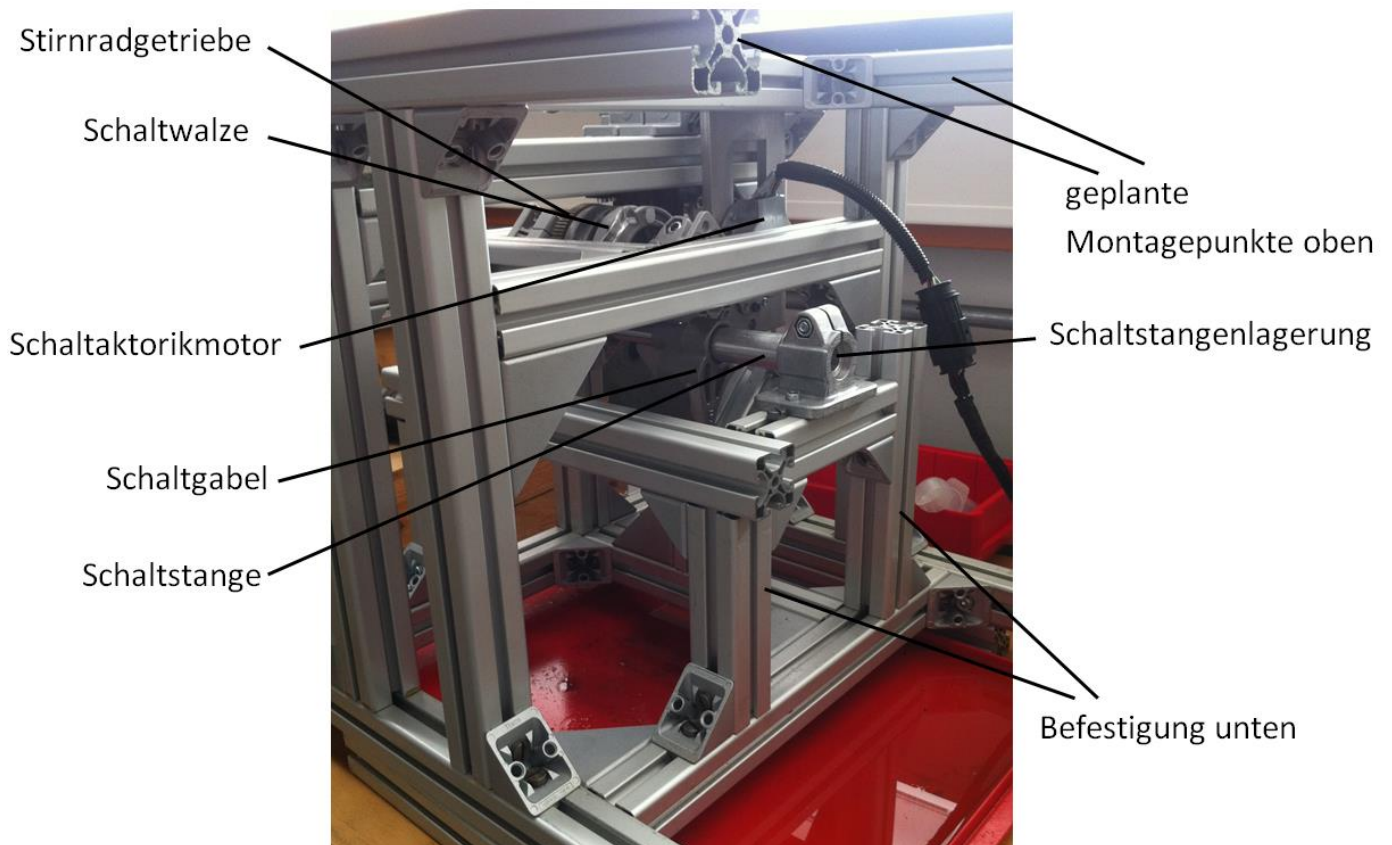


Abbildung 7.1 aktueller Hardwareaufbau

Der weitere Aufbau kann in dem aktuellen Zustand belassen werden, da keine weiteren Konflikte auftreten.

### 7.3 Montage der Prüfstandserweiterung

Die Prüfstandserweiterung ist separat zusammengebaut und auf Funktion getestet worden. Hierfür wurden die bereits montierten Lager in die vorgesehenen Lagerstellen geklemmt und das Nadellager in die Lagerbuchse eingeführt. In Abbildung 7.2 ist die reale Prüfstandserweiterung zu sehen. Die Abtriebswelle steht hierbei fest und die Antriebswelle wird über den Prüfstandsmotor angetrieben. Dieser ist mittels Verbindungselement und Wellenkupplung an die Antriebswelle gekoppelt. Die Schalmuffe leitet nach links die elektrische und nach rechts die mechanische Synchronisierung ein. Somit ist es möglich eine elektrische sowie eine mechanische Synchronisierung am Prüfstand abzubilden. Die beiden Seitenteile definieren den Abstand zwischen den beiden Wellen.



