

*André Mayer*

# Analyse gesamtsystemischer Zusammenhänge von hybriden Antriebsstrangkzepten bezüglich kundenrelevanter Anforderungen

*Dissertation*

Schriftenreihe der Arbeitsgruppe  
Mess- und Regelungstechnik – Mechatronik  
Department Maschinenbau

Herausgeber Oliver Nelles

**Impressum**

Prof. Dr.-Ing. Oliver Nelles  
Arbeitsgruppe Mess- und Regelungstechnik  
Department Maschinenbau  
Universität Siegen  
57068 Siegen  
ISSN 2193-0538  
URN urn:nbn:de:hbz:467-19603  
Zugl.: Siegen, Univ., Diss., 2021

**Analyse gesamtsystemischer Zusammenhänge  
von hybriden Antriebsstrangkzepten  
bezüglich kundenrelevanter Anforderungen**

DISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines Doktors  
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

M. Eng. André Mayer

aus Mosbach

eingereicht bei der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät  
der Universität Siegen

Siegen 2020



Betreuer und erster Gutachter

Prof. Dr.-Ing. Oliver Nelles

Universität Siegen

Zweiter Gutachter

Prof. Dr.-Ing. Dirk Söffker

Universität Duisburg-Essen

Tag der mündlichen Prüfung

08. Juli 2021



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Antriebsvorentwicklung bei der Mercedes-Benz AG in Stuttgart. Die hochschulseitige Betreuung erfolgte durch Herrn Prof. Dr.-Ing. Oliver Nelles, Leiter der Arbeitsgruppe Mess- und Regelungstechnik – Mechatronik der Universität Siegen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Oliver Nelles für die Betreuung dieser Arbeit und das mir entgegengebrachte Vertrauen. Den stets konstruktiven fachlichen Austausch und die offenen Gespräche, auch über das Thema der Dissertation hinaus, habe ich sehr zu schätzen gelernt. Herrn Prof. Dr.-Ing. Dirk Söffker, Leiter des Lehrstuhls Steuerung, Regelung und Systemdynamik der Universität Duisburg-Essen, gilt mein Dank für die Übernahme des Koreferats und die konstruktiven Anregungen während der Endphase dieser Ausarbeitung.

Für die Unterstützung von der ersten Idee bis zur fertigen Dissertation und das Verständnis für die Notwendigkeit dieser Arbeit danke ich meinen früheren Vorgesetzten Herrn Dr. Corrado Nizzola, Herrn Dr.-Ing. Steffen Henzler, Herrn Manuel Urstöger sowie Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Pflieger sehr. Meinen früheren Kollegen der Abteilung RD/ETA danke ich für das offene und lehrreiche Umfeld. Insbesondere Herrn Christian Gletter und Herrn Dr.-Ing. Felix Pauli bin ich zu besonderem Dank verpflichtet für unzählige fachliche Diskussionen, motivierende Gespräche und deren unverblünte Kritik. Ebenso danke ich meinen Studenten Herrn Dominik Strach, Frau Evelyn Eisemann und Herrn Thomas Schmauser für ihr großes Engagement im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten und deren wertvollen Beitrag zu dieser Arbeit.

Für den offenen Umgang und die Unterstützung in zahlreichen Belangen danke ich allen Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Mess- und Regelungstechnik – Mechatronik.

Meiner Freundin Sandra danke ich ganz besonders für das entgegengebrachte Verständnis und ihre Geduld. Auch in frustrierenden Zeiten hat sie es immer wieder verstanden, meinen Fokus aufrecht zu erhalten. Ihre bedingungslose Unterstützung hat es mir erst ermöglicht, die Hürden dieses Promotionsvorhabens zu nehmen.





# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>VII</b>
<b>Symbole und Abkürzungen</b>	<b>XIII</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>XVII</b>
<b>Abstract</b>	<b>XIX</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Stand der Technik: Gesamtsystemauslegung hybrider Antriebsstränge	4
1.2.1 Anforderungen und Auslegungsziele . . . . .	6
1.2.2 Betriebsstrategien . . . . .	9
1.2.3 Methoden zur Beherrschung der Variantenvielfalt . . . . .	13
1.3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit . . . . .	15
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>21</b>
2.1 Optimierung . . . . .	22
2.1.1 Multikriterielle Optimierungsprobleme. . . . .	24
2.1.2 Optimalsteuerung . . . . .	26
2.2 Statistische Modellierungs- und Analysemethoden . . . . .	30
2.2.1 Clusteranalyse . . . . .	31
2.2.2 Markow-Ketten . . . . .	33
2.2.3 Individual Conditional Expectation Plots . . . . .	35
2.3 Computational Intelligence Methoden . . . . .	38
2.3.1 Fuzzy-Logik . . . . .	38
2.3.2 Partikelschwarmoptimierung . . . . .	41
<b>3 Methode zur Analyse gesamtsystemischer Zusammenhänge</b>	<b>45</b>
3.1 Spannungsfeld aus Effizienz, Leistungsfähigkeit und Fahrkomfort . . .	47
3.1.1 Das Leistungsversprechen . . . . .	48

---

3.1.2	Quantifizierung der Leistungsanforderung . . . . .	51
3.2	Objektivierung von kundenrelevanten Fahranforderungen . . . . .	55
3.2.1	Identifikation von prägenden Lastfällen . . . . .	55
3.2.2	Generierung synthetischer Fahrzyklen . . . . .	57
3.3	Objektivierung von Antriebsstranganforderungen . . . . .	64
3.3.1	Antriebsstrangmodell . . . . .	64
3.3.2	Betriebsstrategie . . . . .	70
3.3.3	Beeinflussung des Steuerungsverhaltens . . . . .	77
3.3.4	Verifikation des Betriebsstrategieansatzes . . . . .	84
3.4	Gesamtsystemische Zusammenhänge . . . . .	88
3.4.1	Definition von Einflussparametern . . . . .	88
3.4.2	Definition von gesamtsystemischen Zielgrößen . . . . .	89
3.4.3	Analyse und Visualisierung . . . . .	91
<b>4</b>	<b>Anwendung der Methode</b>	<b>95</b>
4.1	Anforderungsanalyse bezüglich der Leistungspositionierung . . . . .	96
4.1.1	Identifizierte Fahranforderung und Simulationsprämissen . . . . .	97
4.1.2	Einflussanalyse der Auslegungsparameter . . . . .	99
4.1.3	Handlungsbedarfe und Handlungsspielraum . . . . .	108
4.2	Analyse bezüglich der Antriebseffizienz . . . . .	113
4.2.1	Synthetische kundenrelevante Fahrzyklen . . . . .	113
4.2.2	Repräsentative Betriebspunktverteilung . . . . .	121
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>131</b>
5.1	Relevanz der Ergebnisse und Erkenntnisse . . . . .	131
5.2	Kritische Reflexion der methodischen Vorgehensweise . . . . .	134
5.3	Fazit . . . . .	140
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>143</b>
<b>A</b>	<b>Adaptionssysteme</b>	<b>147</b>
A.1	Schaltstrategie . . . . .	147
A.2	Implementierung der weichen Nebenbedingungen . . . . .	149
A.3	Adaption des Äquivalenzfaktors . . . . .	153
<b>B</b>	<b>Ergänzende Simulationsergebnisse</b>	<b>157</b>
B.1	Ergänzungen zur Anforderungsanalyse für die PHEV-Anwendung . . . . .	157
B.2	Anforderungsanalyse für die HEV-Anwendung . . . . .	160

---

B.3	Ergänzungen zur Fahrzyklensynthese der HEV-Anwendung . . . . .	166
B.4	Ergänzungen zur Analyse der Betriebspunktverteilungen . . . . .	169
<b>C</b>	<b>Zur Robustheit der Methode</b>	<b>171</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>173</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>177</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>179</b>



# Symbole und Abkürzungen

## Notation

$X, Y, Z$	Matrizen, Mengen
$\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$	Vektoren
$x, y, z$	Skalare
$\frac{df(x)}{dx}$	Ableitung der Funktion $f(x)$ nach $x$
$\frac{\partial f}{\partial x}$	Partielle Ableitung der Funktion $f(x)$ nach $x$
$\dot{x}$	Zeitliche Ableitung der Variablen $x$
$(\hat{\cdot})$	Schätzung, Modellausgang
$(\bar{\cdot})$	Mittelwert
$(\cdot)^T$	Transponierte einer Matrix / eines Vektors
$(\cdot)^{-1}$	Inverse einer Funktion / Matrix
$(\cdot)^*$	Optimierte Größe
$ \cdot $	Anzahl der Elemente einer Menge / eines Vektors
$\ \cdot\ ^2$	Quadratische euklidische Norm
$\odot$	Elementweise Matrixmultiplikation

## Lateinische Buchstaben

$C$	–	Menge der Elemente eines Clusters
$F$	–	Fuzzy-Menge
$P$	–	Suchraum, Menge der zulässigen Parameterwerte
$U$	–	Menge der zulässigen Steuergrößen, Stellraum
$X$	–	Zustandsraum / Grundmenge
$A_f$	$\text{m}^2$	Stirnfläche
$B_{\text{Kor}}$	$\text{l}/100 \text{ km}$	Korrigierter Kraftstoffverbrauch
$E$	$\text{Ws}$	Energie

$E_v$	Ws	Energievorhalt in der HV-Batterie
$F$	N	Kraft
$\bar{F}_{\text{trac}}$	Ws/m	Mean Tractive Force
$F_w$	N	Fahrwiderstandskraft
$G$	–	Getriebeegang
$H(\cdot)$	–	Hamilton-Funktion
$H_u$	kJ/kg	Unterer Heizwert
$I$	A	Elektrischer Strom
$J(\cdot)$	–	Kostenfunktion
$K$	–	Anzahl der Cluster
$L(\cdot)$	–	Funktion der momentanen Kosten
$N_{(\cdot)}$	–	Anzahl
$P$	–, W	Wahrscheinlichkeit, Leistung
$Q_0$	As	Kapazität der HV-Batterie
$R$	–, $\Omega$	Regel eines Fuzzy-Systems, elektrischer Widerstand
$SoC$	%	Ladezustand der Batterie
$T$	s, Nm	Dauer, Drehmoment
$U$	V	Elektrische Spannung
$V(\cdot)$	–	Endkostenterm
$X$	–	Stochastischer Prozess
$Z(\tau)$	–	Belastungsdauerkurve
$\mathbf{c}$	–	Mittelpunkt eines Clusters
$\mathbf{d}$	–	Koordinaten eines Datenmusters
$\mathbf{q}$	–	Geschwindigkeit eines Partikels
$c$	–	Einstellparameter der Partikelschwarmoptimierung
$c_w$	–	Luftwiderstandsbeiwert
$e_G$	–	Drehmassenzuschlagsfaktor
$f_R$	–	Rollwiderstandsbeiwert
$g(\cdot), g$	–, m/s <sup>2</sup>	Gleichheitsbedingung, Erdbeschleunigung
$h(\cdot), h$	–, –	Ungleichheitsbedingung, relative Häufigkeit
$i, j, k$	–	Zählvariablen
$i_G$	–	Getriebeübersetzung
$\dot{m}_{\text{Kr}}$	g/s	Kraftstoffmassenstrom
$m$	kg, –	Masse, Steigung einer Funktion
$n$	–, U/min	Diskreter Zeitschritt, Drehzahl
$p$	–	Variationsparameter
$r_{\text{dyn}}$	m	Dynamischer Radhalbmesser

$s$	–	Schwarm
$t$	s	Zeit
$u, u(t)$	–	Steuergröße, Steuerung
$u_D$	–	Stellgröße des Fahrerreglers
$v_{\text{Fzg}}$	m/s	Fahrzeuggeschwindigkeit
$w$	–	Gewichtungsfaktor
$x$	–, m	Zustand / Element einer Menge, Weg
$z$	–	Zufallszahl
$\mathbb{N}$		Menge der natürlichen Zahlen
$\mathbb{R}$		Menge der reellen Zahlen

## Griechische Buchstaben

$\Theta$	–	Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix
$\Lambda$	–	Fahrzyklus
$\alpha$	rad, %	Steigungswinkel, Steigung
$\epsilon(\cdot)$	–	Strafterm
$\eta$	–	Wirkungsgrad
$(\theta_{i,j})$	–	Übergangswahrscheinlichkeit von $i$ nach $j$
$\vartheta$	K	Temperatur
$\kappa$	–	Kennwert des Drehzahl-niveaus
$\lambda(\cdot)$	–	Kozustand, Äquivalenzfaktor
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Luftdichte
$\tau$	s	Zeitfenster

## Abkürzungen

Anf	Drehmomentanforderung
Bat	Die HV-Batterie betreffend
CI	Computational Intelligence
DC	Gleichspannung/-strom
DoE	Design of Experiments
ECMS	Equivalent Consumption Minimization Strategy
EM	Elektrische Maschine
EV	Betriebsmodus: Elektrische Fahrt

Fzg	Fahrzeug
Gen	Den generatorischen Betrieb betreffend
GKL	Grenzkennlinie
HA	Hinterachse
HEV	Hybrid Electric Vehicle: Autarkhybrid
HV	Hochvolt
ICE-Plot	Individual Conditional Expectation Plot
K1	Kupplung zwischen P2-EM und VM
K2	Kupplung am Getriebeeingang
Mot	Den motorischen Betrieb betreffend
MT	Micro-Trip
NEC	Net Energy Change
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NVH	Noise Vibration Harshness
OC	Die Leerlaufspannung betreffend
P2	Parallelhybrid: EM-Position zwischen VM und Getriebe
P4	Parallelhybrid: EM-Position an der Hinterachse
PH	Betriebsmodus: Parallelhybrid
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle
RMS	Root Mean Square, Effektivwert
RMSE	Root Mean Square Error
RoI	Region of Interest
SoC	State of Charge - Ladezustand der Batterie
VA	Vorderachse
VM	Verbrennungsmotor
WLTC	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle



# Kurzfassung

Eine zentrale Fragestellung im Forschungsbereich der methodischen Gesamtsystemauslegung hybrider Antriebsstränge ist die Beherrschung der Komplexität bezüglich der Varianten- und Anforderungsvielfalt. Die existierenden methodischen Ansätze basieren auf der Identifikation optimaler Systemauslegungen bezüglich vorab definierter Anforderungen an den Antriebsstrang. In dieser Arbeit wird die Möglichkeit zur Substitution bestimmter Leistungsklassen im Antriebsportfolio durch Hybridkonzepte untersucht, deren Systemleistung maßgeblich durch das elektrische Antriebssystem definiert ist. Die signifikante Reduzierung der Verbrennungsmotorleistung im Systemverbund gegenüber konventionellen Antrieben erfordert im Kontext der Kundenrelevanz eine Überprüfung der bisherigen Anforderungen an nicht elektrifizierte Antriebsstränge.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Methode identifiziert im Gegensatz zu bekannten Untersuchungen erstmals die Bedarfe der leistungsseitigen und energetischen Auslegung des elektrischen Antriebssystems sowie des elektrischen Energiespeichers, welche sich durch die Erfüllung bisheriger Antriebsstranganforderungen ergeben. Die zusätzliche Beeinflussung des Fahrkomforts spannt ein Spannungsfeld aus Antriebseffizienz, Leistungsfähigkeit und Fahrkomfort auf, in welchem die für eine Entscheidungsfindung relevanten gesamtsystemischen Zusammenhänge analysiert werden. Hierzu werden systemische Stellhebel wie zum Beispiel eine Reduzierung der Höchstgeschwindigkeit identifiziert und deren Einfluss auf eine kundenrelevante Auslegung des Hybridkonzepts bewertet. Visualisierungstechniken aus dem Bereich des maschinellen Lernens stellen im Verlauf dieser Arbeit eine transparente und nachvollziehbare Grundlage für einen fundierten Konzeptentscheid bereit. Des Weiteren werden bekannte optimierungsbasierte Betriebsstrategieansätze um Methoden der Fuzzy-Logik hinsichtlich der Lösung der Problemstellung erweitert. Letzteres wird insbesondere durch die Berücksichtigung zeitfensterbasierter Analysemethoden zur vollständigen Charakterisierung der Leistungsanforderungen an die elektrischen Komponenten ermöglicht.



# Abstract

System-level design of hybrid electric vehicles focuses on the analysis and optimization of hybrid powertrains within a high-dimensional solution space with regard to the variety of variants and requirements. Existing methodical approaches are based on the identification of optimal system designs with regard to predefined powertrain requirements. In this thesis, the possibility of substituting certain engine-power classes of the product portfolio with hybrid concepts whose system performance is largely defined by the electric drive system is investigated. A significant reduction of the combustion engine power within the overall system compared to conventional drives requires a verification of the original powertrain requirements in the context of customer relevance.

In contrast to previous investigations, the method presented in this thesis identifies for the first time the demands in power and energy sizing of the electric drive system and the electric energy storage, which result from the fulfillment of original powertrain requirements. The additional influence on driving comfort spans a region of conflict between powertrain efficiency, performance and driving comfort, in which the relevant overall systemic relationships for decision-making are analysed. For this purpose, systemic influencing factors such as a reduction of the maximum velocity requirement are identified and their influence on a customer-relevant powertrain design is evaluated. In the course of this work, visualization techniques from the field of machine learning provide a comprehensible and transparent basis for substantiated decision-making. Furthermore, well-known optimization-based operating strategy approaches are extended by methods of fuzzy logic with regard to the solution of the problem. The latter is mainly enabled by considering a timeframe-based analysis for the complete characterization of the performance requirements of the electrical components.



# 1 Einleitung

In den kommenden Jahren sieht sich die Automobilindustrie mit der bislang größten Transformation innerhalb ihrer Geschichte konfrontiert. Ein Teil dieser Transformation ist der weitreichende Einzug der Elektromobilität [29]. Die Fokussierung auf eine nachhaltige und rentable Entwicklung elektrifizierter Antriebskonzepte ist zur Erreichung seitens der Gesetzgebung formulierter zukünftiger CO<sub>2</sub>-Flottenziele unabdingbar und trägt nicht zuletzt dazu bei, den Anforderungen eines gestiegenen gesellschaftlichen Umweltbewusstseins zu genügen [88]. Somit stellt die Elektrifizierung des konventionellen Antriebsstrangs eine wichtige Brückentechnologie hin zur reinen Elektromobilität dar, wobei der Auslegung und Integration der elektrischen Antriebskomponenten und Energiespeicher eine führende Rolle in der Entwicklung zukünftiger Antriebe zukommt. Als *konventioneller Antrieb* wird in dieser Arbeit stets eine Kombination aus Verbrennungsmotor (VM) und mechanischem Getriebe bezeichnet.

Im Folgenden wird die Motivation der vorliegenden Arbeit dargelegt und darauf basierend der Stand der Technik im Bereich der methodischen Gesamtsystemauslegung und -optimierung von Hybridkonzepten analysiert. Auf Basis dieser Analyse erfolgt die Formulierung der Zielsetzung.

## 1.1 Motivation

Die Elektrifizierung konventioneller Antriebsstränge liefert durch die Verfügbarkeit weiterer Drehmomentquellen neue Freiheitsgrade hinsichtlich Effizienz und Funktionalität. Gleichzeitig führt dies zu einer Erhöhung der Komplexität des Antriebsstranges. Die Herausforderung der Entwicklung hybrider Antriebsstränge besteht dabei in der geeigneten Auslegung und Betriebsweise der Komponenten im Systemverbund zur Erfüllung von spezifischen Anforderungen.

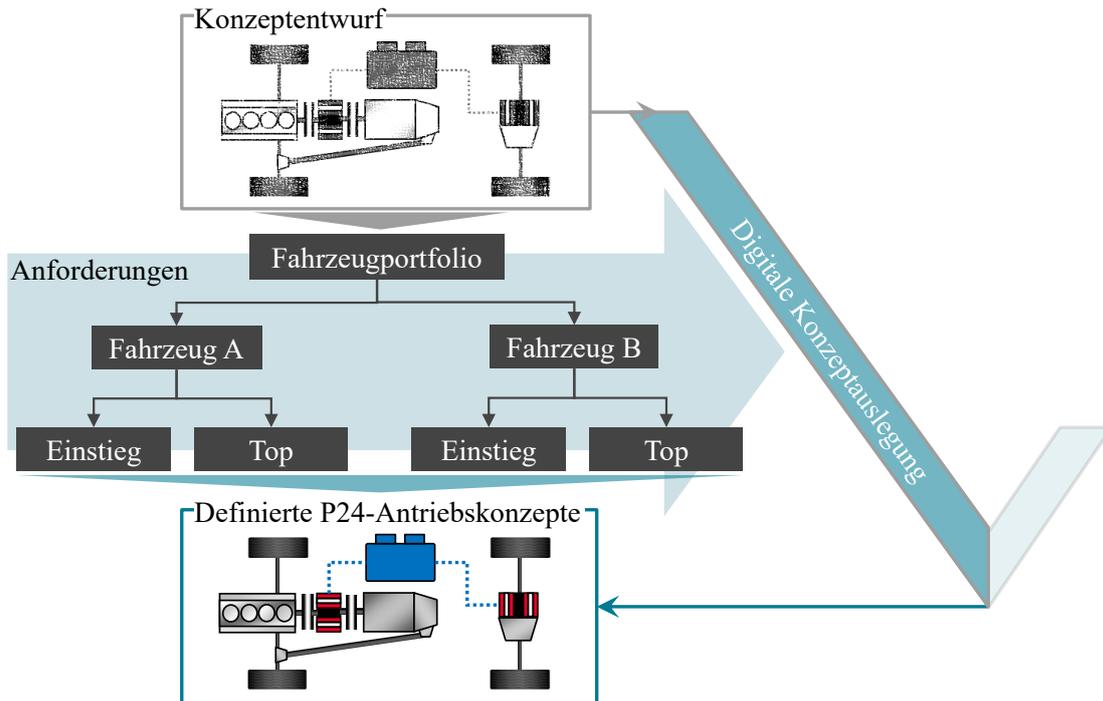


Bild 1.1: Schematische Darstellung der Konzeptionierung hybrider Antriebsstränge.

