



Reinhard Brugger, Bsc.

Analyse und Darstellung von optimierten Prüfproze- duren und Prüfaufbauten von P2 Hybridmodulen von elektrifizierten Antriebssträngen

Masterarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom Ingenieur

Masterstudium- Maschinenbau

Eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ass. Prof. Dipl. Ing. Dr. techn. Bader Michael

Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik

DI Hulla Roland (AVL List GmbH)

DI Rieger Herwig (AVL List GmbH)

Graz, November 2014

Danksagung

An dieser Stelle will ich all jenen Menschen Danke sagen, die mich während meines Studiums begleitet und unterstützt haben. Sie haben großen Anteil an diesem erfolgreichen Abschluss.

Danke an meine Eltern Erika und Wilfried Brugger, die mir durch ihren Einsatz eine höhere Schulbildung ermöglicht haben und mir bis zum heutigen Tag in Liebe unterstützend zur Seite stehen.

Danke an meine Frau Sarah Brugger, die mich seit den letzten Jahren meines Studiums begleitet. Danke, dass du an diesem Ziel mitgearbeitet hast, es auch zu deinem Ziel hast werden lassen, indem wir gemeinsam die damit verbundenen Herausforderungen bewältigt haben.

Weiters gilt mein Dank, Herrn Ass. Prof Bader Michael von der TU-Graz, der mich mit seinem fachlichen Wissen unterstützt und wertvolle Impulse für die Arbeit gegeben hat.

Danke auch an Herrn DI Dr. Hannes Hick, Herrn DI (FH) Wilhelm Vallant, Herrn Silvio Koiser und Herrn DI Helmut Puschnig, sowie viele weitere Mitarbeiter der AVL List GmbH, die sich für fachliche Diskussionen Zeit nahmen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn DI Roland Hulla und Herrn DI Herwig Rieger, die sich beide viel Zeit genommen haben mich zu betreuen und meine Fragen zu beantworten.

Am meisten danke ich meinem Herrn Jesus Christus, für seine tägliche Unterstützung und Treue mir gegenüber. Was ich habe und was ich bin, ist durch ihn.

Reinhard Brugger

Zusammenfassung

Das Thema Hybrid ist ein zukunftsweisendes Thema in der Automobilindustrie. Es ist ein kräftiger Schritt in Richtung Vollelektrifizierung des Antriebsstranges.

Die AVL List GmbH baut derzeit ihre Kompetenz im Bereich des hybridisierten Antriebsstranges aus. Aus diesem Hintergrund heraus ist diese Arbeit entstanden. Sie hat den Zweck, Prüfaufbauten und Prüfprozeduren für ein Parallelhybridmodul darzustellen und zu beschreiben.

Im ersten Teil werden allgemeine Informationen über die Hybridtechnologie, deren Beweggründe und Ausprägungen dargebracht. Im zweiten Teil findet eine Analyse des P2 Hybridmoduls statt, hinsichtlich der Komponenten, Belastungen und Funktionen. Auf dieser Grundlage werden im Weiteren Prüfaufbauten und Prüfprozeduren beschrieben, die zur Verifizierung der angeführten Funktionen dienen. Im letzten Teil wird das Thema Betriebsfestigkeit angeschnitten und der Weg von der Last zum Dauerlaufprogramm grob beschrieben.

Abstract

The hybrid technology is a topic that will grow in the future of automobile industry. It is a big step forward in the direction of the full electrified drive train.

The AVL List GmbH is constantly growing in its expertise concerning the field of hybrid drive train technique. The purpose of this work is to illustrate test-rigs and test procedures for a P2 Hybrid Module.

The first part of the work gives common information about hybrid drive trains and about the motivations behind this technology. The second part is an analysis of a P2 Hybrid Module, regarding its components, loadings and functions. Based on this analysis, test-rigs and test procedures are described to verify these functions. The third part deals with the topic of fatigue strength and gives a rough insight into the procedure from the load to the endurance test.

Eidesstattliche Erklärung

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 entnommen 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 indicated to the present master's thesis.

Graz, am 15. November 2014

Datum/ Date

.....

Unterschrift/ Signature

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Danksagung..... | I |
| Zusammenfassung..... | II |
| Eidesstattliche Erklärung | III |
| Inhaltsverzeichnis | IV |
| 1 Einleitung..... | 1 |
| 2 Geschichte | 2 |
| 3 Motivationen für den Hybridantrieb..... | 3 |
| 3.1 Hintergründe..... | 4 |
| 3.1.1 Rohstoffverknappung, Umwelt und Klima..... | 4 |
| 3.1.2 Gesetzgebung..... | 5 |
| 3.2 Sinnhaftigkeit der Hybridisierung..... | 7 |
| 3.2.1 Fahrverhalten des Kunden | 7 |
| 3.2.2 Eigenschaften der VKM und des E-Motors..... | 8 |
| 3.2.3 “Well to Wheel” und “Tank to Wheel” Analyse | 10 |
| 3.2.4 Downsizing | 11 |
| 4 Verschiede Hybridkonzepte | 12 |
| 4.1 Serieller Hybrid | 12 |
| 4.2 Leistungsverzweigter Hybrid | 13 |
| 4.3 Parallel-Hybrid | 15 |
| 4.3.1 P1 | 15 |
| 4.3.2 P2 | 16 |
| 4.3.3 P3 | 17 |
| 4.3.4 P4 | 18 |
| 5 Analyse des P2 Hybrid Modul..... | 19 |
| 5.1 Funktionen..... | 19 |
| 5.1.1 Rekuperation | 19 |
| 5.1.2 Start/Stopp..... | 20 |
| 5.1.3 Lastpunktverschiebung | 21 |
| 5.1.4 Rein elektrisches Fahren | 22 |
| 5.1.5 Start der VKM während der Fahrt | 23 |
| 5.1.6 Boost | 23 |
| 5.2 Baugruppen und Komponenten des P2 | 24 |
| 5.2.1 E-Motor..... | 24 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.2.2 | Kupplung..... | 26 |
| 5.2.3 | Hydraulik | 26 |
| 5.3 | Belastungen | 28 |
| 5.3.1 | Mechanische Belastung | 28 |
| 5.3.2 | Thermische Belastung..... | 31 |
| 5.3.3 | Chemische Belastung..... | 32 |
| 5.4 | Interaktion des P2 Moduls mit seiner Umgebung..... | 33 |
| 5.4.1 | Mechanische Energie | 34 |
| 5.4.2 | Thermische Energie | 34 |
| 5.4.3 | Elektrische Energie | 35 |
| 5.4.4 | Fluidtransport..... | 35 |
| 5.4.5 | Information/Signalverbindungen | 36 |
| 6 | Prüfmethodik | 37 |
| 6.1 | Allgemeines zur Funktion | 37 |
| 6.2 | Verifikation und Validierung | 37 |
| 7 | Die Verifikation..... | 40 |
| 7.1 | Das Funktionsanalyseblatt | 41 |
| 7.1.1 | Abgrenzung der Systembetrachtung..... | 41 |
| 7.1.2 | Abgrenzung der Funktionsanforderungen | 42 |
| 7.1.3 | Zielwerte | 43 |
| 7.1.4 | Aufbau und Logik..... | 43 |
| 7.1.5 | Aussage..... | 45 |
| 7.1.6 | Blätter..... | 45 |
| 7.1.7 | Ergebnis | 52 |
| 7.2 | Prüfaufbau, Steuerung und Prüfprozedur..... | 53 |
| 7.2.1 | A1: Hydraulikaufbauten..... | 53 |
| 7.2.2 | A2: E-Motor Prüfaufbauten für mechanische Umgebungslast..... | 59 |
| 7.2.3 | B1: Kupplung 2 Maschinen Prüfaufbau | 59 |
| 7.2.4 | B2: 1M Schmierungs-Prüfaufbau | 64 |
| 7.2.5 | B3: E-Motor 1M Prüfaufbau..... | 67 |
| 7.2.6 | C: 3-Maschinen Prüfaufbau | 72 |
| 7.2.7 | D: Antriebsstrang..... | 77 |
| 8 | Die Validierung | 81 |
| 8.1 | Prüfaufbauten | 81 |
| 8.2 | Prüfprozedur..... | 82 |

| | | |
|-------|---|----|
| 8.2.1 | Das Anforderungsprofil | 82 |
| 8.2.2 | Belastungsverläufe (Lastdaten)..... | 84 |
| 8.2.3 | Die Klassierung..... | 86 |
| 8.2.4 | Dauerlaufprogramme | 90 |
| 8.3 | Schädigungsrelevante Betriebszustände: Unterschied Getriebe und Hybridmodul.. | 90 |
| 8.4 | Schlussfolgerung | 92 |
| 9 | Abbildungsverzeichnis | 94 |
| 10 | Tabellenverzeichnis | 96 |
| 11 | Literaturverzeichnis | 96 |

1 Einleitung

Der Wunsch des Kunden nach Verbrauchseinsparung, die politische Gesetzgebung und nicht zuletzt die unerwünscht starke Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen, treiben die Elektrifizierung des Automobils voran. Zwischen dem herkömmlichen Antriebskonzept des Autos, der Verbrennungskraftmaschine (VKM) und dem rein elektrischen Antrieb gibt es viele Kombinationen der beiden Antriebe, die man *Hybrid* nennt. *Hybrid* heißt in seiner Grundbedeutung „von zweierlei Art“. In Bezug auf den Antrieb eines Fahrzeugs bedeutet das, dass immer mindestens zwei unterschiedliche Energiewandler und Energiespeichersysteme im Fahrzeug vorhanden sein müssen.¹ Zumeist bezieht es sich auf den gemischten Antrieb eines Fahrzeugs mit Verbrennungskraftmaschine (VKM) und einem oder mehreren Elektromotoren.

Die Elektromotoren ermöglichen neben einer Verbrauchsreduktion oftmals auch temporäres emissionsfreies Fahren. Ebenfalls kann die Fahrdynamik verbessert werden und je nach Aufbau des Hybrid-Triebstranges auch eine temporäre Allradisierung möglich sein.

Generell scheint sich der Aufbau des Parallelhybrides besonders gut für die anstehenden Anforderungen zu eignen. Mit dieser Technologie wird es voraussichtlich gelingen die Vorgaben der derzeitigen Gesetzgebung zu erfüllen und das Kundenbedürfnisses nach weniger Verbrauch zu befriedigen. Im Vergleich zu anderen Hybridkonzepten, die ebenfalls die geforderten Grenzwerte erfüllen, spricht das gute Verhältnis von Kosten zu Nutzen für den Parallelhybrid.

Zwischen der Konstruktion eines Hybridmoduls am PC bis zur Serienreife liegt ein langer Weg. Durch verschiedene Prüfungen muss vorab sichergestellt werden, dass die verwendete Technologie den vielfältigen Beanspruchungen des Realbetriebs standhält. Zu Beginn dieses Prozesses steht die Verifikation aller definierten Funktionen, danach folgt die Validierung, die sich mit der Beurteilung des Systems über seine Lebensdauer unter realen Betriebslasten beschäftigt.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Darstellung von optimierten Prüfprozeduren und Prüfaufbauten eines P2 Hybridmoduls. Der Schwerpunkt liegt auf der Verifikation.

¹ Vgl. (Hofmann, 2010 S. 2)

2 Geschichte

Die Idee, Elektromotoren im Automobil zum Vortrieb zu verwenden, ist nicht neu. Bereits 1900 wurde in Wien ein Elektrofahrzeug gebaut, der Lohner-Porsche, welches erstmals ohne Getriebe und VKM auskam. Das Fahrzeug hatte zwei Radnabenmotoren in den Vorderrädern. Aufgrund der geringen Reichweite von 50 km wurde später noch ein Benzinmotor mit Generator hinzugefügt, um die 410 kg schwere Batterie mit Strom zu versorgen. Das erste serielle Hybridfahrzeug war erfunden und viele andere sollten folgen.

In der Anfangszeit des Automobils waren es eher die Probleme der Regelbarkeit der Verbrennungskraftmaschine (VKM), des Getriebes und der Kupplung die E-Motoren für den Antrieb interessant machten.² Als man diese Probleme in den Griff bekam, verschwanden die E-Motoren wieder aus den konventionellen Fahrzeugen.³ Die Gründe dafür waren der Preisunterschied der Systeme und die unzureichende Versorgung der Bevölkerung mit Strom zu dieser Zeit. Im Gegensatz zu Strom, ließ sich Treibstoff leichter in entlegene Regionen transportieren.

Zudem haben fossile Brennstoffe eine wesentlich höhere Energiedichte, als Batteriespeicher. Die Bleibatterien der damaligen Zeit hatten 10-20 Wh/kg, wohingegen Diesel und Benzin 11000 Wh/kg haben.⁴ Heutige Lithium Ionen Batterien erreichen Energiedichten bis zu 150 Wh/kg.⁵

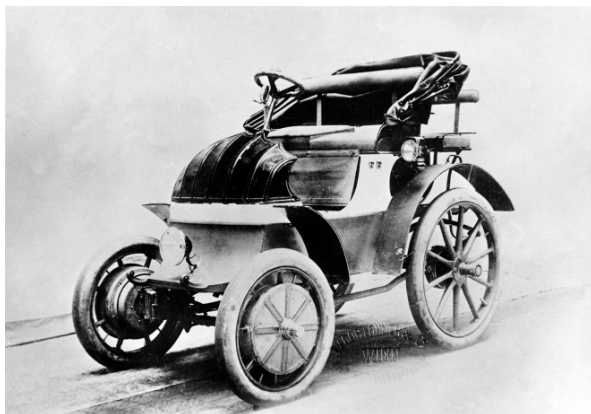


Abbildung 2.1: Lohner Porsche⁶

² Vgl. (Hofmann, 2010 S. 6,11)

³ Vgl. (Reif, 2012 S. 4)

⁴ Vgl. (Rummich, 2012)

⁵ Vgl. (Reif, 2012 S. 12)

⁶ Vgl. (Austria)

In der jüngeren Vergangenheit gewann der Hybridantrieb wieder mehr an Bedeutung. Verschiedene europäische Autohersteller, darunter VW, BMW und AUDI, forschten in diese Richtung. Der Durchbruch am Markt gelang schlussendlich der Firma Toyota mit ihrem *Toyota Prius* im Jahr 1997. Der mittlerweile in dritter Generation verkaufte, leistungsverzweigte Hybrid erfreut sich vor allem in Japan und den USA großer Beliebtheit. Er steht im kumulierten Verkauf der Modelle bei über 3 Mio. Stück weltweit.^{7, 8}

Zurzeit bringen fast alle bekannten Autohersteller Hybrid- oder Elektrofahrzeuge auf den Markt.



Abbildung 2.2: Toyota Prius⁹

3 Motivationen für den Hybridantrieb

Zusätzliche Komponenten und ein komplexerer Aufbau bedeuten immer ein Mehrgewicht und höhere Kosten, deshalb muss ein gewisser Nutzen diesen Aufwand rechtfertigen. Die wesentlichen Motivationen für den Hybridantrieb sind der geringere Verbrauch, die damit verbundene Senkung der Emissionen und die neuen funktionalen Möglichkeiten die ein E-Motor im Antrieb bietet. Auch das grüne Image der Hersteller und die Technologiedemonstration sind weitere Argumente. Dahinter stehen die erhofften Verkaufszahlen und die Erfüllung der politischen Gesetzgebung.¹⁰

⁷ Vgl. Hybridfahrzeuge, 2010, S. 6-11

⁸ Vgl. (Toyota, o.J.)

⁹ (Namo-Motors)

¹⁰ Vgl. (Hofmann, 2010 S. 55)

3.1 Hintergründe

3.1.1 Rohstoffverknappung, Umwelt und Klima

Der geringere Verbrauch von Diesel und Benzin ist höchst schlagkräftiges Argument angesichts der aktuellen Diskussion über die Ressourcenknappheit. Diesel und Benzin werden aus Erdöl gewonnen, welches auf lange Sicht nicht ausreichen wird, die Energiebedürfnisse der Welt zu decken. Der Verbrauch von fossilen Energieträgern stieg seit Mitte des 20. Jahrhunderts stark an und steigt unaufhörlich weiter. Nicht zuletzt durch große, aufstrebende Nationen, allen voran China, die derzeit noch pro Kopf einen Bruchteil der Energie westlicher Länder verbrauchen, wird der Verbrauch weiter in die Höhe getrieben.¹¹ Der einfache Zusammenhang von Angebot und Nachfrage macht deutlich, dass durch eine Verknappung der fossilen Energieträger ihr Preis dementsprechend ansteigen wird.

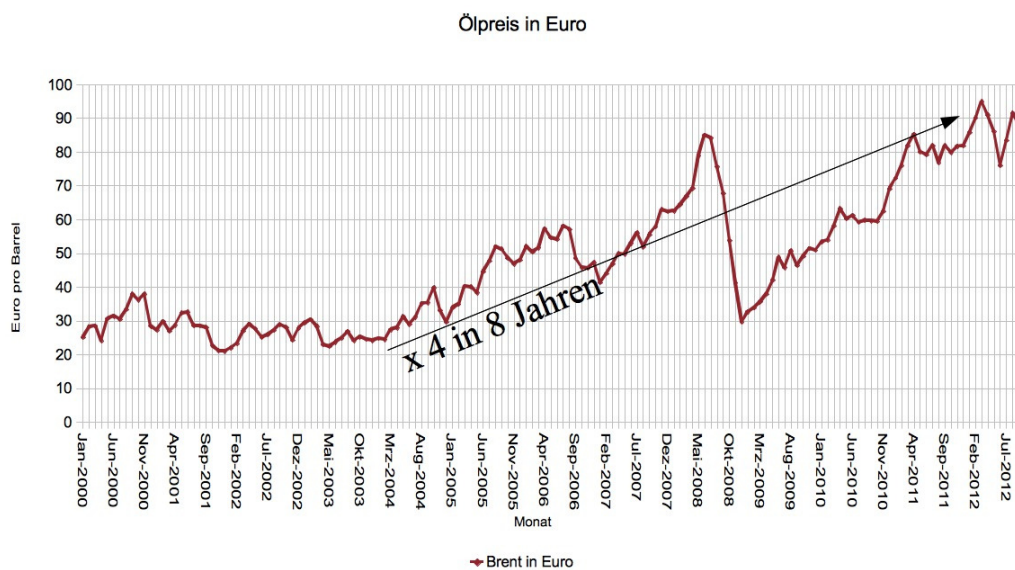


Abbildung 3.1: Preis in Euro pro Barrel Brent-Öl¹²

Das bedeutet, dass der Verbrauch eines Fahrzeugs immer mehr zu einem verkaufsentscheidenden Argument wird. Nicht nur wegen der steigenden Spritkosten werden sparsamere Autos bevorzugt, auch das Bewusstsein bezüglich der Umwelt und des Klimawandels wächst in unserer Gesellschaft. Dass der CO₂ Ausstoß durch Verbrennung fossiler Brennstoffe sich

¹¹ Vgl. (Rost, 2012)

¹² (Rost, 2012)

negativ auf den Treibhauseffekt auswirkt, gilt als erwiesen. Der Transportsektor ist für gut ein Viertel der CO₂ Emissionen in der EU verantwortlich.¹³

3.1.2 Gesetzgebung

Die politische Gesetzgebung nimmt massiv Einfluss auf die technische Entwicklung. Durch immer niedrigere erlaubte Schadstoff-Emissionswerte sieht die Autoindustrie sich gezwungen, in neue Technologien zu investieren.¹⁴

Durch die innermotorische Optimierung und die außermotorischen Zusatzkomponenten, wie Katalysatoren und Partikelfilter, ist es gelungen die Schadstoffemission stark zu reduzieren. In Kalifornien, wo die Abgasgesetzgebung sich aufgrund der schon Mitte der Fünfziger-Jahre auftretenden Probleme in einer weltweiten Vorreiterrolle befindet, ist es gelungen Benzinmotoren unter das SULEV (Super Ultra Low Emission Vehicle) Limit zu optimieren.¹⁵

Tabelle 3.1: Emissionsgrenzwerte für Pkw mit Ottomotor; Angaben in mg/km außer PN (1/km)¹⁶

| Norm | Euro 1 | Euro 2 | Euro 3 | Euro 4 | Euro 5 | Euro 6 |
|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| Typprüfung | ab 1. Jul. 1992 | ab 1. Jan. 1996 | ab 1. Jan. 2000 | ab 1. Jan. 2005 | ab 1. Sep. 2009 | ab 1. Sep. 2014 |
| Erstzulassung | ab 1. Jan. 1993 | ab 1. Jan. 1997 | ab 1. Jan. 2001 | ab 1. Jan. 2006 | ab 1. Jan. 2011 | ab 1. Sep. 2015 |
| CO | 3160 | 2200 | 2300 | 1000 | 1000 | 1000 |
| (HC + NO _x) | 1130 | 500 | | | | |
| HC | | | 200 | 100 | 100 | 100 |
| NO _x | | | 150 | 80 | 60 | 60 |
| PM | | | | | 4,5 | 4,5 |
| PN | -- | -- | -- | -- | -- | 6×10 ¹¹ |

¹³ Vgl. (Hofmann, 2010)

¹⁴ Vgl. (Reif, 2012 S. 5)

¹⁵ Vgl. (Klauer, 2002)

¹⁶ (Wikipedia)

Tabelle 3.2: Emissionsgrenzwerte für Pkw mit Dieselmotor, Angaben in mg/km außer PN (1/km)¹⁷

| Norm | Euro 1 | Euro 2 | Euro 3 | Euro 4 | Euro 5 a | Euro 5 b | Euro 6 |
|-------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Typprüfung | ab 1. Jul. 1992 | ab 1. Jan. 1996 | ab 1. Jan. 2000 | ab 1. Jan. 2005 | ab 1. Sep. 2009 | ab 1. Sep. 2011 | ab 1. Sep. 2014 |
| Erstzulassung | ab 1. Jan. 1993 | ab 1. Jan. 1997 | ab 1. Jan. 2001 | ab 1. Jan. 2006 | ab 1. Jan. 2011 | ab 1. Jan. 2013 | ab 1. Sep. 2015 |
| CO | 3160 | 1000 | 640 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| (HC + NO _x) | 1130 | 700 / 900 | 560 | 300 | 230 | 230 | 170 |
| NO _x | | | 500 | 250 | 180 | 180 | 80 |
| PM | 180 | 80 / 100 | 50 | 25 | 5 | 4,5 | 4,5 |
| PN | -- | -- | -- | -- | -- | 6×10 ¹¹ | 6×10 ¹¹ |

Neben den Schadstoffen Kohlenmonoxid (CO), den Stickstoffoxiden (NO_x), den Kohlenwasserstoffen (HC) sowie der Partikelmasse (PM) und Partikelanzahl (PN) steht CO₂ im Fokus der Gesetzgebung. CO₂ ist ein Produkt der vollständigen Verbrennung und seine Menge ist direkt an den Verbrauch gekoppelt. CO₂ ist kein Schadstoff, da es kein toxisches Gas ist, dennoch beschleunigt es den Treibhauseffekt und unterliegt deshalb Beschränkungen.

Ab 2015 liegt in Europa das Limit bei 130g/km für die Flotte. Das erklärte Ziel ist es, den Flottenverbrauch bis 2020 auf 95g/km zu senken. Der Flottenverbrauch bedeutet den Mittelwert der Emission von allen Fahrzeugen der Flotte, gewichtet nach den tatsächlichen Verkaufszahlen. Schwere Fahrzeugtypen dürfen, gekoppelt an ihr Gewicht, mehr emittieren. Dass nach tatsächlichen Verkaufszahlen abgerechnet wird, macht die Regelung noch herausfordernder, da es somit nicht genug ist, sparsame Autos in seinem Verkaufssortiment zu haben. Diese müssen auch so attraktiv sein, dass nennenswerte Stückzahlen abgesetzt werden um den Flottenverbrauch positiv nach unten zu beeinflussen.

Falls die Werte überschritten werden, müssen die Hersteller hohe Strafabgaben für jedes überschrittene Gramm CO₂ pro verkauftem Fahrzeug bezahlen.^{18,19}

¹⁷ Vgl. (Wikipedia)

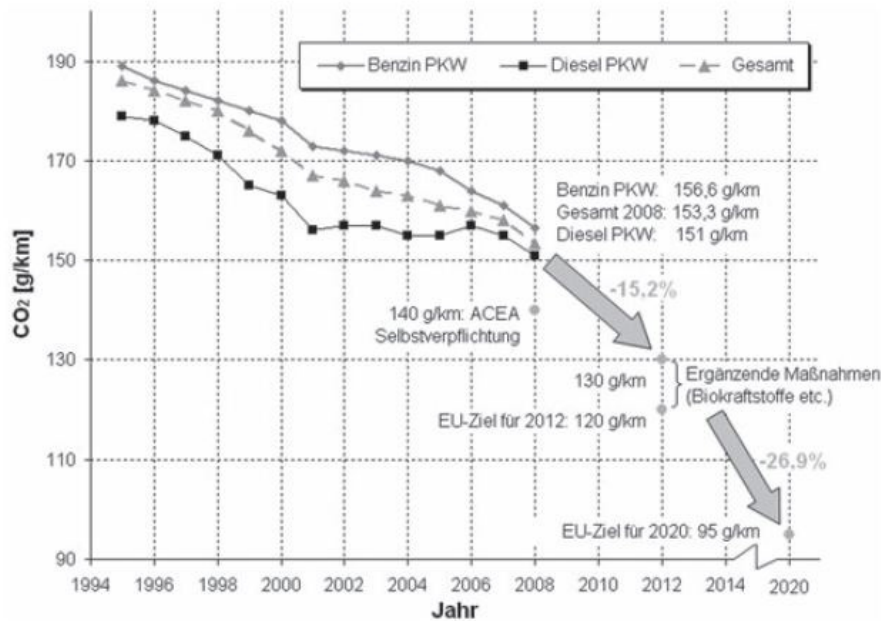


Abbildung 3.2: CO₂-Emissionen der durchschnittlichen Neuwagenflotte²⁰

Es kann also festgehalten werden, dass der Ottomotor vor allem in Bezug auf seinen Verbrauch -sprich CO₂ Ausstoß- und der Dieselmotor im Hinblick auf seine Schadstoffemissionen optimiert werden müssen, um die Gesetzesvorgaben zu erfüllen.²¹

3.2 Sinnhaftigkeit der Hybridisierung

Die Frage die sich nun stellt ist, inwiefern eine Hybridisierung des Automobils Möglichkeiten schafft, den gerade beschriebenen Herausforderungen zu begegnen.

3.2.1 Fahrverhalten des Kunden

Laut einer VCÖ (Verkehrsclub Österreich) Untersuchung liegen zwei Drittel der täglichen Fahrten der Österreicher unter 10 Km. Durchschnittlich liegt die tägliche Distanz bei 36 Km.²²

¹⁸ (Puls, 2013 S. 8)

¹⁹ (Hofmann, 2010 S. 68, 69)

²⁰ (Hofmann, 2010 S. 3)

²¹ Vgl. (Hofmann, 2010 S. 71)

²² Vgl. (VCÖ, 2012)

Kurze Strecken und vor allem Stadtfahrten mit niedriger Geschwindigkeit sind prädestiniert für die Hybridtechnologie. Die VKM wird hier oft weit entfernt von ihrem Bestpunkt betrieben was vor allem beim Benzinmotor, aufgrund der Drosselung, einen schlechten Wirkungsgrad bedeutet und ein erhebliches Einsparungspotential birgt. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass der E-Motor ein kurzzeitiges zusätzliches Antriebsmoment ermöglicht wodurch im transienten Betrieb Beschleunigungen in gewünschter Weise durchgeführt werden können ohne die permanent hohe Leistung einer VKM zu benötigen.²³ Bei Bremsvorgängen wird rekupe-riert und Energie wird wieder in die Batterie gespeichert.²⁴

Zudem kann- je nach Hybridsystem- für kurze Strecken auch rein elektrisch gefahren werden, was die Emissionen und den Spritverbrauch vorübergehend auf null reduziert.

Dies ist vor allem auch für lärm- oder emissionssensible Zonen zentral.²⁵

3.2.2 Eigenschaften der VKM und des E-Motors

Im Hybridbau werden fast ausschließlich Synchronmotoren mit Permanentmagneten verwendet. Diese sind sehr kompakt, haben einen hohen Wirkungsgrad und eine lange Lebensdauer.²⁶

Der E-Motor eignet sich sehr gut für die Kombination mit der VKM. Um dies zu verstehen, muss man sich die Kennfelder der beiden Maschinen vor Augen führen.

Die VKM liefert erst ein Moment ab der Leerlaufdrehzahl. Bei der VKM steigt das Moment weiter mit der Drehzahl an und erreicht ein Momenten-Maximum bevor- bei noch höherer Drehzahl- das Leistungsmaximum erreicht wird. Deshalb ist bei der VKM eine Kupplung notwendig, die die Drehzahl der Maschine mit dem restlichen Antriebsstrang synchronisiert. Zudem wird ein Getriebe mit mehreren Übersetzungsstufen benötigt, das es ermöglicht die VKM über einen großen Geschwindigkeitsbereich im ihr möglichen Drehzahlbereich zu betreiben.

Im Gegensatz dazu stellt der E-Motor schon ab der Drehzahl *null* sein volles Moment zur Verfügung. Der E-Motor kann motorisch wie generatorisch, sowie in beide Richtungen (Vier Quadranten Betrieb) betrieben werden. Das heißt, er kann mechanische oder elektrische

²³ Vgl. (Reif, 2012 S. 3)

²⁴ Vgl. (Reif, 2012 S. 5)

²⁵ Vgl. (Hofmann, 2010 S. 89)

²⁶ Vgl. (Hofmann, 2010 S. 122)

Energie erzeugen. Beim E-Motor fällt das Moment, nach einer Moment-konstanten Phase, bei steigender Drehzahl wieder ab. Nach dem Moment-konstanten Bereich folgt der Leistungs-konstante Bereich oder Feldschwächebereich, in dem das Moment proportional zur Drehzahl abnimmt. Der E-Motor kann über seine Nennleistung hinaus belastet werden. Für kurze Zeit kann bis zum 2,5-Fachen der Nennleistung generiert werden.²⁷ Die Überlastfähigkeit wird zeitlich durch die Überhitzung des Motors oder des Umrichters begrenzt.²⁸

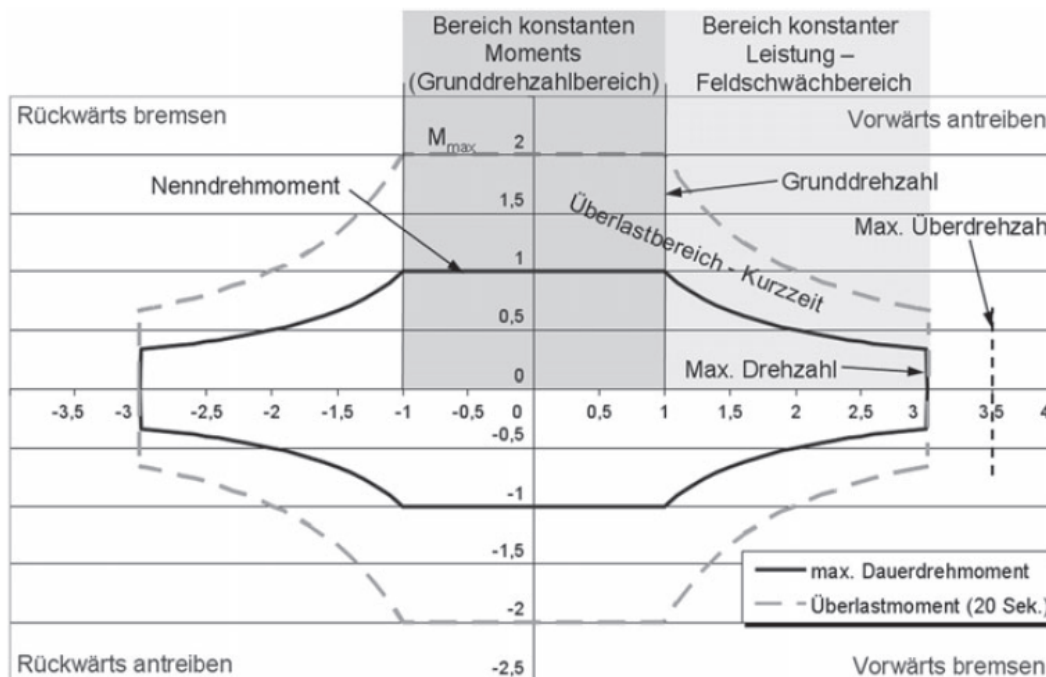


Abbildung 3.3: Betriebsmöglichkeiten E-Motor²⁹

Kombiniert man nun VKM und E-Motor, sodass sie gemeinsam das Fahrzeug antreiben, macht man sich die unterschiedlichen Eigenschaften der beiden Antriebe zu Nutze. Der E-Motor unterstützt den Verbrenner in den Bereichen in denen er nicht optimal betrieben werden kann.³⁰ Entsprechend vorheriger Erklärung wäre dies vor allem im Teillastbereich. Bei schneller Fahrt und hohen Gängen wird die VKM nahe ihrer Vollastlinie betrieben und damit in einem guten Wirkungsgradbereich. Der E-Motor wird in dieser Situation nicht gebraucht.

²⁷ Vgl. (Hofmann, 2010 S. 115,116)

²⁸ Vgl. (Wikipedia, 2014)

²⁹ (Hofmann, 2010 S. 116)

³⁰ Vgl. (Hofmann, 2010 S. 101)

Im Teillastbereich hat die VKM einen erhöhten spezifischen Verbrauch. Wie man aus dem Verbrauchskennfeld erkennen kann, wird die VKM mit einem schlechten Wirkungsgrad betrieben, wenn eine hohe Drehmomentreserve vorhanden ist, also der Abstand vom Betriebspunkt zur Vollastlinie groß ist. Der indizierte Mitteldruck –der direkt mit dem Moment zusammenhängt- ist dort klein und somit wiegt der Reibmitteldruck im Verhältnis stärker. Der Benzin-Saugmotor hat zudem das Problem der hohen Ladungswechselverluste durch die Drosselung im Teillastbetrieb, was eine weitere Verschlechterung bewirkt.³¹

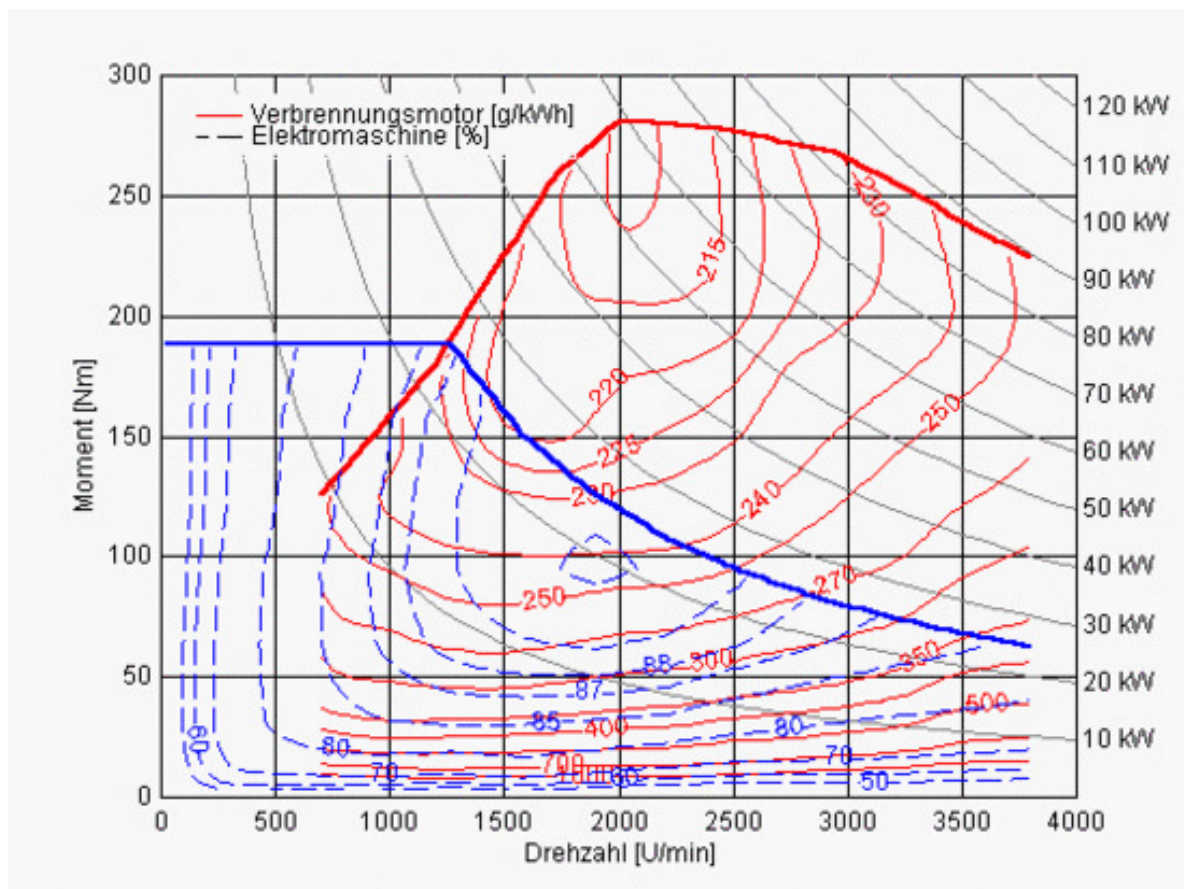


Abbildung 3.4: Überlagerung von Elektromotor Wirkungsgrad- und Verbrennungsmotor Verbrauchskennfeld³²

3.2.3 “Well to Wheel” und “Tank to Wheel” Analyse

Die Begriffe „Well to Wheel“ (WTW) und „Tank to Wheel“ (TTW) beziehen sich auf die unterschiedliche Ziehung der Systemgrenzen bei der Energie- und Schadstoffemissionsanalyse. Bei WTW wird der gesamte Prozess von der Gewinnung der Energie über den Transport,

³¹ Vgl. (Merker, 2014 S. 36)

³² Vgl. (Prof. Wallentowitz, 1999)

die Lagerung und der Umsetzung im Fahrzeug beurteilt. Bei der TTW Analyse wird die Systemgrenze enger gezogen und nur die Effizienz des Energiewandels und Speicherns im Fahrzeug beurteilt.³³

Wenn man also die Systemgrenze um das Fahrzeug zieht, hat ein Elektrofahrzeug keine Emissionen.³⁴

Strom ist allerdings neben mechanischer Arbeit die höchste Form der Energie, da er reine Exergie ist, und kann niemals direkt aus der Erde gewonnen werden. Strom muss immer aus Primärenergieträgern wie fossiler, Sonnen-, Wasser-, Wind-, Atom- oder Biomassen-Energie gewandelt werden.

