

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen

# Ableitung einer heuristischen Betriebsstrategie für ein Hybridfahrzeug aus einer Online-Optimierung

Dipl.-Ing. Univ. Johannes von Grundherr zu Altenthan und Weiyherhaus

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen  
der Technischen Universität München  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
DOKTOR-INGENIEURS  
genehmigten Dissertation

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Heißing  
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister  
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd-Robert Höhn

Die Dissertation wurde am 07.09.2009 bei der Technischen  
Universität München eingereicht und durch die Fakultät für  
Maschinenwesen am 26.04.2010 angenommen.

# Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit Betriebsstrategievarianten für ein Hybridfahrzeug, das in naher Zukunft in Serie produziert werden soll. Ziel der Untersuchungen ist es, einen geeigneten Algorithmus zu finden, der die Zielkonflikte zwischen den Anforderungen Kraftstoffeffizienz, Qualität des Fahrverhaltens und Komponentenbelastungen optimal auflöst. Da geringe Entwicklungs- und Herstellkosten erstrebenswert sind, ist zudem die Komplexität der Algorithmen im Serienprozess ein wichtiges Bewertungskriterium.

Für die Untersuchungen wird das ausgewählte Fahrzeug in einem Simulationsmodell abgebildet. Dazu werden in ein bestehendes Modell die Hybridkomponenten Getriebe, E-Maschinen mit Leistungselektronik und Hochvoltspeicher integriert und validiert. Alle Betriebsstrategieansätze werden im Simulationsmodell umgesetzt und ausgewertet:

Als Ausgangspunkt dient der Ansatz *Online-Optimierung*, da dieser unter allen derzeit umsetzbaren Algorithmen die höchste Kraftstoffeffizienz ermöglicht. Für die angestrebten Untersuchungen wird das Prinzip weiterentwickelt, um es sowohl auf das ausgewählte Fahrzeug und Getriebe als auch auf das erweiterte Spektrum an Anforderungen anzupassen. So entsteht eine Lösung, die unter Einhaltung der Anforderungen an Fahrverhalten und Komponentenbelastungen den niedrigsten Kraftstoffverbrauch erzielt.

Ein Nachteil der erarbeiteten Lösung ist ihre hohe Komplexität. Ein weiterer Schritt analysiert daher, welche Betriebspunkte die *Online-Optimierung* auswählt und leitet aus den erkannten Mustern eine vereinfachte, erfahrungsbasierte Regelstrategie ab.

Die Simulationsergebnisse der kraftstoffoptimalen und der weiterentwickelten *Online-Optimierung* werden denen der heuristischen Strategie gegenübergestellt. Dabei können folgende Ergebnisse festgehalten werden:

Die Anpassungen, die zur Verbesserung des Fahrverhaltens und zur Reduzierung der Komponentenbelastungen auf ein seriennahes Niveau notwendig sind, heben unvermeidlich den Kraftstoffverbrauch nennenswert an.

Die Ableitung der erfahrungsbasierten Algorithmen gelingt sehr gut. Einer deutlichen Vereinfachung der Algorithmen stehen nur sehr geringe Einbußen bei der Kraftstoffeffizienz gegenüber. Für die Implementierung im untersuchten Fahrzeug bietet in Summe aller Kriterien die abgeleitete heuristische Betriebsstrategie den geeignetsten Ansatz. Die *Online-Optimierung* selbst ist besser für theoretische Voruntersuchungen geeignet.

# Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt Herrn *Professor Dr.-Ing. Georg Wachtmeister*, der durch stetige Förderung und zahlreiche produktive Diskussionen entscheidend zum Erfolg dieser Dissertation beigetragen hat. Sehr verbunden bin ich meinem Doktorvater zudem für das angenehme, vertrauensvolle und positive Arbeitsklima. Für sein Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Zweitgutachtens danke ich Herrn *Professor Dr.-Ing. Bernd-Robert Höhn*.

Herrn *Dr. Liebl*, Leiter Effiziente Dynamik bei der BMW Group möchte ich meinen Dank aussprechen für die Möglichkeiten zum wissenschaftlichen Arbeiten in seiner Hauptabteilung und die Ratschläge zu meinen Veröffentlichungen. Für die Anregung des Themas, die fachliche Unterstützung und das Korrekturlesen danke ich *Dr.-Ing. Stephan Neugebauer*, Leiter der Abteilung Wärmemanagement bei der BMW Group. Herrn *Dr.-Ing. Matthias Lederer*, Leiter Energiemanagement bei der Porsche SE danke ich für die Initiative zu meiner Dissertation und die Betreuung meiner Arbeit in der frühen Phase. Für die anschließende Förderung danke ich Herrn *Dipl.-Ing. Geert Schmitz* und Herrn *Dipl.-Ing. Christian Senger*, Leiter Energiemanagement bei der BMW Group.

Ein sehr herzlicher Dank gilt meinen Kollegen für die zahlreichen fachlichen Diskussionen und Denkanstöße; besonders erwähnen möchte ich Herrn *Dr.-Ing. Thomas Christ*, Herrn *MSc Henrik Wigermo*, Herrn *Dipl.-Ing. Arnd Golle*, Herrn *Dipl.-Ing. Stefan Lindhuber* und Herrn *Dipl.-Ing. Georg Mumelter*. Sehr viel Spaß hat mir die Betreuung der Diplomanden *Dipl.-Ing. Felix Lins*, *Dipl.-Ing. Gonzalo Sánchez Arjona Voser* und *Dipl.-Ing. Thomas Kernernecht* gemacht, denen ich für die intensive und gute Zusammenarbeit danke. Für die interessante gemeinsame Zeit im Rahmen des Forschungsprojektes „Energetische Bewertung von Hybridfunktionen bezüglich Warmlauf im Gesamtfahrzeug“ danke ich Herrn *Dipl.-Ing. Stefan Blodig*.

Mein größter Dank gilt meiner Frau Julia und meinen Eltern, die mich über fast vier Jahre hinweg bei meiner Promotion unterstützt und mir die notwendige Energie gegeben haben.

# Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Stand der Technik . . . . .                                  | 2         |
| 1.1.1    | Hybridtechnik . . . . .                                      | 2         |
| 1.1.2    | Betriebsstrategie für Hybridfahrzeuge . . . . .              | 6         |
| 1.1.3    | Simulationsmethoden . . . . .                                | 9         |
| 1.2      | Zielsetzung der Arbeit . . . . .                             | 9         |
| 1.2.1    | Entwicklung der Betriebsstrategieansätze . . . . .           | 10        |
| 1.2.2    | Bewertungskriterien für Betriebsstrategieansätze . . . . .   | 11        |
| 1.3      | Aufbau der Arbeit . . . . .                                  | 14        |
| <b>2</b> | <b>Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells</b> | <b>16</b> |
| 2.1      | Gesamtfahrzeug . . . . .                                     | 16        |
| 2.1.1    | Beschreibung des Gesamtfahrzeuges . . . . .                  | 16        |
| 2.1.2    | Modellierung des Gesamtfahrzeuges . . . . .                  | 17        |
| 2.2      | Verbrennungsmotor . . . . .                                  | 19        |
| 2.2.1    | Beschreibung des Verbrennungsmotors . . . . .                | 19        |
| 2.2.2    | Modellierung des Verbrennungsmotors . . . . .                | 21        |
| 2.3      | Getriebe . . . . .   | 23        |
| 2.3.1    | Aufbau und Eigenschaften des Getriebes . . . . .             | 23        |
| 2.3.2    | Getriebegleichungen . . . . .                                | 26        |
| 2.3.3    | Modellierung des Getriebes . . . . .                         | 30        |
| 2.3.4    | Validierung . . . . .  | 31        |
| 2.4      | Elektromotoren . . . . .                                     | 38        |
| 2.4.1    | Beschreibung der Elektromotoren . . . . .                    | 38        |
| 2.4.2    | Modellierung der Elektromotoren . . . . .                    | 39        |
| 2.4.3    | Validierung . . . . .  | 42        |
| 2.5      | Hochvoltspeicher . . . . .                                   | 44        |
| 2.5.1    | Beschreibung des Hochvoltspeichers . . . . .                 | 44        |
| 2.5.2    | Modellierung des HV-Speichers . . . . .                      | 45        |
| 2.5.3    | Validierung . . . . .  | 47        |
| <b>3</b> | <b>Funktionsarchitektur und Basisfunktionen</b>              | <b>49</b> |
| 3.1      | Funktionsarchitektur . . . . .                               | 49        |
| 3.2      | Randwertberechnung . . . . .                                 | 51        |
| 3.2.1    | Drehzahlbegrenzungen . . . . .                               | 51        |
| 3.2.2    | Maximales und minimales Getriebeausgangsmoment . . . . .     | 54        |

## Inhaltsverzeichnis

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.2.3    | Maximales und minimales Verbrennungsmotormoment . . . . .                 | 62         |
| 3.2.4    | Modellierung der Randwertberechnung . . . . .                             | 62         |
| 3.3      | Getriebesteuerung . . . . .   | 63         |
| 3.3.1    | Beschreibung der Funktionsweise der Getriebesteuerung . . . . .           | 63         |
| 3.3.2    | Modellierung der Getriebesteuerung . . . . .                              | 65         |
| 3.4      | Regelung der E-Maschinen . . . . .  | 65         |
| 3.4.1    | Beschreibung der Funktionsweise der E-Maschinenregelung . . . . .         | 65         |
| 3.4.2    | Modellierung der E-Maschinenregelung . . . . .                            | 66         |
| <b>4</b> | <b>Online optimierende Betriebsstrategie</b>                              | <b>67</b>  |
| 4.1      | Entwurf der Online-Optimierung . . . . .                                  | 67         |
| 4.1.1    | Aufbau und Bestandteile der Online-Optimierung . . . . .                  | 67         |
| 4.1.2    | Entwurf der Gütefunktion . . . . .  | 69         |
| 4.1.3    | Auswahl des Optimierungsalgorithmus . . . . .                             | 75         |
| 4.1.4    | Stabilisierung der Sollwertvorgabe . . . . .                              | 79         |
| 4.2      | Implementierung der Funktionen in Modelica und Parametrisierung . . . . . | 80         |
| 4.2.1    | Schnittstellen und Aufbau des Modells . . . . .                           | 80         |
| 4.2.2    | Umsetzung der Teilfunktionen . . . . .                                    | 82         |
| 4.2.3    | Parametrisierung . . . . .  | 83         |
| 4.3      | Rechenergebnisse und Analyse . . . . .                                    | 89         |
| 4.3.1    | Rechenergebnisse . . . . .  | 90         |
| 4.3.2    | Analyse und Interpretation . . . . .                                      | 93         |
| <b>5</b> | <b>Ableitung der heuristischen Ansätze</b>                                | <b>98</b>  |
| 5.1      | Entwurf . . . . .   | 98         |
| 5.1.1    | Drehzahlwahl . . . . .  | 98         |
| 5.1.2    | Ladezustandsregelung . . . . .  | 100        |
| 5.1.3    | Elektrisches Fahren . . . . .   | 109        |
| 5.2      | Implementierung und Parametrisierung der heuristischen Ansätze . . . . .  | 112        |
| 5.2.1    | Implementierung in Modelica . . . . .                                     | 112        |
| 5.2.2    | Parametrisierung . . . . .  | 114        |
| 5.3      | Simulationsergebnisse . . . . .   | 120        |
| 5.3.1    | Kraftstoffverbrauch . . . . .   | 120        |
| 5.3.2    | Fahrverhalten . . . . .   | 121        |
| 5.3.3    | Komponentenbelastung . . . . .  | 121        |
| <b>6</b> | <b>Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick</b>                        | <b>123</b> |
| 6.1      | Vergleich der Ansätze anhand der Zielkriterien . . . . .                  | 124        |
| 6.2      | Einordnung der Ergebnisse und Ausblick . . . . .                          | 126        |
| <b>A</b> | <b>Getriebegleichungen</b>  | <b>128</b> |
| <b>B</b> | <b>Gleichungen zur Berechnung des Verbrennungsmotormomentes</b>           | <b>131</b> |
|          | <b>Abkürzungsverzeichnis</b>  | <b>134</b> |

## *Inhaltsverzeichnis*

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| <b>Abbildungsverzeichnis</b> | <b>136</b> |
| <b>Tabellenverzeichnis</b>   | <b>139</b> |
| <b>Literaturverzeichnis</b>  | <b>140</b> |

# 1 Einleitung

Der  $CO_2$ -Ausstoß der Industrienationen und die Folgen für die Umwelt sind ein viel und kontrovers diskutiertes Thema. Zwar ist allgemein anerkannt, dass  $CO_2$  ein klimawirksames Gas ist; der tatsächliche Einfluss ist aber äußerst schwer zu quantifizieren, weil die Wechselwirkungen im System „Weltklima“ noch zu wenig verstanden werden [8]. Voraussagen zu langfristig ansteigenden Temperaturen scheinen vor diesem Hintergrund spekulativ. Dennoch ist es sinnvoll, den  $CO_2$ -Ausstoß durch das Verbrennen fossiler Energieträger so weit wie möglich zu reduzieren, um auf das wenig verstandene System „Weltklima“ keinen zu großen Einfluss mit unbekanntem Auswirkungen zu nehmen und gleichzeitig begrenzte Ressourcen zu schonen.

Der Anteil des Individualverkehrs betrug im Jahr 2004 etwa 16% der anthropogenen  $CO_2$ -Emissionen der EU-15-Staaten [49]. Damit hat auch die Automobilindustrie die Aufgabe, Technologien anzubieten, die den  $CO_2$ -Ausstoß reduzieren. Die Einführung von Hybridfahrzeugen in Großserien war in diesem Zusammenhang die technische Neuerung, die im automobilen Umfeld in den letzten beiden Jahrzehnten für das größte Aufsehen gesorgt hat. Die Technik ist vielversprechend: In den verbrennungsmotorischen Antriebsstrang werden an geeigneter Stelle eine oder mehrere E-Maschinen integriert. Die beiden Antriebsquellen, Verbrennungs- und Elektromotor, ergänzen sich und spielen dabei ihre jeweiligen Vorteile aus. Neue Funktionen wie rein elektrisches Fahren oder Bremsenergieerückgewinnung ermöglichen Kraftstoffeinsparung bei gleichzeitiger Fahrleistungsverbesserung.

Die Idee ist nicht neu: Bereits Ferdinand Porsche hat im Jahr 1900 einen Hybrid-Antrieb für die Wiener k.u.k. Hofwagenfabrik Ludwig Lohner & Co konstruiert. Sein Lohner Porsche besaß bereits einen Verbrennungsmotor sowie einen elektrischen Radnabenmotor und konnte in einer Batterie Energie zwischenspeichern [74]. Die größten Hindernisse für die Einführung der Hybridtechnik waren lange Zeit Gewicht, Zuverlässigkeit der elektrischen Speicher und Kosten. Mit der Weiterentwicklung der Speichertechnologie sind die beiden ersten Probleme beherrschbar geworden. Vor dem Hintergrund der dramatisch steigenden Energiekosten, der Bemühungen um die Reduktion des  $CO_2$ -Ausstoßes und den damit verbundenen restriktiven Gesetzgebungen [19] wird die Hybridtechnik zunehmend auch betriebswirtschaftlich interessant. Hybridfahrzeuge können ferner als Zwischenschritt auf dem Weg zu einem rein elektrischen Fahrzeug gesehen werden, das Individualverkehr unabhängig von der endlichen Ressource Erdöl ermöglicht. In Zukunft zeichnet sich daher eine Weiterentwicklung der Hybridtechnik und eine steigende Marktdurchdringung ab.

### 1.1 Stand der Technik

Dieser Abschnitt fasst den aktuellen Stand der Technik im Bereich Hybridtechnologie zusammen. Schwerpunkte liegen auf Systemaufbau, Komponenten und Steuerstrategien. Da Modellbildung und Simulation in dieser Arbeit eine zentrale Rolle einnehmen, folgt eine Übersicht über Methoden und Werkzeuge, die im Bereich Fahrzeugtechnik derzeit zum Einsatz kommen.

#### 1.1.1 Hybridtechnik

Das Adjektiv „hybrid“ lässt sich auf seinen lateinischen Ursprung zurückführen [51]. Entlehnt von „hybrida“ bedeutet es seit dem 19. Jahrhundert umgangssprachlich „durch Kreuzung entstandenes Wesen“. In der Automobiltechnik verfügt ein Hybridfahrzeug über eine Kombination von zwei unterschiedlichen Antrieben mit jeweils eigenem Energiespeicher. Üblich ist dabei das Zusammenspiel eines verbrennungsmotorischen mit einem elektrischen Antrieb. Nicht zu den Hybridfahrzeugen zählen sog. „bivalente“ Fahrzeuge, die Speicher für zwei unterschiedliche Kraftstoffe besitzen, diese jedoch im selben Motor in mechanische Energie wandeln. Beispiele sind Fahrzeuge mit Benzin-Erdgas, Benzin-Ethanol oder Benzin-Wasserstoff-Verbrennungsmotor [72,6]. Alle derzeit auf dem Markt erhältlichen Hybridfahrzeuge kombinieren Verbrennungs- und Elektromotor.

Neben zahlreichen Forschungsprojekten, vgl. z.B. [34], sind heute mehrere Hybridfahrzeuge in Großserien auf dem Markt. Dabei werden Hybridfahrzeuge je nach der Leistungsfähigkeit des elektrischen Systems und den damit verbundenen Funktionalitäten in Mikro-, Mild- und Vollhybride unterteilt [86], [55].

Als Mikrohybride werden dabei Fahrzeuge bezeichnet, die ohne größere Änderungen gegenüber dem Standardfahrzeug durch ein geschicktes Energiemanagement Hybridfunktionen wie Bremsenergieerückgewinnung oder Motorstartstopp-Funktion umsetzen können. Beispiele dafür sind die aktuellen Modelle von MINI [13], 1er und 3er-Modelle von BMW [58,59,36] oder die Citroën-Modelle C2 und C3 „Stop & Start“ [21].

Als Mild-Hybride werden Fahrzeuge bezeichnet, die über ein zweites Energiebordnetz mit erhöhter Spannung (bis ca. 60V) und eine entsprechende E-Maschine mit bis zu ca. 15 kW verfügen. Diese Systeme ermöglichen einen Großteil der Hybridfunktionen. Für ein voll ausgeprägtes rein elektrische Fahren sind sie aber nicht ausgelegt. Da die zusätzlich möglichen Beschleunigungen kaum spürbar sind, bieten diese Hybridfahrzeuge keine erlebbaren Funktionen. Ein Beispiel ist der „Honda Civic Hybrid“ [42].

Vollhybride verfügen über nochmals deutlich höhere Spannungen im HV-Bordnetz von bis zu 600V und E-Maschinen mit Leistungen im Bereich von 50 bis 125 kW. Beispiele dafür sind die Fahrzeuge Toyota Prius, Lexus RX400h, GS450h oder LS600h oder Ford Escape [100].

# 1 Einleitung

## Hybridgetriebe

Neben der Leistungsfähigkeit dient die Getriebebauart als Unterscheidungskriterium für hybridisierte Antriebsstränge. In der Literatur (zum Beispiel in [9, 35, 95]) haben sich folgende Begriffe für die drei Basisklassen etabliert, vgl. auch Abbildung 1.1:

- Serieller Hybrid
- Paralleler Hybrid
- Leistungsverzweigter Hybrid

Die Unterschiede liegen in Anzahl und Anordnung der elektrischen Maschinen und den resultierenden Energieflüssen.

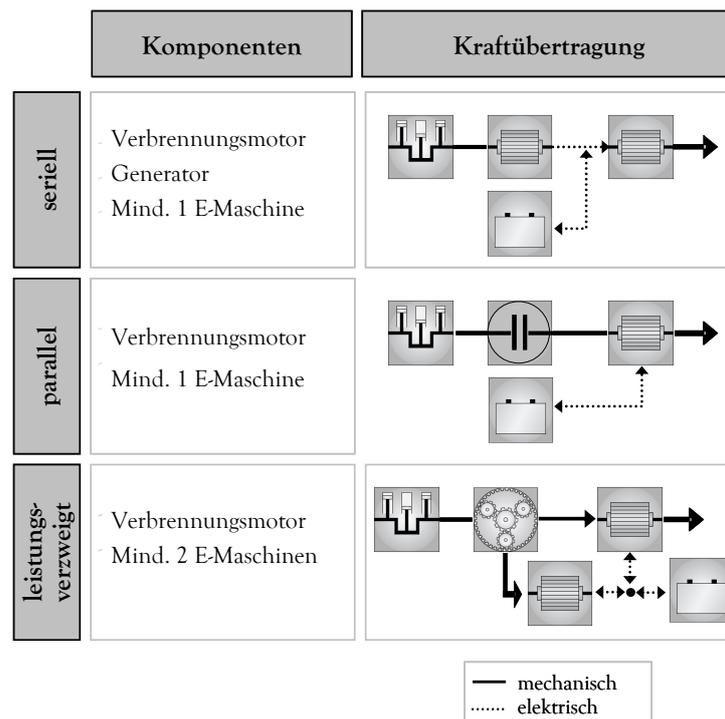


Abbildung 1.1: Überblick Hybridtopologien

Beim *seriellen* Hybriden gibt es keine direkte mechanische Kopplung zwischen Verbrennungsmotor und Getriebeabtriebswelle. Die mechanische Leistung wird vollständig in

## 1 Einleitung

elektrische Leistung umgewandelt. Anwendungsbeispiele sind Schiffe, Diesellokomotiven oder in Kleinserien Stadtbusse [48]. Ein großer Vorteil dieser Konfiguration ist, dass keine Wellen vom Verbrennungsmotor zu den antreibenden Elementen (Schiffschraube, Rad) notwendig sind. Leitungen für elektrische Energie sind flexibler, benötigen weniger Bauraum und erzeugen keine Vibrationen. Diese Vorteile kommen im PKW weniger zum Tragen. Die bei der Energiewandlung entstehenden Verluste machen das Konzept für Kraftfahrzeuge deswegen uninteressant. Eine denkbare Anwendung stellen Batteriefahrzeuge dar, die zur Erweiterung der Reichweite über einen kleinen Verbrennungsmotor zum Zwischenladen des Speichers verfügen.

Der *parallele* Hybrid basiert auf einem konventionellen Antriebsstrang, in den zwischen Verbrennungsmotor und Automatikgetriebe mindestens eine E-Maschine und eine oder zwei Kupplungen integriert sind. Die im seriellen Hybriden auftretenden elektrischen Energiewandlungsverluste entfallen daher. Nach derzeitigem Stand der Technik ergeben sich aber größere Schwierigkeiten mit dem Zustarten des Verbrennungsmotors [99], [85].

Alle derzeit auf dem Markt erhältlichen Vollhybriden basieren auf dem *leistungsverzweigten* Ansatz [26]. Leistungsverzweigte Getriebe bestehen aus mindestens einem Planetenradsatz und zwei E-Maschinen, die die Leistung des Verbrennungsmotors teils mechanisch, teils elektrisch übertragen und dabei stufenlose Übersetzungsverhältnisse ermöglichen. Sie werden daher auch eCVT-Getriebe (electrically continuously variable transmission) genannt. Eine interessante Weiterentwicklung des leistungsverzweigten Ansatzes bietet das so genannte „Two-Mode-Getriebe“, wie es z.B. [89] vorstellt. Dabei werden die Vorteile von zwei Getriebekonzepten vereint: Einerseits lassen sich wie bei parallelen Hybriden feste Gänge schalten. Auf der anderen Seite ist auch der leistungsverzweigte Betrieb als eCVT-Getriebe möglich. Zudem verfügt dieses Getriebe, anders als die zur Zeit von Toyota eingesetzten eCVT-Getriebe, über einen zweiten eCVT-Mode, der für höhere Geschwindigkeiten ausgelegt ist. Damit lassen sich im Schnitt bessere Wirkungsgrade mit kleineren E-Maschinen realisieren [47,29].

Bei so genannten Plug-In-Hybriden [61] kann die Batterie extern geladen werden. So können abhängig vom Energiemix [80] des Netzstromes pro Kilometer noch geringere  $CO_2$ -Emissionen erreicht werden als bei Standard-Hybridfahrzeugen.

### Speichertechnologien

In Hybridfahrzeugen kommen Hochvoltbatterien als Energiespeicher zum Einsatz. Tabelle 1.1 gibt einen Überblick über die Eigenschaften verschiedener Batterietechnologien.

Im Automobilbereich dominiert NiMH die Batterietechnologie der Gegenwart, während sich die Entwicklungen für zukünftige Generationen auf die Lithiumtechnologie konzentrieren [15]. Eine Alternative zu Batterien stellen Doppelschichtkondensatoren [24,54] dar. Hybridfahrzeuge, die diese Technologie als Hauptspeicher verwenden, sind bisher nur in Forschungsprojekten im Einsatz, z.B. [48].

## 1 Einleitung

| Batterietyp | Spez. Energie [Wh/kg] | Spez. Leistung [W/kg] | Zyklenlebensdauer |
|-------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|
| Blei        | 25...30               | 80...300              | 500               |
| NiCd        | 50...60               | 200...500             | 1350              |
| NiMH        | 60...70               | 200...1500            | 1350              |
| Lithium     | 60...150              | 80...2000             | 1500              |

Tabelle 1.1: Eigenschaften verschiedener Batterietechnologien

### E-Maschinen

Nach ihrer Wirkweise lassen sich fast alle elektrischen Maschinen auf drei Grundtypen zurückführen: Asynchronmaschinen, Synchronmaschinen und Gleichstrommaschinen [18]. In Hybridfahrzeugen kommen derzeit ausschließlich permanent erregte Synchronmaschinen (PSM) zum Einsatz. Eine Alternative stellen Asynchronmaschinen (ASM) dar, die bauartbedingt Kostenvorteile bieten, aber höhere Verluste und eine schlechtere Regelgüte aufweisen [94].

### Bremssysteme für Hybridfahrzeuge

Bremssysteme für Hybridfahrzeuge koordinieren bei betätigtem Bremspedal die Momentenverteilung zwischen mechanischen Bremsen und generatorisch arbeitenden E-Maschinen. Entwickelt wurden pedalverkoppelte und pedalentkoppelte Varianten. Bei ersteren ist im Bereich niedriger Pedalwinkel das Bremspedal von Bremskraftverstärker und Hauptbremszylinder entkoppelt. Ein Steuergerät entscheidet anhand des Systemzustandes, zu welchem Anteil die gewünschte Verzögerung über die E-Maschinen bzw. über die mechanische Bremsanlage dargestellt wird.

Bei pedalverkoppelten Systemen ist das mechanische Bremssystem direkt an das Bremspedal gebunden. Ein rein regeneratives Bremsen ist also nicht möglich. Von dem elektrischen System wird abhängig vom Bremspedalwinkel ein Moment angefordert. Kann das elektrische System z.B. wegen einer zu vollen Batterie keine Bremsleistung stellen, fällt das Bremsmoment entsprechend geringer aus.

### Elektrifizierte Nebenaggregate

In Hybridfahrzeugen werden mehrere Nebenaggregate, die in Standardfahrzeugen teils noch der Verbrennungsmotor antreibt [7], elektrisch angetrieben. Dazu zählen nach derzeitigem Stand der Technik Unterdruckpumpe, Klimakompressor, Getriebeölpumpe und Lenkung. Alleine die elektrische Lenkung benötigt elektrische Spitzenleistungen von bis zu 1000 W [38]. Eine Integration der Komponenten im leistungsstarken HV-Bordnetz ist der im NV-Bordnetz vorzuziehen. Eine elektrische Kühlmittelpumpe ist in Hybridfahrzeugen nicht notwendig, spart aber zusätzlich Kraftstoff [39].

### 1.1.2 Betriebsstrategie für Hybridfahrzeuge

Der elektrifizierte Antriebsstrang bietet neue Freiheitsgrade. Dies demonstriert das Beispiel einer langsamen Konstantfahrt: Muss im Standardfahrzeug lediglich festgelegt werden, ob der erste, zweite oder dritte Gang zum Einsatz kommt, stehen im Hybridfahrzeug zahlreiche Optionen zur Wahl: Soll der Verbrennungsmotor laufen oder abgestellt werden? Falls der Motor läuft, ist es besser, die Batterie zu laden oder zu entladen? Welche Drehzahl ist am günstigsten? Noch komplexer gestaltet sich die Betriebspunktwahl aufgrund der eCVT-Getriebe, die in allen derzeit auf dem Markt erhältlichen Voll-Hybriden zum Einsatz kommen: Die diskrete Gangwahl erweitert sich zu einer kontinuierlichen Fragestellung.

Die Betriebspunktwahl stellt ein komplexes Optimierungsproblem dar, dessen Lösung wichtige Fahrzeugeigenschaften direkt beeinflusst. Kraftstoffverbrauch, subjektive Bewertung der neuen Hybridfunktionen, Ansprechverhalten, Komfort, Emissionierung oder Lebensdauer der Komponenten hängen direkt von der Nutzung der neuen Freiheitsgrade ab. Diese Fahrzeugeigenschaften sollen in Summe optimal ausgeprägt sein. Um dies trotz der Komplexität des Systems zu erreichen, ist eine übergreifende Betriebsstrategie notwendig, die die Energieströme im Fahrzeug steuert. Diese umfasst folgende eng miteinander vernetzten Teilfunktionen [3]:

1. Die Funktion *Entscheidung elektrisches Fahren* bestimmt, ob es bei den gegebenen Randbedingungen günstiger ist, mit Verbrennungsmotor zu fahren oder die gewünschte Antriebsleistung allein mit dem elektrischen System aufzubringen. Hauptziel des rein elektrischen Fahrens ist es, Kraftstoff zu sparen. Das ist am besten in Phasen niedriger Geschwindigkeiten und Beschleunigungen möglich, in denen der Betrieb des Verbrennungsmotors aufgrund der schlechten Teillast-Wirkungsgrade ineffizient arbeitet.
2. Läuft der Verbrennungsmotor, legt die Funktion *Drehzahlwahl* einen günstigen Getriebemodus mit dem passenden Übersetzungsverhältnis fest und bestimmt so Drehzahlen von Verbrennungsmotor und E-Maschinen.
3. Bei laufendem Verbrennungsmotor kann die Betriebsstrategie innerhalb der Komponentengrenzen frei wählen, welcher Teil der Antriebsleistung vom Verbrennungsmotor und welcher Teil vom elektrischen System gestellt wird. Die Funktion *Lastpunktwahl* legt diesen Freiheitsgrad durch die Wahl des Verbrennungsmotormomentes fest. Wählt sie eine Verbrennungsmotorleistung, die die für den gewünschten Vortrieb notwendige Leistung übersteigt, wird die überschüssige Energie in den HV-Speicher geladen (Lastpunktanhebung). Wählt sie eine geringere Leistung, wird der HV-Speicher entsprechend entladen (Lastpunktabsenkung oder auch: Assist). Lastpunktanhebung und Lastpunktabsenkung sind also wichtige Funktionen, um den Ladezustand der HV-Batterie im gewünschten Bereich zu halten. Der Neutralpunkt zwischen Lastpunktanhebung und Lastpunktabsenkung ist daher als der Punkt definiert, in dem die Batterieleistung gleich Null ist.

## 1 Einleitung

4. Die Funktion *Entscheidung Boost* legt fest, wann das elektrische System die maximale Antriebsleistung über die des Verbrennungsmotors hinaus erhöht. Im Gegensatz zu der oben beschriebenen Funktion Lastpunktabsenkung ergänzt das elektrische System die Verbrennungsmotorleistung, ersetzt sie aber nicht. Die Funktion Boost kann also nur einsetzen, wenn der Verbrennungsmotor sein derzeit mögliches Maximalmoment abgibt. Je nach dem, ob es sich um die instationäre oder stationäre Volllast handelt, kann zwischen Stationär- und Instationärboost unterschieden werden. Instationärboost verbessert kurzfristig das Ansprechverhalten, Stationärboost erhöht längerfristig das maximale Beschleunigungsvermögen, siehe Abbildung 1.2.

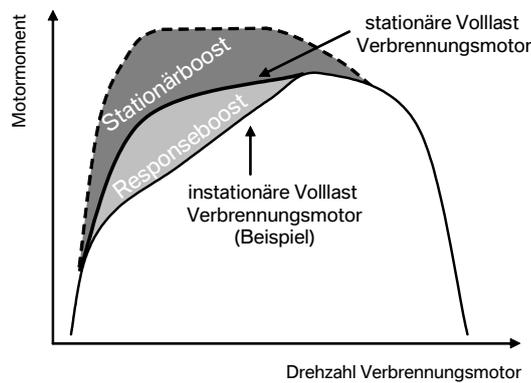


Abbildung 1.2: Unterfunktionen Boost

5. In Verzögerungsphasen entscheidet die Funktion *Rekuperation*, wie viel kinetische Energie über generatorisch arbeitende E-Maschinen in elektrische Energie umgewandelt wird. Je nach dem, ob das Bremspedal betätigt ist oder nicht, wird in Brems- bzw. Schleppekuperation unterteilt. Die Schleppekuperation kommt zum Beispiel beim elektrischen Fahren zum Einsatz, um dem Fahrer bei nicht betätigtem Gaspedal das gewohnte Schlepverhalten des Verbrennungsmotors zu simulieren.

## 1 Einleitung

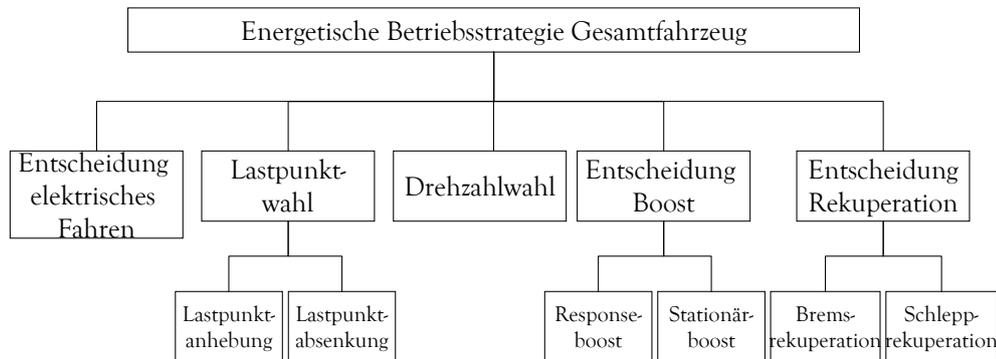


Abbildung 1.3: Teilfunktionen der energetischen Betriebsstrategie Gesamtfahrzeug

Für die energetische Betriebsstrategie Gesamtfahrzeug werden verschiedene Ansätze diskutiert:

Die ideale Steuertrajektorie lässt sich mit einer nichtkausalen Optimalsteuerung berechnen, der der Fahrzyklus im Voraus bekannt ist. Ein Anwendungsbeispiel zeigt [50], der mittels dynamischer Programmierung eine optimale Steuertrajektorie berechnet. Die so erreichten Kraftstoffeinsparungen dienen später als Referenz für eine kausale Betriebsstrategie. Der Optimalsteuerungsalgorithmus, den [1,4] oder [45] verwenden, ist dagegen für den Einsatz im Fahrzeug entwickelt. Im Fahrbetrieb wird ein Fahrprofil prädiziert, für das von einem stetig mitlaufenden Optimalsteuerungsalgorithmus eine optimale Steuertrajektorie berechnet wird. Unklar bleibt dabei jedoch, wie das Fahrprofil in ausreichender Güte vorhergesagt werden kann. Eine Optimalsteuerung stellt daher derzeit keinen zielführenden Ansatz dar und wird in der vorliegenden Arbeit nicht weiter betrachtet.

Zentraler Punkt bei vielen umsetzbaren Ansätzen ist die Minimierung der Verluste im Antriebsstrang. [67] beschreibt, wie die Betriebsstrategie des Toyota Prius II Betriebspunkte wählt, die die Gesamtverluste des Systems minimieren. Auch [84, 50, 81] empfehlen die Online-Optimierung, also eine in Echtzeit im Fahrzeug laufende Optimierung als geeignetes Herangehen. In beiden Veröffentlichungen wird angegeben, dass mit der Online-Optimierung beinahe so gute Werte erreichbar sind wie mit der im vorherigen Absatz beschriebenen Optimalsteuerung. Die Online-Optimierung wird ebenfalls empfohlen von [68] und [82].

Schaltprogramme für Automatikgetriebe stellen eine mögliche Ausprägung der Teilfunktion *Drehzahlwahl* dar. Diese basieren auf Kennfeldern, in denen das vorab optimierte gewünschte Verhalten abgelegt ist [16].

## 1 Einleitung

Alle Betriebsstrategieansätze lassen sich mit adaptiven und prädiktiven Funktionen erweitern und verbessern. Diese können in Sondersituationen, beispielsweise bei langen Bergabfahrten Vorteile bringen [56,98].

### 1.1.3 Simulationsmethoden

Das Fahrzeug und seine Teilsysteme in Simulationen abzubilden, ist in den letzten Jahren zu einem etablierten Entwicklungsschritt geworden, in dem Zusammenhänge untersucht und Entscheidungen vorbereitet werden. Dabei können Gesamtsysteme [11] oder Teilsysteme (z.B. Bremsanlage [2]) simuliert werden. Simulationen sind schneller verfügbar, flexibler und deutlich preiswerter als Prototypen. In frühen Entwicklungsphasen sind sie deswegen ein unverzichtbares Werkzeug. Die Lage der Systemgrenzen und die Anforderungen an die Rechenzeit bestimmen im Wesentlichen das verwendete Simulationsprogramm und den angestrebten Detaillierungsgrad.

Es gibt verschiedene kommerzielle Programme, die für die unterschiedlichen Aufgaben jeweils Vor- und Nachteile aufweisen. Beispiele hierfür sind Simulink [87] für regelungstechnische Systeme, SimXpert [66], Simpack [44] oder WorkingModel [23] für mechanische Systeme sowie Flowmaster [25] für hydraulische Systeme.

Diese Art von Programmen ist jedoch auf ein Fachgebiet zugeschnitten. Die Modellierung von Komponenten anderer Disziplinen ist nicht oder nur in eingeschränktem Umfang möglich. Für multidisziplinäre Aufgaben wie die Simulation eines Gesamtfahrzeuges bietet sich der Sprachstandard Modelica an. Modelica ist eine frei verfügbare, objektorientierte Sprache zur Modellierung von komplexen physikalischen Systemen [65]. Sie ist geeignet, Teilsysteme verschiedener Domänen in einem Modell abzubilden. Da im Fahrzeug verschiedene physikalische Domänen betrachtet werden, bietet sich das auf Modelica basierende Tool Dymola der Firma Dynasim an [69]. Im Vorfeld dieser Arbeit ist ein umfangreiches Modell zur Simulation von Längsdynamik und Kraftstoffverbrauch von Standardfahrzeugen und Mild-Hybriden entstanden [20,30,88,96]. Die in dieser Arbeit beschriebenen Hybridmodelle bauen auf diesen Erkenntnissen auf.

## 1.2 Zielsetzung der Arbeit

Als zukunftssträchtige Weiterentwicklung von Hybridgetrieben hat der vorangegangene Abschnitt das *Two-Mode-Getriebe* vorgestellt. Ausgehend von den dort ebenfalls beschriebenen Regelungs- und Steuerungsmethoden, soll für ein Hybridfahrzeug mit diesem Getriebe die Betriebsstrategie entwickelt werden, die für den Serieneinsatz in naher Zukunft am besten geeignet ist. Welche Ansätze dabei betrachtet werden, beschreibt Abschnitt 1.2.1. Der gesuchte Steuerungsalgorithmus soll den Zielkonflikt zwischen Kraftstoffeffizienz, Qualität des Fahrverhaltens, resultierende Komponentenbelastungen und Komplexität optimal auflösen. Abschnitt 1.2.2 beschreibt diese Kriterien detaillierter.

### 1.2.1 Entwicklung der Betriebsstrategieansätze

Nicht alle der in Abschnitt 1.1 vorgestellten Betriebsstrategieansätze sind für die in dieser Arbeit angestrebten Untersuchungen geeignet. Eine *Optimalsteuerung* ermöglicht es, den Kraftstoffverbrauch auf das theoretische Minimum zu senken. Wegen des derzeit nicht ausreichend genau bekannten zukünftigen Fahrprofils kann dieser Ansatz jedoch nicht in näherer Zukunft umgesetzt werden. Es bietet sich daher die *Online-Optimierung* als Ausgangspunkt der Untersuchungen an, weil diese ohne bzw. mit weniger genauen prädiktiven Daten die gleiche Effizienz erreicht. Dazu müssen einerseits die Algorithmen auf das komplexe Two-Mode-Getriebe angepasst werden. Weiterhin verfolgen die genannten Veröffentlichungen zur *Online-Optimierung* ausschließlich das Ziel, bei ausgeglichener Ladebilanz einen minimalen Kraftstoffverbrauch zu erreichen. Die vorliegende Arbeit entwickelt die verbrauchsoptimalen Ansätze weiter, um auch den übrigen Anforderungen des realen Fahrbetriebs gerecht zu werden: Es sind Erweiterungen für die bisher nicht beachteten Randbedingungen Fahrverhalten und Komponentenanforderungen notwendig.

Die *Online-Optimierung* ist nach heutigem Stand der Technik zwar in einem Serienfahrzeug implementierbar, zählt jedoch zu den aufwändigsten Steuerungsansätzen. Da auch die Komplexität in die Bewertung mit einfließt, wird eine in den bisherigen Veröffentlichungen unbeantwortete Frage erörtert: Wie gut lässt sich das Verhalten der *Online-Optimierung* mit einem heuristischen Ansatz abbilden? Ist mit dieser weniger komplexen Ableitung die gleiche Kraftstoffeffizienz erreichbar?

Die Betriebspunktwahl der *Online-Optimierung* wird analysiert, um die wesentlichen Wirkzusammenhänge zu verstehen. Auf dieser Basis baut der heuristische Ansatz auf, der nur die Zusammenhänge berücksichtigt, die die gesteckten Ziele maßgeblich beeinflussen und die Wechselwirkungen vernachlässigt, die nur geringe Auswirkungen haben. Ziel dabei ist es, die enorme Komplexität der *Online-Optimierung* zu reduzieren ohne wesentliche Verschlechterungen in den oben genannten Zielwerten hinnehmen zu müssen.

Abbildung 1.4 fasst die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Ansätzen und die offenen Punkte zusammen.

## 1 Einleitung

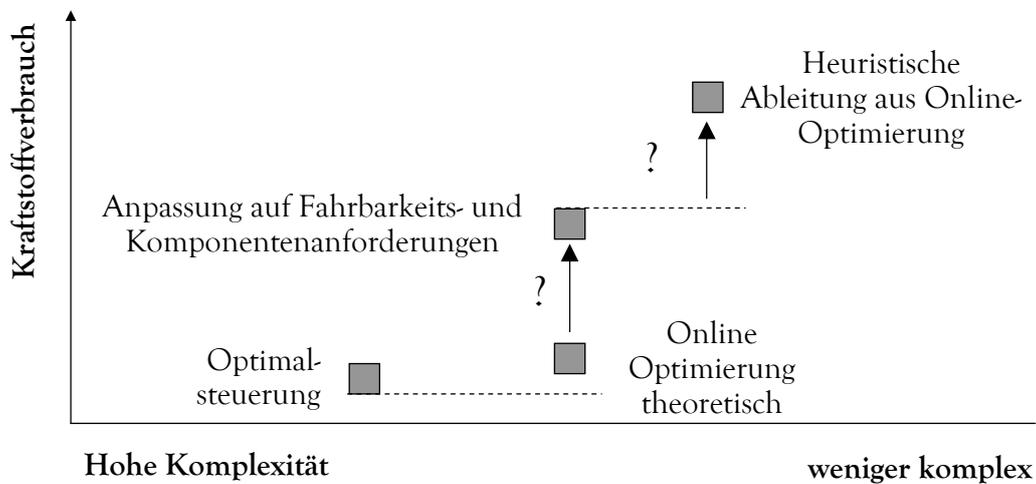


Abbildung 1.4: Betriebsstrategieansätze

Vergleichende Bewertungen klären die offenen Punkte: Welche Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs bringt das Einführen der Fahrverhaltens- und Komponentenanforderungen mit sich? Ist die *Online-Optimierung* oder ihre heuristische Ableitung nach den in Abschnitt 1.2.2 dargestellten Kriterien besser für das gewählte Fahrzeug geeignet? Die Bewertungen werden in Simulationen durchgeführt. Eine virtuelle Testumgebung eignet sich wegen ihrer Reproduzierbarkeit, Schnelligkeit und Flexibilität für grundsätzliche Untersuchungen dieser Art am besten. Die Simulationsmodelle sollen mit Hilfe von Versuchsfahrzeugen validiert werden.

### 1.2.2 Bewertungskriterien für Betriebsstrategieansätze

1. Die Senkung des  $CO_2$ -Ausstoßes ist die wichtigste Motivation, Hybridfahrzeuge zu entwickeln. Die Betriebsstrategie muss den Antriebsstrang so steuern, dass er möglichst wenig Kraftstoff verbraucht. Als Bewertungskriterium für die verschiedenen Betriebsstrategieansätze zieht diese Arbeit folgende Testzyklen heran:
  - a) die für Europa und Nordamerika geltenden gesetzlichen Verbrauchszyklen nach *FTP* [90] und *Neuer Europäischer Fahrzyklus NEFZ* [76]
  - b) einen mit statistischen Methoden gewonnenen repräsentativen Kundenzyklus [77]
2. Das Fahrzeug soll ein ausgereiftes Fahrverhalten bieten, das einem Fahrzeug der Premiumklasse entspricht. Diesem Ziel wird anhand der folgenden zwei objektiven

## 1 Einleitung

Kriterien bewertet:

- a) Um einen souveränen Eindruck zu vermitteln, muss der Antriebsstrang zu jedem Zeitpunkt ohne Verzögerung durch eine Rückschaltung eine Mindestbeschleunigung darstellen können. Der geschwindigkeitsabhängige Wert muss dem des nicht-hybridisierten Basisfahrzeuges entsprechen. Als Referenz für eine Fahrt in der Ebene dient dabei die in Abbildung 1.5 dargestellte Kurve.

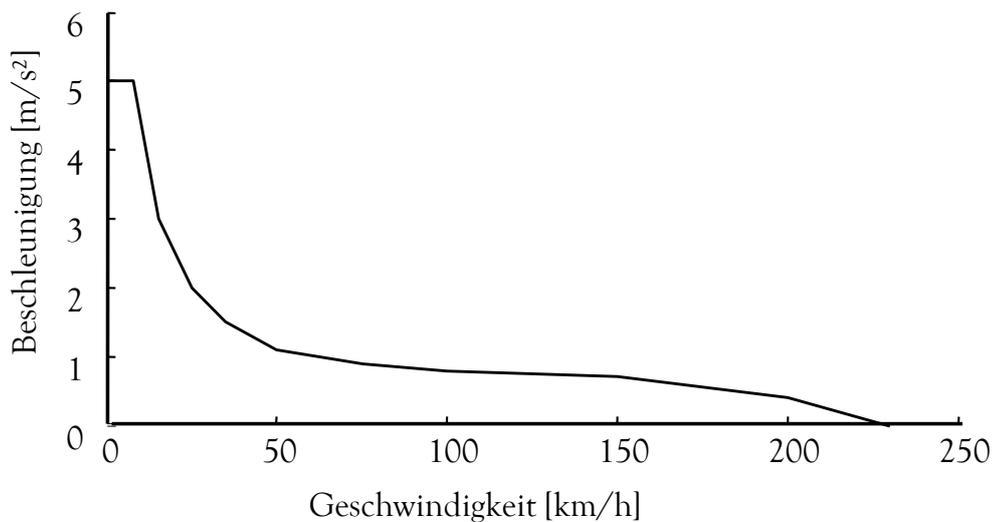


Abbildung 1.5: Geschwindigkeitsabhängige Mindestwerte für das Beschleunigungsvermögen, die stets ohne Rückschaltung erreichbar sein müssen

- b) Die Stabilität des gewählten Betriebspunktes beeinflusst das Fahrerlebnis maßgeblich. Besonders wahrnehmbar sind Drehzahländerungen. Falls diese nicht mit der Fahrsituation harmonieren, entsteht ein unruhiger Eindruck. Neben der Stabilität ist auch entscheidend, wie dynamisch Beschleunigungsphasen erlebt werden. Das subjektive Beschleunigungsempfinden wird beim Fahrer maßgeblich durch die geschwindigkeitsabhängig ansteigende Drehzahl des Verbrennungsmotors und den damit ansteigenden Geräuschpegel wahrgenommen. Der so genannte CVT-Effekt, bei dem sich in Beschleunigungsphasen kein klares Verhältnis zwischen Geschwindigkeitssteigerung und Drehzahl-anhebung ergibt, hinterlässt deswegen beim Kunden ein undynamisches Gefühl [46]. Der subjektive Eindruck ist im Alltag wesentlich wichtiger als objektiv messbare Größen, auffällige CVT-Effekte schmälern das positive Fahrerlebnis. Die in den folgenden Gleichungen definierte Kennzahl  $\Omega$  bewertet, wie häufig sich die Getriebeübersetzung  $i = \frac{\omega_i}{\omega_o}$  wahrnehmbar verändert. Dazu werden die Zeitanteile, während derer die Änderung der Getriebeübersetzung  $\frac{d i}{d t}$  einen festgelegten Grenzwert überschreitet, ins Verhältnis zur gesam-

## 1 Einleitung

ten Fahrdauer gesetzt. Damit sind beide Kriterien - Stabilität und CVT-Effekte - abgedeckt:

$$\Omega = \frac{\int \iota dt}{\int dt} \quad (1.1)$$

mit

$$\iota = \begin{cases} 1 & \text{falls } \left| \frac{d i}{dt} \right| > 0,01 \text{ und } \omega_o > 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (1.2)$$

Abbildung 1.6 zeigt beispielhafte Verläufe von Getriebeeingangs- und Ausgangsdrehzahlen  $\omega_i$  bzw.  $\omega_o$ . Rot hinterlegt sind die Zeitabschnitte, in denen das Kriterium  $\left| \frac{d i}{dt} \right| > 0,01$  erfüllt ist.  $\Omega$  sinkt, je seltener sich das Drehzahlverhältnis merklich ändert. Ein möglichst geringer  $\Omega$ -Wert ist damit erstrebenswert.

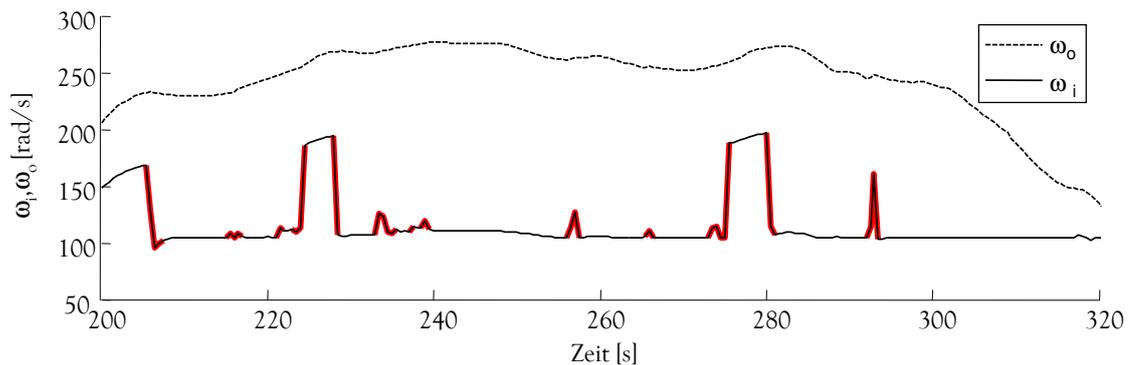


Abbildung 1.6: Berechnung der Kennzahl  $\Omega$

### 3. Komponentenbelastungen

- Verbrennungsmotor, Kupplungen, E-Maschinen, Getriebe und HV-Speicher müssen stets in ihrem zulässigen Arbeitsbereich betrieben werden. Die jeweils vorgegebenen Drehzahl-, Momenten- und Leistungsgrenzen dürfen nicht verletzt werden.
- Alle Komponenten müssen ihre vorgegebene Lebensdauer erreichen. Im Fokus steht dabei der HV-Speicher, der besondere Anforderungen an die energetische Betriebsstrategie stellt. Diese muss so ausgelegt sein, dass der HV-Speicher schwerpunktmäßig in seinem optimalen Ladebereich betrieben und

## 1 Einleitung

der Energiedurchsatz auf ein verträgliches Maß begrenzt wird (vgl. Abschnitt 2.5). Zur Bewertung der Betriebsstrategie werden daher zum einen der mittlere, der maximale und der minimale Wert des Ladezustandes betrachtet. Zum anderen fließt der Energiedurchsatz durch den HV-Speicher in die Bewertung ein.

4. Komplexität, Beherrschbarkeit, Entwicklungsaufwand  
Rechenleistung und Speicherbedarf verteuern die Steuergeräte, auf denen die Betriebsstrategie läuft. Hohe Aufwände bei Funktionsentwicklung, Applikation und Absicherung erhöhen die Entwicklungskosten. Für eine industrielle Umsetzung der untersuchten Betriebsstrategieansätze ist daher eine möglichst geringe Komplexität wünschenswert. Eine erhöhte Komplexität der Algorithmen muss mit einer entsprechend deutlichen Verbesserung der zuvor genannten Kriterien einhergehen.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Nach der Zusammenfassung des Standes der Technik und der Zielsetzung für diese Arbeit folgt in Kapitel 2 die Beschreibung wichtiger Merkmale des gewählten Hybridfahrzeuges. Der Fokus liegt auf den Komponenten des elektrifizierten Antriebsstranges und ihrer Abbildung im Simulationsmodell.

Kapitel 3 stellt eine Funktionsarchitektur vor, die alle Teil-Regelkreise verbindet und eine flexible Basis für die verschiedenen Betriebsstrategien bietet. Einige Unterfunktionen der Betriebsstrategie wie z.B. die Momentenregelungen oder die Randwertberechnungen sind unabhängig vom gewählten Ansatz. Diese Teilfunktionen sind ebenfalls in Kapitel 3 beschrieben. Da die Untersuchungen in dieser Arbeit schwerpunktmäßig an Simulationsmodellen erfolgen, ist jeweils auch die Modellierung der Bausteine skizziert.

Kapitel 4 beschreibt zunächst die theoretische Anwendung und Weiterentwicklung des Prinzips *Online-Optimierung* für den ausgewählten Antriebsstrang und die gesetzten Ziele und Randbedingungen. Es folgt eine Beschreibung der Umsetzung der resultierenden Algorithmen im Simulationsmodell des Gesamtfahrzeuges. Anschließend wird simulativ überprüft, inwieweit der Ansatz *Online-Optimierung* die gesteckten Ziele erreicht. Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist die Analyse der Funktionsweise der *Online-Optimierung*. Die wichtigsten Wirkzusammenhänge werden herausgearbeitet und bilden die Basis für die Ableitung der heuristischen Algorithmen.

Kapitel 5 leitet mit Hilfe der erkannten Zusammenhänge weniger komplexe, heuristische Algorithmen ab. Die Funktionsblöcke für Drehzahlwahl, elektrisches Fahren und Lastpunktverschiebung werden beschrieben. Es folgt eine Beschreibung der Umsetzung dieser Algorithmen im Simulationsmodell.

Kapitel 6 fasst die Ergebnisse vergleichend zusammen und gibt einen Ausblick auf weitere Entwicklungen.

## *1 Einleitung*

Die Arbeit steht in engem Austausch mit der BMW-Entwicklungsarbeit zum Thema „Active Hybrid“. Die entwickelten Simulationsmodelle konnten für zahlreiche Untersuchungen des Serienprojektes genutzt werden; Konzepte flossen teils direkt in die Entwicklung ein und stellten die Grundlage für Serienfunktionen. Im Gegenzug konnten Prüfstand- und Fahrzeugmessungen für die Validierung der Simulationsergebnisse genutzt werden. Dieser Austausch hat zudem zur Bestätigung der Aussagen dieser Arbeit beigetragen. Dennoch verläuft eine klare Trennlinie zwischen der vorliegenden Arbeit und dem Serienprojekt: Die theoretische Arbeit beschäftigt sich mit grundlegenden Betriebsstrategie-Konzepten und vernachlässigt die dafür nicht relevanten Teilfunktionen, Feinapplikationen und Fehlerquellen des Serienprojektes.

