

Alexander Basler

**Eine modulare Funktionsarchitektur
zur Umsetzung einer gesamt-
heitlichen Betriebsstrategie für
Elektrofahrzeuge**

Alexander Basler

**Eine modulare Funktionsarchitektur
zur Umsetzung einer gesamtheitlichen
Betriebsstrategie für Elektrofahrzeuge**

**Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik
Band 42**

Herausgeber

FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

Das Institut für Fahrzeugsystemtechnik besteht aus den eigenständigen Lehrstühlen für Bahnsystemtechnik, Fahrzeugtechnik, Leichtbautechnologie und Mobile Arbeitsmaschinen

Eine Übersicht aller bisher in dieser Schriftenreihe erschienenen Bände finden Sie am Ende des Buchs.

Eine modulare Funktionsarchitektur zur Umsetzung einer gesamtheitlichen Betriebsstrategie für Elektrofahrzeuge

von
Alexander Basler

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Fakultät für Maschinenbau, 2015

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe
Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed
under the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License
(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*



*The cover page is licensed under the Creative Commons
Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE):
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>*

Print on Demand 2015

ISSN 1869-6058

ISBN 978-3-7315-0421-4

DOI: 10.5445/KSP/1000048340

Vorwort des Herausgebers

Die Fahrzeugtechnik ist gegenwärtig großen Veränderungen unterworfen. Klimawandel, die Verknappung einiger für Fahrzeugbau und -betrieb benötigter Rohstoffe, globaler Wettbewerb, gesellschaftlicher Wandel und das rapide Wachstum großer Städte erfordern neue Mobilitätslösungen, die vielfach eine Neudefinition des Fahrzeugs erforderlich machen. Die Forderungen nach Steigerung der Energieeffizienz, Emissionsreduktion, erhöhter Fahr- und Arbeitssicherheit, Benutzerfreundlichkeit und angemessenen Kosten finden ihre Antworten nicht aus der singulären Verbesserung einzelner technischer Elemente, sondern benötigen Systemverständnis und eine domänenübergreifende Optimierung der Lösungen.

Hierzu will die Karlsruher Schriftenreihe für Fahrzeugsystemtechnik einen Beitrag leisten. Für die Fahrzeuggattungen Pkw, Nfz, Mobile Arbeitsmaschinen und Bahnfahrzeuge werden Forschungsarbeiten vorgestellt, die Fahrzeugsystemtechnik auf vier Ebenen beleuchten: das Fahrzeug als komplexes mechatronisches System, die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion, das Fahrzeug in Verkehr und Infrastruktur sowie das Fahrzeug in Gesellschaft und Umwelt.

Die nach wie vor begrenzte Reichweite batterieelektrischer Fahrzeuge erschwert deren Verbreitung im Markt. Neben der Verbesserung der Batterien erfordert dies eine Steigerung der Energieeffizienz. Beiträge dazu liefern geeignete Topologien des Antriebssystems sowie ganzheitliche Fahr- und Betriebsstrategien, die durch fahrsituationsangepasste und prädiktive Nutzung und Zwischenspeicherung der Energie einen sparsamen Verbrauch erreichen. In der vorliegenden

Arbeit werden nach einer energetischen Bewertung unterschiedlicher Antriebskonfigurationen eine generische Funktionsarchitektur sowie eine Betriebsstrategie erstellt, die den Fahrzeugantrieb und die Fahrzeugklimatisierung umfassen und orientiert am Fahrzyklus eine gemeinsame Optimierung von Reichweite, Fahrdynamik und thermischem Komfort umsetzen.

Karlsruhe, 08.05.2015

Frank Gauterin

**Eine modulare Funktionsarchitektur zur
Umsetzung einer gesamtheitlichen
Betriebsstrategie für Elektrofahrzeuge**
Ein ganzheitlicher Ansatz aus Gesamtfahrzeugsicht

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Fakultät Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation
von

Dipl. Ing. Alexander Basler

| | |
|-----------------------------|--|
| Tag der mündlichen Prüfung: | 06.05.2015 |
| Hauptreferent: | Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin |
| Korreferent: | Prof. Dr. Ing. Martin Doppelbauer |
| Prüfungsvorsitz: | Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h.c. Jivka Ovtcharova |

Kurzfassung

Elektrofahrzeuge besitzen aktuell aufgrund des geringen Energieinhalts der Hochvolt-Traktionsbatterie eine beschränkte Reichweite, welche im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen wesentlich geringer ausfällt. Darüber hinaus reduzieren elektrische Nebenverbraucher zur Realisierung von Fahrzeug- sowie Komfortfunktionalitäten die ohnehin beschränkte Reichweite zusätzlich. Vor diesem Hintergrund kann beim alltäglichen Fahrzeugeinsatz ein vielschichtiger Zielkonflikt aus Reichweiten-, Dynamik- und Komfortansprüchen entstehen.

Durch eine modulare Funktionsarchitektur soll dieser Zielkonflikt mittels geeigneter Betriebsstrategie-Maßnahmen entschärft werden. Hierzu ist eine strecken-, situations- sowie umgebungsspezifische Betriebsstrategievorgabe für das Gesamtfahrzeug notwendig. Insbesondere steht hierbei ein individuelles Energie- bzw. Reichweitenmanagement als innovative Funktion im Fokus.

Die vorliegende Arbeit entwickelt hierzu einen ganzheitlichen Systemansatz zur Umsetzung und Applikation von reichweitensteigernden Funktionen. Simulationsgestützte Energieflussanalysen aus Sicht des Gesamtfahrzeugs bilden die Grundlage zur Identifikation möglicher Effizienz-Funktionen und Betriebsstrategie-Maßnahmen für Elektrofahrzeuge. In diesem Kontext werden die für eine Objektivierung notwendigen Qualitätsmerkmale beschrieben und analysiert. Mit Hilfe eines mathematischen Lösungsverfahrens kann unter Einbeziehung dieser Qualitätsmerkmale im Sinne einer Optimierung das Spannungsfeld bestehend aus Reichweiten-, Dynamik- sowie Komfortansprüchen temporär zu Gunsten einer Reichweitenverlängerung verlagert werden. Die Einhaltung von annehmbaren Dynamik- und Komfortgrenzen als zu applizierende Größen wird hierbei dennoch gewährleistet. Die über die vorgestellte Funktionsarchitektur

umsetzbaren Betriebsstrategie-Maßnahmen werden in repräsentativen Zyklen validiert und hinsichtlich ihres Beitrags zum Einsparpotential in Bezug auf den Energiebedarf quantifiziert. Hierüber kann eine Empfehlung für die Umsetzung und Applikation einer ganzheitlichen Betriebsstrategie aus Gesamtfahrzeugsicht gegeben werden.

Abstract

A modular function architecture for implementing a holistic operation strategy for battery electric vehicles

Due to the low energy content of the high-voltage traction battery, the range of battery electric vehicles is currently restricted. Compared to conventional vehicles, the range is significantly lower. This restricted range is further reduced by electric auxiliary systems, which ensure the realization of both vehicle and comfort functionalities. Thus, using a battery electric vehicle everyday might result in a complex conflict of objectives between range, dynamic and comfort requirements. This conflict of objectives is expected to be alleviated by means of a modular function architecture, using appropriate operation strategy measures. Therefore, it is necessary to implement route-specific, situation-specific and environment-specific operation strategy specifications for the whole vehicle. The focus is on an individual energy and range management as innovative functionalities.

For this purpose, this study develops a holistic system approach, in order to implement and apply range-extending functionalities. Simulation-assisted analyses of energy flows considering the whole vehicle represent the basis to identify potential efficiency functionalities and operation strategy measures for battery electric vehicles. In this context, the quality characteristics, which are essential for an objectivization are described and analyzed. In terms of optimization the tension between range, dynamic and thermal comfort requirements can temporarily be shifted to achieve an extended range by means of a mathematical solution method, which involves these quality characteristics. The observance of

acceptable limits of dynamic and thermal comfort as applicable parameters can nevertheless be ensured. A function architecture is presented, which allows the implementation of operation strategy measures. These are validated in representative driving cycles and quantified in terms of their saving potential regarding the energy demand. In this way, a recommendation can be given concerning the implementation and application of a holistic operation strategy regarding the whole vehicle.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit im Rahmen des Kooperationsprojektes „Fahrsteuerung für Elektrofahrzeuge“ als Doktorand bei der Porsche Engineering Services GmbH im Bereich Antriebsstrang und der Porsche AG in der Abteilung Entwicklung Gesamtfahrzeug Energiemanagement. Die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit wurde durch das Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) durchgeführt. Daher gilt mein außerordentlicher Dank Herrn Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin für die Möglichkeit zu diesem Kooperationsprojekt, die wissenschaftliche Förderung und Betreuung, das stets vorhandene Interesse an dieser Arbeit und die regelmäßigen konstruktiven Meilenstein-Gespräche sowie für die Übernahme des Hauptreferates.

Für die Übernahme des Korreferates gebührt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Doppelbauer vom Lehrstuhl für Hybrid Elektrische Antriebe.

Herr Dr. Daniel Armbruster, Herr Dirk Lappe sowie Herr Dr. Matthias Lederer danke ich für das in mich gesetzte Vertrauen sowie für die Möglichkeit und die Rahmenbedingungen zu diesem Kooperationsprojekt seitens der Firma Porsche.

Darüber hinaus bin ich meinen Betreuern der Porsche Engineering, Dr. Jan-Peter Müller-Kose, sowie der Porsche AG, Dr. Martin Roth und Dr. Frank Weberbauer, zu ganz besonderem Dank verpflichtet. Insbesondere das mir entgegengebrachte Vertrauen zur selbständigen Projektarbeit und den nötigen Freiraum zur wissenschaftlichen und methodischen Arbeit weiß ich sehr zu schätzen. Des Weiteren möchte ich Euch für wesentliche Impulse danken, ohne welche die vorliegende Arbeit in dieser Form nicht hätte entstehen können.

Allen Mitarbeitern des Fachbereichs möchte ich für die angenehme, freundliche und außerordentlich hilfsbereite Arbeitsatmosphäre sowie inspirierende Gespräche danken. Herrn Dr. Marco Fleckner möchte ich in diesem Kontext für seine stetige Hilfe und Unterstützung im alltäglichen Projektgeschäft sowie bei wissenschaftlichen Fragestellungen und für das Korrekturlesen dieser Arbeit ganz besonders danken.

Herr Bastian Freese und insbesondere Herr Peter Megyesi möchte ich für die intensive Zusammenarbeit am Innenraum-Modell und der damit verbundenen gemeinsamen Veröffentlichung danken.

Darüber hinaus gilt mein Dank allen betreuten Diplomanden, insbesondere mit namentlicher Erwähnung Uwe Brenndörfer, Matthias Halfer, Axel Gemander und Raoul Klein. Ihr habt durch Euer Engagement einen hilfreichen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet.

Von ganzem Herzen gilt mein außerordentlicher Dank meiner Familie für die Unterstützung und das Interesse an meinem gesamten Ausbildungsweg. Ohne diese Unterstützung wäre mir meine fundierte Ausbildung als Grundstein für diese Arbeit verwehrt geblieben.

Dir, Katrin, möchte ich für Deine Geduld und Dein Verständnis für zahlreiche Entbehrungen, für unzählige entgangene Wochenenden, Feiertage und Urlaube danken. Du hast mich stets motiviert und in meinem Vorhaben gestärkt.

Renningen, im Mai 2015

Alexander Basler

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----------|
| Symbolverzeichnis | xiii |
| 1. Einleitung | 1 |
| 1.1. Elektromobilität - Neue Chancen und Herausforderungen | 1 |
| 1.2. Zielsetzung und Aufbau der Arbeit | 2 |
| 2. Stand der Wissenschaft und Forschung | 5 |
| 2.1. Elektrisches Antriebssystem | 5 |
| 2.1.1. Traktionsbatterie als Energiespeicher im Fahrzeug | 6 |
| 2.1.2. Elektrische Maschinen | 7 |
| 2.1.3. Mechanische Komponenten des Antriebsstrangs | 15 |
| 2.2. Nebenaggregate | 17 |
| 2.2.1. Klimatisierung des Innenraums | 17 |
| 2.2.2. Weitere Nebenaggregate | 24 |
| 2.3. Elektronik im Kraftfahrzeug | 25 |
| 2.3.1. Fahrerassistenzsysteme | 25 |
| 2.3.2. Kommunikation und Vernetzung der Funktionen | 27 |
| 2.3.3. Sensorik | 27 |
| 2.4. Methodiken zur Entwicklung mechatronischer Systeme | 28 |
| 2.5. Betriebsstrategie und Energiemanagement | 30 |
| 2.5.1. Betriebsstrategien für Antriebssysteme | 31 |
| 2.5.2. Elektrisches Energiemanagement | 32 |
| 2.6. Einordnung der Arbeit | 33 |

| | |
|---|-----------|
| 3. Bewertung funktionaler Konzepte | |
| durch energetische Analysen bei Elektrofahrzeugen | 35 |
| 3.1. Anforderungsgerechte Gestaltung des Antriebskonzepts | 35 |
| 3.1.1. Fahrzeugsegmentabhängige Zielgrößen | 36 |
| 3.1.2. Auswahl der elektrischen Antriebsmaschine unter Berücksichtigung der gewichteten Zielgrößen | 40 |
| 3.1.3. Antriebstopologien unter Berücksichtigung der gewichteten Zielgrößen | 42 |
| 3.1.4. Diskussion relevanter Antriebstopologien hinsichtlich des Energieverbrauchs | 44 |
| 3.1.5. Simulative Evaluierung des Verbrauchseinflusses der Antriebstopologie | 47 |
| 3.2. Energieflussanalyse | 54 |
| 3.2.1. Energieflüsse des Antriebssystems | 54 |
| 3.2.2. Funktionen zur Energieverbrauchsreduzierung des Antriebssystems | 55 |
| 3.2.3. Energieflüsse im Gesamtfahrzeugkontext in Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen | 59 |
| 3.3. Schlussfolgerungen der Energieflussanalysen | 63 |
| 4. Funktionsarchitektur zur Umsetzung einer | |
| Betriebsstrategie aus Gesamtfahrzeugsicht | 67 |
| 4.1. Anforderungen an die Betriebsstrategie für Elektrofahrzeuge | 68 |
| 4.2. Aufbau und Aufgabenverteilung der modularen Funktionsarchitektur | 70 |
| 4.3. Energiemanagementansätze zur Betriebsstrategievorgabe | 71 |
| 4.3.1. Leistungsorientiertes Energiemanagement | 72 |
| 4.3.2. Agentenorientiertes Energiemanagement | 72 |
| 4.3.3. Ökonomische Modelle für ein Energiemanagement | 73 |

| | |
|---|------------|
| 4.3.4. Auktionsorientiertes Energiemanagement | 74 |
| 4.4. Klassifizierung und Auswahl | 75 |
| 4.4.1. Klassifizierung der Energiemanagement-Ansätze | 75 |
| 4.4.2. Evaluierung und Auswahl der Energiemanagement-Ansätze | 76 |
| 4.5. Modularisierung der Funktionsarchitektur | 78 |
| 5. Umsetzung der Funktionalitäten | |
| innerhalb der Funktionsarchitektur | 81 |
| 5.1. Funktionen des Energiemanagements | 81 |
| 5.1.1. Betriebsstrategie ohne Zielführung | 85 |
| 5.1.2. Betriebsstrategie in Zielführung | 87 |
| 5.1.3. Funktion zur Reduzierung der Batterieverluste | 89 |
| 5.2. Funktionen des Antriebsmanagements | 90 |
| 5.2.1. Fahrstrategie | 91 |
| 5.2.2. Betriebsmodusabhängige Drehmomentenvorgabe | 92 |
| 5.2.3. Drehmomentenkoordination und -steuerung | 95 |
| 5.3. Funktionen der Reichweitenermittlung | 98 |
| 5.3.1. Berechnung der Reichweite | 99 |
| 5.3.2. Prädiktion der Antriebsleistung | 101 |
| 5.3.3. Prädiktion der Klimatisierungsleistungen | 104 |
| 6. Virtuelle Gesamtfahrzeugumgebung | 105 |
| 6.1. Gesamtfahrzeugmodell | 106 |
| 6.1.1. Antriebssystem | 106 |
| 6.1.2. Innenraum und Klimatisierung | 107 |
| 6.1.3. Niedervolt-Bordnetz | 112 |
| 6.2. Ableitung eines Referenzfahrzeugs | 114 |
| 6.2.1. Dimensionierung und Ausführung des Antriebssystems | 114 |
| 6.2.2. Dimensionierung des Klimasystems | 115 |

| | |
|---|------------|
| 6.3. Modellvalidierung | 116 |
| 6.3.1. Modellvalidierung des Antriebsstrangmodells | 117 |
| 6.3.2. Modellvalidierung des Innenraummodells | 119 |
| 6.4. Virtuelle Software-in-the-Loop-Testumgebung | 120 |
| 6.5. Fahrzyklen | 121 |
| 7. Simulationsgestützte Betriebsstrategieoptimierung | 125 |
| 7.1. Methode zur Betriebsstrategieoptimierung | 125 |
| 7.2. Anwendung der Methode | 127 |
| 7.2.1. Objektivierung der Qualitätsmerkmale | 127 |
| 7.2.2. Einflussparameter | 131 |
| 7.2.3. Statistische Versuchsplanung | 134 |
| 7.2.4. Regressionsanalysen zur mathematischen Beschreibung der Zielgrößen | 135 |
| 7.2.5. Definition der Zielfunktion | 146 |
| 7.3. Ergebnisse der Optimierung zur Entschärfung des Zielkonflikts | 148 |
| 8. Validierung und Bewertung der Betriebsstrategie-Maßnahmen | 151 |
| 8.1. Degradierung des Antriebssystems | 151 |
| 8.1.1. Begrenzung von Drehmoment und Leistung | 151 |
| 8.1.2. Begrenzung der Maximalgeschwindigkeit | 153 |
| 8.2. Degradierung des Klimatisierungssystems | 154 |
| 8.2.1. Lineare Gewichtung der Zielgrößen | 155 |
| 8.2.2. Sensitivitätsanalyse durch unterschiedliche Gewichtung der Zielgrößen | 159 |
| 8.2.3. Untersuchungen zur Vorkonditionierung des Innenraums | 161 |
| 8.3. Reduzierung der Batterieverluste | 165 |
| 8.4. Verlustleistungsminimierte Allradverteilung | 168 |

| | |
|---|-----|
| 8.5. Prädiktive Betriebsstrategie durch Nutzung von Strecken- und Umgebungsdaten | 172 |
| 8.6. Zusammenfassung und Fazit der Betriebsstrategie | 175 |
| 9. Diskussion und Ausblick | 179 |
| A. Energieflussanalysen | 183 |
| B. Evaluierung der Energiemanagement-Ansätze | 185 |
| C. Bordnetz-Messungen und Fahrzyklen | 187 |
| D. Signifikanzprüfung | 189 |
| E. Lastpunktverteilung in Abhängigkeit der Betriebsstrategie | 191 |
| F. Abkürzungsverzeichnis | 193 |
| G. Literaturverzeichnis | 195 |

Symbolverzeichnis

| | | |
|--------------------------|---|-------------------|
| α_{abs} | Absorptionskoeffizient | — |
| α_{kl} | Wärmeübergangskoeffizient der Kleidung | $\frac{W}{m^2 K}$ |
| α_s | Einfallswinkel der Sonne | <i>rad</i> |
| β | Steigungswinkel | <i>rad</i> |
| $\Delta\dot{q}_{theo}$ | theor. Differenz der Wärmeabgabe | $\frac{W}{m^2}$ |
| δ | Schichtdicke | <i>m</i> |
| \dot{m}_{zu} | Luftmassenstrom | $\frac{kg}{s}$ |
| \dot{Q}_{Abluft} | Wärmestrom der Abluft | <i>W</i> |
| $\dot{q}_{abs\ sonne}$ | Absorbierte Sonneneinstrahlungsintensität | $\frac{W}{m^2}$ |
| \dot{q}_{ab} | Abgegebene Wärmestromdichte | $\frac{W}{m^2}$ |
| \dot{Q}_{durch} | Durchgangswärmestrom | <i>W</i> |
| \dot{Q}_{ges} | Gesamter Wärmestrom | <i>W</i> |
| $\dot{Q}_{interieur}$ | Wärmestrom des Interieurs | <i>W</i> |
| $\dot{Q}_{Karosserie}$ | Wärmestrom durch Karosserie | <i>W</i> |
| $\dot{Q}_{klima\ heiz}$ | Heizleistungsbedarf | <i>W</i> |
| $\dot{Q}_{klima\ kuehl}$ | Kühlleistungsbedarf | <i>W</i> |
| \dot{Q}_{klima} | Luftseitiger Leistungsbedarf | <i>W</i> |
| \dot{q}_{konv} | konvektiver Wärmestromdichte | $\frac{W}{m^2}$ |
| \dot{q}_m | menschlicher Bruttoenergieumsatz | $\frac{W}{m^2}$ |
| \dot{Q}_{sonne} | Sonneneinstrahlung | <i>W</i> |
| \dot{q}_{sonne} | Wärmeintensität der Sonne | $\frac{W}{m^2}$ |
| \dot{Q}_{strahl} | Wärmestrom durch Strahlung | <i>W</i> |
| \dot{q}_{strahl} | Wärmestromdichte infolge Strahlung | $\frac{W}{m^2}$ |
| \dot{Q}_{trans} | Wärmeeintrag infolge Transmission | <i>W</i> |

| | | |
|-----------------------------|--|---------------------|
| $\dot{q}_v \text{ atm}$ | Wärmestromdichte Atmung | $\frac{W}{m^2}$ |
| $\dot{q}_v \text{ dif}$ | Wärmestromdichte Diffusion | $\frac{W}{m^2}$ |
| $\dot{q}_v \text{ trans}$ | Wärmestromdichte Schweißbildung | $\frac{W}{m^2}$ |
| \dot{q}_v | Wärmestromdichte durch Verdunstung | $\frac{W}{m^2}$ |
| \dot{Q}_{zu} | Zugeführter Wärmestrom | W |
| ε | Emmissionskoeffizient | - |
| ε_h | Hysteresis-Koeffizient | $\frac{W}{kg}$ |
| ε_w | Wirbelstrom-Koeffizient | $\frac{W}{kg}$ |
| η | Wirkungsgrad | - |
| η_{ptc} | Wirkungsgrad PTC | - |
| γ | Hautdurchlässigkeit | $\frac{kg}{sN}$ |
| κ | Kurvenkrümmung | $\frac{1}{m}$ |
| λ | Wärmedurchgangskoeffizient | $\frac{W}{m^2 K}$ |
| λ_{kl} | Wärmedurchgangskoeffizient Kleidung | $\frac{W}{m^2 K}$ |
| λ_L | Lagrange Multiplikator | - |
| ω | Drehzahl | $\frac{rad}{s}$ |
| $\overline{\Delta a_x}$ | Größe zur Bewertung des Qualitätsmerkmals Dynamik | $\frac{m}{s^2}$ |
| $\overline{a_{+x}}$ | Durchschnittliche Beschleunigung im Fahrzyklus | $\frac{m}{s^2}$ |
| $\overline{a_{-x}}$ | Durchschnittliche Verzögerung im Fahrzyklus | $\frac{m}{s^2}$ |
| $\overline{b_{ac}}$ | Energiebedarf Klimatisierungssystem | $\frac{Wh}{km}$ |
| $\overline{b_{ant}}$ | Energiebedarf Antriebssystem | $\frac{Wh}{km}$ |
| $\overline{b_{zyk}}$ | Größe zur Bewertung des Qualitätsmerkmals Reichweite | $\frac{Wh}{km}$ |
| $\overline{PM\overline{V}}$ | Größe zur Bewertung des thermischen Komforts | - |
| \overline{V} | Durchschnittliche Geschwindigkeit im Fahrzyklus | $\frac{km}{h}$ |
| \overline{Y} | Mittelwert | - |
| ϕ | Luftfeuchte | - |
| ψ | Flussverkettung | Vs |
| ρ | Dichte Luft | $\frac{kg}{m^3}$ |
| σ | Stefan-Boltzmann-Konstante | $\frac{W}{m^2 K^4}$ |
| τ_{kl} | Absorptionskoeffizient | - |

| | | |
|----------------|--|------------------------|
| τ_{trans} | Transmissionskoeffizient | - |
| \vec{X} | Datenreihe aus Modell | - |
| \vec{Y} | Datenreihe aus Messung | - |
| A | Flächenelement | m^2 |
| A_k | Verglasungsfläche | m^2 |
| A_m | Körperfläche | m^2 |
| A_{proj} | Projizierte Fläche | m^2 |
| $a_{x\ ist}$ | Beschleunigung bei degradiertem System | $\frac{m}{s^2}$ |
| $a_{x\ prd}$ | Prädizierte Längsbeschleunigung | $\frac{m}{s^2}$ |
| $a_{x\ soll}$ | Beschleunigung bei undegradiertem System | $\frac{m}{s^2}$ |
| $a_{x_{max}}$ | Maximal auftretende Beschleunigung im Fahrzyklus | $\frac{m}{s^2}$ |
| $a_{x_{min}}$ | Maximal auftretende Verzögerung im Fahrzyklus | $\frac{m}{s^2}$ |
| a_y | Querbeschleunigung | $\frac{m}{s^2}$ |
| b_{ac} | Energieverbrauch Klimatisierungssystem | $\frac{Wh}{km}$ |
| b_{ant} | Energieverbrauch Antriebssystem | $\frac{Wh}{km}$ |
| b_{bn} | Energieverbrauch Bordnetz | $\frac{Wh}{km}$ |
| B_{max} | Maximale Magnetische Flussdichte | T |
| b_x | Charakteristische Verzögerung | $\frac{m}{s^2}$ |
| b_{kv} | Bremskraftverteilung | - |
| C | Ausnutzungsziffer | $\frac{kW_{min}}{m^3}$ |
| c_{atm} | Lungen-Volumenstrom | $\frac{kg}{s}$ |
| $c_{p\ bt}$ | spezifische Wärmekapazität Bauteiltemperatur | $\frac{W}{kgK}$ |
| c_p | Spezifische Wärmekapazität | $\frac{W}{kg K}$ |
| c_w | Luftwiderstandsbeiwert | - |
| COP | Coefficient of Performance | - |
| d | Durchmesser der Maschine | m |
| E_{max} | Maximal nutzbarer Energieinhalt der Batterie | Wh |
| F | Aktivierungsfunktion des Neurons | - |
| f_{el} | Frequenz | $\frac{1}{s}$ |
| f_{roll} | Rollwiderstandsbeiwert | - |

| | | |
|----------------|---|------------------|
| f_V | Charakteristische Frequenz | $\frac{1}{s}$ |
| $F_{zug\ prd}$ | Prädizierte Zugkraft | N |
| g | Erdbeschleunigung | $\frac{m}{s^2}$ |
| $g_{i,j,k}$ | Gewichtungsfaktor der Verbindung zum Neuron | - |
| h | Enthalpie | $\frac{W_s}{kg}$ |
| $h_{(x)}$ | Höhenverlauf | m |
| h_{lat} | Latente Verdunstungswärme | $\frac{W_s}{kg}$ |
| h_s | Vertikale Schwerpunktlage | m |
| I_{bat} | Batteriestrom | A |
| I_d | Längsstrom | A |
| i_{max} | Höchste Getriebeübersetzung | - |
| I_q | Querstrom | A |
| J | Massenträgheitmoment der Maschine | $\frac{kg}{m^2}$ |
| K | Steuersignal Kupplung | - |
| k | Exponent zur Gewichtung | - |
| k_h | Korrekturfaktor für Hysterese-Koeffizient | - |
| k_{kr} | Wärmeleitwiderstand der Karosserie | $\frac{W}{m^2K}$ |
| k_{luft} | Maschinenspezifische Konstante für Luftreibung | Nms |
| k_{reib} | Maschinenspezifische Konstante für Lagerreibung | Nm |
| k_{st} | Steinmetz-Konstante | - |
| k_w | Korrekturfaktor für Wirbelstrom-Koeffizient | - |
| L | Lagrangesche Hilfsfunktion | - |
| l | Länge der Maschine | m |
| L_d | Längsinduktivität | $\frac{V_s}{A}$ |
| L_q | Querinduktivität | $\frac{V_s}{A}$ |
| M | Drehmoment | Nm |
| m | Masse der Maschine | kg |
| m_{bt} | Bauteilmasse | kg |
| m_{cu} | Kupfermasse | kg |
| m_{cu} | Kupfermasse | kg |

| | | |
|----------------|--|-----------------|
| M_{des} | Fahrerwunschmodent | Nm |
| M_{des} | Soll-Drehmoment | Nm |
| $M_{EM 1}$ | Soll-Drehmoment Vorderachse | Nm |
| $M_{EM 2}$ | Soll-Drehmoment Hinterachse | Nm |
| m_{fe} | Eisenmasse | kg |
| m_{fzg} | Fahrzeuggewicht | kg |
| m_{gb} | Gewicht des Getriebes | kg |
| M_{in} | Eingangsdrehmoment | Nm |
| M_{max} | Maximales Drehmoment | Nm |
| n_d | Länge der Datenreihe | - |
| n_{gang} | Anzahl der Gänge | - |
| n_k | Anzahl der Neuronen der Zwischenschicht | - |
| $n_{parallel}$ | Anzahl der Zellen parallel | - |
| n_q | Anzahl der Qualitätsmerkmale | - |
| $n_{seriell}$ | Anzahl der Zellen in Reihe | - |
| n_{st} | Anzahl der Stützstellen im Zyklus | - |
| n_x | Anzahl der Faktoren | - |
| n_y | Anzahl der Zielgrößen | - |
| P | Leistung | W |
| p | Polpaarzahl | - |
| $P_{ac max}$ | Maximale Leistung Klimatisierung | W |
| P_{ac} | Leistung Klimatisierungssystem | W |
| p_d | Wasserdampfpartialdruck der Luft | $\frac{N}{m^2}$ |
| P_{ekk} | Leistung des elektrischen Klimakompressors | W |
| P_{el} | Elektrische Leistung | W |
| P_{max} | Maximale Leistung Antrieb | W |
| P_{mech} | mechanische Leistung | W |
| P_{prd} | Prädizierte Radleistung | W |
| P_{ptc} | Leistung der elektrischen Heizung | W |
| p_s | Sättigungsdampfdruck | $\frac{N}{m^2}$ |

| | | |
|-----------------------------|--|-------|
| $P_{V\ bat}$ | Batterieverluste | W |
| $P_{V\ cu}$ | Kupferverluste | W |
| $P_{V\ EM}$ | Verlustleistung der elektrischen Maschine | W |
| $P_{V\ fe}$ | Eisenverluste | W |
| $P_{V\ GB}$ | Verlustleistung des Getriebes | W |
| $P_{V\ mech}$ | Mechanische Verlustleistung | W |
| $P_{V\ W}$ | Verlustleistung am Rad | W |
| P_V | Verlustleistung | W |
| PMV | predicted mean vote | - |
| PPD | predicted percentage of dissatisfied | - |
| q | Normierte Zielgröße | - |
| $q_{\overline{\Delta a_x}}$ | Normierte Zielgröße Dynamik | - |
| $q_{\overline{b_{zyk}}}$ | Normierte Zielgröße Reichweite | - |
| $q_{\overline{PMV}}$ | Normierte Zielgröße Komfort | - |
| R^2 | Bestimmtheitsmaß | - |
| $R_i\ bat$ | Innenwiderstand der Batterie | Ohm |
| $R_i\ zelle$ | Innenwiderstand der Zelle | Ohm |
| R_s | Ohmscher Statorwiderstand | Ohm |
| RW | Reichweite | km |
| S | Skalierungsfaktor | - |
| s | Strecke | km |
| s_h | Abstand der horizontalen Schwerpunktlage zur Hinterachse | m |
| s_v | Abstand der horizontalen Schwerpunktlage zur Vorderachse | m |
| SOC | relativer SOC | % |
| T | Umgebungstemperatur | K |
| T_{ab} | Temperatur der Abluft | K |
| T_{bt} | Kalorische Mitteltemperatur | K |
| T_{ein} | Temperatur der Ansaugluft | K |
| T_h | Hautoberflächentemperatur | K |
| T_i | Innenraumtemperatur | K |

| | | |
|-----------------|--|----------------|
| T_s | Strahlungstemperatur | K |
| V | Volumen der Maschine | m^3 |
| V_k | Kurvengeschwindigkeit | $\frac{m}{s}$ |
| $v_{luft\ max}$ | Maximale Anströmgeschwindigkeit | $\frac{m}{s}$ |
| v_{luft} | Anströmgeschwindigkeit | $\frac{m}{s}$ |
| V_{max} | Maximale Geschwindigkeit im Fahrzyklus | $\frac{km}{h}$ |
| V_{mittel} | Durchschnittliche Geschwindigkeit | $\frac{km}{h}$ |
| V_{prd} | Prädizierte Geschwindigkeit | $\frac{km}{h}$ |
| W | Zielfunktionswert | - |
| x | Faktor | ... |
| y | Zielgröße | ... |
| y_{max} | Oberer Grenzwert zur Normierung der Zielgröße | - |
| y_{min} | Unterer Grenzwert zur Normierung der Zielgröße | - |
| y_V | Charakteristische Amplitude | $\frac{km}{h}$ |

1. Einleitung

1.1. Elektromobilität - Neue Chancen und Herausforderungen

Fossile Brennstoffe als Energieträger in Verbindung mit Verbrennungsmotoren stellen bisweilen in der Geschichte des Automobils die Grundlage zur Sicherung der individuellen Mobilität dar. Aufgrund eingeschränkter Rohölvorkommen und der damit einhergehenden Ressourcenverknappung sowie insbesondere der Klimarelevanz fossiler Kraftstoffe findet aktuell ein politischer Bewusstseinswandel statt, der langfristig die Unabhängigkeit von fossilen Brennstoffen fordert, um den anthropogenen CO₂-Ausstoß zu reduzieren.

Unter diesen Gesichtspunkten hat sich die International Energy Agency unter Abstimmung der G8 Staatengemeinschaft bis zum Jahr 2050 eine 50%ige Reduzierung der globalen CO₂-Emissionen zum Ziel gesetzt. Um dieses Vorhaben zu unterstützen, soll im Verkehrssektor die Marktdurchdringung von Elektro- und Plug-In-Hybridfahrzeugen auf einen Anteil von insgesamt 50% gesteigert werden [93]. Als nationale Initiative zur CO₂-Reduzierung verabschiedete hierzu die Bundesregierung den nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität, welcher vorsieht, bis zum Jahr 2020 eine Million Elektrofahrzeuge in Deutschland zuzulassen [23].

Wie werden sich die Automobilmärkte unter diesen politischen und sozialen Rahmenbedingungen entwickeln? Alle Vorsätze und Pläne zur Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen können nur realisiert werden, wenn eine durchgängige Kundenakzeptanz bezüglich der Elektromobilität erreicht werden kann. Batteriebetriebene Elektrofahrzeuge weisen aktuell im Vergleich zum konventionell verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeug vor allem hinsichtlich

Energiespeichervermögen und der damit verbundenen reduzierten Reichweite erhebliche Nachteile auf. Dies bestätigt eine vom Bundesministerium in Auftrag gegebene Umfrage, wonach als wesentliche Hindernisse sowohl die geringe Reichweite als auch hohe Anschaffungskosten von vielen Langzeitzutzern als kritisch benannt wurden [100]. Diese Gegebenheiten können zu Skepsis und Ablehnung seitens potentieller Käufer führen, woraus eine Verhinderung der geforderten Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen resultiert. Die Kundenakzeptanz stellt sich vor diesem Hintergrund sowohl als ein technisches als aber auch ein psychologisches Problem zur Erfüllung der Mobilitätsanforderungen dar [98].

Um die Reichweite und somit auch die Kundenakzeptanz von Elektrofahrzeugen zu steigern ist es unerlässlich, den Betrieb des Gesamtfahrzeugs über eine optimale Betriebsstrategie möglichst effizient zu gestalten. Es müssen mittels innovativer Assistenzsysteme und neuartiger Funktionalitäten Hilfestellungen zur Verfügung gestellt werden, um die Planungssicherheit zu erhöhen und Reichweitenängste in Verbindung mit Elektrofahrzeugen zu nehmen. Diese Funktionalitäten steigern die Wertigkeit dieser für den Kunden neuartigen Fahrzeuge und können somit einen Beitrag zu einer besseren Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen leisten.

1.2. Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Ziel dieser Arbeit sind der Entwurf und die Implementierung einer Funktionsarchitektur für Elektrofahrzeuge, welche die Vorgabe einer ganzheitlichen Betriebsstrategie aus Sicht des Gesamtfahrzeugs ermöglicht. Die Betriebsstrategie soll möglichst adaptiv, prädiktiv sowie situationsbedingt einen optimalen Betrieb des Fahrzeugs gewährleisten, um die Reichweite des Elektrofahrzeugs bedarfsgerecht zu erhöhen. Hierbei sollen die im Fahrbetrieb auftretenden Anforderungen bezüglich Reichweite, Dynamik sowie Komfort gewährleistet werden. Dies impliziert eine Verwaltung der Energieflüsse im Fahrzeug in Form

eines Energiemanagements unter Berücksichtigung aller verbrauchsrelevanten Energiequellen und -senken. Um diese Betriebsstrategie-Maßnahmen evaluieren zu können, soll eine virtuelle Gesamtfahrzeugumgebung implementiert werden, welche das energetische, längsdynamische sowie thermische Fahrzeugverhalten gesamthaft abbildet.

In Kapitel 2 wird der Stand der Forschung bezüglich der abzubildenden Teilsysteme eines Elektrofahrzeugs sowie etablierter Entwicklungsprozesse zur methodischen Funktionsentwicklung erarbeitet. Anschließend werden in Kapitel 3 Energieflussanalysen mit dem Ziel durchgeführt, den Energieverbrauch von Elektrofahrzeugen unter dem Einfluss möglicher Konzeptvarianten des Antriebsystems und maßgeblicher Umgebungsbedingungen zu quantifizieren. Diese energetischen Analysen bilden die Grundlage für die Identifikation und die Definition neuartiger Funktionen zur Vorgabe von wirksamen Betriebsstrategie-Maßnahmen für Elektrofahrzeuge.

Diese Funktionen werden in Kapitel 4 anforderungsgerecht spezifiziert und in Kapitel 5 modellbasiert implementiert. Zur Evaluierung der entwickelten Betriebsstrategie-Maßnahmen wird eine virtuelle Gesamtfahrzeugumgebung eingesetzt, deren Umsetzung und Validierung in Kapitel 6 erfolgt.

Die Funktionsarchitektur ist modular und skalierbar aufgebaut, um ein möglichst breites Einsatzspektrum für Elektrofahrzeuge unterschiedlicher Segmente und Ausstattungsmerkmale bedienen zu können. Die Diversifizierung und die Eingriffstiefe der einzelnen Betriebsstrategie-Maßnahmen können durch Applikationsparameter spezifisch ausgeprägt werden. Um diese ermitteln zu können, findet eine in Kapitel 7 beschriebene Methode Anwendung. Diese hat das Ziel, das Spannungsfeld bestehend aus Reichweiten-, Dynamik- sowie Komfortanforderungen zu objektivieren und unter Anwendung mathematischer Verfahren zu entschärfen. Kapitel 8 dient im Anschluss der Validierung und Evaluierung der entwickelten Betriebsstrategie-Maßnahmen in repräsentativen Zyklen.

Die Arbeit schließt in Kapitel 9 mit einer zusammenfassenden Darstellung und einem Ausblick ab.

2. Stand der Wissenschaft und Forschung

Elektrofahrzeuge unterscheiden sich aufgrund ihrer elektrischen Primärenergiequelle grundlegend von konventionellen Fahrzeugen, sowohl im Aufbau des Antriebs als auch hinsichtlich ihrer Nebenaggregate und den damit verbundenen Fahrzeugfunktionen. In diesem Kapitel wird ein Überblick über die einzelnen Komponenten des Antriebsstrangs und die wesentlichen Nebenaggregate eines Elektrofahrzeugs gegeben. Der Fokus liegt hierbei auf der Beschreibung des energetischen Verhaltens. Dieses Grundlagenverständnis ist notwendig, um die jeweiligen Komponenten und deren Wechselwirkungen in einer Gesamtfahrzeugsimulation abzubilden. Im Anschluss an die Beschreibung der Komponenten wird auf die Kraftfahrzeugelektronik, insbesondere den Bereich der Fahrerassistenzsysteme und die hierfür geltenden Entwicklungsprozesse eingegangen. Abschließend wird der Begriff Energiemanagement für automobiler Anwendungen diskutiert.

2.1. Elektrisches Antriebssystem

Antriebssysteme von Elektrofahrzeugen bestehen aus den Komponenten zur Energiebereitstellung in elektrochemischer Form, zur Umwandlung der elektrischen in mechanische Antriebsenergie und umgekehrt sowie zur Übertragung der mechanischen Antriebsenergie zu den Rädern. Diese Komponenten werden im Folgenden detailliert dargestellt.

2.1.1. Traktionsbatterie als Energiespeicher im Fahrzeug

Akkumulatoren stellen elektrochemische Energiespeicher dar. Durch Umwandlung der elektrischen in chemische Energie ermöglichen sie die Speicherung über einen langen Zeitraum hinweg. Sie stellen den Standard als Speichersystem für Elektrofahrzeuge dar. Klassifiziert werden Akkumulatoren durch die Verschaltung der Einzelzellen, der Bauform der Zellen sowie hinsichtlich der verwendeten Zellchemie. Dies sind die maßgeblichen Einflussfaktoren für den Innenwiderstand und somit die Güte des Akkumulators als Gesamtsystem. Die Traktionsbatterie steht im Spannungsfeld verschiedenster Anforderungen [98]:

- Energiedichte (gravimetrisch und volumetrisch)
- Leistungsdichte (gravimetrisch und volumetrisch)
- Kalendarische Lebensdauer
- Zyklfestigkeit
- Sicherheit
- Kosten

Der Energie- und Leistungsdichte kommen besondere Bedeutung zu. Die Energiedichte ist hierbei zur Erfüllung der Kundenakzeptanz durch Reichweitenanforderungen unter Einhaltung von Gewichts- und Bauraumrestriktionen ausschlaggebend. Die Leistungsdichte der Batterie gibt unterdessen das Leistungsvermögen des elektrischen Antriebssystems und der Nebenaggregate vor.

Die Batterie als Gesamtsystem besteht zur Spannungserhöhung aus einer Reihenschaltung von Zellen, die zu Strängen zusammengefasst werden. Mehrere Stränge können zur Kapazitätserhöhung parallel verschaltet werden. Somit sind Zellspannung und Zellkapazität weitere wichtige Eigenschaften, welche die Anzahl der parallel und in Reihe geschalteter Zellen zur Erreichung eines geforderten Gesamtenergieinhalts und der Leistung vorgeben.

Verluste in der Batterie $P_{v\ bat}$ treten aufgrund des Innenwiderstands $R_{i\ bat}$ auf. Dieser ergibt sich aus den Innenwiderständen der verschalteten Einzelzellen $R_{i\ zelle}$ und ist zusätzlich abhängig vom Batterieladezustand SoC (State of Charge).

ge) sowie der Temperatur T . Berechnet wird der Innenwiderstand $R_{i\ bat}$ gemäß Gleichung [2.1] mittels des Zellinnenwiderstands $R_{i\ zelle}$, der Anzahl in Reihe geschalteter Zellen $n_{seriell}$ und der Anzahl der Stänge $n_{parallel}$.

$$R_{i\ bat}(SoC, T) = R_{i\ zelle} \frac{n_{seriell}}{n_{parallel}} \quad [2.1]$$

Die im Betrieb auftretenden Batterieverluste beim Laden und Entladen werden in Abhängigkeit des aktuellen Klemmenstroms $|I_{bat}|$, des Batterieladezustands SoC und der Temperatur T nach Gleichung [2.2] berücksichtigt.

$$P_{v\ bat}(SoC, T) = R_{i\ bat}(SoC, T) I_{bat}^2 \quad [2.2]$$

2.1.2. Elektrische Maschinen

Elektrische Maschinen wandeln elektrische in mechanische Energie und umgekehrt. Prinzipiell kann jede Maschine sowohl motorisch als auch generatorisch betrieben werden. Sie agiert somit in Abhängigkeit des Betriebsmodus als Energiequelle oder -senke. Darüber hinaus ist auch eine Drehzahlumkehr möglich. Dies gewährleistet einen Vier-Quadranten-Betrieb und macht eine mechanische Drehzahlumkehr zum Reversieren des Fahrzeugs überflüssig. Aufgrund ihrer Drehmoment-Charakteristik sind elektrische Maschinen prinzipiell gut zum Einsatz in Fahrzeugen geeignet. Ein hohes Drehmoment kann bereits im Stillstand aufgebracht werden, sodass eine Anfahrkupplung entfallen kann. Im Bremsbetrieb kann die Maschine als Generator fungieren, wobei die gewonnene Energie in den elektrischen Energiespeicher zurückgespeist wird. In Abbildung 2.1 ist der qualitative Drehmomentverlauf von elektrischen Maschinen dargestellt. Im unteren Drehzahlbereich (Ankerstellbereich) bleibt das maximale Drehmoment mit wachsender Drehzahl konstant, die Leistung steigt linear an. Daran schließt sich der so genannte Feldschwächbereich an, bei dem die Leistung idealisiert konstant gehalten wird und somit das Drehmoment hyperbolisch abnimmt. Hierdurch kann die Drehzahl ab der Spannungsgrenze am Nennpunkt weiter angehoben werden.

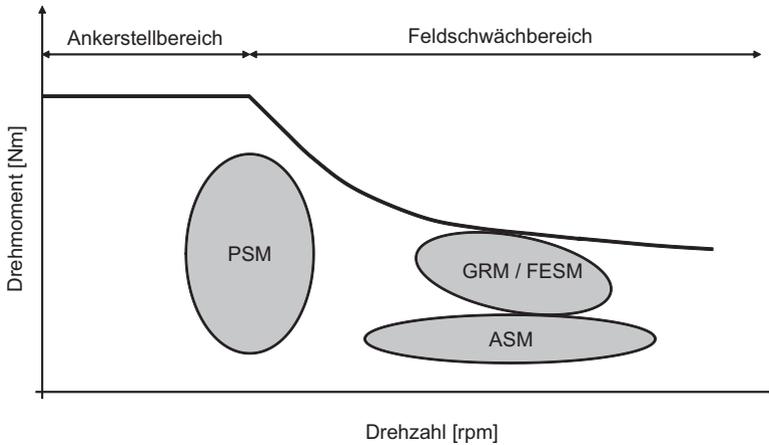


Abb. 2.1.: Qualitatives Kennfeld einer elektrischen Maschine und Lage der maximalen Wirkungsgrade in Abhängigkeit des Maschinentyps, in Anlehnung an [69]

Vergleich unterschiedlicher Maschinentypen

Elektrische Maschinen können in Abhängigkeit ihres Funktionsprinzips in Asynchron- (ASM), Fremderregte Synchron- (FESM), Permanenterregte Synchron- (PSM) sowie Geschaltete Reluktanzmaschinen (GRM) unterschieden werden. Für den automobilen Einsatz weisen diese Typen unterschiedliche Charakteristika auf. Spezifische Eigenschaften zur Charakterisierung der unterschiedlichen Maschinentypen wurden in der Literatur bereits ausgiebig bewertet und miteinander verglichen [21], [59], [79], [70], [98]. Tabelle 2.1 zeigt einen zusammenfassenden Überblick hinsichtlich typischer Vor- (+) und Nachteile (-) sowie gleich bewerteter Eigenschaften (0) der unterschiedlichen Maschinentypen.

Tab. 2.1.: Bewertung spezifischer Eigenschaften elektrischer Maschinen in Abhängigkeit des Maschinentyps nach [21], [59], [79], [70], [98]

| | ASM | FESM | PSM | GRM |
|-------------------|-----|------|-----|-----|
| Wirkungsgrad | 0 | 0 | + | 0 |
| Leerlaufverluste | + | 0 | - | + |
| Kosten | 0 | - | - | + |
| Akustik | + | + | + | - |
| Überlastfähigkeit | 0 | 0 | + | 0 |
| Verschleiß | + | - | + | + |
| Fehlerverhalten | 0 | 0 | - | + |

Asynchronmaschinen weisen den ausgereiftesten Entwicklungsstand bei Elektromaschinen auf, weshalb sie in sehr hohen Stückzahlen vor allem im industriellen Bereich im Einsatz sind. Sie besitzen einen akzeptablen Wirkungsgrad und ein unauffälliges akustisches Verhalten. Nachteilig ist die geringere Leistungsdichte der Maschine, woraus in Bezug auf die installierte Maschinenleistung ein hohes Gewicht resultiert.

Die FESM zeigt ein gutes Steuerverhalten, jedoch benötigt die Maschine einen hohen Einsatz von Kupfer, wodurch sie sehr kostenintensiv wird und eine niedrige Leistungsdichte aufweist. Ebenfalls nachteilig sind je nach Bauart die Schleifkontakte am Rotor hinsichtlich Verschleiß und Sicherheit.

Die PSM hat aufgrund ihrer Selbsterregung durch Magnete am Rotor einen sehr hohen Maximalwirkungsgrad und eine sehr hohe Leistungsdichte. Nachteilig ist jedoch, dass im Fehlerfall die Maschine schlagartig blockieren kann. Hierdurch muss hinsichtlich funktionaler Sicherheit ein hoher Aufwand zur Absicherung betrieben werden. Hinzu kommt, dass die verwendeten magnetischen Materialien sehr teuer sind und somit die Systemkosten sehr hoch ausfallen können.

Vorteile der GRM sind einfache Konstruktion und geringe Fertigungskosten. Auch bezüglich funktionaler Sicherheit bietet die GRM Vorteile im Fehlerfall,

wodurch geringere Kosten hinsichtlich Fail-Safe-Konzepten zu erwarten sind. Hieraus resultiert insgesamt ein großer Kostenvorteil. Nachteilig ist jedoch vor allem das akustische Verhalten der Maschine.

Für den Energieverbrauch eines Elektrofahrzeugs in unterschiedlichen Zyklen ist der Wirkungsgrad der Maschine im jeweiligen Arbeitspunkt entscheidend. Die Maschinentypen weisen Unterschiede im Absolutwert des Maximalwirkungsgrads (siehe Tabelle 2.1), aber auch bezüglich der Lage im Kennfeld auf. Abbildung 2.1 zeigt qualitativ die drehzahl- und lastabhängigen Bereiche des maximalen Wirkungsgrades der unterschiedlichen Maschinentypen. Der Bestpunkt der PSM liegt prinzipbedingt um den Nennpunkt. ASM haben bei höheren Drehzahlen und mittleren Lasten, GRM und FESM nahe der Volllast ihren maximalen Wirkungsgrad.

Beschreibung elektrischer Maschinen

Durch eine analytische Beschreibung am Beispiel einer PSM sollen zunächst wesentliche Einflussparameter und Zusammenhänge erörtert werden. Hieraus soll eine kennfeldbasierte Darstellung abgeleitet werden.

Zur Beschreibung in einem rotorfesten d/q -Koordinatensystem kann das Drehmoment M gemäß Gleichung [2.3] angenommen werden [66].

$$M = \frac{3}{2}p (\psi I_q - (L_q - L_d) I_d I_q) \quad [2.3]$$

Mit:

p : Polpaarzahl

ψ : Flussverkettung

L_d und L_q : Längs- und Querinduktivität

I_d und I_q : Längs- und Querstrom

Die mechanische Leistung P_{mech} nach Gleichung [2.4] kann durch Erweiterung von Gleichung [2.3] um die Drehzahl ω ermittelt werden.

$$P_{mech} = M\omega = \left(\frac{3}{2} P (\psi I_q - (L_q - L_d) I_d I_q) \right) \omega \quad [2.4]$$

Verluste treten in Form von Kupferverlusten $P_{v\,cu}$, durch Ummagnetisierung als Eisenverluste $P_{v\,fe}$ bedingt durch Hysterese-, Wirbelstrom- und Streuverlusten sowie mechanische Verluste $P_{v\,mech}$ bedingt durch Lager- und Luftreibung auf. Diese können analytisch durch die Gleichungen [2.5]-[2.7] beschrieben werden [79], [72]. Da zur rein analytischen Ermittlung der Verluste nach Gleichung [2.5]-[2.7] empirische Parameter benötigt werden, ist die analytische Berechnung insbesondere in Bezug auf die Eisenverluste $P_{v\,fe}$ unscharf behaftet. Daher wird die Berechnung meist mit Hilfe von FEM¹-Analysen rechnergestützt durchgeführt.

$$P_{v\,cu} = 3R_s \left(\frac{I_d^2}{2} + \frac{I_q^2}{2} \right) \quad [2.5]$$

$$P_{v\,fe} = m_{fe} \varepsilon_h k_h \left(\frac{f_{el}}{50\text{Hz}} \right) \left(\frac{B_{max}}{1.5\text{T}} \right)^{k_{st}} \quad [2.6]$$

$$+ m_{fe} \varepsilon_w k_w \left(\frac{f_{el}}{50\text{Hz}} \right)^2 \left(\frac{B_{max}}{1.5\text{T}} \right)^2$$

$$P_{v\,mech} = k_{reib} \omega + k_{luft} \omega^2 \quad [2.7]$$

Dabei bedeuten:

R_s : Ohmscher Statorwiderstand

m_{fe} : Eisenmasse

ε_h : Hysterese-Koeffizient

ε_w : Wirbelstrom-Koeffizient

k_h : Fabrikationsbedingter Korrekturfaktor für Hysterese-Koeffizient

k_w : Fabrikationsbedingter Korrekturfaktor für Wirbelstrom-Koeffizient

¹ Finite Element Methode

f_{el} : Elektrische Frequenz

k_{st} : Steinmetz-Konstante

B_{max} : Maximale Magnetische Flussdichte

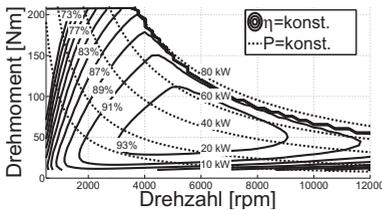
k_{reib} : Maschinenspezifische Konstante für Lagerreibung

k_{luft} : Maschinenspezifische Konstante für Luftreibung

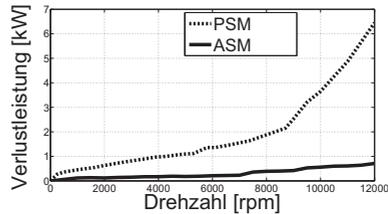
Der last- und drehzahlabhängige Wirkungsgrad η ergibt sich unter Annahme dieser Verluste nach Gleichung [2.8].

$$\eta_{(M,n)} = \frac{P_{mech}}{P_{mech} + P_{v fe} + P_{v cu} + P_{v mech}} = \frac{M\omega}{M\omega + P_{v fe} + P_{v cu} + P_{v mech}} \quad [2.8]$$

Abbildung 2.2(a) zeigt ein Wirkungsgradkennfeld einer permanentenregten Synchronmaschine zur Darstellung des last- und drehzahlabhängigen Verhaltens für den gesamten motorischen Betriebsbereich.



(a) Exemplarisches Wirkungsgradkennfeld



(b) Vergleich der Leerlaufverluste bei Nullmoment

Abb. 2.2.: Kennfeldbasierte Beschreibung elektrischer Maschinen [25]

Durch die Umwandlung von Wirkungsgrad in Verlustleistung ist es möglich, die Maschine auch bei Nullmoment energetisch zu beschreiben. Denn auch wenn die Maschine kein Drehmoment abgibt, werden Verluste generiert, welche sich je nach Maschinentyp systembedingt unterscheiden. Abbildung 2.2(b) zeigt einen Vergleich der Leerlaufverluste einer exemplarischen ASM und PSM gleicher Leistungsklasse. Ersichtlich sind die systembedingt hohen Leerlaufver-

luste der PSM bei der Abgabeleistung $P_{mech} = 0$, bedingt durch die Feldinduzierung durch die Permanentmagnete des Rotors. ASM hingegen besitzen hierbei lediglich mechanische Verluste.

Skalierung mittels Wachstumsgesetze

Da für Konzeptuntersuchungen unter Umständen Maschinenkennfelder nicht in beliebigen Leistungsklassen vorliegen, besteht die Möglichkeit, mittels der Wachstumsgesetze für elektrische Maschinen ein vorliegendes Maschinenkennfeld innerhalb eingeschränkter Leistungsbereiche zu skalieren. Die Skalierung gewährleistet ein hohes Maß an Vergleichbarkeit für durchzuführende Untersuchungen, da von einer identischen konstruktiven Ausführung ausgegangen wird. Bei der Skalierung werden Gewicht, Volumen, Leistung, Drehmoment-Drehzahl-Charakteristik sowie Trägheitsmomente in Abhängigkeit der geometrischen Abmessung von Durchmesser d und Aktivlänge l berücksichtigt. Besondere Bedeutung kommt dem Wirkungsgradverhalten der Maschine zu, da dieses für ein Elektrofahrzeug verbrauchsbestimmend ist.