Erdöl kann hingegen direkt aus der Erde gewonnen werden und nach dem Raffinerie Prozess steht Benzin und Diesel zur Verfügung. Die Erzeugung von Benzin und Diesel hat deshalb einen wesentlich höheren Wirkungsgrad- ungefähr 90%- als die Erzeugung von Strom.³⁵

Kurz gesagt, bei Strom ist es wichtig, woher er kommt. Die Emissionen hängen von der Quelle der Ursprungsenergie und von Sauberkeit der Aufbereitung ab.

Wenn ein Fahrzeug mit Strom betrieben wird, der aus einem Kohlekraftwerk kommt, mit einem Wirkungsgrad um die 30%, ohne Rauchgasreinigung, dann ist es sehr fraglich ob- über den gesamten Prozess betrachtet- tatsächlich weniger Schadstoff und CO₂ Emissionen auftreten. In dieser Arbeit wird rein von einer „Tank to Wheel“ Analyse ausgegangen.

3.2.4 Downsizing

Eine direkte Folge aus dem zusätzlichen Leistungsgewinn des E-Motors ist die Möglichkeit die VKM kleiner zu dimensionieren. Bei parallelen- und leistungsverzweigten- Hybridsystemen können die Leistungen beider Energiewandler addiert werden, sodass nur insgesamt die erwünschte Leistung erreicht werden muss. Eine kleinere VKM bedeutet weniger Verbrauch und oft auch automatische Lastpunktoptimierung. Diese Maßnahme birgt das größte Sparpotenzial.³⁶

³³ Vgl. (Hussein, 2011)

³⁴ Vgl. (Merker, 2014 S. 217)

³⁵ Vgl. (Klemm, et al., 2008 S. 7)

³⁶ Vgl. (Hofmann, 2010 S. 87)

4 Verschiede Hybridkonzepte

Es gibt eine Fülle verschiedener Hybridkonzepte mit spezifischen Eigenschaften, die für bestimmte Zielsetzungen und Rahmenbedingungen eine gewisse Eignung aufweisen.

Grundsätzlich sei hier die Gliederung nach dem Aufbau erwähnt nämlich in

- serielle Hybride
- parallele Hybride
- und leistungsverzweigte Hybride

Sowie die Gliederung nach dem Grad der Elektrifizierung, unterteilt in

- Microhybrid
- Mildhybrid
- und Vollhybrid.

Die Gliederung nach dem Grad der Elektrifizierung sagt nur bedingt etwas über die Topologie aus, hauptsächlich wird hierbei nach Leistungsdaten der E-Motoren klassifiziert. Der Vollhybrid ist immer ein Fahrzeug mit dem rein elektrisch gefahren werden kann. Der Vollhybrid kann noch weiter klassifiziert werden, je nach E-Motor, VKM und Batteriegröße. Je nach Konzept kann oder muss das Fahrzeug nach einer gewissen Zeit auch an das Stromnetz angeschlossen werden.³⁷

4.1 Serieller Hybrid

Das Kennzeichen des seriellen Hybrids ist, dass keine mechanische Verbindung von der VKM zu den Rädern vorhanden ist. Die VKM wird hier als kleines Kraftwerk verwendet, das die elektrische Maschine A antreibt. Diese speist Strom in die Batterie die wiederum Strom an elektrische Maschine B abgibt, die nun die Räder antreibt. Bei idealer Betriebsweise wird wenig Strom in die Batterie gespeichert weil die elektrische Maschine B direkt angetrieben wird. Die Vorteile des Seriellen Hybrids sind, dass die VKM stationär und in ihrem Bestpunkt betrieben werden kann. Zudem bestehen größere Freiheiten bei der Anordnung der Komponenten im Fahrzeug. Es sind auch eine Reihe verschiedener Konzepte darstellbar, zum Beispiel Allrad durch Radnabenantrieb und Vorder- oder Hinterachsenantrieb.

³⁷ Vgl. (Hofmann, 2010 S. 16-24)

Aufgrund der Charakteristik des E-Motors ist es möglich, das herkömmliche Getriebe einzusparen. Es kann durch ein sehr vereinfachtes oder gar kein Getriebe ersetzt werden.

Nachteilig jedoch ist, dass alle drei Energiewandler auf die maximale Leistung ausgelegt sein müssen, da keine Leistungsaddition stattfindet. Die Folgen davon sind mehr Gewicht und Kosten. Die lange Wirkungsgradkette der Energiewandlungen ergeben Verluste, außerdem müssen die für die Maximalgeschwindigkeit ausgelegten Motoren im Stadtbetrieb oft im starken Teillastbetrieb gefahren werden.³⁸ Ebenfalls kann für den Kunden das ungewöhnliche Fahrzeuggeräusch befremdend sein. Dies ist z.B. auch bei Stufenlosgetrieben (CVT- continuously variable transmission) das Problem, da kein gewohnter Zusammenhang zwischen Drehzahl und Fahrgeschwindigkeit für den Fahrer besteht.³⁹

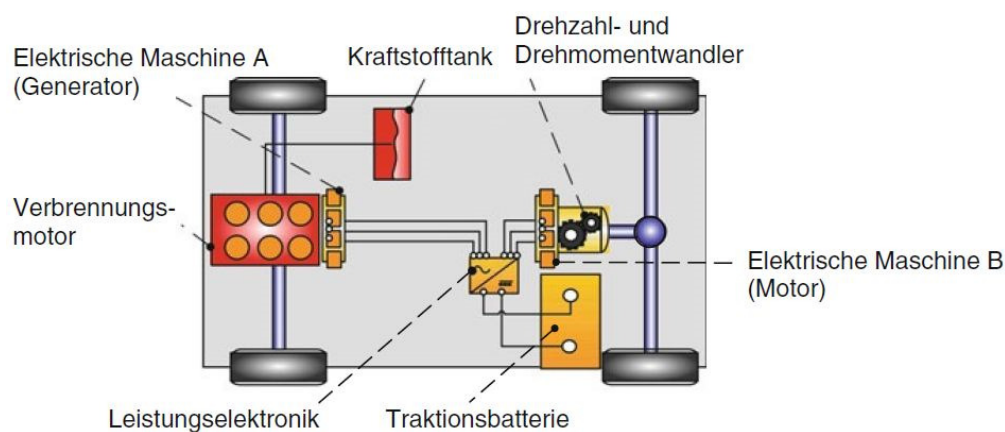


Abbildung 4.1: Serieller Hybrid⁴⁰

4.2 Leistungsverzweigter Hybrid

Der leistungsverzweigte Hybrid ist dadurch gekennzeichnet, dass ein Teil der Leistung über den mechanischen Pfad und der andere Teil über den elektrischen Pfad geleitet werden. Die Vorteile eines parallelen und eines seriellen Hybrides sollen vereinigt werden. Getrennt und zusammengeführt wird die Leistung mit Hilfe von einem oder mehreren Planetensätzen, zwei E-Motoren und einer Batterie. Bei dem Konzept des ersten Toyota Prius zum Beispiel treibt die VKM den Steg des Planetensatzes an, auf der Sonne sitzt die elektrische Maschine A, die die Batterie speist. Am Hohlrad befindet sich die elektrische Maschine B. Je nach Be-

³⁸ Vgl. (Hofmann, 2010 S. 18)

³⁹ Vgl. (Fischer, 2012 S. 88, 272)

⁴⁰ (Reif, 2012 S. 28)

darf wird von der elektrischen Maschine A durch Drehzahlsubtraktion Leistung abgezweigt, die in der Batterie gespeichert oder der elektrischen Maschine B durch Drehzahladdition hinzugefügt. Ein stufenloser Antrieb ist somit ohne Stufenlosgetriebe (CVT) möglich.

Allerdings besitzt der elektrische Zweig im Vergleich zum mechanischen einen schlechten Wirkungsgrad. Bei einem einzigen Planetensatz ist der Bereich in dem der Gesamtwirkungsgrad gewünscht hoch ist, also über 90%, eher klein. Beim maximalen Wirkungsgrad steht die elektrische Maschine A, dies bedeutet eine Übersetzung von kleiner 1 für die VKM zu den Rädern. Nur im Umkreis dieses Übersetzungsverhältnisses ist der Wirkungsgrad gewünscht hoch, womit viele Betriebspunkte nicht zufriedenstellend abbildbar sind.⁴¹

Um über einen breiteren Bereich gute Wirkungsgrade zu erzielen, werden komplexere Getriebe eingesetzt, bei denen elektrischen Maschinen in verschiedener Weise eingebaut sind.

Es kommt zum Beispiel zur Kombination der Leistungsverzweigung mit einem Parallelsystem. Der direkte Durchtrieb zu den Rädern soll erhalten bleiben. Über mehrere Planetensätze, Kupplungen und Bremsen werden verschiedene direkte Gangstufen ermöglicht. Durch die E-Motoren wird eine stufenlose Variation der Drehzahl innerhalb dieser Gänge ermöglicht, aber auch rein elektrisches Fahren und alle anderen Funktionen.

Es sind jedoch, aufgrund von Gewichts-, Platz- und Kostengründen, nicht alle möglichen technischen Lösungen sinnvoll.^{42, 43}

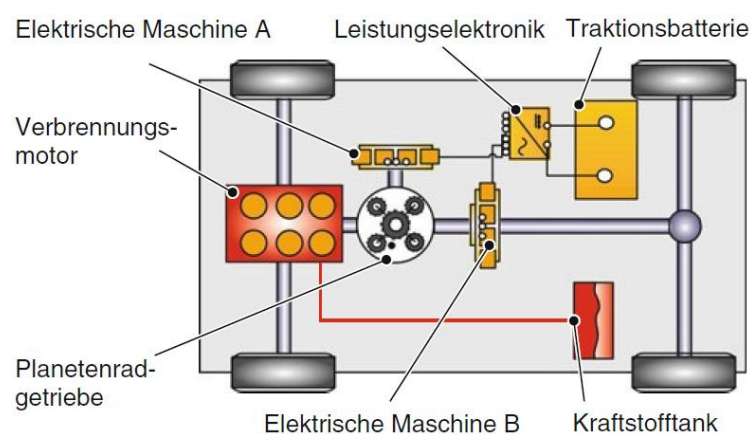


Abbildung 4.2: leistungsverzweigter Hybrid⁴⁴

⁴¹ Vgl. (Hofmann, 2010 S. 27, 31)

⁴² Vgl. (Fischer, 2012 S. 273,282-292)

⁴³ Vgl. (Hofmann, 2010 S. 33, 34)

⁴⁴ (Reif, 2012 S. 43)

4.3 Parallel-Hybrid

Beim Parallelhybrid gibt es, im Gegensatz zum seriellen Hybrid, einen direkten mechanischen Durchtrieb von der VKM zu den Rädern. Zusätzlich zur VKM befinden sich nun zu meist ein oder manchmal mehrere E-Motoren im Antriebsstrang, die parallel zur VKM agieren. Das bedeutet, dass der elektrische Antrieb nach Belieben zu- und abgeschaltet werden kann, um die VKM in angestrebter Weise zu unterstützen. Das Drehmoment wird addiert. Der E-Motor kann auch als Generator zur Rekuperation betrieben werden. Der große Vorteil des Parallelhybrides ist, dass viele Teile des herkömmlichen Aufbaus übernommen werden können. Es ist daher mechanisch ein kleinerer Aufwand im Vergleich zum seriellen Aufbau zu betreiben. Allerdings ist die Regelung durchaus aufwendig. Dadurch, dass VKM und E-Motor auf einem Antriebsstrang sitzen, wird die Leistung überlagert. Dies muss zu jeder Zeit so geschehen, dass die Insassen des Autos kein unangenehmes Rucken oder ähnliches zu spüren bekommen. Der Parallelhybrid wird in vier unterschiedliche Konzepte unterteilt. Der Buchstabe P steht für parallel, die Zahl bezeichnet den Ort des E-Motors im Antriebsstrang.⁴⁵

4.3.1 P1

Der P1 Hybrid wird immer als Microhybrid oder Mildhybrid ausgeführt. Der E-Motor befindet sich entweder an der Seite der VKM als Riemen-Starter-Generator (RSG) oder er sitzt am Kurbelwellenausgang. Es gibt keine Trennung zwischen E-Motor und VKM. Die derzeit übliche elektrische Leistung liegt im Bereich von bis zu 20 kW. Die Start/Stop Funktion ist gut realisierbar und auch die Lastpunktverschiebung ist möglich. Die Rekuperation ist nur bedingt sinnvoll, da durch das Schleppmoment des Motors nicht das volle Potential ausschöpfbar ist. Aus diesem Grund ist auch das rein elektrische Fahren nicht sinnvoll.

Der ursprüngliche Aufbau des Fahrzeugs kann weitgehend beibehalten werden. Es wird versucht, den E-Motor ohne aufwendige Änderung zu integrieren.⁴⁶

⁴⁵ Vgl. (Reif, 2012 S. 31)

⁴⁶ Vgl. (Reif, 2012 S. 34)

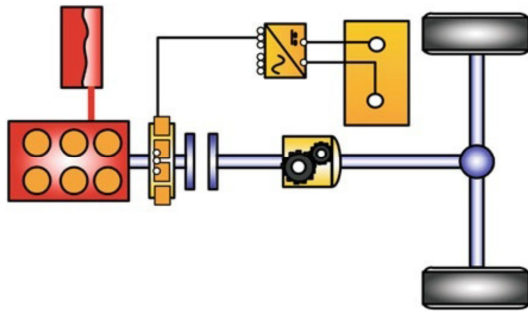


Abbildung 4.3: P1 Hybrid⁴⁷

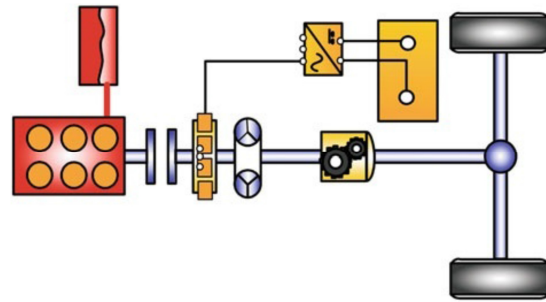


Abbildung 4.4: P2 Hybrid⁴⁸

4.3.2 P2

Mit dem P2 ist im Vergleich zum P1 voll elektrisches Fahren möglich. Damit ist der P2 ein Vollhybrid. Die E-Motor Leistung ist allerdings eher gering und liegt bei maximal 50 kW. Eine Kupplung zwischen VKM und E-Motor ermöglicht das Aus- und Einkuppeln im Stand und während der Fahrt. Damit kann die Rekuperation und das elektrische Fahren viel besser realisiert werden, weil kein Motorschleppmoment negativ einwirkt.

Die Kupplung zwischen VKM und E-Motor ist entweder als Nass- oder Trockenkupplung ausgeführt und wird oft in den E-Motor integriert. Ein Teil ist mit der Kurbelwelle verbunden der andere Teil mit dem Rotor des E-Motors.

Da manche P2 Konzepte eine zusätzliche Kupplung zwischen E-Motor und Getriebe haben, kann man hier noch eine weitere Unterteilung vornehmen. Wandler bei Stufenautomatgetrieben oder 2 Kupplungen bei Doppelkupplungsgetrieben sind Beispiele dafür. Bei der Variante ohne eine zweite Kupplung kann der Bauraum des Wandlers für den E-Motor verwendet.

Für die Start/Stop Funktion wird ein separater Starter eingebaut. Wenn die Start/Stop Funktion mit nur einem E-Motor realisiert wird, muss - wegen des unterschiedlichen Losbrechmomentes der VKM- die genaue Position der Kurbelwelle bekannt sein. Der E-Motor muss präzise ansteuerbar sein um ein unerwünschtes Ruckeln beim Wegfahren zu vermeiden.⁴⁹

⁴⁷ (Reif, 2012 S. 32)

⁴⁸ (Reif, 2012 S. 32)

⁴⁹ Vgl. (Reif, 2012 S. 34)

4.3.3 P3

Beim P3 befindet sich der E-Motor direkt hinter dem Getriebe oder in der Nähe des Differentials. Ähnlich wie beim P2 liegt die Leistung des E-Motors üblicherweise bei 20-50 kW. Auch hier ist durch eine Kupplung zwischen VKM und Getriebe ein rein elektrisches Fahren gut möglich. Durch die günstige Charakteristik des E-Motors ist es auch kein Problem, dass ihm keine Übersetzungsstufen zur Verfügung stehen. Ebenso kann geboostet und rekuperiert werden. Die Start/Stop Funktion wird allerdings mit einem eigenen Starter ausgeführt. Da der E-Motor hinter dem Getriebe sitzt, müsste er im ersten Gang ein hohes Moment aufbringen um über die Übersetzung genug Moment für den Startvorgang zu liefern. Zudem sinkt der Wirkungsgrad des E-Motors bei sehr niedrigen Drehzahlen ab, was auch die Lastpunktverschiebung in den niedrigen Gängen weniger effektiv macht.

Generell muss der E-Motor für einen größeren Bereich ausgelegt werden, da er über die gesamte Getriebespreizung belastet wird. Befindet sich der E-Motor vor dem Getriebe wie beim P1 und P2, wird die Leistung immer synchron der Drehzahl des Motors abgerufen.

Auch beim P3 ist es ein Vorteil, dass die meisten Teile der konventionellen Baureihe übernommen werden können.⁵⁰

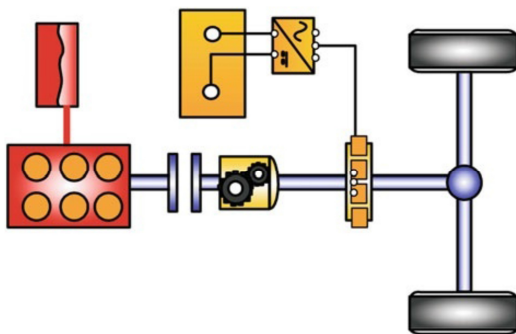


Abbildung 4.5: P3 Hybrid⁵¹

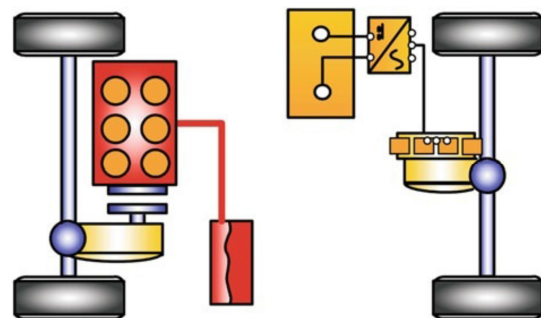


Abbildung 4.6: P4 Hybrid⁵²

⁵⁰ Vgl. (Reif, 2012 S. 35)

⁵¹ (Reif, 2012 S. 32)

⁵² (Reif, 2012 S. 33)

4.3.4 P4

Beim P4 werden beide Achsen angetrieben- eine rein verbrennungsmotorisch, die andere rein elektrisch. Damit wird ein Allradantrieb realisiert. Im Gegensatz zu den anderen Parallelhybrid Systemen spricht man hier nicht von einer Momenten- sondern von einer Zugkraftaddition. Da alle vier Räder gleichzeitig angetrieben werden können, ist mehr Kraft auf die Straße übertragbar. Die Leistung des E-Motors liegt auch bei diesem Konzept im Bereich von 20-50kW. Damit ist die Allradfunktion nicht dauerhaft nutzbar, sondern beschränkt sich eher auf kritische Einzelfälle. Die Start/Stop Funktion muss über einen eigenen Starter ermöglicht werden. Rein elektrisches Fahren sowie Rekuperation und „Boosten“ sind gut möglich. Auch die Lastpunktverschiebung ist möglich, allerdings nur „through the road“. Das bedeutet, dass der E-Motor an der Hinterachse ein Gegenmoment aufbringt, welches die VKM an der Vorderachse spürt und ausgleicht. Dies ist nicht unbedingt die effizienteste Art der Lastpunkterhöhung, allerdings ist sie von ihrer Regelung her relativ simpel.^{53, 54}

| | Serieller Hybrid | Leistungsverzweigter Hybrid | Parallelhybrid | | | |
|------------------------------|--|--|--|---|---|--|
| | | | P1 | P2 | P3 | P4 |
| Konstruktive Merkmale | VKM hat keine direkte Verbindung zu Rädern. In Serie geschaltete VKM mit 2 E-Motoren. | Mischung aus seriell und parallelem Hybrid. Viele verschiedene Konzepte. | E-Motor untrennbar mit VKM verbunden | E-Motor zwischen VKM und Getriebe. Trennung zur VKM möglich | E-Motor hinter Getriebe. | E-Motor(en) auf separater Achse. |
| Funktionen | Start/Stopp Rekuperation Boosten Lastpunktverschiebung E-Fahren für mittlere Reichweiten | Start/Stopp Rekuperation Boosten Lastpunktverschiebung E-Fahren für mittlere Reichweiten | Start/Stopp Boosten Lastpunktverschiebung | Start/Stopp Rekuperation Boosten Lastpunktverschiebung E-Fahren für kurze Reichweiten | Rekuperation Boosten Bedingte Lastpunktverschiebung E-Fahren für kurze Reichweiten | Rekuperation Boosten E-Fahren für kurze Reichweiten |
| Leistung E-Motor(en) | Zumindest so viel wie VKM | Konzeptabhängig | ~2-15 kW | ~20-50 kW | ~20-50 kW | ~ 20-50 kW |
| Vorteile | Emissionsoptimierte Startstrategie Stationärer Betrieb VKM Freie Positionierung | Konzeptabhängig | Geringerer mechanischer Aufwand als andere Konzepte. | Geringerer mechanischer Aufwand als andere Konzepte. | Geringerer mechanischer Aufwand als andere Konzepte. | Geringerer mechanischer Aufwand als andere Konzepte. Allradfunktion möglich. |
| Nachteile | Große Leistungsdimensionierung Wirkungsgrad Psychologischer Faktor | Konzeptabhängig | Keine Trennung von VKM möglich | Komplexität Wechselwirkung Gesamtsystem. Bauraumbedarf an krit. Stellen. | Komplexität Wechselwirkung Gesamtsystem. Bei Stillstand keine Stromerzeugung möglich. | Bei Stillstand keine Stromerzeugung möglich. |

Tabelle 4.1: Übersicht der Hybridkonzepte⁵⁵

⁵³ Vgl. (Hussein, 2011)

⁵⁴ Vgl. (Reif, 2012 S. 36)

⁵⁵ Vgl. (Hofmann, 2010 S. 19)

5 Analyse des P2 Hybrid Modul

Der Beschreibung von Prüfaufbauten und Prüfprozeduren des P2 Hybrid Moduls geht dessen Analyse der Funktionen, des Aufbaus und der Belastungen voraus.

5.1 Funktionen

Die Erweiterung des Antriebsstranges durch das P2 Hybridmodul realisiert eine Reihe neuer Betriebszustände.

5.1.1 Rekuperation

Bei konventionellen Fahrzeugen wird zuerst chemische in mechanische Energie umgewandelt und bei der Verzögerung die kinetische Energie in Wärmeenergie. Diese Energie wird nicht weiter genutzt und an die Umgebung abgegeben.

Da der E-Motor als Motor wie auch als Generator verwendet werden kann, nutzt man ihn bei Hybridfahrzeugen zur Rückgewinnung von Energie bei der Verzögerung des Fahrzeugs. Beim Bremsen in der Ebene oder im Schubetrieb beim bergab Fahren, liegt am Generator ein Gegenmoment zu den Rädern an. Der erzeugte Strom wird in der Batterie gespeichert. Durch diese Funktion lässt sich einfach Energie sparen, die sonst nutzlos verpufft wäre. Allerdings wird die Rekuperationsmöglichkeit durch den maximalen Ladestrom und die maximale Ladekapazität der Batterie beschränkt, zudem können nur gut 50% der theoretisch rekuperierbaren Energie, aufgrund der Wirkungsgrade, wieder an die Räder abgegeben werden. Im Realbetrieb können im Stadtverkehr Einsparungen von ungefähr 5% erzielt werden.⁵⁶

⁵⁶ Vgl. (Hofmann, 2010 S. 85,87)

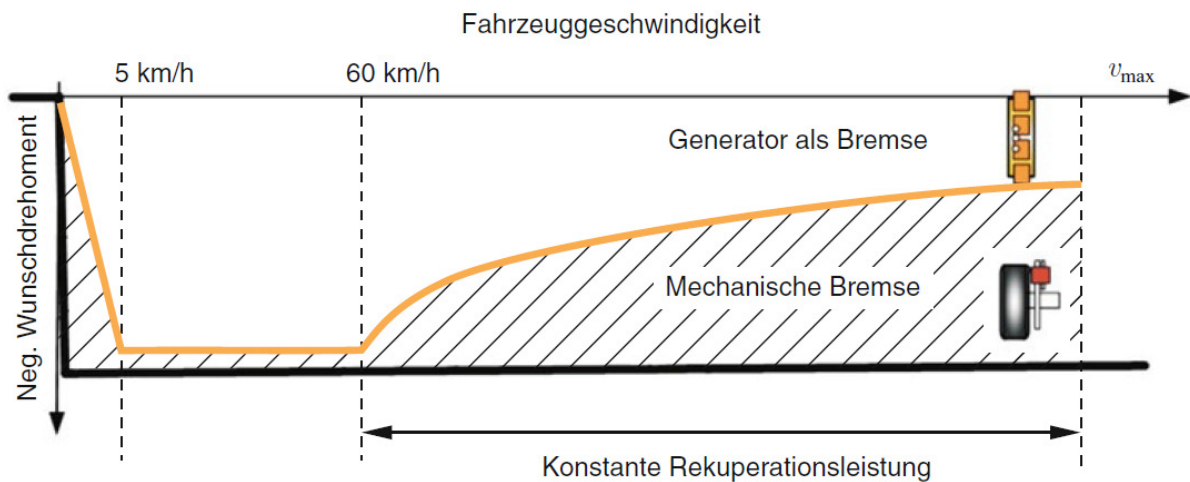


Abbildung 5.1: Bremsvorgang eines Hybridfahrzeugs mit Rekuperation⁵⁷

Die Kurve in der obigen Abbildung spiegelt die Leistungshyperbel des E-Motors wieder, der bei hohen Drehzahlen aufgrund seiner Leistungsgrenze nicht das gesamte negative Wunschsrehmoment aufbringen kann. Im zweiten Bereich kann der Großteil der Bremsenergie durch den Generator geleistet werden. Bei Schritttempo übernimmt wieder sukzessive die mechanische Bremse bis zum Stillstand.⁵⁸

5.1.2 Start/Stopp

Um Treibstoff zu sparen, wird die VKM im Leerlauf abgeschaltet. Wenn der Fahrer an einer Kreuzung zum Stehen kommt, schaltet sich die VKM automatisch ab. Wird das Gaspedal betätigt, schleppt der E-Motor dank seines Moments die VKM rasch wieder zur Leerlaufdrehzahl. Im Stadtverkehr bei dem lange Wartezeiten an Ampeln und in Staus zu erwarten sind, kann dieses System 3-8% Verbrauchsreduktion bewirken.⁵⁹

Starts bei besonders kalten Temperaturen können es notwendig machen, dass zusätzlich zum E-Motor noch ein herkömmlicher 12V-Starter verbaut ist. Dies kann deshalb notwendig sein, da das ZMS bei verlängerter Hochschleppdauer länger in seiner Resonanzdrehzahl betrieben wird und somit das ZMS selbst und in weiterer Folge auch das P2 Modul starken Drehmomentschwingungen ausgesetzt wäre. Durch den Start über den 12 V-Starter kann die Hybridkupplung während des VKM Starts offen bleiben.

⁵⁷ (Reif, 2012 S. 20)

⁵⁸ Vgl. (Reif, 2012 S. 20)

⁵⁹ Vgl. (Hofmann, 2010 S. 76)

5.1.3 Lastpunktverschiebung

Eine weitere Möglichkeit, die durch die Hybridisierung zur Verfügung steht, ist die Lastpunktverschiebung. Bei der Lastpunktverschiebung wird die VKM stärker belastet als für den Vortrieb notwendig, um sie in einem effizienteren Betriebspunkt zu betreiben.

Wie schon zuvor beschrieben macht sich vor allem bei herkömmlichen Benzinmotoren mit Saugrohreinspritzung, bei denen aus den hohen Ladungswechselverlusten schlechte Wirkungsgrade in der Teillast resultieren, eine Erhöhung des Lastpunktes bezahlt. Bei Dieselmotoren die aufgrund ihrer Qualitätsregelung keine Drosselverluste haben, sondern im Teillastbereich grundsätzlich sogar einen höheren indizierten Wirkungsgrad aufweisen, macht eine Lastpunktverschiebung wenig Sinn.

Die VKM hat bei ungefähr drei Viertel der Volllast und niedrigen Drehzahlen ihr spezifisches Verbrauchsminimum. Mit dem überschüssigen Moment wird der E-Motor als Generator betrieben und somit die Batterie geladen. Bei Beschleunigungsvorgängen oder rein elektrischer Fahrt wird die gespeicherte Energie wieder abgerufen.

Das macht nur Sinn wenn diese Energie möglichst verlustarm gespeichert werden kann. Die lange Wirkungsgradkette von Generator, Gleichrichter, Batterie, Wechselrichter und E-Motor bewirkt allerdings eine deutliche Reduktion der theoretisch gewinnbaren Energie. Dennoch können vor allem bei Stadtfahrten Einsparungen entstehen.

Die andere Möglichkeit eine Lastpunktverschiebung herbeizuführen ist die Veränderung der Getriebe- oder Differenzialübersetzung, das so genannte „Downspeeding“. Hier findet nur eine Verschiebung entlang der Leistungshyperbel statt, die aufgebrauchte Leistung für den Betriebspunkt bleibt also gleich. Allerdings ändert sich die Größe der Faktoren, die Last steigt, die Drehzahl sinkt. Dies bedeutet, dass generell die Gänge in einen besseren Wirkungsgradbereich verschoben werden.

Für den Fahrer ergibt sich durch das niedertourige Fahren ein eher träges Ansprechverhalten des Fahrzeugs aufgrund der geringen Drehmomentreserve. Damit diese konstruktive Maßnahme von Nutzen ist, müssen -vor allem beim Ottomotor- Wege gefunden werden bei niedrigen Drehzahlen genügend Drehmoment zur Verfügung zu stellen.⁶⁰ Mit der „Boost“-Funktion des E-Motors kann dies z.B. realisiert werden. Der E-Motor bringt das gewünschte

⁶⁰ Vgl. (Merker, 2014 S. 198)

Zusatzmoment bei Beschleunigungen auf.⁶¹ Ohne diese Maßnahme würde der Fahrer instinktiv in einen niedrigeren Gang schalten und es gäbe keine Treibstoffeinsparungen.

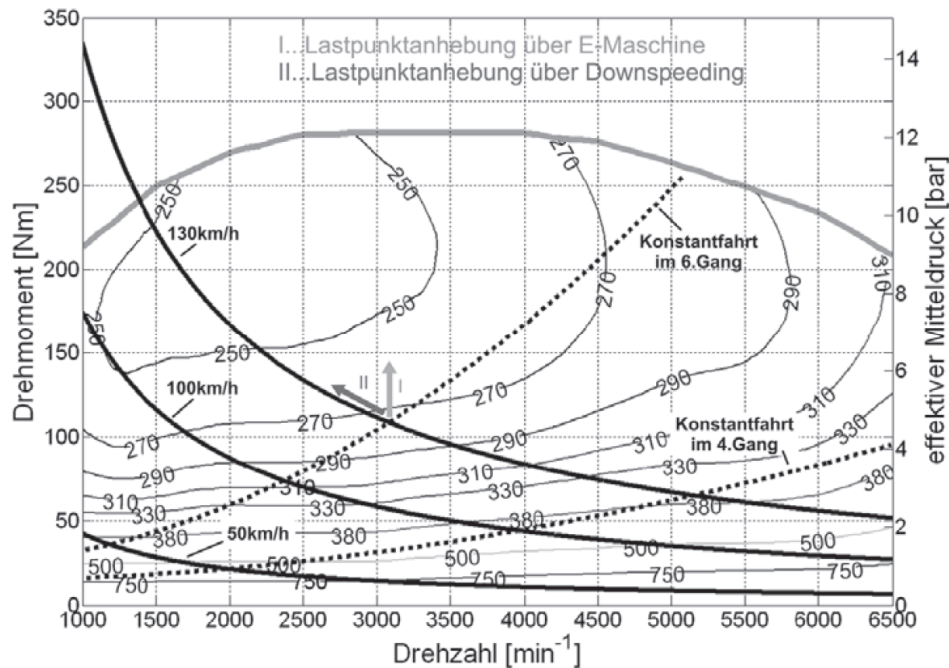


Abbildung 5.2: Verbrauchskennfeld eines Otto Motors mit Saugrohreinspritzung (Verbrauchswerte in [g/kWh])⁶²

5.1.4 Rein elektrisches Fahren

Durch die Abkoppelung und Abschaltung der VKM kann das Fahrzeug auch rein elektrisch betrieben werden. Die Länge der Strecke und die Höchstgeschwindigkeit hängen von der Dimensionierung des E-Motors und der Batterie ab.

Bei dem betrachteten Konzept sind nur wenige km elektrische Fahrt bei geringer Geschwindigkeit vorgesehen, zum Beispiel für Stop and Go Verkehr in der Stadt.

Lokal wird dadurch eine Reduktion an Schadstoffemission bewirkt. Ob sich die Möglichkeit der rein elektrischen Fahrt und einem Drittel der Drehzahl merklich positiv auf den Verbrauch des gesamten realen Fahrkollektivs auswirkt, hängt sehr stark vom Fahrverhalten und von der Strecke ab. Wenn es der Ladezustand (SOC-state of charge) zulässt, so soll grundsätzlich elektrisch angefahren werden. Je nach Lastanforderung, z.B. Steigung oder Be-

⁶¹ Vgl. (Hofmann, 2010 S. 74)

⁶² (Hofmann, 2010 S. 72)

schleunigung, muss aber ab einem gewissen Zeitpunkt die VKM angeworfen werden. Diesen Vorgang nennt man Impulsstart.

5.1.5 Start der VKM während der Fahrt

In Bruchteilen einer Sekunde wird zuerst die Getriebekupplung gezielt im Schlupfzustand betrieben, um weiter ein bestimmtes Moment zu den Rädern zu übertragen. Im zweiten Schritt werden die E-Motordrehzahl und das Moment erhöht. Der dritte Schritt schaltet die Hybridmodulkupplung vom offenen Zustand in den Schlupfzustand. Durch das zusätzlich aufgebaute Moment des E-Motors, wird die VKM hochgeschleppt bis zur Zündung. Die Hybridmodulkupplung kann nicht sofort vollständig geschlossen werden, da dies zu hohe Momentenspitzen für das Zwei-Massen-Schwungrad (ZMS) bedeuten würde. Nachdem der E-Motor und die VKM drehzahlsynchron laufen, schließt sie völlig und danach auch die Getriebekupplung. Die VKM übernimmt die Leistungsversorgung des Antriebsstrangs. Der Fahrer darf diesen Vorgang nicht negativ, durch Ruckeln oder Leistungseinbruch des Fahrzeugs, bemerken.⁶³

5.1.6 Boost

Neben der Reduzierung von Treibstoff ergeben sich auch andere Möglichkeiten der Optimierung. Bei gleichbleibender Dimensionierung der VKM wird durch den E-Motor die verfügbare Leistung erhöht. *Boosten* bedeutet die Unterstützung der VKM durch den E-Motor bei Beschleunigungsvorgängen. Die Momente der beiden Motoren werden addiert und der Fahrer kann auf mehr Leistung und somit auf eine stärkere Beschleunigung zurückgreifen. Ebenso kann bei Getrieben mit Zugkraftunterbrechung, also manuellen und automatischen Schaltgetrieben, diese Unterbrechung durch den E-Motor überbrückt werden.⁶⁴

⁶³ Vgl. (Hofmann, 2010 S. 82)

⁶⁴ Vgl. (Fischer, 2012 S. 276)

5.2 Baugruppen und Komponenten des P2

Ein P2 Modul besteht aus folgenden Baugruppen. Aus dem E-Motor, einer Kupplung, der Hydraulik und Schmierung, dem Gehäuse, den Lagern und den Dichtungen. Die Ausführung dieser Baugruppen kann variieren.