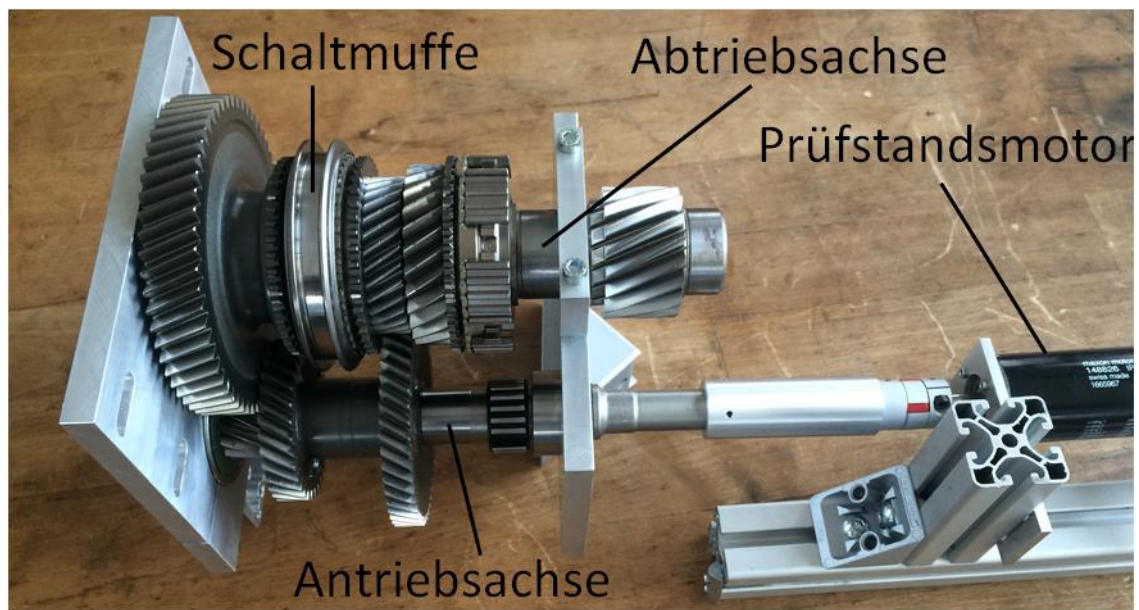


Abbildung 7.2 reale Prüfstandserweiterung

---

## 8 Programmierung des dSPACE Controllerboards

---

In diesem Kapitel wird die Programmierung des dSPACE Controllerboards näher beschrieben. Zu Beginn wird ein Überblick über den kompletten Programmablauf mit Hilfe eines Programmablaufplans gegeben. Dem schließt sich eine detailliertere Beschreibung der Unterprogramme an.

---

### 8.1 Programmablaufplan

---

Um den gesamten Ablauf des späteren Programms grafisch darzustellen, wird ein Programmablaufplan verwendet. Hierbei wird die Integration bzw. das Zusammenspiel zwischen bisherigem Prüfstandsabbau und Prüfstandserweiterung deutlich.

Das zentrale Herzstück des gesamten Prüfstands bildet das dSPACE Controllerboard. Auf diesem wird später das komplette Programm, welches in Abbildung 8.1 dargestellt ist, ablaufen.

Zu Beginn muss die entsprechende Massenträgheit des ausgewählten Getriebes am Prüfstand montiert und am PC die gewünschte Differenzdrehzahl, die dem abzubildenden Gangwechsel entspricht, eingestellt werden. Zusätzlich ist noch die später abzufahrende Schleppmomentkurve auszuwählen.

Nun wird das Programm gestartet und geht sofort in die Drehzahlregelung für den Prüfstandsmotor. Dieser beschleunigt die Massenträgheit auf die gewünschte Differenzdrehzahl. Ist die Solldrehzahl erreicht, dreht der Motor mit dieser solange weiter, bis entweder automatisch oder manuell der Synchronisierungsvorgang gestartet wird. Ist das Startsignal erfolgt, wechselt der Prüfstandsmotor von einer Drehzahlregelung in eine Drehmomentregelung und fährt die zuvor ausgewählte Schleppmomentkurve ab. Gleichzeitig legt der Schaltaktorikmotor über die Schaltgabel den Gang ein. Ist der Gang komplett eingelegt und somit die Differenzdrehzahl gleich Null, wird der Prüfstandsmotor sowie der Schaltaktorikmotor gestoppt und das Programm ist beendet.