## **2 Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells**

Dieses Kapitel beschreibt das Hybridfahrzeug und dessen Abbildung im Simulationsmodell. Zunächst ist der Aufbau des Gesamtfahrzeuges dargelegt. Ein Absatz befasst sich mit dem Verbrennungsmotor, dessen Eigenschaften die Betriebsstrategie maßgeblich prägen. Der Schwerpunkt liegt auf den neu entwickelten Komponenten des hybriden Antriebsstranges, also dem so genannten Two-Mode-Getriebe [29], den E-Maschinen und der Batterie. Nicht beschrieben sind Betriebsstrategie und Regelungen, mit denen sich Kapitel 3 bis 5 beschäftigen.

### **2.1 Gesamtfahrzeug**

#### **2.1.1 Beschreibung des Gesamtfahrzeuges**

Als Basis der Untersuchungen dieser Arbeit dient ein Fahrzeug der so genannten Sport-Utility-Vehicle-Klasse (SUV) [12], in den ein Vollhybrid-Antriebsstrang mit Two-Mode-Getriebe integriert wird, siehe Abbildung 2.1. Das Fahrzeug verfügt über Allradantrieb und wiegt mit Hybridtechnik ca. 2500 kg.

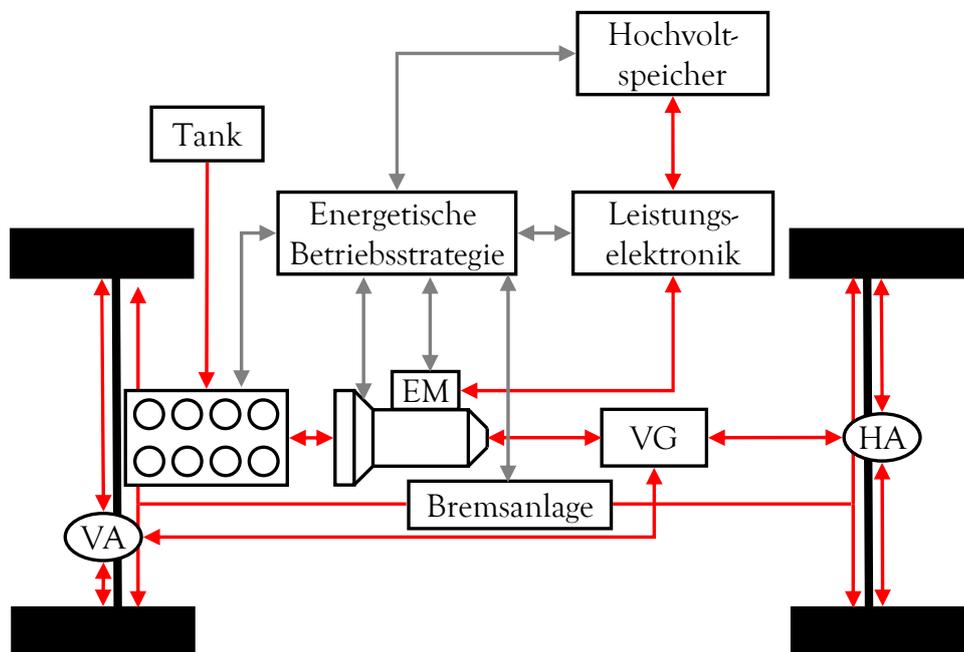


Abbildung 2.1: Gesamtfahrzeug mit Hybridumfängen

### 2.1.2 Modellierung des Gesamtfahrzeuges

#### Fokus Gesamtfahrzeugmodell und Detaillierungsgrad

Ein Hybridfahrzeug ist ein komplexes System. In einem übersichtlichen und handhabbaren Modell lassen sich kaum alle Aspekte abbilden [33]. Für die Entwicklung von Betriebsstrategiealgorithmen muss der Schwerpunkt des Modells in der Abbildung der Energieflüsse im Gesamtfahrzeug liegen, also auf der Leitung, Wandlung und Speicherung elektrischer, thermischer, mechanischer und chemischer Energie. Trotz dieser Fokussierung verbleiben vielfältige Wechselwirkungen, die in einem handhabbaren Modell mit akzeptablen Rechenzeiten abgebildet werden sollen. Dies erfordert eine möglichst einfache und dennoch korrekte Abbildung aller notwendigen Zusammenhänge unter Vernachlässigung der unwesentlichen Einflüsse.

Für die beschriebenen Simulationsziele muss nur die Längsdynamik des Fahrzeugs abgebildet sein. Dies ermöglicht mehrere Vereinfachungen: Die Modellierung der Querdynamik kann komplett entfallen, das vertikaldynamische Modell beschränkt sich auf das Höhenprofil der gefahrenen Strecke. Die Modellierung der Längsdynamik fokussiert sich auf das Notwendige – beispielsweise müssen Details wie Fahrwerkregelsysteme nicht ab-

## 2 Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells

gebildet sein. Da der Fokus auf größeren Zeitspannen liegt, sind höher frequente Vorgänge weniger interessant. Es reicht aus, diese näherungsweise (z.B. Ansprechverhalten des Verbrennungsmotors) oder gar nicht abzubilden (z.B. Schwingungen im Antriebsstrang: das System wird als steif angenommen).

Ein weiterer Aspekt, der große Auswirkung auf die Komplexität hat, ist der Detaillierungsgrad der Modelle. Für jede Komponente muss abgewogen werden, welcher Umfang des Verhaltens physikalisch beschrieben, und welche Zusammenhänge aus zuvor empirisch ermittelten Daten abgerufen werden sollen. Für ein physikalisches Modell etwa eines Elektromotors müssen die Zusammenhänge zwischen anliegender Spannung, Strömen, Magnetfeldern, Momenten, Drehzahlen und den unterschiedlichen Verlustleistungen in Differentialgleichungen beschrieben sein. Für komplexere Komponenten lassen sich rein physikalische Modelle nur in Ausnahmefällen erstellen. Auch bei der Bemühung um einen möglichst physikalischen Ansatz ist es meistens notwendig, auf empirisch ermittelte Zusammenhänge zurückzugreifen. Besonders die physikalische Beschreibung der Verlustleistungen gestaltet sich häufig schwierig.

Die Beschreibung als Verhaltensmodell stellt einen grundlegend anderen Ansatz dar. Im Beispiel würden die Zusammenhänge zwischen mechanischen und elektrischen Schnittstellen des Elektromotors als Kennfeld hinterlegt. Die Details der Energiewandlung wären dann nicht mehr von Interesse. Eine genauere Betrachtung oder Optimierung der Komponente ist mit einem solchen Modell natürlich nicht möglich. Zudem lassen sich auf diese Weise nur Komponenten genau abbilden, bei denen es z.B. am Prüfstand möglich ist, die notwendigen Messungen durchzuführen. Für noch nicht ausreichend reife Komponenten können aber häufig Annahmen getroffen werden, die im Laufe des Entwicklungsfortschritts überprüft und verbessert werden müssen. Die Parametrierung ist bei physikalischen Modellen meist wesentlich aufwändiger als bei Verhaltensmodellen. Müssen bei letzteren nur einige Kennfelder und wenige vereinfachte Parameter wie z.B. die auf die Welle reduzierte Trägheit bekannt sein, erfordert ein physikalisches Modell zahlreiche Parameter für Widerstände, thermische Massen oder Geometrien.

Da die Energieflüsse auf Systemebene im Vordergrund stehen, müssen diese physikalisch, z.B. als Momente und Drehzahlen oder Strom und Spannung modelliert sein. Vereinfachungen auf Komponentenebene sind dagegen notwendig und zulässig. Komponentenmodelle müssen nicht rein physikalisch aufgebaut sein. Einfache teilphysikalische oder rein kennfeldbasierte Modelle bilden alle notwendigen Zusammenhänge ab, lassen sich leichter bedaten und benötigen weniger Rechenzeit.

### **Modellaufbau**

Auf oberster Ebene ist das Modell physikalisch aufgebaut. Die Teilsysteme sind über fest definierte mechanische, elektrische und thermische Schnittstellen miteinander verbunden. Zudem sind Informationsschnittstellen vorhanden, die als Bussystem ausgeprägt sind. Jede Teilkomponente kann beliebige Signale empfangen, muss aber genau die für sie festgelegten Signale senden. Es handelt sich um ein kausal, also vorwärtsrechendes

## 2 Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells

Modell: Der virtuelle Fahrer regelt über Betätigung von Gas- und Bremspedal die vorgegebene Geschwindigkeit ein. Die abgebildeten Teilsysteme sind: Verbrennungsmotor, Getriebe, Achsen, Fahrwiderstände, elektrisches Bordnetz, Hybrid-Komponenten, Steuerungen und Fahrermodell mit den Fahrzyklen. Die Struktur des Modells zeigt Abbildung 2.2.

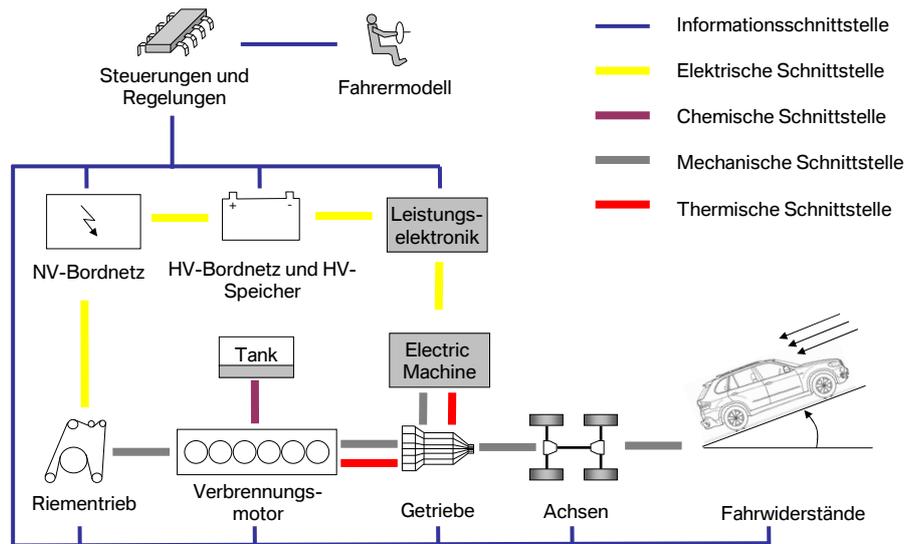


Abbildung 2.2: Aufbau des Gesamtfahrzeugmodells

Mehr Details über Aufbau und Komponenten des Gesamtfahrzeugmodells und Validierung finden sich in [20, 30, 88, 96].

## 2.2 Verbrennungsmotor

### 2.2.1 Beschreibung des Verbrennungsmotors

Beim Verbrennungsmotor handelt es sich um einen direkteinspritzenden 4,4-Liter V8-Ottomotor mit zwei Turboladern, die zentral im V-Raum der Zylinderbänke angeordnet sind. Auch im elektrifizierten Antriebsstrang stellt der Verbrennungsmotor die wichtigste Antriebsquelle. Eigenschaften von Ottomotoren sind beispielsweise in [92] beschrieben. Im Folgenden werden ausschließlich die Merkmale beleuchtet, die für die Aufgabenstellung der Arbeit besondere Relevanz haben.

## 2 Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells

Der elektrifizierte Antriebsstrang bietet die Möglichkeit der Lastpunktverschiebung am Verbrennungsmotor: die Betriebsstrategie kann entscheiden, ob der Verbrennungsmotor genau das erforderliche Antriebsmoment aufbringt, ein höheres Moment stellt, um die Batterie zu laden, oder durch die E-Maschine entlastet wird, vgl. Abbildung 2.3.

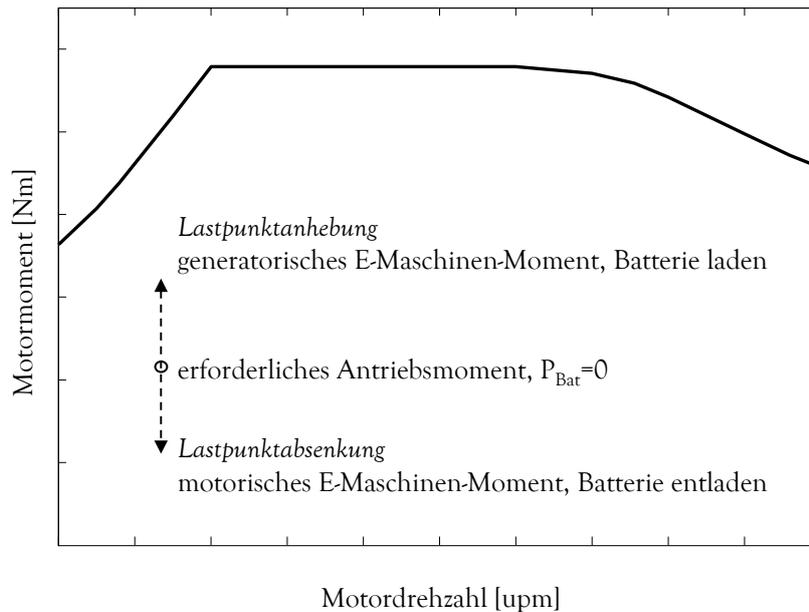


Abbildung 2.3: Freiheitsgrad im Hybridsystem: Lastpunktverschiebung am Verbrennungsmotor

Für die Entwicklung einer Betriebsstrategie ist entscheidend, ob sich dieser Freiheitsgrad nutzen lässt, um durch betriebspunktabhängige Lastpunktverschiebung Kraftstoff einzusparen.

Abbildung 2.4 zeigt Kennlinien des Verbrennungsmotors, die das Verhältnis zwischen chemischer und mechanischer Leistung beschreiben, die sogenannten Willans-Linien [70, 79]. Mit 1000 bis 2000 U/min sind die Kennlinien für Drehzahlen dargestellt, die für gemäßigte Fahrt typisch sind. Diese Kennlinien sind im Teillastbereich nahezu gerade und parallel. Dies bedeutet, dass in diesem Bereich eine bestimmte Erhöhung der mechanischen Leistung die ungefähr gleiche Erhöhung der chemischen Leistung zur Folge hat. Erst nahe des Volllastbereiches ist ein Abknicken der Kennlinien nach oben zu erkennen, das durch die fallenden Wirkungsgrade in diesem Bereich begründet ist.

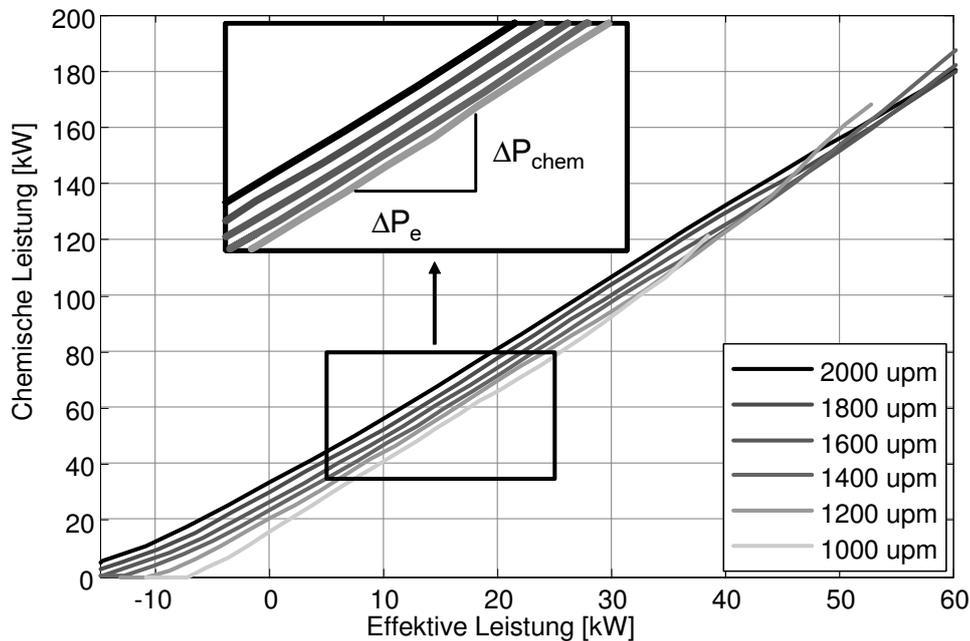


Abbildung 2.4: Verhältnis zwischen chemischer und effektiver Leistung des Verbrennungsmotors

Aus Abbildung 2.4 kann der so genannte relative Wirkungsgrad bestimmt werden, der eine bestimmte Erhöhung der mechanischen Leistung mit der resultierenden Erhöhung der chemischen Leistung ins Verhältnis setzt:

$$\eta_{VM,rel} = \frac{\Delta P_e}{\Delta P_{chem}} \quad (2.1)$$

Es lässt sich festhalten, dass eine Lastpunkterhöhung im Teillastbereich den absoluten Wirkungsgrad bei steigendem Absolutverbrauch stets erhöht. Eine Lastpunktabsenkung dagegen senkt bei fallendem Absolutverbrauch den absoluten Wirkungsgrad. Der relative Wirkungsgrad, der nur die chemischen und mechanischen Deltaleistungen betrachtet, bleibt dagegen nahezu konstant.

## 2.2.2 Modellierung des Verbrennungsmotors

Der Verbrennungsmotor ist als vereinfachtes Verhaltensmodell ohne Modellierung der thermodynamischen Prozesse abgebildet. Das Modell des Verbrennungsmotors ist zweigeteilt: Ein Teilmodell berechnet das mittlere resultierende Ausgangsmoment, das zwei-

## 2 Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells

te dient der Modellierung des zugehörigen Kraftstoffverbrauchs. Die Modellierung des Motorwarmlaufs ist für den Verbrauch wichtig und notwendig. Diese Arbeit verwendet gemessene Warmlaufkennlinien und entsprechende temperaturabhängige Reibmomente.

### Mechanisches Modell

Aus dem Lastsignal  $x_l \in [0, 1]$  und der Drehzahl  $\omega_i$  errechnet die Motorsteuerung das gewünschte indizierte Moment  $M_{ind}^{ref}$  und regelt den Verbrennungsmotor entsprechend. Das tatsächlich erreichte indizierte Moment  $M_{ind}$  wird unter Berücksichtigung der vereinfacht modellierten Stelldynamik (Gleichung 2.2) berechnet. Der Momentenaufbau des Verbrennungsmotors wird durch zahlreiche komplexe Vorgänge bestimmt [92]. Deren Abbildung ist im Vergleich zum Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch gering. Der verzögerte Momentenaufbau wird daher vereinfacht durch ein  $PT_1$ -Glied abgebildet.

$$M_{ind} = \frac{1}{T_m s + 1} M_{ind}^{ref}(x_l, \omega_{mot}) \quad (2.2)$$

Die motorinternen Verluste sind durch das Reibmoment  $M_r(\omega_i, \vartheta_m)$  berücksichtigt. Sie setzen sich aus den folgenden Anteilen zusammen:

- Ventiltrieb
- Ölpumpenantrieb
- Lagerreibung
- Reibung der Zylinder
- Verluste des Riemen- und Kettentriebs.

An der Kurbelwelle ist dann das effektive Moment  $M_e$  verfügbar:

$$M_e = M_{ind} - M_r \quad (2.3)$$

Das maximale effektive Moment  $M_e^{max}$  des Verbrennungsmotors ist durch die Vollastkennlinie gegeben. Die Massenträgheitsmomente der an den Motor getriebeseitig angeflanschten Rotationskörper (Zwei-Massen-Schwungrad ZMS) werden der Motormassenträgheit  $\theta_m$  zugerechnet. Die Elastizität des ZMS ist nicht modelliert, so dass stets gilt:

$$\omega_i = \omega_{mot} \quad (2.4)$$

Da in der vorliegenden Arbeit Energie und Leistung meist über das Getriebe bilanziert werden, findet das Getriebeeingangsmoment  $M_i$  am häufigsten Anwendung, siehe Abbildung 2.5

## 2 Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells

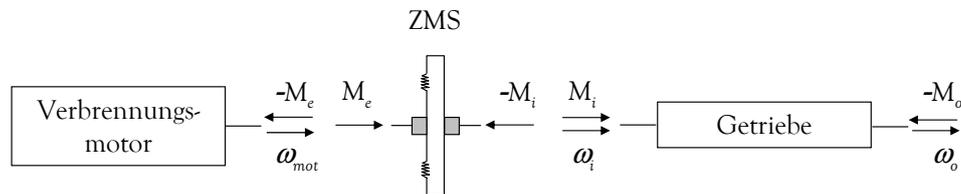


Abbildung 2.5: Effektives Moment des Verbrennungsmotors und Getriebeeingangsmoment

### Verbrauchsmodellierung

Der Kraftstoffverbrauch des Verbrennungsmotors wird über sein Verbrauchskennfeld beschrieben. Der Brennstoffmassenstrom  $\dot{m}_t$  ist eine Funktion der Motordrehzahl  $\omega_m$  und des effektiven Motormoments  $M_{e,m}$ .

$$\dot{m}_t = \dot{m}_t(M_e, \omega_{mot}) \quad (2.5)$$

Das thermische Verhalten wird über ein temperaturabhängiges additives Verlustmoment im Modell berücksichtigt. Die Validierung des Modells hinsichtlich Verbrauch ist in [20] beschrieben.

## 2.3 Getriebe

### 2.3.1 Aufbau und Eigenschaften des Getriebes

In Abbildung 2.6 ist der Aufbau des so genannten Two-Mode-Getriebes [29] dargestellt.

## 2 Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells

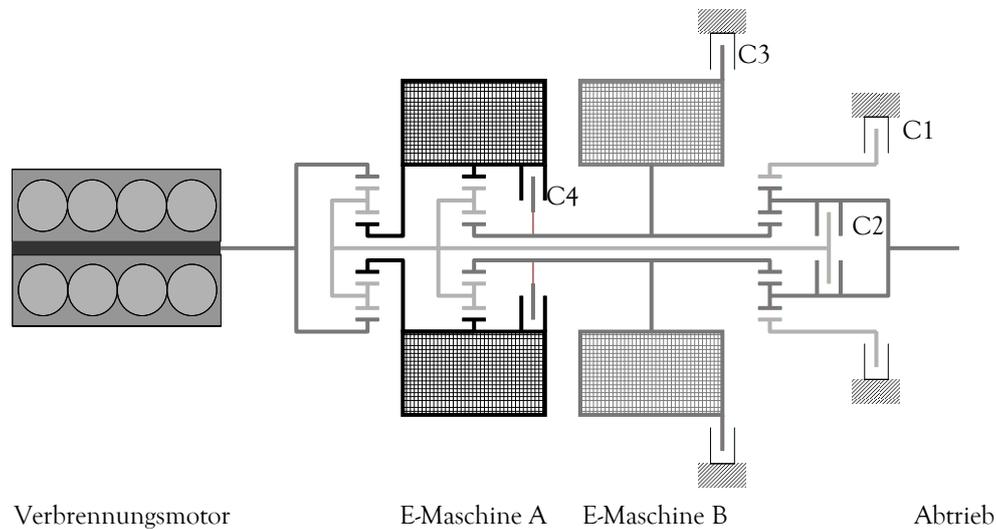


Abbildung 2.6: Aufbau des Getriebes

Dargestellt sind die drei Planetensätze, die Verbrennungsmotor, E-Maschine A ( $EM_A$ ) und B ( $EM_B$ ) und die Abtriebswelle miteinander verknüpfen. Geschaltet wird das Getriebe über die Kupplungen  $C_2$  und  $C_4$  sowie die Bremsen  $C_1$  und  $C_3$ .

Ein Planetenradsatz besitzt bei korrekter Lagerung der Wellen zwei Freiheitsgrade [64]: Sind zwei Drehzahlen festgelegt, zum Beispiel die von Steg und Sonne, ist auch die dritte definiert, im Beispiel die des Hohlrades. Die drei Planetenradstufen des vorliegenden Getriebes verfügen also über sechs Freiheitsgrade. Drei davon sind konstruktiv festgelegt: Die Stege der ersten und zweiten Stufe sind miteinander verbunden (gelb), genauso die Sonnen der zweiten und dritten Stufe (rot) sowie die Sonne der ersten Stufe und das Hohlrad der zweiten (blau). Damit gilt:

$$\omega_{Steg,1} = \omega_{Steg,2} \quad (2.6)$$

$$\omega_{Sonne,2} = \omega_{Sonne,3} \quad (2.7)$$

$$\omega_{Sonne,1} = \omega_{Hohlrad,2} \quad (2.8)$$

Bei gegebener Getriebeabtriebsdrehzahl  $\omega_o$  müssen noch zwei weitere Freiheitsgrade aufgehoben werden, um die Getriebeeingangs- bzw. Verbrennungsmotordrehzahl eindeutig festzulegen. Eine Möglichkeit besteht darin, zwei Kupplungen zu schließen. Dann ergibt sich ein festes Übersetzungsverhältnis, analog einem Gang in einem Automatikgetriebe. Wird nur eine Kupplung geschlossen, kann die Motordrehzahl stufenlos über die Dreh-

## 2 Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells

zahlen der E-Maschinen eingestellt werden. Dieser Getriebemodus wird eCVT-Modus genannt (*electrically continuously variable transmission*).

Eine Anfahrkupplung oder ein hydromechanischer Wandler sind in dem Getriebe nicht notwendig, da alle Anfahr- oder Schaltvorgänge über die eCVT-Modi abgedeckt sind. Tabelle 2.1 zeigt alle funktionalen Kupplungsstellungen. Es lassen sich vier feste Gänge und zwei eCVT-Modi einstellen.

| Betriebszustand \ Kupplungen | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| eCVT-1                       | x     |       |       |       |
| eCVT-2                       |       | x     |       |       |
| 1.Gang                       | x     |       |       | x     |
| 2.Gang                       | x     | x     |       |       |
| 3.Gang                       |       | x     |       | x     |
| 4.Gang                       |       | x     | x     |       |
| neutral                      |       |       |       |       |
| Parkstellung                 | x     |       | x     |       |

Tabelle 2.1: Kupplungseinsatz in den verschiedenen Gängen und eCVT-Modi

Bei den Kupplungen handelt es sich um Lamellenkupplungen mit mehreren in Reihe angeordneten Reibbelägen. Diese Art von Kupplungen sind unter Last schaltbar. Die Vorteile gegenüber Trockenkupplungen liegen in der höheren Leistungs- und Energieaufnahme, da hier mit Öl gekühlt wird. Die Nachteile sind niedrigere Reibwerte und ein höheres Schleppmoment im geöffneten Zustand.

Die Funktionsweise des Getriebes veranschaulicht Abbildung 2.7. Sie stellt die Drehzahlen des Verbrennungsmotors und der E-Maschinen bei verschiedenen Abtriebsdrehzahlen dar. Die Motordrehzahl ist in dem Beispiel der Einfachheit halber konstant.

## 2 Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells

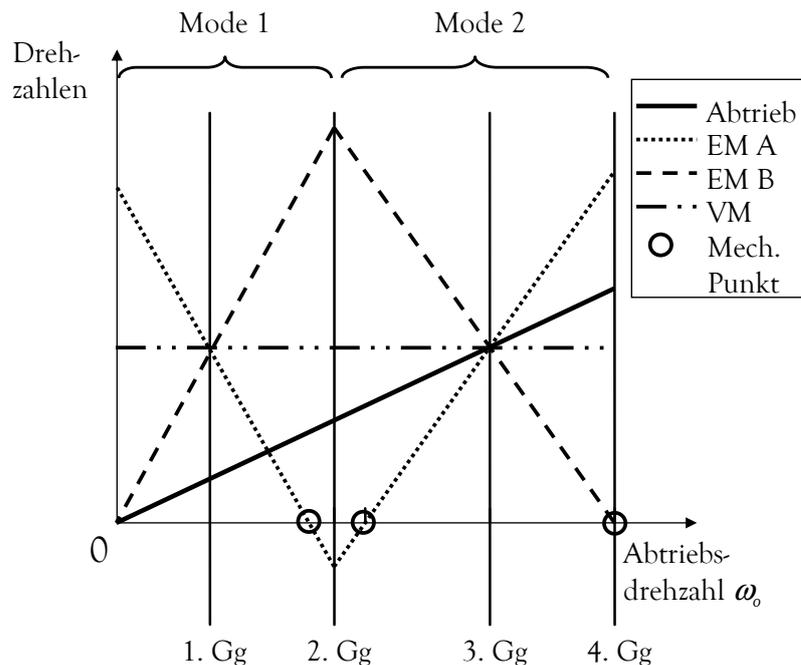


Abbildung 2.7: Drehzahlverlauf

Niedrige Geschwindigkeiten werden im eCVT-Mode 1 dargestellt. Mit steigender Abtriebsdrehzahl erhöht sich in diesem Modus die Drehzahl der E-Maschine B. Beim Erreichen des Übersetzungsverhältnisses des zweiten Ganges kann in den eCVT-Modus 2 umgeschaltet werden, in dem sich mit steigender Abtriebsdrehzahl die Drehzahl von Maschine B wieder reduziert. Der Vorteil der zwei eCVT-Modi liegt also in den verringerten Anforderungen an Minimal- und Maximaldrehzahlen der E-Maschinen [22].

In den durch senkrechte Linien markierten Übersetzungsverhältnissen der festen Gänge kann durch Schließen der entsprechenden Kupplung (vgl. Tabelle 2.1) in einen festen Gang gewechselt werden. Weiterhin interessant sind die so genannten *mechanischen Punkte*, die in Abbildung 2.7 durch Kreise gekennzeichnet sind. An diesen Punkten steht eine der E-Maschinen still und kann daher keine mechanische Leistung übertragen. Der Energiefluss durch das Getriebe erfolgt dann rein mechanisch.

### 2.3.2 Getriebegleichungen

Eine Methode zur Herleitung der kinematischen und dynamischen Getriebegleichungen zeigt [47]. Basis dafür ist die vereinfachende Darstellung des Getriebes als Waagbalkenmodell [5], siehe 2.8. Dieser Abschnitt stellt die Ergebnisse der Analyse in allgemeingültiger Form dar. Dies ist für das Verständnis der Kernfunktionen der Betriebsstrategie ausreichend. Die detaillierten Lösungen finden sich im Anhang A.

## 2 Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells

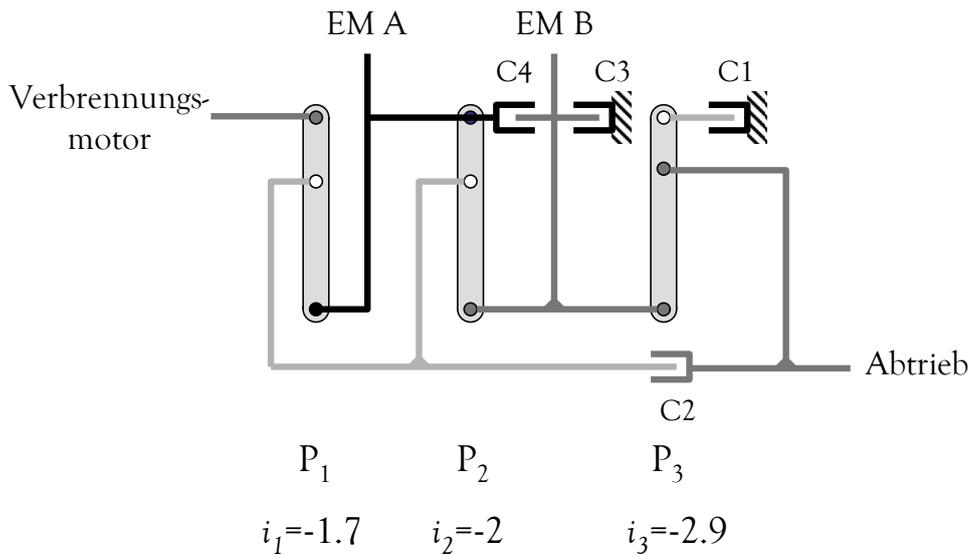


Abbildung 2.8: Waagebalkenmodell des Getriebes

### Kinematik

In den festen Gängen lassen sich die Drehzahlen von E-Maschinen und Verbrennungsmotor abhängig von der Getriebeausgangsdrehzahl bestimmen. Für den Gang  $n$  gilt mit den Übersetzungsverhältnissen  $i$ :

$$\begin{bmatrix} \omega_{a,n} \\ \omega_{b,n} \\ \omega_{i,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ao,n} \\ i_{bo,n} \\ i_{io,n} \end{bmatrix} \cdot \omega_o \quad (2.9)$$

Die eCVT-Modi erlauben bei gegebener Getriebeausgangsdrehzahl eine freie Wahl der Drehzahl des Verbrennungsmotors. Für den Modus  $m$  gilt:

$$\begin{bmatrix} \omega_{a,m} \\ \omega_{b,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ao,m} & i_{ai,m} \\ i_{bo,m} & i_{bi,m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_o \\ \omega_i \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

### Kinetik

In den festen Gängen gibt es keine Zwangsbedingungen, die die Momente der beiden E-Maschinen aneinander koppeln. Die Aufteilung der Antriebs- bzw. Rekuperationsmomente auf die beiden E-Maschinen kann die Betriebsstrategie frei festlegen. Ausgenommen ist Gang vier, in dem E-Maschine B durch eine Bremse festgestellt ist. Die Gleichungen lassen sich für den Gang  $n$  in folgende Form bringen:

## 2 Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells

$$M_{o,n} = \begin{bmatrix} u_{oi,n} & u_{oa,n} & u_{ob,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_i \\ M_a \\ M_b \end{bmatrix} - \theta_{o,n} \dot{\omega}_o \quad (2.11)$$

$\theta_{o,n}$  fasst die auf die Abtriebswelle reduzierten Trägheiten der Getriebebauteile in Schaltstellung  $n$  zusammen. Eine Berechnung der E-Maschinenmomente abhängig von  $M_i$  und  $M_o$  ist mit Gleichung 2.11 nicht möglich. Die fehlenden Zusammenhänge werden im Folgenden abgeleitet. Ziel bei der Aufteilung der Momente zwischen den E-Maschinen A und B in den ersten drei festen Gängen muss die Minimierung der Verlustenergie sein. Die Grundidee liegt also darin, die notwendige mechanische Leistung so auf die beiden E-Maschinen zu verteilen, dass die kumulierten E-Maschinenverluste einen minimalen Wert annehmen. Die Berechnung eines einfachen Verteilungsgesetzes wird anhand des ersten Ganges erläutert und lässt sich auf den zweiten und dritten übertragen.

Für die mechanische Leistung der beiden E-Maschinen gilt:

$$P_{mech} = \omega_a \cdot M_a + \omega_b \cdot M_b \quad (2.12)$$

Mit Gleichung 2.11 werden für eine ausreichende Anzahl von möglichen Abtriebsdrehzahlen  $\omega_o$  (70 Stützstellen) des ersten Ganges die resultierenden E-Maschinendrehzahlen berechnet. Aus den Momentenkennfeldern lassen sich die jeweils gültigen minimalen und maximalen Momente ermitteln. Für die Bestimmung der möglichen Leistungsaufteilung bei einer mechanischen Gesamtleistung  $P_{mech}$  der E-Maschinen gelten folgende Annahmen:

- $P_{mech}$  ist positiv, in Summe arbeiten die E-Maschinen motorisch. So wird nur ein Teil des symmetrischen Problems betrachtet.
- beide Maschinen arbeiten motorisch; eine generatorisch arbeitende E-Maschine würde nur zusätzliche Verlustleistungen erzeugen und kann so keinen energieoptimalen Punkt darstellen.

Mit diesen beiden Einschränkungen wird für den Elektromotor A für jede Drehzahl ein Bereich möglicher Momente bestimmt, mit denen insgesamt die gegebene mechanische Leistung erreichbar ist.

Die Momente von Maschine B erhält man aus Gleichung 2.12. Für jede Drehzahl wird nun eine energieoptimale Verteilung berechnet, siehe Abbildung 2.9. Die Graphik zeigt, welchen Anteil von  $P_{mech}$  E-Maschine A abhängig von ihrer Drehzahl übernehmen muss, um minimale Verluste zu erreichen. Man sieht, dass Maschine A im ersten Gang bei kleinen Drehzahlen im Mittel ca. 50 % der Gesamtleistung aufnehmen sollte. Dieses Ergebnis ist plausibel, da bei dieser Getriebeübersetzung beide Maschinen dieselbe Drehzahl aufweisen. Die starke Streuung bei höheren Drehzahlen ergibt sich dadurch, dass in diesen Betriebspunkten mehrere Aufteilungsmöglichkeiten bestehen, welche annähernd identische Verlustleistungen ergeben.

## 2 Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells

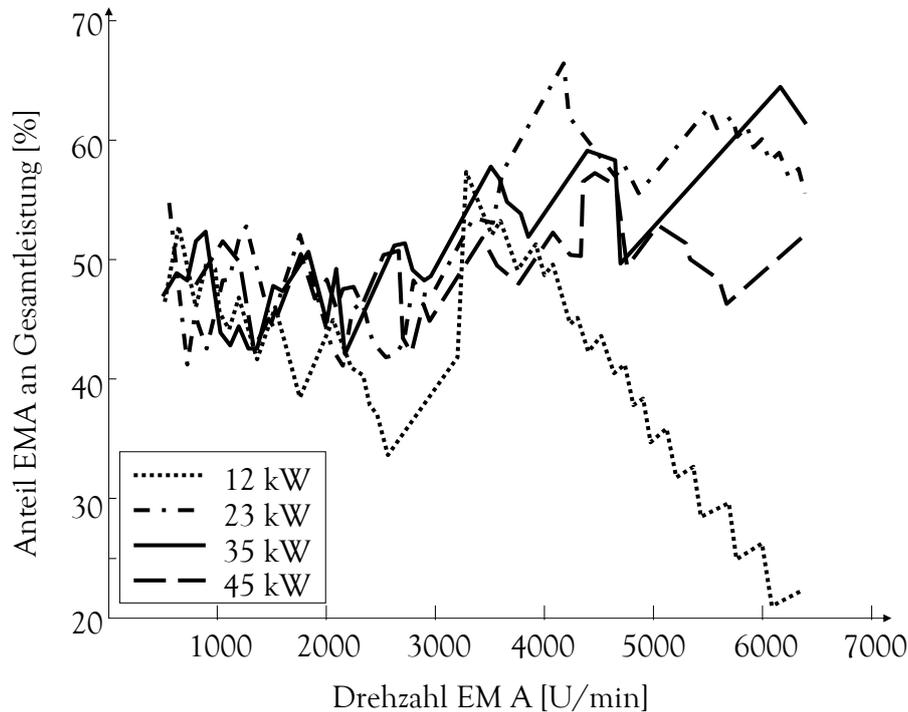


Abbildung 2.9: Wirkungsgradoptimaler Anteil von E-Maschine A an Gesamtleistung im ersten Gang unter Beachtung der maximalen Momentengrenzen

Eine Fehleranalyse zeigt, dass bei einer festen Aufteilung der Leistung auf die beiden E-Maschinen die Verluste um maximal nur 3 % gegenüber dem Optimum ansteigen. Aufgrund dieser kleinen Abweichung wird für den ersten festen Gang festgelegt:

$$\omega_a \cdot M_a = \omega_b \cdot M_b \quad (2.13)$$

Mit entsprechenden Überlegungen wird die optimale Leistungsaufteilung für die anderen festen Gänge berechnet. Für Gang 3 gilt ebenfalls Formel 2.13. Für Gang 2 ergibt sich:

$$\omega_a \cdot M_a = \frac{1}{9} \cdot \omega_b \cdot M_b \quad (2.14)$$

Für Gang 4, in dem E-Maschine B festgebremst ist, folgt die triviale Gleichung:

$$M_b = 0; \quad (2.15)$$

Setzt man diese Ergebnisse in Gleichung 2.11 ein, lassen sich für jeden festen Gang  $n$  die Momente der E-Maschinen errechnen:

$$M_a, M_b = f(n, M_i, M_o, \omega_o); \quad (2.16)$$

## 2 Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells

Die eCVT-Modi bieten keinen Freiheitsgrad bei der Verteilung der E-Maschinenmomente. Es lassen sich folgende Momentenbeziehungen für den eCVT-Modus  $m$  ableiten:

$$\begin{bmatrix} M_{a,m} \\ M_{b,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{ai,m} & u_{ao,m} \\ u_{bi,m} & u_{bo,m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_i \\ M_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \theta_{ai,m} & \theta_{ao,m} \\ \theta_{bi,m} & \theta_{bo,m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_i \\ \dot{\omega}_o \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

### 2.3.3 Modellierung des Getriebes

Das Getriebe ist größtenteils physikalisch abgebildet und besteht aus einem mechanischen und einem thermischen Untermodell:

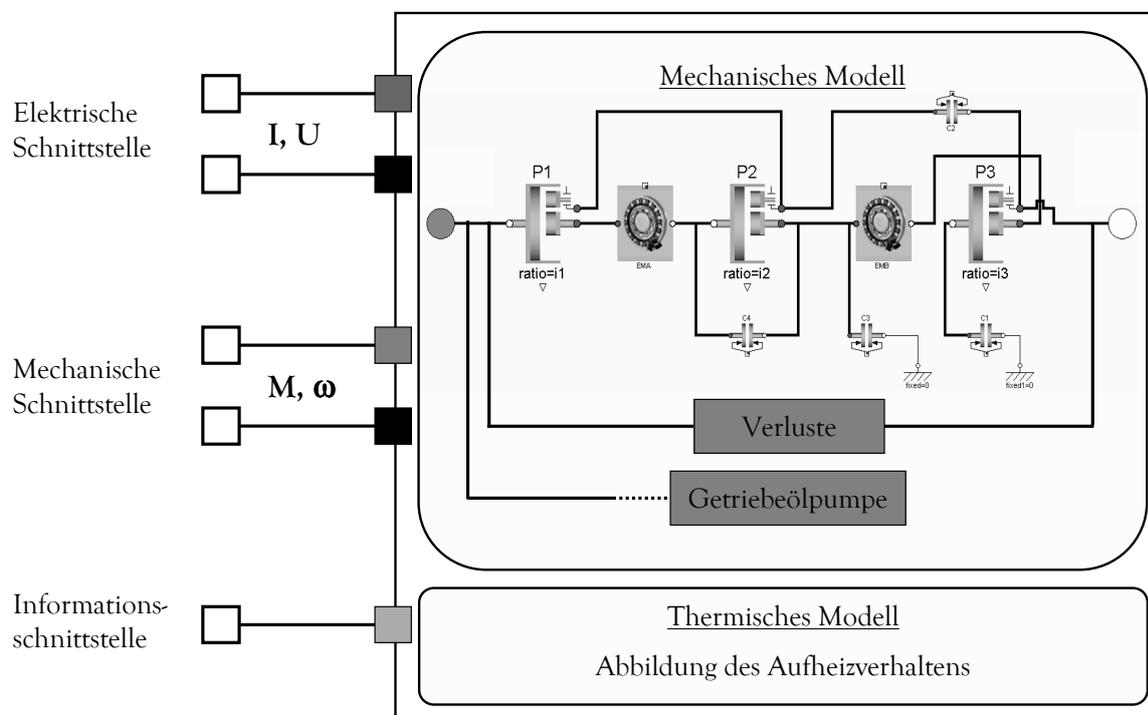


Abbildung 2.10: Aufbau des Getriebemodells

Im mechanischen Modell ist das Getriebe physikalisch modelliert durch die im vorangehenden Abschnitt beschriebenen idealen, d.h. verlustfreien Gleichungen. Die Simulationssprache *Modelica* erlaubt es, die Gleichungen direkt in der dargestellten Form zu übernehmen; das Auflösen nach den jeweils gesuchten Größen übernimmt der Algorithmus des Simulationsprogramms, der das Differentialgleichungssystem löst. Bedatungen für Trägheiten und Übersetzungen werden aus dem abgebildeten Fahrzeug übernommen. In Messungen ermittelte Verlustleistungen des Getriebes, die von Last, Drehzahl und Gang abhängen, werden als Bremsmoment am Getriebeausgang eingebracht. Die Leerlaufverlustleistung umfasst Ölplansch-, Dichtungs- und Synchronisierungsverluste [52]. Zusätz-

## 2 Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells

lich beinhalten sie im verbrennungsmotorischen Betrieb die erforderliche Antriebsleistung der Getriebeölpumpe. In elektrischen Fahrphasen wird die Antriebsleistung der Getriebeölpumpe dem Hochvoltbordnetz entzogen. Die lastunabhängigen Verluste sind in den festen Gängen abhängig von Öltemperatur, Öldruck und Getriebeeingangsdrehzahl; im eCVT-Betrieb stellt die Getriebeausgangsdrehzahl einen weiteren Einflussfaktor dar. Dementsprechend sind im Modell drei- bzw. vierdimensionale Kennfelder implementiert.

Wird das Getriebe mit einem Moment beaufschlagt, fallen zusätzlich lastabhängige Verluste an. Diese untergliedern sich in Zahnreibungs- und Lagerverluste und sind lediglich abhängig vom eingelegten Gang bzw. eCVT-Mode. Ein Sonderfall stellt der dritte feste Gang dar: im direkten Gang läuft das Getriebe als Block um. Es fallen keine lastabhängigen Verluste an.

Das hydraulische System ist auf eine festgelegte Dynamik reduziert, mit der die Kupplungen geschlossen werden. Die Leistungen der Getriebeölpumpe werden ebenfalls aus gemessenen Kennfeldern eingelesen und je nach Betriebsart der antreibenden Quelle entnommen: Im rein elektrischen Betrieb dem elektrischen Bordnetz, im verbrennungsmotorischen Betrieb als zusätzliches Lastmoment dem Verbrennungsmotor. Im Block Getriebeölpumpe erfolgt schwerpunktmäßig die Berechnung des Getriebeöldrucks. Der von der Getriebeölpumpe aufzubringende Öldruck  $p_{perf}$  berechnet sich nach Formel 2.18 so, dass die entsprechenden Kupplungen den erforderlichen Kraftfluss gewährleisten. Die relevanten Größen sind Sicherheitsfaktor ( $F_{Sicherheit}$ ), Druck, der für die Rückstellfeder überwunden werden muss ( $p_{Rückstellfeder, x}$ ), Moment, das in der Kupplung  $x$  übertragen werden soll ( $M_{Kupplung, x}$ ), Reibwert ( $\lambda_{Reib}$ ), Oberfläche der Kupplung ( $A_{Kupplung, x}$ ), mittlerer Radius ( $r_{mittel, x}$ ) und die Anzahl der Oberflächen ( $z_{Oberflächen, x}$ ).

$$p_{perf} = F_{Sicherheit} \cdot p_{Rückstellfeder, x} + \frac{M_{Kupplung, x}}{\lambda_{Reib} \cdot A_{Kupplung, x} \cdot r_{mittel, x} \cdot z_{Oberflächen, x}} \quad (2.18)$$

Beim Schließen der Kupplung  $x$  muss zunächst der Druck der Rückstellfeder überwunden werden. Zusätzlich muss die Getriebeölpumpe genügend Druck aufbringen, um die Momente an den Kupplungen sicher übertragen zu können. Müssen zwei Kupplungen geschlossen werden, ist diejenige ausschlaggebend, die den höchsten Öldruck erfordert.

Das thermische Modell ist als Verhaltensmodell aufgebaut. Das Aufheizverhalten des Getriebes ist in Kennfeldern hinterlegt.

### 2.3.4 Validierung

Für die Validierung wurde das Getriebemodell aus dem Gesamtfahrzeugmodell entkoppelt und separat in einer Simulationsumgebung getestet. Der Vergleich zwischen Komponentenverhalten und Simulationsmodell erfolgt schrittweise: Zunächst ist zu überprüfen, ob die Simulation die Bestimmung des Getriebeöldrucks ausreichend genau abbildet.

## 2 Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells

Dieser beeinflusst die Getriebeverluste und damit das Getriebeverhalten maßgeblich. Im Anschluss folgt die Validierung des Modells für feste Gänge, für die beiden eCVT-Modi und für elektrisches Fahren.

Die für die Validierung verwendeten Messungen stammen von einem Getriebeprüfstand. Der Getriebeausgang ist mit einem Dynamometer verbunden, das den Fahrwiderstand simuliert und das Getriebeausgangsmoment und die zugehörige Drehzahl genau bestimmt. Um alle verbrauchsrelevanten Drehzahlbereiche abzudecken, wurde in den Messungen die Drehzahl des Verbrennungsmotors jeweils von ca. 1000 bis auf 3000 *upm* angehoben. Zudem variieren in den verwendeten Messungen Getriebeöldruck, Öltemperatur und das Lastprofil. Damit erfüllen sie alle Kriterien für eine umfangreiche Validierung des Getriebes.

### Validierung Getriebeöldruck

Die Prüfstandmessung ergibt den in Abbildung 2.11 rot gezeichneten Verlauf. Bei Parametrierung des Modells mit den Daten des derzeitigen Entwicklungsstandes ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung (blaue Kurve).

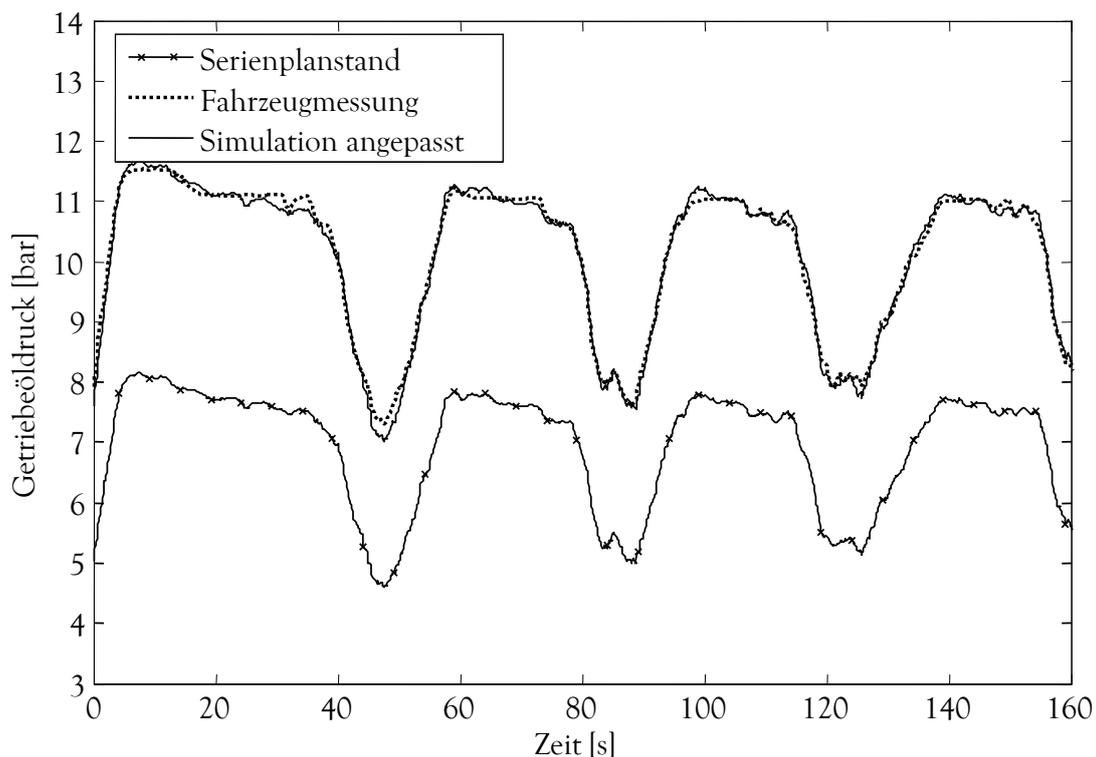


Abbildung 2.11: Verlauf des Getriebeöldrucks für ein dynamisches Lastprofil im 3. festen Gang

## 2 Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells

Während elektrischer Fahrphasen ist die Getriebeölpumpe über einen Freilauf vom mechanischen Antrieb abgekoppelt und liefert im elektrischen Betrieb konstant 4,5 bar. Dies ist in der Simulation ebenfalls korrekt berücksichtigt.

### Validierung feste Gänge

Bei der Validierung eines festen Ganges muss eine Drehzahl festgelegt sein. Da die Getriebeausgangsdrehzahl durch das Dynamometer am genauesten messbar ist, wurde diese Drehzahl aus der Fahrzeugmessung vorgegeben. Zudem müssen dem Getriebemodell gemäß Formel 2.11 drei Momente vorgegeben werden: In der Testumgebung sind das Getriebeausgangsmoment und die Momente der beiden E-Maschinen aus der Prüfstandsmessung vorgegeben. Damit sich diese drei Momente einstellen und die Getriebeverluste überwunden werden, ist je nach Betriebspunkt ein bestimmtes Getriebeeingangsmoment nötig. Aus dem Vergleich zwischen dem in der Simulation erforderlichen und dem am Prüfstand gemessenen Getriebeeingangsmoment können Rückschlüsse auf die Qualität des Getriebemodells und die Abbildung der Getriebeverluste abgeleitet werden.

Abbildung 2.12 zeigt die Ergebnisse. Stellvertretend für die festen Gänge ist in der Abbildung die Analyse für den dritten festen Gang dargestellt. In Teilbild 3 ist zu erkennen, dass das Getriebeeingangsmoment in Simulation und Messung sehr gut übereinstimmen. Absolut gesehen sind die Abweichungen maximal 10 Nm. Interessant ist die Betrachtung der relativen Verluste bezogen auf die motorische Eingangsleistung des Getriebes. Da die E-Maschinen in allen Messungen für die festen Gänge generatorisch tätig waren, reduziert sich die motorische Eingangsleistung auf die Leistung am Getriebeeingang:

$$\text{relativeAbweichung} = \frac{M_{i,\text{Messung}} \cdot \omega_{i,\text{Messung}} - \omega_{i,\text{Simulation}} \cdot M_{i,\text{Simulation}}}{M_{i,\text{Messung}} \cdot \omega_{i,\text{Messung}}} \cdot 100\% \quad (2.19)$$

Die relativen Abweichungen sind zum Großteil im Bereich von  $\pm 2\%$ , insbesondere in stationären Phasen. Größere Diskrepanzen sind nur bei Sprüngen im Lastprofil zu erkennen. Diese Abweichungen können sowohl auf eine ungenaue Abbildung der Trägheiten von Getriebe und Dynamometer im Simulationsmodell als auch auf ein zeitliches Offset in der Aufnahme des Messsignals zurückgeführt werden.

Für den ersten, zweiten und vierten festen Gang ergeben sich ähnliche Ergebnisse.