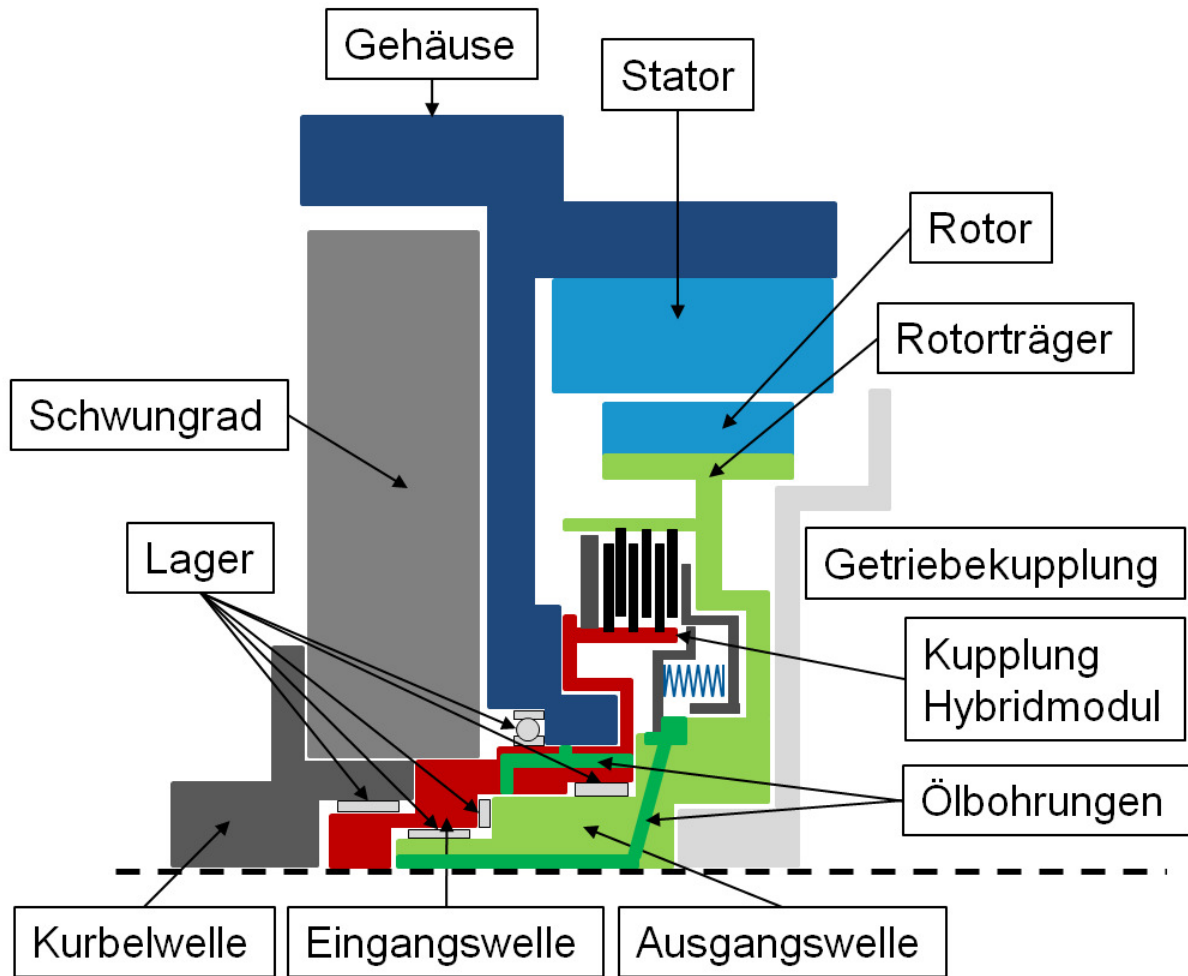


Abbildung 5.3: schematischer Schnitt durch ein P2 Hybridmodul⁶⁵

5.2.1 E-Motor

Es werden permanentmagneterregte Synchronmotoren verbaut. Die Leistung der Motoren liegt im Bereich von 20-50 kW. Der Synchronmotor ist ein Drehfeldmotor der für seinen Betrieb eine 3-phasige Wechselspannung benötigt. Diese Wechselspannung wird mithilfe einer

⁶⁵ (AVL List GmbH, 2014)

Leistungselektronik erzeugt. Die Gleichspannung aus der Batterie wird geteilt und phasenverschoben um 120° - den drei Strängen des Ständers zugeführt. Somit wird ein magnetisches Drehfeld erzeugt, das in Wechselwirkung mit den Permanentmagneten des Läufers steht und diese anzieht. Der Rotor dreht sich mit der gleichen Drehzahl (synchron) wie das Stator-Magnetfeld. Das übertragbare Drehmoment wird durch die Stärke des Stator-Magnetfeldes und durch den Verdrehwinkel zwischen Rotor- und Stator-Magnetfeld geregelt. Deshalb ist für Güte der Drehmomentregelung eine exakte Bestimmung der Rotorlage notwendig. Dies wird mit Hilfe eines Drehwinkelsensors bewerkstelligt. Es gibt aber auch Konzepte die ohne die teuren Sensoren auskommen, sogenannte „sensorlose Regelung“.⁶⁶

Die Permanentmagnete, die aus seltenen Erden gefertigt sind, besitzen sehr hohe Magnetkräfte. Damit sind hohe Wirkungsgrade auch im Teillastbereich erzielbar und eine kompakte Bauweise möglich. Die E-Motoren werden je nach Gebrauch als Außen- oder Innenläufer ausgeführt.

Beim Innenläufer kann der Stator gut mit Wasser gekühlt werden, dies ist ein Vorteil da die Kühlung des E-Motors ein zentrales Thema ist. Die Magnete werden aufgrund der hohen Fliehkräfte vergraben verbaut. Außenläufer sind luftgekühlt, sie bauen kürzer dafür mit größerem Durchmesser.⁶⁷



Abbildung 5.4: Synchronmaschine Innenläufer Bosch⁶⁸



Abbildung 5.5: Synchronmaschine Außenläufer ZF⁶⁹

⁶⁶ Vgl. (Reif, 2012 S. 142)

⁶⁷ Vgl. (Hofmann, 2010 S. 124)

⁶⁸ (Bosch)

⁶⁹ (ZF-Friedrichshafen)

5.2.2 Kupplung

Beim P2 Hybrid kommen, je nach Variante, eine oder zwei Kupplungen zum Einsatz. Die Hybridmodulkupplung (C0) befindet sich zwischen VKM und E-Motor, die Getriebekupplung (C1) zwischen E-Motor und Getriebe. Die C0 wird in jedem Konzept gebraucht um voll elektrisches Fahren zu ermöglichen, die C1 entfällt bei manchen Konzepten.

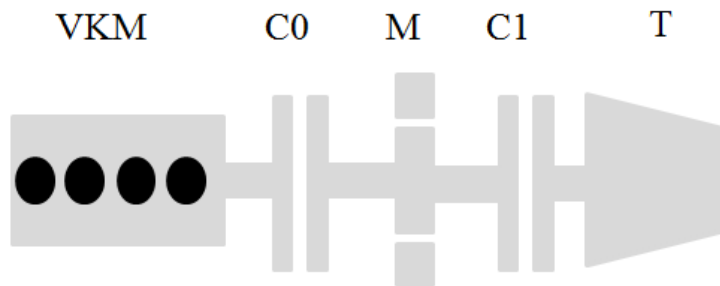


Abbildung 5.6: Schematischer Aufbau- Antriebsstrang

Die Ausführung der Getriebekupplung hängt in erster Linie vom verbauten Getriebe ab. Bei einem Stufenautomaten ist diese Kupplung der Wandler, bei einem Doppelkupplungsgetriebe (DKG) verbergen sich hinter dem Begriff C1 zwei Lamellenkupplungen. Die C0 ist normalerweise als Lamellenkupplung ausgeführt. Es kommen Trocken- sowie Nasskupplungen zum Einsatz.

Die Trockenkupplung kann ein oder mehrlagig ausgeführt sein. Ihr Wirkungsgrad ist höher als der, der Nasskupplung und aufgrund verkleinerter Hydraulik ist sie preislich günstiger.

Die Nasskupplung baut kompakter. Bei hohem Energieeintrag kann sie durch das Öl, das die Wärme abtransportiert, besser gekühlt werden. Ihre Reibwerte sind allerdings aufgrund des Öls grundsätzlich niedriger und im Leerlauf sind Schleppverluste vorhanden.

Ein weiterer Vorteil der Nasskupplung ist ihre geringere Ruppneigung die die Funktion des Mikroschlupfs ermöglicht. Der Mikroschlupf dient neben dem Massenschwungrad zur Entkoppelung des Getriebes von den Drehungleichförmigkeiten der VKM.⁷⁰

5.2.3 Hydraulik

Der Hydraulikkreislauf besteht aus Ölsumpf, Filter, E-Pumpe, Valve Body, Nieder- und Hochdruckkreislauf sowie Ölkühler. Die Funktion der Hydraulik ist die Schmierung des Sys-

⁷⁰ Vgl. (W. Reik, 2004)

tems sowie die Kühlung und Betätigung der Kupplung. Die Pumpe fördert das Öl aus dem Sumpf. Bevor das Öl die Pumpe erreicht, fließt es durch den Filter. Je nach Betriebspunkt wird ein gewisses Volumen gefördert um den gewünschten Druck zu erzeugen. Nach der Pumpe wird der Volumenstrom aufgeteilt in einen Niederdruck und einen Hochdruckkreislauf. Der Niederdruckkreislauf dient zur Schmierung und zum Wärmeabtransport. Durch ein Magnetventil (Solenoid) wird der gewünschte Durchfluss geregelt. Durch gezielte Leckage bei den Dichtungen wird den Lagern Öl zugeführt, das von dort wieder zurück in den Sumpf gelangt. Die Wärmeentwicklung findet hauptsächlich in der Kupplung statt, die mit einigen Litern pro Minute durchströmt wird um die Reibwärme abzutransportieren.

Beim Hochdruckkreislauf wird der Leitungsdruck ebenfalls über ein Magnetventil eingestellt, dieser Druck liegt an der Kupplung an.

Die Pumpe besitzt ein Druckbegrenzungsventil, das den Kreislauf vor Überdruck und damit Schäden bewahrt. Falls es durch Pulsationen zu einem Überdruck kommt, wird dieser über das Überdruckventil direkt nach der Pumpe limitiert und das überschüssige Öl der Pumpe saugseitig wieder zugeführt. Das überschüssige Öl, das auf das hohe Druckniveau gebracht wurde, wird also nicht in den Sumpf geleitet um die Energie nicht zu verschwenden sondern wird im Kreis gepumpt, was aber dennoch einen Druckabfall und eine Temperaturerhöhung bewirkt.⁷¹

⁷¹ Vgl. (Will, et al., 2011 S. 209)

5.3 Belastungen

Die Belastung kann grundsätzlich in mechanische, thermische und chemische Belastung unterteilt werden.

5.3.1 Mechanische Belastung

Die höchsten Momente im Regülarbetrieb muss das Hybridmodul während der Boostphasen und der VKM Vollast übertragen. Während des Boostens findet eine Addition des VKM- und des E-Motormoments statt.

Zusätzlich zu diesen von VKM und E-Motor erzeugten Momenten, treten Momentsprünge durch die Schaltvorgänge im Getriebe auf.

Weitere Belastungen ergeben sich durch die Masse und die Drehung des Rotors. Der Rotor besitzt eine große Masse die bei Beschleunigungen in axiale sowie radiale Richtung zu erhöhten Lagerkräften führt.

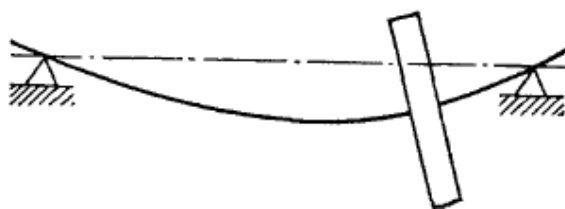


Abbildung 5.7: Auslenkung des Rotors- Seitenansicht⁷²

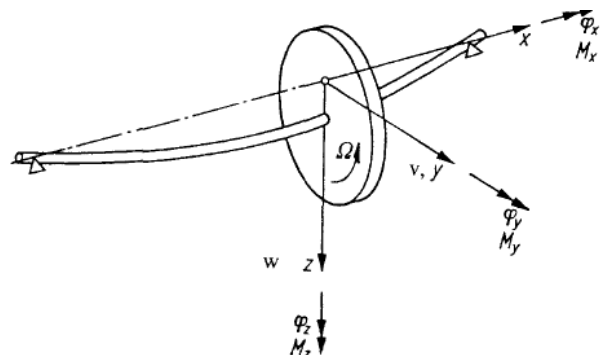


Abbildung 5.8: Auslenkung des Rotors mit Gegenmomenten⁷³

Zusätzlich erzeugt ein Kippen des Rotors um die y- oder z-Achse ein Moment, das sich aus Kippwinkelbeschleunigung und axialem Massenträgheitsmoment zusammensetzt. Dieses tritt im Stillstand wie auch bei Drehung um die x-Achse auf. Bei einer Drehung jedoch tritt noch ein weiteres Moment auf, das entgegen der Auslenkung der Drehachse wirkt. Dieses Phänomen wird gyroskopisches Moment genannt und ist vom Kreisel her bekannt. Gleich wie beim Kreisel bewirkt dieses Moment auch beim Rotor eine weitere Erhöhung des, zur Verschie-

⁷² (R. Gasch, 2006 S. 160)

⁷³ (R. Gasch, 2006 S. 160)

bung der Drehachse benötigten, Moments. Dieses Moment ergibt sich aus der Multiplikation der Drehzahl, dem polaren Massenträgheitsmoment und der Kippwinkelgeschwindigkeit.⁷⁴ Bei Fahrzuständen, bei denen der Rotor abseits seiner Drehung um die x-Achse beschleunigt oder/und seine Drehachse ausgelenkt wird, steigt somit die Belastung auf das System. Bei einem Front-quer Antrieb geschieht dies wenn das Fahrzeug wankt oder giert.

Die VKM regt den Antriebsstrang, neben den Drehschwingungen durch die Verbrennungsstöße an der Kurbelwelle, auch über das Gehäuse an. Während des Betriebes entstehen Momente um die 3 Koordinatenachsen der VKM aus den freien Massekräften. Da das Gehäuse des Hybridmoduls mitbewegt wird, entsteht auch daraus eine Kraft auf den Rotor, die diesen versucht auszulenken. Diese Kraft stützt sich am Hauptlager ab.

Die Drehschwingungen der VKM an der Kurbelwelle werden durch das Zwei-Massen Schwungrad (ZMS) gedämpft.⁷⁵

Der E-Motor schwingt ebenfalls im Betrieb. Dies ergibt sich funktionsbedingt durch die umlaufenden radialen Magnetkräfte im Luftspalt. Je nach Polpaarzahl ergibt sich ein anderes Anregungsbild des Stators und Gehäuses. Diese Kraftwellen können, wenn nicht beherrscht, hohe Schwingungen auslösen die nicht nur hörbar sind, sondern auch den Verschleiß beschleunigen und im schlimmsten Fall Risse und Ständerkurzschlüsse herbeiführen können.⁷⁶

Resonanzen des Stators oder anderer Komponenten im Antriebsstrang die durch Anregung durch die Radialkraftwellen entstehen, müssen soweit wie möglich vermieden werden.

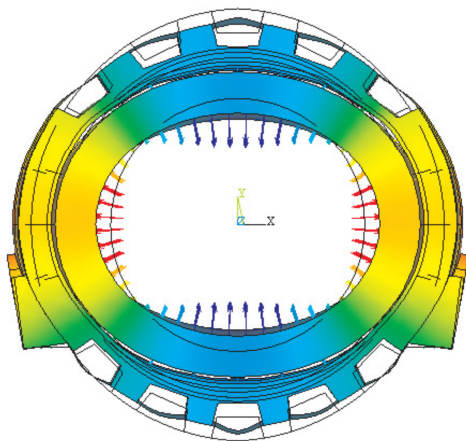


Abbildung 5.9: Elektromagnetische Kräfte in der Bohrung deformieren das Gehäuse⁷⁷

⁷⁴ Vgl. (R. Gasch, 2006 S. 165)

⁷⁵ Vgl. (W. Reik, 2004 S. 19)

⁷⁶ Vgl. (Ebi, 2006 S. 465,467,469)

⁷⁷ (Ebi, 2006 S. 466)

Eine weitere mechanische Belastung, die Reibung, tritt überall dort auf, wo eine Relativbewegung von sich berührenden Teilen stattfindet. Die Reibung steigt mit der Anpresskraft an. Reibung tritt somit im P2 Modul an verschiedenen Stellen auf, z.B. an den Lamellen der Kupplung, in den Lagern und an Dichtungen.

Generell ist noch zu erwähnen, dass aufgrund der vielen Trägheiten und Steifigkeiten im System, die Amplituden und Frequenzen der Momente im System sich vom Eingangsmoment unterscheiden können.

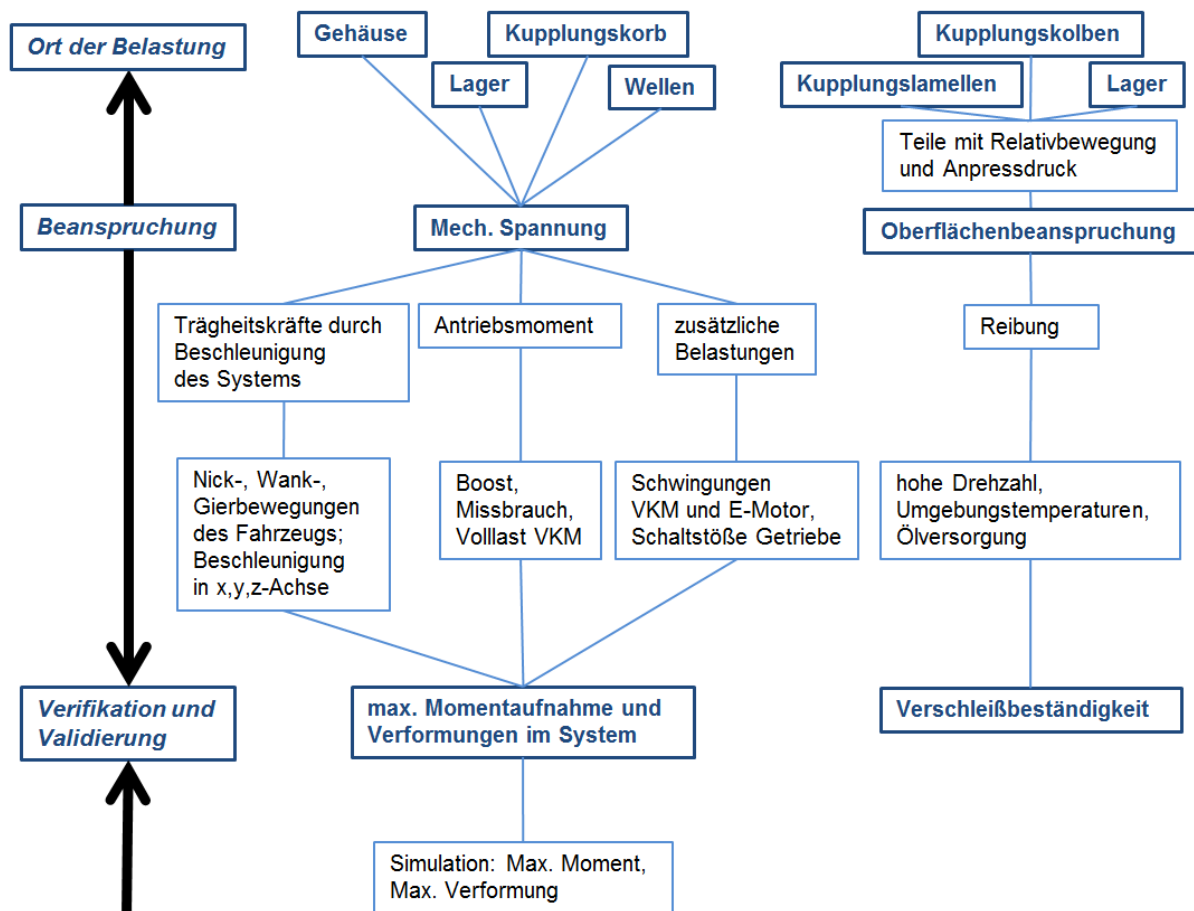


Abbildung 5.10: mechanische Belastung

5.3.2 Thermische Belastung

Die thermische Belastung ergibt sich aus der Summe der Wärmequellen und -senken. Wärmequellen im P2 Modul sind der E-Motor, die Kupplung und die Lager. Die Wärmesenken sind die Kühlung des Stators, die Abgabe der Wärme über das Gehäuse und das Öl, das wiederum selbst im Ölkühler gekühlt wird. Zudem gibt es Wärmefluss über die Systemgrenzen. Vor allem die VKM, aber auch das Getriebe produzieren Wärme, die über das Gehäuse in das P2 Modul gelangt. Die Simulation des gesamten thermischen Verhaltens eines Systems ist sehr komplex, weil sehr schwer vorzuberechnen ist, wann tatsächlich wo wie viel Wärme vorhanden ist. Hier ist man auf Tests und Messungen angewiesen.

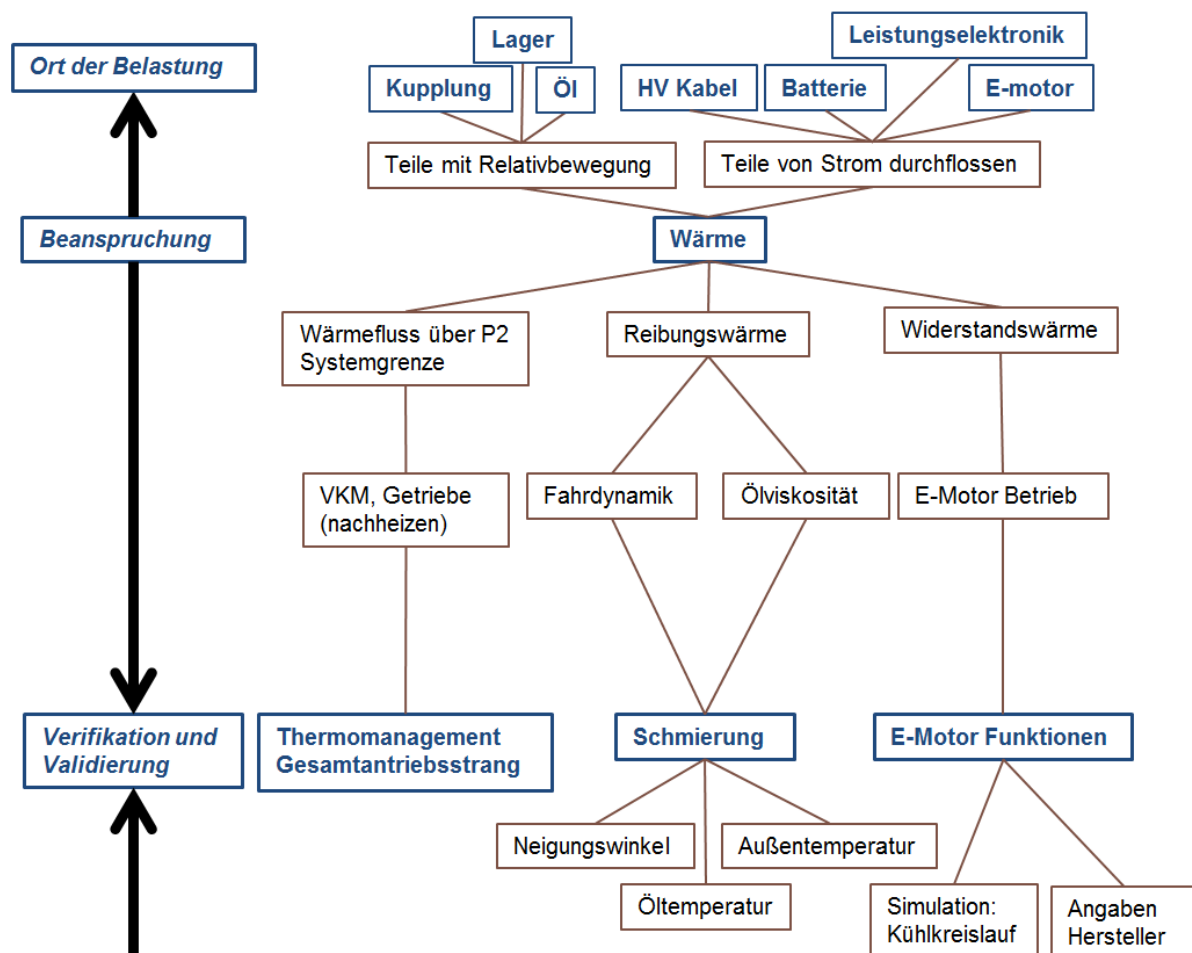


Abbildung 5.11: thermische Belastung

5.3.3 Chemische Belastung

Chemische Belastungen können zum einen von innen her entstehen, wenn z.B. eine Ölunverträglichkeit mit einem anderen Bauteil vorliegt oder wenn zwei unterschiedliche Metalle in einer als Elektrolyt agierenden Flüssigkeit in Berührung kommen und somit elektrochemisch korrodieren. Ebenso kann das System undicht sein und Öl an die Umgebung abgeben.

Gleichzeitig kann das System aber auch von außen chemischen Belastungen ausgesetzt sein. So kann in einer aggressiven z.B. salzhaltigen Umgebung das Gehäuse angegriffen werden, oder auch das Innere des Systems, da über die Dichtungen das korrosive Medium dorthin gelangt.

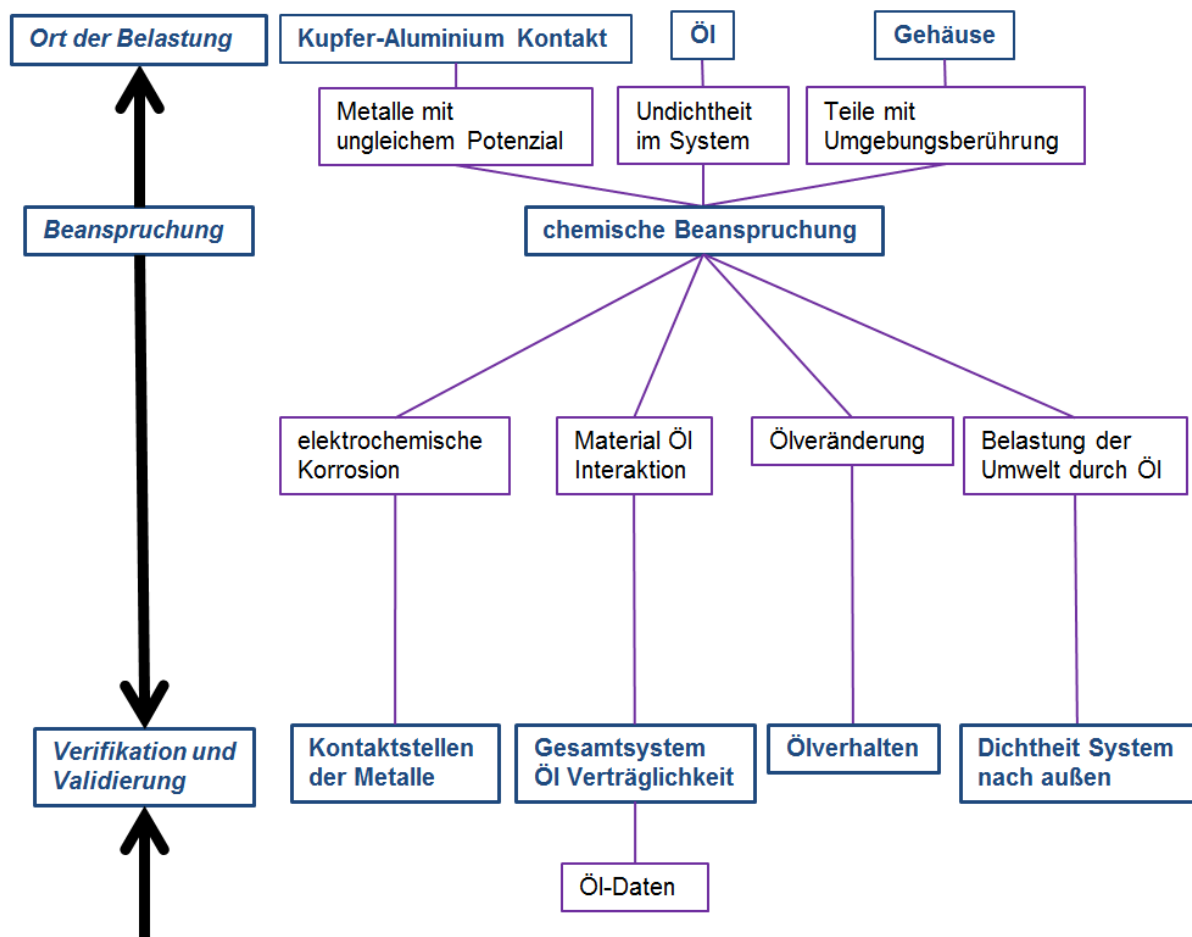


Abbildung 5.12: chemische Belastung

5.4 Interaktion des P2 Moduls mit seiner Umgebung

Beim P2 Parallelhybrid wird das P2 Modul in den bestehenden Antriebsstrang integriert. Es wird zwischen VKM und Getriebe platziert. Das führt zu verschiedenen Schnittstellen des Moduls mit dem Rest des Antriebsstrangs. Über diese Schnittstellen wird mechanische, thermische und elektrische Energie transportiert. Zudem wird das P2 Modul in den bestehenden Kühlkreislauf integriert, sodass dieser verändert werden muss. Außerdem benötigt das P2 Modul eine Regelung.

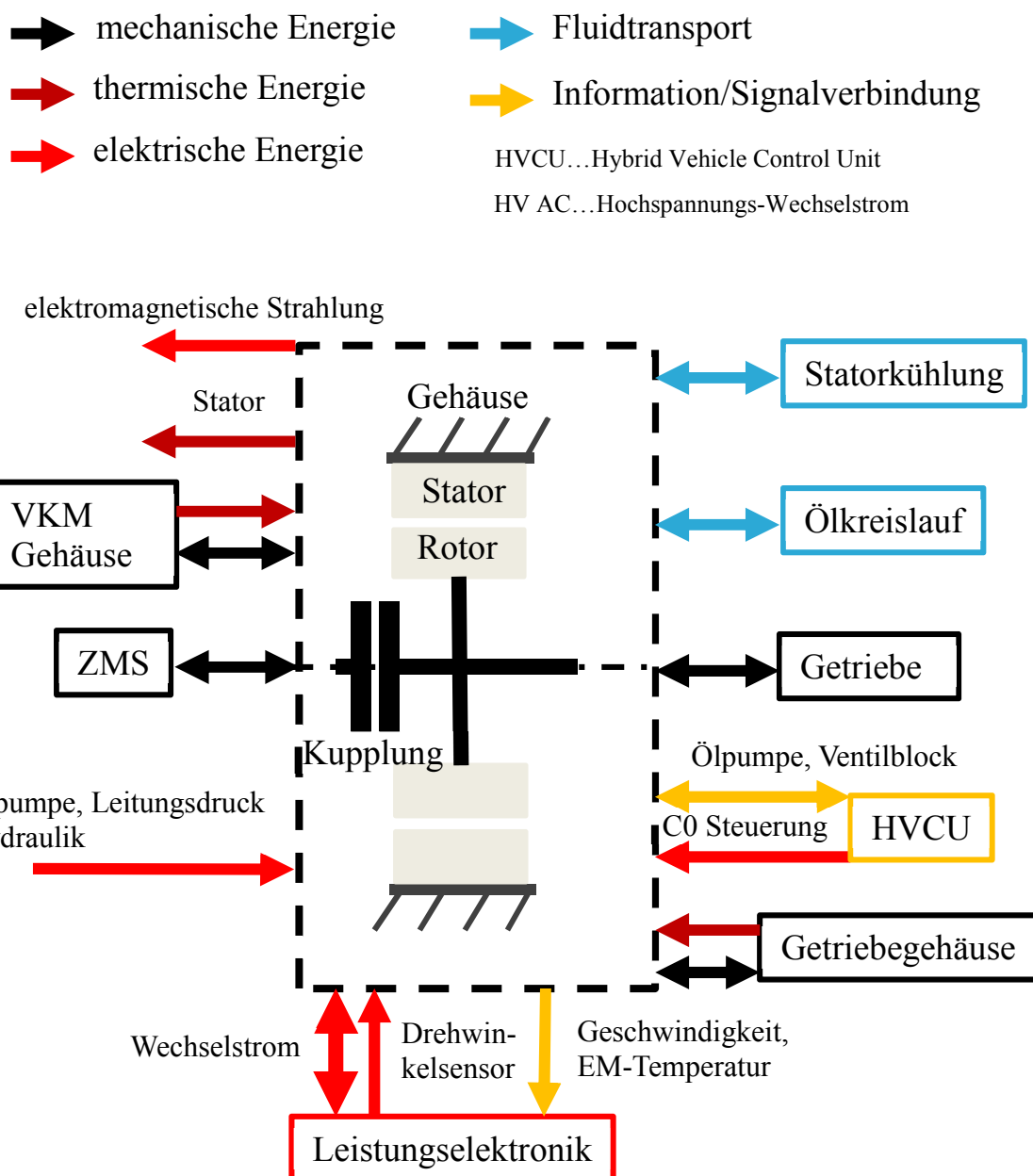


Abbildung 5.13: Schnittstellen des P2 Moduls mit seiner Umgebung

5.4.1 Mechanische Energie

Durch die Verlängerung des Antriebsstrangs ändert sich dessen Eigenfrequenz, was bei der Auslegung der Antriebsstrangkomponenten zu berücksichtigen ist. Weiters läuft bei Impulsstartvorgängen nun der Kraftfluss im Zwei-Massen-Schwungrad (ZMS) von der Sekundärmasse zur Primärmasse. Die maximale Belastbarkeit des ZMS darf nicht überschritten werden. Wegen der Massenerhöhung des Antriebsstranges sind die Aggregatlagerungen am Getriebe und der VKM ebenfalls zu überarbeiten.

Durch die Betriebsstrategie des Hybridmoduls kann es zu einer Veränderung des Schaltkennfeldes kommen. Dies bedeutet, dass manche Gangsynchronisierungen nun mehr belastet werden als zuvor. Es muss daher eine Überprüfung der Synchronisierungen stattfinden.

Beim konventionellen Schubbetrieb wird das Getriebe mit ungefähr 50 Nm belastet. Durch die Funktion der Rekuperation werden plötzlich Schubmomente bis über 150 Nm möglich. Auch dies ist bei der Auslegung zu berücksichtigen.

5.4.2 Thermische Energie

Der Wärmestrom von der VKM wirkt sich negativ auf die gewünschte niedrige Temperatur im P2 Modul aus. Das Getriebe hat im Betrieb wenig Einfluss auf die Erwärmung des Hybridmoduls, allerdings kann das sogenannte Nachheizen ein Problem darstellen. Nach Abstellen des Fahrzeugs fließt ein Wärmestrom vom 90-100°C warmen Getriebe zum Hybridmodul. Das Modul ist mit dem Niedertemperaturkreislauf (NTK) verbunden, dessen Temperatur bei 40-60°C liegt, um im Betrieb die Leistungselektronik und den Stator zu kühlen. Das Kühlwasser des NTK beginnt sich nun durch den Wärmestrom zu erwärmen. Es muss sichergestellt werden, dass bei erneutem Betrieb des Fahrzeugs die benötigten Kühltemperaturen, in kurzer Zeit, wieder hergestellt werden.

Der Wärmestrom über das Gehäuse des P2 Moduls hat keinen Einfluss auf den Betrieb von VKM und Getriebe.

5.4.3 Elektrische Energie

Dem P2 Modul muss elektrische Energie zugeführt werden. Zu diesem Zweck werden im Fahrzeug eine Batterie mit wesentlich höherer Spannung (~200 V) und eine Leistungselektronik verbaut. Über die Leistungselektronik wird nun aus der Gleichspannung die dreiphasige Wechselspannung für den E-Motor erzeugt, aber auch die 12V Gleichspannung für die konventionellen Fahrzeugkomponenten. Durch die hohen Ströme und Spannungen entstehen starke elektromagnetische Felder, wodurch es zu Impulsen auf Versorgungsleitungen, Störungen auf Signal- und Geberleitungen sowie feldgebundenen elektromagnetischen Störungen kommen kann. Man unterscheidet zwischen Störquelle und Störsenke, die auf ihre Störemission und ihre Störfestigkeit untersucht werden. Diese Thematik wird generell mit dem Begriff Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) beschrieben.⁷⁸

5.4.4 Fluidtransport

Der NT Kühlkreislauf wird im Vergleich zum konventionellen Fahrzeug, mit dem E-Motor und der Leistungselektronik, um 2 Komponenten erweitert. Bei der Kühlerauslegung muss berücksichtigt werden, dass die erforderlichen Volumenströme und Eingangstemperaturen erreicht werden.

Das P2 Modul besitzt einen eigenen Hydraulikkreislauf, der Volumenstrom und Druck für die Schmierung und Betätigung der Kupplung zur Verfügung stellt. Dieser Kreislauf kann entweder einen separaten Ölsumpf besitzen oder sich den Ölsumpf mit dem Getriebe teilen. Es muss gewährleistet werden, dass jeweils für Getriebe und P2 Modul immer genügend Öl vorhanden ist um alle Schmier- und Regelungsfunktionen durchzuführen.