## Programmablauf in dSPACE

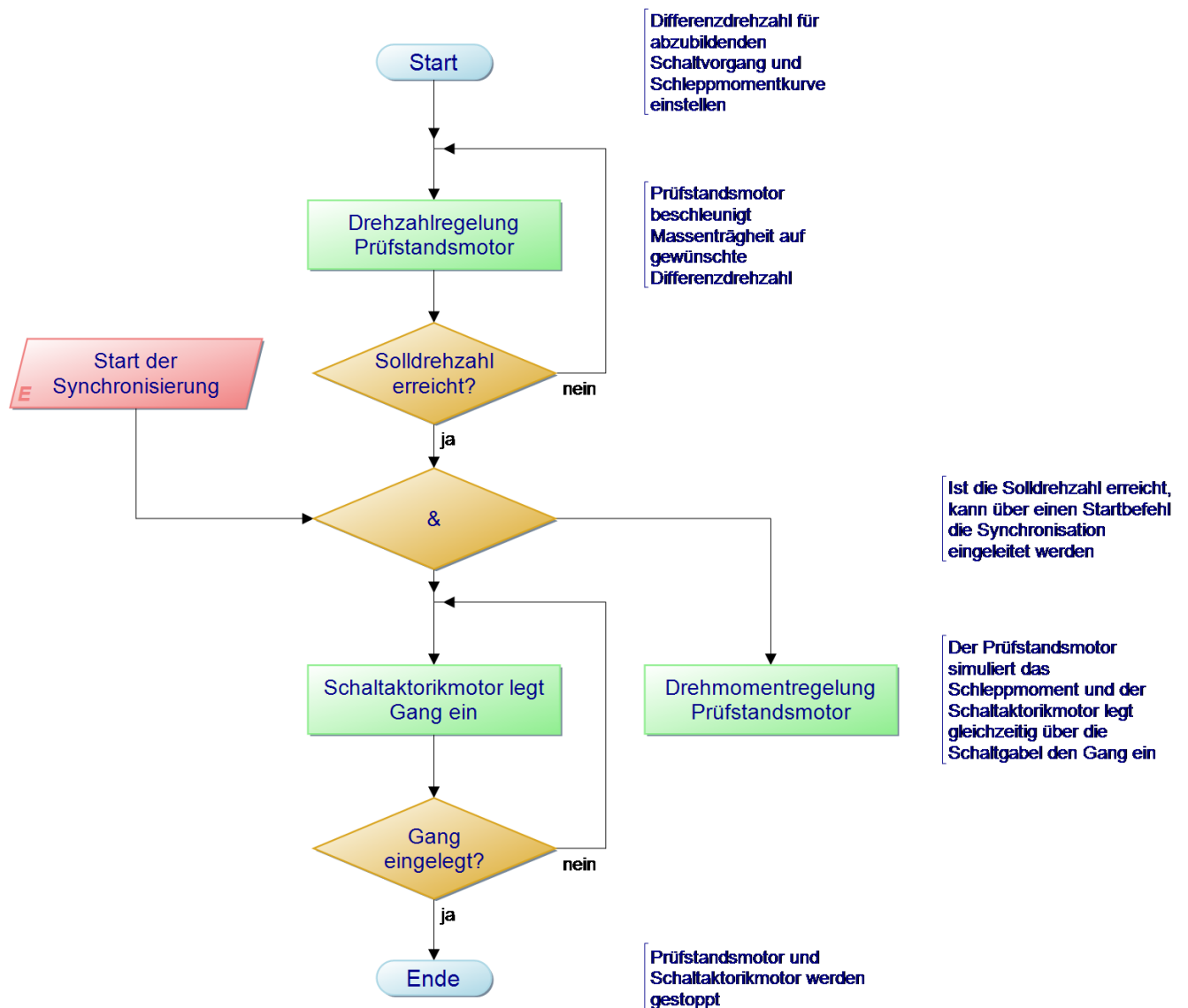


Abbildung 8.1 Programmablaufplan in dSPACE

## 8.2 Detaillierte Beschreibung der Unterprogramme

Im Programmablaufplan sind die zwei Unterprogramme Drehzahlregelung und Drehmomentregelung zu erkennen. Diese sollen nun näher beschrieben werden. Außerdem wird noch die Implementierung der RS-232 Kommunikation zwischen Motorcontroller und dSPACE Controllerboard näher erläutert.

---

### 8.2.1 Drehzahlregelung

---

Die Drehzahlregelung hat die Aufgabe, die Massenträgheit auf die eingestellte Differenzdrehzahl zu beschleunigen. Ist die Drehzahl erreicht, soll dieses Unterprogramm ein Signal ausgeben. In Abbildung 8.2 ist der Regelkreis für die Drehzahlregelung dargestellt.