## 2 Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells

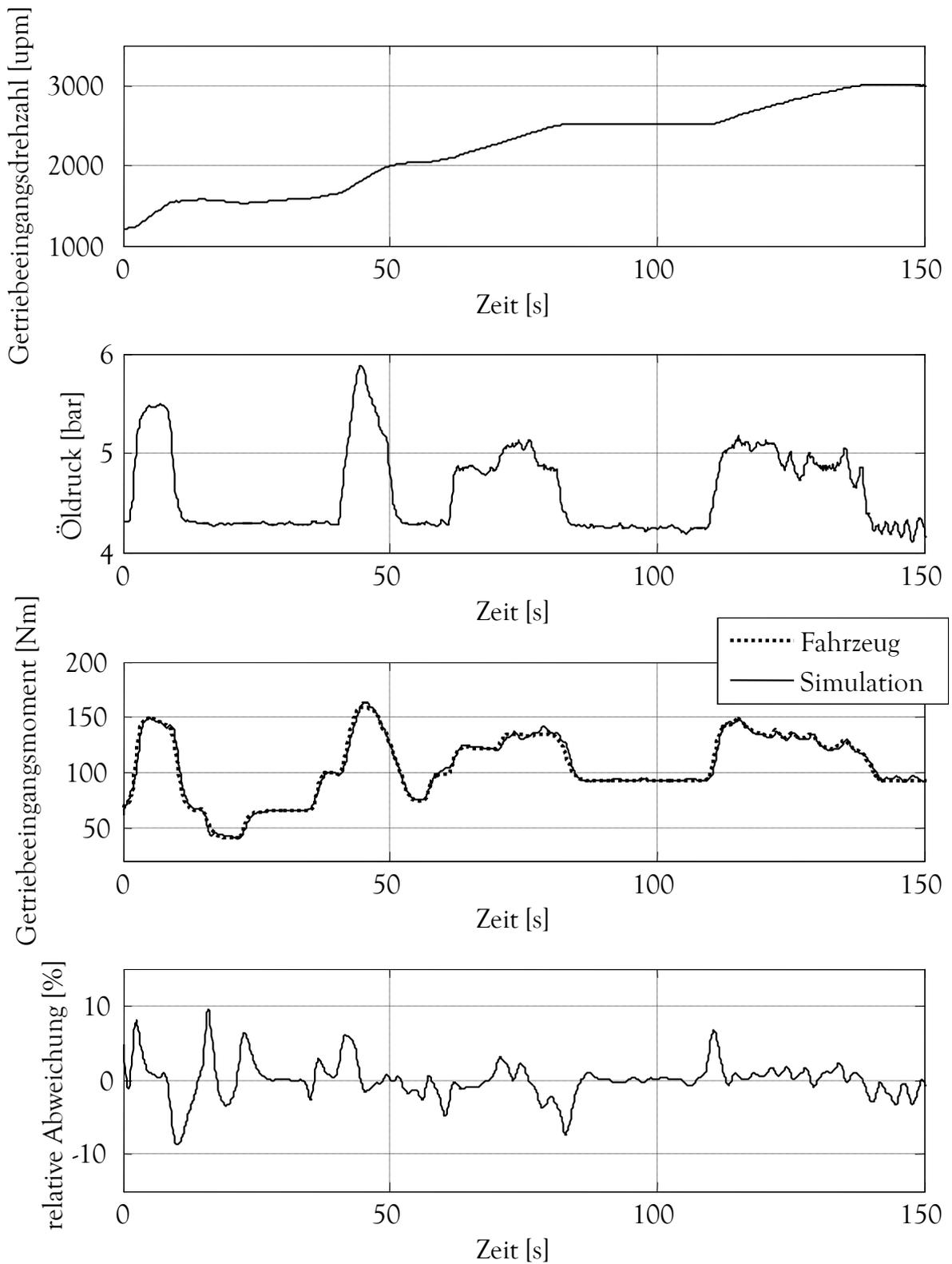


Abbildung 2.12: Validierungsergebnis für den dritten festen Gang

### Validierung eCVT Betrieb

Bei der Validierung des eCVT-Betriebes muss dem Getriebemodell neben der Getriebeausgangsdrehzahl eine weitere Drehzahl vorgegeben werden. In der verwendeten Simulationsumgebung wurde hierfür die Getriebeeingangsdrehzahl gewählt. Des Weiteren müssen gemäß Formel 2.17 zwei Momente festgelegt werden, damit das System nicht unterbestimmt ist. Wie in den festen Gängen, ist hierbei das Getriebeausgangsmoment aufgrund der Messgenauigkeit geeignet. Zudem wird das Modell mit dem Moment der E-Maschine B gespeist. Dies hat folgenden Grund:

Die Validierung der Getriebeverluste erschwert sich im Gegensatz zu den festen Gängen; infolge der gegebenen Drehzahl- und Momentenbelastung stellen sich nun zwei Momente ein: das am Getriebeeingang und an der E-Maschine A. Da ein Vergleich von jeweils zwei Momenten keine sinnvollen Rückschlüsse zulässt, ist es zweckmäßig, Leistungen zu analysieren. Für die Untersuchungen wurde die motorische Eingangsleistung des Getriebes gewählt. Die Leistung der E-Maschine A ist für die durchgeführten Prüfstandsmessungen im eCVT2-Modus stets positiv, d.h. sie unterstützt den Verbrennungsmotor motorisch; die E-Maschine B ist generatorisch tätig. Die Summenleistungen am Getriebeeingang und der E-Maschine A stellen somit die gesamte motorische Eingangsleistung dar.

Abbildung 2.13 zeigt am Beispiel des eCVT-Modus 2 das Ergebnis der Validierung. Der Vergleich der Eingangsleistung zeigt eine gute Korrelation zwischen Simulation und Messung. Dies wird auch an der geringen relativen Abweichung der beiden Leistungskurven im dritten Teilbild ersichtlich. Vor allem im stationären Bereich sind die Abweichungen klein. In dynamischen Phasen stellen sich etwas größere Abweichungen ein, die mit unter 5 % aber dennoch vertretbar sind. Grund für diese Abweichungen sind u.a. Messungenauigkeiten.

## 2 Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells

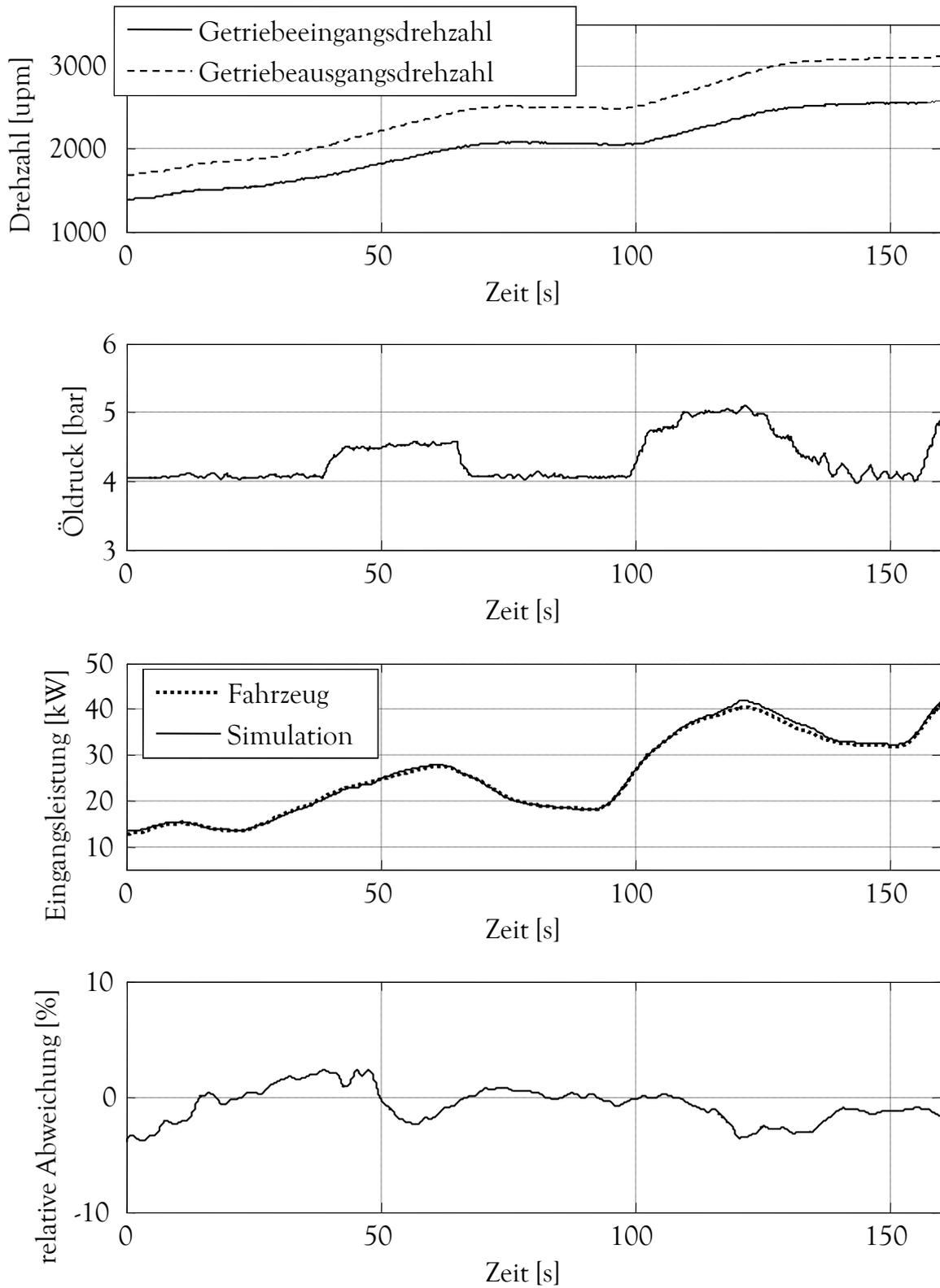


Abbildung 2.13: Validierungsergebnis für den dritten virtuellen Gang

### Validierung elektrisches Fahren

Während elektrischer Fahrphasen ist im Getriebe der eCVT-Modus 1 eingelegt. Die E-Maschine A stellt wie der Verbrennungsmotor kein Moment und dient lediglich dazu, die Verbrennungsmotordrehzahl auf Null zu regeln. Der Fahrzeugantrieb erfolgt ausschließlich über die E-Maschine B. Für die Getriebevalidierung kann die Konfiguration der Simulationsumgebung für den eCVT-Modus 1 übernommen werden, mit dem Unterschied, dass das Getriebe Modell mit dem Moment der E-Maschine A gespeist wird. Am Getriebeein- und -ausgang wird weiterhin die jeweilige Drehzahl vorgegeben. Der Vergleich zwischen Prüfstandsmessung und Simulationsergebnis reduziert sich somit auf die Überprüfung der E-Maschinendrehzahlen und des Moments der E-Maschine B, das sich in Folge der Drehzahl- und Momentenbelastung ergibt. Zu beachten ist, dass im Modell die lastunabhängigen Verluste während elektrischer Fahrphasen von der Getriebeausgangsdrehzahl abhängig sind. Die Verluste werden ausschließlich als Bremsmoment am Getriebeausgang eingebracht.

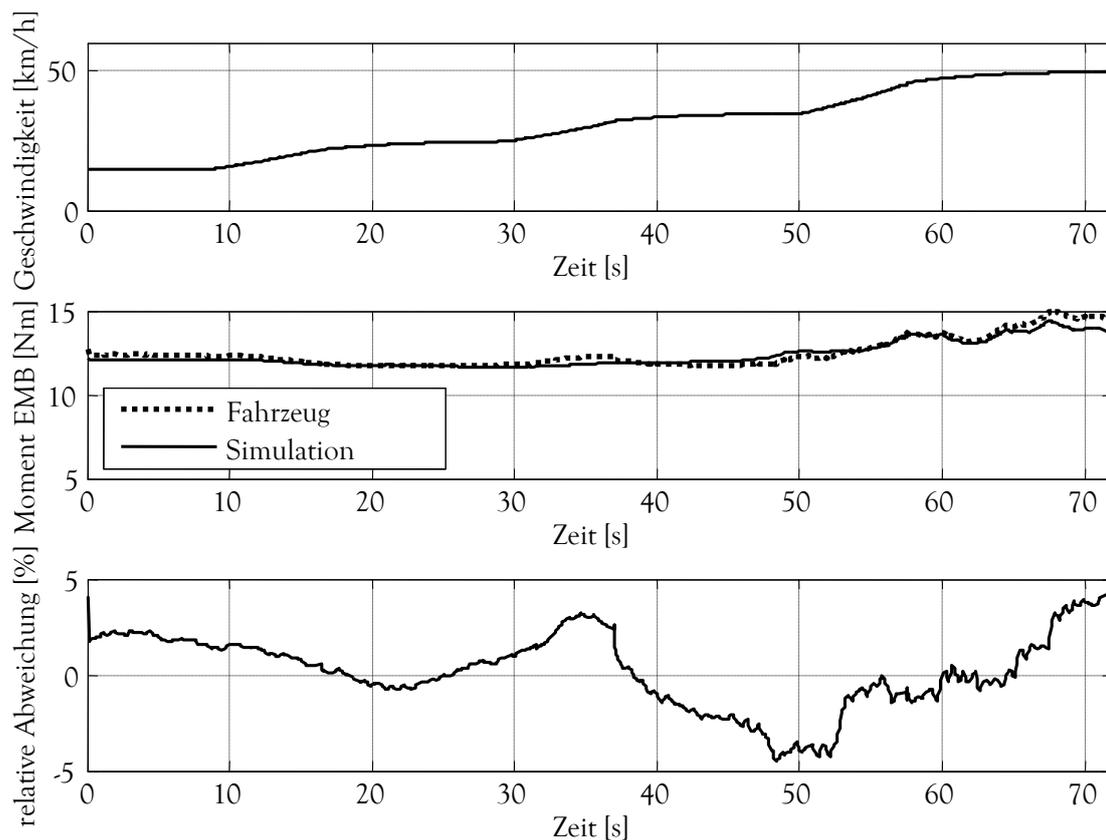


Abbildung 2.14: Validierungsergebnis für elektrisches Fahren

Die Prüfstandsmessung weist ein Geschwindigkeitsprofil auf, das bis zu einer Geschwin-

digkeit von  $50 \frac{km}{h}$  stufenweise ansteigt. Da im NEFZ der Fahrzeugvortrieb maximal bis zu dieser Geschwindigkeit elektrisch erfolgt, ist das Profil für die Validierung gut geeignet.

Die Drehzahlen stellen sich wie in den vorangegangenen Validierungen gemäß der Messung ein. Der Vergleich der E-Maschinenmomente ist Abbildung 2.14 zu entnehmen. Die Momente liegen in weiten Teilen eng aneinander. Der relative Fehler ist stets kleiner als 4 %. Da die Messgenauigkeit der E-Maschinenmomente bei niedrigen Lasten gering ist, stellt dies ein gutes Ergebnis dar. Die Getriebeverluste während elektrischer Fahrphasen sind somit ausreichend genau in der Simulation abgebildet.

## 2.4 Elektromotoren

### 2.4.1 Beschreibung der Elektromotoren

Bei den E-Maschinen handelt es sich um permanentmagneterregte Synchronmaschinen. Die Maschinen sind für Maximal- bzw. Minimaldrehzahlen von ungefähr  $\pm 13000$  upm ausgelegt. Die Leistungen sind abhängig von der Versorgungsspannung der Leistungselektronik und erreichen bei 300 V ca. 60 kW. In Abbildung 2.15 ist der für E-Maschinen typische Momentenverlauf für drei verschiedene Spannungen in Abhängigkeit der Drehzahl des Elektromotors A dargestellt.

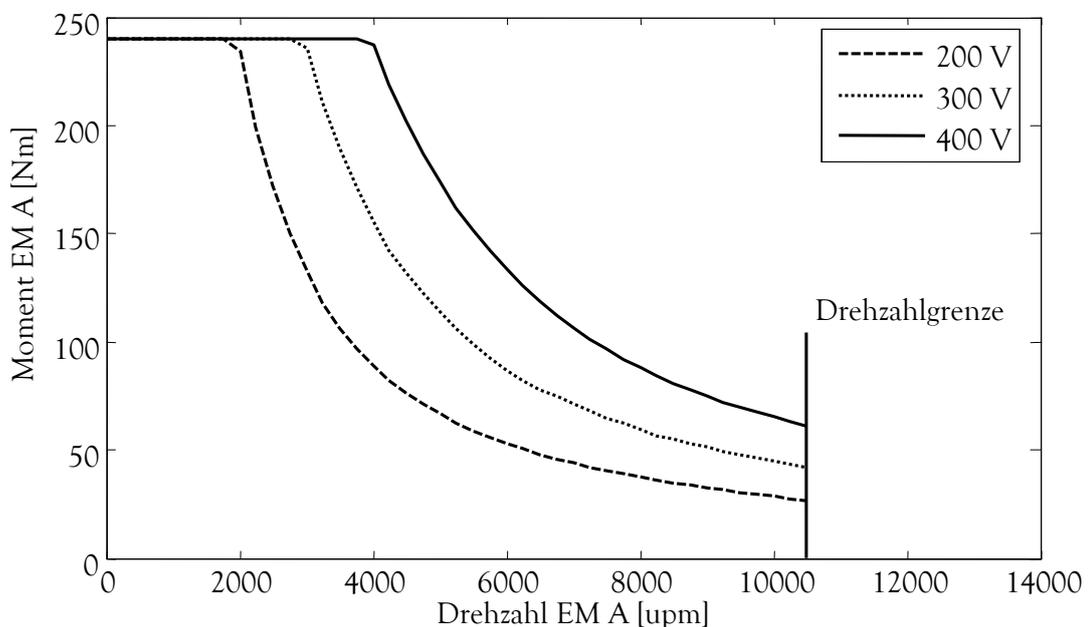


Abbildung 2.15: Momentenkennlinien der E-Maschine A

## 2 Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells

Die Drehmomentengrenzen sind im motorischen und generatorischen Betrieb ähnlich, aufgrund der Verlustleistungen liegen die generatorischen Maximalmomente höher. Die Wirkungsgrade typischer Betriebspunkte liegen bei über 90 %. Abbildung 2.16 zeigt einen der beiden generatorischen Quadranten des Wirkungsgradkennfeldes. Die übrigen Quadranten entstehen durch Spiegelung an Drehzahl- und Momentenachse. Die entstehenden Verluste werden als Wärme ans Getriebeöl abgegeben. Die Stator Kühlung erfolgt durch einen umlaufenden Kühlkreislauf und eine zusätzliche Sprühkühlung auf die Wickelköpfe der Statorwicklungen.

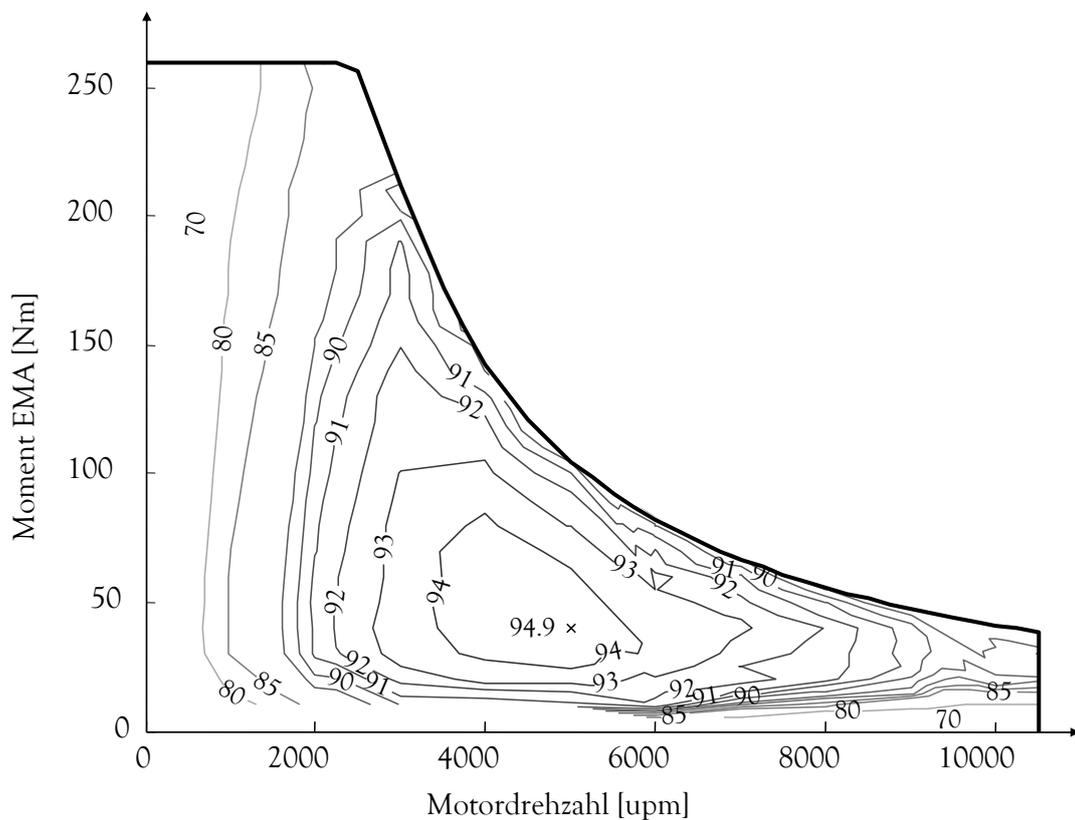


Abbildung 2.16: Wirkungsgradkennfeld der E-Maschine A bei 300V und 90°C

### 2.4.2 Modellierung der Elektromotoren

Ein mechanisches und ein elektrisches Untermodell bilden die E-Maschinen ab. Nach [62] ist für die Abbildung des elektrischen Verhaltens von E-Maschinen ein Wirkungsgradkennfeld ausreichend, um die für ein Gesamtfahrzeugmodell notwendige Genauigkeit zu erreichen.

## 2 Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells

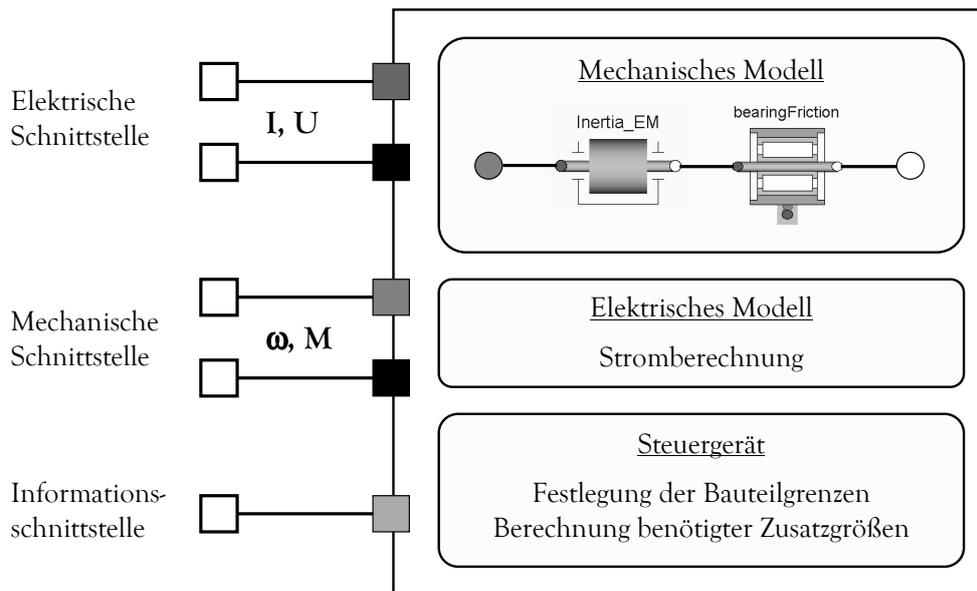


Abbildung 2.17: Aufbau des E-Maschinenmodells

Das mechanische Untermodell umfasst eine ideale Momentenquelle, die auf die zulässigen Maximalmomente begrenzt ist. Es berücksichtigt zudem die Trägheit des Rotors und Lagerverluste, die in Folge der Rotordrehung entstehen. Die Trägheit des Rotors ist jeweils für beide E-Maschinen aus deren Bauteilgeometrie berechnet; die Lagerverluste in Folge Coulomb'scher Reibung stammen aus Prüfstandmessungen.

Im zweiten Untermodell ist die elektrische Verlustleistung in Abhängigkeit von E-Maschinendrehzahl und -drehmoment in einem Kennfeld hinterlegt. Sie umfasst die Verluste der jeweiligen E-Maschine und der zugehörigen Leistungselektronik. Berücksichtigt sind Verluste an ohmschen Widerständen, magnetische Verluste und Hysterese- und Wirbelstromverluste [63]; die Verluste der Leistungselektronik beinhalten Durchlass- und Schaltverluste [71]. Die Charakteristik der elektrischen Verluste erlaubt eine präzise analytische Beschreibung. Sie entstehen in erster Linie in den elektrischen Leitungen und in zweiter Linie durch Wirbelströme in den magnetischen Leitern. Sie steigen bei gegebener Drehzahl quadratisch mit dem geforderten Moment bei nahezu konstanten Leerlaufverlusten [27]. Deshalb wurde für eine Approximation der Verlustleistungen folgender Ansatz verwendet.

$$P_{Verlust} = a_1(n) \cdot M^2 + a_2(n) \cdot M + a_3(n) \quad (2.20)$$

Die auftretenden Verluste an den Maschinen werden durch Polynome zweiten Grades angenähert, deren Koeffizienten  $a_1$ ,  $a_2$  und  $a_3$  abhängig von der Drehzahl  $n$  des Elektromotors sind. Diese werden durch eine quadratische Minimierung mit Hilfe der Verlustleistungskennfelder berechnet. In Abbildung 2.18 ist das Ergebnis dieser Minimierung exemplarisch für zwei verschiedene Drehzahlen des Elektromotors A dargestellt.

## 2 Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells

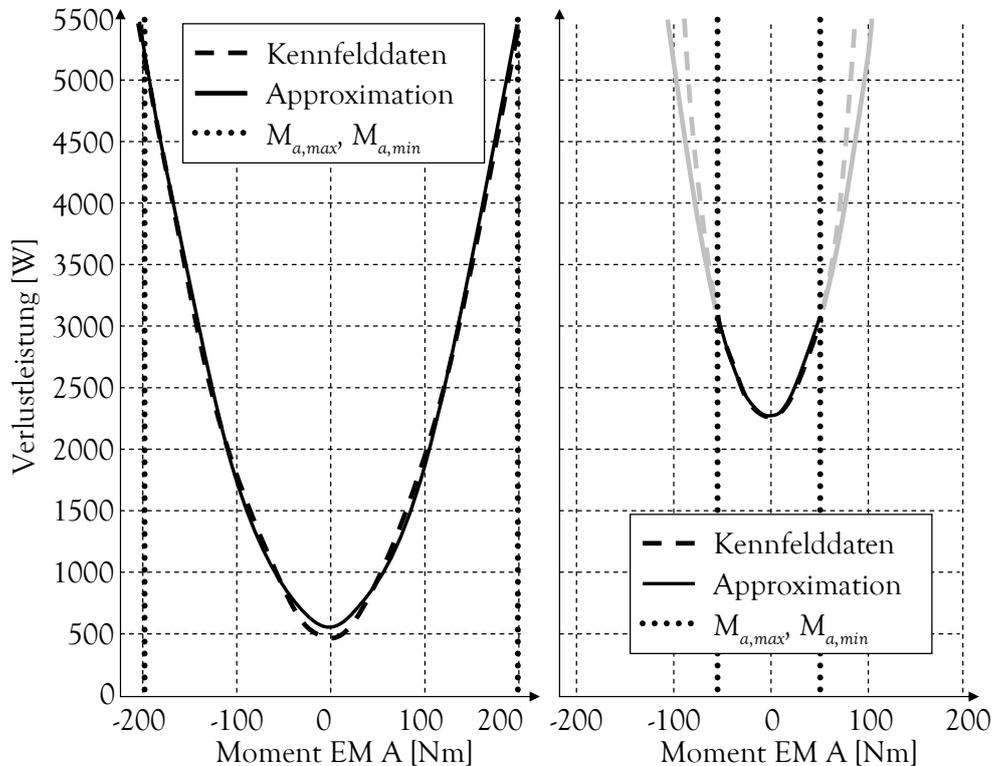


Abbildung 2.18: Approximation der Verlustleistung für  $\omega_a = 3000$  U/min (links) und  $\omega_a = 8000$  U/min (rechts)

Die schwarzen vertikalen Linien in Abbildung 2.18 grenzen dabei den gültigen Momentenbereich bei der aktuellen Drehzahl ein. In diesem Bereich wurde die Optimierung durchgeführt. Die approximierten Verluste stimmen im relevanten Bereich sehr genau mit den gemessenen Verlusten aus den Kennfeldern überein. Eine Fehleranalyse zeigte, dass die berechneten Verluste in den schlechtesten Punkten absolut gesehen nicht mehr als 100 Watt von den gemessenen abweichen. Die Verlustleistungen sind symmetrisch zum Nullpunkt. Das bedeutet, dass die Verluste sowohl im motorischen als auch im generatorischen Betrieb der E-Maschinen gleich groß sind. Die Koeffizienten des Polynoms in Gleichung 2.20 werden im Simulationsmodell drehzahlabhängig aus einer 1D-Tabelle ausgelesen.

### 2.4.3 Validierung

Für die Validierung wird die E-Maschine aus dem Gesamtfahrzeugmodell entkoppelt und in einer separaten Simulationsumgebung getestet. Zur Validierung des elektrischen Modells wird die mechanische Schnittstelle des Modells mit Drehzahl und Moment aus der Prüfstandsmessung beaufschlagt. An der elektrischen Schnittstelle wird die Betriebsspannung der E-Maschine aus der Messung vorgegeben. Die Analyse erfolgt an Hand eines dynamischen Messprofils, das hohe Lasten und Drehzahlen beinhaltet. Dies ermöglicht auch eine Validierung der implementierten zulässigen Maximalmomente. Die ersten beiden Teilbilder in Abbildung 2.19 zeigen die verwendeten Drehzahl- und Momentenprofile. Der Strom, der sich infolge der Drehzahl- und Momentenbeaufschlagung in Simulation und Messung einstellt, ist in Teilbild 3 dargestellt. Eine gute Übereinstimmung des Stromsignals bestätigt, dass die Verlustleistungen im Simulationsmodell ausreichend genau implementiert sind. Die hier vorgestellten Validierungsergebnisse sind am Beispiel der E-Maschine B dargestellt. Die Resultate sind auf E-Maschine A übertragbar.

## 2 Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells

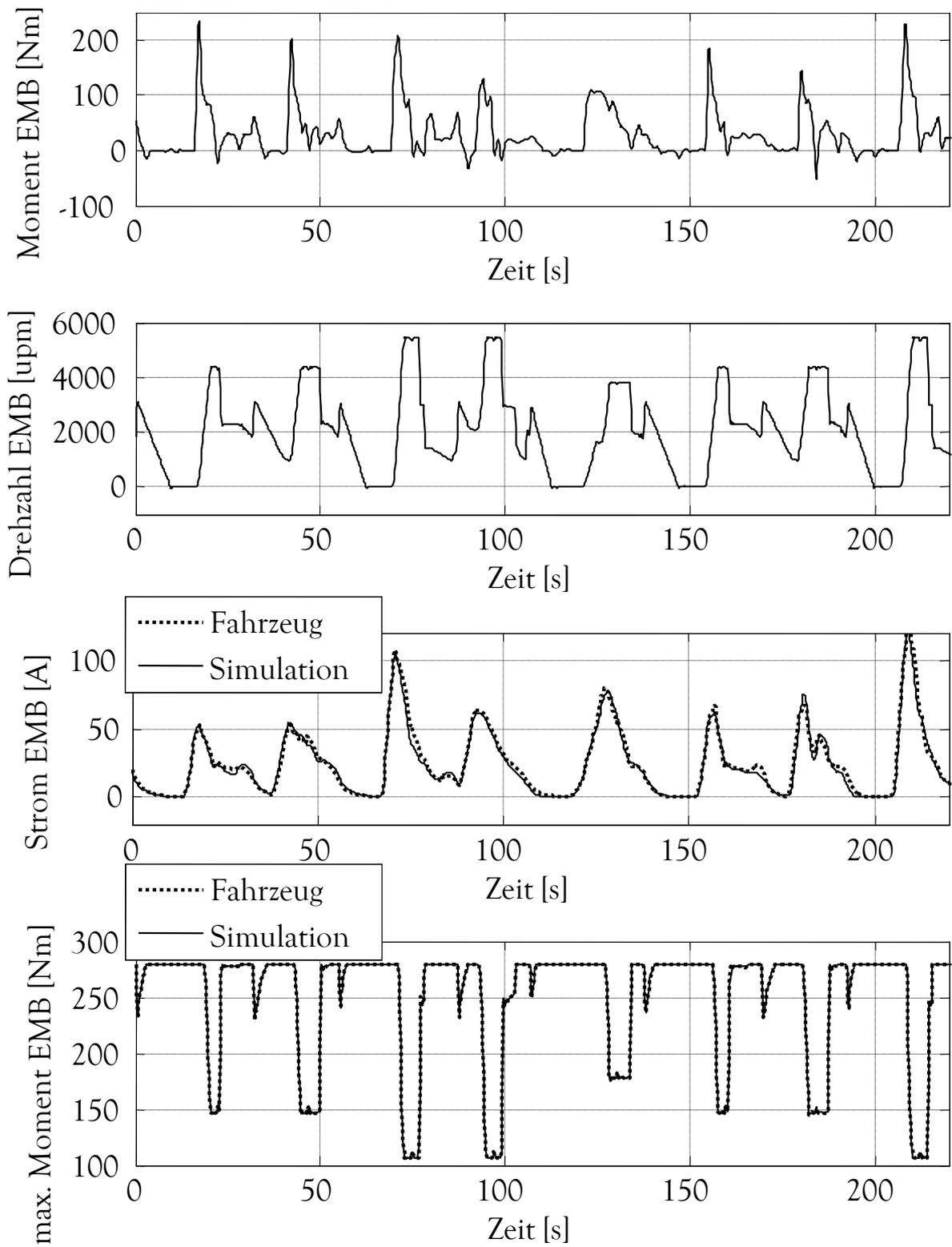


Abbildung 2.19: Validierungsergebnis E-Maschine B

## 2.5 Hochvoltspeicher

Eines der entscheidensten Bauteile des hybriden Antriebsstranges ist der elektrische Energiespeicher. Wie in Kapitel 1 dargestellt, sind für Hochvoltspeicher Nickel-Metallhydrid-Batterien Stand der Technik. Eine NiMH-Zelle besteht aus einer auf Nickelhydroxid basierenden positiven und einer auf einer Wasserstoffspeicherlegierung basierenden negativen Elektrode. Wasserstoff reagiert mit vielen im Periodensystem vorkommenden Elementen. Die dabei entstehenden Element-Wasserstoff-Verbindungen werden als Hydride bezeichnet und sind abhängig vom Ausgangselement ionisch, kovalent oder metallisch aufgebaut. Die allgemeine Reaktionsgleichung für die exotherme Hydridbildung lautet:



Der folgende Abschnitt beschreibt die Eigenschaften des Hochvoltspeichers, welche die Betriebsstrategie maßgeblich beeinflussen.

### 2.5.1 Beschreibung des Hochvoltspeichers

Die Batterie besteht aus mehreren in Serien geschalteten Einzelzellen. Tabelle 2.2 fasst die nominellen technischen Daten zusammen.

|  |  |
|--|--|
| Anzahl der Einzelzellen:                       | 260  |
| Nennspannung $U_0$ :                           | $325 \text{ V} \cong 1.25 \frac{\text{V}}{\text{Zelle}}$ |
| Kapazität $Q_0$ :                              | $8.5 \frac{\text{Ah}}{\text{Zelle}}$                     |
| Energieinhalt $E_{bat}$ :                      | 2.8 kWh  |
| max. Lade- /Entladeleistung $P_{batMax/Min}$ : | $\pm 57 \text{ kW}$                                      |
| Gesamtgewicht:                                 | ca. 85 kg  |
| Zyklisierbarkeit:                              | 1000 Normzyklen  |
| Optimaler Bereich Betriebstemperatur:          | 25°C bis 45 °C   |
| Optimaler Bereich Ladezustand:                 | 60 % $\pm$ 10 %  |

Tabelle 2.2: Technische Daten NiMH-Batterie

Die Daten sind jeweils stark abhängig von Temperatur, Ladezustand und Betriebspunkt. Besondere Bedeutung für die Betriebsstrategie haben die maximale und minimale Batterieleistung, die stets eingehalten werden müssen, um Beschädigungen zu vermeiden. Der optimale Bereich des Ladezustandes muss bestmöglich eingehalten werden, um ein frühzeitiges Altern zu verhindern. Ebenfalls großen Einfluss auf die Lebensdauer hat der Energiedurchsatz der Batterie [43]. Tabelle 2.3 zeigt als Referenz die Energiedurchsätze, die bei einem Serienfahrzeug mit gleicher Speichertechnologie (RX400h [100]) in verschiedenen Zyklen gemessen wurden.

## 2 Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells

| Zyklus  | Energiedurchsatz absolut [kWh] | Energiedurchsatz bezogen auf Nennkapazität [%] |
|---------|--------------------------------|--|
| FTP72   | 2,00                           | 118  |
| Highway | 0,42                           | 25   |

Tabelle 2.3: Zulässiger Energiedurchsatz des HV-Speichers

Der Wirkungsgrad der Batterie ist abhängig von Ladezustand, Temperatur, Spannung und Art der Belastung. In typischen Betriebspunkten mit Lasten unter 10 kW liegt er bei ungefähr 95%. Mit steigender Leistung steigen die Verluste überproportional an. Um die entstehenden Verluste abzuführen, verfügt die Batterie über eine Wasserkühlung.

### 2.5.2 Modellierung des HV-Speichers

Das Batteriemodell beinhaltet nach Abbildung 2.20 ein elektrisches und ein thermisches Untermodell. Zudem sind die Funktionen des Batteriesteuergeräts abgebildet.

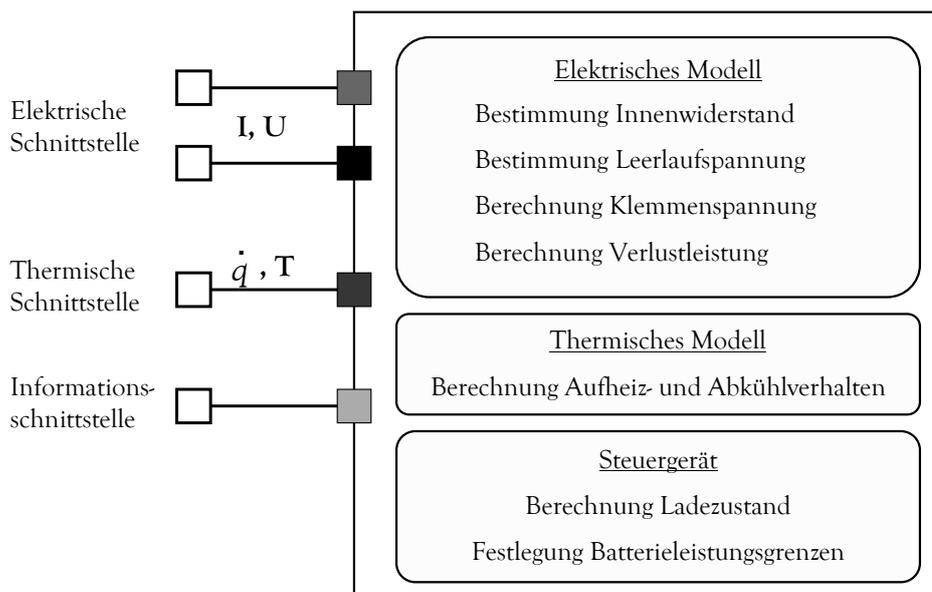


Abbildung 2.20: Struktur des Batteriemodells

#### Elektrisches Untermodell

Es gibt verschiedenste Möglichkeiten, das komplexe Verhalten von Batterien zu modellieren [17,43]. Abbildung 2.21 zeigt ein für die Ziele dieser Arbeit geeignetes Ersatzschaltbild. Dieses besteht aus einer idealen Spannungsquelle und einer Impedanz. Der Innen-

## 2 Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells

widerstand wird im Wesentlichen durch den ohmschen Widerstand im Elektrolyt ( $R_w$ ) und die Konzentrationsüberspannung (Parallelschaltung von  $R_k$  und  $C_k$ ) verursacht.

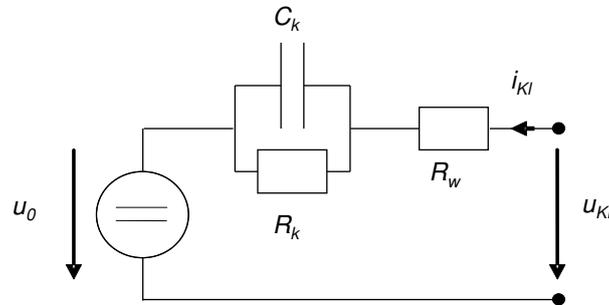


Abbildung 2.21: Batterieersatzmodell

Mit Hilfe der Kirchhoffschen Gesetze lassen sich die folgenden Differentialgleichungen zur Systembeschreibung ableiten:<sup>1</sup>

$$\frac{d}{dt}u_k = -\frac{u_k}{R_k C_k} + \frac{i_{Kl}}{C_k} \quad (2.22)$$

$$u_{kl} = u_k + R_w i_{Kl} + U_0 \quad (2.23)$$

Diese Differentialgleichungen werden in dem Batteriemodell hinterlegt. Da  $u_0$ ,  $R_w$ ,  $R_k$  und  $C_k$  abhängig vom Betriebspunkt variieren, gliedert sich das elektrische Untermodell in folgende Berechnungsblöcke:

Der Block „Bestimmung Innenwiderstand“ gibt die Werte für  $R_w$ ,  $R_k$  und  $C_k$  in Abhängigkeit der Zelltemperatur und des Ladezustands aus. Mit zunehmender Lade- bzw. Entladedauer ändern sich die Werte durch Erwärmung. Dieses Verhalten ist durch zwei Kennfelder abgebildet, aus denen zeitabhängig interpoliert wird. Ebenfalls abhängig von Temperatur und dem Ladezustand (State of Charge, *SOC*) ist die Leerlaufspannung, die in einem weiteren Block einem Kennfeld entnommen wird.

Die Bestimmung der für das Temperaturmodell nötigen Verlustleistung erfolgt in einem separaten Block nach Formel 2.24.

$$P_{Bat,Verl} = R_w \cdot I_{Kl}^2 + R_k \cdot I_k^2 \quad (2.24)$$

<sup>1</sup>Es wird angenommen, dass die Parameter um Größenordnungen langsamer variieren als die Systemdynamik. Somit spielen die zeitlichen Änderungen der Parameter für die Formulierung der Differentialgleichung keine Rolle.

## 2 Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells

Das thermische Modell ermittelt in Abhängigkeit der berechneten Verlustleistung und der Umgebungstemperatur das Temperaturverhalten. Untermodelle berechnen eine ein-dimensional angenäherte Temperaturverteilung im Inneren einer Zelle abhängig vom Radius. Der Wärmeübergang vom Mantel der Batterie bis zur Bodenplatte wird näherungsweise anhand eines thermischen RC-Netzwerkes simuliert. Die Wärme wird schließlich durch den internen Kühlkreislauf der Batterie nach außen abgeführt.

Das Batteriesteuergerät berechnet den *SOC* gemäß Formel 2.27 durch Integration des Klemmenstroms und Berücksichtigung der Batteriekapazität. Zudem bestimmt das Steuergerät die Batterieleistungsgrenzen. Dabei bewertet das Modell die bauteilbedingte maximale Lade- bzw. Entladeleistung ( $\pm 57kW$ ) der Batterie mit *SOC*- und temperaturabhängigen Faktoren  $Fak(SOC)$  und  $Fak(Temp_{Bat})$ . Diese sind in günstigen Betriebspunkten gleich eins und werden bei ungünstigen Randbedingungen (z.B. Batterie zu heiß oder zu weit entladen) bis auf null degradiert. Weiterhin wird die Grenzleistung berücksichtigt, die sich aus dem maximal bzw. minimal möglichen Ladestrom errechnet. Für das Simulationsmodell ergibt sich somit folgender Berechnungsalgorithmus:

$$P_{max\ Laden} = \min(P_{Bat\ max} \cdot Fak(SOC) \cdot Fak(Temp_{Bat}), \frac{U_{max} - U_{Leerlauf}}{R_{innen}} \cdot U_{max}) \quad (2.25)$$

$$P_{max\ Entladen} = \max(P_{Bat\ min} \cdot Fak(SOC) \cdot Fak(Temp_{Bat}), \frac{U_{min} - U_{Leerlauf}}{R_{innen}} \cdot U_{min}) \quad (2.26)$$

Der aufwändigste Teil der Modellbildung ist die Bedatung. Sinnvoll ist eine Bedatung abhängig von der Zellenzahl, um skalierbare Modelle zu erhalten. Die Leerlaufspannung  $u_0$  jeder Zelle lässt sich abhängig vom Ladezustand der Batterie messen. Die Größen  $R_w$ ,  $R_k$  und  $C_k$  können dagegen nicht direkt ermittelt werden. Passende Werte müssen aus systematischen Messreihen mit unterschiedlich langen Strompulsen bei variierenden Ladezuständen und Temperaturen abgeleitet werden. Das Ergebnis wird in Tabellen hinterlegt, aus denen das Modell abhängig vom aktuellen Zustand der Batterie die richtigen Werte für die Parameter ermittelt.

Die Berechnung des Ladezustandes erfolgt über eine Integration des Klemmenstroms:

$$SOC(t) = \int_0^t \frac{1}{Q_0} i_{Kl} dt + SOC(0) \quad (2.27)$$

### 2.5.3 Validierung

Die Batterie wurde mit Hilfe eines für den Prüfzyklus *US06* simulierten Lastprofils validiert. Bei Vorgabe des Stromprofil war eine gute Übereinstimmung zwischen gemessener und simulierter Spannung und Temperatur zu erkennen.

## 2 Beschreibung des Fahrzeugs und des Simulationsmodells

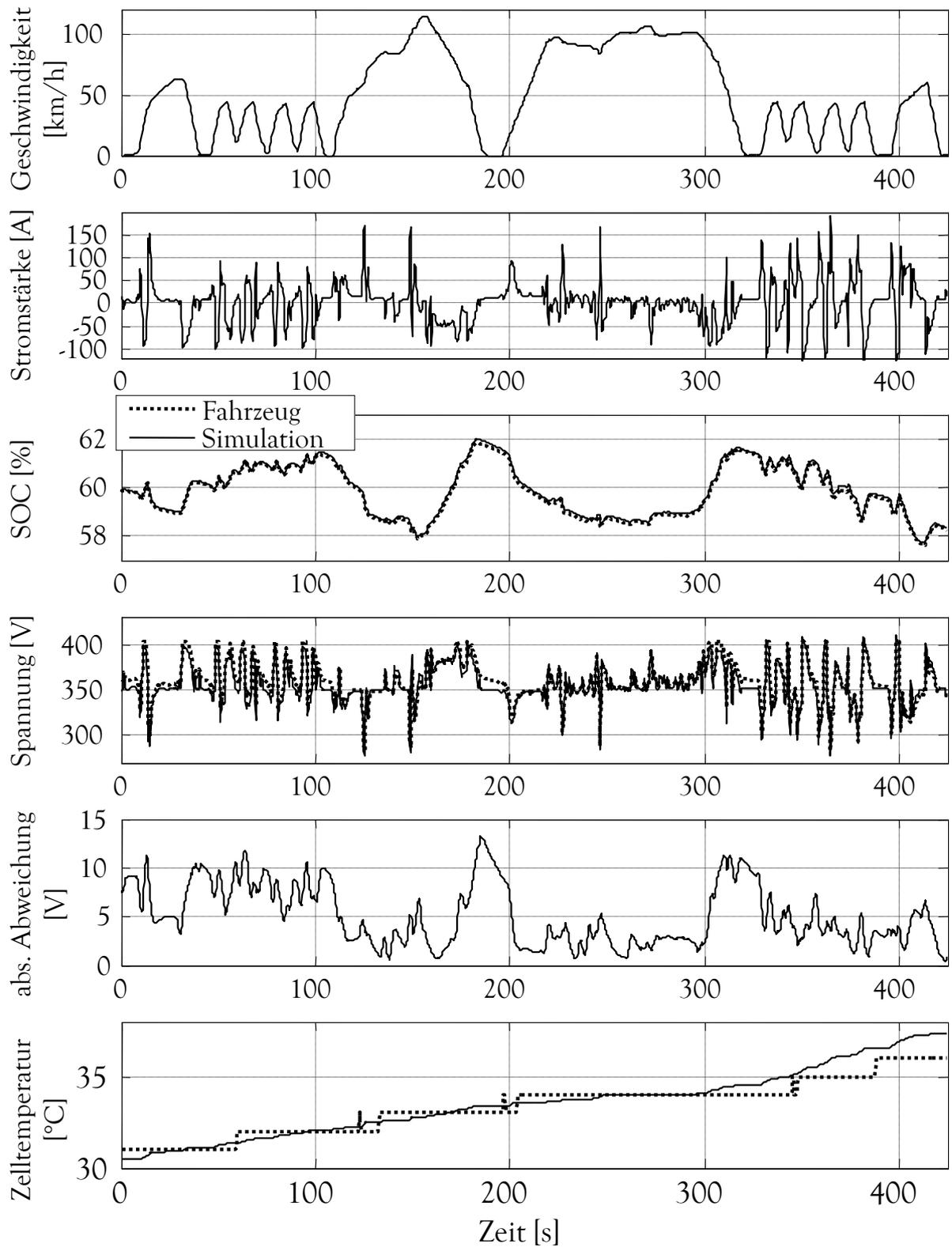


Abbildung 2.22: Messung für Batterieparametrisierung

# 3 Funktionsarchitektur und Basisfunktionen

Dieses Kapitel beschreibt Aufgaben und Zusammenspiel der einzelnen Bausteine der Betriebsstrategie (Abschnitt 3.1). Diese Funktionsarchitektur ist Basis für alle in dieser Arbeit untersuchten Betriebsstrategieansätze (Kapitel 4 und 5). Einige Bausteine kommen in allen Ansätzen in gleicher Form zum Einsatz. Diese allgemeinen Funktionen werden am Ende des Kapitels vorgestellt: Randwertberechnung (3.2), Getriebesteuerung (3.3) und E-Maschinensteuerung (3.4).

## 3.1 Funktionsarchitektur

Die Funktionsarchitektur ist auf die Größe Getriebeausgangsmoment  $M_o$  ausgerichtet: Der Fahrer fordert über das Gaspedal eine bestimmte Zugkraft an, das Hybridsystem wählt Getriebeübersetzung und Momente so, dass sich der Wunschwert einstellt. Ein auf dem Verbrennungsmotor- bzw. dem Getriebeeingangsmoment  $M_i$  basierender Ansatz kommt aufgrund der im Getriebe liegenden E-Maschinen nicht in Frage.

Die Betriebsstrategie legt die Freiheitsgrade entsprechend der Stelldynamik der Komponenten fest: Zunächst wird als trügste Größe die Drehzahl des Verbrennungsmotors festgelegt, dann das Moment des Verbrennungsmotors und zuletzt das sehr schnell stellbare Moment der E-Maschinen. Ähnlich kaskadierte Strukturen werden auch für normale Automatikgetriebe diskutiert, vgl. [57]. Abbildung 3.1 stellt die Zusammenhänge grafisch dar.

### 3 Funktionsarchitektur und Basisfunktionen

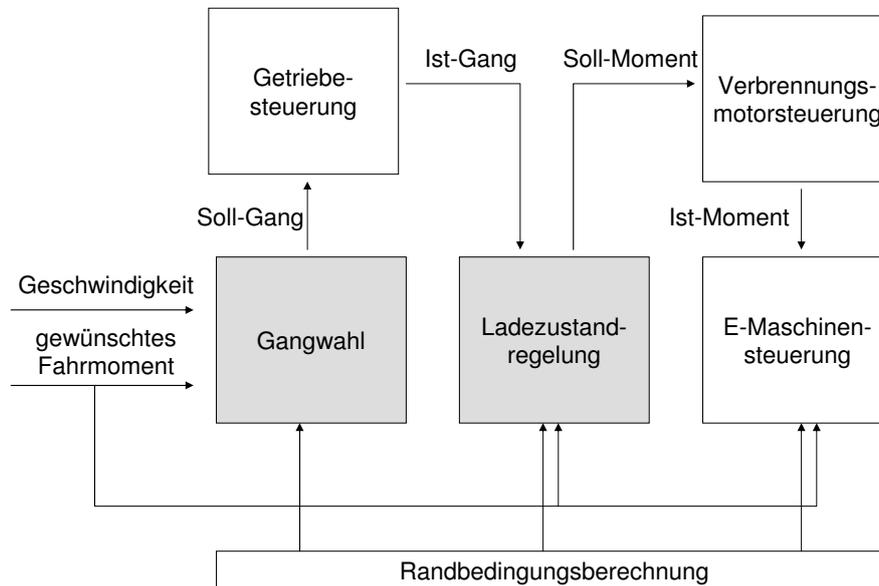


Abbildung 3.1: Die wichtigsten Informationsflüsse der Regelarchitektur

Grau hinterlegt sind die Blöcke, die die strategischen Funktionen beinhalten: *Gangwahl* und *Ladezustandregelung*. Weiß hinterlegt sind die Grundfunktionen *Getriebe-steuerung*, *Verbrennungsmotorsteuerung* und *E-Maschinensteuerung*. Eine übergreifende Rolle kommt dem Funktionsblock *Randwertberechnung* zu: Er berechnet die zulässigen Bereiche, in denen die übrigen Funktionsblöcke Betriebspunkte festlegen können, ohne dass eine Komponente unzulässig belastet würde.

Auf Basis der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  und des vom Fahrer angeforderten Fahrmomentes  $M_{o,wunsch}$  fällt der Funktionsblock *Gangwahl* zunächst die Entscheidung, ob verbrennungsmotorisch oder rein elektrisch gefahren werden soll. Bei laufendem Verbrennungsmotor wählt er zudem den geeigneten Gang oder eCVT-Modus. Diesen Sollzustand setzt die *Getriebe-steuerung* um. Schaltvorgänge nehmen eine bestimmte Zeit in Anspruch, so dass Soll- und Istwert nicht immer übereinstimmen. Alle folgenden Funktionsblöcke arbeiten daher auf Basis des Ist-Ganges, den die *Getriebe-steuerung* an das System zurückmeldet.

Die *Ladezustandregelung* entscheidet anhand des Ist-Ganges, des Fahrerwunschlomentes und des Ladezustandes des HV-Speichers, ob der Hochvolt-Speicher durch eine Lastpunktanhebung bzw. Lastpunktabsenkung am Verbrennungsmotor zusätzlich zu eventuellen Boost- und Rekuperationsvorgängen geladen oder entladen werden soll. Ein resultierendes Verbrennungsmotormoment wird berechnet und an die *Verbrennungsmotor-*

steuerung weitergegeben. Anhand des vom Verbrennungsmotor tatsächlich gestellten Momentes und des Fahrerwunschloments berechnet die *E-Maschinensteuerung* die Sollmomente der E-Maschinen.

## 3.2 Randwertberechnung

Die Funktionsblöcke, die den Betriebspunkt des Hybridsystems festlegen, benötigen als Eingangsgröße den Bereich der möglichen Systemzustände. Dieser Bereich umfasst alle Betriebspunkte, in denen das vom Fahrer geforderte Antriebsmoment  $M_{o,wunsch}$  gestellt wird, ohne eine der beteiligten Baugruppen unzulässig zu belasten.

Die Funktion *Randwertberechnung* bestimmt diesen zulässigen Bereich abhängig von Fahrgeschwindigkeit, gefordertem Fahrmoment und aktueller Leistungsfähigkeit der Komponenten Verbrennungsmotor, Batterie, E-Maschinen und Kupplungen [60]. Die Teilfunktionen der Betriebsstrategie benötigen folgende Informationen:

- Welche Gänge und welche Drehzahlbereiche in den eCVT-Modi können eingenommen werden, ohne die Drehzahlgrenzen der Komponenten zu verletzen?
- Welche maximalen und minimalen Getriebeausgangsmomente  $M_{o,max}$  und  $M_{o,min}$  sind innerhalb der Momenten- und Leistungsgrenzen der Komponenten jeweils darstellbar?
- Welche maximalen und minimalen Verbrennungsmotormomente  $M_{i,max}$  und  $M_{i,min}$  sind zulässig, ohne Momenten- oder Leistungsgrenzen zu verletzen?

Die relevanten Grenzen der beteiligten Komponenten lassen sich in drei Gruppen unterteilen: Drehzahl-, Momenten- und Leistungsgrenzen. Den Leistungsgrenzen der Batterie kommt eine besondere Rolle zu. Mit der Näherungsformel 2.20 für die E-Maschinenverluste gilt folgende elliptische Gleichung für die Batterieleistung:

$$P_{bat} = \underbrace{\omega_a \cdot M_a}_{P_{mech,EMA}} + \underbrace{a_1 \cdot M_a^2 + a_2 \cdot M_a + a_3}_{P_{Verlust,EMA}} + \underbrace{\omega_b \cdot M_b}_{P_{mech,EMB}} + \underbrace{b_1 \cdot M_b^2 + b_2 \cdot M_b + b_3}_{P_{Verlust,EMB}} + P_{BN} \quad (3.1)$$

Bei Einbeziehung der Leistungsgrenzen der Batterie erhalten die drei oben genannten Extremwertprobleme eine nicht-lineare Randbedingung. Die nächsten Abschnitte beschreiben mögliche Lösungswege. Dabei wird zunächst das lineare Problem unter Vernachlässigung der quadratischen Randbedingung betrachtet. Dieses Zwischenergebnis dient als Ausgangspunkt für das nicht-lineare Problem.