Durch die zusätzliche Kupplung und Schmierfunktionen im Hybridmodul erfährt das Öl eine zusätzliche Belastung. Es ist zu überprüfen, ob das gesteigerte Volumen des Öls diese Zusatzbelastung ausgleicht.

⁷⁸ (Schäfer, 2009 S. 9)

5.4.5 Information/Signalverbindungen

Der Regelungsaufwand des P2 Moduls im Antriebsstrang steigt durch die Integration der Leistungselektronik und dem Batterie Management System (BMS) signifikant an. Die gewinnbringenden Funktionen eines hybridisierten Antriebsstranges können nur durch eine gute Betriebsstrategie ausgenutzt werden. Die Hybrid-Vehicle-Control-Unit (HVCU) übernimmt die Gesamtkontrolle über die Motorsteuerung (ECU), die Getriebesteuerung (TCU) und das BMS, sowie über die Leistungselektronik und die Hydraulik des Hybridmoduls.

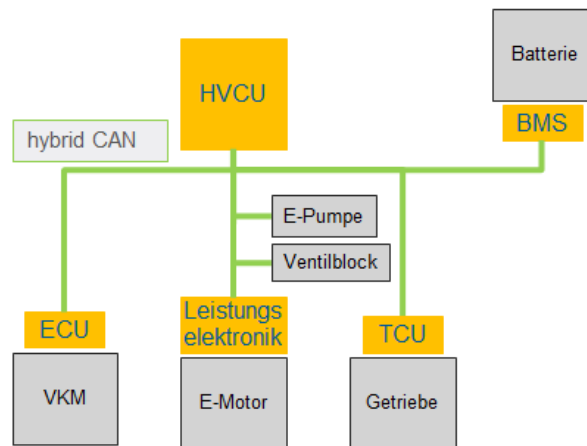


Abbildung 5.14: Steuersystem

6 Prüfmethodik

6.1 Allgemeines zur Funktion

Als Funktion eines Objektes bezeichnet man die Aufgabe für die es gemacht worden ist⁷⁹.

Zusätzlich wird zumeist durch die Ausführung der Funktion auch die Voraussetzung für eine weiterführende Funktion gelegt. Z.B. der Ventilblock regelt die Drücke, die Kupplung kann dadurch die richtige Momentübertragung zur rechten Zeit gewährleisten, der Jump Start funktioniert einwandfrei. Man erkennt also, dass eine Funktion zumeist nicht für sich allein besteht, sondern sich in einer Hierarchie von Funktionen befindet und mit den umliegenden Funktionen entweder einseitig oder wechselseitig verknüpft ist.

Es wird versucht einem Objekt eine Reihe von Funktionen zuzuordnen um die Fülle an Aufgaben komplexer Systeme zu bewältigen.⁸⁰ In der Konstruktionslehre bezeichnet man das als Funktionsintegration. Die Kupplung im P2 Modul hat die Funktion der Drehmomentübertragung, der Ölzufuhr und Abfuhr im Betrieb, der Schwingungsdämpfung durch Mikroschlupf, etc.

Bei der Neuentwicklung eines Produktes müssen alle Funktionen die später im Realbetrieb gefordert sind, vorher gewährleistet werden. Mithilfe von geeigneten Prüfständen und Prüfprozeduren wird versucht dies zu erreichen. Diese Gewährleistung gliedert sich in Verifikation und Validierung.

6.2 Verifikation und Validierung

Aus dem vom Kunden gelieferten Lastenheft, der eigenen Firmenerfahrung, aus technischen Spezifikationen und verschiedenen anderen Quellen, wird intern ein Pflichtenheft erstellt. Die Anforderungen werden konkretisiert und auf einzelne Teilbereiche der Entwicklung heruntergebrochen. Im Pflichtenheft befinden sich nun eine Fülle von Anforderungen die das Produkt und seine Subsysteme zu erfüllen haben, um als Gesamtes den Anforderungen des Kunden und gesetzlichen Normen zu entsprechen. Das Pflichtenheft ist also die Antwort darauf

⁷⁹ (Wikipedia, 2013)

⁸⁰ (Wikipedia, 2014)

wie und womit man die Forderungen des Lastenheftes gedenkt umzusetzen. Die Erfüllung des Pflichtenheftes nennt man Verifikation.⁸¹

Die Verifikation ist also die Erprobung aller Funktionen die für den gewünschten Betrieb festgelegt worden sind. Es geht um die Frage, ob und wie gut die gewünschten Funktionen erfüllt werden. Den Funktionen stehen Zielwerte gegenüber, anhand derer sie klar bewertet werden können.

Eine Funktion hat zumeist zwei Urheber, die Hardware, also den mechanischen Aufbau, und die Software. Beide Teile müssen ihre zgedachten Aufgaben erfüllen um die Funktion zu gewährleisten. Die Software bestimmt den Ablauf der Funktion, gibt der Hardware vor was zu tun ist. Die Hardware muss die Befehle ausführen und den dabei entstehenden Belastungen standhalten.

Am Beginn stehen Funktionen die sich auf einzelne Komponenten und Baugruppen beziehen z.B. Druckverläufe, Volumenströme, Schließzeiten der Kupplung, Momentübertragung, Drehzahl, Schmierung, etc. Hier stehen mechanische Probleme im Vordergrund. Danach folgen die Systemfunktionen. Systemfunktionen sind z.B. die gewünschte Temperaturverteilung im System sowie die Ausführung aller gewünschten Betriebszustände wie Boost, Rekuperation, rein elektrische Fahrt etc. Hier liegt der Fokus neben der Hardware auch stärker auf der Software.

Falls die Verifikation zu nicht zufriedenstellenden Ergebnissen kommt, werden damit grobe Konstruktionsfehler, Softwareprobleme oder auch unrealistische Anforderungen aufgezeigt. Diese Probleme müssen behoben werden, bevor mit der Überprüfung fortgefahren werden kann. Die Verifikation wird vor, während und nach der Validierung durchgeführt um sicherzustellen, dass die Funktionen gewährleistet bleiben.⁸²

Wenn das System den gewünschten Vorstellungen entspricht, beginnt die zweite Phase der Prüfung, die Validierung.

Bei der Validierung geht es darum festzustellen ob das Produkt nun tatsächlich den gewünschten Kundenanforderungen entspricht, also das leistet was der Kunde im Lastenheft definiert hat.⁸³

⁸¹ Vgl. (Wikipedia, 2014)

⁸² Vgl. (Wikipedia, 2014)

⁸³ Vgl. (Wikipedia, 2014)

Hierzu wird das System mit Belastungszeitfunktionen belastet die dem späteren Realbetrieb entsprechen. Mit Raffungsfaktoren und wohlüberlegten Gewichtungen der Betriebsarten im Zyklus versucht man das System über die Lebensdauer realistisch zu belasten, um dadurch Aussagen über Ausfälle durch Langzeitschäden zu erlangen.

Hier stehen funktionsmindernde Faktoren im Mittelpunkt, die erst nach längerem Betrieb bemerkbar werden. Das sind Schäden wie z.B. die Schwächung des Materials, aufgrund dessen es dann zum Dauerbruch kommt oder Verschleiß, Korrosion, thermische Alterung, etc.

7 Die Verifikation

Im Gegensatz zur Validierung, bei der in einer AVL List GmbH internen Methodik sehr stark die Schäden die Grundlage der Betrachtung bilden, steht bei der Verifikation die Funktion im Zentrum. Nicht jede Funktion kann durch eine Schadensart ausgedrückt werden. So kann beispielsweise eine Fehlkonstruktion eine Funktion verhindern, aber keinen physikalischen Schaden verursachen. Die Funktion „Ventilöffnung in gewünschter Zeit“ kann durch den Schaden Korrosion des Ventils verhindert werden, es könnte aber auch ein konstruktives Problem dahinterliegen. Das Überschreiten der geforderten Schließzeiten der Kupplung kann an falsch dimensionierten Leckage-Schlitzern liegen, oder daran, dass die Ölviskosität für die gegebene Temperatur zu hoch ist, etc. Es kommt zu keinem Schaden, die Funktion wird aber trotzdem nicht erfüllt. Außerdem kann es sein, dass es mit der Software ein Problem gibt. Sogenannte „bugs“ bezeichnen ein unerwünschtes Softwareverhalten. Dies kann genauso der Grund für einen Funktionsausfall sein, unabhängig davon ob dabei ein Schaden auftritt oder nicht.

Aus diesem Grund wird an dieser Stelle eine Auflistung eingeführt die versucht der Betrachtungsweise nach Funktionen Rechnung zu tragen, das *Funktionsanalyseblatt*. Es listet die Funktionen auf, die ein System erfüllen muss und verbindet diese mit relevanten Informationen für Prüfaufbauten und Prüfprozeduren. Im Vergleich zu den Schadensarten, als die negativen physische und chemische Veränderungen des Systemmaterials, die klar definiert sind, ist bei einer Funktionsauflistung die Art der Formulierung und Betrachtungsweise nicht von vorn herein gegeben.

Das Funktionsanalyseblatt beschränkt sich auf Funktionen einer bzw. zweier Ebenen und stellt Verbindung zu Prüfaufbauten und Prüfprozeduren sowie kritischen Lastanwendungen her.

7.1 Das Funktionsanalyseblatt

Im Funktionsanalyseblatt werden nun alle, für die mechanische Entwicklung relevanten, Funktionsanforderungen des P2 Moduls, seiner Baugruppen und teilweise derer Hauptkomponenten aufgelistet. Ihnen wird, wenn vorhanden, ein kritischer Anwendungsfall oder eine kritische Last zugeordnet. Danach wird definiert, welche Prüfaufbauten, Messparameter und Prüfprozeduren benötigt werden um die gegebene Funktion vollständig zu überprüfen.

Die Informationen im Funktionsanalyseblatt sind aus vielen Expertengesprächen zusammengetragen worden, sowie aus der Literatur entnommen. Abbildungen die nicht mit Quellenangaben versehen sind, sind entweder vom Autor selbst erstellt worden oder ihm von Mitarbeitern der AVL List GmbH zur Verfügung gestellt worden.

7.1.1 Abgrenzung der Systembetrachtung

Als Unternehmen, welches ein Produkt entwickelt, ist man immer Auftragnehmer und Auftraggeber zugleich. Der Grund liegt darin, dass selbst bei einer Neuentwicklung eines Produktes auf Standardteile zurückgegriffen wird oder andere Unternehmen mit spezieller Kompetenz mit der Fertigung von Komponenten oder Baugruppen beauftragt werden. So spiegelt sich also das eigene Verhältnis zum Auftraggeber bezüglich Lasten- und Pflichtenheft im Verhältnis zu den eigenen Auftragnehmern wieder. Die Teile die zugekauft werden, müssen entsprechend der Abmachung vom Auftragnehmer bereits verifiziert und nach den gewünschten Anforderungen auch validiert worden sein.

In dieser Arbeit beschränkt sich die Auflistung der Funktionen auf das P2 Modul selbst und seine Baugruppen. Auf Komponentenebene wird, außer bei der Hydraulik, keine Funktionsauflistung durchgeführt. Die Komponentenfunktionen sind also implizit in den ihnen übergeordneten, Baugruppenfunktionen enthalten.

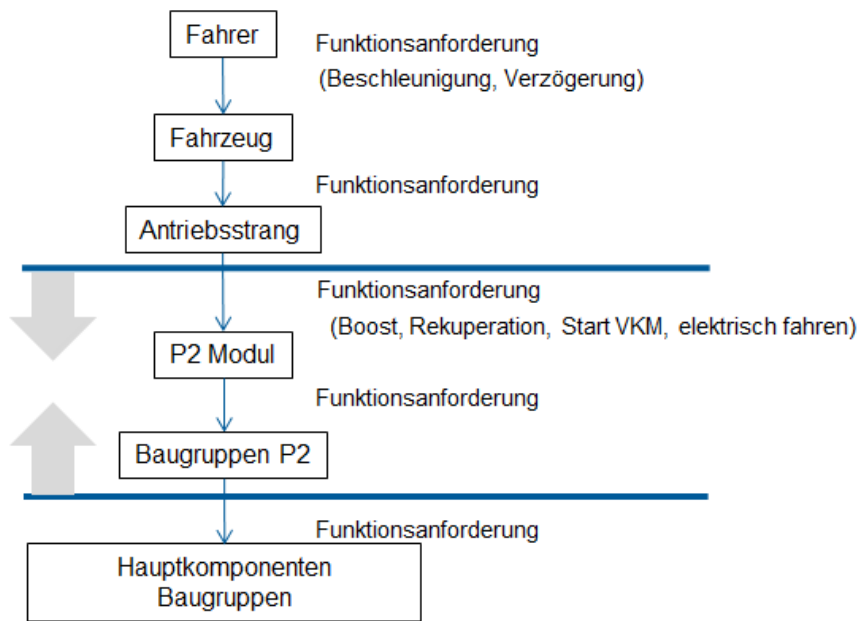


Abbildung 7.1: Betrachtete Ebenen der Funktionsanforderungen

7.1.2 Abgrenzung der Funktionsanforderungen

Die Funktionsanforderungen an das System sind per Definition nur Eigenschaften, die in der Funktionsüberprüfungsphase überprüft werden können. Im Dauerlauf werden dann dieselben Funktionen über Lebensdauer validiert.

Bezüglich Verifizierung und Validierung kann bei mechanischer Belastung folgende Unterscheidung getroffen werden. In der Verifikationsphase wird durch kurzzeitigen Betrieb, mit und ohne Last, die mechanische Funktion der Konstruktion untersucht. Das Verhalten der Konstruktion unter Ausübung der Funktionen über Lebensdauer, ist Aufgabe der Validierung. Erst hier werden die Schäden, die durch Schadensakkumulation auftreten sichtbar, wie Dauerbruch oder Verschleiß.

Bei der thermischen Belastung steht das gewünschte thermische Verhalten des Systems im Mittelpunkt. Das bedeutet, dass das System im realen Betrieb nicht überhitzt und sich die Temperaturen so einstellen wie in der Simulation bestimmt. Ebenfalls wird ein Spontanversagen erfasst, das durch thermische Last ausgelöst wird. Z.B. ein Verklemmen oder die Zerstörung des Materials durch unzulässig hohe Wärmedehnungen.

Die Erfassung von Langzeitschäden der Komponenten durch thermische Last, ist Aufgabe der Validierung.

Bei der chemischen Belastung spielt der Zeitfaktor eine entscheidende Rolle. Deshalb wird die Überprüfung der chemischen Belastbarkeit der Validierung zugeordnet.

7.1.3 Zielwerte

Allein die qualitative Beschreibung der Funktion genügt noch nicht um sie verifizieren zu können. Es bedarf auch einer Quantifizierung, der Frage nach Zahlen: wie lang, wie viel, wie schnell, wie warm, etc.

Grundsätzlich erfolgen die Zielwerte für jede Komponente aus der Ableitung der Forderungen des Lastenheftes auf die Baugruppen und Komponenten.

Um diese Ableitung allerdings richtig durchzuführen, bedarf es einer genauen Simulation und der Expertenerfahrung, die schon ähnliche Projekte durchgeführt und ein gewisses „know how“, -ein Verständnis des Systems- aufgebaut haben, das ihnen hilft Zielwerte zu definieren. Aus diesen Quellen setzen sich die Zielwerte der Funktionen zusammen, die es zu erreichen gilt. Wenn nun ein Zielwert in der Überprüfung nicht erreicht wird, stellt sich zuerst die Frage, ob man versteht warum er nicht erreicht wurde. Wenn nicht, so gilt es dies herauszufinden. Hier kann es helfen auf eine tiefere Systemebene zu gehen und Komponententests durchzuführen um gewisse Vermutungen zu bestätigen oder zu zerstreuen. Wenn man die Ursache des Fehlers erkannt hat, gibt es zwei Möglichkeiten vorzugehen. Die eine Möglichkeit ist die Veränderung des Systems, die andere die Veränderung des Zielwertes. Von Fall zu Fall muss man den Aufwand und das Risiko abschätzen und dann entscheiden, welchen Weg man geht. Wenn nun der Zielwert einer Funktion einer Komponente erreicht wird, muss das aber noch nicht zwingend heißen, dass alles richtig konstruiert ist. Es bedeutet nur, dass diese Komponentenkonstruktion den Anforderungen die man zuvor definiert hat entspricht. Vielleicht war die Definition aber falsch und beim nächst komplexeren Aufbau tritt zu Tage, dass die Komponente doch stärker belastet wird, als zuvor angenommen.

7.1.4 Aufbau und Logik

Der Aufbau des Funktionsanalyseblattes gliedert sich in verschiedene Spalten, die im Folgenden kurz beschrieben sind.

7.1.4.1 Baugruppen

Das System ist in verschiedene Baugruppen gegliedert. Es werden die Funktionsanforderungen des Systems und der Baugruppen betrachtet. Die Funktionen der Baugruppen dienen den Funktionen des Systems, sie leiten sich daraus ab. Die Unterteilung ist aufgrund von funktionalen Überlegungen getroffen worden. Deshalb bilden Kupplung und Wellen eine Einheit, da sie im gleichen Aufbau mit der gleichen Last getestet werden.

7.1.4.2 Funktionsanforderungen

Die Funktionsanforderungen entspringen keiner durchgängigen Systematik. Sie sind die Summe aus den Überlegungen über die Belastungen die Funktionen abzuleiten, aus Literaturrecherchen und Gesprächen mit Experten. Eingeschränkt sind sie dadurch, dass keine Softwarefunktionen betrachtet werden und eine Funktion per Definition in der Funktionserprobung prüfbar sein muss, da es konkrete Zielwerte gibt, die erfüllt werden können. Diese konkreten Ziele müssen spezifiziert sein, z.B. in einem Lastenheft oder durch die Erfahrung von Experten.

7.1.4.3 Kritische Last/ Anwendung

Die Definition der kritischen Last oder Anwendung dient dazu, eine Prüfprozedur zu erstellen, die das System mit einer Sonderlast beansprucht. Dadurch hat man ehesten die Chance ein Sofortversagen aufzudecken.

7.1.4.4 Prüfaufbau

Der Prüfaufbau ist geeignet die Funktionsanforderung verifizieren zu können. Obwohl es hier mehrere Möglichkeiten gibt, da es oft vorkommt, dass Funktionen auf verschiedenen Prüfständen getestet werden können. Es hängt dann auch von finanziellen Randbedingungen ab, welche Abstriche man in Kauf nimmt. So sind trotzdem manchmal 2 Prüfstände einer Funktionsanforderung zugeordnet, da z.B. der erste Prüfaufbau eine grobe Abschätzung zulässt, wohingegen der zweite Aufbau die Umgebungsbedingungen noch ein Stück realer abbildet. Die Abkürzung M steht für Maschine.

7.1.4.5 Erklärung

Diese Spalte enthält zusätzliche Informationen. Sie enthält Ursachen einer Fehlfunktion, sowie nähere Erklärungen zur Funktionsanforderung oder dem Prüfaufbau.

7.1.4.6 Messparameter für die Verifikation

Diese Spalte beschreibt die Parameter zur Überprüfung der Funktionen am Prüfstand. Allerdings entsprechend der Ebene in der man sich gerade befindet. Die Funktion z.B. Übertragung von Drehmoment, hängt auf P2 Modulebene von der Kühlleistung des Stator Kühlers ab. Öldrücke etc., sind schon zuvor am Hydraulik und Kupplungsprüfstand verifiziert worden.

7.1.4.7 Prüfprozedur

Die Spalte Prüfprozedur gibt in Stichworten wieder, welche Bestandteile die Prozedur, neben der Überprüfung der Grundperformance, beinhalten sollte.

7.1.5 Aussage

Das Funktionsanalyseblatt gibt einen Überblick über alle relevanten Funktionen des P2 Moduls. Es macht Aussagen über die benötigten Prüfstände, über die Messparameter sowie über Prüfprozeduren für die Verifikation einer Funktion.

7.1.6 Blätter

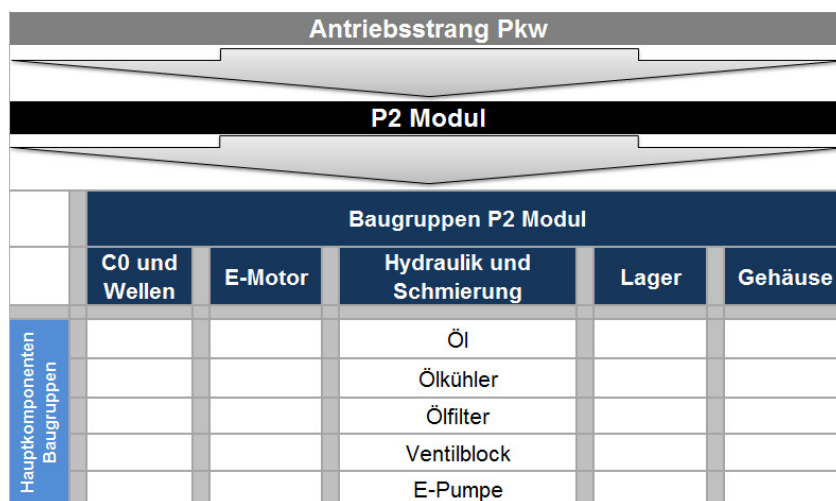


Abbildung 7.2: P2 Modul aufgeteilt in Baugruppen

| FA-Blatt | | Betrachtetes Subsystem / Komponente | Funktionsanforderungen (Zielwerte laut Lastenheft/Spezifikation) | Kritische Last/Anwendung | Prüfaufbau | Erklärungen | Messparameter für die Verifikation | Prüfprozedur |
|----------|-------|-------------------------------------|--|---|---------------------------------------|--|---|---|
| Nr. | Titel | | | | | | | |
| 1 | | P2 Modul | Momentübertragung von E-Motor auf Getriebe bei offener Kupplung | Anfahren bei Steigung, max. rein elektrischen Fahrzeit bei hoher Systemtemperatur, niedriger SOC | C: 3M Prüfaufbau D: Antriebsstrang | Fehlerursache: zu geringe Kühlleistung Stator Kühler, zu niedriger SOC D: Betrachtung mit VKM → alle Wärmequellen | Druckdifferenz, Volumenstrom, T_ein, T_aus, M_ein, M_aus VKM | C: reiner E-Motorbetrieb für geforderten Drehzahlen und Momenten D: E-Motor Betrieb für gewünschte Zeit nach Vollast VKM |
| 2 | | P2 Modul | Momentübertragung von Getriebe auf E-Motor bei offener Kupplung | max. Rekuperationsmoment bei hoher Systemtemperatur, niedriger SOC | C: 3M Prüfaufbau D: Antriebsstrang | Fehlerursache: zu geringe Kühlleistung Stator Kühler D: Betrachtung mit VKM → alle Wärmequellen | Kühler: Druckdifferenz, Volumenstrom, T_ein, T_aus | E-Motor im Rekuperationsbetrieb für gewünschte Zeit nach Boost Phase |
| 3 | | P2 Modul | VKM Start bei positivem/negativem Antriebsmoment bei schlupfend betriebener Kupplung | Grenztemperatur zwischen Betätigung 12V Starter oder E-Motor, Start bei hohem Momentbedarf, niedriger SOC | D: Antriebsstrang | Fehlerursache: Regelprobleme Druckmoment, zu langsames Schließ- und Öffnungsverhalten der Kupplung | Verdrehwinkel ZMS, Zeit bis VKM Start | oftmaliges anfahren und beschleunigen/lastlos Drehzahl steigern, bis VKM angeworfen wird |
| 4 | | P2 Modul | Momentübertragung bei geschlossener Kupplung | Vollastbeschleunigung, Boosten, Sonderlasten | C: 3M Prüfaufbau | Fehlerursache: zu geringe Kühlleistung Stator Kühler, zu niedriger SOC, zu niedriger Öldruck für Moment | Mv_ein, Me_ein, M_aus, Verdrehwinkel ZMS | Vollastbeschleunigung, häufiges Boosten, Moment größer als Betriebsmoment |
| 5 | | P2 Modul | Lastpunktverschiebung | thermische Belastung durch Rekuperation nach Boost bei hoher Systemtemperatur | C: 3M Prüfaufbau D: Antriebsstrang | Fehlerursache: zu geringe Kühlleistung Stator Kühler, zu niedriger Öldruck für Moment | Temperatur, Mv_ein, M_aus, Drehzahl | Rekuperation durch E-Motor nach Boostvorgang, zuvor VKM Vollast |
| 6 | | P2 Modul | thermisches Verhalten Erreichen von Beharrungstemperatur | VKM Vollast, häufiges boosten, häufig Start/Stop, nachheizen | D: Antriebsstrang | Fehlerursache: unzureichende Kühlung | Öltemperatur, Kühlmitteltemperatur | Vollastfahrt VKM, elektrische Fahrt, Pause und danach wiederholen |
| 7 | | P2 Modul | Überschreiten der Lärmgrenzen | Anregung Stator im Leerlauf, hochfrequente Verzahnungsanregung Getriebe | D: Antriebsstrang | Fehlerursache: Anregung von Eigenfrequenzen | Körpergeräusch | Messung der Akustik des Antriebsstrangs mit P2 Modul über gesamter Betriebsbereich |
| 8 | | P2 Modul | geringe Betriebserschwingungen | Anregung durch VKM | D: Antriebsstrang | Fehlerursache: Anregung von Eigenfrequenzen | Beschleunigungswerte | Messung der Beschleunigungen des Gehäuses bei unterschiedlichen Drehzahlen |
| 9 | | P2 Modul | Dichtheit intern/extern | t_max, M_max | C: 3M Prüfaufbau | Fehlerursache: Undichtheit durch Dichtungsschleife, Gehäuseverformung durch hohes Moment | Sichtkontrolle | Betrieb bei hoher Temperatur und hoher Last |

Abbildung 7.3: Funktionsanalyse Blatt: P2 Modul

| Nummerierung | F2 Modul | Hauptkomponente | FA-Blatt | Betrachtetes Subsystem / Komponente | Funktionsanforderungen (Zielwerte laut Lastenheft/Spezifikation) | kritische Last/Anwendung | Prüfaufbau | Erklärungen | Messparameter für die Verifikation | Prüfprozedur |
|--------------|----------|-----------------|----------|-------------------------------------|--|--|----------------------------|---|--|--|
| 10 | | | | | Kupplung und Wellen | | | | | |
| 1 | | | | | Übertragung des Maximalmoments im Betriebsdruckbereich | Moment von VKM bei Vollastbeschleunigung | B1: Kupplung 2M Prüfaufbau | Fehlerursache: zu geringer Öldruck | Öldruck, Differenzdrehzahl, Moment | Übertragung von definierten Maximalmoment bei unterschiedlichen Drücken --> Rutschpunkt |
| 11 | | | | | Belastbarkeit der Schweißnähte | Moment von VKM + Boostmoment, Schaltstöße Getriebe, Spiel in Momentübertragung | B1: Kupplung 2M Prüfaufbau | Fehlerursache: Spannungsüberhöhung, zu geringe Festigkeit | M_ein, M_aus | Übertragung von definierten Moment bis zum 2 fache Maximalmoment für Stöße, Schläge etc. |
| 12 | | | | | Reproduzierbarkeit des Kupplungsmoments in Abhängigkeit des Öldrucks | Moment bei Impulsstart während der Fahrt, hohe Ölviskosität | B1: Kupplung 2M Prüfaufbau | Fehlerursache: falsche Adaptierung der sich durch Verschleiß ändernden Kraft- Weg Kennlinie | Öldruck, Öltemperatur, Drehzahl, Moment ,Zusammenhang Druck-Moment | B1: Wiederholtes Übertragen von Drehmomentwerten, gezielter Schlupfbetrieb |
| 13 | | | | | Schließ- und Öffnungsverhalten | Ölviskosität bei niedriger Temperatur, hohe Drehzahl | B1: Kupplung 2M Prüfaufbau | Fehlerursache: zu geringer Öldruck, Setzen der Rückstellfeder, zu hohe Ölviskosität, unzulässig hohe Reibung des Kolbens | Öldruck, Öltemperatur, Drehzahl, M_ein, M_aus, Druckdifferenz, Volumenstrom, T_ein, Taus | betätigen der Kupplung bei verschiedenen Drehzahlen und Momenten |
| 14 | | | | | Einhalten der Leckageimits der Hydraulik | p_max, t_min-t_max, n_max | B1: Kupplung 2M Prüfaufbau | Fehlerursache: unzureichende Dichtung am Kolben B1: Test ohne Ventilblock, am Kupplungszyylinder wird Druck angelegt und Durchfluss gemessen | Volumenstrom, Drehzahl, Druck, Temperatur | Messen der Leckage über n_min bis n_max, p_min bis p_max und t_min bis t_max |
| 15 | | | | | Unterschreitung zulässiger Schleppmomente | hohe Differenzdrehzahlen, hohe Ölviskosität | B1: Kupplung 2M Prüfaufbau | Fehlerursache: unzureichendes Öffnungsverhalten, hohe Ölviskosität | M_ein, M_aus, Drehzahl, Öldruck, Öltemperatur | B1: verschiedene Drehzahlen bei offener Kupplung, bei unterschiedlichen Öltemperaturen |
| 16 | | | | | Rupffreiheit | geometrische Genauigkeit Lamellen Ölqualität, Tribologie | B1: Kupplung 2M Prüfaufbau | Fehlerursache: falsche Abstimmung zwischen Reibbelag und Öl | M_ein, M_aus, Drehzahl, Öldruck, Öltemperatur | B1: Schaltvorgänge bei unterschiedlichen Drehzahlen, Momenten und Temperaturen |
| 17 | | | | | Steifigkeit | hohes Moment, hoher Öldruck, hohe Drehzahl | B1: Kupplung 2M Prüfaufbau | Fehlerursache: zu hohes maximal auftretendes Moment im Betrieb, zu geringe Wandstärke | Öldruck, Moment | Druck Moment Kennlinien statisch |
| 18 | | | | | thermisches Verhalten | t_max, häufige Kupplungsbetätigung | B1: Kupplung 2M Prüfaufbau | Fehlerursache: nicht Erreichen Volumenströme zur Kühlung durch die Lamellen wegen konstruktiver Auslegung, zu hohe Ölviskosität | Volumenstrom, T_ein, T_aus | häufige Betätigung bei hohen Temperaturen |
| 19 | | | | | Betätigungsfrequenz der Kupplung | häufige Betätigung der Kupplung, Schlupfzeit | B1: Kupplung 2M Prüfaufbau | Fehlerursache: Überbeanspruchung der Lamellen bei Schlupf und des Kolbens bei Betätigung | Öldruck, Öltemperatur, Drehzahl, Moment | häufige Betätigung bei verschiedenen Drehzahlen, Öldrücke und Öltemperaturen |
| 20 | | | | | | | | | | |

Abbildung 7.4: Funktionsanalyse Blatt: Kupplung C0

| FA-Blatt | | Betrachtetes Subsystem / Komponente | Funktionsanforderungen (Zielwerte laut Lastenheft/Spezifikation) | kritische Last/Anwendung | Prüfaufbau | Erklärungen | Messparameter für die Verifikation | Prüfprozedur |
|----------|-------|-------------------------------------|--|--|--|---|---|---|
| Nr. | Titel | | | | | | | |
| 21 | 2 | E-Motor | kontinuierliche Leistungsabgabe | hohe Ausgangstemperatur, niedrige Spannung | B3: E-Motor 1M Prüfaufbau | Fehlerursache: E-Motor u. Kühlerdimensionierung | Moment, Drehzahl, Polradwinkel, U, I | Betrieb mit kontinuierlicher Leistung bei versch. SOC und t, für vorgegebene Zeit |
| 22 | 2 | E-Motor | Leistungsspitze | hohe Umgebungstemperatur, maximales Moment, niedrige Spannung | B3: E-Motor 1M Prüfaufbau | Fehlerursache: E-Motor u. Kühlerdimensionierung | Moment, Drehzahl, Polradwinkel, U, I | Belastung mit hohem Moment für gewünschter Zeit bei niedriger Drehzahl, versch. SOC und t |
| 23 | 2 | E-Motor | Wirkungsgradkennfeld als Motor und Generator | - | B3: E-Motor 1M Prüfaufbau | - | Drehzahl, P_ein (l, U), P_aus (M, n) | Betrieb in allen Bereichen des möglichen Arbeitsfeldes |
| 24 | 2 | E-Motor | Überschreiten maximaler Eisenverluste und Lagerreibungsverluste | hohe Drehzahl | B3: E-Motor 1M Prüfaufbau | - | Drehzahl | Leertlaufversuch |
| 25 | 2 | E-Motor | EMV | Bestimmung der Rotorposition, störungsfreie Ansteuerung | B3: E-Motor 1M Prüfaufbau | Fehlerursache: Der Lagesensor ist zu nahe am E-Motor verbaut | Signalübertragung Lagesensor | Wechselastbetrieb |
| 26 | 2 | E-Motor | Momentenaufbau | hoch transienter Betrieb, hohe Umgebungstemperatur | B3: E-Motor 1M Prüfaufbau | Fehlerursache: zu abrupte gewünschte Laständerung | Drehzahl, M_aus, T_ein, T_aus, T_umgebung | Wechselastbetrieb |
| 27 | 2 | E-Motor | Erreichen der max. Drehzahlen | max. Drehzahl -> Fliehkraft | B3: E-Motor 1M Prüfaufbau | Fehlerursache: Ausbrechen der Rotormagnete | Drehzahl | beschleunigen auf maximale Drehzahl |
| 28 | 2 | E-Motor | thermisches Verhalten | Betrieb mit hoher Leistung, unterschiedliche Umgebungstemperaturen | B3: E-Motor 1M Prüfaufbau | Fehlerursache: zu kleine Kühlerdimensionierung, schlechte Wärmeabfuhr | Volumenstrom, Druckabfall, T_ein, T_aus | steht in Zusammenhang mit Leistungsdaten und Wirkungsgradkennfeld |
| 29 | 2 | E-Motor | Belastbarkeit durch axiale und radiale Kräfte | Vibrationen und Schläge | A2.1: E-Motoraufbau mit Rütteltisch | Fehlerursache: zu geringe mechanischen Festigkeit, zu hohe Spannungen | DIN EN 60068-2-64 DIN EN 60068-2-27 | DIN EN 60068-2-64 DIN EN 60068-2-27 |
| 30 | 2 | E-Motor | Belastbarkeit durch Kippmomente | hohe Drehzahl, Schwingungsanregung durch VKW, Gier und Wankbewegungen von Fzg. | A2.2: E-Motoraufbau mit Hydropulser | Fehlerursache: zu hohe Spannungen durch Auslenkung der Rotorachse, zu geringe mechanischen Festigkeit | EN 60349-1 | EN 60349-1 |
| 31 | 2 | E-Motor | Betriebsverhalten bei hoher Luftfeuchte mit Kondensation | Luftfeuchte > 90%, L_min, L_max | A2.3: E-Motoraufbau mit Luftfeuchtigkeit und | Fehlerursache: Auftreten von Kurzschluss durch Wasseransammlung | DIN EN 60068-2-38 | DIN EN 60068-2-38 |
| 32 | 2 | E-Motor | | | | | | |