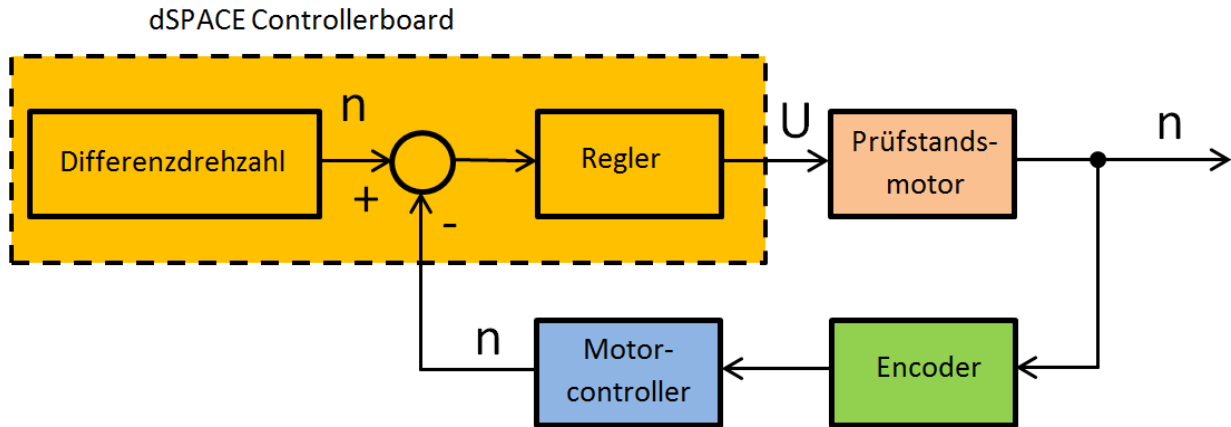


Abbildung 8.2 Regelkreis der Drehzahlregelung

Es ist die Differenzdrehzahl als Sollgröße zu erkennen, die im dSPACE Controllerboard eingestellt wird. Diese wird nun mit der aktuellen Drehzahl des Motors, welche über den Encoder erfasst und durch den Motorcontroller ausgewertet wird, verglichen. Der Regler berechnet aus der Regeldifferenz die neue Stellspannung und gibt diese an den Prüfstandsmotor weiter. Die Drehzahl am Prüfstandsmotor stellt die Regelgröße dar.

---

### 8.2.2 Drehmomentregelung

---

Um das Schleppmoment an der Synchronisierung über den Prüfstandsmotor abzubilden, wird nach dem Start des Synchronisierungsvorganges in den Drehmomentmodus gewechselt. Der Regelkreis für das Drehmoment ist in Abbildung 8.3 dargestellt.

Die zu Beginn eingestellte Schleppmomentkurve stellt die Sollgröße dar, welche mit dem aktuellen Moment des Motors verglichen wird. Hierfür wird über Stromsensoren, welche sich im Motorcontroller befinden, der Strom gemessen und anschließend im dSPACE Controllerboard über die Drehmomentkonstante  $k_M$  das Drehmoment berechnet. Der Regler stellt nun abhängig von der Regeldifferenz die Spannung am Prüfstandsmotor ein. Der Prüfstandsmotorstrom stellt die Regelgröße dar, weshalb es sich eigentlich um einen Stromregelkreis handelt. Da Drehmoment und Strom bei dem ausgewählten Motor direkt proportional sind, wird der Regelkreis vereinfachend als Drehmomentregelung bezeichnet.