### 3.2.1 Drehzahlbegrenzungen

### Feste Gänge

Für die festen Gänge ermittelt die Funktion Randwertberechnung zunächst die resultierenden Drehzahlen der beteiligten Komponenten durch Einsetzen der aktuellen Getriebeabtriebsdrehzahl  $\omega_o$  in Gleichung 2.9. Es sind alle Gänge  $n$  zulässig, die die folgende Bedingung erfüllen:

$$\begin{bmatrix} \omega_{a,min} \\ \omega_{b,min} \\ \omega_{i,min} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \omega_{a,n} \\ \omega_{b,n} \\ \omega_{i,n} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \omega_{a,max} \\ \omega_{b,max} \\ \omega_{i,max} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

### eCVT-Modi

In den eCVT-Modi ist das Übersetzungsverhältnis kontinuierlich wählbar. Die Aufgabe besteht darin, den Bereich der Übersetzungsverhältnisse zu finden, in denen keine Drehzahlgrenzen verletzt werden. Das Vorgehen ist in den beiden eCVT-Modi jeweils unterschiedlich. Abbildung 3.2 veranschaulicht den zulässigen Betriebsbereich des eCVT-Modus 1.

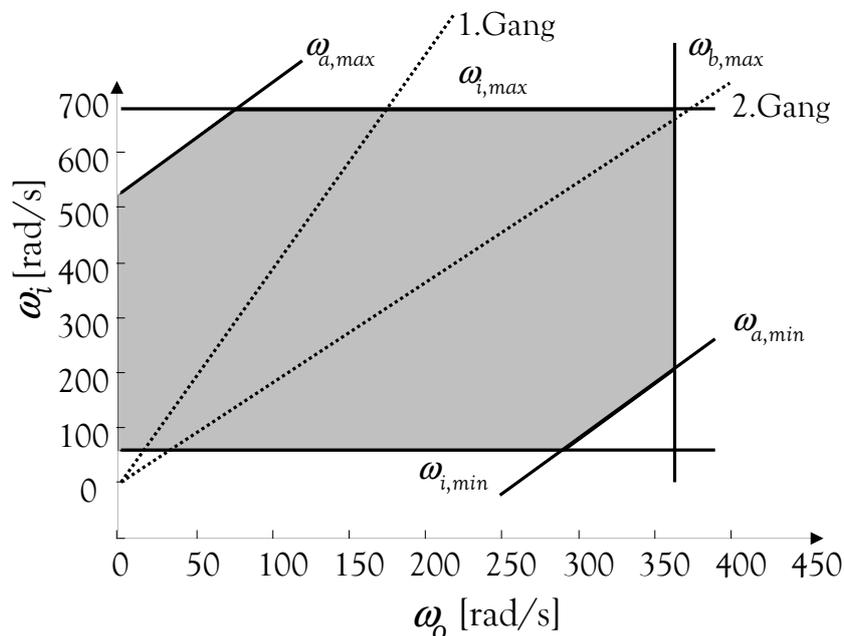


Abbildung 3.2: Zulässiger Drehzahlbereich im eCVT-Modus 1

Im eCVT-Modus 1 ist die Drehzahl der E-Maschine B direkt an den Abtrieb gekoppelt, die

### 3 Funktionsarchitektur und Basisfunktionen

Begrenzung durch  $\omega_{b,max}$  ist daher eine Parallele zur  $\omega_i$ -Achse. Ist diese Grenzgeschwindigkeit nicht überschritten, verbleiben minimale und maximale Drehzahl von Verbrennungsmotor und E-Maschine A als Begrenzungen des zulässigen Bereichs. Für die Werte  $\omega_{a,max}$  und  $\omega_{a,min}$  werden mit Hilfe von Gleichung 2.10 die entsprechenden Verbrennungsmotordrehzahlen berechnet. Für den aktuellen Betriebspunkt ergibt sich dann folgender zulässiger Betriebsbereich im eCVT-Modus 1:

$$\omega_i \in [\min(\omega_{i,min}, \omega_i(\omega_{a,min}, \omega_o)) \dots \max(\omega_{i,max}, \omega_i(\omega_{a,max}, \omega_o))] \quad (3.3)$$

Im eCVT-Modus 2 gibt es keine direkte Kopplung der Abtriebsdrehzahl an eine der beiden E-Maschinendrehzahlen. Abbildung 3.3 zeigt den zulässigen Drehzahlbereich.

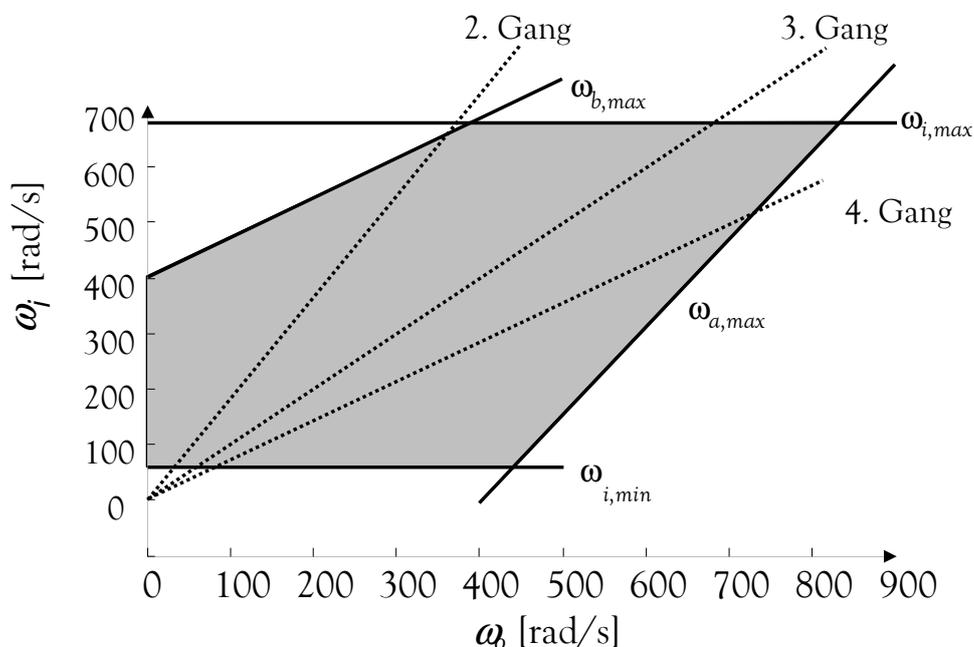


Abbildung 3.3: Drehzahlbereich eCVT-2

Die maximale Drehzahl des Verbrennungsmotors ist abhängig von  $\omega_o$  entweder durch  $\omega_{b,max}$  oder  $\omega_{i,max}$  festgelegt, die minimale dagegen durch  $\omega_{i,min}$  oder  $\omega_{a,max}$ . Die Werte lassen sich mit Hilfe von Gleichung 2.10 bestimmen. Für den eCVT-2 resultiert folgender zulässiger Bereich für  $\omega_i$ :

$$\omega_i \in [\min(\omega_{i,min}, \omega_i(\omega_{a,max}, \omega_o)) \dots \max(\omega_{i,max}, \omega_i(\omega_{b,max}, \omega_o))] \quad (3.4)$$

### 3.2.2 Maximales und minimales Getriebeausgangsmoment

#### Feste Gänge

In den festen Gängen sind die Momente von Verbrennungsmotor und E-Maschinen voneinander unabhängig wählbar, vgl. Gleichung 2.11. Das maximale Getriebeausgangsmoment lässt sich somit erreichen, wenn die Einzelmomente multipliziert mit den zugehörigen Übersetzungsverhältnissen maximale Werte annehmen. Für das lineare Optimierungsproblem ohne Berücksichtigung der Batterieleistungsgrenzen gilt:

$$M_{o,max,linear} = \begin{bmatrix} u_{oi} & u_{oa} & u_{ob} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{i,lim} \\ M_{a,lim} \\ M_{b,lim} \end{bmatrix} - \theta_{o,n} \dot{\omega}_o \quad (3.5)$$

Dabei ist für die Grenzmomente  $M_{lim}$  jeweils  $M_{max}$  zu setzen, falls das entsprechende Übersetzungsverhältnis  $u_{ox}$  größer Null ist, und  $M_{min}$ , falls  $u_{ox}$  einen negativen Wert annimmt. Im vierten festen Gang ist  $u_{ob}$  gleich Null; die Wahl des Moments der E-Maschine B spielt in diesem Sonderfall keine Rolle.

Anschließend wird mit Hilfe von Formel 3.1 die nichtlineare Randbedingung überprüft. Bei einem Wert  $P_{Bat,min} \leq P_{Bat} \leq P_{Bat,max}$  ist mit der Lösung des linearen Optimierungsproblems gleichzeitig die Lösung des gesamten Problems gefunden. Wird die Batterie überlastet, müssen die beiden E-Maschinenmomente reduziert werden, bis die Batterieleistung die zuvor überschrittene Schranke gerade nicht mehr verletzt.

Die zulässigen Grenzmomente lassen sich mit den Gleichungen aus Abschnitt 2.3.2 und 2.4 bestimmen.

$$M_a, M_b = f(P_{Bat,max}, \omega_a, \omega_b, \dot{\omega}_o) \quad (3.6)$$

Da es sich um eine quadratische Gleichung handelt, ergeben sich im Allgemeinen zwei Lösungen. Für den ersten festen Gang mit  $\dot{\omega}_o=0$  gilt beispielsweise:

$$M_a = -\frac{2 \cdot \omega_a + a_2 + b_2}{2 \cdot a_1 + 2 \cdot b_1} \pm \sqrt{\left(\frac{2 \cdot \omega_a + a_2 + b_2}{2 \cdot a_1 + 2 \cdot b_1}\right)^2 - \frac{a_3 + b_3 - P_{BatMax}}{a_1 + b_1}} \quad (3.7)$$

Geometrisch entspricht die Berechnung dem Schnitt einer Geraden mit einer Ellipse. Abbildung 3.4 verdeutlicht die Zusammenhänge grafisch.

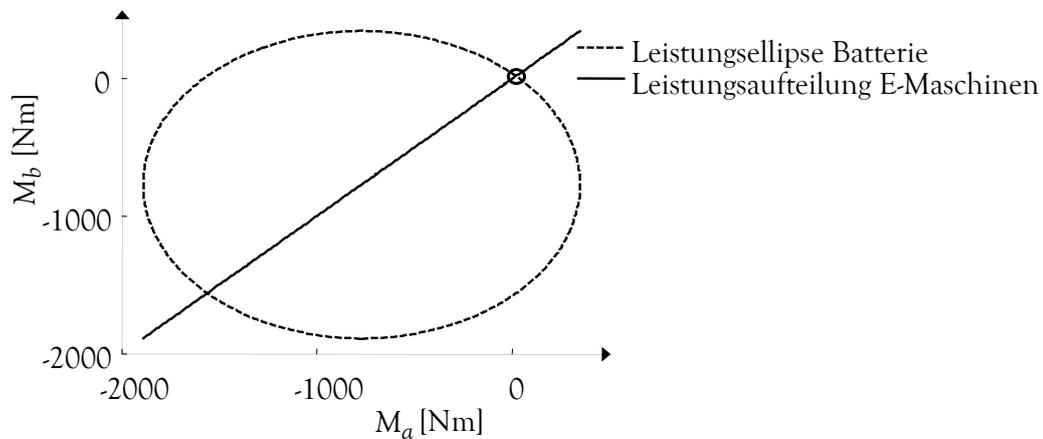


Abbildung 3.4: Berechnung Moment der E-Maschine A  $M_a$

Der gesuchte Schnittpunkt ist in Abbildung 3.4 durch einen Kreis gekennzeichnet. Der zweite Schnittpunkt liegt außerhalb des Bereiches, in dem die Approximation der Verlustkennfelder durchgeführt wurde. Er stellt somit keine physikalisch gültige Lösung dar.

#### eCVT-Modi

Der erreichbare minimale und maximale Wert des Getriebeausgangsmomentes hängt in den eCVT-Modi von der gewählten Drehzahl des Verbrennungsmotors  $\omega_i$  ab. Da die Berechnung der Grenzwerte nur an diskreten Punkten möglich ist, werden in dem zulässigen Drehzahlbereich des Verbrennungsmotors gleichmäßig verteilte Stützstellen für die Momentenberechnung festgelegt. Die dort ermittelten Grenzmomente dienen als Interpolationsbasis, siehe 3.5. Es hat sich gezeigt, dass sieben Stützstellen einen guten Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenzeit darstellen.

### 3 Funktionsarchitektur und Basisfunktionen

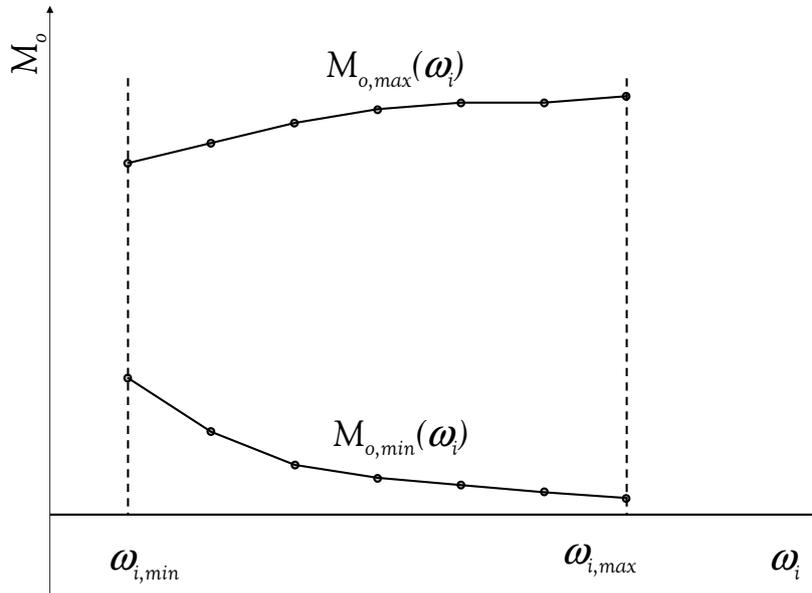


Abbildung 3.5: Berechnung von  $M_{o,max} = f(\omega_i)$  durch lineare Interpolation zwischen den an den Stützstellen berechneten Grenzmomenten

Bei der Berechnung der Stützstellen sind folgende Ungleichheitsbedingungen zu beachten:

$$M_{a,min} < M_a < M_{a,max} \quad (3.8)$$

$$M_{b,min} < M_b < M_{b,max} \quad (3.9)$$

$$M_{i,min} < M_i < M_{i,max} \quad (3.10)$$

$$P_{Bat,min} < P_{Bat} < P_{Bat,max} \quad (3.11)$$

Mit Hilfe von Gleichung 2.17 und 3.1 ist es möglich,  $M_i$ ,  $M_o$  und  $P_{Bat}$  als Funktion von  $M_a$  und  $M_b$  auszudrücken. Die Zusammenhänge lassen sich daher in der von  $M_a$  und  $M_b$  aufgespannten Ebene visualisieren.

Abbildung 3.6 zeigt beispielhaft für eine Geschwindigkeit von 30 km/h, einer Drehzahl des Verbrennungsmotors von 1500 U/min und einer maximalen bzw. minimalen Batterieleistung von  $\pm 15$  kW die Abtriebsmomente, welche im eCVT-1 eingestellt werden können, ohne eine Begrenzung des Systems zu überschreiten.

### 3 Funktionsarchitektur und Basisfunktionen

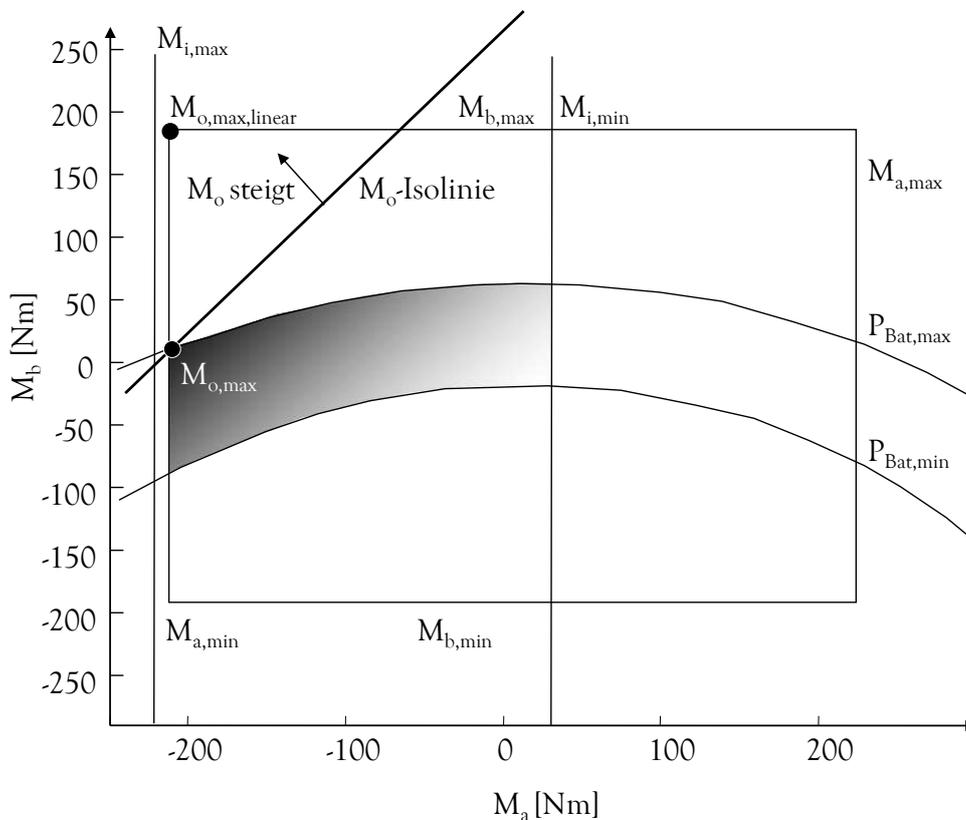


Abbildung 3.6: zulässige Abtriebsmomente im eCVT-1 Modus

Die zulässigen Betriebspunkte sind grau hinterlegt. Je dunkler ein Punkt eingefärbt ist, desto größer ist der maximal mögliche Wert des Abtriebsmomente  $M_o$ . Auf einer  $M_o$ -Isolinie liegen Betriebspunkte mit konstanten  $M_o$ . Zur Veranschaulichung ist die  $M_o$ -Isolinie dargestellt, die den maximalen zulässigen Wert des Getriebeausgangsmomentes  $M_{o,max}$  beinhaltet. So ist zu erkennen, dass die gesuchte Lösung durch den Schnittpunkt des minimalen Momentes der Maschine A  $M_{a,min}$  mit der maximalen Batterieleistung  $P_{Bat,max}$  definiert ist.

Allgemein gilt, dass das gesuchte maximale oder minimale Abtriebsmoment immer durch den Schnittpunkt der zwei relevanten Komponentengrenzen definiert ist. Es stehen 24 mögliche Schnittpunkte zur Auswahl: Die beiden Batteriegrenzen  $P_{Bat,max}$  und  $P_{Bat,min}$  können jeweils alle sechs Komponentenlimits  $M_{i,max}$ ,  $M_{i,min}$ ,  $M_{a,max}$ ,  $M_{a,min}$ ,  $M_{b,max}$  und  $M_{b,min}$  schneiden (zwölf Schnittpunkte). Zudem existieren vier weitere Schnittpunkte zwischen den E-Maschinengrenzen. Acht Schnittpunkte ergeben sich zwischen den beiden Verbrennungsmotorgrenzen und den vier E-Maschinenlimits<sup>1</sup>. Immer alle möglichen

<sup>1</sup>Im eCVT-Modus 1 entfallen vier Schnittpunkte, da wegen der direkten Kopplung zwischen  $M_a$  und  $M_i$

### 3 Funktionsarchitektur und Basisfunktionen

Schnittpunkte zu betrachten und den restriktivsten Wert zu wählen, ist eine mögliche, aber rechenaufwändige Methode. Daher wurde ein Vorgehen entwickelt, das mit wesentlich weniger Berechnungen auskommt. Startpunkt dieses Verfahrens ist stets die Lösung des linearen Optimierungsproblems.

#### Vorgehen eCVT-Modus 1

Abbildung 3.7 zeigt die optimierte Abfrage der Schnittpunkte für den eCVT-Modus 1. Das Vorgehen ist im Folgenden beispielhaft für die Berechnung von  $M_{o,max}$  dargestellt.

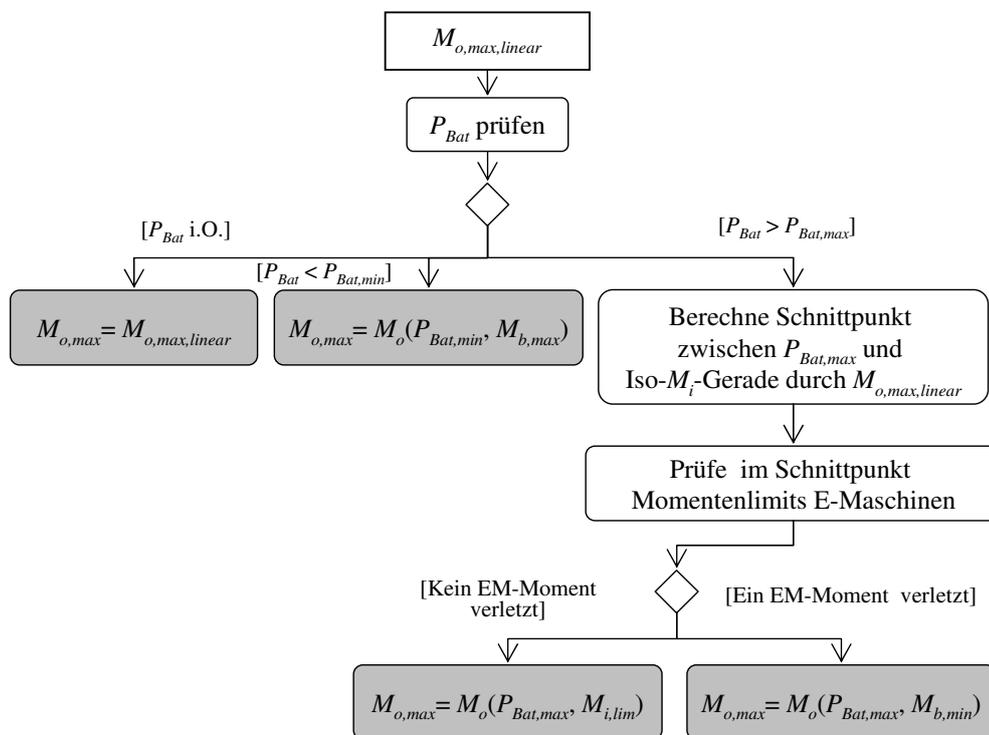


Abbildung 3.7: Berechnung von  $M_{o,max}$  im eCVT-1 Modus

Startpunkt ist  $M_{o,max,linear}$ . Dieses liegt - wie Abbildung 3.7 zeigt - entweder auf dem Schnittpunkt zwischen  $M_{b,max}$  und  $M_{i,max}$  oder auf dem zwischen  $M_{b,max}$  und  $M_{a,min}$ . Das relevante Limit wird durch Nachrechnen ermittelt. Nun wird mit Hilfe von Formel 3.1 die nicht-lineare Randbedingung überprüft. Ist diese erfüllt, ist der relevante Schnittpunkt bereits gefunden. Ist dagegen die maximale Lade- oder Entladeleistung der Batterie überschritten, steht lediglich fest, dass der gesuchte Punkt auf der verletzten Grenze liegt. Das zweite entscheidende Limit wird folgendermaßen ermittelt:

die zugehörigen Grenzen Parallelen sind.

### 3 Funktionsarchitektur und Basisfunktionen

Bei zu starker Batterieladung ( $P_{Bat} < P_{Bat,min}$ ) muss die Leistung des Verbrennungsmotors reduziert werden. Der relevante Schnittpunkt ist dann durch die minimale Batterieleistung  $P_{bat,min}$  und das maximale Moment der E-Maschine B  $M_{b,max}$  bestimmt.

Bei zu starker Entladung der Batterie ( $P_{Bat} > P_{Bat,max}$ ) ist der nächste abzufragende Schnittpunkt festgelegt durch das vertikale Limit von  $M_{o,max,linear}$ , also  $M_{i,max}$  oder  $M_{a,min}$  und dem zuvor überschrittenen Batterielimit  $P_{Bat,max}$ . Wird in diesem Punkt das Minimalmoment der Maschine B nicht verletzt, sind die beiden restriktivsten Begrenzungen gefunden. Andernfalls stellt der Schnittpunkt zwischen  $P_{Bat,max}$  und  $M_{b,min}$  die Lösung dar.

Die minimal möglichen Abtriebsmomente werden sinngemäß ermittelt.

#### Vorgehen eCVT-Modus 2

Abbildung 3.8 stellt den zulässigen Bereich im eCVT-Modus 2 für einen beispielhaften Betriebspunkt ( $v = 120 \text{ km/h}$ ,  $\omega_i = 2500 \text{ U/min}$  und  $P_{Bat,lim} = \pm 20 \text{ kW}$ ) dar.

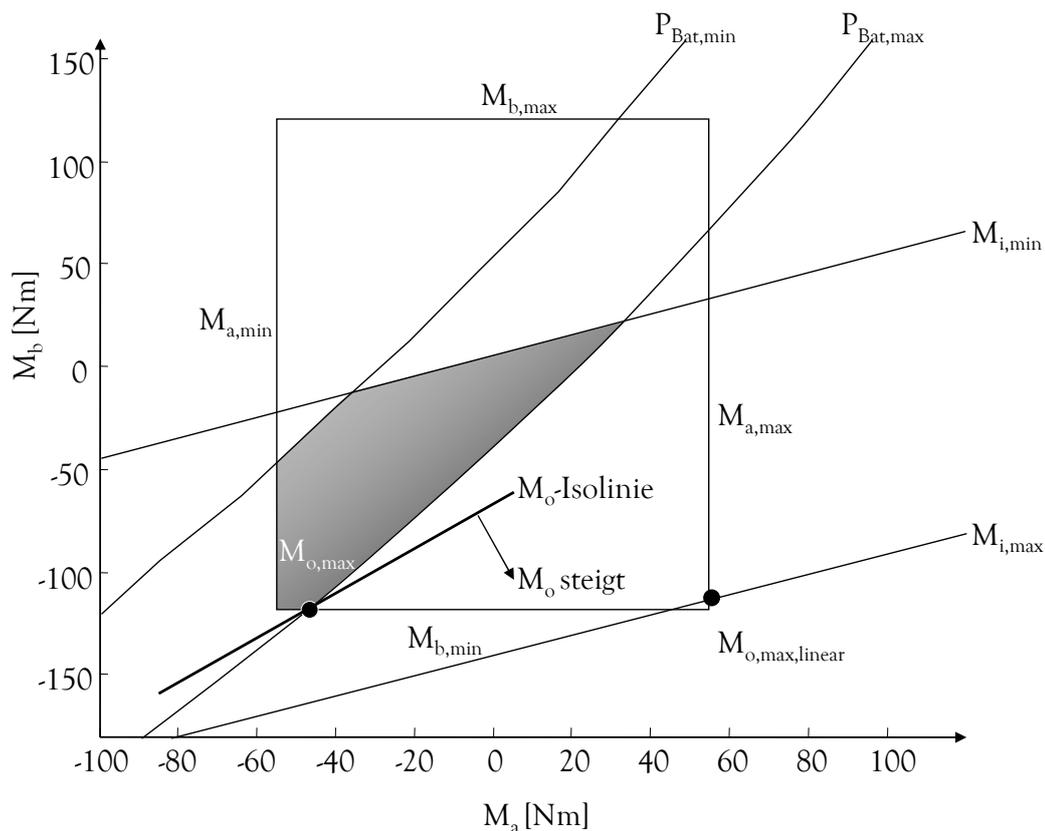


Abbildung 3.8: Bereich zulässiger Abtriebsmomente im eCVT-2 Modus

### 3 Funktionsarchitektur und Basisfunktionen

Startpunkt der Berechnung ist  $M_{o,max,linear}$ . Im eCVT-Modus 2 ist  $M_o$  umso größer, je größer  $M_a$  und je kleiner  $M_b$  ist. Abbildung 3.8 veranschaulicht, dass als relevante Schnittpunkte für  $M_{o,max,linear}$  daher nur folgende in Frage kommen:

- $M_{bMin}$  und  $M_{aMax}$ ,
- $M_{iMax}$  und  $M_{aMax}$  oder
- $M_{iMax}$  und  $M_{bMax}$ .

Liegt die resultierende Batterieleistung von  $M_{o,max,linear}$  im zulässigen Bereich, ist der relevante Schnittpunkt gefunden. Falls nicht, gibt Abbildung 3.9 das weitere Vorgehen vor.

### 3 Funktionsarchitektur und Basisfunktionen

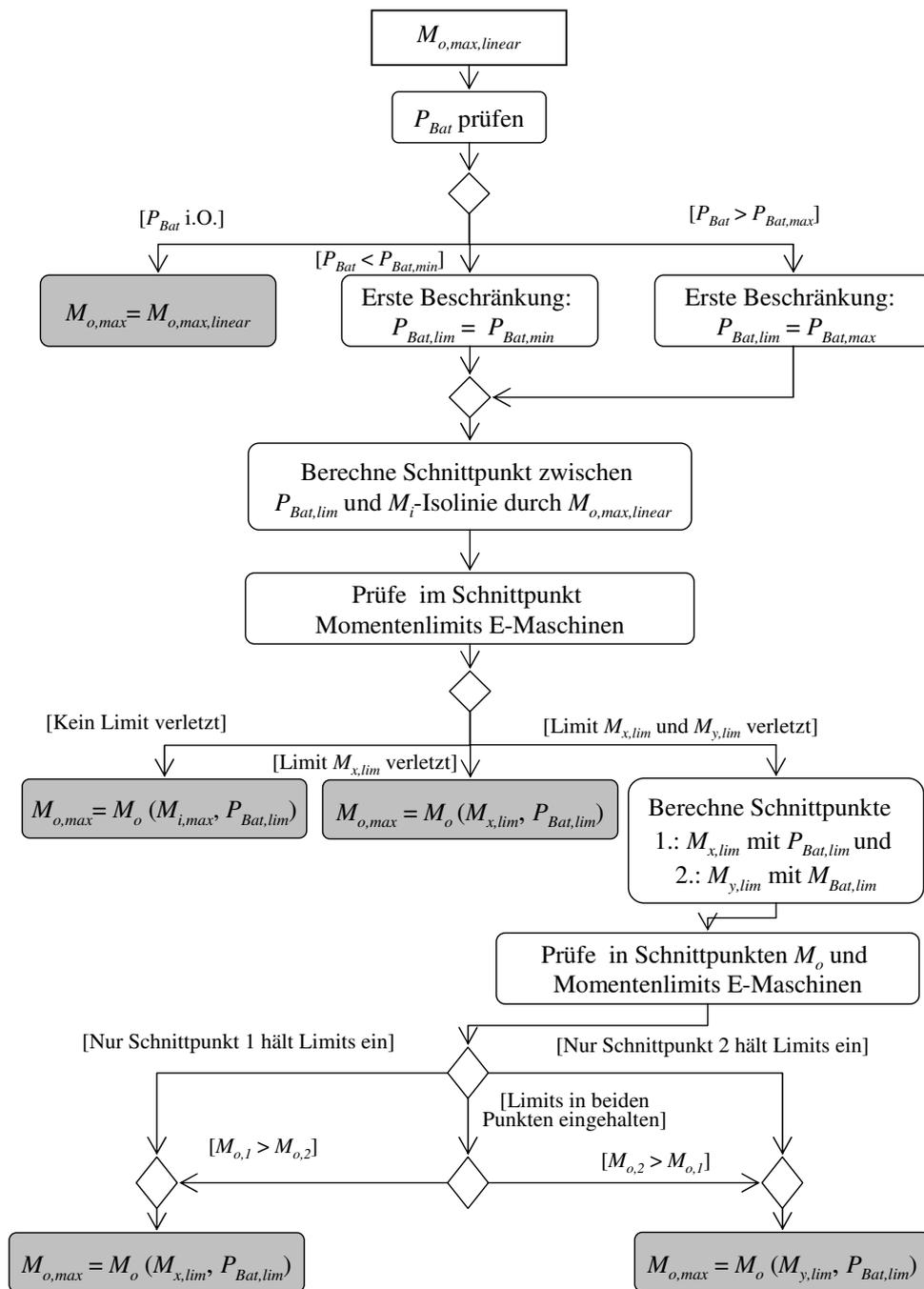


Abbildung 3.9: Berechnung von  $M_{o,max}$  im eCVT-2 Modus

Mit dem verletzten Batterielimit ist eine der beiden gesuchten Begrenzungen bereits gefunden. Um die zweite zu finden, wird im nächsten Schritt der Schnittpunkt der  $M_i$ -Isograden durch  $M_{o,max,linear}$  mit der beschränkenden Batterieleistungslinie berechnet. Aufgrund der quadratischen Gleichung der Batterie existieren zwei Lösungen. Das  $M_o$

### 3 Funktionsarchitektur und Basisfunktionen

der relevanten Lösung ist kleiner als  $M_{o,max,linear}$ . Erfüllen beide Lösungen diese Bedingung, wählt man die näher bei  $M_{o,max,linear}$  liegende. Im resultierenden Betriebspunkt werden die Momentengrenzen der E-Maschinen überprüft.

Es können drei verschiedene Fälle eintreten:

1. **kein Limit wird verletzt:** Der relevante Schnittpunkt ist definiert durch die von  $M_{o,max,linear}$  überschrittene Batterieleistung und  $M_{i,max}$ .
2. **ein E-Maschinenlimit wird verletzt:** Der relevante Schnittpunkt ist definiert durch das gerade überschrittene E-Maschinenlimit und die von  $M_{o,max,linear}$  überschrittene Batterieleistung.
3. **beide E-Maschinen verletzen ihre Beschränkungen:** In diesem Fall müssen die Schnittpunkte der von  $M_{o,max,linear}$  überschrittenen Batteriegrenze und den beiden überschrittenen E-Maschinenlimits berechnet werden. Die gesuchte Lösung maximiert  $M_o$  und hält die Momentengrenzen der zweiten Maschine ein.

Die Berechnung von  $M_{o,min}$  erfolgt sinngemäß.

#### 3.2.3 Maximales und minimales Verbrennungsmotormoment

Für die einzelnen Gänge muss ermittelt werden, in welchem Bereich das Moment des Verbrennungsmotors jeweils liegen darf, um das vom Fahrer geforderte Abtriebsmoment zu erfüllen, ohne eine der beteiligten Komponenten zu stark zu belasten. Die Verfahren ähneln denen zur Ermittlung von  $M_{o,max}$  und  $M_{o,min}$ , sind aber einfacher. Ein Freiheitsgrad ist bereits durch die von  $M_o$  vorgegebene Gerade in der  $M_a$ - $M_b$ -Ebene festgelegt. Der Lösungsraum reduziert sich somit von zuvor 24 auf acht mögliche Punkte, die den Ober- und Untergrenzen von Batterie, Verbrennungsmotor und den beiden E-Maschinen entsprechen. Diese acht Punkte werden jeweils berechnet und auf Gültigkeit überprüft. Der größte und der kleinste gültige Wert des Verbrennungsmotors ergeben die gesuchten Werte  $M_{i,max}$  und  $M_{i,min}$ .

#### 3.2.4 Modellierung der Randwertberechnung

Die für die drei Teilfunktionen *Drehzahlgrenzen*, *Grenzen Getriebeausgangsmoment* und *Grenzen Getriebeeingangsmoment* beschriebenen Berechnungsverfahren sind im Simulationsmodell durch wenn-dann Bedingungen und die jeweils gültigen Gleichungssysteme abgebildet.

## 3.3 Getriebesteuerung

Die Schaltungen schnell und mit einem komfortablen Verlauf des Getriebeausgangsmomentes auszuführen, ist ein äußerst komplexes Thema [83, 101]. Eine genaue Trajektorienplanung und -regelung für E-Maschinenmomente und den Schlupf der Kupplungen ist notwendig. Für die in dieser Arbeit bewerteten Kriterien spielt die Qualität der Schaltausführung eine untergeordnete Rolle. Die Schaltungen müssen lediglich zuverlässig ausgeführt werden ohne die Energiebilanzen zu verfälschen. Die dafür notwendigen Zusammenhänge sind im Folgenden dargestellt.

### 3.3.1 Beschreibung der Funktionsweise der Getriebesteuerung

Die Getriebesteuerung ist dafür zuständig, die Gang- und Drehzahlvorgabe umzusetzen. Das System liefert ein Signal mit dem aktuellen Gang oder dem gerade verwendeten Modus (siehe Abb. 3.1).

Aus diesen Informationen legt die Getriebesteuerung eine Drehzahltrajektorie fest, anhand derer das System vom aktuellen in den neuen gewünschten Betriebszustand wechselt. In Tabelle 3.1 ist dargestellt, wie aus dem gerade eingelegten Gang in einen beliebigen anderen Betriebszustand gewechselt werden kann. Elektrisches Fahren ist dabei ein Sonderfall des eCVT-Modus 1 ( $i = \infty$ ).

Das Wechseln zwischen zwei festen Gängen erfolgt über die beiden eCVT-Modi. Durch Anfahren der Synchronschaltpunkte (in der Tabelle abgekürzt mit SSP - Übersetzungsverhältnisse der festen Gänge) kann zwischen den festen Gängen ohne schleifende Kupplungen gewechselt werden. Eine wichtige Rolle spielt dabei das Übersetzungsverhältnis des zweiten Ganges, da dort zugleich der Umschaltpunkt zwischen den beiden eCVT-Modi liegt.

Die E-Maschinenregelung (vgl. Abschnitt 3.4) stellt in den eCVT-Modi die gewünschte Drehzahl des Verbrennungsmotors ein. Sobald die Zieldrehzahl des Verbrennungsmotors erreicht ist, steuert die Schaltausführung die entsprechenden Kupplungen an.

### 3 Funktionsarchitektur und Basisfunktionen

|      |  | gewünschter Gang bzw. Modus                       |  |   |  |  |
|------|--|---|--|---|--|--|
|      |  | 1   | 2  | 3   | 4  |  |
|      |  |   |  |   |  | CVT1   |
|      |  |   |  |   |  | CVT2   |
| 1    | x  | C4 öffnen<br>CVT1 bis SSP 2.Gang<br>C2 schliessen | C4 öffnen<br>CVT1 bis SSP 2.Gang<br>umschalten in CVT2<br>CVT2 bis SSP 3.Gang<br>C4 schliessen | C4 öffnen<br>CVT1 bis SSP 2.Gang<br>umschalten in CVT2<br>C3 schliessen           | C4 öffnen<br>CVT1 bis SSP 2.Gang<br>umschalten in CVT2 | C4 öffnen<br>CVT1 bis SSP 2.Gang<br>umschalten in CVT2 |
| 2    | C2 öffnen<br>CVT1 bis SSP 1.Gang<br>C4 schliessen  | x   | C1 öffnen<br>CVT2 bis SSP 3.Gang<br>C4 schliessen  | C1 öffnen<br>CVT2 bis SSP 4.Gang<br>C3 schliessen                                 | C1 öffnen  | C1 öffnen  |
| 3    | C4 öffnen<br>CVT2 bis SSP 2.Gang<br>umschalten in CVT1<br>CVT1 bis SSP 1.Gang<br>C4 schliessen | C4 öffnen<br>CVT2 bis SSP 2.Gang<br>C1 schliessen | x  | C4 öffnen<br>CVT2 bis SSP 4.Gang<br>C3 schliessen                                 | C4 öffnen<br>CVT2 bis SSP 2.Gang<br>umschalten in CVT1 | C4 öffnen  |
| 4    | C3 öffnen<br>CVT2 bis SSP 2.Gang<br>umschalten in CVT1<br>CVT1 bis SSP 1.Gang<br>C4 schliessen | C3 öffnen<br>CVT2 bis SSP 2.Gang<br>C1 schliessen | C3 öffnen<br>CVT2 bis SSP 3.Gang<br>C4 schliessen  | x   | C3 öffnen<br>CVT2 bis SSP 2.Gang<br>umschalten in CVT1 | C4 öffnen  |
| CVT1 | CVT1 bis SSP 1.Gang<br>C4 schliessen   | CVT1 bis SSP 2.Gang<br>C2 schliessen              | CVT1 bis SSP 2.Gang<br>umschalten in CVT2<br>CVT2 bis SSP 3.Gang<br>C4 schliessen              | CVT1 bis SSP 2.Gang<br>umschalten in CVT2<br>CVT2 bis SSP 4.Gang<br>C3 schliessen | x  | CVT1 bis SSP 2.Gang<br>umschalten in CVT2              |
| CVT2 | CVT2 bis SSP 2.Gang<br>umschalten in CVT1<br>CVT1 bis SSP 1.Gang<br>C4 schliessen              | CVT2 bis SSP 2.Gang<br>C1 schliessen              | CVT2 bis SSP 3.Gang<br>C4 schliessen   | CVT2 bis SSP 4.Gang<br>C3 schliessen  | CVT2 bis SSP 2.Gang<br>umschalten in CVT1              | x  |

Tabelle 3.1: Schaltvorgang zwischen verschiedenen Betriebszuständen

### 3.3.2 Modellierung der Getriebesteuerung

Die Modellierung der Getriebesteuerung ist auf das Notwendigste reduziert. Abhängig von aktuellem und gewünschtem Getriebemodus wird mit Hilfe der Daten aus Tabelle 3.1 der Ziel-Betriebspunkt des Getriebes festgelegt. Die dafür notwendige Zieldrehzahl wird direkt ausgegeben, die Berechnung der optimalen Schalt-Trajektorie entfällt. Ist eine Schaltung notwendig und der entsprechende Synchronpunkt erreicht, werden die entsprechenden Kupplungen digital, also ohne Regelung der Zwischenzustände mit schleifenden Kupplungen angesteuert.

## 3.4 Regelung der E-Maschinen

### 3.4.1 Beschreibung der Funktionsweise der E-Maschinenregelung

Eine Aufgabe der E-Maschinen-Steuerung ist es sicherzustellen, dass das vom Fahrer gewünschte Antriebsmoment  $M_o$  gestellt wird. Wurde z.B. das Moment des Verbrennungsmotors höher gewählt als für den Vortrieb notwendig, arbeiten die E-Maschinen generatorisch und laden den Speicher. In den eCVT-Modi müssen die E-Maschinen zudem die Drehzahl des Verbrennungsmotors einregeln. Die Steuerung der E-Maschinen unterteilt sich also in zwei Teilfunktionen: Steuerung in den eCVT-Modi und Steuerung in den festen Gängen.

#### Steuerung in den eCVT-Modi

In den eCVT-Modi lassen sich die E-Maschinenmomente abhängig von  $M_i$ ,  $M_{o,des}$ ,  $\dot{\omega}_i$  und  $\dot{\omega}_o$  mit Hilfe von Gleichung 2.17 berechnen. Im rein elektrischen Betrieb ist das Moment des Verbrennungsmotors  $M_i$ , außer während Start- und Stoppvorgängen, gleich Null, genauso wie die Drehzahländerung  $\dot{\omega}_i$  des Verbrennungsmotors.

Im verbrennungsmotorischen Betrieb ist  $M_i$  das aktuell vom Verbrennungsmotor gestellte Kurbelwellenmoment. Die Getriebesteuerung berechnet die Wunschkrehzahl  $\omega_{i,soll}$  des Verbrennungsmotors, vgl. Abschnitt 3.3. Die zu der optimalen Trajektorie gehörige Drehzahländerung  $\dot{\omega}_i$  muss die E-Maschinenregelung bestimmen.  $M_{o,des}$  ist das vom Fahrer vorgegebene Fahrmoment. Die Beschleunigung der Getriebeausgangswelle  $\dot{\omega}_o$  ist proportional zur Fahrzeugbeschleunigung:  $\dot{\omega}_o = a_{Fzg} \frac{i_{HAG}}{r_{Rad}}$ . Diese wird aus dem gewünschten Fahrmoment und den Fahrwiderständen abgeschätzt  $a_{Fzg} m_{Fzg} = \frac{M_{o,des} \cdot i_{HAG}}{r_{Rad}} - F_{Fahrwiderstände}$ .

#### Regelung in den festen Gängen

In den festen Gängen lassen sich die E-Maschinenmomente mit Formel 2.16 berechnen. Die Größe  $\dot{\omega}_o$  wird - wie im vorherigen Abschnitt beschrieben - aus dem geforderten Fahr-

moment abgeschätzt.

### 3.4.2 Modellierung der E-Maschinenregelung

Wie die Modellierung der Getriebesteuerung spielt auch die Abbildung der E-Maschinensteuerung und -regelung eine untergeordnete Rolle. Die beiden oben genannten Teilfunktionen sind in zwei Berechnungsblöcken abgebildet. Eine Besonderheit in der Modellierung kommt der aufwändigen Bestimmung der optimalen Drehzahltrajektorie des Verbrennungsmotors zu. Diese wird durch einen limitierten PI-Regler angenähert, der  $\omega_{i,soll}$  als Ziel- und  $\omega_i$  als Istgröße verwendet, siehe Abbildung 3.10. Eine geeignete Limitierung von  $\dot{\omega}_i$  stellt sicher, dass auch während Schaltvorgängen die Batteriegrenzen eingehalten werden. Auf diese Weise gelingt es, die Solldrehzahl des Verbrennungsmotors stabil einzuregeln, ohne Systemgrenzen zu verletzen. Größere Abweichungen zu einer detaillierteren Modellierung ergeben sich in den Zugkraft- und Drehzahlverläufen während Schaltvorgängen. Dies hat aber keinen relevanten Einfluss auf die Untersuchungen dieser Arbeit. Eine genauere Modellierung entfällt daher.

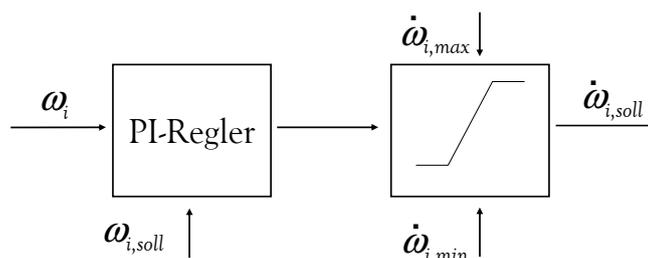


Abbildung 3.10: Regelung der Größe  $\dot{\omega}_i$ , die für die Berechnung der E-Maschinenmomente  $M_a$  und  $M_b$  notwendig ist

## 4 Online optimierende Betriebsstrategie

Die in Abschnitt 1.2 genannten Ziele lassen sich nur mit einer intelligenten Betriebsstrategie erreichen, die die Möglichkeiten des komplexen Systems voll ausschöpft. Der hybride Antriebsstrang bietet mit der Option zum Batterieladen bzw. -entladen gegenüber Standardfahrzeugen einen weiteren Freiheitsgrad, den nicht der Fahrer, sondern die Betriebsstrategie festlegen soll. Im Falle des hier zu Grunde liegenden Fahrzeugs mit eCVT-Getriebe wird zudem die Drehzahlwahl von einer diskreten zu einer kontinuierlichen Fragestellung erweitert. Damit ergibt sich für die Betriebsstrategie ein komplexes zweidimensionales Optimierungsproblem: Wie sollen abhängig von Fahrerwunsch und Fahrzeugzustand Drehzahl und Moment des Verbrennungsmotors gewählt werden, um in Summe aller Kriterien das Optimum zu erreichen? Einen vielversprechenden Ansatz stellt die *Online-Optimierung* dar (vgl. Abschnitt 1.1.2). In diesem Kapitel wird eine für das untersuchte Fahrzeug passende Betriebsstrategie auf Basis der *Online-Optimierung* entwickelt 4.1. Es folgt eine Beschreibung der Implementierung in Modelica 4.2 und eine Diskussion der Rechenergebnisse.

### 4.1 Entwurf der Online-Optimierung

#### 4.1.1 Aufbau und Bestandteile der Online-Optimierung

Der Online-Optimierungsalgorithmus legt in zwei Teilschritten Verbrennungsmotordrehzahl und -moment fest.

##### Drehzahlwahl

Der Funktionsblock „Drehzahlwahl“ (vgl. Abschnitt 3.1) wählt die optimale Drehzahl des Verbrennungsmotors. Wichtige Eingangsgrößen sind Fahrmomentenanforderung des Fahrers, Fahrzeuggeschwindigkeit und die gewünschte Batterieleistung. Fahrmomentenanforderung und Fahrzeuggeschwindigkeit sind von Fahrer bzw. Fahrzeug vorgegeben. Den Zielwert für die Batterieleistung muss die Betriebsstrategie selbst wählen. Er hängt einerseits vom Ladezustand des Speichers ab: Ein leerer Speicher sollte tendenziell eher geladen werden als ein voller. Andererseits soll der Speicher möglichst effizient gela-

#### 4 Online optimierende Betriebsstrategie

den werden. Daher beeinflusst zudem die Effizienz des aktuellen Betriebspunktes die gewünschte Ladeleistung: Punkte, die ein Laden des Speichers mit geringen Verlusten ermöglichen, sollten für eine Lastpunktanhebung stärker genutzt werden als Punkte, in denen der Speicher nur unter hohen Verlusten geladen werden kann. Damit beeinflusst die Gangwahl die gewünschte Batterieleistung, die ihrerseits wiederum die Gangwahl beeinflusst. Die beiden Größen können also unter den getroffenen Prämissen nicht unabhängig voneinander festgelegt werden. Für die Wahl des Getriebemodus ist eine mehrdimensionale Optimierung notwendig, die neben Getriebemodus und Drehzahl gleichzeitig die Batterieleistung berücksichtigt.

Um das Problem beherrschbar zu machen, wird es in Teilprobleme untergliedert. Für die vier festen Gänge (*FG1* bis *FG4*), die beiden eCVT-Modi und den rein elektrischen Betrieb werden in eigenen Teiloptimierungen Minima gesucht. Der Betriebspunkt, der zu dem günstigsten Wert führt, gibt den Betriebspunkt vor. Abbildung 4.1 zeigt den Aufbau der Optimierung im Funktionsblock „Gangwahl“.

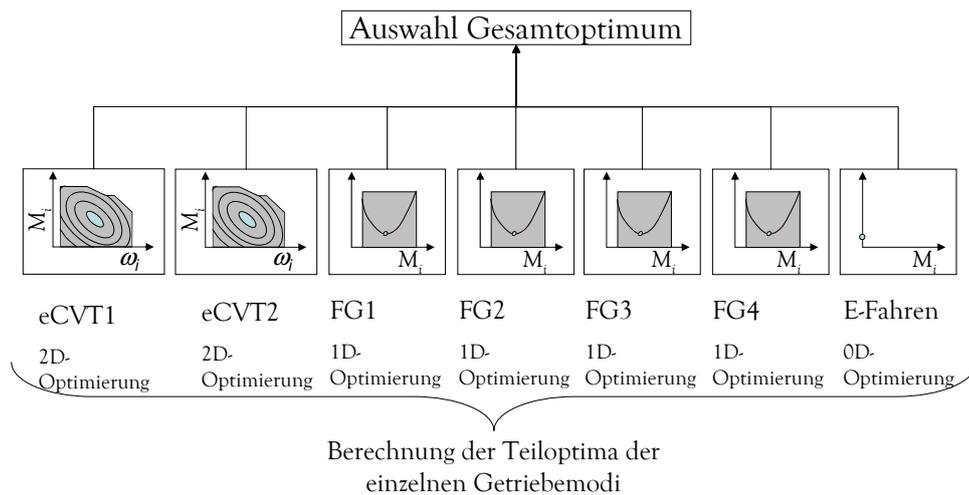


Abbildung 4.1: Aufbau der Online-Optimierung

Nur im elektrischen Fahren sind mit der Wahl des Getriebemodus alle Freiheitsgrade festgelegt. In den festen Gängen kann die Batterieleistung bzw. das Motormoment variiert werden, es ergibt sich ein eindimensionales Unterproblem. In den eCVT-Modi bietet die Drehzahl des Verbrennungsmotors einen weiteren Freiheitsgrad, so dass ein zweidimensionales Optimierungsproblem entsteht. Der Optimierungsalgorithmus beschränkt sich bei der Suche jeweils auf die Bereiche, die die Randwertberechnung als zulässig freigegeben hat (vgl. Abschnitt 3.2). Finden sich in einem Getriebemodus keine zulässigen Punkte, wird er von der Optimierung ganz ausgenommen.

### Wahl Moment Verbrennungsmotor

Der gewählte Gang mit der zugehörigen Drehzahl dient als Sollwert für die Getriebe- steuerung. Da dieser Sollwert in transienten Phasen nicht dem tatsächlich eingestellten Ist-Wert entspricht, kann das in der Drehzahl-Optimierung bestimmte Verbrennungsmo- tormoment nicht verwendet werden: Es stellt ein Optimum für die Zieldrehzahl, nicht für die Ist-Drehzahl dar. Der Funktionsblock *Ladezustandregelung* muss also in einer er- neuten Optimierung das optimale Verbrennungsmotormoment für die Ist-Drehzahl fest- legen. Das Vorgehen entspricht dem bei der Drehzahlwahl. Der Berechnungsumfang be- schränkt sich auf eine 1-D-Optimierung, da nur der Ist-Getriebemodus bei der aktuellen Drehzahl untersucht werden muss. Im rein elektrischen Betrieb ist der Funktionsblock *Ladezustandregelung* inaktiv, da Fahrerwunsch und Geschwindigkeit alle Freiheitsgrade festlegen.

### 4.1.2 Entwurf der Gütefunktion

Die Online-Optimierung benötigt eine Gütefunktion  $\Gamma$ , die bewertet, wie gut der jeweilige Betriebspunkt geeignet ist, die in Abschnitt 1.2 gesteckten Ziele zu erreichen [32]. Bewer- tet wird also die Effizienz des jeweiligen Betriebspunktes, die Zyklisierung der Batterie und das Einhalten der Fahrleistungsvorhalte. Die Gütefunktion setzt sich damit aus ver- schiedenen Teilfunktionen zusammen, die sich abhängig von gegebenen Größen ( $M_{o,des}$  und  $\omega_o$ ) und den zu bestimmenden Größen (Getriebestatus  $g$ , Verbrennungsmotormo- ment  $M_i$  und -drehzahl  $\omega_i$ ) berechnen lassen.

$$\Gamma = \sum_n^{i=1} \gamma_i(g, M_i, \omega_i, M_{o,des}, \omega_o) \quad (4.1)$$

Im Folgenden werden geeignete Teilfunktionen beschrieben.

### Physikalische Verluste

Beispielsweise [82] schlägt einen Ansatz vor, der die verschiedenen Betriebspunkte an- hand der entstehenden Verlustleistungen bewertet. Diese setzen sich aus den Einzelver- lusten der beteiligten Komponenten zusammen. So wird der Betriebspunkt am besten bewertet, der den optimalen Gesamtwirkungsgrad aufweist.

$$\gamma_{Verl} = P_{Verl,VM} + P_{Verl,EMA} + P_{Verl,EMB} + P_{Verl,Bat} + P_{Verl,Get} \quad (4.2)$$

mit:

## 4 Online optimierende Betriebsstrategie

|                |                                 |
|----------------|---------------------------------|
| $P_{Verl,VM}$  | Verluste des Verbrennungsmotors |
| $P_{Verl,EMA}$ | Verluste in der E-Maschine A    |
| $P_{Verl,EMB}$ | Verluste in der E-Maschine B    |
| $P_{Verl,Bat}$ | Verluste in der Batterie        |
| $P_{Verl,Get}$ | Getriebeverluste                |

### Äquivalenzkosten

Es genügt nicht, nur die aktuell anfallenden physikalischen Verluste zu betrachten, weil dabei der Energieaustausch mit der Batterie unberücksichtigt bliebe. Nach Formel 4.2 würde immer der Verbrennungsmotor abgeschaltet, da dann die großen Verbrennungsmotorverluste entfallen. Die aufgewandte elektrische Energie stünde dagegen kostenlos zur Verfügung. [50] hat zu diesem Problem eine Lösung vorgeschlagen, kam aber zu dem Schluss, dass seine Betrachtungsweise vermutlich nicht für alle Punkte hinreichend ist. An dieser Stelle soll die in [50] vorgeschlagene Lösung weiterentwickelt werden. Dazu wird die elektrische Leistung des zu bewertenden Betriebspunktes mit einem Äquivalenzfaktor  $\xi$  gewichtet und der Gütefunktion zugerechnet:

$$\gamma_{\text{Äquivalenzkosten}} = \xi \cdot P_{Bat,ist} \quad (4.3)$$

Bei der Bestimmung des Äquivalenzfaktors  $\xi$  müssen verschiedene, im Folgenden beschriebene Aspekte bedacht werden.