Der Skalierung liegt als Annahme eine quadratische Rotorauslegung für die linearen Abmessungen mit Durchmesser d und Rotorlänge l mit $d = l$ zu Grunde. Dies führt zu gleich bleibender Materialausnutzung. Die Skalierung wird durch den Geometrie-Faktor S beschrieben. Die Leistung einer elektrischen Maschine kann näherungsweise nach [87] gemäß Gleichung [2.9] in Abhängigkeit ihrer Abmessungen mit

$$P_{mech} = M\omega = Cl d^2 \omega \quad [2.9]$$

beschrieben werden, wobei C die Ausnutzungsziffer der Maschine darstellt. Die Proportionalität der Leistung zu den Abmessungen d und l ergibt sich somit nach dem Wachstumsgesetz für elektrische Maschinen nach [16] gemäß Gleichung [2.10] zu:

$$P_{mech} \propto d^2 l \propto d^3 \quad [2.10]$$

Volumen V und Masse m ergeben sich zu:

$$V = \frac{\pi}{4} d^2 l \propto d^3 \quad [2.11]$$

$$m \propto V \propto d^3 \quad [2.12]$$

Das Trägheitsmoment J ergibt sich zu:

$$J = \frac{1}{2} m \left(\frac{d}{2} \right)^2 \propto d^5 \quad [2.13]$$

Für eine Skalierung der Leistung über ihre geometrischen Abmessungen zu P_{mech}^* mit $S \propto d$ und $d = l$ folgt nach dem Wachstumsgesetz für elektrische Maschine nach [88] :

$$P_{mech}^* = P_{mech} S^3 \quad [2.14]$$

$$J^* = J S^5 \quad [2.15]$$

$$m^* = m S^3 \quad [2.16]$$

Die Massen für Kupfer m_{cu} und Eisen m_{fe} und die sich hieraus ergebenden Verluste gemäß Gleichung [2.5] und [2.6] werden entsprechend nach [88] zu:

$$m_{cu} \propto P_{v\ cu} \propto S^3 \quad [2.17]$$

$$m_{fe} \propto P_{v\ fe} \propto S^3 \quad [2.18]$$

Dies bedeutet für den Wirkungsgrad η^* der skalierten Maschine:

$$\eta^* = \frac{P_{mech} S^3}{P_{mech} S^3 + P_{v\ cu} S^3 + P_{v\ fe} S^3 + P_{v\ mech}} \quad [2.19]$$

Mechanische Verluste ändern sich lediglich marginal in Abhängigkeit der Skalierung [12]. Gemäß der Gleichungen [2.14]-[2.19] werden Maschinen mit zunehmender Baugröße effizienter, da sich bei gleicher Stromdichte und Induktion die Kupfer- und Eisenverluste proportional zum Volumen verhalten [89].

Hierüber nimmt die Leistungsdichte der Maschine ebenfalls mit der Baugröße zu [87]. Skudelny [87] gibt unter diesen Annahmen über den ursprünglichen Wirkungsgrad η eine Skalierung der Wirkungsgrade gemäß Gleichung 2.20 an.

$$\eta^* = \frac{1}{1 + \frac{1}{S} \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)} \quad [2.20]$$

2.1.3. Mechanische Komponenten des Antriebsstrangs

Der Antriebsstrang überträgt und verteilt das mechanisch abgegebene Motor Drehmoment der elektrischen Maschine(n) an die Räder und umgekehrt. Getriebe sind hierbei als Kennungswandler notwendig, um das zur Verfügung stehende Zugkraftangebot des Antriebsaggregats der durch Fahrwiderstände bedingten Zugkraftanforderung anzugleichen [50]. Abbildung 2.3 zeigt einen qualitativen Vergleich der Lieferkennfelder eines Verbrennungsmotors nach Abbildung 2.3(a) und einer elektrischen Maschine nach Abbildung 2.3(b) im Zugkraftdiagramm jeweils oben ohne und unten mit Kennungswandler.

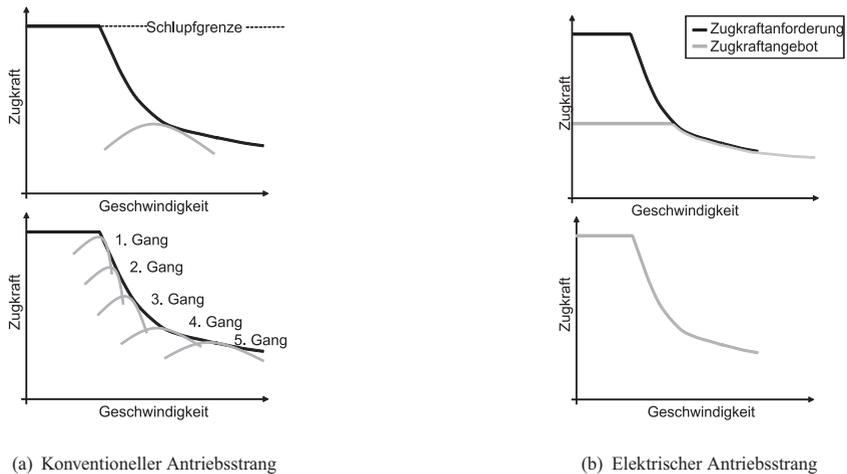


Abb. 2.3.: Qualitativer Vergleich der Lieferkennfelder im Zugkraftdiagramm mit (unten) und ohne (oben) Kennungswandler

Der konventionelle Antriebsstrang benötigt aufgrund der Charakteristik des Verbrennungsmotors ein mehrgängiges Getriebe und ein Anfaehrelement, um die gewünschte Zugkraftanforderung zu erfüllen. Bei Elektrofahrzeugen ist ein Mehrganggetriebe aufgrund der Charakteristik der elektrischen Maschine nicht zwingend erforderlich. Auch das Anfaehrelement kann entfallen. Bei der Wandlung von Drehmoment und Drehzahl treten im Getriebe Verluste auf. Diese sind sowohl last- als auch drehzahlabhängig [68]. Hierfür kann ein entsprechendes Wirkungsgrad-Kennfeld, wie in Abbildung 2.4 dargestellt, abgeleitet werden.

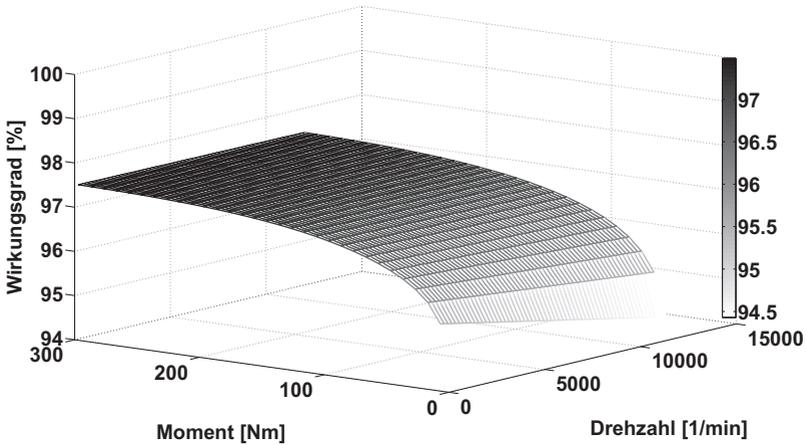


Abb. 2.4.: Exemplarisches Wirkungsgradkennfeld eines Getriebes [25]

Das Gewicht eines Getriebes m_{gb} kann in Abhängigkeit des Eingangsdrehmomentes M_{in} , der Maximalübersetzung i_{max} sowie der Gangzahl n_{gang} mit Hilfe der empirisch ermittelten Gleichung [2.21] abgeschätzt werden [68]. Bei Getrieben mit einer festen Übersetzungsstufe wird $n_{gang} = 1$ angenommen.

$$m_{gb} = 0.199 \left((i_{max} M_{in})^{0.669} n_{gang}^{0.334} \right) \quad [2.21]$$

Liegt ein zentraler Achsantrieb vor, wird analog dem konventionellen Antriebstrang ein Differential benötigt, um bei Kurvenfahrt zwischen kurveninnerem und -äußerem Rad einen Drehzahlausgleich zu ermöglichen. Der Wirkungsgrad des Differentials kann nach [68] in erster Näherung als konstant angenommen werden.

2.2. Nebenaggregate

Neben dem Antriebssystem müssen in Elektrofahrzeugen alle weiteren Nebenverbraucher ebenfalls elektrisch betrieben und aus dem Hochvolt-Energiespeicher gespeist werden. Im Speziellen sind dies Hochvolt-Komponenten des Klimatisierungssystems und alle weiteren Niedervolt-Verbraucher, welche über einen DC/DC-Wandler angebunden werden. Da diese Verbraucher die Reichweite des Fahrzeugs erheblich beeinflussen, sollen diese im Folgenden näher beschrieben werden.

2.2.1. Klimatisierung des Innenraums

Das Klimatisierungssystem stellt zur Gewährleistung der thermischen Behaglichkeit in der Fahrzeugkabine einen wesentlichen Energieverbraucher im Gesamtfahrzeug dar.

Physiologie und Komfortempfinden

Der notwendige Kühl- und Heizleistungsbedarf zur Innenraumklimatisierung ist vom Behaglichkeits- und Komfortempfinden der Insassen abhängig. Zur Bewertung dieses thermischen Komforts hat sich das von Fanger [28] entwickelte physiologische Modell etabliert, welches in normativen Schriften für den europäischen [3] und amerikanischen [1] Raum verankert ist.

Nach Fanger [28] wird der thermische Komfort im Wesentlichen durch die folgenden Größen beeinflusst:

- Innenraumtemperatur
- Mittlere Strahlungstemperatur
- Luftfeuchte
- Luftgeschwindigkeit
- Aktivität des Menschen (Bruttoenergieumsatz)
- Bekleidung (äquivalenter Wärmeleitwiderstand)

Das beschriebene Komfortmodell bildet hierbei den menschlichen Wärmehaushalt als einen einzigen Masseknoten ab und kann somit als eine Bewertung der globalen thermischen Behaglichkeit betrachtet werden. Es beschreibt hierzu zum einen die vom Menschen ausgehenden flächenbezogenen Wärmestromdichten $\sum \dot{q}_{ab}$ durch Verdunstung, Konvektion und Strahlung und zum anderen den menschlichen Bruttoenergieumsatz \dot{q}_m als Wärmequelle gemäß Gleichung [2.22]. Durch \dot{q}_m kann somit die auf die Körperoberfläche bezogene Stoffwechselrate in Abhängigkeit der Aktivität des Menschen (schlafend, sitzende Tätigkeit, stehende Tätigkeit, Sport etc.) ausgedrückt werden, d.h. wieviel Wärmeleistung der Mensch in Abhängigkeit seiner Tätigkeit bezogen auf die Körperoberfläche produziert. Das ursprünglich für die Gebäudetechnik entwickelte Modell kann durch Erweiterung der absorbierten Sonneneinstrahlungsinintensität $\dot{q}_{abs\ sunne}$ als weitere Wärmequelle nach [38] zur Bestimmung des thermischen Komforts in der Fahrzeugkabine Anwendung finden. Es gilt zunächst:

$$\dot{q}_m + \dot{q}_{abs\ sunne} = \sum \dot{q}_{ab} = \dot{q}_v + \dot{q}_{konv} + \dot{q}_{strahl} \quad [2.22]$$

Die Summe der abgehenden Wärmestromdichten wird durch Verdunstung \dot{q}_v in Form von Diffusion $\dot{q}_{v\ dif}$, Schweißbildung $\dot{q}_{v\ trans}$ sowie Atmung $\dot{q}_{v\ atm}$, konvektivem Wärmestrom \dot{q}_{konv} sowie Wärmestrahlung \dot{q}_{strahl} nach Gleichung [2.22] bilanziert. Nachfolgend werden die genannten Wärmestromdichten (in der Einheit $\frac{W}{m^2}$) einzeln ausgeführt.

Absorbierte Sonneneinstrahlung $\dot{q}_{abs\ sonne}$:

Die vom Insassen absorbierte Sonneneinstrahlung $\dot{q}_{abs\ sonne}$ kann nach [38] mittels Absorptionskoeffizient τ_{kl} und der Sonneneinstrahlungsintensität \dot{q}_{sonne} nach Gleichung [2.23] berechnet werden.

$$\dot{q}_{abs\ sonne} = \tau_{kl}\dot{q}_{sonne} \quad [2.23]$$

Verdunstung durch Diffusion $\dot{q}_v\ dif$:

Die Diffusion kann nach [10] mittels der massebezogenen latenten Verdunstungswärme h_{lat} , der Hautdurchlässigkeit γ sowie der Differenz aus Sättigungsdampfdruck p_s und Wasserdampfpartialdruck der Luft p_d nach Gleichung [2.24] ermittelt werden, wobei in [10] keine Abhängigkeit zur Hautoberflächentemperatur beschrieben wird.

$$\dot{q}_v\ dif = h_{lat}\gamma(p_s - p_d) \quad [2.24]$$

Verdunstung durch Schweißbildung $\dot{q}_v\ trans$:

Sowohl in [10] als auch [38] ist hierzu folgende Zahlengleichung [2.25] als Näherung in Abhängigkeit der Stoffwechselrate \dot{q}_m aufgeführt. Es handelt sich nicht um eine physikalisch korrekte Formulierung. Sie gilt als Näherung für behaglich empfundene Bedingungen.

$$\dot{q}_v\ trans = 0.42 \left(\dot{q}_m - 50 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right) \quad [2.25]$$

Verdunstung durch Atmung $\dot{q}_v\ atm$:

[10] beschreibt die Wärmestromdichte der Verdunstung durch Atmung durch den Lungen-Volumenstrom c_{atm} , die massebezogene latente Verdunstungswärme h_{lat} sowie die relative Luftfeuchte ϕ . Diese Wärmeleistung wird mittels der Körperoberfläche A_m in eine auf die Körperoberfläche bezogene Wärmestromdichte nach Gleichung [2.26] umgerechnet.

$$\dot{q}_v\ atm = c_{atm}h_{lat}\phi \frac{1}{A_m} \quad [2.26]$$

Konvektion \dot{q}_{konv} :

Die Wärmestromdichte infolge Konvektion ergibt sich mit dem Wärmeübergangskoeffizienten der Kleidung α_{kl} und der Differenz der mittleren Hauttemperatur T_h sowie der mittleren Innenraumtemperatur T_i nach Gleichung [2.27]. Da in [10] von einem mittleren Wärmeübergangskoeffizienten der Bekleidung ausgegangen wird, wird zusätzlich ein Skalierungsfaktor über die Anströmgeschwindigkeit v_{luft} und die maximale Anströmgeschwindigkeit des Gebläses $v_{luft\ max}$ eingeführt, welcher somit den Wärmeübergang in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit berücksichtigt. Diese Annahme ist nur für geringe Anströmgeschwindigkeiten wie sie in Gebäuden oder Fahrzeugen auftreten mit $v_{luft\ max} \leq 5 \frac{m}{s}$ gültig und kann nicht auf größere Anströmgeschwindigkeiten übertragen werden.

$$\dot{q}_{konv} = \alpha_{kl} \sqrt{\frac{v_{luft}}{v_{luft\ max}}} (T_h - T_i) \quad [2.27]$$

Wärmestrahlung \dot{q}_{strahl} :

Die Wärmestromdichte durch Wärmestrahlung ergibt sich mit dem Absorptionskoeffizient τ_{kl} , der Stefan-Boltzmann Konstanten σ , der mittleren Hauttemperatur T_h sowie der mittleren Strahlungstemperatur T_s .

$$\dot{q}_{strahl} = \tau_{kl} \sigma (T_h^4 - T_s^4) \quad [2.28]$$

Für die biophysikalischen Größen \dot{q}_m , $\dot{q}_v\ dif$, $\dot{q}_v\ trans$, $\dot{q}_v\ atm$ sowie die thermodynamische Beschreibung der Kleidung in Form von α_{kl} und τ_{kl} können aus [10] und [38] entsprechende konstante Erfahrungs- bzw. Messwerte entnommen werden. Es handelt sich somit um ein statisches nicht regelndes physiologisches Komfortmodell, welches die globale Behaglichkeit auf Basis der veränderlichen raumklimatischen Größen Temperatur, Sonneneinstrahlung, Luftfeuchte sowie Anströmgeschwindigkeit beschreibt.

Daher kann nach Gleichung [2.29] gemäß [77] mit $\Delta\dot{q}_{theo}$ die theoretische „Differenz zwischen aktivitätsbedingter Wärmeabgabe \dot{q}_m und der bei den vorliegenden raumklimatischen und bekleidungsphysiologischen Verhältnissen be-

stimmbaren behaglichen Wärmeabgabe $\sum \dot{q}_{ab}$ “ ermittelt werden, welche sich ergibt, wenn sich der menschliche Körper nicht im thermischen Gleichgewicht mit der Umgebung befinden würde. Mit „aktivitätsbedingter Wärmeabgabe“ meint Richter [77] hierbei eine Wärme, die in Abhängigkeit der Aktivität des Menschen in Form von Stoffwechselreaktionen entsteht und nach außen an die Umgebung abgeführt werden muss, damit sich der Körper nicht aufheizt (oder abkühlt) und sich weiterhin im thermischen Gleichgewicht befindet. Denn nur wenn ein thermisches Gleichgewicht existiert, wird dies bezüglich des thermischen Komforts als angenehm empfunden.

$$\Delta \dot{q}_{theo} = \dot{q}_m + \dot{q}_{abs\ sunne} - \sum \dot{q}_{ab} \quad [2.29]$$

Demnach ist $\Delta \dot{q}_{theo} > 0$ wenn der menschliche Körper theoretisch Wärme aufnehmen würde und in Folge dessen eine Empfindung in Richtung warm stattfindet. Umgekehrt ist $\Delta \dot{q}_{theo} < 0$ wenn der menschliche Körper Wärme an die Umgebung abgeben würde und somit eine Empfindung in Richtung kalt stattfindet. Die Größe $\Delta \dot{q}_{theo}$ ist somit rein theoretischer Natur, da tatsächlich der menschliche Körper durch metabolische Reaktionen auf entsprechende klimatische Einflüsse reagieren würde.

Als Bewertungsgröße des thermischen Komforts nach Fanger [28] wird dann der dimensionslose *PMV*-Index nach Gleichung [2.30] mit Hilfe von $\Delta \dot{q}_{theo}$

$$\begin{aligned} PMV &= \Delta \dot{q}_{theo} \cdot \text{Skalierungsfunktion} \\ &= \Delta \dot{q}_{theo} \left(1 \frac{\text{m}^2}{\text{W}} \exp \left(-0.036 \frac{\text{m}^2}{\text{W}} \dot{q}_m \right) + 0.028 \frac{\text{m}^2}{\text{W}} \right) \quad [2.30] \end{aligned}$$

als empirisch ermittelte Zahlengleichung zur Beschreibung eines mittleren Wärmebeurteilungsindex gebildet. Fanger entwickelte hierzu eine aus Probandenversuchen rein empirisch abgeleitete Skalierungsfunktion, um den *PMV*-Index dimensionslos darstellen zu können. Diese Exponentialfunktion ist in Abhängigkeit des Bruttoenergieumsatzes \dot{q}_m im Exponenten und wird über den Faktor $-0.036 \frac{\text{m}^2}{\text{W}}$ zum einheitenlosen Exponenten normiert.

Tab. 2.2.: Skala zur Bewertung des thermischen Komforts nach [28]

| Empfinden | PMV [-] | PPD [-] |
|-------------|---------|---------|
| Heiß | 3 | 100 |
| Warm | 2 | 78 |
| Leicht warm | 1 | 26 |
| Neutral | 0 | 5 |
| Leicht kühl | -1 | 26 |
| Kühl | -2 | 78 |
| Kalt | -3 | 100 |

Der thermische Komfort kann somit durch den von Fanger [28] entwickelten *PMV*- und *PPD*-Index, entsprechend der Skala gemäß Tabelle 2.2, angegeben werden.

Aus dem *PMV*-Index kann der zu erwartende Prozentsatz an Probanden errechnet werden, welcher mit den aktuellen klimatischen Bedingungen unzufrieden ist. Auch hierzu leitete Fanger eine empirisch ermittelte Formel ab. Dieser Prozentsatz wird durch den *PPD*-Index (predicted percentage of dissatisfied) ausgedrückt und ergibt sich nach Gleichung [2.31] zu:

$$PPD = 100 - 95 \exp\left(-0.03343 |PMV|^4 - 0.2179 PMV^2\right) \quad [2.31]$$

Die Haupteinflussgrößen in Fahrzeugen für das Behaglichkeitsempfinden sind laut [38] die Innenraum- und Strahlungstemperatur. Der Luftfeuchte kommt nach [10] in Bezug auf das Behaglichkeitsempfinden eine untergeordnete Rolle zu. Sie ist jedoch nicht zu vernachlässigen insbesondere auch aufgrund von möglichem Scheibenbeschlag.

Abbildung 2.5 zeigt den Zusammenhang zwischen Außentemperatur und Behaglichkeitstemperatur im Fahrzeuginnenraum, welche nach DIN 1946 [2] als wesentliche Soll-Größe zur Klimaregelung dient. Im dargestellten Komfortband beträgt der *PMV*-Index ± 0.5 .

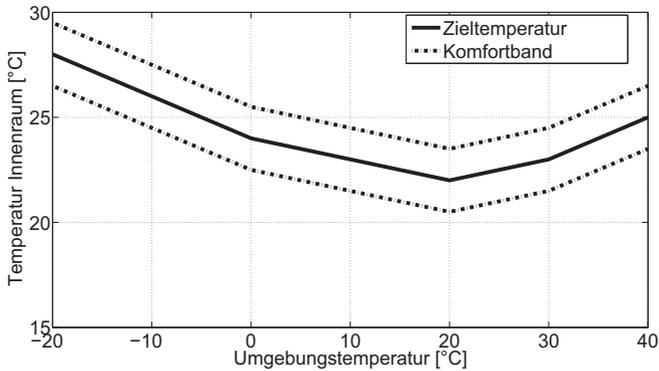


Abb. 2.5.: Empfohlene Ziel-Innenraumtemperatur nach DIN 1946 [2]

Komponenten und Funktionen zur Innenraumklimatisierung

Die Aufgaben der Fahrzeug-Innenraumklimatisierung sind nach [57]:

- Ein angenehmes Innenraumklima zur Steigerung des Wohlbefindens zu schaffen und Ermüdung vor allem bei hohen Außentemperaturen entgegenzuwirken. Dies beinhaltet auch das Sicherstellen eines Mindestsauerstoffgehalts des Innenraums mittels Steuerung der Umluftklappe.
- Die Scheiben durch Trocknung der Luft in Verbindung mit der Heizung frei von Beschlag zu halten.

Generell kann zwischen den Betriebsarten Außenluft-, Umluft- und Mischbetrieb unterschieden werden. Mittels der Umluftklappe können diese Betriebsarten eingestellt werden. Beim Außenluftbetrieb gelangt Umgebungsluft über einen Partikel- und Wasserabscheider zum Klimagerät. Dort wird sie je nach Bedarf durch den Verdampfer abgekühlt und/oder durch den Heizungswärmetauscher anschließend aufgeheizt. Im Umluftbetrieb wird die Luft des Fahrgastraums angesaugt, gereinigt und umgewälzt. Ferner wird zwischen den Zuständen Kühlen und Heizen unterschieden. Die Ansaugluft wird beim Durchströmen des Verdampfers gekühlt. Je nach Stellung der Heizklappe wird sie an

schließend am Heizungswärmetauscher wieder erhitzt. Dieser Re-Heat-Betrieb dient primär der Luftentfeuchtung und kann neben dem reinen Kühlen oder Heizen als weiterer Betriebszustand angesehen werden. Bei dieser Betriebsart sind sowohl Klimakompressor als auch Heizung gleichzeitig aktiv.

Bei konventionellen Fahrzeugen wird zum Heizen das Kühlmedium durch die Motorabwärme am Wärmetauscher aufgeheizt, welches dann die durchströmende Luft zum Innenraum erwärmt. Bei Elektrofahrzeugen reicht die Abwärme des Antriebssystems aufgrund der hohen Effizienz zur Innenraumheizung nicht aus. Aus diesem Grund werden meist elektrische Widerstandsheizungen als PTC²-Elemente eingesetzt. Zur Steigerung der Effizienz werden in aktuellen Forschungsarbeiten Wärmepumpensysteme für den Einsatz in Elektrofahrzeugen untersucht [51].

Zum Kühlen der Fahrgastzelle wird der Kältekreislauf, bestehend aus elektrischem Klimakompressor, Kondensator, Verdampfer und Gebläse, eingesetzt. Das zunächst gasförmige Kältemittel wird durch den Kompressor auf ein erhöhtes Druckniveau komprimiert, wobei es sich erwärmt. Am Kondensator wird es von umströmender Außenluft abgekühlt wodurch es in einen flüssigen Aggregatzustand übergeht. Anschließend wird es expandiert wodurch es zur Abkühlung kommt. Hierbei findet ein Übergang in einen gasförmigen Aggregatzustand statt, wobei aus dem Verdampfer Wärme aufgenommen wird.

2.2.2. Weitere Nebenaggregate

Je nach Witterungsbedingungen und Komforteinstellungen durch den Fahrer belasten weitere elektrische Nebenverbraucher zusätzlich das Hochvolt-EnergieNetz eines Elektrofahrzeugs und erhöhen somit den Gesamtenergieverbrauch. Gespeist werden diese Verbraucher über einen Gleichspannungswechselrichter zur Spannungstransformation auf die im Automobilbereich übliche Niederspannungslage. Tabelle 2.3 zeigt nach [57] eine Auswahl der aus energe-

² Positiv Temperatur Coefficient

tischen Aspekten bedeutendsten elektrischen Niedervolt-Verbraucher, ohne jedoch den Anspruch auf Vollständigkeit zu besitzen. Nicht aufgeführt sind vom Autor [57] beispielsweise die Leistungsaufnahmen vom gesamten Steuergeräteverbund oder weiterer Komfortverbraucher wie Sitz- und Lenkradheizung.

Tab. 2.3.: Mittlere Leistungsaufnahme von elektrischen Niedervoltverbrauchern [57]

| Verbraucher | mittlere Leistungsaufnahme [W] |
|--------------------|---------------------------------------|
| Kühlerlüfter | 200...800 |
| Gebläse Innenraum | 100...500 |
| Scheibenheizung | 120 |
| Scheibenwischer | 80...150 |
| Abblendlicht | 110 |
| Fernlicht | 120 |
| Schlussleuchten | 10 |

2.3. Elektronik im Kraftfahrzeug

Die elektronischen Systeme im Fahrzeug sind vielfach nicht von einander unabhängig. Im Sinne eines Systems handelt es sich um verteilte Funktionen, welche sich über Kommunikationsmechanismen austauschen können. Die Komplexität dieser Funktionalitäten und die Anzahl an verbauten Steuergeräten wächst kontinuierlich, vor allem vor dem Hintergrund steigender aktiver Sicherheits- und Komfortbedürfnisse im Automobilbau [19].

2.3.1. Fahrerassistenzsysteme

Fahrerassistenzsysteme nehmen bei der Unterstützung des Fahrers unterschiedliche Aufgaben wahr. Diese gliedern sich in Sicherheits-, Komfort- sowie Informationsfunktionen. Allen Systemen gemein ist jedoch eine Interaktion mit dem Fahrer. In der Literatur werden Fahrerassistenzsysteme nach unterschiedlichen

Gesichtspunkten klassifiziert. In [61] wird eine funktionsorientierte Kategorisierung vorgenommen, indem in autonome Systeme, Komfortsysteme, Fahrinformationssysteme sowie effizienzsteigernde Systeme unterschieden wird. In [55] wird ein umfassender Überblick über aktuell serienreife Fahrerassistenzsysteme gegeben. Diese werden in Tabelle 2.4 exemplarisch dargestellt und nach [61] kategorisiert. Tabelle 2.4 verdeutlicht die Schwierigkeit der eindeutigen Kategorisierung. Daher wird in [82] in zwei Ebenen unterschieden, zum einen im Unterstützungsgrad des Systems (informierend, agierend) und zum anderen in der Aufgabe des Systems (Navigation, Führung, Stabilisierung). Es ergibt sich nach Tabelle 2.5 eine Matrix nach folgendem Muster. Schneider [82] klassifiziert hierbei das ACC-System als agierende Stabilisierung, wobei auch eine agierende Führung als Einteilung vorgenommen werden könnte.

Tab. 2.4.: Serienreife Fahrerassistenzsysteme nach [55] und deren Einteilung nach [61]

| Systembezeichnung | Kategorie |
|--|------------------------------|
| Abbiegeassistent | Fahrinformationssystem |
| Adaptive Cruise Control (ACC) | Autonomes / Komfortsystem |
| Adaptive Cruise Control InnoDrive (ACCi) | Autonomes System / Verbrauch |
| Adaptive Lichtsysteme | Komfortsystem |
| Einparkassistent | Autonomes / Komfortsystem |
| Elektronisches Stabilitätssystem (ESP) | Autonomes System |
| Müdigkeitserkennung | Fahrinformationssystem |
| Spurhalteassistent (LKA) | Autonomes System |
| Spurverlassenswarner (LDW) | Fahrinformationssystem |
| Notbremsassistent | Autonomes System |
| Verkehrszeichenerkennung | Fahrinformationssystem |

Tab. 2.5.: Einteilungsmatrix für Fahrerassistenzsysteme nach [82]

| | Navigation | Führung | Stabilisierung |
|--------------|-------------------|----------------------|----------------|
| Informierend | Navigationssystem | Spurverlassenswarner | - |
| Agierend | - | Notbremsassistent | ACC |

2.3.2. Kommunikation und Vernetzung der Funktionen

Die Kommunikation und Vernetzung der Funktionen im automobilen Steuergeräteverbund wird standardmäßig mittels CAN³ ausgeführt. Es handelt sich hierbei um einen seriellen, zweiadrigen Datenbus. Alle Teilnehmer des Netzwerkes sind gleichberechtigt in der Kommunikation. Die Botschaften zum Informationsaustausch sind jedoch untereinander mittels ihres Identifiers priorisiert. Durch Arbitrierung über die Identifier wird eine zuverlässige Übermittlung der Nachrichten sichergestellt [53].

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Funktionsarchitektur setzt den CAN-Bus als standardmäßiges Kommunikationsmittel im Fahrzeug voraus.

2.3.3. Sensorik

Sämtliche Fahrerassistenzfunktionen stützen sich auf eine Vielzahl an Informationen, welche von entsprechender Sensorik zur Verfügung gestellt werden. Hierbei kann zwischen fahrzeugeigenen bzw. internen Größen und Informationen zum Fahrzeugumfeld bzw. externen Größen unterschieden werden.

Das ESP⁴ zur Fahrzeugstabilisierung in fahrdynamischen Grenzbereichen benötigt Sensorik zur Erfassung der Gierrate, Längs- und Querbeschleunigung, Fahrzeuglängsgeschwindigkeit, Raddrehzahlen sowie den Lenkradwinkel.

Darüber hinaus stellen die elektrischen Antriebskomponenten Informationen zu Spannungen und Strömen bereit, sowohl für den aktuellen Zustand als auch prädiktiv zur Ermittlung von verfügbaren Leistungsgrenzen.

³ Control Area Network

⁴ Elektronisches Stabilitätsprogramm

Das Navigationssystem kann darüber hinaus Streckeninformationen für den aktuellen und kommenden Streckenverlauf bereit stellen. Mit Hilfe des ADASIS⁵-Protokolls können prädiktive Informationen zu Straßentyp, Geschwindigkeitslimits, Höhenverlauf und Kurvenkrümmung via CAN-Bus übermittelt werden [76]. Diese Informationen sind für eine adaptive und prädiktive Betriebsstrategie von entscheidender Bedeutung, um den aktuellen und zukünftigen Leistungsbedarf des Gesamtfahrzeugs abzuschätzen und eine streckenspezifisch optimale Betriebsstrategie zu entwickeln.

2.4. Methodiken zur Entwicklung mechatronischer Systeme

Mit steigender Anzahl an verteilten Funktionen und Elektronik im Automobil wachsen gleichbedeutend die softwaretechnischen Umfänge. Zur zielgerichteten Entwicklung solcher mechatronischen Systeme haben sich entsprechende Methodiken und Prozesse etabliert, welche einen durchgängigen und strukturierten Systementwurf ermöglichen.

Aus der Systemtheorie sind Methoden und systematische Denkweisen zur Anwendung komplexer Problemlösungsprozesse im Rahmen des Produktentwicklungsprozesses bekannt. Diese Art der Betrachtung beschreibt das zu entwickelnde Produkt als Zielsystem auf Basis von definierten Anforderungen und Kundenwünschen [99]. Als Handlungssysteme werden alle an der Entwicklung beteiligten Prozesse und Ressourcen zusammengefasst. Das Objektsystem beschreibt letztendlich das technische Produkt als Realisierung des Zielsystems durch die Festlegung beispielsweise geometrischer, stofflicher sowie funktionaler Eigenschaften. Ziel der Produktentwicklung ist das Überführen eines Zielsystems mit Hilfe des Handlungssystems in ein Objektsystem [73].

Als Grundlage des automobilen Elektronik- und Software-Entwicklungsprozesses dient das V-Modell gemäß Abbildung 2.6, welches nach VDI Richtlinie

⁵ Advanced Driver Assistance Systems Interface Specification

2206 - „Entwicklung mechatronischer Systeme“ [6] als Problemlösungsprozess bei der Entwicklung mechatronischer Systeme spezifiziert wird. Es kann somit nach Auffassung der Systemtheorie als Handlungssystem verstanden werden. Es gliedert sich in zwei Äste und beschreibt durchgängig als „Makrozyklus“ die einander abfolgenden Entwicklungsschritte und das „generische Vorgehen beim Entwurf“ der formalen und funktionalen Systembeschreibung über die Umsetzung und Integration bis hin zur Funktions- und Qualitätssicherung im Fahrzeug.

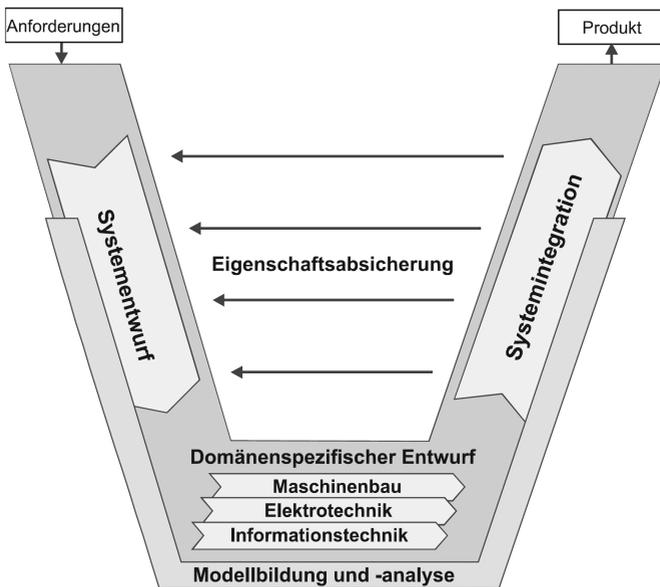


Abb. 2.6.: Das V-Modell nach VDI 2206 [6]

Der linke Arm beinhaltet den Systementwurf als top down Prozess, beginnend mit der Anforderungsdefinition, über den Systementwurf bis hin zur Implementierung. In [84] wird der Systementwurf noch detaillierter untergliedert in Spezifikation der logischen Architektur, der technischen Architektur, der Software-Architektur und der Software-Komponenten. Hierbei wird, ausgehend von der

erstellten Anforderungsdefinition, erst das System funktional gegliedert. Anschließend erfolgt eine Unterteilung in technisch realisierbare Module. Durch hierarchische Verknüpfungen kann somit eine Architektur der gesamthaft zu erstellenden Software aufgebaut werden. Die einzelnen Komponenten werden auf Basis ihrer Schnittstellen und Variablendeklaration spezifiziert und festgelegt. Im Anschluss kann die eigentliche Implementierung erfolgen.

Die rechte Seite hingegen beinhaltet eine bottom up Systemintegration. Die einzelnen Module werden hierbei zu einem immer komplexer werdenden Gesamtsystem verknüpft. Die Eigenschaftsabsicherung und Validierung erfolgt hierbei jeweils in horizontaler Ebene. An oberster Stelle steht am Ende das adressierte und fertig ausgestaltete Produkt bzw. System. Die beschriebene VDI-Richtlinie 2206 und im Speziellen das V-Modell stellen die methodische Grundlage als Vorgehensmodell der im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnden Funktionsarchitektur dar.

2.5. Betriebsstrategie und Energiemanagement

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine ganzheitliche Betriebsstrategie für Elektrofahrzeuge aus Gesamtfahrzeugsicht entwickelt werden. In diesem Kontext soll der Begriff Energiemanagement näher erläutert werden.

Nach VDI Richtlinie 4602 [7] ist „Energiemanagement [...] die vorausschauende, organisierte und systematische Koordinierung, Beschaffung, Wandlung, Verteilung und Nutzung von Energie zur Deckung der Anforderungen unter Berücksichtigung ökologischer und ökonomischer Zielsetzungen. [...] Ziele des Energiemanagements sind u.a.: Befriedigung der Nutzer- oder Prozessanforderungen, Sicherheit der Energiebereitstellung, Komfort- und Repräsentationsanforderungen, Senkung der Energiekosten, Senkung der Anlagenkosten, Verbesserung der Gesamtwirtschaftlichkeit, Schaffung einer ökologischen Vorbildfunktion usw.“. Im Automobilbereich wird der Begriff in zweierlei Hinsicht verstanden. Zum einen beschreibt das Energiemanagement in Verbindung mit

Hybridfahrzeugen die Betriebsstrategie des Antriebssystems und koordiniert das energieeffiziente Zusammenspiel des Antriebsstrangs. Zum anderen findet die Begrifflichkeit des Energiemanagements bezüglich elektrischer Niedervolt-Energiebordnetze und deren Regelung Anwendung.

2.5.1. Betriebsstrategien für Antriebssysteme

Aus der Literatur sind Betriebsstrategien für Hybridfahrzeuge sowohl für parallele, serielle als auch leistungsverzweigte Topologien bekannt [102], [56], [95], [34]. Diese beinhalten allesamt die Steuerung und Koordinierung des Antriebsstrangs, im Speziellen das Zusammenspiel von Verbrennungskraftmaschine und elektrischem Antriebssystem. Hierbei liegt der Fokus auf einem möglichst effizienten und kraftstoffsparenden Einsatz des Gesamtsystems, bestehend aus Verbrennungskraftmaschine, Energiespeicher und elektrischer Maschine.

Als Steuergröße der Betriebsstrategie dient bei Hybridfahrzeugen primär der Ladezustand der Batterie (SoC). Ziel der Betriebsstrategie ist ein ausgeglichener Ladezustand der Batterie über den gesamten Zyklus. Durch Einsatz und Unterstützung des elektrischen Traktionssystems resultiert eine betriebsstrategieabhängige Kraftstoffersparnis in Abhängigkeit des Hybridisierungsgrades und der Antriebsstrang-Topologie von 5% bis 20% [75].

Allen Betriebsstrategien gemein ist eine Optimierung der Energieeffizienz. Nach Hofmann [43] kann eine Kategorisierung hinsichtlich „der Art der Erstellung der implementierten Gesetzmäßigkeiten“ vorgenommen werden.

Statische Betriebsstrategien

Sie beinhalten klar definierte Regeln und Grenzen, wie exemplarisch in [44], [29] beschrieben. Es bedarf keiner Kenntnis über die zu befahrende Strecke. Die Betriebsmodi werden in Abhängigkeit gewisser Betriebsgrößen, primär dem SoC, aber auch sekundärer Größen wie geforderter Antriebsleistung, Geschwindigkeit, Temperaturen etc. eingestellt. Hierbei werden meist mit Hilfe von Zustandsautomaten diskrete Betriebszustände vorgegeben.

Erfahrungsbasierte Betriebsstrategien

Werden hingegen kontinuierliche Regler mit Hilfe von Fuzzy-Logik oder neuronaler Netze verwendet, können nicht diskrete Betriebszustände erreicht werden, exemplarisch in [83] dargestellt. Hierfür sind entsprechendes Wissen und Erfahrung über das Systemverhalten notwendig. Daher wird diese Art der Betriebsstrategie auch als heuristisch bezeichnet.

Analytische Betriebsstrategien

Hierbei wird die Betriebsstrategie auf Basis einer analytischen Optimierung durchgeführt [52], [49]. Mathematisch wird das Optimierungsproblem über eine Zielfunktion formuliert. Diese ist durch einen entsprechenden Parametersatz an Eingangsgrößen beschrieben. Diese repräsentieren alle relevanten Einflussparameter des technischen Systems. Die Optimierung kann dabei eine oder mehrere Zielgrößen beinhalten (Kraftstoffverbrauch, Fahrleistung, Bauteilschutz etc.). Nebenbedingungen können das Optimierungsproblem zu einer konvergenten Lösung eingrenzen bzw. restriktieren.

Prädiktive Betriebsstrategien

Durch die Kenntnis von Streckeninformationen einer zukünftig zu befahrenden Strecke kann eine Vorhersage über Fahr- und Verkehrssituationen getroffen werden. Durch die Erweiterung der Kenntnis über zukünftige Ereignisse und Leistungsbedarfe kann eine optimale Lösung für den jeweiligen Prädiktionshorizont gefunden werden [11], [92], [101]. Somit kann nicht nur ein lokales, sondern ein globales Optimum innerhalb des Prädiktionshorizonts ermittelt werden.

2.5.2. Elektrisches Energiemanagement

Der Begriff Energiemanagement ist nicht nur in Verbindung mit Betriebsstrategien für Hybridfahrzeuge, sondern auch in Bezug auf das Niedervolt-Energiebordnetz als das zentrale Energieversorgungssystem beim konventionellen Fahrzeug gebräuchlich. In Abschnitt 4.3 werden hierzu eine detaillierte Erläu-

terung sowie Kategorisierung des elektrischen Niedervolt-Energiemanagements vorgestellt. In [78] wird dies wie folgt definiert: „Ein elektrisches Energiemanagement koordiniert während der Fahrt das Zusammenspiel von Generator, Spannungswandler, Batterie und elektrischen Verbrauchern.“

Der Fokus hierbei ist die zuverlässige und zugleich effiziente Versorgung der Niedervolt-Nebenverbraucher mit Energie. Diese Energie entstammt entweder der Niedervolt-Batterie oder muss zusätzlich durch die installierte Generator-Einheit indirekt durch Lastpunktanhebung vom Verbrennungsmotor erbracht werden.

2.6. Einordnung der Arbeit

Durch eine ganzheitliche Betriebsstrategie aus Sicht des Gesamtfahrzeugs ist es mit Hilfe einer Verwaltung der Energieflüsse aller Verbraucher möglich, die Reichweite eines Elektrofahrzeugs bedarfsgerecht zu beeinflussen. Die vorliegende Arbeit orientiert sich hierzu an der Definition des Begriffs Energiemanagement gemäß der VDI Richtlinie 4602 [7] und interpretiert diesen aus Sicht des Gesamtfahrzeugs. Sie vereint die beiden aufgeführten gebräuchlichen automobilen Verwendungen des Begriffs zu einem gesamtheitlichen Ansatz. Dem Fahrer kann hierdurch eine Unterstützung zur Erhöhung der Planungssicherheit seiner Routen gegeben werden. Somit übernimmt das Energiemanagement respektive die Betriebsstrategie auch die Funktion eines neuartigen Fahrerassistenzsystems mit agierendem sowie informierendem Charakter. Der Marktüberblick aktueller Fahrerassistenzsysteme nach Tabelle 2.4 verdeutlicht den Fokus und Nutzen heutiger Systeme hinsichtlich der Ausprägung als präventives Instrument zur Steigerung der aktiven Sicherheit. Da die Alltagstauglichkeit von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen durch die reduzierte Reichweite beschränkt ist, werden innovative Fahrerassistenzsysteme benötigt, welche diesen neuartigen Anforderungen funktional gerecht werden, um die Fahrzeugverfügbarkeit zu erhöhen und dadurch eine breitere Marktdurch-

dringung und Akzeptanz von Elektrofahrzeugen zu ermöglichen. Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der Entwicklung einer hierfür geeigneten Funktionsarchitektur zur Umsetzung von Betriebsstrategie-Maßnahmen zur Steigerung der Reichweite und zum bedarfsgerechten Einsatz der zur Verfügung stehenden Energie durch Effizienz-Funktionen. Zur Betriebsstrategieoptimierung werden mit Hilfe einer entwickelten Methode Objektivgrößen der übergeordneten Qualitätsmerkmale Reichweite, Fahrzeugdynamik sowie thermischer Innenraumkomfort berücksichtigt. Die folgenden Untersuchungen werden simulationsgestützt mit Hilfe eines Gesamtfahrzeugmodells durchgeführt. Dieses wird mit einem realen Versuchsträger eines Elektrofahrzeugs validiert. Die vorliegende Arbeit besitzt den Charakter einer virtuellen Konzeptuntersuchung und kann als Handlungssystem für die frühe Produktentwicklungsphase verstanden werden. Die Funktionen und Algorithmen zur Betriebsstrategie-Vorgabe werden bereits echtzeitfähig für den Einsatz auf einer Rapid-Prototyping-Hardware umgesetzt, um die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse direkt in ein Fahrzeug übertragen zu können.

Um diese Funktionen methodisch entwickeln zu können, sind jedoch zunächst spezifische Anforderungen gemäß des V-Modells, als für diese Arbeit maßgebliches Handlungssystem, zu erörtern, welche einen anforderungsgerechten Systementwurf ermöglichen. Hierfür muss die Vielzahl an funktionalen Konzepten, insbesondere die Ausführungsmöglichkeiten des Antriebssystems, in Form von Voruntersuchungen methodisch analysiert und bewertet werden, um letztendlich das zielführendste Konzept auswählen zu können. Die einzelnen Funktionen können dann für dieses Fahrzeug-Konzept entwickelt und bewertet werden. Die einzelnen Komponenten eines Elektrofahrzeugs sind heute bereits aus etablierten Anwendungen bekannt. Sie können hinreichend abgebildet und separat beschrieben werden. Deren Zusammenspiel und die hieraus entstehenden systemischen Korrelationen und Wechselwirkungen im Gesamtfahrzeug aber auch mit der Umwelt sind für Elektrofahrzeuge noch nicht hinreichend analysiert und erforscht. Diese Arbeit soll auch hierzu einen Beitrag leisten.

3. Bewertung funktionaler Konzepte durch energetische Analysen bei Elektrofahrzeugen

Das folgende Kapitel 3 soll als Voruntersuchung im Kontext einer umfangreichen Analyse der konzeptabhängigen Energieflüsse bei Elektrofahrzeugen dienen. Hierzu werden eingangs übergeordnete Anforderungen an Elektrofahrzeuge in Abhängigkeit des Fahrzeugsegments diskutiert. Auf diesen Anforderungen aufbauend wird eine Methode vorgestellt, welche unterschiedliche funktionale Konzepte bewertet, um eine anforderungsgerechte Ausführung des Antriebssystems zu ermöglichen. Unter Anwendung dieser Methode wird aus der Vielzahl möglicher Antriebskonzepte das zielführendste für weitere Untersuchungen abgeleitet.

Darüber hinaus sollen wesentliche Einflussparameter auf den Gesamtenergieverbrauch und somit die Reichweite identifiziert werden. Hierzu werden sowohl das ausgewählte elektrische Antriebs- als auch das Klimatisierungssystem in repräsentativen Zyklen und Umgebungsbedingungen analysiert. Diese Datenerhebung soll zum Erkenntnisgewinn als Grundlage für den Entwurf einer Betriebsstrategie aus Gesamtfahrzeugsicht führen und relevante Maßnahmen zur Steigerung der Reichweite identifizieren.

3.1. Anforderungsgerechte Gestaltung des Antriebskonzepts

Das elektrische Antriebssystem stellt zur Erfüllung der Zielgrößen im Rahmen des Produktentwicklungsprozesses einen wesentlichen Bestandteil innerhalb des Gesamtfahrzeugs dar. Um sinnvolle funktionale Konzepte zu identifizieren, wird im Folgenden eine Methode zur anforderungsgerechten Gestaltung des Antriebssystems vorgestellt. Diese sieht die Schritte

1. Definition und Gewichtung der Zielgrößen in Abhängigkeit des Fahrzeugsegments
2. Auswahl des Maschinentyps mittels Nutzwertanalyse
3. Auswahl der Antriebstopologie mittels energetischer Analysen

vor, welche im Folgenden näher ausgeführt werden.

3.1.1. Fahrzeugsegmentabhängige Zielgrößen

Im Produktentwicklungsprozess müssen unterschiedliche und auch teilweise konkurrierende Anforderungen erfüllt werden. Diese lassen sich in die Bereiche der kunden- und herstellerspezifischen sowie der gesetzlichen Anforderungsprofile unterteilen [36].

Damit ein neues Produkt vom Markt und seinen potentiellen Käufern angenommen wird, müssen deren Erwartungen an ein neues Fahrzeugkonzept zufriedenstellend erfüllt sein. Diese Erwartungen des Kunden werden somit zu Zielgrößen für den gesamten Entwicklungsprozess. Studien zeigen mittels repräsentativer Umfragen, welche Zielgrößen für die Kaufentscheidung prinzipiell ausschlaggebend sind [9], [24], [41], [90], [15]. Effizienz und Reichweite, Sicherheit, Performance, Komfort, Anschaffungskosten sowie Stauraum stehen hierbei je nach Fahrzeugsegment mehr oder weniger im Vordergrund.

Aus Perspektive der Fahrzeugentwicklung sind diese Erwartungen demnach entsprechend zu berücksichtigen und repräsentieren Indikatoren zur Ableitung eines Zielekatalogs. Aus herstellerspezifischer Sicht existieren weitere Faktoren wie das Maßkonzept, das Package der Komponenten innerhalb des Gesamtfahrzeugs sowie das Fahrzeuggewicht.

Seitens des Gesetzgebers fließen darüber hinaus nationale und internationale Regularien für Emissions-, Geräusch- und Sicherheitsanforderungen als weitere Zielgrößen in den Produktentwicklungsprozess ein.

Die Erfüllung dieser kunden-, hersteller- sowie gesetzgebungsspezifischen Zielgrößen stellt aus technischer sowie ökonomischer Sicht meist einen Zielkonflikt

für den Produktentwicklungsprozess dar [97]. Um das Produkt bestmöglich innerhalb dieses Zielkonflikts zu positionieren, werden ausgewählte Zielgrößen im Rahmen der zu entwickelnden Methode in Abhängigkeit des Fahrzeugsegments unterschiedlich zueinander gewichtet, um segmentspezifische Anforderungen für ein Elektrofahrzeug ableiten zu können.

Abbildung 3.1 stellt die Bedeutung der oben aufgeführten Zielgrößen und deren Gewichtung in Abhängigkeit des Fahrzeugsegments dar. Die Gewichtung wurde exemplarisch von 1 (geringe Bedeutung) bis 10 (hohe Bedeutung) im Rahmen eines interdisziplinär besetzten Expertengesprächs durchgeführt. Die dargestellten Gewichtungen besitzen somit subjektiven Charakter und können je nach Fahrzeugprojekt individuell angepasst werden.

Bei Kleinwagen stehen gemäß Abbildung 3.1(a) die Anschaffungskosten als Kaufkriterium im Vordergrund. Weitere wichtige Zielgrößen für den Entwicklungsprozess sind Gewicht und Package aufgrund des geringen verfügbaren Bauvolumens. Der Performance kommt in diesem Fahrzeugsegment eine untergeordnete Rolle zu. Da der urbane Raum das Haupteinsatzgebiet eines Kleinwagens darstellt, werden mittlere Reichweiten erwartet.

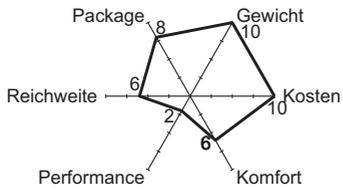
Bei Mittelklasse-Fahrzeugen entspannt sich die Bauraum- und Gewichtssituation im Vergleich zum Kleinwagen nach Abbildung 3.1(b). Ein wichtiger Aspekt im Mittelklasse-Segment ist die Reichweite. Zusätzlich wird eine höhere Performance der Fahrzeuge erwartet, da diese nicht ausschließlich im urbanen Umfeld eingesetzt werden. Auch die Komfortansprüche sind im Vergleich zum Kleinwagen wesentlich höher. Es werden künftig ähnliche Ansprüche wie bei Oberklassefahrzeugen erwartet [65]. Jedoch kann bei Oberklasse-Fahrzeugen ein höheres Preisniveau erreicht werden.

Bei Oberklasse-Fahrzeugen ist die Gewichts- und Packagesituation besser. Hoher Komfort, aber auch ansprechende Performance werden in diesem Segment vorausgesetzt, siehe Abbildung 3.1(c).

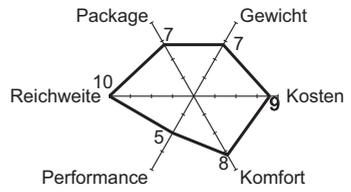
Performance und Fahrdynamik stehen beim Sportwagen klar im Fokus. Für den

Entwicklungsprozess hat dies gemäß Abbildung 3.1(d) zur Folge, dass der Bau-
raum limitiert ist und vor allem das Gewicht aufgrund der hohen Dynamikan-
forderungen gering sein muss. Die Kosten treten im Vergleich zu anderen Fahr-
zeugsegmenten in den Hintergrund.

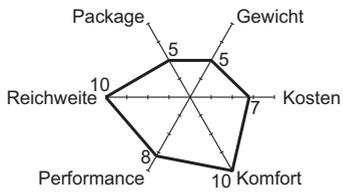
Da Transportfahrzeuge vorwiegend kommerziell im Lieferverkehr genutzt wer-
den, können hierbei Komfort und Performance zu Gunsten der Kosten als zen-
trale Zielgröße niedriger gewichtet werden. Aufgrund des großen Fahrzeugvo-
lumens entspannt sich die Package- und Gewichtssituation, siehe Abbildung 3.1(e). Diese in Abhängigkeit des Fahrzeugsegments gewich-
teten Zielgrößen stellen die Grundlage für den weiteren Auswahlprozess im
Rahmen der Gestaltung des Antriebskonzepts dar.



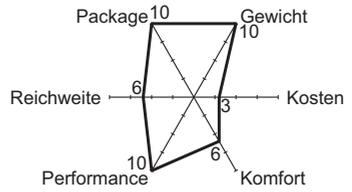
(a) Kleinwagen



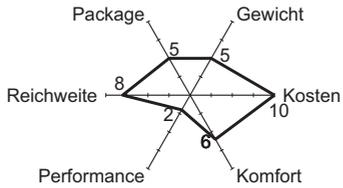
(b) Mittelklasse



(c) Oberklasse



(d) Sportwagen



(e) Transporter

Abb. 3.1.: Gewichtung relevanter Zielgrößen in Abhängigkeit des Fahrzeugsegments

3.1.2. Auswahl der elektrischen Antriebsmaschine unter Berücksichtigung der gewichteten Zielgrößen

Aufgrund der Vielzahl an Maschinentypen (siehe Abschnitt 2.1.2) soll mit Hilfe einer Nutzwertanalyse durch Verknüpfung der gewichteten Zielgrößen und der maschinentypspezifischen Eigenschaften nach Tabelle 2.1 eine Hilfestellung für den Maschinen-Auswahlprozess vorgestellt werden.

Mit Hilfe einer Nutzwertanalyse soll im Folgenden eine möglichst objektive Aussage zur Auswahl des Maschinentyps im Kontext der verschiedenen Fahrzeugsegmente getroffen werden. Tabelle 3.1 zeigt eine exemplarische Zuordnung der Zielgrößen zu den maschinenspezifischen Eigenschaften.

Tab. 3.1.: Verknüpfung der Zielgrößen mit maschinenspezifischen Eigenschaften

| Zielgrößen | Maschinenspezifische Eigenschaften |
|----------------------------|------------------------------------|
| Reichweite | Wirkungsgrad |
| | Leerlaufverluste |
| Performance | Leistungsdichte |
| | Überlastfähigkeit |
| Kosten | Kosten |
| | Fehlverhalten |
| Package | Leistungsdichte |
| Gewicht | Leistungsdichte |
| Komfort / NVH ¹ | Akustik |

Für eine Nutzwertanalyse werden die aus der Literatur stammenden Eigenschaften gemäß Tabelle 2.1 entsprechend für Vorteile (+) mit 2 Punkten, neutral (0) mit 1 Punkt und Nachteile (-) mit 0 Punkten bewertet. Anschließend

¹Noise Vibration Harshness

wird mit den gewichteten Zielgrößen je Fahrzeugsegment nach Abbildung 3.1 durch Multiplikation ein Teilnutzwert bestimmt. Werden mehrere Eigenschaften mit einer Zielgröße verknüpft, wird zur Bewertung das arithmetische Mittel gebildet. Die einzelnen Teilnutzwerte werden anschließend zu einem Gesamtnutzwert addiert. Hierdurch wird eine Indikation zur zielgerichteten Auswahl des Maschinentyps für ein jeweiliges Fahrzeugsegment deutlich. Je höher der Gesamtnutzwert ausfällt, desto besser eignet sich ein entsprechender Maschinentyp für ein spezifisches Fahrzeugsegment.

Tabelle 3.2 stellt die Ergebnisse der exemplarisch durchgeführten Maschinenauswahl dar.

Tab. 3.2.: Ergebnis der Nutzwertanalyse zur Maschinenauswahl

| | ASM | FESM | PSM | GRM |
|--------------|------------|-------------|------------|------------|
| Kleinwagen | 51 | 24 | 58 | 49 |
| Mittelklasse | 59 | 33 | 64 | 52 |
| Oberklasse | 60 | 37.5 | 66 | 47 |
| Sportwagen | 54 | 24.5 | 78 | 45 |
| Transporter | 46 | 26 | 44 | 44 |

In Abhängigkeit konkreter Maschinen und individueller Gewichtung kann das Bewertungsverfahren auf konkrete Fahrzeugprojekte angepasst werden. Aus der Nutzwertanalyse ist ersichtlich, dass sich prinzipiell PSM für den Einsatz in Elektrofahrzeugen sehr gut eignen. Aufgrund der hohen Kosten erscheint jedoch bei Kleinwagen die ASM als probate Alternative. Ebenso bei Fahrzeugen der Mittel- und Oberklasse. Die hohen Anforderungen an Performance, Package und Gewicht bei Sportwagen kann jedoch ausschließlich die PSM erfüllen. Bei Transporterfahrzeugen stellt sich aufgrund der hohen Gewichtung der Kosten bei gleichzeitig geringer Gewichtung bezüglich des Package die ASM als sehr geeignet dar, wobei auch die GRM aufgrund der niedrigen Gewichtung des Komforts künftig eventuell in Betracht kommen könnte. FESM erscheinen bei

dieser exemplarisch durchgeführten Analyse aufgrund der niedrigen Nutzwerte für den Einsatz bei reinen Elektrofahrzeugen als weniger geeignet.