Abbildung 7.5: Funktionsanalyseblatt: E-Motor

| Nummerierung | P2 Modul | Hauptgruppe | Hauptkomponente | Funktionsanforderungen (Zielwerte laut Lastenheft/Spezifikation) | kritische Last/Anwendung | Prüfaufbau | Erklärungen | Messparameter für die Verifikation | Prüfprozedur |
|---------------------------------|----------|-------------|--------------------------|--|---|--|--|---|--|
| 33 | | 3 | | | | | | | |
| P2 Modul | | | | | | | | | |
| Hydraulik und Schmierung | | | | | | | | | |
| 34 | | 3 | Hydraulik und Schmierung | Komponentenzusammenspiel | - | A1: Hydraulikaufbauten | - | Druck, Drehzahlen, Öl-Lagertemperaturen | verschiedene Drehzahlen, verschiedene Winkellagen, unterschiedliche Temperaturen |
| 35 | | 3 | Hydraulik und Schmierung | Ölrückfluss | Ölviskosität bei niedrigen Temperaturen Öldruck bei Kupplungsbetätigung | B2: 1M-Schmierungs-Prüfaufbau | Fehlerursache: unzureichende oder zu starke Dichtungen | Ölmenge, Öltemperatur, Öldruck, Sichtkontrolle | verschiedene Drehzahlen, verschiedene Winkellagen, unterschiedliche Temperaturen |
| 36 | | 3 | Hydraulik und Schmierung | Entlüftung | Ölviskosität bei niedrigen Temperaturen Öldruck bei Kupplungsbetätigung | B2: 1M-Schmierungs-Prüfaufbau | Fehlerursache: unzureichende oder zu starke Dichtungen | Ölmenge, Öltemperatur, Öldruck, Sichtkontrolle | verschiedene Drehzahlen, verschiedene Winkellagen, unterschiedliche Temperaturen |
| 37 | | 3 | Öl | | | | | | |
| 38 | | 3 | Öl | thermisches Verhalten-erreichen von Beharrungstemperatur | Volllast VKM, häufiges Boosten | B1: Kupplung 2M Prüfaufbau D: Antriebsstrang | Fehlerursache: unterdimensionierter Ölkühler, häufigere Kupplungsbetätigung D: alle Wärmequellen werden miteinbezogen | Öltemperatur, Stoffveränderung Öl | Volllastfahrt VKM, Wechselslastbetrieb |
| 39 | | 3 | Öl | keine (geringe) Schaumbildung | hohe Drehzahl, t_max | B1: Kupplung 2M Prüfaufbau B2: 1M-Schmierungs-Prüfaufbau | Fehlerursache: Verschäumung durch Luftertrag durch Planschen von Teilen, keine Ruhebereiche im Sumpf (ausgasen), Hochdruckstrahl in Sumpf, Luftansaugung bei Neigung | B1: Öltemperatur, Druck, Drehzahl B2: Öl-Temperatur, Drehzahlen, Neigung | B1: Betrieb bei versch. Drücken, Drehzahlen und Temperaturen B2: verschiedene Drehzahlen, Winkellagen, versch. Temperaturen |
| 40 | | 3 | Öl | tribologische Eigenschaften | t_min, t_max | B1: Kupplung 2M Prüfaufbau | - | Differenzdrehzahlen, Öldruck, Öltemperatur | versch. Differenzdrehzahlen, untersch. Temperaturen, unterschiedlichen Drücke Reibungskoeffizient-Bestimmung (Reibwertkurve) |
| 41 | | 3 | Ölkühler | | | | | | |
| 42 | | 3 | Ölkühler | Kühlleistung | Motovolllast, Boost u. Rekuperation | E: Fahrzeug | Fehlerursache: Hoher Wärmeintrag anderer Komponenten im Hochtemperaturkreislauf | T_ein, T_aus | transienter Betrieb (Beschleunigungen, Steigung) |
| 43 | | 3 | Ölkühler | mechanische Belastbarkeit | Schlechtwegfahrt und Betrieb bei kritischer Motordrehzahl, Kaltstart | A1: Hydraulikaufbauten E: Fahrzeug | Fehlerursache: Vibrationen, Druckpulsation (Öl), hohe Ölviskosität durch t_min | - | Schlechtwegfahrten |
| 44 | | 3 | Ölkühler | Druckabfalllimits | - | A1: Hydraulikaufbauten E: Fahrzeug | Fehlerursache: Zusetzung, Verdreckung durch verschmutztes Öl durch Abrieb | p_ein, p_aus, Volumenstrom, t_Öl | Aufnahme des Differenzdrucks von t_min bis t_max |

Abbildung 7.6: Funktionsanalyseblatt: Hydraulik und Schmierung 1/2

| FA-Blatt | Betrachtetes Subsystem / Komponente | Funktionsanforderungen (Zielwerte laut Lastenheft/Spezifikation) | kritische Last/Anwendung | Prüfaufbau | Erklärungen | Messparameter für die Verifikation | Prüfprozedur |
|-----------------|-------------------------------------|---|---|---|---|---|---|
| P2 Modul | | | | | | | |
| 45 | 3 3 | Ölfiler | | A1: Hydraulikaufbauten E: Fahrzeug | Fehlerursache: Zusetzung, Verdeckung durch verschmutztes Öl durch Abrieb | Volumenstrom, Druckmessung, Öltemperatur | Delta p Messung bei Max Volumenstrom und untersch. Temperaturen |
| 46 | 3 3 1 | Druckabfalllimits | - | | | | |
| 47 | 3 4 | Ventilblock | | A1: Hydraulikaufbauten | Fehlerursache: zu hoher Druck, zu hohe Öltemperatur | V _{ein} , V _{aus} , p, t | Messen der Leckage über gesamten Betriebsdruck, Veränderung durch Schaltungen bei Maximaldruck und unterschiedlichen Temperaturen |
| 48 | 3 4 1 | Überschreiten der Leckagelimits in Abhängigkeit des Drucks und der Temperatur | p _{max} , t _{max} | | | | |
| 49 | 3 4 2 | Reaktionszeiten der Solenoids | hohe Ölviskosität | A1: Hydraulikaufbauten | Fehlerursache: Probleme bei der Ansteuerung, Reibungsprobleme | Strom-Druck Zusammenhang | Sprungantwort auf Stufensprung hinauf und hinunter |
| 50 | 3 4 3 | Überschreiten der Hysterese-Limits | hohe Ölviskosität | A1: Hydraulikaufbauten | Fehlerursache: Durch die Reibung entstehen unterschiedliche Zusammenhänge von Strom zu Druck bei Druckaufbau und -abbau | Ventilkennlinie | Stufenweise Druckerhöhung und Senkung von p _{min} bis p _{max} , Beobachtung der Strom-Druck Zusammenhänge |
| 51 | 3 4 4 | mechanische Belastbarkeit | mechanische Belastung durch Reibung und Druck | A1: Hydraulikaufbauten | Fehlerursache: Einreiben der Ventile im Aluminium, Bruch durch zu hohe Druckbelastung | Ventilkennlinie, Kontrolle nach Zerlegung des Systems | Betätigung bei p _{max} |
| 52 | 3 5 | E-Pumpe | | | | | |
| 53 | 3 5 1 | Druck | Ölviskosität bei niedriger Temperatur, hohe Volumenstromanforderung (Boost nach Rekuperation) | A1: Hydraulikaufbauten B1: Kupplung 2M Prüfaufbau | Fehlerursache: Druckeinbruch oder Schmiervolumenreduktion bei Kupplungsbetätigung | Volumenstrom, Druckmessung, Öltemperatur | Betrieb bei verschiedenen Drücken und Temperaturen, Füllung von Zylindervolumen bei gleichzeitiger Schmieranforderung |
| 54 | 3 5 2 | Volumen | Ölviskosität bei niedriger Temperatur, hohe Volumenstromanforderung (Boost nach Rekuperation) | A1: Hydraulikaufbauten B1: Kupplung 2M Prüfaufbau | Fehlerursache: Druckeinbruch oder Schmiervolumenreduktion bei Kupplungsbetätigung | Volumenstrom, Druckmessung, Öltemperatur | Betrieb bei verschiedenen Drücken und Temperaturen, Füllung von Zylindervolumen bei gleichzeitiger Schmieranforderung |
| 55 | 3 5 3 | mechanische Belastbarkeit | Überdruckspeize -> hohe Viskosität Ansaugunterdruck-> (hohe Viskosität, hohe Drehzahl) | A1: Hydraulikaufbauten | Fehlerursache: Kavitation; zusätzlich bei hoher Ölviskosität verzögerte Funktion des Überdruckventils-> Druckspeize | Kavitation-> Audiotest, Materialkontrolle | Betrieb bei verschiedenen Drücken und Temperaturen mit hoher Ölviskosität |
| 56 | 3 5 4 | gewünschte Laufruhe | Betrieb bei resonanter Drehzahl, T _{min} | A1: Hydraulikaufbauten D: Antriebsstrang | Fehlerursache: Vibrationen, Kavitation | Temperatur | A1: Betrieb bei verschiedenen Drücken und Temperaturen D: Wechselschaltbetrieb |
| 57 | 3 5 5 | hydraulischer Wirkungsgrad | Betrieb bei hohem Druck, T _{min} | A1: Hydraulikaufbauten | | Vördervolumen, Druckdifferenz, Drehzahl | Betrieb bei verschiedenen Drücken und Temperaturen |

Abbildung 7.7: Funktionsanalyseblatt: Hydraulik und Schmierung 2/2

| FA-Blatt | | Betrachtetes Subsystem / Komponente | Funktionsanforderungen (Zielwerte laut Lastenheft/Spezifikation) | kritische Last/Anwendung | Prüfaufbau | Erklärungen | Messparameter für die Verifikation | Prüfprozedur |
|-----------------|--------|-------------------------------------|--|--|---------------------------------------|---|--------------------------------------|--|
| Nummerierung | Nummer | | | | | | | |
| P2 Modul | | | | | | | | |
| 58 | 4 | Lager | Belastbarkeit durch axiale und radiale Kräfte | Vibrationen und Schläge | A2.1: E-Motoraufbau mit Rütteltisch | Fehlerursache: erhöhtes Moment durch Trägheit des Rotors | DIN EN 60068-2-64 | DIN EN 60068-2-64 |
| 59 | 4 | Lager | Belastbarkeit durch Kippmomente | hohe Drehzahl, Schwingungsanregung durch VKM, Gier und Wankbewegungen von Fzg. | A2.2: E-Motoraufbau auf Hydropulser | Fehlerursache: zu hohes Moment durch Trägheit des Rotors bei Auslenkung der Drehachse | EN 60349-1 | EN 60349-1 |
| 60 | 4 | Lager | Lagerstromverträglichkeit | - | C: 3M Prüfaufbau | Fehlerursache: Lagerströme durch asymmetrischen Magnetfluss im Motor, nicht abgeschirmte Verkabelung, Frequenzumrichter | Kontrolle nach Zerlegung des Systems | Betrieb mit hohem elektrischen Anteil |
| 61 | 4 | Lager | thermisches Verhalten | stark dynamisches Fahrverhalten, hohe Drehzahlen | D: Antriebsstrang | Fehlerursache: Probleme durch Überhitzung bei Mangelschmierung, Fehldimensionierung | Kontrolle nach Zerlegung des Systems | Vollastfahrt VKM, Wechselastbetrieb |
| 62 | 4 | Lager | max. Drehzahl | hohe Drehzahlen, hohe Temperaturen, Vollast | C: 3M Prüfaufbau D: Antriebsstrang | Fehlerursache: Verschieß durch Mangelschmierung oder Überbelastung | Kontrolle nach Zerlegung des Systems | C: Wechselastbetrieb D: Vollastfahrt VKM, Wechselastbetrieb |
| 63 | 4 | Lager | | | | | | |
| 64 | 5 | Gehäuse | | | | | | |
| 65 | 5 | Gehäuse | Sterilität und Festigkeit | Stützmoment VKM und E-Motor bei Vollastbeschleunigung, Lastschläge, Schraubverbindungen zu Getriebe und VKM | D: Antriebsstrang | Fehlerursache: zu hohes maximal auftretendes Moment im Betrieb, zu geringe Wandstärke | Moment, Verformungen | Belastung mit maximalem Moment + Überlastabsicherung |
| 66 | 5 | Gehäuse | Belastbarkeit durch axiale und radiale Kräfte | Vibrationen und Schläge | A2.1: E-Motoraufbau mit Rütteltisch | Fehlerursache: zu hohe Spannungsspitzen, Fehlkonstruktion A2.1: Aufbau gemeinsam mit E-Motor | DIN EN 60068-2-64 | DIN EN 60068-2-64 |
| 67 | 5 | Gehäuse | Belastbarkeit durch Kippmomente | Auslenkung der Rotorachse bei hoher Drehzahl bei hoher Drehzahl durch Schwingungen VKM, Gier und Wankbewegungen von Fzg. | A2.2: E-Motoraufbau auf Hydropulser | Fehlerursache: zu hohe Spannungsspitzen, Fehlkonstruktion A2.2: Aufbau gemeinsam mit E-Motor | EN 60349-1 | EN 60349-1 |

Abbildung 7.8: Funktionsanalyseblatt: Lager und Gehäuse

7.1.7 Ergebnis

Das Ergebnis der Untersuchung sind eine Reihe von unterschiedliche Prüfaufbauten, mit denen die aufgelisteten Funktionen überprüft werden können:

- Hydraulikaufbauten
- E-Motor Prüfaufbauten für Umgebungsbedingungen
 - E-Motoraufbau mit Aufbau für mechanische Belastung
 - E-Motoraufbau mit Luftfeuchtigkeit- und Temperaturregelung
- Kupplung Zwei-Maschinen Prüfaufbau
- Ein-Maschinen-Schmierungs-Prüfaufbau
- E-Motor Ein-Maschinen Prüfaufbau
- Drei-Maschinen Prüfaufbau
- Antriebsstrangprüfstand

In weiterer Folge werden 6 Prüfstände näher beschrieben. Die E-Motorprüfaufbauten für die Umgebungsbedingungen werden nicht näher beschrieben. Diese leiten sich aus verschiedenen Normen ab, die später im Kapitel angeführt sind. Als zusätzlichen Feldversuch kann man auch noch das Gesamtfahrzeug betrachten, da die Zielwerte einiger Themen (Kühlung, Dichtheit) erst endgültig im Fahrzeugbetrieb verifiziert werden können.

Den Funktionen sind Messparameter und Prüfprozeduren zugeordnet, die man benötigt, um die Funktion auf dem jeweiligen Prüfstand zu verifizieren.

7.2 Prüfaufbau, Steuerung und Prüfprozedur

Die Prüfungen auf den Prüfaufbauten sind teilweise voneinander abhängig und deshalb in Ebenen gegliedert. Zuerst müssen alle Prüfungen der vorhergehenden Ebene durchgeführt werden, bevor die nächsten Schritte erfolgen. Folgende Abbildung erläutert den Zusammenhang der Tests:

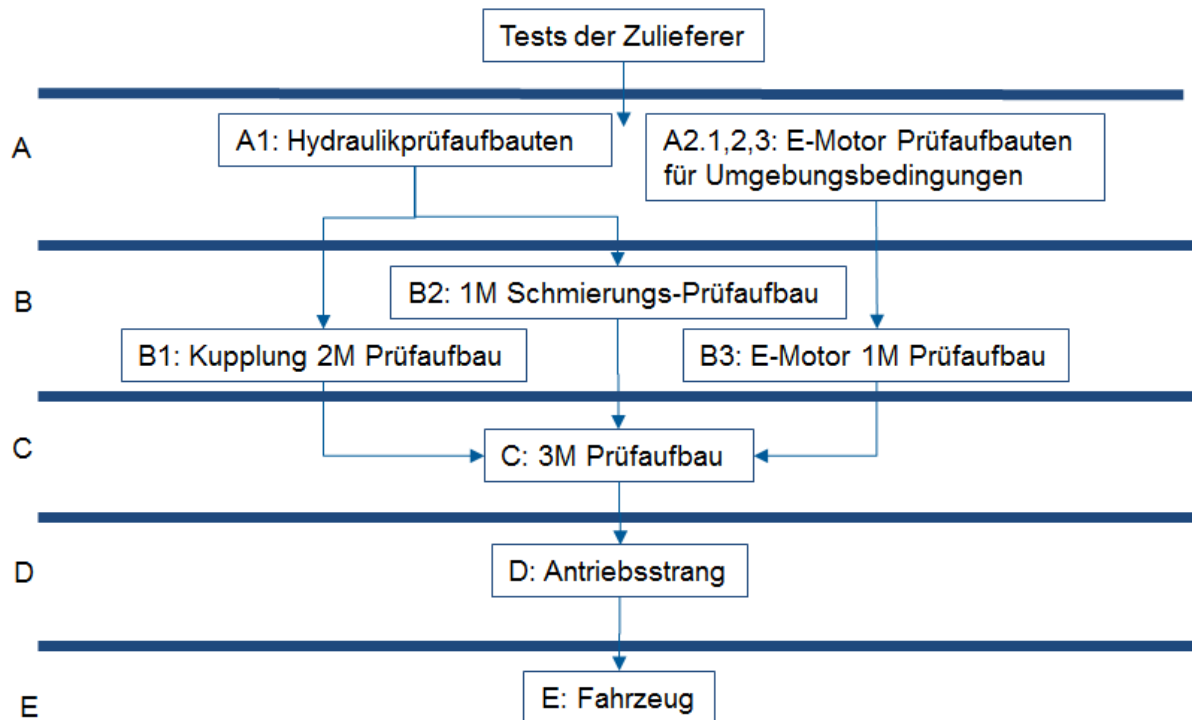


Abbildung 7.9: Zusammenhang Prüfaufbauten

7.2.1 A1: Hydraulikaufbauten

Die Funktionen die getestet werden, betreffen die Hydraulik. Es werden der Ventilblock, die E-Pumpe, der Filter und der Ölkühler überprüft.

7.2.1.1 Aufbau

Man wird jede Komponente, die man genauer überprüfen will separat auf dem Hydraulikprüfstand begutachten. Die Skizze beschreibt hier den Aufbau des Ventilblocks zur Überprüfung der Leckage wie der Regelfunktionen.

Bei diesem Aufbau befindet sich am Ausgang und am Eingang jeweils ein Volumenstrommessgerät. Es wird der Ausgangsstrom vom Eingangsstrom subtrahiert. Die Differenz ergibt die Leckage, die durch die Ventile austritt. Eine zweite Option der Leckage-Überprüfung besteht darin, den Ventilblock in eine Wanne zu legen und dann zu betreiben. Die ausgetretene Ölmenge wird nach einer Betriebsstunde gemessen und somit erhält man die Leckage pro Stunde.

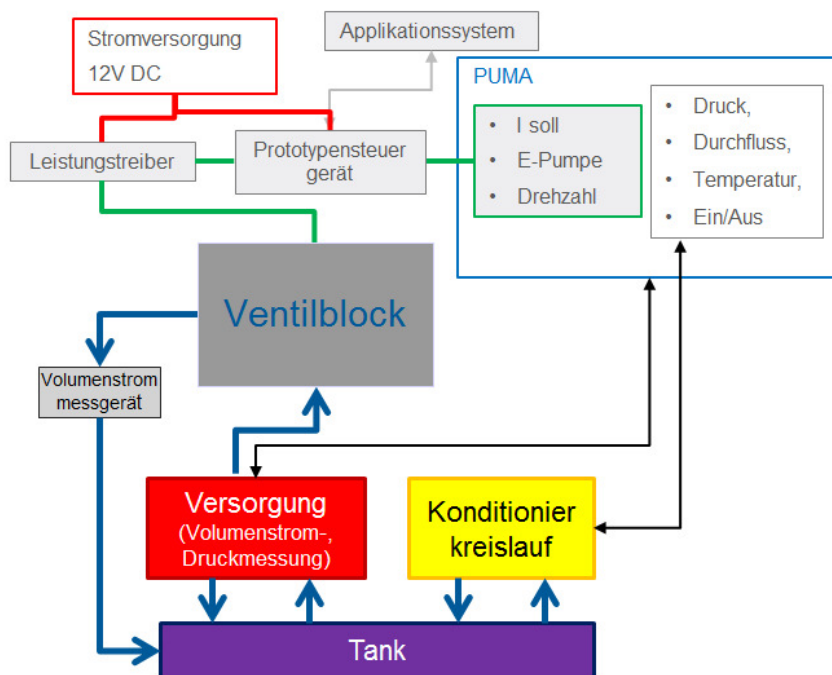


Abbildung 7.10: Hydrauliklabor Ventilblock-Leckage

Beim zweiten Aufbau werden Pumpe, Ventilblock, Filter und Kühler gemeinsam aufgebaut. Dieser Aufbau dient dazu das Zusammenspiel der einzelnen Systeme und so die Systemperformance als Gesamtes zu überprüfen.

Der Tank ist an die Konditionieranlage angeschlossen, die die gewünschte Temperatur einstellt. Die Anlage muss alle Volumenströme und Öltemperaturen darstellen können die im Betrieb vorkommen. Für die Überprüfung des Druckaufbaus wird ein Zylinder benötigt, der dem Volumen des Kupplungszyinders entspricht und der eine plötzliche Betätigung der Kupplung simuliert.

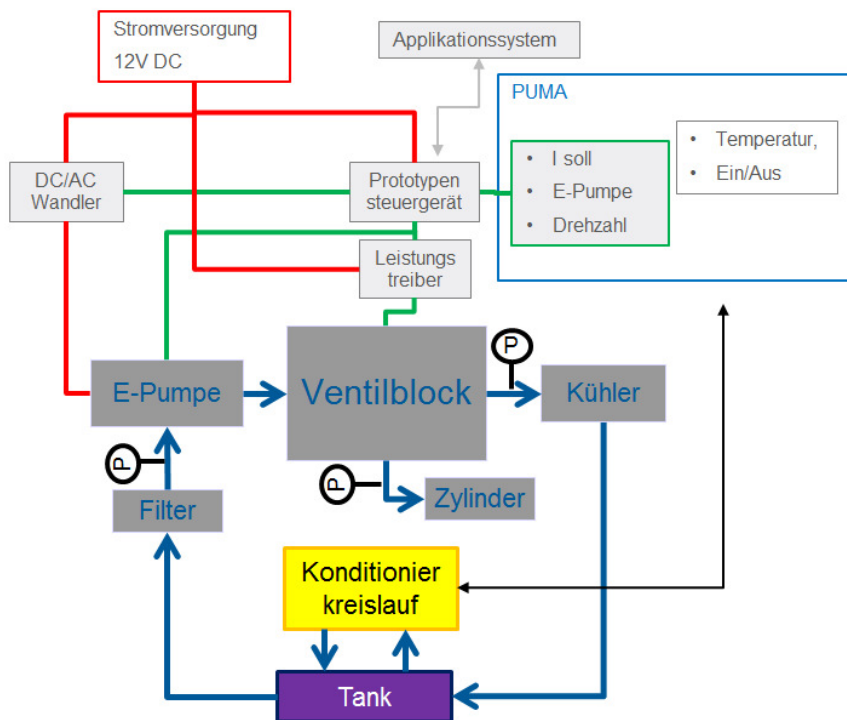


Abbildung 7.11: Hydrauliklabor Ventilblock, E-Pumpe, Filter, Kühler

7.2.1.2 Steuerung

Wenn zu diesem Zeitpunkt der Testung noch keine originale Steuereinheit zur Verfügung steht, bedient man sich eines Prototypensteuergerätes, mit dem die Steuer- und Regelalgorithmen in Echtzeit durchgeführt werden können. Das Steuergerät benötigt noch einen Leistungstreiber, der dann die notwendigen Ströme zur Verfügung stellt.

Der Konditionierkreislauf wird vom Prüfstand direkt angesteuert um die gewünschte Öltemperatur im Tank einzustellen. Versorgung mit Druck und Volumenstrom kann entweder über die Versorgungseinheit des Hydrauliklabors oder die E-Pumpe geschehen. Die Versorgungseinheit wird direkt vom Prüfstand gesteuert. Die Pumpe wird über eine Prototypensteuerung angesteuert, die wiederum von einem Applikationssystem und dem Prüfstand die Informationen erhält. Zudem benötigen Pumpe, Leistungstreiber und Prototypensteuerung eine Stromversorgung. Da die Pumpe mit Wechselstrom betrieben wird, ist hier noch ein DC/AC Wandler zwischengeschaltet. Beim Gesamtaufbau mit allen Hydraulikkomponenten wird die Steuerungshardware verwendet, die auch bei den weiteren Prüfständen zum Einsatz kommt, um Komplikationen durch die Ansteuerung früh zu erkennen.

7.2.1.3 Prüfprozedur

Ventilblock

Eine kleine Leckage ist beim Ventilblock immer vorhanden, da die Ventile ein Spiel haben um beweglich zu sein. Diese Leckage darf aber eine definierte Menge nicht überschreiten. Bei der Überprüfung muss der Druckbereich vom mittleren Betriebsdruck bis p_{\max} abgefahren werden. Zusätzlich muss die Temperatur variiert werden. Da bei steigender Temperatur das Öl dünnflüssiger wird, steigt mit der Temperatur die Leckage an. Der kritische Zustand ist bei p_{\max} und t_{\max} .

Weiters wird die Regelqualität des Ventilblocks überprüft. Bei Öltemperaturen von t_{\min} bis t_{\max} , bei unterschiedlichen Lastpunkten von p_{\min} bis p_{\max} und bei charakteristischen Volumenströmen, werden Geschwindigkeit und Genauigkeit des Druckaufbaus überprüft. Durch die entstehende Reibung zwischen den Ventilen und den Ventilbohrungen tritt eine sog. *Hysterese* auf. Unter Hysterese versteht man die Differenz des Ausgangssignals zwischen ansteigenden und abfallenden Sollwert bei gleichem Eingangssignal. Die Ausprägung der Hysterese ist bei t_{\min} bis t_{\max} und p_{\min} bis p_{\max} im Betrieb für alle Ventile zu überprüfen. Neben der Hysterese werde auch die Linearität, die Wiederholbarkeit sowie die Empfindlichkeit überprüft. Die Linearität bezeichnet die Abweichung von einer Geraden zwischen den Ausgangswerten Volumenstrom oder Druck und dem Eingangsstrom. Bei der Wiederholbarkeit wird immer wieder von 0 auf 50% und 100% des Eingangssignals geschaltet, um Abweichungen des Ausgangswertes zu erkennen. Die Empfindlichkeit gibt an, bei welcher Schwelle der Stromänderung das Ventil anfängt zu reagieren.

Weitere wichtige Punkte sind die Reaktionszeit und die Dynamik der Ventile. Um dies zu überprüfen werden Sprung- und Frequenzantwort überprüft. Unter der Sprungantwort versteht man die Dauer die vom Eingangssignal bis zum Anliegen des gewünschten Ausgangsdrucks oder Strom am Ventil vergeht. Es wird 100% des Eingangswertes mittels einer Sprungfunktion angelegt und dann der Verzug bis zum Erreichen des Sollwertes gemessen. Dieser ist ein Maß für die Geschwindigkeit mit der ein Ventil arbeiten kann. Bei der Frequenzantwort wird beschrieben, bei welcher Eingangssignalfrequenz das Ventil noch hinreichend genau arbeiten kann. Zur Beschreibung werden Amplitudenverhältnis und Phasenverschiebung benutzt. Je höher die Frequenz ist, desto mehr eilt der Ausgangswert dem Eingangswert hinterher. Dadurch wird vom Ventil der angestrebte maximale Sollwert nicht mehr erreicht, weil das Signal schon wieder abfällt und das Ventil in die Gegenrichtung zwingt.

Bei der Überprüfung wird die Frequenz- angefangen von einem niedrigen Wert von ungefähr einem Hertz- schrittweise erhöht, bis die Phasenverschiebung bis zum festgelegt kritischen Wert angestiegen und das Amplitudenverhältnis gesunken ist. Im Bode Diagramm werden Amplitudenverhältnis und Phasenverschiebung über die Frequenz dargestellt.⁸⁴

Bei der Überprüfung der mechanischen Belastbarkeit wird der im Betrieb maximale Öldruck bei geringer Temperatur und somit hoher Ölviskosität angelegt und die Ventile betätigt. Die Kontrolle der Einzelteile des Ventilblocks gibt Aufschluss über den Verschleiß der Bohrungen der Ventile.

Pumpe

Bei der Funktionsanforderung der Pumpe werden der gewünschte Druck- und Volumenstromaufbau in Abhängigkeit der Temperatur sowie die Laufruhe überprüft. Der kritische Betrieb ist dann gegeben, wenn gleichzeitig hoher Druck und ein hoher Volumenstrom gefordert ist. Dies tritt im Zuge einer Vollastbeschleunigung auf, wenn zuvor gerade rekuperierte worden und der Kupplungszyylinder entleert ist. Die Kupplung muss bei gleichzeitig erhöhter Schmierungsanforderung schnellst möglich geschlossen werden. Am Prüfstand öffnet sich dann das Ventil für die Kupplungsbetätigung und füllt den Zylinder mit Öl bis der gewünschte Druck anliegt, der dort gemessen wird. Hier wird auch das Zusammenspiel zwischen Schmierung und Kupplung beurteilt. Da hier dieselbe Pumpe Schmierung und Kupplung versorgt, kann es zu Versorgungsengpässen der Schmierung kommen, wenn die von der Steuerung priorisierte Kupplung zu viel Volumen zur Betätigung benötigt.

Bei hoher Ölviskosität kommt zudem noch das Problem der Kavitation und der Überdruckspitzen hinzu. Bei der Kavitation saugt die Pumpe mit zu hoher Drehzahl an, sodass ein Unterdruck entsteht, da das Öl nicht so schnell nachströmen kann. Fällt der Druck unter den Verdampfungsdruck kann dies bewirken, dass das Öl vom flüssigen in den gasförmigen Zustand übergeht. Steigt der Druck wieder an, kollabieren diese Dampfblasen unter Freisetzung großer Spannungs- und Temperaturspitzen, die der Pumpe massiv schaden.⁸⁵

Überdruckspitzen kommen zustande, weil bei hoher Ölviskosität das Überdruckventil nicht ausreichend schnell reagiert. Die Pumpe muss also alle ihre geforderten Betriebspunkte auch bei hoher Ölviskosität durchführen können, was es zu testen gilt.

⁸⁴ Vgl. (SUNHYDRAULIK, 2010)

⁸⁵ Vgl. (Wikipedia, 2014)

Der Gesamtwirkungsgrad der Pumpe ergibt sich aus der Multiplikation von volumetrischem und mechanischem Wirkungsgrad. Die mechanischen Verluste ergeben sich aus dem viskosen Verhalten des Öls, sowie aus der Reibung zwischen Gleitflächen z.B. bei Dichtungen und Lager. Die volumetrischen Verluste entstehen durch Flüssigkeitsleckagen, der Wirkungsgrad ergibt sich aus der Division von ausströmender zu einströmender Flüssigkeitsmenge. Die Höhe der Verluste hängen im Wesentlichen von der Viskosität des Öles ab. Der mechanische Wirkungsgrad steigt mit niedriger Viskosität, während der volumetrische Wirkungsgrad bei hoher Viskosität am größten ist. Durch die Multiplikation ergibt sich ein optimaler Betriebsbereich. Weiters haben aber auch noch der Druck und die Drehzahl Einfluss auf die Verluste. Generell steigen, bei höherem Druck, die Verluste an. Die Abbildung zeigt die Veränderung von theoretischem, zu effektivem Förderstrom bei gleichbleibendem Verdrängungsvolumen in Abhängigkeit von Druckdifferenz und Drehzahl.^{86, 87}

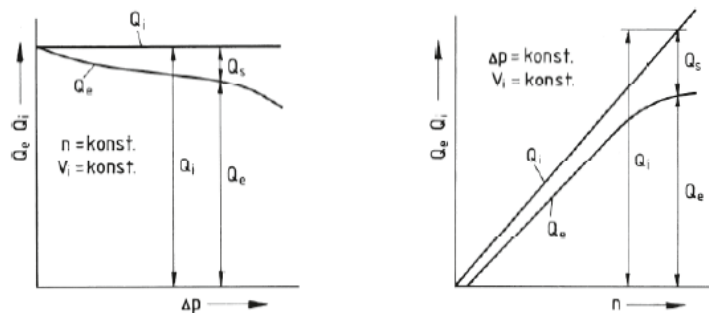


Abbildung 7.12: Verläufe des effektiven und theoretischen Förderstroms⁸⁸

Filter

Das Öl erfährt einen Druckabfall durch den Filter, welcher nach dem Filter gemessen wird. Dieser Druckwert gibt auch darüber Aufschluss, wie viel Öl über das Überdruckventil im Kreis gepumpt wird.

Kühler

Der Kühler mit Originalschläuchen wird ebenfalls mitaufgebaut. Falls dieser zu diesem Zeitpunkt noch nicht zur Verfügung steht, wird er durch eine Blende ersetzt. Bei hoher Ölviskosität steigt der Druck in der Zuleitung zum Kühler so an, sodass diese bersten kann. Hier wird

⁸⁶ Vgl. (Grollius, 2012 S. 69)

⁸⁷ Vgl. (Exxon-Mobil, 2009)

⁸⁸ (Grollius, 2012 S. 70)

eine Druckmessung durchgeführt. Durch die richtig eingestellte Blende wird lediglich der Druckabfall am Kühler dargestellt.

7.2.2 A2: E-Motor Prüfaufbauten für mechanische Umgebungslast

Um die Festigkeit und Steifigkeit des E-Motors vorab zu überprüfen wird dieser starken mechanischen Stößen ausgesetzt. Zudem muss das Verhalten des Motors bei Auslenkung der Motorachse überprüft werden. Diese Überprüfungen werden später in der Validierungsphase weiter fortgeführt.

Diese Überprüfungen werden im Vorfeld durchgeführt, um sich ein Bild von der Belastbarkeit der Konstruktion zu machen. Falls hier, binnen kurzer Zeit, Risse, Brüche oder unzulässige Verformungen auftreten, muss die Konstruktion geändert werden. Für diese Prüfungen ist keine ausgereifte E-Motor Betriebssoftware von Nöten, was die Durchführung zu Beginn der Testreihe erleichtert. Der Motor kann auch auf die gewünschte Drehzahl geschleppt werden, somit ist auch keine Abhängigkeit von der Leistungselektronik vorhanden. In dieser Arbeit ist keine detailliertere Ausführung vorgesehen, für weitere Informationen siehe: DIN EN 60068-2-27, DIN EN 60068-2-64 und EN 60349-1.

Zudem muss überprüft werden, dass es durch eine Fehlkonstruktion nicht zu Kondenswasser-Ansammlungen im E-Motor kommt. Diese können in weiterer Folge einen Kurzschluss auslösen. Hierfür wird eine Haube benötigt die den E-Motorprüfstand abdeckt und unter der unterschiedliche Temperaturen und Luftfeuchten eingestellt werden können. Für weitere Informationen siehe: DIN EN 60068-2-38

7.2.3 B1: Kupplung 2 Maschinen Prüfaufbau

Ziel des Aufbaus ist es, die mechanischen Eigenschaften der Kupplung sowie die Eigenschaften der Kupplung als tribologisches Systems zu beurteilen. Das System besteht aus mehreren Grund- und Gegenkörpern, den Lamellen und dem Kolben. Sowie aus dem Zwischenmedium Öl, dass zugleich auch das Umgebungsmedium bildet. Reibung tritt dort auf wo die Ge-

schwindigkeiten der sich berührenden Körper in Richtung und Geschwindigkeit unterschiedlich sind.⁸⁹

7.2.3.1 Aufbau

Der C0 Prüfstand besteht aus zwei E-Maschinen die jeweils als An- und Abtriebsmaschine fungieren. Die Kupplung ist im P2 Gehäuse dazwischen angebracht. Der E-Motor wird durch einen Dummy ersetzt oder überhaupt weggelassen, da er für den Aufbau nicht von Bedeutung ist. Die Kupplung wird an den originalen Hydraulikkreislauf angeschlossen, der die notwendigen Volumenströme, Drücke und Temperaturen bereitstellt. Die Temperatur des Öls wird durch eine Konditionieranlage geregelt. Für einige Funktionsanforderungen wird ein kühles System benötigt. Dies wird über eine Kältekammer herbeigeführt, mit der das P2 Modul auf die gewünschte niedrige Temperatur gekühlt wird.

Um die Schweißnähte auf ihre Belastbarkeit zu prüfen, werden die Lamellen der Kupplung entfernt und durch Stahlscheiben ersetzt, die die Kupplung fix miteinander verbinden. Für die Schweißnaht die den Rotor mit dem Lamellenträger verbindet, werden dann zusätzlich noch Rotor und Stator Dummy miteinander verbunden.

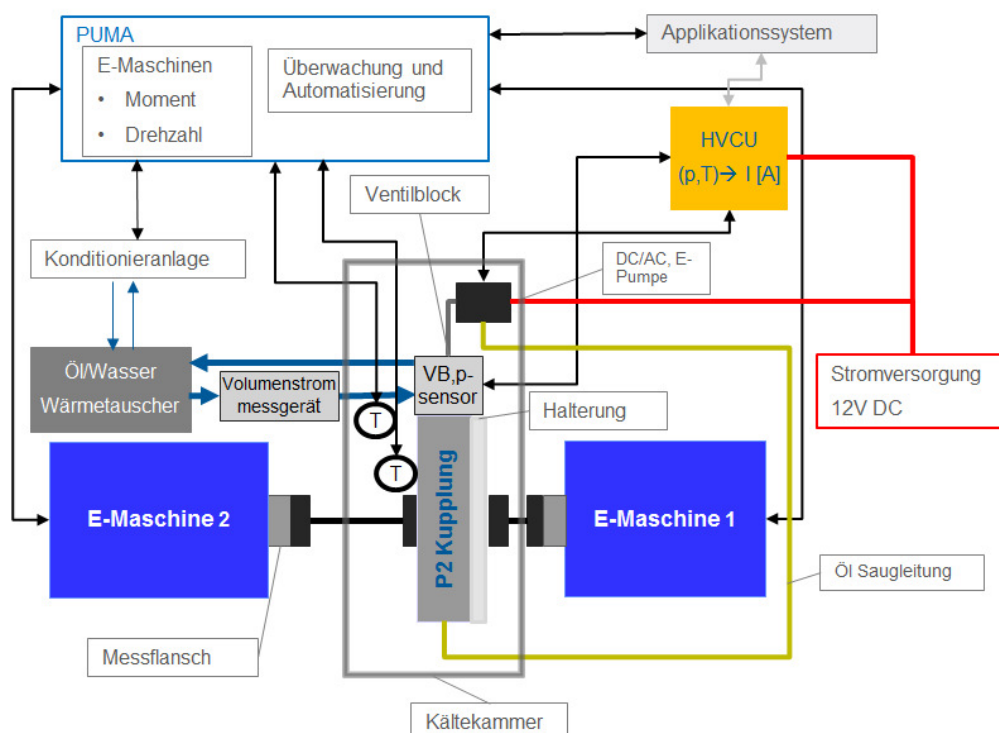


Abbildung 7.13: 2M Prüfaufbau für Kupplung

⁸⁹ Vgl. (GfT, 2002 S. 6, 29)

7.2.3.2 Steuerung

Die HVCU wird benötigt um die Pumpe und den Ventilblock zu regeln. Über den Prüfstand oder das Applikationssystem, wird die HVCU appliziert. Der Prüfstand regelt die E-Maschinen und kann Drehzahl- und Momentunterschiede erkennen.

