



# Konzeptionierung eines Prüfstandes für Antriebsstrangkomponenten und Modellierung von Elektromotoren

## MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Individual-Masterstudium  
Elektrotechnik-Fahrzeugtechnik

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Dipl.-Ing. Martin Ackerl  
Dipl.-Ing. Dr.techn. Jürgen Fabian

Institut für Fahrzeugtechnik

The logo for the Institute of Vehicle Technology (FTG), consisting of the letters 'FTG' in a bold, blue, italicized sans-serif font.

Graz, März 2016

## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

### *AFFIDAVIT*

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

*I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.*

---

Datum / Date

---

Unterschrift / Signature

# Kurzfassung

Heutzutage sind Prüfstände ein wichtiges Werkzeug um neu designete Produkte auf Komponenten-Basis prüfen zu können. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit ein Prüfstand konzeptioniert mit dem Belastungsversuche unterschiedlicher Bauteile durchgeführt werden können.

In dieser Arbeit wird auf die Anforderungen, die an einem solchen Prüfstand gestellt werden, eingegangen. Weiters wird ein Konzept erstellt, welches diese Anforderungen erfüllt. Bei den Komponenten, welche zur Umsetzung dieses Konzeptes notwendig sind, wird auch auf die Eigenschaften eingegangen die diese erfüllen müssen.

Um die verwendeten Antriebs- und Belastungsmaschinen ohne hohen Aufwand an Messtechnik betreiben zu können, wird ein mathematisches Modell gezeigt mit dem ein solcher Betrieb umgesetzt werden kann. Zur Parametrierung dieses Modelles werden Möglichkeiten aufgezeigt wie die benötigten Parameter berechnet werden können.

Für nachfolgende Prüfstandserweiterungen werden zusätzliche Möglichkeiten aufgezeigt, mit denen die Eigenschaften des gesamten Prüfstandes weiter verbessert werden können.

# Abstract

Test benches are today an important tool for examining newly designed products on a component basis. This is why the present thesis develops a test bench that can carry out tests on various construction elements.

The thesis begins by addressing the requirements of such a test bench. Following this, a conceptual design is presented that meets all desired requirements. The components necessary for realizing the design are discussed, and their essential characteristics analysed.

In order to drive the motors without extensive measurement technology, a suitable mathematical model is presented. As far as parametrization of the model is concerned, various possibilities are shown for calculating the necessary parameters.

Finally, to allow subsequent extension of the test bench, further possible options of improving the characteristics of the entire device are shown.

# Abkürzungsverzeichnis

<b>AC</b>	Alternative-Current (Wechselstrom)
<b>ASM</b>	Asynchronmaschine
<b>CAN</b>	Control Area Network (Automotives Bussystem)
<b>CPU</b>	Central Processing Unit (Prozessor)
<b>DC</b>	Direct-Current (Gleichstrom)
<b>DC-DC</b>	Spannungswandler für Gleichspannung
<b>DMMW</b>	Drehmomentmesswelle
<b>FSM</b>	Fremd-erregte Synchronmaschine
<b>GM</b>	Gleichstrommaschine
<b>HV</b>	Hochvolt bzw. Hazardous Voltage (Gefährliche Spannung)
<b>LV</b>	Low-Voltage (Niederspannung)
<b>PDU</b>	Power Distribution Unit (Leistungsverteiler)
<b>PM</b>	Permanent-Magnete
<b>PMSM</b>	Permanent-erregte Synchronmaschine
<b>PKW</b>	Personenkraftwagen
<b>RKS</b>	Rotorfestes Koordinatensystem
<b>SKS</b>	Statorfestes Koordinatensystem
<b>SRM</b>	Geschaltene Reluktanzmaschine
<b>SW</b>	Software
<b>TFM</b>	Transversalflussmaschine
<b>ZSE</b>	Zentrale Steuer Einheit

# Symbolverzeichnis

$\vec{B}$	Vektor der magnetischen Flussdichte
$I_a(t)$	Strom in der Phase a zum Zeitpunkt t
$\vec{I}^R$	Stromraumzeiger in Betrachtung im RKS
$\vec{I}^S$	Stromraumzeiger in Betrachtung im SKS
$I_0$	Nullstrom in einem Drehstromsystem
$L_d$	Längsinduktivität
$L_q$	Querinduktivität
$M_R$	Reibmoment
$M_L$	Lastmoment
$M_i$	Inneres erzeugtes Drehmoment
$R_S$	Elektrischer Widerstand der Ständerwicklung
$Z_p$	Polpaarzahl der elektrischen Maschine
$d$	Realteil im RKS
$q$	Imaginärteil im RKS
$\alpha$	Realteil im SKS
$\beta$	Imaginärteil im SKS
$\beta_L$	Winkel zwischen SKS und RKS
$\Theta$	Trägheitsmoment
$\mu_{r,FE}$	Relative magnetische Permeabilität von Eisen
$\mu_{r,PM}$	Relative magnetische Permeabilität eines PM
$\varphi$	Winkel im Koordinatensystem
$\Psi_{PM}$	Verketteter magnetischer Fluss der PM
$\omega_{el}$	Elektrische Winkelgeschwindigkeit
$\omega_{mech}$	Mechanische Winkelgeschwindigkeit

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Aufbau des Prüfstandes</b>	<b>2</b>
2.1	Anforderungen an den Prüfstand . . . . .	2
2.1.1	Kalibrierung und Reproduzierbarkeit . . . . .	2
2.1.2	Automatisierte Abläufe . . . . .	3
2.1.3	Diverse Ansteuermöglichkeiten . . . . .	3
2.1.4	Flexible Komponenten-Anordnung . . . . .	3
2.1.5	Messungen am Prüfstand mit einer hohen zeitlichen Auflösung .	4
2.1.6	Automotive Elektromotoren als Belastungsmaschinen . . . . .	4
2.2	Benötigte Komponenten am Prüfstand . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Erstellung eines Prüfstandkonzeptes</b>	<b>6</b>
3.1	Antriebs- und Belastungsmaschinen mit Inverter . . . . .	6
3.2	Spannung und Energieversorgung . . . . .	8
3.3	Ansteuerung des Prüfstandes . . . . .	9
3.4	Messtechnik . . . . .	10
3.4.1	Aufzeichnung von SW-Parameter . . . . .	11
3.4.2	LV-Messsystem . . . . .	12
3.4.3	HV-Messsystem . . . . .	12
3.4.4	Drehmoment-Messwelle . . . . .	13
3.4.5	Synchronisierung der Messsysteme . . . . .	13
3.4.6	Interne Sensoren der PMSM . . . . .	14
3.5	Kühlung der Bauteile . . . . .	15
3.6	Grundgestell mit Schwingungsentkoppelung . . . . .	17
3.7	Wellenkoppelung der beiden Elektromotoren . . . . .	17
3.8	Sicherheitseinrichtungen am Prüfstand . . . . .	19
3.8.1	Mechanische Sicherung . . . . .	19
3.8.2	Interlock-Schutzkreis . . . . .	20
3.8.3	Isolationsmessung . . . . .	21
3.8.4	Notausschalter . . . . .	22
3.8.5	Kommunikationsüberwachung . . . . .	22
3.8.6	Sicherheitsprozedere für das Zuschalten der HV-Batterie . . . . .	23
3.9	Gesamtkonzept . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Modellierung der elektrischen Motoren</b>	<b>25</b>
4.1	Aufbau einer PMSM . . . . .	25
4.1.1	Ständer mit Wicklungen . . . . .	26
4.1.2	Rotor mit vergrabenen Permanentmagneten . . . . .	26

4.1.3	Definition des Raumzeigers . . . . .	27
4.1.4	Einführung von unterschiedlichen Koordinatensystemen . . . . .	28
4.2	Mathematisches Modell einer PMSM . . . . .	30
4.3	Erfassen der notwendigen Parameter . . . . .	32
4.3.1	Berechnung des Differenzwinkels der Drehratensensoren . . . . .	32
4.3.2	Ermittlung der Polpaarzahl . . . . .	33
4.3.3	Berechnung von $\Psi_{PM}$ . . . . .	34
4.3.4	Berechnung von $R_S$ . . . . .	34
4.3.5	Berechnung von $L_d$ und $L_q$ . . . . .	36
4.3.6	Berechnung des Reibmomentes $M_R$ . . . . .	37
4.3.7	Trägheitsmoment $\Theta$ . . . . .	38
4.4	Anordnung der Komponenten . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Ergebnisse aus Modellsimulation</b>	<b>42</b>
5.1	Parameter für die Simulation . . . . .	42
5.2	Randbedingungen der Simulation . . . . .	43
5.3	Hochlaufsimulation . . . . .	43
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>47</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>50</b>

# 1 Einleitung

Im Rahmen dieser Masterarbeit wird am Institut für Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität Graz ein Prüfstand mit Elektromotoren konzeptioniert. Mit diesem Prüfstand sollen Versuche für unterschiedliche Bauteile möglich sein. Es gilt die Anforderungen die an den Prüfstand gestellt wurden, zu erfüllen.

Bei der Entwicklung von Fahrzeugen oder Fahrzeugkomponenten wird unter anderem das so genannte „V-Modell“ verwendet [1]. Dieses Modell besteht aus einem linken und einem rechten Zweig. Im linken Zweig wird aufgrund von Modellen ein System entwickelt, welche am rechten Zweig mittels Versuchen an Prototypen verifiziert werden. Diese Versuche werden an Prüfständen für Gesamtfahrzeuge oder an einem Prüfstand für einzelne Bauteile durchgeführt. Dies hat den Vorteil, dass der Versuch ausschließlich an dem neu entwickeltem bzw. weiterentwickeltem Bauteil durchgeführt werden kann.

Weiters kann auch ein Bauteil mit Hilfe eines Prüfstandes modelliert werden, um dessen Verhalten wiedergeben zu können. Durch Messungen diverser Parameter des Bauteils ist es mit Hilfe des Modelles auch möglich, Größen zu berechnen die messtechnisch nicht erfassbar sind.

## 2 Aufbau des Prüfstandes

In diesem Kapitel werden die Anforderungen an den Prüfstand sowie die dafür vorgesehenen Komponenten, die für den Betrieb eines Prüfstandes benötigt werden, erläutert. Es wird ebenfalls eine Möglichkeit gezeigt, die Komponenten des Prüfstandes in unterschiedlichen Anordnungen aufzubauen, sodass dieser in verschiedenen Konfigurationen betrieben werden kann.

### 2.1 Anforderungen an den Prüfstand

Um den Prüfstand entsprechend konzeptionieren zu können, werden Anforderungen herangezogen die aus bestehenden Projekten sowie aus Anfragen unterschiedlicher Entwicklungsfirmen gestellt werden. Durch die Verwendung des V-Modells bei der Entwicklung, in Abbildung 2.1 zu sehen, werden Komponenten-Versuche an Prüfständen immer wichtiger. Mit Hilfe eines Prüfstandes können Versuche an Teilsystemen durchgeführt werden noch bevor diese in ein Gesamtsystem integriert werden. Es besteht die Möglichkeit ein Teilsystem zu testen während sich das Gesamtsystem noch in der Entwicklung befindet. Aus dieser Anwendung leiten sich bereits unterschiedliche Anforderungen an den Prüfstand ab.

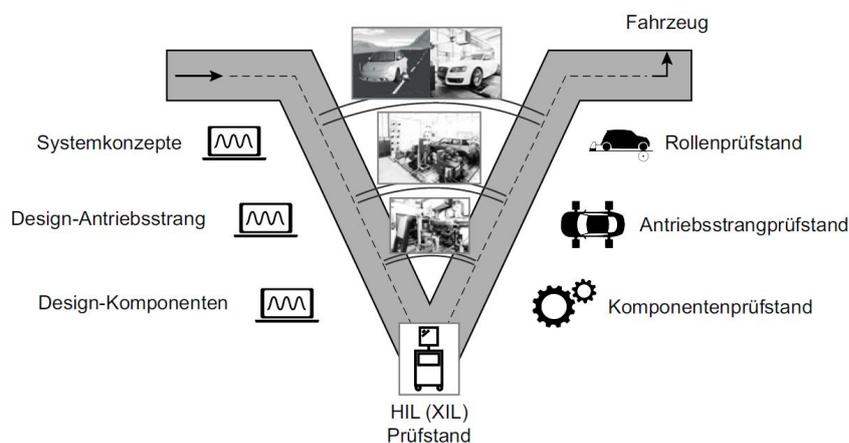


Abbildung 2.1: Schematischer Produktentwicklungsprozess [1].

#### 2.1.1 Kalibrierung und Reproduzierbarkeit

Kalibrieren bedeutet das Feststellen von Messfehlern in innerhalb des Messbereiches. Das Beseitigen dieser Fehler wird als justieren bezeichnet [1].

Um den Test eines Prüflings nachvollziehen zu können, ist es notwendig alle aufgenommenen Messgrößen und Abläufe, unabhängig von der Umgebung, reproduzieren zu können. Das bedeutet, dass ein Versuch wiederholt werden kann und, abgesehen von Messtoleranzen, dasselbe Ergebnis vorliegen muss. In weiterer Folge ist es hierfür notwendig alle Messgeräte zu kalibrieren um sicherstellen zu können, dass die Messwerte in den vorgegebenen Toleranzen liegen. Dies wird unter anderem benötigt, um eine Änderung bzw. Verbesserung eines zu testenden Prüflings quantifizieren zu können.

Bei der Reproduzierbarkeit ist jedoch auch die Ausgangslage entscheidend. Es müssen für jeden Versuch dieselben Start- und Prüfbedingungen herrschen. Bei jedem Prüflauf muss die Möglichkeit gegeben sein, die Temperatur auf einen bestimmten Wert zu konditionieren und während des Prüflaufes weiter durch Kühlung bzw. Heizung zu beeinflussen.

### **2.1.2 Automatisierte Abläufe**

Bei verschiedenen Prüfungen müssen gewisse standardisierte Abläufe mehrmals hintereinander durchgeführt werden. Bei diesen Abläufen handelt es sich in erster Linie um Betätigungen von Schaltern und Ansteuerungen von Aktoren am zu prüfenden Objekt. Um diese Abläufe vom menschlichen Einfluss so weit als möglich zu befreien, müssen diese automatisiert gesteuert bzw. geregelt werden. So muss zum Beispiel, bei einem zweistufigen automatisierten Getriebe der Schaltvorgang von der Prüfstandsteuerung übernommen werden.

### **2.1.3 Diverse Ansteuermöglichkeiten**

Durch die Anwendung des Prüfstandes für Bauteilkomponenten ist es wichtig unterschiedliche Prüfabläufe umsetzen zu können. Das bedeutet wenn ein kundenspezifisches Fahrprofil für einen Belastungstest vorliegt, muss der Prüfstand durch geeignete Konvertierung der Werte die Möglichkeit besitzen, diese Abläufe nachbilden zu können.

Weiters muss der Prüfstand die Möglichkeit besitzen durch ein zusätzliches Steuergerät angesteuert werden zu können. Dies dient dazu, einen Prüflauf umzusetzen, welcher aus einer Simulation stammt und Daten aus anderen Steuergeräten berücksichtigt. Hierzu muss die Steuerung des Prüfstandes mit weiteren Steuergeräten kommunizieren und die Belastungsmotoren dementsprechend regeln.

### **2.1.4 Flexible Komponenten-Anordnung**

Um unterschiedliche Komponenten prüfen zu können, muss der Prüfstand ohne großen Aufwand umgebaut werden können. Das bedeutet, dass für die Befestigung der Elektromotoren sowie für die Fixierung des Prüflinges eine Aufnahme gewählt werden muss, welche diese Anforderungen erfüllt. Weiters müssen auch alle Messinstrumente, wie zum Beispiel die Drehmomentmesswelle (DMMW), mit einer flexiblen Aufnahme ausgestattet sein.

In Abbildung 2.2 sind zwei Anordnungen der Komponenten zu sehen welche für unterschiedliche Prüfungen hergezogen werden. Bei diesen Anordnungen ist zu sehen, dass beim Umbau von einer Prüfung mit langer Gelenkwelle zu einer Prüfung mit kurzer Gelenkwelle, nur einer der beiden Elektromotor versetzt werden muss.

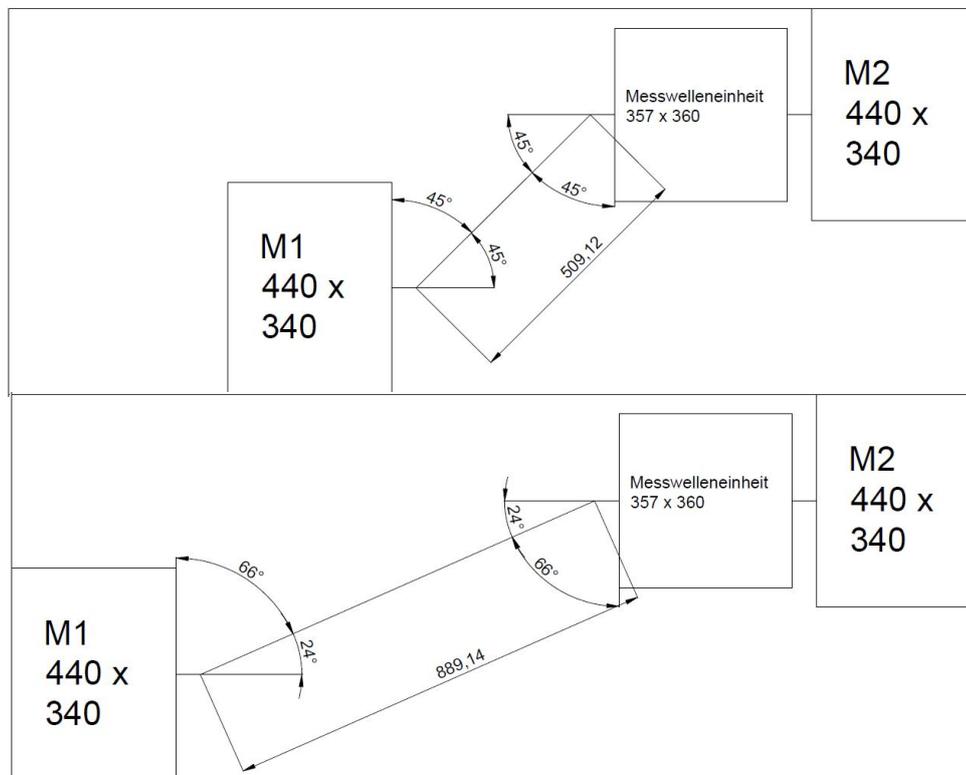


Abbildung 2.2: Anordnungen für Untersuchungen von Gelenkwellen mit unterschiedlichen Längen [2].

### 2.1.5 Messungen am Prüfstand mit einer hohen zeitlichen Auflösung

Um das transiente Verhalten eines Prüflinges messen zu können, muss das Messsystem am Prüfstand in der Lage sein diese Vorgänge, in ausreichender Auflösung, aufnehmen zu können. Das Messsystem, welches diesen Anforderungen entspricht, kann auch zur Modellierung der Prüfstandkomponenten, siehe Kapitel 4, verwendet werden.

### 2.1.6 Automotive Elektromotoren als Belastungsmaschinen

Für das Konzept des Prüfstandes wurde als zusätzliche Herausforderung die Anforderung gestellt, bei der Wahl der Belastungsmaschinen auf automotiv elektrische Maschinen zurück zu greifen. Unter automotiven Elektromotoren versteht man Maschinen, welche sich im Bezug auf Aufbau, Baugröße, Gewicht und Leistung, für den Antrieb eines Fahrzeuges eignen. Die für den Prüfstand durchgeführten Untersuchungen der Motoren können bei einem Einbau in ein Fahrzeug für die Umsetzung der Regelung herangezogen werden.