3.1.3. Antriebstopologien unter Berücksichtigung der gewichteten Zielgrößen

Als Antriebsstrang-Topologie wird die Anordnung der einzelnen am Energiefluss beteiligten Komponenten im Antriebsstrang verstanden. Durch eine freie Anordnung der Antriebsstrang-Komponenten bestehen prinzipiell verschiedene Möglichkeiten zur Gestaltung der Antriebstopologie bei Elektrofahrzeugen. Sie können unabhängig vom gewählten Maschinentyp nach folgenden Kriterien charakterisiert werden:

- Anzahl angetriebener Achsen (2WD / 4WD)
- Anzahl an elektrischen Maschinen (eins bis vier)
- Verteilung der installierten Leistung (zentral, längs, quer, radindividuell)
- Ausführung von Getrieben (1-Gang, Mehr-Gang)
- Einsatz von Kupplungen

Abbildung 3.2 zeigt mögliche Antriebstopologien. Diese sind unabhängig davon dargestellt, ob die Fahrzeuge front- oder heckangetrieben sind. Die im Folgenden erarbeiteten Erkenntnisse sind hiervon unabhängig.

Die Abbildung zeigt 2WD-Varianten mit einer Zentralmaschine und einer festübersetzenden Getriebestufe (Abbildung 3.2(a)), einer Zentralmaschine mit Mehr-Gang Getriebe (Abbildung 3.2(b)) und eine Querverteilung der Leistung auf zwei elektrische Maschinen zum radindividuellen Antrieb mit jeweils einer festübersetzenden Getriebestufe (Abbildung 3.2(c)). Ebenfalls sind 4WD-Topologien mit sowohl achsbezogener Längsverteilung mit zwei (Abbildung 3.2(d)) und drei Maschinen (Abbildung 3.2(e)), als auch einem radindividuellen Antrieb aller vier Räder dargestellt (Abbildung 3.2(f)).

Zur Wahl einer anforderungsgerechten Topologie können analog der Maschinenauswahl die gewichteten Zielgrößen zur fahrzeugsegmentabhängigen Ent-

scheidungsfindung beitragen. Aufgrund niedriger Performance-Anforderungen und angespannter Kosten- und Bauraumsituation scheidet Mehrmotorenkonzepte bei Klein- und Transportfahrzeugen aus. Durch ein Mehr-Gang Getriebe kann die elektrische Maschine kleiner dimensioniert werden, was projektabhängig zu Package-Vorteilen führen kann. Mehrkosten des Getriebes wirken sich aufgrund der dominierenden Batteriekosten nur geringfügig aus [27].

Auch bei Fahrzeugen der Mittelklasse sind die Anforderungen an Performance noch nicht so entscheidend, dass sie nicht von einer Zentral-Topologie erfüllt werden könnten. Aus diesem Grund sind auch in diesem Segment keine Mehrmotorenkonzepte zu erwarten.

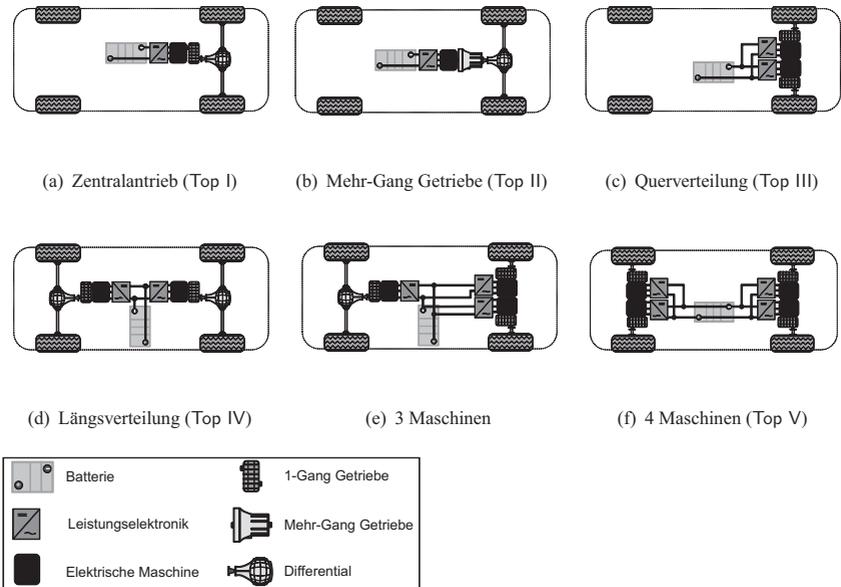


Abb. 3.2.: Übersicht möglicher Topologien bei Elektrofahrzeugen

Bei Sportwagen und Fahrzeugen der Oberklasse stellen sich die Verhältnisse anders dar. In diesen Segmenten können die hohen Performance-Anforderungen durch ein Mehrmotorenkonzept gut erfüllt werden, da eine Zentralmaschine

mit der zur Erfüllung der Performance benötigten Gesamtleistung hinsichtlich Package nur schwer zu realisieren ist und auch die Leistungselektronik nach aktuellem Stand der Technik in der Einzelleistung begrenzt ist.

Da für die Reichweite als entscheidende und bei Elektrofahrzeugen allgemein kritische Zielgröße letztendlich der Energieverbrauch ausschlaggebend ist, soll im Folgenden der Einfluss der Topologie auf den Energieverbrauch diskutiert und anschließend simulativ evaluiert werden.

3.1.4. Diskussion relevanter Antriebstopologien hinsichtlich des Energieverbrauchs

Die Antriebsstrang-Topologie beeinflusst entscheidend sowohl den motorischen Betrieb als auch das Rekuperationspotential eines Elektrofahrzeugs. Im motorischen Betrieb ist die Auslastung der Maschine und der lastpunktabhängige Wirkungsgrad im aktuellen Arbeitspunkt verbrauchsentscheidend. In der Arbeit von [39] konnte in diesem Kontext aufgezeigt werden, dass eine Leistungsaufteilung bedingt durch die Wachstumsgesetze elektrischer Maschinen einen signifikanten Einfluss auf den Energieverbrauch besitzt. Bezüglich der Rekuperation kann ausschließlich an angetriebenen Achsen Energie ins elektrische Antriebssystem eingespeist werden, um dadurch den Verbrauch zu senken. Da aufgrund dynamischer Achslastverteilung eine entsprechende Bremskraftverteilung eingehalten werden muss, besitzen 4WD-Topologien ein erhöhtes Rekuperationspotential im realen Betrieb bei erhöhten Verzögerungsanforderungen. Bei einem Zentralmotorsystem (Abbildung 3.2(a)) wird die gesamte Leistung durch eine Maschine aufgebracht. Es sind lediglich ein Umrichter und eine feste Übersetzungsstufe notwendig. Die Wirkungsgradkette ist hierdurch relativ kurz. Die im Fahrbetrieb auftretenden Verluste beschränken sich hauptsächlich auf diese drei Komponenten. Zudem fallen bei gleicher installierter Systemleistung Gewicht und Kosten im Vergleich zu Mehrmotorenkonzepten am geringsten aus. Da der Wirkungsgrad mit der Baugröße der elektrischen Maschine zunimmt, ist bei gleicher angenommener Leistungsdichte ein höherer maxima-

ler Wirkungsgrad des Antriebs im Vergleich zu einer Leistungsaufteilung nach Abschnitt 2.1.2 zu erwarten. Jedoch ist je nach Zyklus die Auslastung der Maschine gering und die Lastpunkte befinden sich in wirkungsgradungünstigen Teillastbereichen. Bei heckgetriebenen Zentralantrieben ist das Rekuperationspotential aufgrund dynamischer Achslastverteilung beschränkt, da an der Vorderachse rein mechanisch zugebremst werden muss, um instabile Fahrzustände zu vermeiden.

Bei Zentralantrieben mit Mehr-Gang Getriebe (Abbildung 3.2(b)) kann die Übersetzung im Fahrbetrieb angepasst werden, um somit die Auslastung und den damit verbundenen Wirkungsgrad im Arbeitspunkt der Maschine positiv zu beeinflussen. Jedoch steigt hierdurch das Systemgewicht. Zudem sind Schleppverluste des Mehr-Gang Getriebes sowie erhöhte Verluste durch eine Zunahme an Zahnradpaarungen und Lagerungen im Vergleich zur festen Übersetzungsstufe zu erwarten [33]. Durch den in weiten Betriebsbereichen ohnehin hohen Wirkungsgrad der elektrischen Maschine ist demnach nicht mit einer signifikanten Verbesserung des Energieverbrauchs durch ein Mehr-Gang Getriebe zu rechnen.

Bei einer Querverteilung der installierten Leistung (Abbildung 3.2(c)) steigen im Vergleich zum Zentralantrieb durch die zweifache Ausführung aller Komponenten (Maschine, Inverter, Getriebe) Systemgewicht und -kosten. Ein mechanisches Differential kann aufgrund der radindividuellen Ansteuerung der elektrischen Maschinen entfallen. Durch die Aufteilung der Leistung werden die Lastpunkte im Fahrbetrieb abgesenkt, wodurch sich diese in schlechteren Wirkungsgradbereichen befinden. Die einzelnen Maschinen besitzen zudem im Vergleich zum Zentralantrieb bedingt durch die Wachstumsgesetze nach Abschnitt 2.1.2 einen schlechteren Wirkungsgrad, da sie durch die Querverteilung eine geringere Einzelleistung aufweisen. Auch während der Rekuperationsphasen befinden sich dadurch die Maschinen in schlechteren Wirkungsgradbereichen, wodurch bei heckgetriebenen Varianten das ohnehin schon beschränkte Rekuperationspotential über die Hinterachse weiter gemindert wird. Daher ist

gerade bei heckangetriebenen Varianten, wie sie bei Sportwagen und Fahrzeugen der Oberklasse üblich sind, aufgrund der ungünstigen Lage der Betriebspunkte sowohl im motorischen als auch im generatorischen Betrieb mit einem erhöhten Verbrauch zu rechnen. Jedoch kann durch die radselektive Anordnung aktiv ein Giermoment erzeugt werden. Dieses kann für Torque-Vectoring² Funktionalitäten genutzt werden, um die Agilität bei Kurvenfahrt zu verbessern. Eine Längsverteilung der installierten Leistung (Abbildung 3.2(d)) erhöht das Rekuperationspotential und senkt somit den Energieverbrauch, da sowohl an der Vorder- als auch an der Hinterachse rekuperativ verzögert werden kann. Durch die Realisierung einer energieverbrauchsgünstigen Drehmomentenverteilung besteht zudem die Möglichkeit, mittels einer freien Wahl der Betriebspunkte in Längsrichtung zwischen Vorder- und Hinterachsmaschine die Verlustleistung im motorischen Betrieb zu senken. Bei dieser Art der Betriebsstrategie ist jedoch der verwendete Maschinentyp besonders ausschlaggebend, falls eine Maschine temporär nicht am Momentenfluss beteiligt ist. Da vor allem PSM drehzahlabhängige Leerlaufverluste bei Nullmoment von mehreren Kilowatt aufweisen können, kann ein Mischverbau von ASM und PSM oder aber auch die Verwendung von Kupplungen zur temporär mechanischen Abkoppelung einer Achse sinnvoll sein. Durch diese Möglichkeiten zur Verbrauchssenkung kann bei einer Längsverteilung der installierten Leistung eine hohe Effizienz des elektrischen Antriebs sowohl im motorischen als auch generatorischen Betrieb erzielt werden. Hierdurch ist ein Verbrauchsvorteil im Vergleich zum Zentralantrieb zu erwarten.

Bei einer Kombination aus Längs- und Querverteilung der installierten Leistung (Abbildung 3.2(e) und Abbildung 3.2(f)) sinkt baugrößenbedingt das Wirkungsgradniveau der einzelnen Maschinen stark. Hierdurch ist ein signifikant höherer Energieverbrauch im Vergleich zu einer Zentral-Topologie zu erwarten.

² Aktive Giermomentenerzeugung durch radselektive Drehmomentenvorgabe zur Verbesserung der Fahrdynamik

Zusammenfassend ergeben sich in Abhängigkeit der Antriebstopologie folgende verbrauchsbeeinflussende Faktoren, welche wesentlich durch die Wachstumsgesetze elektrischer Maschinen nach Abschnitt 2.1 bestimmt sind:

- Wirkungsgrad der Maschine in Abhängigkeit ihrer Baugröße und Leistung
- Auslastung der Maschine im Fahrbetrieb
- Leerlaufverluste in Abhängigkeit des Maschinentyps und der Betriebsstrategie
- Rekuperationspotential durch Anordnung der Maschinen an Vorder- und Hinterachse
- Fahrzeugmasse bedingt durch Gewicht des gesamten elektrischen Antriebssystems (elektrische Maschine, Leistungselektronik, Getriebe)

3.1.5. Simulative Evaluierung des Verbrauchseinflusses der Antriebstopologie am Beispiel eines Sportwagens

Um den Verbrauchseinfluss der verschiedenen Antriebstopologien zu quantifizieren und die im vorherigen Abschnitt aufgestellten Thesen zu untersuchen, wird eine Längsdynamiksimulation unter Einsatz des Simulationswerkzeugs AVL Cruise[©] verwendet. Eine detaillierte Beschreibung der Simulationsumgebung zur Ermittlung der Fahrleistungs- und Verbrauchswerte erfolgt in Abschnitt 6.1.1.

Als zu untersuchende Topologie werden ein Zentralantrieb (Top I), ein Zentralantrieb mit 2-Gang Getriebe (Top II), eine Querverteilung der Leistung mit zwei radindividuellen Antrieben (Top III), eine Längsverteilung der Leistung mit zwei Achsantrieben (Top IV) sowie ein radindividueller Antrieb aller Räder (Top V) gemäß Abbildung 3.2 betrachtet. Zur Untersuchung wird ein sportwagentypisches Basisfahrzeug gewählt, da in Abschnitt 3.1.3 gezeigt werden konnte, dass sich gerade in diesem Fahrzeugsegment auch ein Mehrmotorenkonzept aus Performance- und Packagesicht eignet.

Um eine faire Vergleichbarkeit zu gewährleisten, müssen die zu erzielenden Fahrleistungen aller Varianten für eine Konzeptbewertung hinsichtlich des Energieverbrauchs konstant gehalten werden. Daher wird für die elektrischen Maschinen und Getriebe jeweils ein Basiskennfeld herangezogen, welches konzeptabhängig skaliert wird. Abbildung 3.3 zeigt das iterative Vorgehen zur fahrleistungsneutralen Auslegung der verschiedenen Antriebstopologien.

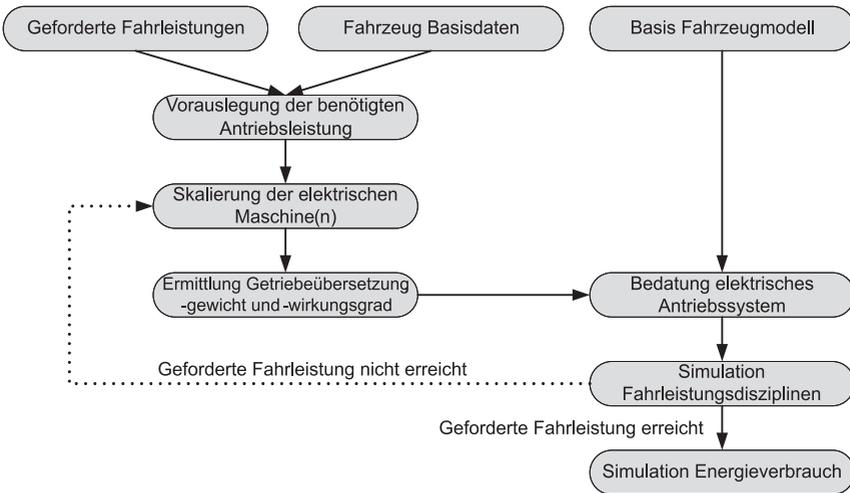


Abb. 3.3.: Fahrleistungsneutrale Auslegung zur energetischen Topologie-Bewertung, in Anlehnung an [32]

Als relevante Fahrleistungsdisziplinen zur Bewertung der Performance werden die folgenden Kennwerte gewählt:

- Beschleunigung $0 - 50 \frac{km}{h}$
- Beschleunigung $0 - 100 \frac{km}{h}$
- Durchzugsvermögen $80 - 120 \frac{km}{h}$
- Höchstgeschwindigkeit

Die zur Erreichung der geforderten Fahrleistung benötigte Gesamtleistung kann in einem ersten Schritt approximativ abgeschätzt werden. Die Antriebssträn-

ge respektive die elektrischen Maschinen und Getriebe werden dann entsprechend Abschnitt 2.1.2 und 2.1.3 hinsichtlich Leistung, Drehmoment-Drehzahl-Wirkungsgrad, Gewicht sowie Trägheitsmoment skaliert. Dies wird in einem iterativen Prozess so lange vollzogen, bis die geforderte Fahrleistung erreicht wird. Da sich gemäß Abschnitt 3.1.2 für Sportwagen permanenterrege Synchronmaschinen besonders eignen, wird dieser Maschinentyp für die Skalierung zugrunde gelegt. Das Basisfahrzeug eines Sportwagens wird für die Untersuchungen durch die in Tabelle 3.3 aufgeführten Fahrzeugdaten beschrieben.

Tab. 3.3.: Modellparameter des Basis-Fahrzeugmodells

| Merkmal | Wert | Einheit |
|--|-------------|-------------------|
| Dynamischer Reifenhalmmesser | 0.3 | [m] |
| Gewicht Fahrzeug ohne Triebstrang und Batterie | 1050 | [kg] |
| Gewicht Batterie | 360 | [kg] |
| Rollwiderstandsbeiwert | 0.011 | [-] |
| Luftwiderstandsbeiwert | 0.32 | [-] |
| Querschnittsfläche | 1.99 | [m ²] |

Tabelle 3.4 stellt die Parameter der topologieabhängigen skalierten Antriebssysteme dar. Die Gewichtsangaben beziehen sich auf das gesamte Antriebssystem, bestehend aus elektrische(n) Maschine(n), Leistungselektronik, Getriebe und weiteren am Leistungsfluss beteiligten mechanischen Komponenten.

Mit der Anzahl der elektrischen Maschinen steigt auch das Systemgewicht. Top II ist aufgrund der geringsten benötigten Leistung auch am leichtesten. Durch den Einsatz eines 2-Gang Getriebes kann zur Erreichung der geforderten Fahrleistung die Systemleistung reduziert werden. Die Übersetzung des zweiten Gangs ist hierbei auf die geforderte Höchstgeschwindigkeit ausgelegt. Dadurch ist aufgrund der größeren Übersetzung des ersten Gangs ein erhöhtes Zugkraftangebot gegeben. Top III und Top IV weisen identische Systemleistungen auf,

Top III benötigt jedoch kein Differential zum Drehzahlausgleich und ist aus diesem Grund leichter. Top V ist aufgrund der insgesamt 4 Maschinen, Inverter und Getriebe am schwersten und benötigt daher auch am meisten Leistung, um die geforderten Fahrleistungen zu erreichen.

Tab. 3.4.: Parameter der skalierten Antriebssysteme in Abhängigkeit der Topologie

| | Top I | Top II | Top III | Top IV | Top V |
|------------------|-------|--------|---------|--------|-------|
| Anzahl Maschinen | 1 | 1 | 2 | 2 | 4 |
| Gewicht [kg] | 222 | 198 | 253 | 267 | 338 |
| Leistung [kW] | 218 | 153 | 222 | 222 | 236 |
| Antriebsart | RWD | RWD | RWD | AWD | AWD |

Die Quantifizierung hinsichtlich des Energieverbrauchs wird sowohl für den synthetischen NEFZ-Zyklus als auch für den dynamischeren FTP75-Zyklus und die Stuttgartrunde als reales Fahrprofil durchgeführt, um auch den Einfluss unterschiedlicher Lastprofile evaluieren zu können. Bei der Stuttgartrunde handelt sich entgegen des NEFZ und FTP75-Zyklus nicht um ein offizielles Fahrprofil zur Fahrzeugtypisierung sondern um ein reales aus Messdaten entstammendes Fahrprofil, welches im Vergleich zu NEFZ und FTP75-Zyklus wesentlich dynamischer ist. Eine detaillierte Charakterisierung der für diese Untersuchung herangezogenen Fahrzyklen ist in Abschnitt 6.5 dargestellt. Die Geschwindigkeitsprofile sind dem Anhang C zu entnehmen. Bei 2WD-Varianten wird aufgrund der sportwagentypischen Ausprägung ein Heckantrieb angenommen. Hinsichtlich der Rekuperation wird davon ausgegangen, dass Verzögerungen von bis zu $a_x = -1 \frac{m}{s^2}$ rein über die Hinterachse aufgebracht werden können. Erst bei Verzögerungen von $a_x < -1 \frac{m}{s^2}$ wird auf eine feste Bremskraftverteilung gewechselt, um instabile Fahrzustände zu vermeiden. Übersteigt die Bremskraftanforderung das Leistungsvermögen des elektrischen Antriebssystems, wird mechanisch gemäß der festen Bremskraftverteilung zugebremst. Bei

4WD Topologien wird für den motorischen Betrieb zunächst von einer 50 : 50 Drehmomentenverteilung ausgegangen.

Abbildung 3.4 zeigt die Ergebnisse der Energieverbrauchssimulation. Dargestellt sind jeweils der resultierende Energieverbrauch und der Anteil an Rekuperationsenergie. Die prozentuale Darstellung bezieht sich auf den resultierenden Zyklusverbrauch der Top I im NEFZ.

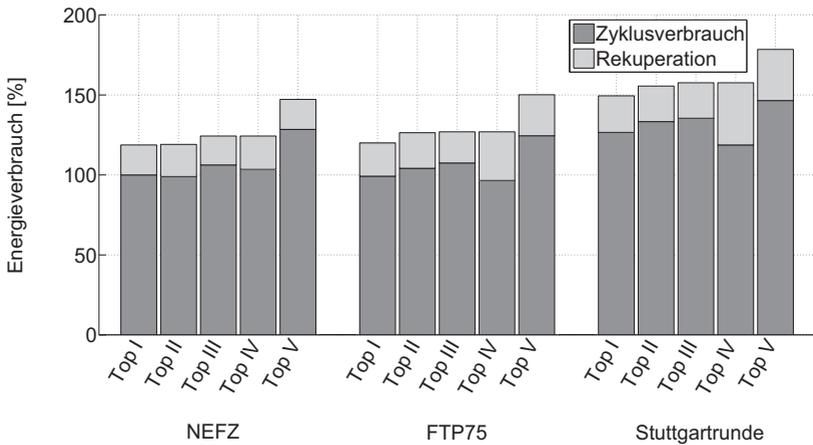


Abb. 3.4.: Energieverbrauch der Antriebstopologien in den untersuchten Zyklen

Die Energieverbräuche im NEFZ und im FTP75-Zyklus fallen aufgrund der moderaten Lastanforderung der Zyklen ähnlich aus, die der Stuttgartrunde sind aufgrund der höheren Dynamikanforderung insgesamt auf einem höheren Niveau. Auffällig ist, dass Top V in allen Zyklen mit Abstand den höchsten Energieverbrauch aufweist. Weiterhin zeigen die Allradtopologien (Top IV und V) mit steigender Dynamik im FTP75 und der Stuttgartrunde ein höheres Rekuperationspotential im Vergleich zu 2WD-Topologien (Top I, Top II und Top III). Tabelle 3.5 zeigt im Detail die prozentualen Mehr- bzw. Minderverbräuche in Bezug auf Top I, sowie den rekuperierten Energieanteil und den durchschnittlichen Antriebsstrang-Wirkungsgrad $\bar{\eta}_{ges}$ (Maschine, Leistungselektronik, Ge-

triebe und Differential) für die untersuchten Zyklen, um die Ursachen der topologiebedingten Energieverbräuche zu analysieren. Top I dient in Bezug auf den Energieverbrauch als Basis.

Tab. 3.5.: Ergebnisse der Verbrauchssimulation für unterschiedliche Zyklen

| Zyklus | | Top I | Top II | Top III | Top IV | Top V |
|-----------------|--|-------|--------|---------|--------|-------|
| NEFZ | Δ Verbrauch [%] | Basis | -1.0 | 6.3 | 3.5 | 28.5 |
| | Rekuperation [$\frac{\text{Wh}}{\text{km}}$] | 27 | 29 | 26 | 29.8 | 27 |
| | $\bar{\eta}_{ges}$ [%] | 65.7 | 72.1 | 63.8 | 62.7 | 55 |
| FTP75 | Δ Verbrauch [%] | Basis | 5.0 | 8.3 | -2.7 | 25.5 |
| | Rekuperation [$\frac{\text{Wh}}{\text{km}}$] | 30 | 30 | 28 | 43.5 | 36.9 |
| | $\bar{\eta}_{ges}$ [%] | 69.5 | 68.9 | 67.9 | 67.4 | 61.7 |
| Stuttgart-Runde | Δ Verbrauch [%] | Basis | 5.3 | 7.0 | -6.2 | 15.7 |
| | Rekuperation [$\frac{\text{Wh}}{\text{km}}$] | 32.9 | 35 | 32 | 53 | 46 |
| | $\bar{\eta}_{ges}$ [%] | 70.5 | 69.9 | 69.7 | 69.3 | 61.7 |

Das 2-Gang Getriebe (Top II) weist im NEFZ-Zyklus ein geringes Potential zur Reduzierung des Energiebedarfs im Vergleich zum Zentralantrieb auf. Die elektrische Maschine wird durch die Möglichkeit der zwei Getriebeübersetzungen über den Zyklus hindurch in besseren Wirkungsgradbereichen betrieben. Hierdurch kann auch das Rekuperationspotential leicht gesteigert werden, da die elektrische Maschine mit höherem Wirkungsgrad in motorischen sowie generatorischen Phasen betrieben wird. Somit entstehen insgesamt weniger Verluste an der elektrischen Maschine. Mit steigender Dynamik im FTP75 und der Stuttgartrunde kann jedoch kein Verbrauchsvorteil erzielt werden, da durch höhere Dynamikanforderung auch erhöhte Getriebeverluste die bessere Maschinenauslastung überwiegen. Der Antriebsstrang-Wirkungsgrad verschlechtert sich entsprechend. Zudem kann bedingt durch den Heckantrieb nicht das volle Rekuperationspotential im Vergleich zu einer 4WD-Variante ausgeschöpft werden.

Eine Querverteilung der Systemleistung (Top III) erweist sich in allen Zyklen als verbrauchssteigernd. Ursache hierfür ist, dass die beiden Maschinen baugrößenbedingt einen schlechteren Wirkungsgrad aufgrund der geringeren Einzelleistung besitzen. Dies spiegelt sich im durchschnittlichen Antriebsstrang-Wirkungsgrad wieder. Ein weiterer Grund ist das geminderte Rekuperationspotential über die Hinterachse, welches im dynamischeren FTP75-Zyklus und in der Stuttgartrunde deutlich wird.

Der rein motorische Energieverbrauch bei Top IV verhält sich aufgrund der 50 : 50 Drehmomentenverteilung analog Top III (siehe Abbildung 3.4). Jedoch besteht aufgrund der Möglichkeit der Rekuperation über die Vorderachse ein erhöhtes Rekuperationspotential, welches sich auf den Energieverbrauch mit steigender Dynamik vor allem im FTP75-Zyklus und der Stuttgartrunde positiv auswirkt. In Bezug auf den Wirkungsgrad ist dieser im Vergleich zu Top III geringer, da sowohl an Vorder- als auch Hinterachse ein Differential benötigt wird, welches bei Top III durch die radindividuelle Ansteuerung entfällt. Somit ist die Wirkungsgradkette bei Top IV durch das Differential länger.

Top V weist den höchsten Verbrauch auf, da der baugrößenbedingte Maschinenwirkungsgrad aufgrund der vier Maschinen mit niedriger Einzelleistung gering ausfällt und somit hohe Verluste im Antriebsstrang insbesondere an den elektrischen Maschinen entstehen. Daher fällt auch das Rekuperationspotential im Vergleich zu Topologie Top IV geringer aus.

Die Absolutwerte zur Verbrauchsquantifizierung können je nach geforderten Fahrleistungen, verwendeter Maschinen, betrachtetem Basisfahrzeug sowie des Fahrzyklus quantitativ unterschiedlich ausfallen. Es können jedoch die qualitativen Aussagen gemäß Abschnitt 3.1.4 verifiziert werden. Top IV mit einem achsindividuellen Antriebssystem erweist sich hierbei hinsichtlich des Energieverbrauchs als das beste Konzept.

3.2. Energieflussanalyse

3.2.1. Energieflüsse des Antriebssystems

Um den Energiebedarf des Antriebssystems näher zu analysieren, wird eine Energieflussanalyse durchgeführt. Da gezeigt werden konnte, dass ein achsindividueller Antrieb (Top IV) besonders in dynamischen Realfahrzyklen energetisch das günstigste Konzept darstellt, wird diese Topologie für eine detaillierte Energieflussanalyse zu Grunde gelegt. Abbildung 3.5 stellt die im NEFZ auftretenden Verluste unter den Annahmen einer konstanten 50 : 50 Allradverteilung und fester Bremskraftverteilung dar (analog Abschnitt 3.1.5). Die Ergebnisse für FTP75 nach Abbildung A.1 und Stuttgartrunde gemäß Abbildung A.2 können dem Anhang A entnommen werden.

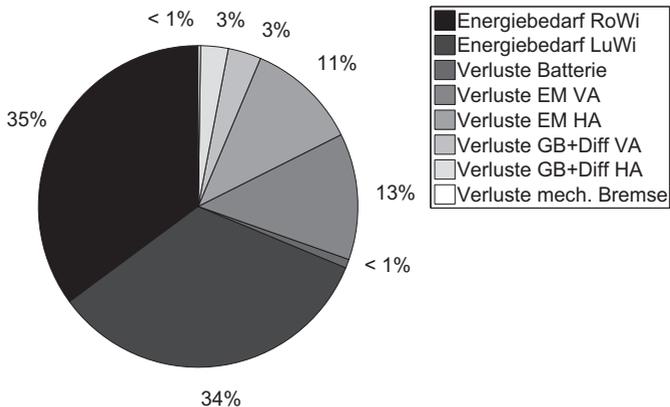


Abb. 3.5.: Verluste des Antriebssystems für Top IV im NEFZ

Es ist ersichtlich, dass zyklusabhängig 61% – 65% der Verluste, also rund zwei Drittel, zur Überwindung der Fahrwiderstände in Form des Roll- (RoWi) und Luftwiderstandes (LuWi) aufgebracht werden müssen. Diese sind durch die fahrzeugspezifische Größen durch Rollwiderstandsbeiwert, Masse, Luftwider-

standsbeiwert sowie Querschnittsfläche gegeben. Der Anteil zur Überwindung der Fahrzeugträgheit ($m a_x$) kann beim Elektrofahrzeug durch Rekuperation teilweise zurückgewonnen werden und tritt somit über die Wirkungsgradkette in Form von Komponentenverlusten auf. Beim konventionellen Fahrzeug würde sich dieser Anteil allein in den mechanischen Bremsverlusten widerspiegeln. Das verbleibende Drittel des Energiebedarfs entfällt auf Verluste an Batterie, elektrischen Maschinen an Vorder- (EM VA) und Hinterachse (EM HA), Getriebe (GB) und Differential (Diff) sowie der mechanischen Bremse. Diese komponentenspezifischen Verluste können durch eine geeignete Betriebsstrategie reduziert werden. Dies senkt den Energieverbrauch und erhöht die Reichweite in gleichem Maße. Die Batterieverluste fallen in allen Zyklen verhältnismäßig gering aus und wachsen mit der Dynamikanforderung in der Stuttgartrunde aufgrund des quadratischen Zusammenhangs mit den Batterieströmen nach Abschnitt 2.1.1 überproportional an. Zudem steigt der Anteil der Verluste bedingt durch die mechanische Bremse, da hier durch eine feste Bremskraftverteilung bei hohen Verzögerungen teilweise mechanisch zugebremst werden muss. Der überwiegende Teil der Verluste entfällt auf die elektrischen Maschinen und Getriebe bedingt durch die last- und drehzahlabhängigen Wirkungsgrade dieser Komponenten.

3.2.2. Funktionen zur Energieverbrauchsreduzierung des Antriebssystems

Es können aufgrund der Energieflussanalysen für die Entwicklung einer energieverbrauchsorientierten Betriebsstrategie drei Potentiale identifiziert werden:

1. Drehmomentenverteilung zwischen Vorder- und Hinterachse in motorischen Phasen zur Minimierung der Verluste im Triebstrang
2. Bremskraftverteilung zur Minimierung der mechanischen Bremsverluste
3. Reduzierung von Leistungsspitzen zur Minimierung der Batterieverluste

Diese betriebsstrategieseitigen Möglichkeiten zur Energieverbrauchsreduzierung werden im Folgenden näher ausgeführt:

Verbrauchsoptimierte Drehmomentenverteilung

Zur Energieverbrauchsoptimierung kann bei Allradantrieben, insbesondere bei Top IV, eine Effizienzsteigerung durch eine bedarfsgerechte Drehmomentenverteilung vorgenommen werden. In den Arbeiten [39] und [32] wird zu diesem Zweck eine rein heuristische Strategie umgesetzt, wobei bei geringer Leistungsanforderung dieser Bedarf lediglich über eine Achsmaschine aufgebracht wird. Aufgrund der dynamischen Achslastverteilung erfolgt dies vornehmlich über die Hinterachse. Somit wird die Maschine der Hinterachse besser ausgelastet und die Verluste können minimiert werden. Jedoch treten bei dieser Betriebsstrategie vor allem bei PSM drehzahlabhängig hohe Leerlaufverluste an der momentenfreien Maschine auf (siehe Abbildung 2.2(b)). Aus diesem Grund wird insbesondere für PSM eine mechanische Kupplung zum bedarfsgerechten Abkoppeln der Maschine vorgeschlagen. Durch diese heuristische Strategie wird in [32] eine Energieverbrauchersparnis im NEFZ von über 3% im Vergleich zu einer 50 : 50-Verteilung ausgewiesen.

In [104] wird ein analytisches Optimierungsverfahren auf Basis der Verlustleistungen der elektrischen Maschinen dargestellt und hieraus eine heuristische Verteilungsstrategie abgeleitet. Es wird für den NEFZ-Zyklus ein Potential von 4% im Vergleich zu einer 50 : 50-Verteilung ausgewiesen.

In [48] wird ein online-fähiges, rein analytisches Verfahren auf Basis der Verlustleistungen der elektrischen Maschinen sowie der Getriebe dargestellt. Es kann hierdurch ein Einsparpotential in Bezug auf den Energiebedarf von 5.5 % im NEFZ beziffert werden.

In dieser Arbeit soll eine verlustleistungsoptimale Drehmomentenkoordination als Online-Verfahren dargestellt werden, da gemäß der dargestellten Literaturwerte für dieses Verfahren das größte Optimierungspotential erwartet werden

kann. Hierbei soll die gesamte Wirkungsgradkette bestehend aus elektrischen Maschinen, Getriebe sowie der Räder für eine analytische Optimierung betrachtet werden. Der detaillierten funktionalen Umsetzung widmet sich Abschnitt 5.2.2.

Bremskraftverteilung zur Minimierung der mechanischen Bremsverluste

Die Bremskraftverteilung ist aus sicherheitstechnischer Sicht so zu realisieren, dass die Vorderachse vor der Hinterachse die Rutschgrenze erreicht, um einen stabilen Fahrzustand beim Verzögern zu gewährleisten. Abbildung 3.6 zeigt ein Bremskraftverteilungsdiagramm mit zwei möglichen Verteilungsstrategien.

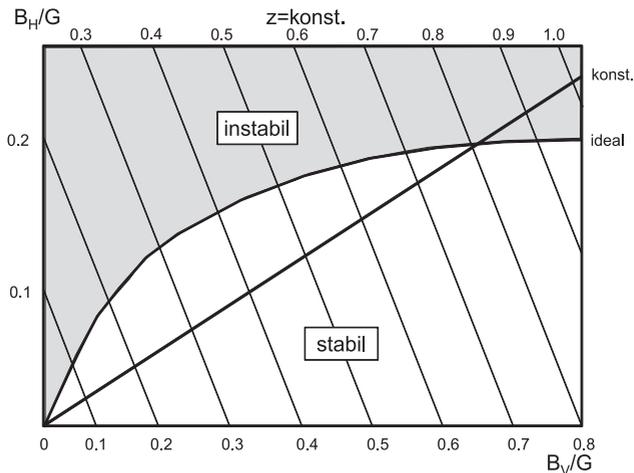


Abb. 3.6.: Bremskraftverteilungsdiagramm nach [31]

In der Regel entspricht die im Fahrzeug installierte Bremskraftverteilung nicht der idealen Verteilung, da hierfür eine reibwertabhängige Regelung von Nöten ist. Daher wird eine robuste und konstante Verteilung installiert [31].

Bei Elektrofahrzeugen wird aus energetischer Sicht versucht, eine Verzögerung soweit möglich rein mittels der elektrischen Maschine(n) durch generatorischen

Betrieb darzustellen. Die Bremskraftverteilung und das installierte Bremssystem besitzen somit einen nicht unerheblichen Einfluss auf das Rekuperationspotential und somit den Energieverbrauch des Fahrzeugs [35], [43].

Bei einer konstanten Bremskraftverteilung erreicht bei der untersuchten achsindividuellen Topologie (Top IV) zuerst die Vorderachsmaschine das stellbare Maximalmoment, wodurch bei hohen Verzögerungsanforderung hydromechanisch zugebremst werden muss. Nach Abbildung 3.6 könnte jedoch bei idealer Verteilung ein zusätzliches generatorisches Moment über die Hinterachse aufgebracht werden.

Da jedoch durch die Energieflussanalyse unter Annahme einer konstanten Bremskraftverteilung (siehe Abbildung 3.5, Abbildung A.1, Abbildung A.2) gezeigt werden konnte, dass die Verluste durch mechanische Brems Eingriffe gering ausfallen, wird der Ansatz einer idealen Verteilung nicht weiter verfolgt, sondern eine konstante Bremskraftverteilung umgesetzt, welche bereits topologiebedingt für (Top IV) ein hohes Rekuperationspotential ermöglicht. Die funktionale Umsetzung erfolgt in Abschnitt 5.2.2.

Reduzierung von Leistungsspitzen zur Minimierung der Batterieverluste

Batterieverluste weisen nach Abschnitt 2.1.1 eine quadratische Abhängigkeit zum Klemmenstrom der Batterie auf, welcher proportional zur abgeforderten Leistung ist. Eine Reduzierung von Leistungsspitzen des Hochvolt-Systems kann die daraus resultierenden Batterieverluste reduzieren und somit die Effizienz des Gesamtsystems erhöhen, wodurch ein Reichweitenpotential erzielt werden kann.

Der Ansatz zur Reduzierung dieser Batterieverluste beruht auf einer Leistungsanhebung von Nebenverbrauchern in generatorischen Phasen. Die in Bremsphasen generierte Leistung kann innerhalb des Gleichstromzwischenkreises direkt den Verbrauchern ohne eine Zwischenspeicherung in der Batterie zur Verfügung gestellt werden. Somit treten keine Ein- und Ausspeiseverluste an der Batterie auf. In der darauf folgenden motorischen Phase kann dann die Leistung der

Nebenverbraucher um den gleichen Betrag abgesenkt werden, ohne eine Komforteinbuße zu generieren. Hierbei wird die Klemmenleistung respektive die Batterieverluste auch in motorischen Phasen durch die Absenkung des Klemmenstroms reduziert und insgesamt geglättet.

Diese Funktion zur lastsynchrone Klimaregelung soll mit Hilfe eines entsprechenden Energiemanagement-Ansatzes, welcher in der Lage ist, relevante Nebenverbraucher ansteuern zu können, funktional umgesetzt werden. Der funktionalen Umsetzung widmet sich Abschnitt 5.1.3.

3.2.3. Energieflüsse im Gesamtfahrzeugkontext in Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen

Neben dem Antriebssystem müssen sämtliche Nebenverbraucher, insbesondere die Klimatisierung der Fahrzeuggabine, energetisch durch die Batterie versorgt werden. Es entsteht ein Energiebedarf, welcher für eine ganzheitliche Analyse im Folgenden näher betrachtet werden soll. Dieser muss zusätzlich zum Energiebedarf des Antriebssystems zur Erfüllung der Komfortansprüche und zur Versorgung von Fahrfunktionen aufgewendet werden. Hierdurch kann die Reichweite in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen stark reduziert werden. Da beim Elektrofahrzeug aufgrund der hohen Wirkungsgrade im Antriebssystem nur geringfügig nutzbare Abwärme anfällt, muss im Vergleich zum konventionellen Fahrzeug nicht nur zusätzliche Energie zum Kühlen, sondern insbesondere auch zum Heizen aufgewendet werden.

Als relevante Einflussparameter auf den Energieverbrauch zur Innenraumklimatisierung sind Außentemperatur, Luftfeuchte und Sonneneinstrahlung zu nennen. Da eine Vielzahl möglicher Kombinationen dieser drei Parameter im Realbetrieb auftreten kann, können Sonnenintensität und Luftfeuchte gemäß [54] statistisch nach Auftretenswahrscheinlichkeit der Umgebungstemperatur in Abhängigkeit der zu untersuchenden Klimazone zugeordnet werden. Eine Quantifizierung des Energieverbrauchs- bzw. des Reichweiteneinflusses kann, wie in [51] und [32] nachgewiesen, mittels einer analytischen Bilanzierung der auf-

tretenden Wärmeströme des Fahrzeuginnenraums vorgenommen werden. Für diesen Zweck wird im Folgenden zur Indikation des energetischen Klimatisierungsbedarfs zunächst eine rein analytische Abschätzung des Kühl- und Heizleistungsbedarfs im stationären Zustand durchgeführt. Instationäre Vorgänge können mittels dieses analytischen Vorgehens jedoch nicht berücksichtigt werden.

Die Wärmebilanz ergibt sich nach [38] gemäß der Gleichungen [3.1]-[3.4] für den winterlichen Heizbetrieb nach Abbildung 3.7:

$$\dot{Q}_{zu} = \dot{Q}_{Karosserie} + \dot{Q}_{Abluft} + \dot{Q}_{Interieur} - \dot{Q}_{trans} \quad [3.1]$$

Mit

$$\dot{Q}_{Karosserie} = k_{kr}A(T_i - T) = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{\frac{1}{\alpha_{i,i}} + \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{a,i}}} (T_i - T) \quad [3.2]$$

$$\dot{Q}_{Abluft} = \dot{m}_{zu}c_p(T_{ab} - T) \quad [3.3]$$

$$\dot{Q}_{trans} = \sum_{i=1}^n A_i \tau_{trans,i} \dot{q}_{some} \quad [3.4]$$

Für stationäre Betrachtungen gilt:

$$\dot{Q}_{Interieur} = \frac{\partial(\Delta T)}{\partial t} \sum_{i=1}^n m_i c_{p,i} = 0 \quad [3.5]$$

Dabei bedeuten:

T_i : Mittlere Innenraumtemperatur

T : Außentemperatur

$k_{kr}A$: Wärmedurchgang der Karosserie inklusive Verglasung

\dot{m}_{zu} : Luftmassenstrom

c_p : Spezifische Wärmekapazität

$\alpha_{i,a}$: Wärmeübergangskoeffizient innen bzw. außen

λ : Wärmedurchgangskoeffizient

Mit Hilfe der dargestellten analytischen Formulierung der Wärmeströme kann der Kühl- und Heizleistungsbedarf in Abhängigkeit von Außentemperatur, Sonnenintensität und Luftfeuchte zumindest für den stationären, thermodynamisch eingeschwungenen Zustand für eine Voruntersuchung abgeschätzt werden. Das Fahrzeug wird hierbei als vorkonditioniert angenommen. Niedervolt-Bordnetzverbraucher wie beispielsweise elektrische Lenkung, Kühlerlüfter etc. werden aus Messungen als zusätzlicher Leistungsbedarf in eine gesamtheitliche Energieflussanalyse aufgenommen.

Abbildung 3.8 und die Abbildungen A.3 und A.4 im Anhang A zeigen eine nach dem dargestellten analytisch stationären Verfahren durchgeführte Energieflussanalyse für die Fahrzyklen des NEFZ, FTP75 und der Stuttgartrunde. Das Fahrprofil wird somit unter Variation von realen Randbedingungen energetisch betrachtet. Der zu untersuchenden Außentemperatur werden statistische Werte für Sonnenintensität und Luftfeuchte nach [51] exemplarisch für die Klimazone West-Europa zugeordnet. In dieser Darstellung beziehen sich 100% Reichweite rein auf den benötigten Energiebedarf für das Antriebssystem unter Normbedingungen. Im NEFZ und dem FTP75-Zyklus treten temperaturabhängige Reichweiteneinbußen von über 60% auf. Gründe dafür sind eine geringe Durchschnittsgeschwindigkeit und zyklusbedingt lange Standphasen. Der Anteil des Bordnetzbedarfs fällt im Vergleich zum Kühlen und Heizen eher gering aus. Dieser beträgt ungefähr 10%, nimmt jedoch bei hohen Außentemperaturen leicht zu, da der Leistungsbedarf der Kühlerlüfter bei Temperaturen größer 20°C zunimmt. Auffällig ist im Temperaturbereich zwischen 5°C und 20°C sowohl ein Anteil für Kühlen als auch Heizen. Innerhalb dieses Temperaturbereichs wird die Ansaugluft zunächst mittels Klimakompressor abgekühlt und entfeuchtet, um sie anschließend auf Zieltemperatur aufzuheizen. Dies wird als Re-Heat-Betrieb bezeichnet (vgl. Abschnitt 2.2.1). In der dynamischeren Stuttgartrunde treten nach Abbildung A.4 Reichweiteneinbußen von bis zu maximal 40% im Heizbetrieb auf. Da die Durchschnittsgeschwindigkeit im Vergleich

zum NEFZ höher ausfällt, ist der Anteil der Nebenverbraucher in Bezug auf den Gesamtenergieverbrauch geringer.

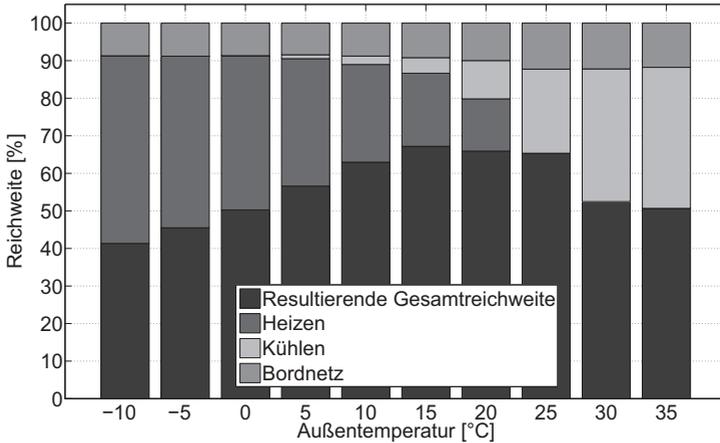


Abb. 3.8.: Reichweitenreduktion durch Nebenverbraucher bei stationärer Betrachtung im NEFZ in Abhängigkeit der Außentemperatur für die Klimazone West-Europa

3.3. Schlussfolgerungen der Energieflussanalysen

Es konnte gezeigt werden, dass in Abhängigkeit des Fahrzeugsegments bei Elektrofahrzeugen unterschiedliche Anforderungen an spezifische Zielgrößen im Entwicklungsprozess bestehen. Gerade für die Gestaltung des Antriebskonzepts sind diese Zielgrößen für eine anforderungsgerechte Entwicklung von entscheidender Bedeutung. Hieraus ergeben sich fahrzeugsegmentabhängige Restriktionen sowohl für die Maschinenauswahl als auch für die Antriebstopologie. Eine Methodik zur Auswahl und Bewertung der funktionalen Konzepte wurde vorgestellt.

Ferner wurde der Einfluss der Antriebstopologie auf die Effizienz und den Energieverbrauch für unterschiedliche Zyklen diskutiert und simulativ untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass sich insbesondere bei leistungsstärkeren Fahr-

zeugen ein achsindividuelles Mehrmotorenkonzept mit permanenterregten Synchronmaschinen und mindestens einer Kupplung (Top IV) aus energetischer Sicht als vorteilhaft erweist.

Mittels einer Energieflussanalyse des ausgewählten Antriebssystems konnten Funktionen für eine energieoptimale Betriebsstrategie identifiziert werden. Dies sind zum einen eine wirkungsgradoptimierte Drehmomentenverteilung in motorischen Phasen und zum anderen eine Bremskraftverteilung zur Ausschöpfung des Rekuperationspotentials. Darüber hinaus können durch eine lastsynchrone Nebenverbrauchersteuerung Batterieverluste verringert werden.

Hinsichtlich des Gesamt-Energieverbrauchs weisen Komfortnebenverbraucher einen erheblichen Anteil auf, wie in einer Energieflussanalyse aus Gesamtfahrzeugsicht gezeigt werden konnte. Insbesondere das Klimatisierungssystem konnte als relevanter Verbraucher identifiziert werden. Dieses kann je nach Umgebungsbedingungen und Fahrprofil die Reichweite des Fahrzeugs um über die Hälfte reduzieren.

Diese Erkenntnisse ermöglichen einen anforderungsgerechten Entwurf einer innovativen Funktionsarchitektur zur Betriebsstrategievorgabe aus Gesamtfahrzeugsicht. Hierbei wird ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt, welcher die Nebenverbraucher aufgrund der hohen Sensitivität bezüglich der Reichweite mit berücksichtigt. Ziel dieser ganzheitlichen Betriebsstrategie muss es sein, die Reichweite des Fahrzeugs im Alltagsgebrauch bedarfsgerecht zu erhöhen, um so die Verfügbarkeit des Elektrofahrzeugs zu steigern. Dies kann jedoch im Speziellen bedeuten, dass Verbraucher wie das Antriebs- oder auch das Klimatisierungssystem zur Erreichung eines konkreten Fahrziels in ihrer Leistung temporär reduziert werden. Eine Degradierung dieser Systemleistungen hat direkten Einfluss auf den Energieverbrauch respektive die erzielbare Reichweite, jedoch auch gleichzeitig auf die Dynamik- und Komfortverhältnisse des Fahrzeugs.

Abbildung 3.9 stellt die identifizierten Betriebsstrategie-Maßnahmen dar. Die einzelnen Funktionen stellen in ihrer Ausführung in Bezug auf die Aspekte

Fahrbarkeit und Fahrstabilität, insbesondere jedoch hinsichtlich der Zielgrößen Dynamik und Komfort einen Zielkonflikt dar. Diesen gilt es in geeigneter Form bedarfsgerecht zu entschärfen. Dem Entwurf der Betriebsstrategie und der damit verbundenen Funktionsarchitektur zur Betriebsstrategievorgabe widmet sich, aufbauend auf den erarbeiteten Erkenntnissen, das folgende Kapitel 4.

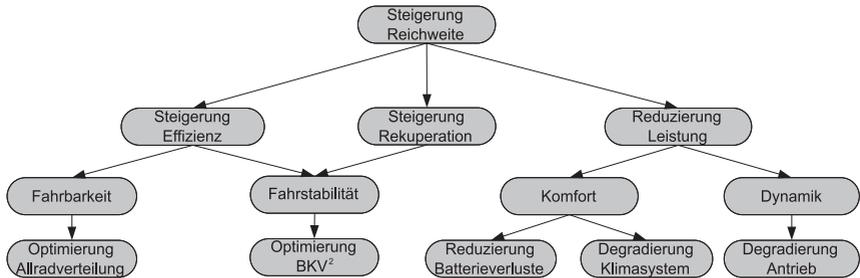


Abb. 3.9.: Übersicht identifizierter Betriebsstrategie-Maßnahmen zur Steigerung der Reichweite im Fahrbetrieb

² Bremskraftverteilung

4. Funktionsarchitektur zur Umsetzung einer Betriebsstrategie aus Gesamtfahrzeugsicht

Elektrofahrzeuge weisen im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen aufgrund der geringeren Reichweiten spezielle Anforderungen auf. Diese Anforderungen stellen die Grundlage für neuartige Funktionen im Gesamtfahrzeugkontext dar. Im Folgenden wird auf Basis dieser Anforderungen eine modulare Funktionsarchitektur für Elektrofahrzeuge beschrieben. Ziel dieser Funktionsarchitektur ist es zum einen, eine optimale Betriebsstrategie für das Gesamtfahrzeug vorgeben zu können. Zum anderen sollen neue Funktionalitäten zur Unterstützung des Fahrers vorgestellt werden, um den Zielkonflikt aus Reichweiten-, Dynamik- und Komfortwunsch situativ und streckenspezifisch entschärfen zu können. Hierbei kann temporär die Priorität zugunsten eines Reichweitenwunsches verlagert werden, indem Verbraucher wie das Antriebssystem oder Komfortnebenverbraucher temporär in ihrer Leistung reduziert werden. Grundlage der zu definierenden Anforderungen sind die im vorangegangenen Kapitel 3 vorgestellten Topologie-Untersuchungen und Energieflussanalysen.

Zunächst wird die Anforderungsdefinition für eine Funktionsarchitektur vorgestellt. Im Anschluss werden ein grober Systemaufbau und eine entsprechende Aufgabenverteilung dargelegt, welche aus der Anforderungsdefinition resultieren. Für eine detaillierte Beschreibung der Systemarchitektur wird dann ein geeigneter Energiemanagementansatz ausgewählt. Eine ausführliche Architekturbeschreibung der modularen Einzelfunktionalitäten schließt dieses Kapitel ab.

4.1. Anforderungen an die Betriebsstrategie für Elektrofahrzeuge

Auf Basis der vorgestellten Energieflussanalyse und der Identifizierung wesentlicher Einflussgrößen am Gesamtenergiebedarf gemäß Kapitel 3 können Anforderungen an eine innovative Funktionsarchitektur abgeleitet werden. Diese Anforderungen werden im Folgenden in nicht-funktionale und funktionale Anforderungen unterteilt. Nach Tabelle 4.1 sind folgende nicht-funktionale Anforderungen an eine Funktionsarchitektur für Elektrofahrzeuge gestellt.

Tab. 4.1.: Nicht-funktionale Anforderungen zur Betriebsstrategie-Vorgabe

| Nicht-funktionale Anforderung | Beschreibung |
|-------------------------------|---|
| Nr.1 Unabhängigkeit | Gegenüber fahrzeug-, system- und herstellerspezifischen Größen |
| Nr.2 Modularität | Bildung von Funktionsgruppen- und strukturen |
| Nr.3 Skalierbarkeit | Übertragbar auf verschiedene Fahrzeugkonzepte |
| Nr.4 Applizierbarkeit | Ausprägungsmöglichkeit der systemspezifischen Eingriffstiefe |
| Nr.5 Erweiterbarkeit | Muss auf weitere Komponenten ohne eine Änderung des Kernalgorithmus möglich sein |
| Nr.6 Kommunikationsfähigkeit | Die Kommunikation im Steuergeräteverbund muss den aktuellen Standards genügen. Als Basis muss eine CAN-Kommunikation dienen |
| Nr.7 Nachvollziehbarkeit | Das Systemverhalten muss für den Fahrer nachvollziehbar sein |
| Nr.8 Adaptionfähigkeit | Die Betriebsstrategie muss sich an im Fahrbetrieb ändernde Bedingungen adaptieren |
| Nr.9 Stabilität | Der Kernalgorithmus muss robust in allen Fahrsituationen voll funktionsfähig sein |

Darüber hinaus bestehen weitere funktionale Anforderungen an eine Funktionsarchitektur, welche in Tabelle 4.2 dargestellt sind.

Tab. 4.2.: Allgemeine funktionale Anforderungen zur Betriebsstrategie-Vorgabe

| Funktionale Anforderung | Beschreibung |
|---|--|
| Nr.10 Betriebsstrategievorgabe unter Berücksichtigung aller verbrauchsrelevanter Komponenten | Steuerung aller Energieflüsse im Gesamtfahrzeug |
| Nr.11 Autonome Entschärfung des Zielkonflikts bestehend aus Reichweiten-, Komfort- und Dynamikwunsch | Temporäre Verschiebung der Prioritäten durch Energiemanagement-Maßnahmen |
| Nr.12 Berücksichtigung des wahrnehmbaren Komforts und der Fahrzeugdynamik bei Reduzierung von Verbraucherleistungen | Priorisierung von Verbrauchern unter Berücksichtigung von applizierbaren Dynamik- und Komfortschwellen durch das Energiemanagement |
| Nr.13 Betriebsstrategievorgabe für das Antriebssystem | Dynamikwunsch des Fahrers in eine energieeffiziente Lastvorgabe für das Antriebssystem übersetzen |
| Nr.14 Vorgabe einer konfigurierbaren Fahrstrategie | Beachtung der Aspekte Fahrbarkeit, Energieeffizienz sowie Komfort |
| Nr.15 Energieoptimale Drehmomentenkoordination des Triebstrangs | Topologieabhängige Drehmomentenverteilung und Kupplungsansteuerung |
| Nr.16 Präzise Reichweitenberechnung als Steuergröße für Betriebsstrategie | Berücksichtigung von Antriebs- und Nebenverbraucherlasten im Berechnungsalgorithmus |
| Nr.17 Prädiktionsfähigkeit | Berücksichtigung von Streckendaten und historienbasierten Informationen zur Reichweitenberechnung |
| Nr.18 Online-Fähigkeit | Die verwendeten Algorithmen müssen hinsichtlich des Ressourcenbedarfs echtzeitfähig sein |

4.2. Aufbau und Aufgabenverteilung der modularen Funktionsarchitektur

Die Funktionsarchitektur wird modular aufgebaut und in folgende funktionale Hauptmodule unterteilt:

- Energiemanagement
- Antriebsmanagement
- Reichweitenermittlung

Abbildung 4.1 stellt schematisch den Aufbau der Funktionsarchitektur dar.