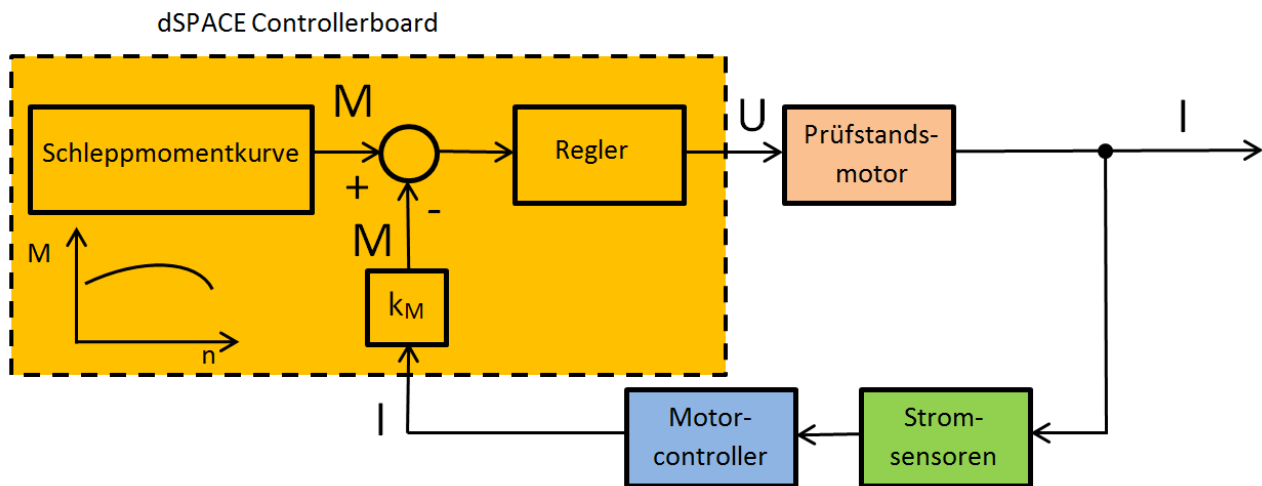


Abbildung 8.3 Regelkreis der Drehmomentregelung

### 8.2.3 RS-232 Kommunikation

Damit das dSPACE Controllerboard die aktuellen Strom- und Drehzahlwerte aus dem Motorcontroller lesen kann, ist es notwendig, eine RS-232 Kommunikation auf dem dSPACE Controllerboard zu implementieren. Aus dem Datenblatt des Motorcontrollers können die Befehle, die geschickt werden müssen um die beiden Istwerte zurückzubekommen, gewonnen werden. Beispielsweise muss für den aktuellen Motorstrom „?A“ an den Motorcontroller geschickt werden und dieser gibt anschließend den Motorstrom zurück.

Für die Implementierung existieren bereits zwei vorgefertigte Blöcke in Simulink, Serial Transmit und Serial Receive, die mit dem richtigen Parameterformat angesteuert werden müssen. Im Anhang ist die Implementierung in Simulink für das Auslesen des Stromistwertes dargestellt und beschrieben. Das Auslesen der aktuellen Drehzahl funktioniert mit dem gleichen Code, nur dass nun ein anderer Befehl an den Motorcontroller geschickt werden muss.

Die gewonnen Istwerte werden anschließend, wie in den vorherigen Unterkapiteln beschrieben, für die Drehzahl- bzw. Drehmomentregelung verwendet.

---

## 9 Erweiterung des Gesamtkonzepts

---

In diesem Kapitel werden Erweiterungen des Gesamtkonzeptes, die während der Durchführung dieser Arbeit aufgekommen sind und am Schaltwalzenprüfstand noch umgesetzt werden sollen, dargestellt. Hierzu gehören die Montage zusätzlicher Piezoelemente, die notwendige Schmierung der Lager, die daraus resultierende Abdeckung des Prüfstands und die Anbringung eines Not-Aus-Schalters.

---

### 9.1 Zusätzliche Piezoelemente

---

Es ist sehr wichtig, den Schaltvorgang so genau wie möglich beschreiben zu können. Mit den aktuell geplanten Messeinrichtungen ist es nur möglich, die aktuelle Position der Schaltgabel oder der Schaltmuffe am Schaltwalzenprüfstand zu erfassen. Es kann allerdings nicht festgestellt werden, ob die Schaltgabel von der Schaltmuffe während des Schaltvorgangs abhebt.

Deshalb soll zwischen Schaltgabel und Schaltmuffe jeweils ein Piezoelement angebracht und über die abgreifbare Spannung das Abheben erkannt werden. Mit dieser Anordnung ist es zusätzlich möglich die Schaltkraft, welche an der Schaltgabel anliegt, zu messen.

Als Montageort ist die Abflachung der Schaltgabel geeignet (Abbildung 9.1). Hier kann das Piezoelement aufgeklebt und das Kabel über die Schaltgabel und die Schaltstange zur Auswerteelektronik verlegt werden. Da auf beiden Seiten ein Gang eingelegt werden soll (mechanisch und elektrische Synchronisierung), wird auf beiden Seiten ein Piezoelement benötigt.

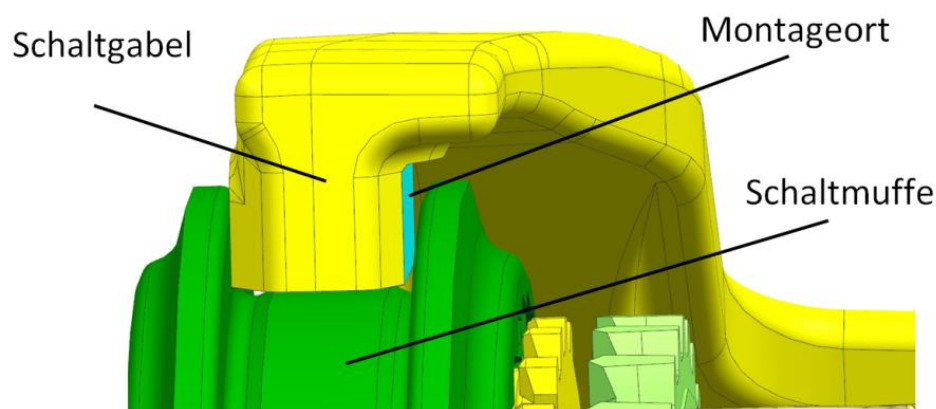


Abbildung 9.1 Montageort der Piezoelemente

---

## 9.2 Schmierung der Lager

---

Um eine zuverlässige Funktion und eine lange Lebensdauer der Wälzlager zu gewährleisten ist es notwendig, diese ausreichend gut zu schmieren. Der Schmierstoff soll hierbei Verschleiß vermeiden, Wärme ableiten, das Laufgeräusch dämpfen und vor Korrosion schützen [15].