## 2.2 Benötigte Komponenten am Prüfstand

Um einen Prüfstand konzeptionieren zu können, müssen die im Kapitel 2.1 dargestellten Anforderungen auf einzelne Aufgaben von Komponenten heruntergebrochen werden [1]:

- Elektrischer Belastungsmotor mit der Möglichkeit zum Vierquadrantenbetrieb<sup>1</sup> und regelbaren Parametern (Drehmoment, Drehzahl und Rotorwinkel).
- HV-Energieversorgung zur Speisung der Inverter mit Möglichkeit zur Rückspeisung.
- Hochfrequente Messung von Spannung und Strom an den Gleichstrom-Anschlussklemmen des Inverters.
- Hochfrequente Messung von Phasenspannungen und Phasenströmen zwischen Inverter und Elektromotor.
- Messung von Drehmoment, Drehzahl sowie Rotorwinkel an der Elektromotorwelle.
- Schwingungsentkopplung zwischen dem Prüfstand, mit Belastungsmotoren und Aufspannvorrichtung für den Prüfling, und dem Prüfraum bzw. dem Gebäude.
- Drehsteife Kopplung zwischen den Belastungsmotoren und dem Prüfling.
- Konditionierung des Kühlmediums um Temperatur, Volumenstrom und Druck regeln zu können.
- Messungen am Kühlsystem (Temperatur, Volumenstrom<sup>2</sup> und Druck<sup>2</sup> des Kühlmediums).
- Wellenblockiereinrichtung<sup>2</sup> um eine Kurzschlussprüfung durchführen zu können.
- Temperatur-<sup>2</sup> bzw. Klimaprüfkammer<sup>2</sup> um Langzeittests unter extremen klimatischen Bedingungen durchführen zu können.

---

<sup>1</sup> Unter Vierquadrantenbetrieb versteht man den Betrieb in beide Drehrichtungen sowie als Antriebs- und Bremsmaschine.

<sup>2</sup> Ist bei der Konzeptionierung in dieser Arbeit nicht vorgesehen.

## 3 Erstellung eines Prüfstandkonzeptes

In diesem Kapitel wird das Konzept eines Prüfstandes, welches die Anforderungen aus Kapitel 2 erfüllt, erstellt. Es wird den Einsatzbereich jeder Komponente eingegangen sowie deren spezielle Anforderung näher gebracht. Weiters werden bei einigen Bauteilen unterschiedliche Eigenschaften vorgestellt, welche bei diversen Einsatzgebieten andere Möglichkeiten bieten.

### 3.1 Antriebs- und Belastungsmaschinen mit Inverter

Die elektrischen Maschinen dienen dem Antreiben bzw. dem Belasten der Welle. Um die Anforderungen zu erfüllen, müssen die Maschinen für den Vierquadrantenbetrieb ausgelegt sein. Hierfür ist es auch notwendig, dass die verwendeten Inverter ebenfalls den Energiefluss in beide Richtungen umsetzen können. Da die HV-Batterie im Betrieb nicht von einem externen Ladegerät geladen werden darf, kann durch die Rückspeisung der Energie aus der bremsenden Maschine der Testlauf über eine längere Zeit durchgeführt werden. Die Batterie braucht bei diesem Betrieb nur die Verlustenergie zur Verfügung zu stellen.

Die Leistung der Motoren muss ausreichen um ein hohes Maß an Dynamik zur Verfügung zu stellen. Hierfür wurde als Mindestanforderung ein Leistung von  $300\text{ kW}$  und eine maximale Drehzahl von  $\geq 10.000\text{ U}/\text{min}$  definiert. Weiters muss es möglich sein, dass diese Motoren in ein Fahrzeug als Antriebsmaschinen eingebaut werden. Durch diese Anforderungen ist eine hohe Leistungsdichte<sup>3</sup> sowie eine hohe spezifische Leistung<sup>4</sup> gefordert. Zusätzlich muss aufgrund dieser Anforderung die Elektronik der Steuereinheit, welche die Motoren regelt, mit einer LV<sup>5</sup>-Spannung versorgt werden können, welche durch ein Fahrzeugbordnetz zur Verfügung gestellt werden kann. Die Nennspannung eines PKW-Bordnetzes, und damit der LV-Versorgung des in dieser Arbeit konzeptionierten Prüfstandes, beträgt  $12\text{V}$ .

Seit der kostengünstigen Verfügbarkeit von Leistungshalbleitern werden und aufgrund deren Vorteile, werden bei Hybrid- und Elektrofahrzeugen ausschließlich Synchron- und Asynchronmaschinen verwendet.

Bei beiden Maschinenarten handelt es sich um Drehstrommaschinen. Die Energie wird jedoch von einer Gleichspannungsquelle geliefert. Um die Gleichspannung in eine Wechselspannung und weiter in ein Drehfeld umzuwandeln, werden Inverter verwendet. Diese können, durch zeitliche Gewichtung der Gleichspannung, die Frequenz sowie die Spannungshöhe an deren Ausgang regeln. Weshalb bei der Auswahl der Antriebs- und Belastungsmaschinen das Verhalten bei variabler Frequenz betrachtet werden muss.

<sup>3</sup> Unter Leistungsdichte versteht man die Leistung normiert auf das Bauvolumen.

<sup>4</sup> Unter spezifischer Leistung versteht man die Leistung normiert auf das Gewicht.

<sup>5</sup> LV: Low-Voltage (Niederspannung)

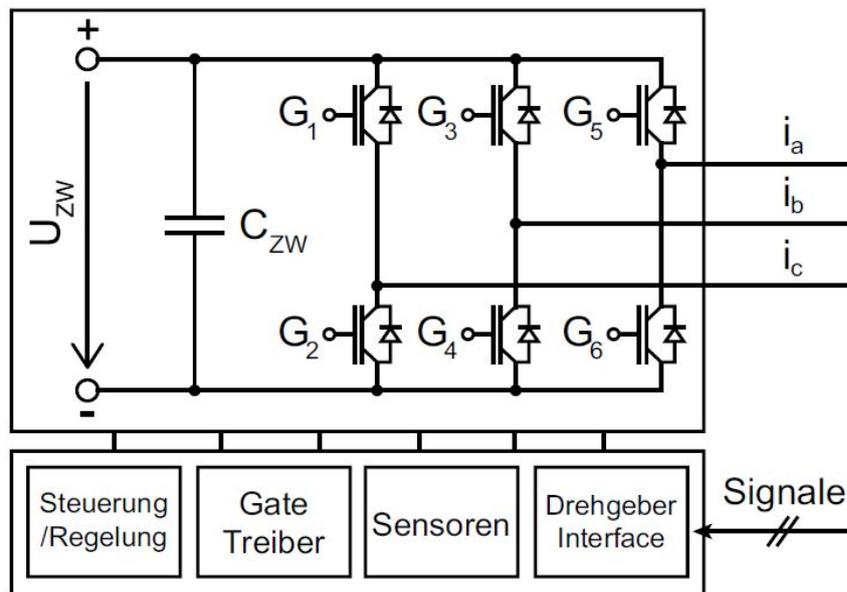


Abbildung 3.1: Schematischer Aufbau eines 3-Phasen-Inverter für den Antrieb von elektrischen Maschinen [1].

Der Name Asynchronmaschine (ASM) kommt daher, dass das Magnetfeld im Stator nicht dieselbe Drehzahl wie der Läufer hat. Die Sonderformen einer Asynchronmaschine wie etwa eine doppelt-gespeiste ASM wird nur beim Betrieb mit konstanter Speise-Frequenz verwendet, wie dies im Energieversorgungsnetz ohne Umrichter der Fall ist. Aus diesem Grund wurde auf dies Sonderformen in der vorliegenden Arbeit nicht näher eingegangen. Asynchronmaschinen haben den Vorteil, dass diese ohne Permanent-Magnete (PM) und somit auch ohne seltene Erden<sup>6</sup> auskommen und sehr robust sind. Der Nachteil besteht darin, dass die Energie, um ein Magnetfeld im Läufer aufzubauen, durch den Ständer eingebracht werden muss. Dieser Umstand wirkt sich negativ auf den Wirkungsgrad dieses Maschinentyps aus.

Bei der Synchronmaschine gibt es grundsätzlich zwei Bauweisen, die Fremd-erregte Synchronmaschine (FSM) und die Permanent-erregte Synchronmaschine (PMSM). Bei der FSM wird das Magnetfeld im Läufer durch Schleifkontakte eingebracht. Bei der PMSM sind im Läufer PM verbaut welche das Magnetfeld erzeugen. Dadurch, dass beim Betrieb keine Energie für das Magnetfeld im Läufer aufgebracht werden muss, hat diese Bauweise im Bezug auf Wirkungsgrad und Leistungsdichte einen Vorteil. Der Nachteil der durch die permanent-Magnete entsteht, ist unter anderem die Verwendung von seltenen Erden, welche die Maschinen teuer in der Herstellung machen. Der Aufbau und die Funktionsweise wird in Kapitel 4.1 genauer erklärt.

<sup>6</sup> Unter seltenen Erden versteht man insgesamt 17 spezielle Metalle im Periodensystem, welche durch ihre Vorkommen in China eine wirtschaftliche Unsicherheit darstellen können. Weiters sind seltene Erden im Vergleich zu anderen Metallen erheblich teurer [3].

Tabelle 3.1 zeigt einen schematischen Vergleich verschiedener Elektromotoren, welche für einen Einbau in ein Fahrzeug in Frage kommen. Bei den beiden, für das Konzept wichtigen, Parametern Volumen und Gewicht, weist die PMSM die besten Werte auf.

Tabelle 3.1: Elektromotoren für Elektrofahrzeuge im Vergleich [4].

	GM	ASM	FSM	PMSM	SRM	TFM
Wirkungsgrad	--	+	+	++	+	++
Maximale Drehzahl	--	++	+	+	++	--
Volumen	--	+	+	++	+	-
Gewicht	--	+	+	++	+	+
Kühlung	--	+	+	++	++	+
Fertigungsaufwand	-	++	-	-	++	--
Kosten	-	++	-	--	++	--

Gleichstrommaschine (GM); Asynchronmaschine (ASM); Fremd-erregte Synchronmaschine (FSM); Permanent-erregte Synchronmaschine (PMSM); Geschaltene Reluktanzmaschine (SRM); Transversalflussmaschine (TFM)

## 3.2 Spannung und Energieversorgung

Bei der HV<sup>7</sup>-Spannungsversorgung der Inverter ist darauf zu achten, dass diese auf die zur Verfügung gestellte Spannung ausgelegt sind. Weiters ist zu beachten, dass die Energiequelle die benötigte Leistung zur Verfügung stellen kann. Da bei der Wahl der Energieversorgung, gleich wie bei der Wahl der Antriebsmaschinen, darauf zu achten ist, dass dieses System in ein Fahrzeug eingebaut werden kann, wurde für dieses Konzept eine Hochvoltbatterie<sup>8</sup> gewählt, welche für automotiv Anwendungen ausgelegt ist. Dies setzt etwa die Eigenschaft voraus, dass die Batterie für die Umgebungsbedingungen in einem Fahrzeug ausgelegt sein muss. Dies beinhaltet klimatische Einflüsse wie etwa durch Temperaturschwankungen sowie mechanische Belastungen wie etwa Vibrationen.

Da es sich bei dieser Batterie um eine Hochvoltbatterie handelt, muss aus sicherheitstechnischen Gründen das Berühren der lebensgefährlichen Spannung verhindert werden. Es müssen Relais verbaut sein welche die Anschlüsse der Batterie spannungsfrei schalten können. Weiters muss die Batterie über eine interne Logik verfügen, welche das unbeabsichtigte Zuschalten der Relais verhindert. Weitere Sicherheitseinrichtungen der Batterie und des gesamten Prüfstandes werden in Kapitel 3.8 genauer behandelt. Das Steuergerät der Batterie, welche das Schalten der Relais sowie einige Sicherheitseinrichtungen kontrolliert, muss, wie auch die Steuerung der Motoren in Kapitel 3.1, auf das LV-Spannungsniveau eines Fahrzeugens ausgelegt sein.

<sup>7</sup> HV: Hochvolt bzw. Hazardous Voltage (Gefährliche Spannung)

<sup>8</sup> Der Name Hochvolt ist etwas irreführend, da in der Energietechnik Hochspannung bei 1000V für Alternative-Current (Wechselstrom) (AC) und bei 1500V für Direct-Current (Gleichstrom) (DC) beginnt. In der Elektromobilität spricht man von Hochvolt ab einer Spannung von 60V [5].

Für die LV-Versorgung, wurde in diesem Konzept die Möglichkeit der Verwendung eines Labornetzteiles sowie eines DC-DC<sup>9</sup>-Konverters betrachtet. Bei der Verwendung eines Labornetzteiles kann, unabhängig von der Batterie die Bordnetzspannung stabil gehalten werden. Ein DC-DC-Konverter bezieht die Energie, für die Ladung der LV-Batterie, aus der HV-Versorgung. Aus diesem Grund wird die verfügbare Energiemenge für den Prüfstand reduziert. Daher wird in dieser Arbeit eine Spannungsversorgung mittels Netzteil konzeptioniert. Die Versorgung mittels DC-DC-Konverter ist allerdings für einen Betrieb in einem Fahrzeug unumgänglich, daher wird diese Möglichkeit als Erweiterung in Kapitel 6 behandelt.

### 3.3 Ansteuerung des Prüfstandes

Bei dieser Komponente handelt es sich um die Zentrale Steuer Einheit (ZSE) des Prüfstandes. Es besteht, aus einem programmierbaren Steuergerät mit diversen Kommunikationsschnittstellen sowie weiteren Mess- und Spannungseingängen. Die ZSE wird verwendet um die Inverter und in weiterer Folge die Motoren zu steuern. In dieser Einheit laufen auch sämtliche Informationen der weiteren Komponenten, wie etwa der Batterie, ein.

Da auch für diese Komponente ein Einbau in ein Fahrzeug zu berücksichtigen ist, muss auf automotiv Kompatibilität geachtet werden. Wie bei der Batterie sowie bei der elektrischen Belastungsmaschine, muss auch die ZSE für Belastungen im automotiven Bereich sowie für die Versorgung aus dem Bordnetz ausgelegt sein.

Ein weiterer Punkt welcher mit diesem System umgesetzt werden muss, ist die Zusammenführung aller verwendeten Sicherheitseinrichtungen. Da die Batterie eine Steuereinheit verbaut hat und auch bei allen andere Komponenten eine Berührung mit der gefährlichen Spannung verhindert werden muss, sind einige Sicherheitseinrichtungen für den Prüfstand vorgesehen, welche mit der ZSE zusammengefasst und überwacht werden müssen. Eine detailliertere Auflistung der Sicherheitseinrichtungen in diesem Konzept wird in Kapitel 3.8 genauer behandelt.

In diesem Konzept wird ein Steuerungssystem vorgesehen welches über analoge und digitale Ein- und Ausgänge verfügt sowie mit mindestens 4 CAN-Kanälen ausgestattet ist. Mit Hilfe der CAN-Kanäle wird, wie in Abbildung 3.2 ersichtlich, eine Kommunikation zwischen allen Komponenten hergestellt.

---

<sup>9</sup> DC-DC: Spannungswandler für Gleichspannung

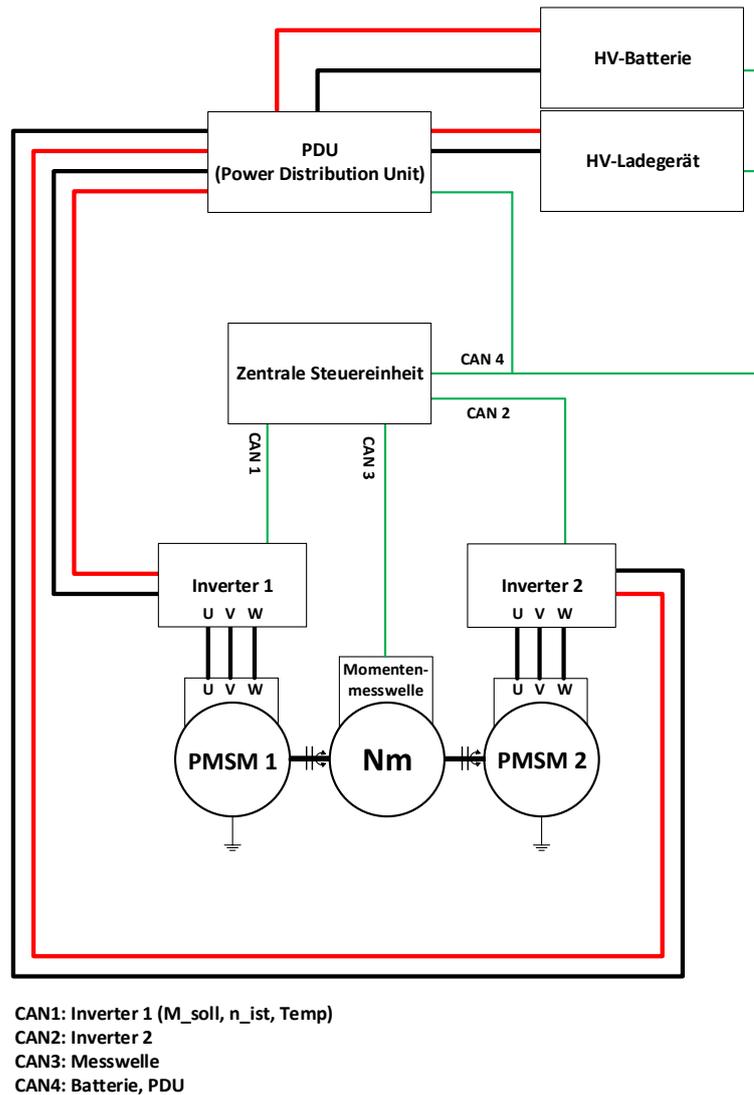


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Kommunikation zwischen den verschiedenen Komponenten.

### 3.4 Messtechnik

Die Messtechnik dient zur Erfassung und Aufzeichnung von Größen, mit welchen die Vorgänge am Prüfstand modelliert werden können. Mit dem erstellten Modell lassen sich Vorgänge rekonstruieren welche durch Messungen nicht erfasst werden können. Eine weitere Aufgabe der Messtechnik ist das Erfassen sicherheitsrelevanter Größen und bei Detektierung eines Fehlers eine sofortige Reaktion auszulösen. Diese kann zum Beispiel der Abbruch eines Prüflaufes bzw. die Abschaltung der HV-Versorgung sein. Einige Messgrößen können für beide Verwendungszwecke herangezogen werden, andere müssen nur bei speziellen Prüfungen gemessen werden. Welche Größen das sind, hängt vom jeweiligen Prüfprogramm bzw. Verwendungszweck ab.