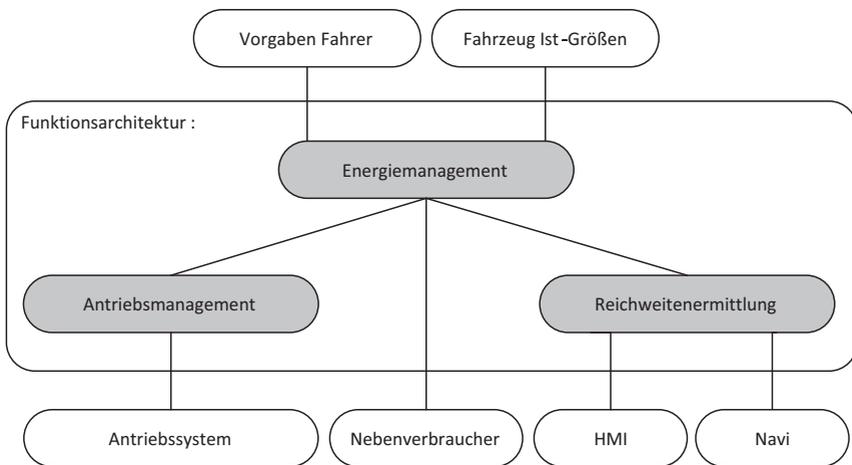


Abb. 4.1.: Hauptmodule innerhalb der Funktionsarchitektur

Das Energiemanagement hat die Aufgabe, sämtliche Energieflüsse im Fahrzeug zu kontrollieren und zu steuern, um den beschriebenen Zielkonflikt aus Reichweiten-, Dynamik- und Komfortwunsch entschärfen zu können und eine Priorisierung der Energieflüsse durchzuführen. Fahrerwunschvorgaben sowohl hinsichtlich Fahrzeugdynamik und Komfort werden hierzu vom Energiemanagement erfasst. Das Antriebsmanagement hat zur Aufgabe, die Fahrvorgaben des Fahrers in Form von Fahr- und Bremspedal in Sollvorgaben für das An-

triebssystem zu übersetzen. Insbesondere bei Antriebssystemen mit Mehrmotorenkonzept zählt hierzu die bedarfsgerechte Aufteilung des Fahrerwunschmoments auf mehrere elektrische Maschinen, wie in Abschnitt 3.2.2 gezeigt wurde. Die Reichweitenermittlung berechnet die aktuelle Restreichweite des Fahrzeugs. Hierzu werden prädiktive Streckeninformationen integriert, um eine möglichst hohe Prognosegüte zu gewährleisten. Hierzu ist eine Schnittstelle zum Navigationssystem zur Übermittlung der Streckeninformationen notwendig.

Die drei funktionalen Hauptmodule des Energie- und Antriebsmanagements sowie der Reichweitenermittlung müssen hierfür miteinander vernetzt sein, um einen eventuell bestehenden Zielkonflikt aus Reichweiten-, Dynamik- und Komfortwunsch bestmöglich ausbalancieren zu können. Um jedoch eine detailliertere Systemarchitektur entwickeln zu können (siehe Abschnitt 4.5), muss in einem weiteren Schritt zunächst ein geeigneter Energiemanagement-Ansatz ausgewählt werden. Dieser ist für die Interaktion der einzelnen Module von entscheidender Bedeutung, da in Abhängigkeit des Energiemanagement-Ansatzes die jeweiligen Verantwortlichkeiten unterschiedlich verteilt sind.

4.3. Energiemanagementansätze zur Betriebsstrategievorgabe

Das Energiemanagement stellt innerhalb der Funktionsarchitektur eine Instanz zur Kontrolle, Steuerung und Priorisierung der Energieflüsse im Gesamtfahrzeug dar. Hierbei können jedoch unterschiedliche Ansätze zur Umsetzung dieser Betriebsstrategievorgaben verfolgt werden.

Die im Folgenden vorgestellten Ansätze sind aus der Literatur bezüglich des elektrischen Energiemanagements für Niedervolt-Bordnetze bei konventionellen Fahrzeugen bekannt. Nach Erläuterung dieser Ansätze erfolgt eine generische Klassifizierung. Abschließend wird eine Bewertung hinsichtlich der Übertragbarkeit der dargestellten Ansätze durchgeführt. Ziel ist es im Rahmen dieser Arbeit, die System- und Steuergrenzen des Energiemanagements zu einem Gesamtfahrzeug-Ansatz zu erweitern.

4.3.1. Leistungsorientiertes Energiemanagement

In [94] und [81] werden Ansätze mit einer zentralen leistungsorientierten Verbrauchersteuerung und Entscheidungsfindung beschrieben. Kern des Systems ist eine steuernde übergeordnete Instanz, welche eine Auflistung, Kategorisierung und Priorisierung der Energieerzeuger, -speicher und -verbraucher in Bezug auf ihre Leistung enthält. Auf Basis dessen kann eine Priorisierung der Verbraucher zueinander festgelegt werden. Zur Interaktion melden sich die Nebenverbraucher mit ihrer Kategorie und Priorität beim Energiemanagement an und stellen eine Leistungsanforderung. Gemäß der Priorisierung gibt dieser zentrale Koordinator dann jeweilige Leistungsflüsse vor, nachdem eine Leistungsbilanzierung und -plausibilisierung im Koordinator erfolgt ist. Hierdurch ist eine Abstimmung des Leistungsbedarfs auf das aktuelle Leistungsangebot der Speicherkomponenten möglich.

Nach [94] besteht ein Energiemanagementsystem aus:

- Energiesystem
- Diagnosesystem
- Informationssystem

Die Leistungs- bzw. Energiebilanzen werden auf Basis des Systemverhaltens beurteilt. Als Klassifikation dient die energetische Funktion innerhalb des Energiesystems (Quelle, Senke, Speicher). Entscheidend für die Einteilung der Priorisierung sind zum einen der Einfluss der Verbraucher für das Komfortempfinden des Fahrers und zum anderen sicherheitstechnische Aspekte bezüglich zwingend funktionstüchtiger Komponenten, wie beispielsweise eine elektrische Lenkung.

4.3.2. Agentenorientiertes Energiemanagement

Ziel des Ansatzes nach [42] ist eine flexible und effiziente Funktionalität des Energiemanagements mit dezentraler Entscheidungsfindung und Informations-

bereitstellung. Hierbei soll insbesondere die Sicherheit für X-by-Wire Systeme erhöht werden. Der aktuelle Status einzelner Verbraucher wird an alle beteiligten Verbraucher mittels einer einheitlichen Kommunikationsschnittstelle übermittelt. Jeder Verbraucher besitzt somit genug Information und Intelligenz, um nach einer Situationsanalyse seinen Leistungsbedarf autonom einzustellen. Es findet eine Verteilung der Funktionalitäten und Verantwortlichkeiten statt. Die Kontrolle über das jeweilige Verhalten und somit die Autonomie liegt bei dem Verbraucher selbst. Eine Interaktion der Einzelverbraucher findet lediglich statt, um individuelle Ziele zu erreichen. Dem Begriff Fairness kommt in diesem Kontext eine zentrale Bedeutung zu. Vergleichbar mit einem Schiedsrichter werden neutrale Wächter implementiert, welche Inkonsistenzen und Fehlzustände vermeiden sollen. Das Bordnetzsteuergerät und die jeweiligen Verbrauchersteuergeräte überwachen sich gegenseitig auf Fehlfunktionen, um bei einem Defekt des Bordnetzsteuergeräts einen Notlauf für sicherheitsrelevante Funktionen gewährleisten zu können. Somit besitzt das System in sich eine Redundanz, welche hinsichtlich funktionaler Sicherheit Vorteile bieten kann, damit das Bordnetzsteuergerät nicht mehrfach ausgeführt werden muss. Dies erfordert jedoch ein Höchstmaß an Informationsaustausch der Verbraucher untereinander.

4.3.3. Ökonomische Modelle für ein Energiemanagement

Dieser Ansatz orientiert sich am Beispiel der Börse als Handelsplatz [14], [37]. Hiernach gibt es sowohl Anbieter (Energieerzeuger) als auch Käufer (Energieverbraucher) im Energieversorgungssystem. Das so entstehende Leistungsangebot und die -nachfrage werden mittels einer Kostenfunktion geregelt. Das Energiemanagement adaptiert sich somit an der aktuellen Preis- bzw. Energiesituation. Hierzu meldet jeder Verbraucher seine Leistungsanforderung und seine individuelle Preissensitivität an ein zentrales Organ, den sogenannten Power Trader. Dieser kommuniziert wiederum auf Basis der aktuellen Energiesituation gemäß Angebot und Nachfrage das Preisniveau. Die Leistungsflüsse ergeben

sich somit innerhalb gewisser Grenzen über den ermittelten und kommunizierten Gleichgewichtspreis. Der Power Trader hat nur indirekten Einfluss auf die Einzelverbraucher. Es handelt sich um keine zentrale Steuerungsinstanz, sondern um ein Konsolidierungs- und zentrales Informationsorgan. Das Steuerverhalten wird jeweils dezentral und autonom auf die Verbrauchskomponente verteilt, wobei die Information des Gleichgewichtspreises zentral vom Power Trader gebildet wird. Die Modellansätze zur Markt- bzw. Energieregulierung entstammen hierbei der Mikro-Ökonomie.

4.3.4. Auktionsorientiertes Energiemanagement

Hierbei wird sich zur Umsetzung eines Energiemanagements dem Versteigerungsprinzip bedient [14]. Ein zentraler Auktionator versteigert hierbei Leistungspakete, die Verbraucher steigern um diese. Die Verbraucher geben hierzu ihre Gebote für einzelne Leistungen ab. Die Gebote der Verbraucher erfolgen unter Berücksichtigung von ihrer Verbraucherpriorität und Funktionsrelevanz. Die Bietstrategie ist hierbei applizierbar einzustellen, wobei ein Verbraucher auch mehrere Gebote für unterschiedliche Leistungen abgeben kann. Die Entscheidungsfindung und die Allokation der Ressourcen wird hier im Gegensatz zu ökonomisch orientierten Ansätzen zentral durch den Auktionator und nicht durch den Verbraucher durchgeführt. Der Auktionator verteilt, beginnend mit dem Höchstbietenden, entsprechend Leistungspakete, bis die zur Verfügung stehende Energie aufgebraucht ist. Die Informationsbereitstellung ist in diesem Fall dezentral, d.h. jeder Verbraucher meldet seine Priorität durch sein Gebot. Auch die Informationen zum aktuellen Fahrzeugzustand liegen jedem Verbraucher vor, damit er sein entsprechendes Gebot abgeben kann. In [14] erläutert der Autor jedoch nicht wie vor Auktionsbeginn das „Zahlungsmittel“ zur Gebotsabgabe auf die einzelnen Verbraucher verteilt ist.

4.4. Klassifizierung und Auswahl der Energiemanagement-Ansätze

Die aufgeführten Ansätze sollen nun hinsichtlich der Erfüllung der in Abschnitt 4.1 definierten nicht-funktionalen Anforderungen bewertet werden, um eine eventuelle Erweiterung der Ansätze zu einem ganzheitlichen Gesamtfahrzeug-Ansatz vornehmen zu können. Der durch die Bewertung ermittelte Ansatz soll dann im Rahmen der zu entwickelnden Funktionsarchitektur umgesetzt werden.

4.4.1. Klassifizierung der Energiemanagement-Ansätze

Zunächst werden die dargestellten Ansätze nach Abbildung 4.2 für eine weitere Bewertung abstrahiert und klassifiziert. Zu diesem Zweck kann zwischen der Art der Steuerungs- und Optimierungsebene und der Art der Informationsebene und -bereitstellung unterschieden werden [18]. Die oben beschriebenen Ansätze können hierüber einem entsprechend abstrahierten Energiemanagement-Ansatz zugeordnet werden. Insgesamt ergeben sich nach Abbildung 4.2 vier mögliche Ausführungsformen eines Energiemanagements.

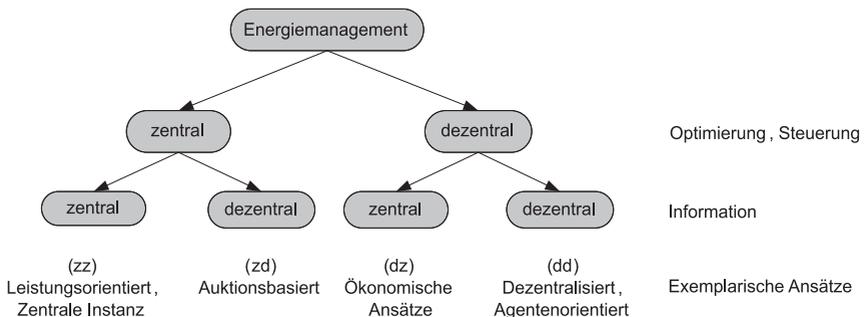


Abb. 4.2.: Einteilung von Energiemanagement-Ansätzen, in Anlehnung an [18]

Die im vorherigen Abschnitt 4.3 beschriebenen Ansätze können nach dieser Klassifizierung eindeutig zugeordnet werden. Leistungsorientierte Ansätze weisen sowohl eine zentrale Steuer-, als auch zentrale Informationsebene (zz) auf.

Agentenbasierte Ansätze hingegen besitzen sowohl eine dezentrale und autonome Entscheidungsfindung des jeweiligen Verbrauchers, als auch eine dezentrale Informationsebene (dd). Börsenorientierte ökonomische Ansätze verfügen über eine dezentrale Steuerebene, jedoch eine zentrale Informationsbereitstellung durch die Konsolidierungsstelle aufgrund der zentralen Publikation der aktuellen Preisentwicklung (dz). Auktionsbasierte Ansätze hingegen weisen eine zentrale Entscheidungsfindung durch den Auktionator und eine dezentrale (zd) Informationsebene durch jeweilige Verbraucher auf, da diese ihre Priorität durch ihr Gebot kommunizieren.

4.4.2. Evaluierung und Auswahl der Energiemanagement-Ansätze

Im Folgenden werden die dargestellten und klassifizierten Ansätze hinsichtlich des projektierten Einsatzzwecks bewertet. Hierzu werden aus der Anforderungsdefinition entsprechende Kriterien abstrahiert. Da die jeweiligen Kriterien nicht gleichwertig für die Auswahlentscheidung zu behandeln sind, wird ein paarweiser Vergleich der Kriterien zur Ermittlung einer Gewichtung durchgeführt. Die Evaluierung ist in Tabelle B.1 des Anhangs B dargestellt. Hierbei werden die Kriterien jeweils als Zeilen und Spalten in einer Matrix aufgetragen. Für die Bewertung wird zeilenweise das links stehende Kriterium mit den in Spalten stehenden Kriterien verglichen. Die Punktevergabe erfolgt von 0 bis 4, wobei 4 als wesentlich wichtiger, 2 als neutral und 0 als wesentlich unwichtiger befunden wird. Die Punktevergabe wird anschließend summiert, um eine Relation der Kriterien untereinander herzustellen. Über diesen paarweisen Vergleich wird eine möglichst objektive Gewichtung bezüglich der Relevanz der Kriterien untereinander gewährleistet.

Anschließend erfolgt die Bewertung der dargestellten Energiemanagement-Ansätze in Bezug auf die einzelnen Kriterien. Durch die Gewichtung der Kriterien und der vergebenen Eignungsnote kann eine Gesamtnote ermittelt werden. Die Notenvergabe erfolgt hierbei nach dem Schulnotensystem, wobei die Note 1 das Kriterium am besten, die Note 6 das Kriterium am schlechtesten erfüllt.

Besonderer Fokus liegt auf der Auswahl eines allgemein gültigen Ansatzes des Energiemanagements, welcher unabhängig von Fahrzeugsegment, Marken- diversifizierung oder komponentenspezifischer Größen implementiert werden kann und eine gute Skalierbarkeit sowie Portierbarkeit gewährleistet.

Eine entsprechende Bewertungsmatrix zeigt Tabelle 4.3. Die Bewertung wurde im Rahmen eines interdisziplinär besetzten Expertengesprächs mit Entwicklungsingenieuren durchgeführt. Da sich jedoch bei jeder noch so objektiv durchgeführten Bewertung unterschiedliche Ansichten aufgrund projektseitiger Restriktionen und Gegebenheitenzutragen können, ist das Bewertungsverfahren samt paarweisem Vergleich nach Tabelle B.1 vollständig und nachvollziehbar dargelegt. Daher kann die Bewertung bei anderen Sichtweisen oder Anforderungen entsprechend angepasst und korrigiert werden. Da an dieser Stelle nicht einzeln auf alle Notenvergaben eingegangen werden kann, soll der Entscheidungsprozess am höchst gewichteten Kriterium exemplarisch erläutert werden. Die Ansätze mit zentraler Optimierungsebene erfüllen das Kriterium Erweiterbarkeit in hohem Maße, da der Optimierungsalgorithmus lediglich an einer Stelle für eine Erweiterbarkeit modifiziert werden muss. Bei Ansätzen mit dezentraler Optimierungsebene erweist sich der Aufwand bei einer Systemerweiterung als wesentlich höher, da an allen Verbrauchern eine Modifikation des Algorithmus vorgenommen werden muss.

Der Energiemanagement-Ansatz mit zentraler Entscheidungsfindung und zentraler Informationsbereitstellung (zz) erzielt bei der durchgeführten Bewertung die beste Eignungsnote. Dieser Ansatz soll bei der Umsetzung der Funktionsarchitektur Anwendung finden.

Im Folgenden kann nun unter Annahme eines zentralen Energiemanagements eine detaillierte Beschreibung des modularen Aufbaus erfolgen.

Tab. 4.3.: Bewertungsmatrix zur Auswahl eines Energiemanagement-Ansatzes

| Kriterium | Gewichtung | Ansatz | | | |
|-----------------------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|
| | | zz | zd | dz | dd |
| Erweiterbarkeit | 0.1 | 1 | 1 | 3 | 3 |
| Stabilität | 0.09 | 3 | 3 | 3 | 1 |
| Skalierbarkeit | 0.09 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| Notlaufeigenschaften | 0.08 | 4 | 4 | 1 | 2 |
| Nachvollziehbarkeit | 0.07 | 1 | 3 | 3 | 2 |
| Applikationsfähigkeit | 0.07 | 1 | 3 | 3 | 2 |
| Modularisierbarkeit | 0.07 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| Adaptionsfähigkeit | 0.07 | 1 | 3 | 3 | 2 |
| Konfigurierbarkeit | 0.06 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| Integrationsfähigkeit | 0.06 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| Latenzverhalten | 0.06 | 1 | 3 | 3 | 2 |
| Bus-Last | 0.05 | 1 | 3 | 2 | 3 |
| Überwachungsfähigkeit | 0.05 | 1 | 3 | 4 | 2 |
| Entwicklungsaufwand | 0.04 | 1 | 2 | 2 | 3 |
| Ressourcenbedarf | 0.04 | 1 | 3 | 3 | 2 |
| Endnote | | 1.54 | 2.4 | 2.36 | 2.12 |

4.5. Modularisierung der Funktionsarchitektur

Die drei funktionalen Hauptmodule des Energie- und Antriebsmanagements sowie der Reichweitenermittlung sind jeweils in sich modular in weitere Funktionseinheiten untergliedert und strukturiert. Abbildung 4.3 stellt den gesamten modularisierten Aufbau dar.

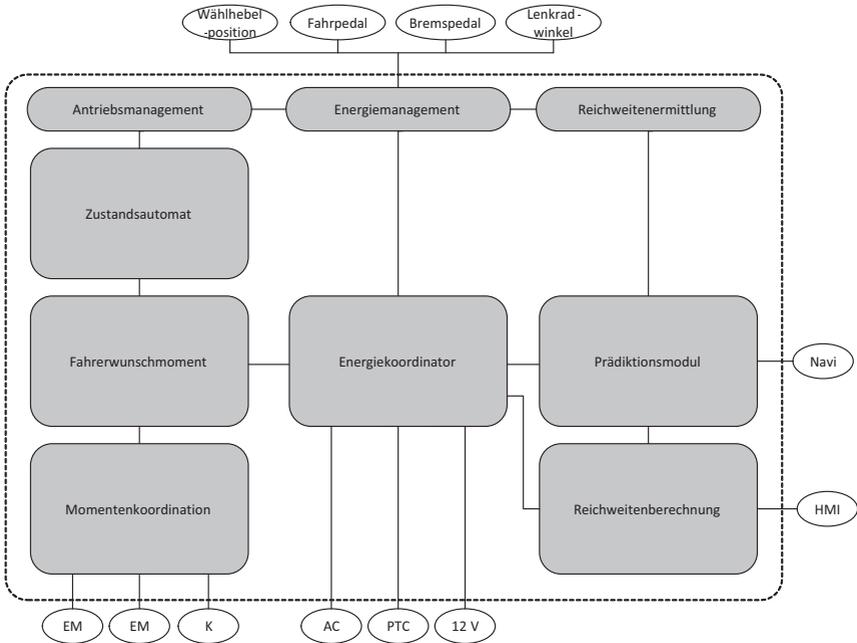


Abb. 4.3.: Modulare Architekturgestaltung

Innerhalb des Antriebsmanagement werden mittels eines Zustandsautomaten die einzelnen Betriebsmodi durch entsprechende Fahrervorgaben und eine applizierbare Fahrstrategie vorgegeben. Hieran schließt sich eine Plausibilisierung und betriebsmodusabhängige Berechnung des Fahrerwunschmoments an. Dieses wird innerhalb des Moduls Momentenkoordination je nach Antriebstopologie auf mehrere elektrische Maschinen (EM) energieoptimal aufgeteilt. Hierzu kann je nach Maschinentyp auch das Ansteuern von einer Kupplung (K) zur Minimierung von Leerlaufverlusten gemäß Abschnitt 3.2.2 zählen.

Innerhalb des Moduls Energiemanagement steuert und koordiniert ein Energiekoordinator bedarfsgerecht und situativ als zentrale Optimierungsinstanz sämtliche Leistungs- bzw. Energieflüsse des Fahrzeugs. Der Energiekoordinator besitzt eine Schnittstelle zum Antriebsmanagement, um gegebenenfalls Einfluss auf die zur Verfügung stehende Antriebsleistung nehmen zu können. Analog

kann der Energiekoordinator Leistungsanforderungen von Nebenverbrauchern, insbesondere von Klimakompressor (AC), Heizung (PTC) und weiterer 12-Volt Bordnetz-Verbrauchern (12V) empfangen und im Gegenzug Leistungsvorgaben entsenden. Mittels des Energiekoordinators als zentrales Modul kann somit eine Betriebsstrategievorgabe für das Gesamtfahrzeug realisiert werden. Die Eingangsgrößen Wählhebelposition, Fahr- und Bremspedal sowie Lenkradwinkel werden aus diesem Grund zentral vom Energiemanagement erfasst und an das Antriebsmanagement übergeben. Weitere Schnittstellen bestehen zum Prädiktionsmodul und der Reichweitenermittlung. Hierüber werden sowohl aktuell zur Verfügung stehende Leistungen an das Prädiktionsmodul, als auch die hieraus resultierende Reichweite übermittelt. Die Information der aktuellen Reichweite dient dem Energiekoordinator als Steuergröße der Betriebsstrategie. Dementsprechend werden die Leistungsvorgaben für das Antriebssystem und die Komfortnebenverbraucher in Abhängigkeit der aktuellen Reichweite eingestellt. Eine detaillierte Beschreibung erfolgt in Abschnitt 5.1.

Das Prädiktionsmodul empfängt vom Navigationssystem Streckendaten (Geschwindigkeitslimits, Höhenprofil, Kurvenkrümmungen) und erstellt hieraus eine Leistungsprädiktion des Antriebssystems. Zusätzlich werden ebenfalls prädiktiv Nebenverbraucherlasten für die gesamte Fahrstrecke abgeschätzt. Die Reichweitenberechnung ermittelt dann auf Basis des prädiktiven Leistungsbedarfs und des Energieinhalts der Traktionsbatterie die aktuelle Reichweite.

Mittels der drei funktionalen Hauptmodule und den untergeordneten modular aufgebauten Einzelfunktionalitäten ist es somit möglich, eine energieoptimale und situativ angepasste Betriebsstrategie für das Gesamtfahrzeug zu entwickeln und vorzugeben. Die Umsetzung dieser Einzelfunktionalitäten wird im Folgenden in Kapitel 5 erläutert.

5. Umsetzung der Funktionalitäten innerhalb der Funktionsarchitektur

Im Folgenden soll die funktionale Umsetzung der drei Hauptmodule des Energie- und Antriebsmanagements sowie der Reichweitenermittlung, wie in Abbildung 4.3 dargestellt, detailliert erläutert werden. Ziel dieser Funktionen ist die Vorgabe einer ganzheitlichen Betriebsstrategie zur Beeinflussung der Aspekte Reichweite, Dynamik sowie thermischer Komfort.

5.1. Funktionen des Energiemanagements

Das Energiemanagement wird aufgrund der Bewertung in Abschnitt 4.4 als Instanz mit zentraler Optimierungs- und Informationsebene (zz) gemäß Abbildung 4.3 zur Steuerung und Vorgabe der Energieflüsse des Gesamtfahrzeugs implementiert, um Betriebsstrategie-Maßnahmen auszuführen.

Die Wahrnehmbarkeit ist bei der Steuerung und Degradierung spezifischer Verbraucher insbesondere bei Komfortverbrauchern zu Gunsten einer Reichweitensteigerung essenziell. Um dies für einen Algorithmus berücksichtigen zu können, werden alle Verbraucher in Prioritätsklassen (PK) eingeteilt. Exemplarisch wird gemäß Tabelle 5.1 eine Unterteilung in insgesamt 10 Klassen vorgenommen. Die Klassifizierung der Verbraucher nach Prioritäten gewährleistet eine gute Skalierbarkeit und Übertragbarkeit, da eine Einteilung hersteller- und fahrzeugsegmentspezifisch individuell vorgenommen werden kann. Entsprechende Parameter sind somit im Sinne der Applikation als parametrierbare Größen vorzuhalten. Prinzipiell wird eine Unterteilung in Komfort- und sicherheitsrelevante Verbraucher vorgenommen, wobei Verbraucher, welche sowohl Sicherheits-

als auch Komfortfunktionalitäten ausführen, der Gruppe der sicherheitsrelevanten Verbraucher zugeordnet werden.

Tab. 5.1.: Prioritätsklassen der elektrischen Verbraucher aus Sicht des Energiemanagements

| PK | Beschreibung |
|-----------|---|
| Klasse 1 | Komfortverbraucher, dauerhafte Abschaltung beeinflusst nicht die Kundenzufriedenheit |
| Klasse 2 | Komfortverbraucher, dauerhafte Abschaltung nimmt der Fahrer zur Erreichung seines Wunschziels hin |
| Klasse 3 | Komfortverbraucher, temporäre Abschaltung nimmt der Fahrer zur Erreichung seines Wunschziels hin |
| Klasse 4 | Komfortverbraucher, dauerhafte Leistungsreduzierung beeinflusst nicht die Kundenzufriedenheit |
| Klasse 5 | Komfortverbraucher, dauerhafte Leistungsreduzierung wird zur Erreichung des Wunschziels toleriert |
| Klasse 6 | Komfortverbraucher, temporäre Leistungsreduzierung wird zur Erreichung des Wunschziels toleriert |
| Klasse 7 | Komfortverbraucher, temporäre Leistungsreduzierung kann unter Beachtung des Bauteilschutzes vorgenommen werden |
| Klasse 8 | Sicherheitsrelevanter Verbraucher, dauerhafte Leistungsreduzierung kann aus sicherheitstechnischer Sicht vorgenommen werden |
| Klasse 9 | Sicherheitsrelevanter Verbraucher, temporäre Leistungsreduzierung kann aus sicherheitstechnischer Sicht vorgenommen werden |
| Klasse 10 | Sicherheitsrelevanter Verbraucher, keine Leistungsreduzierung zulässig |

Die Prioritätenvergabe wird nach folgenden Aspekten durchgeführt:

- Funktionale Sicherheit
- Bauteilschutz
- Wahrnehmbarkeit bezüglich Dynamik und thermischem Komfort

Hierdurch kann situativ, streckenabhängig und adaptiv ein energetischer Zustand des Gesamtfahrzeugs zur Erfüllung einer geforderten Reichweite in Form eines vom Fahrer vorgegebenen Zielorts (in Zielführung) bzw. eines allgemein reichweitenmaximierenden Betriebs (ohne Zielführung) erreicht werden.

Es findet somit eine Unterscheidung in eine Betriebsstrategie in Zielführung und eine Betriebsstrategie ohne Zielführung statt. Liegt eine konkrete Zielführung vor, können Streckeninformationen (Geschwindigkeitslimits, Kurvenkrümmung, Höhenprofil) prädiktiv zur Betriebsstrategievorgabe bis zum gewünschten Zielort genutzt werden.

Abbildung 5.1 zeigt den Ablaufplan des Moduls Energiekoordinator zur Unterscheidung dieser beiden Fälle. Die Einteilung der Verbraucher nach Prioritätsklassen ist hierbei als applizierbare Datenbank hinterlegt und beschreibt jeden Verbraucher durch seine Prioritätskennzahl (PK) gemäß Tabelle 5.1. Diese dient sowohl der Betriebsstrategie in Zielführung als auch der Betriebsstrategie ohne Zielführung als Eingangsgröße. Über die weiteren Eingangsgrößen Reichweite und Entfernung bis Ziel kann im Modul Betriebsstrategie in Zielführung ein Abgleich zur Erreichbarkeit des gewünschten Ziels durchgeführt werden, wonach sich dann die Betriebsstrategie ausrichtet. Hierbei liegt die Annahme zu Grunde, dass am Zielort die Batterie geladen werden kann. Im Modul Betriebsstrategie ohne Zielführung hingegen richtet sich die Ausführung der Betriebsstrategie nach der Größe SoC, um einen allgemein reichweitenverlängernden Betrieb umzusetzen. Die Information zur Entfernung bis zum nächsten Ladeort steht hierbei nicht zur Verfügung. Darüber hinaus dient die Temperatur T als weitere Eingangsgröße zur Ausführung der Betriebsstrategie. Die detaillierte Beschreibung zur Umsetzung der Betriebsstrategie in den Modulen Betriebs-

strategie ohne Zielführung und Betriebsstrategie in Zielführung erfolgt in den Abschnitten 5.1.1 und 5.1.2. Ausgangsgröße ist jeweils die pro Verbraucher maximal einzustellende Leistung P_{\max} , welche dem Modul Leistungskoordination übergeben wird. Hier laufen die Leistungsanforderung eines jeden Verbrauchers und die Leistungsfreigabe P_{\max} durch das Energiemanagement zusammen. Die Leistungsanforderung der jeweiligen Verbraucher gewährleistet zunächst die Qualitätsmerkmale Dynamik und Komfort in vollem Umfang zu Lasten des Qualitätsmerkmals Reichweite. Die Leistungsobergrenze P_{\max} dient gegebenenfalls dazu, die Leistungsflüsse der Verbraucher temporär und situativ in ihrem Absolutbetrag zu deckeln, um dadurch das Qualitätsmerkmal Reichweite zu steigern. Es wird also durch das Energiemanagement eine Balance zwischen den drei konkurrierenden Qualitätsmerkmalen hergestellt. Daher gibt das Energiemanagement in Form von maximalen Leistungsgrenzen durch die Größe P_{\max} für jeden Verbraucher eine im Absolutwert einzuhaltende Obergrenze vor. Liegt hingegen die Leistungsanforderung des jeweiligen Verbrauchers unterhalb der vom Energiemanagement definierten Obergrenze, wird der Leistungsanforderung des Verbrauchers in vollem Umfang frei gegeben. Somit wird in diesem Fall das Qualitätsmerkmal Dynamik bzw. Komfort nicht reduziert. Über den beschriebenen Mechanismus zur Deckelung der maximalen Verbraucherleistungen können alle Leistungsflüsse im Gesamtfahrzeug gesteuert werden, um einen reichweitenverlängernden Betrieb zu gewährleisten.

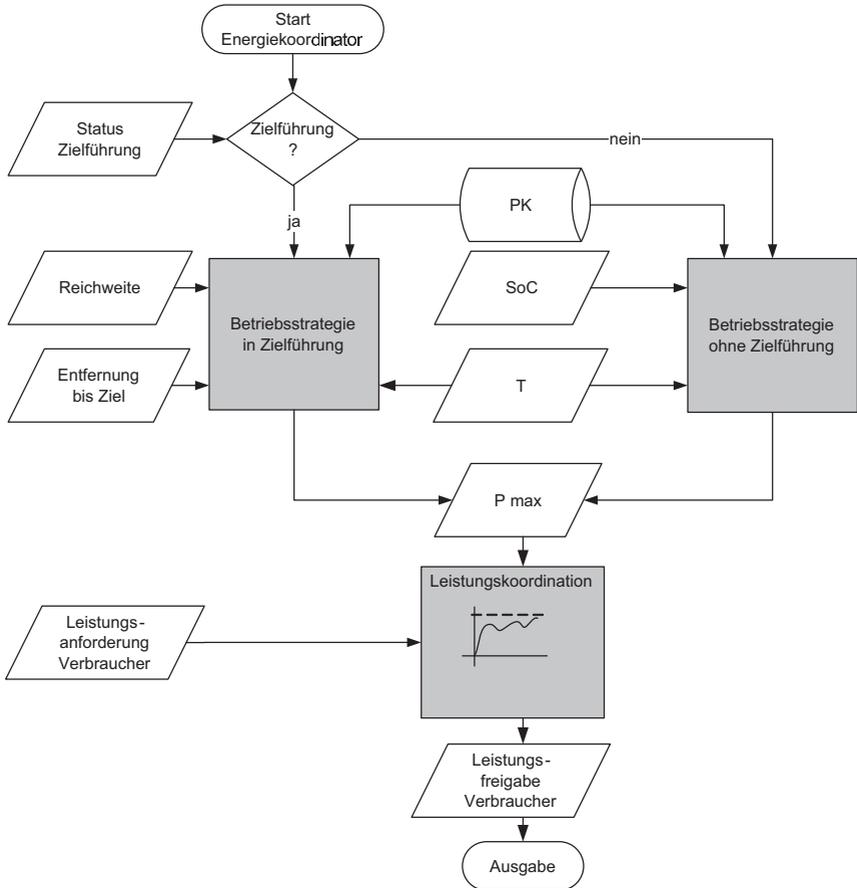


Abb. 5.1.: Ablaufplan des Energiekoordinators

5.1.1. Betriebsstrategie ohne Zielführung

Die Koordinierung der Energieflüsse wird in Abhängigkeit der Prioritätskennzahl durchgeführt und kann ohne konkrete Zielführung zu einem allgemein reichweitenverlängernden Betrieb führen. Die PK dient dem Energiekoordina-

tor zur Bestimmung der maximal zulässigen Leistung eines jeden Verbrauchers. Durch applizierbare Kennfelder kann so ein entsprechendes Verhalten zur Leistungsfreigabe des Moduls Energiekoordinator definiert vorgegeben werden. Da in Abschnitt 3.2.3 eine starke Abhängigkeit der Reichweite in Bezug auf die Außentemperatur aufgezeigt werden konnte, wird die Umgebungstemperatur T als weitere Dimension dieser Kennfelder hinzugefügt. Zusätzlich könnte auch der Energieinhalt der Batterie in Form des SoC als dritte Eingangsgröße zur variablen Gestaltung des Verbraucherverhaltens im Fahrtverlauf dienen. Dies kann jedoch zu einem für den Fahrer nicht reproduzierbaren Systemverhalten im Fahrbetrieb führen. Daher wird diese Möglichkeit im Rahmen der folgenden Grundlagenuntersuchungen in Kapitel 7 nicht weiter verfolgt, da ein SoC-abhängiges Verhalten lediglich als Notfunktion bei sehr geringem Batterieinhalt sinnvoll erscheint. Abbildung 5.2 zeigt exemplarisch eine mögliche Variante der Bedatung (ohne den Einfluss des SoC).

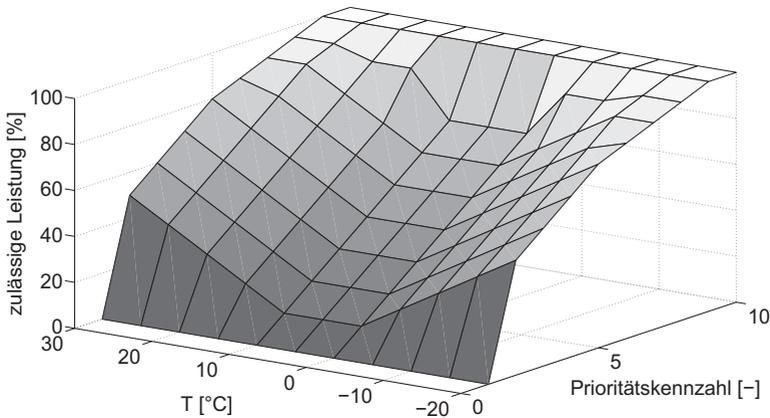


Abb. 5.2.: Applikativ festlegbares Kennfeld zur Vorgabe des Verbraucherverhaltens

Eine reichweitensteigernde und für den Fahrer trotzdem angenehme Ausprägung der Antriebs-, Klimatisierungs- und Komfortsysteme (Sitzheizung, Spiegelheizung etc.) ist Aufgabe der Applikation. Diese kann in Abhängigkeit des

Fahrzeugsegments und der herstellerspezifischen Ausrichtung hinsichtlich Komfort und Dynamik unterschiedlich ausgeprägt sein. Der Parametrierung dieser Kennfelder zur Festlegung von definierten Komfort- und Dynamikgrenzen mit Hilfe einer multikriteriellen Optimierung widmet sich das Kapitel 7.

5.1.2. Betriebsstrategie in Zielführung

Liegt eine konkrete Zielführung vor, ist die Steuergröße zur Festlegung der Leistungsflüsse die Reichweite bzw. das Delta aus Entfernung bis Ziel und der aktuellen Restreichweite. Kann das Ziel unter Annahme der aktuellen Energieflüsse nicht erreicht werden, so wird eine bedarfsgerechte Degradierung von Verbrauchern vorgenommen. Hierfür muss zunächst eine Reihenfolge zur Degradierung gemäß der festgelegten Prioritätskennzahlen der einzelnen Verbraucher ermittelt werden. Verbraucher mit der niedrigsten Priorität werden zuerst degradiert. Es handelt sich um ein gestuftes Konzept. Nach Ermittlung der Reihenfolge werden zunächst wieder alle Verbraucher mit der höchsten Priorität, in diesem Fall der Prioritätskennzahl 10, belegt und gemäß der ermittelten Reihenfolge wird abgefragt, ob eine Degradierung von Verbrauchern zur Zielerreichung nötig ist. Die Zielerreichung wird somit im iterativen Verfahren durch Herabstufung der Prioritätskennzahlen durchgeführt. Die festgelegte Prioritätskennzahl dient dabei als untere Grenze (Min PK), welche im iterativen Verfahren nicht weiter herabgestuft werden darf. Wird die Prioritätskennzahl als unterer Grenzwert erreicht, wird der in der Reihenfolge nächst folgende Verbraucher im analogen Verfahren degradiert.

Nachdem durch den Algorithmus eine Prioritätskennzahl verändert wurde, wird eine Neuberechnung der Reichweite angestoßen. Es wird dann überprüft, ob das Ziel nun erreichbar ist oder eine weitere Iteration durchgeführt werden muss. Es findet somit ein serieller Berechnungsablauf der Module Energiekoordinator und Prädiktionsmodul statt.

Umgekehrt kann während der Fahrt ein Verbraucher in seinem Leistungsbedarf erhöht werden, wenn festgestellt wird, dass das Ziel erreichbar ist und noch

Energie am Zielort vorhanden wäre, z.B. wenn während der Fahrt ein Verbraucher vom Fahrer deaktiviert wird. Dies ermöglicht eine Adaptionfähigkeit der Betriebsstrategie während des Fahrbetriebs. Ein Schwellenwert zur Umsetzung einer Hysterese kann hierbei applikativ vorgesehen werden. Abbildung 5.3 stellt das beschriebene Verfahren als Ablaufplan schematisch für einen Rechenschritt dar. Das dargestellte Verfahren wird im Betrieb iterativ durchlaufen.

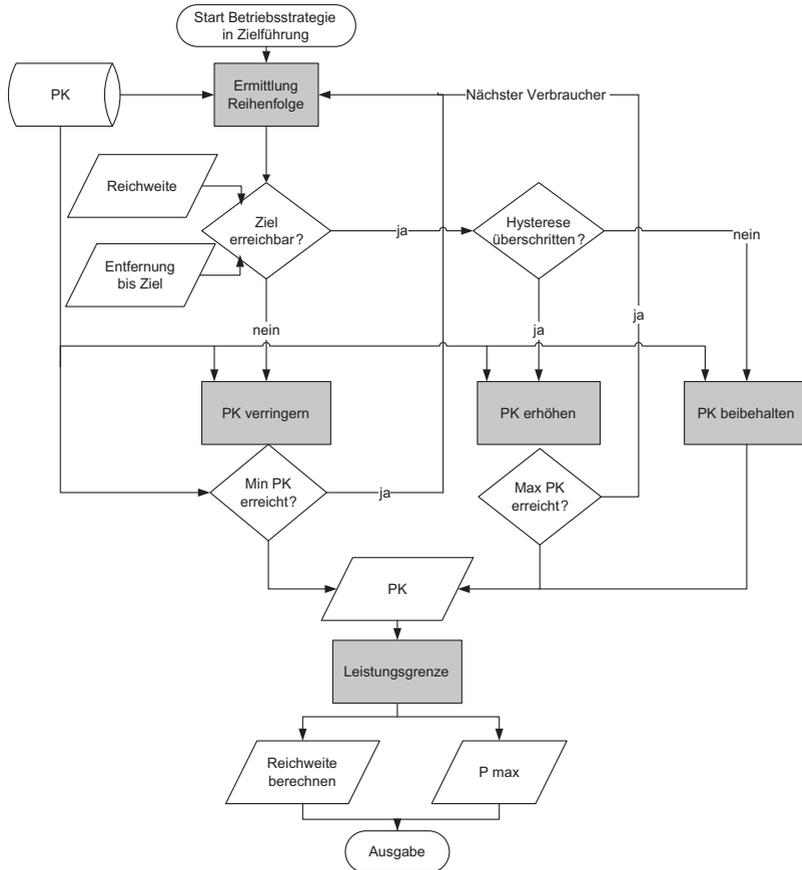


Abb. 5.3.: Ablaufplan der Betriebsstrategie in Zielführung (dargestellt für einen Rechenschritt)

5.1.3. Funktion zur Reduzierung der Batterieverluste

Gemäß Abschnitt 2.1.1 treten im Fahrbetrieb strom- und temperaturabhängige Batterieverluste auf, welche durch den Innenwiderstand der Batterie hervorgerufen werden. Da diese überproportional mit dem Batteriestrom ansteigen, kann eine Reduzierung von Leistungsspitzen diese Verluste verringern. Dies kann erreicht werden, indem in Rekuperationsphasen leistungsintensive Nebenverbraucher, insbesondere das Klimatisierungssystem, mit mehr Leistung versorgt werden. Dieser Leistungsüberschuss muss dann nicht von der Batterie aufgenommen werden, sondern wird während der Rekuperation direkt über den Gleichstromzwischenkreis an den Verbraucher abgeführt. In darauf folgenden motorischen Phasen kann der entsprechende Verbraucher kurzzeitig mit einer geringeren Leistung versorgt werden, bei gleichbleibendem Komfortniveau (siehe Abschnitt 3.2.2). Somit werden auftretende Leistungsspitzen gleichfalls im motorischen sowie generatorischen Betrieb abgesenkt und Ein- bzw. Auspeiseverluste an der Batterie reduziert.

Dieses Verhalten kann mittels des Energiekoordinators in einfacher Weise erreicht werden. Hierzu wird die Prioritätskennzahl von entsprechenden Verbrauchern des Klimatisierungssystems in Abhängigkeit von Rekuperations- und darauf folgenden Antriebsphasen dynamisch verändert. Abbildung 5.4 stellt schematisch die Funktionsweise des Algorithmus als Ablaufdiagramm dar.

Über eine Abfrage der Antriebsleistung kann ermittelt werden, ob eine motorische oder generatorische Phase vorliegt. Wird gerade rekuperiert, wird die Zeit dieser Phase gespeichert (t_{Reku}) sowie die Prioritätskennzahl des Klimatisierungssystems erhöht, um die Leistungsgrenze anzuheben. In der darauf folgenden motorischen Phase wird analog die Prioritätskennzahl über diesen Zeitraum verringert. Dauert das motorische Manöver länger als das zuvor absolvierte generatorische, wird die Prioritätskennzahl wieder auf den hinterlegten Wert PK gesetzt. Somit werden die Leistungsgrenzen dynamisch angepasst und Batterieverluste durch die Nutzung der zurückgespeisten Energie insgesamt verringert.

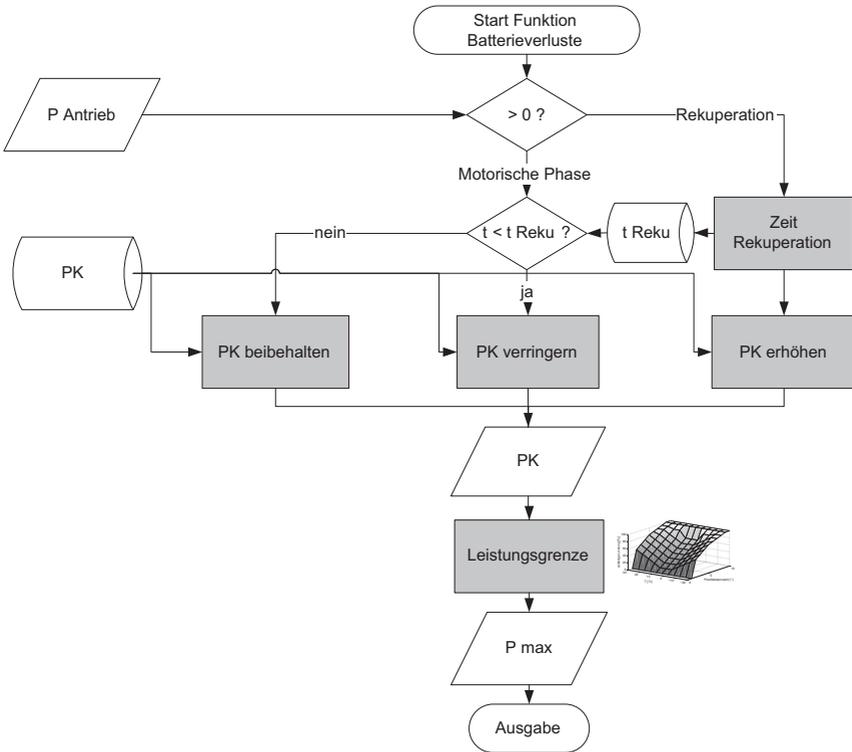


Abb. 5.4.: Funktionsprinzip zur Reduzierung von Batterieverlusten mittels des zentralen Energiemanagements (dargestellt für einen Rechenschritt)

5.2. Funktionen des Antriebsmanagements

Aufgabe des Antriebsmanagements ist die Übersetzung des Fahrerwunsches in eine Lastvorgabe des Antriebssystems. Dies wird in Form einer definierten Fahrstrategie umgesetzt. Die Fahrstrategie soll hierbei einen möglichst effizienten Betrieb des Antriebssystems gewährleisten. Eine weitere wichtige Aufgabe ist die Sicherstellung von Fahrbarkeitsansprüchen. Im Folgenden werden die Funktionalitäten und die Struktur des Antriebsmanagements erläutert.

5.2.1. Fahrstrategie

Innerhalb des Antriebsmanagements ist gemäß Abbildung 4.3 ein Zustandsautomat implementiert, welcher eine definierte Fahrstrategie in Form von diskreten Betriebsmodi vorgibt. Es wird zwischen den Modi

- Parken
- Stehen
- Kriechen
- Segeln/Schub
- Fahren
- Rekuperation

unterschieden. Eine entsprechende Logik zur Betriebsmodusauswahl ist mit Hilfe eines Zustandsautomaten gemäß Abbildung 5.5 implementiert. Hierbei meinen die &&-Symbole eine „und“-Verknüpfung.

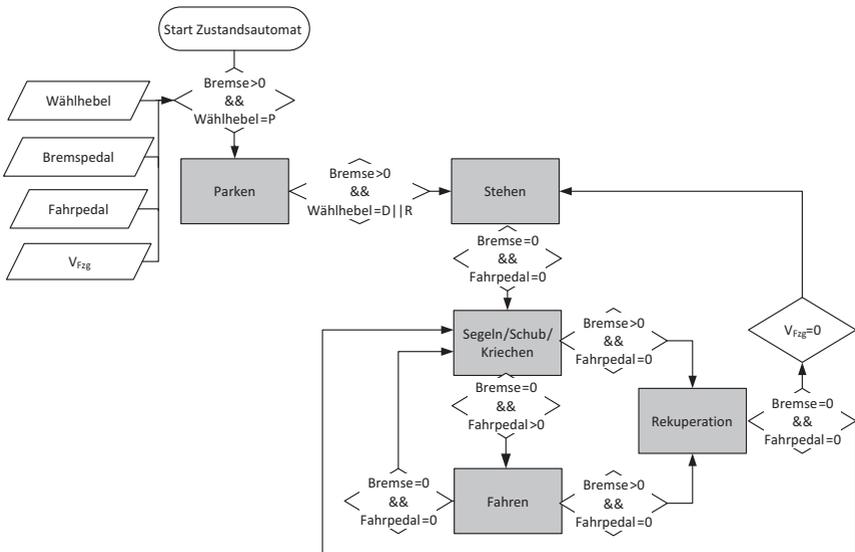


Abb. 5.5.: Ablaufplan des Zustandsautomaten zur Umsetzung der Fahrstrategie

Die Logikfunktion wird in Abhängigkeit von Fahr- und Bremspedal sowie der Wählhebel-Position ausgeführt. Zusätzlich dient die Fahrzeuggeschwindigkeit V_{Fzg} als Signal zur Plausibilisierung dieser Logikfunktionen.

5.2.2. Betriebsmodusabhängige Drehmomentenvorgabe

In Abhängigkeit der beschriebenen Betriebsmodi werden die Vorgaben für das Antriebssystem in Form einer drehmomentenbasierten Laststeuerung durch ein Fahrerwunschkraftmoment ausgeführt, welches anschließend auf die elektrischen Maschinen M_{EM1} und M_{EM2} aufgeteilt und die Kupplungsansteuerung K koordiniert werden muss. Die drehmomentenbasierte Antriebssteuerung orientiert sich somit an der bei konventionellen und hybriden Fahrzeugen etablierten Führungsgröße des Fahrerwunschkraftmoments M_{des} , wie in [45] dargestellt.

Abbildung 5.6 zeigt schematisch die Struktur der Antriebssteuerung. Die einzelnen Module werden in Abhängigkeit des aktuellen Betriebsmodus gemäß Abschnitt 5.2.1 aufgerufen und führen dann eine modusabhängige Fahrerwunschkraftmomentenvorgabe aus. Die folgende Darstellung erfolgt für eine idealisierte Betrachtung in der Ebene.

Parken und Stehen

In den Fahrmodi Parken und Stehen wird das Fahrerwunschkraftmoment $M_{des} = 0$ ausgegeben.

Fahren

Durch Betätigen des Fahrpedals liegt ein positiver Drehmomentenwunsch vor. Das Fahrerwunschkraftmoment M_{des} wird mittels eines Fahrpedalkennfelds aus dem Fahrpedalsignal ermittelt und entsprechend der Triebstrang-Topologie weiter koordiniert. In motorischen Phasen (positives Fahrerwunschkraftmoment, $M_{des} > 0$) soll ein möglichst effizienter Betrieb eingestellt werden. Hierzu dient bei Allrad-Topologien ein Optimierer im Modul Momentenkoordination, siehe Abschnitt 5.2.3.

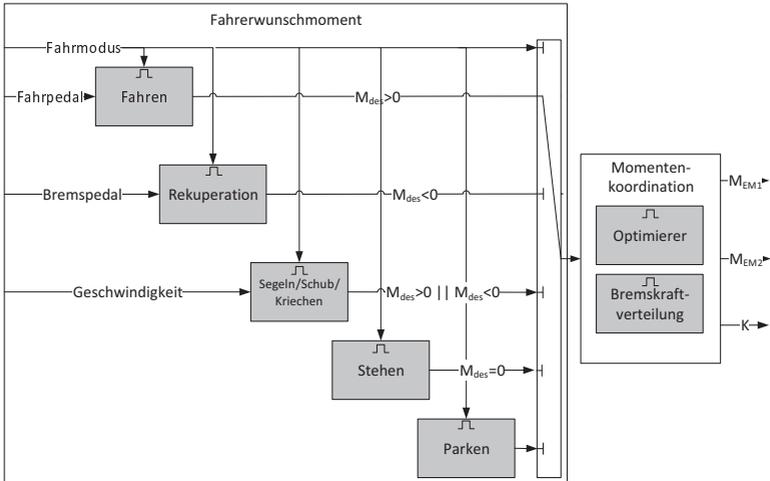


Abb. 5.6.: Struktur der drehmomentenbasierten Antriebssteuerung

Rekuperation

Durch Betätigen des Bremspedals liegt ein negativer Drehmomentenwunsch vor. Das negative Fahrerwunschemoment M_{des} wird mit Hilfe des Bremspedalsignals und einem Bremspedalkennfeld ermittelt. Die Aufteilung des negativen Fahrerwunschemoments zur Vorgabe einer definierten Bremskraftverteilung erfolgt im Modul Bremskraftverteilung, siehe Abschnitt 5.2.3.

Segeln/Schub/Kriechen

Sind gleichzeitig das Fahr- und das Bremspedal nicht betätigt, gibt diese Funktion ein Fahrerwunschemoment M_{des} in Abhängigkeit der aktuellen Längsgeschwindigkeit vor. Analog heutiger Automatikgetriebe kann hierbei aus dem Stand ein positives Drehmoment zum Anfahren vorgegeben werden (Kriechmoment). Dies ermöglicht ein besseres Rangieren und erhöht die Fahrbarkeit in niedrigen Geschwindigkeitsbereichen. Während der Fahrt hingegen kann ein Schubmoment generiert werden, um eine leichte Rekuperation einzustellen und

dem Fahrer ein vom Verbrennungsmotor gewohntes, leichtes Schubmoment zu ermöglichen. Konfigurierbar kann dieses Schubmoment im Fahrbetrieb jedoch auch zu Null bedatet werden. Beim Segeln rollt das Fahrzeug frei aus und wird lediglich durch die Fahrwiderstände verzögert. Dies kann bei vorausschauender Fahrweise zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs führen. Zur Umsetzung dieses Verhaltens ist eine geschwindigkeitsabhängige Kennlinie hinterlegt. Abbildung 5.7 zeigt diese frei applizierbare Kennlinie.

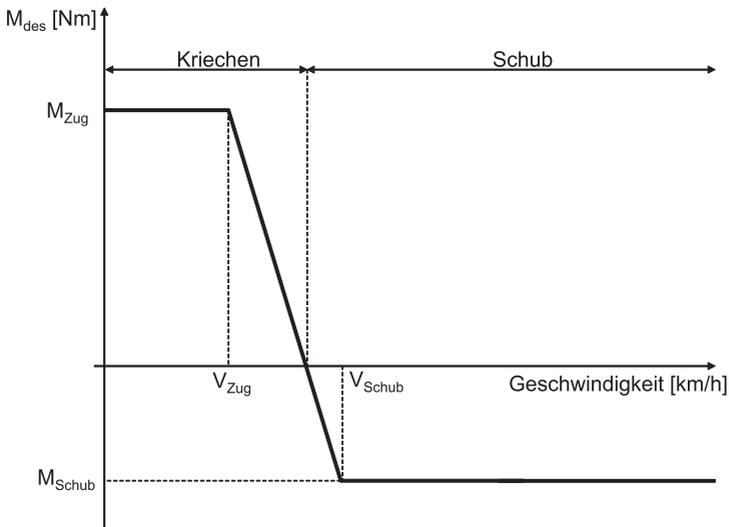


Abb. 5.7.: Kennlinie zur Drehmomentenvorgabe im Fahrmodus Segeln/Schub/Kriechen

Bis zur Geschwindigkeit V_{Zug} wird ein konstantes positives Drehmoment M_{Zug} vorgegeben. Dieses kann in Abhängigkeit der aktuellen Steigung beeinflusst werden. Somit kann auch eine Hill-Hold¹-Funktion umgesetzt werden. Im Geschwindigkeitsbereich zwischen V_{Zug} und V_{Schub} wird das Drehmoment linear

¹ Funktion zur Rollssicherung am Berg; normalerweise durch einen Bremseneingriff realisiert

auf das negative Fahrerwunschkraftmoment M_{Schub} überblendet. Dieses kann jedoch auch applikativ zu Null bedatet werden, um den Betriebsmodus Segeln einzustellen.

5.2.3. Drehmomentenkoordination und -steuerung

Das Fahrerwunschkraftmoment muss in Abhängigkeit des aktuellen Fahrmodus zur Sollmomentenvorgabe auf Vorder- und Hinterachse aufgeteilt werden. Hierzu wird im Modul Momentenkoordination in motorischen Phasen eine verlustleistungsoptimale Allradverteilung realisiert. Des Weiteren wird eine definierte Bremskraftverteilung in generatorischen Phasen umgesetzt.