Die Anforderungen und Auslegungsziele an zukünftige Hybridfahrzeuge sind hierbei vielfältig und insbesondere im Bereich von Premiumfahrzeugen teilweise konträr. Beispielsweise stehen die Forderungen nach einer Reduktion von Emissionen dem Kundenwunsch nach dauerhaftem Leistungsvermögen bei möglichst gleichbleibenden Kosten im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen gegenüber. Zusätzlich ergibt sich durch die stetig steigende Varianz von Antriebsstrangkzepten innerhalb der Fahrzeugklassen in Kombination mit unterschiedlichen gesetzlichen Rahmenbedingungen und Nutzungsprofilen des globalen Marktes eine Anforderungsvielfalt, welche hinsichtlich der Wettbewerbsfähigkeit eine optimale Auslegung jeder spezifischen Variante verhindert [89]. Einen zentralen Aspekt dieser Arbeit bildet hierbei die Berücksichtigung spezifischer Anforderungen einer *Leistungspositionierung*, deren Realisierung mittels eines Hybridkonzepts vorgesehen ist. Die Leistungspositionierung beschreibt hierbei die Einordnung des Antriebs im Portfolio eines Fahrzeugmodells, beispielsweise als Einstiegs- oder Topvariante. Dieser Sachverhalt ist im linken Teil von Bild 1.1 schematisch dargestellt. Aus wirtschaftlicher Sicht ist dabei eine Antriebstopologie vorteilhaft, welche ein hohes Maß an Modularität bietet.

Die im Bild schematisch dargestellte P24-Hybridtopologie forciert dabei die Modularisierbarkeit einzelner Antriebskomponenten und erlaubt die Realisierung leistungs-

fähiger Hybridantriebe bei signifikanter Reduktion der VM-Leistung. Darüber hinaus ergibt sich ein hoher Freiheitsgrad zur Darstellung unterschiedlicher Funktionalitäten wie zum Beispiel eine elektrische Allradfunktion. Diese Aspekte motivieren in dieser Arbeit die Analyse der Einsatztauglichkeit des P24-Konzepts in verschiedenen Leistungspositionierungen. Die Bezeichnung *P24* steht im Kontext von Antriebsstrangtopologien für einen Parallelhybrid, welcher über zwei elektrische Maschinen (EM) und einen Verbrennungsmotor verfügt. Die Nummerierung 24 bezeichnet indes die Einbauorte der EMs im Antriebsstrang, worauf in Kapitel 3.3.1 näher eingegangen wird. Hierbei sind alle Antriebsaggregate mechanisch an das Rad gekoppelt, wodurch sich der funktionale Freiheitsgrad im Vergleich zu seriellen Konzepten erhöht. Der erhöhte Freiheitsgrad geht dabei jedoch mit einer Erhöhung der Komplexität einher, welche in der Konzeptbewertung zu beherrschen ist. Hierzu fokussiert sich diese Arbeit auf den im Bild 1.1 als V-Diagramm angedeuteten Prozess der digitalen Konzeptauslegung innerhalb der Vorentwicklung. Die Bewertung von Konzepten erfolgt dabei anhand von Simulationen, da die Variantenvielfalt eine hardwareseitige Realisierung jeder möglichen Konzeptausprägung aufgrund des hohen Aufwands verhindert [103]. Das Ergebnis des Prozesses sind somit definierte Antriebskonzepte, welche basierend auf einem ursprünglichen Entwurf die an den Antriebsstrang gestellten Anforderungen in der besten Art und Weise erfüllen. Eine geeignete Vorgehensweise im Rahmen der Vorentwicklung beschreibt einen Trichterprozess, dessen Ergebnisse eine begründete Auswahl von Antriebskonzepten für eine Detailoptimierung in den Fachbereichen der Serienentwicklung darstellt.

In der vorliegenden Arbeit stellt der Aspekt der *Kundenrelevanz* ein zentrales Element des betrachteten Forschungsrahmens dar. Unter dem Begriff der Kundenrelevanz wird in dieser Arbeit verstanden, dass ein Hybridkonzept sowohl die Erwartungen an die Antriebseffizienz, als auch jene an die Leistungsfähigkeit und den Fahrkomfort im Vergleich zu einem konventionellen Fahrzeug erfüllt [88]. Die Bewertung der Kundenrelevanz erfolgt somit insbesondere durch die Objektivierung der Begriffe Leistungsfähigkeit und Fahrkomfort. Als *Objektivierung* wird in dieser Arbeit die Überführung von vagen und subjektiven Begriffen in eindeutige und technisch bewertbare Größen bezeichnet. Nach dieser Definition kann die Systemauslegung bezüglich der Leistungsfähigkeit als kundenrelevant bewertet werden, wenn das Hybridkonzept einer auf Basis des konventionellen Fahrzeugs gemessenen Fahranforderung uneingeschränkt folgen kann. Zur Bewertung der Konzepte bezüglich kundenrelevanter Anforderungen ist dabei eine Methode erforderlich, welche die Einflüsse relevanter physikalischer Stellhebel auf maßgebliche Auslegungsziele in repräsentativen Anwen-

dungsfällen identifiziert. Von besonderem Interesse ist dabei die Frage, wie sich die Erfüllung von kundenrelevanten Anforderungen auf die hardwareseitige Auslegung der elektrischen Antriebsstrangkomponenten auswirkt und welche betriebsstrategischen Maßnahmen hierzu notwendig sind.

Der Forschungsbereich der Gesamtsystemauslegung hybrider Antriebsstränge, welcher im weiteren Verlauf dieser Arbeit als *System-Level Design* bezeichnet wird, beschäftigt sich mit Methoden zur ganzheitlichen Analyse und Optimierung von Hybridfahrzeugen. Im Folgenden wird der derzeitige Stand der Technik vorgestellt.

## 1.2 Stand der Technik: Gesamtsystemauslegung hybrider Antriebsstränge

Als System-Level Design wird stets die Antriebsstrangauslegung hinsichtlich der Erfüllung bestimmter Anforderungen und der Optimierung bestimmter Auslegungsziele unter Berücksichtigung der Antriebsstrangsteuerung verstanden. In Bild 1.2 ist diese Problemstellung anhand eines Multi-Level Problems abstrahiert, welches durch die verschiedenen statischen Ebenen (Schalen) des physikalischen Systems und die dynamische Steuerungsebene charakterisiert ist. In der äußeren Schale werden Methoden zur Definition der Anzahl und der Struktur der mechanischen Kopplung von elektrischen Maschinen zueinander und zum Abtrieb eingesetzt.

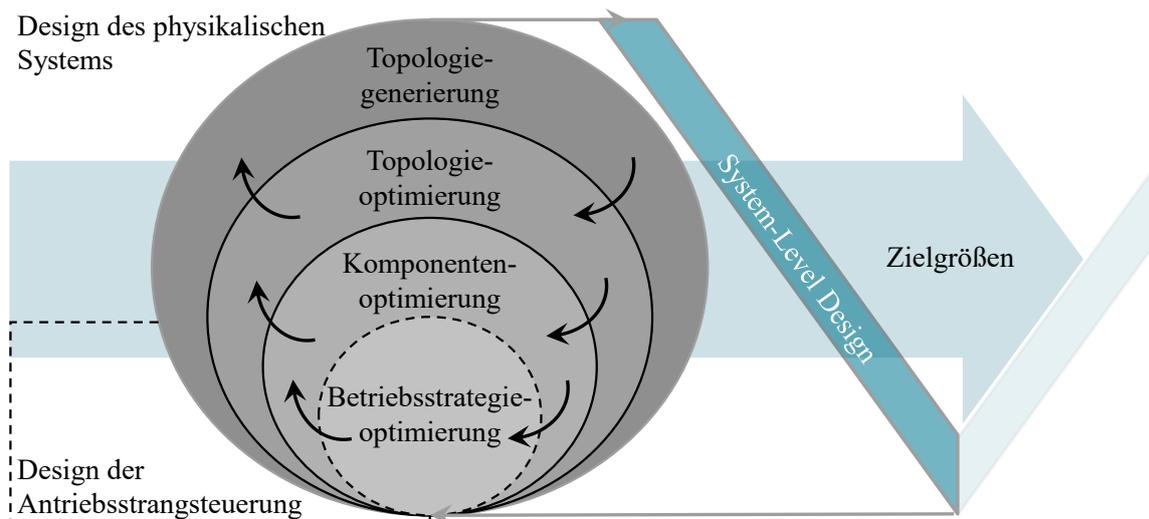


Bild 1.2: Schematische Darstellung des System-Level Design hybrider Antriebsstränge, modifiziert vgl. [103].



Im Bereich der Komponentenoptimierung erfolgt sowohl die Auswahl der Technologie, beispielsweise das Magnetlayout und die verwendeten Materialien der EM, als auch deren Dimensionierung. Dies beeinflusst typischerweise das Wirkungsgradverhalten der jeweiligen Komponenten. Charakteristische und quantifizierbare Dimensionierungsgrößen sind beispielsweise die maximale Leistung der elektrischen Maschine oder die Kapazität der Hochvolt-Batterie (HV-Batterie). Das Vorhandensein von mindestens zwei Drehmomentquellen bei einem Hybridfahrzeug erfordert dabei eine Antriebsstrangsteuerung, welche die Antriebsaggregate des elektrifizierten Antriebsstrangs in Abhängigkeit der Fahranforderung und hinsichtlich spezifischer Ziele in der am besten geeigneten Weise betreibt [37]. Das Design der Antriebsstrangsteuerung, das heißt die Auswahl und Optimierung einer geeigneten Betriebsstrategie, beschreibt die innere Schale des System-Level Design Prozess in Bild 1.2. In Tabelle 1.1 sind Beispiele typischer Parameter im System-Level Design aufgeführt.

Tabelle 1.1: Beispiele typischer Parameter im System-Level Design

<b>Ebene</b>	<b>Kontinuierlich</b>	<b>Diskret</b>
Topologie-generierung	-	Anzahl EMs, Kupplungen und Getrieben
Topologie-optimierung	-	Positionen der Komponenten, Kopplungen zum Rad
Komponenten-optimierung	max. EM-Leistung, Kapazität der HV-Batterie	EM-Technologievariante, EM-Kennfeld
Betriebsstrategie-optimierung	Äquivalenzfaktor, Leistungsschwellen VM an/aus	Betriebsstrategiealgorithmus

Hierbei definieren sich die Schalen der Topologiegenerierung und -optimierung anhand diskreter Parameter, welche zur Erfüllung grundsätzlicher Funktionalitäten des Hybridkonzepts optimiert werden. Innerhalb der Komponenten- und Betriebsstrategieoptimierung werden sowohl kontinuierliche als auch diskrete Parameter betrachtet. Die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Schalen des System-Level Design in Kombination mit einer hohen Anzahl an Parametern motivieren die Entwicklung von Auslegungsmethoden zur Beherrschung der Komplexität der funktionalen Zusammenhänge im Lösungsraum [103].

Die Analyse des Stands der Technik beinhaltet im Folgenden Abschnitt zunächst eine Vorstellung der an hybride Antriebsstränge gestellten Anforderungen und bis-

heriger in der Literatur betrachteten Auslegungsziele. Er befasst sich ebenfalls mit der Definition von repräsentativen Fahranforderungen und deren Objektivierung für die Verwendung im System-Level Design. Basierend hierauf erfolgt eine Vorstellung grundlegender Betriebsstrategieansätze und aktueller Forschungsschwerpunkte im Bereich der Betriebsstrategieentwicklung hinsichtlich unterschiedlicher Zielsetzungen. Den Abschluss der Analyse bildet die Darstellung von in der Literatur vorhandenen methodischen Ansätzen zur Beherrschung der Variantenvielfalt im System-Level Design hybrider Antriebsstränge. Da in dieser Arbeit die Einsatztauglichkeit des P24-Konzepts untersucht wird, fokussiert sich die Analyse der Literatur auf Ansätze zur ganzheitlichen Komponenten- und Betriebsstrategieoptimierung. Einblicke in Methoden zur Topologieoptimierung bietet beispielsweise die Arbeit [115].

### 1.2.1 Anforderungen und Auslegungsziele

Die Motivation für diese Arbeit ergibt sich durch die Fragestellung, wie ein methodischer Ansatz zur Auslegung von hybriden Antriebskonzepten im Rahmen der Vorentwicklung gestaltet wird. Eine Konzeptauslegung erfüllt dabei grundlegende kundenrelevante Anforderungen an den Antriebsstrang und bietet Potentiale hinsichtlich spezifischer Auslegungsziele. Dieser Abschnitt klärt anhand der Literatur, welche Auslegungsziele im System-Level Design berücksichtigt werden und welchen Anforderungen die bewerteten Hybridkonzepte dabei genügen.

*Top-Level Anforderungen* definieren in dieser Arbeit in Anlehnung an [114] Zielkriterien, welche vorab bestimmt sind und vom Hybridkonzept zu erfüllen sind. Dem hingegen werden Optimierungspotentiale hinsichtlich bestimmter Zielkriterien als *Auslegungsziele* beschrieben. Dieser Zusammenhang ist in Bild 1.3 schematisch dargestellt. Hierbei erfüllt das Grundkonzept die vorab gestellten Anforderungen, wodurch sich ein Lösungsraum für die Optimierung bezüglich der Auslegungsziele ergibt.

#### Top-Level Anforderungen

Die Definition der Anforderungen nach Bild 1.3 führt dazu, dass Antriebskonzepte, welche grundlegende Anforderungen nicht erfüllen, vom weiteren System-Design Prozess ausgeschlossen werden. Die Definition von Anforderungen trägt somit zur Reduktion der Variantenvielfalt bei. Hierzu ist es jedoch notwendig, dass die Kriterien zur Überprüfung der gestellten Anforderungen vollständig bekannt sind.

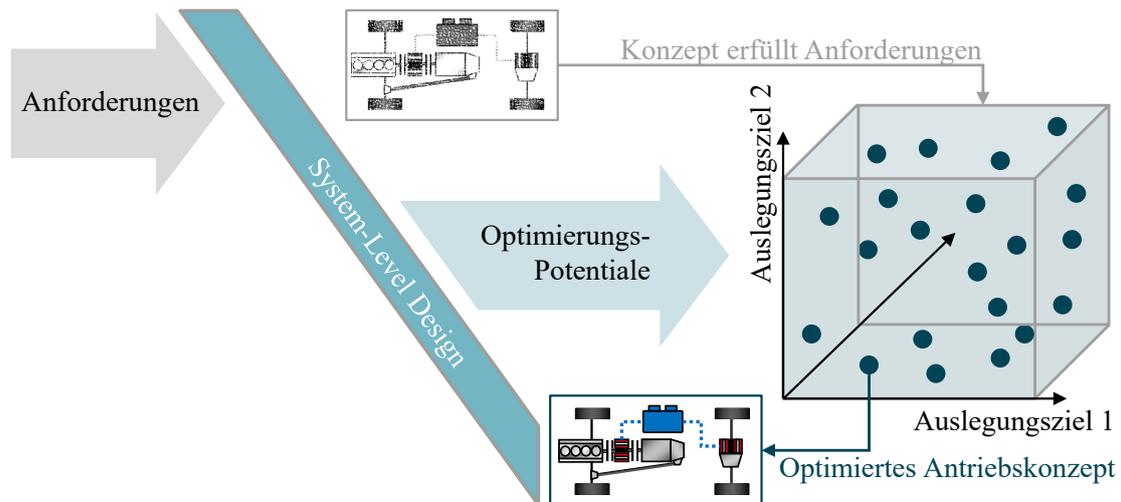


Bild 1.3: Schematische Darstellung von Anforderungen und Auslegungszielen im System-Level Design.

Das heißt zum Beispiel, dass Anforderungen, deren Bewertung die Berücksichtigung der Betriebsstrategie erfordert, nicht im Vorfeld der Simulation zum Ausschluss von Konzepten führen sollen. Aus diesem Grund werden typische Top-Level Anforderungen so definiert, dass diese bereits durch grundlegende Dimensionierungsparameter der Antriebskomponenten überprüfbar sind. Beispiele im Bereich der Leistungsfähigkeit des Antriebs sind dabei die Höchstgeschwindigkeit oder Beschleunigungs- und Steigfähigkeitswerte [25, 32, 45, 109, 114]. Die Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit von der zeitlich begrenzten Maximalleistung der elektrischen Komponenten wird dagegen erstmals in [118] berücksichtigt. Eine zeitliche Beschränkung der verfügbaren elektrischen Leistung wird hierbei durch die thermischen Grenzen der elektrischen Komponenten begründet. Zur Überprüfung der Wiederholbarkeit der Beschleunigungsanforderung als Basis der Dimensionierung von Antriebskomponenten kommen bereits Simulationen in einem synthetischen Grenzlastprofil zum Einsatz.

Darüber hinaus werden weitere Anforderungen an den Antriebsstrang häufig auf Basis der zu erfüllenden Fahranforderung formuliert. Ein Beispiel hierfür ist die Dimensionierung des elektrischen Antriebssystems, sodass ein bestimmter Zyklus vollelektrisch durchfahren werden kann [46]. Bisher erfolgt dies aufgrund der Vergleichbarkeit häufig anhand von standardisierten Fahrzyklen wie beispielsweise dem NEFZ oder WLTC. Ein Trend innerhalb der Forschung im System-Level Design hybrider Antriebsstränge zeichnet sich dabei durch einen verstärkten Fokus auf die Entwicklung anwendungsspezifischer Fahrzyklen ab [103].

### Kundenrelevante Fahranforderungen

Fahrzyklen  $\Lambda(t)$  spielen als Basis der Bewertung von Anforderungen und der Optimierung von Auslegungszielen eine entscheidende Rolle im System-Level Design. Diese werden anhand des entsprechenden Geschwindigkeitsprofils  $v_{\text{Fzg}}(t)$  und in aktuellen Veröffentlichungen auch in Kombination mit dem dazugehörigen Steigungsverlauf  $\alpha(t)$  im Zeitintervall  $[t_0, t_f]$  für die Simulation objektiviert, sodass sich

$$\Lambda(t) = \begin{bmatrix} v_{\text{Fzg}}(t) \\ \alpha(t) \end{bmatrix} \text{ mit } t \in [t_0, t_f] \quad (1.1)$$

ergibt [103]. Da typischerweise eine Vielzahl unterschiedlicher Fahranforderungen existieren, ist ein auf Basis eines einzelnen Zyklus ausgelegtes Hybridkonzept per Definition suboptimal bezüglich anderer Zyklen [104]. Um dies zu verhindern und somit eine Konzeptauslegung zu realisieren, welche für eine Vielzahl möglicher Fahranforderungen gute Ergebnisse liefert, werden in der Literatur mehrere Fahrzyklen in den Auslegungsprozess integriert (vgl. [71, 78, 108]). Aktuellere Ansätze sehen die Konstruktion von synthetischen Fahrzyklen vor [21, 49, 51, 81, 126]. Das Ziel hierbei ist es, Geschwindigkeits- und Steigungsverläufe so zu wählen, dass diese repräsentativ bezüglich typischer Fahrsituationen für spezifische Anwendungen und gleichzeitig kurz genug für eine praktikable Simulationszeit sind [103]. Synthetische Fahrzyklen basieren dabei typischerweise auf Messungen von realen Fahrten. Die Definition, wonach ein Fahrzyklus repräsentativ bezüglich relevanter Kriterien ist, obliegt dem Anwender und ist insbesondere durch die gewählten Auslegungsziele begründet.

### Kundenrelevante Auslegungsziele

Ein typisches Auslegungsziel von Hybridkonzepten ist die Maximierung der Antriebseffizienz. Dieses wird im Falle eines autarken Hybrids typischerweise anhand des Kraftstoffverbrauchs objektiviert. Bei der Betrachtung von Plug-In-Konzepten, welche über eine HV-Batterie mit großem Energieinhalt verfügen, wird die Effizienz zusätzlich anhand des elektrischen Verbrauchs und der elektrischen Reichweite objektiviert. Die Bewertung erfolgt dabei meistens unter Berücksichtigung der Antriebsstrangkosten. Neben diesen übergeordneten Zielen existieren in der Literatur noch weitere Beispiele, wofür im Folgenden eine Auswahl vorgestellt wird.