Zunächst wird ein Grenzfall betrachtet, in dem die Rekuperation keinen Einfluss hat: Basis ist zum Beispiel ein Fahrprofil, in dem maximal so stark verzögert wird, dass die Fahrwiderstände alleine die notwendige Bremswirkung aufbringen. In diesem Fahrprofil steht keine Energie zur Rekuperation zur Verfügung. Soll in diesem Fahrprofil elektrische Energie  $E_{elek}$  eingesetzt werden, um Anteile rein elektrisch zu fahren, muss der Speicher zuvor durch Lastpunktanhebung geladen werden. Dabei ergeben sich Verluste in Verbrennungsmotor, E-Maschinen und Batterie, die sich zu  $E_{Verl,LPAn}$  summieren. Für diesen Fall lässt sich eindeutig ein Äquivalenzfaktor  $\xi$  für Formel 4.3 bestimmen:

$$\xi = \frac{E_{Verl,LPAn}}{E_{elek}} = \frac{\int P_{Verl,LPAn} dt}{\int P_{Bat,laden} dt} \quad (4.4)$$

wobei sich die Verlustleistung beim Laden des Speichers  $P_{Verlust,LPAn}$  wie folgt berechnet:

$$P_{Verlust,LPAn} = P_{chem} - P_{Bat,laden} = P_{Bat,laden} \left( \frac{1}{\eta_{VM,rel} \cdot \eta_{EM,gen} \cdot \eta_{Bat,laden}} - 1 \right) \quad (4.5)$$

womit für den Äquivalenzfaktor  $\xi$  gilt:

## 4 Online optimierende Betriebsstrategie

$$\xi = \frac{1}{\eta_{VM,rel} \cdot \eta_{EM,gen} \cdot \eta_{Bat,laden}} - 1 = \frac{1 - \eta_{VM,rel} \cdot \eta_{EM,gen} \cdot \eta_{Bat,laden}}{\eta_{VM,rel} \cdot \eta_{EM,gen} \cdot \eta_{Bat,laden}} \quad (4.6)$$

Mit dieser Formel lässt sich  $\xi$  unter Annahme im Mittel konstanter Wirkungsgrade berechnen. Für diese Annahme sind sehr gute Ergebnisse zu erwarten: Im Teillastbereich liegt der relative Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors  $\eta_{VM,rel}$  weitgehend konstant bei 42,5 % (siehe Abschnitt 2.2.1), der generatorische Wirkungsgrad der E-Maschinen  $\eta_{EM,gen}$  kann mit 90% (vgl. Abschnitt 2.4), der der Batterie  $\eta_{Bat,laden}$  mit 95% (vgl. Abschnitt 2.5) abgeschätzt werden. Es ergibt sich die gewünschte Funktionsweise: in vielen Phasen werden generatorischen Betriebspunkten genau die Kosten gutgeschrieben, die für die Lastpunktanhebung anfallen. In Punkten, in denen der Speicher besonders effizient geladen werden kann, werden mehr Verluste gutgeschrieben als tatsächlich entstehen. Eine Lastpunktanhebung erscheint dann günstiger und wird verstärkt durchgeführt. Bei Punkten, in denen große Verluste für eine Lastpunktanhebung entstehen, verhält es sich umgekehrt: Eine Lastpunktanhebung wird vermieden, in extremen Punkten nahe der Vollast ist es sogar günstiger, eine Lastpunktabsenkung durchzuführen.

Basis der bisherigen Betrachtungen war ein Fahrprofil ohne Rekuperationsanteile. Welche Veränderungen ergeben sich nun in Zyklen mit Rekuperation? Dazu soll nochmals differenziert werden. Zunächst werden Zyklen ausgeklammert, in denen durch Rekuperation elektrische Energie im Überschuss zur Verfügung steht, beispielsweise lange Bergabfahrten. Betrachtet werden also Zyklen, in denen stets ein gewisser Teil der Speicherladung über Lastpunktanhebung erzeugt werden muss. Solange Lastpunktanhebung notwendig ist, ist es logisch, bei der Bewertung der generatorischen Betriebspunkte die Verluste abzuziehen, die der Lastpunktanhebung zuzurechnen sind. Für die Berechnung von  $\xi$  kann also weiterhin Formel 4.6 angewendet werden. Komplizierter ist die Frage beim Entladen der Batterie. Wurde ein Teil der elektrischen Energie umsonst gewonnen, müsste doch die elektrische Energie „günstiger“ und elektrisches Fahren in einem größeren Bereich effizient sein. Solange aber ein Teil der Energie durch Lastpunktanhebung erzeugt wurde, gilt diese Schlussfolgerung nicht. Die Grenze der Effizienz verschiebt sich nicht, wie die folgende Überlegung zeigt.

Es wird ein einfacher Fahrzyklus angenommen, der aus vier Phasen besteht, vgl. Abbildung 4.2.

- Phase 1 ist eine Konstantfahrt bei hoher Geschwindigkeit. Es kann nicht elektrisch gefahren werden. In dem gewählten verbrennungsmotorischen Betriebspunkt ist eine Lastpunktanhebung möglich, bei der für eine kWh elektrische Energie im Speicher 250 g Kraftstoff aufgewendet werden müssen.
- Phase 2 ist eine Verzögerung, die gerade so stark ist, dass die Bremswirkung alleine durch die Fahrwiderstände aufgebracht wird. Es kann keine Energie rekuperiert werden.
- Phase 3 ist eine Konstantfahrt bei niedriger Geschwindigkeit. Für die Strecke, die mit einer kWh im elektrischen Fahren zurückgelegt werden kann, müssen im ver-

#### 4 Online optimierende Betriebsstrategie

brennungsmotorischen Betrieb 280 g Kraftstoff aufgewendet werden.

- Phase 4 ist eine weitere Konstantfahrt bei etwas höherer Geschwindigkeit. Jetzt müssen für die Strecke, die mit einer kWh im elektrischen Fahren zurückgelegt werden kann, im verbrennungsmotorischen Betrieb nur 230 g Kraftstoff aufgewendet werden.

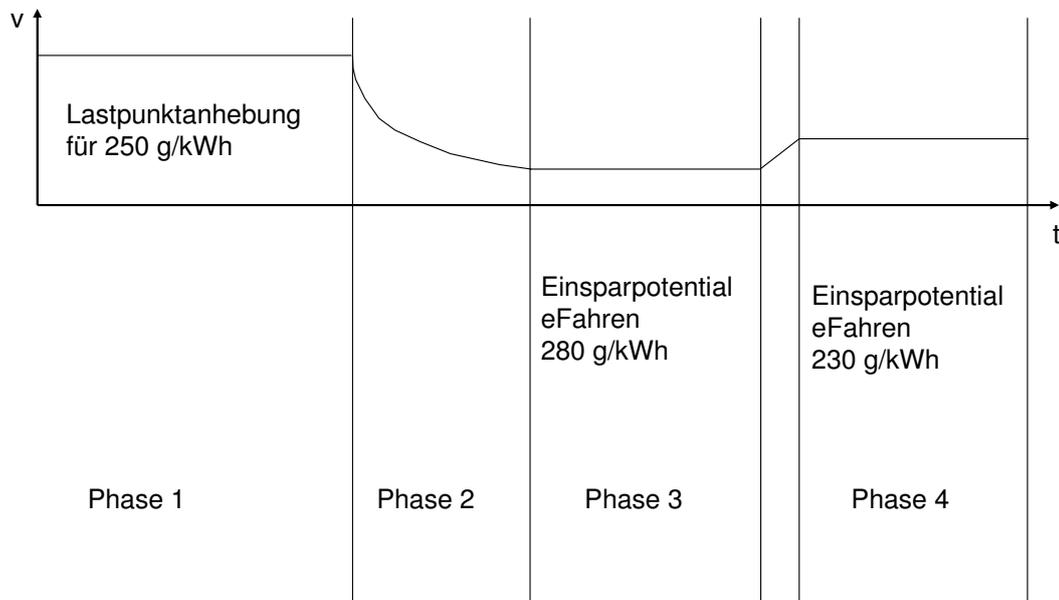


Abbildung 4.2: einfacher Fahrzyklus

Dieser Zyklus soll nun unter der Prämisse, dass der Speicher zu Beginn und Ende den selben Ladezustand hat, verbrauchsoptimal gefahren werden. Die Lösung ist offensichtlich: In Phase 1 wird durch Lastpunktanhebung gerade so viel Energie in den Speicher geladen, dass Phase 3 rein elektrisch gefahren werden kann:  $E_{LPAn,Phase1} = E_{eFahren,Phase3}$ . Das ist zielführend, da pro eingesetzter elektrischer Energie mehr Kraftstoff gespart wird als für die Erzeugung notwendig war:  $\Delta P_{chem,LPAn,Phase1} < \Delta P_{chem,eFahren,Phase3}$ . Phase 4 wird verbrennungsmotorisch gefahren, da sich hier die Verhältnisse umkehren: Durch die Einsparungen im elektrischen Fahren würden die Aufwände der Lastpunktanhebung nicht gedeckt.

Nun wird ein leicht abgewandelter Zyklus betrachtet, in dem in Phase 2 stärker verzögert wird als zuvor, so dass eine bestimmte Menge an elektrischer Energie  $E_{Rekup}$  rekuperierte wird. Wenn der Zyklus nun wieder verbrauchsoptimal gefahren werden soll, stellt sich die Frage, ob mit der rekuperierten Energie  $E_{Rekup}$  nun zusätzlich zu der bereits ohne Rekuperation lohnenden Phase 3 auch Teile der Phase 4 elektrisch gefahren

## 4 Online optimierende Betriebsstrategie

werden sollen. Für die rekuperierte Energie ist kein Kraftstoff aufgewendet worden, deswegen gibt es keine „Erzeugungskosten“. Ein Einsatz der Energie für das elektrische Fahren von Phase 4 ist trotz der verhältnismäßig geringen Kraftstoffersparnis von nur 230 g pro kWh lohnend  $\Delta P_{chem,Rekup} = 0 < \Delta P_{chem,eFahren,Phase4}$ . Allerdings wird so nicht die verbrauchsoptimale Lösung erreicht. Noch effizienter ist es, nicht den eFahren-Bereich auf Phase 4 zu erweitern, sondern die Lastpunktanhebung in Phase 1 einzuschränken, da damit 250 g pro kWh und nicht 230 g pro kWh eingespart werden können:

$$E_{LPA_n,Phase1} = E_{eFahren,Phase3} - E_{Rekup}$$

Die Zahlenwerte dienen der Veranschaulichung, das Beispiel ist auf beliebige Fahrzyklen übertragbar: In jedem Zyklus kann mit einer von der Fahrsituation abhängigen Effizienz elektrisch gefahren werden. Die Effizienz wird definiert als das Verhältnis von chemischer Leistung, die im günstigsten verbrennungsmotorischen Punkt eingesetzt werden muss, zu elektrischer Leistung, die für das elektrische Fahren eingesetzt werden muss. Im oben angeführten Beispiel wurden hier 230 bzw. 280 g pro kWh angenommen. Energetisch optimal ist es, alle Phasen elektrisch zu fahren, für die durch eine Lastpunktanhebung höherer Effizienz Energie in den Speicher geladen werden kann. Diese Effizienz-Grenze verschiebt sich durch Rekuperation erst, wenn soviel Energie rekuperiert wird, dass keine Lastpunktanhebung mehr notwendig ist. Damit ist Formel 4.6 auch unter Berücksichtigung der Rekuperation gültig.

Alleine Sonderfälle, in denen die benötigte elektrische Energie rein durch regeneratives Bremsen gewonnen werden kann, liegen nicht im Gültigkeitsbereich dieser Annahmen. Der Äquivalenzfaktor  $\xi$  ist für diese Fälle zu hoch, ein entsprechend hoher Ladezustand ist die Folge. Es gibt nun zwei Möglichkeiten: Entweder wird der Äquivalenzfaktor  $\xi$  bei hohen Ladezuständen reduziert oder es wird durch die Ladezustandsregelung ein weiteres Laden der Batterie unterbunden bzw. ein Entladen gefördert. Da beide Lösungen die identische Wirkung erzielen, wird die einfachere gewählt, um die Komplexität des Systems nicht unnötig zu steigern. Sehr hohe Rekuperationsanteile werden also durch die im nächsten Absatz beschriebene Ladezustandsregelung abgedeckt.

### Ladezustandsregelung

Um die Lebensdauerziele der Batterie zu erreichen, muss die Ladezustandsregelung den Ladezustand der Batterie  $SOC$  so steuern, dass die Batterie schwerpunktmäßig um ihren optimalen Betriebspunkt betrieben wird. Dazu wird abhängig vom SOC eine Batteriewunschleistung  $P_{Bat,Wunsch}$  vorgegeben. Bei hohen Ladezuständen wird ein Entladen, bei niedrigen ein Laden der Batterie gewünscht. In den einzelnen Betriebspunkten wird dann bewertet, wie stark die Ist-Batterieleistung von der Wunschbatterieleistung abweicht. Diese Abweichung führt zu „virtuellen“ Verlusten, so dass sich mit dem Gewichtungsfaktor  $\psi_{Ladezustand}$  formulieren lässt:

$$\gamma_{Ladezustand} = \psi_{Ladezustand} \cdot |P_{Bat,ist} - P_{Bat,Wunsch}| \quad (4.7)$$

## 4 Online optimierende Betriebsstrategie

Die Wahl des Gewichtungsfaktors  $\psi_{Ladezustand}$  legt fest, wie stark der Optimierungsalgorithmus bei der Suche nach einem effizienten Punkt durch die gewünschte Batterieleistung eingeschränkt ist. Im einen Extremfall mit  $\psi_{Ladezustand} = 0$  übt die gewünschte Batterieleistung keinen Einfluss aus. Der Optimierungsalgorithmus hat dann die größtmöglichen Freiheiten. Ob damit auch die besten Verbräuche zu erreichen sind, ist fraglich. Häufig wird sich dann ein ungünstiger Ladezustand einstellen, der sich negativ auf die Verfügbarkeit der Funktionen elektrisches Fahren bzw. Rekuperation auswirkt. Bei  $\psi_{Ladezustand} \rightarrow +\infty$  können nur Punkte, die die Batteriewunschleistung möglichst gut erfüllen, ein Minimum darstellen. Damit würde die Optimierung um einen Freiheitsgrad eingeschränkt. Eine Festlegung der genauen Bedatung erfolgt nach Interpretation der Rechenergebnisse in Abschnitt 4.3.1.

### Fahrbarkeitskriterium

Um einen souveränen Fahreindruck zu vermitteln, ein gutes Ansprechverhalten sicherzustellen und häufige Rückschaltungen zu vermeiden, ist es notwendig, dass der Antriebsstrang in jeder Fahrsituation schnell - also ohne Drehzahländerung - ein Mindestantriebsmoment  $M_{o,min,v}$  stellen kann. Um die in Abschnitt 1.2.2 aufgestellten Anforderungen zu erfüllen, wird eine weitere Gütefunktion eingeführt: Geschwindigkeitsabhängig ist ein Mindestmoment  $M_{o,min,v}$  gefordert, das ausgehend von dem zu bewertenden Betriebspunkt ohne Drehzahländerung, also nur durch Nutzung der Momentenreserven, verfügbar sein muss. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, werden „virtuelle“ Verluste berechnet. Da natürlich auch der zu bewertende Betriebspunkt das vom Fahrer angeforderte Moment erreichen muss, bietet sich die in Abbildung 4.3 dargestellte Logik an:

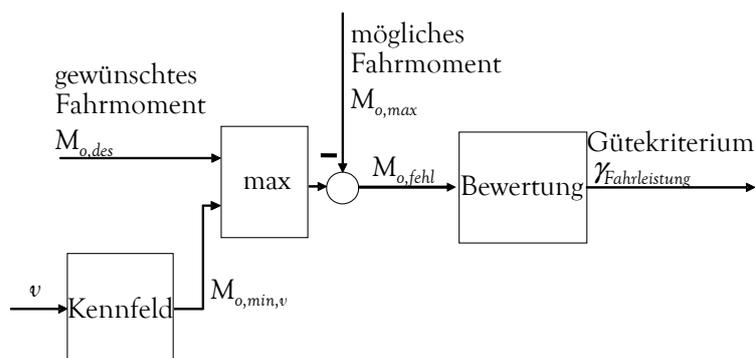


Abbildung 4.3: Berechnung der Fahrbarkeitskriteriums

Der Maximalwert aus dem vom Fahrer geforderten Moment und dem geschwindigkeitsabhängigen Mindestmoment wird mit dem Moment verglichen  $M_{o,max}(\omega_i)$ , das mit der im Optimierungsschritt zu bewertenden Drehzahl erreichbar ist. Diese Differenz wird dann wie in Gleichung 4.8 dargestellt bewertet.

## 4 Online optimierende Betriebsstrategie

$$\gamma_{\text{Fahrleistung}} = \begin{cases} 0 & \text{falls } M_{o,fehl} < 0 \\ \psi_{\text{Fahrbarkeit}} \cdot M_{o,fehl} & \text{falls } M_{o,fehl} \geq 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

Das fehlende verfügbare Moment  $M_{o,fehl}$  berechnet sich wie in Abbildung 4.3 dargestellt aus der Differenz zwischen gefordertem und verfügbarem Getriebeausgangsmoment:

$$M_{o,fehl} = \max(M_{o,des}, M_{o,min,v}) - M_{o,max} \quad (4.9)$$

### Kriterium Fahrverhalten

Ein zu häufiges Ändern der Verbrennungsmotordrehzahl bzw. ein zu häufiges Starten oder Abstellen ist weder aus Fahrverhaltenssicht noch aus Effizienzgründen wünschenswert. Für einen nachvollziehbaren und möglichst ruhigen Verlauf (siehe Kriterium  $\Omega$  in Abschnitt 1.2.2) sorgt eine weitere Gütefunktion, die eine Änderung der Drehzahl bestraft. Dabei muss die Bedatung so gewählt werden, dass nicht dauerhaft in ineffizienten Betriebspunkten mit hohen Drehzahlen verharrt wird. Drehzahlerhöhungen und -absenkungen sollen daher unterschiedlich gewichtet werden.

$$\gamma_{\text{Fahrverhalten}} = \begin{cases} \psi_{\text{Fahrverhalten},1} \cdot (\omega_i - \omega_{i,aktuell}) & \text{falls } \omega_i > \omega_{i,aktuell} \\ \psi_{\text{Fahrverhalten},2} \cdot (\omega_{i,aktuell} - \omega_i) & \text{falls } \omega_i < \omega_{i,aktuell} \end{cases} \quad (4.10)$$

### 4.1.3 Auswahl des Optimierungsalgorithmus

Die Gütefunktion  $\Gamma$  erlaubt nun, die möglichen Betriebspunkte zu bewerten. Ziel ist es, stets den günstigsten Punkt zu wählen. Dies setzt zwei Dinge voraus:

1. Die möglichen Betriebspunkte müssen ausreichend häufig bewertet werden, um schnell auf veränderte Randbedingungen reagieren zu können. Eine Bewertung in Abständen von z.B. einer Sekunde ist nicht ausreichend, da diese Zeit zwischen zwei Optimierungsschritten im ungünstigsten Fall als Totzeit vor einer möglichen Fahrzeugreaktion eingerechnet werden muss. Um z.B. bei einem Sprung in der Lastanforderung ein schnelles Rückschalten zu ermöglichen, ist ein Optimierungsschritt spätestens alle 100 ms notwendig.
2. Innerhalb dieser 100 ms muss aus den möglichen Betriebspunkten derjenige ausgewählt werden, der mit ausreichender Genauigkeit das globale Minimum der Gütefunktion  $\Gamma$  darstellt.

Wie im Abschnitt 4.1.1 beschrieben, sollen für die Funktion  $\Gamma$  in den eCVT-Modi und den festen Gängen jeweils mit möglichst wenigen Auswertungen Minima gefunden werden:

- Für die beiden eCVT-Modi wird jeweils eine zweidimensionale Optimierung mit den unabhängigen Variablen Motormoment  $M_i$  und Motordrehzahl  $\omega_i$  durchge-

## 4 Online optimierende Betriebsstrategie

führt. Der Suchbereich ist dabei auf das von der Randwertberechnung freigegebene Gebiet eingeschränkt zwischen  $\omega_{i,min}$  und  $\omega_{i,max}$  und die jeweiligen Maximal- und Minimalmomente  $M_{i,min}(\omega_i)$  und  $M_{i,max}(\omega_i)$ .

- In den festen Gänge ist die Motordrehzahl  $\omega_i$  durch die Fahrzeuggeschwindigkeit eindeutig festgelegt. Es wird eine ein-dimensionale Optimierung des Motormomentes  $M_i$  zwischen  $M_{i,min}$  und  $M_{i,max}$  durchgeführt.
- Im rein elektrische Betrieb steht der Verbrennungsmotor und soll kein Moment abstützen. Es handelt sich also um einen speziellen Betriebspunkt des eCVT 1, in dem mit Motormoment  $M_i=0$  und Motordrehzahl  $\omega_i=0$  beide unabhängigen Variablen festgelegt sind. Es ist keine Optimierung notwendig, der Wert der Gütefunktion  $\Gamma_{min,eFahren}$  kann direkt ausgewertet werden:  $\Gamma_{min,eFahren} = \Gamma(eCVT1, M_i = 0, \omega_i = 0)$ .

Da die Werte der Teilfunktionen  $\gamma_i$  teilweise aus Kennfeldern ausgelesen werden müssen, ist die Zielfunktion nicht-linear und lässt sich nicht analytisch beschreiben.

Für dieses Optimierungsproblem muss nun ein geeigneter Algorithmus gefunden werden. Einen guten Überblick über die verschiedenen Suchverfahren bieten z.B. [75, 14, 37]. Da es sich um ein nicht lineares Problem handelt, scheiden lineare Optimierungsverfahren, z.B. das Simplexverfahren aus. Gradientenverfahren scheinen ebenfalls ungünstig, da die Gütefunktion von Kennfeldern abhängt. Dies macht das Bilden von Ableitungen schwer. Statistische Algorithmen wie der Metropolis Algorithmus oder die Particle Swarm Optimization stellen eine Möglichkeit dar, die allerdings viele Auswertungen der Gütefunktion  $\Gamma$  erfordern. Beim Betrachten der Gütefunktionen (siehe z.B. Abbildung 4.18) fällt eine Eigenschaft der Gütefunktion  $\Gamma$  auf, die die Problematik sehr vereinfacht: Die Funktion hat nur ein Minimum, ausgehend von diesem Minimum steigt die Funktion stetig bis zu den Grenzen des Optimierungsbereiches an. In Sonderfällen liegt das Minimum direkt auf dem Rand. Für diese Art von Funktion gibt es ein sehr effizientes Suchverfahren, das darauf beruht, das Intervall, in dem das Minimum liegt, immer weiter zu verkleinern. Entsprechend den Intervall-Teilungsverhältnissen heißt es „Suchverfahren nach dem Goldener Schnitt“.

Im Folgenden ist das Verfahren zunächst für den eindimensionalen Fall beschrieben. Es gilt folgende Überlegung: Das gesuchte Minimum liegt zwischen den Punkten  $a$  und  $c$ , falls mindestens ein weiterer Punkt  $b$  zwischen  $a$  und  $c$  liegt ( $a < b < c$  bzw.  $a > b > c$ ), an dem der Wert der zu minimierenden Funktion kleiner ist als an den beiden Grenzpunkten des Intervalls:  $\Gamma(b) < \Gamma(c)$  und  $\Gamma(b) < \Gamma(a)$ . Durch diese Punkte ist das Minimum-Intervall beschrieben. Um dieses Intervall zu verkleinern, wird ein neuer Punkt  $x$  gewählt, der zwischen  $b$  und  $c$  liegt. Ist der Funktionswert  $\Gamma(x)$  größer als  $\Gamma(b)$ , verkleinert sich das Minimum-Intervall auf  $a, b, x$ , vgl. Abbildung 4.4.

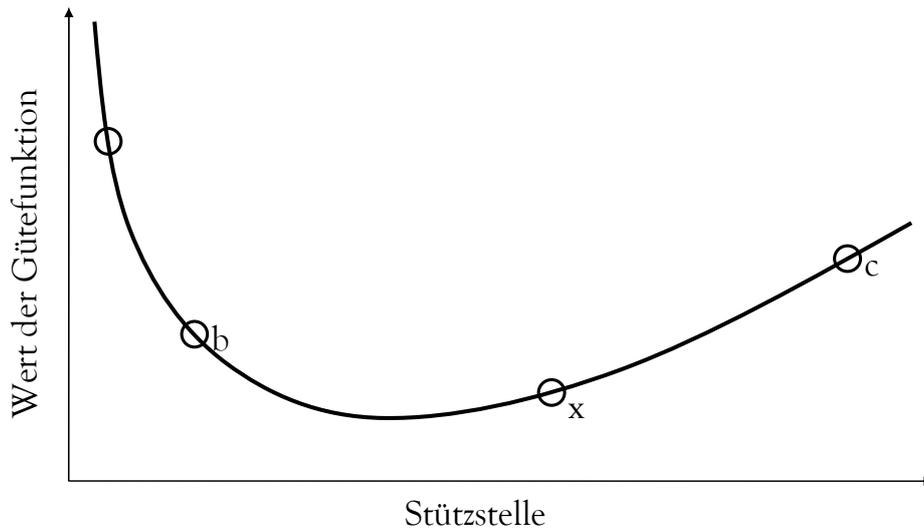


Abbildung 4.4: Suchverfahren nach dem Goldenen Schnitt

Anderenfalls ( $\Gamma(x) < \Gamma(b)$ ) kann das Minimum-Intervall auf die drei Punkte  $b, x, c$  verkleinert werden. In jedem Fall stellt der mittlere Punkt das bisher beste gefundene Minimum dar. Der Prozess kann fortgesetzt werden, bis die Randpunkte des Intervalls ausreichend nahe zusammengedrückt sind. Um dies mit möglichst wenigen Funktionsauswertungen zu erreichen, soll  $x$  so gewählt werden, dass sich das Intervall möglichst schnell verkleinert.

Dazu wird das Teilungsverhältnis  $w$  eingeführt, das angibt, auf welcher Strecke zwischen  $a$  und  $c$  der Punkt  $b$  liegt:

$$w = \frac{b - a}{c - a} \quad \frac{c - b}{c - a} = 1 - w \quad (4.11)$$

Das Verhältnis  $z$  ist analog definiert:

$$z = \frac{x - b}{c - a} \quad (4.12)$$

Das nächst kleinere Intervall nach einem weiteren Suchschritt wird, wie oben beschrieben, entweder die Länge  $x - a$ , also  $(w + z) \cdot (c - a)$  oder  $c - b$ , also  $(1 - w) \cdot (c - a)$ . Im ungünstigeren Fall liegt das Minimum in dem größeren der beiden Teilintervalle. Um diesen ungünstigen Fall zu optimieren, müssen beide Intervalle gleich groß sein, also  $w + z = 1 - w$ . Der Punkt  $x$  muss also so gewählt werden, dass gilt:

$$z = 1 - 2w \quad (4.13)$$

#### 4 Online optimierende Betriebsstrategie

Diese Gleichung für  $z$  hängt von  $w$  ab. Nimmt man nun an, dass  $w$  einen Arbeitsschritt früher durch den gleichen Algorithmus bestimmt wurde, unterteilt  $x$  die Strecke  $b$  nach  $c$  im gleichen Verhältnis wie  $b$  die Strecke zwischen  $a$  und  $c$ , also

$$\frac{z}{1-w} = w \quad (4.14)$$

Gleichung 4.13 und 4.14 ergeben folgende quadratische Gleichung:

$$w^2 - 3w + 1 = 0 \quad w = \frac{3 - \sqrt{5}}{2} \approx 0,38197 \quad (4.15)$$

Dieses Verhältnis ist auch bekannt als „Goldener Schnitt“, der diesem Suchverfahren seinen Namen gibt.

Das Verfahren lässt sich auf zweidimensionale Probleme erweitern, siehe Abbildung 4.5.

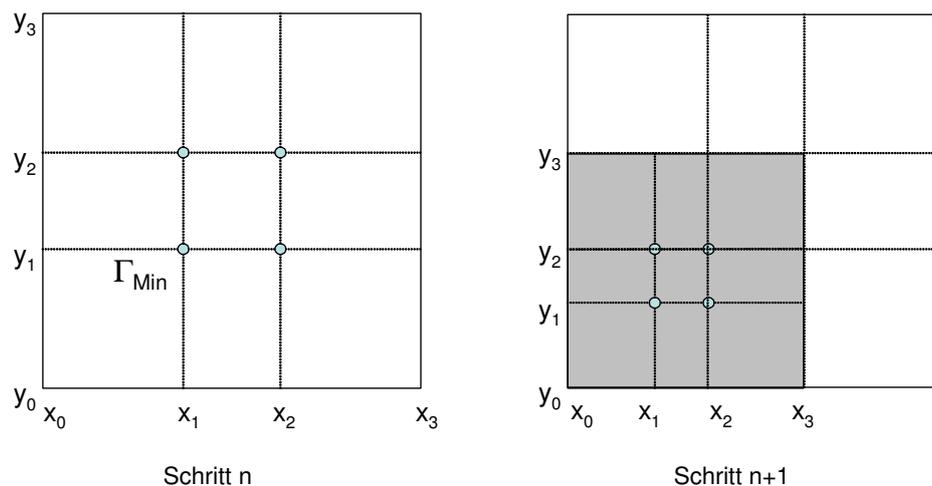


Abbildung 4.5: Suchverfahren nach dem Goldenen Schnitt für den zweidimensionalen Fall

In dem Optimierungsbereich werden vier Punkte  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_1, y_2)$ ,  $(x_2, y_1)$  und  $(x_2, y_2)$  ausgewertet, die den Optimierungsbereich in  $x$ - bzw.  $y$ -Richtung im Verhältnis des Goldenen Schnittes teilen. Der Punkt, der dem minimalen Wert der Gütefunktion  $\Gamma_{min}$  entspricht, wird beibehalten und bestimmt wie in Abbildung 4.5 dargestellt den Optimierungsbereich des nächsten Schrittes.

Für den zweidimensionalen Fall muss ein weiteres Problem gelöst werden: Das gerade beschriebene 2-D-Suchverfahren setzt einen quadratischen Suchbereich voraus. Die Form

## 4 Online optimierende Betriebsstrategie

des von der Randwertberechnung freigegebenen Suchbereiches erfüllt im Allgemeinen diese Anforderung nicht. Er wird daher mittels einer Transformation auf ein Einheitsquadrat abgebildet:

Eine einfache Lineartransformation (siehe Formeln 4.16 und 4.17) bildet den freigegebenen Suchbereich auf ein Einheitsquadrat ab. Abbildung 4.6 veranschaulicht die Zusammenhänge.

$$M_{i,norm} = \frac{M_i - M_{i,min}(\omega_i)}{M_{i,max}(\omega_i) - M_{i,min}(\omega_i)} \quad (4.16)$$

und

$$\omega_{i,norm} = \frac{\omega_i - \omega_{i,min}}{\omega_{i,max} - \omega_{i,min}} \quad (4.17)$$

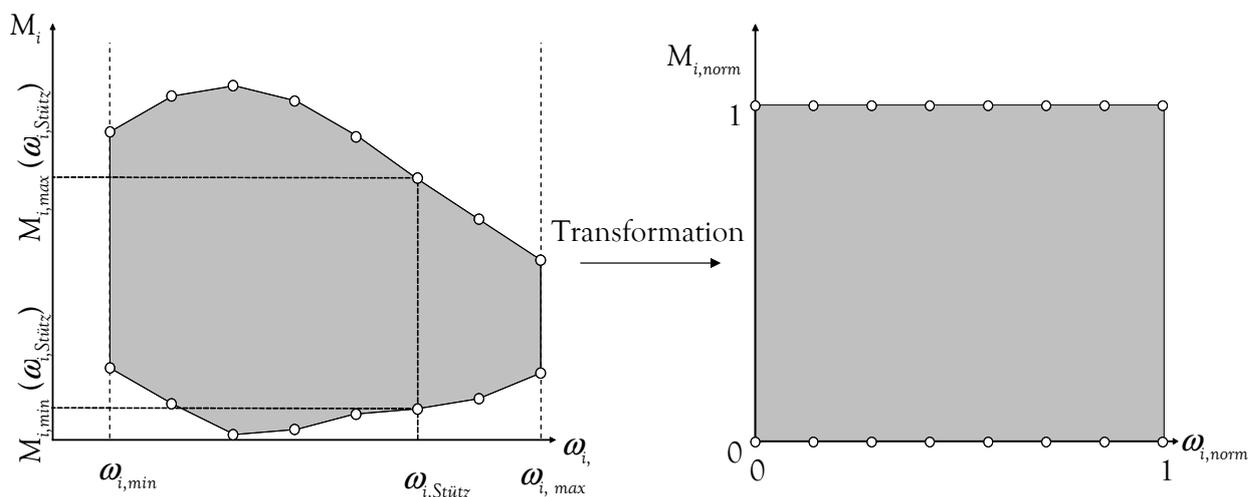


Abbildung 4.6: Transformation des 2-D-Suchbereiches auf normierte Achsen

### 4.1.4 Stabilisierung der Sollwertvorgabe

Trotz der Stabilisierungsfunktion  $\gamma_{Fahrverhalten}$  lässt sich nicht vermeiden, dass in bestimmten Fahrsituationen zwei verschiedenen Getriebemodi näherungsweise gleich günstig sind. Ein häufiges Umschalten ist die Folge. Um dieses Problem zu umgehen, werden weitere, zeitvariante Kosten eingeführt, die nach Schaltungen entsprechend folgender Logik aufgeschlagen werden:

Bei einer Schaltung von Gang  $n$  nach  $m$  erhalten alle Gänge außer  $n$  und  $m$  Zusatzkosten  $\Delta\Gamma_1$ , die bei einem gemeinsamen Startwert beginnen und exponentiell abfallen. Be-

sonders hohe Zusatzkosten  $\Delta\Gamma_2$  werden dem Getriebemodus  $n$  aufgeschlagen, um ein Pendeln zu unterbinden.

## 4.2 Implementierung der Funktionen in Modelica und Parametrisierung

Dieser Abschnitt beschreibt, wie das Simulationsmodell den zuvor entwickelten Betriebsstrategieansatz „Online-Optimierung“ abbildet. Anhand der Abbildung des Funktionsblockes *Drehzahlwahl* werden die wesentlichen Punkte der Umsetzung diskutiert. Das Vorgehen lässt sich auf den weniger komplexen Funktionsblock *Momentenwahl* übertragen. Dessen Modellierung ist daher nicht separat beschrieben.

### 4.2.1 Schnittstellen und Aufbau des Modells

Den Aufbau des Funktionsblockes *Drehzahlwahl* zeigt Abbildung 4.7. Vor der eigentlichen Optimierung sind einige Datenaufbereitungsschritte notwendig: Zum einen müssen für den aktuellen Optimierungsschritt Daten von Fahrer und Fahrzeug eingelesen werden. Zentrale Größen sind Ladezustand der HV-Batterie  $SOC$ , Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$ , angefordertes Fahrmoment  $M_{o,des}$  und aktuelle Drehzahl des Verbrennungsmotors  $\omega_i$ . Zudem greift der Funktionsblock auf zeitinvariante Bedatungen wie Komponentenkennfelder, Parameter von Kennlinien und Gewichtungsfaktoren zu. Ebenfalls variable Eingangssignale liefert der Funktionsblock *Randwertberechnung* mit den Daten des zulässigen Optimierungsbereichs.

Ein vorgeschalteter Berechnungsblock wertet weitere Eingangsgrößen der Gütefunktion  $\Gamma$  aus: Er berechnet abhängig vom Ladezustand der Hochvoltbatterie  $SOC$  die gewünschte Batterieleistung für die Teilfunktion  $\gamma_{Ladezustand}$  (vgl. Abschnitt 4.1). Für  $\gamma_{Fahrverhalten}$  wird abhängig von Fahrgeschwindigkeit  $v$  und angefordertem Fahrmoment  $M_{o,des}$  das Mindestmoment  $M_{o,min,v}$  berechnet. Zudem werden drehzahlabhängig die Verlustleistungskoeffizienten der E-Maschinen bestimmt.

#### 4 Online optimierende Betriebsstrategie

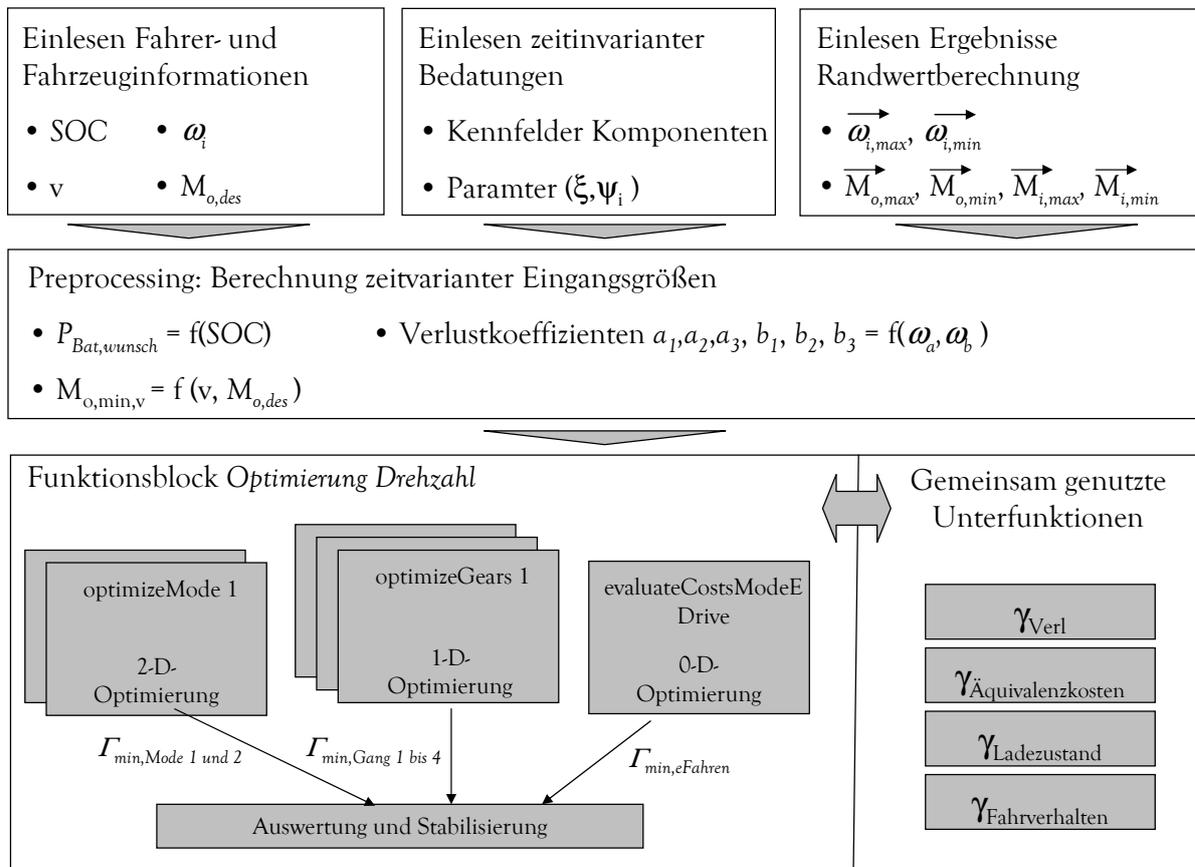


Abbildung 4.7: Struktur der obersten Ebene der Drehzahloptimierung

Die eigentliche Optimierung erfolgt im Funktionsblock *Optimierung Drehzahl*. Modelica ist darauf ausgelegt, selbst die optimalen Zeitpunkte festzulegen, zu denen das Gleichungssystem ausgewertet wird. Wegen der hohen Komplexität der hier umgesetzten Unterfunktion steigt die Rechengeschwindigkeit aber erheblich, wenn der Funktionsblock *Optimierung Drehzahl* zyklisch zu festen Zeitpunkten über eine `when`-Bedingung gestartet wird [97] (siehe Zeile 1 im Quellcodeausschnitt 4.1).

Aus der Randwertberechnung (vgl. Abschnitt 3.2) ist bekannt, in welchen Gängen bzw. Modi die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit darstellbar ist, ohne Drehzahlgrenzen der E-Maschinen oder des Verbrennungsmotors zu verletzen. In jedem Optimierungsschritt wird für diese Gänge und den rein elektrischen Betrieb eine Unterfunktion aufgerufen, die aus den übergebenen Daten jeweils den minimal möglichen Wert der Gütefunktion  $\Gamma_{min}$  ermittelt, vgl. Zeilen drei bis acht im Quellcode-Ausschnitt 4.1. Dabei sind drei verschiedene Unterfunktionen notwendig: `optimizeGear` für die festen Gänge, `optimizeMode`

## 4 Online optimierende Betriebsstrategie

für die eCVT-Modi und `evaluateCostsModeEDrive` für den rein elektrischen Betrieb. Die genaue Funktionsweise dieser Unterfunktionen beschreibt Abschnitt 4.2.2.

Ist ein Gang aufgrund überschrittener Drehzahlgrenzen nicht erlaubt, werden die Kosten nicht berechnet, sondern auf einen sehr hohen Wert gesetzt (im Beispiel  $10^{10}$ ), um eine Auswahl des Ganges auszuschließen, vgl. Zeilen zehn bis 15.

```
when sample(0,1/sampleRate) then // Trigger Optimierung
2
if Data.gearModeAllowed[1] then //falls erster Gang erlaubt ist
4   (GloptTi,optCostG1,resultData) :=
      optimizeGear(no.y, Data.ToGears[1], Data.niGears[1],
6     Data.TiMinGears[1], Data.TiMaxGears[1], Data,1);

8   resultDataG1:=resultData;

10 else // Platzhalter, falls erster Gang nicht erlaubt ist
    GloptTi:=0;
12   optCostG1:=1e10;

14   resultDataG1:=emptyResultData;
end if;
16 .
. // identisches Vorgehen für die übrigen Gänge
18 .
end when;
```

Quellcode 4.1: Aufruf des Optimierungsalgorithmus zu festen Zeitpunkten

Die für die sieben verschiedenen Optionen berechneten Kosten werden anschließend einer Funktion übergeben, die den günstigsten Gang wählt. Dies ist üblicherweise der mit den niedrigsten Kosten, die genaue Funktionalität beschreibt Abschnitt 4.1.4.

### 4.2.2 Umsetzung der Teilfunktionen

#### Funktionsblock *optimizeMode*

Die Funktion *optimizeMode* ist für beide eCVT-Modi identisch. Das Suchgebiet umfasst alle in dem jeweiligen Modus zulässigen Betriebspunkte. Nach der in Abschnitt 4.1.3 beschriebenen Transformation auf ein Einheitsquadrat wählt der Suchalgorithmus nach dem ebenfalls in 4.1.3 beschriebenen Schema Punkte  $(\omega_i, M_i)$  aus. An diesen ruft er eine Unterfunktion auf, die die Gütefunktionen  $\Gamma$  auswertet.

Diese Unterfunktion bestimmt zunächst abhängig vom gewählten Optimierungspunkt  $(\omega_i, M_i)$  die Zustandsgrößen, die für die Berechnung der Gütefunktion  $\Gamma$  notwendig sind: Die bekannten Größen  $\omega_i$  und  $\omega_o$  bestimmen  $\omega_a$  und  $\omega_b$  (Formel 2.10),  $M_i$  und  $M_o$  ermöglichen die Berechnung von  $M_a$  und  $M_b$  (Formel 2.17) und damit von  $P_{Bat}$  (Formel

## 4 Online optimierende Betriebsstrategie

3.1). Die Informationen über den Ladezustand der Batterie (*SOC*) und das angeforderte Fahrmoment  $M_{o,des}$  werden dem Bussystem entnommen. Der Funktionsblock *Randwertberechnung* liefert den maximalen und den minimalen Wert, den das Getriebeausgangsmoment erreichen kann ( $M_{o,max}$  und  $M_{o,min}$ ). Daraus wird das verfügbare Reservemoment bestimmt:  $M_{o,res} = M_{o,max} - M_{o,des}$ . Die einzelnen Gütefunktionen  $\gamma_i$  sind ebenfalls als Unterfunktionen implementiert. Sie erhalten die berechneten Zustandsgrößen und liefern die jeweiligen Gütemaße als Rückgabewert. Die Summe der Rückgabewerte entscheidet, wie sich der Optimierungsbereich weiter einschränkt.

Die Anzahl der Suchschritte ist als Parameter festgelegt. Ein Abbruch der Suche nach Einschränkung des Optimums auf einen tolerablen Bereich stellt keine Alternative dar. Im Falle der Nichtkonvergenz ergäbe sich eine Endlosschleife. Ein Abbruch vor der festgelegten Anzahl an Optimierungsschritten bringt keinen Vorteil, da für die Funktion im Steuergerät stets die maximal mögliche Rechenzeit vorgehalten sein muss. Bei vorzeitiger Beendigung würde die reservierte Rechenzeit ungenutzt verstreichen.

### Funktionsblock *optimizeGear*

Die Funktion *optimizeGear* ist für alle festen Gänge in gleicher Form anwendbar. Der Aufbau der Logik ähnelt stark der von *optimizeMode*; der Unterschied besteht darin, dass in den festen Gängen lediglich ein 1-D-Suchalgorithmus mit dem Freiheitsgrad  $M_i$  zum Einsatz kommt. Dieser bestimmt entsprechend Abschnitt 4.1.3 den Betriebspunkt, der dem Minimum der Gütefunktion entspricht. Die Suche beschränkt sich auf Werte zwischen den Grenzen  $M_{i,min}$  und  $M_{i,max}$ , die die Funktion *Randwertberechnung* ermittelt. Abhängig von dem im Optimierungsschritt untersuchten  $M_i$  können alle notwendigen Zustandsgrößen und damit die Gütefunktionen  $\gamma_i$  errechnet werden. Die Anzahl der Suchschritte ist durch einen Parameter festgelegt.

### Funktionsblock *evaluateCostsModeElek*

Im rein elektrischen Betrieb sind alle Freiheitsgrade definiert, es ist keine Optimierung notwendig. Der Funktionsblock *evaluateCostsModeElek* kann direkt die Teilfunktionen  $\gamma_i$  in dem resultierenden Betriebspunkt auswerten.

## 4.2.3 Parametrisierung

Die implementierten Funktionen lassen sich durch die Wahl der Parameter, Kennlinien und Kennfelder in unterschiedliche Richtungen ausprägen. Es gibt verschiedene Methoden, die Freiheitsgrade festzulegen. Es besteht die Möglichkeit, Optimierungsverfahren einzusetzen, um die Parameter für einen bestimmten Zyklus optimal zu wählen. Solche Methoden kommen beispielsweise bei der Applikation von Verbrennungsmotoren zum

## 4 Online optimierende Betriebsstrategie

Einsatz [53, 73, 73]. Vergleichbare Verfahren werden auch für Hybridbetriebsstrategien angewendet [10]. Bei diesen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Optimierungsalgorithmen zu guten Parameterabstimmungen führen. Allerdings können durch einfache Überlegungen und einige Versuche ähnlich gute Werte gefunden werden. Das lässt sich durch die Eigenschaften der Zielfunktion erklären: Sie weist häufig ein raues, flaches Minimum auf, das einfach zu treffen ist [41].

Es ist daher zu erwarten, dass eine systematische Parameteroptimierung die Ergebnisse dieser Arbeit nicht wesentlich beeinflusst. Dies gilt auch deswegen, weil der untersuchte Ansatz *Online-Optimierung* an sich bereits eine modellbasierte Optimierung darstellt, deren Eingangsgrößen im Wesentlichen objektive, physikalische Parameter sind. Aufgrund der Komplexität und des erheblichen Rechenaufwandes wurden daher keine Parameteroptimierungsverfahren eingesetzt. Die Methodik, die bei der Bedatung der Algorithmen zur Anwendung kam, ist im Folgenden beschrieben:

Viele Parameter der Betriebsstrategie bilden das mechanische, thermische oder elektrische Verhalten von Bauteilen ab. Diese Kenngrößen können aus Messungen übernommen werden. Dies gilt für folgende Werte:

- Daten für die Berechnung der Verlustleistungen für  $\gamma_{Verl}$ : Verbrennungsmotorverluste, E-Maschinenverluste, Getriebeverluste und Batterieverluste können direkt aus Messungen übernommen werden.
- Äquivalenzfaktor  $\xi$ : Mit den Durchschnittswerten  $\eta_{VM,rel} = 0,425$ ,  $\eta_{EM,rel} = 0,9$  und  $\eta_{Bat,laden} = 0,97$  ergibt sich  $\xi$  ungefähr zu 1,75. Für die Leistung, die dem Speicher entnommen wird, berechnet die Gütefunktion das 1,75-fache an Verlusten.

Bei der Festlegung folgender Parameter bestehen dagegen Freiheitsgrade:

- $P_{Bat,soll} = f(SOC)$  mit Gewichtungsfaktor  $\psi_{Ladezustand}$
- $M_{o,min,v}$  und  $\psi_{Fahrbarkeit}$
- Bedatung der Stabilisierung und von  $\psi_{Fahrverhalten}$
- Anzahl der Optimierungsschritte

Die folgenden Absätze beschreiben die Festlegung dieser Parameter. Es werden zwei Varianten erarbeitet: Zum einen die verbrauchsoptimale Parametrierung (Variante 1), zum anderen ein Datensatz, der auch alle anderen in Abschnitt 1.2.2 genannten Kriterien mit einbezieht (Variante 2). Auf diese Weise wird untersucht, welcher Unterschied sich bei der Online-Optimierung zwischen theoretischer und praktischer Kraftstoffeffizienz ergibt.

### Festlegung des Fahrbarkeitskriteriums

Die Gütefunktion  $\gamma_{Fahrleistung}$  benötigt eine Vorgabe für das geschwindigkeitsabhängige Mindestmoment  $M_{o,min,v}$ , das der Antriebsstrang zu jedem Zeitpunkt ohne Drehzahländerung stellen können muss. Datenvariante 1 ignoriert die Fahrbarkeitsanforderungen

## 4 Online optimierende Betriebsstrategie

und setzt  $M_{o,min,v}$  stets gleich Null. Für den vollständigen Datensatz wird  $M_{o,min,v}$  mit Hilfe der bekannten Fahrwiderstände und Fahrzeugparameter aus dem geforderten Beschleunigungsvermögen (siehe Abschnitt 1.2.2) berechnet.

### Festlegung und Gewichtung der Batteriewunschleistung

Die Parametrisierung der Batteriewunschleistung  $P_{Bat,soll}$  richtet sich in Parametersatz 2 nach den Anforderungen der Komponente, vgl. Abschnitt 2.5. Um eine angemessene Lebensdauer zu erreichen, soll der Speicher schwerpunktmäßig in einem mittleren Ladezustandsbereich mit  $50\% < SOC < 70\%$  betrieben werden. Die Wunschleistung wird daher abhängig vom Ladezustand vorgegeben: Bei zu niedrigen Ladezuständen wird ein Laden der Batterie angestrebt, bei zu hohen ein Entladen. Im mittleren Bereich ist die Batteriewunschleistung Null, siehe Abbildung 4.8.

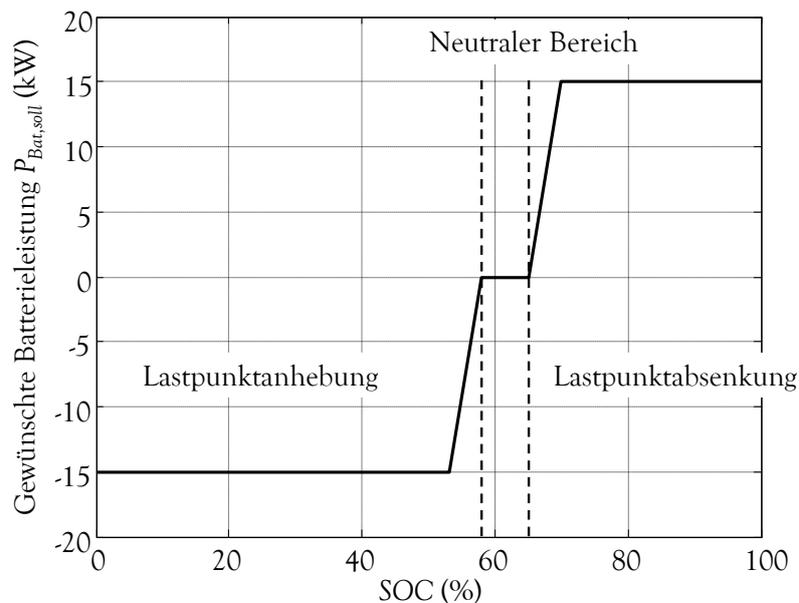


Abbildung 4.8:  $P_{Bat,soll}$  in Abhängigkeit des Ladezustandes  $SOC$

Die Bedatung des Gewichtungsfaktors  $\psi_{Ladezustand}$  hat maßgeblichen Einfluss auf die Wahl des Betriebspunktes. In folgendem Anwendungsbeispiel lässt sich die Funktionsweise der Gütefunktion abhängig von der Bedatung beobachten. Simuliert wird eine langsame Konstantfahrt, bei der das vom Fahrer angeforderte Antriebsmoment  $M_{o,des}$  variiert. Bei niedrigen Lastanforderungen wird in dem Beispiel bereits mit einem sehr geringen Gewichtungsfaktor von  $\psi_{Ladezustand}=0.1$  die gewünschte Batterieleistung genau eingehalten. Bei hoher Fahrmomentanforderung erscheint dagegen wegen des fallenden re-

#### 4 Online optimierende Betriebsstrategie

lativen Verbrennungsmotorwirkungsgrades nahe der Vollast eine Lastpunktanhebung ungünstig, vgl. Abbildung 4.9. Die Wahl des Faktors  $\psi_{Ladezustand}$  entscheidet dann darüber, ob die Wunschleistung dennoch eingestellt wird. Ein hoher Wert des Gewichtungsfaktors  $\psi_{Ladezustand}$  bewirkt, dass sich die Wunschleistung einstellt: im Beispiel ist mit  $\psi_{Ladezustand}=3$  zu erkennen, dass die die geforderten 8 kW so lange gestellt werden, wie es das System erlaubt. Erst wenn das angeforderte Getriebeausgangsmoment 335 Nm überschreitet, wird die Batterie weniger stark geladen, weil das maximale Verbrennungsmotormoment erreicht ist. Mit  $\psi_{Ladezustand}=1$  dagegen ist die Wunschladeleistung weniger stark gewichtet und der Effizienz kommt entsprechend mehr Bedeutung zu. Die optimalen Betriebspunkte liefern dann bereits ab einem Getriebeausgangsmoment von 250 Nm die geforderten 8 kW Ladeleistung nicht mehr, da auf diese Weise die weniger effizienten Betriebspunkte des Verbrennungsmotors nahe der Vollast vermieden werden können.

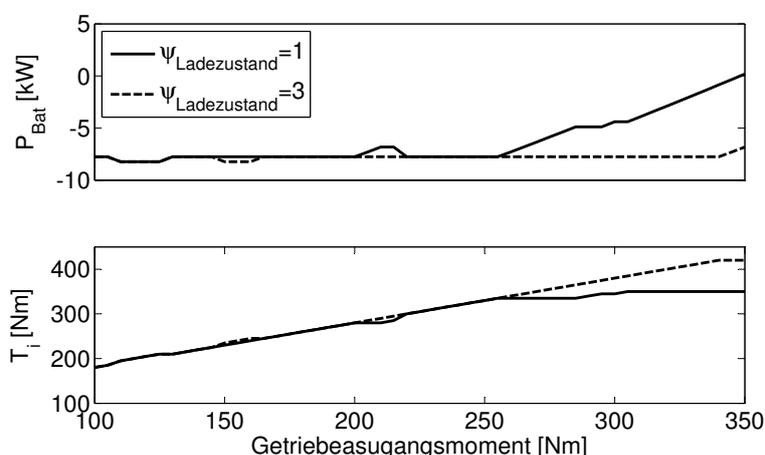


Abbildung 4.9: Einfluss der Lastanforderung auf die Batterieleistung

Nach einigen Experimenten dieser Art lassen sich folgende Ergebnisse festhalten:

- Ein Wert des Gewichtungsfaktors von 0,5 ist gut geeignet für den mittleren Ladezustandsbereich ( $55\% < SOC < 65\%$ ), in dem das Moment des Verbrennungsmotors hauptsächlich nach Effizienzkriterien gewählt werden soll und weniger nach dem Ladezustand.
- Ein Gewichtungsfaktor von 3 ist für hohe oder niedrige Ladezustände ( $SOC < 50$  oder  $SOC > 70$ ) geeignet, in denen der Fokus eher auf der Rückführung in den günstigen mittleren Bereich liegt und weniger auf der resultierenden Effizienz.
- Für die Zwischenbereiche eignen sich lineare Übergänge.