Optimierer zur Allradverteilung in motorischen Phasen

Bei Fahrzeugen mit Mehrmotorenkonzept und achsindividuellem Antrieb (Top IV) kann nach Abschnitt 3.2.2 eine entsprechende Allradverteilung Verbrauchspotentiale aufweisen. Zur Gewährleistung dieser Anforderung wird ein onlinefähiger Optimierer implementiert, welcher die Sollmomente der elektrischen Maschinen für Vorder- und Hinterachse sowie die Kupplungsstellung unter dem Aspekt der Energieverbrauchsminimierung aus dem Fahrerwunschkraftmoment ermittelt. Bei der folgenden Betrachtung wird davon ausgegangen, dass keine Anforderungen bezüglich fahrdynamischer und sicherheitsrelevanter Aspekte zur Fahrzeugstabilität und Lenkbarkeit vorliegen. Somit kann eine optimierte Verteilung der Drehmomente rein aus energetischen Gesichtspunkten erfolgen.

Im Folgenden soll die gesamte Wirkungsgradkette bis zum Rad betrachtet werden. Als Steuergröße dient daher die Verlustleistung des gesamten Antriebssystems, bestehend aus elektrischen Maschinen, Getriebe und Differential sowie den Rädern. Jede Komponente wird durch ein abgelegtes Verlustleistungskennfeld beschrieben. Die Verlustleistung gilt es gesamthaft zu minimieren. Die Optimierung wird analytisch auf Basis von applizierbaren Verlustleistungskennfeldern der einzelnen Komponenten (elektrische Maschinen, Getriebe und Differential, Reifen) im aktuellen Betriebspunkt durchgeführt. Neben dieser

analytischen Betriebsstrategie kann auch eine heuristische Strategie auf Basis einer festen Drehmomentenverteilung zwischen Vorder- und Hinterachse vorgegeben werden. Diese soll als Referenz zur Beurteilung des Optimierungsverfahrens dienen.

Die analytische Zielfunktion zur Minimierung des Energieverbrauchs kann mittels der Verlustleistung des Antriebssystems P_v beschrieben werden, welche eine Funktion der Soll-Drehmomente M_{EM1} und M_{EM2} der beiden elektrischen Maschinen darstellt. Die Gesamtverlustleistung setzt sich aus den Verlustleistungen der elektrischen Maschine an Vorder- P_{vEM1} und Hinterachse P_{vEM2} , der achsindividuellen Getriebe (Getriebe und Achsdifferential) $P_{vGB1,2}$ und der Reifen pro Achse $P_{vW1,2}$ nach Gleichung [5.1] zusammen:

$$\min: f(M_{EM1}, M_{EM2}) = \sum P_{vEM} + \sum P_{vGB} + \sum P_{vW} \quad [5.1]$$

Als Nebenbedingung (NB) muss nach Gleichung [5.2] das geforderte Wunschmodent M_{des} durch das Summendrehmoment der beiden elektrischen Maschinen M_{EM1} und M_{EM2} aufgebracht werden.

$$\text{NB: } M_{des} = M_{EM1} + M_{EM2} \quad [5.2]$$

Das Wunschmodent M_{des} kann hierbei als gegeben betrachtet werden, wobei die Kombination von M_{EM1} und M_{EM2} gesucht ist, bei der $f(M_{EM1}, M_{EM2}) = P_v$ minimal wird. Zur Ermittlung einer Extremalstelle unter Berücksichtigung der Nebenbedingung kann nach [26] und [62] das Verfahren von Lagrange Anwendung finden. Hierzu wird die Lagrangesche Hilfsfunktion L nach Gleichung [5.3] gebildet,

$$L(M_{EM1}, M_{EM2}, \lambda_L) = f(M_{EM1}, M_{EM2}) + \lambda_L g(M_{EM1}, M_{EM2}) \quad [5.3]$$

wobei λ_L der Lagrange-Multiplikator und $g(M_{EM1}, M_{EM2})$ die Funktion zur Nebenbedingung mit $g(M_{EM1}, M_{EM2}) = M_{EM1} + M_{EM2} - M_{des}$ darstellen. Man sucht nun die Kombinationen M_{EM1} und M_{EM2} , für die die partiellen

Ableitungen $L_{M_{EM\ 1}}$, $L_{M_{EM\ 2}}$ und L_{λ_L} gemäß der Gleichungen [5.4]-[5.6] durch Lösen des linearen Gleichungssystems null werden.

$$L_{M_{EM\ 1}} = \frac{\partial L}{\partial M_{EM\ 1}} = 0 \quad [5.4]$$

$$L_{M_{EM\ 2}} = \frac{\partial L}{\partial M_{EM\ 2}} = 0 \quad [5.5]$$

$$L_{\lambda_L} = \frac{\partial L}{\partial \lambda_L} = g(M_{EM\ 1}, M_{EM\ 2}) = 0 \quad [5.6]$$

Durch Einsetzen der ermittelten Stellen in die Zielfunktion wird das Minimum über den Funktionswert identifiziert.

Zudem wird über die beschriebene Funktion zur Allradverteilung die Kupplungsansteuerung K realisiert. Wenn das Sollmoment $M_{EM\ 1}$ der Vorderachse ungleich Null ist, wird die Kupplung geschlossen, $K = 0$. Die Kupplung wird hierbei für die Optimierung als ideal verlustfrei angenommen und bauartbedingte Synchronisationsvorgänge sowie Fahrbarkeitsrestriktionen werden vernachlässigt, um zunächst das absolute Potential hinsichtlich des Energieverbrauchs quantifizieren zu können. Der dargestellte Optimierungsalgorithmus kann auch auf radindividuelle Antriebskonzepte mit mehr als einer Maschine pro Achse angewendet werden. Hierbei setzen sich die für jeweils eine Achse formulierten Verluste additiv aus den am Leistungsfluss beteiligten Komponenten einer jeden Achse zusammen. Die resultierenden Sollmomente müssen dann jedoch auf die antreibenden Maschinen zu gleichen Teilen aufgeteilt werden, um ungewollte Giermomente zu vermeiden.

Bremskraftverteilung (bkv)

Aus Gründen der fahrdynamischen Stabilität, Robustheit sowie Einfachheit wird eine feste Bremskraftverteilung eingestellt, siehe Abschnitt 3.2.2, auch wenn hierbei die Güte der Abbremsung verringert wird. Für eine stabile Bremsung

unter Ausnutzung der Rutschgrenze an der Vorderachse und einer stabilen Hinterachse gilt nach [31] für die Bremskraftverteilung bk_v nach Gleichung [5.7]

$$bk_v = \frac{(s_h + 0.8 h_s)}{(s_v - 0.8 h_s)} \quad [5.7]$$

Mit:

s_h : Abstand der horizontalen Schwerpunktlage zur Hinterachse

s_v : Abstand der horizontalen Schwerpunktlage zur Vorderachse

h_s : Vertikale Schwerpunktlage

Übersteigt das vorgegebene Bremsmoment das maximal mögliche Drehmoment der elektrischen Maschinen oder kann die Batterie aufgrund thermischer Einflüsse oder hohem Ladezustand keine Energie aufnehmen, wird mechanisch über das konventionelle Bremssystem zugebremst. Die Kupplung an der Vorderachse ist in Rekuperationsphasen immer geschlossen, $K = 0$.

5.3. Funktionen der Reichweitenermittlung

Aufgabe der Reichweitenermittlung ist es, eine präzise Reichweite des Fahrzeugs zu prognostizieren, um dem Energiemanagement eine Steuergröße hoher Güte zur Verfügung zu stellen. Hierfür ist die genaue Kenntnis über Fahrzeug, Fahrer, Strecke sowie Umgebung notwendig. Mittels dieser Informationen kann der benötigte Leistungsbedarf für Antrieb und Nebenverbraucher hinreichend genau prädiziert werden. Die Prognose des Leistungsbedarfs stellt somit die wesentliche Herausforderung dar. Mittels dieses Leistungsbedarfs kann dann eine präzise Restreichweite unter Berücksichtigung des aktuellen Energieinhalts der Batterie ermittelt werden.

5.3.1. Berechnung der Reichweite

Die benötigten Größen zur Berechnung der Reichweite sind Energieinhalt der Batterie, Energieverbrauch des Antriebssystems b_{ant} , der Klimatisierung b_{ac} und des Niedervolt-Bordnetzes b_{bn} , wobei es sich beim Energieverbrauch hierbei um einen Streckenverbrauch in der Einheit $\frac{Wh}{km}$ handelt. Abbildung 5.8 zeigt das Funktionsschema des implementierten Algorithmus.

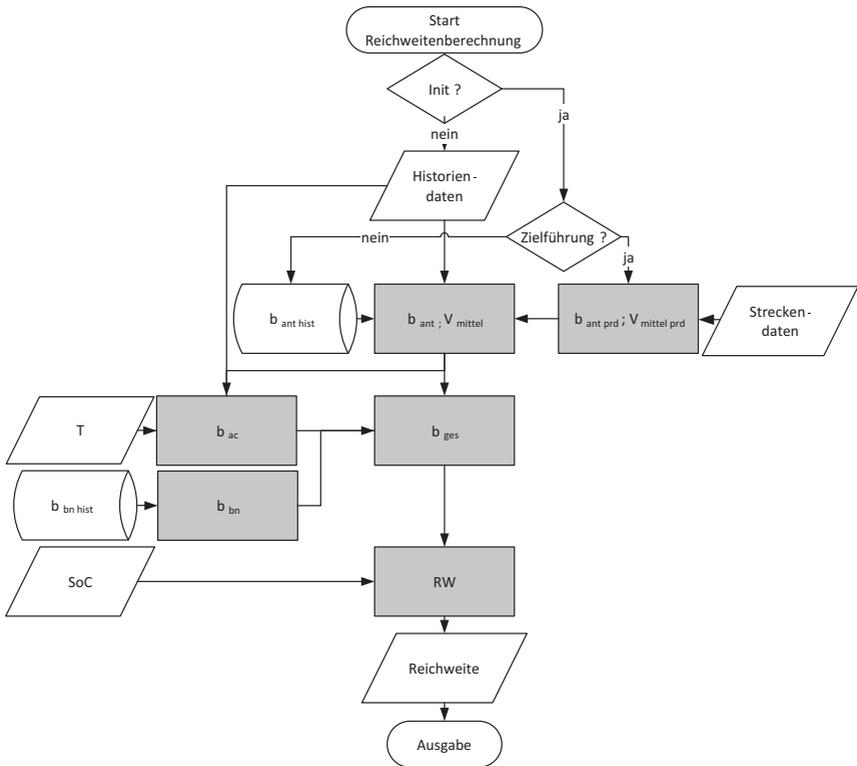


Abb. 5.8.: Ablaufplan der Reichweitenermittlung

Liegt keine Zielführung vor, muss der Energieverbrauch des Antriebssystems mittels Verbrauchsdaten aus der Historie abgeschätzt werden. Diese Daten werden entsprechend über die bisher zurückgelegte Wegstrecke im Modul $b_{ant}; V_{mittel}$

ermittelt, um diese als Schätzung für den Verbrauch pro Strecke der noch zurückzulegenden Teilstrecke zu verwenden. In diesem Modul wird sowohl der Energieverbrauch als auch die dazugehörige Durchschnittsgeschwindigkeit V_{mittel} berechnet.

Liegt hingegen eine Zielführung vor, kann der Antriebsverbrauch b_{ant} auf Basis der prädictierten Radleistung P_{prd} und der zurückzulegenden Strecke s gemäß Gleichung [5.8] mit Hilfe von Streckendaten prädictiv abgeschätzt werden, siehe Abschnitt 5.3.2.

$$b_{ant} = \frac{\int_0^{t_{end}} P_{prd} dt}{s} \quad [5.8]$$

Die Energieverbräuche der Nebenverbraucher (b_{ac} , b_{bn}) werden aus einem Leistungsbedarf und einer mittleren Geschwindigkeit V_{mittel} nach Gleichung [5.9] errechnet. Die Abschätzung des Energiebedarfs zur Innenraumklimatisierung wird im Modul b_{ac} auf Basis einer außentemperaturabhängigen Leistung $\overline{P_{ac}}$ durchgeführt. Da die Sonneneinstrahlung nicht in jedem Fahrzeug sensiert wird, somit auch nicht als Eingangsgröße zur Verfügung steht, wird hierbei eine in Abhängigkeit der Temperatur mittlere Sonneneinstrahlung angenommen. Die Durchschnittsgeschwindigkeit V_{mittel} wird hierzu im Modul $b_{ant}; V_{mittel}$ ermittelt.

$$b_{ac} = \frac{\overline{P_{ac}}}{V_{mittel}} \quad [5.9]$$

Die Reichweite RW bestimmt sich nun nach Gleichung [5.10] aus dem aktuell nutzbaren Energieinhalt der Traktionsbatterie in Form des relativen SOC , dem maximal nutzbaren Energieinhalt E_{max} und dem Energieverbrauch des Gesamtfahrzeugs, welcher sich aus den ermittelten Einzelverbräuchen zusammensetzt.

$$RW = \frac{E_{max} SOC}{b_{ant} + b_{ac} + b_{bn}} \quad [5.10]$$

5.3.2. Prädiktion der Antriebsleistung

Mit Hilfe von Streckendaten soll in Zielführung die Antriebsleistung für die zu befahrende Strecke und die Durchschnittsgeschwindigkeit $V_{mittel\ prd}$ im Modul $b_{ant\ prd}; V_{mittel\ prd}$ prädiziert werden. Hierbei stehen Informationen über gesetzliche Geschwindigkeitslimits V_{lim} , das topographische Höhenprofil h und Kurvenkrümmungen κ zur Verfügung. Die Berechnung des Leistungsbedarfs P_{prd} wird physikalisch auf Basis der Zugkraftgleichung [5.11]

$$\begin{aligned} P_{prd} &= F_{zug\ prd} \frac{V_{prd}}{\bar{\eta}} \\ &= \left(m_{fzg} (a_{x\ prd} + g f_{roll} + g \sin(\beta)) + \frac{1}{2} \rho c_w A V_{prd}^2 \right) \frac{V_{prd}}{\bar{\eta}} \quad [5.11] \end{aligned}$$

und eines mittleren Triebstrangwirkungsgrades $\bar{\eta}$ durchgeführt. Bei der Abbildung des Radwiderstands werden der Vorspurwiderstand sowie Lagerreibung und Restbremsmomente nicht berücksichtigt, da sie nach [63] in erster Näherung gegenüber dem Rollwiderstand als Haupteinflussgröße vernachlässigbar sind.

Die für Gleichung [5.11] zu bestimmenden Größen sind der Geschwindigkeitsverlauf V_{prd} , die hieraus resultierende Beschleunigung $a_{x\ prd}$ und der Verlauf des Steigungswinkels β . Bei Gefällestrecken und Verzögerungen ergibt sich somit nach Gleichung [5.11] eine negative Leistung, welche als Rekuperationsleistung angenommen werden kann und somit den Energiebedarf reduziert.

Ermittlung von V_{prd}

Das zu prädizierende Geschwindigkeitsprofil wird aus den gesetzlichen Geschwindigkeitslimits abgeleitet. Dieses liegt als wegabhängiges Profil vor. Es handelt sich zunächst aufgrund des abschnittswisen Charakters um ein unstetiges Profil. Auf Basis von Kurvenkrümmungen und einer für den Fahrer akzep-

tablen Querbesehleunigung a_y und der Kurvenkrümmung κ können jeweilige Kurvengeschwindigkeiten V_k gemäß Gleichung [5.12] ermittelt werden.

$$V_k = \sqrt{\frac{a_y}{\kappa}} \quad [5.12]$$

Diese werden den gesetzlichen Geschwindigkeitslimits überlagert und in das Geschwindigkeitsprofil eingetragen.

An Übergängen von zwei aufeinanderfolgenden Geschwindigkeitslimits bzw. Übergängen zu Kurvengrenzgeschwindigkeiten wird mittels einer charakteristischen mittleren Beschleunigung a_x bzw. Verzögerung b_x ein linearer Übergang vom einen auf das andere Geschwindigkeitslimit bzw. zur Kurvengrenzgeschwindigkeit erzeugt.

Als letzter Schritt wird in Phasen konstanter Geschwindigkeitslimits eine charakteristische Schwankung aufmoduliert. Diese wird mittels einer geschwindigkeitsabhängigen Frequenz f_V und Amplitude y_V beschrieben.

Die hinterlegten Frequenzen und Amplituden zur Modulation der Geschwindigkeitsschwankungen sowie die mittleren Beschleunigungen und Verzögerungen entstammen einer Datenbank. Diese charakteristischen Werte für y_V sowie f_V sowie a_x , b_x wurden im realen Straßenverkehr aus über 170 Messfahrten ermittelt und zu statistischen Werten aggregiert. Die Größen y_V , f_V können hierbei mit Hilfe einer FFT²-Analyse aus den messtechnisch erfassten Fahrzeuggeschwindigkeiten als dominierende Werte einer überlagerten Schwingung ermittelt werden.

Abbildung 5.9 zeigt qualitativ das oben beschriebene Verfahren zur Prädiktion des Geschwindigkeitsverlaufs mit Hilfe von Streckeninformationen und charakteristischen Größen.

² Fast Fourier Transformation

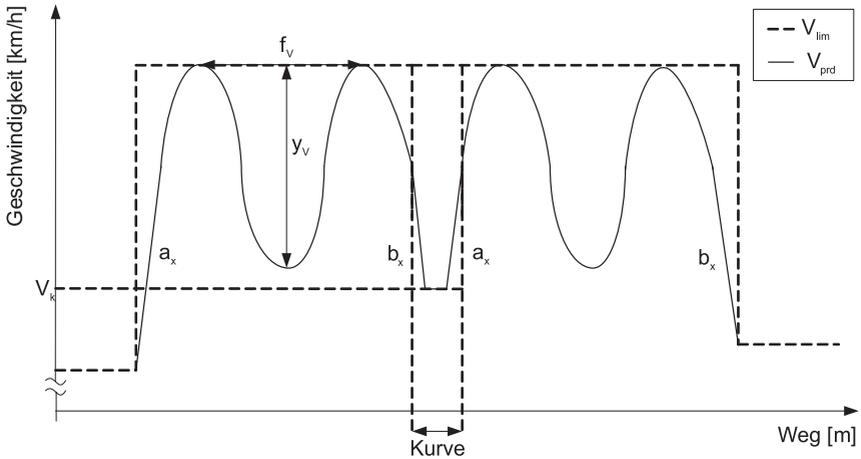


Abb. 5.9.: Prädiktion des Geschwindigkeitsverlaufs zur Ermittlung des voraussichtlichen Energiebedarfs bis zum Zielort

Ermittlung von $a_{x\ prd}$

Aus dem prädiizierten Geschwindigkeitsprofil V_{prd} wird mittels Differenzieren nach Gleichung [5.13] abschnittsweise das prädiizierte Beschleunigungsprofil erzeugt. Hierfür wird das wegbasierte Geschwindigkeitsprofil zuvor in ein zeitbasiertes überführt. Die Abschnitte können analog dem Geschwindigkeitsverlauf aneinander gefügt werden.

$$a_{x\ prd} = \frac{dV_{prd}}{dt} \quad [5.13]$$

Ermittlung von β

Mittels der wegbabhängigen Information über den Höhenverlauf $h_{(x)}$ kann der Steigungswinkel β nach Gleichung [5.14] ermittelt werden. Wobei dieser sowohl positiver als auch im Falle von Gefällestrecken negative Werte annehmen kann.

$$\beta = \arctan\left(\frac{\Delta h}{\Delta x}\right) \quad [5.14]$$

5.3.3. Prädiktion der Klimatisierungsleistungen

Der Leistungsbedarf des Klimatisierungssystems kann, wie in Abschnitt 3.2.3 dargestellt, auf Basis der Außentemperatur für den stationären Zustand analytisch abgeschätzt werden. Da jedoch auch instationäre Vorgänge zum erstmaligen Aufheizen bzw. Abkühlen der Fahrzeugkabine energetisch relevant sind, wird zur präzisen Prognose ein neuronales Netz eingesetzt, welches die aktuellen Umgebungsbedingungen zur Prädiktion des Energieverbrauchs berücksichtigen kann, um direkt zu Fahrtbeginn eine verlässliche Reichweitenberechnung durchführen zu können. Eine detaillierte Beschreibung und Ausführung folgt im Abschnitt 7.2.

Während des Fahrbetriebs kann dann eine Ermittlung des Energieverbrauchs auf Basis von aktuellen Daten durchgeführt werden, um die Adaptionfähigkeit sicherzustellen. Die Berechnung des Klimatisierungsverbrauchs wird im Modul b_{ac} gemäß Abbildung 5.8 durchgeführt.

6. Virtuelle Gesamtfahrzeugumgebung

Mit Hilfe einer virtuellen Gesamtfahrzeugumgebung sollen zum einen die in Kapitel 3 dargelegten Untersuchungen zum Antriebskonzept durchgeführt werden und zum anderen die in Kapitel 5 beschriebene Funktionsarchitektur simulativ untersucht werden, um einzelne Betriebsstrategie-Maßnahmen zu bewerten und deren Potentiale quantifizieren zu können. In diesem Kontext wird in Kapitel 7 eine Methode zur Betriebsstrategieoptimierung und zur Entschärfung des Spannungsfelds bestehend aus Reichweiten-, Dynamik- sowie Komfortanforderungen vorgestellt. Es wird ein Fahrzeugmodell benötigt, welches alle relevanten Energieflüsse im Fahrbetrieb gesamthaft abbildet und zusätzlich eine realitätsnahe Bewertung der Fahrzeugdynamik sowie des thermischen Komforts in der Fahrzeuggabine gewährleistet.

Eingangs wird hierzu ein modular aufgebautes Fahrzeugmodell vorgestellt, welches die oben beschriebenen Anforderungen erfüllt. Im Anschluss wird die Ableitung eines Referenzfahrzeugs erläutert und die Dimensionierung der Teilsysteme ausgeführt. Es folgt eine Validierung des Referenzmodells mittels Messdaten eines realen Versuchsfahrzeugs. Hieran schließt sich die Darstellung einer SiL¹-Umgebung an, welche eine Kopplung des Gesamtfahrzeugmodells mit der Funktionsarchitektur aufzeigt, um diese virtuell erproben und in ihrer Funktionsweise analysieren zu können.

¹ Software in the Loop

6.1. Gesamtfahrzeugmodell

Das Gesamtfahrzeug gliedert sich in die folgenden Teilmodelle:

- Antriebssystem
- Innenraum und Klimatisierung
- Niedervolt-Bordnetz

6.1.1. Antriebssystem

Das Antriebssystem wird mit Hilfe des Simulationswerkzeugs AVL Cruise[©] abgebildet. Es handelt sich hierbei um eine reine Längsdynamik-Simulation. Die Modellbildung ist modular durchzuführen, so dass die Komponenten des elektrischen Antriebssystems separat abgebildet werden können. Um die gesamte Wirkungsgradkette der jeweiligen Topologie und den Einfluss auf den Energieverbrauch darzustellen, wird jede Komponente durch ein Verlustleistungskennfeld beschrieben. Ebenso wird eine Verbindung der Komponenten bezüglich der mechanischen und elektrischen Energieflüsse innerhalb des elektrischen Antriebssystems hergestellt. Hierbei werden entsprechende physikalische Gesetzmäßigkeiten insbesondere für elektrische Maschinen, Traktionsbatterie sowie Getriebe, wie in Abschnitt 2.1 dargestellt, berücksichtigt.

Die Fahrwiderstände werden in Form von Luft-, Beschleunigungs- und Rollwiderstand sowie zyklusabhängig auch durch den Steigungswiderstand abgebildet. Hierdurch ist es möglich, eine Quantifizierung des Energieverbrauchs unter Vorgabe repräsentativer Fahrzyklen durchzuführen.

Innerhalb der Simulationsumgebung AVL Cruise[©] steht zusätzlich ein Fahrermodell zur Verfügung, welches auf Basis einer zyklusabhängigen Geschwindigkeitsvorgabe die Stellgrößen des Fahr- und Bremspedals regelt. Somit ist neben der physikalischen Abbildung des Antriebssystems und der Abbildung der Fahrwiderstände auch der Fahrer selbst in AVL Cruise[©] enthalten.

6.1.2. Innenraum und Klimatisierung

Bei jedem physikalischen Modell gilt es, die realen Verhältnisse möglichst genau abzubilden. Es müssen die relevanten Einflussfaktoren aufgenommen und extrahiert werden, gleichzeitig aber Komplexität und Umfang auf das Wesentliche reduziert werden. Hinsichtlich der Modellierung des Fahrzeuginnenraums sind verschiedene Ansätze bekannt. Diese unterscheiden sich vor allem in der Modellierungstiefe und Simulationslaufzeit. Es kann eine Einteilung in empirische (black box) [103], 1-Zonen [47], Mehr-Zonen [64] sowie numerische dreidimensionale CFD²-Ansätze [20] bis hin zu gekoppelten System-Simulationen [80] als Kombinationen der genannten Möglichkeiten mit entsprechenden Vor- und Nachteilen getroffen werden [96].

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein eindimensionales 2-Zonen-Innenraummodell implementiert, welches sowohl die Bewertung des thermischen Komforts in der Fahrzeugkabine als auch die Quantifizierung des Energieverbrauchs des Klimatisierungssystems erlaubt. Mit 2-Zonen-Modell ist die separate Abbildung des Kopf- und Fussraums als entsprechende Luftvolumina gemeint.

Das Modell beinhaltet neben der Abbildung relevanter thermodynamischer Zusammenhänge und bauteilbedingter Wärmeübertragungsmechanismen auch die Modellierung einer vereinfachten Klimaregelung. Dies gewährleistet die Darstellung realitätsnaher Temperaturverläufe in der Fahrzeugkabine sowie dynamischer Energieflüsse im Fahrbetrieb. Zudem werden im Modell alle relevanten Bauteiltemperaturen der Karosserie bestimmt, um konvektive Wärmeübergänge und Einflüsse durch Wärmestrahlung lokal in guter Näherung abzubilden und zugleich eine mittlere Strahlungstemperatur zur Bestimmung des *PMV*-Index gemäß Gleichung [2.30] zur Verfügung stellen zu können.

Die Umsetzung erfolgt in der Umgebung Matlab/Simulink[©]. Mit Hilfe dieses Modells ist es möglich, nicht nur statische, thermisch eingeschwungene Zustände, sondern auch instationäre Aufheiz- und Abkühlvorgänge abzubilden

² Computer Fluid Dynamics

und zu untersuchen, welche für den thermischen Komfort und den Energieverbrauch gleichermaßen von großer Bedeutung sind. Hierin besteht der wesentliche Mehrwert zum rein analytischen Ansatz der Voruntersuchungen nach Abschnitt 3.2.3.

Modellbildung

Das Modell bilanziert nach Abbildung 6.1 separat für jedes Karosserieelement i (Verglasungen, Dach, Seitenelemente, Unterboden) die auftretenden Wärmeströme für Strahlung $\dot{Q}_{strahl,i}$ unter Vorgabe der Umgebungstemperatur T , Absorption durch Sonneneinstrahlung $\dot{Q}_{abs,i}$ sowie den materialspezifischen Wärmedurchgang $\dot{Q}_{durch,i}$ gemäß der Gleichungen [6.1]-[6.4].

$$\dot{Q}_{ges,i} = \dot{Q}_{strahl,i} + \dot{Q}_{abs,i} + \dot{Q}_{durch,i} \quad [6.1]$$

Mit:

$$\dot{Q}_{strahl,i} = \varepsilon \sigma A_i \left(T_{bt,i}^4 - T^4 \right) \quad [6.2]$$

$$\dot{Q}_{abs,i} = \alpha_{abs} A_i \dot{q}_{sone} \quad [6.3]$$

$$\dot{Q}_{durch,i} = k A_i \Delta T = \frac{A_i}{\frac{1}{\alpha_{i,i}} + \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{a,i}}} \Delta T \quad [6.4]$$

Nach Gleichung [6.4] ist die freie Konvektion als weiterer Wärmeübertragungsmechanismus ebenfalls in der Abbildung des Wärmedurchgangs enthalten.

Durch die Bilanzierung der Wärmeströme können die einzelnen Bauteiltemperaturen $T_{bt,i}$ als kalorische Mitteltemperatur mit Hilfe der Bauteilmasse $m_{bt,i}$ und der spezifischen Wärmekapazität c_p $m_{bt,i}$ nach Gleichung [6.5] ermittelt werden. Die instationäre Wärmeleitung kann hierdurch in eine gewöhnliche Differentialgleichung 1. Ordnung überführt werden [17].

$$\Delta T_{bt,i} = \int_0^t \frac{\dot{Q}_{ges,i}}{m_{bt,i} c_p} dt \quad [6.5]$$

Für Emmisions- und Absorptionskoeffizient ε bzw. α_{abs} als wesentlichen Einflussparameter bezüglich der Wärmestrahlung nach Gleichung [6.2] sowie der

Absorption von Sonnenstrahlung nach Gleichung [6.3] werden Werte für in der Automobilindustrie übliche Lacke der Farbe Schwarz angenommen. Geschichtete Komponenten, im Speziellen das Dach, Seiten und der Unterboden, können in ihrem wärmeübertragenden Verhalten abgebildet werden. Hierbei wirken isolierende Luftschichten zwischen Außen- und Innenhülle. Diese werden mittels eines weiteren konvektiven Wärmeübergangs zwischen Außen- und Innenhülle und mittels Wärmedurchgang nach Gleichung [6.4] berücksichtigt. Der Wärmeübertragungsvorgang wird als mehrschichtige ebene Platte nach [58] betrachtet. Bei der Modellierung der Fahrzeugkabine nach Abbildung 6.1 werden insbesondere aus Gründen der Rechenzeit folgende Annahmen bzw. Vereinfachungen getroffen:

- Im Fahrzeuginnenraum wird der Wärmeaustausch zwischen Bauteilen und der Luft ausschließlich als freie Konvektion abgebildet, da diese der Hauptaustauschmechanismus darstellt
- Die Klimatisierung als erzwungene Konvektion steht ausschließlich mit dem Kopfraum im Austausch
- Kopf- und Fußraum sind über freie Konvektion gekoppelt
- Das Interieur wird als ein aggregierter Masseknoten abgebildet
- Das Interieur ist über freie Konvektion mit dem Fußraum gekoppelt
- Das Interieur absorbiert den Anteil der transmittierten Sonneneinstrahlung \dot{Q}_{trans} (siehe Gleichung [6.6])

Durch die Verglasung tritt zudem ein Großteil der Sonneneinstrahlungsintensität \dot{q}_{sonne} in Form von Transmission in Abhängigkeit des Einfallswinkels der Sonne relativ zur Scheibe α_s über die entsprechenden projizierten Verglasungsflächen $A_{proj,k}$ der Anzahl n_s in den Fahrzeuginnenraum nach Gleichung [6.6] ein und wird vom Interieur absorbiert.

$$\dot{Q}_{trans} = \sum_{k=1}^{n_s} A_{proj,k} \tau_k \dot{q}_{sonne} \quad [6.6]$$

Die projizierten Flächen werden nach Gleichung [6.7] bestimmt.

$$A_{proj,k} = A_k \cos(\alpha_s). \tag{6.7}$$

Nach Abbildung 6.1 werden als relevante Karosseriebauteile die Wärmeströme für Dach und Dachhimmel, Seiten und Seitenverkleidungen, Boden und Unterbodenverkleidung UBV, sowie Front-, Seiten- und Heckscheibe aufgestellt und entsprechend implementiert.

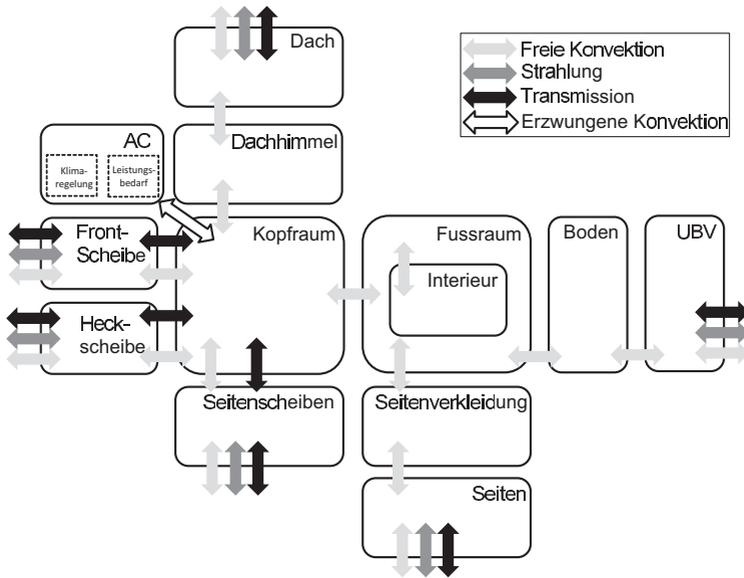


Abb. 6.1.: Bilanzierung der Wärmeströme am 2-Zonen Innenraummodell nach [13]

Abbildung der Klimaregelung

Die Klimaregelung wird im Modul AC nach Abbildung 6.1 auf Basis eines Volumenstromreglers der Luft \dot{m}_{zu} mittels eines PID-Reglers realisiert. Regelgröße ist hierbei die außentemperaturabhängige Zieltemperatur T_{Ziel} nach Abbildung 2.5. Dieser Regelung ist eine Steuerung für die Ausblas- und Verdampfertemperaturen ($T_{Ausblas}$, $T_{Verdampfer}$) unterlagert. Diese werden ebenfalls in Abhängigkeit der Außentemperatur $T_{Umgebung}$ als Kennlinien vorgegeben. Die An-

sauglufttemperatur T_{Ansaug} kann durch die Stellung der Umluftklappe verändert werden. Auch hierfür ist eine Funktion in Abhängigkeit der Außentemperatur hinterlegt. Die modelltechnische Umsetzung ist in Abbildung 6.2 dargestellt.

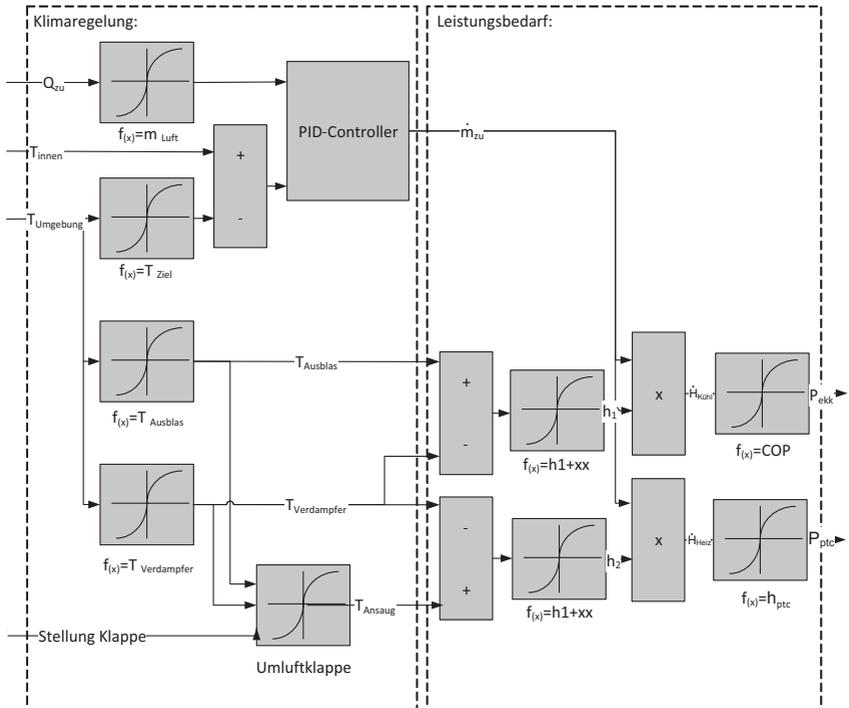


Abb. 6.2.: Abbildung der Klimaregelung und der Berechnung des Leistungsbedarfs im Modul AC

Der luftseitige Leistungsbedarf \dot{Q}_{klima} wird mittels des Luftvolumenstroms \dot{m}_{zu} und der spezifischen Enthalpie h nach Gleichung [6.8] ermittelt.

$$\dot{Q}_{\text{klima}} = \dot{m}_{zu} h \quad [6.8]$$

Hierbei wird neben dem Leistungsbedarf zum Kühlen und Heizen ($\dot{Q}_{\text{klimakuehl}}$, $\dot{Q}_{\text{klimaheiz}}$) des Innenraumvolumens auch der Energiebedarf zur Luftentfeuch-

tion berücksichtigt. Hierfür werden die entsprechenden spezifischen Enthalpien h an Verdampfer und Heizungswärmetauscher mit Hilfe eines hinterlegten Mollier h_x -Diagramms ($h_1 + x x$) berechnet.

Die elektrischen Leistungen können für den elektrischen Klimakompressor P_{ekk} mit Hilfe eines COP^3 -Kennfeldes und für die PTC-Heizung P_{ptc} mittels eines Wirkungsgradkennfeldes gemäß den Gleichungen [6.9] und [6.10] ermittelt werden.

$$P_{ekk} = \dot{Q}_{klimakuehl} \frac{1}{COP} \quad [6.9]$$

$$P_{ptc} = \dot{Q}_{klimaheiz} \frac{1}{\eta_{ptc}} \quad [6.10]$$

Durch das beschriebenen 2-Zonen-Innenraummodell mit einer Aufteilung der Luftvolumina in Kopf- und Fussraum ist es möglich, sowohl den Energiebedarf des Klimatisierungssystems, als auch den thermischen Komfort in der Fahrzeugkabine unter Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen (Außentemperatur, Luftfeuchte sowie Sonneneinstrahlung) realitätsnah abzubilden.

6.1.3. Niedervolt-Bordnetz

Um neben den Hochvolt-Verbrauchern respektive dem Antriebs- und Klimatisierungssystem auch weitere Niedervolt-Verbraucher abbilden zu können, wurden Bordnetz-Messungen an einem Versuchsfahrzeug durchgeführt. Die Messungen werden entsprechend hinsichtlich des zeitbasierten Leistungsverlaufs einer jeden Komponente analysiert, um das Verbraucherverhalten empirisch in der Simulation zu berücksichtigen. Es werden die folgenden Verbraucher als zeitbasiertes Leistungsverhalten in die Simulation überführt:

³ Coefficient of Performance: Verhältnis der erzeugten Kälteleistung zur eingesetzten el. Leistung

- Sitzheizung (P_{SitzHzg})
- Sitzlüftung ($P_{\text{SitzLueft}}$)
- Lenkradheizung (P_{LenkHzg})
- Scheibenheizung Heck ($P_{\text{ScheibenHzgHeck}}$)
- Scheibenheizung Front ($P_{\text{ScheibenHzgFront}}$)

Im Modell kann somit virtuell ein Niedervolt-Komfortverbraucher über ein Status-Bit aktiviert werden. Dessen Leistungsbedarf wird dann nach Abbildung 6.3 am DC/DC-Wandler zusätzlich abgefordert. Neben den aktivierbaren Verbrauchern wird auch eine Bordnetz-Grundlast in Abhängigkeit der Außentemperatur T abgebildet. Die Messungen sind der Abbildung C.1 des Anhangs C zu entnehmen.

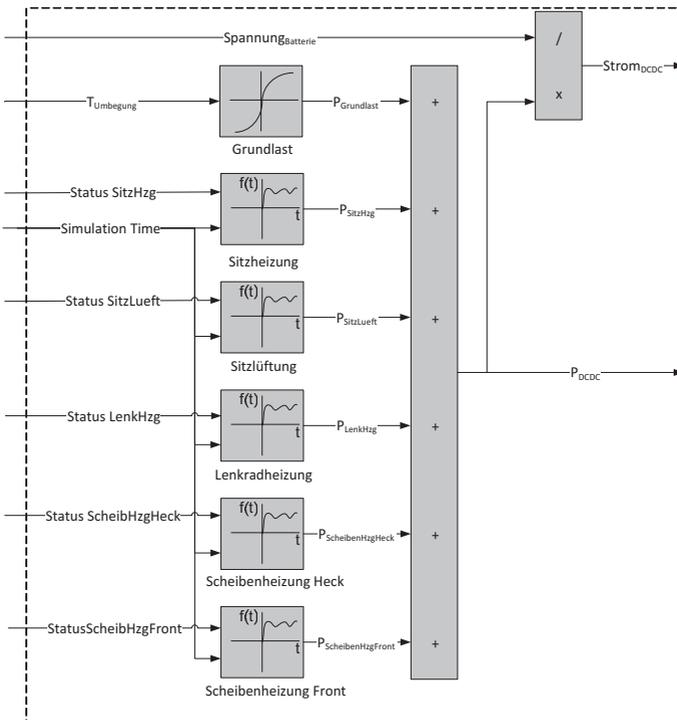


Abb. 6.3.: Modellierung des Niedervolt-Bordnetzes

6.2. Ableitung eines Referenzfahrzeugs

Die Teilmodelle für Antriebssystem, Innenraum und Klimatisierung sowie Niedervolt-Bordnetz werden gemäß Abbildung 6.4 zu einem Gesamtfahrzeugmodell verknüpft.

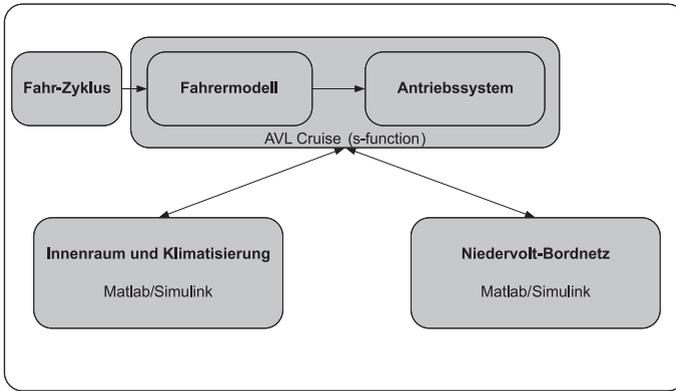


Abb. 6.4.: Aufbau des Gesamtfahrzeugmodells

Die Hochvolt-Traktionsbatterie ist im Antriebssystem enthalten. Die Ströme des Klimatisierungssystems und des Niedervolt-Bordnetzes werden an das Antriebsstrangmodell übergeben, um als zusätzlicher Strombedarf an den Batterieklammern abgefordert werden zu können. Somit können ganzheitliche energetische Untersuchungen unter Vorgabe des Fahr-Zyklus, der Umgebungsbedingungen und der Einstellungen jeweiliger Verbraucher durchgeführt werden.

6.2.1. Dimensionierung und Ausführung des Antriebssystems

Im Folgenden soll die Ableitung eines Referenzfahrzeugs dargestellt werden. Dieses Referenzfahrzeug wird im weiteren Verlauf in Kapitel 7 zur Analyse der Betriebsstrategie Anwendung finden.

In Kapitel 3 konnte mit Hilfe der entwickelten Methodik zur Topologiebewertung gezeigt werden, dass eine achsindividuelle Topologie mit je einer perma-

nenterregten Synchronmaschine pro Achse und einer Kupplung an der Vorderachse (Top IV) das verbrauchsgünstigste Antriebskonzept darstellt. Daher werden die folgenden Untersuchungen auf Basis dieser Topologie bewertet. Des Weiteren konnte in Abschnitt 3.1.3 dargelegt werden, dass sich aufgrund der fahrzeugsegmentabhängigen Anforderungen diese Topologie gerade bei performanteren Sportwagen besonders eignet. Daher wird das Fahrzeugmodell entsprechend eines Sportwagens parametrisiert, um die folgenden Untersuchungen an dessen Beispiel durchzuführen. Tabelle 6.1 zeigt die Parametrierung des sportwagentypischen Antriebsstrangmodells.

Tab. 6.1.: Parametrierung des Fahrzeugmodells

| Parameter | Wert | Einheit |
|---------------------------|-------------|-------------------|
| Leergewicht | 1677 | [kg] |
| Rollwiderstandsbeiwert | 0.011 | [-] |
| Luftwiderstandsbeiwert | 0.32 | [-] |
| Querschnittsfläche | 1.99 | [m ²] |
| Dyn. Reifenhalmmesser | 0.3 | [m] |
| El. Leistung Batterie | 190 | [kW] |
| El. Leistung pro Maschine | 90 | [kW] |
| Anzahl an el. Maschinen | 2 | [-] |
| Antriebsart | 4WD (TopIV) | [-] |

6.2.2. Dimensionierung des Klimasystems

Wie bereits in Abschnitt 2.2.1 erörtert, ist das thermische Komfortempfinden stark abhängig von der aktuellen Innenraumtemperatur und den umgebenden Strahlungstemperaturen der umschließenden Bauteile. Nach DIN 1946 [2] werden Richtwerte sowohl für den Winter- als auch Sommerbetrieb zur Einstellung der Innenraumtemperatur dargestellt: Im Winterbetrieb, bei einer Außentemperatur von -20°C , sollte nach 30 Minuten eine mittlere Innenraumtemperatur

von 15°C erreicht werden. Im Sommerbetrieb sollte bei einem konditionierten Fahrzeug bei einer Sonnenintensität von 1000 Watt pro Quadratmeter und einer Außentemperatur von 40°C nach 30 Minuten eine Temperatur im Kopfraum von höchstens 25°C herrschen.

Zur Gewährleistung dieser Anforderungen müssen der elektrische Klimakompressor und die PTC-Heizung hinsichtlich ihres Leistungsvermögens entsprechend dimensioniert werden. Die Dimensionierung hat somit direkten Einfluss auf den thermischen Komfort, aber auch auf den resultierenden Energieverbrauch respektive die Reichweite. Tabelle 6.2 zeigt die Parametrierung des Innenraummodells zur Erfüllung der in DIN 1946 [2] gestellten Anforderungen.

Tab. 6.2.: Parametrierung des Innenraummodells

| Parameter | Wert | Einheit |
|--------------------------|------|-------------------|
| Volumen Innenraum | 1.5 | [m ³] |
| Masse Interieur | 150 | [kg] |
| El. Leistung Kompressor | 5000 | [W] |
| El. Leistung PTC-Heizung | 8000 | [W] |

6.3. Modellvalidierung

Eine Validierung ist im allgemeinen Sinne nach DIN EN ISO 8402 [4] das „[...] Bestätigen aufgrund einer Untersuchung und durch Bereitstellung eines Nachweises, dass die besonderen Forderungen für einen speziellen, beabsichtigten Gebrauch erfüllt worden sind.“ Die Modellvalidierung des Antriebsstrang- und Innenraummodells soll nach dargestellter Norm vollzogen werden. Es wird daher im Folgenden ein Abgleich der Modelle respektive der relevanten Modellgrößen mit entsprechenden Messdaten eines Versuchsfahrzeugs, welches sich an das virtuelle Referenzfahrzeug anlehnt, durchgeführt.

Aufgrund der sehr hohen Anzahl an zu vergleichenden Stützstellen (>10.000 , siehe Abbildungen 6.5 und 6.6) kann zur Quantifizierung der Modellgüte das Bestimmtheitsmaß R^2 als statistische Bewertungsgröße herangezogen werden. Der Wert des Bestimmtheitsmaßes nach Gleichung [6.11] entspricht dem Verhältnis von erklärter Varianz zu beobachteter Varianz. Der Wertebereich von R^2 liegt im Intervall $[0 : 1]$. Indikatorwerte mit $R^2 \geq 0.9$ zeugen von einer sehr hohen Korrelation der zu vergleichenden Datenreihen \vec{X} und \vec{Y} .

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_d} (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^{n_d} (Y_i - \bar{Y})^2} = \frac{\sum_{i=1}^{n_d} (X_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^{n_d} (Y_i - \bar{Y})^2} \quad [6.11]$$

Mit:

\vec{X} : Datenreihe aus Modell

\vec{Y} : Datenreihe aus Messung

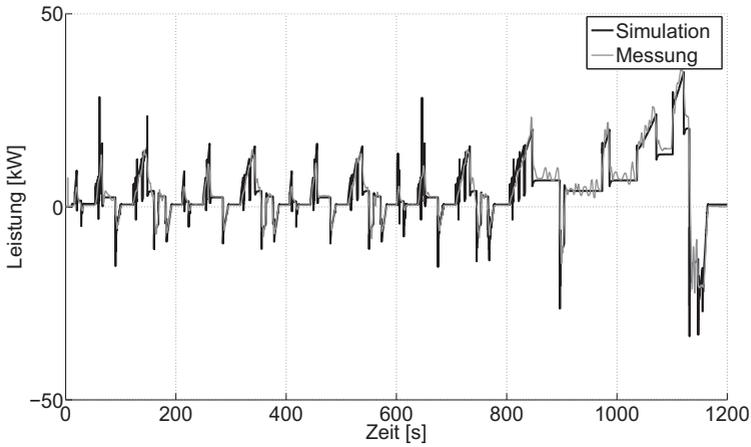
\bar{Y} : Mittelwert aus \vec{Y}

n_d : Länge der Datenreihe ($|\vec{X}|$ bzw. $|\vec{Y}|$)

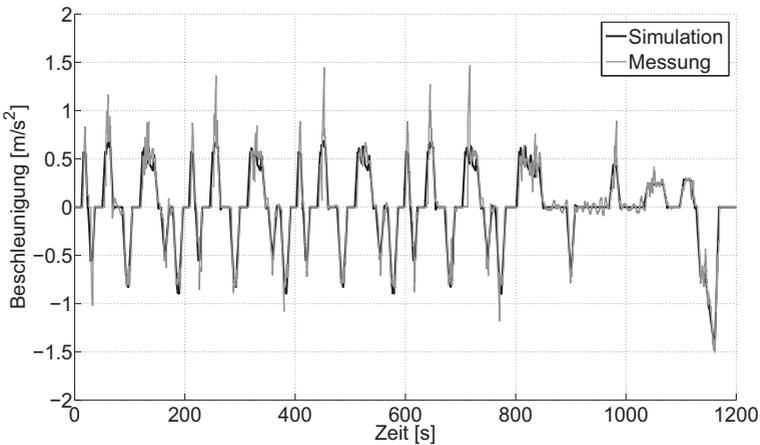
6.3.1. Modellvalidierung des Antriebsstrangmodells

Das Antriebsstrangmodell wird sowohl hinsichtlich des energetischen Verhaltens, als auch der Abbildung der Längsdynamik untersucht. Der Abgleich mit Messdaten eines dem Modell entsprechenden Versuchsfahrzeugs erfolgt im NEFZ-Zyklus, da dieser messtechnisch auf dem Rollenprüfstand reproduzierbar absolviert werden kann. Abbildung 6.5(a) zeigt zur Beurteilung des energetischen Verhaltens die Batterieleistung. Die Längsbeschleunigung nach Abbildung 6.5(b) dient hingegen der Bewertung der Längsdynamik.

Sowohl der simulierte Leistungs- als auch der Beschleunigungsverlauf sind nahezu identisch zur Referenzmessung. Im Beschleunigungsverlauf sind bei den Anfahrvorgängen teilweise kurzzeitige Beschleunigungsspitzen zu erkennen, welche das Modell nicht aufweist, da das Fahrermodell in der Simulation im



(a) Abgleich der Batterieleistung



(b) Abgleich der Längsbeschleunigung

Abb. 6.5.: Validierung des Antriebssystems im NEFZ

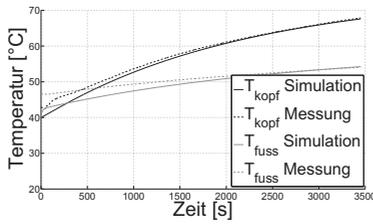
Vergleich zur Referenzmessung immer ideal und exakt reproduzierbar der Sollvorgabe nachkommt. In der Referenzmessung hingegen folgt ein realer Fahrer der Sollvorgabe mittels Fahrpedaleingabe, woraus sich die zu erkennenden Be-

schleunigungsspitzen ergeben können. Im Überland-Teil des NEFZ (ab Sekunde 800) zeigt die Messung leichte Abweichungen mit schwingendem Charakter. Dies kann auf das regelnde Verhalten des realen Fahrers mit dem Fahrpedal zurück geführt werden, welches sich sowohl auf die Beschleunigung als auch die Leistung auswirkt.

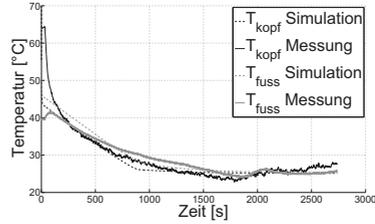
Beim Vergleich der Batterieleistung des Antriebsstrangmodells und der Messung ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0.99$. Beim Abgleich der Längsbeschleunigung kann ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0.93$ erzielt werden. Aufgrund der sehr hohen Anzahl an vergleichbaren Stützstellen zwischen Simulation und Messung wird auf die Angabe des Signifikanzniveaus mittels F-Test verzichtet.

6.3.2. Modellvalidierung des Innenraummodells

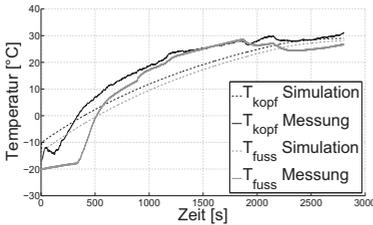
Da nach DIN 1946 gemäß Abschnitt 6.2 für den Kühl- und Heizbetrieb Komfortempfehlungen gegeben sind, werden analog der Norm die Kopf- und Fusstemperatur im Kühlbetrieb bei $+40^\circ\text{C}$, sowie im Heizbetrieb bei -20°C betrachtet. Zusätzlich wird die passive Aufheizung der Fahrzeuggabine unter Sonneneinstrahlung mit $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ bei deaktiviertem Klimasystem bewertet, welche zur Ermittlung der Starttemperaturen im Sommerbetrieb relevant ist. Abbildung 6.5 zeigt die ermittelten Verläufe der Modellgrößen und die Verläufe von einer aus dem Klima-Windkanal entstammenden Messreihe. Das als Referenz dienende Versuchsfahrzeug entspricht hinsichtlich Parametrierung dem 2-Zonen-Innenraummodell. Analog der Modellvalidierung des Antriebsstrangmodells wird das Bestimmtheitsmaß als skalare Bemessungsgröße der Modellgüte betrachtet. Die Bewertung ist in Tabelle 6.3 dargestellt. Auch für das 2-Zonen-Innenraummodell kann eine hohe Korrelation zu den Referenzmessungen mit $R^2 \geq 0.9$ konstatiert werden. Aufgrund der sehr hohen Anzahl an vergleichbaren Stützstellen zwischen Simulation und Messung wird auch an dieser Stelle auf die Angabe des Signifikanzniveaus mittels F-Test verzichtet.



(a) Passive Aufheizung bei 40°C



(b) Aktive Abkühlung bei 40°C



(c) Aktive Aufheizung bei -20°C

Abb. 6.6.: Validierung des Innenraummodells

Tab. 6.3.: Bestimmtheitsmaß zur Bewertung der Modellgüte des Innenraummodells

| Fall | Größe | R ² |
|--------------------|-------------------|----------------|
| Passive Aufheizung | T _{kopf} | 0.99 |
| | T _{fuss} | 0.98 |
| Aktive Abkühlung | T _{kopf} | 0.96 |
| | T _{fuss} | 0.98 |
| Aktive Aufheizung | T _{kopf} | 0.92 |
| | T _{fuss} | 0.94 |

6.4. Virtuelle Software-in-the-Loop-Testumgebung

Durch Kopplung des validierten Fahrzeugmodells mit den Schnittstellen zur Funktionsarchitektur ist es möglich, definierte Zyklen unter Vorgabe der Umgebungsbedingungen virtuell zu absolvieren und die Funktionsarchitektur in-

the-loop⁴ zu erproben. Abbildung 6.7 zeigt die Verknüpfung von Gesamtfahrzeugmodell und Funktionsarchitektur.

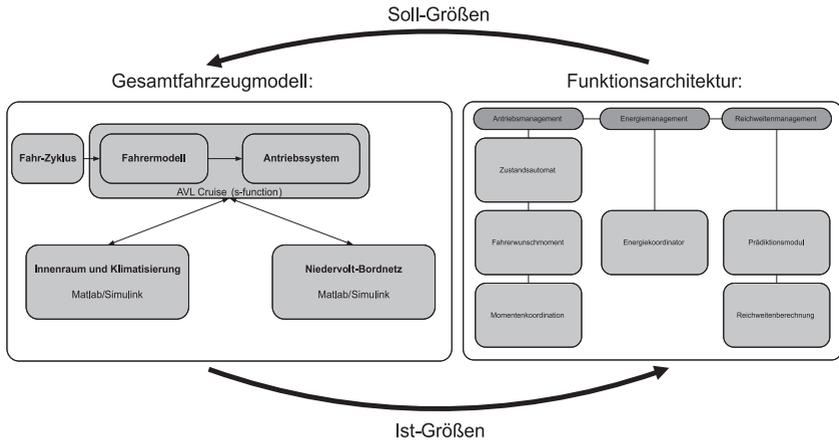


Abb. 6.7.: Aufbau der Simulationsumgebung als geschlossener Regelkreis

Hierbei werden betriebsstrategierelevante Soll-Größen von der Funktionsarchitektur dem Gesamtfahrzeugmodell vorgegeben. Das Gesamtfahrzeug übermittelt hierzu aktuelle Ist-Größen des Fahr- und Fahrzeugzustandes.

6.5. Fahrzyklen

Fahrzyklen dienen zur reproduzierbaren Quantifizierung des Kraftstoff- und Energiebedarfs bei Kraftfahrzeugen. In Abhängigkeit der jeweiligen Zertifizierungsbehörde und des länderspezifischen Typisierungsverfahrens haben sich unterschiedliche Zyklen etabliert. Diese sind durch ein zeitabhängiges Soll-Geschwindigkeitsprofil definiert.