Ein Beispiel für zusätzliche (kundenrelevante) Auslegungsziele ist die Steigerung der Leistungsfähigkeit von Hybridkonzepten für die Anwendung in sportlichen Fahrzeu-

gen [94]. Hierbei werden neben Standardzyklen und Realfahrzyklen für Sportfahrzeuge ebenfalls relevante Rennstrecken untersucht. Weitere Beispiele existieren in [17, 102, 112, 118], wobei neben der Effizienz explizit die Beschleunigungszeit bewertet wird. Werden in den genannten Veröffentlichungen sowohl Potentiale zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs als auch Potentiale hinsichtlich der Leistungsfähigkeit untersucht, erfolgt in [53] eine ausschließliche Optimierung des Antriebsstrangs hinsichtlich der Fahrdynamik. Hierbei wird die Leistungsfähigkeit des Antriebs stärker gewichtet als in Auslegungsprozessen, in welchen die Leistungsfähigkeit ausschließlich als grundlegende (Mindest-)Anforderung berücksichtigt wird.

Das Auslegungsziel der Leistungsfähigkeit wird in den meisten Veröffentlichungen durch die Komponentendimensionierung berücksichtigt. Daneben existieren Ziele wie zum Beispiel die Reduktion bestimmter Emissionen, welche mittels einer Betriebsstrategieoptimierung erreicht werden. Aktuelle Untersuchungen zur Reduzierung von Stickoxiden und unverbrannten Kohlenwasserstoffen finden sich in [4, 11, 22]. Darüber hinaus werden bereits in der simulativen Bewertung von Hybridkonzepten zunehmend Komfort- und Fahrbarkeitsaspekte berücksichtigt. Dies erfolgt typischerweise ebenfalls mittels einer Optimierung der Betriebsstrategie und umfasst beispielsweise die Reduzierung von Getriebeschaltvorgängen und Verbrennungsmotorstarts [70] oder die Erhöhung des Komforts bei Wechselvorgängen der Betriebsmodi [125, 127]. Ein weiterer in der Literatur berücksichtigter Komfortaspekt bezieht sich auf das NVH-Verhalten (Noise-Vibration-Harshness) von Verbrennungsmotoren in Hybridtopologien mit einer unabhängigen Wahl des Drehmoments und der Drehzahl des Verbrennungsmotors von der Fahranforderung [2, 68]. Hierbei wird versucht, Lastpunktverschiebungen bevorzugt in NVH-optimale Betriebsbereiche durchzuführen. In der Literatur erfolgt hierzu häufig die Beschreibung eines Spannungsfeldes aus Energieeffizienz und Komfortaspekten, da letztere den Freiheitsgrad der Betriebsstrategie beschränken können.

### 1.2.2 Betriebsstrategien

Zur Bewertung eines Hybridkonzepts ist eine Betriebsstrategie erforderlich, welche bestimmt, wie die Komponenten betrieben werden, sodass eine Fahraufgabe in der am besten geeigneten Art und Weise erfüllt wird. Hierbei ist das typischerweise übergeordnete Ziel die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs unter Berücksichtigung von Anforderungen bezüglich des Fahrkomforts und der Leistungsfähigkeit [37].

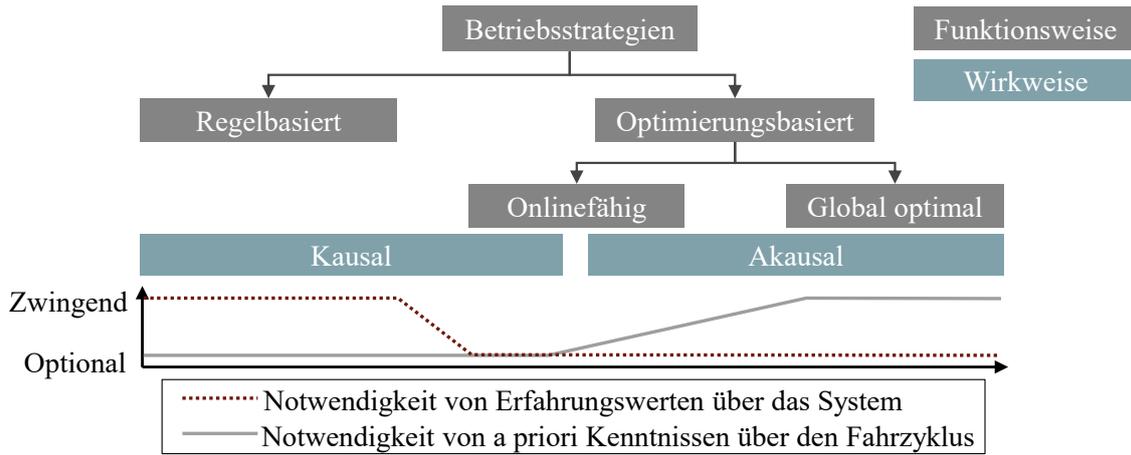


Bild 1.4: Klassifizierung grundlegender Betriebsstrategieansätze.

Die Erfüllung der Fahraufgabe impliziert dabei die Fähigkeit, einem anhand eines Fahrzyklus vorgegebenen Geschwindigkeitsprofils uneingeschränkt zu folgen. In diesem Abschnitt werden grundlegende Betriebsstrategieansätze anhand der Funktions- und Wirkweise unterteilt sowie die daraus resultierenden Zielkonflikte erläutert. Des Weiteren erfolgt eine kurze Übersicht aktueller Forschungsaktivitäten im Bereich der Betriebsstrategieentwicklung von hybriden Antriebssträngen.

Eine Möglichkeit zur Unterteilung grundlegender Betriebsstrategieansätze basiert auf jenen in der einschlägigen Literatur erfolgten Klassifizierungen [37, 96, 103, 120] und ist in Bild 1.4 schematisch dargestellt. Hierbei erfolgt eine grundsätzliche Unterteilung aufgrund der Funktionsweise in regelbasierte Ansätze und optimierungsbasierte Ansätze, welche wiederum anhand der Merkmale „onlinefähig“ und „global optimal“ unterteilt werden. Des Weiteren können diese anhand der Wirkweise nach Definition der Systemtheorie klassifiziert werden. Die Eigenschaft der Kausalität und weitere charakteristische Zusammenhänge der aufgeführten Klassen und Unterklassen werden im Folgenden näher erläutert.

### Optimierungsbasierte Betriebsstrategien

Optimierungsbasierte Betriebsstrategien basieren auf der Minimierung einer Kostenfunktion unter bestimmten Bedingungen [96, 100]. Das grundsätzliche Ziel dieser Strategien ist die Ermittlung einer Steuerung der Komponenten, welche den Kraftstoffverbrauch minimiert und dabei ladezustandsneutral ist. Das Kriterium der Ladezustandsneutralität wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit in Anlehnung an die Li-

teratur als *Charge-Sustaining*-Kriterium bezeichnet. Hierzu kann die global optimale Steuerung bestimmt werden, sofern der Fahrzyklus im Voraus vollständig bekannt ist (vgl. Bild 1.4). Diese Steuerung ist aufgrund der Abhängigkeit von zukünftigen Ereignissen akausal. Obwohl akausale Betriebsstrategien typischerweise nicht in einem technischen System implementiert werden können, dienen die hierdurch ermittelten global optimalen Lösungen als Referenz zur Beurteilung der Güte kausaler Strategien [42, 48] beziehungsweise werden als Basis zur Ableitung von Regeln für die Umsetzung in einer kausalen Strategie verwendet [10, 69]. Darüber hinaus können nach [96] optimierungsbasierte Ansätze direkt in einer Realfahrzeuganwendung eingesetzt werden, wenn diese entweder auf einer unmittelbaren Minimierung der Kostenfunktion im aktuellen Zeitschritt basieren [83] oder in der Zukunft liegende Fahrsituationen durch ein Modell geschätzt (modellprädiktiv) werden [13, 18].

Aktuelle Trends in der Entwicklung von optimierungsbasierten Betriebsstrategien sind beispielsweise die Berücksichtigung von Zielgrößen hinsichtlich des Fahrkomforts. Des Weiteren erfolgen Untersuchungen zur Einbindung von Routen- und Verkehrsinformationen zur Erhöhung der Anwendbarkeit in Realfahrscenarien [14, 113]. Hierzu ist es notwendig, die Steuerung adaptiv zu gestalten, sodass diese bei sich verändernden Rahmenbedingungen und für vorab nicht vollständig bekannte Fahraufgaben dennoch gute Ergebnisse liefert. In diesem Kontext fokussieren sich viele Autoren auf Untersuchungen zur Implementierbarkeit onlinefähiger optimierungsbasierter Betriebsstrategien, deren Ergebnisgüte einer global optimalen Lösung möglichst nahe kommt [57, 92]. Optimierungsbasierte Betriebsstrategien benötigen dabei in ihrer grundlegenden Form keine Erfahrungswerte über das Systemverhalten. Das heißt, diese eignen sich prinzipiell zur Analyse neuer und komplexer Hybridkonzepte. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Lösung vollständig auf der Arbeitsweise des eingesetzten Optimierungsverfahrens und des zuvor definierten Lösungsraums basiert. Im Gegensatz dazu eignen sich aufgrund der Nachvollziehbarkeit und der Robustheit für heutige Serienanwendungen insbesondere regelbasierte Betriebsstrategien.

## **Regelbasierte Betriebsstrategien**

Regelbasierte Betriebsstrategien werden in der Literatur teilweise auch als heuristische Strategien bezeichnet (beispielsweise in [37, 100]). Ein grundlegendes Prinzip zur Definition einer Regelbasis ist hierbei, dass der Verbrennungsmotor lediglich in effizienten Arbeitsbereichen betrieben wird [37]. Da hierzu die Kenntnis über das ideale

Betriebsverhalten notwendig ist, setzten diese Strategien ein hohes Maß an Erfahrungswerten voraus, um eine geeignete Steuerung der Antriebsstrangkomponenten zu realisieren. Das heißt, die Lösungsgüte steht in direktem Zusammenhang mit dem Systemverständnis über das Hybridkonzept. Die Implementierung solcher Betriebsstrategien kann beispielsweise mittels multidimensionaler Kennfelder erfolgen [7, 42]. Ein weiterer Ansatz zur Wahl des jeweiligen Betriebsmodus ist die Realisierung anhand von Zustandsautomaten [90, 116]. Der Hauptvorteil gegenüber optimierungsbaasierten Betriebsstrategien ergibt sich hierbei aus der Tatsache, dass Erfahrungswerte und Intuition direkt in eine Regelbasis umgesetzt werden können [37]. Demnach ist es möglich, spezifische Auslegungsziele der Steuerung nachvollziehbar im Betriebsstrategieansatz zu berücksichtigen. Des Weiteren sind diese Ansätze kausal, einfach zu implementieren und benötigen lediglich geringen Rechenaufwand [103], weshalb hauptsächlich regelbasierte Betriebsstrategien in aktuellen Serienfahrzeugen verwendet werden [37].

Ein prinzipbedingter Nachteil ist dagegen, dass die Regelbasis stark vom betrachteten Hybridkonzept und von der vorgesehen Fahraufgabe abhängt [100]. Das heißt, dass eine regelbasierte Betriebsstrategie, welche für ein Hybridkonzept hinsichtlich der Verbrauchsreduzierung auf Basis des WLTC konfiguriert ist, für die Untersuchung eines anderen Konzepts mit unterschiedlichen Antriebskomponenten im NEFZ eine geringe Ergebnisgüte aufweist. Zudem wird die Implementierung erschwert, wenn eine Vielzahl von Eingangsgrößen und Abhängigkeiten vorhanden sind. Die Handhabung dieser Komplexität begründet einen verstärkten Fokus auf die Verwendung von Fuzzy-Logik in zahlreichen Veröffentlichungen [95, 121, 122, 123]. Zum einen besteht hierbei die Möglichkeit, komplexe Zusammenhänge anhand einer nachvollziehbaren Regelbasis zu realisieren und zum anderen, die Steuerung adaptiv und robust für die Anwendung in einem variablen Anforderungsumfeld zu gestalten.

Die Eignung einer Betriebsstrategie wird anhand der in diesem Abschnitt erläuterten Gesichtspunkten in Verbindung mit der jeweiligen Anwendung bewertet. Im Stand der Technik dominiert die Anwendung in parallelen Hybriden die Untersuchungen zu Betriebsstrategien [103]. Hierbei wird sich insbesondere auf P2-Hybride fokussiert, welche eine vom VM abkoppelbare EM auf der Eingangswelle des mechanischen Getriebes berücksichtigen [35, 58, 70, 79, 92]. Darüber hinaus existieren Untersuchungen zu Betriebsstrategien für parallele Hybridkonzepte mit zwei EMs, wobei der elektrische Hauptantrieb die Hinterachse antreibt und eine klein dimensionierte EM zur Effizienzsteigerung mittels Lastpunktanhebung beiträgt [19, 91, 107]. Das in dieser Arbeit fokussierte P24-Konzept findet im Stand der Technik von Betriebsstrategien



bisher wenig Beachtung. Selbiges gilt demnach für den Bereich der ganzheitlichen Auslegungsmethoden zur Beherrschung der Variantenvielfalt, wofür im Folgenden der aktuelle Stand der Technik vorgestellt wird.

### 1.2.3 Methoden zur Beherrschung der Variantenvielfalt

Die Veröffentlichungen der letzten Jahre zeigen eine Fokussierung der Autoren auf die Erarbeitung methodischer Ansätze zur ganzheitlichen Lösung des System-Level Design Problems. Als ganzheitlich wird in diesem Zusammenhang die Berücksichtigung der Kopplung zwischen den Ebenen des physikalischen Systems und der Betriebsstrategieebene (vgl. Bild 1.2) verstanden. Die Dimensionalität des Problems kann beispielsweise durch die Verwendung derselben Betriebsstrategie für jede zu untersuchende Auslegungsvariante reduziert werden. Hierdurch wird jedoch die Kopplung zwischen dem physikalischen System und der Betriebsstrategie ignoriert, wodurch die Ergebnislösung (zum Beispiel der Kraftstoffverbrauch) negativ beeinflusst werden kann. Die entwickelten ganzheitlichen Lösungsansätze fokussieren sich dabei auf die Beherrschung der Variantenvielfalt in praktikabler Art und Weise. Dieser Abschnitt klassifiziert anhand der Literatur die grundlegenden Vorgehensweisen und fokussiert sich dabei insbesondere auf die Objektivierung von Anforderungen sowie die Berücksichtigung des Einflusses der Betriebsstrategie auf die Konzeptauswahl.

Die Analyse der Literatur zeigt dabei drei grundlegende Vorgehensweisen zur Beherrschung der Variantenvielfalt. Hierbei behandelt eine der Vorgehensweisen die Lösungsraumanalyse. Das Ziel dabei ist es, die Zusammenhänge von Auslegungsparametern und Auslegungszielen sowie etwaige Zielkonflikte zu analysieren, um darauf basierend eine geeignete Konzeptauswahl zu treffen. Demnach steht bei diesen Ansätzen nicht die Systemoptimierung, sondern vielmehr die Generierung von Systemverständnis im Vordergrund. Hierzu werden in [41, 46] die Einflüsse von Dimensionierungsparametern auf den Kraftstoffverbrauch bewertet und visualisiert. Da hierbei ausschließlich der Einfluss der Komponentenauslegung von Interesse ist, wird eine optimale Betriebsstrategie für jedes der betrachteten Konzepte berechnet. Hierdurch erfolgt die Bewertung der Kraftstoffeffizienz unabhängig vom Einfluss der Betriebsstrategie. Selbiges erfolgt in der Arbeit [102], wobei jedoch der Einfluss verschiedener Hybridtopologien auf ausgewählte Zielgrößen analysiert wird. Hierbei haben die aufgeführten Arbeiten gemein, dass die jeweilige diskrete Auswahl der zu bewertenden Auslegungsvarianten auf Basis einer vorab durchgeführten Überprüfung von Mindestanforderungen an die Leistungsfähigkeit erfolgt.

Dem hingegen existiert eine Vielzahl von Methoden, welche auf Optimierungsverfahren zur Beherrschung der Variantenvielfalt zurückgreifen. Somit werden in [17, 25, 26, 32, 63, 109, 118] stochastische Optimierungsalgorithmen zur Auswahl und Evaluation von Konzeptauslegungen verwendet. Der Lösungsraum ergibt sich dabei anhand von kontinuierlichen Dimensionierungsparametern [25, 109, 118] wie zum Beispiel der maximalen Leistung der EM oder des Energieinhalts der HV-Batterie und umfasst bei der Verwendung von regelbasierten Betriebsstrategien zudem sogenannte Tuning-Parameter der Betriebsstrategie. Diese Tuning-Parameter sind in [26, 32] zur Berücksichtigung der Emissionsreduzierung als zusätzliches Zielkriterium neben dem Kraftstoffverbrauch erforderlich. Dabei wird in den genannten Arbeiten die Leistungsfähigkeit stets als Top-Level Anforderung in Form einer Nebenbedingung im Optimierungsproblem berücksichtigt. Ein bei Verwendung von stochastischen Algorithmen oftmals genanntes Problem ist der Rechenaufwand, welcher insbesondere mit der Anzahl der untersuchten Parameter und bei Verwendung von global optimalen Betriebsstrategien steigt. Ansätze, welche Vorteile bezüglich des Rechenaufwands aufweisen, werden in [44, 45, 73] vorgestellt. Hierbei wird auf die Verwendung von stochastischen Algorithmen verzichtet. Stattdessen erfolgt eine simultane Optimierung der Betriebsstrategie und des Energiespeichersystems mittels konvexer Optimierung in [44, 73]. Die konvexe Optimierung setzt dabei konvexe Komponentenmodelle voraus, wodurch jedoch die Detaillierungstiefe der Modelle auf quadratische Zusammenhänge beschränkt wird. Jung [45] entwickelt ein Optimierungsverfahren zur Beherrschung der Variantenvielfalt auf Basis von Gauß-Prozessen, wobei jedoch ebenfalls stark vereinfachte Modellansätze Verwendung finden.

Eine weitere Vorgehensweise basiert auf der Verwendung von Methoden aus den Bereichen des Design of Experiments (DoE) und der Systemidentifikation. Hierzu erfolgt die statistisch begründete Auswahl der zu bewertenden Antriebsvarianten in [117] anhand eines Latin-Hypercube Samplings. Die Dimensionen des Lösungsraum umfassen dabei sowohl Parameter des physikalischen Systems als auch Parameter einer regelbasierten Betriebsstrategie, um den Zielkonflikt zwischen minimalem Kraftstoffverbrauch und der Batteriealterung in einem Untersuchungsgerüst zur Bewertung der Gesamtbetriebskosten im Lebenszyklus eines hybriden Nutzfahrzeuges zu bewerten. In den Arbeiten [20, 53, 66, 112] erfolgt auf Basis einer auf DoE-Methoden begründeten Konzeptauswahl die Approximation des Lösungsraum mittels mathematischer Modelle. Diese Modelle werden in einigen der Ansätze dann als Grundlage einer Optimierung der Komponentendimensionen hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs und Fahrleistungswerten (Beschleunigungszeit, Elastizität) [66, 112] oder

der Rundenzeit auf einer Rennstrecke [53] verwendet. Potentiale der mathematischen Modelle bezüglich der Lösungsraumanalyse werden in [66] durch Sensitivitätsanalysen einzelner Parameter auf die Zielgröße genutzt. Kraft [53] erweitert die Analyse um Methoden der varianzbasierten Sensitivitätsanalysen zur Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen den Parametern.

Anhand der Analyse der Literatur werden im Folgenden der Forschungsbedarf im Bereich der Konzeptionierung hybrider Antriebsstränge bezüglich kundenrelevanter Anforderungen identifiziert sowie das Ziel dieser Arbeit formuliert.

### 1.3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Die in der Literatur gezeigten Methoden zur ganzheitlichen Konzeptauslegung sehen einen anhand von Top-Level Anforderungen begrenzten Lösungsraum vor, innerhalb welchem der Trichterprozess zur Identifikation geeigneter Konzeptauslegungen erfolgt (vgl. Bild 1.5(a)). Dieser Prozess basiert zumeist auf Optimierungsverfahren, mittels welcher geeignete Varianten im Lösungsraum identifiziert werden. Die Tatsache, dass die zur Lösung der komplexen Problemstellungen eingesetzten Methoden selbst komplex und teilweise intransparent sind, führt oftmals zu einer geringen Akzeptanz in Entscheidungsgremien. Für einen fundierten Konzeptentscheid eignen sich somit Methoden zur Lösungsraumanalyse, welche neben den Optimierungspotentialen den Handlungsspielraum aufzeigen. Die genannten Vorgehensweisen erlauben bisher stets die Beantwortung der Frage, welche Optimierungspotentiale bei Erfüllung vorab festgelegter Anforderungen erreicht werden können beziehungsweise welcher Handlungsspielraum innerhalb des Lösungsraums existiert.

Nach der in dieser Arbeit verwendeten Definition der Kundenrelevanz erfüllt ein Hybridkonzept die an den Antriebsstrang gestellten Erwartungen im Vergleich zu einer konventionellen Leistungspositionierung. Die Leistungsverfügbarkeit des Hybridantriebs hängt dabei insbesondere von der thermischen Belastung der Komponenten sowie der in der HV-Batterie verfügbaren Energie ab. Sowohl die thermische Belastung als auch der Ladezustand der HV-Batterie werden durch die Betriebsstrategie beeinflusst. Soll das Hybridkonzept die vorab an den Antriebsstrang gestellten konventionellen Fahranforderungen in jeder Situation erfüllen, bedeutet dies mindestens die Verwendung desselben Verbrennungsmotors wie im konventionellen Fahrzeug (im Falle einer entladenen Batterie oder einer thermischen Begrenzung der elektrischen Leistung).