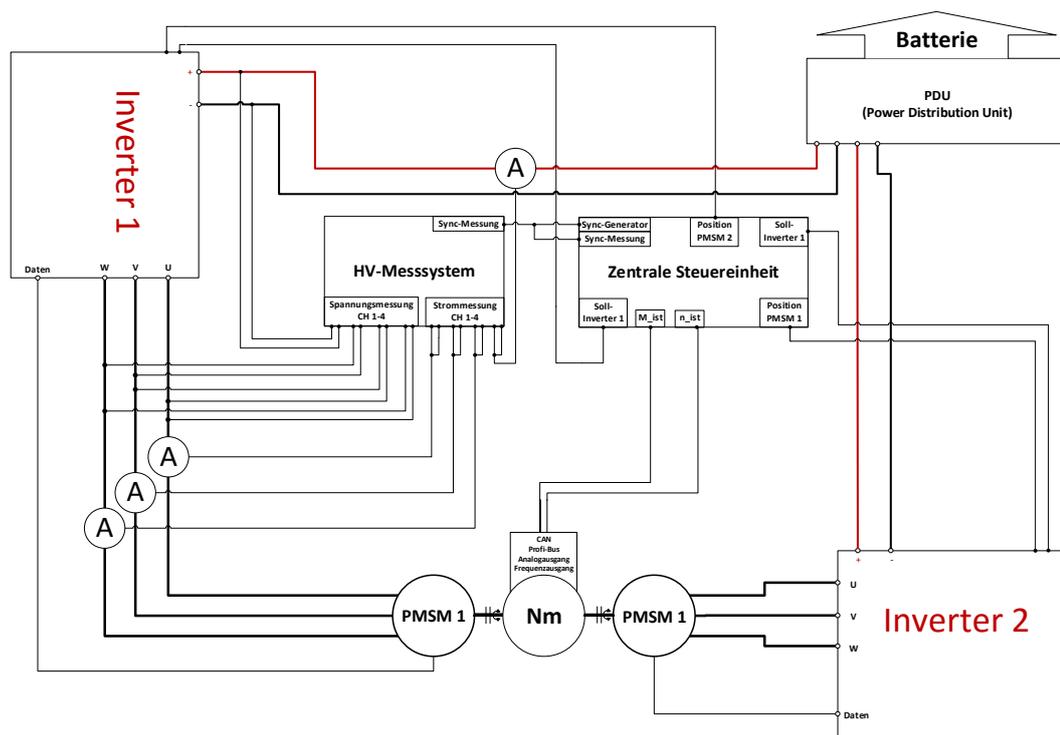


Abbildung 3.3: Aufbau mit Messeinrichtungen für Modellierung.

### 3.4.1 Aufzeichnung von SW-Parameter

Bei dieser Messeinrichtung handelt es sich um einen Speicher für bereits digitale Daten. Daten die durch diese Messeinrichtung aufgezeichnet werden, sind Soll-Werte welche an einen Aktor ausgesendet werden. Dadurch kann nach einem Prüflauf der Vergleich zwischen Soll- und Ist-Werten durchgeführt werden.

Die Aufzeichnung von SW-Daten funktioniert wie ein Speicher in den zu bestimmten Zeitpunkten aktuelle Werte abgespeichert werden. Dies kann direkt im Ansteuerungssystem passieren oder mittels Datenleitung auf einen externen Computer. Bei der Verwendung eines internen Speichers ist auf die Menge der zu speichernden Daten zu achten, da bei einem Prüflauf sehr große Datenmengen entstehen können. Bei einem externen Speicher kann unter Umständen eine Weitergabe auf weitere Speichermedien erfolgen um das Speicherproblem zu umgehen.

Bei Trigger-Systemen werden die Messgrößen abgetastet jedoch nicht zwangsweise aufgezeichnet. Die Aufzeichnung startet erst bei Erfüllung einer oder mehreren Trigger-Bedingungen. Dies ist sinnvoll wenn bei einem Dauerlauf die Werte erst ab einem bestimmten Ereignis für eine Auswertung relevant sind.

In diesem Konzept ist eine Aufzeichnung mit dem internen Speicher des Ansteuerungssystems vorgesehen. Aufgrund der vorgesehenen Versuche ist es notwendig die Messung bzw. die Aufzeichnung manuell sowie auch mittels Trigger-Bedingungen starten zu können. Die Durchführung von Langzeitversuchen und Messungen mit sehr hohem Speicherbedarf wird in Kapitel 6 behandelt.

### 3.4.2 LV-Messsystem

Bei der LV-Messung ist, wie bei der Aufzeichnung der SW-Parameter, ein abspeichern der aktuellen Größen notwendig um das Verhalten des Prüfstandes nachvollziehen zu können. Zusätzlich spielt bei der LV-Messung, wie bei allen Messungen von physikalischen Größen, die Genauigkeit eine wichtige Rolle. Mit dem LV-Messsystem können Versorgungsspannungen sowie Sensorgrößen, wie zum Beispiel Temperaturen gemessen werden. Bei einem Abbruch eines Prüflaufes durch die Erkennung eines Fehlers ist die Information von Versorgungsspannung, Temperatur usw. ein nützliches Instrument um den Grund der Abschaltung eruieren zu können.

Auch bei dem LV-Messsystem ist die Aufzeichnung mit einer bzw. mehreren Trigger-Bedingungen von Vorteil, um den Speicherplatzbedarf zu reduzieren.

### 3.4.3 HV-Messsystem

Das HV-Messsystem besteht aus Messinstrumenten, welche die hohen Spannungen und Ströme, wie etwa an der Batterie, messen können, sowie einem System zum Aufzeichnen der Messdaten. Grundsätzlich ist, wie bei allen Messinstrumenten, eine geringe Rückwirkung auf das zu messende System sowie eine genaue Auflösung der zu messenden Größe zu beachten. Um eine ausreichende Auswertegenauigkeit zu erreichen, muss bei der Wahl des Messsystems auf Messgenauigkeit und Abtastfrequenz geachtet werden. Eine hohe Abtastfrequenz dient in erster Linie dazu auch transiente Vorgänge mit einer ausreichenden Genauigkeit wiedergeben zu können.

Die Messdaten werden während eines Prüflaufes aufgezeichnet und nach Beendigung mit einer dafür vorgesehenen Software ausgewertet. Wenn das Messsystem mit einem Ausgang ausgestattet ist, mit dem Signale an die Steuereinheit übertragen werden können, kann das HV-Messsystem für sicherheitsrelevante Messungen herangezogen werden.

Bei der Verkabelung ist zu beachten, da an den Spannungsmesskabeln HV-Potential vorhanden ist, dass diese Kabeln ausreichend isoliert sind. Wenn möglich sollte das Messinstrument nahe am Messobjekt angebracht werden, um die Länge der Messkabel so gering wie möglich zu halten.

Bei diesem System ist es, gleich wie bei LV-Messsystemen, sinnvoll die Messung mit Trigger-Bedingungen zu starten und zu stoppen um den Speicherplatzaufwand zu reduzieren. Im Konzept ist das HV-Messsystem mit einem eigenen Speicher ausgestattet um transiente Vorgänge über längere Zeit aufnehmen zu können, ohne die Messung der SW- bzw. LV-Größen zu beeinflussen.

### 3.4.4 Drehmoment-Messwelle

Das Drehmoment ist beim Betrieb eines Prüfstandes eine sehr wichtige Messgröße. Mit der Information über das aktuelle Drehmoment kann die Belastung auf das zu prüfende Objekt berechnet werden. Da es bei einem Anregen der Eigenfrequenz des Aufbaues, zu einer Überschreitung des maximal vorgesehenen Drehmomentes kommen kann, wird das aktuelle Drehmoment als eine sicherheitsrelevante Größe behandelt.

Für das Konzept ist bei der Dimensionierung der Drehmoment-Messwelle darauf zu achten, dass diese für das maximal vorkommende Drehmoment sowie Drehzahl ausgelegt sein muss. Dies beinhaltet verschiedene Aufbaumöglichkeiten am Prüfstand, zum Beispiel die Berücksichtigung der Möglichkeit ein Getriebe zur Momentenerhöhung einzusetzen. Bei Verwendung unterschiedlicher Momentenmesswellen wie etwa bei Einsatz eines Getriebes, muss auf die korrekte Erfassung der Daten geachtet werden, da das Drehmoment während des Prüflaufes von der zentralen Steuereinheit ausgewertet wird.

### 3.4.5 Synchronisierung der Messsysteme

Wenn bei einem Prüfstand mehr als ein Mess- und Aufzeichnungs-System zum Einsatz kommt, müssen diese, um transiente Vorgänge exakt beschreiben zu können, untereinander synchronisiert werden. Darunter versteht man, dass unabhängig vom Messsystem bzw. von der gewählten Datenübertragung eine Aussage über den Zeitpunkt eines Messwertes getroffen werden kann. Um die Reaktion eines Systems auf einen Befehl modellieren zu können, muss die Zeitdifferenz der Ein- und Ausgangswerte nachvollziehbar gemessen werden können.

Abhängig vom Messsystem und der verwendeten Datenübertragung, sind unterschiedliche Synchronisationsmethoden möglich. Bei der Verarbeitung eines analogen Sensorwertes muss die Synchronisation durch das übergeordnete Messsystem erfolgen. Bei einem Messsystem mit einer eigenen CPU werden zwei Methoden zur Synchronisation verwendet. Die erste ist die Verwendung des internen Taktes um den Messwert mit einem Zeitstempel zu versehen. Die zweite Methode ist die Verwendung einer Sync-Leitung an der ein Takt an alle Teilnehmer ausgegeben wird. Mit dieser Methode können alle Messwerte mit einem exaktem Zeitstempel versehen werden. Eine weitere Methode ist die Sync-Leitung als Messeingang in jedem Messsystem zu verwenden. Durch die gleichzeitige Messung der Spannung an der Sync-Leitung und der weiteren Messeingänge kann bei der Auswertung die zeitliche Abfolge des Prüflaufes rekonstruiert werden.

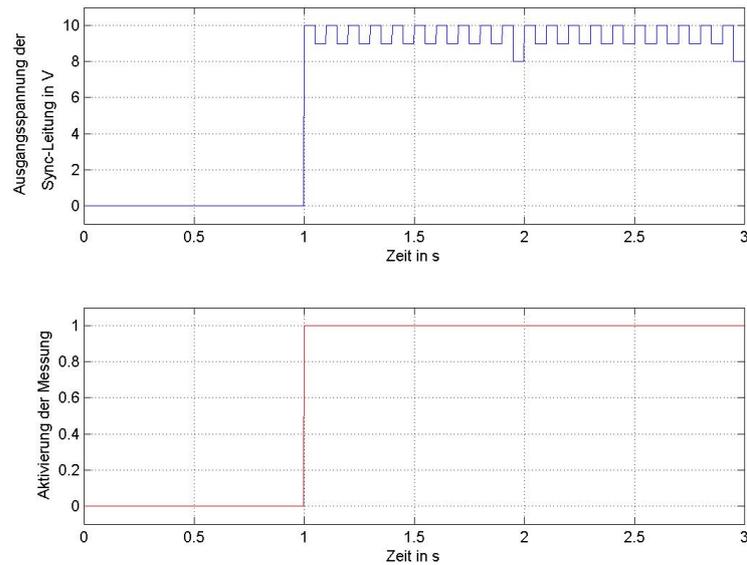


Abbildung 3.4: Spannungsverlauf der Sync-Leitung bei Aktivierung der Messung.

Abbildung 3.4 zeigt den Verlauf der Spannung der Sync-Leitung bei Aktivierung der Messung durch die ZSE. In jedem Messsystem, in dem die Messwerte aufgezeichnet werden, wird auch die Spannung dieser Leitung mit-aufgezeichnet, um den zeitlichen Verlauf der Messwerte rekonstruieren zu können. Für die Ausgabe dieses Spannungsverlaufes wurde in MATLAB-Simulink Modell erstellt, welches einen geeigneten Signalverlauf generiert. In Abbildung 3.5 wird ein solcher Signalgenerator gezeigt.

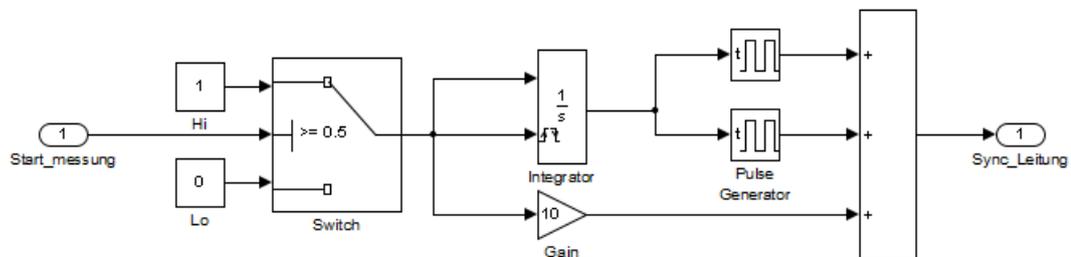


Abbildung 3.5: Aufbau des Signalgenerators zur Erzeugung des Sync-Signales.

### 3.4.6 Interne Sensoren der PMSM

Da die PMSM mit deren Invertern ein System darstellt welche die Ausgangsgrößen aufgrund diverser Eingangsgrößen selbstständig regelt, müssen in diesem System Sensoren verbaut sein. Solche Messgrößen können zum Beispiel diverse Temperaturen, der aktuelle Drehwinkel bzw. die Drehzahl des Rotors oder auch das aktuelle Drehmoment sein. Der Zugriff auf diese Werte wird meist über eine bestehende Bus-Leitung realisiert. Die Daten, wie zum Beispiel die aktuelle Drehzahl der Maschine, werden über die Kommunikation auf die Steuereinheit übertragen. In dieser können die Daten als SW-Parameter gespeichert

werden. Zu beachten ist jedoch, dass durch die Übertragung der Daten über ein Bussystem, eine Zeitdifferenz zwischen dem Messen und dem Aufzeichnen der zu messenden Größe auftritt. Demnach kann keine genaue Aussage über den Zeitpunkt der gemessenen Größe getroffen werden. Diese Messgrößen können auch nicht mit der zuvor gezeigten Methode synchronisiert werden, da die Messgröße hierfür vor dem Senden an der Busleitung mit einem Zeitstempel versehen werden müsste.

## 3.5 Kühlung der Bauteile

Die Aufgabe der Kühlung besteht darin die durch Verluste entstehende Wärmeenergie von den Bauteilen abzuführen um damit eine Überhitzung zu verhindern. Dies kann durch unterschiedliche Kühlmethoden erfolgen.

Es gibt die Möglichkeit einer Gebläsekühlung bei der Umgebungsluft mittels Ventilator durch das Bauteil geblasen wird um die Wärmeenergie abzuführen. Bei dieser Kühlmethode besteht das Problem, dass sehr große Durchmesser für die Luft vorgesehen werden müssen um einen ausreichenden Massenstrom und in weiterer Folge eine ausreichende Kühlung erfolgen kann. Weiters werden Verunreinigungen wie Staub und Partikel in das Bauteil eingebracht, welche unter Umständen zu Problemen führen können. Der Vorteil einer solchen Kühlung ist, dass das Kühlmedium aus der Umgebung genommen wird und nicht in einem Behälter mitgeführt werden muss. Dies sorgt für eine signifikante Verringerung des Gewichtes.

Eine weitere Kühlmethode ist die Flüssigkeitskühlung. Bei dieser Methode wird ein flüssiges Medium mittels einer Pumpe durch das Bauteil gepumpt und entzieht diesen Wärmeenergie. Diese aufgenommene Energie wird im Wärmetauscher wiederum an die Umgebungsluft abgegeben. Die Wärmeübertragung am Wärmetauscher kann mittels Klappen und Ventilatoren geregelt werden. Bei dieser Kühlmethode ist darauf zu achten, dass der Durchfluss sowie der Druck auf den das System ausgelegt ist, eingehalten werden. Ansonsten kann es zu sogenannten „Hot Spots“<sup>10</sup> kommen. Durch die Verwendung von Flüssigkeit als Transportmedium, kann der Wärmetransport über einige Meter mittels Schläuchen umgesetzt werden.

Bei beiden Kühlmethoden ist zu berücksichtigen, dass die Wärmeenergie an die Umgebungsluft abgegeben wird und somit die Temperatur im Prüfraum erhöht wird. Durch diesen Umstand muss eine weitere Wärmeübertragung vorgesehen werden, bei der die Wärmeenergie der Umgebungsluft aus dem Prüfraum abgeführt wird. Dies kann beispielsweise durch eine, im Prüfraum installierte, Klimaanlage erfolgen.

Im Konzept dieser Arbeit wird aufgrund der Forderung von hoher Effizienz eine Flüssigkeitskühlung für die Antriebsmotoren, für die Inverter sowie für die Batterie vorgesehen. In Abbildung 3.6 ist eine mögliche Anordnung des Kühlmittelkreislaufes zu sehen.

Die Regelung der Temperatur, welche bei der Modellierung der Motoren notwendig ist, wird durch die Ansteuerung der Lüftermotoren umgesetzt. Dadurch wird der Kühleffekt der Wärmetauscher, welche die Wärmeenergie an die Umgebung abgeben, verändert.

---

<sup>10</sup> Hot Spot: Punktuelle Überhitzung eines Bauteiles durch nicht ausreichende Kühlung.

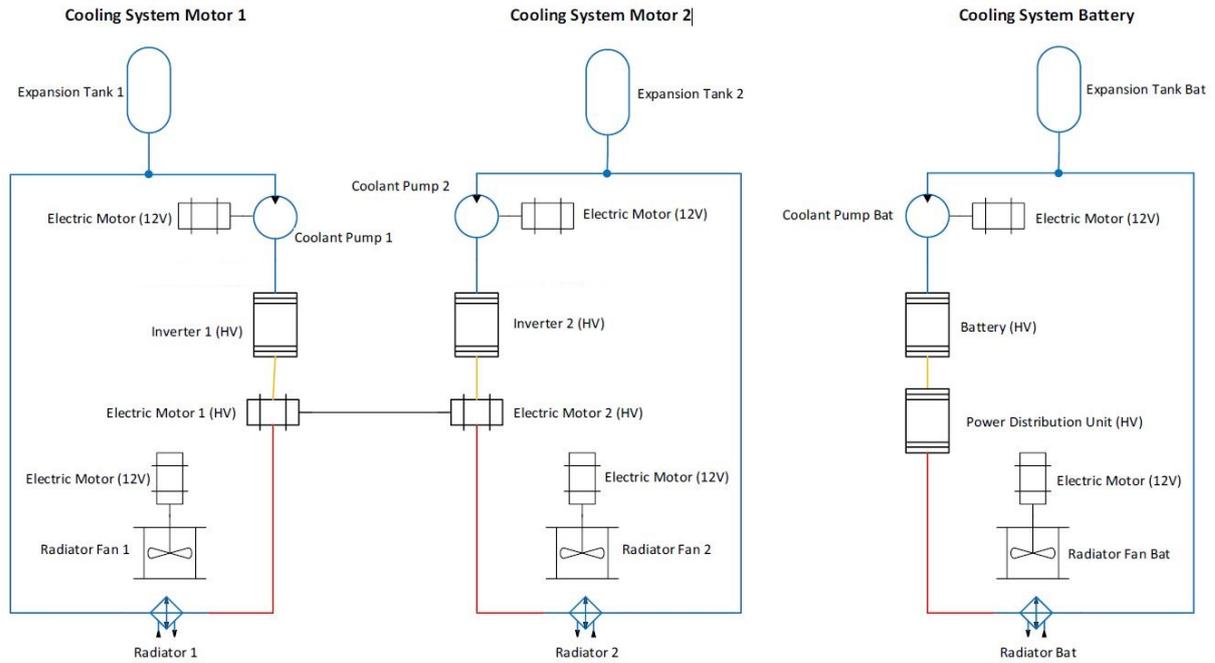


Abbildung 3.6: Anordnung zur Kühlung der Komponenten des Prüfstandes.