Nach [71] können die Zyklen durch eine Vielzahl an Kriterien charakterisiert und anhand dieser Unterscheidungsmerkmale in die vier Kategorien Stadt-, Land-, Autobahn- und Mischzyklus unterteilt werden. Hierzu gibt Neudorfer

⁴ Geschlossener Regelkreis zwischen Fahrer-Fahrzeugmodell und Funktionsarchitektur

nach [71] eine qualitative und idealisierte (an der Geschwindigkeitsachse gespiegelte) Einteilung gemäß Abbildung 6.8 an. Tatsächlich könnte sich zugunsten negativer Drehmomente eine leichte Asymmetrie ergeben, da das Bremsen oftmals mit höheren Verzögerungsbeträgen stattfindet im Vergleich zum Beschleunigen.

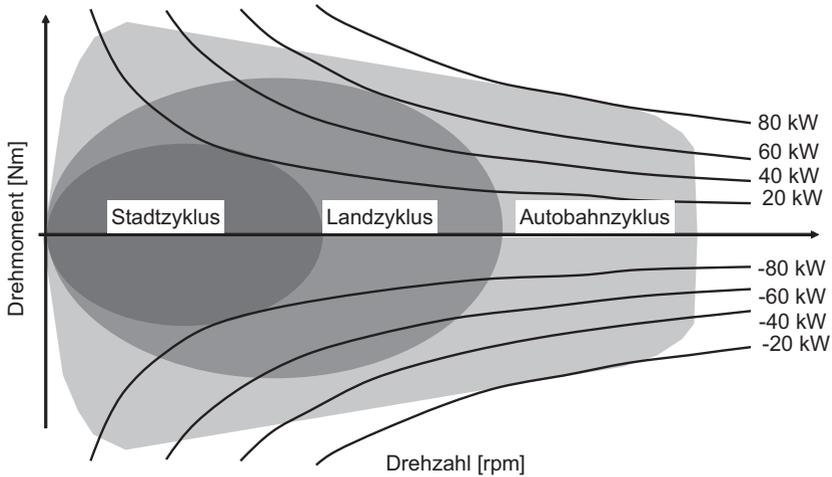


Abb. 6.8.: Qualitative Darstellung der typisch auftretenden Betriebspunkte in Abhängigkeit der Kategorie des Fahrzyklus, in Anlehnung an [71]

Im Rahmen dieser Arbeit werden für weitere Untersuchungen insgesamt acht Zyklen heran gezogen. Da kein konkretes Mobilitätsverhalten für das elektrische Referenzfahrzeug nach Abschnitt 6.2 zugrunde gelegt werden kann, wird mit der Auswahl der acht Zyklen versucht, ein möglichst breites Einsatzspektrum abzubilden. Tabelle 6.4 zeigt die ausgewählten Zyklen und deren Charakterisierung mittels ausgesuchter Kriterien nach [71].

Tab. 6.4.: Charakterisierung der zu betrachtenden Fahrzyklen anhand ausgewählter Kriterien

| Zyklus | Typ | $\bar{V}[\frac{km}{h}]$ | $\overline{a_{+x}}[\frac{m}{s^2}]$ | $\overline{a_{-x}}[\frac{m}{s^2}]$ | $V_{max}[\frac{km}{h}]$ | $\alpha_{x_{max}}[\frac{m}{s^2}]$ | $\alpha_{x_{min}}[\frac{m}{s^2}]$ |
|-----------------|----------|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| NEFZ | Gemischt | 33 | 0.5 | -0.8 | 120 | 1.2 | -1.4 |
| FTP75 | Gemischt | 34 | 0.5 | -0.6 | 91 | 1.6 | -1.5 |
| Artemis Urban | Stadt | 18 | 0.7 | -0.8 | 57 | 2.8 | -3.1 |
| Verteilerrunde | Stadt | 27 | 0.3 | -0.6 | 95 | 4.2 | -4.1 |
| Weissachrunde | Überland | 62 | 0.5 | -0.5 | 130 | 1.8 | -2.6 |
| Stuttgartrunde | Gemischt | 64 | 0.5 | -0.5 | 131 | 4.5 | -4.7 |
| Dauerlauftrunde | Gemischt | 71 | 0.5 | -0.5 | 187 | 3.8 | -4.2 |
| BAB | Autobahn | 104 | 1.7 | -2.1 | 145 | 2.8 | -3.7 |

Dargestellt sind die Mittelwerte sowohl für die Geschwindigkeit \bar{V} , Beschleunigung $\overline{a_{+x}}$ sowie Verzögerung $\overline{a_{-x}}$ als auch deren Maximalwerte V_{max} , $\alpha_{x_{max}}$, $\alpha_{x_{min}}$. Für den Energiebedarf eines Elektrofahrzeugs ist die Lage der Häufigkeitsverteilungen der Lastpunkte (Drehmoment-Drehzahl-Kombination) im fahrzeugspezifischen Wirkungsgradkennfeld des elektrischen Antriebssystems relevant [71]. Bei den Zyklen des NEFZ, FTP75 und Artemis Urban handelt es sich um bekannte und genormte Zyklen. Bei der Verteilerrunde, Weissachrunde, Stuttgartrunde und Dauerlauftrunde handelt es sich um aus Messdaten von Realfahrten erzeugte Profile. Der BAB-Zyklus beschreibt eine synthetisch generierte Autobahnfahrt. Die entsprechenden Geschwindigkeitsprofile aller acht Zyklen sind der Abbildung C.2 des Anhangs C zu entnehmen.

7. Simulationsgestützte Betriebsstrategieoptimierung

Bei der Entwicklung technischer Systeme müssen im Rahmen des Produktentwicklungsprozesses meist mehrere Qualitätsmerkmale gleichzeitig optimiert werden. Die einzelnen Zielgrößen zur Beschreibung dieser Qualitätsmerkmale weisen hierbei oftmals gegenläufige Optimierungsziele und -tendenzen auf, wodurch die Optimierung zur Darstellung eines Kompromisses bei der Wahl der Systemparameter wird.

Zur mathematischen Beschreibung kann eine ein- oder multidimensionale Zielfunktion formuliert werden. Diese reduziert hierbei das Systemverhalten und dessen systemische Korrelationen in Bezug auf die kontrollierbaren Eingangsvariablen und die Ausgangsgrößen als die zu beschreibenden Qualitätsmerkmale des technischen Systems. Bei der Behandlung solcher Problemstellungen kann das Systemverhalten als unbekannt (black box), teilweise bekannt (grey box) oder bereits bekannt und vollkommen einsichtig (white box) beschrieben werden.

7.1. Methode zur Betriebsstrategieoptimierung

In den Kapiteln 4 und 5 wurde eine Funktionsarchitektur vorgestellt, welche mittels eines zentralen Energiemanagements in Bezug auf den Energiefluss durch geeignete Betriebsstrategie-Maßnahmen Priorisierungen einzelner Verbraucher vornehmen kann, um eine bedarfsgerechte Steigerung der Reichweite herbei zu führen. Dies kann im Speziellen bedeuten, dass Verbraucher wie das Antriebs- oder auch das Klimatisierungssystem in ihren Leistungen reduziert werden. Eine Degradierung dieser Systemleistungen hat direkten Einfluss auf den Energieverbrauch respektive die Reichweite, jedoch auch gleichzeitig auf die Dynamik-

und Komfortverhältnisse des Fahrzeugs. Hierbei müssen die Erwartungen des Fahrers im Rahmen angemessen zu definierender Dynamik- und Komfortgrenzen erfüllt werden, um die Kundenzufriedenheit zu gewährleisten.

Im Folgenden soll ein mathematisches Optimierungsverfahren vorgestellt werden, mit dessen Hilfe entsprechende Applikationsgrößen der Funktionsarchitektur virtuell ermittelt werden können.

Das energetische Verhalten eines Elektrofahrzeugs kann mittels der in Kapitel 6 vorgestellten virtuellen Gesamtfahrzeugumgebung unter Berücksichtigung aller relevanter Verbraucher für das in Abschnitt 6.2 definierte Referenzfahrzeug hinreichend abgebildet werden. Ferner kann mittels des Längsdynamikmodells das Dynamikverhalten und durch Verwendung des 2-Zonen-Innenraummodells der thermische Komfort in der Fahrzeugkabine simulativ untersucht werden. Aufgrund der hohen Anzahl an systembeeinflussender Eingangsparameter und entsprechender Simulationslaufzeiten, werden systemische Korrelationen im Gesamtfahrzeugkontext mit Hilfe von Regressionsanalysen und durch Anwendung einer statistischen Versuchsplanung (DoE¹) abgeleitet. Anschließend werden die so reduzierten Metamodelle einem mathematischen Optimierungsprozess zugeführt, um eine geeignete Wahl der Eingangsparameter zu finden, für die sich wiederum optimale Werte der Zielgrößen ergeben. Ziel hierbei ist, die Qualitätsmerkmale Reichweite, Dynamik sowie thermischer Komfort durch geeignete Betriebsstrategie-Maßnahmen im bestehenden Spannungsfeld optimieren zu können. Zu diesem Zweck soll die folgende Methode Anwendung finden:

1. Objektivierung der Problemstellung durch Formulierung der Qualitätsmerkmale mittels geeigneter Zielgrößen
2. Auswahl relevanter Eingangsparameter (Faktoren)
3. Versuchsplanung und -durchführung mittels Gesamtfahrzeugumgebung (DoE)

¹ Design of Experiments

4. Beschreibung des Systemverhaltens durch die abgeleiteten Zielgrößen mittels Regressionsfunktionen (Modellbildung)
5. Normierung der Zielgrößen im Intervall $[0 : 1]$
6. Bilden einer Zielfunktion unter Verwendung der normierten Zielgrößen zur Formulierung des Optimierungsproblems (Modellanalyse)
7. Suche des Optimums (mathematische Reduzierung des Zielkonflikts im Kontext eines bestmöglichen Kompromisses)

7.2. Anwendung der Methode

Die drei Qualitätsmerkmale Reichweite, Dynamik sowie thermischer Komfort werden als zu beschreibende Zielgrößen festgelegt. Sie können durch die dargestellte Funktionsarchitektur mittels Betriebsstrategie-Maßnahmen mit Hilfe des Moduls Energiekoordinator entsprechend beeinflusst werden. Die Untersuchung dieser Zielgrößen erfolgt virtuell in den in Abschnitt 6.5 definierten Fahrzyklen. Diese werden virtuell als reines Längsdynamik-Manöver absolviert. Die Beurteilung der Querdynamik und Beeinflussungen der Betriebsstrategie hinsichtlich fahrdynamischer Aspekte wird bei den folgenden Untersuchungen nicht betrachtet. Der Fokus liegt ausschließlich auf energetischen Betrachtungen und den Auswirkungen der Betriebsstrategie-Maßnahmen auf das Längsdynamikverhalten des Fahrzeugs und den thermischen Komfort in der Fahrzeugkabine.

7.2.1. Objektivierung der Qualitätsmerkmale

Die Objektivierung der oben genannten Qualitätsmerkmale wird durch die im Folgenden definierten Zielgrößen vollzogen.

Zielgröße Reichweite

Die Reichweite eines Elektrofahrzeugs wird proportional über dessen Energieverbrauch beeinflusst. Daher kann zur Bewertung gleichbedeutend der Energieverbrauch verwendet werden. Dieser setzt sich im Wesentlichen aus den Anteilen Energieverbrauch des Antriebssystems b_{ant} sowie Energieverbrauch des Klimatisierungssystems b_{ac} zum Kühlen und Heizen zusammen. Bordnetzverbraucher werden für diese Betrachtung vernachlässigt. Zur Bewertung wird der über den Zyklus gemittelte Gesamtenergieverbrauch $\overline{b_{zyk}}$ nach Gleichung [7.1] verwendet, welcher nun unabhängig von der Batteriekapazität ist. Da der Energieverbrauch eine auf die zurückgelegte Wegstrecke s bezogene Größe ist, ist eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Zyklen sichergestellt.

$$\overline{b_{zyk}} = \overline{b_{ant}} + \overline{b_{ac}} = \frac{\int_0^t P_{ant} dt}{s} + \frac{\int_0^t P_{ac} dt}{s} \quad [7.1]$$

Zielgröße Dynamik

Das Attribut Dynamik kann nach [74] durch die vier Größen Fahrzeuggeschwindigkeit V_{fzg} , Längs- und Querschleunigung a_x, a_y sowie Motordrehzahl n_{vkm} ausgedrückt werden. Da im Folgenden rein längsdynamische Manöver betrachtet werden, scheidet die Querschleunigung als Bewertungsgröße aus. Da des Weiteren ein Fahrzeug ohne schaltbares Getriebe betrachtet wird, kann auch die Motordrehzahl aufgrund der Proportionalität zur Geschwindigkeit vernachlässigt werden.

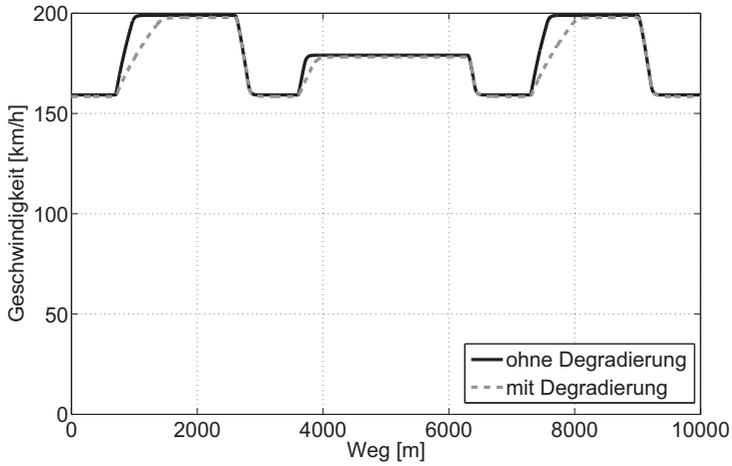
Die menschliche Sinnesmodalität kann nach [67] die Geschwindigkeit lediglich mit Hilfe visueller und akustischer Reize erfahrungsbasiert abschätzen. Die Längsbeschleunigung hingegen kann kinästhetisch über das Vestibularorgan im Ohr und haptisch über die Körpereigenbewegung an Sitz und Gurt sensiert werden. Aus diesem Grund dient zur Beurteilung von Agilität und Anfahrvorgängen rein die Längsbeschleunigung als wesentliche Beurteilungsgröße [86], [8]. Daher soll auch im Folgenden ausschließlich die Fahrzeug-Längsbeschleuni-

gung zur Bewertung des Qualitätsmerkmals Dynamik dienen. Da im Rahmen dieser Untersuchungen insbesondere der Einfluss der Betriebsstrategieeingriffe in Form einer Degradierung des Antriebssystems (Leistung und/oder Drehmoment) auf den Energieverbrauch und das damit verbundene Dynamikverhalten des Fahrzeugs von Interesse ist, wird eine für alle Stützstellen im Zyklus kumulierte und gemittelte Abweichung der Fahrzeug-Längsbeschleunigung $\overline{\Delta a_x}$ zwischen Soll-Beschleunigung in Form der im Zyklus auftretenden Beschleunigung bei voll verfügbarer Systemleistung $a_{x\text{ soll}_i}$ und der Ist-Beschleunigung bei degradiertem Antriebssystem $a_{x\text{ ist}_i}$ formuliert.

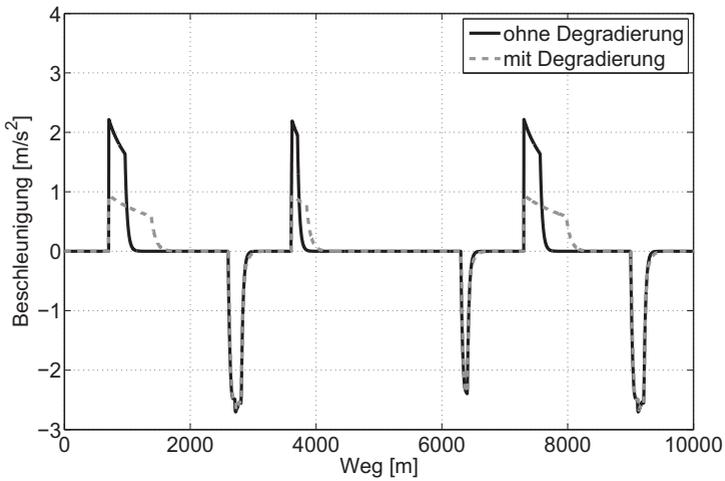
Abbildung 7.1 stellt exemplarisch die Verläufe von Geschwindigkeit (Abbildung 7.1(a)) und Längsbeschleunigung (Abbildung 7.1(b)) vergleichend dar. Es ist erkennbar, dass eine Degradierung des Antriebssystems starken Einfluss auf die Längsbeschleunigung sowie die Geschwindigkeit besitzt. Der Unterschied besteht darin, dass die Soll-Längsbeschleunigung bei Degradierung in ihrem Absolutwert nicht erreicht wird, wohingegen die Soll-Geschwindigkeit nach einem gewissen Verzug eingehalten werden kann. Auch aus diesem Grund erscheint die Längsbeschleunigung als alleiniger Indikator zur Beschreibung des Qualitätsmerkmals Dynamik als ausreichend.

Die Beschleunigung $a_{x\text{ soll}_i}$ bei nicht degradiertem System dient somit in jedem Punkt des Zyklus als Referenz. Eine Betragsbildung soll die Mittelung zu Null bei unterschiedlichen Vorzeichen verhindern. Die Zielgröße kann somit lediglich positive Werte annehmen. Um Untersuchungen in unterschiedlichen Zyklen miteinander vergleichbar zu halten, wird mittels der Anzahl der im Zyklus auftretenden Stützstellen bzw. der in der Simulation verwendeten Rechenschritte n_{st} normiert. Somit stellt sich die gemittelte Zielgröße $\overline{\Delta a_x}$ zur Bewertung der Dynamik gemäß Gleichung [7.2] dar.

$$\overline{\Delta a_x} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{st}} |a_{x\text{ soll}_i} - a_{x\text{ ist}_i}|}{n_{st}} \quad [7.2]$$



(a) Fahrzeuggeschwindigkeit



(b) Längsbeschleunigung

Abb. 7.1.: Auswirkung der Degradierung des Antriebssystems in einem exemplarischen Fahrmanöver

Zur Bewertung der Degradierung des Antriebssystems, wie oben dargestellt, muss die Zyklenvorgabe wegbasiert erfolgen, lediglich in Standphasen wird auf eine zeitbasierte Zyklusvorgabe gewechselt. Diese Funktionalität ist in der virtuellen Gesamtfahrzeugumgebung gemäß Kapitel 6 vorgehalten.

Zielgröße Komfort

Der thermische Komfort in der Fahrzeugkabine kann nach Abschnitt 2.2.1 über den *PMV*-Index als objektive Größe auf einer Skala zwischen -3 und +3 bewertet werden. Zur Evaluierung wird daher ein gemittelter *PMV*-Index über der gesamten Fahrt gemäß Gleichung [7.3] gebildet. Eine Referenz analog der Zielgröße zur Bewertung der Dynamik ist aufgrund der vorhandenen Skala nicht nötig. Des Weiteren weist der *PMV*-Index über den Zyklus gesehen keine schnellen Änderungen im Vergleich zur Längsbeschleunigung auf. Die Betragsbildung soll eine Mittelung zu Null bei unterschiedlichem Vorzeichen verhindern, da hierdurch eventuell falsche Einschätzungen des Komforts entstehen könnten. Die Zielgröße kann somit nur positive Werte im Wertebereich [0 : 3] annehmen. Die Mittelung zur Vergleichbarkeit erfolgt über der Anzahl der im Zyklus betrachteten Stützstellen bzw. Rechenschritte n_{st} .

$$\overline{PMV} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{st}} |PMV_i|}{n_{st}} \quad [7.3]$$

7.2.2. Einflussparameter

Die jeweiligen Zielgrößen besitzen eine Vielzahl an relevanten Eingangsgrößen bzw. Faktoren. Tabelle 7.1 stellt diese zusammenfassend dar. Die Ermittlung von annehmbaren Leistungsgrenzen zur Entschärfung des Zielkonflikts zwischen Reichweite, Dynamik sowie Komfort steht bei den folgenden Untersuchungen im Fokus.

Tab. 7.1.: Zu untersuchende Faktoren zur Beschreibung der Zielgrößen

| Zielgröße | Rubrik | Faktor | min | max | Einheit |
|---|----------------------|------------------|-----|------|-------------------|
| $\overline{b_{ac}}, \overline{\Delta ax}$ | Zyklus | NEFZ | | | |
| | | FTP75 | | | |
| | | Artemis Urban | | | |
| | | Verteilerrunde | | | |
| | | Weissachrunde | | | |
| | | BAB | | | |
| | | Stuttgartrunde | | | |
| $\overline{b_{ac}}, \overline{PMV}$ | Betriebsstrategie | M max | 15 | 100 | [%] |
| | | P max | 20 | 100 | [%] |
| | Betriebsstrategie | P ac max | 0 | 100 | [%] |
| | | Außentemperatur | -20 | +40 | [°C] |
| | Umgebungsbedingungen | Sonnenintensität | 0 | 1000 | $[\frac{W}{m^2}]$ |
| | | Luftfeuchte | 0 | 100 | [%] |
| | Abstraktion Zyklus | Fahrtzeit | 5 | 120 | [min] |
| | | V mittel | 15 | 130 | $[\frac{km}{h}]$ |
| | Fahrzeugverwendung | Standzeit | 0 | 12 | [h] |

Zur Abbildung der Metamodelle des Antriebssystems $\overline{b_{ac}}$ und $\overline{\Delta ax}$ werden hierzu die in Abschnitt 6.5 aufgeführten Fahrzyklen Anwendung finden, welche sich in ihrer Dynamikausprägung und Kategorie (Stadt, Land, Autobahn, gemischt) wesentlich unterscheiden. Wie bereits in Abschnitt 6.5 dargestellt, wird durch diese Auswahl an unterschiedlichen Zyklen versucht, ein breites Nutzerverhalten abzudecken. Durch die Funktionsarchitektur besteht die Möglichkeit, mittels Betriebsstrategie-Maßnahmen das Antriebssystem über eine Momenten- und/oder Leistungsreduzierung durch entsprechende Variation der Maximalgrenzen M_{max} sowie P_{max} zu beeinflussen. Das Antriebssystem wird in diesen acht Zyklen untersucht.

Neben dieser Möglichkeit soll zudem die Auswirkung einer Leistungsreduzierung des Klimatisierungssystems durch Variation der Leistungsgrenze $P_{ac max}$

in Bezug auf die Zielgrößen $\overline{b_{ac}}$ und \overline{PMV} untersucht werden. Der Energieverbrauch des Klimatisierungssystems, aber auch der thermische Komfort sind neben der maximalen Systemleistung stark von den Umgebungsbedingungen abhängig. Daher werden die drei Faktoren Außentemperatur, Sonnenintensität und Luftfeuchte variiert. Darüber hinaus wird der Einfluss der Standzeit untersucht. Es wird betrachtet, wie lange das Fahrzeug den Umgebungsbedingungen vor Fahrtbeginn ausgesetzt war oder ob es beispielsweise in der Garage stand und somit als vorkonditioniert (Standzeit = 0) angenommen werden kann. Die Durchschnittsgeschwindigkeit V mittel und die Fahrzeit werden ebenfalls als Faktoren für $\overline{b_{ac}}$ und \overline{PMV} variiert. Die maximale Fahrzeit wird hierbei auf 120 Minuten festgesetzt. Für die Abbildung der Metamodelle $\overline{b_{ac}}$ und \overline{PMV} wird somit der Fahrzyklus durch die Faktoren Durchschnittsgeschwindigkeit sowie Fahrzeit abstrahiert. Hierdurch können granulare Faktorstufen in Bezug auf die Faktoren gebildet werden. Für anschließende gesamthafte Untersuchungen des Antriebs- und Klimatisierungssystems in entsprechenden Zyklen, wie in Abschnitt 7.3 durchgeführt, besteht eine Verknüpfung zu den definierten Zyklen über die Vorgabe der Durchschnittsgeschwindigkeit und Fahrzeit des Zyklus. Eine nachgelagerte Optimierung und Validierung erfolgt in den acht dargelegten Zyklen. Da die untersuchten Zyklen eine definierte Fahrzeit bzw. Fahrtlänge aufweisen, können diese ggf. mehrfach hintereinander durchgeführt werden, bis die gewünschte Fahrzeit (bis zu 120 Minuten) erreicht ist. Es erfolgt jedoch im Kontext der nachgelagerten Optimierung und Validierung in Abschnitt 7.3 keine Variation der Geschwindigkeitsprofile aufgrund der definierten Zyklusvorgaben.

Die Signifikanz der oben aufgeführten Faktoren zur Beschreibung der Zielgrößen wurde im Vorfeld durch screening-Versuche² verifiziert.

² Vorversuche zur Identifikation von signifikanten Faktoren und Wechselwirkungen

7.2.3. Statistische Versuchsplanung

Da die Parametervariation zur Ableitung von Metamodellen aufgrund der Anzahl der zu variierenden Faktoren und Faktorstufen zu umfangreichen Simulationsumfängen führt, wird die Versuchsplanung und -durchführung durch Anwendung der Methode der statistischen Versuchsplanung mit der kommerziellen Software *Jmp*® der Firma SAS unterstützt. Vorteile der statistischen Versuchsplanung sind methodisches Vorgehen, Reduzierung der Versuchsumfänge, Identifikation von relevanten Systemparametern und Wechselwirkungen sowie statistische Absicherung der Ergebnisse.

Die Modellbildung der beiden Zielgrößen $\overline{b_{ant}}$, $\overline{\Delta ax}$ zur Bewertung des Antriebsystems sowie $\overline{b_{ac}}$, \overline{PMV} zur Bewertung des Klimatisierungssystems kann jeweils durch einen gemeinsamen Versuchsplan durchgeführt werden, da die Faktoren gemäß Tabelle 7.1 hierfür identisch sind.

Tab. 7.2.: Übersicht der eingesetzten Versuchspläne

| Zielgröße | Typ | Grad der Faktoren | Grad der Wechselwirkungen | Anzahl Versuche |
|--|-------------|-------------------|---------------------------|-----------------|
| $\overline{b_{ant}}, \overline{\Delta ax}$ | raumfüllend | 4 | 2 | 96 |
| $\overline{b_{ac}}, \overline{PMV}$ | raumfüllend | 4 | 2 | 1128 |

Die Versuchspläne werden als raumfüllendes Design (space-filling) ausgeführt. Hierbei wird der Faktorraum gleichmäßig durch eine enge und gleichmäßige Verteilung der Faktorstufen abgedeckt. Die Ecken des Faktorraums werden zusätzlich berücksichtigt. Dies ermöglicht eine gleichmäßige und zuverlässige Modellgüte über den gesamten Faktorraum und an dessen Rändern. Die Anzahl an benötigter Einzelversuche wird neben der Art des Versuchsplans auch durch den abzubildenden Grad jedes Faktors und dessen Wechselwirkungen in Bezug auf das zu beschreibende mathematische Modell vorgegeben. Die Faktoren nach Tabelle 7.1 werden hierbei über den gesamten Faktorraum variiert und

miteinander kombiniert. Für diese Anwendungen stellen raumfüllende Versuchspläne die beste Wahl dar [85], da der Versuchsraum voll umfänglich abgedeckt wird, jedoch trotzdem der Umfang an benötigter Einzelversuche im Vergleich zu einem vollfaktoriellen Versuchsplan reduziert ist. Da die Versuchspläne rein virtuell abgearbeitet werden, stellt die verhältnismäßig hohe Anzahl benötigter Einzelversuche kein Hindernis dar. Aus diesem Grund bleibt diese Art von Versuchsplänen üblicherweise den CAE³-Studien vorbehalten. Zur Ausführung der Versuchspläne nach Tabelle 7.2 wurde eine automatisierte Versuchssteuerung implementiert.

7.2.4. Regressionsanalysen zur mathematischen Beschreibung der Zielgrößen

Die Regressionsanalyse wird nach erfolgter Versuchsdurchführung individuell für jede Zielgröße durchgeführt, um eine bestmögliche Modellgüte zu erlangen. Hierbei findet zunächst eine lineare Regressionsanalyse mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate Anwendung. Die Beschreibung erfolgt hierbei als Polynom. Aufgabe der Regressionsanalyse ist die Ermittlung der Regressionskoeffizienten, sodass das resultierende Metamodell der Zielgröße y eine möglichst hohe Güte erhält.

Zur statistischen Untersuchung werden die einzelnen Faktoren mittels der Irrtumswahrscheinlichkeit in Form des p-Werts auf Signifikanz geprüft. Der p-Wert kann als statistischer Gradmesser der Signifikanz eines Faktors verstanden werden. Dabei bedeutet: $p < 0.05$: signifikant; $p < 0.01$: sehr signifikant; $p < 0.001$: höchst signifikant. Zur Bestimmung des p-Werts wird der empirische t-Wert benötigt, weshalb dieser der Vollständigkeit halber mit angegeben ist. Die Modellgüte des Metamodells kann durch das Bestimmtheitsmaß R^2 nach Gleichung [6.11] ausgedrückt werden.

³ Computer Aided Engineering

Regressionsfunktion für $\overline{b_{ant}}$

Tabelle 7.3 stellt die Ergebnisse der linearen Regressionsanalyse des Metamodells für $\overline{b_{ant}}$ dar.

Tab. 7.3.: Statistische Auswertung der linearen Regressionsanalyse für $\overline{b_{ant}}$

| Faktor | t-Wert | p-Wert |
|---------------------------|---------------|---------------|
| P_{\max} | 17.3 | 0.0001 |
| Zyklus | 339.5 | 0.0001 |
| Zyklus \cdot P_{\max} | 6.7 | 0.0001 |
| Zyklus \cdot M_{\max} | 3.0 | 0.0075 |
| M_{\max} | 7.0 | 0.01 |
| $P_{\max} \cdot M_{\max}$ | 3.1 | 0.085 |
| Modell | | Wert |
| R^2 | | 0.97 |

Die Signifikanzprüfung wird nach oben dargestellter Definition über den p-Wert geführt. Die Beschreibung der Regressionsfunktion kann nach Tabelle 7.3 ohne eine quadratische oder höhere Ordnung der Faktoren mit hinreichender Modellgüte mit $R^2 = 0.97$ erreicht werden. Die Leistungsgrenze P_{\max} , der jeweilige Fahrzyklus und die Wechselwirkung aus diesen beiden Faktoren weisen gemäß des p-Werts höchste Signifikanz auf. Der Faktor Zyklus steht hierbei übergreifend für alle acht untersuchte Zyklen. Da es sich bei diesem Faktor um eine kategoriale und nicht stetige Größe handelt, wird für jeden Fahrzyklus ein separater Regressionskoeffizient zur Beschreibung der Regressionsfunktion benötigt. Dieser besitzt dann auch jeweils einen separaten Signifikanzwert, welcher sich vom übergreifenden p-Wert nach Tabelle 7.3 für Zyklus unterscheiden kann. Dieser besagt lediglich, dass die Größe Zyklus, unabhängig welcher der acht Untersuchten, höchst signifikant ist. Die unterschiedlichen Signifikanzniveaus ergeben sich bei Betrachtung innerhalb eines jeweiligen Zyklus für die Fakto-

ren P_{\max} und M_{\max} und die entsprechenden Wechselwirkungen. In Abhängigkeit des Fahrzyklus und der darin auftretenden Lastpunkte führt die untersuchte Degradierung zu unterschiedlichen Auswirkungen.

Dies wird durch einzelne p-Werte jeweils für NEFZ, FTP75, Artemis Urban, Verteilerrunde, Weissachrunde, BAB, Stuttgartrunde und Dauerlaufrunde sowie die jeweiligen Wechselwirkungen mit P_{\max} und M_{\max} ausgedrückt. Diese können der Tabelle D.1 des Anhangs D entnommen werden.

Regressionsfunktion für $\overline{\Delta a_x}$

Analog kann auch die Zielgröße $\overline{\Delta a_x}$ zur Beschreibung der Dynamik mittels einer linearen Regression abgebildet werden. Tabelle 7.4 stellt die Ergebnisse zur Beschreibung des Metamodells für $\overline{\Delta a_x}$ dar.

Tab. 7.4.: Statistische Auswertung der linearen Regressionsanalyse für $\overline{\Delta a_x}$

| Faktor | t-Wert | p-Wert |
|--|--------|-------------|
| $M_{\max} \cdot M_{\max}$ | 74.1 | 0.0001 |
| $M_{\max} \cdot M_{\max} \cdot M_{\max}$ | 149.7 | 0.0001 |
| Zyklus | 14.3 | 0.0001 |
| Zyklus $\cdot P_{\max}$ | 6.1 | 0.0001 |
| Zyklus $\cdot M_{\max}$ | 5.3 | 0.0001 |
| P_{\max} | 14.1 | 0.0003 |
| $P_{\max} \cdot M_{\max}$ | 3.6 | 0.06 |
| Modell | | Wert |
| R^2 | | 0.96 |

Es kann für die Regressionsfunktion für $\overline{\Delta a_x}$ eine Modellgüte mit $R^2 = 0.96$ erzielt werden. Im Vergleich zu $\overline{b_{ant}}$ weist diese für $\overline{\Delta a_x}$ eine höchst signifikante quadratische und kubische Abhängigkeit des zulässigen Maximalmoments

M_{\max} auf. Zudem sind auch der Fahrzyklus und dessen Wechselwirkungen in Bezug auf $\overline{\Delta\alpha_x}$ gemäß des p-Werts nach Tabelle 7.4 höchst signifikant. Analog des vorherigen Abschnitts steht der Faktor Zyklus übergreifend für alle acht untersuchte Zyklen. Daher ergeben sich auch hier innerhalb eines jeweiligen Zyklus unterschiedliche Signifikanzniveaus für M_{\max} und P_{\max} als Wechselwirkung mit dem jeweiligen Fahrzyklus. Auch der jeweilige Zyklus besitzt nach Tabelle D in Bezug auf die zu beschreibende Zielgröße ein unterschiedliches Signifikanzniveau. Dies ist so zu interpretieren, dass in dynamischeren Zyklen entsprechend bei Degradierung durch die größeren Lastanforderungen bedingt durch die Zyklusvorgabe eine größere Dynamikeinbuße auftreten kann. Daher besitzen die dynamischeren Zyklen wie BAB, Dauerlaufrunde, Stuttgarunde niedrigere p-Werte im Vergleich zu beispielsweise Artemis Urban oder Verteilrunde. Die Signifikanzniveaus können der Tabelle D.2 des Anhangs D entnommen werden.

Diskussion der Betriebsstrategie-Maßnahmen hinsichtlich des Antriebssystems

Um das Qualitätsmerkmal Reichweite im Kontext der Zielgröße $\overline{b_{ant}}$ zu beeinflussen, können seitens der Betriebsstrategie sowohl das Antriebsmoment M_{\max} , als auch die -leistung P_{\max} reduziert werden. Dies kann wiederum zu einer Beeinflussung des Qualitätsmerkmals Dynamik $\overline{\Delta\alpha_x}$ führen. Die Auswirkungen sind hierbei stark vom untersuchten Zyklus abhängig. Dies wird durch die stark variierenden Signifikanzwerte für die Faktoren Zyklus, Zyklus \cdot P_{\max} sowie Zyklus \cdot M_{\max} gemäß der Tabellen D.1 und D.2 belegt. Eine nähere Analyse soll im Folgenden zunächst exemplarisch anhand der Stuttgarunde, aufgrund des Abdeckens eines breiten Lastbereichs, diskutiert werden. Abbildung 7.2 zeigt hierzu die mittels Regressionsanalyse abgeleiteten Metamodelle $\overline{b_{ant}}$ und $\overline{\Delta\alpha_x}$ unter Variation der Momenten- und Leistungsreduzierung. Die Abbildung der Metamodelle erfolgt hierbei mit Hilfe der Regressionsfunktionen nach Tabelle 7.3 und Tabelle 7.4.

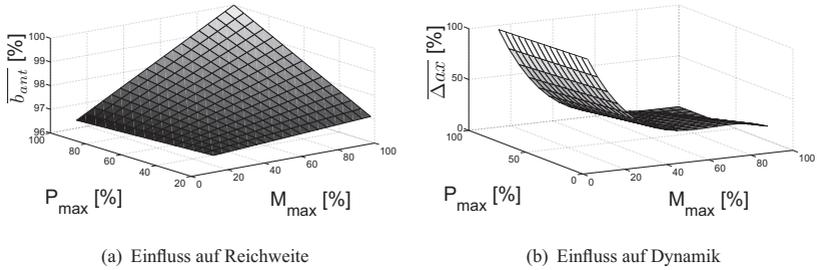


Abb. 7.2.: Einfluss der Betriebsstrategie-Maßnahmen hinsichtlich des Antriebssystems in der Stuttgartrunde

Bei $P_{\max} = 100\%$ und $M_{\max} = 100\%$ ist das Antriebssystem undegraduiert, dieser Punkt bildet die Referenz ab. Somit beträgt hier der Verbrauch $\overline{b_{ant}} = 100\%$. Die Dynamikeinbuße $\overline{\Delta a_x}$ hingegen ist 0. Je stärker dann degradiert wird, umso größer wird die Dynamikeinbuße, wobei jeweils der Wert bei $P_{\max} = 20\%$ und $M_{\max} = 15\%$ als Untergrenze der untersuchten Degradierung für $\overline{\Delta a_x}$ zu 100% gesetzt wird. Die hier auftretende relative Dynamikeinbuße fällt am größten aus. Wie bereits durch die Regressionsanalyse nach Tabelle 7.3 gezeigt wurde, kann der Einfluss von M_{\max} und P_{\max} nach Abbildung 7.2(a) linear in Bezug auf den Energieverbrauch angenommen werden. In der Stuttgartrunde, aber auch in den übrigen dynamischeren Zyklen, kann ein Verbrauchsvorteil bei Momenten- und Leistungsreduzierung konstatiert werden. Für die Stuttgartrunde beträgt das maximale Einsparpotential in Bezug auf den Energiebedarf bis zu 3%. Die auftretenden Lastpunkte sind teilweise in hohen wirkungsgradungünstigen Teil- und Volllastbereichen zu finden, wie Abbildung 7.3(a) für die Stuttgartrunde belegt.

Diese Lastpunkte werden durch eine Degradierung in niedrigere und somit wirkungsgradgünstigere Bereiche verschoben. Insbesondere für den BAB-Zyklus und die Dauerlauftrunde wirkt sich eine Reduzierung der Leistung P_{\max} auf den Energieverbrauch aus, da sich der Großteil der Lastpunkte bei hohen Drehzahlen bzw. Geschwindigkeiten befindet. Dies belegen die Signifikanzwerte nach

Tabelle D.1 für die beiden genannten Zyklen. Eine Darstellung der Lastpunkte in den übrigen untersuchten Zyklen findet sich im Anhang in Abbildung E. Bezüglich der Dynamik $\overline{\Delta a_x}$ überwiegt der überproportionale Einfluss des maximal zulässigen Moments M_{\max} , wie bereits durch Tabelle 7.4 dargelegt werden konnte. In der Stuttgartrunde nach Abbildung 7.2(b), aber auch bei den übrigen dynamischeren Zyklen, kann eine Dynamikeinbuße über das gesamte Drehmomenten- und Leistungsspektrum festgestellt werden. Daher fallen gerade für den BAB-Zyklus und die Dauerlaufrunde die Signifikanzwerte der Wechselwirkungen Zyklus· P_{\max} sowie Zyklus· M_{\max} gering aus. Nach Abbildung 7.2(b) kann ab einem Drehmoment von rund 40% ein überproportionaler Anstieg der Dynamikeinbuße festgestellt werden. Die Stuttgartrunde weist vor allem bezüglich der Wechselwirkung Zyklus · M_{\max} eine hohe Signifikanz auf, da im Zyklus Anfahrvorgänge mit einer hohen Momentenanforderung auftreten, wie Abbildung 7.3(a) zeigt.

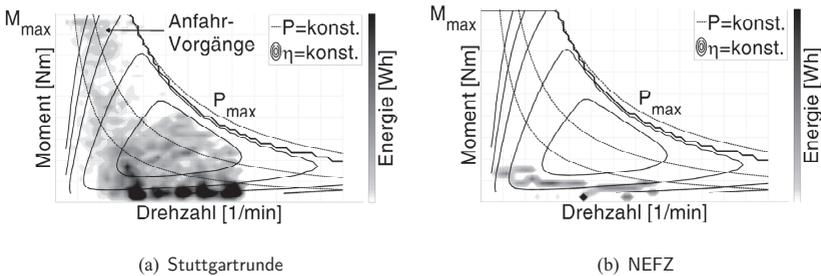


Abb. 7.3.: Häufigkeitsverteilung der Lastpunkte in Bezug auf den Energieverbrauch

Der NEFZ weist aufgrund seiner geringen Lastanforderung abweichende Gegebenheiten auf, welche nun gesondert diskutiert werden sollen. Auffällig ist nach Abbildung 7.4, dass eine gleichzeitige und zu starke Reduzierung des Antriebsmoments und der -leistung nach Abbildung 7.4(a) entgegen aller ande-

ren betrachteten Zyklen bei $P_{\max} = 20\%$ und $M_{\max} = 15\%$ zu einem erhöhten Energieverbrauch führt. Dies kann durch die geringe Lastanforderung des Zyklus begründet werden. Die Lastpunkte sind über den Zyklus in niedrigen Teillastbereichen verteilt, wie Abbildung 7.3(b) zeigt. Durch eine sehr starke Degradierung des Antriebssystems werden die Lastpunkte in noch schlechtere Wirkungsgradbereiche verschoben. Dies führt zu einem Mehrverbrauch von maximal 2% (siehe Abbildung 7.4(a)).

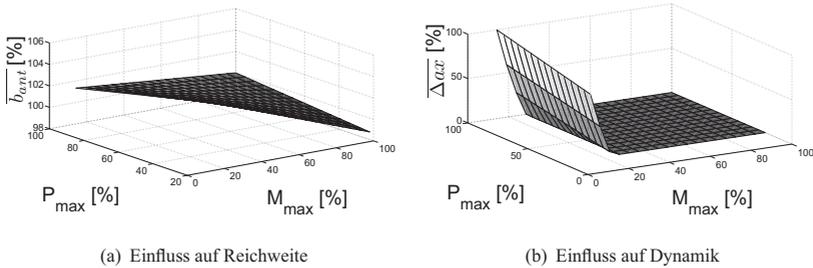


Abb. 7.4.: Einfluss der Betriebsstrategie-Maßnahmen hinsichtlich des Antriebssystems im NEFZ-Zyklus

Eine Dynamikeinbuße ist im NEFZ nach Abbildung 7.4(b) erst ab einem zulässigen Maximalmoment von rund 30% festzustellen, da in diesem Zyklus keine höheren Momentenanforderungen auftreten. Eine Leistungsreduzierung durch P_{\max} wirkt sich nur marginal aus, da eine Leistungsreduzierung aufgrund der E-Maschinen Charakteristik erst ab der Nennzahl Auswirkungen besitzt. Der Großteil der Lastpunkte befindet sich jedoch zyklusbedingt in niedrigeren Drehzahlbereichen. Daher fällt der Signifikanzwert für die Wechselwirkung Zyklus- P_{\max} für den NEFZ auch höher aus. Auffällig ist jedoch, dass die Dynamikeinbuße mit zunehmender Leistung bei geringen maximalen Drehmomenten zunimmt. Dies kann aus einem physikalischen Zusammenhang nicht erklärt werden, sondern ist auf die Abbildung der Regressionsfunktion zurück zu führen. Insgesamt kann festgestellt werden, dass das Verbrauchspotential resultierend aus der Degradierung des Antriebssystems relativ gering ausfällt, mit den

Dynamikanforderungen der Zyklen jedoch ansteigt. Dies belegen auch die entsprechenden Signifikanzwerte. Eine sehr starke Degradierung kann sich jedoch auch in weniger dynamischen Zyklen negativ auf den Verbrauch auswirken, wie für den NEFZ dargestellt wurde. Die aus einer Degradierung resultierende Dynamikeinbuße fällt bezogen auf das einhergehende Einsparpotential in Bezug auf den Energiebedarf überproportional aus. Gerade in Zyklen mit häufigen Anfahrvorgängen, wie für die Stuttgartarrunde dargestellt, zeigt sich insbesondere eine hohe Signifikanz bezüglich der Momentenreduzierung mittels M_{\max} . In Zyklen, in denen vermehrt Lastpunkte bei hohen Drehzahlen auftreten, beispielsweise bei Autobahnfahrten, zeigt sich hingegen eine erhöhte Signifikanz bezüglich einer Leistungsreduzierung (BAB, Dauerlaufrunde). Eine Evaluierung dieser Annahmen wird in Kapitel 8 durchgeführt.

Modellbildung für $\overline{b_{ac}}$ und \overline{PMV}

Auch für die Zielgrößen $\overline{b_{ac}}$ und \overline{PMV} zur Bewertung des Klimatisierungssystems wurde zunächst eine lineare Regressionsanalyse angewendet. Hierbei konnte jedoch aufgrund der komplexen Zusammenhänge und der großen Anzahl an Faktoren durch die lineare Regressionsanalyse eine Modellgüte von $R^2 = 0.8$ nicht übertroffen werden. Aus diesem Grund wird, wie in [46] dargestellt, das komplexe Systemverhalten mittels künstlich neuronaler Netze abgebildet, um auch diese Metamodelle einer anschließenden Optimierung zuführen zu können. Durch die Verwendung künstlich neuronaler Netze geht die Anschaulichkeit des Metamodells und die Aussage über die statistischen Signifikanzen der Faktoren im Vergleich zur polynomialen Darstellung verloren. Daher wurde die Signifikanz der verwendeten Faktoren bezüglich der Metamodelle für $\overline{b_{ac}}$ und \overline{PMV} im Vorfeld durch screening-Versuche verifiziert. Die mathematische Formulierbarkeit bleibt jedoch auch für ein künstlich neuronales Netz erhalten. Somit kann auch ein Metamodell, welches mit einem künstlich neuronalen Netz abgebildet wird, im anschließenden Optimierungsprozess verwendet werden. Die Modellgüte und die Flexibilität kann durch Anwendung

eines neuronalen Netzes erheblich gesteigert werden, weshalb die Abbildung der Zielgrößen $\overline{b_{ac}}$ und \overline{PMV} durch ein künstlich neuronales Netz erfolgt. Abbildung 7.5 zeigt den schematischen Aufbau eines künstlich neuronalen Netzes mit einer Zwischenschicht.

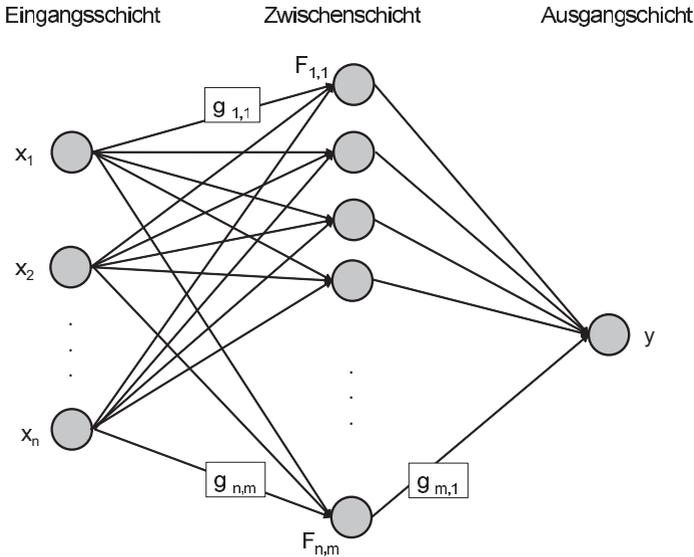


Abb. 7.5.: Prinzipieller Aufbau der eingesetzten künstlich neuronalen Netze

Mathematisch kann dieses Netz nach [30] im vorliegenden Fall für eine einzige Zielgröße y und somit $n_y = 1$ durch Gleichung [7.4] formuliert werden.

$$y_k(x) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{n_y} F_{i,j} g_{i,j} g_{j,k} x_j \quad [7.4]$$

Mit:

y : Zielgröße

x : Faktor

F : Sigmoide Aktivierungsfunktion des Neurons

g : Gewichtungsfaktor der Verbindung zum Neuron

Die Verbindungen zu den Neuronen sind hierbei jeweils über eine Gewichtung g verknüpft und das jeweilige Neuron besitzt zudem eine sigmoide Aktivierungsfunktion F .

Die neuronalen Netze zur Beschreibung der Zielgrößen $\overline{b_{ac}}$ und \overline{PMV} werden gemäß Abbildung 7.5 und nach Tabelle 7.5 ausgeführt. Für die Wahl der Anzahl an Neuronen n_k der Zwischenschicht kann nach [60] zunächst die Faustformel nach Gleichung [7.5]

$$n_k = \sqrt{n_y n_x} \quad [7.5]$$

mit der Anzahl der Faktoren n_x und Anzahl an Zielgrößen n_y verwendet werden. Nach Bedarf kann anschließend die Anzahl der Neuronen iterativ erhöht werden, um die Modellgüte weiter zu steigern. Eine zu große Anzahl an Neuronen birgt jedoch die Gefahr von Overfitting. Die spezifische Ausführung nach Tabelle 7.5 hat sich in einem iterativen Prozess als die beste Wahl ergeben.

Tab. 7.5.: Übersicht der eingesetzten künstlich neuronalen Netze

| Zielgröße | Anzahl Schichten | Anzahl Neuronen Zwischenschicht | Modellgüte |
|---------------------|------------------|------------------------------------|------------|
| \overline{PMV} | 3 | 7 | $R^2=0.93$ |
| $\overline{b_{ac}}$ | 3 | 21 | $R^2=0.96$ |

Diskussion der Betriebsstrategie-Maßnahmen hinsichtlich des Klimasystems

Durch eine Degradierung des Klimatisierungssystems mittels der maximal zulässigen Leistung $P_{ac \max}$ kann die Reichweite des Fahrzeugs beeinflusst werden. Zugleich hat dies jedoch auch Auswirkungen auf den thermischen Komfort in der Fahrzeugkabine. Abbildung 7.6 stellt die Verhältnisse exemplarisch für die Stuttgartrunde als reales Fahrprofil dar. Der Energieverbrauch des Klimatisierungssystems $\overline{b_{ac}}$ ist hierbei prozentual bezogen auf den Gesamtenergieverbrauch im Zyklus dargestellt.

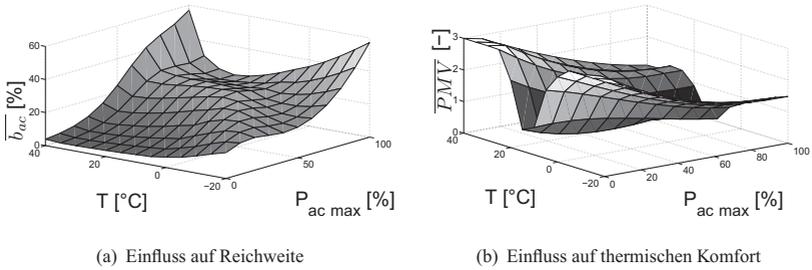


Abb. 7.6.: Einfluss der Betriebsstrategie-Maßnahmen hinsichtlich des Klimatisierungssystems für die Stuttgartrunde

Hinsichtlich des Energieverbrauchs ist nach Abbildung 7.6(a) eine starke Abhängigkeit von der Außentemperatur T ersichtlich. Bei hohen Temperaturen stellt sich ein überproportionales Verhalten aufgrund von gleichzeitig hoher Sonneneinstrahlung ein. Auch die maximal zulässige Leistung $P_{ac\ max}$ weist einen in weiten Bereichen nicht linearen Einfluss auf. Bei mittleren Temperaturen stellt sich jedoch ein konstanter Bereich ein, da nicht mehr Leistung zur Darstellung des einzuregelnden Komforts benötigt wird.

Hinsichtlich des thermischen Komforts sind nach Abbildung 7.6(b) die Einflüsse in Bezug auf die Temperatur stark nicht linear. Bei mittleren Temperaturen ist der PMV-Index aufgrund des guten thermischen Komforts nahe 0. Bei hohen und tiefen Temperaturen nimmt der Komfort in der Fahrzeugkabine ab, da das Fahrzeug zu Fahrtbeginn zunächst auf Zieltemperatur konditioniert werden muss. Infolge dessen steigt der PMV-Index. Da bei der Berechnung von \overline{PMV} der Betrag gebildet wird, steigt dieser sowohl zu hohen als auch zu tiefen Temperaturen an. Die Abhängigkeit des Komforts in Bezug auf $P_{ac\ max}$ verhält sich hingegen recht linear.

Die für die Stuttgartrunde exemplarisch dargestellten Abhängigkeiten stellen sich in allen acht Zyklen analog dar. Die Absolutwerte für $\overline{b_{ac}}$ steigen mit sinkender Durchschnittsgeschwindigkeit des Fahr-Zyklus.

7.2.5. Definition der Zielfunktion

Die Zielfunktion zur Bewertung des Zielkonflikts der Qualitätsmerkmale Reichweite, Dynamik sowie thermischer Komfort kann nun mathematisch als skalare Bewertungsfunktion durch Kopplung der Regressionsfunktionen der einzelnen Zielgrößen $\overline{b_{zyk}}$, $\overline{\Delta ax}$ und \overline{PMV} formuliert werden. Zu diesem Zweck wird eigens für multikriterielle Optimierungsprobleme vom National Institute of Standards [5] die Anwendung einer Wünschbarkeitsfunktion vorgeschlagen, welche erstmals von [40] vorgestellt wurde.

Zunächst werden hierbei die Zielgrößen y mittels Rampenfunktionen gemäß gewünschtem Optimierungsziel im Intervall $[0 : 1]$ zu einem normierten Qualitätsmerkmal q skaliert. Im vorliegenden Fall sollen alle drei Zielgrößen $\overline{b_{zyk}}$, $\overline{\Delta ax}$ und \overline{PMV} minimiert werden. [22] schlägt hierfür eine bereichsweise definierte Funktion gemäß Gleichung [7.6] vor.

$$q(y) = \begin{cases} 1, & \text{wenn } y < y_{min} \\ \left(\frac{y_{max}-y}{y_{max}-y_{min}} \right)^k, & \text{wenn } y_{min} \leq y \leq y_{max} \\ 0, & \text{wenn } y > y_{max} \end{cases} \quad [7.6]$$

Der Wert 0 drückt bei der Definition des Qualitätsmerkmals q ein inakzeptables, 1 ein voll zufriedenstellendes Ergebnis aus. Die Rampenfunktion dient jedoch nicht nur der Normierung. Sie kann auch zur Gewichtung der Qualitätsmerkmale untereinander verschiedene Abbildungsformen (linear, degressiv, progressiv) in Abhängigkeit des Exponenten k annehmen. Für detaillierte Ausführungen sei auf [91] verwiesen. Im Folgenden wird zunächst für alle drei Zielgrößen eine lineare Gewichtung mit $k = 1$ gewählt. Abbildung 7.7 stellt die Normierungsfunktion für die Minimierungsaufgabe dar, welche für alle drei Zielgrößen vorliegt.

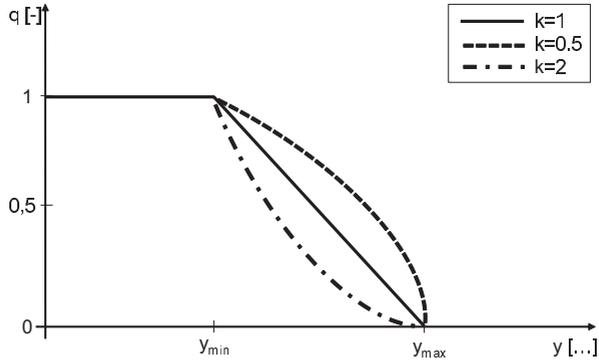


Abb. 7.7.: Qualitative Darstellung der Funktion zur Normierung der Qualitätsmerkmale

Die Kopplung zur Wünschbarkeitsfunktion W wird durch Multiplikation der normierten Zielgrößen nach Gleichung [7.7] vollzogen.

$$W = \left(\prod_{i=1}^{n_q} q_i \right)^{\frac{1}{n_q}} = \left(q_{bzyk} \cdot q_{\Delta d_x} \cdot q_{PMV} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [7.7]$$

Mit:

W : Wünschbarkeitsfunktion

q : Normiertes Qualitätsmerkmal

n_q : Anzahl der Qualitätsmerkmale

Auch die Wünschbarkeitsfunktion selbst nimmt somit Werte im Intervall $[0 : 1]$ an. Das globale Optimum der Wünschbarkeitsfunktion beschreibt nun objektiv den bestmöglichen Kompromiss im Sinne einer gleichzeitig zufriedenstellenden Erfüllung aller Qualitätsmerkmale der Zielfunktion.

7.3. Ergebnisse der Optimierung zur Entschärfung des Zielkonflikts

Gesucht werden die Werte der Größen M_{\max} , P_{\max} , $P_{ac \max}$, welche das globale Optimum der Wünschbarkeitsfunktion W in Abhängigkeit des Zyklus, der Umgebungsbedingungen sowie der Fahrzeugverwendung beschreiben. Diese Werte können für das Energiemanagement als annehmbare Dynamik- und Komfortgrenzen angesehen werden. Zu diesem Zweck kann eine Optimierung respektive Suche nach dem globalen Optimum für jeden Zyklus unter Variation der Umgebungsbedingungen und der Fahrzeugverwendung durchgeführt werden. Abbildung 7.8 zeigt zur Erläuterung des Vorgehens die Zielfunktion W separat jeweils in Abhängigkeit der Größen M_{\max} , P_{\max} des Antriebssystems und der das Klimatisierungssystem beeinflussenden Größen Außentemperatur T und $P_{ac \max}$ exemplarisch für die Stuttgartrunde als reales Fahrprofil. Die Optima sind durch + gekennzeichnet und stellen die gesuchten Dynamik- und Komfortgrenzen für den Fahrzyklus und das jeweilige Temperaturcluster dar.