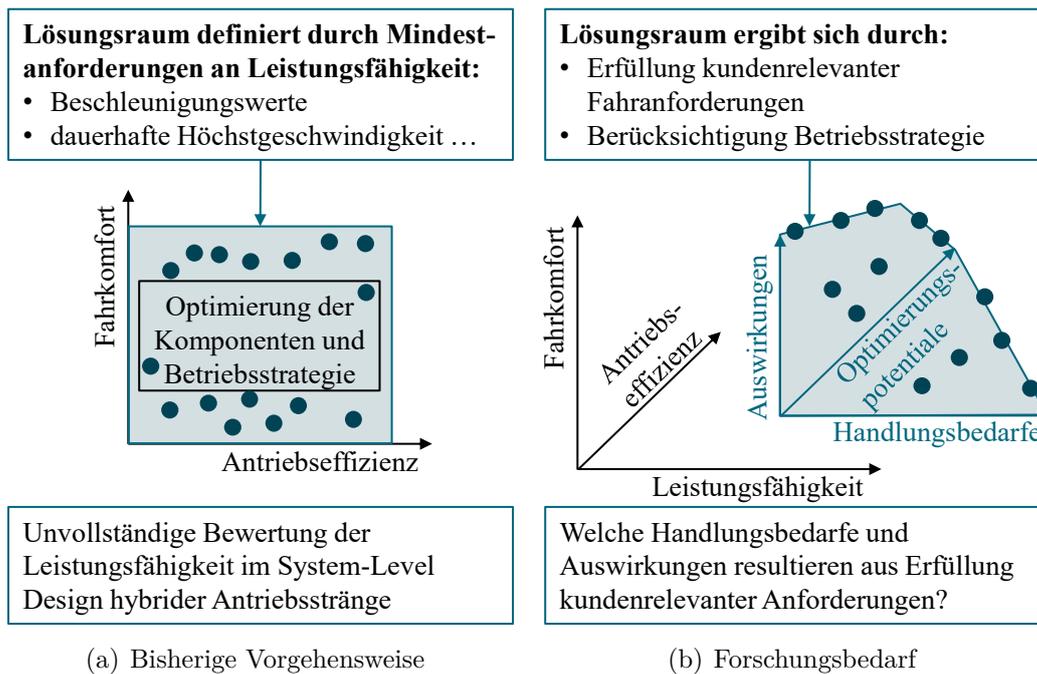


Bild 1.5: Schematische Darstellung des Forschungsbedarfs.

In diesem Fall ist das Antriebssystem insbesondere für das betrachtete P24-Konzept hinsichtlich des tatsächlichen Nutzungsverhaltens der Kunden überdimensioniert, da die volle Systemleistung nicht in jeder Fahrsituation notwendig ist. Die Bewertung der Einsatztauglichkeit des Hybridkonzepts erfordert demnach die Berücksichtigung betriebsstrategischer Maßnahmen zum Erhalt der Leistungsfähigkeit und die Ermittlung der hieraus resultierenden Leistungsbedarfe des elektrischen Antriebssystems. Da nach obigem Beispiel die Erfüllung ursprünglicher Anforderungen des konventionellen Fahrzeugs zu einer technisch nicht realisierbaren oder kostenseitig ungeeigneten Systemauslegung führen kann, erfordert eine fundierte Entscheidungsfindung zusätzlich die Darstellung von Handlungsmöglichkeiten in Form einer Anforderungsreduzierung. Das heißt, dass die Bewertung der Leistungsfähigkeit im Kontext der Kundenrelevanz vielmehr eine Analyse der an den Antriebsstrang gestellten Anforderungen auf Basis *gesamtsystemischer Zusammenhänge* erfordert. Gesamtsystemische Zusammenhänge beschreiben dabei objektiv die Einflüsse der Handlungsmöglichkeiten (technische und betriebsstrategische Parameter sowie Maßnahmen der Anforderungsreduzierung) auf den Handlungsbedarf zur Erfüllung der kundenrelevanten Fahranforderung (leistungsseitige und energetische Auslegung des elektrischen Antriebssystems). Zusätzlich ist eine Überprüfung der Auswirkungen einer Substitution des konventionellen Antriebs durch ein Hybridkonzept mit reduzierter verbrennungs-

motorischer Leistung auf den Fahrkomfort notwendig. Anhand einer solchen Analyse ergibt sich der (technische) Lösungsraum für eine kundenrelevante Systemauslegung (vgl. Bild 1.5(b)), innerhalb welchem die Entscheidungsfindung erfolgt. Des Weiteren erfordert die Problemstellung eine neue Definition und Vorgehensweise zur Objektivierung und Analyse relevanter systemischer Stellhebel im Kontext der Kundenrelevanz. Die geeignete Visualisierung einer solchen Anforderungsanalyse bildet eine fundierte Grundlage für den Konzeptentscheid. Zudem umfasst eine vollständige Bewertung der Einsatztauglichkeit des P24-Hybridkonzepts zur Substitution bestimmter Leistungspositionierungen im Produktportfolio die Analyse von Optimierungspotentialen der Komponenten hinsichtlich der Antriebseffizienz.

Auf Basis der Analyse der Literatur und auf Basis von Beobachtungen des Autors wird die folgende Forschungshypothese formuliert:

**Hypothese** Eine kundenrelevante Systemauslegung des P24-Antriebsstrangs erfolgt in einem Spannungsfeld aus Antriebseffizienz, Leistungsfähigkeit und Fahrkomfort, welches das Potential zur Reduktion der verbrennungsmotorischen Leistung begrenzt.

Zur Adressierung der identifizierten Forschungslücken und als Basis der Entwicklung einer geeigneten methodischen Vorgehensweise zur Konzeptfindung in der Vorentwicklung, werden die folgenden Forschungsfragen formuliert:

**Forschungsfrage 1:** Wie wird das Attribut der Kundenrelevanz zur Bewertung von Hybridkonzepten objektiviert, deren Systemleistungen maßgeblich durch das elektrische Antriebssystem definiert werden?

**Forschungsfrage 2:** Welche gesamtsystemischen Zusammenhänge sind für die Anforderungsanalyse im genannten Spannungsfeld relevant und wie werden diese als Basis eines Konzeptentscheid in geeigneter Art und Weise visualisiert?

**Forschungsfrage 3:** Wie gestaltet sich eine simulationsgestützte Methode zur Objektivierung von Antriebsstranganforderungen hinsichtlich der Analyse gesamtsystemischer Zusammenhänge in P24-Konzepten?

**Forschungsfrage 4:** Welche Betriebspunkte sind zur Detailoptimierung der Antriebsmaschinen des P24-Konzepts relevant und wie werden diese bestimmt?

Das Ziel der Arbeit ist somit die Entwicklung einer Methode, welche ursprüngliche Anforderungen an die Leistungsfähigkeit in einen technischen Handlungsbedarf

und komfortseitige Auswirkungen übersetzt. Der *Handlungsbedarf* beschreibt dabei konkrete Schritte zur Umsetzung einer kundenrelevanten Auslegung des elektrischen Antriebssystems. Als Basis eines Konzeptentscheids wird der hierzu vorhandene *Handlungsspielraum* anhand von relevanten gesamtsystemischen Zusammenhängen visualisiert, wodurch eine differenzierte Konzeptbewertung ermöglicht wird. Zur weiteren Unterstützung der Entscheidungsfindung generiert die Methode Auslegungsempfehlungen des elektrischen Antriebssystems in Form von kundenrelevanten Betriebspunktverteilungen. Diese Empfehlungen dienen zur Abschätzung des Optimierungspotentials bezüglich der Antriebseffizienz in der Komponentenauslegung. Die Komplexität des P24-Konzepts erfordert dabei einen transparenten und nachvollziehbaren Lösungsweg zur Erhöhung der Akzeptanz der Ergebnisse.

Zur Bearbeitung der Problemstellung erfolgt in **Kapitel 2** zunächst eine Erläuterung der zum Verständnis der Arbeit notwendigen theoretischen Grundlagen. Diese beinhalten neben einer Einführung in die statische Optimierung eine Vorstellung der im Kontext von Betriebsstrategien relevanten Aspekte der Optimalsteuerung. Des Weiteren erfolgt basierend auf statistischen Grundbegriffen sowohl die Erläuterung von Methoden zur Visualisierung komplexer technischer Zusammenhänge als auch eine Einführung in die Theorie der in der Zyklengenerierung genutzten Cluster-Analysen und Prozessmodelle. Das Kapitel endet mit einer kurzen Darstellung der in dieser Arbeit verwendeten Methoden aus dem Bereich der Computational Intelligence.

**Kapitel 3** beschreibt die methodische Vorgehensweise in dieser Arbeit. Das zugrundeliegende Gedankengerüst wird anhand der Erläuterung des Spannungsfeldes aus Antriebseffizienz, Leistungsfähigkeit und Fahrkomfort vorgestellt. Der darauffolgende Abschnitt behandelt die Objektivierung von kundenrelevanten Fahranforderungen in Form von Fahrzyklen. Des Weiteren wird mittels des entwickelten Simulationsmodells und Betriebsstrategieansatzes die Basis der Objektivierung von Antriebsstranganforderungen erläutert. Zudem werden Systeme und Methoden zur gezielten Beeinflussung des Steuerungsverhaltens der Betriebsstrategie vorgestellt und verifiziert, wonach die Erläuterung der Zielgrößen und Einflussparameter zur Objektivierung von gesamtsystemischen Zusammenhängen erfolgt. Diese werden zum Ende des Kapitels in Kombination mit den entsprechenden Fahranforderungen innerhalb zweier Untersuchungsrahmen zusammengefasst, welche die Lösung der Problemstellung innerhalb des Spannungsfelds aus Antriebseffizienz, Leistungsfähigkeit und Fahrkomfort ermöglichen.

Die Methode zur Analyse von gesamtsystemischen Zusammenhängen wird in **Ka-**

**pitel 4** anhand der Bewertung der Einsatztauglichkeit des P24-Konzepts in zwei unterschiedlichen Anwendungsszenarien validiert. Hierbei erfolgt zunächst die Anforderungsanalyse auf Basis geeigneter, die Leistungsanforderung prägender, Fahrzyklen. Die Analyse liefert die Handlungsbedarfe sowie den Handlungsspielraum in der Konzeptauslegung hinsichtlich der Erfüllung kundenrelevanter Anforderungen. Das Ergebnis stellt dann die hardwareseitigen Systemgrenzen des Antriebssystems unter Berücksichtigung betriebsstrategischer Potentiale und anforderungsreduzierender Maßnahmen dar. Im Anschluss hieran erfolgt die Analyse repräsentativer Betriebspunkte im P24-Konzept zur Bewertung des effizientesten Betriebsverhaltens sowie zur Bewertung von Optimierungspotentialen in der Komponentenauslegung der Antriebsmaschinen. Die Analyse bezüglich der Antriebseffizienz basiert dabei auf kundenrelevanten synthetischen Fahrzyklen.

Im **Kapitel 5** werden die Ergebnisse im Kontext der Problemstellung der Arbeit sowie deren Relevanz für die Bewertung von Hybridkonzepten im Rahmen der Vorentwicklung diskutiert. Darauf folgt eine kritische Reflexion der methodischen Vorgehensweise zur Beantwortung der Forschungsfragen. Das Kapitel schließt mit einem Fazit, wobei die Forschungshypothese und die Beantwortung der Forschungsfragen überprüft werden. Dies bildet zugleich die Grundlage für den Ausblick auf weiterführende Forschungsaktivitäten. Die Problemstellung, die Methodik sowie die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit werden in **Kapitel 6** zusammengefasst.

Zum besseren Verständnis der vorliegenden Arbeit werden im Folgenden häufig verwendete Begriffe und deren Erläuterung zusammengefasst. Dies gilt sowohl für bereits eingeführte Begriffe als auch für jene, die im späteren Verlauf der Arbeit verwendet werden.

**Gesamtsystemische Zusammenhänge:** Die Einflüsse von systemischen Stellhebeln (Parameter) auf Zielgrößen einer kundenrelevanten Systemauslegung.

**Kundenrelevanz:** Die Erfüllung von Anforderungen des Hybridantriebs an die Leistungsfähigkeit und den Fahrkomfort auf Basis einer repräsentativen Fahranforderung des vergleichbaren konventionellen Fahrzeugs.

**Handlungsspielraum:** Der Handlungsspielraum stellt in der Entscheidungsfindung die Optionen zur Erreichung einer kundenrelevanten Systemauslegung dar.

**Handlungsbedarf:** Die erforderlichen Schritte in der Systemauslegung zur Erfüllung kundenrelevanter Fahranforderungen.

**Spannungsfeld:** Die Auslegungsziele Antriebseffizienz, Leistungsfähigkeit und Fahrkomfort werden durch Änderungen der systemischen Stellhebel gegenseitig beeinflusst, wobei Zielkonflikte nicht auszuschließen sind.

**Anspannungsgrad:** Das Risiko, dass die erforderliche Systemauslegung zur Erfüllung kundenrelevanter Fahranforderungen technisch oder kostenseitig nicht realisierbar ist.

**Leistungspositionierung:** Die Einordnung des Antriebs im Produktportfolio. Bei konventionellen Fahrzeugen ausschließlich durch die VM-Leistung begründet. Bei Hybridfahrzeugen durch die Systemleistung und gegebenenfalls durch die elektrische Reichweite begründet.

**Komponenten-/Kennfeldoptimierung:** Die Optimierung der elektrischen Maschinen hinsichtlich einer Verbesserung derer Effizienz. Im Kontext der Optimierung wird das Wort „Kennfeld“ synonym für die Komponente verwendet.

**Objektivierung:** Die Überführung von vagen und subjektiven Begriffen in technisch eindeutig bewertbare Größen und Sachverhalte.



## 2 Theoretische Grundlagen

Die Analyse und Visualisierung von gesamtsystemischen Zusammenhängen hybrider Antriebsstränge erfordert eine Abstrahierung des Problems auf eine Darstellung der Beziehung von relevanten Einflussgrößen und Zielgrößen. Eine eindeutige Darstellung der Beziehung bedeutet dabei, dass der Einfluss von innersystemischen Zusammenhängen auf die Zielgrößen möglichst gering beziehungsweise vollständig nachvollziehbar ist. Solche innersystemischen Zusammenhänge sind in dieser Arbeit hauptsächlich durch die Betriebsstrategie gekennzeichnet, wonach das vorliegende Problem als System von Systemen, wie in Bild 2.1 schematisch dargestellt, bezeichnet werden kann. Viele Methoden im Stand der Technik befassen sich hierbei mit der Optimierung von Einflussgrößen (beispielsweise der Antriebskomponenten). Zwar wird eine Optimierung von Einflussgrößen innerhalb dieser Arbeit nicht explizit durchgeführt, jedoch basieren sämtliche Gedankengänge und methodischen Konzepte auf den grundlegenden Zusammenhängen von Optimierungsproblemen. Dies gilt insbesondere für den Bereich der Betriebsstrategieentwicklung, weshalb dieses Kapitel zunächst die zum Verständnis dieser Arbeit notwendigen theoretischen Begriffe der Optimierung vorstellt.

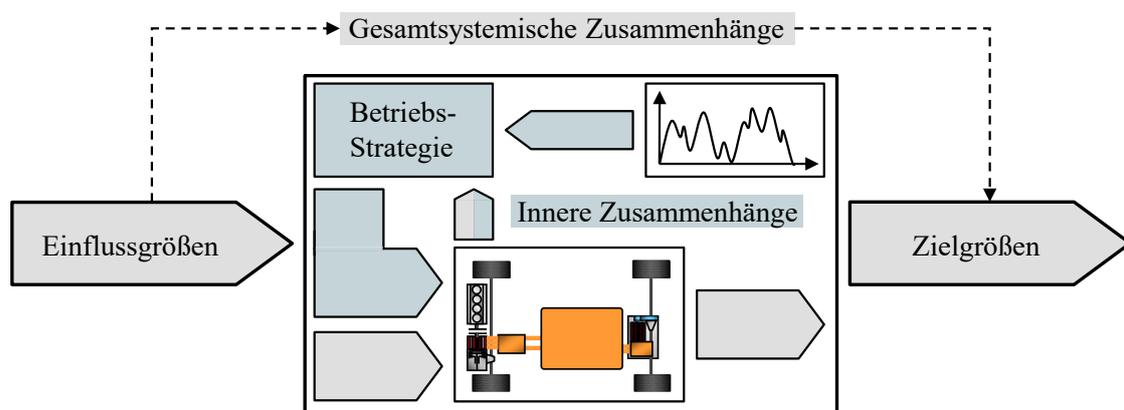


Bild 2.1: Schematische Darstellung eines Systems von Systemen am Beispiel hybrider Antriebsstrang.

Diese umfassen eine Einführung in die allgemeine Theorie, Aspekte der multikriteriellen Optimierung sowie die hierauf basierenden Zusammenhänge der Optimalsteuerung.

## 2.1 Optimierung

Der Formulierung eines Optimierungsproblems geht in der Regel eine Abstrahierung auf eine Systemdarstellung, wie in Bild 2.1 gezeigt, voraus. Hiernach definiert der Vektor  $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_{N_p}]$  die zu optimierenden Einflussgrößen, welche im Folgenden als *Parameter*  $p_i$  bezeichnet werden. Die Zusammenhänge innerhalb der Systemgrenzen verknüpfen die Parameter mit einer definierten *Zielgröße*, wonach sich die Zielfunktion  $f(\mathbf{p})$  und die Formulierung des allgemeinen Optimierungsproblems in Anlehnung an [86] zu

$$\begin{aligned} \mathbf{p}^* &= \arg \min_{\mathbf{p}} f(\mathbf{p}) \text{ mit } \mathbf{p} \in \mathbb{R}^{N_p}, f : \mathbb{R}^{N_p} \rightarrow \mathbb{R}, \\ \text{u.B.v. } g_j(\mathbf{p}) &= 0, \quad j = 1, \dots, N_g, \\ h_k(\mathbf{p}) &\leq 0, \quad k = 1, \dots, N_h, \\ \text{und } p_{i,\min} &\leq p_i \leq p_{i,\max}, \quad i = 1, \dots, N_p \end{aligned} \tag{2.1}$$

ergibt. Hierbei bezeichnet  $\mathbf{p}^*$  den optimalen Parametervektor, welcher die Zielfunktion im zulässigen Suchraum  $\mathbf{P} = \{\mathbf{p} \in \mathbb{R}^{N_p} | \mathbf{p} \in [p_{\min}, p_{\max}]\}$  minimiert. Direkte Beschränkungen des Parametervektors werden innerhalb dieser Arbeit als *explizite Restriktionen* bezeichnet, wobei  $N_g$  *Gleichheitsbedingungen*  $g_j(\mathbf{p})$  sowie  $N_h$  *Ungleichheitsbedingungen*  $h_k(\mathbf{p})$  zur weiteren Eingrenzung des Suchraums definiert werden können. Solche Nebenbedingungen, welche den zulässigen Suchraum eingrenzen, werden im Folgenden als *harte Nebenbedingungen* bezeichnet. Die Berücksichtigung von harten Nebenbedingungen kann dabei durch sogenannte starke *Strafterme* erfolgen, welche der Zielfunktion im Falle einer Verletzung der Nebenbedingung hinzuaddiert werden und somit eine Suche in unzulässigen Parameterregionen verhindern. Strafverfahren eignen sich dabei zur Berücksichtigung von Gleichheitsbedingungen und Ungleichheitsbedingungen, wohingegen Barriereverfahren lediglich zur Einbindung letzterer verwendet werden können. Die Idee der Barriereverfahren besteht darin, ein Minimum auf dem Rand des zulässigen Suchraums vom Inneren kommend zu erreichen [86]. Das heißt, die Stärke eines solchen Barriereterms, welcher beispielsweise mittels einer logarithmischen Funktion implementiert ist, wird iterativ

abgeschwächt. Dadurch wandern die zulässigen Parameterregionen in Richtung der mittels  $h_k$  definierten Grenzen, überschreiten diese jedoch nicht. Eine geeignete Wahl der Vorgehensweise zur Implementierung von harten Nebenbedingungen hängt dabei insbesondere vom gewählten Optimierungsverfahren ab. Somit erfordert die Anwendung von Gradientenverfahren beispielsweise den Einsatz von Straftermen, welche differenzierbar sind.

Dem hingegen existieren Parameterregionen, in welchen eine Suche aufgrund bestimmter Parametereinflüsse mehr oder weniger erwünscht ist. Solche Parametereinflüsse ergeben sich beispielsweise durch spezifische innersystemische Einflüsse innerhalb des Optimierungsproblems und werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit als *weiche Nebenbedingungen* bezeichnet, obwohl diese keine mathematischen Nebenbedingungen im Sinne der Gl. 2.1 darstellen. Zur Verdeutlichung des Sachverhalts zeigt Bild 2.2 eine schematische Darstellung der eingeführten Begriffe. Der rot-gestrichelte Verlauf beschreibt hierbei eine starke künstliche Erhöhung (Bestrafung) der Zielfunktionswerte zur Umsetzung von harten Nebenbedingungen. In diesem Beispiel wird durch die Nebenbedingung  $h_1(p)$  somit eine Suche im rechten Bereich des Diagramms verhindert. Im Gegensatz hierzu sind Bereiche, in welchen weiche Nebenbedingungen wirksam sind zulässig, weshalb die Zielfunktion im betreffenden Intervall weniger stark bestraft wird (blau-gepunkteter Verlauf). Sowohl harte als auch weiche Nebenbedingungen werden in dieser Arbeit anhand von Straftermen im Optimierungsproblem berücksichtigt. Des Weiteren zeigt Bild 2.2 eine relevante Eigenschaft von Zielfunktionen, welche anhand der Begriffe *lokales Optimum* und *globales Optimum* erläutert wird. Typischerweise wird bei einer Optimierung versucht, das globale Optimum und somit den niedrigsten Zielfunktionswert im Lösungsraum, zu finden.