Im dargestellten Gesamtaufbau dreht sich nur die Antriebsachse und deshalb ist es notwendig, die Lagerung dieser Achse zu schmieren. Die Antriebsachse wird von einem Rillenkugellager und einem Nadellager gelagert. Um beide Bauteile möglichst einfach und zuverlässig zu schmieren, soll ein Ölkreislauf, wie in Abbildung 9.2 dargestellt, aufgebaut werden. Hierfür wird eine Ölpumpe benötigt, die das Öl aus einem Auffangbehälter an die entsprechende Lagerstelle pumpt. Anschließend tropft das überschüssige Öl wieder in den Auffangbehälter, kühlt dort ab und wird erneut zu den Lagerstellen gepumpt. Eine aktive Kühlung wie sie in Abbildung 9.2 dargestellt ist, wird in diesem Fall nicht benötigt.

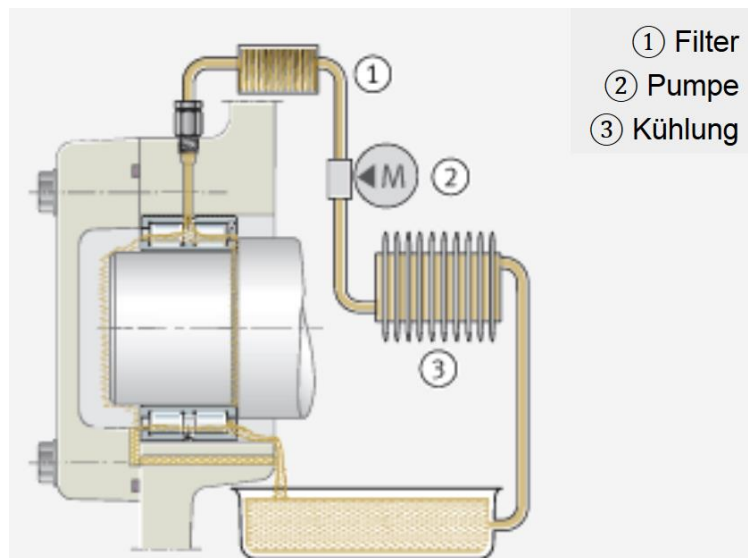


Abbildung 9.2 Ölkreislauf [15]

---

## 9.3 Abdeckung des Prüfstands

---

Da am erweiterten Schaltwalzenprüfstand drehende Teile vorliegen und der Anwender beim Betreiben des Prüfstandes nicht gefährdet werden soll, ist es notwendig, einen Schutz einzubauen. Außerdem ist es möglich, dass durch die Schmierung der Lager auch etwas Öl nach außen spritzt und dieses die Gesundheit des Anwenders gefährden könnte. Um diese Gefahren zu eliminieren wird der komplette Prüfstand durch eine Abdeckung vom Anwender abgegrenzt.

Um trotzdem eine Sicht zum Prüfstand zu gewährleisten, soll die Abdeckung aus Plexiglas bestehen. Dieses ist kostengünstig, transparent und leicht zu verarbeiten. Die Abdeckung sollte zusätzlich ein Fenster besitzen, wie in Abbildung 9.3 dargestellt, durch welches es weiterhin möglich bleibt, die abzubildende Massenträgheit schnell und unkompliziert zu tauschen. Außerdem muss an diesem

---

Fenster eine Verriegelung mit Endscharter angebracht sein, welcher überprüft, ob das Fenster wirklich geschlossen ist. Dieser wird als Verriegelung in das Gesamtsystem integriert. Zur Sicherheit des Anlagenbedieners darf es nur möglich sein, den Schaltwalzenprüfstand zu aktivieren, wenn das Fenster geschlossen ist.