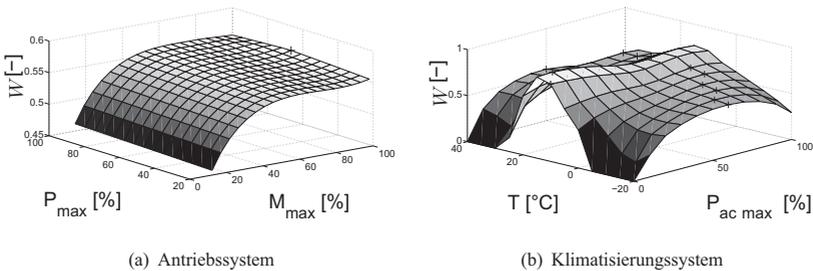


Abb. 7.8.: Zielfunktion zur Ermittlung der Dynamik- und Komfortgrenzen am Beispiel der Stuttgartrunde

Tabelle 7.6 stellt die mittels Optimierung gewonnenen Ergebnisse für die Größen M_{\max} und P_{\max} für die acht untersuchten Zyklen dar.

In weniger dynamischen Zyklen wie dem FTP75 oder der Weissachrunde kann eine starke Degradierung des Drehmoments und der Leistung vorgenommen

werden, ohne die Zielgröße Dynamik zu sehr zu beeinträchtigen. In Zyklen mit höheren Geschwindigkeiten wie dem BAB oder der Dauerlaufrunde hingegen sollte die Leistung nicht zu sehr degradiert werden, das Drehmoment hingegen kann in diesen Zyklen stärker reduziert werden. Dies liegt auch an der Drehmomenten-Drehzahlcharakteristik der E-Maschine, da diese bei hohen Drehzahlen im Feldschwäcbereich nicht mehr das maximale Drehmoment zur Verfügung hat, somit Lastpunkte mit maximalem Drehmoment selten auftreten. In Zyklen mit vielen dynamischeren Anfahrvorgängen wie dem Artemis Urban oder der Stuttgartrunde hingegen sollte aufgrund der starken Überproportionalität des Drehmoments in Bezug auf die Zielgröße Dynamik für eine optimale Auslegung keine Drehmomentenreduzierung vorgenommen werden. Im NEFZ sollte hingegen wie bereits in Abschnitt 7.2.4 diskutiert, keine Degradierungen des Antriebssystems vorgenommen werden, da hierdurch ein Mehrverbrauch entsteht.

Tab. 7.6.: Dynamikgrenzen als Ergebnis der Optimierung

| Zyklus | M_{\max} [%] | P_{\max} [%] |
|--|----------------|----------------|
| NEFZ | 100 | 100 |
| FTP75 | 29 | 48 |
| Artemis Urban | 100 | 44 |
| Verteilerrunde | 79 | 42 |
| Weissachrunde | 38 | 22 |
| Stuttgartrunde | 100 | 67 |
| Dauerlaufrunde | 57 | 89 |
| BAB | 52 | 94 |
| gemittelt - als Applikationsvorgabe | 68 | 74 |

Abbildung 7.9 stellt die Komfortgrenzen für das Klimatisierungssystem als Ergebnis der Optimierung für $P_{ac \max}$ in Abhängigkeit der Außentemperatur ge-

mittelt über alle acht Zyklen dar. Hierbei kann für eine optimale Auslegung bei extrem niedrigen als auch hohen Temperaturen eine Leistungsreduzierung bis ungefähr 60% der Maximalleistung vorgenommen werden. Im Re-Heat Betrieb kann sogar bis auf eine Maximalleistung von 20% reduziert werden. Für die Größen M_{\max} und P_{\max} werden für folgende Untersuchungen im Kontext einer Validierung dem Energiemanagement die gemittelten Werte nach Tabelle 7.6 als Dynamikgrenzen im Kontext einer Grundapplikation vorgegeben. Für $P_{ac \max}$ erfolgt dies analog gemäß der Kennlinie der Abbildung 7.9. Hierüber können die Kennfelder zur Festlegung der Dynamik- und Komfortgrenzen nach Abbildung 5.2 für die Verwendung innerhalb des Energiemanagements applikativ bedatet werden.

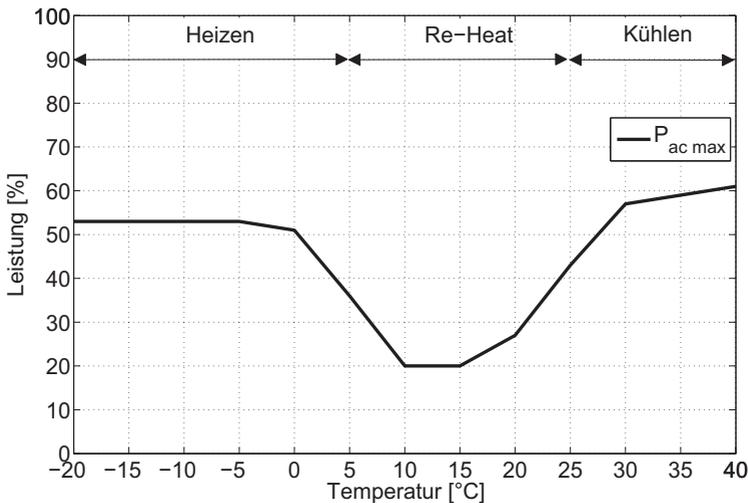


Abb. 7.9.: Komfortgrenzen als Ergebnis der Optimierung

8. Validierung und Bewertung der Betriebsstrategie-Maßnahmen

Nachdem im vorherigen Kapitel 7 eine Methode zur Entschärfung des Zielkonflikts aus Reichweiten-, Dynamik- sowie Komfortwünschen dargelegt wurde, sollen im Folgenden die Funktionen im Sinne einzelner Betriebsstrategie-Maßnahmen validiert und evaluiert werden.

Als wesentliche Funktionen zur Reduzierung des Energieverbrauchs respektive zur Steigerung der Reichweite konnten gemäß Abbildung 3.9 die folgenden Funktionen identifiziert werden, welche im weiteren Verlauf separat analysiert werden:

- Degradierung des Antriebssystems
- Degradierung des Klimatisierungssystems
- Reduzierung von Batterieverlusten durch lastsynchrone Verbrauchersteuerung
- Verlustleistungsminimierte Allradverteilung

8.1. Degradierung des Antriebssystems

Im Folgenden werden unterschiedliche Möglichkeiten zur Degradierung des Antriebssystems diskutiert.

8.1.1. Begrenzung von Drehmoment und Leistung

Die Auswirkungen einer Degradierung des Antriebssystems durch Begrenzung des maximalen Drehmoments und der Leistung, wie in Abschnitt 7.3 dargelegt,

sind in Bezug auf den Energieverbrauch und die einhergehende Dynamikeinbuße stark vom jeweiligen Fahrzyklus abhängig. Abbildung 8.1 stellt die erzielten Ergebnisse für alle acht Zyklen unter Annahme der in Abschnitt 7.3 gemittelten Dynamikgrenzen dar. Positive Werte bedeuten in diesem Fall, dass ein Verbesserungspotential erzielt werden konnte. Dementsprechend zeugen negative Werte von einer Verschlechterung. Die Dynamikeinbuße $\overline{\Delta ax}$ wird hierbei prozentual, jeweils bezogen auf eine maximale Degradierung, dargestellt. Somit wird der Wert für $\overline{\Delta ax}$ mit $P_{\max} = 20\%$ und $M_{\max} = 20\%$ als maximal im Zyklus auftretende Dynamikeinbuße auf 100% gesetzt.

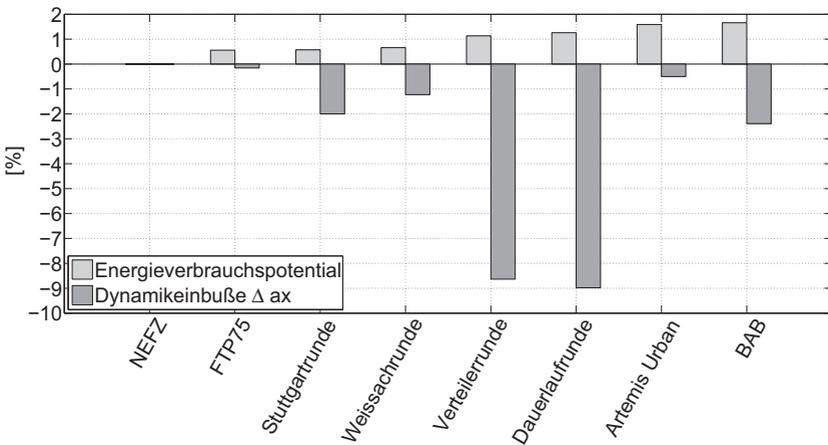


Abb. 8.1.: Einsparpotential in Bezug auf den Energiebedarf und Dynamikeinbuße bei Begrenzung des Drehmoments und der Leistung

Im NEFZ-Zyklus zeigen sich keine Auswirkungen einer Degradierung, da die Lastanforderungen des Zyklus geringer sind als die vorgegebenen Drehmoment- und Leistungsgrenzen des Antriebssystems. Prinzipiell läßt sich jedoch feststellen, dass das Einsparpotential in Bezug auf den Energiebedarf mit der Dynamikanforderung des Zyklus ansteigt. Nicht proportional dazu verhält sich die resultierende Dynamikeinbuße. Gerade bei der Verteiler- und der Dauerlaufrunde treten signifikante Dynamikeinbußen auf, da in diesen Zyklen verhältnismäßig

hohe Drehmomentenanforderungen in Form von Anfahrvorgängen auftreten. Das maximale Drehmoment besitzt nach Tabelle 7.4 einen überproportionalen Einfluss auf die Zielgröße Dynamik.

Insgesamt fällt das Potential zur Degradierung des Antriebssystems bezüglich des Energieverbrauchs mit maximal knapp 2% gering aus. Dies kann dadurch begründet werden, dass aufgrund der Wegvorgabe des Fahrzyklus die Fahrwiderstände nicht wesentlich reduziert werden. Bei einer Degradierung durch Begrenzung des maximalen Drehmoments und der Leistung werden zwar die Beschleunigungen reduziert, sie müssen jedoch aufgrund der Wegvorgabe für einen längeren Zeitraum aufgebracht werden. Somit wirkt sich dies auf den Energieverbrauch lediglich durch geänderte Lastpunkte und damit verbundene Wirkungsgrade aus. Auch die resultierenden Dynamikeinbußen sind stark zyklusabhängig, fallen jedoch meist überproportional zum erzielten Einsparpotential in Bezug auf den Energiebedarf aus.

8.1.2. Begrenzung der Maximalgeschwindigkeit

Zur Reduzierung der Fahrwiderstände soll im Folgenden eine Begrenzung der maximalen Geschwindigkeit untersucht werden. Da sich diese lediglich bei Zyklen mit höheren Geschwindigkeitsanteilen auswirkt, werden hierfür der BAB-Zyklus, Dauerlauf- sowie die Stuttgartrunde zur Evaluierung betrachtet. Abbildung 8.2 zeigt die Sensitivität einer Begrenzung der maximal zulässigen Höchstgeschwindigkeit in Bezug auf den Energieverbrauch des Antriebssystems. Das erzielbare Einsparpotential in Bezug auf den Energieverbrauch ist abhängig von der Häufigkeit der entsprechenden Geschwindigkeitsanteile im Fahrzyklus. Da im BAB-Zyklus fast ausschließlich Geschwindigkeitsanteile über $80 \frac{km}{h}$ auftreten, fällt das Einsparpotential in Bezug auf den Energiebedarf in diesem Zyklus am größten aus. Prinzipiell ist für alle drei Zyklen ein überproportionaler Einfluss erkennbar, welcher auf die quadratische Abhängigkeit der Geschwindigkeit in Bezug auf den Luftwiderstand zurück zu führen ist. Somit kann durch eine Begrenzung der maximalen Geschwindigkeit der Fahrwider-

stand insbesondere bei Autobahnfahrten wesentlich reduziert werden. In Bezug auf die Längsbeschleunigung und die nach Gleichung 7.2 definierte objektivierte Bewertungsgröße zur Dynamikbewertung hat eine Geschwindigkeitsbegrenzung keine Auswirkungen. Da, wie bereits in Abschnitt 7.2.1 erörtert, die Längsgeschwindigkeit von der menschlichen Sinneswahrnehmung nicht direkt erfasst werden kann, ist eine geringere subjektive Wahrnehmung anzunehmen insbesondere im Vergleich zu einer Drehmomentenbegrenzung.

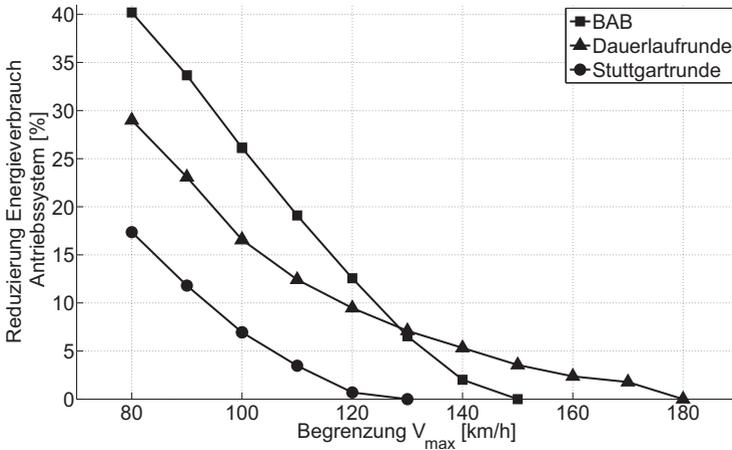


Abb. 8.2.: Reduzierung des Energiebedarfs durch Begrenzung der Maximalgeschwindigkeit

8.2. Degradierung des Klimatisierungssystems

Durch eine Degradierung des Klimatisierungssystems mittels Reduzierung der maximalen Aufnahmeleistung kann in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen ein Reichweitenpotential erzielt werden.

8.2.1. Lineare Gewichtung der Zielgrößen

Zur Evaluierung dieser Maßnahme werden die Zyklen solange wiederholend absolviert, bis die Batterie leer ist. Das Fahrzeug wird zunächst zu Fahrtbeginn als nicht vorkonditioniert und mit voll geladener Batterie betrachtet. Es wird zuvor für sechs Stunden den Umgebungsbedingungen ausgesetzt.

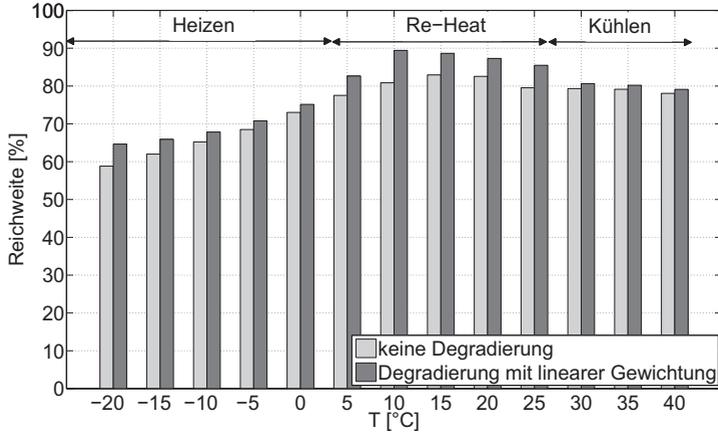
Abbildung 8.3 zeigt die Ergebnisse exemplarisch für die Stuttgartrunde für den gesamten untersuchten Temperaturbereich. Dargestellt ist sowohl die Reichweite bei nicht degradiertem, als auch bei degradiertem System. Die Qualitätsmerkmale Reichweite und thermischer Komfort sind hierbei zunächst im Rahmen des Optimierungsprozesses gleichwertig jeweils mit $k = 1$ zueinander gewichtet. Die hierbei einzuhaltenden Komfortgrenzen werden gemäß Abbildung 7.9 berücksichtigt. 100% Reichweite entsprechen dem Energieverbrauch des Antriebssystems.

Das Reichweitenpotential variiert nach Abbildung 8.3(a) in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen. Auffällig ist, dass das Reichweitenpotential im Heizbetrieb höher ausfällt als im Kühlbetrieb bei hohen Außentemperaturen. Das Komfortmodell berücksichtigt hierbei die direkte Sonneneinstrahlung und die Strahlungstemperaturen der umliegenden Bauteile (Scheiben, Dachhimmel etc.). Daher reagiert das Komfortmodell im Kühlbetrieb bei hoher Sonneneinstrahlung sensitiv auf eine Systemdegradierung der Innenraumklimatisierung, dargestellt in Abbildung 8.3(b). Da die Luftfeuchte das Komfortmodell weniger stark beeinflusst, kann durch eine Degradierung im Temperaturbereich des Re-Heat-Betriebs das größte Potential bei minimaler Komfordinbuße erzielt werden. Hierbei wird die Luft zunächst zur Entfeuchtung abgekühlt, um sie anschließend wieder zu erhitzen, wobei hierbei aufgrund der Leistungsreduzierung nicht mehr die Zieltemperatur erreicht wird.

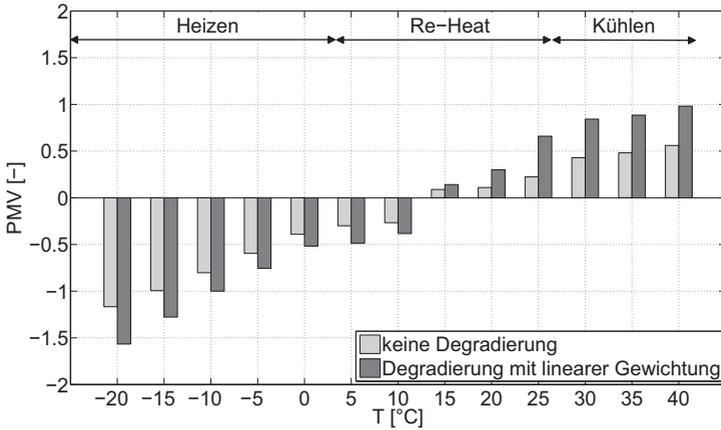
Abbildung 8.4 zeigt zusammenfassend für alle acht Zyklen den prozentualen Reichweitengewinn und die Komfordinbuße in Form des Unterschieds im PMV-Index sowie der mittleren Abweichung zur Zieltemperatur nach Abbildung 2.5,

welche die Regelgröße der Klimatisierung darstellt. Die Größen sind jeweils für die Randbereiche der Temperatur im Heiz- und Kühlfall sowie für den Re-Heat-Betrieb dargestellt.

Die Reichweitenpotentiale nach Abbildung 8.4(a) fallen in den Zyklen mit geringer Durchschnittsgeschwindigkeit größer aus, da der Anteil der Klimatisierung am Gesamtenergieverbrauch größer ist. Die resultierende Komforteinbuße nach Abbildung 8.4(b) steigt jedoch mit der Durchschnittsgeschwindigkeit, da die konvektiven Wärmeübergänge an der Karosserie aufgrund der größeren Anströmgeschwindigkeiten erhöht werden. Dies führt am Innenraummodell im Heiz- sowie im stationären Kühlbetrieb zu einer erhöhten Wärmeab- bzw. zufuhr, wodurch sich eine größere Abweichung zur Zieltemperatur ergibt. Dies wiederum wirkt sich dann negativ auf den thermischen Komfort in Form des PMV-Index aus. Für den Kühl- und Heizfall stellt sich die Komforteinbuße annähernd gleich dar. Dies zeigen sowohl der Unterschied des PMV-Index zwischen degradiertem und nicht degradiertem System, als auch die mittleren Abweichungen zur Zieltemperatur nach Abbildung 8.4(c). Diese Abweichungen liegen für alle betrachteten Zyklen und Umgebungsbedingungen unterhalb von $\pm 4^\circ\text{C}$.

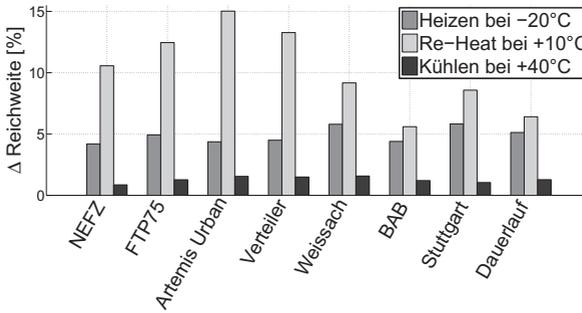


(a) Reichweitenpotential

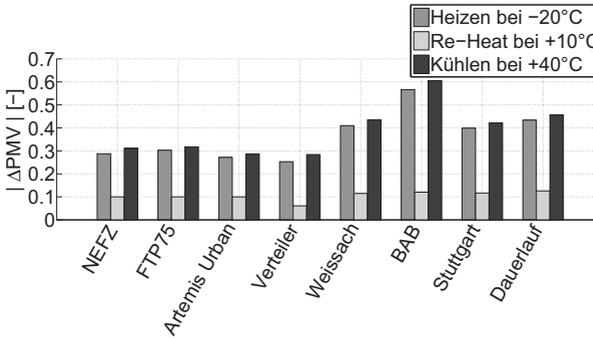


(b) Einbuße des thermischen Komforts

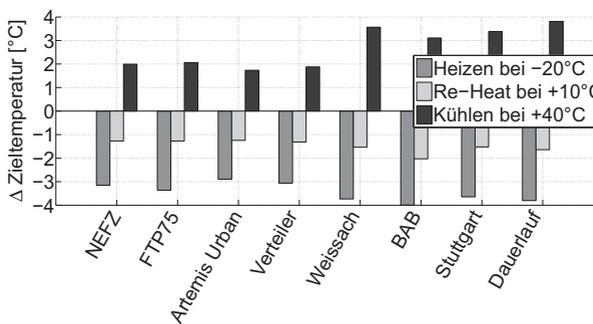
Abb. 8.3.: Auswirkungen der Degradierung des Klimasystems am Beispiel der Stuttgartrunde (bei linearer Gewichtung der Zielgrößen)



(a) Reichweitenpotential



(b) Komforteinbuße



(c) Mittlere Abweichung zur Zieltemperatur

Abb. 8.4.: Auswirkungen der Degradierung des Klimatisierungssystems für alle untersuchten Zyklen

8.2.2. Sensitivitätsanalyse durch unterschiedliche Gewichtung der Zielgrößen

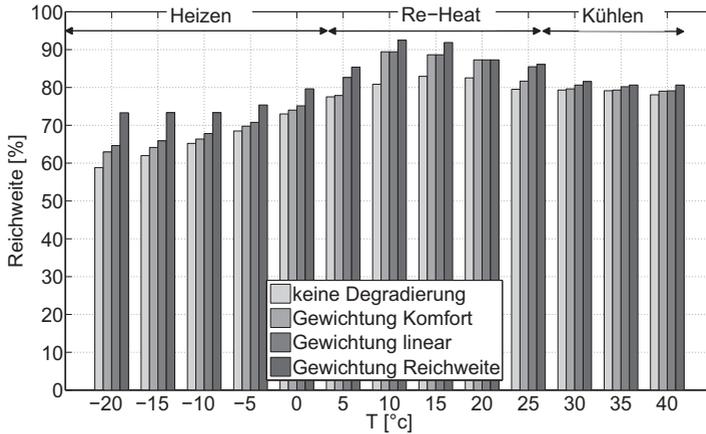
Da gezeigt werden konnte, dass der Energieverbrauch des Klimatisierungssystems und der thermische Komfort in Abhängigkeit der Fahrzyklen und Umgebungsbedingungen eine große Spreizung aufweisen, kann durch eine Gewichtung der Zielgrößen die Betriebsstrategie unterschiedlich ausgeprägt werden. Hierfür können, wie in Abschnitt 7.2.5 dargelegt wurde, die Zielgrößen mittels der Abbildungsform der Normierungsfunktion unterschiedlich gewichtet werden. Abbildung 8.5 zeigt eine Sensitivitätsanalyse mit unterschiedlichen Ausprägungsvarianten für eine komfortbetonte sowie eine reichweitenbetonte Betriebsstrategie im Vergleich zu einer linearen Gewichtung der Zielgrößen sowie dem undegradierten System analog der Abbildung 8.3. Es wurden für die Normierungsfunktionen exemplarisch die Exponenten k nach Gleichung 7.7 gemäß Tabelle 8.1 gewählt.

Tab. 8.1.: Wahl der Exponenten zur Gewichtung der Zielgrößen

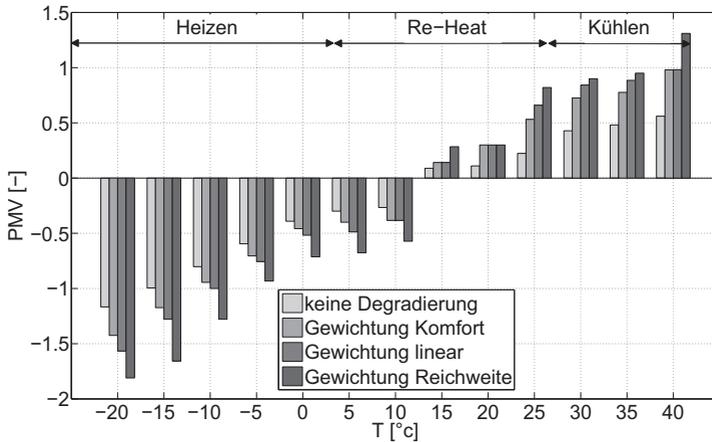
| Ausprägung | k für q_{PMV} | k für $q_{b_{ac}}$ |
|-------------------|-------------------|----------------------|
| komfortbetont | 2 | 0.5 |
| linear | 1 | 1 |
| reichweitenbetont | 0.5 | 2 |

Bei der vorliegenden Sensitivitätsanalyse wurden die Zielgrößen für Reichweite und thermischen Komfort unterschiedlich gewichtet. Analog könnte auch eine unterschiedliche Gewichtung bezüglich der Zielgröße Dynamik vorgenommen werden. Es konnte jedoch nach Abbildung 8.1 gezeigt werden, dass das Reichweitenpotential in allen untersuchten Fahrzyklen sehr gering ausfällt. Daher bietet eine unterschiedliche Ausprägung bezüglich des Attributs Dynamik aus energetischen Gesichtspunkten für die Betriebsstrategie keinen Mehrwert. Die Sensitivitätsanalyse nach Abbildung 8.5 dient nicht nur zur Darstellung unterschiedlicher Ausprägungsvarianten der Betriebsstrategie, sondern belegt

insbesondere die Robustheit des durchgeführten Optimierungsverfahrens nach Abschnitt 7.2.



(a) Reichweitenpotential



(b) Einbuße des thermischen Komforts

Abb. 8.5.: Ausprägungsvarianten der Betriebsstrategie durch unterschiedliche Gewichtung der Zielgrößen Reichweite und thermischer Komfort am Beispiel der Stuttgartrunde

8.2.3. Untersuchungen zur Vorkonditionierung des Innenraums

Bei den bisherigen Untersuchungen wurde das Fahrzeug zu Fahrtbeginn als unkonditioniert betrachtet. Des Weiteren wurden die Zyklen zur Evaluierung so lange wiederholend absolviert, bis der Energieinhalt der Batterie aufgebraucht war. Im Folgenden soll nun das Potential einer Vorkonditionierung der Fahrzeuggabine evaluiert werden. Hierzu wird der Fahrzeuginnenraum vor Fahrtbeginn durch das Klimatisierungssystem bereits auf Zieltemperatur konditioniert. Der benötigte Energiebedarf wird dem Netz und nicht der Batterie entnommen, wodurch der Energiebedarf des Klimatisierungssystems während der Fahrt reduziert werden kann.

Das Potential einer Vorkonditionierung in Bezug auf eine Energieverbrauchsreduzierung ist neben den Umgebungsbedingungen stark vom individuellen Mobilitätsverhalten abhängig. Im Wesentlichen sind hierbei die Einflussfaktoren Fahrzeit sowie durchschnittliche Geschwindigkeit relevant. Abbild 8.6 zeigt für die acht Zyklen das Einsparpotential in Bezug auf den Energieverbrauch bedingt durch eine Vorkonditionierung des Innenraums. Die Zyklen werden hierzu lediglich einmal absolviert. Das Einsparpotential in Bezug auf den Energiebedarf sinkt zum einen mit steigender Fahrzeit, da der Anteil des dynamischen Abkühl- bzw. Aufheizvorgangs beim unkonditionierten Fahrzeug mit steigender Fahrzeit kleiner wird. Zum anderen sinkt das Einsparpotential in Bezug auf den Energiebedarf mit steigender Durchschnittsgeschwindigkeit, da der Anteil des Energieverbrauchs der Klimatisierung am Gesamtenergieverbrauch mit steigender Durchschnittsgeschwindigkeit kleiner wird. Bei kurzen Fahrten mit geringer Durchschnittsgeschwindigkeit kann ein maximales Potential in Bezug auf den Energiebedarf von rund 40% im Heizbetrieb und 30% im Kühlbetrieb erzielt werden. Die prinzipiellen Verhältnisse stellen sich für Heiz- und Kühlbetrieb ähnlich dar.

Durch die Vorkonditionierung kann neben der Reduzierung des Energieverbrauchs insbesondere auch der thermische Komfort in der Fahrzeuggabine er-

heblich gesteigert werden. Abbildung 8.7 stellt die Komfortsteigerung im Vergleich zu einer Fahrt mit unkonditioniertem Fahrzeug dar. Insbesondere in Bezug auf die Fahrtzeit kann ein signifikanter Einfluss bezüglich des thermischen Komforts erzielt werden, da bereits zu Fahrtbeginn die Fahrzeuggabine auf Zieltemperatur konditioniert ist. Ein Einfluss der Durchschnittsgeschwindigkeit kann in Bezug auf den Komfort nicht festgestellt werden.

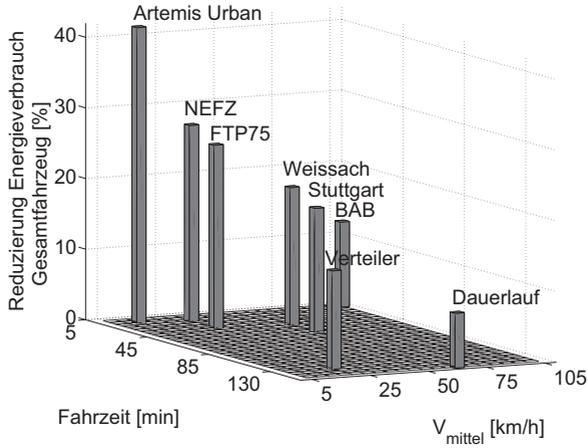
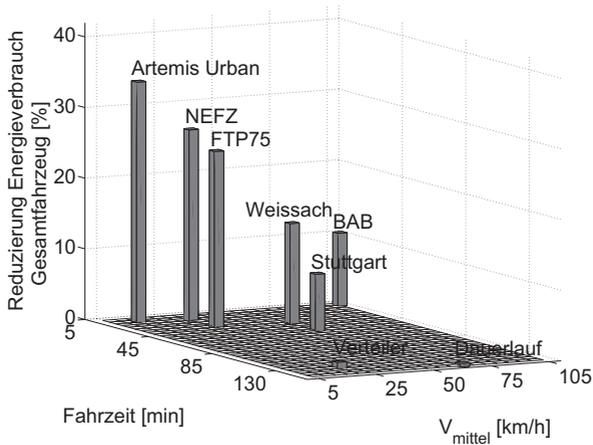
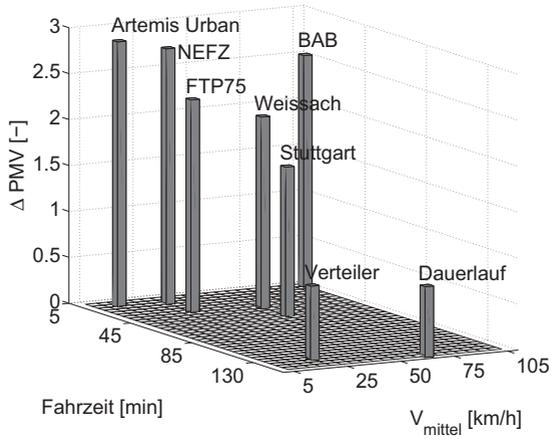
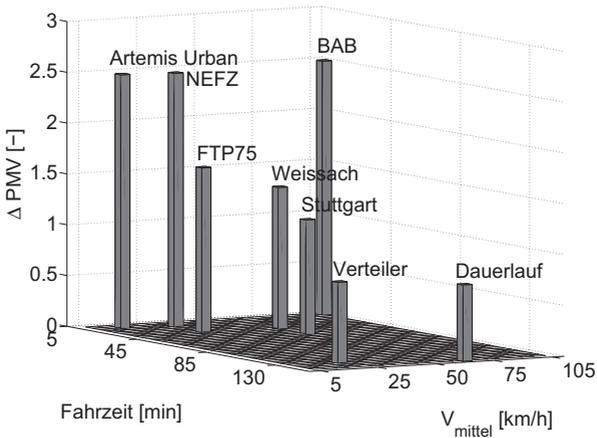
(a) Heizbetrieb bei $T = -20^\circ\text{C}$ (b) Kühlbetrieb bei $T = +40^\circ\text{C}$ und $700 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ Sonneneinstrahlung

Abb. 8.6.: Reduzierung des Energieverbrauchs durch Vorkonditionierung des Innenraums



(a) Heizbetrieb bei $T = -20^\circ\text{C}$



(b) Kühlbetrieb bei $T = +40^\circ\text{C}$ und $700 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ Sonneneinstrahlung

Abb. 8.7.: Komfortsteigerung durch Vorkonditionierung des Innenraums

8.3. Reduzierung der Batterieverluste

Wie bereits in Abschnitt 3.2.2 dargelegt, sollen durch die Umsetzung einer last-synchronen Verbrauchersteuerung des Klimatisierungssystems Leistungsspitzen und hieraus resultierende Batterieverluste reduziert werden. Das Prinzip beruht auf einer Leistungsanhebung der Innenraumklimatisierung während Rekuperationsphasen. Hierdurch wird die zurückgewonnene Bremsenergie direkt im Gleichstromzwischenkreis an die Nebenverbraucher abgeführt, ohne diese in der Batterie mit entsprechenden Ein- und Ausspeiseverlusten zwischenspeichern zu müssen. In darauf folgenden motorischen Phasen kann die Leistung zur Innenraumklimatisierung reduziert werden. Dies gewährleistet einen annähernd konstanten thermischen Komfort bei gleichzeitiger Reduzierung von Leistungsspitzen und auftretenden Batterieverlusten.

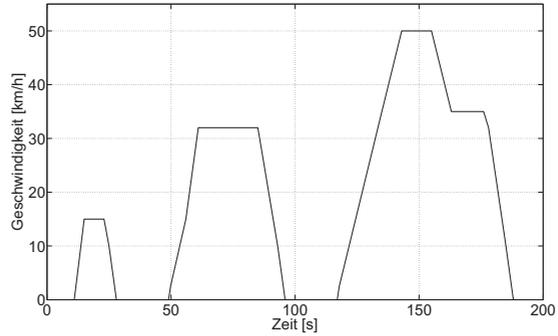
Abbildung 8.8 zeigt hierzu exemplarisch die sich einstellenden Leistungsverläufe im ECE-Teilzyklus des NEFZ im winterlichen Heizbetrieb bei 0°C im Vergleich zu einer kontinuierlichen Nebenverbrauchersteuerung. Ersichtlich ist, dass erst eine Leistungsanhebung in Rekuperationsphasen statt findet, wenn auch genügend Leistung durch Rekuperation zur Deckung der Nebenverbraucherlast vorhanden ist. Daher wird in der ersten Rekuperationsphase die Leistung der PTC-Heizung nicht erhöht.

Tabelle 8.2 stellt die Ergebnisse aller untersuchten Zyklen für eine exemplarische Fahrt im Heizbetrieb bei 0°C Außentemperatur zusammenfassend dar. Durch die dargestellte Funktion können die auftretenden Batterieverluste in erheblichem Maße reduziert werden. Das sich ergebende Einsparpotential in Bezug auf den Energiebedarf fällt insgesamt sehr gering aus, da die Batterieverluste am Gesamtenergieverbrauch einen geringen Anteil ausmachen, wie bereits durch die Energieflussanalyse in Abschnitt 3.2.1 gezeigt werden konnte. Aus energetischer Sicht steht der erhebliche funktionale Aufwand zur robusten und sicheren Umsetzung in keinem Verhältnis zu dem geringen Einsparpoten-

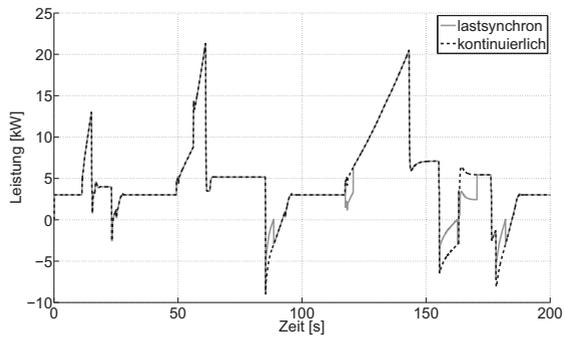
tial in Bezug auf den Energiebedarf. Auf die Batterielebensdauer wirkt sich die erhebliche Reduzierung der Leistungsspitzen generell positiv aus.

Tab. 8.2.: Potentiale einer lastsynchrone Klimasteuerung im Vergleich zu einer kontinuierlichen Klimasteuerung

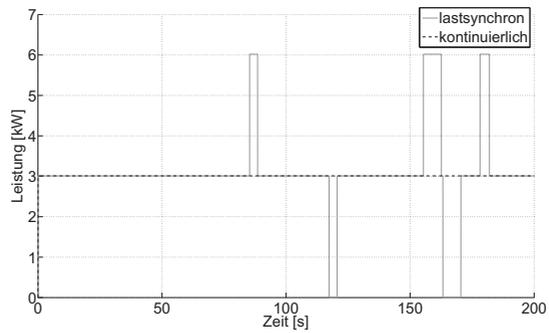
| Zyklus | ΔBatterieverluste [%] | ΔEnergieverbrauch [%] |
|-----------------|--|--|
| NEFZ | -41.6 | -0.3 |
| FTP75 | -35.8 | -0.3 |
| Artemis Urban | -42.1 | -0.5 |
| Verteilerrunde | -17.7 | -0.2 |
| Weissachrunde | -19.8 | -0.4 |
| Stuttgartrunde | -12.7 | -0.2 |
| Dauerlauftrunde | -25.2 | -0.2 |
| BAB | -12.1 | -0.5 |



(a) Geschwindigkeit



(b) Batterie

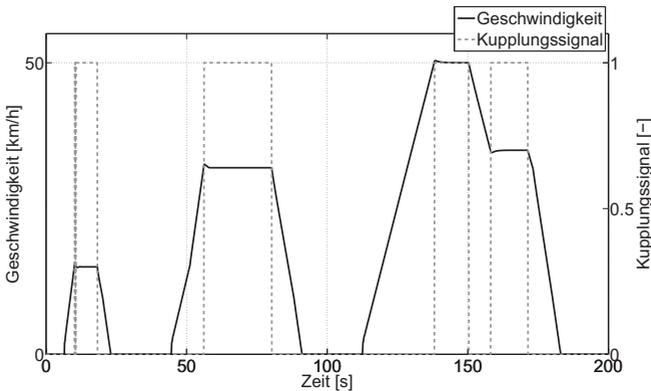


(c) PTC-Heizung

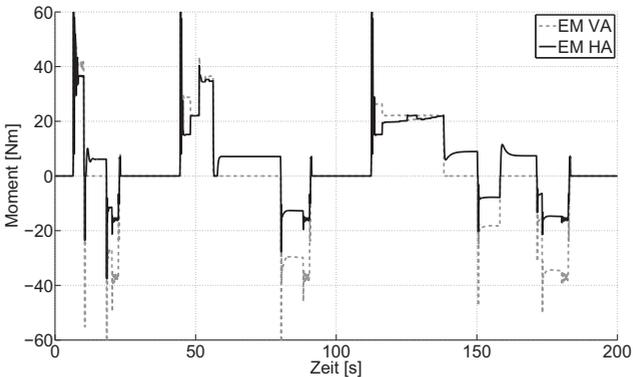
Abb. 8.8.: Validierung der lastsynchrone Klimasteuerung im ECE-Teilzyklus des NEFZ

8.4. Verlustleistungsminimierte Allradverteilung

Die in Abschnitt 5.2.2 dargestellte verlustleistungsminimierte Allradverteilung soll mit Hilfe des Online-Optimierers für Top IV ein weiteres Verbrauchspotential erbringen. Abbildung 8.9 zeigt zunächst zur Validierung der Funktion für den ECE-Teilzyklus des NEFZ die Kupplungsstellung und Momentenaufteilung für Vorder- und Hinterachse.



(a) Kupplungsstatus und Geschwindigkeit



(b) Momente

Abb. 8.9.: Validierung der Funktion zur Allradverteilung im ECE-Teilzyklus des NEFZ

In den Beschleunigungsphasen bei höheren Leistungsanforderungen sind beide Maschinen am Leistungsfluss beteiligt. In den Konstantfahrphasen mit niedrigen Lastanforderungen ist nach Abbildung 8.9(a) die Vorderachsmaschine mechanisch abgekoppelt, um keine Leerlaufverluste zu generieren. Die Momentenanforderung wird von der Hinterachsmaschine erbracht, wie Abbildung 8.9(b) zeigt.

Entscheidend für eine Steigerung der Effizienz und somit zur Energieverbrauchsreduzierung ist die Verteilung der Lastpunkte im Kennfeld. Abbildung 8.10 zeigt hierzu die motorischen Lastpunktverteilungen für entsprechende Allradverteilungen im NEFZ-Zyklus. Eine konstante 50:50-Momentenverteilung in motorischen Phasen dient hierbei als Referenz.

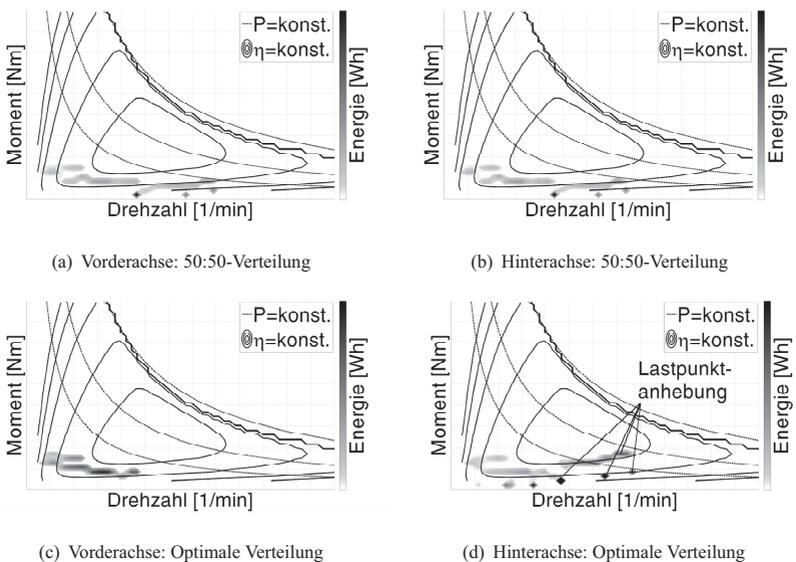


Abb. 8.10.: Auftretende motorische Lastpunkte von Top IV bei entsprechender Allradverteilung im NEFZ

Bei optimierter Allradverteilung nach Abbildung 8.10(c) und 8.10(d) ist ersichtlich, dass die Vorderachse nur bei höherem Leistungsbedarf, vorzugsweise bei

Beschleunigungsvorgängen, eingesetzt wird. In Konstantfahrphasen wird die Vorderachse abgekoppelt und der Leistungsbedarf rein über die Hinterachse gedeckt. Somit kann die Hinterachsmaschine in wirkungsgradgünstigeren Bereichen betrieben werden. Aufgrund des synthetischen Charakters des NEFZ und der geringen Kennfeld-Abdeckung wird in Abbildung 8.11 zusätzlich die Häufigkeitsverteilung in der Stuttgartrunde heran gezogen, um die Funktion auch für ein breiteres Spektrum an auftretenden Betriebspunkten für einen realen Fahrzyklus zu validieren. Auch Abbildung 8.11 verdeutlicht die Wirkungsgradverbesserung insbesondere im unteren Teillastbereich. Die Abbildungen E.1 und E.2 stellen im Anhang E die Ergebnisse der übrigen untersuchten Fahrzyklen dar. Prinzipiell kann für alle Fahrzyklen gezeigt werden, dass durch das Optimierungsverfahren die Vorderachse nicht mehr im unteren Teillastbereich betrieben wird. Hierdurch bedingt die Lastpunktanhebung der Hinterachse eine Wirkungsgradsteigerung.

Abbildung 8.12 zeigt abschließend das Verbrauchspotential durch eine optimierte Allradverteilung im Vergleich zu einer festen 50:50-Verteilung für alle acht Zyklen. Es ist ersichtlich, dass durch die Funktion zur optimierten Allradverteilung in allen Zyklen ein merklicher Verbrauchsvorteil erzielt werden kann. Je geringer die Lastanforderung des Zyklus, desto höher fällt das prozentuale Einsparpotential in Bezug auf den Energiebedarf aus. Lediglich im Artemis Urban fällt das Verbrauchspotential mit 1% im Vergleich gering aus. Dies kann durch den schmalen Betriebspunktebereich im Zyklus erklärt werden. Der Optimierer hat aufgrund dieser Zyklus-Charakteristik keine große Möglichkeit, die Lastpunkte in wirkungsgradgünstigere Punkte zu verteilen. Die Abbildungen E.1(c) und E.1(d) zeigen, dass die auftretenden Lastpunkte aufgrund der Last- und Geschwindigkeitsanforderung des Zyklus bereits in wirkungsgradgünstigen Bereichen liegen. Die Aufteilung kommt hierbei einer reinen 50:50-Verteilung bereits sehr nahe. Kupplungsvorgänge werden für diese Untersuchungen als ideal und verlustfrei angenommen und abgebildet.

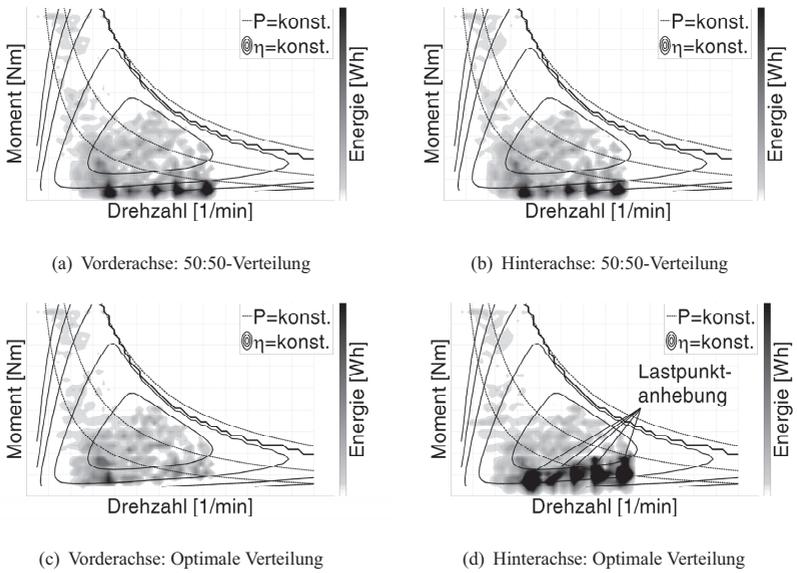


Abb. 8.11.: Auftretende motorische Lastpunkte von Top IV bei entsprechender Allradverteilung in der Stuttgartrunde

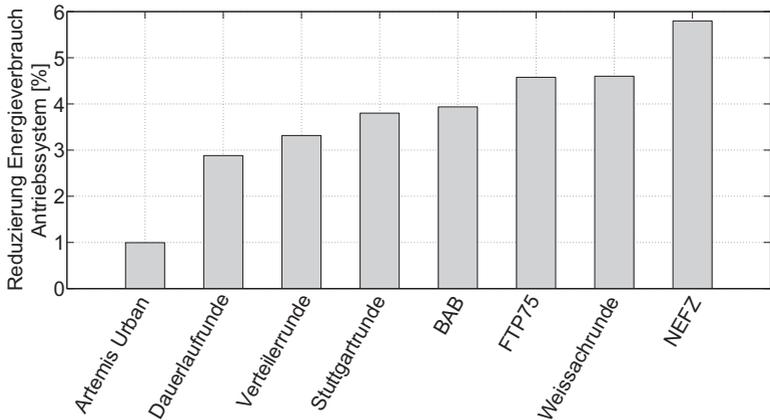


Abb. 8.12.: Verbrauchsreduzierung durch verlustleistungsminimierte Allradverteilung für Top IV

8.5. Prädiktive Betriebsstrategie durch Nutzung von Strecken- und Umgebungsdaten

In Abschnitt 5.1.2 wurde die Funktion zur Vorgabe der Betriebsstrategie in Zielführung vorgestellt. Ziel dieser Funktion des Energiemanagements ist das Einregeln einer geforderten Reichweite, wenn ein konkretes Fahrziel in Form einer Navigationseingabe bekannt ist. Das Energiemanagement und die Reichweitemittlung interagieren zu diesem Zweck, um Streckeninformationen prädiktiv zu nutzen und hierdurch die Reichweite des Fahrzeugs präzise zu prognostizieren. Liegt das Fahrziel mit den aktuellen Fahrzeugeinstellungen außerhalb der prognostizierten Reichweite, kann das Energiemanagement durch Betriebsstrategieeingriffe die Reichweite des Fahrzeugs bedarfsgerecht verlängern, bis das Ziel erreichbar wird.

Dies soll am Beispiel der Weissachrunde in einem hypothetischen Winterszenario mit Heizbetrieb und aktivierter Sitz-, Lenkrad- sowie Scheibenheizung erläutert werden. Tabelle 8.3 stellt die Randbedingungen des Manövers und die exemplarische Applikation des Energiemanagements dar.

Tab. 8.3.: Manöver zur Darstellung der Betriebsstrategie in Zielführung

| Parameter | Wert | Einheit |
|--|------|---------|
| Strecke bis Ziel | 48 | [km] |
| Start-SOC | 40 | [%] |
| Reichweite zu Fahrtbeginn ohne Eingriffe | 44 | [km] |
| Prioritätskennzahl der Sitzheizung | 2 | [-] |
| Prioritätskennzahl der Lenkradheizung | 2 | [-] |
| Prioritätskennzahl der Scheibenheizung | 4 | [-] |
| Prioritätskennzahl der Heizung Innenraum | 5 | [-] |

Das Szenario sieht vor, dass eine Strecke von insgesamt 48 km befahren werden soll, siehe Abbildung 8.14. Da die Batterie jedoch zu Fahrtbeginn nicht voll geladen ist und aufgrund von aktivierten Nebenverbrauchern ein hoher Energiebedarf besteht, kann das Ziel unter diesen Einstellungen nicht erreicht werden. Es wird zunächst eine Reichweite von 44 km prädiziert. Um die geforderte Zielerreichung zu gewährleisten, führt das Energiemanagement nun auf Basis der applizierten Prioritätskennzahlen Degradierungen der jeweiligen Verbraucher durch. Abbildung 8.13 stellt die Leistungsflüsse zu Fahrtbeginn dar. Da die Sitz- und Lenkradheizung am niedrigsten priorisiert sind (PK 2), werden diese zuerst degradiert. Dies führt zu einem Reichweitengewinn, welcher noch nicht zur Zielerreichung ausreicht. Daher wird die mit PK 4 nächst höher priorisierte Scheibenheizung degradiert. Es stellt sich ein Reichweitengewinn von Rund 1 km ein, der jedoch zur Zielerreichung nicht ausreicht. Daher wird die Heizung zur Innenraumklimatisierung unter Beachtung der definierten Komfortgrenze solange degradiert, bis das Ziel innerhalb der prädizierten Reichweite liegt. Die seitens des Energiemanagements freigegebene Leistungsaufnahme der Innenraum-Heizung beträgt rund 5500 W. Es kann somit gezeigt werden, dass durch die Nutzung von Streckendaten der Algorithmus des Energiemanagements streckenspezifisch und adaptiv eine Wunschreichweite zur Zielerreichung einregeln kann. Der Ansatz ist in Bezug auf die Verbraucherpriorisierung und Komfortgrenzen frei applizierbar anzuwenden.

Zur Reichweitenprognose werden Streckendaten in Form von Geschwindigkeitslimits, Höhenprofil sowie Kurvenkrümmungen genutzt, wie in Abschnitt 5.3.2 erörtert wurde. Auch der Heizleistungsbedarf kann nach Abschnitt 5.3.3 prädiktiv mit Hilfe eines neuronalen Netzes prädiziert werden. Abbildung 8.13 zeigt die Güte des Algorithmus zur Reichweitenberechnung im Vergleich zu einer optimalen Prognose. Diese würde, als Winkelhalbierende dargestellt, pro gefahrenen Kilometer um einen Kilometer abnehmen. Der umgesetzte Algorithmus zeigt lediglich geringe Abweichungen auf.

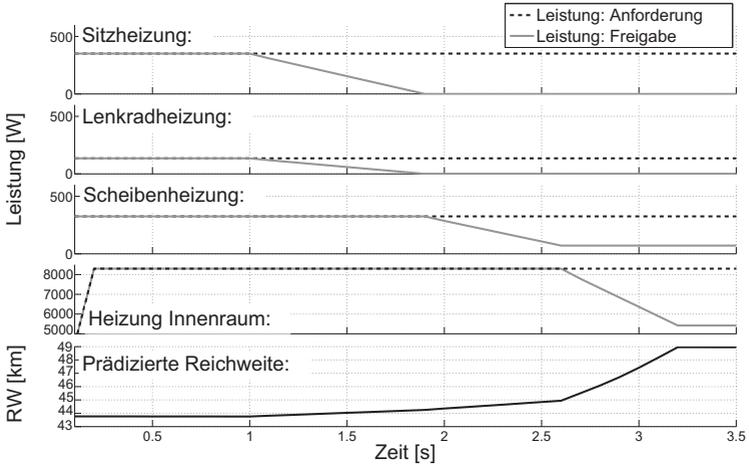


Abb. 8.13.: Betriebsstrategieeingriffe des Energiekoordinators zur Gewährleistung der Zielerreichung vor Fahrtbeginn

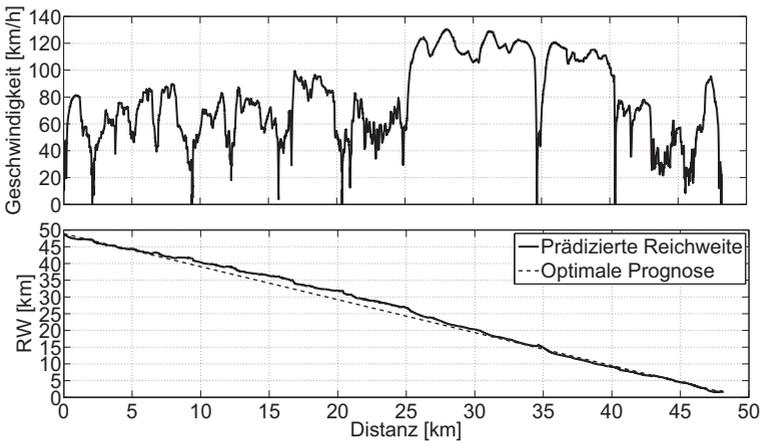


Abb. 8.14.: Reichweitenprognose während des Manövers

8.6. Zusammenfassung und Fazit der Betriebsstrategie

Die dargestellten energetischen Potentiale der einzelnen Maßnahmen sind zum einen stark zyklusabhängig und zum anderen in Bezug auf ein quantifizierbares Gesamtpotential stark abhängig von den Umgebungsbedingungen. Zum Zweck einer zusammenfassenden Übersicht soll der Beitrag der jeweiligen Maßnahmen am Gesamtpotential ausgewiesen werden. Des Weiteren soll das durch eine gesamtheitliche Betriebsstrategie erzielbare Gesamtpotential als Summe der Einzelmaßnahmen quantifiziert werden. Als Bezugsgröße dient hierbei der über alle Temperaturbereiche gemittelte Energieverbrauch des Gesamtfahrzeugs. Abbildung 8.15 zeigt die Ergebnisse für die acht untersuchten Zyklen über alle Temperaturbereiche gemittelt (-20°C bis $+40^{\circ}\text{C}$). In einzelnen Temperaturbereichen kann somit teilweise das Potential höher ausfallen, als in Abbildung 8.4 dargestellt.

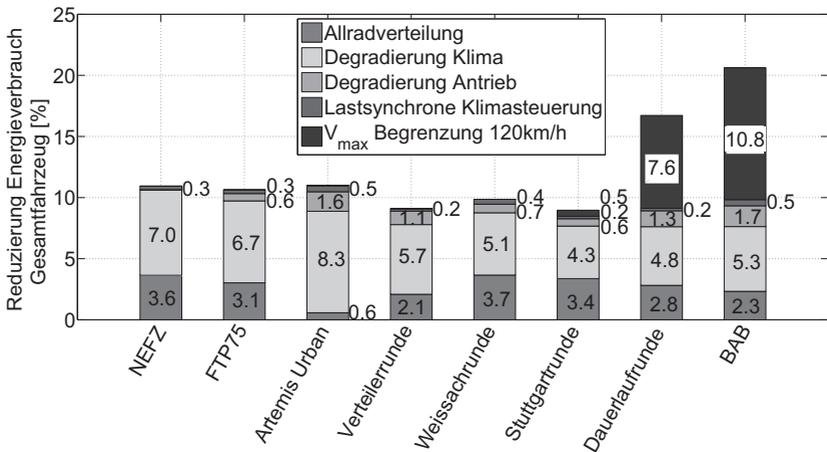


Abb. 8.15.: Verbrauchspotentiale der einzelnen Betriebsstrategie-Maßnahmen über alle Temperaturbereiche gemittelt (-20°C bis $+40^{\circ}\text{C}$)

Als wesentliche Betriebsstrategie-Maßnahme kann die Funktion zur Degradierung des Klimatisierungssystems zur bedarfsgerechten Reichweitensteigerung

bei gleichzeitiger Gewährleistung eines Mindestkomforts in der Fahrzeugkabine beitragen. Im Mittel über alle Temperaturbereiche liegt das Einsparpotential in Bezug auf den Energiebedarf zwischen 4% und 8%. Die sich hierbei ergebenden Einschränkungen bezüglich des thermischen Komforts in Form des mittleren PMV-Index betragen maximal $\overline{\Delta PMV} = 0,5$, was einer maximalen Abweichung zur Zieltemperatur von 4 °C entspricht.