$\psi_{Ladezustand}$  wird abhängig vom  $SOC$  aus einer entsprechenden Kennlinie bestimmt.

Die verbrauchsoptimale Bedatung gewichtet die Batterieanforderungen deutlich weniger; es wird daher über den gesamten Ladezustandsbereich ein Gewichtungsfaktor von

0,5 gewählt.

### Bedatung der Stabilisierungsfunktionen

Im verbrauchsoptimalen Parametersatz sind alle Stabilisierungsfunktionen mit Null bedatet. Für Parametervariante 2 wird in Simulationen ein Kompromiss zwischen Effizienz (niedriger Kraftstoffverbrauch) und Fahrverhalten (möglichst niedrige Kennzahl  $\Omega$ ) gesucht, vgl. Abschnitt 1.2.2. In einer Variationsrechnung haben sich folgende Werte als günstig erwiesen:

- $\psi_{\text{Fahrverhalten1}} = 0,1$
- $\psi_{\text{Fahrverhalten2}} = 0,01$
- $\Delta\Gamma_1 = 0,5 \text{ kW}$
- $\Delta\Gamma_2 = 2 \text{ kW}$

Mit dieser Bedatung ergibt sich im FTP72-Zyklus zwar ein Kraftstoffmehrverbrauch von 0,37%, allerdings verbessert sich die Kennzahl  $\Omega$  um 24%<sup>1</sup>. Abbildung 4.10 zeigt das Ergebnis im Vergleich zu Datensatz 1. Dargestellt sind die resultierenden Drehzahl- und Gangverläufe in einem Ausschnitt des FTP72.

---

<sup>1</sup>Die Prozentwerte beziehen sich auf einen modifizierten Parametersatz 2 ( $\psi_{\text{Fahrverhalten}} = 0, \Delta\Gamma = 0$ ). Der Vergleich zwischen Parametersatz 1 und 2 erfolgt später in Kapitel 4.3.1

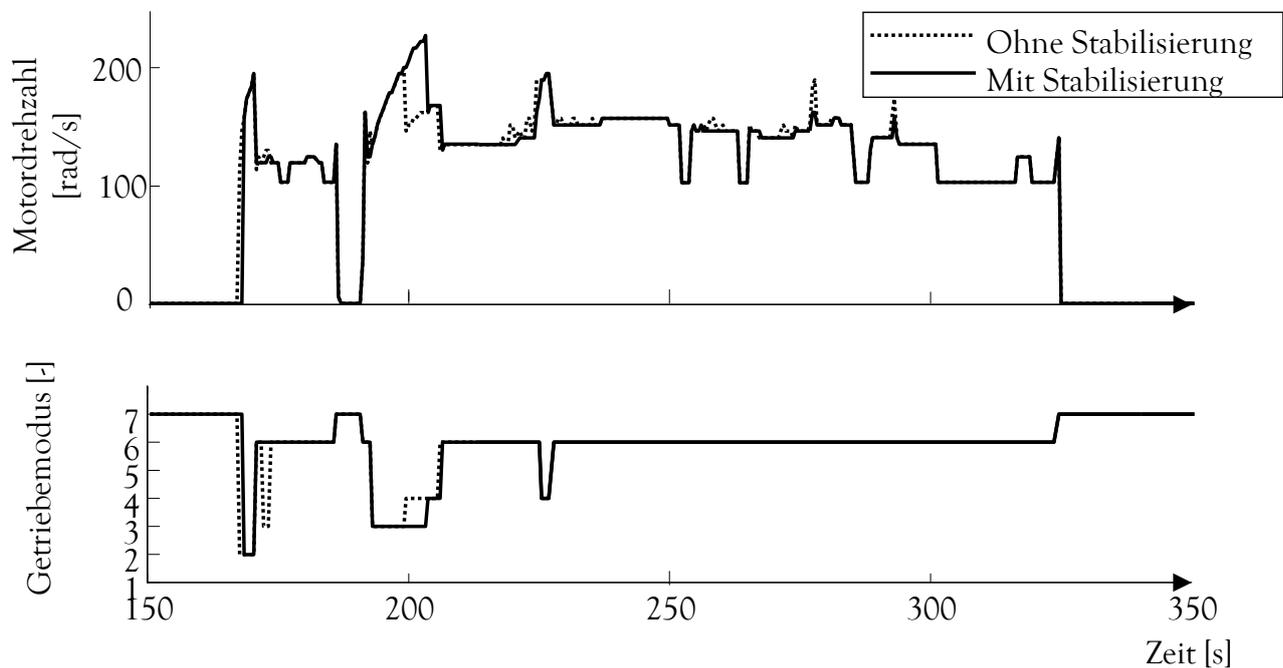


Abbildung 4.10: Drehzahlverläufe mit und ohne Stabilisierung

Vor- und Nachteile der Stabilisierung lassen sich erkennen: Ohne Stabilisierung ergibt sich ein unruhiger Drehzahlverlauf. Auch für kleinste Verbesserungen der Zielfunktion nimmt die Optimierung Drehzahländerungen in Kauf. Deutlich verbessert zeigt sich der stabilisierte Drehzahlverlauf. Für den Fahrer ist eine klare Korrelation zwischen seiner Fahrpedalbedienung und der Rückmeldung des Antriebsstrangs ersichtlich: Die Drehzahl des Verbrennungsmotors steigt und fällt gleichzeitig mit dem angeforderten Drehmoment bzw. der Fahrgeschwindigkeit. Ein Nachteil der Stabilisierung ist dagegen, dass teilweise weniger effiziente Zustände länger gehalten werden: Bei Sekunde 170 verzögert sich im Beispiel der Wechsel in den bereits effizienteren verbrennungsmotorischen Betrieb. Ebenso wird bei Sekunde 200 erst später zu niedrigeren und damit verbrauchsgünstigeren Drehzahlen hochgeschaltet.

### Anzahl der Optimierungsschritte

Die Anzahl der Suchschritte soll auf das notwendige Minimum reduziert werden. Sobald das Minimum  $\Gamma_{min}$  auf einen Bereich eingegrenzt wurde, der die Regelgenauigkeit der Stellsysteme unterschreitet, kann die Suche abgebrochen werden. Auf Basis dieser Überlegungen wurde festgelegt, dass die Abbruchbedingung erreicht ist, sobald die beiden mittleren Punkte des Suchintervalls nicht mehr als  $1 \text{ Nm}$  bzw.  $1 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$  voneinander abweichen. Folgende Abbildung zeigt das Ergebnis der Untersuchung.

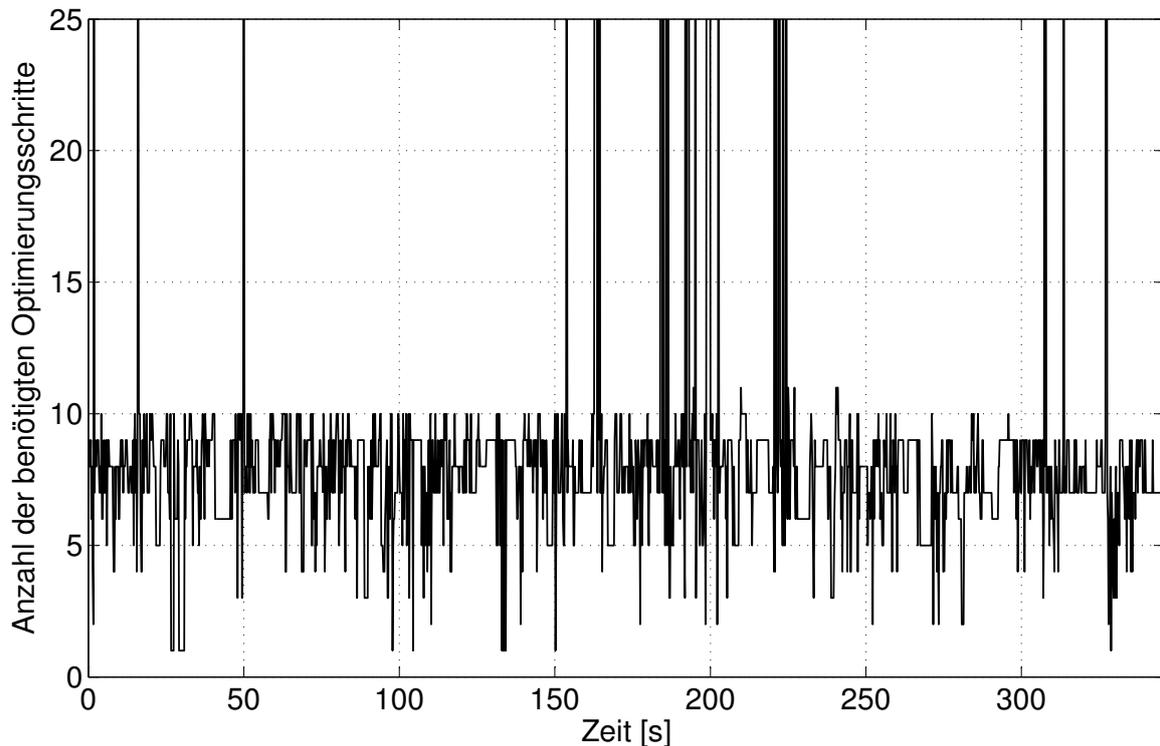


Abbildung 4.11: Erforderliche Anzahl an Optimierungsschritten des in *Dymola* implementierten Optimierers

Es ist zu erkennen, dass unter den beschriebenen Kriterien für das Suchverfahren in der Regel zehn Suchschritte ausreichen, um das Minimum zu finden. Die Spitzen treten auf, wenn das Suchverfahren das Minimum nicht auf die geforderte Genauigkeit eingrenzen kann. In diesen Fällen weist die Gütefunktion ein raues flaches Minimum auf. Der nach zehn Schritten gefundene Wert weicht in diesen Fällen von dem exakten Minimum stets weniger als 100 W ab. Im Fahrzeug stellt damit eine Begrenzung auf zehn Suchschritte einen guten Mittelweg zwischen Rechenzeit und Optimierungsgenauigkeit dar.

### 4.3 Rechenergebnisse und Analyse

Dieser Abschnitt fasst die Ergebnisse der Simulationen zusammen, die mit dem Modell der online-optimierenden Betriebsstrategie durchgeführt wurden. Betrachtet werden dabei zwei Parametervarianten: eine ausschließlich auf niedrigen Verbrauch optimierte, und eine, die auch die übrigen Ziele aus Abschnitt 1.2.2 berücksichtigt. So wird ersichtlich, welcher Mehrverbrauch durch den Übergang von einer theoretischen zu einer praktisch im Fahrzeug einsetzbaren Lösung entsteht.

Es folgt ein Schritt, der für diese Arbeit große Bedeutung hat: Die Funktionsweise der Online-Optimierung wird analysiert, um die wichtigen Wirkzusammenhänge für die einzelnen Funktionen der Betriebsstrategie abzuleiten. Mit diesen Erkenntnissen und dem Wissen über die Komponenten werden im folgenden Kapitel die heuristischen Ansätze entwickelt.

### 4.3.1 Rechenergebnisse

Um einen korrekten Vergleich verschiedener Betriebsstrategien in einem Fahrzyklus zu ermöglichen, ist eine ausgeglichene Ladebilanz des Hochvoltspeichers erforderlich. Die Ladezustände zu Beginn und am Ende der Rechnung müssen näherungsweise gleich sein:  $SOC(t = 0) = SOC(t = end)$ . Unterschiedliche Ladezustände würden den berechneten Kraftstoffverbrauch und die ermittelten Komponentenbelastungen verfälschen. Die Betriebsstrategie kann jedoch nicht grundsätzlich so ausgelegt sein, dass nach Durchlauf eines beliebigen Testzyklus stets wieder der initiale Ladezustand erreicht wird.

Eine Lösung des Problems ergibt sich durch die Parametrierung der Betriebsstrategie. Sie ist so ausgelegt, dass sich ein mittlerer Ladezustand  $SOC$  in der Batterie einstellt. Dies führt dazu, dass der Ladezustand  $SOC$ , den die Batterie am Ende eines Zyklus erreicht, weitgehend unabhängig vom Startwert am Anfang des Zyklus ist. Bei den Simulationen hat sich daher folgendes Vorgehen bewährt: Die erste Rechnung wird mit einem mittleren Ladezustand (z.B.  $SOC = 60\%$ ) gestartet und endet mit einem im Allgemeinen um  $\Delta$  abweichenden Ladezustand  $SOC_{end,1}$ , siehe Abb. 4.12. Nun wird eine zweite Simulation mit  $SOC(t = 0) = SOC_{end,1}$  gestartet, bei deren Ende sich mit hoher Genauigkeit wiederum  $SOC_{end,1} = SOC_{end,2}$  einstellt.

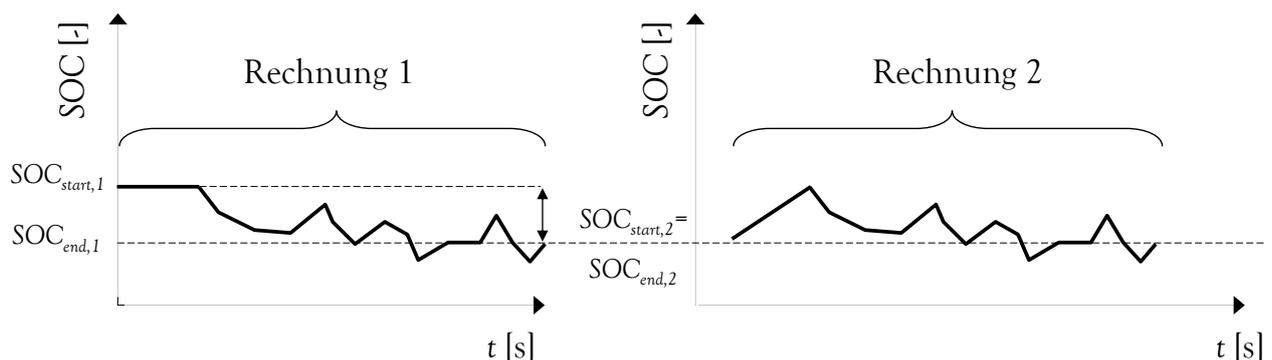


Abbildung 4.12: Eine ausgeglichene Ladebilanz wird durch zweifache Simulation der Zyklen erreicht

### Kraftstoffverbrauch

Mit den implementierten Algorithmen und den beiden Parametersätzen ergeben sich die in Tabelle 4.1 dargestellten Verbräuche. Datensatz 1 entspricht der idealisierten, verbrauchsoptimalen Parametrierung, Datensatz 2 berücksichtigt auch die Ziele Fahrverhalten und Komponentenbelastungen.

| Zyklus       | Kraftstoffverbrauch [l]<br>Datensatz 1 | Kraftstoffverbrauch [l]<br>Datensatz 2 | $\Delta$<br>1 $\rightarrow$ 2 |
|--------------|--|--|-------------------------------|
| NEFZ         | 1,104                                  | 1,144                                  | +3,6 %                        |
| FTP          | 1,256                                  | 1,296                                  | +3,2 %                        |
| Kundenzyklus | 4,315                                  | 4,434                                  | +2,8%                         |

Tabelle 4.1: Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs mit online-optimierender Betriebsstrategie

Aus diesen Ergebnissen lässt sich ableiten, wie stark der Verbrauch durch die Beachtung von Fahrleistungs- und Komponentenanforderungen steigt, vgl. Abbildung 4.13.

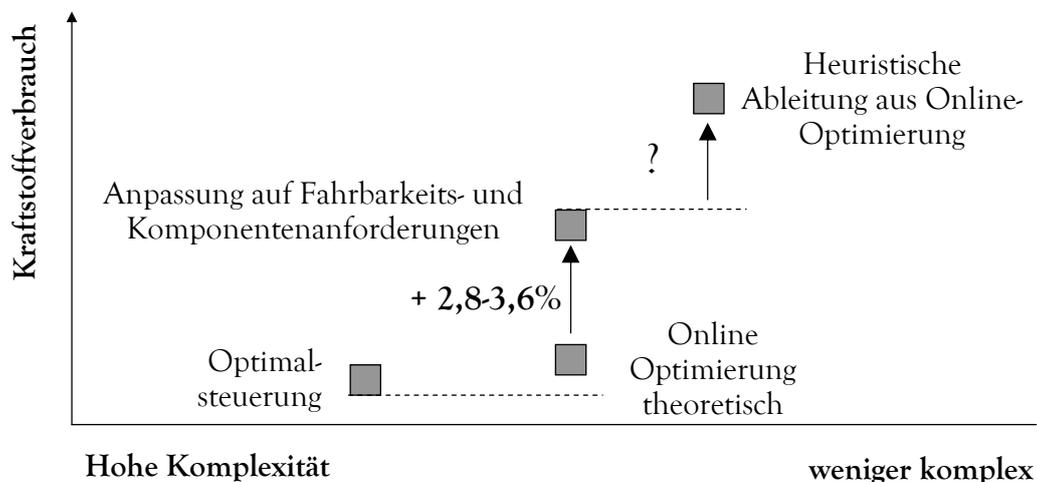


Abbildung 4.13: Betriebsstrategieansätze

Die Verbrauchsunterschiede zwischen den Parametersätzen lassen sich wie folgt auf die einzelnen Anpassungen zurückführen:

- Die Einführung der Stabilisierungsfunktion  $\gamma_{\text{Fahrverhalten}}$  hat mit 0,3 bis 0,4% einen kleinen Einfluss.

## 4 Online optimierende Betriebsstrategie

- Die Einführung der Mindestmomentanforderung durch  $\gamma_{\text{Fahrleistung}}$  hat große Auswirkungen, da im Schnitt die Drehzahl des Verbrennungsmotors steigt. Der Verbrauch erhöht sich um 1,5 bis 2%.
- Der restliche Verbrauchsunterschied ist auf die stärkere Beachtung der Batterieanforderungen im Datensatz 2 zurückzuführen. Die Bereiche, in denen elektrisch gefahren wird, schränken sich leicht ein. Außerdem werden Potentiale, die sich durch Lastpunktverschiebungen ergeben, in geringerem Umfang realisiert.

### Fahrverhalten

Die mit Parametersatz 1 gewählten Betriebspunkte erfüllen die Fahrverhaltensanforderungen nicht. Die Drehzahlen werden nahezu durchgehend so gewählt, dass der Verbrennungsmotor mit der aus Akustikgründen definierten Mindestdrehzahl (1100 upm) läuft bzw. das aktuell angeforderte Fahrmoment gerade erreicht wird, vgl. Abbildung 4.14. Dies hat den Nachteil, dass bei jeder noch so kleinen Erhöhung des angeforderten Fahrmomentes die Drehzahl angehoben werden muss. So ergibt sich ein unruhiger Drehzahlverlauf und ein zu träges Ansprechverhalten.

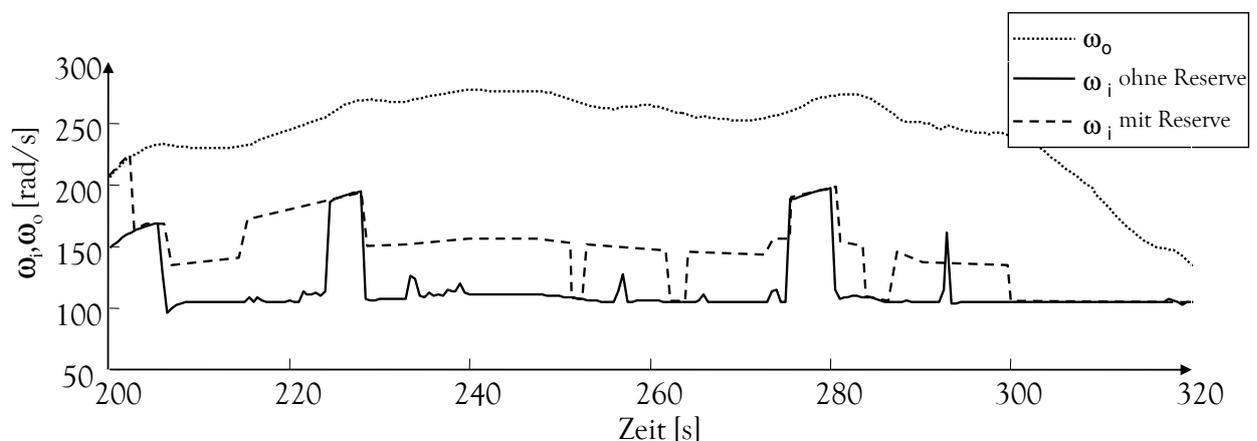


Abbildung 4.14: Drehzahlverlauf ohne Berücksichtigung der Reservemomentanforderung

Durch die Gütefunktion  $\gamma_{\text{Fahrverhalten}}$  ist im 2. Datensatz dagegen sichergestellt, dass das geforderte Reservemoment stets eingehalten wird, siehe ebenfalls Abbildung 4.14.

Für das Gütemaß  $\Omega$ , das die Qualität der Drehzahlverläufe bewertet, ergeben sich die in Tabelle 4.2 dargestellten Werte:

Es ist zu sehen, dass sich das Gütemaß  $\Omega$  durch die Parametrierung in Datensatz 2 deut-

## 4 Online optimierende Betriebsstrategie

| Zyklus       | $\Omega$ [%] | $\Omega$ [%] |
|--------------|--------------|--------------|
|              | Datensatz 1  | Datensatz 2  |
| NEFZ         | 4,5          | 3,9          |
| FTP          | 12,4         | 9,5          |
| Kundenzyklus | 19,8         | 13,9         |

Tabelle 4.2: Gütemaß  $\Omega$

lich verringert. Das bedeutet, dass sich die Getriebeübersetzung seltener spürbar ändert und ruhigere Drehzahlverläufe erreicht werden.

### Komponentenbelastung

Die implementierte Randwertberechnung gibt zuverlässig nur Betriebspunkte frei, in denen alle Leistungs- und Momentengrenzen eingehalten sind. Dieses Kriterium ist daher mit beiden Datensätzen erfüllt. Die Belastungen, denen der HV-Speicher in den verschiedenen Testzyklen ausgesetzt ist, fasst Tabelle 4.3 zusammen.

| Zyklus       | Kriterium        | Datensatz 1 | Datensatz 2 |
|--------------|------------------|-------------|-------------|
| FTP          | Energiedurchsatz | 2,71 kWh    | 2,38 kWh    |
|              | $SOC_{max}$      | 63,1 %      | 64,6 %      |
|              | $SOC_{min}$      | 55,9 %      | 57,2%       |
|              | $SOC_{mittel}$   | 59,8        | 61,2 %      |
| NEFZ         | Energiedurchsatz | 1,94 kWh    | 1,56 kWh    |
|              | $SOC_{max}$      | 67,2        | 67,1 %      |
|              | $SOC_{min}$      | 49,0        | 52,2 %      |
|              | $SOC_{mittel}$   | 58,7        | 60,4 %      |
| Kundenzyklus | Energiedurchsatz | 3,66 kWh    | 3,45 kWh    |
|              | $SOC_{max}$      | 67,4        | 67,4 %      |
|              | $SOC_{min}$      | 50,0        | 52,5%       |
|              | $SOC_{mittel}$   | 61,7        | 62,0 %      |

Tabelle 4.3: Belastung des HV-Speichers in den verschiedenen Testzyklen

### 4.3.2 Analyse und Interpretation

#### Interpretation Drehzahlwahl

Die Verbrennungsmotordrehzahlen der optimalen Betriebspunkte liegen durchgehend sehr niedrig. Bei einer Analyse des FTP72 fällt auf, dass in 85% der Zeit, in der der Verbrennungsmotor läuft, die Drehzahlen so gewählt werden, dass die geforderten Momentenreserven gerade noch eingehalten werden, vgl. Abbildung 4.15. Das lässt sich folgen-

#### 4 Online optimierende Betriebsstrategie

dermaßen begründen: Bei den angeforderten Leistungen lassen sich gute Verbrennungsmotorwirkungsgrade durch die Wahl möglichst niedriger Drehzahlen erreichen, siehe Abschnitt 2.2. Die Verluste des Verbrennungsmotors übertreffen die der anderen Komponenten so deutlich, dass auch die Systemverluste minimal werden, wenn möglichst niedrige Drehzahlen eingenommen werden.

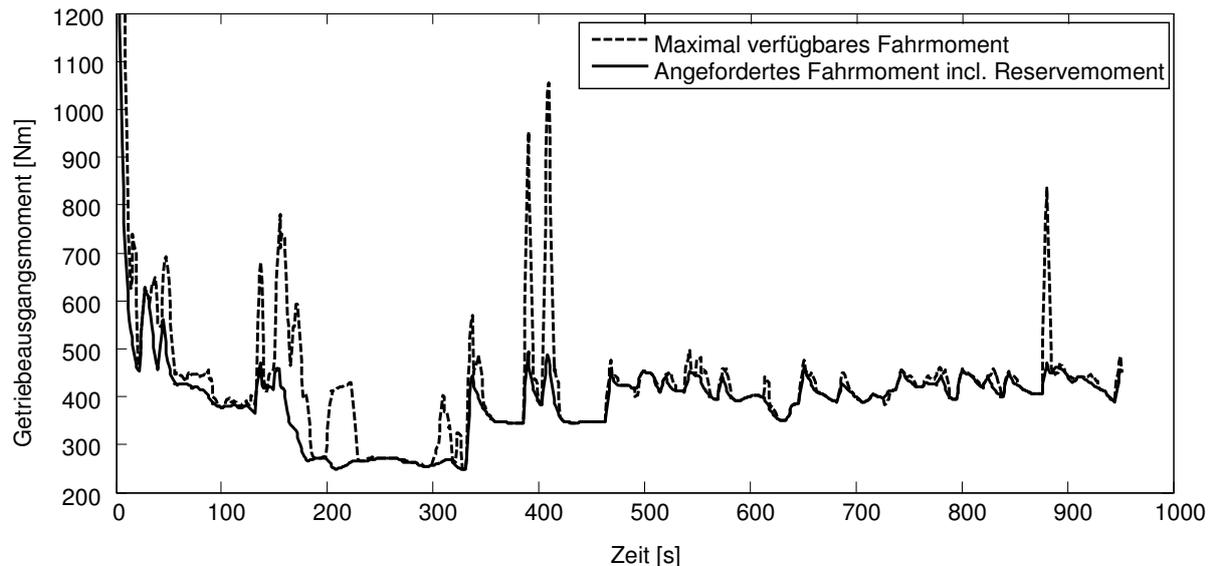


Abbildung 4.15: Der Optimierer wählt die Drehzahlen meist so, dass das verfügbare Fahrmoment gerade dem Mindestwert entspricht

Weiterhin lässt sich feststellen, dass die Drehzahlwahl des Optimierers von der gewünschten Batterieleistung abhängt, vgl. Abbildung 4.16. Die Zusammenhänge lassen sich beobachten, indem der gleiche Fahrzyklus mit unterschiedlichen Batteriewunschleistungen gefahren wird. Bei einem  $\Delta P_{Bat,Wunsch}$  von 5 kW sind im Leerlauf und in einigen Beschleunigungsphasen Drehzulanhebungen von 20 bis  $40 \frac{rad}{s}$  zu beobachten. Dennoch wird zu 70% der Zeit die geringstmögliche Drehzahl gewählt. Der Einfluss des Ladezustandes der Batterie auf die Drehzahlwahl ist damit zwar erkennbar, die Auswirkungen sind aber gering.

## 4 Online optimierende Betriebsstrategie

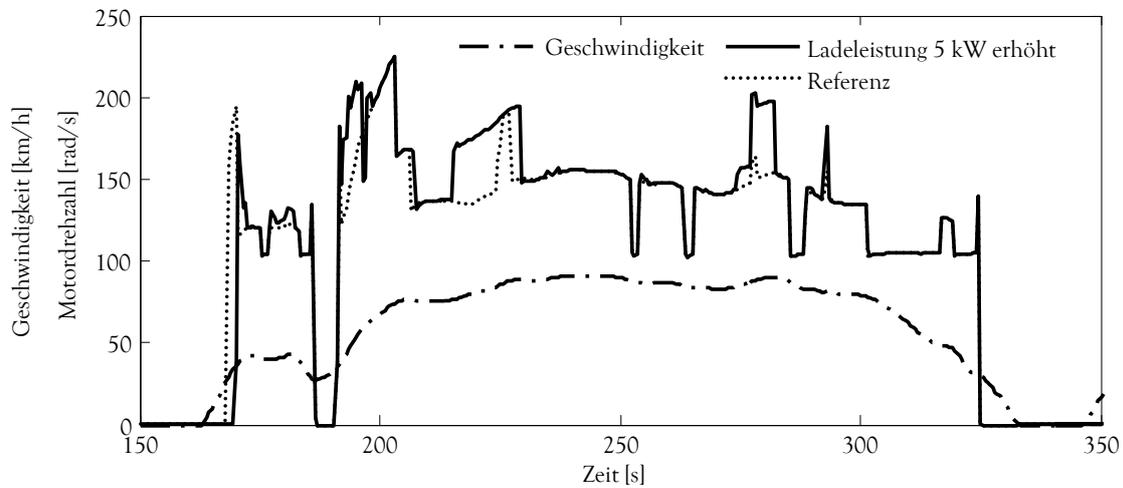


Abbildung 4.16: Drehzahlerhöhung bei erhöhter Ladeleistung

### Interpretation Momentenwahl

Die Analyse der Ladezustandregelung zeigt, dass der Optimierer das Moment des Verbrennungsmotors häufig so wählt, dass sich die von der Teilfunktion  $\gamma_{Ladezustand}$  gewünschte Batterieleistung  $P_{Bat,Wunsch}$  einstellt. Besonders bei niedrigen Lastanforderungen gilt mit hoher Genauigkeit:

$$P_{Bat} = P_{Bat,Wunsch}$$

Die Gründe dafür liegen in der Beschaffenheit der Gütefunktion  $\Gamma$ . Abbildung 4.17 zeigt am Beispiel einer leicht beschleunigten Fahrt ( $a_x = 1,5 \frac{m}{s^2}$ ) bei  $90 \frac{km}{h}$  typische Werte des eindimensionalen Optimierungsproblems. Zunächst werden die Verläufe ohne  $\gamma_{Ladezustand}$  untersucht ( $\psi_{Ladezustand}=0$ ).

#### 4 Online optimierende Betriebsstrategie

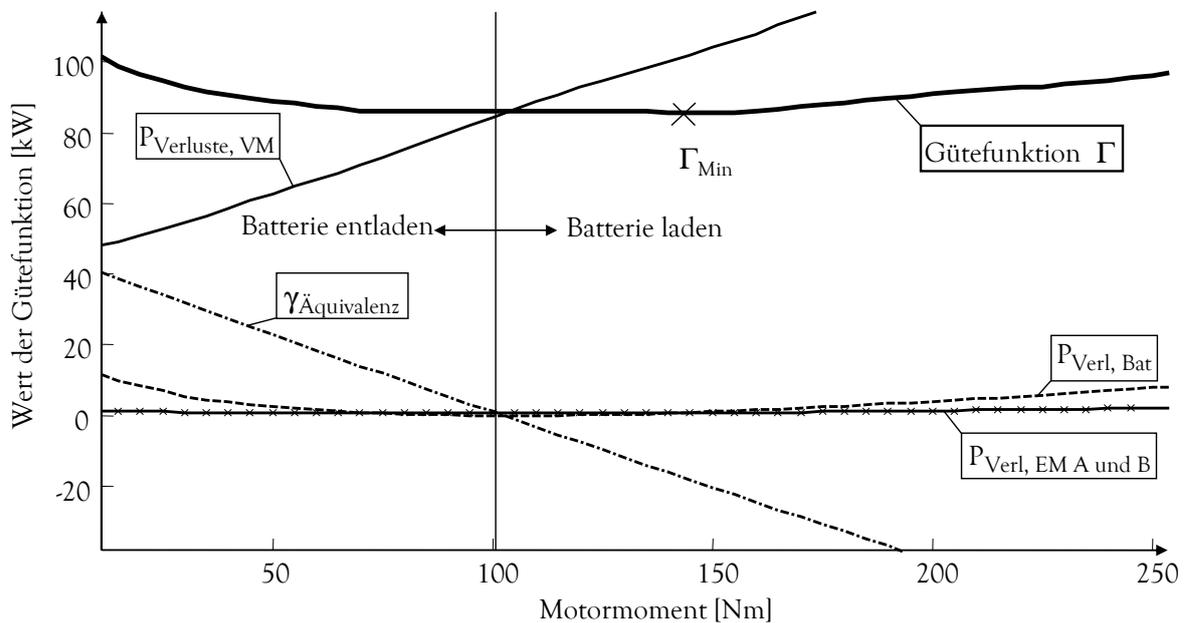


Abbildung 4.17: Gütefunktionen  $\gamma$  mit  $a_x = 1,5 \frac{m}{s^2}$ ,  $90 \frac{km}{h}$  und  $\psi_{\text{Ladezustand}}=0$

An diesem Beispiel lassen sich drei interessante Punkte ablesen:

- Die Verluste des Verbrennungsmotors  $P_{\text{Verl, VM}}$  steigen mit zunehmendem Motormoment nahezu linear an. Dies ist mit dem in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen konstanten relativen Wirkungsgrad zu erklären. Weiterhin ist interessant, dass die Verbrennungsmotorverluste über weite Bereiche alle anderen physikalischen Verluste deutlich übertreffen; erst bei sehr starken Entladeleistungen der Batterie, die zu einer entsprechenden Entlastung des Verbrennungsmotors führen, erreichen die Batterieverluste die Verluste des Verbrennungsmotors. Im Beispiel liegt der Schnittpunkt bei einem Motormoment von 60 Nm, das einer Batterieentladung von etwa 30 kW entspricht.
- $\gamma_{\text{Äquivalenzkosten}}$  ist eine Gerade, die wie eine Spiegelung der Verbrennungsmotorverluste an einer Parallelen zur x-Achse wirkt. Tatsächlich ist die Steigung etwas steiler. Dieses Verhalten ergibt sich, weil die Verbrennungsmotorverluste zwar den Großteil der Äquivalenzkosten verursachen, diese aber auch die E-Maschinen- und Batterieverluste enthalten.
- Da sich mit  $\gamma_{\text{Äquivalenzkosten}}$  und  $P_{\text{Verl, VM}}$  die beiden größten Einflüsse nahezu aufheben, wird das Minimum der Gesamtgütefunktion  $\Gamma$  ohne die Gütefunktion der Ladezustandregelung  $\gamma_{\text{Ladezustand}}$  extrem flach. Das bedeutet, dass sich durch eine zeitliche Verschiebung der Lastpunktanhebung die über einen Fahrzyklus akkumulierte Verlustleistung kaum vergrößern oder verkleinern lässt. Der genaue Zeitpunkt

#### 4 Online optimierende Betriebsstrategie

der Lastpunktanhebung hat also kaum Einfluss auf den Gesamtverbrauch.

Wegen dieses Plateaus, das die restlichen Gütefunktionen formen, bestimmt  $\gamma_{Ladezustand}$  maßgeblich die Lage des Optimums. Abbildung 4.18 zeigt das Optimierungsproblem für den selben Betriebspunkt wie Abbildung 4.17, allerdings unter Berücksichtigung von  $\gamma_{Ladezustand}$  ( $\psi_{Ladezustand}=0,5$ ). Das Minimum der Gesamtgütefunktion  $\Gamma$  ist nun deutlich ausgeprägt. Die Batterieleistung des resultierenden Betriebspunktes liegt nahe an dem Wunschwert  $P_{Bat,Wunsch}$ , der mit Null kW vorgegeben wurde.

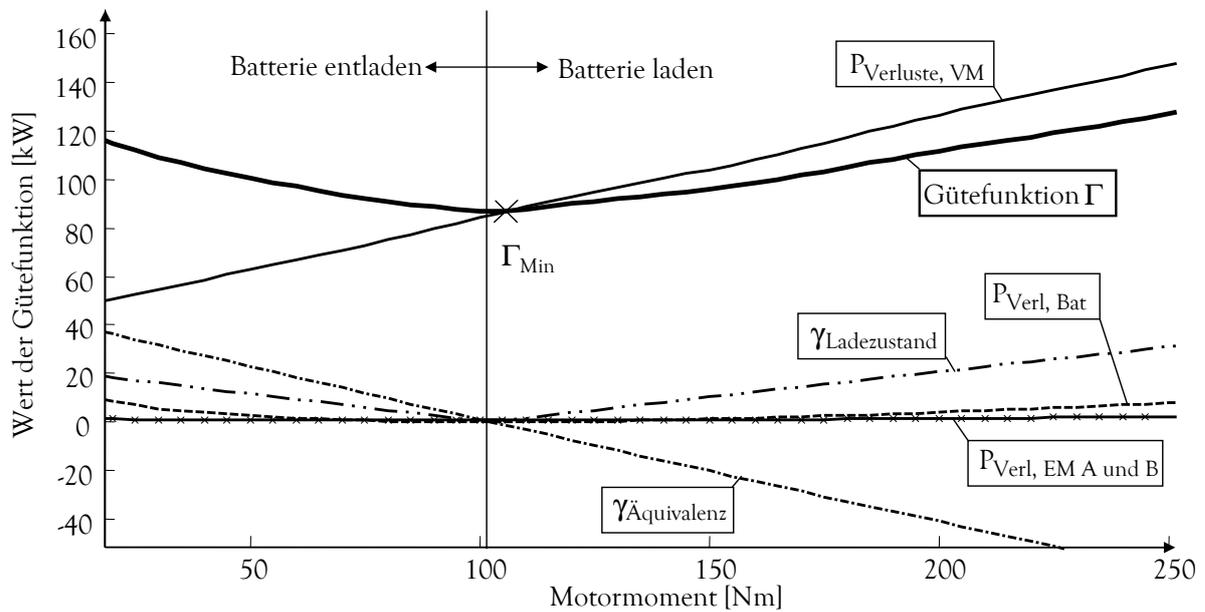


Abbildung 4.18: Gütefunktionen  $\gamma$  mit  $a_x = 1,5 \frac{m}{s^2}$ ,  $90 \frac{km}{h}$  und  $\psi_{Ladezustand}=0,5$

# 5 Ableitung der heuristischen Ansätze

Die enorme Komplexität der in Kapitel 4 beschriebenen „Online-Optimierung“ stellt einen Nachteil dar. Es handelt sich um ein sehr aufwändiges Rechenverfahren, das deutlich erhöhte Anforderungen an Rechenleistung und Speicherkapazität der Steuergeräte stellt. Zudem gestaltet die Komplexität Entwicklung und Bedienung aufwändig. Test und Absicherung der Betriebsstrategie werden erschwert. Diese Nachteile legen nahe, auch einen deutlich einfacheren Ansatz zu betrachten. Dieser stellt im Gegensatz zur Online-Optimierung nicht den Anspruch, zu jedem Zeitpunkt den idealen Betriebspunkt zu finden. Ziel ist vielmehr, eine Betriebsstrategie zu entwickeln, die nur die Zusammenhänge beachtet, die den größten Einfluss auf die gesteckten Ziele haben. Die Erkenntnisse, die in Abschnitt 4.3 mit Hilfe der Online-Optimierung gewonnen wurden, sind somit Basis der in diesem Kapitel erarbeiteten heuristische Algorithmen.

Es werden Funktionen für Drehzahlwahl, Entscheidung über elektrisches Fahren und Ladezustandregelung entworfen. Es folgen eine Beschreibung der Umsetzung dieser Algorithmen im Simulationsmodell und eine Zusammenfassung der Simulationsergebnisse.

## 5.1 Entwurf

### 5.1.1 Drehzahlwahl

Die Funktion Drehzahlwahl legt den Getriebemodus und die Zieldrehzahl des Verbrennungsmotors fest. Sie wird aufgrund folgender Prämissen und Erkenntnisse vorangegangener Kapitel entwickelt:

- Ein günstiger Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors  $\eta_{VM}$  wird durch die Wahl niedriger Drehzahlen und entsprechend hoher Momente erreicht, vgl. Abschnitt 2.2 und 4.3.
- Die Drehzahlen müssen so gewählt werden, dass im Zugbetrieb eine geschwindigkeitsabhängige Mindestbeschleunigung auch ohne Rückschaltung darstellbar ist.
- Wahrnehmbare eCVT-Effekte, also konstante Drehzahlen in Beschleunigungsphasen, reduzieren die subjektiv wahrgenommene Dynamik des Fahrzeuges. Um dies zu vermeiden, bildet das Hybridgetriebe bei hohen Lastanforderungen das Verhalten eines Automatikgetriebes nach.

## 5 Ableitung der heuristischen Ansätze

Entsprechend diesen Prämissen gliedert sich die Funktion Drehzahlwahl in zwei Teilfunktionen, die je nach Betriebsbereich die Drehzahl des Verbrennungsmotors festlegen: Eine Teilfunktion ist bei niedrigen Geschwindigkeiten und/oder Lasten aktiv, in dem beliebige Übersetzungsverhältnisse zulässig sind. Die andere deckt den verbleibenden Betriebsbereich ab, in dem nur diskrete Übersetzungsverhältnisse zum Einsatz kommen.

### Teilfunktion 1: Kontinuierliche Übersetzungsverhältnisse

Neben dem Fahrmoment  $M_o$  muss stets das in Abschnitt 1.2.2 geforderte Reservemoment verfügbar sein. Diese beiden Anforderungen legen eine Mindestdrehzahl des Verbrennungsmotors fest. Die Online-Optimierung hat gezeigt, dass für niedrige oder negative Lastanforderungen die optimalen Betriebspunkte nahezu immer bei diesen Mindestdrehzahlen liegen.

Für niedrige Fahrmomente  $M_{o,des} < M_{o,des,lim}$  werden daher diese geschwindigkeitsabhängigen Mindestdrehzahlen als Sollwerte vorgegeben. Bei höheren Lastanforderungen ist Teilfunktion 2 aktiv, falls mindestens eines der diskreten Übersetzungsverhältnisse von der Randwertberechnung freigegeben ist. Bei Anfahrvorgängen mit hohen Lastanforderungen liegt im kürzesten Übersetzungsverhältnis die Motordrehzahl unter der Leerlaufdrehzahl. Dann muss Teilfunktion 1 auch bei hohen Lasten eine geeignete Drehzahl vorgeben. In einem Kennfeld sind daher nicht nur über der Abtriebsdrehzahl  $\omega_o$ , sondern auch über dem angeforderten Fahrmoment  $M_{o,des}$  geeignete Verbrennungsmotordrehzahlen  $\omega_{i,soll}$  abgelegt.

Mit Hilfe von  $\omega_{i,soll}$  lässt sich der zugehörige Getriebemodus ermitteln. Liegt das resultierende Übersetzungsverhältnis oberhalb des zweiten festen Ganges, wird eCVT-Mode 1 gewählt, sonst 2. Eine Hysterese vermeidet ein häufiges Wechseln.

### Teilfunktion 2: Diskrete Übersetzungsverhältnisse

Liegt das angeforderte Fahrmoment über einem Grenzwert ( $M_{o,des} > M_{o,des,lim}$ ), kommen nur diskrete Übersetzungsverhältnisse zum Einsatz. Um dennoch möglichst effizient zu sein, müssen diese in möglichst großer Anzahl zur Auswahl stehen. Daher werden zusätzlich zu den Übersetzungsverhältnissen, die die festen Gänge vorgeben, vier weitere Gangstufen in den eCVT-Modi festgelegt. Diese festen Übersetzungsverhältnisse werden als *virtuelle Gänge* bezeichnet, siehe Abbildung 5.1.

## 5 Ableitung der heuristischen Ansätze

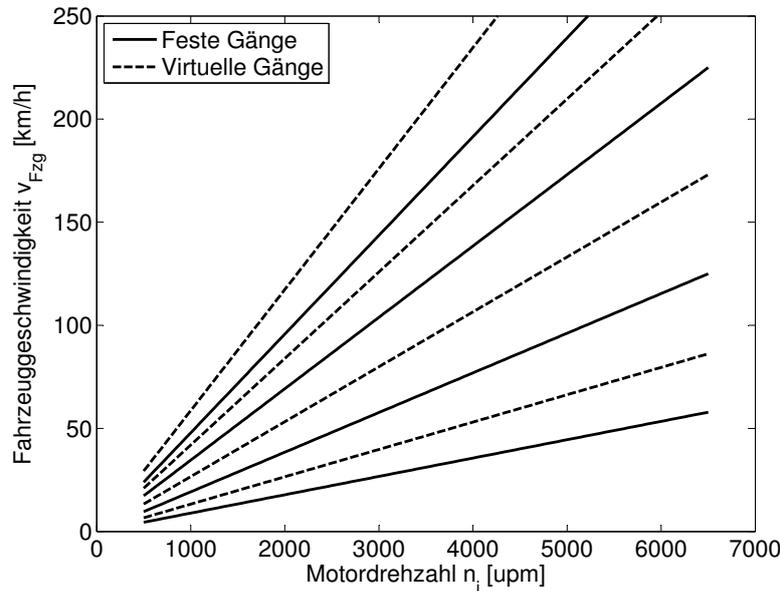


Abbildung 5.1: Getriebestufen

Von den so definierten acht Übersetzungsverhältnissen soll das effizienteste gewählt werden, das die Fahr- und Reservemomentanforderung erfüllt. Die Fahrmomente, die sich in den einzelnen Gängen maximal erreichen lassen, können aus den Randwertberechnungen abgeleitet werden. Die Analyse des Optimiererbetriebs hat gezeigt, dass die effizientesten Punkte nahezu immer durch möglichst niedrige Verbrennungsmotordrehzahlen erreicht werden können. Ausgewählt wird also der längste Gang, der die Anforderungen erfüllt. Falls kein Gang  $M_{o,des}$  erfüllen kann, wird der Gang gewählt, der dem Wunschwert am nächsten kommt.

Um Pendelschaltungen zu vermeiden, müssen Hoch- und Rückschaltpunkte für einen Gangwechsel  $n$  auf  $n + 1$  bzw. von  $n + 1$  auf  $n$  ausreichend weit auseinander liegen. Für Hochschaltungen wird daher ein um  $\Delta M_{o,Hysteresis}$  erhöhtes Fahrmoment zu Grunde gelegt.

### 5.1.2 Ladezustandsregelung

Aufbauend auf den Ergebnissen aus Kapitel 4 wird ein Funktionsblock *Ladezustandsregelung* entwickelt, der das Verbrennungsmotormoment  $M_i$  ohne Online-Optimierung festlegt [91]. Um die gestellten Ziele zu erreichen, ist es am wichtigsten, die Batterie in einem geeigneten Ladezustand zu betreiben. Eine hohe Verfügbarkeit der Hybridfunktionen Rekuperation, elektrisches Fahren und Boost ist dann sichergestellt. Die hier beschriebene Funktion basiert daher auf einer *SOC*-abhängigen Sollwertvorgabe der Batterieleistung.

## 5 Ableitung der heuristischen Ansätze

Die Effizienzbetrachtungen der Ladezustandsregelung lassen Vereinfachungen zu. Folgende Näherungen können nach den im Kapitel 4 gewonnenen Erkenntnissen angewendet werden, ohne dass dabei wesentliche Verschlechterungen bei den angestrebten Zielen erwartet werden müssten:

- Die im elektrischen System entstehenden Verluste beeinflussen die Wahl des Verbrennungsmotormomentes nicht. Sie fallen wesentlich niedriger aus als die des Verbrennungsmotors, siehe Abbildung 4.18.
- Der genaue Betriebspunkt des Verbrennungsmotors beeinflusst die Ladezustandsregelung nicht. Es wird lediglich nach volllastnahen und Teillast-Betriebspunkten differenziert. Solange der Verbrennungsmotor nicht nahe der Volllast betrieben wird, wird sein Wirkungsgrad bei der Bestimmung des optimalen Momentes nicht berücksichtigt. Dies ist wegen des dann weitgehend konstanten relativen Wirkungsgrades  $\eta_{VM,rel}$  (siehe Abschnitt 2.2 oder Abbildung 2.4) zulässig und bedeutet, dass im Teillastbereich eine bestimmte Erhöhung der mechanischen Leistung immer dieselbe Erhöhung der chemischen Leistung zur Folge hat. Im Teillastbereich ist es daher nicht relevant, wann genau die Lastpunktanhebung erfolgt, da immer mit derselben Erhöhung des Verbrauchs gerechnet werden muss.

Die Eingangsgrößen der Logik sind wie im Abschnitt 3.1 beschrieben:

- Drehzahl Verbrennungsmotor ( $\omega_i$ )
- Getriebe-Ausgangsdrehzahl ( $\omega_o$ )
- E-Maschinen-Drehzahlen ( $\omega_a, \omega_b$ )
- Getriebe-Ausgangsmoment ( $M_o$ )
- Batterie-Ladezustand ( $SOC$ )
- Zulässige Grenzmomente ( $M_{i,max}, M_{i,min}$ )
- Fahrzeuggeschwindigkeit ( $v$ )

Abbildung 5.2 stellt die Funktionsweise schematisch dar.

## 5 Ableitung der heuristischen Ansätze

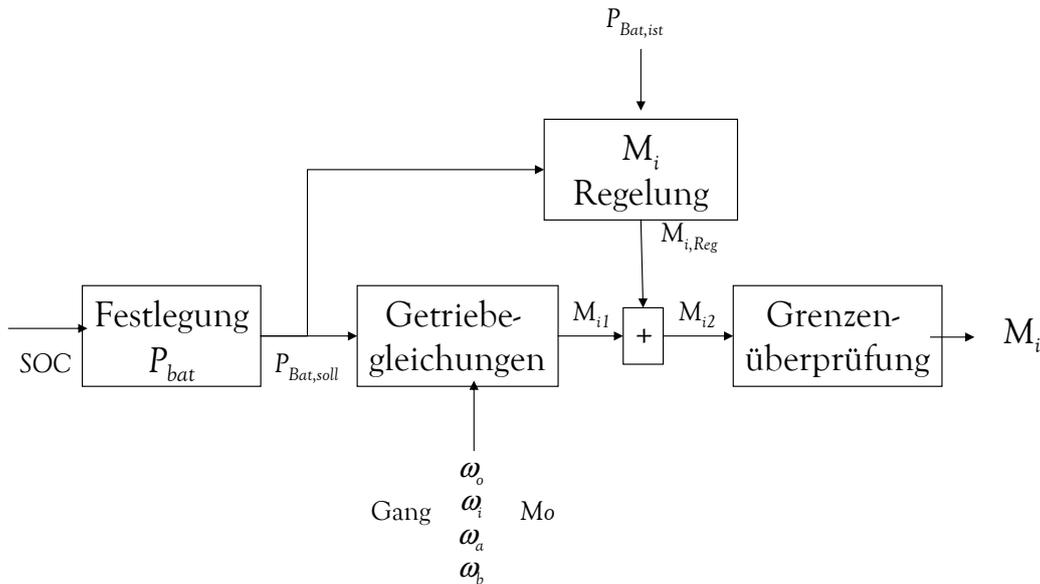


Abbildung 5.2: Bestimmung des Verbrennungsmotormomentes ohne Online-Optimierung

Ein erster Funktionsblock ermittelt aus dem Ladezustand der Batterie  $SOC$  die gewünschte Batterieleistung ( $P_{Bat,soll}$ ). Diese ist positiv (entladen) bei hohen Ladezuständen, und negativ (laden) bei niedrigen. Aus  $P_{Bat,soll}$  und dem aktuellen Betriebspunkt lässt sich das Verbrennungsmotormoment  $M_{i,1}$  berechnen. Die dazu notwendigen Gleichungen werden im folgenden Abschnitt hergeleitet. Diese erste Berechnung ist in einigen Betriebspunkten nicht ausreichend, da sich mit  $M_{i,1}$  Abweichungen zwischen tatsächlicher und gewünschter Batterieleistung ergeben. Diese Abweichungen lassen sich auf die teils ungenaue Abschätzung der Getriebeverluste zurückführen. Die geeignetste Lösung bietet ein Regelkreis, der die Abweichungen durch ein angepasstes Motormoment  $M_{i,2}$  korrigiert. Abschließend muss überprüft werden, ob das berechnete Verbrennungsmotormoment  $M_{i,2}$  innerhalb des zulässigen Bereichs liegt. Falls eine Grenze überschritten ist, nimmt  $M_{i,2}$  den entsprechenden Grenzwert an.

Der beschriebene Regelkreis funktioniert auch in Rekuperations- oder Boostphasen: In Rekuperationsphasen kann die tatsächliche Batterieleistung die gewünschte unterschreiten. Die Regelung wird dann das Verbrennungsmotormoment reduzieren, bis der Verbrennungsmotor im Schubetrieb arbeitet. Das entspricht dem gewünschten Verhalten.

In Boostphasen kann die tatsächliche Leistung oberhalb des gewünschten Wertes liegen, da die Batterie unabhängig von der gewünschten Batterieleistung entladen wird. Eine weitere Erhöhung des Verbrennungsmotormomentes durch die Regelung ist dann aber nicht möglich, da der Verbrennungsmotor in Boostphasen ohnehin mit Volllast betrieben wird.

## 5 Ableitung der heuristischen Ansätze

Der rein elektrische Betrieb deaktiviert die beschriebene Logik, und  $M_{i,soll}$  wird auf Null gesetzt.

### Bestimmung der optimalen Batterieleistung

Das Verbrennungsmotormoment wird aus der gewünschten Batterieleistung  $P_{Bat,soll}$  berechnet. Diese wiederum ist abhängig vom Ladezustand der Batterie  $SOC$ . Eine Kennlinie bildet den gewünschten Zusammenhang ab: Sie ist so ausgeprägt, dass der Ladezustand schwerpunktmäßig in einem günstigen mittleren Bereich liegt. So steht genügend Kapazität für elektrisches Fahren bzw. Rekuperieren zur Verfügung, und die Lebensdauerkriterien der Batterie sind erfüllt.

Eine Lastpunktabsenkung ist in den meisten Fällen mit einer Verschlechterung des Wirkungsgrades des Verbrennungsmotors verbunden. In Zyklen, in denen längere Zeit nicht elektrisch gefahren werden kann, tendiert die Batterie zu höheren Ladezuständen. Sie wird in Verzögerungsphasen durch Rekuperation geladen, nach einer bestimmten Zeit ist eine Lastpunktabsenkung unvermeidlich. Die günstigste Art der Lastpunktabsenkung ist die, bei der der Verbrennungsmotor gerade so entlastet wird, dass die Verbraucher des elektrischen Bordnetzes aus der HV-Batterie gespeist werden. Formeln 5.1 bis 5.3 zeigen, dass auf diese Weise pro Energieeinheit  $\Delta E_{Bat}$  mehr Kraftstoff  $\Delta E_{chem}$  eingespart wird, als bei einer Lastpunktabsenkung. Bei dieser muss die Energie zunächst verlustbehaftet ( $\eta_{EM,mot}$ ) in mechanische Energie gewandelt werden:

$$\Delta E_{chem,Lastpunktabsenkung} = \frac{\Delta E_{Bat} \cdot \eta_{EM,mot}}{\eta_{VM,rel}} \quad (5.1)$$

Wird das Bordnetz versorgt, entfällt dagegen die generatorische Wandlung ( $\eta_{EM,gen}$ ) der E-Maschine.

$$\Delta E_{chem,Bordnetzversorgung} = \frac{\Delta E_{Bat}}{\eta_{VM,rel} \cdot \eta_{EM,gen}} = \Delta E_{chem,Lastpunktabsenkung} \frac{1}{\eta_{EM,mot} \eta_{EM,gen}} \quad (5.2)$$

da  $\eta_{EM,mot} < 1$  gilt stets

$$\Delta E_{chem,Bordnetzversorgung} > \Delta E_{chem,Lastpunktabsenkung} \quad (5.3)$$

Es wird deswegen ab einem bestimmten Ladezustand  $SOC$  zu der vorher beschriebenen gewünschten Batterieleistung die Bordnetzlast addiert.