7.2.3.3 Prüfprozedur

Kupplung C0

An die Kupplung sind eine Reihe Funktionsanforderungen gestellt. Die Kupplung muss das maximal auftretende Moment bei maximal möglichem Öldruck übertragen können. Durch Verformungen des Kolbens oder des Korbes der Kupplung könnte das maximale Moment nicht übertragbar sein, dass ansonsten lineare Verhältnis zwischen Moment und Öldruck verändert sich, da selbst bei mehr Öldruck nicht mehr Anpresskraft erzeugt wird. Die Hydraulik stellt den Öldruck zur Verfügung und es werden Moment und Gegenmoment der E-Maschinen gemessen.

Alle Komponenten der Kupplung müssen dem maximal übertragbaren Moment standhalten. Die kritischen Bereiche sind die zwei Schweißnähte, die den äußeren Lamellenträger mit der Welle und dem Rotor verbinden. Zu diesem Zweck wird bei fest verbundenen Lamellentragern das System mit einem Moment, das über dem maximalen Moment im Betrieb liegt, verspannt, um die Schweißnahtfestigkeit zur Welle zu überprüfen. Für die Naht zum Rotor werden Stator und Rotor miteinander starr verbunden. Danach wird die Kupplung mit Moment belastet, das nun über die Schweißnaht zum Stator hinauf ein Gegenmoment erfährt.

Die Kupplung muss das angeforderte Moment bei definiertem Öldruck genau reproduzieren können. Es darf nur eine geringe Hysterese vorhanden sein. Dies muss überprüft werden, indem man wiederholt von niedrigerem und höherem Druckniveau einen definierten Soll-druck anfährt und die Momente vergleicht. Diese Messung wird bei unterschiedlichen charakteristischen Temperaturen des Öls durchgeführt. Eine besondere Bedeutung hat diese Funktion für den Impulsstart, da die Kupplung hier im Betrieb tatsächlich schlupfend betrieben wird, um eine konstante Momentübertragung bei variierender Drehzahl zu ermöglichen.

Die nächste Funktionsanforderung betrifft das Erreichen der Öffnungs- und Schließzeiten der Kupplung. Beim Wegfahren aus dem Stand oder dem Beschleunigen nach einer Rekuperationsphase ist es von besonderer Bedeutung, dass die Kupplung schnell ihren Kiss-Point er-

reicht, bei dem sie beginnt Moment zu übertragen. Bei der Betätigung der Kupplung wird der Raum hinter dem Kolben mit Öl gefüllt und der Kolben nach vorne gedrückt. Dieser Druck erfährt einen Gegendruck durch die Rückstellfeder und durch das Öl, das sich im Raum vor dem Kolben befindet. Dieses Öl bewirkt -zusätzlich zur Feder- eine Rückstellkraft auf den Kolben, die durch die Fliehkraft bei Drehung, die auf das Öl wirkt, hervorgerufen wird. Je viskoser das Öl ist, je niedriger also die Temperatur, desto größer die Gegenkraft des Öls im vorderen Raum, welches durch Leckageschlitze entweichen muss. Das Gleiche gilt für die Öffnung der Kupplung. Hier muss die Rückstellfeder nun das Öl aus dem Kolbenraum pressen. Je höher die Viskosität, desto länger dauert dieser Vorgang. Es muss bei verschiedenen Betriebstemperaturen, vor allem aber im Bereich t_{\min} , die Öffnungs- und Schließzeit der Kupplung überprüft werden, um anzuzeigen ab wann an der zweiten E-Maschine ein Moment anliegt oder kein Moment bzw. nur mehr das Schleppmoment anliegt. Bei hohen Drehzahlen oder hoher Ölviskosität könnte es sein, dass die Hydraulik nicht schnell genug den gewünschten Druck aufbauen kann, da zu viel Volumen an die Schmierung abgegeben wird oder die Pumpe, wegen der Viskosität, nicht genug Öl fördern kann.

Der Kolben der Kupplung hat eine gewisse Leckage, da das Öl über eine Drehdurchführung dort hingelangt. Es ist zu überprüfen, ob die Leckage dem gewünschten Limit entspricht. Für diese Überprüfung wird anstatt des Ventilblocks ein Adapter befestigt, der nur den Kuppelungskanal mit Öl beaufschlagt. Mittels einer Blende mit gemessener Druckdifferenz wird bei verschiedenen Betriebsdrücken und Temperaturen von p_{\min} bis p_{\max} und t_{\min} bis t_{\max} , der Volumenstrom bestimmt, der als Leckage verloren geht.

Eine weitere Funktionsanforderung betrifft das Schleppmoment, das verstärkt bei hoher Differenzdrehzahl und Ölviskosität auftritt. Da bewegte und unbewegte Lamellen im offenen Zustand nur wenige Millimeter auseinanderliegen, bewirkt das Öl, das durch die bewegten Lamellen im Kreis gefördert wird, eine Reibkraft in Umfangsrichtung die über den Radius der Kupplung im Schleppmoment resultiert. Die Kupplung muss bei verschiedenen Betriebsdrehzahlen und Temperaturen betrieben werden, um das Schleppmoment zu erfassen. Zusätzlich muss auch überprüft werden, ob sich die Kupplung bei hoher Ölviskosität wirklich ganz öffnet, da dies natürlich großen Einfluss auf das Schleppmoment hat.

Die Funktionsanforderung der geringen Rupfneigung betrifft das Zusammenspiel zwischen Belag und Öl und tritt im Betrieb während der Schlupfphasen auf. Die C0 wird nicht als Anfahrkupplung verwendet, da dies über das Anfahrlement des Getriebes geschieht. Der einzi-

ge Schlupfzustand tritt demnach beim Impulsstart auf. Die Kupplung wird im Test bei unterschiedlichen Drehzahlniveaus in den Schlupfzustand gebracht um die Belastung bei einem Impulsstart zu simulieren. An den Momenten der E-Maschinen lässt sich die Rumpfneigung eindeutig beurteilen. Diese Überprüfung muss bei verschiedenen Temperaturen des Öls von t_{\min} bis t_{\max} durchgeführt werden, da die Rumpfneigung sich mit der Temperatur verändern kann.

Die Kupplung darf sich nur innerhalb ihrer gegebenen Grenzen verformen. Falls tatsächlich eine zu große elastische oder gar plastische Deformation auftritt, bewirkt diese einen Abfall im übertragbaren Moment bzw. eine Kollision der Kupplung an ihre Umgebung. Die kritischen Teile sind der Kolben und der äußere und innere Lamellenträger, die durch die Druckkraft des Öls belastet werden, sowie der Teil der Kupplung, der mit dem Kolben den Raum einschließt in dem sich die Rückstellfeder befindet. Dieser Teil wird durch die Fliehkräfte des Öls radial belastet. Im Nachhinein sind beim zerlegten System Verformungen und Reibspuren zu überprüfen. Die Kupplung wird bei der Überprüfung wiederholt mit dem maximalen Betriebsdruck und der maximalen Drehzahl beaufschlagt.

Eine weitere Funktionsanforderung an die Kupplung und das Öl ist die Wärmeabfuhr aus der Kupplung. Das Öl muss die Wärme abtransportieren, die bei häufiger Betätigung entsteht. Das Öl strömt von innen nach außen durch die Kupplung, fließt dabei durch die Lamellen und schmiert und kühlt diese. Es wird ein Volumenstrommessgerät vor dem Ventilblock angebracht, zudem wird die Temperatur im Ölkreislauf vor und direkt hinter der Kupplung gemessen. Das Öl wird auf eine realistische, aber hohe Betriebstemperatur konditioniert. Während der häufigen Betätigung der Kupplung wird nun der Temperaturverlauf von t_{aus} mit einer vorgegebenen Frequenz gemessen und mit dem Volumen des durchgeflossenen Öls multipliziert, um daraus die Wärmemenge zu erhalten die abgegeben wird. Die Wärmemenge muss ein beharrendes Maß erreichen.

Die einzelnen Komponenten der Kupplung, vor allem Kolben und Lamellen, müssen die gewünschte Verschleißfestigkeit erreichen. Durch die Betätigung des Kolbens reibt dessen Dichtung entlang des Lamellenträgers und wird dadurch belastet. Ebenso werden die Reiblamellen beim Schlupfbetrieb belastet. Im Test muss der Kolben häufig betätigt, sowie Impulsstart ähnliche Schlupfbetriebe dargestellt werden. Am zerlegten System sind dann die Verschleißspuren zu beurteilen.

Bei besonders kalter Umgebung erhöht sich die Viskosität des Öles und damit auch die Kraft die benötigt wird um es zu transportieren. Es ist zu überprüfen, dass bei den niedrigsten, im Betrieb realistischen, Temperaturen das Öl von der Pumpe gefördert werden kann. Das gesamte System wird am Prüfstand mittels der Kältekammer abgekühlt und dann in Betrieb genommen. Die Pumpe muss Öl ansaugen können, es darf keine Kavitation auftreten und Drücke für Kupplung und Schmierung müssen aufgebaut werden, um einen Betrieb des Fahrzeugs zu ermöglichen.

Öl

Das Öl wird auf seine Neigung zur Schaumbildung hin überprüft. Bei charakteristischen Betriebspunkten mit hohen Drehzahlen und erhöhten Öltemperaturen wird überprüft ob an der Ölentlüftungsschraube Öl austritt. Dies würde auf eine Verschäumung hinweisen.

Eine weitere Funktionsanforderung an das Öl sind seine tribologischen Eigenschaften. Diese beeinflussen den Reibwert zwischen den Lamellen. Der Reibwert sollte möglichst über den gesamten Betrieb konstant sein. Dies ist zu überprüfen, in dem bei verschiedenen Startdrehzahlen ein Kupplungsdruck eingestellt wird, der dazu führen sollte, dass die Drehzahl linear mit der Zeit synchronisiert. Ist dies nicht der Fall, dann lässt sich daraus schließen, dass der Reibwert nicht konstant ist. Neben der Relativgeschwindigkeit verändert sich auch die Temperatur in der Kupplung, sie steigt durch die Reibung an. Dies soll auch keine Auswirkungen auf den Reibungskoeffizient haben.

7.2.4 B2: 1M Schmierungs-Prüfaufbau

Das Hauptziel dieses Prüfaufbaus ist die Überprüfung der Schmierung. Es muss sichergestellt werden, dass im gesamten Betriebsbereich alle Komponenten mit genügend Öl versorgt werden.

7.2.4.1 Aufbau

Das P2 Modul kann z.B. mit einem durchsichtigen Kunststoffgehäuse zusammengebaut werden. Eine andere Möglichkeit besteht darin ein Fenster auszuschneiden und mit durchsichtigem Material zu verschließen. Der Aufbau findet an einem Ein-Maschinen Prüfstand statt, wobei die E-Maschine um die Antriebsachse, sowie um die Befestigungsachse schwenkbar

ist. An der Vorderseite wird das Modul mit einem Adapter für das Pilotlager verschlossen. Der E-Motor wird durch einen Dummy ersetzt, weil er für diesen Aufbau nicht benötigt wird. Es werden die Originalteile der Hydraulik verwendet.

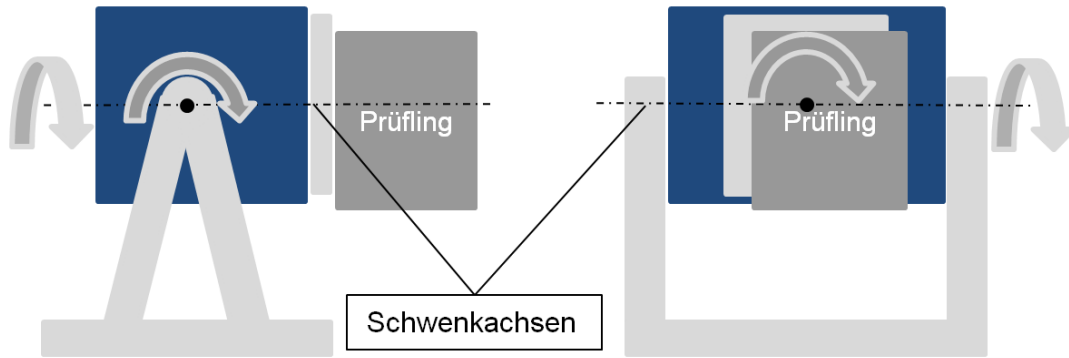


Abbildung 7.14: : Prinzipskizze Schwenkprüfstand

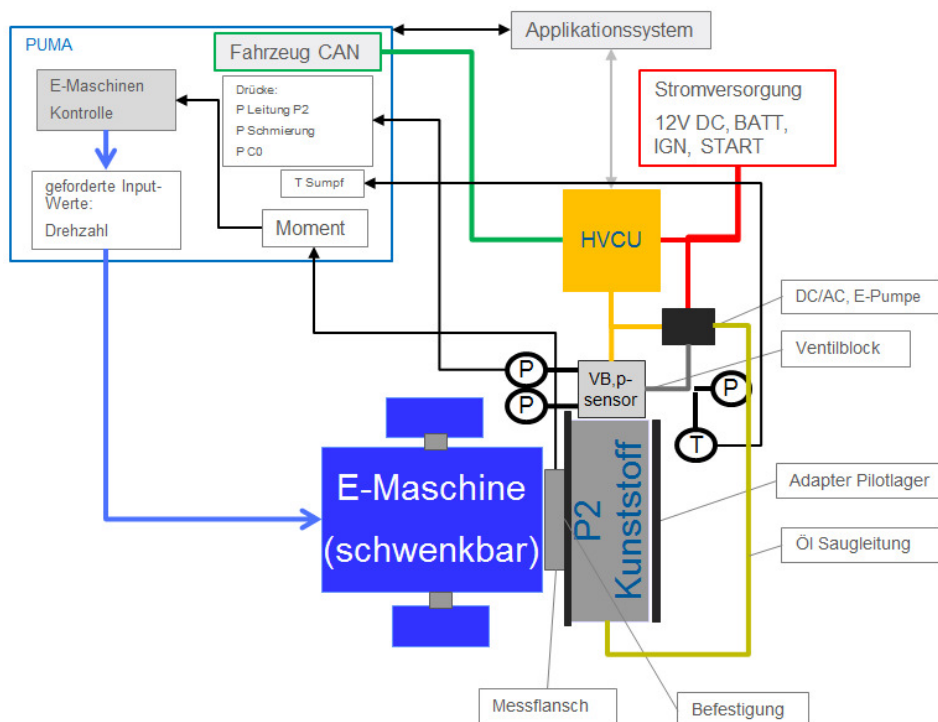


Abbildung 7.15: Schwenkprüfstand mit Kunststoffgehäuse⁹⁰

⁹⁰ (AVL List GmbH, 2014)

7.2.4.2 Steuerung

Die HVCU steuert den Ventilblock und die E-Pumpe. Der Aufbau bedarf weder einer Motorsteuerung und noch einer Leistungselektronik, ebenso wenig wird ein Batteriemanagementsystem benötigt. Alle anderen benötigten Signale werden vom Prüfstand bzw. dem Applikationssystem zur Verfügung gestellt.

7.2.4.3 Prüfprozedur

| Funktionsanforderungen | Einflussgrößen | Parameterbereich | messtechnisch erfasste Größen | Zielgrößen |
|---|---|--|---|--|
| Bereitstellung Fördervolumen für Schmierung | Öltemperatur Ölniveau | T _{öl} : -30- 60 °C n: 0- n _{max} U/min Winkel: 0+-45° | Drücke Ventilblock Drehzahl Öl-Sumpftemperatur Temperatur Lager Fördervolumen Pumpe Pumpendrehzahl | z. B. 2 Liter pro Minute |
| geringe Schaumneigung | Öltemperatur Ölniveau | | | keine Schaumbildung |
| Ölrückfluss | Öltemperatur Fördermenge | | | Minimaler Anstieg des Ölstandes im Modul |
| Entlüftung | Öltemperatur Ölniveau Schwenkwinkel | | | kein Ölaustritt kein Wassereintritt |
| Versorgung Saugstelle | Öltemperatur Ölniveau Schwenkwinkel | | | kein Lufteinschluss im angesaugten Öl |

Tabelle 7.1: Überblick über Funktionsanforderungen und versch. relevante Größen zur Funktionserprobung am Schwenkprüfstand

Die Funktionsanforderung die überprüft werden, sind die Schmierung des Systems und die Verschäumung des Öls bei Neigung. Um die Schmierung zu gewährleisten, muss das nötige Ölvolumen angesaugt werden. Bei besonders kühlem Öl und sehr starker Neigung fördert die Pumpe unter Umständen nicht genug Öl. Das Problem wird zusätzlich noch verstärkt, wenn sich das Fahrzeug in einem Betrieb befindet, in dem die Kupplung häufig betätigt wird. Bei jeder Betätigung der C0 muss zuerst das Volumen des Kolbens gefüllt und der Druck aufgebaut werden. In dieser Zeit muss die Pumpe also Schmierung und Kupplung mit Öl versorgen. Da die Kupplungsbetätigung Vorrang gegenüber der Schmierung hat, wird zu wenig Öl für die Schmierung zur Verfügung gestellt.

Das P2 Modul wird bei verschiedenen charakteristischen Drehzahlen und Temperaturen betrieben. Der Aufbau wird dabei geschwenkt, um Kurvenfahrten, Steigungen oder Längsbeschleunigungen darzustellen. Der Öldruck liegt allerdings wegen der Belastbarkeit des Kunststoffes unter dem maximalen Betriebsdruck. Durch das durchsichtige Kunststoffgehäuse können während des Betriebs Sichtkontrollen durchgeführt werden, die eine Abschätzung erlauben, ob genug Öl an den gewünschten Stellen vorhanden ist. Bei nicht einsehbaren Stellen müssen kleine Bohrungen angebracht werden, die man mit einem Schlauch versieht.

Wenn Öl in den Schlauch gelangt, ist bewiesen, dass grundsätzlich Öl an dieser Stelle vorhanden ist. Die Verschäumung des Öls tritt auf, wenn Luft in das Öl gelangt. Saugt die Pumpe Luft statt Öl, dann ist dies der Fall. Dies passiert wenn das Ansaugrohr der Pumpe aufgrund der starken Neigung aus dem Ölsumpf herausragt. Es ist zu verifizieren, dass bei allen dynamischen Vorgängen im Fahrzeug dies nicht passiert. Die Werte dafür ergeben sich aus der maximalen Steigfähigkeit und aus den gewünschten Beschleunigungs- und Verzögerungswerten.

7.2.5 B3: E-Motor 1M Prüfaufbau

7.2.5.1 Aufbau

Der Ein-Maschinen E-Motor-Prüfstand besteht aus einer E-Maschine für Eintriebs- und Gegenmoment, dem E-Motor, der im P2 Modul Gehäuse verbaut ist, und dem Ventilblock. Die Kupplung wird nicht benötigt. Die Lamellen können durch Scheiben ersetzt werden, die die Lamellenträger fix miteinander verbinden. Der Ventilblock dient lediglich zur Schmierungsversorgung. Für die Kühlung des E-Motors wird ein Kühlkreislauf benötigt, der verschiedene Eingangstemperaturen konditionieren kann. Hierzu werden Temperaturmessstellen jeweils bei den Aus- und Eingängen appliziert, sowie Volumenstromgeräte zwischen Wärmetauscher und E-Motor und im Niedertemperaturkreislauf installiert. Zusätzlich wird das Drehmoment zwischen E-Maschine und E-Motor gemessen.

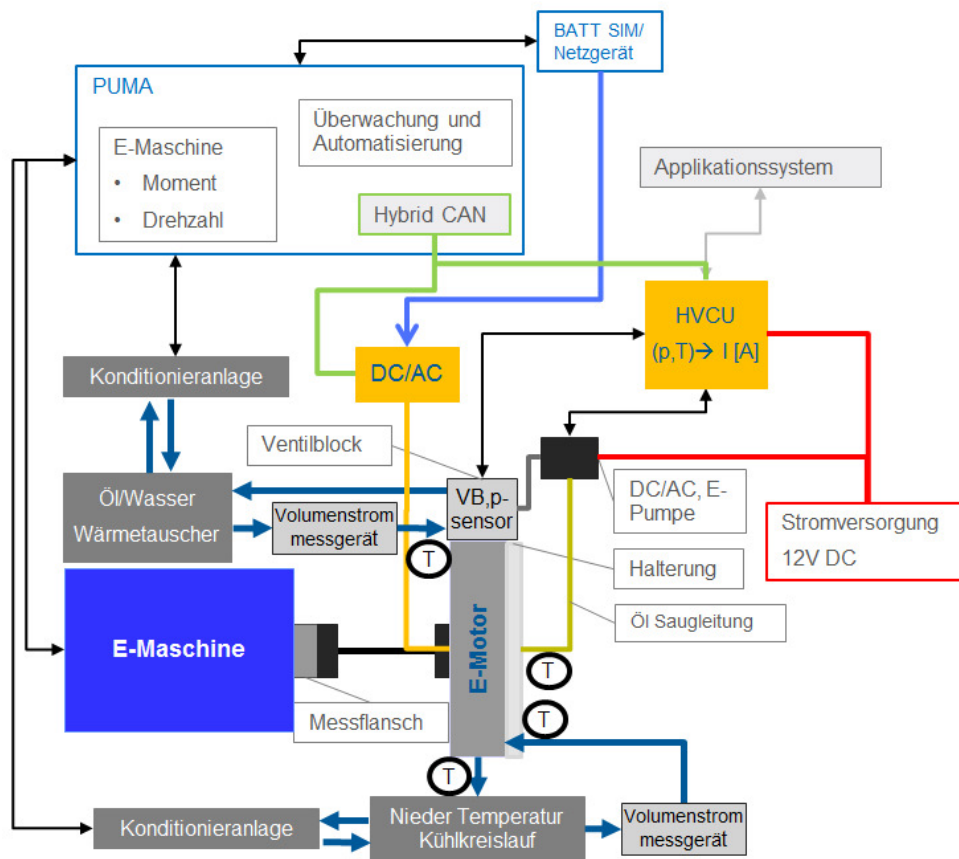


Abbildung 7.16: Ein-Maschinen E-Motor Prüfstand

7.2.5.2 Steuerung

Für den Betrieb sind die Leistungselektronik und der Batteriesimulator von Nöten. Die HVCU muss einsatzfähig sein und alle Funktionen, die an diesem Aufbau getestet werden, ausführen können. Die HVCU steuert auch den Ventilblock und die E-Pumpe, die für die Schmierung sorgen. Die E-Maschine wird direkt vom Prüfstand aus gesteuert.

7.2.5.3 Prüfprozedur

| Funktionsanforderungen | Einflussgrößen | Parameterbereich | messtechnisch erfasste Größen | Zielgrößen |
|---|--|--|---|---|
| kontinuierliche Leistungsabgabe | Klemmenspannung Wicklungstemperatur | U: U_min - U_max T_w: T_um-180 °C T_k: 40-60°C V_k: 1-1.5 l/min | T: T_Wicklung p: Druckdifferenz_Kühler M: M_aus Drehzahl, I, U, Wicklungstemperatur Polradwinkel Volumenstrom | Erreichen von 10 kW über 1 Minute |
| Leistungsspitze | Klemmenspannung Wicklungstemperatur | | | Erreichen von 25 kW über 10 Sekunden |
| Wirkungsgradkennfeld als Motor und Generator | Klemmenspannung | | | z.B. Wirkungsgrad größer 90% |
| geringe Eisenverluste und Lagerreibungsverluste | - | | | - |
| EMV | - | | | Signalübertragung Lagesensor |
| Momentenaufbau | Klemmenspannung Wicklungstemperatur | | | - |
| Betriebssicherheit bei max. Drehzahl | - | | | keine Schädigung der Konstruktion bei durch n_max Betrieb |
| thermisches Verhalten | Klemmenspannung Wicklungstemperatur Kühlmitteldurchfluss Kühlmitteltemperatur | | | Abgabe von vorg. Leistung (kont., max) |

Tabelle 7.2: Überblick über Funktionsanforderungen und versch. relevante Größen zur Funktionserprobung am E-Maschinen Prüfstand

Die Belastungen die auf den E-Motor wirken, gliedern sich in Belastungen die im System durch den Betrieb entstehen, sowie Belastungen die von außen auf den E-Motor einwirken.⁹¹ Das zentrale Thema der Beanspruchung durch den Betrieb, ist die Wärmeentwicklung. Durch die Widerstände des Kupfers erwärmt sich der E-Motor stark. Dies geht zu Lasten der Isolierung der Wicklungsstränge. Die Temperaturbeständigkeit der Isolierung ist der begrenzende Faktor im Betrieb des E-Motors.⁹² Grundsätzlich kann die Performance des E-Motors nicht sinnvoll, unabhängig von der Leistungselektronik und der Batterie geprüft werden, da diese Komponenten in starker Wechselwirkung zueinander stehen. Je nach Auslegung kann auch die Leistungselektronik der begrenzende Faktor im Betrieb sein, da sie wesentlich weniger thermische Masse hat.

Der E-Motor muss für eine spezifizierte Zeit eine kontinuierliche Leistung abgeben können. Er muss aber keinen Beharrungszustand erreichen. Die sogenannte S1 Kennlinie, die sich aus dem Betrieb in einem stellvertretenden Einzellastpunkt für das gesamte Lastkollektiv ergibt, ist hier nur in begrenztem Maße sinnvoll, da der E-Motor im Betrieb nie den Beharrungszustand erreichen wird. Es ist deshalb sinnvoller, eine definierte Zeit von z.B. einer halben Minute zu wählen, die für den Betrieb relevant ist und darauf eine Leistung zu bemessen, die in dieser Zeit keine Überhitzung zur Folge hat.

⁹¹ Vgl. (ISO/TC22, 2003 S. 9)

⁹² Vgl. (Reif, 2012 S. 105)

Bei der Überprüfung werden die Temperaturdifferenzen und Volumenströme gemessen, um die Wärmeeinträge in das Öl und das Kühlmittel zu bestimmen. Eine erschwerende Bedingung ist der Betrieb bei hoher, im Realbetrieb zu erwartender, Umgebungstemperatur.

Was zusätzlich noch sehr relevant ist, ist die Tatsache, dass mit fortlaufender Entladung der Batterie die Spannung sinkt. Durch das Sinken der Spannung, steigt der Stromfluss um die Leistung zu erhalten bis die Software den Stromfluss begrenzt und die Leistung zurückgeht. Das bedeutet, es gilt zu überprüfen, ob der E-Motor die gewünschte Leistung auch bei niedrigem Batteriestand erreicht, ohne zu überhitzen. Die Verlustleistung ist ungefähr dem Quadrat des fließenden Stromes proportional. Bei höherem Stromfluss findet eine stärkere Erwärmung statt.⁹³

Neben dem Punkt kontinuierlicher Leistung ist das ganze Wirkungsgradkennfeld von hoher Relevanz. Es gibt Aufschluss über die Effizienz des Motors und stellt sicher, dass über das ganze Kennfeld, bei unterschiedlichen Drehzahlen, das gewünschte Moment abgegeben werden kann. Es ist zu überprüfen, ob das Wirkungsgradkennfeld der gewünschten Spezifikation entspricht und in welchem Bereich die besten Wirkungsgrade auftreten. Da die Wirkungsgrade generell sehr hoch sind, bedarf es einer genauen Messung von Eingangs- und Ausgangsleistung.

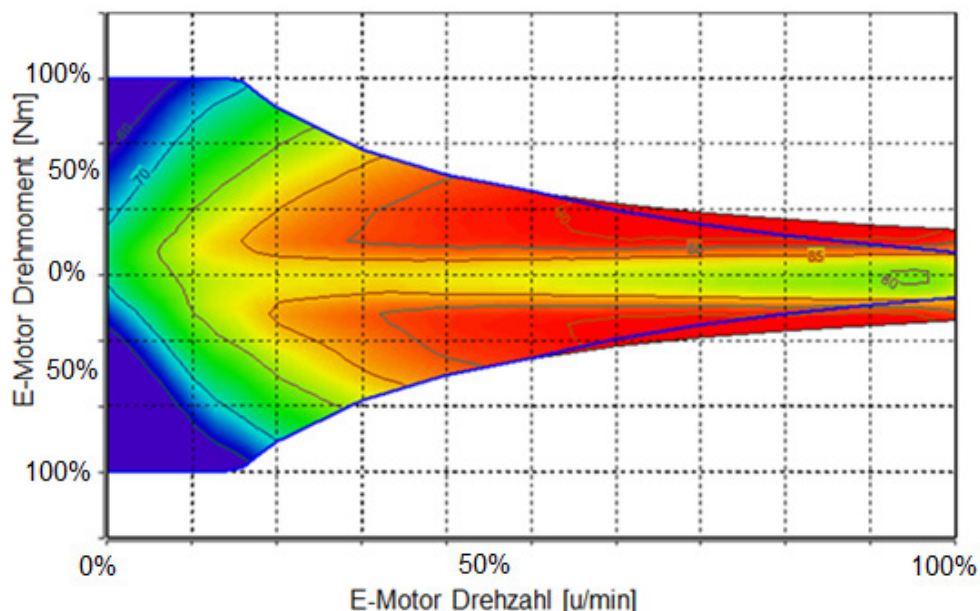


Abbildung 7.17: Exemplarisches Wirkungsgradkennfeld E-Motor (PSM, P_{nenn}= 10 KW)⁹⁴

⁹³ (w-tech)

⁹⁴ (AVL List GmbH, 2014)

Der Leerlaufversuch dient dazu die Eisenverluste und die Lagerreibungsverluste zu ermitteln. Die Eisenverluste gliedern sich in Ummagnetisierungsverluste und Wirbelstromverluste.

Bei der Synchronmaschine, dreht sich, wie der Name schon verrät, der Läufer synchron mit dem Drehfeld im Stator. Wenn keine Momentlast aufliegt, ist der Polradwinkel Null. Sobald nun eine Last an der Welle angelegt wird, bewegt sich der Rotor relativ zum Drehfeld. Durch diese Relativbewegung entsteht nun eine Spannungsdifferenz zwischen der Polradspannung und der Netzspannung. Diese Spannungsdifferenz ruft einen Ständerstrom hervor, der im Generatorbetrieb über die Leistungselektronik in die Batterie gespeist wird und im Motorbetrieb von dort genommen wird. Durch den erhöhten Ständerstrom erhöht sich das Magnetfeld und somit kommt es zu einem Gleichgewicht zwischen Last und Magnetkraft. Der Rotor läuft somit synchron um, aber um den Polradwinkel versetzt.⁹⁵ Wenn der Polradwinkel auf 90° anwächst, spricht man vom Kippwinkel, an dem das maximale Moment, das Kippmoment übertragen wird. Darüber hinaus darf die Synchronmaschine nicht belastet werden, weil es dann zu einer Relativlage von Ständerfeld und Läufermagneten kommt, der Rotor gerät „außer Tritt“. Durch diese Gegenorientierung der beiden Felder kann es zur Entmagnetisierung der Permanentmagnete kommen.⁹⁶ Es ist zu gewährleisten, dass im Betrieb es regelungstechnisch verhindert wird, dass ein Moment auftritt, das größer als das Kippmoment ist.

Die Leistungsspitze beschreibt im Weiteren einen Betriebspunkt bei dem der E-Motor das maximal gewünschte Moment für die benötigte Zeit bei gewünschter Drehzahl leisten kann. Ausgehend von der kontinuierlichen Leistung muss der E-Motor für z.B. 10 Sekunden⁹⁷ die gewünschte Maximalleistung bringen, die über das Doppelte der Nennleistung betragen kann. Danach muss immer noch so viel Temperaturreserve vorhanden sein, dass ein generatorischer Betrieb mit Bemessungsleistung möglich ist, um die Batterie zu laden. Der E-Motor wird mit der maximalen Leistung bei unterschiedlichen Drehzahlen, unter Messung der Temperaturentwicklung, des Momentes und Polradwinkels, belastet.

Diese Funktion steht in Verbindung mit der Dynamik des E-Motors. Die Trägheit und die gewünschte Winkelbeschleunigung ergeben das benötigte Moment. Es muss sichergestellt werden, dass der E-Motor alle kritischen Lastsprünge des Lastprofils in gewünschter Zeit durchführen kann.

⁹⁵ Vgl. (Fischer, 2013 S. 321)

⁹⁶ Vgl. (Binder, 2012)

⁹⁷ Vgl. (Schaeffler, 2014 S. 432)

Ein weiteres Thema ist die elektromagnetische Verträglichkeit des Lagesensors. Dieser sollte in einem gewissen Mindestabstand vom Rotor verbaut werden, um nicht von etwaigen Feldern gestört zu werden. Falls dies aus Platzgründen nicht möglich ist, ist darauf zu achten, dass die Signalübertragung der Rotorposition einwandfrei funktioniert.

Es gibt eine Vielzahl von weiteren Prüfbeschreibungen die z.B. in den Normen DIN EN 60034, ISO 16750 und anderen festgehalten sind, wobei nicht alles für eine permanenterrechte Synchronmaschine im Fahrzeug verpflichtend oder gültig ist.⁹⁸ In dieser Arbeit ist keine detailliertere Ausarbeitung vorgesehen.

7.2.6 C: 3-Maschinen Prüfaufbau

Der Vorteil des 3-Maschinen Prüfstands liegt hauptsächlich in der Unabhängigkeit des Testbetriebs von der VKM. Es wird für den Prüfbetrieb eine sehr zuverlässige Eintriebsmaschine verwendet und die potentiellen Fehlerquellen eines VKM-Antriebs, die zu Verzögerungen am Prüfstand führen, werden eliminiert. Generell ist der Betrieb einer E-Maschine einfacher zu handhaben als der einer VKM, da die Regelung einfacher ist und man keinen zusätzlichen Aufwand durch Geräuschbelastung und Abgase hat. Zudem kann die Last über das maximale Moment der VKM, die später im Betrieb eingesetzt wird, angehoben werden, um „worst case“ Szenarien durch Laststöße abzudecken.

7.2.6.1 Aufbau

Der Eintrieb erfolgt über eine E-Maschine. Das P2 Modul wird vollständig aufgebaut. Weiters wird eine Konditionieranlage für den Öl/Wasser Wärmetauscher benötigt und für den Wasserkühlkreislauf des Stators und der Leistungselektronik. Wenn vorhanden, wird das Getriebe mitaufgebaut, da die Systembelastung dadurch realistischer ist und an Aussagekraft gewinnt. Weiters wird auch das Bremspedal mit Zylinder und Bremssattel aufgebaut, um das Zusammenspiel von konventioneller Bremse, ESP und Rekuperation zu überprüfen.

⁹⁸ Vgl. (Beuth, 2009)

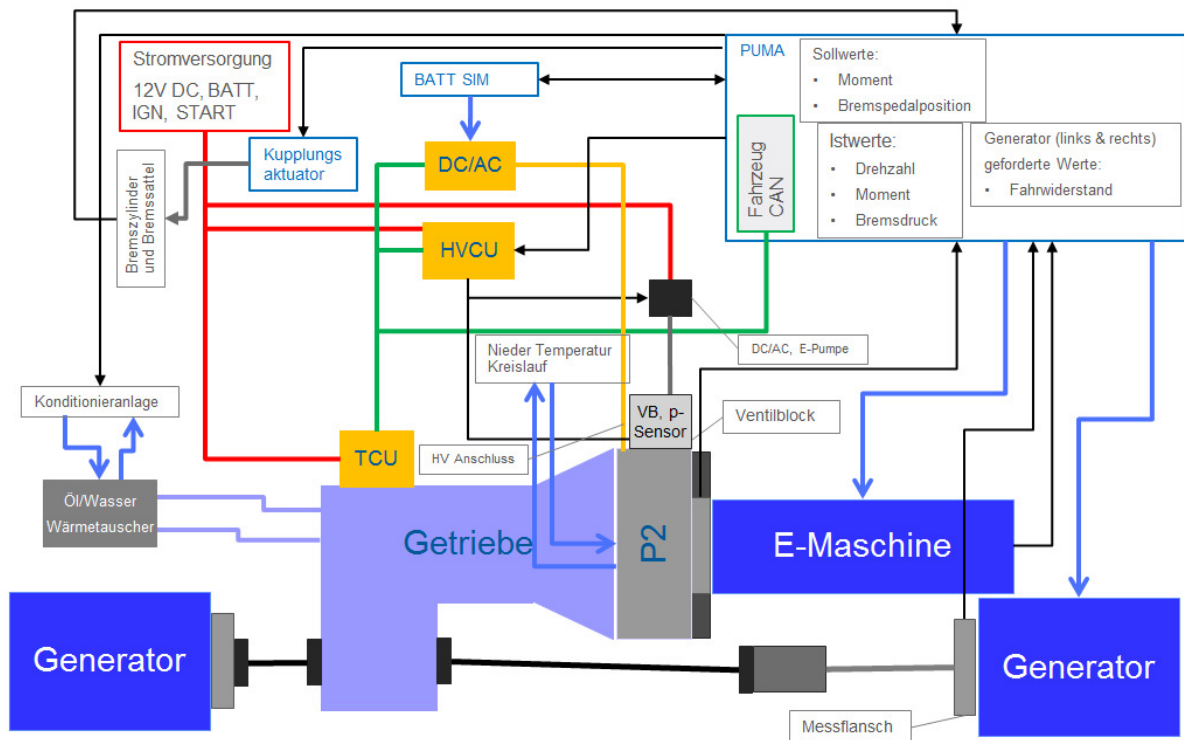


Abbildung 7.18: 3M Prüfstands Aufbau für P2 Modul inkl. Getriebe als Beispiel für eine Front-quer Antriebseinheit⁹⁹

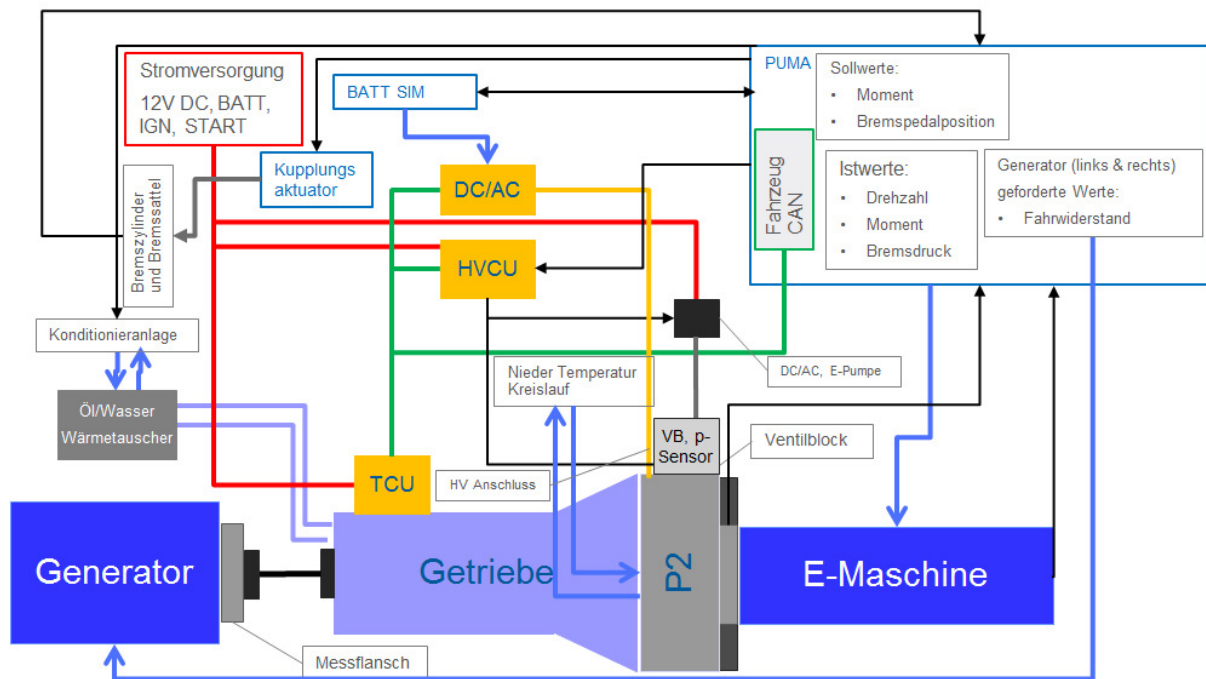


Abbildung 7.19: 3M Prüfstands Aufbau für P2 Modul inkl. Getriebe als Beispiel für eine Heckantrieb¹⁰⁰

⁹⁹ (AVL List GmbH, 2014)

¹⁰⁰ (AVL List GmbH, 2014)

7.2.6.2 Steuerung

Über die HVCU wird die Momentaufteilung zwischen E-Maschine und E-Motor festgelegt. Ebenfalls wird die Schmierungsversorgung von der HVCU kontrolliert. Weiters sendet die HVCU die Momentanforderung an die Leistungselektronik.