Durch diese Art der Regelung, kann der Durchfluss der Kühlsysteme bei allen verwendeten Bauteilen konstant gehalten werden. Bei der Verwendung eines Thermostats, wird die resultierende Temperatur durch Mischen von 2 unterschiedlichen Temperaturniveaus umgesetzt. Diese Art der Regelung wird in modernen Kraftfahrzeugen eingesetzt.

## 3.6 Grundgestell mit Schwingungsentkoppelung

Das Grundgestell dient als Unterbau für den Prüfstand und als Aufnahme für die Belastungsmotoren und den Prüfling. Da die Aufnahme mit dem aufgebracht Drehmoment belastet wird, ist ein verwindungssteifer Unterbau unumgänglich. Um die geforderte Flexibilität des Prüfstandes zu erreichen muss eine Möglichkeit geboten werden, die Anordnung der Motoren sowie der Prüflinge mit geringem Aufwand verändern zu können.

Um die, beim Prüflauf entstehenden Vibrationen, nicht an den Boden und das Gebäude zu übertragen, muss zwischen Grundgestell und Prüfgebäude eine Schwingungsentkoppelung vorgesehen werden. Diese Entkoppelung kann mittels gedämpfter Füße gewährleistet werden, oder auch mit einer Kunststoffmatte welche zwischen Gestell und Boden eingelegt wird. Es ist jedoch zu beachten, dass der Prüfstand mit dem Boden verankert ist um eine Bewegung im Raum zu verhindern.

In diesem Konzept werden speziell dafür entwickelte Standfüße mit Schwingungsentkoppelung<sup>11</sup> vorgesehen. Diese Füße erlauben den Ausgleich von Unebenheiten am Unterbau sowie am Boden. Die benötigte Befestigung gegen eine horizontale Bewegung im Raum, wird durch am Boden verschraubte Grundplatten umgesetzt. Diese Platten besitzen eine Perforation in der Größe der Standfüße, somit wird eine horizontale Bewegung des Prüfstandes verhindert.

Wie in Abbildung 3.7 zu sehen, wurde bei diesem Konzept ein Unterbau aus verstrehten Formrohren vorgesehen, welcher auf die Belastung des maximal vorkommenden Drehmoment ausgelegt wurde.

Um sicherzustellen, dass die Aufnahme die geforderte Flexibilität erreicht, wird auf den Unterbau eine T-Nutenplatte aufgeschraubt. Um garantieren zu können, dass die Nutenplatte plan auf dem Unterbau aufliegt, wird dieser nach der Fertigung mittels einer Planfräse nachgearbeitet und danach die Nutenplatte aufgeschraubt.

## 3.7 Wellenkoppelung der beiden Elektromotoren

Um zwei Elektromotoren miteinander verbinden zu können ist eine Wellenentkoppelung unabdingbar. Bei der unvermeidlichen Abweichung der Motorachsen, wird die Welle bei jeder Umdrehung auf Verbiegung beansprucht, dies führt zu einer hohen Belastung der Lager und der Welle selbst.

---

<sup>11</sup> <http://www.rosta.ch/produkte/gummifeder-technologie/schwingungsaempfer.htm&productId=148>

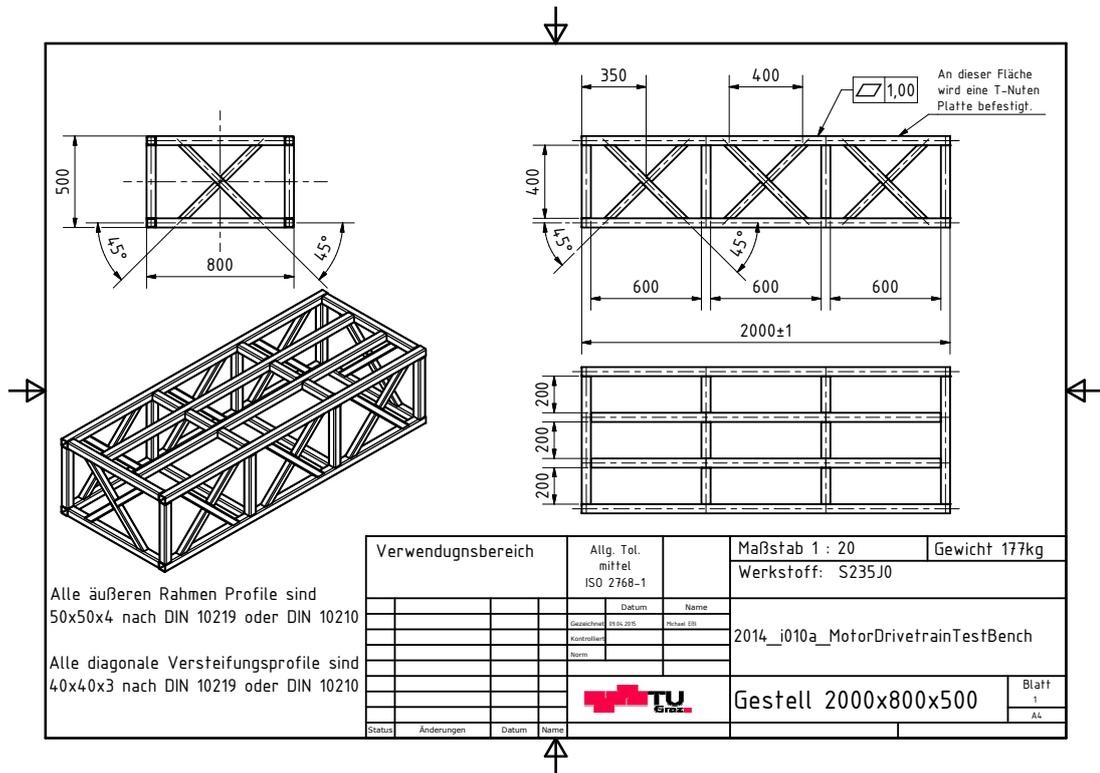


Abbildung 3.7: Konzeptzeichnung des Unterbaues für den Prüfstand [2].

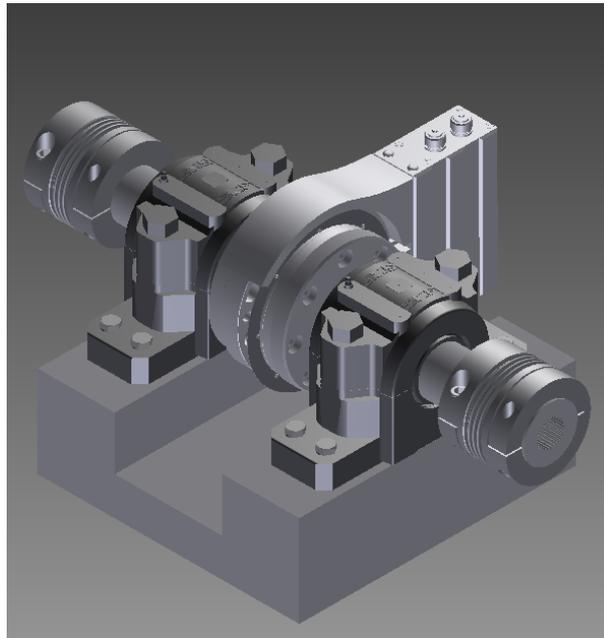


Abbildung 3.8: Konzept der Wellenkopplung mit Vorrichtung zur Lagerung der Drehmomentenmesswelle [2].

## 3.8 Sicherheitseinrichtungen am Prüfstand

Bei jedem Prüfstand ist es notwendig Sicherheitsvorkehrungen zu treffen. In [1] wird, bezugnehmend auf dieses Prüfstandkonzept, auf folgende sicherheitsrelevante Systeme hingewiesen:

- Antriebs- und Belastungsmaschine
- Prüfling
- Wellen und Verbindungsstücke
- Hochvoltführende Teile (Batterie, PDU, Messkabel und HV-Leitungen)
- diverse Konditionierungsgeräte (Kühlpumpen, Kühlflüssigkeit, Klimaanlage).

Um sicherstellen zu können, dass bei einem unerwarteten Auftreten eines Fehlers keine Gefahr für die anwesenden Personen besteht, müssen Systeme zur Erkennung von Problemen eingesetzt werden sowie Systeme welche die Auswirkungen eines Fehlers reduzieren bzw. darauf reagieren. Um die zuvor genannten sicherheitsrelevanten Systeme ausreichend abzusichern, wurden folgende Maßnahmen vorgesehen.

### 3.8.1 Mechanische Sicherung

Wie in Abbildung 3.9 zu sehen ist, wird über alle drehenden Teile radial ein Fangblech angebracht. Durch diese Maßnahme kann ein Bruchstück nicht ungehindert weggeschleudert werden.

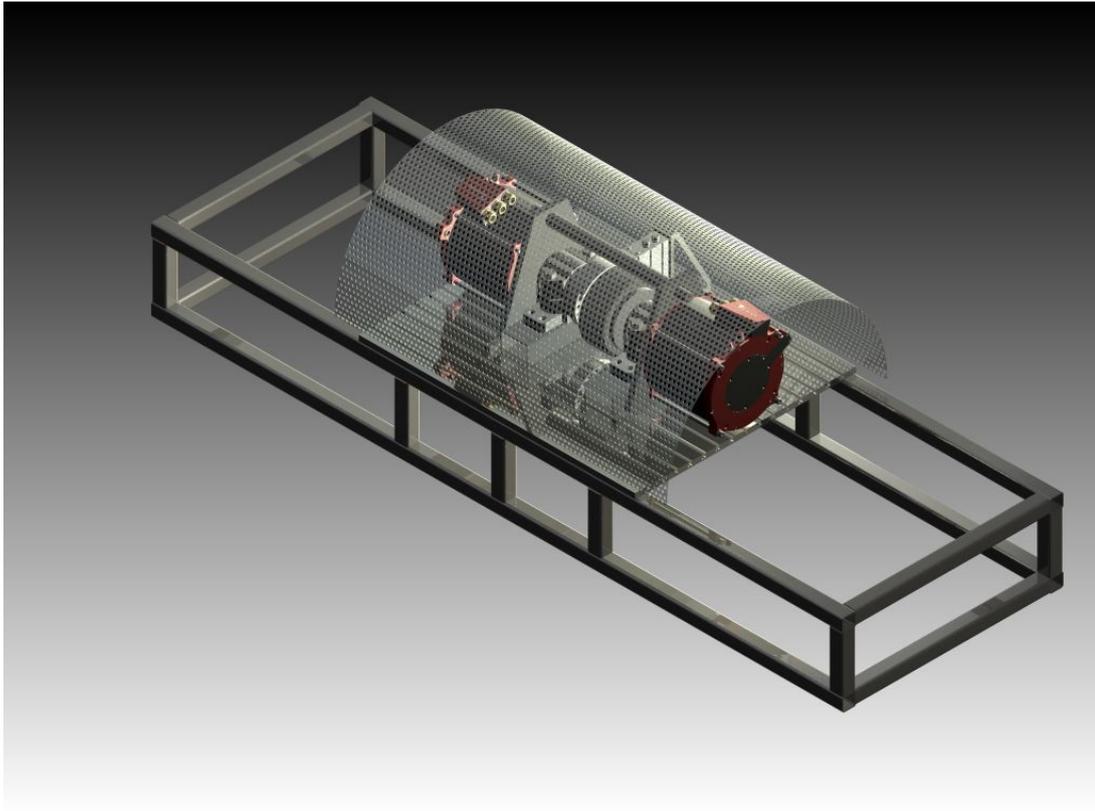


Abbildung 3.9: Konzeptzeichnung der mechanischen Schutzvorrichtung [2].

Eine weitere Maßnahme ist die Positionierung des Prüfcomputers, dieser wird in axialer Richtung der Welle positioniert. Dadurch können keine Teile auf den Arbeitsplatz geschleudert werden. Zwischen Prüfcomputer und Prüfstand wird zusätzlich noch eine durchsichtige Trennwand vorgesehen, um eine Abgrenzung zu schaffen.

### 3.8.2 Interlock-Schutzkreis

Bei einem Interlock-Schutzkreis handelt es sich um eine separate elektrische Verbindung aller HV-führenden Komponenten. Wenn an allen HV-Komponenten die Bedingungen für einen Betrieb erfüllt sind, wird der Kontakt durchgeschaltet. Welche Bedingungen das sind, hängen von der jeweiligen Komponente ab. Eine Bedingung wird nicht erfüllt, wenn etwa ein Servicedeckel nicht verschlossen ist und es eine Möglichkeit gibt einen HV-führenden Teil berühren zu können. Weitere mögliche Bedingungen sind das Abstecken eines HV-Steckers, der Wert der Isolationsmessung oder das Drücken eines Notausschalters. Wenn der Interlock-Schutzkreis an irgendeinem Punkt unterbrochen wurde, werden die HV-Relais in der Batterie nicht eingeschaltet bzw. wenn diese bereits eingeschaltet sind werden sie ausgeschaltet. Abbildung 3.10 zeigt eine Realisierungsmöglichkeit des Interlock-Schutzkreises.

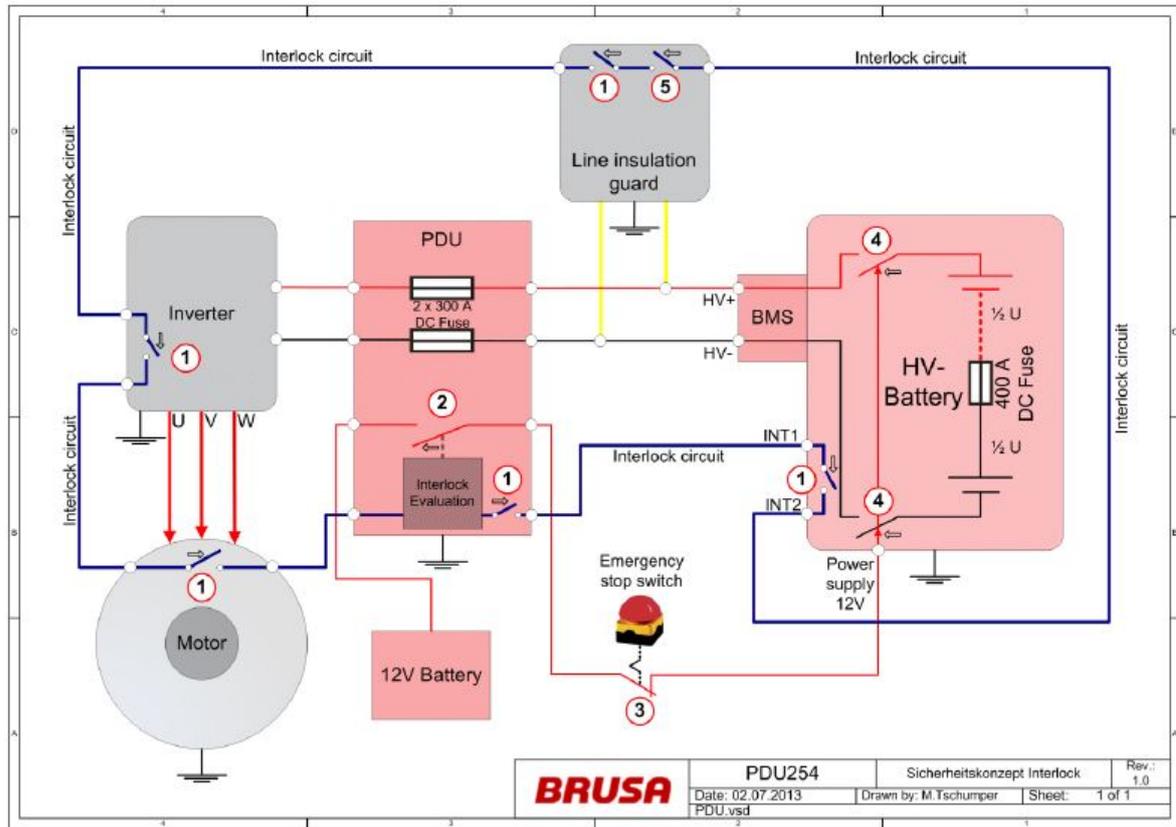


Abbildung 3.10: Schematische Zeichnung eines Interlock-Sicherheitskreises [6].

Der Vorteil eines solchen Schutzkreises besteht darin, dass durch ein System alle Servicegedeckel, HV-Verbindungen und weitere HV-führende Komponenten überprüft werden können. Weiters werden durch diese Überwachung die HV-Relais direkt geschaltet und können nicht durch einen Bedienungs- bzw. SW-Fehler die HV-Relais geschlossen werden und dadurch jemanden verletzen.

### 3.8.3 Isolationsmessung

Eine weitere Möglichkeit HV-führende Komponenten berühren zu können besteht, wenn z.B. die Isolation eines HV-führenden Kabels beschädigt ist. Da alle HV-führenden Kabel mit einer Schirmung<sup>12</sup> ausgestattet sind, würde durch eine Beschädigung auch eine Verbindung zur Masse und somit zum Gehäuse bestehen. Diese wird durch eine Isolationsüberwachung detektiert. Bei dieser Art der Sicherheitseinrichtung wird der Widerstand zwischen Gehäuse und HV-Leiter überwacht. Da alle Komponenten sowie der Unterbau des Prüfstandes elektrisch miteinander verbunden sind, kann ein solcher Fehler an jedem Punkt des Prüfstandes detektiert werden.

Als Reaktion auf einen solchen Fehler kann z.B. das Öffnen der Interlock-Schutzkreises folgen, wie in Abbildung 3.10 eingezeichnet ist. Bei vorliegendem Konzept wird diese

<sup>12</sup> Eine Schirmung ist ein in die Isolation eines Kabels eingelassener Leiter, der mit Masse verbunden ist und somit die Einflüsse der elektromagnetischen Störungen reduziert.

Überwachung in der PDU vorgesehen in der auch alle HV-Relais eingebaut sind. Da die Isolationsüberwachung die hohe Spannung benötigt um die Isolation messen zu können, kann die Isolation-Messung auch bei ausgeschalteten HV-Relais durchgeführt werden, allerdings nur für die Batterie und den Leitungen bis hin zu den ersten Relais.

Die Messung beginnt sobald das Steuergerät in der PDU versorgt wird, um frühzeitig einen Fehler detektieren zu können und an das Hauptsteuergerät zu übermitteln.

### 3.8.4 Notausschalter

Bei einem Notausschalter handelt es sich um einen im Prüfraum befindlichen Schalter welcher bei Erkennung einer Gefahr, manuell betätigt werden kann. Wenn der Schalter in den Interlockkreis eingebunden ist, kann durch Betätigung dieses Schalters das Einschalten der HV-Relais verhindert werden, um sicher zu gehen, dass man sich dem Prüfstand nähern kann ohne dass von diesem Gefahr ausgeht. Weiters kann bei einem Problem, welches nicht durch ein anderes Sicherheitssystem detektiert werden kann, eine Abschaltung der Relais ausgelöst werden. Durch diesen Vorgang wird der gesamte Prüfstand spannungsfrei geschaltet. Zu beachten ist jedoch, dass nach dem Abschalten der Spannung auch kein bremsen der Welle mittels Elektromotoren möglich ist. Um ein verschweißen<sup>13</sup> der Relais zu verhindern, wurden in vorliegendem Konzept die Relais so ausgelegt, dass diese den Schaltvorgang bei vollem Strom schadlos überstehen.