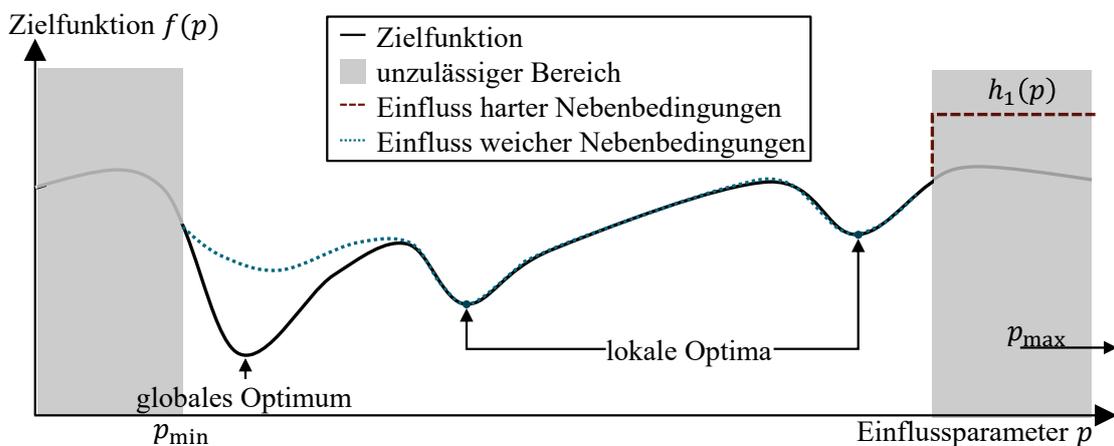


Bild 2.2: Schematische Darstellung der Eigenschaften von Optimierungsproblemen.

Hierzu eignen sich stochastische Optimierungsverfahren wie zum Beispiel die *Partikelschwarmoptimierung*, welche in Abschnitt 2.3.2 näher erläutert wird. An dieser Stelle ist anzumerken, dass das Finden des globalen Optimums in der Regel nicht garantiert werden kann und somit häufig ein lokales Minimum als geeignete Lösung anzusehen ist. Im Zusammenhang lokaler und globaler Optima wird ein wichtiger Aspekt der Verwendung von weichen Nebenbedingungen verdeutlicht. Im Beispiel verändern diese die Zielfunktion in einem solchen Ausmaß, dass sich an der Stelle des ursprünglichen globalen Optimums lediglich ein lokales Optimum der neuen Zielfunktion befindet.

In Bezug auf die Systemdarstellung in Bild 2.1 können weiche Nebenbedingungen als implizite Zielfunktionen aufgefasst werden, sofern diese in Abhängigkeit von inner-systemischen Zusammenhängen formuliert sind. Die Tatsache, dass deren Einfluss ein Optimierungsproblem grundlegend verändern kann, ist im weiteren Verlauf dieser Arbeit relevant. Insbesondere dann, wenn weiche Nebenbedingungen auf heuristischen Ansätzen basieren, kann eine nachvollziehbare Priorisierung der Zielkriterien die Akzeptanz der Ergebnisse erhöhen. Optimierungsprobleme, welche weitere Zielgrößen explizit berücksichtigen ( $f : \mathbb{R}^{N_p} \rightarrow \mathbb{R}^{N_z}$ ,  $N_z \geq 2$ ), werden indes unter dem Begriff der multikriteriellen Optimierung zusammengefasst (vgl. [15, 75]). Nachfolgend werden weitere Aspekte und grundlegende Lösungsansätze dieses Teilgebiets eingeführt.

### 2.1.1 Multikriterielle Optimierungsprobleme.

In vielen technischen Problemstellungen, so auch in dieser Arbeit, sind mehrere Zielgrößen von Interesse. Allgemein kann das multikriterielle Optimierungsproblem wie folgt formuliert werden

$$\begin{aligned} \min \mathbf{f}(\mathbf{p}) \text{ mit } \mathbf{p} \in \mathbb{R}^{N_p}, \mathbf{f} : \mathbb{R}^{N_p} \rightarrow \mathbb{R}^{N_z}, N_z \geq 2 \text{ und} \\ \mathbf{f}(\mathbf{p}) = [f_1(\mathbf{p}), f_2(\mathbf{p}) \dots, f_{N_z}(\mathbf{p})], \end{aligned} \quad (2.2)$$

wobei  $N_z$  die Anzahl der berücksichtigten Zielfunktionen beschreibt. Ein Ansatz zur Lösung solcher Probleme, ist die Generierung sogenannter Kompromisslösungen. Am Beispiel eines Optimierungsproblems mit den beiden Zielgrößen  $f_1$  und  $f_2$  wird diese Vorgehensweise verdeutlicht. Die Eigenschaften der genannten Kompromisslösungen, welche im Folgenden als *Pareto-optimale Lösungen* bezeichnet werden [15], sind in Bild 2.3 schematisch dargestellt.

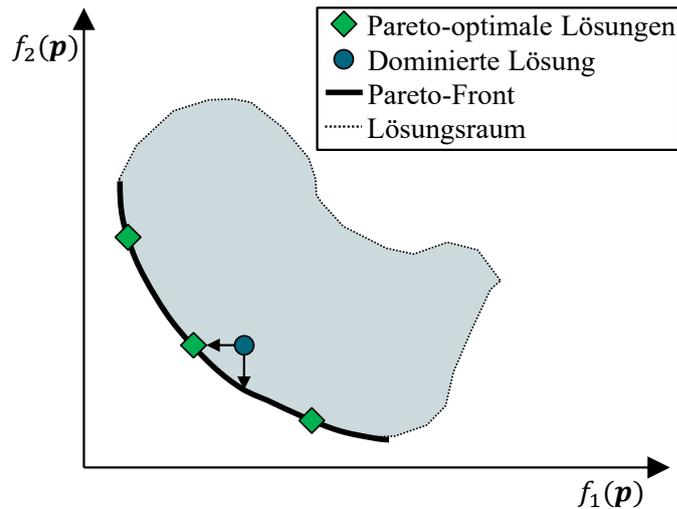


Bild 2.3: Schematische Darstellung einer multikriteriellen Optimierung, modifiziert vgl. [16, 75].

Hierbei stellt der schattierte Bereich den Lösungsraum des Optimierungsproblems dar, das heißt den Wertebereich, welchen die Zielfunktionen  $f_1$  und  $f_2$  abbilden. Die schwarz-durchgezogene Kurve bezeichnet die sogenannte *Pareto-Front*. Lösungen auf dieser Kurve werden nicht durch andere Lösungen dominiert (Pareto-optimale Lösungen) [61]. In anderen Worten besitzt eine Pareto-optimale Lösung die Eigenschaft, dass der Wert einer einzelnen Zielfunktion nicht verbessert werden kann, ohne gleichzeitig einen anderen Zielfunktionswert zu verschlechtern. Dieser Sachverhalt wird anhand des Beispiels einer dominierten Lösung (blauer Kreis) veranschaulicht. Hierbei kann derselbe Zielfunktionswert  $f_2$  der Pareto-optimalen Lösung (grüne Raute) nur durch einen erhöhten Zielfunktionswert  $f_1$  erreicht werden. Hingegen kann zum Beispiel bei der dominierten Lösung  $f_2$  verbessert werden, ohne den Zielfunktionswert  $f_1$  zu ändern.

Da die Lösung eines multikriteriellen Optimierungsproblems im Allgemeinen kein einzelnes Optimum liefert, ist neben der Auswahl eines geeigneten Verfahrens zur Suche der Pareto-Front zusätzlich eine nachgelagerte Methodik zur Entscheidungsfindung für die Auswahl der am besten geeigneten Einzellösung erforderlich [61]. Dies kann als eine nachträgliche Gewichtung der Zielgrößen verstanden werden, welche beispielsweise auf Basis der Erfahrungen des Entscheidungsträgers erfolgt. Somit ist die Visualisierung der Pareto-Front auch im Bereich des System-Level-Design hybrider Antriebsstränge von großer Bedeutung, da diese eine Interpretation der Stärke des Zielkonflikts und somit die Bewertung der Relevanz einzelner Zielgrößen zulässt.

Ist die Relevanz der berücksichtigten Zielgrößen dagegen im Vorfeld der Optimierung bekannt, kann das multikriterielle Optimierungsproblem durch die Einführung von Gewichtungsfaktoren  $w_i$  auf das skalare Problem der gewichteten Summe

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{p}) \text{ mit } \mathbf{p} \in \mathbb{R}^{N_p}, f: \mathbb{R}^{N_p} \rightarrow \mathbb{R} \text{ und} \\ f(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^{N_z} w_i f_i(\mathbf{p}) \end{aligned} \quad (2.3)$$

zurückgeführt werden. Hierbei ist zu beachten, dass anwendungsbezogene Zielfunktionen typischerweise einheitenbehaftet sind und somit unterschiedlich große Wertebereiche abbilden. Demnach erfordert eine sinnvolle Bewertung der Relevanz von Zielgrößen mittels Gewichtungsfaktoren eine Normierung der Wertebereiche.

### 2.1.2 Optimalsteuerung

Die bisher betrachteten Optimierungsprobleme werden als *statische Optimierungsprobleme* bezeichnet. Das heißt, die Zielfunktion wird bezüglich des Parametervektors  $\mathbf{p}$  im euklidischen Raum  $\mathbb{R}^{N_p}$  minimiert [36]. Im Bereich der Betriebsstrategieentwicklung spielen jedoch auch dynamische Optimierungsprobleme eine bedeutende Rolle, weshalb diese ebenfalls für die Problemstellung in dieser Arbeit relevant sind.

Im Folgenden als *Optimalsteuerungsproblem* bezeichnet, wird bei einem dynamischen Optimierungsproblem eine *Steuertrajektorie*  $\mathbf{u}^*(t)$  gesucht, welche ein dynamisches System  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t)$  von einem Anfangszustand  $\mathbf{x}(t_0)$  in einen Endzustand  $\mathbf{x}(t_f)$  überträgt [31]. Die Zielfunktion wird im Optimalsteuerungsproblem als *Kostenfunktional* bezeichnet und in Anlehnung an [36] mittels

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^* = \arg \min_{\mathbf{u}} [V(\mathbf{x}(t_f), t_f) + \int_{t_0}^{t_f} L(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) dt] \\ \text{u.B.v. } \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t), \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}(t_f), t_f) = 0, \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) \leq 0, \\ \text{und } \mathbf{u}(t) \in \mathbf{U}(t), \mathbf{x}(t) \in \mathbf{X}(t), \forall t \in [t_0, t_f] \end{aligned} \quad (2.4)$$

minimiert. Hierbei beschreiben die Terme im Kostenfunktional zum einen die bis zum Zeitpunkt  $t$  kumulierten Kosten  $\int_{t_0}^t L(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) dt$  und zum anderen einen vom Endzustand abhängigen und somit konstanten Kostenanteil  $V(\mathbf{x}(t_f), t_f)$ . Analog

zum statischen Optimierungsproblem in Gl. (2.1) enthält das Optimalsteuerungsproblem Gleichheits- und Ungleichheitsbedingungen, welche hierbei jedoch Funktionen der Zeit beschreiben. Da in dieser Arbeit ausschließlich eingangsbeschränkte Optimalsteuerungsprobleme von Interesse sind, werden die Steuergrößen  $\mathbf{u}(t)$  auf die jeweilige, zum aktuellen Zeitpunkt zulässige, Menge  $\mathbf{U}(t)$  beschränkt.

Im Folgenden wird *Pontryagins Minimumprinzip* als etablierter Lösungsansatz für Optimalsteuerungsprobleme aus dem Bereich der Betriebsstrategieentwicklung kurz vorgestellt. Eine detaillierte Herleitung des Ansatzes findet sich beispielsweise in [31, 86]. Das Minimumprinzip basiert auf der sogenannten *Hamilton-Funktion*, welche sich durch Einführung des *Kozustands*  $\lambda$  nach [31] zu

$$H(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\lambda}(t), t) = L(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) + \boldsymbol{\lambda}^T(t) \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) \quad (2.5)$$

ergibt. Das Minimumprinzip beschreibt dabei die notwendige Bedingung für eine optimale Lösung, welche für einen festen Endzeitpunkts  $t_f$  erfüllt ist, sofern [36, 82]:

- 1:** Die Steuertrajektorie  $\mathbf{u}^*$  die Hamilton-Funktion in jedem Zeitschritt  $t \in [t_0, t_f]$  global minimiert, das heißt

$$H(\mathbf{x}^*(t), \mathbf{u}^*(t), \boldsymbol{\lambda}^*(t), t) = \min_{\mathbf{u} \in \mathbf{U}} H(\mathbf{x}^*(t), \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\lambda}^*(t), t). \quad (2.6)$$

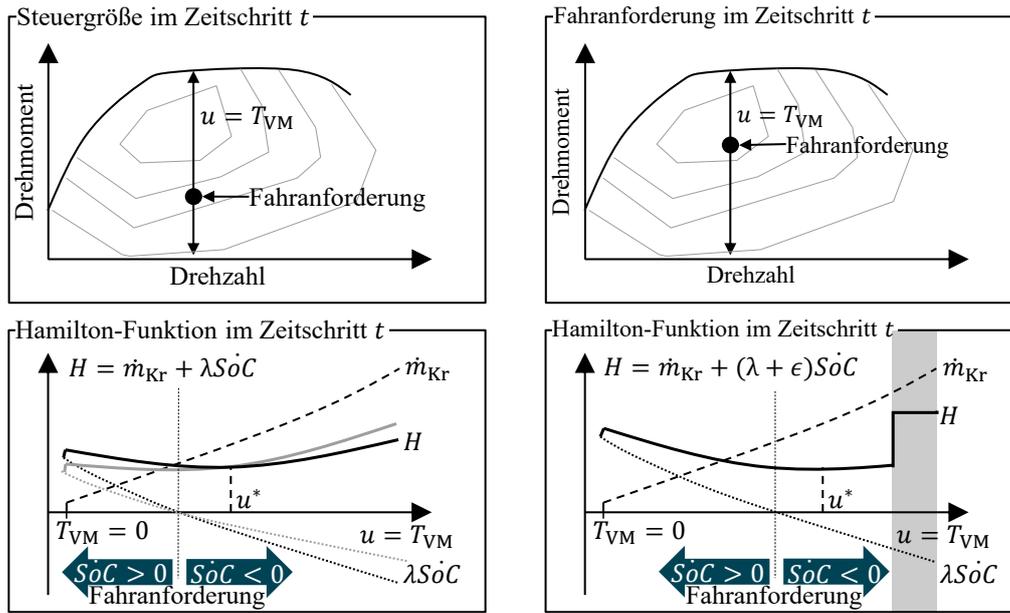
- 2:** Die Zustände und Kozustände folgende Bedingungen erfüllen

$$\dot{\mathbf{x}}^*(t) = \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}}, \quad \dot{\boldsymbol{\lambda}}^*(t) = -\frac{\partial H}{\partial \boldsymbol{\lambda}}, \quad \mathbf{x}^*(t_0) = \mathbf{x}_0, \quad \mathbf{x}^*(t_f) = \mathbf{x}_{t_f}. \quad (2.7)$$

Hierbei ist zu beachten, dass die in Gl. (2.5) aufgeführte Hamilton-Funktion anhand der Kozustände  $\boldsymbol{\lambda}(t)$  lediglich die globalen Nebenbedingungen  $\mathbf{x}^*(t_f) = \mathbf{x}_{t_f}$  berücksichtigt. Das sich ergebende Zweipunkt-Randwertproblem wird dann für die Bedingungen in Gl. (2.6) und Gl. (2.7) beispielsweise numerisch für  $t \in [t_0, t_f]$  gelöst. Wenn darüber hinaus lokale Beschränkungen der Zustände von Interesse sind, erfordert dies die Erweiterung der Hamilton-Funktion

$$H(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\lambda}(t), t) = L(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) + \left( \boldsymbol{\lambda}^T(t) + \boldsymbol{\epsilon}^T(\mathbf{x}) \right) \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) \quad (2.8)$$

um einen zusätzlichen Term. Hierin beschreibt  $\boldsymbol{\epsilon}(\mathbf{x})$  eine Straffunktion, welche aktiv wird, sobald eine lokale Zustandsgrenze erreicht ist [82].



(a) Einfluss des Kozustands  $\lambda$ , modifiziert vgl. [35] (b) Einfluss von lokalen Nebenbedingungen und der Fahranforderung

Bild 2.4: Anwendung von Pontryagins Minimumprinzip auf das Optimalsteuerungsproblem eines Hybridantriebs.

Zur Verdeutlichung der mathematischen Zusammenhänge eignet sich die Anwendung von Pontryagins Minimumprinzip auf das Optimalsteuerungsproblem eines Hybridfahrzeugs in Anlehnung an [35] und [50]. Dies stellt zugleich einen direkten Bezug zur Problemstellung in dieser Arbeit her. Hierzu ist in Bild 2.4 das Beispiel der Berechnung einer optimalen Trajektorie  $u^*$  zur Steuerung des Batterieladezustands  $SoC$  visualisiert.

Die Steuergröße  $u = T_{VM}$  ist dabei das Drehmoment des Verbrennungsmotors, das dynamische System wird durch die Änderung des Batterieladezustands  $\dot{x} = \dot{SoC}$  beschrieben und der Kraftstoffmassenstrom  $\dot{m}_{Kr} = L$  stellt die momentanen Kosten dar. Mit dem Ziel der Erfüllung der Fahraufgabe in jedem Zeitschritt  $t$ , ergibt sich das Steuerungsproblem des Hybridantriebs aus der Wahl der Zusammensetzung des erforderlichen Antriebsdrehmoments. Das heißt, dass der Verbrennungsmotor beispielsweise ein höheres als zur Erfüllung der Fahraufgabe notwendiges Drehmoment liefert und dieser Überschuss dann in Form von elektrischer Leistung in die HV-Batterie geladen wird. Eine weitere Möglichkeit zur Erfüllung der Fahraufgabe ist die vollständig elektrische Fahrt ( $T_{VM} = 0$  und  $\dot{m}_{Kr} = 0$ ). Unter Berücksichtigung von Gl. (2.5) und dem Ziel der Minimierung des Kraftstoffverbrauchs nimmt die





Zudem existieren fünf diskrete Steuerungen  $u_i$ , zum Beispiel Werte der Batterieleistung, um das System von einem in den nächsten Zustand zu überführen. Die Größe  $V$  bezeichnet die Kosten, welche ein Übergang von  $x_n$  zu  $x_{n+1}$  durch die entsprechende Wahl einer Steuerung  $u_i$  zur Folge hat. Diese Kosten werden zunächst für sämtliche im Diagramm vorhandenen Übergänge (Pfeile) berechnet. Im Anschluss werden die sogenannten *cost-to-go*  $L$  schrittweise rückwärts in der Zeit berechnet. Der Wert  $L_3(x_3, u_3)$  bezeichnet dabei die minimalen Kosten, welche vom Zeitschritt  $n = 3$  und vom Zustand  $x_3$  ab bei der Wahl der Steuerung  $u_3$  bis zum Ende anfallen. Da die Zustandswerte in der dynamischen Programmierung diskretisiert werden, diese im Falle des Ladezustands jedoch kontinuierlich sind, kann beispielsweise ein Wert zwischen zwei diskreten Werten erreicht werden. In diesem Fall erfolgt die Berechnung von  $L$  mittels Interpolation [82]. Die Berechnung der *cost-to-go* erfolgt für den vollständigen Fahrzyklus, anhand welcher dann die optimalen Steuer- und Zustandstrajektorien identifiziert werden. Da der Zustand für den Zeitschritt  $N$  zu Beginn der Rückwärtsrechnung den Anfangszustand des SoC annimmt, wird die Bedingung  $SoC^*(t_0) = SoC^*(t_f)$  zwangsläufig erfüllt.

Die dynamische Programmierung liefert für das approximierten Steuerungsproblem ein globales Optimum. Die Lösungsgüte hängt dabei insbesondere von der Diskretisierung ab, welche maßgeblich den Rechenaufwand beeinflusst. Eine detaillierte Beschreibung zur praktikablen Umsetzung des Algorithmus ist in [110] zu finden.

## 2.2 Statistische Modellierungs- und Analysemethoden

Die Einleitung dieses Kapitels zeigt die Abstrahierung eines Problems auf eine Systemdarstellung (vgl. Bild 2.1). Hierbei werden Parameter und Zielgrößen definiert, deren funktionale Verknüpfung im Inneren des Systems erfolgt. Wurden solche Zusammenhänge bisher anhand von allgemeinen Funktionen erläutert, wird das abstrahierte System in diesem Abschnitt als Modell aufgefasst, das heißt als Approximation der Eingangs- und Ausgangsbeziehung eines Systems.