Da keine VKM aufgebaut ist, bedarf es keiner ECU. Die Leistungselektronik versorgt den E-Motor mit Spannung und Strom. Sie besitzt eine Temperaturüberwachung um bei hohen Stromflüssen nicht durchzubrennen.

Die TCU steuert das Getriebe und gibt Gang und Kupplungsbetätigung vor. Zusätzlich überwacht sie die Schmierung des Getriebes.

Es wird ein Batteriesimulator verwendet. Dies hat den Vorteil, dass konstante Spannung zur Verfügung steht. Allerdings müssen hier gegebenenfalls Batteriesimulationsprogramme zum Einsatz kommen, falls das Batterieverhalten von der HVCU überprüft wird und als unrealistisch befunden wird.

Der Prüfstand sendet die Signale der Pedalposition und des Bremslichtschalters an die HVCU. Weiters errechnet er aufgrund von vorgegebenen Fahrzeugparametern einen Fahrzeugwiderstand, der an die Bremsgeneratoren geleitet wird.

7.2.6.3 Prüfprozedur

Der 3-Maschinen Prüfstand dient dazu, einen Großteil der Lastzustände, die im Realbetrieb auftreten, zu testen. Hauptsächlich werden die Momentübertragung und der Momentsplit zwischen VKM, E-Motor und Getriebe im Hinblick auf die Wärmeentwicklung und die Beanspruchung von Wellen und Gehäuse überprüft. Zudem ist die Beanspruchung der Lager durch mechanische Belastung und Lagerströme interessant. Aussagen über das thermische Verhalten könne nur bedingt getroffen werden, da die VKM als Wärmequelle im System fehlt. Da die Software für die Steuerung zu diesem Zeitpunkt schon vorhanden ist, ist nicht nur die einzelne Überprüfung der Funktionen relevant, sondern auch der Einfluss der einzelnen Betriebszustände aufeinander. Zu diesem Zweck werden zusätzlich zur Einzelüberprüfung, die Funktionen im Verbund getestet, indem ein realer Zyklus am Prüfstand durchfahren wird.

Die folgende Tabelle gibt einen groben Überblick über die getesteten Funktionsanforderungen, die Einflussgrößen und deren Parameterbereich, sowie die messtechnischen erfassten Größen am Prüfstand und die zu erreichenden Zielwerte.

| Funktionsanforderungen | Einflussgrößen | Parameterbereich | messtechnisch erfasste Größen | Zielwerte |
|--|--|--|--|---|
| Momentübertragung von E-Motor auf Getriebe bei offener Kupplung- elektrisch fahren | SOC Wicklungstemperatur Fahrwiderstand Fahrerwunsch | | | rein elektrisches Fahren für z.B. 5 km, v_max = 50 km/h |
| Momentübertragung von Getriebe auf E-Motor bei offener Kupplung- Rekuperation | SOC Wicklungstemperatur Fahrwiderstand Fahrerwunsch | SOC: 50-90 % T_w: T_um-~180 °C Steigung: +-20% | T: T_Kühler, T_Kupplung T_Sumpf, T_Wicklung p: Druckdifferenz_Kühler Drücke_Ventilblock M: M_ein, M_aus Volumenstrom_Kühler | Rekuperationswirkungsgrad Speichern elektrischer Leistung |
| Momentübertragung bei geschlossener Kupplung- Boost | SOC Wicklungstemperatur Fahrwiderstand Fahrerwunsch | Fahrpedalwert: 0-100% Bremspedalwert: 0-100% | U, I (Primär- Sekundärseite Leistungselektronik) Drehzahl | Erreichen des max. Getriebeeingangsmoments für z.B. 10 Sekunden |
| Lastpunktverschiebung | SOC Systemtemperatur | | | Effizienzmaximierung |
| Dichtheit intern/extern | Öltemperatur | T_öl: T_um-150°C | Sichtkontrolle | dicht |
| Lagerstromverträglichkeit | Konstruktion | - | Kontrolle nach Zerlegung des Systems | keine Schädigung der Lager |

Tabelle 7.3: Verschiedene relevante Größen für 3- Maschinen Prüfstand

P2-Modul

Bei geöffneter C0 wird das Fahrzeug allein durch den E-Motor angetrieben. Dies ist im Betrieb- bei genügend geladener Batterie- bei allen Anfahrvorgängen in der Ebene aus dem Stand der Fall, bis hin zu charakteristischen Geschwindigkeiten im innerstädtischen Bereich. Es ist sicherzustellen, dass der E-Motor zu diesem Zweck das benötigte Moment und die Leistung aufbringt und dabei nicht überhitzt.

Im Schubbetrieb wird durch das umlaufende Permanentmagnetfeld eine Spannung in die Wicklungen des Stators induziert. Diese Spannung bewirkt einen Stromfluss, der dazu dient die Batterie zu laden. Der E-Motor wird also über die Getriebewelle generatorisch betrieben und rekuperiert. Es ist zu überprüfen, ob der E-Motor das gewünschte Rekuperationsmoment aufbringen kann, ohne zu überhitzen. Vor allem nach Boostphasen und bei hohen Drehzahlen ist dies interessant.

Bei geschlossener C0 treten die höchsten Torsionsmomente und Spitzenleistungen während den Boostphasen, den Vollastbeschleunigungen und Schaltstößen auf. Es sind mehrere Vollastbeschleunigungen sowie Boostvorgänge durchzuführen. Bei den Boostvorgängen ist vor allem auch auf die Temperaturentwicklung zu achten. Zudem werden einige Zyklen mit Überlast gefahren, um eine Absicherung der mechanischen Belastbarkeit der Konstruktion zu erzielen. Dies ist möglich da die E-Maschine des Prüfstands mehr Leistung, als die VKM hat.

Durch das mitaufgebaute Getriebe wird eine zum Teil realistische Belastung des Gehäuses des P2 Moduls erreicht, da sich am Gehäuse, über das Getriebe, das Gegenmoment abstützt.

Durch den Mitaufbau des Getriebes werden auch Schaltstöße abgebildet, die zu plötzlichen Momenterhöhungen am Hybridmodul führen.

Der Widerstand in den Kupferwicklungen erzeugt Wärme, die das Hauptkriterium einer Einschränkung der Betriebsfähigkeit des E-Motors ist. Diese Wärme muss deshalb möglichst schnell abgeführt werden. Der Stator gibt die Wärme an den Niedertemperaturkühlkreislauf ab. Es ist zu überprüfen, ob der zuvor simulierte und errechnete Volumenstrom ausreicht um die entstehende Wärme abzutransportieren. Im Kühlkreislauf muss sich eine Beharrungstemperatur einstellen, ansonsten überhitzen Leistungselektronik und E-Motor und die Steuerung reagiert mit einer Leistungsreduktion.

Durch hohe Belastungen könnten Verformungen am Gehäuse auftreten, die zu einer Ölleckage führen. Ob dies der Fall ist, ist zu überprüfen.

Lager

Die Lager werden auf ihre mechanische Belastbarkeit überprüft. Der Verschleiß gibt bei der Nachuntersuchung Aufschluss über die Schmiersituation und den damit verbundenen Wärmeabtransport. Bei groben Verschleißspuren könnte auch ein Montagefehler vorliegen. Ebenso weisen Ermüdungsrisse auf eine Überbelastung des Lagers hin.

Neben der mechanischen Belastung können in Systemen mit Elektromotoren Lagerströme auftreten. Aufgrund von Asymmetrien im Magnetfeld, nicht abgeschirmter Verkabelung und Frequenzumrichtern entstehen Ströme, die durch die Lager fließen. Durch den Stromdurchgang entstehen hohe Temperaturen im Lager, die die Lauffläche und das Öl zerstören. Nach der Prüfprozedur sind die Lager auf typische Schäden wie verkohltes Öl oder Krater an der Oberfläche zu überprüfen.¹⁰¹

Gehäuse

Wie schon erwähnt, wird die gewünschte Steifigkeit und Festigkeit des Gehäuses überprüft, in dem sich das Reaktionsmoment über das Getriebe abstützt. Durch die Anbindung an die E-Maschine auf der VKM Seite, wird allerdings der Momentfluss des Gesamtsystems verändert, sodass das Gehäuse anders belastet wird als im Fahrzeug.

¹⁰¹ Vgl. (Antriebstechnik, 2006)

7.2.7 D: Antriebsstrang

Hier wird der gesamte Antriebsstrang wie im Fahrzeug verbaut. Das Ziel ist die Prüfung des Zusammenwirkens der Komponenten im System bei realistischen Lastbedingungen und das thermische Verhalten des Gesamtsystems.

7.2.7.1 Aufbau

Der Eintrieb erfolgt über die voll funktionsfähige VKM, der Abtrieb über das Differential und die Seitenwellen zu den Generatoren. Für den Öl/Wasser Wärmetauscher, für den Niedertemperatur- und den Hochtemperaturkühlkreislauf müssen Konditioniermöglichkeiten vorhanden sein. Als Batterie sollte, wenn verfügbar, die Originalbatterie eingesetzt werden, ansonsten kann am Prüfstand auch weiterhin der Batteriesimulator mit Batteriemodell verwendet werden. Durch die entsprechende Aufhängung der VKM und des Getriebes wird eine realistische Bewegung des Antriebsstrangs möglich.

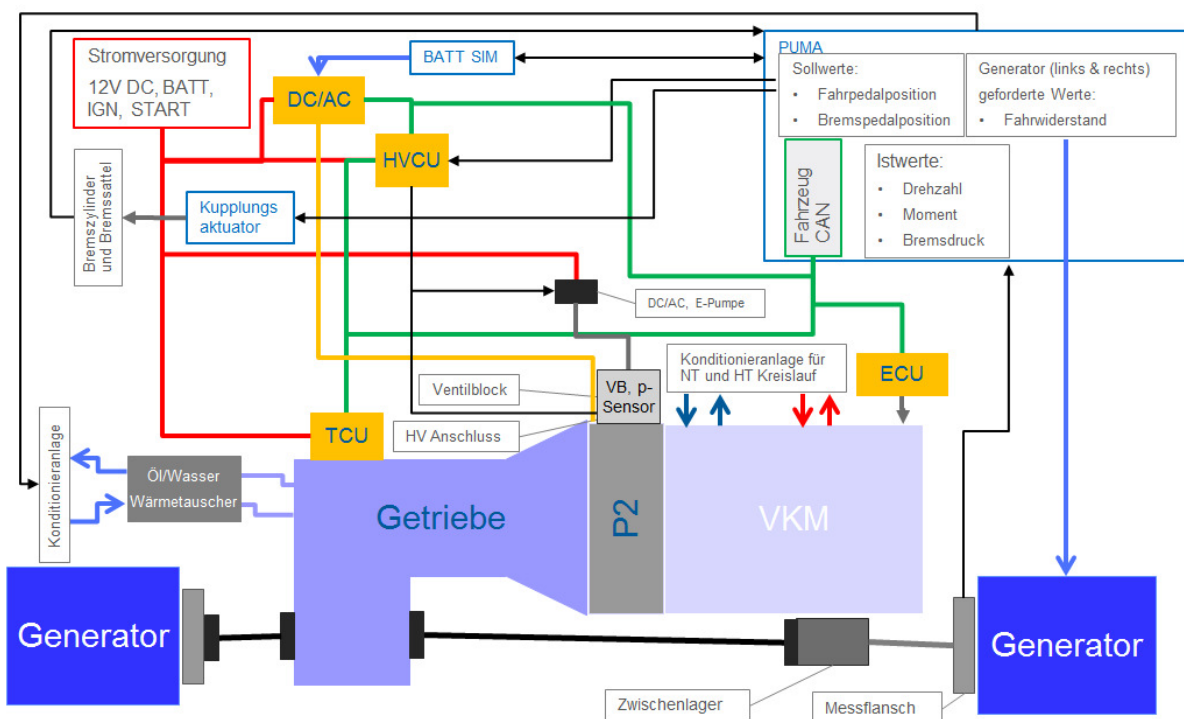


Abbildung 7.20: Antriebsstrangprüfstand für P2 Modul inkl. Getriebe und VKM als Beispiel für eine Front-quer Antriebseinheit¹⁰²

¹⁰² (AVL List GmbH, 2014)

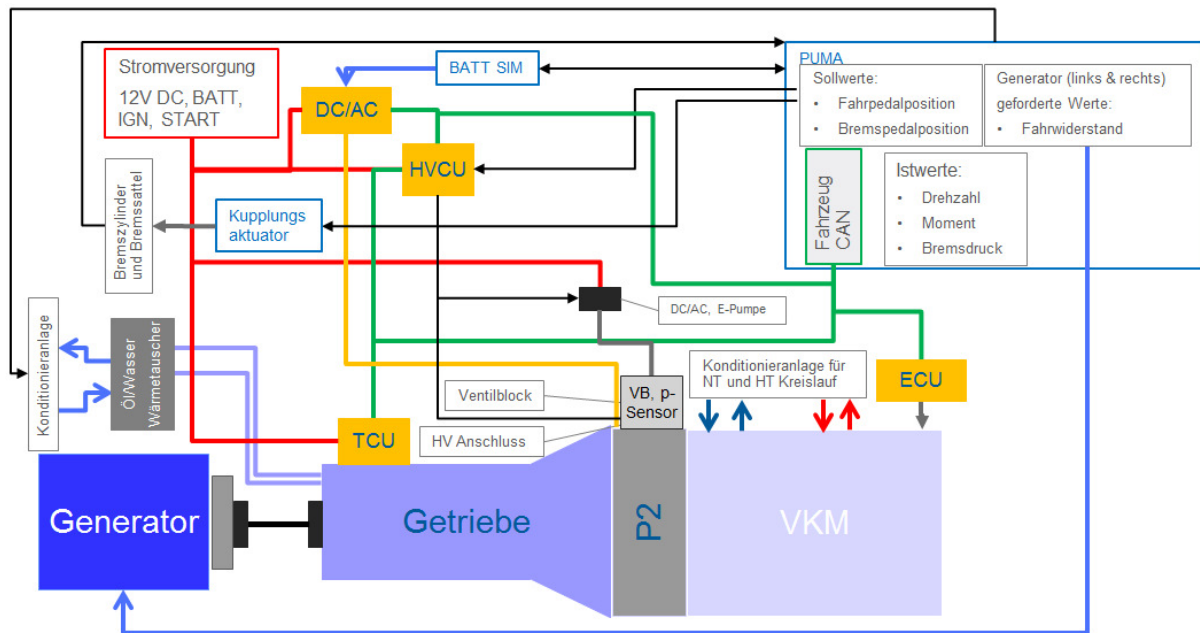


Abbildung 7.21: Antriebsstrangprüfstand für P2 Modul inkl. Getriebe und VKM als Beispiel für eine Heckantrieb¹⁰³

7.2.7.2 Steuerung

Die Software sollte generell bei diesem Aufbau voll funktionsfähig sein. Die HVCU kontrolliert und steuert alle Betriebszustände und entscheidet über die Momentenverteilung und die Übergänge zwischen den Betriebsarten. Zusätzlich steuert die HVCU auch die Hydraulik und damit die Kupplung des P2 Moduls und auch Teile des BMS. Die ECU ist voll einsatzfähig, ebenso die Leistungselektronik und die TCU die die Schaltvorgänge entsprechend der Beschleunigung oder Verzögerung realisiert. Um realistische Rekuperationsmanöver durchzuführen bzw. die Funktion der Aufteilung von Reibbremse und Generator zu testen, wird das Signal des Bremspedals -ob und wie stark die Bremse gedrückt ist- an die HVCU gesendet. Diese muss nun das Zusammenspiel zwischen Rekuperation und konventioneller Bremse unter Berücksichtigung der Hitzeentwicklung und des Ladezustands der Batterie und des ESPs kontrollieren.

¹⁰³ (AVL List GmbH, 2014)

7.2.7.3 Prüfprozedur

Es gibt einige Funktionen die mit den bisher beschriebenen Prüfständen nicht zufriedenstellend geprüft werden konnten. Dazu gehören vor allem der Impulsstart und das thermische Verhalten des Systems.

| Funktionsanforderungen | Einflussgrößen | Parameterbereich | messtechnisch erfasste Größen | Zielgrößen |
|--|--|--|---|---|
| VKM Start bei positivem/negativem Antriebsmoment bei schlupfend betriebener Kupplung- Impuls Start | SOC Wicklungstemperatur Fahrwiderstand Fahrerwunsch | | T: T_Kühler, T_Kupplung T_Sumpf, T_Wicklung p: Druckdifferenz_Kühler Drücke_Valveblock | Zuverlässiger Start der VKM in vorg. Zeit (~300 ms) |
| Lastpunktverschiebung | SOC Systemtemperatur | SOC: 50-90 % T_w: T_um~-180 °C Steigung: +-20% | M: M_aus Volumenstrom_Kühler U, I (Primär- Sekundärseite Leistungselektronik) | Effizienzmaximierung |
| thermisches Verhalten | SOC Fahrwiderstand Fahrerwunsch Drehzahl | Fahrpedalwert: 0-100% Drehzahl: 0- n_max | Drehzahl Verdrehwinkel ZMS Beschleunigungen (Körperschall) | erreichen von Beharrungstemperatur |
| geringe Betriebschwingungen | Moment Drehzahl | | | Einhalten von Maximalwerten Vermeiden von Resonanzen |

Tabelle 7.4: Überblick über Funktionsanforderungen und verschiedene relevante Größen für die Funktionserprobung am Antriebsstrang Prüfstand

P2 Modul

Beim Impulsstart wird die VKM durch den E-Motor gestartet. Die VKM ersetzt dann den E-Motor als Leistungsquelle. Dies kann kurz nach dem Wegfahren oder während der Fahrt geschehen. Zentral dabei ist die genau dosierte Momentübertragung durch bewussten Schlupf an den Kupplungen C0 und C1, um die Komponenten nicht zu starken Belastungen auszusetzen und um ein konstantes Moment weiter an das Getriebe zu übertragen. Es ist zu sicherzustellen, dass der Impulsstart bei den vorgegebenen Temperaturen in der gewünschten Zeit funktioniert. Da die Software voll einsatzfähig ist und die Entscheidung trifft, wann der Impulsstart durchgeführt wird, können die Impulsstarts nur durch dementsprechende Betriebszyklen erzwungen werden. Es wird bei verschiedenen, im Betrieb relevanten Temperaturen, mit unterschiedlichen Raten beschleunigt. Besonders kritisch sind Situationen, in denen das Fahrzeug rein elektrisch, mit einem Moment das nahe der Impulsstartgrenze liegt, angetrieben wird. Da erfolgt ein plötzlicher Anstieg der Momentanforderung durch einen Überholvorgang oder eine Änderung der Fahrbahnsteigung.

Bei kühlen Umgebungstemperaturen benutzt die Steuerung nicht den E-Motor zum Start, sondern den zusätzlich verbauten 12 Volt Starter. Es ist in einer Kältekammer zu überprüfen,

ab wann die Steuerung den 12 Volt Starter einsetzt bzw. ob der Start mit dem E-Motor bei der festgelegten unteren Grenztemperatur das System zu stark belastet.

Der Verdrehwinkel des ZMS ist zu messen, ebenso wie die Momente an den E-Bremsen und die Temperaturentwicklung in den Kupplungen.

Die VKM ist eine zentrale Wärmequelle im System, die die Temperaturen im P2 Modul beeinflusst. Es ist zu verifizieren, dass das P2 Modul im dynamischen Betrieb den thermischen Belastungen standhält und eine Beharrungstemperatur erreicht. Der von der VKM kommende Wärmestrom muss abtransportiert werden können. Dynamischer Betrieb bedeutet hier Volllast der VKM abgewechselt mit Teillastbetrieb und Boost- und Rekuperationsphasen. Da die Batterie nicht von extern geladen wird, muss durch den Betrieb der Ladezustand jeweils so gehalten werden, dass die nötige E-Motor Leistung zur Verfügung steht. Dies bedeutet, dass manchmal zu den Rekuperationsphasen bei Verzögerung die VKM auf einem höheren Leistungsniveau betrieben wird, um den E-Motor als Generator zu betreiben und die Batterie zu laden. Es ist zu gewährleisten, dass nach Boostphasen der E-Motor genug Temperaturreserve hat, um die Batterie zu laden.

Durch die Hybridisierung des Antriebsstrangs dürfen die geforderten Lärmgrenzen nicht überschritten werden. Durch den E-Motor und die Leistungselektronik können allerdings verschiedene Schwingungsanregungen auftreten. Es ist zu überprüfen, ob der E-Motor andere Komponenten im Antriebsstrang durch Drehmomentungleichförmigkeiten anregt. Ein Beispiel wäre eine hochfrequente Verzahnungsanregung im Getriebe.¹⁰⁴

Öl, Lager und E-Pumpe

Weiters wird die thermische Belastung des Öles und der Lager durch den dynamischen Betrieb mitüberprüft. Die E-Pumpe wird auf ihre Laufruhe hin geprüft.

Gehäuse

Durch die entsprechende Aufhängung wird das Reaktionsmoment in richtiger Weise am Getriebegehäuse abgestützt. Es wird also die Verbindung von Getriebe und VKM zum Modul überprüft.

¹⁰⁴ Vgl. (Schäfer, 2009 S. 4)

8 Die Validierung

Wie zuvor beschrieben, beschäftigt sich die Validierung mit dem Verhalten des Systems über seine Lebensdauer. Es geht darum das Lastenheft des Kunden zu erfüllen.¹⁰⁵

Man generiert Prüfprogramme die dem System die gleiche Schädigung, wie der Realbetrieb über Lebensdauer, zuführen. Dabei sollen die Programme einen Raffungsfaktor haben um Kosten zu sparen. Das bedeutet, dass die gleiche Schädigungssumme durch erhöhte Last in kürzerer Zeit aufgebracht wird. Je nach Notwendigkeit werden Dauerläufe für einzelne Baugruppen durchgeführt, bevor das gesamte Hybridmodul getestet wird.

8.1 Prüfaufbauten

Die Prüfaufbauten sind zum Großteil die selben wie in der Verifikationsphase. Beim E-Motor werden jedoch zusätzliche Aufbauten benötigt, mit denen die thermischen und chemischen Umgebungslasten dargestellt werden können. Zum Beispiel sind dies niedrige und hohe Temperaturen, Staub und korrosive Medien. Die Prüfaufbauten müssen einen raschen Temperaturwechsel, die Veränderung der Luftfeuchte sowie die Benetzung mit aggressiven Substanzen erlauben. Z.B.: E-Motoraufbau mit Klimakammern, E-Motoraufbau mit Salzspryanlage und E-Motoraufbau mit Eintauchvorrichtung.

In dieser Arbeit ist keine detailliertere Beschreibung vorgesehen. Für weitere Informationen siehe: ISO 16750-4, DIN 40050-9, IEC 60068-2-38, DIN EN 60068-2-18, sowie DIN EN 60068-2-27 und EN 60349-1.

¹⁰⁵ (Wikipedia, 2014)

8.2 Prüfprozedur

Der Weg von den Fahrzeugdaten bis zum Prüfprogramm:

1. Zuerst muss ein Anforderungsprofil festgelegt werden. Es setzt sich aus Fahrstrecke, Fahrer und Fahrzeug zusammen.
2. Dieses Anforderungsprofil wird danach entweder real abgefahren oder am Rechner simuliert. Dabei werden Drehzahl, Moment und sonstige relevante Parameter aufgezeichnet.
3. Mittels Klassierverfahren wird der Belastungszeitverlauf vom Zeitbereich in den Häufigkeitsbereich übergeführt.
4. Aus der Summenhäufigkeit können nun verschiedene Dauerlaufprogramme abgeleitet werden.

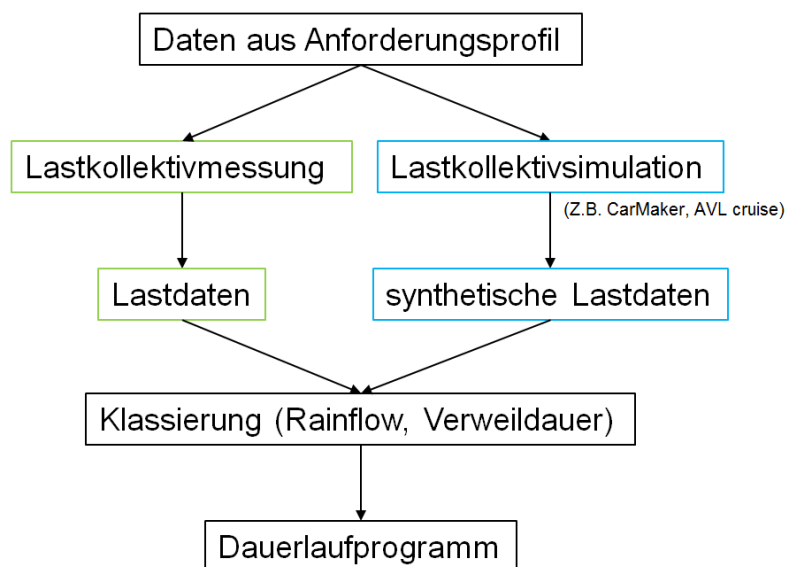


Abbildung 8.1: Ablauf vom Anforderungsprofil zum Dauerlaufprogramm

8.2.1 Das Anforderungsprofil

Um ein wirksames Prüfprogramm zu erstellen, benötigt man ein realistisches Anforderungsprofil. Fehler in der Annahme des Anforderungsprofils wirken sich direkt auf den daraus re-

sultierenden Belastungsverlauf aus, was wiederum starken Einfluss auf die Lebensdauer des Fahrzeugs hat.¹⁰⁶

Das Anforderungsprofil ergibt sich aus Fahrstrecke, Fahrer und Fahrzeug. Um hier realitätsgetreue Daten zu erlangen, ist man auf Messungen und Kundenbefragungen angewiesen. Es werden z.B. auch „Flottenversuche“ in Zusammenarbeit mit Taxi- und Transportunternehmen durchgeführt.¹⁰⁷ In Bezug auf die Fahrbahn sind die Aufteilung der Gesamtkilometer auf Autobahn, Überlandstraße, Stadtfahrt und Schlechtwegfahrt, sowie die typischen Steigungen und maximalen Geschwindigkeiten von Interesse. Das Fahrzeug wird hinsichtlich der Beladung, des Motorkennfelds und der Getriebeübersetzung beurteilt. Der Fahrer beeinflusst die Belastung des Systems durch seinen Fahrstil. Wichtige Parameter sind die Schalthäufigkeit und die Schaltdrehzahl, sowie Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten. Zufällige Einflussparameter wie Wetter und Verkehrssituation sind zusätzliche Einflussfaktoren. Wenn hier Extreme auftreten, werden diese nicht miteinbezogen um die Zyklen nicht zu verfälschen.¹⁰⁸

Die Erfassung des Anforderungsprofils wird vom Kunden durchgeführt und der AVL zur Verfügung gestellt. Als Alternative kann man auch auf vorhandene Daten zurückgreifen, wie z.B. den Normstreckenmix CARLOS.¹⁰⁹

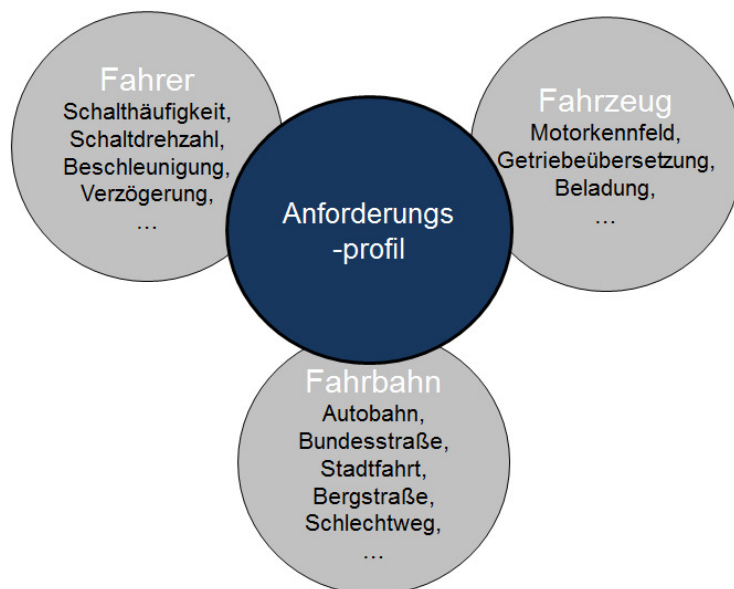


Abbildung 8.2: Erlangung des Anforderungsprofils¹¹⁰

¹⁰⁶ Vgl. (Naunheimer, 2007 S. 256)

¹⁰⁷ Vgl. (Naunheimer, 2007 S. 664)

¹⁰⁸ Vgl. (Naunheimer, 2007 S. 57)

¹⁰⁹ Vgl. (Naunheimer, 2007 S. 57)

8.2.2 Belastungsverläufe (Lastdaten)

Das Anforderungsprofil muss nun vom Prüfling durchlaufen werden, um die benötigten Lastdaten zu erhalten. Es wird aber nicht das gesamte Anforderungsprofil abgefahren, da dies zu zeitaufwändig wäre. Durchlaufen wird eine wesentlich kürzere Strecke von einigen 100 km, die eine repräsentative Belastung im reduzierten Umfang darstellt. Danach wird mittels Hochrechnungsfaktoren auf die tatsächlichen Streckenumfänge und deren Anteil am Anforderungsprofil hochgerechnet.¹¹¹ In diesem Beispiel beläuft sich der Umfang des Anforderungsprofils auf 160.000 km. Die Aufteilung ist der Tabelle zu entnehmen. Es ist eigentlich davon auszugehen, dass ein europäischer Mittelklasse PKW eine längere Lebensdauer als 160.000 km hat. Allerdings sind die ausgewählten Fahrstrecken und die Geschwindigkeitsverteilung wesentlich beanspruchender als das tatsächliche Fahrverhalten des Kunden, wodurch sich die zeitliche Raffung ergibt.¹¹²

| | Anteil [%] | Streckenlänge [km] | Messumfang [km] | Hochrechnungsfaktoren |
|-------------------|------------|--------------------|-----------------|-----------------------|
| Autobahn | 30 | 48 000 | 200 | 240 |
| Überland | 25 | 40 000 | 150 | 270 |
| Stadt | 30 | 48 000 | 150 | 320 |
| Bergstraße | 10 | 16 000 | 50 | 320 |
| Offroad | 5 | 8 000 | 20 | 400 |
| Summe | 100 | 160 000 | 570 | 280 |

Tabelle 8.1: Schematische Darstellung eines Streckenmixes mit Messumfang und Hochrechnungsfaktoren

Dabei werden Drehzahlen, Drehmomente, Temperaturen und sonstige relevante Daten aufgenommen. Beim Hybridmodul spielen neben der Drehzahl und dem Drehmoment ebenfalls Daten wie der Ladezustand der Batterie, deren Spannungs- und Stromfluss eine Rolle.

¹¹⁰ (AVL List GmbH, 2014)

¹¹¹ Vgl. (Naunheimer, 2007 S. 58)

¹¹² Vgl. (Köhler, 2012 S. 190)

Bei Versuchsfahrten ist der Aufwand für eine statistische Absicherung erheblich, zudem ist bei einer konstruktiven Änderung oft eine Neuvermessung notwendig. Um Aufwand und Kosten zu reduzieren gibt es die Möglichkeit zu simulieren.¹¹³

Mit der AVL Software „AVL Cruise“, durchfährt der virtuelle Prüfling die Messstrecke und die relevanten Lastparameter werden mitdokumentiert. Die Simulation hat den Vorteil, dass man ohne Prototyp auskommt und ist deshalb oft unerlässlich. Allerdings ist die Simulation mit Unsicherheiten behaftet in Bezug auf die Eingangsparameter.

Die folgenden Abbildungen zeigen Belastungs-Zeit-Verläufe die durch Simulation ermittelt worden sind.