### 3.8.5 Kommunikationsüberwachung

Da zwischen der Hauptsteuereinheit des Prüfstandes mit allen Komponenten kommuniziert wird, muss diese Kommunikation auch überwacht werden. Hierbei handelt es sich lediglich um eine Überwachung bei der darauf geachtet wird, dass innerhalb einer bestimmten Zeit eine Botschaft empfangen wird. Bei Verlust der Kommunikation besteht die Gefahr, dass Komponenten wie zum Beispiel die elektrische Maschinen nicht mehr auf Änderungen der Parameter reagieren können. Um sicherzustellen, dass bei einem solchen Fehler keine Gefahr für Personen entsteht, überwacht jede Komponente für sich die Kommunikation. Bei einem Kommunikationsfehler detektieren die beteiligten Komponenten sowie die Hauptsteuereinheit den Fehler und deaktiviert aus Sicherheitsgründen den gesamten Prüfstand.

---

<sup>13</sup> Als verschweißen von Relais bezeichnet man den Vorgang, wenn bei hohen Strom die Kontakte geöffnet werden und sich dadurch ein Lichtbogen über den Schaltkontakten bildet. Durch diesen Lichtbogen werden die Kontakte verschweißt und somit kann keine galvanische Trennung von Ein- und Ausgang hergestellt werden.

### 3.8.6 Sicherheitsprozedere für das Zuschalten der HV-Batterie

Vor dem Einschalten der HV-Relais in der Batterie, müssen alle zuvor erwähnten Sicherheitseinrichtungen abgefragt werden, um sicherzustellen dass ein gefahrloses Einschalten möglich ist. In Abbildung 3.11 ist ein solches Zuschaltprozedere abgebildet. Es ist zu sehen, dass bei einem auftretenden Fehler der Zuschaltvorgang abgebrochen wird, und die Zuschaltung nach Behebung des Fehlers von Beginn an gestartet werden muss.

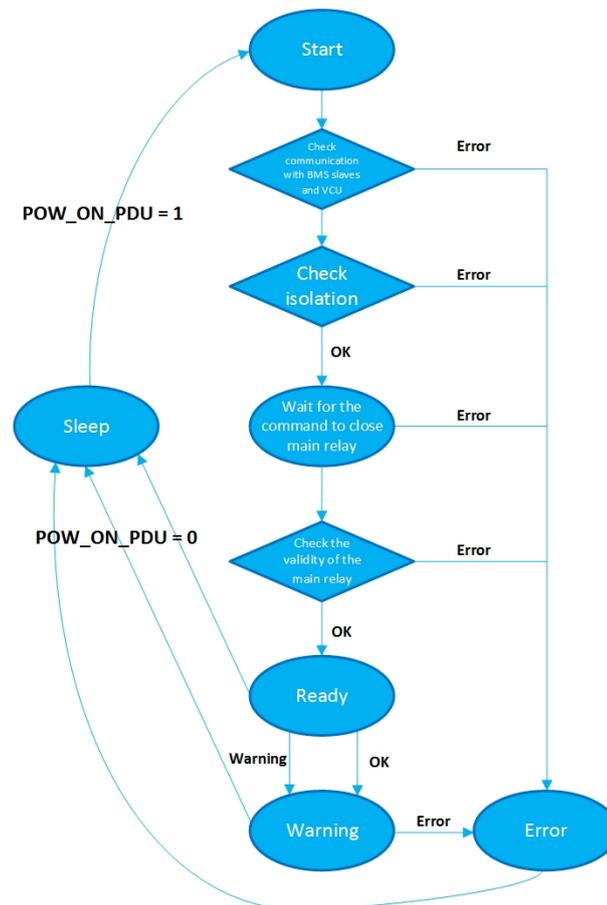


Abbildung 3.11: Zuschaltprozedere der Sicherheitsrelais in der PDU [7].

## 3.9 Gesamtkonzept

In Abbildung 3.12 ist der Gesamtaufbau des Prüfstandes mit einigen Komponenten zu sehen. Mit dieser Anordnung kann die Modellierung aus Kapitel 4 durchgeführt werden. In dieser Darstellung ist die Umsetzung der Flexibilität mittels einer T-Nutenplatte sehr gut zu erkennen. Mit Hilfe dieser Platte und den Konsolen, welche für die Fixierung der unterschiedlichen Komponenten dienen, kann die benötigte Flexibilität umgesetzt werden.

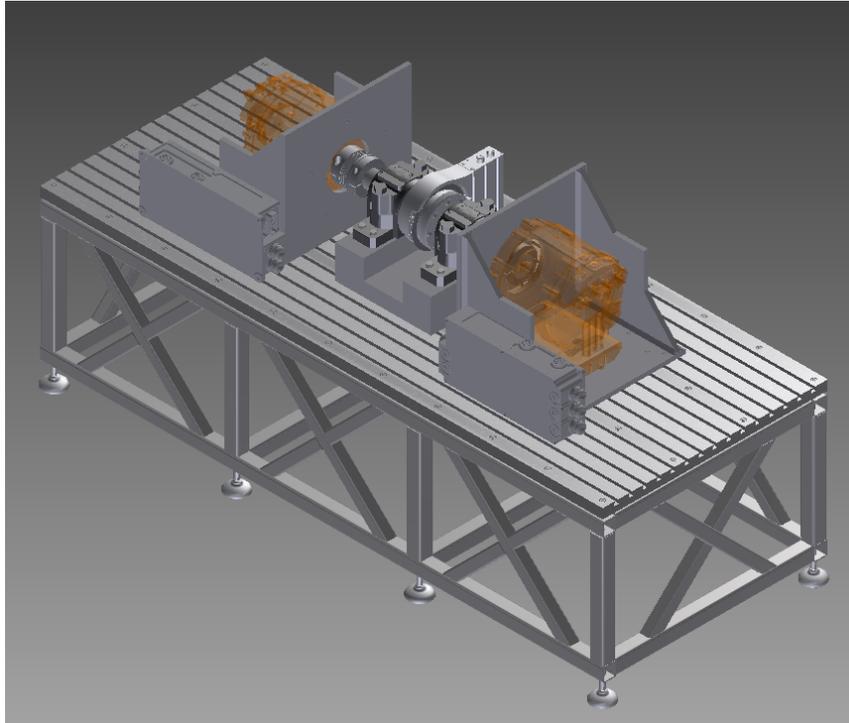


Abbildung 3.12: Aufbau des Prüfstandes mit Vorrichtungen für Motoren und Momentenmesswelle [2].

Es ist weiters die Vorrichtung zur Lagerung der DMMW zusehen mit welcher ebenfalls eine abschraubbare Verbindung mit dem Grundgestell hergestellt wird. Die Inverter, der PMSM, werden ebenfalls mit diesen Gestellen verbunden. Damit wird der Abstand zwischen PMSM und Inverter durch Änderung der Anordnung nicht verändert. Dieser Umstand ermöglicht eine kurze Kabelverbindung zwischen PMSM und Inverter.

## 4 Modellierung der elektrischen Motoren

In diesem Kapitel wird die Modellierung der für den Prüfstand vorgesehenen elektrischen Maschinen näher gebracht. Die Modellierung wird benötigt um das Verhalten der Maschinen zu jedem Zeitpunkt beschreiben zu können. Ein möglicher Anwendungspunkt der Modellierung ist die Berechnung des aktuellen Drehmomentes ohne eine DMMW zu verwenden, wie dies bei einem Einbau in ein Fahrzeug der Fall wäre. Um die Modellierung aus [8] durchführen zu können, müssen folgende Vereinfachungen angenommen werden:

- Alle Oberwellen werden als nicht vorhanden betrachtet, das bedeutet es wird das Grundwellenverhalten modelliert.
- Die definierten Parameter der Maschine werden als linear und zeitinvariant angenommen. Nichtlineare Parameter werden im Arbeitspunkt linearisiert, die Widerstände werden als konstant betrachtet.
- Die räumliche Verteilung der Wicklungen wird vernachlässigt und als konzentrierte Wicklungen betrachtet, welche einen sinusförmigen Verlauf des Magnetfeldes im Luftspalt erzeugen.
- Bei den Parametern der Maschine handelt es sich um Strangwerte die auf die Statorseite transformiert werden.

### 4.1 Aufbau einer PMSM

Bei einer PMSM handelt es sich um eine Drehstrommaschine bei der der magnetische Fluss des Läufers durch PM erzeugt wird. Das bedeutet das keine elektrische Energie verwendet werden muss, um das Magnetfeld im Läufer aufrechtzuerhalten.

Der Stator ist mit Wicklungen ausgestattet, deren Ende als Kontakte aus der Maschine ausgeführt sind. Es gibt Unterschiede bei der Anzahl der Phasen und der Polpaare. In der elektrischen Maschinentechnik ist die 3-phasige Drehstrommaschine am weitesten verbreitet, da mindestens drei Phasen benötigt werden um ein Drehfeld erzeugen zu können. Eine höhere Anzahl ist mit einem höheren Aufwand an Schaltungselektronik verbunden und wird zum Beispiel bei Schrittmotoren eingesetzt. Die Anzahl der Polpaare gibt an, wie oft dieses 3-phasige System in der Maschine verbaut wurde. Das bedeutet, wenn der Drehstrom eine komplette Periode durchläuft, dreht sich die Maschine mechanisch um  $1/\text{Polpaarzahl}$ . Dieser Umstand wird verwendet wenn keine hohen Drehzahlen benötigt werden da der Inverter für eine vielfach höhere Grundfrequenz ausgelegt werden muss.

### 4.1.1 Ständer mit Wicklungen

Für das Konzept und weiters für das Modell wird eine 3-phasige Maschine angenommen, die Anzahl der Polpaare wird als nicht definiert betrachtet und bei der Ermittlung der Parameter in Kapitel 4.3 berücksichtigt. In der Literatur [8] wird für das 3-phasige System die Raumzeigerdarstellung verwendet. Dieser Darstellung liegt der Gedanke zugrunde, dass ein 3-phasiges System die Summe der drei Größen, wie zum Beispiel der Strangströme, gleich Null ist. Dies setzt voraus, dass kein Nulleiter angeschlossen ist. Durch diesen Gedanken, benötigt man lediglich zwei Größen um das System beschreiben zu können. Voraussetzung hierfür ist die zeitliche und räumliche Zuordnung der Größen. Das bedeutet, die Wicklungen werden symmetrisch angenommen und besitzen einen Phasenversatz von  $120^\circ$  elektrisch zueinander. Betrachtungen ohne diese Vereinfachungen sind in [9] nachzulesen.

### 4.1.2 Rotor mit vergrabenen Permanentmagneten

Wie bereits erwähnt besteht der Vorteil eines Rotors mit PM darin, dass keine Energie für den magnetischen Fluss im Rotor aufgewendet werden muss, wie es zum Beispiel bei einer fremd-erregten Synchronmaschine der Fall ist. Bei Rotoren mit PM, gibt es bezüglich dem Rotor zwei Topologien die in [10] genauer behandelt werden.

Bei einem Rotor mit aufgesetzten PM besteht der Rotor selbst aus einem geblechten Eisenkern<sup>14</sup> mit darauf aufgesetzten PM. Da PM eine relative Permeabilität von  $\mu_{r,PM} \approx 1$  besitzen, welche in etwa der von Luft entspricht, wird durch die Einbringung der PM keine Änderung der Induktivität verursacht. Das bedeutet, die Induktivität des Rotors ist in Lage der PM  $L_d$  die selbe als in Lage quer zu diesen  $L_q$ .

Durch die Einbringung der PM in den Rotor mit vergrabenen Magneten, muss im Eisenkern eine Öffnung geschaffen werden um die Magnete platzieren zu können. Da, wie zuvor erwähnt, die relative Permeabilität der PM  $\mu_{r,PM} \approx 1$  und die von Eisen im ungesättigten Betrieb  $\mu_{r,FE} \geq 1000$  ist, wird dadurch die Induktivität des Läufers verändert. Durch diese Änderung wird die Induktivität in Richtung der Magnete  $L_d$  reduziert, wobei die Querinduktivität nahezu unbeeinflusst bleibt. Durch diesen Effekt wird im Betrieb ein so genanntes Reluktanzmoment erzeugt.

Dieses Moment ist unabhängig von der Stärke des verbauten PM. In Abbildung 4.1 wird der Drehmomentverlauf in Abhängigkeit zum Polradwinkel mit und ohne Berücksichtigung des Reluktanzmomentes gezeigt. Diese Kurven wurden mit dem Modell erzeugt, welches in Abbildung 4.3 gezeigt wird.

---

<sup>14</sup> Ein geblechter Eisenkern besteht aus dünnen Blechschichten welche elektrisch isoliert voneinander zusammengesetzt werden. Dieses reduziert die, durch das magnetische Wechselfeld erzeugten, Wirbelströme und somit die so genannten Eisenverluste.

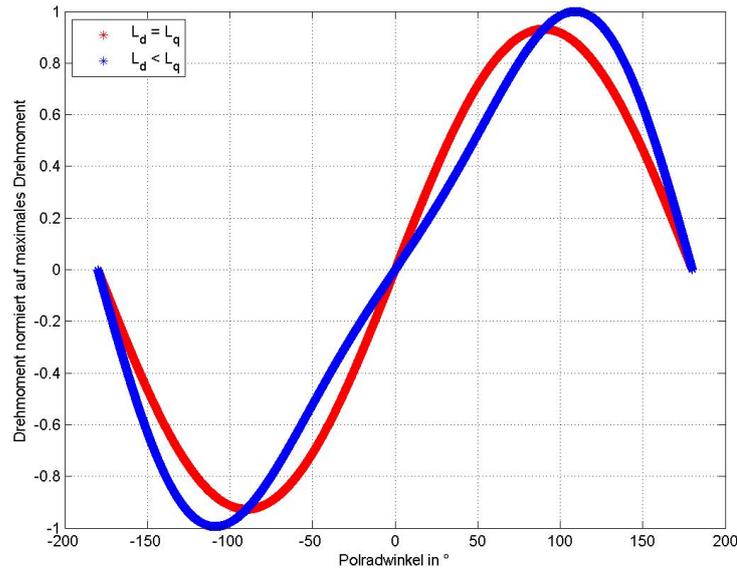


Abbildung 4.1: Drehmoment in Abhängigkeit zum Polradwinkel einer PMSM mit unterschiedlichen Verhältnissen der Längs- und Querinduktivitäten.

### 4.1.3 Definition des Raumzeigers

Die genaue Definition und der Nachweis, dass die Annahme gerechtfertigt ist, wird in [8] gezeigt. Die Erklärung des Raumzeigers wird mit der Definition des Magnetfeldraumzeigers durchgeführt. Das bedeutet das Magnetfeld  $\vec{B}$  der 3-phasigen Drehfeldmaschine (mit Phasen a, b und c) wird durch die Ströme in den Wicklungen hervorgerufen. Für diese Ströme gelten folgende Aussagen:

- Die Summe der Ströme muss zu jedem Zeitpunkt  $t$  den Wert 0 ergeben:  $I_a(t) + I_b(t) + I_c(t) = 0$ .
- Der Strom in jeder Wicklung erzeugt im Luftspalt, zwischen Stator und Rotor, eine räumlich sinusförmige B-Feldverteilung im Umfang.
- Die geometrische Addition der drei Phasen mit deren Strömen führt zu einer räumlichen sinusförmigen B-Gesamtfeldverteilung im Luftspalt.

Die Amplitude und die Phasenlage dieses räumlich sinusförmigen B-Feldes wird durch den komplexen Raumzeiger  $\vec{B}$  dargestellt, dessen Spitze zum Maximum des B-Feldes zeigt. Abbildung 4.2 zeigt die resultierenden B-Felder der drei Phasen sowie die Verteilung des B-Gesamtfeldes entlang des Luftspaltumfangs.

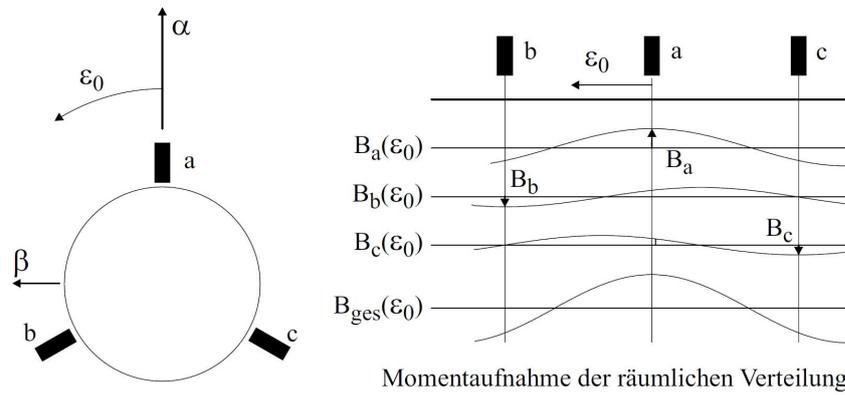


Abbildung 4.2: Verteilung der B-Felder der Wicklungen und des B-Gesamtfeldes entlang des Luftspalts [8].

In der Abbildung 4.2 zeigt der resultierende B-Raumzeiger in Richtung  $\alpha$ , da sich zu diesem Zeitpunkt das Maximum des B-Gesamtfeldes bei der  $\alpha$ -Achse befindet. Ein komplexer Raumzeiger wird mittels Real- und Imaginärteil beschrieben. Dadurch wird das 3-phasige Wicklungssystem der Maschine durch ein 2-phasiges System beschrieben bei dem die Wicklungen senkrecht aufeinander stehen. In [8] lautet die Definition der Beschreibung eines Raumzeiger wie folgt:

$$\vec{B} = B_\alpha + jB_\beta \quad (4.1)$$

$$B_\alpha = \text{Re}\{\vec{B}\} \quad (4.2)$$

$$B_\beta = \text{Im}\{\vec{B}\} \quad (4.3)$$

Die Beschreibung eines Raumzeigers entspricht der Darstellung eines Zeitpunktes. Durch die zeitliche Veränderung der Felder ändert sich in weiterer Folge auch der Raumzeiger. Durch die Annahme, dass die Ströme, welche die Magnetfelder hervorrufen, als Sinusgrößen mit zeitlichem Phasenversatz von  $120^\circ$  beschrieben werden können, drehen sich die Raumzeiger der drei Phasen mit der Frequenz der Ströme. Das bedeutet der B-Gesamtraumzeiger dreht sich ebenfalls mit dieser Frequenz.

Die Berechnung der Raumzeiger aus den Phasengrößen wird mittels der Formel 4.4 durchgeführt. Die Verwendung von  $I_0$  dient der Modellierung eines Nullsystems, welches in diesem Fall nicht berücksichtigt wird, somit ist  $I_0 \stackrel{!}{=} 0$ .

$$\begin{pmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \\ I_0 \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

#### 4.1.4 Einführung von unterschiedlichen Koordinatensystemen

Bei der bisherigen Betrachtung von Phasengrößen und Raumzeigern, waren diese stets fest mit dem Stator verbunden. Durch diese fixe Verbundenheit wird die Betrachtung in [8] als  $\alpha$ - $\beta$ -Koordinatensystem oder auch als Statorfestes Koordinatensystem (SKS) bezeichnet.

Um eine klare Bezeichnung der Größen gewährleisten zu können, wird zum Beispiel der B-Raumzeiger im SKS mit  $\vec{B}^S$  gekennzeichnet. Das S steht hierbei für eine Beschreibung im SKS.