Modelle werden innerhalb dieser Arbeit für unterschiedliche Zwecke und in unterschiedlichen Detaillierungstiefen verwendet. Insbesondere im Bereich der Synthese von kundenrelevanten Fahrzyklen, welche als datenbasierte Modelle zur Approximation von Realfahrten verstanden werden können, werden Methoden aus dem Bereich der Systemidentifikation und des maschinellen Lernens eingesetzt. Für diese Arbeit

relevant, sind hierbei Verfahren der Clusteranalyse sowie die Markow-Ketten als Methode zur Modellierung von stochastischen Prozessen. Des Weiteren stellt der Bereich des maschinellen Lernens Analyseverfahren bereit, welche sich zur Visualisierung von gesamtsystemischen Zusammenhängen eignen. Die in dieser Arbeit verwendeten Methoden werden im Folgenden erläutert.

### 2.2.1 Clusteranalyse

Bei der Entwicklung datenbasierter Modelle ist es das Ziel, die in Daten erfasste Verknüpfung von Parametern und Zielgrößen mittels eines (mathematischen) Modells zu approximieren. Die Auswahl geeigneter Modellierungsverfahren, erfordert hierbei oftmals eine Vorverarbeitung der Eingangsdaten zur Erzeugung praktikabler Datenstrukturen für einen konkreten Anwendungsfall. Für die vorliegende Problemstellung trifft dieser Sachverhalt auf die Eingangsdaten zur Synthese von Fahrzyklen zu. Hierbei ist es erforderlich, die Datenmuster anhand deren statistischer Merkmale in Gruppen zu unterteilen. Diese Gruppen werden im Folgenden als *Cluster* bezeichnet. Ein solches Cluster beinhaltet hierbei eine Menge von Datenmustern, deren Merkmale ähnlicher zueinander sind, als zu jenen der Datenmuster in anderen Clustern [9, 119]. Hierfür stellen die Methoden der Clusteranalyse die notwendigen Verfahren zur Identifikation von Clustern bereit.

Als etabliertes Verfahren der Clusteranalyse, wird im Folgenden der *K-Means* Algorithmus näher erläutert. Dieser zeichnet sich durch seine Einfachheit aus und findet zudem im aktuellen Bereich der Synthese von Fahrzyklen Anwendung (vgl. beispielsweise [27, 28]), weshalb das K-Means Verfahren auch für die Problemstellung in der vorliegenden Arbeit geeignet ist. Der Algorithmus zählt zur sogenannten kombinatorischen Clusteranalyse, wobei in heuristischer Art und Weise die möglichen Kombinationen der Zusammenfassung von Daten in Cluster untersucht werden [119]. Die Wahl der am besten geeigneten Kombination erfolgt dabei auf Basis der Zielfunktion  $J$ , welche sich nach [75] zu

$$J = \sum_{j=1}^K \sum_{i \in \mathbf{C}_j} \|\mathbf{d}_i - \mathbf{c}_j\|^2 \text{ mit } i = 1, 2, \dots, |\mathbf{C}_j| \quad (2.9)$$

ergibt. Ein Koordinatensystem spannt dabei den Raum der betrachteten statistischen Eigenschaften auf. Die Menge  $\mathbf{C}_j$  beinhaltet jene Koordinaten der Datenmuster  $\mathbf{d}_i$ , die dem Cluster  $j$  zugehörig sind und  $\mathbf{c}_j$  beschreibt dessen Mittelpunkt.

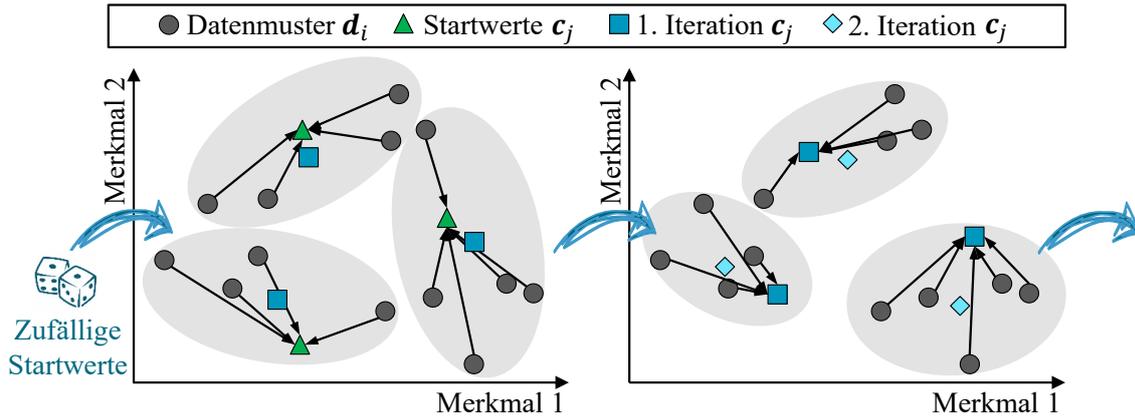


Bild 2.6: Schematische Darstellung des K-Means Algorithmus.

Die Anzahl der Cluster  $K$  wird hierbei vorab definiert und  $|\mathcal{C}_j|$  ist die Anzahl der Elemente in  $\mathcal{C}_j$ . Des Weiteren beschreibt der Term  $\|\mathbf{d}_i - \mathbf{c}_j\|^2$  die quadratische euklidische Norm. Das heißt, die Zielfunktion summiert die quadratischen Abstände der Clustermittelpunkte zu den Koordinaten der jeweiligen zugehörigen Datenmuster [75]. Demnach bewirkt die Minimierung der Zielfunktion mittels Variation von  $\mathbf{c}_j$  die dichteste Eingrenzung von Datenmustern mit ähnlichen Eigenschaften. Der Algorithmus für dieses Optimierungsproblem wurde ursprünglich in [62] vorgestellt und wird folgend in Anlehnung an [75] und anhand von Bild 2.6 erläutert.

Die Koordinaten der Datenmuster basieren in diesem Beispiel auf zwei Merkmalen. Zu Beginn des im Bild gezeigten Prozesses wird für jeden Clustermittelpunkt  $\mathcal{C}_j$  der  $K$  Cluster ein zufälliger Startwert (Dreiecke) gewählt. Anschließend werden sämtliche Datenmuster  $\mathbf{d}_i$  deren jeweils nächstgelegenen Clustermittelpunkten zugewiesen. In der Grafik sind die in der jeweiligen Iteration ermittelten Cluster vereinfacht anhand der elliptischen Schattierungen dargestellt. Für die Cluster in der ersten Iteration werden deren Mittelpunkte mittels

$$\mathbf{c}_j = \frac{\sum_{i \in \mathcal{C}_j} \mathbf{d}_i}{|\mathcal{C}_j|} \quad (2.10)$$

berechnet (Quadrate im Bild 2.6). Diese Vorgehensweise wird solange wiederholt, bis sich die Mittelpunkte von neu geformten Clustern nicht mehr verändern. Trotz der Einfachheit des Algorithmus, erfordert eine geeignete Anwendung von K-Means die Berücksichtigung einiger Aspekte. Das Ergebnis der Clusteranalyse hängt dabei insbesondere von der Wahl der Clusteranzahl  $K$  ab. In dieser Arbeit erfolgt die Wahl von  $K$  anhand der sogenannten Ellbogen-Methode, welche ein heuristisches

Verfahren zur Analyse des Zielkonflikts zwischen der Clusteranzahl und der Summe der quadratischen Abstände (vgl. Gl. 2.9) darstellt [76, 111]. Dies erlaubt dann die Wahl einer geeigneten Kompromisslösung aus Praktikabilität und Ergebnisgüte. Neben diesem Sachverhalt ergibt sich zum einen die Notwendigkeit einer Normierung der Koordinatenachsen für eine sinnvolle Berechnung der Distanzen in Gl. (2.9). Zum anderen weist die Zielfunktion  $J$  typischerweise lokale Minima auf, weshalb in der Literatur viele Untersuchungen zur Verbesserung des Algorithmus bezüglich dessen Effizienz und Lösungsgüte existieren. Ein Beispiel hierfür ist der in [6] vorgeschlagene *K-Means++* Algorithmus, welcher mit einer wahrscheinlichkeitsbasierten Verteilung der Startzustände arbeitet. Darüber hinaus existiert mit dem Fuzzy C-Means Verfahren ein Ansatz, welcher auf dem Konzept der in Abschnitt 2.3.1 erläuterten Fuzzy-Logik basiert (vgl. [75]). Da eine umfassende Zusammenfassung der weiteren in der Literatur vorhandenen Ansätze für das Verständnis dieser Arbeit nicht relevant ist, wird an dieser Stelle darauf verzichtet. Dem Leser empfehlen sich für tiefere Einblicke in die Thematik die Werke [75, 119].

## 2.2.2 Markow-Ketten

Die Clusteranalyse von realen Messdaten ermöglicht Rückschlüsse auf die Signifikanz bestimmter Merkmale und liefert somit eine Basis für die Entscheidung, welche charakteristischen Ereignisse in welcher Häufigkeit innerhalb eines repräsentativen Modells erfasst werden. Neben der Auftrittshäufigkeit ist oftmals auch die Frage von Bedeutung, welches Ereignis am wahrscheinlichsten auf ein aktuell eingetretenes Ereignis folgt. Letzteres ist ein grundlegendes Problem der Synthese von Fahrzyklen, welches nach Stand der Technik vermehrt durch die Anwendung von diskreten Markow-Ketten gelöst wird (vgl. [81, 104]). In Anlehnung an die Literatur beschränkt sich dieser Abschnitt deshalb auf die Vorstellung der grundlegenden Aspekte von diskreten Markow-Ketten. Für tiefergehende Einblicke in kontinuierliche Markow-Ketten empfehlen sich dem Leser die Arbeiten [23, 101].

Markow-Ketten sind stochastische Prozessmodelle, welche nach [23, 101] mittels

$$\begin{aligned} P(X_{n+1} = x_{n+1} | X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n) \\ = P(X_{n+1} = x_{n+1} | X_n = x_n) \end{aligned} \quad (2.11)$$

berechnet werden. Hierbei ist  $X = \{X_n, n \in \mathbb{N}\}$  ein stochastischer Prozess auf dem Zustandsraum  $\mathbf{X}$  mit den entsprechenden Zuständen  $x_n \in \mathbf{X}$  und  $P$  die Wahrschein-

lichkeit. Der Zusammenhang in Gl. (2.11) wird auch als *Markow-Eigenschaft* bezeichnet, welche besagt, dass alle zukünftigen Zustände  $x_{n+1}$  (Ereignisse) ausschließlich vom aktuellen Zustand  $x_n$  abhängen [23]. Demnach erlaubt das Prozessmodell die Generierung einer stochastischen Sequenz der Zustandsvariablen, deren Verteilung der Zustandsübergänge jener in den Eingangsdaten erfassten Verteilung entspricht. Hierfür werden die erfassten Übergangswahrscheinlichkeiten in der sogenannten *Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix*  $\Theta$  mit den Einträgen  $(\theta_{i,j})$  gespeichert, welche in Anlehnung an [101] anhand von

$$P_{i,j} = P(X_{n+1} = j | X_n = i) = (\theta_{i,j}),$$

$$\text{mit } P_{i,j} \geq 0, \sum_{j \in \mathbf{X}} P_{i,j} = 1, i, j = 1, 2, \dots, N_s \quad (2.12)$$

formuliert wird. Die Dimension der Matrix ergibt sich anhand der Anzahl der Zustände  $N_s = |\mathbf{X}|$ , sodass  $\Theta \in \mathbb{R}^{N_s \times N_s}$ . Weiterhin gilt, dass die Summe einer Zeile stets 1 ergibt, da ein Übergang vom aktuellen Zustand  $i$  in einen beliebigen in  $\mathbf{X}$  enthaltenen Zustand  $j$  in jedem Fall erfolgt (hierzu zählt ebenfalls das Verharren im aktuellen Zustand). Die jeweiligen Übergangswahrscheinlichkeiten werden durch Zählen der in den Daten vorhandenen Übergängen von Zustand  $i$  nach Zustand  $j$  und Division mit der Häufigkeit des Zustands  $i$  approximiert.

Mittels der Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix kann nun ein stochastischer Prozess simuliert, das heißt eine synthetische Sequenz von Zuständen erzeugt werden. Eine schematische Darstellung dieses Vorgangs anhand einer beispielhaften Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix ist in Bild 2.7 gezeigt. Hierbei wird zunächst ein Startzustand der Markow-Kette ausgewählt, in diesem Beispiel  $X_1 = x_1 = 1$ .

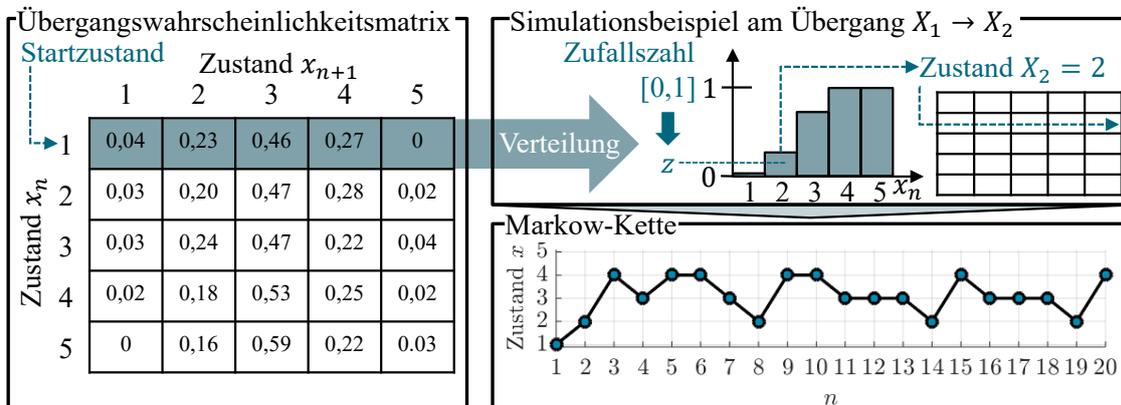


Bild 2.7: Schematische Darstellung der Simulation von Markow-Ketten.

Mittels eines Zufallsexperiments wird dann der nächste Zustand  $X_2 = x_2$  ermittelt. Das heißt, es wird zunächst eine gleichverteilte Zufallszahl  $z$  auf dem Intervall  $[0, 1]$  berechnet sodass  $X_2 = z$ . Im Falle das  $z < 0,04$  ergibt sich der folgende Zustand zu  $X_2 = x_1$ . Im Falle  $0,04 \geq z < 0,04 + 0,23$  folgt  $X_2 = x_2$  und so weiter. Dieses Beispiel zeigt die Berechnung des neuen Zustands nach dem Inversionsprinzip, welches im rechten oberen Teil der Abbildung in Anlehnung an [8] grafisch dargestellt ist. In der nächsten Iteration bestimmt  $x_2$  dann die Zeile der Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix, für welche ein erneutes Zufallsexperiment erfolgt. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis ein vorab festgelegtes Abbruchkriterium erfüllt ist (beispielsweise das Erreichen der gewünschten Länge der Markow-Kette).

Für die typische Anwendung von Markow-Ketten spielen solche Simulationsansätze eine große Rolle. Im Rahmen dieser Arbeit findet jedoch keine stochastische Simulation, sondern lediglich die Markow-Eigenschaft Verwendung, weshalb auf eine weitere Erklärung von stochastischen Simulationsverfahren verzichtet wird. Für eine detaillierte Herleitung sowie die Erläuterung des Algorithmus der in Bild 2.7 gezeigten Inversionsmethode empfiehlt sich dem Leser [52]. Des Weiteren ist ein Beispiel für die Anwendung im Bereich der Fahrzyklensynthese in [104] gezeigt.

### 2.2.3 Individual Conditional Expectation Plots

Die Analyse von Modellen stellt eine wichtige Aufgabe im Bereich der Systemidentifikation und des maschinellen Lernens dar. Hierbei ist beispielsweise von Interesse, wie gut ein Modell die erwarteten Zusammenhänge erklärt. Neben Analysen zur Überprüfung der Modellqualität sind Modellanalysen insbesondere zum Verständnis des Einflusses der Parameter auf die Zielgrößen relevant. Dieser Aspekt stellt ein zentrales Thema der vorliegenden Arbeit dar, wobei zum Verständnis gesamtsystemischer Zusammenhänge als Basis einer Entscheidungsfindung eine möglichst einfache und übersichtliche Visualisierung erforderlich ist. Dies ist jedoch eine nicht triviale Aufgabe, wenn die Anzahl der Parameter steigt und zudem Wechselwirkungen vorhanden sind [39]. Obwohl die in diesem Abschnitt erläuterten Visualisierungstechniken typischerweise in den Bereichen des maschinellen Lernens und der Systemidentifikation verwendet werden, existieren in der Literatur Beispiele für deren erfolgreiche Anwendung zur Unterstützung einer Entscheidungsfindung im Entwicklungsprozess technischer Produkte (vgl. [43]). Im Folgenden wird deshalb die Methode der Individual Conditional Expectation Plots, kurz ICE-Plots, für die Verwendung in dieser Arbeit vorgestellt.

Aus dem Bereich des maschinellen Lernens und der Systemidentifikation ist das Problem der Dimensionalität bekannt. Die Herausforderung im Kontext der Visualisierung besteht dabei darin, die Einflüsse der Parameter von einem hochdimensionalen Raum in einen zwei- beziehungsweise dreidimensionalen Raum zu überführen. Hierzu wird in [30] die Visualisierungsmethode der *Partial Dependence Plots* vorgeschlagen. Diese geben Anhaltspunkte darüber, wie die approximierte Zielfunktion  $\hat{f}(\mathbf{x})$  im Mittel von einer Variablen  $x_S$  unter Berücksichtigung der Einflüsse der restlichen Variablen  $\mathbf{x}_C$  abhängt. Visualisiert wird dieser Aspekt dann anhand einer Funktion  $\hat{f}_S(x_S)$ , im weiteren Verlauf dieser Arbeit als *Trendkurve* bezeichnet, welche sich nach [39] mittels

$$\hat{f}_S = \frac{1}{N_C} \sum_{i=1}^{N_S} \hat{f}(x_S, \mathbf{x}_{C,i}) \quad (2.13)$$

berechnet. Zur Verdeutlichung werden jeweils fünf diskrete Realisierungen<sup>1</sup> der Parameter  $p_S = x_S$  und  $p_C = x_C$  untersucht. Die Beschränkung auf zwei Parameter erfolgt hierbei aus Gründen der Übersichtlichkeit, da zunächst die grundsätzlichen Eigenschaften der Methode erläutert werden. Für jeden Wert  $p_{S,i}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N_S$  ergeben sich in diesem Beispiel mittels der Werte  $p_{C,j}$ ,  $j = 1, 2, \dots, N_C$  dieselben fünf Realisierungen von  $p_C$ . Der Funktionswert  $\hat{f}_S(x_S = p_{S,i})$  bezeichnet demnach den Mittelwert von  $\hat{f}$  für einen festgehaltenen Wert  $p_{S,i}$  bei einer Variation der Werte in  $p_C$ . Obwohl die Trendkurve dabei oftmals hilfreiche Hinweise über den Einfluss eines Parameters liefert, ergibt sich nach [34] ein Nachteil der Partial Dependence Plots aus der Tatsache, dass diese im Falle von starken Wechselwirkungen zwischen den Parametern zu Fehlinterpretationen führen können. Die in [34] vorgeschlagenen ICE-Plots stellen eine Erweiterung der Partial Dependence Plots dar, welche sich zusätzlich für die Visualisierung von starken Wechselwirkungen eignen. Die Kenntnis über Wechselwirkungen in den gesamtsystemischen Zusammenhängen liefert dabei einen wichtigen Beitrag zur Entscheidungsfindung.

Die Idee der ICE-Plots ist es, den Einfluss des betrachteten Parameters  $p_S$  für eine bestimmte Realisierung  $p_{C,j}$  anhand einer eigenen Kurve zu visualisieren. Zur Verdeutlichung wird in Bild 2.8 der Einfluss des Parameters  $p_S$  auf die Zielfunktion  $\hat{f}(\mathbf{p})$  für sämtliche Realisierungen des Parameters  $p_C$  anhand von  $N_C$  Kurven aufgeführt. Im Diagramm stellt die rot-durchgezogene Kurve demnach den Einfluss des Parameters  $p_S$  auf die Zielfunktion für die Realisierung  $p_{C,1}$  dar. Hierbei sind die diskreten Werte von  $p_S$  durch Punkte dargestellt.