## 5 Ableitung der heuristischen Ansätze

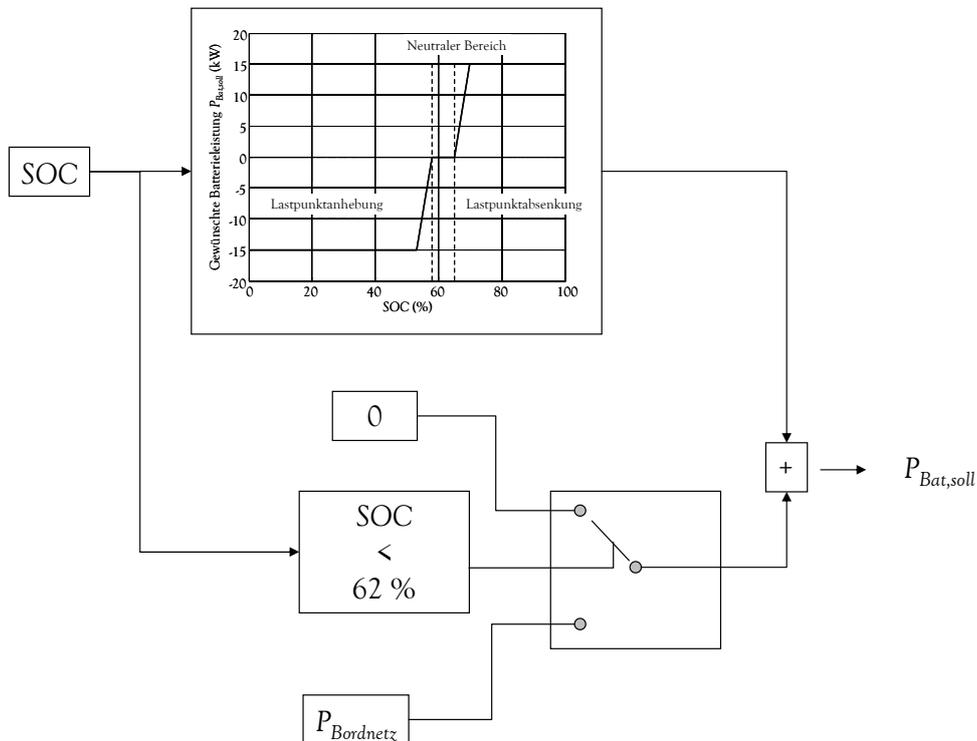


Abbildung 5.3: Direkte Versorgung des Bordnetzes aus der HV-Batterie

### Berechnung des Verbrennungsmotormomentes

Ist die gewünschte Batterieleistung  $P_{Bat,soll}$  festgelegt, kann das Verbrennungsmotormoment ermittelt werden. Es hat sich gezeigt, dass sich die Berechnung am einfachsten in zwei Schritten umsetzen lässt: Zunächst wird das notwendige Moment unter Vernachlässigung der Getriebeverluste berechnet. Die im nächsten Absatz beschriebene Regelung gleicht Fehler aus.

Die Grundlage für die Berechnung ist die in Abschnitt 3.2 abgeleitete Formel 3.1. Zusammen mit den Getriebe-Gleichungen aus Abschnitt 2.3 sind alle notwendigen Zusammenhänge festgelegt. Schwierigkeiten ergeben sich allerdings, weil die E-Maschinenverluste mit einer quadratischen Funktion angenähert werden. So ergeben sich stets zwei Lösungen. Beide resultierenden Verbrennungsmotormomente erfüllen die Abtriebsleistungsbedingung, aber das größere Verbrennungsmotormoment erzeugt höhere Verluste im System, da für dieselbe Ausgangsleistung eine höhere Eingangsleistung eingespeist wird. Es kann daher stets das kleinere der beiden gewählt werden. Die folgenden Absätze

## 5 Ableitung der heuristischen Ansätze

beschreiben exemplarisch die Berechnung für den ersten festen Gang und den eCVT-Modus 1.

**Gang 1** Für die Momente im Gang 1 gilt:

$$M_o = (i_3 + 1) \cdot (M_i + M_a + M_b) - \Theta_1 \dot{\omega}_o \quad (5.4)$$

$$M_a = \frac{\omega_b}{\omega_a} \cdot M_b \quad (5.5)$$

Und für die Drehzahlen:

$$\omega_a = (i_3 + 1) \cdot \omega_o \quad (5.6)$$

$$\omega_b = \omega_a \quad (5.7)$$

Durch Einsetzung in Gleichung 3.1 ergibt sich:

$$a \cdot M_a^2 + b \cdot M_a + c = 0 \quad (5.8)$$

mit

$$a = a_1 + b_1$$

$$b = \omega_a + \omega_b + a_2 + b_2$$

$$c = a_3 + b_3 + B_{Loss} - P_{bat} + P_{BN}$$

Daraus:

$$M_a = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}$$

Gleichung 5.4 zeigt, dass  $M_a$  mit fallendem  $M_i$  steigt. Deswegen errechnet sich das gesuchte  $M_i$  aus dem größeren  $M_a$ .

$$M_a = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}$$

Dies gilt für alle festen Gänge.

Aus Gleichungen 5.5 und 5.7 hat man:

$$M_a = M_b$$

Eingesetzt in 5.4:

$$M_i = \frac{M_o + \Theta_1 \dot{\omega}_o}{i_3 + 1} - 2 \cdot M_a \quad (5.9)$$

Die Zusammenhänge für die restlichen festen Gänge finden sich im Anhang B

## 5 Ableitung der heuristischen Ansätze

**CVT-Mode 1** Die Berechnung in den eCVT-Modi ist etwas komplexer. Ausgangspunkt sind die Gleichungen 2.17 und 2.10. Aus ihnen ergibt sich für die Momente

$$M_b = \frac{M_o}{i_3 + 1} - \frac{1 + i_1}{i_1 \cdot (1 + i_2)} \cdot M_i + \Theta_{bi,1} n_i + \Theta_{bo,1} n_o \quad (5.10)$$

und für die Drehzahlen:

$$\omega_a = \frac{1}{1 - i_1 \cdot i_2} \cdot ((1 + i_1) \cdot (1 + i_3) \cdot \omega_o - i_1 \cdot (1 + i_2) \cdot \omega_i) \quad (5.11)$$

$$\omega_b = (1 + i_3) \cdot \omega_o \quad (5.12)$$

Durch Einsetzen in Gleichung 3.1 ergibt sich:

$$a \cdot M_i^2 + b \cdot M_i + c = 0 \quad (5.13)$$

mit

$$a = a_1 \cdot \left(\frac{1}{i_1} \cdot \frac{1 - i_1 \cdot i_2}{1 + i_2}\right)^2 + b_1 \cdot \left(\frac{1}{i_1 \cdot i_2} \cdot \frac{1 - i_1 \cdot i_2}{1 + i_2} - \frac{1}{i_1 \cdot i_2}\right)^2$$

$$b = (\omega_a + a_2) \cdot \frac{1}{i_1} \cdot \frac{1 - i_1 \cdot i_2}{1 + i_2} + (\omega_b + b_2 + 2 \cdot b_1 \cdot \frac{M_o}{i_3 + 1}) \cdot \left(\frac{1 + i_1}{i_1 \cdot (1 + i_2)}\right)$$

$$c = \frac{M_o}{i_3 + 1} \cdot (\omega_b + b_2) + \left(\frac{M_o}{i_3 + 1}\right)^2 \cdot b_1 + a_3 + b_3 + B_{Loss} - P_{bat} + P_{BN}$$

Das kleinste  $M_i$  ergibt sich mit:

$$M_i = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}$$

### Regelung des Verbrennungsmotormomentes

Die im vorherigen Abschnitt dargestellte Berechnung des Verbrennungsmotormomentes liefert den Vorsteuerwert für die hier beschriebene Regelung. Implementiert ist ein PI-Regler (siehe z.B. in [78]), der die Differenz zwischen tatsächlicher und gewünschter Batterieleistung ausregelt. Da diese Differenz eine Leistung ist, ergibt sich eine bessere Regelgüte, wenn die Stellgröße durch die Verbrennungsmotordrehzahl  $\omega_i$  dividiert wird. Das resultierende Moment wird zu dem Verbrennungsmotormoment addiert, das aus der gewünschten Batterieleistung  $P_{Bat,soll}$  berechnet wurde. Wenn die tatsächliche Batterieleistung größer als die gewünschte ist, ergibt sich ein positives Regelmoment.

## 5 Ableitung der heuristischen Ansätze

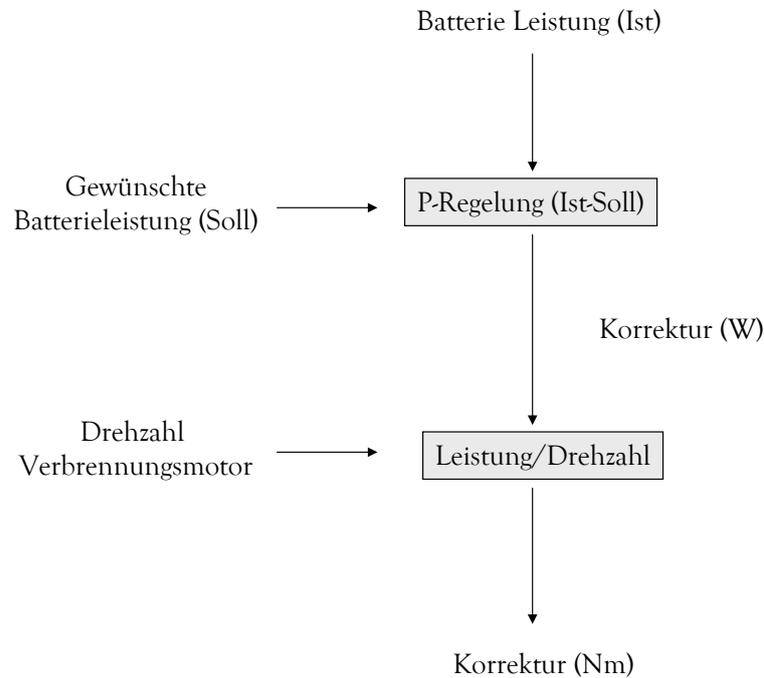


Abbildung 5.4: Verbrennungsmotormoment Regelung

### Begrenzung des Verbrennungsmotormomentes und Berücksichtigung des Volllastbereiches

Nachdem das optimale Verbrennungsmotormoment bestimmt ist, wird überprüft, ob alle Grenzen des Systems eingehalten werden. Dazu wird der Wert mit berechneten Grenzen der Randwertbestimmung (vgl. Abschnitt 3.2) verglichen. Wenn das Moment zwischen den Grenzen liegt, wird es als gewünschtes Verbrennungsmotormoment weitergegeben. Andernfalls übernimmt es den überschrittenen Grenzwert  $M_{i,max}$  bzw.  $M_{i,min}$ .

Durch das Einführen einer weiteren Grenze lässt sich die durchschnittliche Effizienz des Verbrennungsmotors steigern. Wie zuvor diskutiert, ist es im Teillastbereich unerheblich, wann eine Lastpunktanhebung durchgeführt wird. Bei hohen Lasten fällt aber der relative Wirkungsgrad  $\eta_{VM,rel}$ . Ab diesem Knickpunkt steigt die für die Lastpunktanhe-

## 5 Ableitung der heuristischen Ansätze

bung eingesetzte Energie  $\Delta P_{chem}$  überproportional an. Entsprechend steigt die durch Lastpunktabenkung gesparte chemische Energie. Es ist deswegen sinnvoll, den Betriebspunkt des Verbrennungsmotors nach Möglichkeit durch Lastpunktverschiebung unter der Grenze fallender Wirkungsgrade ( $M_{i,lim}$ ) zu halten. Abbildung 5.5 zeigt eine entsprechende Entscheidungsregel.

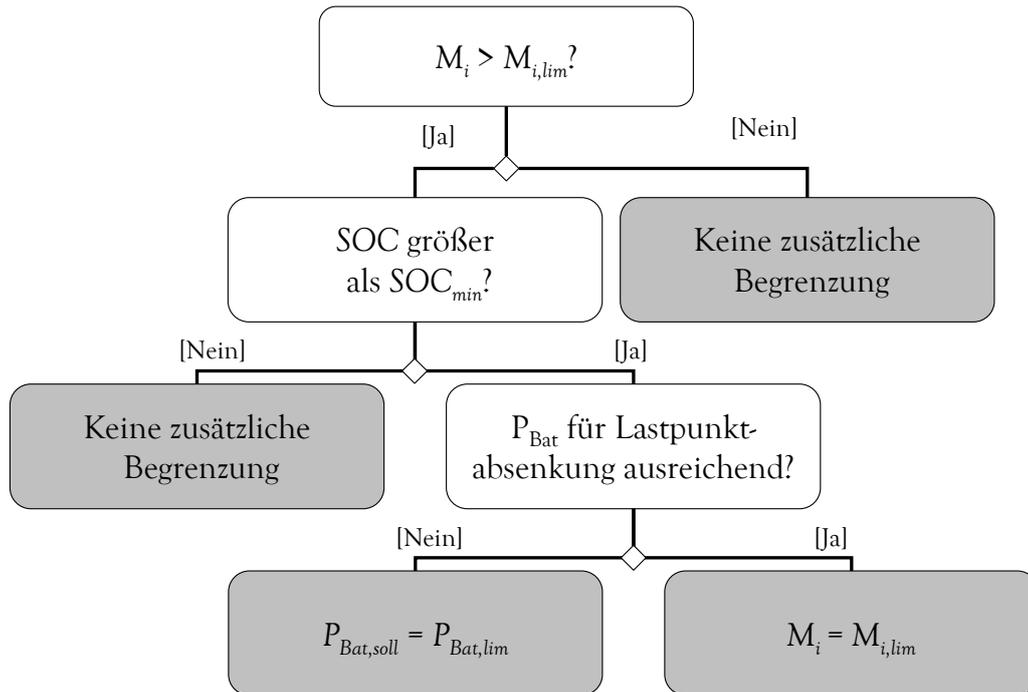


Abbildung 5.5: Entscheidungsregel für eine Begrenzung des Verbrennungsmotormomentes zur Effizienzoptimierung

Zunächst wird überprüft, ob die Batterie einen minimalen Ladezustand  $SOC_{min}$  aufweist. So wird vermieden, dass das Verbrennungsmotormoment begrenzt und die Batterie entladen wird, obwohl sie bereits zu weit entladen ist. Der nächste Schritt überprüft, ob die Batterie momentan ausreichend leistungsstark ist, um das Verbrennungsmotormoment  $M_i$  auf  $M_{i,min}$  zu reduzieren. Falls ja, wird  $M_i$  auf  $M_{i,lim}$  gesetzt. Wenn nicht, wird die Batteriewunschleistung auf den möglichen Grenzwert  $P_{Bat,Lim}$  gesetzt.

### 5.1.3 Elektrisches Fahren

Die online-optimierende Betriebsstrategie benötigt keine eigene Teilfunktion für die Entscheidung, ob der Verbrennungsmotor laufen soll oder nicht. Der rein elektrische Betrieb wird mit Hilfe der Gütefunktion  $\Gamma$  bewertet und mit den anderen Getriebemodi verglichen. Bietet der rein elektrische Betrieb den niedrigsten Wert  $\Gamma_{min}$ , wird der Verbrennungsmotor abgeschaltet. In der heuristischen Ableitung ist es dagegen nicht möglich, den rein elektrischen Betrieb wie einen gewöhnlichen Gang zu betrachten und ihn immer dann auszuwählen, wenn er ein ausreichendes Zugkraftpotential bietet. Der Ladezustand  $SOC$  des HV-Speichers und die Effizienz müssen in die Entscheidung einfließen. Dieser Abschnitt stellt eine entsprechende Entscheidungslogik vor, die aus der Online-Optimierung abgeleitet ist. Sie besteht aus drei Teilschritten [31]:

1. Bewertung des energetischen Vorteils des rein elektrischen Betriebes
2. Berechnung des minimalen energetischen Vorteils in Abhängigkeit des Ladezustandes  $SOC$  des HV-Speichers
3. Stabilisierung der Entscheidung

Abbildung 5.6 zeigt den Aufbau der Entscheidungslogik. Die einzelnen Unterfunktionen sind im Folgenden beschrieben.

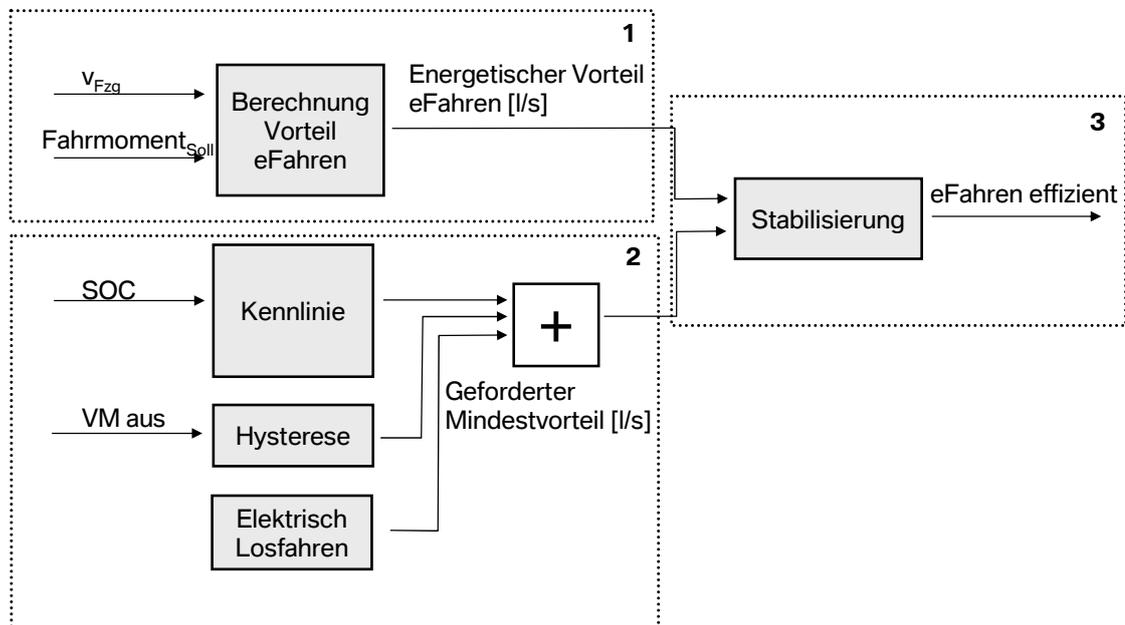


Abbildung 5.6: Aufbau der Entscheidung für oder gegen rein elektrisches Fahren

### Bewertung des energetischen Vorteils des rein elektrischen Betriebes

Der energetische Vorteil des rein elektrischen Betriebes wird im Folgenden mit  $\Delta$  bezeichnet. Für die Berechnung von  $\Delta$  werden die Kriterien der Gütefunktion  $\Gamma$  herangezogen, die entstehende Verlustleistungen bewerten:  $\gamma_{Verl}$  und  $\gamma_{\text{Äquivalenzkosten}}$  (siehe Abschnitt 4.1).  $\Delta$  berechnet sich aus der Differenz dieser beiden Gütefunktionen  $\gamma_i$ , die sich aus dem Vergleich zwischen dem rein elektrischen und dem verbrennungsmotorischen Betrieb ergibt ([40]):

$$\Delta = \sum \gamma_i(\omega_{i,VM}; M_{i,VM}) - \sum \gamma_i(\omega_i = 0; M_i = 0) \quad (5.14)$$

Vereinfachend erfolgt die Berechnung stets auf Basis des verbrennungsmotorischen Betriebspunktes (festgelegt durch  $\omega_i$  und  $M_i$ ), der das angeforderte Fahrmoment  $M_{o,des}$  mit der niedrigsten möglichen Drehzahl und neutralem Hochvoltspeicher ( $P_{Bat} = 0$ ) erreicht. Diese zusätzliche Festlegung hat den Vorteil, dass nur durch Vorgabe von Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  und Fahrmomentanforderung  $M_{o,des}$  des Fahrers der energetische Vorteil  $\Delta$  festgelegt ist. So ist es möglich, die aufwändige Berechnung vorab durchzuführen und die Werte im Fahrbetrieb aus einem Kennfeld abzurufen.

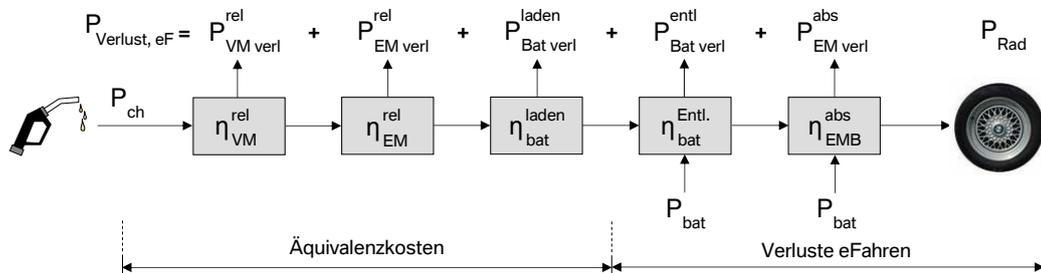
Veranschaulichend lässt sich die Berechnung von  $\Delta$  als der Vergleich von zwei Wirkketten interpretieren:

- Für den rein elektrischen Betrieb werden durch  $\gamma_{Verl}$  die Verluste betrachtet, die beim Fahren selbst entstehen: Verluste beim Entladen der Batterie, Getriebeverluste und motorische Verluste der E-Maschinen. Zudem fließen durch  $\gamma_{\text{Äquivalenz}}$  die Verluste ein, die zuvor beim Laden der Batterie entstanden sind: Verluste in Verbrennungsmotor und Getriebe für die aufgebrauchte Mehrleistung, generatorische Verluste in der E-Maschine und Ladeverluste in der Batterie.
- Die Wirkkette des verbrennungsmotorischen Betriebes besteht entsprechend  $\gamma_{Verl}$  aus den Verlusten, die beim Fahren entstehen: absolute Verluste des Verbrennungsmotors, der E-Maschinen und des Getriebes. Dabei wird eine Gangwahlentscheidung entsprechend der im Abschnitt 5.1.1 beschriebenen Logik zu Grunde gelegt. Durch die Festlegung auf  $P_{Bat} = 0$  ist  $\gamma_{\text{Äquivalenz}}$  ebenfalls stets gleich Null.

Abbildung 5.7 veranschaulicht die Wirkketten.

## 5 Ableitung der heuristischen Ansätze

### elektrisches Fahren



### verbrennungsmotorisches Fahren

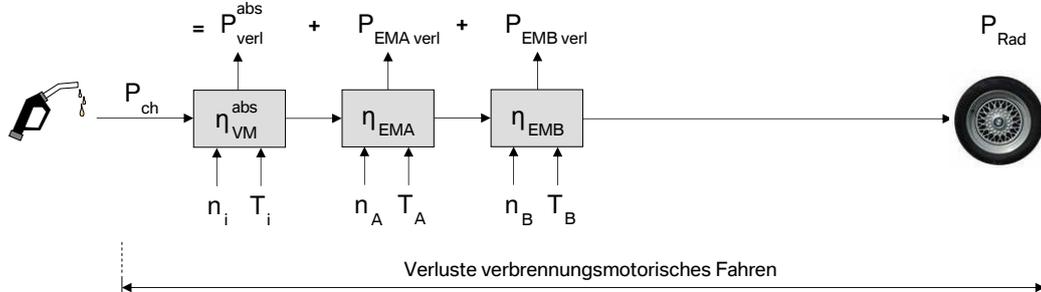


Abbildung 5.7: Wirkketten zur Bewertung des energetischen Vorteils im rein elektrischen Betrieb

Alle Informationen, die für die Bewertung des energetischen Vorteils des rein elektrischen Betriebes notwendig sind, lassen sich abhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  und dem angeforderten Fahrmoment  $M_{o,des}$  berechnen. Damit ist es möglich, die Bewertung vorab durchzuführen und die Ergebnisse in einem Kennfeld abzuspeichern.

### Berechnung des minimalen energetischen Vorteils

Die Gütefunktion  $\gamma_{Ladezustand}$  wird durch die Forderung eines Mindestwertes für den energetischen Vorteil ersetzt: Abhängig vom Ladezustand der HV-Batterie  $SOC$  und dem Zustand des Verbrennungsmotors (an/aus) wird ein Mindestvorteil berechnet, der durch den rein elektrischen Betrieb erzielt werden muss, um den Verbrennungsmotor aus Gründen der Effizienz abzustellen. Liegt der Ladezustand im optimalen Bereich, wird der geforderte Mindestvorteil auf Null gesetzt. Damit werden alle Fahrphasen, in denen elektrisches Fahren zu einer Verbrauchsreduktion führt, auch rein elektrisch umgesetzt. Sinkt der Ladezustand unter ein bestimmtes Niveau, muss aus zwei Gründen ein größerer Vorteil gefordert werden. Zum einen soll die Batterie aus Gründen der Lebensdauer nicht

## 5 Ableitung der heuristischen Ansätze

zu weit entladen und deswegen der Verbrennungsmotor entsprechend früher gestartet werden. Zum anderen hat eine tiefer entladene Batterie nach einem Zustart eine stärkere Lastpunktanhebung zur Folge, siehe Abschnitt 5.1.2. Wegen der mit zunehmender Leistung fallenden Batterie- und E-Maschinenwirkungsgrade steigen die Verlustleistungen.

Bei hohen Ladezuständen muss dagegen ein geringerer Vorteil gefordert werden. Die Batterie muss entladen werden, um wieder einen geeigneten Ladezustand *SOC* zu erreichen. Dabei kann durch elektrisches Fahren immer mehr Kraftstoff eingespart werden als durch eine Lastpunktabsenkung. Es ist deswegen zielführend, den rein elektrischen Betrieb zu begünstigen. Zum anderen werden so hohe Ladezustände nur durch Rekuperation erreicht. Das bedeutet, dass die im vorangegangenen Abschnitt getroffenen Annahmen der Energieerzeugung über Lastpunktanhebung zu pessimistisch waren. Dies wiederum lässt sich durch eine entsprechende Anpassung des geforderten energetischen Vorteils ausgleichen.

### Stabilisierung und Entscheidung

Nicht bei jedem Vorzeichenwechsel der Differenz aus energetischem Vorteil und dem geforderten Mindestwert kann der Verbrennungsmotor ein- bzw. ausgeschaltet werden. Die Entscheidung wird über die folgende Logik stabilisiert: Die Differenz der beiden Signale wird in jedem Zeitschritt zu einem Summenwert addiert, solange sich dieser in einem festgelegten Bereich bewegt. Überschreitet der Summenwert eine der Grenzen, wird er auf diese zurückgesetzt. Bei jedem Überschreiten bzw. Erreichen eines Limits wird das Ausgangssignal auf den zu der Grenze gehörigen Wert (Verbrennungsmotor an bzw. Verbrennungsmotor aus) gesetzt und solange gehalten, bis wieder eine Grenze erreicht wird. Die Stabilisierung ist damit nicht zeitabhängig, sondern wird dadurch bestimmt, wie stark sich das Entscheidungskriterium ändert.

## 5.2 Implementierung und Parametrisierung der heuristischen Ansätze

Dieser Abschnitt beschreibt, wie das Simulationsmodell die heuristischen Ableitungen aus der Online-Optimierung abbildet. Verglichen mit den Optimierungsalgorithmen sind die dazu notwendigen Funktionen leicht umzusetzen. In den meisten Fällen ergibt sich die Implementierung in trivialer Form aus den in Abschnitt 5.1 dargestellten Konzepten. Eine detaillierte Beschreibung der Umsetzung entfällt daher. Der Schwerpunkt von Absatz 5.2.1 liegt auf der gewählten Modellstruktur.

### 5.2.1 Implementierung in Modelica

## Gangwahl

Die in den Abschnitten 5.1.1 bzw. 5.1.3 beschriebenen Funktionen bilden in der heuristischen Betriebsstrategie den Funktionsblock „Gangwahl“, siehe Abbildung 5.8.

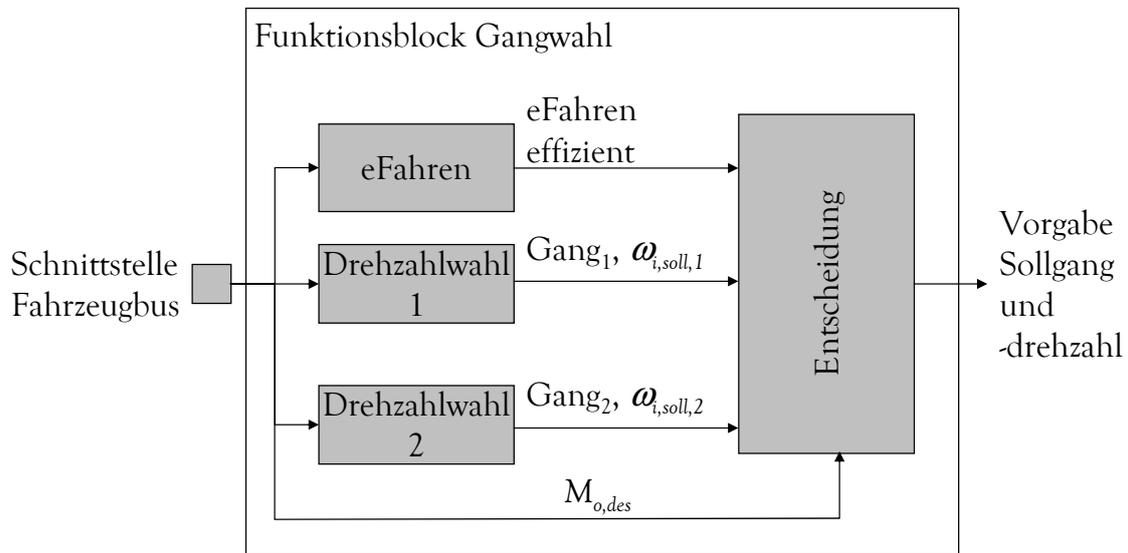


Abbildung 5.8: Aufbau des Funktionsblockes Gangwahl im heuristischen Ansatz

Die Teilfunktion *Entscheidung* wertet die Ergebnisse der anderen Funktionsblöcke aus und gibt den entsprechenden Getriebemodus vor: Falls elektrisches Fahren effizient ist, setzt er die Zieldrehzahl  $\omega_{i,soll}$  gleich Null und den gewünschten Getriebemodus auf eCVT 1. Anderenfalls ist der Wert von  $M_{o,des}$  entscheidend. Liegt er über dem Grenzwert  $M_{o,des,lim}$ , sind die Ergebnisse der Teilfunktion 2 (feste Übersetzungsverhältnisse) ausschlaggebend, liegt er darüber oder findet sich kein zulässiges festes Übersetzungsverhältnis, werden die Ergebnisse von Teilfunktion 2 (kontinuierliche Übersetzungsverhältnisse) weitergeleitet. Die Teilfunktionen liefern bereits durch Hysteresen und Filter stabilisierte Werte, so dass eine übergreifende Stabilisierung nicht mehr notwendig ist.

## Wahl Verbrennungsmotormoment

Der in Abschnitt 5.1.2 beschriebene Algorithmus kann direkt in Modelica umgesetzt werden.

### 5.2.2 Parametrisierung

In den Teilfunktionen Drehzahlwahl, Ladezustandsregelung und elektrisches Fahren finden sich freie Parameter, die festgelegt werden müssen. Sie wurden so gewählt, dass sich in den verschiedenen Zyklen ein Verhalten ähnlich der der Online-Optimierung ergibt.

#### Drehzahlwahl

Teilfunktion 1 gibt abhängig von  $M_{o,des}$  und  $\omega_o$  die Solldrehzahl für den Verbrennungsmotor  $\omega_{i,soll}$  vor.

Für Fahranforderungen  $M_{o,des} < M_{o,des,lim}$  gelten dabei folgende Festlegungen: Im stillstandsnahen Bereich stellt die Leerlaufdrehzahl des Verbrennungsmotors die Untergrenze dar. Während der Fahrt liegt das Mindestniveau bei 1000 upm, um ein akzeptables Ansprechverhalten des Verbrennungsmotors zu gewährleisten. Bei Geschwindigkeiten über  $100 \frac{km}{h}$  ist nochmals ein höheres Niveau erforderlich, um keine zu großen Unterschiede zwischen Schub- und Zugbetrieb (siehe Teilfunktion 2) entstehen zu lassen. Hohe Lastanforderungen erfordern eine entsprechend höhere Verbrennungsmotordrehzahl.

Teilfunktion 2 wählt den längsten Gang, der aus Fahrleistungssicht alle Anforderungen erfüllt. Der einzige freie Parameter ist die Hysterese  $\Delta M_{o,Hysterese}$ , die Pendelschaltungen vermeidet. Wird sie zu klein gewählt, erfüllt sie ihre Aufgabe nicht. Wird sie zu groß gewählt, werden Hochschaltungen zu lange hinausgezögert; eine Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs ist die Folge. Ein Wert von 50 Nm hat sich als guter Kompromiss erwiesen.

#### Ladezustandsregelung

Eine Kennlinie gibt die Batteriewunschleistung  $P_{Bat,soll}$  abhängig vom  $SOC$  vor. Diese Vorgabe orientiert sich an der Bedatung, die für  $\gamma_{Ladezustand}$  gewählt wurde, vgl. Absatz 4.2.3. Abbildung 5.9 zeigt die gewählte Ausprägung: Bei mittleren Ladezuständen ist  $P_{Bat,soll}$  Null, um ein unnötiges Zyklieren der Batterie zu vermeiden. Dies reduziert Verluste und erhöht die Lebensdauer des elektrischen Speichers. Der Ladezustand  $SOC$  weicht daher nur aufgrund der Funktionen Boost, elektrisches Fahren oder Rekuperation von einem günstigen mittleren Wert ab. Mit der gewählten Kennlinie gleicht die Ladezustandsregelung diese Abweichungen wieder aus.

## 5 Ableitung der heuristischen Ansätze

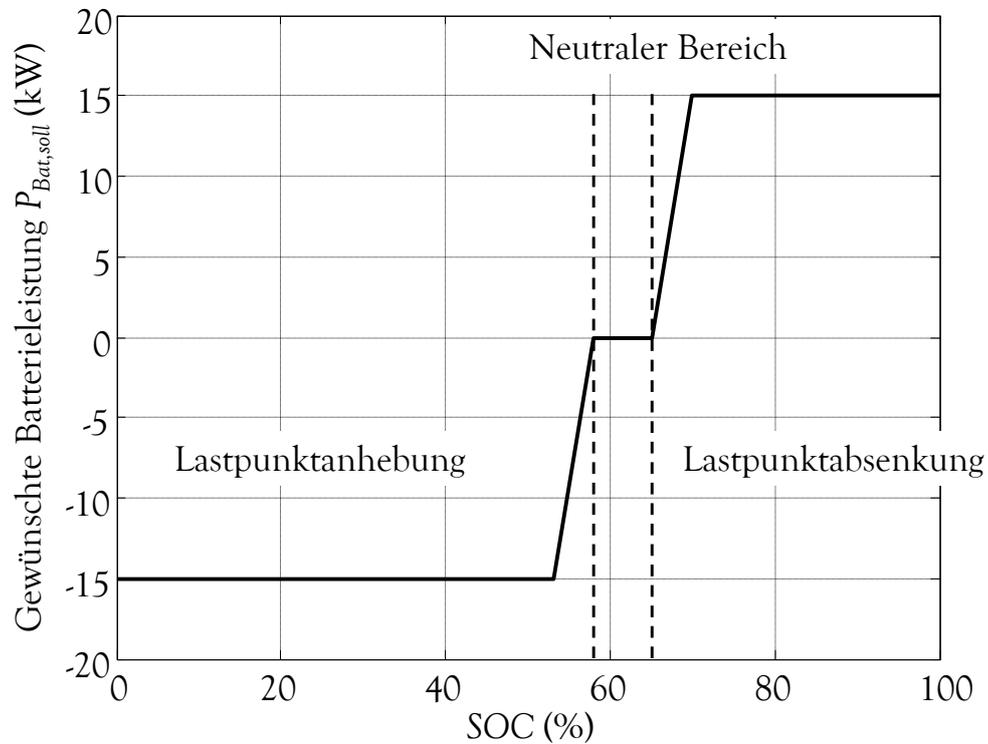


Abbildung 5.9: Gewünschte Batterieleistung abhängig vom SOC

Ein weiterer freier Parameter ist  $M_{i,lim}$ , der von der Ladezustandsregelung nicht überschritten werden sollte, um gute Wirkungsgrade sicherzustellen. Um den Einfluss dieser Begrenzung zu prüfen und ähnlich dem Verhalten der Kostenfunktionen ausprägen zu können, wurde ein Zyklus erstellt, in dem der Verbrennungsmotor mit hohen Lasten betrieben wird. Abbildung 5.10 zeigt das Geschwindigkeitsprofil.

## 5 Ableitung der heuristischen Ansätze

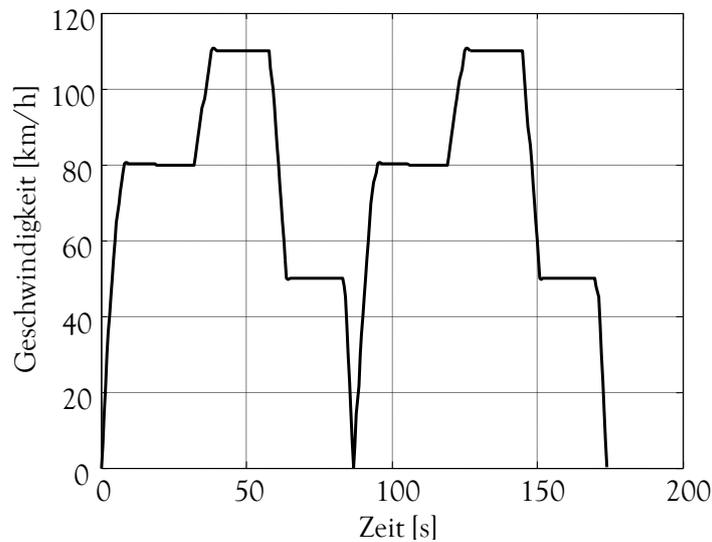


Abbildung 5.10: Geschwindigkeitsprofil des Testzyklus

Der Zyklus kombiniert Phasen großer Beschleunigung mit Phasen konstanter Geschwindigkeit. Dieser Zyklus wurde mit verschiedenen Parametrisierungen der Begrenzungen  $M_{i,lim}$  simuliert, um den jeweiligen Einfluss zu prüfen. Das Ergebnis sind die in Abbildung 5.11 dargestellten Verbräuche. Die Begrenzung darf nicht bei einem zu niedrigen Moment liegen. Bei Grenzmomenten  $M_{i,lim}$  unter 300 Nm liegt der Verbrauch sogar höher als im unbegrenzten Fall ( $M_{i,lim} = 600 Nm$ ), da die E-Maschinen- und die Batterieverluste stark ansteigen. Mit steigenden Begrenzungsmomenten fällt der Verbrauch, ein Optimum ergibt sich in dem ausgewählten Testzyklus bei einem Grenzmoment  $M_{i,lim}$  von 370 bis 390 Nm. Dabei wird eine Verbrauchsverbesserung von knapp 4% erreicht. Auch wenn dieser Wert natürlich nur für einen entsprechend dynamischen Zyklus gilt und nicht direkt auf den Kundenverbrauch übertragbar ist, erweist sich die zusätzliche Begrenzung als sinnvoll. Bei Limits  $M_{i,lim}$  größer als 390 Nm ist bis zum unbegrenzten Fall eine nahezu lineare Abnahme des Potentials zu beobachten.

## 5 Ableitung der heuristischen Ansätze

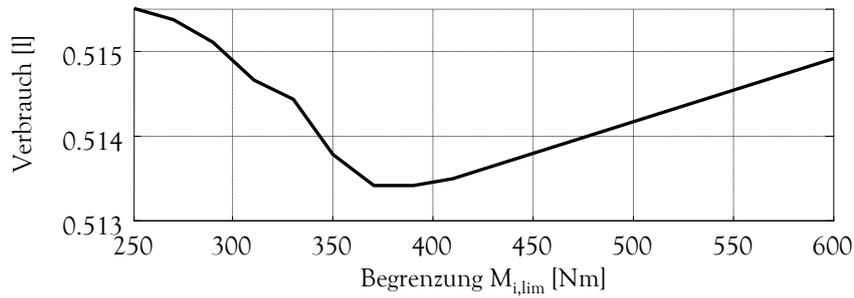


Abbildung 5.11: Verbrauch bei der Fahrt des Testzyklus abhängig von der Begrenzung des Verbrennungsmotormomentes

Bei dem Vergleich zwischen begrenztem und unbegrenztem Verbrennungsmotormoment unterscheiden sich die Verläufe des Verbrennungsmotormomentes nicht nur bei hohen Lasten, sondern auch im Teillastbereich, wie in Abbildung 5.12 zu sehen ist.

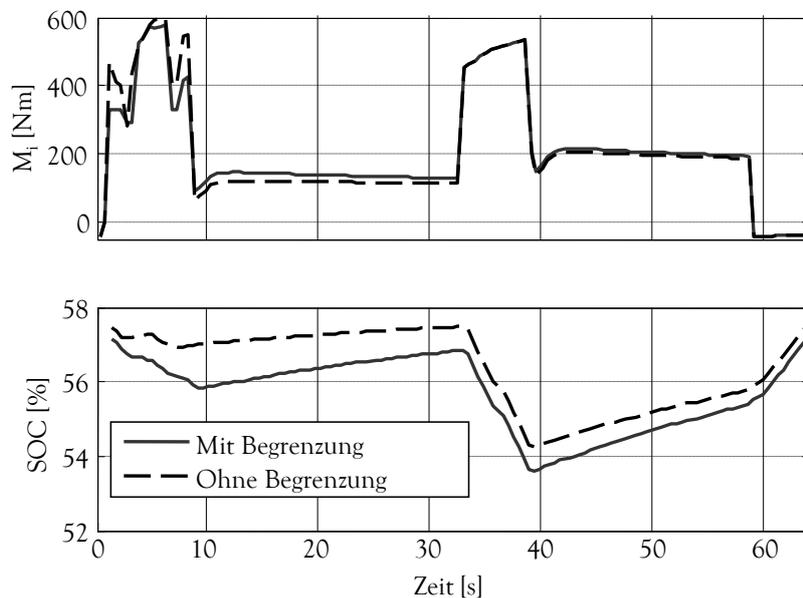


Abbildung 5.12: Verlauf des Verbrennungsmotormomentes und des Ladezustandes

Wenn bei hohen Lasten das Moment begrenzt wird, muss die Batterie die fehlende Leistung ergänzen und wird dabei entladen. Bei der Konstantfahrt ist dann der Ladezustand

## 5 Ableitung der heuristischen Ansätze

*SOC* entsprechend niedriger und die Batterie muss durch eine Lastpunktanhebung geladen werden. Durch diese Lastpunktanhebung steigt der Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors. Beide Effekte erhöhen den mittleren Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors.

Zwar sinken die Verluste im Verbrennungsmotor mit der Momentbegrenzung, dafür steigen die Verluste in den anderen Komponenten. In den Bereichen, in denen das Moment begrenzt wird, müssen die E-Maschinen mit höheren Lasten betrieben werden, um die geforderte Ausgangsleistung des Getriebes zu erfüllen. Dadurch erzeugen sie Verluste in der Batterie und in den E-Maschinen. Im Teillastbereich ist das gleiche Verhalten zu beobachten. Hier wird die Batterie geladen, wobei Verluste in den E-Maschinen und in der Batterie entstehen. Tabelle 5.1 zeigt einen Vergleich aller Verluste für ein begrenztes bzw. unbegrenztes Verbrennungsmotormoment.

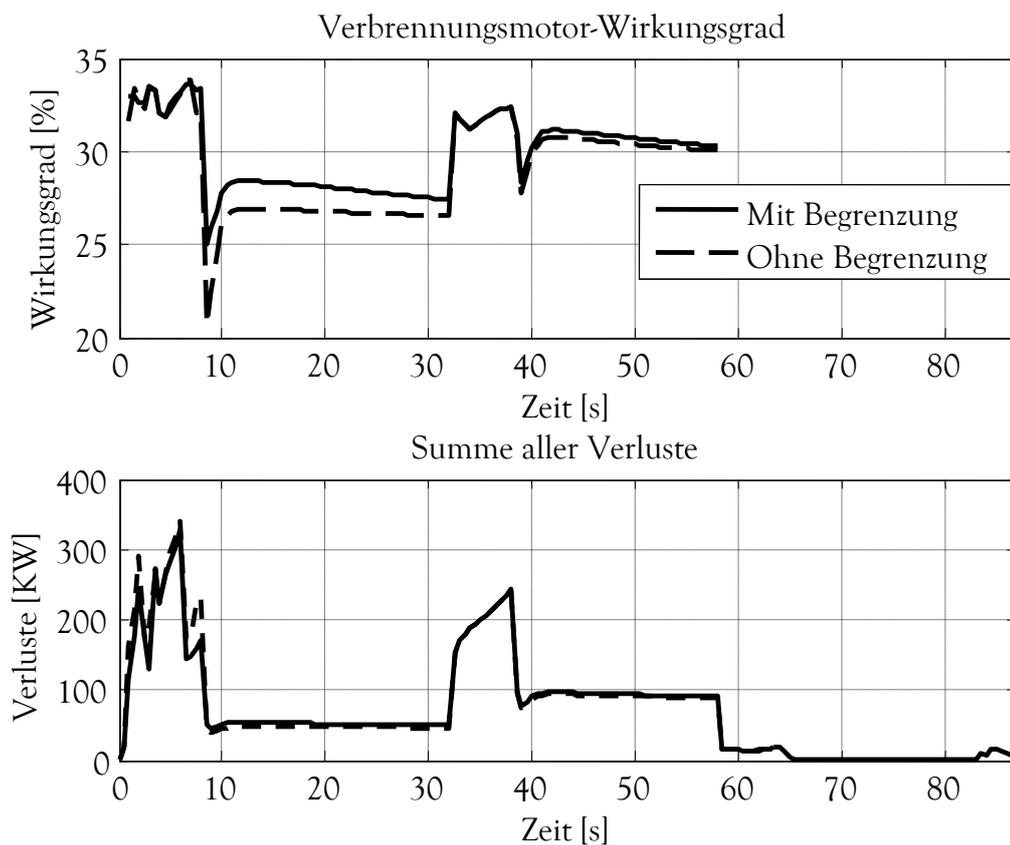


Abbildung 5.13: Verlauf des Wirkungsgrades des Verbrennungsmotors und der Systemverluste

## 5 Ableitung der heuristischen Ansätze

|                                     | <b>Mit <math>M_i</math>-Begrenzung<br/>in Wh</b> | <b>Ohne <math>M_i</math>-Begrenzung<br/>in Wh</b> |
|-------------------------------------|--|---|
| Verbrennungsmotorverluste           | 3150.9   | 3180.5  |
| E-Maschine A Verluste               | 82.2   | 78.9  |
| E-Maschine B Verluste               | 58.3   | 56.4  |
| Batterieverluste                    | 93.4   | 87.4  |
| Totale Verluste                     | 3384.9   | 3403.3  |
| Verlustreduzierung durch Begrenzung | 18.4   |   |

Tabelle 5.1: Vergleich der Verluste für begrenztes und unbegrenztes Verbrennungsmotormoment

Wenn die Begrenzung des Verbrennungsmotormomentes aktiv ist, liegen die Verluste der Batterie und der E-Maschinen höher, die des Verbrennungsmotors dagegen niedriger. In Summe ergeben sich wie gewünscht niedrigere Verluste.

### Elektrisches Fahren

Die Werte des Kennfeldes, die den energetischen Vorteil des rein elektrischen Betriebes festlegen, werden nach der im Abschnitt 5.1.3 beschriebenen Methode berechnet. Als freie Parameter verbleiben die Kennlinie des energetischen Mindestvorteils, der abhängig vom Ladezustand der Batterie *SOC* gefordert wird, und die Bedatung der Stabilisierungsfunktion.

Da die Funktion aus der Logik der Online-Optimierung abgeleitet ist, sollte sich eine Bedatung finden lassen, mit der sich das Verhalten der Online-Optimierung einstellt. Tatsächlich gelingt es, das Verhalten in den verschiedenen Zyklen nahezu deckungsgleich zu gestalten, siehe beispielhaft Abbildung 5.14. Die Abweichungen zwischen den Umschaltungen der beiden Betriebsstrategieansätze liegen bei maximal einer Sekunde, durchgezogene und gestrichelte Linie sind daher kaum unterscheidbar.

## 5 Ableitung der heuristischen Ansätze

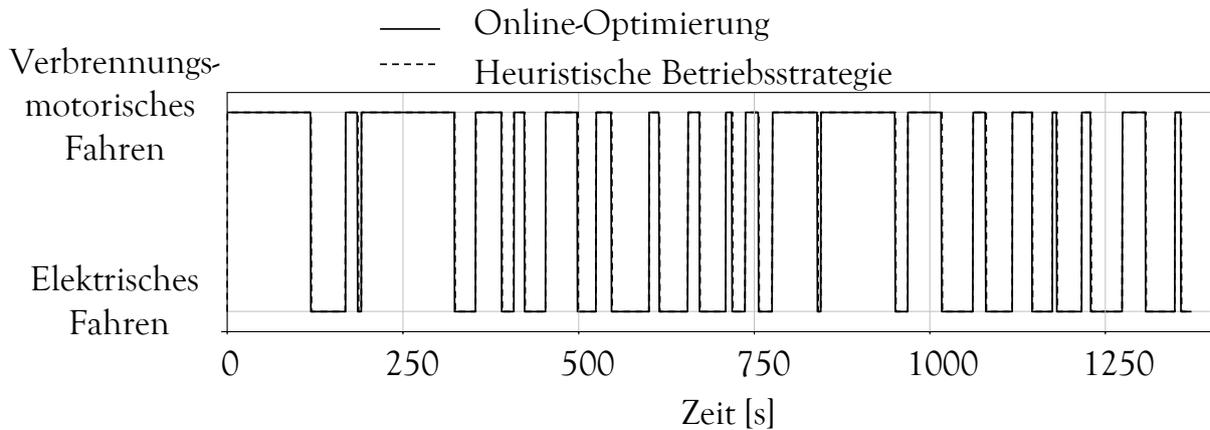


Abbildung 5.14: Phasen mit verbrennungsmotorischem und rein elektrischem Betrieb bei Online-Optimierung und heuristische Betriebsstrategie

### 5.3 Simulationsergebnisse

Alle im Folgenden angegebenen Ergebnisse sind mit ausgeglichener Ladebilanz berechnet.

#### 5.3.1 Kraftstoffverbrauch

Mit den implementierten Algorithmen werden die in Tabelle 5.2 dargestellten Verbräuche erreicht.

| Zyklus       | Kraftstoffverbrauch [l] | $\Delta$ zu Online-Optimierung [%] |
|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| NEFZ         | 1,152                   | +0,7                               |
| FTP          | 1,300                   | +0,3                               |
| Kundenzyklus | 4,438                   | +0,1                               |

Tabelle 5.2: Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs mit heuristischer Betriebsstrategie

Diese Ergebnisse zeigen, dass sich der Verbrauch im Vergleich zur Online-Optimierung nur wenig verschlechtert hat.

### 5.3.2 Fahrverhalten

Die Drehzahlen werden so gewählt, dass das geforderte Reservemoment stets eingehalten wird. Für das Gütemaß  $\Omega$ , das die Qualität der Drehzahlverläufe bewertet, ergeben sich die in Tabelle 5.3 dargestellten Werte:

| Zyklus       | $\Omega$ | $\Delta$ zu Online-Optimierung [%] |
|--------------|----------|------------------------------------|
| NEFZ         | 2,2      | -3,4                               |
| FTP          | 6,1      | -1,7                               |
| Kundenzyklus | 9,6      | -4,3                               |

Tabelle 5.3: Gütemaß  $\Omega$  der heuristischen Betriebsstrategie

Durch den vereinfachten Algorithmus, der in der heuristischen Betriebsstrategie die Drehzahlen festlegt, ergeben sich in allen Zyklen ruhigere Drehzahlverläufe, die zu einem verbesserten Gütemaß  $\Omega$  führen.

### 5.3.3 Komponentenbelastung

Die implementierte Randwertberechnung gibt zuverlässig nur Betriebspunkte frei, in denen alle Leistungs- und Momentengrenzen eingehalten sind. Dieses Kriterium ist daher auch durch die heuristische Betriebsstrategie erfüllt. Die Belastungen, denen der HV-Speicher in den verschiedenen Testzyklen ausgesetzt ist, fasst Tabelle 5.4 zusammen.

## 5 Ableitung der heuristischen Ansätze

| Zyklus              | Kriterium        | Wert     | Referenz Online-Optimierung |
|---------------------|------------------|----------|-----------------------------|
| <b>NEFZ</b>         | Energiedurchsatz | 1,48 kWh | 1,56 kWh                    |
|                     | $SOC_{max}$      | 66,2 %   | 67,1 %                      |
|                     | $SOC_{min}$      | 52,1 %   | 52,2%                       |
|                     | $SOC_{mittel}$   | 59,7 %   | 61,2 %                      |
| <b>FTP</b>          | Energiedurchsatz | 2,65 kWh | 2,71 kWh                    |
|                     | $SOC_{max}$      | 64,3 %   | 64,6 %                      |
|                     | $SOC_{min}$      | 55,0 %   | 57,2%                       |
|                     | $SOC_{mittel}$   | 60,0 %   | 61,2 %                      |
| <b>Kundenzyklus</b> | Energiedurchsatz | 3,57 kWh | 3,45 kWh                    |
|                     | $SOC_{max}$      | 65,8 %   | 67,4 %                      |
|                     | $SOC_{min}$      | 52,8 %   | 52,5%                       |
|                     | $SOC_{mittel}$   | 61,0 %   | 62,0 %                      |

Tabelle 5.4: Belastung des HV-Speichers in den verschiedenen Testzyklen mit der heuristischen Betriebsstrategie im Vergleich zur Online-Optimierung

Die Komponentenbelastungen liegen auf dem gleichen Niveau wie die der Online-Optimierung.

# 6 Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick

Die Arbeit hat sich zum Ziel gesetzt, für ein Hybridfahrzeug den Betriebsstrategieansatz zu entwickeln, der für den Serieneinsatz in naher Zukunft am besten geeignet ist. Als Basis für die Untersuchungen dient ein Fahrzeug der SUV-Klasse mit leistungsverzweigtem Vollhybrid-Getriebe. Die Kriterien, die für die Bewertung herangezogen wurden, sind die erreichte Kraftstoffeffizienz, das resultierende Fahrverhalten, das Maß, in dem die Komponenten belastet werden und die Komplexität der Betriebsstrategie selbst.

Um die Untersuchungen zu ermöglichen, wurde das untersuchte Fahrzeug in einem Simulationsmodell abgebildet. Dazu wurden in ein bestehendes Gesamtfahrzeugmodell die Hybridkomponenten Getriebe, E-Maschinen mit Leistungselektronik und Hochvoltpeicher integriert und validiert.

Nach aktuellem Stand der Technik wird die *Online-Optimierung* als der Betriebsstrategieansatz angesehen, mit dem ohne Prädiktion des Fahrprofils der geringste Kraftstoffverbrauch erreichbar ist. Dieses Prinzip diente daher als Ausgangspunkt der Untersuchungen. Es wurde sowohl auf das ausgewählte Fahrzeug und Getriebe als auch auf das erweiterte Spektrum an Anforderungen angepasst und im Simulationsmodell umgesetzt.