Es besteht jedoch auch die Möglichkeit ein anderes Koordinatensystem zu verwenden, welches sich zum Beispiel mit dem Rotor mitdreht. Ein solches Koordinatensystem wird Rotorfestes Koordinatensystem (RKS) genannt. Bei diesem Koordinatensystem wird die Ausrichtung auf den Rotor beschrieben und die Achsen werden in [8] mit  $d$  und  $q$  bezeichnet, wobei die  $d$ -Achse den Realteil und die  $q$ -Achse den Imaginärteil beschreibt. Der B-Raumzeiger im RKS wird durch  $\vec{B}^R$  gekennzeichnet.

Bei der Verwendung von SKS und RKS ist die Änderung des Winkels zwischen den Koordinatensystemen zu beachten. Dieser Winkel ändert sich in Abhängigkeit der elektrischen Winkelgeschwindigkeit  $\omega_{el}$ . Dieser wiederum wird durch die mechanische Winkelgeschwindigkeit  $\omega_{mech}$  und der Anzahl an Polpaaren  $Z_p$  durch die Formel  $\omega_{el} = Z_p \cdot \omega_{mech}$  beschrieben. Das bedeutet, dass es sich beim RKS gegenüber dem SKS um eine zeitvariante Orientierung handelt. In [8] wird der Winkel zwischen SKS und RKS mit  $\beta_L$  bezeichnet.

Durch diesen Umstand wird ein beliebiger Raumzeiger  $\vec{I}$  im SKS folgendermaßen beschrieben, wobei  $\varphi$  für einen beliebigen Winkel steht:

$$\vec{I}^S = \hat{I} \cdot e^{j \cdot \varphi}. \quad (4.5)$$

Mit dem Winkel zwischen SKS und RKS ist derselbe Raumzeiger im RKS folgendermaßen zu beschreiben:

$$\vec{I}^R = \hat{I} \cdot e^{j \cdot (\varphi - \beta_L)}. \quad (4.6)$$

Um diese Umrechnung durchführen zu können muss der Winkel zwischen SKS und RKS bekannt sein. Aus diesem Grund wurde im Kapitel 3.4 auf die Möglichkeit der Messung des mechanischen Winkel der PMSM geachtet.

Der Grund um ein System im RKS zu beschreiben liegt darin, dass sich im stationären Zustand<sup>15</sup> die Raumvektoren von Spannung, Strom und B-Feldstärke gegenüber dem Rotor nicht verändert. Dadurch können, zur mathematischen Beschreibung der Größen in der Maschine, skalare Werte herangezogen werden, welche, je nach geforderter Genauigkeit, als Konstant angenommen werden können.

## 4.2 Mathematisches Modell einer PMSM

Die folgenden Ableitungen sind aus [8] entnommen. Für die Erstellung eines Signalfussplanes aus den allgemeinen Systemgleichungen werden folgende Parameter herangezogen:

$R_S$	Widerstand der Ständerwicklung
$Z_p$	Polpaarzahl der Maschine
$\Psi_{PM}$	Magnetischer Fluss der PM
$L_d$	Längsreaktanz
$L_q$	Querreaktanz
$M_R$	Reibmoment
$\Theta$	Trägheitsmoment der Maschine.

Mit den Systemgleichungen wird das elektrische und mechanische Verhalten der PMSM mit Hilfe von Differentialgleichungen modelliert. Die detaillierte Herleitung dieser Gleichungen ist in [11] einzusehen.

Flussverkettungsgleichung in d-Achse

$$\Psi_d = \Psi_{PM} + L_d \cdot I_d \quad (4.7)$$

Flussverkettungsgleichung in q-Achse

$$\Psi_q = L_q \cdot I_q \quad (4.8)$$

Ableitung aus der Statorspannungsgleichung in d-Achse

$$\frac{d\Psi_d}{dt} = U_d - R_S \cdot I_d + \Omega_{el} \cdot \Psi_q \quad (4.9)$$

Ableitung aus der Statorspannungsgleichung in q-Achse

$$\frac{d\Psi_q}{dt} = U_q - R_S \cdot I_q - \Omega_{el} \cdot \Psi_d \quad (4.10)$$

<sup>15</sup> Der stationäre Zustand wird erreicht wenn Lastmoment und Drehmoment der Antriebsmaschine denselben Wert erreichen und es zu keiner Drehzahländerung kommt.

Gleichung zur Drehmomentbildung

$$M_i = \frac{3}{2} \cdot Z \cdot (\Psi_{PM} \cdot I_q + (L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q) \tag{4.11}$$

Mechanische Gleichung

$$\Theta \cdot \frac{d\Omega_{mech}}{dt} = M_i - M_L \tag{4.12}$$

Wie in Gleichung 4.11 zu sehen ist, wird durch den in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Umstand von vergrabenen PM, ein zusätzliches Reluktanzmoment erzeugt. Bei aufgesetzten Magneten ( $L_d = L_q$ ) würde sich der hintere Term aufheben und somit kein Reluktanzmoment entstehen.

In Abbildung 4.3 ist eine mögliche Umsetzung des mathematischen Modelles der PMSM im Programm MATLAB-Simulink zu sehen. Aus diesem Modell, welches die drei Phasenspannungen sowie den momentanen Phasenwinkel als Eingangsgrößen besitzt, können Größen wie Drehmoment sowie resultierende Stromgrößen simuliert werden. Weiters besteht ebenfalls die Möglichkeit die Flussverkettungen, welche nur mit großen Aufwand gemessen werden könnten, während des Betriebes zu ermitteln.

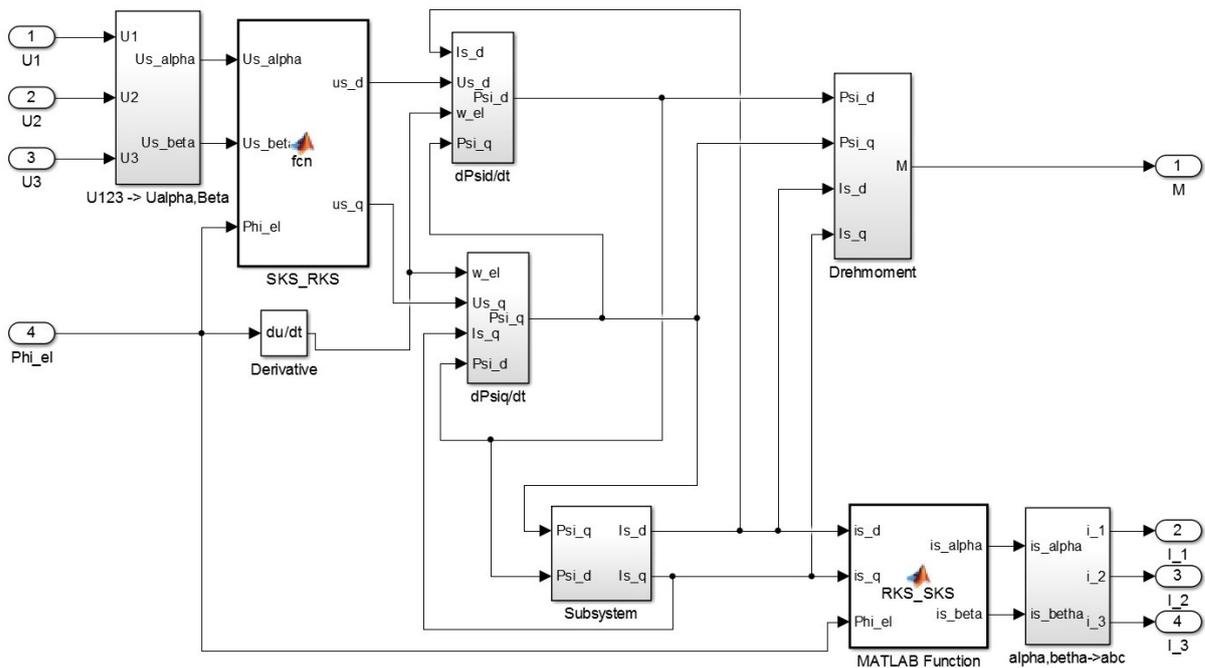


Abbildung 4.3: MATLAB-Simulink Modell für die Umsetzung der DGL.

Aus den Gleichungen und den notwendigen Parametern kann ein Modell erstellt werden, welches das Verhalten der realen PMSM wiedergibt. Mit Hilfe dieses Modells können Größen wie das aktuelle Drehmoment berechnet werden und man kann auf eine Drehmomentmesswelle verzichten. Dies wird, wie in Kapitel 4 beschrieben, wichtig bei der

Verwendung der PMSM in einem Fahrzeug, da dort der Einbau einer Drehmomentmesswelle nicht möglich ist. Um mit den Gleichungen 4.7-4.12 das Modell erstellen zu können werden zuvor die Parameter benötigt.

### 4.3 Erfassen der notwendigen Parameter

Die in Kapitel 4.2 beschriebenen Formeln zur Modellierung einer PMSM, müssen die notwendigen Parameter durch Messungen und Berechnungen erarbeitet werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Motor und der Inverter als eine Einheit angesehen werden müssen. Es besteht lediglich die Möglichkeit Spannung und Strom an den Motoren zu messen, als Führungsgröße für den im Inverter verbauten Regler kann allerdings nur Soll-Drehmoment bzw. die Soll-Drehzahl vorgegeben werden. Die Herausforderung dieses Umstandes wird dadurch verstärkt, dass alle Größen mit der vorhandenen Messtechnik, ohne Umbau des Prüfstandes gemessen bzw. berechnet werden sollen.

Aufgrund des Aufbaues der Messeinrichtungen, in Kapitel 3.4, können zur Modellierung folgende Messgrößen verwendet werden. Durch die Verwendung der HV-Messtechnik, stehen alle verketteten Spannungen ( $U_{12}, U_{23}, U_{31}$ ) sowie alle Ströme ( $I_1, I_2, I_3$ ) zur Verfügung. Weiters lässt sich durch Annahme von Symmetrie daraus die Strangspannungen berechnen. Ein für die Modellierung sehr wichtiger Parameter ist der aktuelle elektrische Rotorwinkel  $\beta_L$  der den Winkel zwischen SKS und RKS beschreibt. Dieser Winkel wird mittels zwei Systemen gemessen, das erste System ist in der PMSM verbaut und wird über die CAN-Kommunikation übertragen. Das zweite System ist in der Drehmomentenmesswelle verbaut und wird über alle Kommunikationskanäle zwischen zentraler Steuereinheit und DMMW übertragen. Der Grund warum zwei Sensoren vorgesehen wurden wird unter Kapitel 4.3.1 erklärt. In der Drehmomentenmesswelle sind neben dem bereits erwähnten Drehwinkelsensor noch weitere Sensoren, für Drehzahl und Drehmoment, vorgesehen. Messungen die Digital übertragen werden, werden von der zentralen Steuereinheit aufgenommen und gespeichert, siehe Kapitel 3.4.

#### 4.3.1 Berechnung des Differenzwinkels der Drehratensensoren

Wie zuvor erwähnt befinden sich zwei Drehratensensoren am Prüfstand. Ein Sensor befindet sich in der PMSM und misst den tatsächlichen Rotorwinkel der PMSM. Der zweite Sensor ist in der DMMW verbaut und misst deren Drehwinkel. Diese beiden Sensoren müssen zueinander synchronisiert werden, da durch Montage bzw. Umbau am Prüfstand die Winkelposition des Sensors gegenüber der Winkelposition der Maschine nicht definiert ist. Das bedeutet, die relative Position der beiden Sensoren, die drehfest miteinander verbunden sind, muss berechnet werden. Es ist noch ein weiterer Sensor am Prüfstand verbaut, dieser befindet sich in der zweiten PMSM, jedoch wird für die Modellierung nur eine der beiden Maschinen herangezogen, deshalb wird diesem Sensor für diesen Zweck keine weitere Beachtung beigemessen.

In der Tabelle 4.1 sind die Einstellungen der Führungsgrößen, sowie die Messgrößen für die Aufzeichnung, welche für die Berechnung des Differenzwinkels benötigt werden, aufgelistet.

Tabelle 4.1: Vorgabe der Führungsgrößen der Maschinen zur Modellierung des Winkels  $\Delta\varphi$ 

Einstellungen der Führungsgrößen		
PMSM 1	Drehzahl	$n = 0 \frac{1}{min}$
PMSM 2	Drehmoment	$M = 0 Nm$

Messdaten		
Messgröße	Messgerät	Aufzeichnungsgerät
$\varphi_{PMSM1}$	PMSM	zentrale Steuereinheit
$\varphi_{DMMW}$	DMMW	zentrale Steuereinheit

Mit den Messdaten dieser Messung kann der Differenzwinkel  $\Delta\varphi$  zwischen  $\varphi_{PMSM}$  und  $\varphi_{DMMW}$  berechnet werden. Die Formel hierfür lautet:

$$\Delta\varphi = \varphi_{PMSM} - \varphi_{DMMW} \quad (4.13)$$

### 4.3.2 Ermittlung der Polpaarzahl

Da die Polpaarzahl der zu modellierenden Maschine nicht bekannt ist, muss diese ermittelt werden. Eine Maschine mit einer Anzahl von  $Z_p$  Polpaaren dreht sich in einer gesamten elektrischen Periode nur  $1/Z_p$  Mal. Wenn man die Maschine mechanisch mit  $n$  Umdrehungen dreht, wird im Stator eine Spannung induziert welche eine Frequenz von  $n \cdot Z_p$  aufweist. Durch diesen Umstand werden bei der Ermittlung der Polpaarzahl die Führungsgrößen sowie die zu messenden Größen aus Tabelle 4.2 herangezogen.

Tabelle 4.2: Vorgabe der Führungsgrößen der Maschinen zur Modellierung der Flussverketzung  $\Psi_{PM}$ 

Einstellungen der Führungsgrößen		
PMSM 1	Drehzahl	$M = 0 Nm$
PMSM 2	Drehmoment	$n = 100 \frac{1}{min}$

Messdaten		
Messgröße	Messgerät	Aufzeichnungsgerät
$\Omega_{mech}$	DMMW	zentrale Steuereinheit
$\varphi_{DMMW}$	DMMW	zentrale Steuereinheit
$U_{12}, U_{23}, U_{31}$	HV-Spannungsmessung	HV-Messsystem

Aus den gemessenen Größen lässt sich durch Umformen der Formel 4.14 aus [8] die Polpaarzahl berechnen. Für diese Berechnung ist es ausreichend die Messung einer Spannung heranzuziehen. Aufgrund der Geometrie kann die Polpaarzahl nur eine ganze Zahl sein.

$$\Omega_{el} = Z_p \cdot \Omega_{mech} \quad (4.14)$$

### 4.3.3 Berechnung von $\Psi_{PM}$

Die Größe  $\Psi_{PM}$  gibt die Größe der Flussverkettung an die durch die im Rotor verbauten Permanent-Magnete hervorgerufen wird. Durch die Montage der PM auf dem Rotor muss der erzeugte Fluss immer in die selbe Richtung am Rotor zeigen. Bei der Verwendung des RKS wird diese Richtung als d-Achse bezeichnet. Durch die Messung der Induktion der PMSM, kann der Wert von  $\Psi_{PM}$  berechnet werden. Um die Induktion messen zu können kann die Messung aus der Ermittlung der Polpaarzahl (Tabelle 4.2) herangezogen werden.

Durch die gemessenen Größen lässt sich auch die Größe der  $\Psi_{PM}$  ermitteln. Hierfür müssen die Spannungen des gemessenen 3-Phasensystems, mit Hilfe der Gleichung 4.4 in das SKS ( $\alpha$ - $\beta$ -System) transformiert werden. Daraus erhält man den komplexen Raumzeiger der Spannung im SKS. Durch Umformung der Gleichung 4.15 aus [8] kann der komplexe Raumzeiger  $\underline{\Psi}_{PM}$  berechnet werden.

$$\underline{U}_s = j \cdot \Omega_{el} \cdot \underline{\Psi}_{PM} \quad (4.15)$$

Dieser Betrag entspricht dem für die Modellierung notwendigen Parameter. Die Phase dieses Zeigers kann mit dem gemessenen Drehwinkel  $\varphi_{DMMW}$  verglichen werden, um die Ausrichtung gegenüber der d-Achse zu erhalten.

### 4.3.4 Berechnung von $R_S$

Der zu berechnende Parameter  $R_S$  dient als Ersatzwiderstand der Wicklungen. In der Realität können sich die Widerstände der Wicklungen im 3-Phasensystem geringfügig unterscheiden. Weiters ändert sich dieser bei Erwärmung der Wicklungen. Da für das Modell ein symmetrisches System angenommen wurde, werden die Innenwiderstände der Wicklungen durch einen gemeinsamen Ständerwiderstand  $R_S$  ersetzt welcher dem Mittelwert der einzelnen Wicklungswiderstände entspricht. Bei der Messung muss darauf geachtet werden, bei welcher Temperatur diese durchgeführt wird. Um das Modell so genau als möglich parametrieren zu können sollte die Messung bei Betriebstemperatur durchgeführt werden.

Für die Ermittlung der Innenwiderstände der Wicklungen sind folgende Führungsgrößen sowie Messgrößen zu definieren:

Tabelle 4.3: Vorgabe der Führungsgrößen der Maschinen zur Berechnung der Strangwiderstände  $R_{1,2,3}$

Einstellungen der Führungsgrößen		
PMSM 1	Drehmoment	$M = 10 \text{ Nm}$
PMSM 2	Drehzahl	$n = 10 \text{ }^1/\text{min}$

Messdaten		
Messgröße	Messgerät	Aufzeichnungsgerät
$\Omega_{mech}$	DMMW	zentrale Steuereinheit
$U_{12}, U_{23}, U_{31}$	HV-Spannungsmessung	HV-Messsystem
$I_1, I_2, I_3$	HV-Strommessung	HV-Messsystem
Temperatur $P_M$	PMSM	zentrale Steuereinheit

Zur Berechnung der Widerstände wird die stationäre Spannungsgleichung 4.16 aus [8] herangezogen. Der Wert von  $L$  entspricht der Induktivität der Wicklungen, welche nicht für die Parametrisierung des Modells herangezogen wird.

$$\vec{U} = R \cdot \vec{I} + \underbrace{j \cdot \Omega_{el} \cdot L \cdot \underline{I}_1}_{\rightarrow 0} + \underbrace{j \cdot \Omega_{el} \cdot \Psi_{PM}}_{\rightarrow 0} \quad (4.16)$$

Durch die niedrige Drehzahl werden Induktivitäten sowie die Induktion vernachlässigbar. Dadurch kann in jeder Phase der Widerstand mittels Spannung- und Strommessung bestimmt werden. Um den benötigten Parameter  $R_S$  zu erhalten, muss mittels der Formel 4.17 der Mittelwert berechnet werden.

$$R_S = \frac{R_{Phase1} + R_{Phase2} + R_{Phase3}}{3} \quad (4.17)$$

Die Auswertung der Messung könnte auch durch die Berechnung der komplexen Zeiger durchgeführt werden, da der Widerstand lediglich den Realteil beeinflusst. Bei dieser Methode kann es, aufgrund von Ungleichmäßigkeiten der Phasengrößen, zu einem Drehzahl- und Positionsabhängigen Messergebnis und dadurch zu einem Messfehler kommen. Weiters könnte der Widerstand auch mittels einer Widerstandsmessung an den Klemmen der PMSM durchgeführt werden. Dabei wäre jedoch, entgegen der Anforderung, ein Umbau am Prüfstand notwendig.