<sup>1</sup>Der Begriff „Realisierung“ wird in dieser Arbeit nicht im Sinne der Realisierung einer Zufallsvariablen in der Statistik sondern synonym für eine bestimmte Einstellung eines diskreten Parameters verwendet



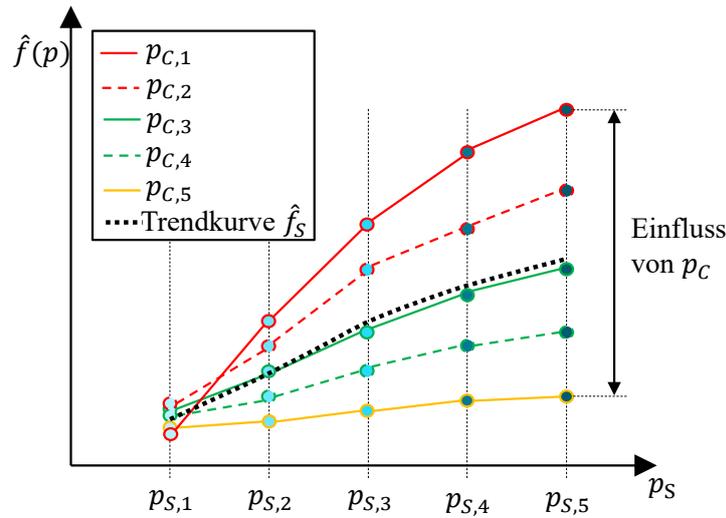


Bild 2.8: Schematische Visualisierung der Einflüsse von Parametern mittels Individual Conditional Expectation Plots.

Anhand des Diagramms wird deutlich, dass der Zielfunktionswert für höhere Werte von  $p_s$  steigt. Die zunehmende Spreizung der Kurven zeigt zudem, dass der Parameter  $p_C$  einen höheren Einfluss auf die Zielfunktion hat, wenn höhere Werte des Parameters  $p_s$  vorliegen. Ein weiterer interessanter Zusammenhang ergibt sich anhand der rot-durchgezogenen Kurve. Diese verläuft stets oberhalb der anderen Kurven mit Ausnahme an der Stelle des Wertes  $p_{S,1}$ , was sich durch die Überschneidung im Bereich zwischen  $p_{S,1}$  und  $p_{S,2}$  äußert. Ein solcher Effekt kann dabei durch starke Wechselwirkungen hervorgerufen werden. Ein wichtiger Aspekt hierbei ist, dass der beschriebene Effekt in der schwarz-gepunkteten Trendkurve nicht erkennbar ist.

Ein Vergleich der mittels der ICE-Plots gewonnenen Erkenntnisse gegenüber dem Informationsgehalt einer Optimierung mittels eines Algorithmus verdeutlicht die Vorteile der Modellanalyse im Kontext der Zielsetzung. Liefert Letzteres zwar eine optimale Lösung bezüglich der Zielgrößen, bleibt jegliche Kenntnis über die funktionalen Zusammenhänge verdeckt. Das heißt, die Auswirkungen einer nachträglichen Änderung von Einflussparametern bleiben unbekannt. In Bezug auf die Analyse gesamtsystemischer Zusammenhänge erlaubt die Kenntnis über den Einfluss der Parameter eine Abschätzung von Auswirkungen auf Zielgrößen, welche nicht explizit in der Analyse berücksichtigt werden. Dieser Aspekt gewinnt insbesondere dann an Relevanz, wenn jene Zielgrößen zu Beginn noch nicht wichtig beziehungsweise unbekannt waren oder deren Objektivierung im Kontext der Gesamtsystemanalyse eine erhebliche Vereinfachung erfordert, da beispielsweise die hierfür benötigte Expertise in anderen

Fachbereichen liegt. Die gesamtsystemischen Zusammenhänge erlauben dann eine detaillierte Bewertung der betreffenden Zielgrößen.

## 2.3 Computational Intelligence Methoden

Sowohl in der Optimierung als auch in der Betriebsstrategieentwicklung werden nach Stand der Technik häufig Methoden aus dem Bereich der Computational Intelligence (CI) verwendet, insbesondere wenn innere Zusammenhänge aufgrund der Komplexität beziehungsweise der Dimensionalität des Problems nicht vollständig bekannt sind. Die Methoden der Computational Intelligence stammen dabei meist aus der nichtlinearen Statistik oder adaptieren Beobachtungen und Vorgänge aus der Natur, beispielsweise einen Vogelschwarm bei der Nahrungssuche oder die Evolution von Organismen mittels Selektion der besten DNA-Bestandteile beziehungsweise Mutation zur Anpassung des Organismus an veränderte Umgebungsbedingungen. Diese naturanalogen Verfahren zielen darauf ab, auch auf Basis von unvollständigem und unsicherem Wissen geeignete, robuste und handhabbare Lösungen für komplexe Problemstellungen zu finden [54]. Im Folgenden werden die innerhalb dieser Arbeit verwendeten Methoden der Fuzzy-Logik und der Schwarm-Algorithmen vorgestellt. Dieser Abschnitt enthält dabei zum Teil Inhalte und Zitate der vom Autor selbst verfassten Masterarbeit „Entwicklung einer fahrleistungsoptimierten Betriebsstrategie für einen Hybridantrieb mittels Fuzzy-Logik und Schwarmintelligenz“, welche 2017 der Fakultät Mechanik und Elektronik der Hochschule Heilbronn vorgelegt wurde.

### 2.3.1 Fuzzy-Logik

Eine grundlegende Absicht in dieser Arbeit ist die Nachvollziehbarkeit der gesamtsystemischen Zusammenhänge zur Stärkung der Akzeptanz der Ergebnisse in der Entscheidungsfindung. Dies erfordert, dass komplexe Zusammenhänge anhand einer Darstellung der Beziehung von relevanten Einflussgrößen und Zielgrößen möglichst einfach interpretierbar sind. Eine mögliche Art der Interpretation abstrakter Zusammenhänge stellt dabei die Formulierung einer *Regelbasis* dar. Mittels dieser Regelbasis können dann Zusammenhänge in einer „Wenn“-„Dann“ Beziehung formuliert werden. Die Diskussion von gesamtsystemischen Zusammenhängen unterliegt dabei jener Eigenschaft der menschlichen Kommunikation, dass Sachverhalte oftmals vage und unscharf, wie anhand der Regel

$R_1$ : WENN das Fahrzeug *schnell* fährt UND die Steigung *groß* ist, DANN ist der Kraftstoffverbrauch *hoch*

illustriert, ausgedrückt werden. Ein Grund hierfür liegt beispielsweise darin, dass das Wissen über die Problembeziehungen nicht vollständig ist [75]. Hierzu beschreibt Fuzzy-Logik ein Verfahren, welches es erlaubt, vage und unscharf formulierte Sachverhalte innerhalb eines regelbasierten Modellansatzes umzusetzen [75], welcher zudem auf nachvollziehbaren Zusammenhängen basiert [77].

Die Modellierung von *unscharfen* (eng.: Fuzzy) Formulierungen erfordert in Anlehnung an [77] die Einführung der sogenannten *Fuzzy-Menge*

$$\mathbf{F} = \{x, \mu_F(x) \mid x \in \mathbf{X}\}, \quad (2.14)$$

wobei die *Zugehörigkeitsfunktion*  $\mu_F(x)$  jedem Element  $x$  einer Grundmenge  $\mathbf{X}$  dessen *Zugehörigkeitsgrad* zu  $\mathbf{F}$  zuordnet. Es wird demnach nicht unterschieden, ob  $x$  in  $\mathbf{F}$  enthalten ist oder nicht ( $\mathbf{X} \rightarrow \{0, 1\}$ ), sondern zu welchem Grad das Element  $x$  zur Fuzzy-Menge  $\mathbf{F}$  gehört ( $\mathbf{X} \rightarrow [0, 1]$ ). Zur Verdeutlichung des Zugehörigkeitsgrades wird ein Vergleich zu den in (vgl. Abschnitt 2.2.2) vorgestellten stochastischen Prozessmodellen angestellt. Hierbei modellieren Markow-Ketten die Wahrscheinlichkeit, ob eine Eigenschaft erfüllt ist, wohingegen Fuzzy-Mengen beschreiben, inwieweit eine Eigenschaft erfüllt ist [54]. Anhand dieser Information ergeben sich die sogenannten *Erfüllungsgrade* der Regeln  $R$ , welche die Verknüpfungen der Eingangs- und Ausgangsgrößen innerhalb des *Fuzzy-Systems* darstellen. Für die weitere Erläuterung der Funktionsweise von Fuzzy-Systemen wird die beispielhafte Regelbasis

$R_1$ : WENN  $v_{\text{Fzg}} = \text{Hoch}$  UND  $\alpha = \text{Groß}$  DANN  $\dot{m}_{\text{Kr}} = \text{Hoch}$ ,

$R_2$ : WENN  $v_{\text{Fzg}} = \text{Mittel}$  ODER  $\alpha = \text{Mittel}$  DANN  $\dot{m}_{\text{Kr}} = \text{Mittel}$

formuliert. Hierbei beschreiben die Geschwindigkeit  $v_{\text{Fzg}}$  und die Steigung  $\alpha$  die Eingangsgrößen und der Kraftstoffmassenstrom  $\dot{m}_{\text{Kr}}$  die Ausgangsgröße des Fuzzy-Systems. Ausdrücke wie „Mittel“ oder „Hoch“ werden dabei als *linguistische Terme* bezeichnet, welche durch die Fuzzy-Mengen, das heißt die Zugehörigkeitsfunktion, beschrieben sind. Die Erfüllungsgrade der Regeln quantisieren, inwieweit diese für spezifische Werte der Eingangsvariablen zutreffend sind [75]. Neben der Beschreibung der Fuzzy-Mengen, welche beispielsweise durch Trapez- oder Dreiecksfunktionen (vgl. Bild 2.9) erfolgt, werden die mittels des Fuzzy-Systems modellierten Zusammenhänge insbesondere durch die mathematische Umsetzung der logischen Operatoren „UND“ beziehungsweise „ODER“ beeinflusst.

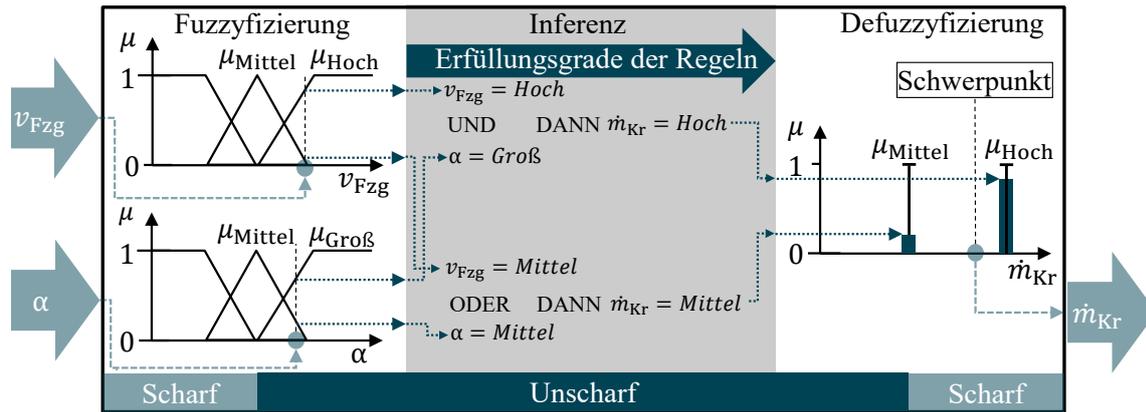


Bild 2.9: Schematische Darstellung der Inferenz eines Singleton-Fuzzy-Systems, modifiziert vgl. [75].

Da sowohl die Wahl der Zugehörigkeitsfunktionen als auch die Wahl der sogenannten *t-Normen* und *t-Conormen* als Berechnungsvorschriften zur Umsetzung der logischen Operatoren problemspezifisch sind, wird an dieser Stelle auf eine detaillierte Erläuterung der mathematischen Zusammenhänge verzichtet und auf die Arbeiten [54, 75, 99] verwiesen. Stattdessen wird der grundlegende Prozess zur Berechnung von Ausgangswerten in Abhängigkeit von Eingangswerten innerhalb eines Fuzzy-Systems, auch *Inferenz* genannt, anhand von Bild 2.9 schematisch dargestellt.

Die Grafik zeigt hierbei ein Singleton-Fuzzy-System, welches aufgrund der geringen Komplexität die am häufigsten verwendete Variante von Fuzzy-Systemen in der Industrie ist [75]. Aufgrund der Prämisse der Nachvollziehbarkeit von Zusammenhängen, stellen diese eine geeignete Variante für die Problemstellung in dieser Arbeit dar. Zunächst werden in der sogenannten *Fuzzyfizierung* scharfe Eingangswerte, das heißt Zahlenwerte wie zum Beispiel  $v_{\text{Fzg}} = 130 \text{ km/h}$  und  $\alpha = 10 \%$  mittels Bestimmung derer jeweiligen Zugehörigkeitsgrade zu den Fuzzy-Mengen, in unscharfe linguistische Terme („Mittel“, „Hoch“) umgewandelt. Die Berechnung der Zugehörigkeit zu den Fuzzy-Mengen erfolgt hierbei zum Beispiel durch Trapez- und Dreiecksfunktionen. Innerhalb der Inferenz werden dann anhand der Zugehörigkeitsgrade die Erfüllungsgrade der Regeln mittels geeigneter Berechnungsnormen für die logischen Operatoren ermittelt. Das Ergebnis der Inferenz bewertet, inwieweit die Regeln erfüllt sind. Im gewählten Beispiel ist der Erfüllungsgrad der Regel 1 hoch, da sowohl die Prämisse „ $v_{\text{Fzg}} = \text{Hoch}$ “ als auch die Prämisse „ $\alpha = \text{Groß}$ “ in hohem Maße erfüllt sind. Im Gegensatz ist der Erfüllungsgrad von Regel 2 gering. Demnach ergibt sich ein hoher Zugehörigkeitsgrad für die Konklusion „ $\dot{m}_{\text{Kr}} = \text{Hoch}$ “ und ein niedriger Zugehörigkeitsgrad für „ $\dot{m}_{\text{Kr}} = \text{Mittel}$ “. Die Bezeichnung des dargestellten Singleton-Fuzzy-

Systems beruht auf den hierbei gewählten Singleton-Zugehörigkeitsfunktionen zur Beschreibung der Ausgangsvariablen. Eine Singleton-Zugehörigkeitsfunktion

$$\mu_F(x) = \begin{cases} a_i & \text{für } x = x_i \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.15)$$

hat dabei lediglich an einer bestimmten Stelle  $x_i$  einen Wert  $a_i$  [99]. Die Stelle  $x_i$  ist hierbei ein scharfer Wert, welcher als Singleton bezeichnet wird. Hiernach beschreibt der Wert  $a_i$  den scharfen Ausgangswert bei vollständiger Erfüllung der Regel  $i$ . Da im Beispiel Regel 1 und Regel 2 zu Teilen erfüllt sind, erfolgt die *Defuzzifizierung* im rechten Teil der Grafik mittels der schematisch dargestellten Berechnung des Schwerpunktes aus den Erfüllungsgraden (blaue Balken) aller Regeln.

### 2.3.2 Partikelschwarmoptimierung

Im Sinne der Nachvollziehbarkeit ist es wünschenswert, ausschließlich deterministische Methoden wie Fuzzy-Logik zu verwenden, welche eindeutige Rückschlüsse auf den Lösungsweg zulassen und somit reproduzierbare Ergebnisse liefern. Aus der Problemstellung dieser Arbeit ergeben sich jedoch auch Teilprobleme, bei denen für den weiteren Verlauf der Arbeit lediglich das Ergebnis von Interesse ist. Ein solches Teilproblem ist die Synthese von Fahrzyklen, wobei eine Kombination von Datenmustern gesucht wird, welche vorab definierte Zielkriterien am besten erfüllt. Der Bereich der Computational Intelligence stellt hierzu eine Klasse stochastischer Algorithmen bereit, welche im Forschungsfeld der Synthese von Fahrzyklen bereits erfolgreich angewendet werden (vgl. [21, 126]).

Die Optimierungsprobleme, welche in dieser Arbeit durch stochastische Algorithmen gelöst werden, sind Black-Box-Probleme. Das heißt, dass die Zielfunktion nicht transparent ist. Infolgedessen können Unstetigkeiten, eine Nichtdifferenzierbarkeit und das Vorhandensein mehrerer lokaler Optima (multimodale Zielfunktionen) nicht ausgeschlossen werden. Stochastische Optimierungsverfahren stellen hierbei geringe Anforderungen an die Zielfunktion, sodass diese Algorithmen auch bei unstetigen, nicht differenzierbaren und multimodalen Problemen in der Lage sind, ein globales Optimum zu finden [67]. In dieser Arbeit wird aufgrund der Eignung und der Verfügbarkeit der in [97] vorgestellte Partikelschwarmoptimierung-Algorithmus (PSO) verwendet und im weiteren Verlauf näher erläutert. Auf eine umfangreichere Erläute-

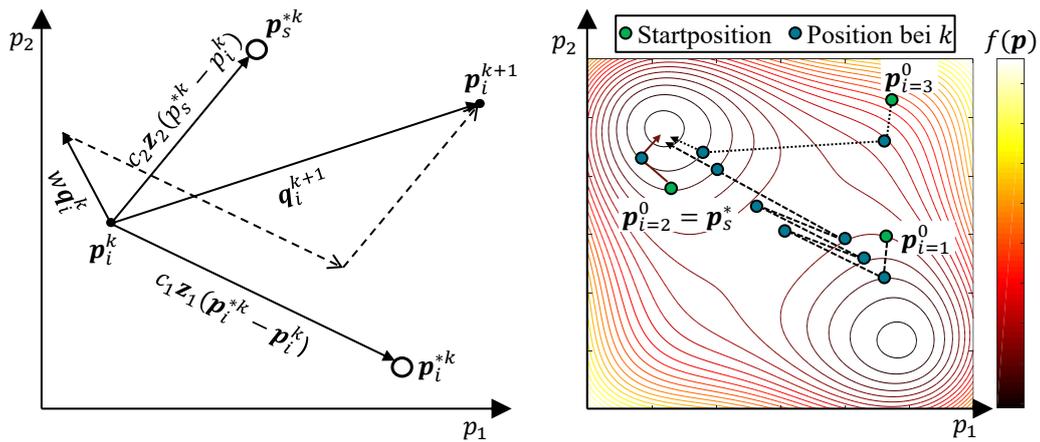
rung stochastischer Optimierungsverfahren wird indes verzichtet. Dem Leser empfehlen sich für tiefergehende Einblicke in die Thematik die Arbeiten [1, 67, 75, 77, 99].

Zuerst vorgestellt in der Arbeit von [47], wird die Partikelschwarmoptimierung (PSO) seither in vielen Veröffentlichungen weiterentwickelt (vgl. beispielsweise [85, 97]) und für unterschiedliche Anwendungen angepasst. Ein Beispiel ist die multikriterielle Antriebsstrangoptimierung in [25, 66]. Im Wesentlichen approximiert der Algorithmus das Schwarmverhalten von Vögeln bei der Nahrungssuche, wobei eine „soziale“ Interaktion zwischen den einzelnen Individuen  $i$  und dem Schwarm  $s$  stattfindet. Die allgemeine mathematische Formulierung der PSO

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_i^{k+1} &= \mathbf{p}_i^k + \mathbf{q}_i^{k+1}, \\ \mathbf{q}_i^{k+1} &= w\mathbf{q}_i^k + c_1\mathbf{z}_1 \odot (\mathbf{p}_i^{*k} - \mathbf{p}_i^k) + c_2\mathbf{z}_2 \odot (\mathbf{p}_s^{*k} - \mathbf{p}_i^k), \\ \mathbf{p}_i, \mathbf{q}_i, \mathbf{p}_s, \mathbf{z}_1, \text{ und } \mathbf{z}_2 &\in \mathbb{R}^{N_p} \end{aligned} \quad (2.16)$$

nach [97], ist zur besseren Übersicht für ein einzelnes Partikel (Individuum) formuliert. Hierbei bezeichnen  $\mathbf{z}_1$  und  $\mathbf{z}_2$  Vektoren aus Zufallszahlen und die Größen  $c_1$ ,  $c_2$  sowie  $w$  sind Faktoren zur Beeinflussung des Konvergenzverhaltens, worauf am Ende dieses Abschnitts genauer eingegangen wird. Des Weiteren bezeichnet der Operator  $\odot$  die elementweise Matrixmultiplikation. Bei der Anwendung des Algorithmus ist die Anzahl der Partikel  $N_i$  (Population) größer 1 und die in Gl. (2.16) dargestellten Vektoren werden als Matrizen der Dimension  $\mathbb{R}^{N_i \times N_p}$  formuliert. Hierbei beschreibt eine bestimmte Realisierung des Parametervektors  $\mathbf{p}_i^k$  die Position des Partikels im Suchraum  $\mathbf{P}$  zur Iteration  $k$ , welcher sich aktuell mit der Geschwindigkeit  $\mathbf{q}_i^k$  bewegt. Die Position eines jeden Partikels verändert sich durch die Aktualisierung des Geschwindigkeitsvektors  $\mathbf{q}_i^{k+1}$ . Dieser Sachverhalt ist in Bild 2.10(a) schematisch dargestellt. Hierfür erfolgt die Aktualisierung basierend auf der eigenen bisherigen besten Position des Individuums  $\mathbf{p}_i^{*k}$  und anhand des Austauschs von Informationen bezüglich der besten Position innerhalb des Schwarms  $\mathbf{p}_s^{*k}$ . Die jeweiligen besten Positionen beschreiben hierbei jene mit dem aktuell geringsten Wert der Zielfunktion  $f(\mathbf{p}_i)$ . Der Schwarm  $s$  wird dabei durch die Anzahl der direkten Verbindungen (Nachbarschaft) des Partikels  $i$  zu den restlichen Individuen definiert. Denkbar sind beispielsweise die Definition des Schwarms als Gesamtheit aller Partikel oder die Bildung von Clustern (vgl. Abschnitt 2.2.1).