Mit unterschiedlichen Parametrisierungen konnten verschiedene Ausprägungen untersucht werden: Durch eine ausreichend niedrige Gewichtung der Gütefunktionen für Fahrverhalten und Komponentenbelastungen ergab sich die Variante, die als theoretische Referenz für den minimalen Kraftstoffverbrauch diente. Praktisch war diese Variante aber nicht einsetzbar, da sie in den übrigen Kriterien keine ausreichenden Ergebnisse aufwies. Eine ausgewogene Parametrisierung der Gütefunktionen führte zu einer Lösung, die unter Einhaltung der Anforderungen an Fahrverhalten und Komponentenbelastungen die Referenz für Kraftstoffeffizienz darstellte.

Dieses funktionale Optimum diente als Referenz für die weiteren Untersuchungen, deren Ziel es war, die hohe Komplexität der *Online-Optimierung* zu umgehen. Dazu wurde ein heuristischer Ansatz abgeleitet. Algorithmen und Parameter dieses heuristischen Ansatzes konnten mit Hilfe der Erkenntnisse aus der Online-Optimierung gefunden werden. So entstand eine Betriebsstrategie, die mit deutlich reduziertem Aufwand nahezu die gleichen Zielwerte erreichte wie die komplexe Originalfunktion. Abschnitt 6.1 fasst die Ergebnisse detailliert zusammen und zieht ein Fazit. Abschnitt 6.2 gibt einen Aus-

blick darüber, inwieweit die Ergebnisse dieser Arbeit verallgemeinert werden können und welchen Einfluss sie damit auf zukünftige Untersuchungen und Fahrzeugentwicklungen haben.

### 6.1 Vergleich der Ansätze anhand der Zielkriterien

**Kraftstoffverbrauch** Das Fahrzeug wurde mit allen Betriebsstrategievarianten simuliert: Es kamen sowohl die *Online-Optimierung* mit verbrauchsoptimaler und seriennaher Parametrisierung zum Einsatz als auch der daraus abgeleitete heuristische Ansatz. Im Fokus der Untersuchungen lagen ein Kundenzyklus und die gesetzlichen Normzyklen für Europa (NEFZ) und die USA (FTP72 und Highway-Zyklus).

Als erstes Ergebnis kann festgehalten werden, dass beim Übergang von dem verbrauchsoptimalen zum seriennahen Parametersatz der *Online-Optimierung* eine merkliche Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs unumgänglich ist. Diese liegt je nach Zyklus zwischen 2,8% und 3,6%.

Geringere Verschlechterungen ergeben sich beim Übergang von der *Online-Optimierung* zu ihrer heuristischen Ableitung. Im Kriterium Kraftstoffverbrauch verfehlt die einfachere Betriebsstrategie je nach Zyklus die Werte der Originalfunktion lediglich um 0,1% bis 0,7%. Diese relativ geringen Vorteile lassen sich damit erklären, dass die für die einfachere Strategie getroffenen Näherungen wie erhofft nur zu geringen Fehlern führen. Der erfahrungsbasierte Ansatz findet häufig die verbrauchsgünstigsten Punkte, und die auftretenden Abweichungen vom Optimum verschlechtern die Effizienz nur geringfügig. Abbildung 6.1 verdeutlicht die Zusammenhänge.

## 6 Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick

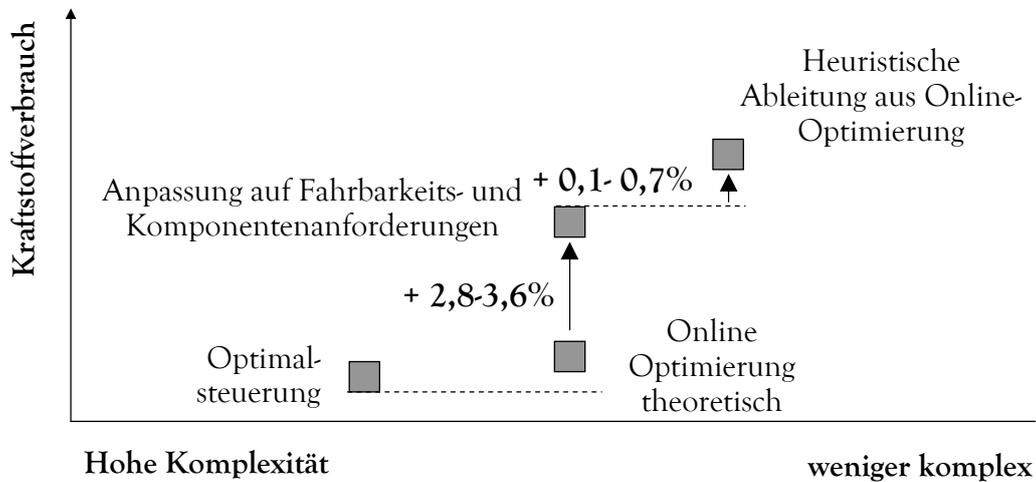


Abbildung 6.1: Betriebsstrategieansätze

**Fahrverhalten, Nachvollziehbarkeit für den Fahrer** Beide Betriebsstrategien sind so ausgelegt, dass sie die geforderten Reservemomente einhalten. Um die Häufigkeit der Schaltungen zu bewerten, wurde zu Beginn der Arbeit ein Kriterium festgelegt, das bewertet, wie häufig sich die Getriebeübersetzung  $i$  wahrnehmbar verändert. Die heuristische Betriebsstrategie zeigt im Schnitt ein etwas ruhigeres Verhalten als die Online-Optimierung. Durch den Stabilisierungsalgorithmus, der die Rohergebnisse der Online-Optimierung filtert, bietet aber auch dieser Ansatz ein für den Fahrer nachvollziehbares Verhalten.

**Komponentenbelastung** Je nach dem, welche Zyklisierung die HV-Batterie zulässt, wird die Betriebsstrategie mehr oder weniger eingeschränkt. Um einen korrekten Vergleich zu ermöglichen, sind beide Ansätze so parametrisiert, dass die Energiedurchsätze der HV-Batterie und deren Zyklisierung ungefähr auf dem gleichen Niveau liegen. Damit ist mit beiden Ansätzen ungefähr die gleiche Speicherlebensdauer zu erwarten.

**Entwicklungsaufwand, Beherrschbarkeit und Entwicklungsrisiko** Die Online-Optimierung erfordert deutlich größere Entwicklungs-, Applikations- und Absicherungsaufwände. Auch die Anforderungen an Rechenleistung und Speicher der betroffenen Steuergeräte sind wesentlich höher. Die kennfeldbasierte Betriebsstrategie ist eindeutig besser beherrschbar, die Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkung sind wesentlich klarer. Die Online-Optimierung erfordert zu jeder Projektphase von Entwicklern und

Applikateuren ein hohes Systemverständnis und idealerweise eine entsprechende Simulationsunterstützung.

**Fazit** Die Anpassungen, die zur Verbesserung des Fahrverhaltens und zur Reduzierung der Komponentenbelastungen auf ein seriennahes Niveau notwendig sind, heben unvermeidlich den Kraftstoffverbrauch nennenswert an.

Die Ableitung der erfahrungsbasierten Algorithmen gelingt sehr gut. Einer deutlichen Vereinfachung der Algorithmen stehen nur sehr geringe Einbußen bei der Kraftstoffeffizienz gegenüber. Für die Implementierung im untersuchten Fahrzeug ist folglich die abgeleitete heuristische Betriebsstrategie der am besten geeignete Ansatz. Die *Online-Optimierung* selbst ist dagegen gut geeignet für theoretische Voruntersuchungen, in denen ein funktionales Optimum gesucht wird. Diese Erkenntnisse sind äußerst wertvoll bei der Ableitung erfahrungsbasierter Algorithmen und deren Bedatung. Eine Umsetzung der Online-Optimierung im Fahrzeug würde die Komplexität des Systems dagegen an der falschen Stelle erhöhen.

## 6.2 Einordnung der Ergebnisse und Ausblick

Für das hier untersuchte Fahrzeug lässt sich ein klares Fazit ziehen: Die Online-Optimierung ist für grundsätzliche Untersuchungen und als Entwicklungswerkzeug geeignet. Für eine Umsetzung im Fahrzeug bieten sich aber die heuristischen Ableitungen an. Inwieweit lässt sich dieses Ergebnis auf andere Fahrzeuge übertragen? Zum einen ist aufgrund des gewählten Getriebes eine gute Übertragbarkeit anzunehmen. Das komplexe TwoMode-Getriebe bietet alle Möglichkeiten eines elektrifizierten Antriebsstranges: Die Hybridfunktionen sind vollständig darstellbar, zudem ist der Betrieb als leistungsverzweigter sowie als paralleler Hybrid möglich.

Einige der Vereinfachungen, die der heuristischen Betriebsstrategie zu Grunde liegen, gelten nur für den untersuchten Antriebsstrang. Bei dem ausgewählten Fahrzeug dominiert der Verbrennungsmotor deutlich das elektrische System. Besonders deutlich ist das Verhältnis bei den entstehenden Verlustleistungen, da das elektrische System zudem über wesentlich bessere Wirkungsgrade verfügt. In Fahrzeugen, in denen die Verlustleistungen des elektrischen Systems denen des Verbrennungsmotors nahe kommen, müssen einige Vereinfachungen neu betrachtet werden. Dies ist zum Beispiel der Fall bei Fahrzeugen, deren Hauptantriebsquelle ein Elektromotor ist und die den Verbrennungsmotor nur zum Notladen des Speichers mitführen („Range extender“).

Weiterhin ist erwähnenswert, dass der relative Wirkungsgrad bei Verbrennungsmotoren, die im niedrigen Teillastbereich im Schichtbetrieb mager ( $\lambda \gg 1$ ) betrieben werden können [93], nicht konstant ist. Hier bietet es sich an, neben der diskutierten Grenze zur Vermeidung der Vollast entsprechende Grenzen einzuführen, die den Magerbetrieb si-

## *6 Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick*

herstellen. Eine ähnlich Logik bietet sich auch für Fahrzeuge an, die bei niedriger Last einen Teil der Zylinder abschalten [28].

Grundsätzlich sind die Ergebnisse auf die heute diskutierten Hybridkonzepte übertragbar: Die Online-Optimierung sollte zur Erstellung heuristischer Algorithmen genutzt werden, die dann im Fahrzeug zur Umsetzung kommen.

# A Getriebegleichungen

Für den eCVT1-Mode gilt:

$$u_{ai,1} = -\frac{1}{i_1} \cdot \frac{1 - i_1 \cdot i_2}{1 - i_2}; \quad (\text{A.1})$$

$$u_{ao,1} = 0; \quad (\text{A.2})$$

$$\theta_{ai,1} = \frac{i_1 i_2^2}{(i_2 + 1)(i_1 i_2 - 1)} \cdot I_C + \frac{(i_2 + 1)i_1}{(i_1 i_2 - 1)} \cdot I_A + \frac{(i_1 i_2 - 1)}{(i_2 + 1)i_1} \cdot I_i; \quad (\text{A.3})$$

$$\theta_{ai,1} = \frac{-(i_3 + 1)i_2}{(i_2 + 1)(i_1 i_2 - 1)} \cdot I_C - \frac{-(i_3 + 1)(i_1 + 1)}{i_1 i_2 - 1} \cdot I_A; \quad (\text{A.4})$$

$$u_{bi,1} = \frac{-(i_1 + 1)}{(i_2 + 1)i_1}; \quad (\text{A.5})$$

$$u_{bo,1} = \frac{1}{i_3 + 1}; \quad (\text{A.6})$$

$$\theta_{bi,1} = \frac{i_1 i_2}{(i_2 + 1)(i_1 i_2 - 1)} \cdot I_C + \frac{i_1 + 1}{(i_2 + 1)i_1} \cdot I_i; \quad (\text{A.7})$$

$$\theta_{bo,1} = \frac{1}{i_3 + 1} \cdot I_o - \frac{i_3 + 1}{(i_1 i_2 - 1)(i_2 + 1)} \cdot I_C + (i_3 + 1) \cdot I_B; \quad (\text{A.8})$$

Für den eCVT-Mode 2 gilt:

$$u_{ai,2} = \frac{1 - i_1 i_2}{(i_2 + 1)i_1}; \quad (\text{A.9})$$

$$u_{ao,2} = \frac{1}{(i_2 + 1)i_2}; \quad (\text{A.10})$$

## A Getriebegleichungen

$$\theta_{ai,2} = \frac{-(i_3 + 1)i_1 i_2^2}{(i_2 + 1)i_3^2} \cdot I_D - i_1 \cdot I_A + \frac{(i_1 i_2 - 1)}{(i_2 + 1)i_1} \cdot I_i; \quad (\text{A.11})$$

$$\theta_{ao,2} = \frac{i_2}{i_2 + 1} \cdot I_o + \frac{i_2}{i_2 + 1} \cdot I_C + (i_1 + 1) \cdot I_A + \frac{(i_3 + 1)(i_1 i_2 + i_3)i_2 i_3^2}{i_2 + 1} \cdot I_D; \quad (\text{A.12})$$

$$u_{bi,2} = \frac{-(i_1 + 1)}{(i_2 + 1)i_1}; \quad (\text{A.13})$$

$$u_{bo,2} = \frac{1}{i_2 + 1}; \quad (\text{A.14})$$

$$\theta_{bi,2} = i_1 i_2 \cdot I_B + \frac{(i_2 - i_3)i_1 i_2}{(i_2 + 1)i_3^2} \cdot I_D + \frac{i_1 + 1}{(i_2 + 1)i_1} \cdot I_i; \quad (\text{A.15})$$

$$\theta_{bo,2} = \frac{1}{i_2 + 1} \cdot I_o + \frac{1}{i_2 + 1} \cdot I_C - (i_1 i_2 - 1) \cdot I_B - \frac{(i_2 - i_3)(i_1 i_2 + i_3)}{(i_2 + 1)i_3^2} \cdot I_D; \quad (\text{A.16})$$

Gang 1:

$$u_{oi,1} = u_{oa,1} = u_{ob,1} = (1 - i_3) \quad (\text{A.17})$$

$$\theta_{o,1} = - \left( (I_i + I_A + I_B + I_C)(i_3 + 1)^2 + I_o \right) \quad (\text{A.18})$$

Gang 2:

$$u_{oi,2} = \left( 1 - \frac{i_3}{i_1 \cdot i_2} \right) \quad (\text{A.19})$$

$$u_{oa,2} = \left( 1 - \frac{i_3}{i_2} \right) \quad (\text{A.20})$$

$$u_{ob,2} = 1 - i_3 \quad (\text{A.21})$$

$$\theta_{o,2} = - \left( I_C + I_o + \frac{(i_2 - i_3)^2}{i_2^2} \cdot I_A + \frac{(i_1 i_2 + i_3)^2}{i_1^2 i_2^2} \cdot I_i + (i_3 + 1)^2 \cdot I_B \right) \quad (\text{A.22})$$

Gang 3:

$$u_{oi,3} = u_{oa,3} = u_{ob,3} = 1 \quad (\text{A.23})$$

$$\theta_{o,3} = -(I_i + I_o + I_A + I_B + I_C + I_D) \quad (\text{A.24})$$

Gang 4:

## A Getriebegleichungen

$$u_{oi,4} = \left(1 - \frac{1}{i_1 \cdot i_2}\right) \quad (\text{A.25})$$

$$u_{oa,4} = -\frac{1 - i_2}{i_2} \quad (\text{A.26})$$

$$u_{ob,4} = 0 \quad (\text{A.27})$$

$$\theta_{o,4} = -\left(I_c + I_o + \frac{(i_3 + 1)^2}{i_3^2} \cdot I_D + \frac{(i_2 + 1)^2}{i_2^2} \cdot I_A + \frac{(I - 2)^2}{i_1^2 i_2^2} I_i\right) \quad (\text{A.28})$$

mit

$I_i$  Trägheit von Verbrennungsmotor, Zweimassenschwungrad, Hohlrads Planetensatz 1

$I_o$  Trägheit Steg 3

$I_A$  Trägheit E-Maschine A, Sonnenrad 1 und Hohlrads 2

$I_B$  Trägheit E-Maschine B, Sonnenrad 2 und 3

$I_C$  Trägheit Steg 1 und 2

$I_D$  Trägheit Hohlrads 3

## B Gleichungen zur Berechnung des Verbrennungsmotormomentes

**Gang 2** Für die Momenten im Gang 2 gilt:

$$M_o = \left(1 + \frac{i_3}{i_1 \cdot i_2}\right) \cdot M_i + \left(1 - \frac{i_3}{i_2}\right) \cdot M_a + (i_3 + 1) \cdot M_b \quad (\text{B.1})$$

$$M_a = \frac{1}{9} \cdot \frac{\omega_b}{\omega_a} \cdot M_b \quad (\text{B.2})$$

Und für die Drehzahlen:

$$\omega_a = \left(1 - \frac{i_3}{i_2}\right) \cdot \omega_o \quad (\text{B.3})$$

$$\omega_b = (1 + i_3) \cdot \omega_o \quad (\text{B.4})$$

Durch Einsetzung in Gleichung 3.1 ergibt sich:

$$a \cdot M_b^2 + b \cdot M_b + c = 0 \quad (\text{B.5})$$

mit

$$a = b_1 + \left(\frac{1}{9} \cdot \frac{\omega_b}{\omega_a}\right)^2 \cdot a_1$$

$$b = \omega_b + b_2 + \left(\frac{1}{9} \cdot \frac{\omega_b}{\omega_a}\right) \cdot (\omega_a + a_2)$$

$$c = a_3 + b_3 + B_{Loss} - P_{bat} + Load$$

Daraus:

$$M_b = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}$$

Und aus Gleichungen B.2 und B.4:

$$M_a = \frac{1}{9} \cdot \frac{1 + i_3}{1 + \frac{i_3}{i_1 \cdot i_2}} \cdot M_b$$

Wie beim Gang 1 erhält man  $T_i$  bei Einsetzung in B.1:

$$M_i = \frac{M_o - \left(1 - \frac{i_3}{i_2}\right) \cdot M_a - (i_3 + 1) \cdot M_b}{1 + \frac{i_3}{i_1 \cdot i_2}} \quad (\text{B.6})$$

## B Gleichungen zur Berechnung des Verbrennungsmotormomentes

**Gang 3** Für die Momenten im Gang 3 gilt:

$$M_o = M_i + M_a + M_b \quad (\text{B.7})$$

$$M_a = \frac{\omega_b}{\omega_a} \cdot M_b \quad (\text{B.8})$$

Und für die Drehzahlen:

$$\omega_a = \omega_b \quad (\text{B.9})$$

$$\omega_b = \omega_o \quad (\text{B.10})$$

Durch Einsetzung in Gleichung 3.1 ergibt sich:

$$a \cdot M_a^2 + b \cdot M_a + c = 0 \quad (\text{B.11})$$

mit

$$a = a_1 + b_1$$

$$b = 2 \cdot \omega_o + a_2 + b_2$$

$$c = a_3 + b_3 + B_{Loss} - P_{bat} + Load$$

Daraus:

$$M_a = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}$$

Und aus Gleichungen B.8 und B.10:

$$M_a = M_b$$

Dann in B.7 einsetzen um  $M_i$  zu berechnen:

$$M_i = M_o - M_a - M_b \quad (\text{B.12})$$

**Gang 4** Für die Momenten im Gang 4 gilt:

$$M_o = \left(1 - \frac{1}{i_1 \cdot i_2}\right) \cdot M_i + \frac{i_2 + 1}{i_2} \cdot M_a \quad (\text{B.13})$$

$$M_b = 0 \quad (\text{B.14})$$

Und für die Drehzahlen:

$$\omega_a = \frac{i_2 + 1}{i_2} \cdot \omega_o \quad (\text{B.15})$$

$$\omega_b = 0 \quad (\text{B.16})$$

Durch Einsetzung in Gleichung 3.1 ergibt sich:

$$a \cdot M_a^2 + b \cdot M_a + c = 0 \quad (\text{B.17})$$

mit

$$a = a_1$$

## B Gleichungen zur Berechnung des Verbrennungsmotormomentes

$$b = \omega_a + a_2$$

$$c = a_3 + B_{Loss} - P_{bat} + Load$$

Daraus:

$$M_a = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}$$

Aus B.13 ergibt sich:

$$M_i = \frac{M_o - \frac{i_2+1}{i_2} \cdot M_a}{1 - \frac{1}{i_1 \cdot i_2}} \quad (B.18)$$

**CVT-Mode 2** Für die Momenten im eCVT-Modi 2 gilt:

$$M_b = \frac{M_o}{i_2 + 1} - \frac{i_1 + 1}{i_1 \cdot (i_2 + 1)} \cdot M_i \quad (B.19)$$

$$M_a = \frac{M_i}{i_1} + i_2 \cdot M_b \quad (B.20)$$

Aus B.19 und B.20:

$$M_a = \frac{i_2}{i_2 + 1} \cdot M_o + \left( \frac{1}{i_1} - \frac{i_2 \cdot (i_1 + 1)}{i_1 \cdot (i_2 + 1)} \right) \cdot M_i \quad (B.21)$$

Und für die Drehzahlen:

$$\omega_a = (1 + i_1) \cdot \omega_o - i_1 \cdot \omega_i \quad (B.22)$$

$$\omega_b = (1 - i_1 \cdot i_2) \cdot \omega_o + i_1 \cdot i_2 \cdot \omega_i \quad (B.23)$$

Durch Einsetzung in Gleichung 3.1 ergibt sich:

$$a \cdot M_i^2 + b \cdot M_i + c = 0 \quad (B.24)$$

mit

$$a = \left( \frac{1}{i_1} - \frac{i_2 \cdot (i_1 + 1)}{i_1 \cdot (i_2 + 1)} \right)^2 \cdot a_1 + \left( \frac{i_1 + 1}{i_1 \cdot (i_2 + 1)} \right)^2 \cdot b_1$$

$$b = \left( \frac{1}{i_1} - \frac{i_2 \cdot (i_1 + 1)}{i_1 \cdot (i_2 + 1)} \right) \cdot (\omega_a + a_2 + 2 \cdot a_1 \cdot M_o \cdot \frac{i_2}{i_2 + 1}) - \left( \frac{i_1 + 1}{i_1 \cdot (i_2 + 1)} \right) \cdot (\omega_b + b_2 + \frac{2 \cdot b_1 \cdot M_o}{i_2 + 1})$$

$$c = \frac{i_2}{i_2 + 1} \cdot (M_o \cdot \omega_a + a_2 \cdot M_o + a_1 \cdot M_o^2 \cdot \frac{i_2}{i_2 + 1}) + \frac{M_o}{i_2 + 1} \cdot (\omega_b + b_2 + b_1 \cdot \frac{M_o}{i_2 + 1}) + a_3 + b_3 + B_{Loss} - P_{bat} + Load$$

Daraus nehmen wir das kleinste  $Ti$ :

$$M_i = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}$$

# Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

## Abkürzungen

|      |  |
|------|--|
| CVT  | Continuously Variable Transmission   |
| eCVT | Electrically Continuously Variable Transmission  |
| FTP  | Federal Test Procedure, beschreibt u.a. den US-amerikanischen Normzyklus zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs |
| HA   | Hinterachse  |
| HV   | Hochvolt   |
| NEFZ | Neuer Europäischer Fahrzyklus  |
| NV   | Niedervolt   |
| SUV  | Sports Utility Vehicle   |
| upm  | Umdrehungen pro Minute   |
| VA   | Vorderachse  |
| VG   | Verteilergetriebe  |

## Bauteile

|            |  |
|------------|--|
| $C_{1..4}$ | Kupplungen eins bis vier des Hybridgetriebes |
| $EM$       | E-Maschine                                   |
| $VM$       | Verbrennungsmotor                            |

## Phyikalische Größen

|              |   |
|--------------|---|
| $a_{1..3}$   | Verlustleistungskoeffizienten der E-Maschine A      |
| $a_x$        | Längsbeschleunigung                                 |
| $b_{1..3}$   | Verlustleistungskoeffizienten der E-Maschine B      |
| $I$          | Strom   |
| $i$          | Übersetzungsverhältnis                              |
| $M$          | Moment  |
| $m$          | Masse   |
| $p$          | Druck   |
| $P$          | Leistung  |
| $SOC$        | Ladezustand der Hochvolt-Batterie (State of Charge) |
| $U$          | Spannung  |
| $T$          | Zeitkonstante                                       |
| $t$          | Zeit  |
| $v$          | Fahrzeuggeschwindigkeit                             |
| $\gamma$     | Gütefunktion  |
| $\Gamma$     | Gesamtgütefunktion                                  |
| $\Omega$     | Gütekriterium zur Bewertung der Drehzahlverläufe    |
| $\omega$     | Drehzahl  |
| $\eta_{rel}$ | relativer Wirkungsgrad der Energieerzeugung         |
| $\theta$     | Trägheitstensor                                     |
| $\psi$       | Gewichtungsfaktor                                   |
| $\xi$        | Äquivalenzfaktor                                    |

## Indizes

|        |   |
|--------|---|
| $a$    | E-Maschine A, z.B. $\omega_a$ : Drehzahl der E-Maschine A                                     |
| $b$    | E-Maschine B, z.B. $M_b$ : Moment der E-Maschine B  |
| $Bat$  | HV-Batterie, z.B. $P_{Bat}$ : Leistung der HV-Batterie  |
| $BN$   | elektrisches Energiebordnetz, $P_{BN}$ : Leistungsaufnahme des elektrischen Energiebordnetzes |
| $chem$ | chemisch, z.B. $P_{chem}$ : chemische Leistung  |
| $el$   | elektrisch, z.B. $P_{el}$ : elektrische Leistung  |
| $i$    | Getriebeeingang, z.B. $\omega_i$ : Drehzahl Getriebeeingang (Input)                           |
| $ind$  | indiziert, z.B. $M_{ind}$ : Indiziertes Moment  |
| $o$    | Getriebeausgang, z.B. $M_o$ : Moment am Getriebeausgang (Output)                              |
| $m$    | eCVT-Modus m, z.B. $\omega_{a,m}$ : Drehzahl der E-Maschine A im eCVT-Modus m                 |
| $n$    | Gang n, z.B. $\omega_{a,n}$ : Drehzahl der E-Maschine A im Gang n                             |
| $r$    | Reibung, z.B. $M_r$ : Reibmoment  |
| $Verl$ | Verluste, z.B. $P_{Verl}$ : Verlustleistung   |

# Abbildungsverzeichnis

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Überblick Hybridtopologien . . . . .   | 3  |
| 1.2  | Unterfunktionen Boost . . . . .  | 7  |
| 1.3  | Teilfunktionen der energetischen Betriebsstrategie Gesamtfahrzeug . . . . .  | 8  |
| 1.4  | Betriebsstrategieansätze . . . . .   | 11 |
| 1.5  | Geschwindigkeitsabhängige Mindestwerte für das Beschleunigungsvermögen, die stets ohne Rückschaltung erreichbar sein müssen . . . . .  | 12 |
| 1.6  | Berechnung der Kennzahl $\Omega$ . . . . .   | 13 |
| 2.1  | Gesamtfahrzeug mit Hybridumfängen . . . . .  | 17 |
| 2.2  | Aufbau des Gesamtfahrzeugmodells . . . . .   | 19 |
| 2.3  | Freiheitsgrad im Hybridsystem: Lastpunktverschiebung am Verbrennungsmotor . . . . .  | 20 |
| 2.4  | Verhältnis zwischen chemischer und effektiver Leistung des Verbrennungsmotors . . . . .  | 21 |
| 2.5  | Effektives Moment des Verbrennungsmotors und Getriebeeingangsmoment . . . . .  | 23 |
| 2.6  | Aufbau des Getriebes . . . . .   | 24 |
| 2.7  | Drehzahlverlauf . . . . .  | 26 |
| 2.8  | Waagebalkenmodell des Getriebes . . . . .  | 27 |
| 2.9  | Wirkungsgradoptimaler Anteil von E-Maschine A an Gesamtleistung im ersten Gang unter Beachtung der maximalen Momentengrenzen . . . . . | 29 |
| 2.10 | Aufbau des Getriebemodells . . . . .   | 30 |
| 2.11 | Verlauf des Getriebeöldrucks für ein dynamisches Lastprofil im 3. festen Gang . . . . .  | 32 |
| 2.12 | Validierungsergebnis für den dritten festen Gang . . . . .   | 34 |
| 2.13 | Validierungsergebnis für den dritten virtuellen Gang . . . . .   | 36 |
| 2.14 | Validierungsergebnis für elektrisches Fahren . . . . .   | 37 |
| 2.15 | Momentenkennlinien der E-Maschine A . . . . .  | 38 |
| 2.16 | Wirkungsgradkennfeld der E-Maschine A bei 300V und 90°C . . . . .  | 39 |
| 2.17 | Aufbau des E-Maschinenmodells . . . . .  | 40 |
| 2.18 | Approximation der Verlustleistung für $\omega_a = 3000$ U/min (links) und $\omega_a = 8000$ U/min (rechts) . . . . .                   | 41 |
| 2.19 | Validierungsergebnis E-Maschine B . . . . .  | 43 |
| 2.20 | Struktur des Batteriemodells . . . . .   | 45 |
| 2.21 | Batterieersatzmodell . . . . .   | 46 |
| 2.22 | Messung für Batterieparametrisierung . . . . .   | 48 |

## Abbildungsverzeichnis

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 3.1  | Die wichtigsten Informationsflüsse der Regelarchitektur . . . . .   | 50  |
| 3.2  | Zulässiger Drehzahlbereich im eCVT-Modus 1 . . . . .  | 52  |
| 3.3  | Drehzahlbereich eCVT-2 . . . . .  | 53  |
| 3.4  | Berechnung Moment der E-Maschine A $M_a$ . . . . .  | 55  |
| 3.5  | Berechnung von $M_{o,max} = f(\omega_i)$ durch lineare Interpolation zwischen den an den Stützstellen berechneten Grenzmomenten . . . . . | 56  |
| 3.6  | zulässige Abtriebsmomente im eCVT-1 Modus . . . . .   | 57  |
| 3.7  | Berechnung von $M_{o,max}$ im eCVT-1 Modus . . . . .  | 58  |
| 3.8  | Bereich zulässiger Abtriebsmomente im eCVT-2 Modus . . . . .  | 59  |
| 3.9  | Berechnung von $M_{oMax}$ im eCVT-2 Modus . . . . .   | 61  |
| 3.10 | Reglung der Größe $\dot{\omega}_i$ , die für die Berechnung der E-Maschinenmomente $M_a$ und $M_b$ notwendig ist . . . . .                | 66  |
|      |   |     |
| 4.1  | Aufbau der Online-Optimierung . . . . .   | 68  |
| 4.2  | einfacher Fahrzyklus . . . . .  | 72  |
| 4.3  | Berechnung der Fahrbarkeitskriteriums . . . . .   | 74  |
| 4.4  | Suchverfahren nach dem Goldenen Schnitt . . . . .   | 77  |
| 4.5  | Suchverfahren nach dem Goldenen Schnitt für den zweidimensionalen Fall . . . . .  | 78  |
| 4.6  | Transformation des 2-D-Suchbereiches auf normierte Achsen . . . . .   | 79  |
| 4.7  | Struktur der obersten Ebene der Drehzahloptimierung . . . . .   | 81  |
| 4.8  | $P_{Bat,soll}$ in Abhängigkeit des Ladezustandes $SOC$ . . . . .  | 85  |
| 4.9  | Einfluss der Lastanforderung auf die Batterieleistung . . . . .   | 86  |
| 4.10 | Drehzahlverläufe mit und ohne Stabilisierung . . . . .  | 88  |
| 4.11 | Erforderliche Anzahl an Optimierungsschritten des in <i>Dymola</i> implementierten Optimierers . . . . .                                  | 89  |
| 4.12 | Eine ausgeglichene Ladebilanz wird durch zweifache Simulation der Zyklen erreicht . . . . .   | 90  |
| 4.13 | Betriebsstrategieansätze . . . . .  | 91  |
| 4.14 | Drehzahlverlauf ohne Berücksichtigung der Reservemomentanforderung . . . . .  | 92  |
| 4.15 | Der Optimierer wählt die Drehzahlen meist so, dass das verfügbare Fahrmoment gerade dem Mindestwert entspricht . . . . .                  | 94  |
| 4.16 | Drehzahlerhöhung bei erhöhter Ladeleistung . . . . .  | 95  |
| 4.17 | Gütefunktionen $\gamma$ mit $a_x = 1, 5 \frac{m}{s^2}, 90 \frac{km}{h}$ und $\psi_{Ladezustand}=0$ . . . . .                              | 96  |
| 4.18 | Gütefunktionen $\gamma$ mit $a_x = 1, 5 \frac{m}{s^2}, 90 \frac{km}{h}$ und $\psi_{Ladezustand}=0,5$ . . . . .                            | 97  |
|      |   |     |
| 5.1  | Getriebestufen . . . . .  | 100 |
| 5.2  | Bestimmung des Verbrennungsmotormomentes ohne Online-Optimierung . . . . .  | 102 |
| 5.3  | Direkte Versorgung des Bordnetzes aus der HV-Batterie . . . . .   | 104 |
| 5.4  | Verbrennungsmotormoment Regelung . . . . .  | 107 |
| 5.5  | Entscheidungsregel für eine Begrenzung des Verbrennungsmotormomentes zur Effizienzoptimierung . . . . .                                   | 108 |
| 5.6  | Aufbau der Entscheidung für oder gegen rein elektrisches Fahren . . . . .   | 109 |
| 5.7  | Wirkketten zur Bewertung des energetischen Vorteils im rein elektrischen Betrieb . . . . .  | 111 |
| 5.8  | Aufbau des Funktionsblockes Gangwahl im heuristischen Ansatz . . . . .  | 113 |

## Abbildungsverzeichnis

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 5.9  | Gewünschte Batterieleistung abhängig vom SOC . . . . .  | 115 |
| 5.10 | Geschwindigkeitsprofil des Testzyklus . . . . .   | 116 |
| 5.11 | Verbrauch bei der Fahrt des Testzyklus abhängig von der Begrenzung des<br>Verbrennungsmotormomentes . . . . .                           | 117 |
| 5.12 | Verlauf des Verbrennungsmotormomentes und des Ladezustandes . . . . .   | 117 |
| 5.13 | Verlauf des Wirkungsgrades des Verbrennungsmotors und der Systemver-<br>luste . . . . .   | 118 |
| 5.14 | Phasen mit verbrennungsmotorischem und rein elektrischem Betrieb bei<br>Online-Optimierung und heuristische Betriebsstrategie . . . . . | 120 |
| 6.1  | Betriebsstrategieansätze . . . . .  | 125 |

# Tabellenverzeichnis

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 1.1 | Eigenschaften verschiedener Batterietechnologien . . . . .   | 5   |
| 2.1 | Kupplungseinsatz in den verschiedenen Gängen und eCVT-Modi . . . . .   | 25  |
| 2.2 | Technische Daten NiMH-Batterie . . . . .   | 44  |
| 2.3 | Zulässiger Energiedurchsatz des HV-Speichers . . . . .   | 45  |
| 3.1 | Schaltvorgang zwischen verschiedenen Betriebszuständen . . . . .   | 64  |
| 4.1 | Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs mit online-optimierender Betriebsstrategie . . . . .   | 91  |
| 4.2 | Gütemaß $\Omega$ . . . . .   | 93  |
| 4.3 | Belastung des HV-Speichers in den verschiedenen Testzyklen . . . . .   | 93  |
| 5.1 | Vergleich der Verluste für begrenztes und unbegrenztes Verbrennungsmotormoment . . . . .   | 119 |
| 5.2 | Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs mit heuristischer Betriebsstrategie . . . . .  | 120 |
| 5.3 | Gütemaß $\Omega$ der heuristischen Betriebsstrategie . . . . .   | 121 |
| 5.4 | Belastung des HV-Speichers in den verschiedenen Testzyklen mit der heuristischen Betriebsstrategie im Vergleich zur Online-Optimierung . . . . . | 122 |

# Literaturverzeichnis

- [1] BACK, M. : *Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen*, Universitätsverlag Karlsruhe, Diss., 2005
- [2] BAUER, R. ; BERTHOLD, T. ; RASTE, T. ; RIETH, P. : Simulationsmethoden für Hybridsysteme und deren Anwendungen am Beispiel der regenerativen Bremse. In: *AUTOREG 2008* VDI/VDE-Gesellschaft, 2008, S. 433–442
- [3] BÖCKL, M. : *Adaptives Energiemanagement für ein Hybridfahrzeug unter Berücksichtigung von Infrastruktur- und Verkehrsinformationen*, Technische Universität Wien, Diss., 2008
- [4] BECK, R. ; BOLLIG, A. ; ABEL, D. : Echtzeitstrategien zum Prädiktiven Optimalen Energiemanagement in Hybridfahrzeugen. VDI-Berichte Nr. 1975 (2006), S. 557–560
- [5] BENFORD, H. L. ; LEISING, M. B.: The Lever Analogy: A New Tool in Transmission Analysis. In: *SAE 1961 Paper 810102*
- [6] BERCKMÜLLER, M. : Wasserstoff-Verbrennungsmotor mit hoher spezifischer Leistung - eine realistische Alternative zu Benzin- und Dieselmotoren. 20. Internationale VDI/VW-Gemeinschaftstagung: Kraftstoffe und Antriebe der Zukunft - Synergien für eine nachhaltige Zukunft? (2003), S. 59–72
- [7] BERGER, C. : Einfluss der Nebenaggregate auf den Motorbetrieb. Technische Universität Dresden, Lehrstuhl für Verbrennungsmotoren (Forschungsbericht 2005)
- [8] BERNER, U. : *Klimafakten. Der Rückblick - Ein Schlüssel für die Zukunft*. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 2004 (4. Auflage)
- [9] BIERMANN, J.-W. : Hybridantriebe - Strukturvarianten, Betriebsstrategien sowie deren Vor- und Nachteile. In: *5. Symposium Elektrische Straßenfahrzeuge* Technische Akademie Esslingen, 2008
- [10] BÄKER, B. : Forschungsprojekt Optimierungstool für Hybridfahrzeuge, Untersuchungen zur Betriebsstrategieoptimierung im hybriden KFZ-Antriebsstrang. Technical report, Technische Universität Dresden (2007)
- [11] BLANKENBACH, B. ; BLESSING, U. ; KNÖDEL, U. : Das Doppelkupplungsgetriebe als Basis für einen Flexiblen Modularen Hybrid. In: *AUTOREG 2008* VDI/VDE-Gesellschaft, 2008, S. 443–456

## Literaturverzeichnis

- [12] BMW GROUP, HG.: *Verkaufskatalog X6*. BMW, 2008
- [13] BMW GROUP, HG.: MINI Homepage. In: *www.MINI.de* (aufgerufen am 20.12.2008)
- [14] BOMZE, I. M. ; GROSSMANN, W. : *Optimierung - Theorie und Algorithmen*. BI wissenschaftsverlag Mannheim, 1993
- [15] BORCK, F. ; EBERLEH, B. ; RINKER, M. : Die Traktionsbatterie - Schlüsseltechnologie für den Durchbruch elektrischer Fahrzeugantriebe. In: *ATZ elektronik* 3. Jahrgang (2008), Februar, S. 14–18
- [16] BRAESS, H. ; SEIFFERT, U. : *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Braunschweig Wiesbaden: Vieweg, 2000 (1. Auflage)
- [17] BULLER, S. : *Impedance-Based Simulation Models for Energy Storage Devices in Advanced Automotive Power Systems*. Dissertation RWTH Aachen, 2002
- [18] BUSCH, R. : *Elektrotechnik und Elektronik*. Wiesbaden: Teubner, 2006 (4. Auflage)
- [19] CHILDERS, C. : Incentives and Regulations Influencing Hybrid Electric Vehicles. In: *SAE Hybrid Vehicles Technologies Symposium 7.2.2007*
- [20] CHRIST, T. : *Rekuperation in elektrischen Energiebordnetzen von Kraftfahrzeugen*. VDI Verlag, 2006 (Fortschr.-Ber. VDI Reihe 12 Nr. 623)
- [21] CITROEN (HRSG.): URL: [http://www.citroen.de/CWG/Neuwagen/PKW/C3/CITROEN\\_C3\\_Stop\\_und\\_Start/Technik\\_Sicherheit/](http://www.citroen.de/CWG/Neuwagen/PKW/C3/CITROEN_C3_Stop_und_Start/Technik_Sicherheit/). In: *WWW-Seite, Zugriff am 21.1.2008*
- [22] CONLON, B. : Comparative Analysis of Single and Combined Hybrid Electrically Variable Transmission Operating Modes. In: *SAE Technical Paper Series 2205-01-1162*
- [23] DESIGN SIMULATION TECHNOLOGIES, INC.: *Online in Internet, URL: <http://www.workingmodel.com/>*. [Stand 2008-07-02]
- [24] EGGER, A. ; SCHMID, A. : Doppelschicht-Kondensator als Kurzzeitspeicher für den autarken Hybrid. In: *VDI-Tagung Hybridantriebe, München* Bd. VDI-Berichte Nr. 1459, ISBN 3-18-091459-9, 1999, S. 167–180
- [25] FLOWMASTER GROUP : *Online in Internet, URL: <http://www.flowmaster.com/>*. [Stand 2008-07-02]
- [26] FREI, B. : *Regelung eines elektromechanischen Getriebes für Hybridfahrzeuge*, Technischen Universität Chemnitz, Diss., 2005
- [27] GLOOR, R. : *Elektrische Antriebssysteme*. Ravel Dokumentation Nr. 724.333d, 1996
- [28] GOLLOCH, R. : *Downsizing bei Verbrennungsmotoren*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005
- [29] GREWE, T. M. ; CONLON, B. M. ; HOLMES, A. G.: Defining the General Motors 2-Mode Hybrid Transmission. In: *SAE SAE 2007-01-0273* (2007)

## Literaturverzeichnis

- [30] VON GRUNDHERR, J. : *Vergleich von Rekuperationsbordnetzen anhand ihres Kraftstoff-einsparpotentials*. Technischen Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Diplomarbeit 2005
- [31] VON GRUNDHERR, J. ; CHRIST, T. ; WIGERMO, H. ; LINS, F. ; GOLLE, A. : E-Fahren-Entscheidung für Hybridfahrzeuge. In: *Internationale Patentanmeldung* PC-T/US2008/008856 (2008)
- [32] VON GRUNDHERR, J. ; LEDERER, M. : Möglichkeiten und Grenzen einer Online-Optimierung zur Steuerung eines hybriden Antriebsstranges Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren - AUTOREG 2008, 2008
- [33] VON GRUNDHERR, J. ; WIGERMO, H. ; MISCH, R. : Simulation of the Entire Vehicle in the Product Development Process. In: *Auto Technology* 9 (Februar 2009)
- [34] GUTTENBERG, P. : *Der Autarke Hybrid am Prüfstand - Funktion, Kraftstoffverbrauch und energetische Analyse*, Technischen Universität München, Diss., 2004
- [35] GUZELLA, L. ; SCIARRETTA, A. : *Vehicle Propulsion Systems*. Springer, 2005
- [36] HAFKEMEYER, M. ; LIEBL, J. ; EL-DWAIK, F. ; STAUBER, J. : Effiziente Dynamik durch intelligentes Energiemanagement. In: *12. Internationaler Kongress Elektronik im Kraftfahrzeug* (Oktober 2005)
- [37] HAFNER, C. : *Numerische Optimierung*. Online in Internet: URL: [www.alphard.ethz.ch/hafner/Vorles/Optim/OPT.htm](http://www.alphard.ethz.ch/hafner/Vorles/Optim/OPT.htm), [Stand 19.11.2007]
- [38] HARRER, M. ; SCHMITT, T. ; FLECK, R. : Elektromechanische Lenksysteme - Herausforderungen und Entwicklungstrends 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug - und Motorentechnik, 2006, S. 1573–1586
- [39] HESS, U. ; MITTERER, A. ; NEUGEBAUER, S. ; RIEGERT, P. ; SEIDER, G. : Das Wärmemanagement des neuen BMW-Reihen-Sechszylindermotors. In: *Motortechnische Zeitschrift - MTZ* 11 (2005), S. 872–877
- [40] HÖHN, B.-R. : Grundlagen für die Auslegung der Elektromaschine beim Autarken Hybrid. *Konstruktion* 48 (1996), S. 109–113
- [41] HOFBECK, F. : *Optimierung von energetischen Betriebsstrategien bei Hybridfahrzeugen*. Technischen Universität München, Lehrstuhl für Informationstechnik im Maschinenwesen, Diplomarbeit 2008
- [42] HONDA MOTOR EUROPE (NORTH) GMBH: Civic Hybrid. In: *Verkaufskatalog* (Offenbach, März 2007)
- [43] HUBER, B. : *Hochvolt-speichermmodellierung*. Technischen Universität München, Diplomarbeit 2008
- [44] INTEC GMBH: Online in Internet, URL: <http://www.simpack.de/>. [Stand 2008-07-02]
- [45] JÖRG, A. ; SCHRÖDER, D. : Predictive Real Time Energy Management for Hybrid

## Literaturverzeichnis

- Cars using Mixed Integer Linear Programming 2nd CTI Symposium - Automotive Transmission, Detroit, USA, 2008
- [46] KACHER, G. : Die Kunst der Untertreibung. In: *Sueddeutsche Zeitung* (5.5.2007), S. Seite V2/2
- [47] KAEHLER, B. ; KERSTING, K. ; BROUWER, M. ; CHRIST, T. : Design Criteria, Methods of Analysis, and Evaluation of Power Split Transmissions Explained Through a Two-Mode Hybrid Application. In: *16. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik 2007* (2007), S. 589–614
- [48] KERSCHL, S. ; HIPPE, E. : Der MAN-Ultracap-Bus, Kraftstoffeinsparung durch effiziente Rekuperation. In: *DGES-Tagung: Hybridtechnologien im Aufschwung, Deutsche Gesellschaft für elektrische Straßenfahrzeuge* Ford Forschungszentrum Aachen (Mai 2003)
- [49] KITOU, E. ; BARKMAN, A. ; FERNANDEZ, R. ; GUGELE, B. ; RIGLER, E. ; RITTER, M. : Annual European Community greenhouse gas inventory 1990-2004 and inventory report 2006. In: *European Environment Agency* (2006)
- [50] KLEIMAIER, A. : *Optimale Betriebsführung von Hybridfahrzeugen*, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der TUM, Diss., 2003
- [51] KLUGE, F. : *Etymologisches Wörterbuch der deutschen Sprache*. de Gruyter, Berlin, 2002 (22. Auflage)
- [52] KNAUER, G. ; WEISS, R. : *Skript zur Vorlesung Fahrzeuggetriebe*. 2007
- [53] KNÖDLER, K. : *Methoden der restringierten Online-Optimierung zur Basisapplikation moderner Verbrennungsmotoren*, Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Diss., 2004
- [54] KNORR, R. ; DEIML, M. ; LUGERT, G. : Starter Generator zeigt Biss. Mehr Fahrspaß durch SuperCaps 2. Braunschweiger Symposium: Hybridfahrzeuge und Energiemanagement, 2004, S. 17–40
- [55] KÜSELL, R. : Hybridantriebe: Potentiale, Funktionen und Komponenten. In: *AUTOREG 2008* VDI/VDE-Gesellschaft, 2008, S. 11–14
- [56] KUBE, R. ; BÖCKL, M. ; HOMMEL, H. ; KÖHLE, S. : Energy Management Strategies for Hybrid Drive Train Systems Using Infrastructure Information. In: *Wolfsburg: Volkswagen AG* 2002
- [57] LÖFFLER, J. : *Optimierungsverfahren zur adaptiven Steuerung von Fahrzeugantrieben*, Institut A für Mechanik der Universität Stuttgart, Diss., 2000
- [58] LIEBL, J. ; HAFKEMEYER, M. : Intelligente Generatorregelung - ein Beitrag zur Effizienten Dynamik, Elektroniksysteme im Automobil, Herausgeber. In: *EUROFORUM (Euroforum Deutschland, Düsseldorf), Beitrag 11* (2006)
- [59] LIEBL, J. ; MÜLLER, P. : Efficient Dynamics - der BMW-Weg zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung. In: *5. Braunschweiger Symposium Hybridfahrzeuge und Energiemanagement* (Februar

## Literaturverzeichnis

- 2008)
- [60] LINS, F. : *Entwicklung einer Betriebsstrategie für ein leistungsverzweigtes Hybridfahrzeug-Konzept*. Institut für Mess- und Regeltechnik Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich, Diplomarbeit 2006
  - [61] MARK, D. : Plug-In Hybrid Electric Vehicles. In: *SAE Hybrid Vehicles Technologies Symposium* (8.2.2007)
  - [62] MÜHLBAUER, K. . *Erstellung von Simulationsmodellen der elektrischen Komponenten eines Hybridsystems im Kraftfahrzeug*. 2008
  - [63] MÜLLER, G. ; VOGT, K. ; PONICK, B. : *Berechnung elektrischer Maschinen*. Wiley-Vch Verlag Weinheim, sechste Auflage, 2008
  - [64] MÜLLER, H. : *Die Umlaufgeriebe*. berlin: Springer, 1998 (Konstruktionsbücher, Band 28)
  - [65] MODELICA ASSOCIATION: *Online in Internet, URL: <http://www.modelica.org>*. [Stand 2008-07-02]
  - [66] MSC SOFTWARE: *Online in Internet, URL: <http://www.mssoftware.com/>*. [Stand 2008-07-02]
  - [67] MUTA, K. : Development of New-Generation Hybrid System THS II - Drastic Improvement of Power Performance and Fuel Economy SAE 2004-01-0064, 2004
  - [68] NITZ, L. : Chevrolet Tahoe and GMC Yukon Hybrids - Integrating Vehicle and Powertrain Technologies to Achieve Fuel Economy and Performance. In: *16. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik* RWTH Aachen, 2007
  - [69] OTTER, M. : Objektorientierte Modellierung mechatronischer Systeme mit MODELICA und DYMOLA. In: *9. Sitzung des VDI/VDA-GMA und VDI-FVT Ausschusses*, 2003
  - [70] PACHERNEGG, S. J.: A Closer Look at the Willans-Line. In: *International Automotive Engineering Congress* Society of Automotive Engineers, 1969
  - [71] PIEPENBREIER, B. : *Pulsumrichter für elektrische Antriebe, Vorlesungsskript*. Lehrstuhl für Elektrische Antriebe und Steuerung, Universität Erlangen- Nürnberg, sechste Auflage, 2008
  - [72] PISCHINGER, S. ; RÜTTEN, O. ; UMIERSKI, U. : Erdgas als Kraftstoff der Zukunft - Effiziente Brennverfahren und Applikation. In: *Kraftstoffe und Antriebe der Zukunft: Synergien für eine nachhaltige Zukunft?* 20. Internationale VDI/VWGemeinschaftstagung, Detroit, MI, Dezember 2003, S. 73–94
  - [73] POLAND, J. : *Modellgestützte und Evolutionäre Optimierungsverfahren für die Motorentwicklung*, Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Diss., 2002
  - [74] PORSCHE AUTOMOBIL HOLDING SE: *Online in Internet, URL:*

## Literaturverzeichnis

- <http://www.porsche.com/germany/aboutporsche/porscheandenvironment/hybrid/lohnerporsche/>.  
[Stand 2008-08-19]
- [75] PRESS, H. W. ; TEUKOLSKY, S. A. ; VETTERLING, W. T. ; FLANNERY, B. P.: *NUMERICAL RECIPES IN C: THE ART OF SCIENTIFIC COMPUTING*. Cambridge University Press, 2002 (ISBN 0-521-43108-5)
- [76] RAT DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN: Richtlinie des Rates vom 20. März 1970 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen. In: 70/220/EWG
- [77] REISER, C. ; ZELLBECK, H. ; HÄRTLE, C. ; KLAISS, T. : Der Kunde im Fokus der Fahrzeugentwicklung. In: ATZ 7-8/08 (Juli 2008)
- [78] REUTER, M. : *Regelungstechnik für Ingenieure*. Vieweg Verlag: Springer, 2004
- [79] ROHDE-BRANDENBURGER, K. : Verfahren zur einfachen und sicheren Abschätzung von Kraftstoffverbrauchspotentialen. In: *Einfluss von Gesamtfahrzeugparametern auf Fahrverhalten/Fahrleistung und Kraftstoffverbrauch* Essen: Haus der Technik E.V. 1996
- [80] SAGA, K. : Notwendige Fortschritte in der Antriebsstrangentwicklung zur nachhaltigen Mobilität mit Hybridtechnologie. In: 16. *Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2007* Aachen 2007
- [81] SCHRÖDER, D. ; JÖRG, A. ; SCHLURMANN, J. : *Der optimierte CVT-Hybrid - Auslegung, Betriebsführung, Regelung*. expert-verlag, Renningen, 2007 (Systemanalyse in der Kfz-Antriebstechnik IV, Band 79)
- [82] SCHUTZRECHT US 2007 / 0032926 A1 FORD GLOBAL TECHNOLOGIES : *Optimal Engine Operating Power Management Strategy for a Hybrid Electric Vehicle Powertrain*. 8.2.2007
- [83] SCHWEIKL, J. : *Nichtlineare Regelung von Schaltabläufen in leistungsverzweigten Hybridfahrzeugen durch Linear-Quadratisch-Optimale Zustandsrückführung (LQR)*. Hochschule München, Fakultät 03 Maschinenbau, Diplomarbeit 2007
- [84] SCIARRETTA, A. : On the Power Split Control of Parallel Hybrid Vehicles: from Global Optimization towards Real-time Control. In: *at - Automatisierungstechnik* 51 (2003), S. 195–203
- [85] SPIEGEL, L. ; KRAXNER, D. ; NEUSSER, H. : Das Hybridkonzept von Porsche
- [86] TAMOR, M. : Beyond Hybrids - Ford's Global Approach to Sustainable Mobility. In: *SAE Hybrid Vehicles Technologies Symposium* (7.2.2007)
- [87] THE MATHWORKS: *Online in Internet, URL: <http://www.Mathworks.com/>*. [Stand 2008-07-02]
- [88] THIMM, K. : *Objektorientierte Modellierung und Bewertung von Energiemanagementkonzepten im Kraftfahrzeug*. Aachen: RWTH, Institut für Regelungstechnik, Diplomarbeit

## Literaturverzeichnis

beit 2004

- [89] TRUCKENBRODT, A. ; NITZ, L. ; EPPLE, W. : Two Mode Hybrids - Adaptionen eines Intelligenten Systems. In: *15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik* RWTH Aachen, 2006
- [90] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY: Federal Test Procedure. In: *40 CFR Part 86*
- [91] VOSER, G. S.-A. . *Optimierung der Betriebsstrategie für ein Hybridfahrzeug*. 2008
- [92] WACHTMEISTER, G. : *Skriptum Grundlagen Verbrennungskraftmaschinen*. TU München, 2008
- [93] WACHTMEISTER, G. : *Skriptum Methoden in der Motorenapplikation*. TU München, 2008
- [94] WALLENTOWITZ, H. ; GNÖRICH, B. : Entwicklungstrends in der Kfz-Antriebstechnik. In: *Hybrid- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge: Energiemanagement-Aufgaben und -Strukturen* DGES-Fachtagung Ingolstadt (9.6.2005)
- [95] WALLENTOWITZ, H. ; JOHANNABER, M. ; SCHÜSSLER, M. : Hybrid-Elektro-Antriebssysteme, eine Übersicht. In: *DGES-Tagung Hybridtechnologien im Aufschwung* Deutsche Gesellschaft für elektrische Straßenfahrzeuge, Ford Forschungszentrum Aachen, 2003
- [96] WIGERMO, H. : *Modelling and Simulation of an electric power supply with regeneration function*. Göteborg: Chalmers University of Technology, Department of Signals and Systems 2005, Masterthesis
- [97] WIGERMO, H. ; VON GRUNDHERR, J. ; CHRIST, T. : Implementation of a Modelica Online Optimization for an Operating Strategy of a Hybrid Powertrain 6th International Modelica Conference, 2008
- [98] WILDE, A. : *Vorrausschauendes Energiemanagement in Hybridfahrzeugen*, Technische Universität München, Diss., 2008
- [99] WÜST, C. : Humpeln unter Starkstrom. In: *Der Spiegel* (12.3.2007)
- [100] YAMANAKA, A. : Lexus Hybrids. In: *SAE Hybrid Vehicles Technologies Symposium* (7.2.2007)
- [101] ZETINA, S. S. ; NEISS, K. ; BECK, R. ; ABEL, D. : Modellbasierte Regelungsmethodik in einem mehrfach leistungsverzweigten Hybridgetriebe angewandt auf dynamische Schalt- und Anfahrmanöver. In: *Autoreg 2008* VDI/VDE-Gesellschaft, S. 457–466