Es besteht die Möglichkeit die Messung mehrfach durchzuführen um die Widerstände bei unterschiedlichen Temperaturen ermitteln zu können. Durch diese Messungen kann der Widerstand über einen Temperaturbereich definiert werden, damit das Modell, durch die Information der Temperatur, mit dem tatsächlichen Widerstandswert parametrisiert werden kann.

### 4.3.5 Berechnung von $L_d$ und $L_q$

Die Längsinduktivität  $L_d$  und die Querinduktivität  $L_q$  sind Parameter welche durch die Geometrie des Rotors bestimmt werden. Es handelt sich dabei, wie am Namen erkennbar, auf RKS basierende Parameter. Da für das Modell die Werte für  $L_d$  und  $L_q$  als konstant angenommen werden, macht es keinen Unterschied welche Einstellungen als Führungsgrößen definiert werden. In [12] ist ersichtlich, dass es zu einer Abweichung der Parameter in Abhängigkeit von  $I_d$  und  $I_q$  kommt. Um untersuchen zu können ob diese Abweichungen vernachlässigbar sind, sollten diese Parameter bei mehreren Betriebspunkten ermittelt werden. Für die Berechnung wird in erster Linie nur ein Betriebspunkt gewählt. Bei der Wahl des Drehmomentes wurde ein Bereich gewählt bei dem die Sättigungserscheinungen, welche bei hohen Strömen und somit bei hohem Drehmoment auftreten, zu vernachlässigen sind. Die Führungsgröße der Drehzahl wurde so gewählt, dass die Auflösung des HV-Messsystems ausreicht um einen genauen Rückschluss der  $d$ - und  $q$ -Komponenten erhalten zu können. Bei einer Drehzahl von  $1000 \frac{1}{min}$  und einer minimalen Abtastfrequenz von  $100 kHz$  entspricht das pro Umdrehung mindestens 6000 Messpunkten.

Tabelle 4.4: Vorgabe der Führungsgrößen der Maschinen zur Berechnung von  $L_d$  und  $L_q$

Einstellungen der Führungsgrößen		
PMSM 1	Drehmoment	$M = 50 Nm$
PMSM 2	Drehzahl	$n = 1000 \frac{1}{min}$

Messdaten		
Messgröße	Messgerät	Aufzeichnungsgerät
$\Omega_{mech}$	DMMW	zentrale Steuereinheit
$\varphi_{DMMW}$	DMMW	zentrale Steuereinheit
$U_{12}, U_{23}, U_{31}$	HV-Spannungsmessung	HV-Messsystem
$I_{12}, I_{23}, I_{31}$	HV-Strommessung	HV-Messsystem

Bei der Aufnahme der Messwerte für diese Messung ist es wichtig, dass sich der stationäre Zustand einstellt. Das bedeutet, dass sich Drehzahl sowie Drehmoment über den Zeitraum der Messung nicht verändern. Für die Berechnung werden Formel 4.8 und 4.9 herangezogen und zu folgender Formel zusammengefügt:

$$\frac{d\Psi_d}{dt} = U_d - R_S \cdot I_d + \Omega_{el} \cdot L_q \cdot I_q \quad (4.18)$$

Durch die Einstellung des stationären Zustandes ( $\frac{d}{dt} = 0$ ), kann die Ableitung der Flussverkettung gleich Null gesetzt werden.

$$0 = U_d - R_S \cdot I_d + \Omega_{el} \cdot L_q \cdot I_q \quad (4.19)$$

Somit lautet die Formel für  $L_q$  im stationären Bereich:

$$L_q = \frac{R_S \cdot I_d - U_d}{\Omega_{el} \cdot I_q} \quad (4.20)$$

Der Index  $d$  und  $q$  entspricht den jeweiligen Komponenten des komplexen Raumzeigers. Die  $d$ -Komponente entspricht dem Real- und die  $q$ -Komponente entspricht dem Imaginärteil des Raumzeigers.

Die Werte für  $I_d$ ,  $I_q$  sowie  $U_d$  werden ermittelt, indem zuerst mittels der Gleichung 4.4 die Messwerte in die Raumzeigerdarstellung transformiert werden. Diese komplexen SKS-Raumzeiger werden, wie in Formel 4.6 gezeigt, umgerechnet um den komplexen Raumzeiger im RKS zu erhalten. Durch die Verwendung des Real- bzw. Imaginärteils eines Zeigers wird die jeweilige  $d$ - bzw.  $q$ -Komponente ermittelt.

Für die Berechnung von  $L_d$  wird dieselbe Messung mit denselben Führungsgrößen gewählt. Die Formel zur Berechnung wird aus den Verhältnissen von Formel 4.7 und 4.10 gebildet.

$$\frac{d\Psi_q}{dt} = U_q - R_S \cdot I_q - \Omega_{el} \cdot (\Psi_{PM} + L_d \cdot I_d) \quad (4.21)$$

Durch die Einstellung des stationären Zustandes ergibt sich für die Berechnung von  $L_d$  folgende Formel:

$$L_d = \frac{U_q - R_S \cdot I_q - \Omega_{el} \cdot \Psi_{PM}}{\Omega_{el} \cdot I_d} \quad (4.22)$$

Für die Berechnung von  $L_d$  muss eine Stromkomponente in  $d$ -Richtung vorhanden sein. Diese Komponente wird durch den internen Regler des Inverters gesteuert, dadurch kann es unter Umständen nötig sein die Führungsgrößen zu verändern bis eine  $d$ -Komponente des Stromes vorhanden ist.

### 4.3.6 Berechnung des Reibmomentes $M_R$

Für die Berechnung des Reibmomentes stehen zwei Möglichkeiten zur Auswahl. Der motorische und der generatorische Leerlaufversuch. Beim motorischen Leerlaufversuch wird die Maschine angetrieben und das aufgebrauchte Drehmoment für die jeweilige Drehzahl mit der Formel 4.11 berechnet. Bei diesem Versuch wird das Reibmoment für die gesamte Welle berechnet, inklusive Lager der Momentenmesswelle, sowie das Reibmoment der zweiten PMSM.

Beim generatorischen Leerlaufversuch wird mit der zweiten Maschine angetrieben und das Drehmoment über die Momentenmesswelle berechnet. Für die Modellierung einer Maschi-

ne ist der generatorische Leerlauf zielführender, da nur eine Maschine betrachtet wird. Für die Berechnung des Trägheitsmomentes  $\Theta$  ist jedoch das Reibmoment der gesamten Welle notwendig. Weiters sind, für die Berechnung des Trägheitsmomentes viele Punkte des möglichen Drehzahlbereiches notwendig. Aus diesem Grund sieht die Wahl der Führungs- und Messgrößen folgendermaßen aus:

Tabelle 4.5: Vorgabe der Führungsgrößen der Maschinen zur Berechnung des Reibmomentes  $M_R$

Einstellungen der Führungsgrößen		
PMSM 1	Drehmoment	$M = 0 \text{ Nm}$
PMSM 2	Drehzahl	$n = -10.000 \text{ bis } 10.000 \frac{1}{\text{min}}$

Messdaten		
Messgröße	Messgerät	Aufzeichnungsgerät
$\Omega_{\text{mech}}$	DMMW	zentrale Steuereinheit
Drehmoment $M$	DMMW	zentrale Steuereinheit

Für die Berechnung des Reibmomentes ist es erforderlich den stationären Zustand ( $\frac{d}{dt}$ ) zu erreichen. Dadurch kann die Gleichung 4.12 wie folgt angesetzt werden:

$$0 = M_i - M_l \quad (4.23)$$

$$M_i = M_l \quad (4.24)$$

Um den stationären Zustand erreichen zu können, muss das innere Drehmoment der PMSM  $M_i$  dem Lastmoment  $M_l$  gleichgesetzt sein. Da keine zusätzliche Last an die Maschine angelegt ist, entspricht das Lastmoment dem Reibmoment.

Um den Verlauf des Reibmomentes in Abhängigkeit der Drehzahl aufzeichnen zu können, müssen mehrere Messungen im gesamten Drehzahlbereich durchgeführt werden. Dies ist für die Berechnung des Trägheitsmomentes im nächsten Schritt notwendig.

Für die in Abbildung 4.4 gezeigte Anordnung der Bauteile, ist keine Unterscheidung zwischen Lager der PMSM und Stützlager der Drehmomentenmesswelle möglich. Das Reibmoment der PMSM kann nur durch Rückrechnung der Lagerreibung erfolgen. Hierfür muss das Datenblatt des Lagers bzw. eine Einzelmessung herangezogen werden.

### 4.3.7 Trägheitsmoment $\Theta$

Das Trägheitsmoment wird durch den sogenannten Auslaufversuch ermittelt. Zur Berechnung des Trägheitsmomentes aus diesem Versuch, muss das Reibmoment in einem be-

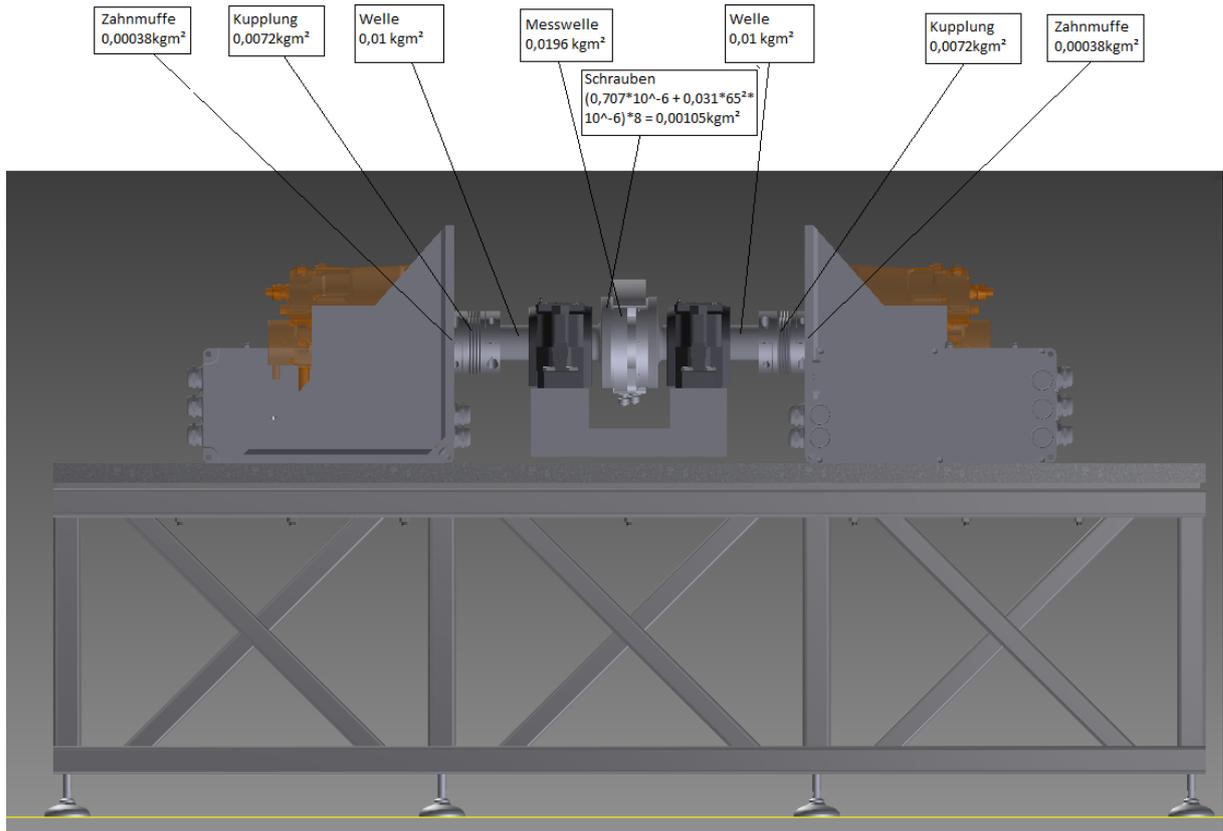


Abbildung 4.4: Anordnung der Bauteile für die Modellierung der PMSM, sowie die dafür berechnete Trägheitsmomente [2].

stimmten Drehzahlbereich bekannt sein. Bei der Vorbereitung der Messung wird die Maschine erst bei einer bestimmten Drehzahl gehalten. Während der Durchführung werden die Inverter abgeschaltet bzw. die Führungsgröße des Drehmomentes auf 0Nm gesetzt.

Tabelle 4.6: Vorgabe der Führungsgrößen der Maschinen zur Berechnung des Trägheitsmoment  $\Theta$

Einstellungen der Führungsgrößen		
PMSM 1	Drehmoment	$M = 0 \text{ Nm}$
PMSM 2	Drehzahl	$n = 1000 \frac{1}{\text{min}} \rightarrow x$
Messdaten		
Messgröße	Messgerät	Aufzeichnungsgerät
$\Omega_{\text{mech}}$	DMMW	zentrale Steuereinheit

Für die Berechnung kann die Formel 4.12 herangezogen werden. Durch die Vorgabe der Führungsgröße ist das innere Drehmoment der PMSM  $M_i = 0$ . Dadurch kann mit der Formel 4.25 und der Information des Reibmoment das Trägheitmoment berechnet werden.

$$\Theta = -\frac{M_R}{\frac{d\Omega_{mech}}{dt}} \quad (4.25)$$

Da die Drehzahländerung beim Auslaufversuch negativ ist, ist das Trägheitmoment wie zu erwarten positiv.

## 4.4 Anordnung der Komponenten

Die Komponenten des Prüfstandes müssen so gewählt werden, dass die in Kapitel 2.1 beschriebenen Punkte so gut wie möglich abgedeckt werden können. Hierbei ist Augenmerk darauf zu legen, dass verschiedene Komponenten bereits aufeinander abgestimmt sind. Es ist darauf zu achten in Bezug auf Genauigkeit, Kompatibilität und Ausfallsicherheit das Maximum zu erreichen. Weiters ist die Sicherheit bei Arbeiten am Prüfstand bei der Konzept-Erstellung sehr wichtig.

In Abbildung 4.5 ist die Einteilung des Prüfraumes sowie die Anordnung der Komponenten zu sehen. Es wurde darauf geachtet, dass am Prüfstand von allen Seiten die Möglichkeit besteht Arbeiten durchführen zu können. Beim Arbeitsplatz des Prüfstandbetreuers wurde darauf geachtet, dass sich dieser in axialer Richtung zur Motorachse befindet. Bei einem möglichen Fehler der Lagerung könnte durch die Zentrifugalkraft ein Bauteil in radialer Richtung geschleudert werden.

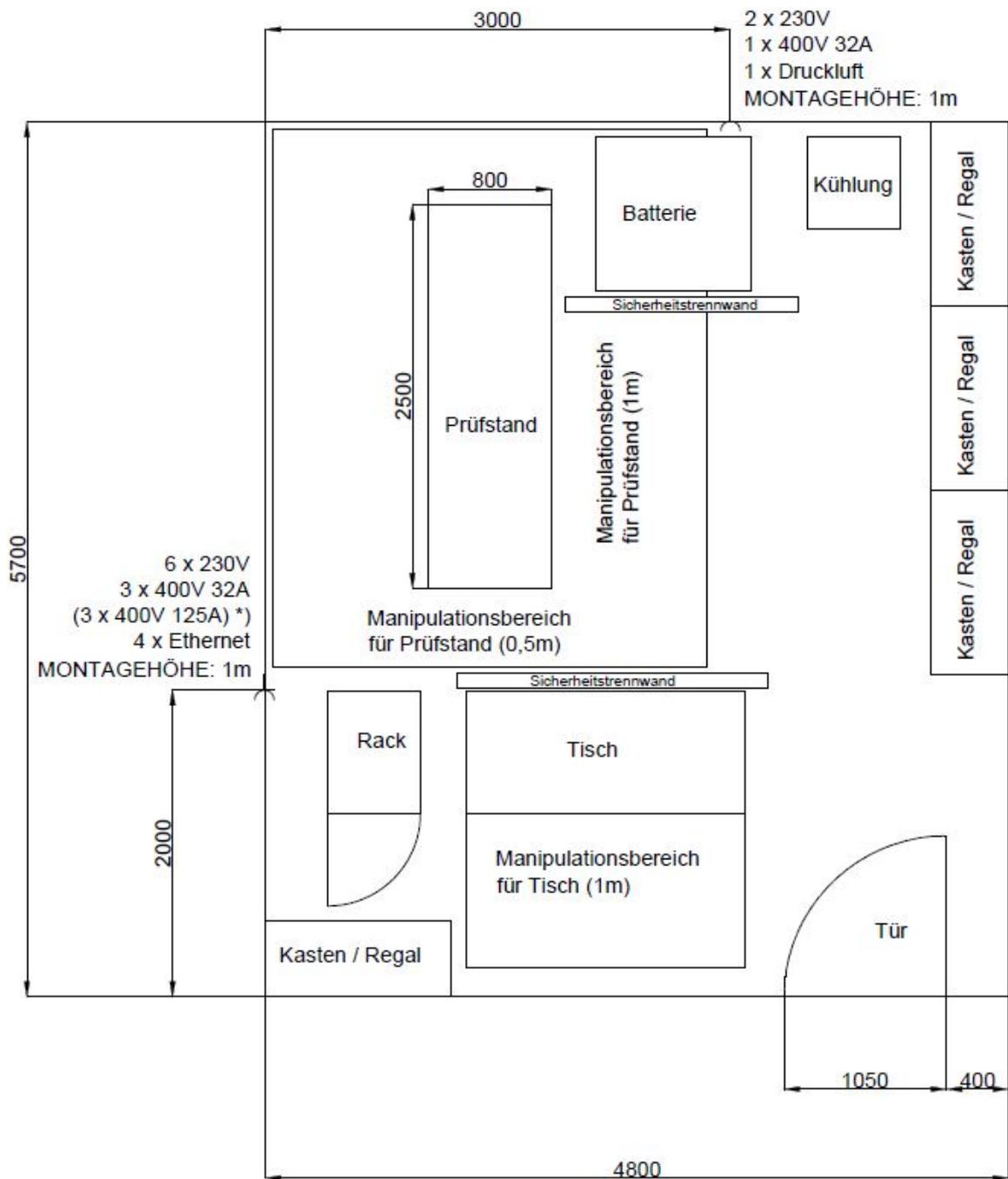


Abbildung 4.5: Vorgesehene Anordnung der Kabelkanäle und alle benötigten Komponenten verbinden zu können [2].

## 5 Ergebnisse aus Modellsimulation

In diesem Kapitel wird ein Versuch mit dem Modell aus Kapitel 4 durchgeführt, welches das Verhalten des erstellten Modelles darstellt. Aufgrund der fehlenden Informationen über die Werte der für diesen Prüfstand konzeptionierten Motoren, wurden für die Simulation Daten aus [6] entnommen.

### 5.1 Parameter für die Simulation

Die in Kapitel 4.3 gezeigten Parameter werden benötigt, um das mathematische Modell der PMSM parametrieren zu können. Für die Parametrierung wurden Werte der PMSM herangezogen welche aus [6] zu entnehmen sind. Für die Werte die nicht aus dieser Quelle verfügbar sind wurden realistische Annahmen getroffen.

Um den Unterschied zwischen vergrabenen und aufgesetzten PM im Kapitel 4.1.2 zeigen zu können, wurden die Werte für die Längs- und Querimpedanz des Läufers für diesen Versuch gleichgesetzt. Die verwendeten Parameter für die Simulation sind in Tabelle 5.1 zu finden.