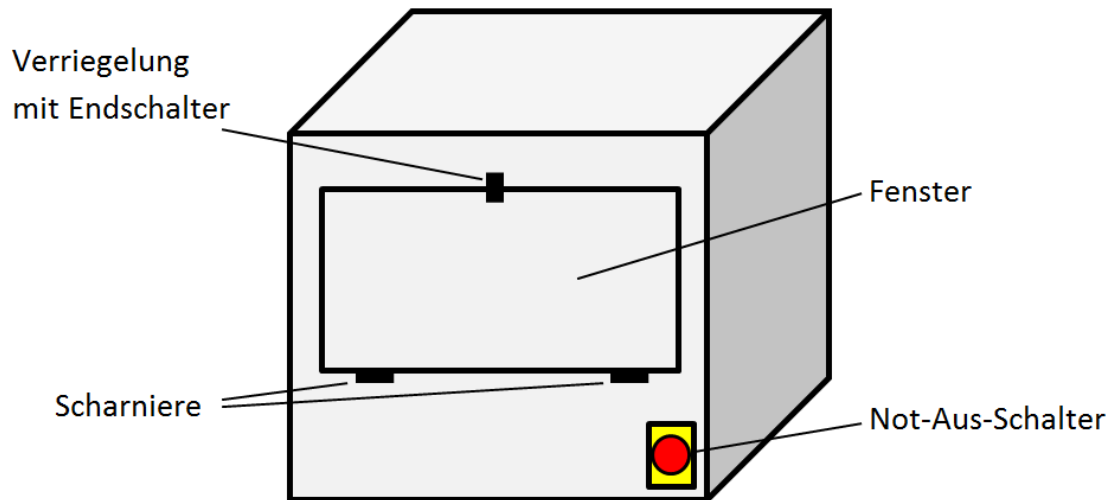


Abbildung 9.3 Plexiglasabdeckung mit Not-Aus-Schalter

---

## 9.4 Not-Aus-Schalter

Um dem Anlagenbediener noch zusätzlich Sicherheit zu gewährleisten, soll ein Not-Aus-Schalter angebracht werden (Abbildung 9.3). Dieser wird nach Stopp-Kategorie 1 betrieben und hat somit die Aufgabe, bei einem Notfall die drehenden Teile bis zum Stillstand abzubremesen und anschließend den kompletten Schaltwalzenprüfstand spannungsfrei zu schalten [16]. Dies ist sinnvoll, wenn Probleme innerhalb der Abdeckung auftreten, welche zum einen eine Gefahr nach außen und zum anderen eine Gefahr für die Bauteile darstellen könnten. Dieser soll also nicht nur zum Personenschutz, sondern auch zum Anlagenschutz dienen.



---

## 10 Zusammenfassung und Ausblick

---

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Konzept zur Abbildung einer Synchronisierung am vorhandenen Schaltwalzenprüfstand und Erfassung weiterer Messgrößen entwickelt. Die benötigte Hardware wurde ausgewählt, der Programmablauf des Prüfstands mit Erweiterung in dSPACE geplant sowie mit der Umsetzung begonnen.

Zunächst wurden der Ausgangszustand des Prüfstands und das Grundkonzept der Prüfstandserweiterung beschrieben. Dieses umfasst das Herunterbrechen auf Differenzdrehzahl und weitere Vereinfachungen. Es wird eine Möglichkeit gegeben, das Schleppmoment realitätsnah abzubilden und es ist ebenfalls möglich, verschiedene Getriebe, egal ob diese eine elektrische oder mechanische Synchronisierung besitzen, an dem Prüfstand zu untersuchen. Zusätzlich wurde ein Konzept zur Erfassung von Messgrößen, wie Differenzdrehzahl, Schleppmoment und Schaltgabelposition, ausgearbeitet.

Im nächsten Schritt sind die Komponenten nach den zuvor gestellten Anforderungen ausgewählt worden und die Integration in den vorhandenen Prüfstand wurde mittels eigens gefertigter Bauteile ermöglicht. Die technischen Zeichnungen für diese wurden aus dem CAD-Entwurf abgeleitet und an die Werkstatt übergeben. Außerdem wurden für die zusätzlich benötigten Bauteile Stücklisten erstellt, beim Hersteller Angebote eingeholt und anschließend bestellt. Die Prüfstandserweiterung wurde testweise zusammengebaut und auf Funktion geprüft. Für die Messung der Schaltgabelposition wurden die verschiedenen Möglichkeiten aufgezeigt und gegenübergestellt.

Die Montage und Inbetriebnahme wurde beschrieben und der Programmablaufplan für das dSPACE Controllerboard ist mit der Beschreibung von Unterprogrammen erläutert worden. Die während der Bachelor-Thesis aufgekommenen zusätzlichen Erweiterungen wurden näher konkretisiert und mit in diese Arbeit aufgenommen, sodass ein nahtloser Übergang zu weiteren Arbeiten ermöglicht wird.

Die nächsten Schritte bestehen nun darin, die Prüfstandserweiterung in den vorhandenen Prüfstand zu integrieren. Anschließend kann der Programmablauf in dSPACE umgesetzt und der Synchronisierungsvorgang am Prüfstand gestartet werden. Um weitere Messgrößen zu erfassen, kann ein Lasersensor sowie Piezoelemente montiert werden.

Sind die letzten Schritte umgesetzt, ist es nun möglich, einen Synchronisierungsvorgang mit elektrischer oder mechanischer Synchronisierung mit vielen Messgrößen zu beschreiben. Diese Ergebnisse dienen zum einen zur Optimierung von Getrieben mit elektrischer Synchronisierung und zum anderen zum Abgleich mit dem vorhandenen Matlab Modell über die mechanische Synchronisierung.