Des Weiteren führt eine verlustleistungsoptimale Momentenverteilung in motorischen Phasen zu einer erheblichen Reduzierung des Gesamtenergieverbrauchs und somit zur Steigerung der Reichweite. Gerade in Zyklen mit geringer Lastanforderung kann hierdurch eine Reduzierung des Energieverbrauchs des Gesamtfahrzeugs von über 5% durch eine Steigerung der Effizienz des Antriebssystems erzielt werden.

In Zyklen mit hohen Geschwindigkeitsanteilen kann zusätzlich eine Begrenzung der Maximalgeschwindigkeit zur Reduzierung des Gesamt-Energieverbrauchs beitragen.

Als weniger zielführend erweist sich die Funktion zur Degradierung des Antriebssystems durch Begrenzung von Drehmoment und Leistung. Die erzielbaren Reichweitenpotentiale liegen in fast allen Zyklen unter 1% und fallen im Vergleich zur damit einhergehenden Dynamikeinbuße sehr gering aus. Die Dynamikeinbuße beträgt hierbei bis zu 10%. Somit entsteht für den Kunden ein spürbares Defizit im Fahrverhalten, ohne eine merkliche Reichweitensteigerung zu erfahren. Aus diesem Grund wird die Betriebsstrategie-Maßnahme zur Degradierung des Antriebssystems durch Begrenzung von Drehmoment und Leistung als nicht zielführend erachtet.

Ein noch geringeres Einsparpotential in Bezug auf den Energiebedarf wird durch eine lastsynchrone Klimaregelung erzielt. Die Batterieverluste können zwar in erheblichem Maße reduziert werden, sie besitzen jedoch an den Gesamtverlusten gemessen einen sehr geringen Anteil. Der hohe funktionale Aufwand rechtfertigt das sehr geringe Reichweitenpotential aus energetischen Gesichtspunkten nicht, die Batterielebensdauer kann hingegen positiv beeinflusst wer-

den. Durch die Summe aller Betriebsstrategie-Maßnahmen kann, wie Abbildung 8.15 zusammenfassend zeigt, im Mittel über alle Temperaturbereiche ein Reichweitenpotential zwischen 9% und 20% unter Einhaltung von annehmbaren Dynamik- und Komfortgrenzen erzielt werden.

9. Diskussion und Ausblick

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der Konzeption, der funktionalen Umsetzung und Applikation sowie der virtuellen Bewertung geeigneter Betriebsstrategie-Maßnahmen für Elektrofahrzeuge zur Steigerung der Reichweite und zur Entschärfung des Zielkonflikts aus Reichweiten-, Dynamik- sowie Komfortansprüchen. Die Arbeit kann in diesem Kontext als eine ganzheitliche Methode zum anforderungsgerechten Entwurf des gesamten funktionalen Konzepts eines Elektrofahrzeugs verstanden werden. Abbildung 9.1 stellt die entwickelte Methode als Handlungssystem eingebettet in den Produktentwicklungsprozess zwischen Zielsystem und final implementiertem Objektsystem zusammenfassend dar. Im Rahmen dieser Arbeit wurden eingangs verschiedene Ausführungsformen von Antriebssystemen hinsichtlich ihrer Eignung in Abhängigkeit des Fahrzeugsegments evaluiert. Hierbei konnte ein achsindividueller Antrieb mit zwei permanenterregten Synchronmaschinen und einer Kupplung als das energetisch beste Konzept identifiziert werden. Mit Hilfe von Energieflussanalysen konnten darauf aufbauend reichweitensteigernde Funktionen im Sinne einer ganzheitlichen Betriebsstrategie abgeleitet werden. Diese wurden zum Zweck der Architekturgestaltung modular strukturiert. Hierbei ergab sich eine Unterteilung in ein Antriebs- und Energiemanagement sowie eine Reichweitenermittlung. Hinsichtlich des umzusetzenden Energiemanagements wurden unterschiedliche Ansätze in Abhängigkeit ihrer Eignung bezüglich der definierten Anforderungen evaluiert. Es ergab sich ein Ansatz mit zentraler Optimierungs- und Informationsebene als das zielführendste Konzept. Der entwickelte Ansatz erlaubt eine freie Parametrierung zur Vorgabe der Eingriffstiefe der Betriebsstrategie. Dies ermöglicht die Priorisierung von Energieflüssen einzelner Ver-

braucher zu Gunsten einer bedarfsgerechten Steigerung der Reichweite. Hierbei gilt es den Zielkonflikt der übergeordneten Qualitätsmerkmale Reichweite, Dynamik sowie thermischer Komfort im Fahrbetrieb strecken- und umgebungsspezifisch auszubalancieren. Eine geeignete Methode wurde hierzu entwickelt, welche entsprechende Dynamik- und Komfortgrenzen als Applikationsgrößen des Energiemanagements ermittelt. Zu diesem Zweck wurden physikalisch geeignete Zielgrößen für die genannten Qualitätsmerkmale formuliert und mit Hilfe einer statistischen Versuchsplanung reduzierte Metamodelle zur

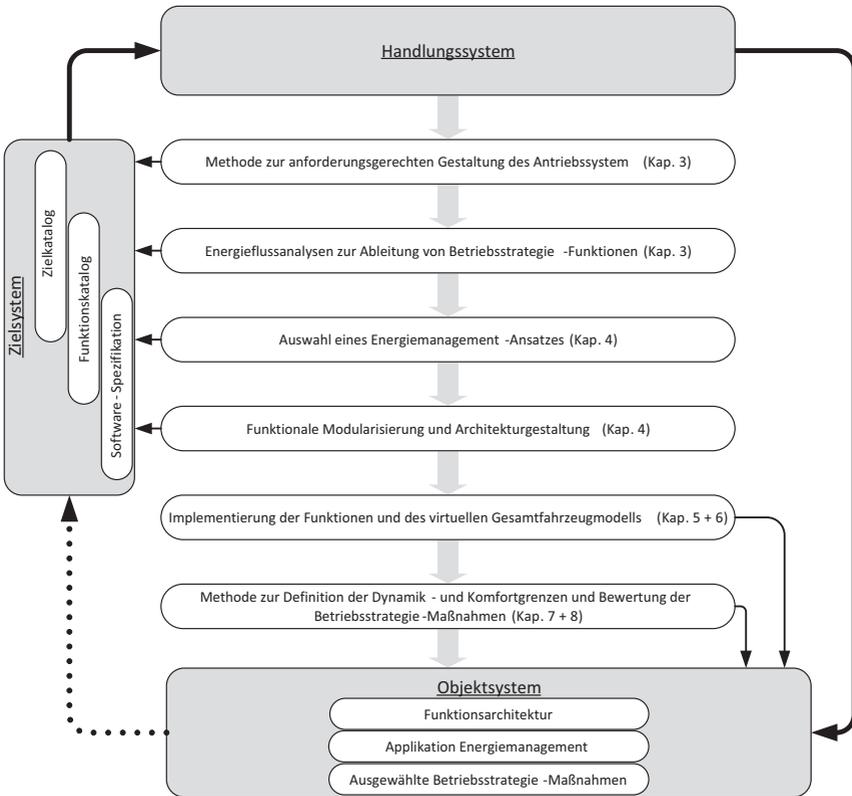


Abb. 9.1.: Ganzheitliche Methode zum anforderungsgerechten Entwurf des funktionalen Konzepts für Elektrofahrzeuge

Beschreibung dieser Zielgrößen abgeleitet. Dies erlaubt die objektive Darstellung des Optimierungsproblems für mathematische Lösungsverfahren und ermöglicht hierdurch eine Kompromisslösung.

Die aufgezeigten Betriebsstrategie-Maßnahmen wurden abschließend in insgesamt acht Zyklen unter Variation der Umgebungsbedingungen evaluiert. Hierbei konnte gezeigt werden, dass für die gewählte Antriebstopologie eine verlustleistungsoptimierte Allradverteilung ein großes Einsparpotential in Bezug auf den Energieverbrauch darbietet. Zur Umsetzung dieser wesentlichen Funktion sind jedoch im realen Fahrzeug in Bezug auf die Kupplungsansteuerung Restriktionen hinsichtlich Synchronisation und Fahrbarkeitsaspekten zu berücksichtigen, welche im Rahmen dieser Arbeit noch nicht betrachtet wurden.

Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass das Klimatisierungssystem einen bedeutenden Stellhebel zur bedarfsgerechten Reichweiterehöhung bietet. Hierbei konnten mit Hilfe eines etablierten Komfortmodells durch Degradierung Reichweitenpotentiale von bis zu 15% unter Einhaltung eines Mindestkomforts ausgewiesen werden. Diese sich auf Simulationsergebnisse stützenden Aussagen gilt es im realen Fahrzeug durch subjektiv-objektiv Korrelationsuntersuchungen zu verifizieren. Durch die untersuchten Funktionen der lastsynchrone Klimasteuerung sowie der Degradierung des Antriebssystems konnten aus energetischen Gesichtspunkten keine merklichen Verbrauchspotentiale erzielt werden. Die Funktion der lastsynchrone Klimasteuerung sollte jedoch unter dem Aspekt der Batteriebensdauer detailliert betrachtet werden.

Der umgesetzte Energiemanagement-Ansatz und der Optimierungsalgorithmus zur Entschärfung des Zielkonflikts unterstützen eine dynamische Ausprägung der Betriebsstrategie insbesondere hinsichtlich der Qualitätsmerkmale Reichweite und thermischer Komfort. Es gilt eine geeignete Fahrer-Fahrzeug-Schnittstelle zu entwickeln und abschließend in Probandenstudien unter physiologischen sowie psychologischen Aspekten zu untersuchen. Hierbei ist vor allem die Frage zu beantworten, ob sich der Fahrer zur Reduzierung des Energieverbrauchs im Sinne einer prädiktiven Fahrstrategie in geeigneter Form anlei-

ten lassen kann. Ein weiteres Einsparpotential in Bezug auf den Energiebedarf könnte durch eine teilautonome Fahrstrategie unter Berücksichtigung von prädiktiven Streckeninformationen im Sinne einer erweiterten ACC-Funktion als autonome Längsregelung für Elektrofahrzeuge erzielt werden. Der modulare Charakter der vorgestellten Funktionsarchitektur gewährleistet eine Integration solcher neuer Funktionalitäten in hohem Maße.

A. Energieflussanalysen

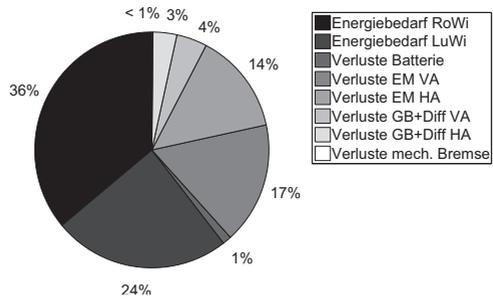


Abb. A.1.: Verluste des Antriebssystems für Top IV im FTP75

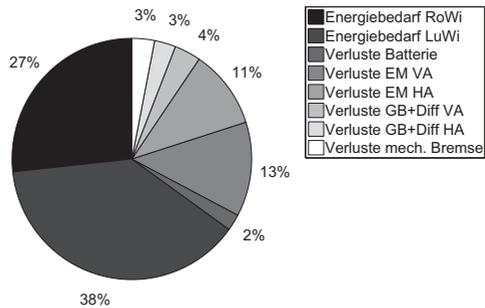


Abb. A.2.: Verluste des Antriebssystems für Top IV in der Stuttgartrunde

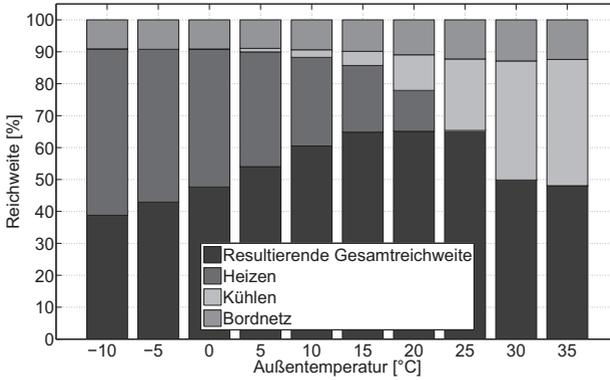


Abb. A.3.: Reichweitenreduktion durch Nebenverbraucher bei stationäre Betrachtung im FTP75 in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur für die Klimazone West-Europa

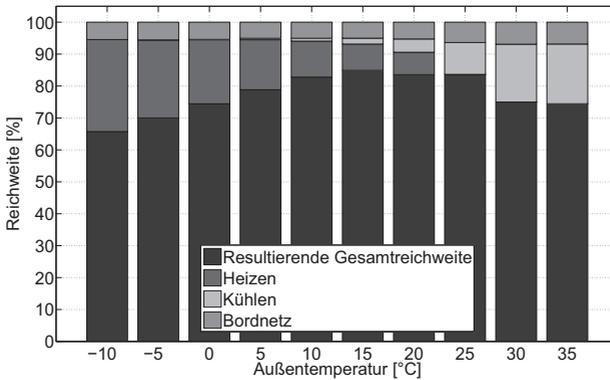


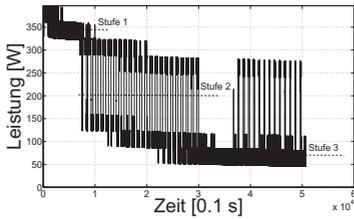
Abb. A.4.: Reichweitenreduktion durch Nebenverbraucher bei stationärer Betrachtung in der Stuttgartrunde in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur für die Klimazone West-Europa

B. Evaluierung der Energiemanagement-Ansätze

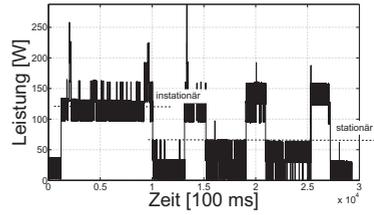
Tab. B.1.: Gewichtung der Anforderungskriterien zur Auswahl eines Energiemanagement-Ansatzes mittels paarweisem Vergleich

| Kriterium | Erweiterbarkeit | Stabilität | Entwicklungsaufwand | Modularisierbarkeit | Latenzverhalten | Bus-Last | Adaptionsfähigkeit | Konfigurierbarkeit | Nachvollziehbarkeit | Überwachungsfähigkeit | Notlaufeigenschaften | Ressourcenbedarf | Applikationsfähigkeit | Skalierbarkeit | Integrationsfähigkeit |
|-------------------------|-----------------|------------|---------------------|---------------------|-----------------|----------|--------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|
| Erweiterbarkeit | - | 2 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 |
| Stabilität | 2 | - | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 |
| Entwicklungsaufwand | 4 | 3 | - | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| Modularisierbarkeit | 3 | 2 | 1 | - | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 2 |
| Latenzverhalten | 3 | 3 | 2 | 3 | - | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 | 3 | 1 |
| Bus-Last | 3 | 3 | 1 | 2 | 3 | - | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 2 |
| Adaptionsfähigkeit | 3 | 3 | 1 | 2 | 2 | 2 | - | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 2 |
| Konfigurierbarkeit | 3 | 3 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | - | 2 | 1 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 |
| Nachvollziehbarkeit | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | - | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| Überwachungsfähigkeit | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 2 | - | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| Notlaufeigenschaften | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | - | 1 | 2 | 2 | 2 |
| Ressourcenbedarf | 4 | 3 | 2 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | - | 3 | 3 | 3 |
| Applikationsfähigkeit | 3 | 3 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | - | 2 | 2 |
| Skalierbarkeit | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | - | 1 |
| Integrationsfähigkeit | 3 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 3 | - |
| Summe | 40 | 37 | 16 | 29 | 26 | 22 | 28 | 27 | 31 | 21 | 32 | 16 | 30 | 37 | 27 |
| Gewichtung x 0.1 | 1 | 0.9 | 0.4 | 0.7 | 0.6 | 0.5 | 0.7 | 0.6 | 0.7 | 0.5 | 0.8 | 0.4 | 0.7 | 0.9 | 0.6 |

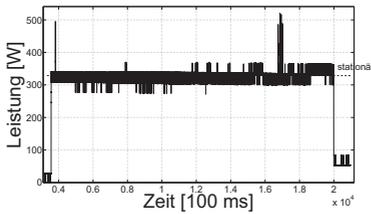
C. Bordnetz-Messungen und Fahrzyklen



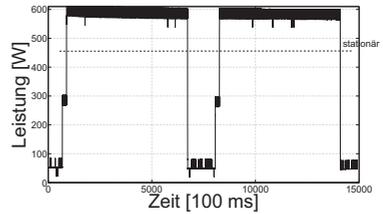
(a) Sitzheizung



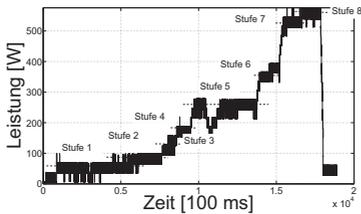
(b) Lenkradheizung



(c) Heckscheibenheizung

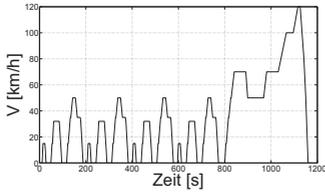


(d) Frontscheibenheizung

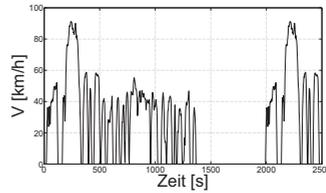


(e) Lüftung

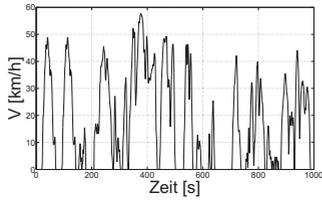
Abb. C.1.: Messung des Leistungsbedarfs ausgewählter Niedervolt-Verbraucher



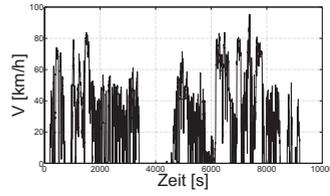
(a) NEFZ



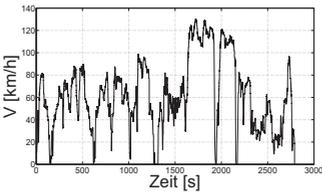
(b) FTP75



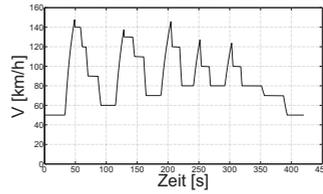
(c) Artemis Urban



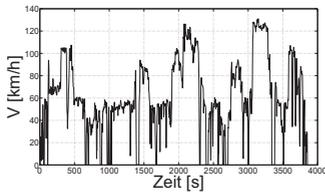
(d) Verteilerrunde



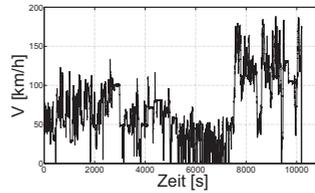
(e) Weissachrunde



(f) BAB



(g) Stuttgartrunde Urban



(h) Dauerlaufrunde

Abb. C.2.: Geschwindigkeitsprofile der betrachteten Fahrzyklen

D. Signifikanzprüfung

Tab. D.1.: Aussage zur Signifikanz für $\overline{b_{ant}}$

| Faktor | | p-Wert |
|---------------------------|-----------------|--------|
| P_{\max} | | 0.0001 |
| Zyklus | NEFZ | 0.0001 |
| | FTP75 | 0.0001 |
| | Artemis Urban | 0.0001 |
| | Verteilerrunde | 0.0001 |
| | Weissachrunde | 0.0001 |
| | BAB | 0.0001 |
| | Stuttgartrunde | 0.0001 |
| | Dauerlauftrunde | 0.0001 |
| Zyklus- P_{\max} | NEFZ | 0.0645 |
| | FTP75 | 0.0548 |
| | Artemis Urban | 0.26 |
| | Verteilerrunde | 0.3805 |
| | Weissachrunde | 0.3078 |
| | BAB | 0.0001 |
| | Stuttgartrunde | 0.34 |
| | Dauerlauftrunde | 0.001 |
| Zyklus- M_{\max} | NEFZ | 0.0265 |
| | FTP75 | 0.17 |
| | Artemis Urban | 0.0925 |
| | Verteilerrunde | 0.4475 |
| | Weissachrunde | 0.62 |
| | BAB | 0.0005 |
| | Stuttgartrunde | 0.98 |
| | Dauerlauftrunde | 0.95 |
| M_{\max} | | 0.01 |
| $P_{\max} \cdot M_{\max}$ | | 0.0845 |

Tab. D.2.: Aussage zur Signifikanz für $\overline{\Delta ax}$

| Faktor | | p-Wert |
|--|----------------|--------|
| $M_{\max} \cdot M_{\max}$ | | 0.0001 |
| $M_{\max} \cdot M_{\max} \cdot M_{\max}$ | | 0.0001 |
| Zyklus | NEFZ | 0.0001 |
| | FTP75 | 0.0001 |
| | Artemis Urban | 0.5132 |
| | Verteilerrunde | 0.5132 |
| | Weissachrunde | 0.04 |
| | BAB | 0.0001 |
| | Stuttgartrunde | 0.0212 |
| Dauerlaufrunde | 0.01 | |
| Zyklus- P_{\max} | NEFZ | 0.155 |
| | FTP75 | 0.0194 |
| | Artemis Urban | 0.2558 |
| | Verteilerrunde | 0.17 |
| | Weissachrunde | 0.3355 |
| | BAB | 0.0001 |
| | Stuttgartrunde | 0.86 |
| Dauerlaufrunde | 0.001 | |
| Zyklus- M_{\max} | NEFZ | 0.0076 |
| | FTP75 | 0.0001 |
| | Artemis Urban | 0.1504 |
| | Verteilerrunde | 0.1332 |
| | Weissachrunde | 0.31 |
| | BAB | 0.35 |
| | Stuttgartrunde | 0.0029 |
| Dauerlaufrunde | 0.001 | |
| P_{\max} | | 0.0003 |
| $P_{\max} \cdot M_{\max}$ | | 0.06 |

E. Lastpunktverteilung in Abhängigkeit der Betriebsstrategie

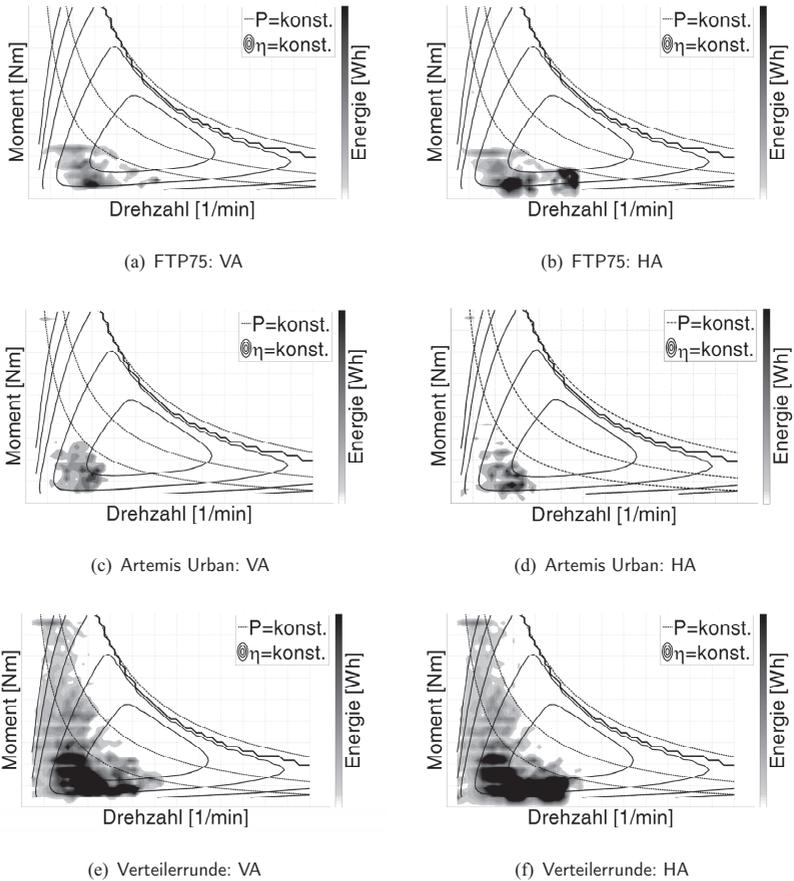


Abb. E.1.: Motorische Lastpunktverteilung bei optimierter Drehmomentenvorgabe, Teil 1

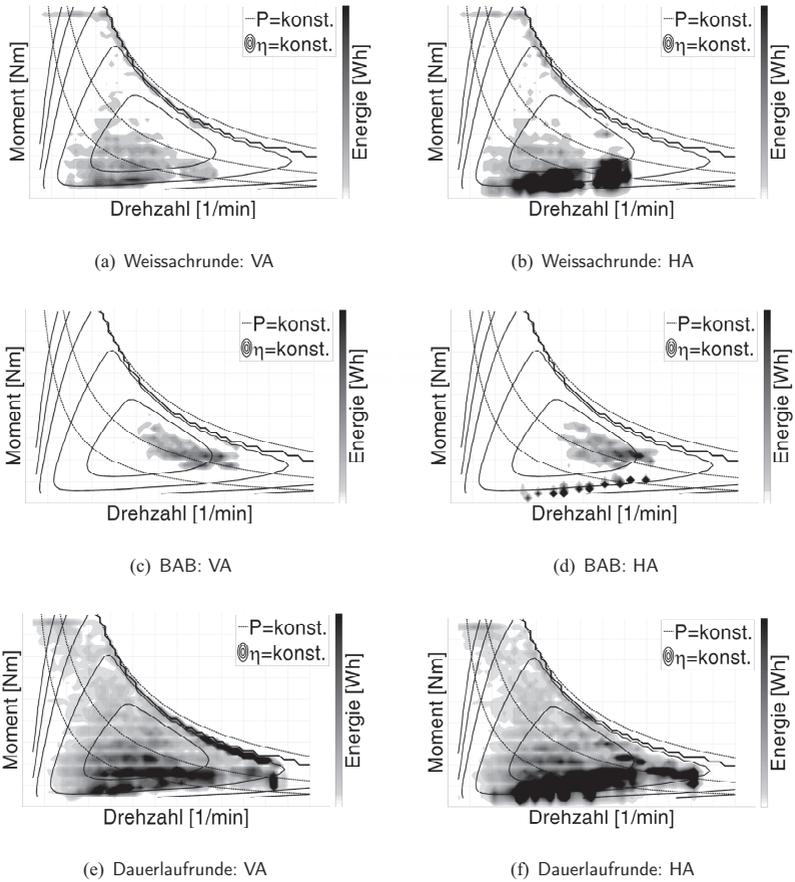


Abb. E.2.: Motorische Lastpunktverteilung bei optimierter Drehmomentenvorgabe, Teil 2

F. Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------|--|
| 2WD | Two Wheel Drive |
| 4WD | Four Wheel Drive |
| AC | Air Condition |
| ACC | Adaptive Cruise Control |
| ACCi | Adaptive Cruise Control InnoDrive |
| ADASIS | Advanced Driver Assistance Systems Interface Specification |
| ASM | Asynchronmaschine |
| BAB | Bundesautobahn |
| BKV | Bremskraftverteilung |
| CAE | Computer Aided Engineering |
| CAN | Control Area Network |
| CFD | Computer Fluid Dynamics |
| CoP | Coefficient of Performance |
| Diff | Differential |
| DoE | Design of Experiments |
| EM | E-Maschine |
| ESP | Elektronisches Stabilitätsprogramm |
| FEM | Fenite Elemente Methode |
| FFT | Fast Fouriere Transformation |
| FESM | Fremderregte Synchronmaschine |
| FTP | Fedrerel Test Procedure |
| GB | Gear Box |
| GRM | Geschaltene Reluktanzmaschine |
| HMI | Human Machine Interface |

| | |
|------|--------------------------------------|
| LDW | Lane Departure Warning |
| LKA | Lane Keeping Assist |
| LuWi | Luftwiderstand |
| NB | Nebenbedingung |
| NEFZ | Neuer Europäischer Fahrzyklus |
| NVH | Noise Vibration Harshness |
| PID | Proportional Integral Differential |
| PK | Prioritätsklasse |
| PMV | Predicted Mean Vote |
| PPD | Predicted Percentage of Dissatisfied |
| PSM | Permanenterregte Synchronmaschine |
| PTC | Positive Temperature Coefficient |
| RoWi | Rollwiderstand |
| SiL | Software in the Loop |
| SoC | State of Charge |
| TOP | Topologie |
| UBV | Unterbodenverkleidung |

G. Literaturverzeichnis

- [1] *Ashrae: Handbook - HVAC Applications.*
- [2] *DIN 1946 Teil 3: Klimatisierung von Personenkraftwagen.*
- [3] *DIN EN 7730: 1995-09 Gemäßigtes Umgebungsklima - Ermittlung des PMV- und des PPD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit.*
- [4] *DIN EN ISO 8402: Qualitätsmanagement - Begriffe.*
- [5] *NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, National Institute of Standards, <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>, 02.01.2013.*
- [6] *VDI 2206: Entwicklungsmethodik mechatronischer Systeme.*
- [7] *VDI 4602: Energiemanagement - Begriffe.*
- [8] ALBERS, A. und A. ALBRECHT: *Abbildung der individuellen subjektiven Komfortbeurteilung von Kunden aus objektiven Messwerten am Beispiel des automatisierten Anfahrens.* In: *Systemanalyse in der Kfz-Antriebstechnik III*, Expert Verlag, 2005.
- [9] ATZWANGER, K. und P. KUPKE: *Kundenorientierung in der Fahrzeugtechnik.* Automobiltechnische Zeitschrift, 06, 2006.
- [10] AULICIEMS, A. und S. V. SZOKOLAY: *Thermal Comfort.* Technischer Bericht, Passiv and Low Energy Architecture International, 2007.

- [11] BACK, M.: *Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen*. Doktorarbeit, Universität Karlsruhe, 2005.
- [12] BAN, D., D. ZARKO und S. MIRKEVSKI: *6th Mako Cigre Conference, Ohrid, Macedonia*. In: *State of the Art and Tendency for increased Power Efficiency of Electric Machines and Drives*, 2009.
- [13] BASLER, A., P. MEGYESI, B. FREESE, M. ROTH und F. GAUTERIN: *Evaluierung des Energiebedarfs der Innenraumklimatisierung mittels Wetter- und Mobilitätsdaten*. In: *14. Internationales Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik*, 2014.
- [14] BÜCHNER, S.: *Energiemangement-Strategien für elektrische Energiebordnetze in Kraftfahrzeugen*. Doktorarbeit, Universität Dresden, 2008.
- [15] BECKER, D.: *KPMG's Global Automotive Executive Survey 2011 - Creating a Future Roadmap for the Automotive Industry*. Technischer Bericht, KPMG International, 2011.
- [16] BINNS, K.J. und D.W. SHIMINN: *Relationship Between Rated Torque and Size of Permanent Magnet Machine*. *Proceeding of Electrical Power Application*, 143:417–422, 1996.
- [17] BOCKHORN, H.: *Vorlesungsskript Wärme- und Stoffübertragung*. Universität Karlsruhe, Institut für Chemische Technik.
- [18] BRENNDÖRFER, U.: *Entwurf und Implementierung eines Reichweitenmanagementsystems für Elektro- und Plug-In-Hybridfahrzeuge*. Diplomarbeit, Hochschule für angewandte Wissenschaften München, 2012.
- [19] BROY, J.: *Modellbasierte Entwicklung und Optimierung flexibler zeitgesteuerter Architekturen im Fahrzeugserienbereich*. Doktorarbeit, Universität Karlsruhe, 2011.

- [20] CAPELLMANN, C., C. SWALE, M. CROMPTON und M. MATTHES: *Einsatz der numerischen Strömungssimulation zur Vorhersage von Strömungsprofilen an Windschutz- und Seitenscheiben - Vergleich mit Laser Doppler Anemometrie*. In: *PKW-Klimatisierung III, Haus der Technik, Renningen-Malmsheim: Expert Verlag, 2004*.
- [21] CHAU, K.T. und C.C. CHAN: *Overview of Permanent Magnet Brushless Drives for Electric and Hybrid Electric Vehicle*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55:2246–2257, 2008.
- [22] DERRINGER, G. und R. SUICH: *Simultaneous Optimization of Several Response Variables*. Journal of Quality Technology, 12 (4):214–219, 1980.
- [23] DEUTSCHE BUNDESREGIERUNG: *Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung*. Technischer Bericht, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2009.
- [24] DIJK, M. und R. KEMP: *A Framework for Understanding Product Market Innovation Path - Emergence of Hybrid Vehicles as Example*. International Journal of Automotive Technology and Management, 10:56–76, 2010.
- [25] DR. ING. H.C. F. PORSCHE AG: *Technische Komponenten-Daten*.
- [26] ECKERT, M.: *Energieoptimale Fahrdynamikregelung mehrmotoriger Elektrofahrzeuge*. Doktorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2015.
- [27] EGTHESSAD, M. und T. MEIER: *Abschlussbericht - Identifikation optimaler Antriebsstrangkonfigurationen für Elektrofahrzeuge*. Technischer Bericht, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2011.
- [28] FANGER, P.O.: *Thermal Comfort*. Danish technical press, 1970.

- [29] FLECKNER, M.: *Betriebsstrategieoptimierung eines Parallel-Hybriden*. Doktorarbeit, RWTH Aachen, 2011.
- [30] FROEHLICH, M.H.: *Informationstheoretische Optimierung künstlicher neuronaler Netze für den Einsatz in Steuergeräten*. Doktorarbeit, Universität Tübingen, 2003.
- [31] GAUTERIN, F. und H.-J. UNRAU: *Vorlesungsskript - Grundlagen der Fahrzeugtechnik*. Universität Karlsruhe, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik.
- [32] GEMANDER, A.: *Erstellung und Validierung von Simulationsmodellen für Elektrofahrzeuge unter Berücksichtigung von Umgebungsbedingungen*. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, Lehrstuhl Kraftfahrwesen, 2011.
- [33] GERLING, D., G. DAJAKU und B. LANGE: *Electric Traction for Automobiles - Comparison of Different Wheel-Hub Drives*. Technischer Bericht, Bundeswehruniversität München, 2009.
- [34] GÖHRING, M.: *Betriebsstrategien für serielle Hybridantriebe*. Doktorarbeit, RWTH Aachen, 1997.
- [35] GIESSLER, M., A. FRITZ, J. PAUL, O. SANDER, F. GAUTERIN und K. MÜLLER-GLASER: *Converted Vehicle for Battery Electric Drive: Aspects on the Design of the Software-Driven Vehicle Control Unit*. In: *2nd International Energy Efficient Vehicle Conference (EEVC)*, Dresden, 2012.
- [36] GOSPODARIC, D., A. SCHMENKEL und J. BÖHLING: *Innovative Fahrzeugantriebe, VDI, Dresden*. In: *Powertrain and Vehicle Simulation of Hybrid and Electrical Cars*, 2002.

- [37] GRAF, DR. M.: *Offene Softwarelösung für das Energiemanagement*. Automobiltechnische Zeitschrift, 1:46–50, 2004.
- [38] GROSSMANN, H.: *PKW-Klimatisierung*. Heidelberg: Springer Verlag, 2010.
- [39] HALFER, M.: *Untersuchung und Optimierung von Antriebsstrang-Topologien für den Einsatz in Elektrofahrzeugen*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, 2011.
- [40] HARRINGTON, J.: *The Desirability Function*. Industrial Quality Control, 20 (10):494–498, 1965.
- [41] HEFFNER, R.R., T.S. TURRENTINE und K. KURANI: *A Primer on Automobile Semiotics*. Technischer Bericht, UC Davis, Institute of Transportation Studies, 2006.
- [42] HEINTEL, B., T. WAGNER und G. HOHN: *Agentenorientiertes dezentrales Energie- und Funktionsmanagement für Kfz*. Technischer Bericht, Entwicklerforum Kfz-Elektronik, 2004.
- [43] HOFMANN, P.: *Hybridfahrzeuge*. Wien: Springer Verlag, 2010.
- [44] HOFMANN, T., M. STEINBUCH, R. VAN DRUTEN und A. SERRAREENS: *Rule-based Energy Management Strategies for Hybrid Vehicles*. International Journal for Electric and Hybrid Vehicles, 1 (1), 2007.
- [45] ISERMANN, R.: *Elektronisches Management motorischer Fahrzeugantriebe*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012.
- [46] KHAYYAM, H.: *Adaptive Intelligent Control of Vehicle Air Conditioning System*. Applied Thermal Engineering, 51:1154–1161, 2013.

- [47] KHAYYAMA, H., A. KOUZANI, E. HU und S. NAHAVANDI: *Coordinated Energy Management of Vehicle Air conditioning System*. Applied thermal Engineering, 31:750–764, 2010.
- [48] KLEIN, R.: *Entwurf und Implementierung einer Momentensteuerung für den Einsatz in Elektrofahrzeugen mit Mehrmotorenkonzept*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, 2012.
- [49] KLEINMAIER, A.: *Optimale Betriebsführung von Hybridfahrzeugen*. Doktorarbeit, Universität München, 2003.
- [50] KLEMENT, W.: *Fahrzeuggetriebe*. 3. Auflage, München: Hanser Verlag, 2011.
- [51] KONZ, M., N. LEMKE, S. FÖRSTERLING und M. EGHTESSAD: *Spezifische Anforderungen an das Heiz-Klimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge*. FAT-Schriftenreihe, 233, 2012.
- [52] KOOT, M.: *Energy Management for Vehicular Electric Power Systems*. Doktorarbeit, TU Eindhoven, 2006.
- [53] KRÜGER, M.: *Grundlagen der Kraftfahrzeugelektronik*. 2. Auflage, München: Hanser, 2008.
- [54] LEMKE, N., C. STRUPP und R. KOSSEL: *Elektrofahrzeug-Klimatisierung unter Berücksichtigung relevanter Klima- und Lastbedingungen*. PKW-Klimatisierung VII, Renningen: Expert-Verlag, VII:54–73, 2012.
- [55] LEWANDOWITZ, L.: *Markenspezifische Auswahl, Parametrierung und Gestaltung der Produktgruppe Fahrassistenzsysteme*. Doktorarbeit, Universität Karlsruhe, 2011.
- [56] LÖFFLER, J.: *Optimierungsverfahren zur adaptiven Steuerung von Fahrzeugantrieben*. Doktorarbeit, Universität Stuttgart, 2000.

- [57] LUNANOVA, M.: *Optimierung von Nebenaggregaten - Maßnahmen zur Senkung der CO₂-Emission von Kraftfahrzeugen*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- [58] MAREK, R. und K. NITSCHKE: *Praxis der Wärmeübertragung*. 3. Auflage, München: Fachbuchverl. Leipzig im Hanser Verl., 2012.
- [59] MARQUARDT, R. und M. HILLER: *High Performance Switched Reluctance Drives with Wide Field Weaking Range*. Technischer Bericht, Bundeswehruniversität München, 2009.
- [60] MASTERS, T.: *Practical Neuronal Network Recipes in C++*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1993.
- [61] MAURER, M. und C. STILLER: *Fahrassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2005.
- [62] MERZINGER, G. und T. WIRTH: *Repetitorium der höheren Mathematik*. 4. Auflage, Springe: Binomi, 2002.
- [63] MITSCHKE, M. und H. WALLENTOWITZ: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. 4. Auflage, Berlin; Heidelberg [u.a.]: Springer, 2004.
- [64] MÜLLER, D., R. STREBLOW, B. FLIEGER und A. JACHENS: *Thermisches PKW-Innenraum-Modell*. Automobiltechnische Zeitschrift, 11:822–828, 2011.
- [65] MÜLLER, N.: *Mobilität 2030*. Technischer Bericht, Mc Kinsey and Company, 2011.
- [66] MOHAN, N.: *Electric Drives - An integretive Approach*. Hoboken, NJ : Wiley, MNPERE, 2003.
- [67] MUIGG, A.: *Implizites Workloadmanagement - Konzept einer zeitlich-situativen Informationsfilterung im Automobil*. Doktorarbeit, TECHN-

SCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, 2009.

- [68] NAUNHEIMER, H., B. BERTSCHE und G. LECHNER: *Fahrzeuggetriebe*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [69] NAUNIN, D.: *Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge*. 4. Auflage, Renningen: expert-Verl., 2007.
- [70] NEUDORFER, H.: *Weiterentwicklung von elektrischen Antriebssystemen für Elektro- und Hybridstraßenfahrzeuge*. Doktorarbeit, Habilitation, Universität Darmstadt, 2008.
- [71] NEUDORFER, H., A. BINDER und N. WICKER: *Analyse von unterschiedlichen Fahrzyklen für den Einsatz von Elektrofahrzeugen*. *Elektrotechnik und Informationstechnik*, 7:352–360, 2006.
- [72] NEUSCHL, Z.: *Rechnerunterstützte experimentelle Verfahren zur Bestimmung der lastunabhängigen Eisenverluste in permanentmagnetisch erregten elektrischen Maschinen mit additionalem Axialfluss*. Doktorarbeit, TU Cottbus, 2007.
- [73] OERDING, J.: *Ein Beitrag zum Modellverständnis der Produktentwicklung - Strukturierung von Zielsystemen mittels C & CM*. Doktorarbeit, Universität Karlsruhe, 2009.
- [74] RADKE, T., L. LEWANDOWITZ, F. GAUTERIN und T. KACZMAREK: *Operationalisation of Human Drivers Subjective Dynamics Perception in Automated Longitudinally Controlled Passenger Vehicles*. *International Journal of Vehicle Autonomous Systems*, 11, 2013.
- [75] REIF, K.: *Konventioneller Antriebsstrang und Hybridantriebe*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010.

- [76] RESS, C., D. BALZER, A. BRACHT, DUREKOVIC S. und J. LÖWENAU: *ADASIS Protocol for Advanced In-Vehicle Applications*. Technischer Bericht, ADASIS Forum, 2009.
- [77] RICHTER, W.: *Handbuch der thermischen Behaglichkeit*. Technischer Bericht, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2007.
- [78] ROBERT BOSCH GMBH: *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*. 26. Auflage, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2007.
- [79] SAMBEAT, R.B.: *Electric Drive Design for Hybrid Electric Vehicle Optimun Fuel Efficiency*. Doktorarbeit, Universität Braunschweig, 2008.
- [80] SCHMIDT, C., S. STRATBÜCKER, A. BOLINENI, D. NORREFELDT, V. WÖLKI, G. GRÜN und C. VAN TREEK: *Skalen-adaptive Simulation zur Innenraumklimatisierung von E-Fahrzeugen*. In: *PKW-Klimatisierung VII, Renningen: Expert-Verlag*, 2011.
- [81] SCHMIDT, M.: *Ein selbstadaptierender, dynamischer Energiemanagementansatz für das elektrische Kraftfahrzeugbordnetz*. Doktorarbeit, Universität Kassel, 2009.
- [82] SCHNEIDER, J. H.: *Modellierung und Erkennung von Fahrsituationen und Fahrmanövern für sicherheitsrelevante Fahrerassistenzsysteme*. Doktorarbeit, Technische Universität Chemnitz, 2009.
- [83] SCHOUTEN, N., M. SALAM und N. KHEIR: *Fuzzy Logic Control for Parallel Hybrid Vehicles*. IEEE Transactions on Control, 10 (3):460–468, 2002.
- [84] SCHÄUFFELE, J. und T. ZURAWKA: *Automotive Software Engineering*. 4. Auflage, Wiesbaden: Vieweg, 2010.
- [85] SIEBERTZ, K., D. VAN BEBBER und T. HOCHKIRCH: *Statistische Versuchsplanung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.

- [86] SIMON, D.: *Entwicklung eines effizienten Verfahrens zur Bewertung des Anfahrverhaltens von Fahrzeugen*. Doktorarbeit, Universität Rostock, 2011.
- [87] SKUDELNY, H., A. ACKVA, J. FETZ, J. LANGHEIM und T. RECKHORN: *Antriebe für Elektrostraßenfahrzeuge*. Technischer Bericht, Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT), 1993.
- [88] SPRING, E.: *Elektrische Maschinen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [89] SPÄTH, H.: *Elektrische Maschinen*. Berlin [u.a.] : Springer, 1973.
- [90] STEG, L., C. VLEK und G. SLOTEGRAAF: *Instrumental-Reasoned and Symbolic-Affective Motives for Using a Car*. Transportation Research Part F- Traffic Psychology and Behavior, 4:151–169, 2001.
- [91] STEUER, S.: *Statistische Eigenschaften der Multikriteriellen Optimierung mittels Wünschbarkeiten*. Doktorarbeit, Universität Dortmund, 2005.
- [92] STIEGLER, M.: *Entwurf einer vorausschauenden Betriebsstrategie für parallele hybride Antriebsstränge*. Doktorarbeit, Universität Ulm, 2008.
- [93] TAYLOR, P., T. KERR, L. FULTOWN und J. WARD: *Technology Roadmap - Electric and Plug-In Hybrid Vehicles*. Technischer Bericht, International Energy Agency (IEA), 2011.
- [94] VIEHMANN, PROF. DR.-ING. M.: *Power Management Classification - Energiebaukasten der Zukunft*. Automobiltechnische Zeitschrift, 4:38–43, 2009.
- [95] VON GRUNDHERR, J.: *Möglichkeiten und Grenzen einer Online-Optimierung eines hybriden Antriebsstrangs*. Technischer Bericht, BMW AG, 2004.

- [96] WAGNER, S.: *Idealisierte energetisch-analytische Abbildungsmethode der Temperaturschichtung bei der passiven Aufheizung in der Fahrzeugkabine*. In: *PKW-Klimatisierung VI, Renningen: expert-Verl., Band VI*, Seiten 94–111, 2009.
- [97] WALLENTOWITZ, H., A. FREIALDENHOVEN und I. OLSCHESKI: *Strategien in der Automobilindustrie*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- [98] WALLENTOWITZ, H., A. FREIALDENHOVEN und I. OLSCHESKI: *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstrangs*. 1. Auflage, Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010.
- [99] WALTHER, C.: *Systemtechnische Zusammenhänge zwischen Eigenschaften und Funktionen großer Systeme*. Herbert Utz Verlag, 2001.
- [100] WIETSCHEL, M., E. DÜTSCHKE, S. FUNKE, A. PETERS, P. PLÖTZ und U. SCHNEIDER: *Kaufpotenzial für Elektrofahrzeuge bei sogenannten Early Adoptern*. Technischer Bericht, Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung, 2012.
- [101] WILDE, A.: *Eine modulare Funktionsarchitektur für adaptives und vorausschauendes Energiemanagement in Hybridfahrzeugen*. Doktorarbeit, Universität München, 2008.
- [102] WON, J. S.: *Intelligent Energy Management Agent for a Parallel Hybrid Vehicle*. Doktorarbeit, Texas A&M University, 2003.
- [103] YADOLLAH, F. und A. TOOTOONCHI: *Controlling Automobile Thermal Comfort Using Optimized Fuzzy Controller*. *Applied Thermal Engineering*, 28:1906–1917, 2008.

- [104] YUAN, X. und J. WANG: *Torque Distribution Strategy for a Front- and Rear-Wheel-Driven Electric Vehicle*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 61:3365–3374, 2012.

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

Die Bände sind unter www.ksp.kit.edu als PDF frei verfügbar
oder als Druckausgabe bestellbar.

- Band 1** Urs Wiesel
Hybrides Lenksystem zur Kraftstoffeinsparung im schweren Nutzfahrzeug. 2010
ISBN 978-3-86644-456-0
- Band 2** Andreas Huber
Ermittlung von prozessabhängigen Lastkollektiven eines hydrostatischen Fahrtriebsstrangs am Beispiel eines Teleskopladens. 2010
ISBN 978-3-86644-564-2
- Band 3** Maurice Bliesener
Optimierung der Betriebsführung mobiler Arbeitsmaschinen. Ansatz für ein Gesamtmaschinenmanagement. 2010
ISBN 978-3-86644-536-9
- Band 4** Manuel Boog
Steigerung der Verfügbarkeit mobiler Arbeitsmaschinen durch Betriebslasterfassung und Fehleridentifikation an hydrostatischen Verdrängereinheiten. 2011
ISBN 978-3-86644-600-7
- Band 5** Christian Kraft
Gezielte Variation und Analyse des Fahrverhaltens von Kraftfahrzeugen mittels elektrischer Linearaktuatoren im Fahrwerksbereich. 2011
ISBN 978-3-86644-607-6
- Band 6** Lars Völker
Untersuchung des Kommunikationsintervalls bei der gekoppelten Simulation. 2011
ISBN 978-3-86644-611-3
- Band 7** 3. Fachtagung
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 17. Februar 2011, Karlsruhe. 2011
ISBN 978-3-86644-599-4

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 8** Vladimir Iliev
Systemansatz zur anregungsunabhängigen Charakterisierung des Schwingungskomforts eines Fahrzeugs. 2011
ISBN 978-3-86644-681-6
- Band 9** Lars Lewandowitz
Markenspezifische Auswahl, Parametrierung und Gestaltung der Produktgruppe Fahrerassistenzsysteme. Ein methodisches Rahmenwerk. 2011
ISBN 978-3-86644-701-1
- Band 10** Phillip Thiebes
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. Grundlegende Erkenntnisse und Zusammenhänge, Vorstellung einer Methodik zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses und deren Validierung am Beispiel einer Forstmaschine. 2012
ISBN 978-3-86644-808-7
- Band 11** Martin Gießler
Mechanismen der Kraftübertragung des Reifens auf Schnee und Eis. 2012
ISBN 978-3-86644-806-3
- Band 12** Daniel Pies
Reifenungleichförmigkeitserregter Schwingungskomfort – Quantifizierung und Bewertung komfortrelevanter Fahrzeugschwingungen. 2012
ISBN 978-3-86644-825-4
- Band 13** Daniel Weber
Untersuchung des Potenzials einer Brems-Ausweich-Assistenz. 2012
ISBN 978-3-86644-864-3
- Band 14** **7. Kolloquium Mobilhydraulik.**
27./28. September 2012 in Karlsruhe. 2012
ISBN 978-3-86644-881-0
- Band 15** 4. Fachtagung
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen
20. Februar 2013, Karlsruhe. 2013
ISBN 978-3-86644-970-1

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 16** Hans-Joachim Unrau
Der Einfluss der Fahrbahnoberflächenkrümmung auf den Rollwiderstand, die Cornering Stiffness und die Aligning Stiffness von Pkw-Reifen. 2013
ISBN 978-3-86644-983-1
- Band 17** Xi Zhang
Untersuchung und Entwicklung verschiedener Spurführungsansätze für Offroad-Fahrzeuge mit Deichselverbindung. 2013
ISBN 978-3-7315-0005-6
- Band 18** Stefanie Grollius
Analyse des gekoppelten Systems Reifen-Hohlraum-Rad-Radführung im Rollzustand und Entwicklung eines Rollgeräuschmodells. 2013
ISBN 978-3-7315-0029-2
- Band 19** Tobias Radke
Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien. 2013
ISBN 978-3-7315-0069-8
- Band 20** David Gutjahr
Objektive Bewertung querdynamischer Reifeneigenschaften im Gesamtfahrzeugversuch. 2014
ISBN 978-3-7315-0153-4
- Band 21** Neli Ovcharova
Methodik zur Nutzenanalyse und Optimierung sicherheitsrelevanter Fahrerassistenzsysteme. 2014
ISBN 978-3-7315-0176-3
- Band 22** Marcus Geimer, Christian Pohlandt
Grundlagen mobiler Arbeitsmaschinen. 2014
ISBN 978-3-7315-0188-6
- Band 23** Timo Kautzmann
Die mobile Arbeitsmaschine als komplexes System. 2014
ISBN 978-3-7315-0187-9

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 24** Roman Weidemann
Analyse der mechanischen Randbedingungen zur Adaption der oszillierenden Hinterschneidtechnik an einen Mobilbagger. 2014
ISBN 978-3-7315-0193-0
- Band 25** Yunfan Wei
Spurführungsregelung eines aktiv gelenkten Radpaars für Straßenbahnen. 2014
ISBN 978-3-7315-0232-6
- Band 26** David Schmitz
Entwurf eines fehlertoleranten Lenkventils für Steer-by-Wire Anwendungen bei Traktoren. 2014
ISBN 978-3-7315-0264-7
- Band 27** Christian Schwab
Beitrag zu einer universellen Baggerschnittstelle zur Übertragung elektrischer und hydraulischer Leistung sowie elektronischer Signale für komplexe Anbaugeräte. 2014
ISBN 978-3-7315-0281-4
- Band 28** Peter Dengler
Untersuchung zum effizienten Betrieb von Hydraulikzylindern in Konstantdrucksystemen unter Verwendung einer Zwischendruckleitung. 2015
ISBN 978-3-7315-0295-1
- Band 29** Manuel Bös
Untersuchung und Optimierung der Fahrkomfort- und Fahrdynamikeigenschaften von Radladern unter Berücksichtigung der prozessspezifischen Randbedingungen. 2015
ISBN 978-3-7315-0310-1
- Band 30** 5. Fachtagung
Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen 25. Februar 2015, Karlsruhe. 2015
ISBN 978-3-7315-0323-1
- Band 31** Michael Eckert
Energieoptimale Fahrdynamikregelung mehrmotoriger Elektrofahrzeuge. 2015
ISBN 978-3-7315-0332-3

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 32** Martin Scherer
**Beitrag zur Effizienzsteigerung mobiler Arbeitsmaschinen.
Entwicklung einer elektrohydraulischen Bedarfsstromsteuerung
mit aufgeprägtem Volumenstrom.** 2015
ISBN 978-3-7315-0339-2
- Band 33** Rinaldo Arnold
**Automatische Abstimmung der Sekundärseite eines dreiphasigen
Systems zur berührungslosen induktiven Energieübertragung.** 2015
ISBN 978-3-7315-0355-2
- Band 34** Johannes Gültlinger
Kraftübertragung und Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen. 2015
ISBN 978-3-7315-0358-3
- Band 35** Thorsten Dreher
**Energieeffizienz von Konstantdrucksystemen mit sekundärgeregelten
Antrieben beim Einsatz in mobilen Arbeitsmaschinen.** 2015
ISBN 978-3-7315-0377-4
- Band 36** Steffen Kölling
**Konzeptionelle Untersuchung zur Neigekompensation
von Stromabnehmern.** 2015
ISBN 978-3-7315-0387-3
- Band 37** Michael Fritz
**Entwicklungswerkzeuge für die Fahrzeugklimatisierung
von Nutzfahrzeugen.** 2015
ISBN 978-3-7315-0384-2
- Band 38** Ralf Oberfell
**Stochastische Simulation von Energieflüssen im Nutzfahrzeug
Ein einsatzorientiertes Bewertungs- und Optimierungsverfahren.** 2015
ISBN 978-3-7315-0403-0
- Band 39** Christoph Sturm
**Bewertung der Energieeffizienz von Antriebssystemen
mobiler Arbeitsmaschinen am Beispiel Bagger.** 2015
ISBN 978-3-7315-0404-7

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 40** Florian Netter
Komplexitätsadaption integrierter Gesamtfahrzeugsimulationen. 2015
ISBN 978-3-7315-0414-6
- Band 41** Markus Springmann
**Auslegung eines asynchronen Langstatorlinearmotors
mit großem Luftspalt als Straßenbahnantrieb.** 2015
ISBN 978-3-7315-0418-4
- Band 42** Alexander Basler
**Eine modulare Funktionsarchitektur zur Umsetzung einer
gesamtheitlichen Betriebsstrategie für Elektrofahrzeuge.** 2015
ISBN 978-3-7315-0421-4

Elektrofahrzeuge besitzen aktuell aufgrund des geringen Energieinhalts der Hochvolt-Traktionsbatterie eine beschränkte Reichweite. Vor diesem Hintergrund kann beim alltäglichen Fahrzeugeinsatz ein vielschichtiger Zielkonflikt aus Reichweiten-, Dynamik- und Komfortansprüchen entstehen. Durch eine modulare Funktionsarchitektur soll dieser Zielkonflikt mittels geeigneter Betriebsstrategie-Maßnahmen entschärft werden. Die vorliegende Arbeit entwickelt hierzu einen ganzheitlichen Systemansatz zur Auswahl effizienter Topologien sowie zur Umsetzung und Applikation von reichweitensteigernden Funktionen. In diesem Kontext werden die für eine Objektivierung notwendigen Qualitätsmerkmale beschrieben und analysiert. Mit Hilfe eines mathematischen Lösungsverfahrens kann unter Einbeziehung dieser Qualitätsmerkmale im Sinne einer Optimierung das Spannungsfeld bestehend aus Reichweiten-, Dynamik- sowie Komfortansprüchen analysiert werden. Die über die vorgestellte Funktionsarchitektur umsetzbaren Betriebsstrategie-Maßnahmen werden in repräsentativen Zyklen validiert und hinsichtlich ihres Beitrags zum Einsparpotential in Bezug auf den Energiebedarf quantifiziert. Hierüber kann eine Empfehlung für die Umsetzung und Applikation einer ganzheitlichen Betriebsstrategie aus Gesamtfahrzeugsicht gegeben werden.