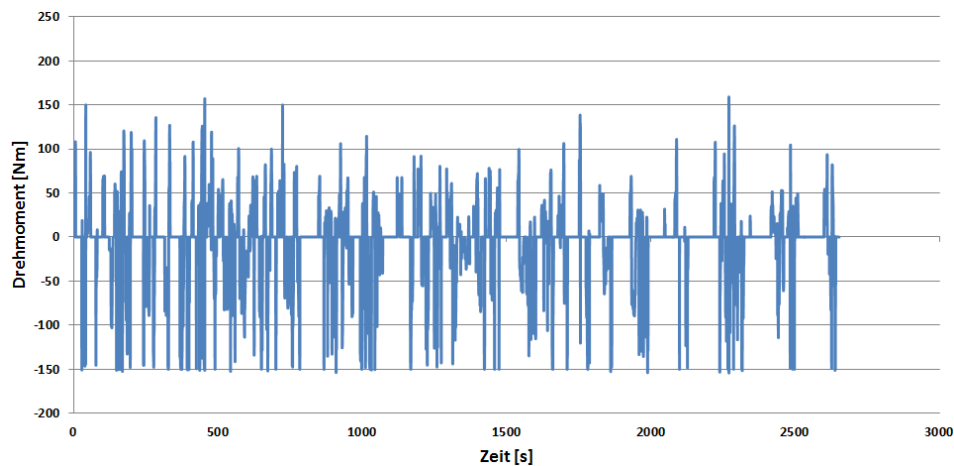


Abbildung 8.3: Drehmoment-Zeit Verlauf E-Motor

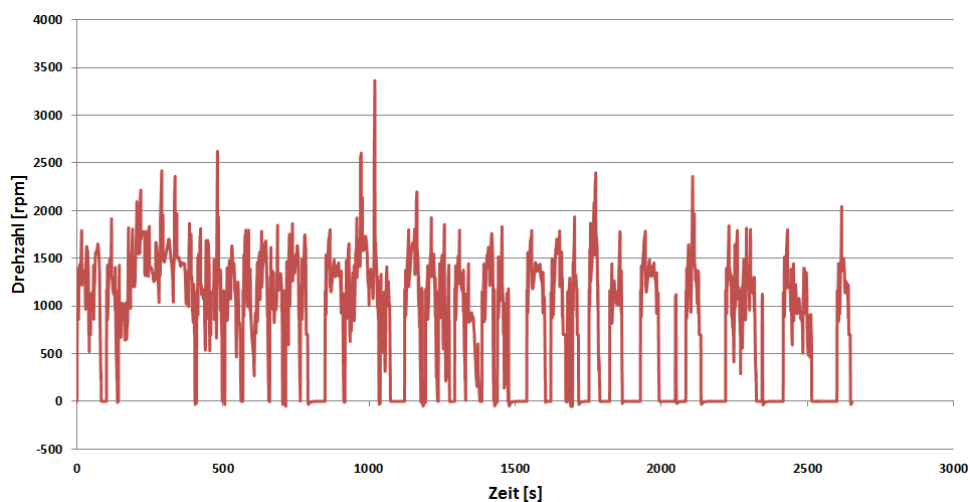


Abbildung 8.4: Drehzahl-Zeit Verlauf E-Motor¹¹⁴

¹¹³ Vgl. (Naunheimer, 2007 S. 259)

¹¹⁴ (AVL List GmbH, 2014)

8.2.3 Die Klassierung

Um die erhaltenen Belastungsverläufe in ein Prüfprogramm überzuführen, muss eine Transformation des Belastungsverlaufes in eine Summenhäufigkeit stattfinden. Mittels sogenannter Klassier- oder Zählverfahren wird der Verlauf der Belastung in eine Summenhäufigkeit der Lastwechsel übergeführt. Es findet eine Überführung vom Zeitbereich und den Häufigkeitsbereich statt. Die Beanspruchung wird also nicht mehr über die Zeit aufgetragen, sondern die verschiedenen Amplituden werden gezählt und in Klassen aneinandergereiht. Dieser Art der Überführung ist bringt es mit sich, dass die Information über die Reihenfolge der unterschiedlichen Lasten verlorengeht.¹¹⁵

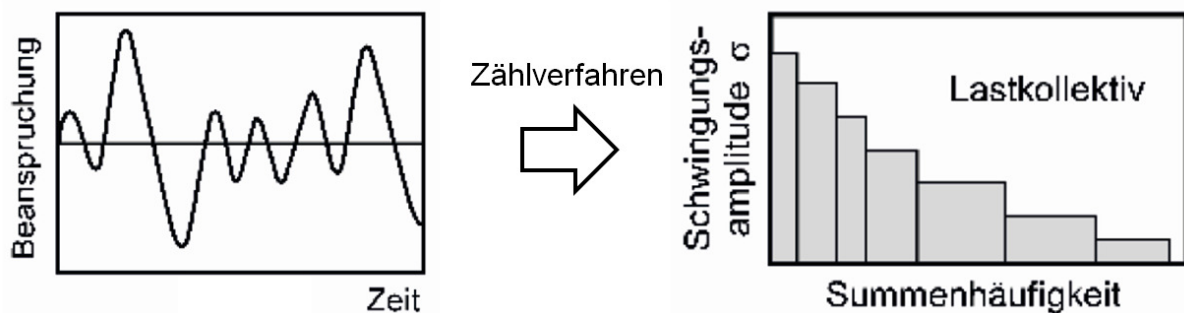


Abbildung 8.5: Überführung des Beanspruchungsverlaufs in eine Summenhäufigkeit¹¹⁶

Hierzu gibt es eine Reihe unterschiedlicher Klassierverfahren. Allen ist gemeinsam, dass die Summe der auftretenden Belastungsamplituden in Klassen eingeteilt wird. Die Belastungen werden je nach Klassiermethode den einzelnen Klassen zugeordnet.¹¹⁷

Grundsätzlich gibt es ein- und zweiparametrische Zählverfahren. Aus heutiger Sicht sind die meisten einparametrischen Verfahren als Sonderfälle der sog. zweiparametrischen Rainflow-Klassierung zu verstehen. Sie können aus dieser abgeleitet werden.¹¹⁸ Das Rainflow-Zählverfahren ist für Bauteile relevant, die durch Schwingspiele belastet werden, z.B. das Gehäuse.

Neben dem Rainflow-Verfahren gibt es Zählverfahren, die für Bauteile relevant sind, die durch Überrollung belastet werden, z.B. Lager. Hier wird nicht die Häufigkeit sondern die

¹¹⁵ Vgl. (Haibach, 2006 S. 9)

¹¹⁶ Vgl. (Naunheimer, 2007 S. 253)

¹¹⁷ Vgl. (Naunheimer, 2007 S. 256)

¹¹⁸ Vgl. (Haibach, 2006 S. 53)

Verweildauer in einer bestimmten Klasse aufgezeichnet. Das zweiparametrische Verweildauer-Zählverfahren wird hier näher erläutert.

8.2.3.1 Die zweiparametrische Verweildauerzählung

Bei der zweiparametrischen Verweildauerzählung spannt sich als Ergebnis eine Matrix über z.B. Moment- und Drehzahlklassen auf. In den Feldern steht die jeweilige Zeitdauer, bei der das System, in den Klassen, betrieben worden ist.¹¹⁹ Daraus kann man nun für jede einzelne Momentenklasse über alle Drehzahlklassen eine Summe bilden. Danach werden diese Summen der einzelnen Momentklassen miteinander addiert. Damit erhält man eine Gesamtsumme der Beanspruchung. In der Abbildung ist in der oberen Hälfte der Momentenverlauf und in der unteren Hälfte der Drehzahlverlauf zu sehen. Es wird nun registriert wie lange das System sich in einer Momentenklasse pro Drehzahl befindet.

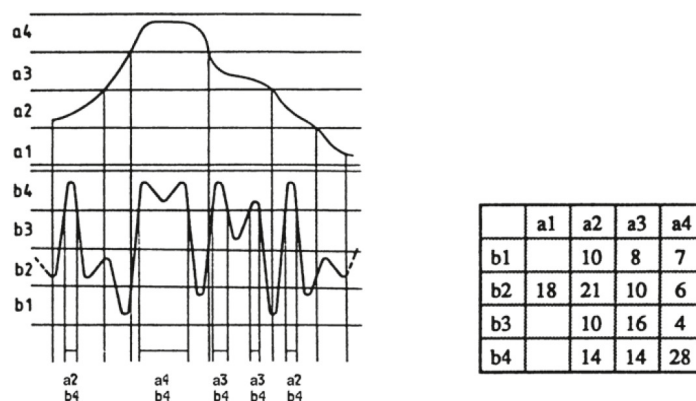


Abbildung 8.6: Moment- und Drehzahlverlauf klassiert in Matrix¹²⁰

Dann wird die jeweilige Drehzahl mit der Zeitdauer multipliziert, somit erhält man die Umdrehungen bzw. Überrollungen. Danach werden die einzelnen Überrollungen mit dem jeweiligen Drehmoment multipliziert. Diese Produkte werden dann aufsummiert. Dadurch erhält man die Summe der Beanspruchung, für eine Drehmomentklasse, über alle Überrollungen.

8.2.3.2 Das Rainflow-Verfahren

Das Rainflow-Verfahren ermöglicht eine werkstoffmechanisch begründete Beschreibung einer Belastungs-Zeit-Funktion.¹²¹ Aus der Belastungs-Zeit-Funktion werden mithilfe der

¹¹⁹ Vgl. (Haibach, 2006 S. 75)

¹²⁰ (Köhler, 2012 S. 62)

Rainflowmethode geschlossene Spannungs-Dehnungs Hysteresen herausgefiltert. Der Name *Rainflow* leitet sich von dem Bild einer asiatischen Pagode ab, von der der Regen von Dach zu Dach nach unten fließt. In gleicher Weise kann bei diesem Algorithmus die Suche nach den Schwingspielen graphisch dargestellt werden.

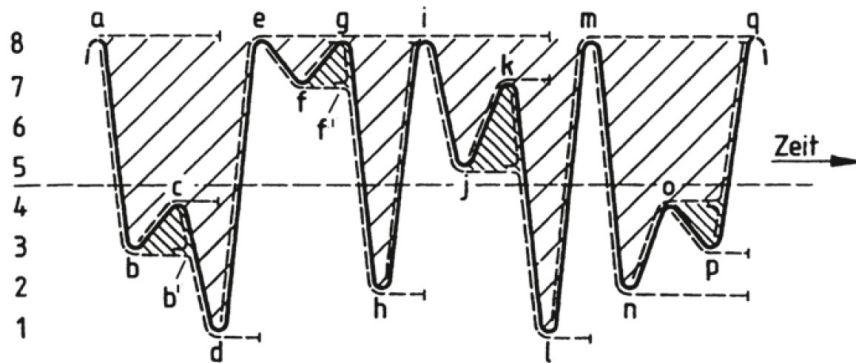


Abbildung 8.7: Belastungs-Zeit-Funktion untersucht mit Rainflow-Methode¹²²

Der Belastungs-Zeit-Verlauf wird sich um 90° im Uhrzeigersinn gedreht vorgestellt. Zum bildlichen Verständnis läuft nun von jedem Umkehrpunkt Wasser nach unten. Ein Halbzyklus ist dann gegeben, wenn das Wasser mit einem Strahl von einem darunter liegenden Umkehrpunkt zusammentrifft (c-b'), oder wenn der Strahl einen Umkehrpunkt erreicht, bei dem der darauf folgende Abstand der Umkehrpunkte eine gleich große oder größere Schwingbreite hat ($b-c < c-d$, $a-d = d-e$) oder der Strahl bis zum Ende der Zeitachse reicht. Es gibt weitere Zählalgorithmen wie die 3- oder 4- Punktmethode. Die Ergebnisse der Algorithmen können sich in Schleifenzahl und Residuum voneinander unterscheiden.¹²³

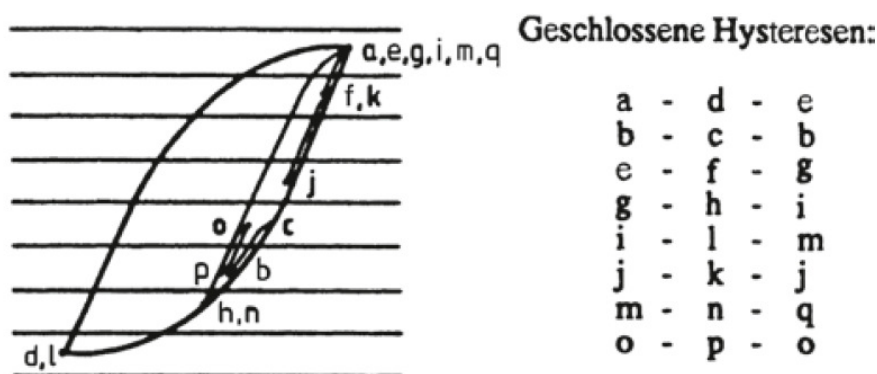


Abbildung 8.8: geschlossene Hystereseschleifen¹²⁴

¹²¹ Vgl. (Haibach, 2006 S. 370)

¹²² (Köhler, 2012 S. 23)

¹²³ Vgl. (Köhler, 2012 S. 24)

¹²⁴ (Köhler, 2012 S. 24)

Die geschlossenen Hysteresen werden gezählt und in einer Matrix abgelegt, die entweder Amplituden und Mittelwerte oder Start- und Zielklassen gegenüberstellt. Die gezählten Zyklen werden aus der Belastungszeitfunktion herausgenommen. Die dadurch neu auftretenden, geschlossenen Hysteresen werden wiederum gezählt und herausgeschnitten, usw. Wenn am Ende Halbzyklen zurück bleiben, nennt man diese das Residuum. Bei kurzen Lastzyklen sollte das Residuum berücksichtigt werden, bei vielen Lastzyklen $N > 100\ 000$ normalerweise nicht.¹²⁵

8.2.3.3 Ergebnisse

Links im Bild ist die Summenhäufigkeit im Zug und Schubbetrieb über die Überrollungen angegeben. Rechts sieht man die Summenhäufigkeit mithilfe der Rainflow-Methode.

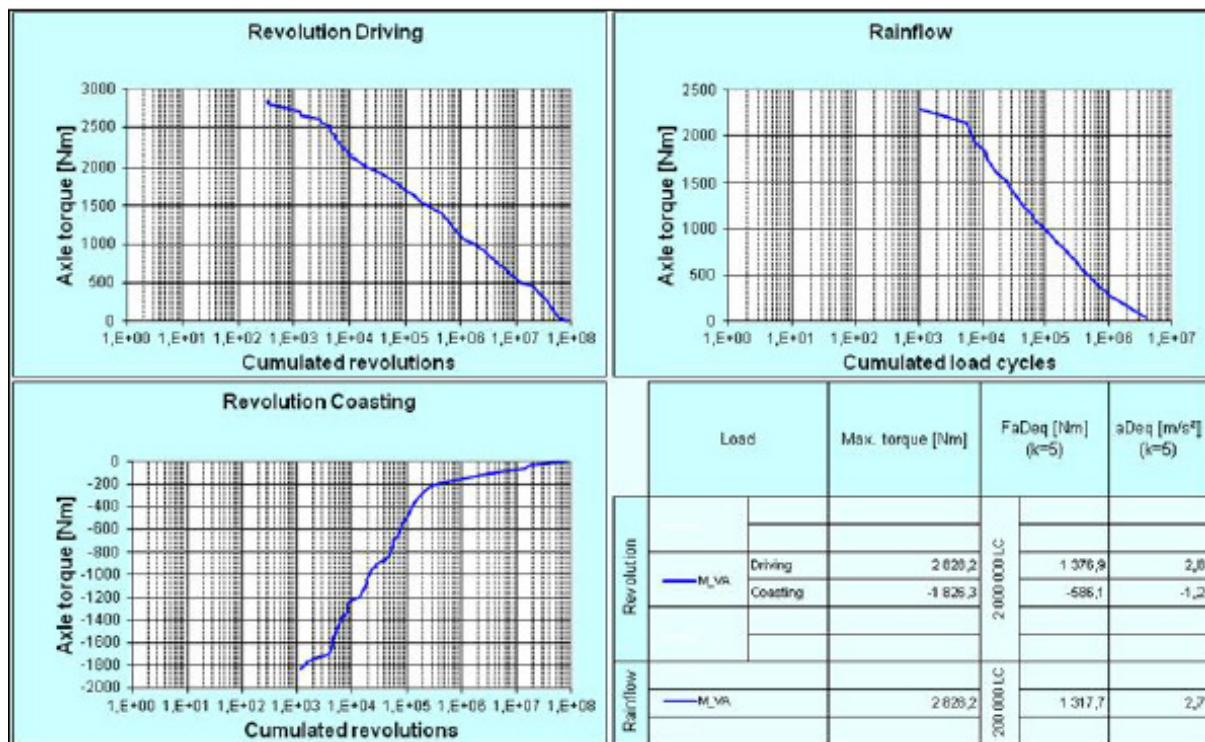


Abbildung 8.9: Lastkollektive¹²⁶

¹²⁵ Vgl. (Köhler, 2012 S. 27)

¹²⁶ (Proissl, 2013 S. 80)

8.2.4 Dauerlaufprogramme

Aus dem Häufigkeitsbereich findet nun wieder eine Rücktransformation in den Zeitbereich statt. Hier kann zum zweiten Mal eine Raffung stattfinden, indem man die Teile der Summenhäufigkeit die einen geringen Beitrag zur Schädigung leisten weglässt. Die gesamte Schädigungswirkung darf sich dabei nicht verändern und es muss eine Durchmischung der Stufen stattfinden, da der zuvor erwähnte Verlust der Reihenfolge der Belastungen die Lage der Lebensdauer in gewissen Grenzen beeinflussen kann.^{127,128} Die folgende Abbildung gibt Beispiele für verschiedene Möglichkeiten eines Prüfprogramms.

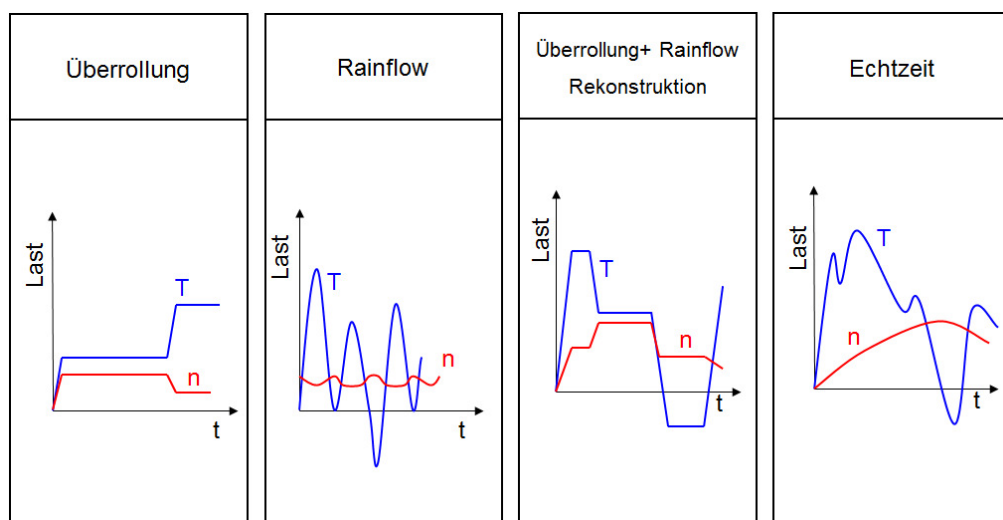


Abbildung 8.10: verschiedene, mögliche Dauerlaufprogramme¹²⁹

8.3 Schädigungsrelevante Betriebszustände: Unterschied Getriebe und Hybridmodul

Um bei der Raffung keinen Fehler im Hinblick auf die geforderte Lebensdauer zu erhalten, müssen die wahren Schadensmechanismen der Bauteile bekannt sein. Die Raffung entsteht durch die Reduktion nichtschädigungsrelevanter Anteile aus dem Referenzlastzyklus.

Beim Getriebe zum Beispiel ist es die mechanische Last die die Schädigung bestimmt. Diese wird aus Zeitdauer, Frequenz bzw. Drehzahl und Moment berechnet, wobei das Moment der einflussreichste Faktor ist. Infolgedessen spielt beim Getriebe dessen Teillastbetrieb eine un-

¹²⁷ Vgl. (Naunheimer, 2007 S. 254)

¹²⁸ Vgl. (Haibach, 2006 S. 9)

¹²⁹ (Proissl, 2013 S. 82)

tergeordnete Rolle. Je höher die Momente, desto mehr Schädigung. Dies ergibt sehr gute Voraussetzungen für eine Raffung des Lastkollektives.

Beim E-Motor eines Hybridmoduls steht neben der mechanischen Belastung auch die thermische Belastung im Vordergrund. Im Gegensatz zum Getriebe ist nicht nur das Moment, sondern auch die Temperatur begrenzender Faktor im Betrieb. Das bedeutet, dass man einen repräsentativen Hybridmodul- Zyklus nicht in gleicher Weise wie einen Getriebezyklus erstellen kann.

Für eine längere Zeitspanne wird der E-Motor nur bei niedrigen Drehzahlen und geringen Geschwindigkeiten betrieben. Dort befindet sich der Bereich der rein elektrischen Fahrt. Fahrten des Fahrzeugs mit Höchstgeschwindigkeit, betreffen das Hybridmodul nur durch das übertragene VKM-Drehmoment, nicht aber aufgrund des eigenen Betriebs. Die stärkste Belastung erfährt der E-Motor des Hybridmoduls während der Boost-Phasen. Diese treten bei niedrigen Geschwindigkeiten unter hoher Lastanforderung auf. Durch den beschriebenen Betrieb kommt es im Hybridmodul zu erhöhten Temperaturen welcher ihrerseits eine Beschleunigung der Materialalterung der Kunststoffe hervorrufen. Ebenso erzeugt der Wechsel der Temperatur Spannungen durch Wärmeausdehnung in den Materialien.

Es gilt also herauszufinden, welcher Betriebszustand schädigend für das System ist. Idealerweise schafft man eine lückenlose Verknüpfung zwischen allen bekannten Schäden und den verursachenden Betriebszuständen. Danach erfolgt eine Priorisierung. Damit erhält man eine grobe Auswahl der schädigenden Betriebszustände.

Aufbauend auf dieser Arbeit sollte nun in weiterer Folge für das Hybridmodul eine systematische Analyse der Betriebsarten und Schadenszusammenhänge durchgeführt werden. Das Wissen von Experten, die die Zusammenhänge von Schäden und Betrieb richtig verstehen, ist dafür unabdingbar.

8.4 Schlussfolgerung

Die Aufgabe der Arbeit war optimierte Prüfprozeduren und Prüfaufbauten darzustellen. Dieser Aufgabe ging die Analyse des Systems voraus, um alle Funktionsanforderungen zu erfassen. Durch die Erfassung der Funktionsanforderungen in Kapitel 7 ist es möglich eine nachvollziehbare Grundlage für das weitere Vorgehen zu schaffen. Zudem gelingt es einen Überblick über die Komplexität des P2 Moduls und seiner Baugruppen zu gewinnen. Im weiteren Verlauf des Kapitels werden nun die daraus abgeleiteten Prüfaufbauten und Prüfprozeduren beschrieben.

Die systematische Ableitung der Prüfaufbauten und Prüfprozeduren aus den Funktionsanforderungen und den jeweils kritischen Anwendungen ermöglicht ein Stück weit eine Loslösung von rein erfahrungsbasierter Entscheidungsfindung. Insofern entsteht eine Optimierung der bestehenden Sichtweise über Themen, indem Klarheit und Nachvollziehbarkeit über notwendige Aufbauten geschaffen wird, sowie durch die eine oder andere Funktionsanforderung eine neue Prüfprozedur hinzukommt.

Es werden eine Reihe an Informationen und Denkanstößen dargelegt, die helfen in Zukunft bei Projekten ähnlicher Art richtungsweisende Schritte zu setzen und die anstehenden Herausforderungen effizient zu lösen. Die erklärten Zusammenhänge dienen als Grundlage für weitere Projekte und können in Verbindung mit z.B. einer FMEA gewinnbringend eingesetzt werden.

Es konnten, wegen der Weitläufigkeit des Themas, die Prüfprozeduren wie die Aufbauten nicht weiter im Detail erklärt werden. Das Thema Validierung wurde in der Arbeit nur angeschnitten, da die Erstellung einer Prozedur für einen Dauerlauf ebenfalls komplex ist.

Das Thema Hybrid wird in Zukunft eine stetig wachsende Rolle spielen und immer mehr hybridisierte Fahrzeuge werden uns auf Europas Straßen begegnen. Die AVL List GmbH tut gut daran, sich diesem Thema stärker zu widmen um ihren Wissensstand weiter zu vermerken.

Der E-Motor als Antriebselement im Fahrzeug bringt den Maschinenbauer in den Genuss, sich neu mit Themen der Elektrotechnik auseinanderzusetzen, um die Beschaffenheit dieser Maschinen besser zu verstehen um dementsprechend zu konstruieren und zu testen.

Auf Antriebsstrangebene ergeben sich zudem neue Herausforderungen, bezüglich der Integration der neuen Funktionen in die Betriebsstrategie.

Die verschiedenen Disziplinen der Ingenieurwissenschaften werden auch in Zukunft immer enger zusammenarbeiten um die Elektrifizierung des Antriebsstrangs voranzutreiben und damit dem Ziel der emissionsfreien Mobilität näher zu kommen.

9 Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 2.1: Lohner Porsche | 2 |
| Abbildung 2.2: Toyota Prius..... | 3 |
| Abbildung 3.1: Preis in Euro pro Barrel Brent-Öl..... | 4 |
| Abbildung 3.2: CO2-Emissionen der durchschnittlichen Neuwagenflotte..... | 7 |
| Abbildung 3.3: Betriebsmöglichkeiten E-Motor | 9 |
| Abbildung 3.4: Überlagerung von Elektromotor Wirkungsgrad- und Verbrennungsmotor Verbrauchskennfeld | 10 |
| Abbildung 4.1: Serieller Hybrid | 13 |
| Abbildung 4.2: leistungsverzweigter Hybrid..... | 14 |
| Abbildung 4.3: P1 Hybrid..... | 16 |
| Abbildung 4.4: P2 Hybrid..... | 16 |
| Abbildung 4.5: P3 Hybrid..... | 17 |
| Abbildung 4.6: P4 Hybrid..... | 17 |
| Abbildung 5.1: Bremsvorgang eines Hybridfahrzeugs mit Rekuperation..... | 20 |
| Abbildung 5.2: Verbrauchskennfeld eines Otto Motors mit Saugrohreinspritzung (Verbrauchswerte in [g/kWh])..... | 22 |
| Abbildung 5.3: schematischer Schnitt durch ein P2 Hybridmodul..... | 24 |
| Abbildung 5.4: Synchronmaschine Innenläufer Bosch | 25 |
| Abbildung 5.5: Synchronmaschine Außenläufer ZF | 25 |
| Abbildung 5.6: Schematischer Aufbau- Antriebsstrang | 26 |
| Abbildung 5.7: Auslenkung des Rotors- Seitenansicht | 28 |
| Abbildung 5.8: Auslenkung des Rotors mit Gegenmomenten | 28 |
| Abbildung 5.9: Elektromagnetische Kräfte in der Bohrung deformieren das Gehäuse | 29 |
| Abbildung 5.10: mechanische Belastung..... | 30 |
| Abbildung 5.11: thermische Belastung..... | 31 |
| Abbildung 5.12: chemische Belastung | 32 |
| Abbildung 5.13: Schnittstellen des P2 Moduls mit seiner Umgebung | 33 |
| Abbildung 5.14: Steuersystem | 36 |
| Abbildung 7.1: Betrachtete Ebenen der Funktionsanforderungen..... | 42 |
| Abbildung 7.2: P2 Modul aufgeteilt in Baugruppen..... | 45 |
| Abbildung 7.3: Funktionsanalyse Blatt: P2 Modul..... | 46 |
| Abbildung 7.4: Funktionsanalyse Blatt: Kupplung C0..... | 47 |
| Abbildung 7.5: Funktionsanalyseblatt: E-Motor | 48 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 7.6: Funktionsanalyseblatt: Hydraulik und Schmierung 1/2 | 49 |
| Abbildung 7.7: Funktionsanalyseblatt: Hydraulik und Schmierung 2/2 | 50 |
| Abbildung 7.8: Funktionsanalyseblatt: Lager und Gehäuse | 51 |
| Abbildung 7.9: Zusammenhang Prüfaufbauten | 53 |
| Abbildung 7.10: Hydrauliklabor Ventilblock-Leckage | 54 |
| Abbildung 7.11: Hydrauliklabor Ventilblock, E-Pumpe, Filter, Kühler | 55 |
| Abbildung 7.12: Verläufe des effektiven und theoretischen Förderstroms | 58 |
| Abbildung 7.13: 2M Prüfaufbau für Kupplung | 60 |
| Abbildung 7.14: : Prinzipskizze Schwenkprüfstand | 65 |
| Abbildung 7.15: Schwenkprüfstand mit Kunststoffgehäuse | 65 |
| Abbildung 7.16: Ein-Maschinen E-Motor Prüfstand | 68 |
| Abbildung 7.17: Exemplarisches Wirkungsgradkennfeld E-Motor (PSM, P _{nenn} = 10 KW). 70 | |
| Abbildung 7.18: 3M Prüfstands Aufbau für P2 Modul inkl. Getriebe als Beispiel für eine Front-quer Antriebseinheit | 73 |
| Abbildung 7.19: 3M Prüfstands Aufbau für P2 Modul inkl. Getriebe als Beispiel für eine Heckantrieb | 73 |
| Abbildung 7.20: Antriebsstrangprüfstand für P2 Modul inkl. Getriebe und VKM als Beispiel für eine Front-quer Antriebseinheit | 77 |
| Abbildung 7.21: Antriebsstrangprüfstand für P2 Modul inkl. Getriebe und VKM als Beispiel für eine Heckantrieb | 78 |
| Abbildung 8.1: Ablauf vom Anforderungsprofil zum Dauerlaufprogramm | 82 |
| Abbildung 8.2: Erlangung des Anforderungsprofils | 83 |
| Abbildung 8.3: Drehmoment-Zeit Verlauf E-Motor | 85 |
| Abbildung 8.4: Drehzahl-Zeit Verlauf E-Motor | 85 |
| Abbildung 8.5: Überführung des Beanspruchungsverlaufs in eine Summenhäufigkeit | 86 |
| Abbildung 8.6: Moment- und Drehzahlverlauf klassiert in Matrix | 87 |
| Abbildung 8.7: Belastungs-Zeit-Funktion untersucht mit Rainflow-Methode | 88 |
| Abbildung 8.8: geschlossene Hystereseschleifen | 88 |
| Abbildung 8.9: Lastkollektive | 89 |
| Abbildung 8.10: verschiedene, mögliche Dauerlaufprogramme | 90 |

10 Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 3.1: Emissionsgrenzwerte für Pkw mit Ottomotor; Angaben in mg/km außer PN (1/km)..... | 5 |
| Tabelle 3.2: Emissionsgrenzwerte für Pkw mit Dieselmotor, Angaben in mg/km außer PN (1/km)..... | 6 |
| Tabelle 4.1: Übersicht der Hybridkonzepte | 18 |
| Tabelle 7.1: Überblick über Funktionsanforderungen und versch. relevante Größen zur Funktionserprobung am Schwenkprüfstand | 66 |
| Tabelle 7.2: Überblick über Funktionsanforderungen und versch. relevante Größen zur Funktionserprobung am E-Maschinen Prüfstand..... | 69 |
| Tabelle 7.3: Verschiedene relevante Größen für 3- Maschinen Prüfstand | 75 |
| Tabelle 7.4: Überblick über Funktionsanforderungen und verschiedene relevante Größen für die Funktionserprobung am Antriebsstrang Prüfstand | 79 |
| Tabelle 8.1: Schematische Darstellung eines Streckenmixes mit Messumfang und Hochrechnungsfaktoren | 84 |

11 Literaturverzeichnis

Albers, Dr.-Ing. Albert. 1994. Advanced Development of Dual Mass Flywheel. [Buchverf.] LuK GmbH & Co. KG. *LuK Symposium Buch 1994*. 1994.

Antriebstechnik, special. 2006. *Stromisolierte Wälzlager: Maßnahmen gegen Elektrokorrosion*. 2006.

Austria, Virtuelles Kraftfahrzeug Museum.

http://www.voz.co.at/VKMA/Lohner/lohner_a.html. [Online] [Zitat vom: 21. 10 2014.]

Auto-News. http://www.auto-news.de/auto/news/bildergalerie_Schon-gefahren-VW-Touareg-V6-TSI-Hybrid-als-Prototyp_id_23607&picindex=7;. [Online] [Zitat vom: 16. 09 2014.]

AVL List GmbH. 2014. Graz : s.n., 2014.

Beuth. 2009. <http://www.beuth.de/de/norm/din-en-60034-4-vde-0530-4-2009-04/113468838>. [Online] 04 2009. [Zitat vom: 13. 10 2014.]

- Binder, Andreas. 2012.** *Elektrische Maschinen und Antriebe*. s.l. : Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- BMW Group Reiner Friedrich. 2013.** http://lexikon.kfz.tu-berlin.de/kfz-seminar/downloads/Vortrag_TU_Berlin_Final_Netz.pdf. [Online] 31. 01 2013. [Zitat vom: 30. 04 2014.]
- Bosch.** http://auto2014.bosch.com.cn/web/site_en/technology_press03.html. [Online] [Zitat vom: 25. 09 2014.]
- CENELEC. 2004.** *Drehende elektrische Maschinen, Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten IEC 60034-1:2004*. s.l. : VDE, 2004.
- Ebi, Günter. 2006.** *Maßnahmen zur Reduzierung von Gehäuseschwingungen bei Generatoren*. s.l. : Symposium Schwingungsdiagnose an Kraftwerksturbosätzen, 2006.
- Exxon-Mobil. 2009.** *Hydraulischer Wirkungsgrad*. s.l. : Exxon-Mobil, 2009.
- Fischer, Robert. 2012.** *Das Getriebebuch*. Wien : Springer, 2012.
- Fischer, Rolf. 2013.** *Elektrische Antriebe*. s.l. : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2013.
- GfT. 2002.** *Arbeitsblatt 7*. s.l. : GfT, 2002.
- Grollius, Horst-W. 2012.** *Grundlagen der Hydraulik*. Muenchen : Carl Hanser Verlag , 2012.
- Haibach, Erwin. 2006.** *Betriebsfestigkeit*. Berlin : Springer, 2006.
- Hofmann, Peter. 2010.** *Hybridfahrzeuge*. s.l. : Springer, 2010.
- Hussein, Iqbal. 2011.** *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals*. USA : CRC Oress, 2011.
- ISO/TC22. 2003.** *Road vehicles — Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment 1*. Schweiz : ISO, 2003.
- Klauer, Kiefer, Ofner. 2002.** *Der Antrieb für den BMW 325i SULEV*. s.l. : Springer, 2002.
- Klemm, M., Beckmann, M. und Scholz, R. 2008.** *Energetische Bewertung der Substitution von fossilen Brenn-stoffen durch Ersatzbrennstoffe und Biomasse*. Dresden : s.n., 2008.
- Köhler. 2012.** *Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit*. Berlin : Springer, 2012.

- Magnetventileshop.** <http://www.magnetventile-shop.de/proportional-magnetventil-1/4-zoll-nc-direktgesteuert-v30.html>. [Online] [Zitat vom:]
- Merker, Teichmann. 2014.** *Grundlagen Verbrennungsmotoren*. Wiesbaden : Springer, 2014.
- Namo-Motors.** <http://www.nomamotors.com.br/2013/index.php/veiculos-novos/2013-04-27-19-23-42>. [Online] [Zitat vom: 21. 10 2014.]
- Naunheimer, Bertsche, Lechner. 2007.** *Fahrzeuggetriebe*. Berlin : Springer, 2007.
- Prof. Wallentowitz, Dr. Biermann, Bady, Renner. 1999.** <http://www.ika.rwth-aachen.de/forschung/veroeffentlichung/1999/25.-26.02/>. [Online] 25. 02 1999. [Zitat vom: 21. 10 2014.]
- Proissl, Christian. 2013.** *Basistestprogramm für die Getriebeerprobung*. 2013.
- Puls, Thomas. 2013.** *CO2-Regulierung für Pkw*. Köln : Institut der deutschen Wirtschaft Köln, 2013.
- R. Gasch, R. Nordmann, H. Pfützner. 2006.** *Rotordynamik*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 2006. ISBN 3-540-41240-9.
- Reif, Noreikat, Borgeest Hrsg. 2012.** *Kraftfahrzeuge- Hybridantriebe*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2012.
- Rost, Norbert. 2012.** <http://www.peak-oil.com/2012/12/gesucht-eine-andere-form-des-wirtschaftens/>. [Online] 02. 12 2012. [Zitat vom: 21. 10 2014.]
- Rummich, Erich. 2012.** <http://scienceblog.at/book/export/html/389>. [Online] 02. 08 2012. [Zitat vom: 14. 11 2014.]
- Schaeffler. 2014.** *Schaeffler Kolloquium- Weiterentwicklung des Hybridmoduls von Schaeffler*. 2014.
- Schäfer, Heinz. 2009.** *Praxis der elektrischen Antriebe für Hybrid- und Elektrofahrzeuge*. Deutschland : expert Verlag, 2009.
- SUNHYDRAULIK. 2010.**
http://www.sunhydraulics.com/sites/default/files/media_library/tech_resources/rel-Prop_terms-definitions-DE.pdf. [Online] 2010. [Zitat vom:]
- Toyota. o.J..** http://www.toyota.de/about/news/2013/details_2013_57.tmex. [Online] o.J. [Zitat vom: 29. 04 2014.]

VCÖ. 2012. <http://www.news.at/a/vcoe-studie-taeglich-36-kilometer-319635>. [Online] 20. 02 2012. [Zitat vom: 05. 11 2014.]

W. Reik, O. Friedmann, I. Agner, O. Werner. 2004. *Die Kupplung - das Herz des Doppelkupplungsgetriebes*. Friedrichshafen : s.n., 2004.

Wikipedia. Abgasnorm.

http://de.wikipedia.org/wiki/Abgasnorm#Schadstoffklassen_und_Plaketten. [Online] [Zitat vom: 15. 11 2014.]

—. **2013.** [http://de.wikipedia.org/wiki/Funktion_\(Objekt\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Funktion_(Objekt)). [Online] 14. 10 2013. [Zitat vom: 21. 10 2014.]

—. **2014.** http://de.wikipedia.org/wiki/Funktionsintegration#cite_note-2. [Online] 10. 10 2014. [Zitat vom: 11. 11 2014.]

—. **2014.** http://de.wikipedia.org/wiki/Hybrid_Synergy_Drive. [Online] 11. 11 2014. [Zitat vom: 15. 11 2014.]

—. **2014.** <http://de.wikipedia.org/wiki/Lastenheft>. [Online] 17. 10 2014. [Zitat vom: 18. 11 2014.]

—. **2014.** Verification and validation.

http://en.wikipedia.org/wiki/Verification_and_validation. [Online] 13. 11 2014. [Zitat vom: 18. 11 2014.]

—. **2014.** Verifizierung. <http://de.wikipedia.org/wiki/Verifizierung>. [Online] 24. 10 2014. [Zitat vom: 18. 11 2014.]

Wikipwedia. 2014. <http://de.wikipedia.org/wiki/Kavitation>. [Online] 28. 07 2014. [Zitat vom: 22. 09 2014.]

Will, Dieter und Gebhardt, Norbert. 2011. *Hydraulik*. Berlin : Springer, 2011.

w-tech. http://www.servotechnik.de/fachwissen/auslegung/f_beitr_00_708.htm. [Online] [Zitat vom: 21. 11 2014.]

ZF-Friedrichshafen.

http://www.zf.com/corporate/en/products/product_range/cars/cars_hybrid_module.shtml. [Online] [Zitat vom: 25. 09 2014.]