---

## 11 Literaturverzeichnis

---

- [1] M. Daniel H. König, „Aktive Schwinungsminderung und elektrische Synchronisierung für mehrgängige Hybridantriebe mit Klauenkupplungen,“ 2015.
- [2] B. B. G. L. Harald Naunheimer, Fahrzeuggetriebe, Grundlagen, Auswahl, Auslegung, Konstruktion, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 2007.
- [3] Getrag, „www.yumpu.com,“ 2014. [Online]. Available: <https://www.yumpu.com/en/document/view/21543392/download-this-file-add-this-file-to-your-download-list-getrag/17>. [Zugriff am 07 07 2015].
- [4] D.-I. T. Hackl, Alternative Synchronisierungen für Handschaltgetriebe, Automatisierte Schaltgetriebe und Doppelkupplungsgetriebe, Aachen: Shaker Verlag, 2013.
- [5] J. Weidauer, Elektrische Antriebstechnik, 2. Auflage Hrsg., B. u. M. Siemens Aktiengesellschaft, Hrsg., Erlangen: Publicis Publishing, Erlangen, 2011.
- [6] A. Binder, Elektrische Maschinen und Antriebe, Grundlagen Betriebsverhalten, Darmstadt: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
- [7] maxon motor, driven by precision, *Programm 2013/2014, Hochpräzise Antriebe und Systeme*, 2013/2014, p. 405.
- [8] P. D. Klaus Fuest, Elektrische Maschinen und Antriebe, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2007.
- [9] dSPACE GmbH, *DS1104R&D Controller Board, Hardware Installation und Configuration*, 2009.
- [10] dSPACE GmbH, *DS1104 R&D Controller Board, RTI Reference*, 2004.
- [11] F. Bert, „Entwicklung einer Ansteuerung für die Schaltaktorik im Doppelkupplungsgetriebe,“ TU Darmstadt, Darmstadt, 2014.
- [12] D. M. D. J. J. V. Herbert Wittel, Roloff/Matek Maschinenelemente, Normung-Berechnung-Gestaltung, 21. Auflage Hrsg., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [13] H. Walcher, Winkel- und Wegmessung im Maschinenbau, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1985.
- [14] Willtec, „www.willtec.de,“ [Online]. Available: <http://www.willtec.de/de/produkte/magnetische-weg-und-winkelmesssysteme/sensoren/s1h/28/>. [Zugriff am 16. Juli 2015].
- [15] SCHAEFFLER, „schaeffler.de,“ SCHAEFFLER, [Online]. Available: [http://medias.schaeffler.de/medias/de!hp.tg.cat/tg\\_hr\\*ST4\\_1652077067](http://medias.schaeffler.de/medias/de!hp.tg.cat/tg_hr*ST4_1652077067). [Zugriff am 15. Juli 2015].
- [16] H. H. D. J. Michael Dzieia, Elektrotechnik-Betriebstechnik: Lernfelder 5-13, Braunschweig: Westermann, 2009.
- [17] G. J. F. K. R. N. B. P. Robert Fischer, Das Getriebebuch, Wien: Springer Verlag, 2012.
- [18] D.-I. U. C. B. D.-I. (. L. H. Ernest Devincent, „Leichtes Frontquer Doppelkupplungsgetriebe mit

---

hoher Effizienz,“ *Getriebe*, pp. 944-948, 12 2013.

- [19] P. D.-I. H. B. Prof. Dr.-Ing. R. Nordmann, *Maschinenelemente und Mechatronik I*, Aachen: Shaker, 2003.
- [20] H. S. W. Gross, *Technische Mechanik 1*, Bd. 1 Statik, Berlin: Springer, 2006.
- [21] S. Dylla, „Entwicklung einer Methode zur Objektivierung der subjektiven erlebten Schaltbetätigungsqualität von Fahrzeugen mit manuellen Schaltgetrieben,“ Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation, 2009.
- [22] D. Falk, *Metalltechnik Tabellenbuch*, Braunschweig: Westermann, 2009.
- [23] Roboteq, Inc, *MBL1xxx Motor Controller Datasheet*, 2013.
- [24] Roboteq, Inc, *Advanced Digital Motor Controller User Manual*, 2013.
- [25] dSPACE GmbH, *DS1104 R&D Controller Board, Features*, 2004.
- [26] D.-I. M. W. D.-I. ( C. S. Dipl.-Ing. (FH) Martin Kern, „Mehrganggetriebe mit Klauenkupplung für Hybridantriebe,“ *ATZ*, Nr. 05/2014, pp. 45-47, 2014.
- [27] D.-I. U. C. B. D.-I. ( L. H. Ernest Devincent, „Leichtes Fronquer Doppelkupplungsgetriebe mit hoher Effizienz,“ *ATZ*, Bd. Titelthema: Getriebe, Nr. 12/2013, pp. 944-948, 2013.