Tabelle 5.1: Die für die Parametrierung verwendeten Werte.

Einstellungen der Parameter		
Bezeichnung	Formelzeichen	Größe
Innenwiderstand	$R_i$	20 mΩ
Längsinduktivität	$L_d$	18 mH
Querinduktivität	$L_q$	19 mH (18 mH)
Magnetischer Fluss aus PM	$\Psi_{PM}$	0.725 Vs
Trägheitsmoment des Rotors	$\Theta$	0.006 kg m <sup>2</sup>
Polpaarzahl	$Z_p$	3
Reibkoeffizient	$k_r$	0.3 Nm s/rad

## 5.2 Randbedingungen der Simulation

Um eine Simulation durchführen zu können, müssen Randbedingungen geschaffen werden um Ergebnisse zu erhalten, welche das Verhalten einer realen Maschine darstellen können. In Tabelle 5.2 sind die in MATLAB-Simulink eingestellten Werte für die Simulation zu sehen.

Tabelle 5.2: Die für die Simulation verwendeten Randbedingungen.

Einstellungen der Parameter		
Bezeichnung	Formelzeichen	Größe
Start Drehzahl	$n_0$	0 1/min
Drehzahländerung	$\frac{d\omega_{mech}}{dt}$	10 rad/s <sup>2</sup>
Enddrehzahl (mech.)	$N_{max}$	1000 1/min
Statorspannung	$\hat{U}_s$	100 V
Abtastzeit	$T_d$	0.1 ms
Simulationszeit	$T_{sim}$	12 s

## 5.3 Hochlaufsimulation

Hierbei handelt es sich um die Simulation eines Hochlaufes einer PMSM. Da im Zuge dieser Arbeit kein Regler entworfen wurde, wird für die Simulation ein Hochlaufversuch herangezogen bei dem die Statorspannungsfrequenz kontinuierlich erhöht wird, sodass das Trägheitmoment des Rotor nicht größer wird als das vom Motor erzeugte Drehmoment.

In Abbildung 5.1 ist der Verlauf der elektrischen Kreisfrequenz der Spannung sowie der Betrag des Stromraumzeigers des Ständerstromes zu sehen. Zu Beginn wird der Strom lediglich durch den hmschen Anteil im Ständer begrenzt, dadurch kann dieser auf einen hohen Wert ansteigen. Bei Verwendung von Frequenzumrichter für die Regelung der Eingangsspannungen würde der Spannungswert durch zeitliche Gewichtung der Zwischenkreisspannung auf einen Wert reduziert werden, bei dem sich maximal ein Strom einstellt, für welchen die Maschine ausgelegt wurde. Bei höheren Drehzahlen wird durch die Induktion in den Statorwicklungen eine Gegenspannung erzeugt, welche dem Strom der Eingangsspannung entgegenwirkt, und damit den Strom reduziert.

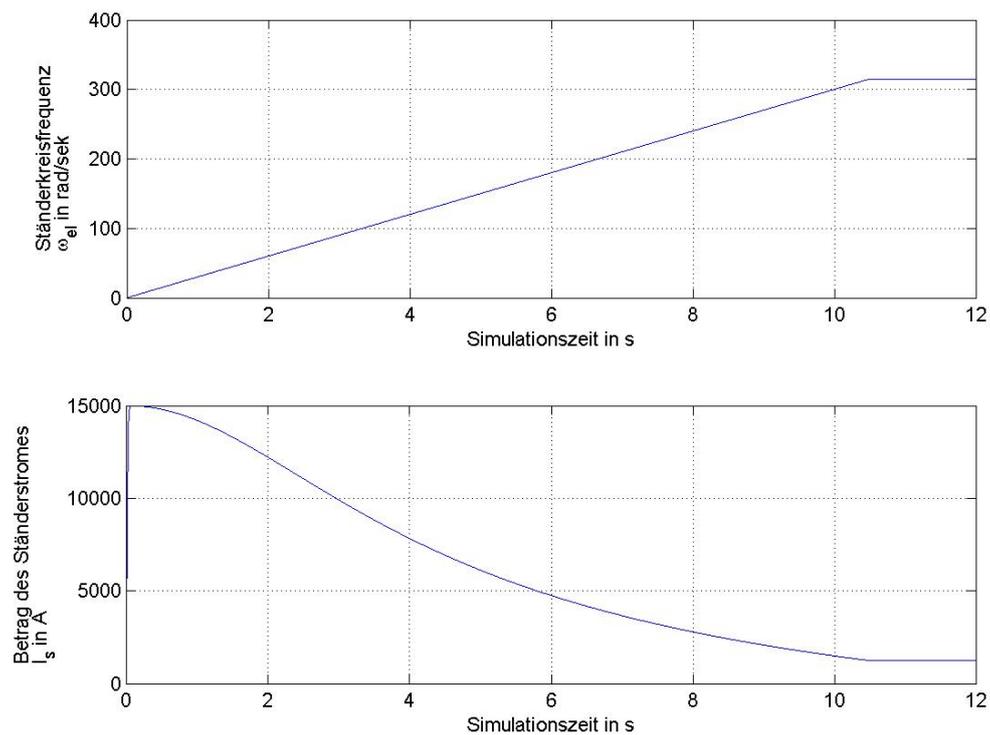


Abbildung 5.1: Ströme und Spannungen während der Hochlaufsimulation.

In Abbildung 5.2 sind die Winkelgeschwindigkeiten für das elektrische und das mechanische System zu sehen. Da für die Simulation eine Polpaarzahl von 3 verwendet wurde, ist der die elektrische Kreisfrequenz exakt 3 mal so groß als die mechanische Kreisfrequenz.

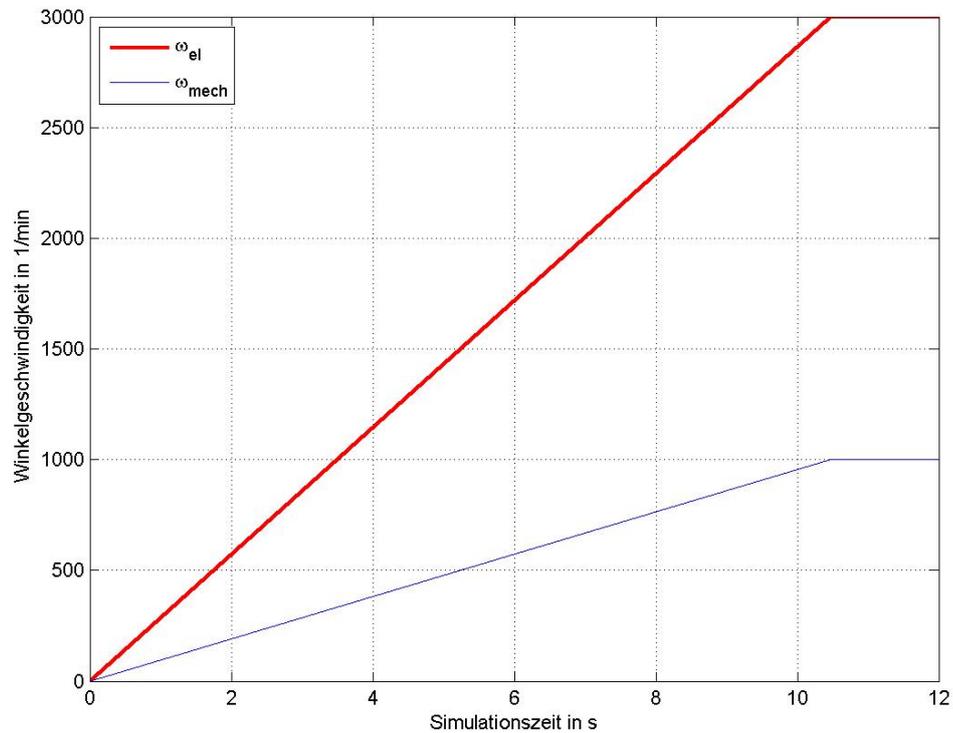


Abbildung 5.2: Vergleich zwischen mechanischer und elektrischer Winkelgeschwindigkeit.

In Abbildung 5.3 ist der Anstieg des Polradwinkels bei erhöhtem Drehmomentbedarf zu sehen. Der exponentielle Anstieg kommt daher, dass bei erhöhter Drehzahl sich der Strom aufgrund der induzierten Spannung verringert, wie in Abbildung 5.1 zu sehen. Das Verhältnis zwischen Drehmoment und Polradwinkel ist in Abbildung 4.1 zu sehen. Weiterer Grund für diesen Anstieg ist der Widerstand der durch den Reib-Koeffizienten hervorgerufen wird.

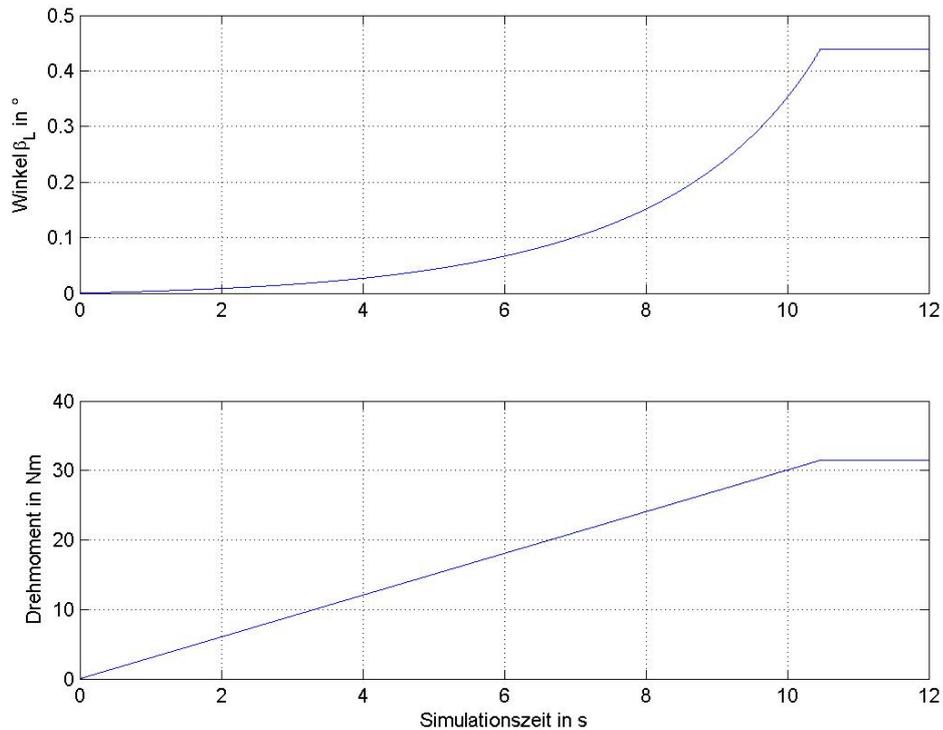


Abbildung 5.3: Drehmoment und Polradwinkel während des Hochlaufversuches.

## 6 Zusammenfassung

Bei der vorliegenden Arbeit wurde der konzeptionelle Aufbau eines Prüfstandes behandelt. Hierbei wurden die Anforderungen von Partnern aus Entwicklungsbetrieben sowie universitätsinterne Anforderungen als Eckpunkte herangezogen. Aus diesen Daten wurde ein Konzept erstellt, welches zur Wahl der Komponenten herangezogen werden kann.

Der Aufbau des Prüfstandes kann aufgrund dieser Arbeit weitergeführt werden, da zu jeder benötigten Komponente die Anforderungen angeführt sind, welche dieses Bauteil erfüllen muss. Bei der Konzeptionierung wurde besonderer Wert auf Sicherheit und Durchführbarkeit gelegt. Zur weiteren Vorgehensweise in diesem Projekt, muss zu jeder Komponente ein verfügbares Produkt gesucht werden, welches die an ihn gestellte Anforderung erfüllt. Hierfür sind am Institut für Fahrzeugtechnik bereits verschiedenen Komponenten verfügbar welche untersucht werden müssen, ob sie für den Einsatz am Prüfstand geeignet sind.

Nach dem Aufbau und der Inbetriebnahme des Prüfstandes können die, in dieser Arbeit definierten, Parameter der Antriebs- und Belastungsmaschinen gemessen und berechnet werden. Mit diesen Parametern ist es möglich, das in dieser Arbeit beschriebene, mathematische Modell der Maschine zu parametrieren.

Mögliche weitere Arbeiten an diesem Prüfstand die den Umfang der möglichen Prüfläufe erweitern sowie diverse Erweiterungen die unumgänglich sind um die verwendeten Komponenten in ein Fahrzeug einbauen zu können, werden nun folgend beschrieben.

### DC-DC-Konverter

Ein DC-DC-Konverter ist ein Bauteil welches Energie von einem Gleichspannungsniveau in ein anderes transportiert. In diesem Zusammenhang wird es verwendet um mit Energie aus dem HV-Kreis die LV-Versorgung sicherzustellen. Mit Hilfe dieses Bauteiles kann eine 12V-Batterie geladen werden, welche die Spannung der LV-Versorgung stabilisiert. Dadurch wird eine Unabhängigkeit des Prüfstandes von einer zusätzlichen Energieversorgung, wie etwa einem Netzteil, erreicht. Durch die Unabhängigkeit können die Komponenten des Prüfstandes auch in einem Fahrzeug verbaut werden. Da der Konverter mit HV-Spannung versorgt ist, muss auch dieser mit Sicherheitseinrichtungen aus Kapitel 3.8 ausgestattet sein.

## Speicherplatzenerweiterung für Messdaten

Bei dieser Erweiterung handelt es sich um ein System, welches auf den Speicher zugreift, auf welchem die Messdaten geschrieben werden. Da dieser interne Speicher begrenzt ist, wird hierfür ein externer Speicher verwendet. Dies hat den Vorteil, dass auch lange Prüfläufe durchgeführt werden können, bei denen ein sehr großer Speicherplatzbedarf besteht. Für die vorliegende Arbeit wurde diese Erweiterung nicht konzeptioniert, da bei den Anforderungen keine Langzeitversuche gefordert wurden.

## Konditionieren des Prüflings

Unter Konditionierung wird die Vorbereitung eines Prüflings für einen Versuch bezeichnet. Durch diese Erweiterung kann ein Prüfling auf eine bestimmte Temperatur gebracht werden bevor der Versuch gestartet wird. Dies kann benötigt werden, um etwa das Verhalten eines Getriebes bei niedrigen Temperaturen zu prüfen.

Hierfür muss ein Aggregat verwendet werden welches die benötigten Temperaturen erzeugen kann, ein sogenanntes Klimagerät. Weiters muss eine isolierende Kammer für den Prüfling vorgesehen werden, um diesen konstant auf einer bestimmten Temperatur halten zu können ohne die Umgebungstemperatur im Prüfraum zu beeinflussen. Diese Kammer muss verschließbar und mit Durchführungen für die Antriebs- und Belastungswelle ausgestattet sein.

## Berechnen der Maschinenparameter bei unterschiedlichen Randbedingungen

Dieser Punkt beinhaltet zeitintensive Messungen um den gesamten Lastbereich abdecken zu können. Hierbei sind die Parameter aus Kapitel 4.3 nicht wie in dieser Arbeit gezeigt in einem Punkt, sondern über einen größeren Betriebsbereich zu ermitteln. Zum Beispiel kann der Widerstand der Ständerwicklungen im gesamten Temperaturbereich erfolgen. Diese Temperaturen könnten etwa mit einer zuvor beschriebenen Vorrichtung erzeugt werden. Weiters könnten die Längsinduktivität  $L_d$  sowie die Querinduktivität  $L_q$  bei unterschiedlichen Verhältnissen und Werten der Längs- und Querströme ( $I_d$  und  $I_q$ ) berechnet werden. Bei dieser Untersuchung, würde die Nichtlinearität der Magnetisierungskennlinie, wie in [12] beschrieben, berücksichtigt werden.

## Untersuchung bei hervorgerufenen Problemen der Kommunikation

Um für den Aufbau eines Prototypen sicherstellen zu können, dass im Falle eines Kommunikationsproblems keine Gefahr für Personen in unmittelbarer Umgebung entsteht, sollte eine Untersuchung der Fehleranfälligkeit durchgeführt werden. Hierfür müssen an der Kommunikationsschnittstelle zwischen zentraler Steuereinheit und Inverter Störungen eingespeist werden. Dies kann etwa durch kapazitive Einkopplung einer dafür vorgesehenen Messzange erfolgen.

Weiters kann das Verhalten durch eine zu hohe Buslast<sup>16</sup> hervorgerufen werden, welches Auftreten kann, wenn zu viele Steuergeräte am selben Bussystem kommunizieren. Dies kann durch zusätzliche Datenpakete hervorgerufen werden, welche durch die zentrale Steuereinheit gesendet werden.

## Mögliche Anwendungen der Modellierung im Fahrzeug

Im Falle, dass die verwendeten Komponenten in einem Fahrzeug verbaut werden, muss ein Echtzeitprogramm die benötigten Parameter modellieren. Da im Fahrzeug die HV-Messung sehr aufwendig sein würde müssen nicht gemessenen Größen aus LV-Größen und SW-Daten modelliert werden.

Um das Modell auf LV-Messungen und SW-Daten stützen zu können, müssen alle Komponenten, die an der Energiekonvertierung beteiligt sind, separat modelliert werden. Hierzu zählen die Inverter, die HV-Batterie, das Getriebe sowie alle Kommunikationsschnittstellen.

---

<sup>16</sup> Buslast ist das Verhältnis zwischen theoretisch maximaler und tatsächlicher Datenübertragungsmenge.

# Literaturverzeichnis

- [1] K. Lebert M. Paulweber. *Mess- und Prüfstandstechnik*. Der Fahrzeugantrieb. Springer Vieweg, 2014. ISBN 978-3-658-04452-7.
- [2] M. Essl. Motor drivetrain testbench. Technical report, Institut für Fahrzeugtechnik, Technische Universität Graz, 2015.
- [3] T. Rohm. *Chinas Seltene Erden: Ein Beispiel für die Umkehrung polit-ökonomischer Abhängigkeiten*. GRIN Verlag, 2011. ISBN 978-3-656-06550-0.
- [4] H. H. Braess and U. Seiffert. *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. ATZ/MTZ-Fachbuch. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. ISBN 978-3-658-01691-3.
- [5] H.-M. Fischer, editor. *Spannungsklassen in der Elektromobilität*. ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e. V. Kompetenzzentrum Elektromobilität, 2013.
- [6] Brusa. *Technische Informationen und Inbetriebnahme, Originalbetriebsanleitung*, 2014.
- [7] Rimac Automobili d.o.o., Ljubljanska 7, 10431 Sveta Nedelja, Croatia. *PDU datasheet*, document version 1.1. edition, 2015.
- [8] D. Schröder. *Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen*. Bd. 10. Springer, 2009. ISBN 978-3-540-89612-8.
- [9] K. P. Kovács and I. Rác. *Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen*. Bd. 2. Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, 1959. LCCN 61042946.
- [10] A. Binder. *Elektrische Maschinen und Antriebe: Grundlagen, Betriebsverhalten*. Springer-Lehrbuch. Springer, 2012. ISBN 978-3-540-71850-5.
- [11] Schröder D. *Elektrische Antriebe 1: Grundlagen*. 3. Auflage. Springer-Verlag, 2007. ISBN 978-3-540-72764-4.
- [12] F. Wang, C. Chang, and B. Liu. Analysis of pmsm control performance based on the mathematical model and saturated parameters. In *Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2014 IEEE Conference and Expo*, pages 1–5, 2014.