Im Bild 2.10(b) ist der Schwarm durch alle drei Partikel definiert, welche die zugrundeliegende Zielfunktion  $f(\mathbf{p})$  an deren Positionen ( $\mathbf{p}_1$ ,  $\mathbf{p}_2$  und  $\mathbf{p}_3$ ) evaluieren.



(a) Aktualisierung der Geschwindigkeit, modifiziert vgl. [25] (b) Optimierungsbeispiel, modifiziert vgl. [99]

Bild 2.10: Schematische Darstellung der Partikelschwarmoptimierung.

Hierbei liefert die zufällige Position von Individuum 2 zu Beginn den (global) niedrigsten Funktionswert, wonach dieser zugleich die beste Position des Schwarms definiert  $p_2^0 = p_s^0$ . Jeder der Punkte im Diagramm beschreibt dabei die Position in einer Iteration (auf die Darstellung gleichbleibender Positionen bei  $p_s^*$  wird zur Übersichtlichkeit verzichtet) und die Linien zeigen den Optimierungsverlauf jedes Partikels. Da die zufällige Startposition von Individuum 3 zu einem hohen Zielfunktionswert führt, tendiert dieses eher dazu, dem Schwarm von Beginn an zu folgen (Individuum 3 bewegt sich zügig in Richtung des Schwarmführers Individuum 2). Dem hingegen startet Individuum 1 bei einem relativ geringen Zielfunktionswert und benötigt mehrere Iterationen, um dem Schwarm zu folgen.

Neben der Definition des Schwarms beeinflussen insbesondere die Konstanten  $c_1$  und  $c_2$  das Konvergenzverhalten des Algorithmus [97, 99]. Hierbei gewichtet  $c_1$  den Einfluss eines einzelnen Partikels auf die Aktualisierung der Geschwindigkeit und  $c_2$  den Einfluss des Schwarms. Die Größe  $w$  beschreibt die Trägheit der Individuen. Die stochastische Komponente der PSO ergibt sich durch die gleichverteilten Zufallszahlen  $z_1$  und  $z_2$  auf dem Intervall  $[0, 1]$ . Diese Zufallszahlen sollen im Wesentlichen das Risiko minimieren, in einem lokalen Minimum zu konvergieren. Im Beispiel führen diese zu den häufigen Richtungswechseln von Individuum 1. Die Wahl der vorgestellten Konstanten sowie des Abbruchkriteriums des Algorithmus ist hierbei stets problemspezifisch.

Die in diesem Kapitel behandelten Themen bilden das theoretische Grundgerüst der

Methode zur Analyse gesamtsystemischer Zusammenhänge, welche im Folgenden Kapitel näher erläutert wird.



### 3 Methode zur Analyse gesamtsystemischer Zusammenhänge

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode, welche Anforderungen an den hybriden Antriebsstrang in technische gesamtsystemische Zusammenhänge übersetzt. Diese werden für die Verwendung als Entscheidungsgrundlage in Konzeptionsdiskussionen oder als Basis von Detailauslegungen mittels geeigneter Visualisierungsmethoden aufbereitet. Das hierfür entwickelte Methodenmodell ist in Bild 3.1 schematisch dargestellt. Die Grafik zeigt, dass die Basis der Analyse stets die an den Antriebsstrang gestellten Anforderungen sind.

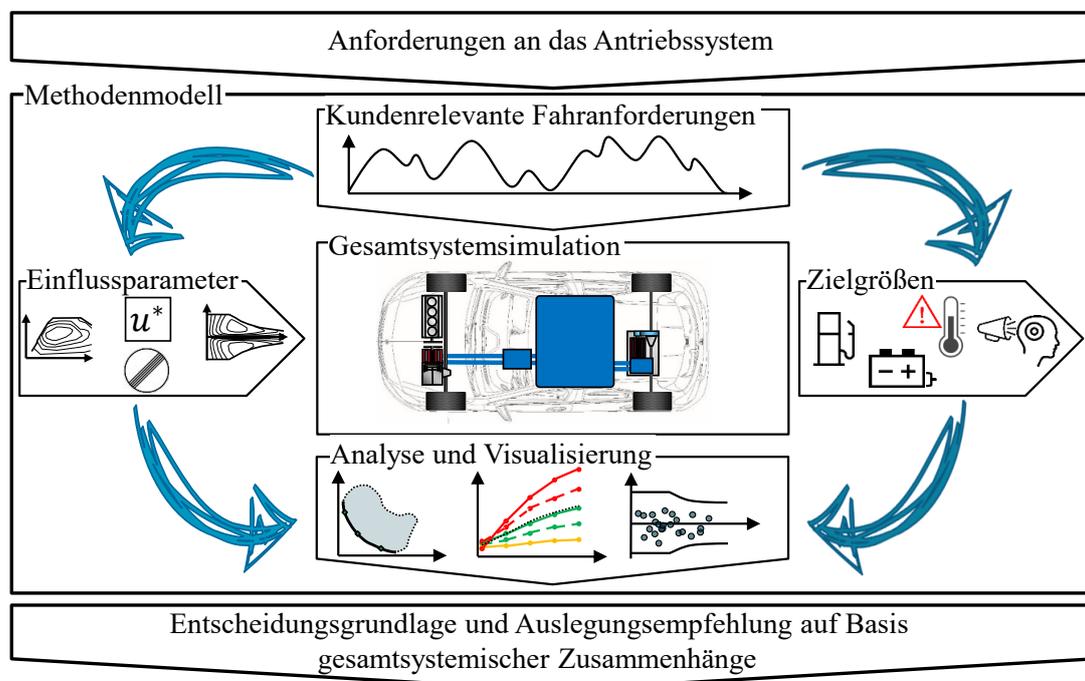


Bild 3.1: Schematische Darstellung des Methodenmodells.

Diese werden beispielsweise durch den Vertrieb und die Strategie in Form von Zielvorgaben für Höchstgeschwindigkeiten und Beschleunigungswerten für die Leistungspositionierung im Antriebsportfolio formuliert. Der Begriff Leistungspositionierung definiert für konventionelle Fahrzeuge die Einordnung einer Antriebsvariante ausschließlich anhand der verbrennungsmotorischen Leistung. Im Fall von Hybridfahrzeugen spielt darüber hinaus die elektrische Reichweite und die Systemleistung eine Rolle zur Einordnung der Antriebsvariante. Zur besseren Übersicht wird der Begriff der Leistungspositionierung in dieser Arbeit synonym auch für die Einordnung von Hybridfahrzeugen im Produktportfolio verwendet. Die technische Gestaltung geeigneter Hybridkonzepte erfolgt innerhalb der Konzeptbewertung, wobei der im Bild gezeigte Transfer der Anforderungen in Entscheidungsgrundlagen und Auslegungsempfehlungen auf Basis gesamtsystemischer Zusammenhänge stattfindet. Diese Arbeit stellt ein neues methodisches Vorgehen zur Lösung dieser Aufgabe unter Berücksichtigung von kundenrelevanten Anforderungen vor. Das Methodenmodell zeigt die hierfür relevanten Bestandteile und deren Verknüpfungen miteinander. Wie in Kapitel 2 dargestellt, erfolgt die Analyse gesamtsystemischer Zusammenhänge basierend auf einer Definition der Beziehung von Eingangsgrößen und Zielgrößen. Eine kundenrelevante Systemauslegung erfolgt dabei (vgl. Forschungshypothese in Abschnitt 1.3) in einem *Spannungsfeld aus Antriebseffizienz, Leistungsfähigkeit und Fahrkomfort*, welches eine differenzierte Bewertung gesamtsystemischer Zusammenhänge auf Basis von spezifischen Fahranforderungen erfordert. Innerhalb dieses Kapitels werden die in Bild 3.1 gezeigten Bestandteile der Methodik erläutert.

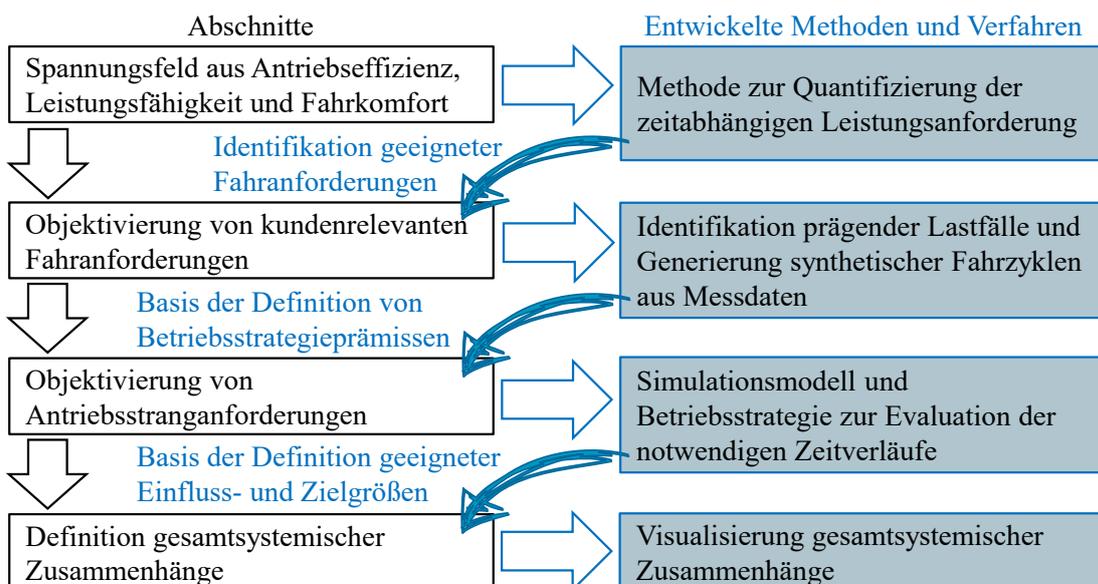


Bild 3.2: Darstellung der in den Abschnitten entwickelten Verfahren.

Der Aufbau des Kapitels wird in Bild 3.2 gezeigt. Zunächst erfolgt in Abschnitt 3.1 eine Erläuterung des Spannungsfelds aus Effizienz, Leistungsfähigkeit und Fahrkomfort. Hierzu werden die technischen Zusammenhänge zur Definition der Leistungsfähigkeit eines Hybridantriebs und die Auswirkungen dieser Zusammenhänge auf die weiteren Auslegungsziele der Effizienz und des Fahrkomforts im Rahmen einer Anforderungsdiskussion erklärt. Folgend darauf wird eine für die Anforderungsdiskussion notwendige Methode zur Quantifizierung der Leistungsanforderung an ein elektrisches Antriebssystem vorgestellt. Diese Methode dient in Abschnitt 3.2 der Identifikation geeigneter Fahranforderungen für die Durchführung der Anforderungsanalyse. Des Weiteren wird eine neue Methode zur Generierung synthetischer Fahrzyklen für die Bewertung der Antriebseffizienz vorgestellt. Zur Analyse gesamtsystemischer Zusammenhänge ist es notwendig, die Fahranforderung in Zielgrößen zu übersetzen und Auswirkungen von Variationen der Einflussparameter zu evaluieren. Ein Beispiel einer Zielgröße ist der zeitliche Leistungsverlauf an der Klemme der HV-Batterie. Analog dazu führt eine Variation der Höchstgeschwindigkeit zu einer unterschiedlichen Leistungsanforderung an den Antrieb. Die Übersetzung von Fahranforderungen in technisch bewertbare Zusammenhänge erfolgt mittels des in Abschnitt 3.3 entwickelten Simulationsmodells und der Betriebsstrategie. Die Analyse des Zielkonflikts zwischen den Auslegungszielen erfordert dabei eine Gewichtung der inneren Zielgrößen der Antriebsstrangsteuerung. Die hierzu entwickelten Verfahren werden in Abschnitt 3.3.3 erläutert und abschließend verifiziert. Das Kapitel endet mit der Definition der gesamtsystemischen Zusammenhänge in Abschnitt 3.4.2. Die Einflussgrößen der Anforderungsanalyse umfassen technische Auslegungs- und Steuerungsparameter sowie Maßnahmen zur Anforderungsreduzierung. Die Zielgrößen umfassen leistungsseitige und energetische Handlungsbedarfe in der EM- und Batterieauslegung sowie Auswirkungen auf den Fahrkomfort. Für die Bewertung der Optimierungspotentiale hinsichtlich der Antriebseffizienz werden hingegen Antriebskomponenten variiert und der Einfluss der Variation auf die repräsentative Betriebspunktverteilung sowie den Kraftstoffverbrauch bewertet.

### **3.1 Spannungsfeld aus Effizienz, Leistungsfähigkeit und Fahrkomfort**

Das Spannungsfeld aus Antriebseffizienz, Leistungsfähigkeit und Fahrkomfort dient als gedankliches Gerüst zur Entwicklung der Methodik und Beschreibung von kun-

denrelevanten Anforderungen. Hierbei erfolgt die Annahme, dass kundenrelevante Anforderungen teilweise zu konträren Zielkriterien für die Bewertung des Hybridkonzepts im Rahmen des System-Level Design führen. Zwar werden im Stand der Technik Leistungsanforderungen, etwa in Form von einzuhaltenden Beschleunigungszeiten, berücksichtigt, jedoch sind diese zumeist vollständig durch die Dimensionierung der Komponenten des Antriebsstranges begründet. Demnach können solche Anforderungen relativ einfach innerhalb eines ganzheitlichen Optimierungsansatzes verwendet werden, da keine gesonderte Betrachtung der Betriebsstrategie erforderlich ist. Stellt die Leistungsfähigkeit ein übergeordnetes oder mindestens gleichwertiges Zielkriterium für das Hybridkonzept dar, beispielsweise in Form der Rundenzeit auf einer Rennstrecke bei der Betrachtung sportlicher Fahrzeuge [53, 94], können sich die Prämissen einer geeigneten Betriebsstrategie grundlegend verändern. Hierbei kann es sinnvoll sein, elektrische Leistung nicht zwangsläufig und in jeder Fahrsituation zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs zum Beispiel mittels Lastpunktanhebung zu nutzen, sondern den Energieinhalt der HV-Batterie auf einem Niveau zu halten, welches die vollständige Systemleistung des Hybridfahrzeugs auf geraden Streckenabschnitten garantiert. Zwar werden sportliche Fahrzeuge in dieser Arbeit nicht explizit betrachtet, jedoch stellen diese ein geeignetes Beispiel für das Spannungsfeld dar. Das typische Ziel der Antriebsstrangelektrifizierung ist die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs. Demnach erscheint die Frage berechtigt, ob die erreichte Rundenzeit eines Hybridfahrzeugs gegenüber einem vergleichbaren konventionellen Fahrzeug ein ausschlaggebendes Kaufkriterium ist. Als Grundlage zur Beantwortung dieser Frage in Entscheidungsgremien identifiziert die entwickelte Methode anhand von gesamtsystemischen Zusammenhängen, welche Handlungsbedarfe sich durch die Erfüllung solcher Anforderungen ergeben und welcher Handlungsspielraum besteht.

### 3.1.1 Das Leistungsversprechen

In dieser Arbeit wird die Einsatztauglichkeit eines P24-Hybridkonzepts für bestimmte Leistungspositionierungen im Antriebsportfolio untersucht. Hieraus ergibt sich die Frage, welche Kriterien für den Kauf des Hybridfahrzeugs ausschlaggebend sind, beziehungsweise welche Erwartungen der Kunde aufgrund der Positionierung an das Fahrzeug stellt. Hierbei wird angenommen, dass mit einer bestimmten Leistungspositionierung auch eine bestimmte Leistungsfähigkeit assoziiert wird, was in dieser Arbeit als *Leistungsversprechen* bezeichnet wird. Gleichzeitig wird angenommen, dass mit der Elektrifizierung des Antriebsstrangs die Erwartung einer erhöhten Kraftstoff-

effizienz einhergeht [88]. Als Referenz gilt dabei stets die vergleichbare konventionelle Leistungspositionierung (beispielsweise das Vorgängermodell), welche ebenfalls als Benchmark für den Fahrkomfort gilt. Basierend auf den getroffenen Annahmen ergibt sich das Spannungsfeld aus Antriebseffizienz, Leistungsfähigkeit und Fahrkomfort, innerhalb welchem ein Konzeptentscheid erfolgt.

Zur Verdeutlichung der Einflüsse dieses Sachverhalts auf die methodische Vorgehensweise erfolgt in Bild 3.3 eine Abstrahierung auf das übergeordnete multikriterielle Optimierungsproblem. Hierzu erfolgt im Diagramm 3.3(a) eine schematische Darstellung der Leistungsfähigkeit eines Hybridfahrzeuges, wobei die Gesamtsystemleistung typischerweise in Abhängigkeit des Verbrennungsmotors und des elektrischen Antriebs angegeben wird. In einem konventionellen Fahrzeug, welches ausschließlich durch einen Verbrennungsmotor angetrieben wird, ist die angegebene Spitzenleistung bei entsprechender Kühlung nahezu dauerhaft verfügbar. Eine signifikante Reduzierung der verbrennungsmotorischen Leistung führt dazu, dass die Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs zu großen Teilen durch das elektrische Antriebssystem begründet wird. Die Leistungsfähigkeit des Hybridkonzepts unterliegt dabei einer zeitlichen Abhängigkeit, welche sich in Anlehnung an [118] wie folgt äußert: Zum einen wird davon ausgegangen, dass die in der HV-Batterie verfügbare Energiemenge geringer als jene der im Kraftstoff eines konventionellen Fahrzeugs verfügbaren Energiemenge ist. Zum anderen ist die Verfügbarkeit der Spitzenleistung des elektrischen Antriebs und der HV-Batterie aufgrund thermischer Grenzen zeitlich begrenzt (dies wird in Abschnitt 3.1.2 näher beschrieben). Hierdurch können prinzipiell Fahrsituationen entstehen, welche durch den Hybridantrieb nicht realisierbar sind.

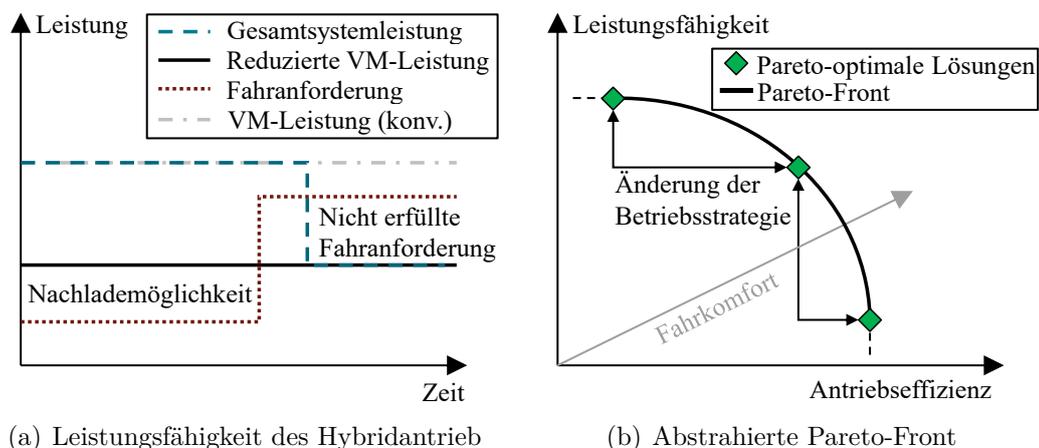


Bild 3.3: Spannungsfeld aus Antriebseffizienz und Leistungsfähigkeit.

Das heißt, dass das Hybridfahrzeug einem auf Basis des konventionellen Fahrzeugs ermittelten Geschwindigkeitsprofil möglicherweise nicht dauerhaft folgen kann.

Zur Verdeutlichung des Zielkonflikts zwischen der Leistungsfähigkeit und der Antriebseffizienz im Sinne einer ganzheitlichen Optimierung, wird das Problem anhand einer beispielhaften Pareto-Front (vgl. Diagramm 3.3(b)) visualisiert. Die zugrundeliegende Prämisse ist dabei, dass das Hybridkonzept mit einer bestimmten Komponentenauslegung einem leistungsanforderungsprägenden Fahrprofil folgt. Als Beispiel kann eine Autobahnfahrt auf einem unlimitierten Streckenabschnitt genannt werden. Als objektives Maß der Leistungsfähigkeit beschreibt die Ordinate hierbei den Erfüllungsgrad der Fahranforderung. Dieser quantifiziert, inwieweit das Hybridkonzept dem durch die entsprechende konventionelle Leistungspositionierung vorgegebenen Fahrprofil folgen kann. Wird nun davon ausgegangen, dass eine Erhaltung der Leistungsfähigkeit des Hybridantriebs in extremen Fahrsituationen anhand geänderter Betriebsstrategieprämissen erfolgt, beispielsweise durch das Nachladen in weniger effizienten Betriebspunkten, führt eine vollständige Erfüllung der Fahranforderung zu einer geringeren Antriebseffizienz. Zusätzlich ergeben sich durch die stärkere Gewichtung der Leistungsfähigkeit Auswirkungen auf den Fahrkomfort, beispielsweise durch das Nachladen hoher Leistungen mittels hoher VM-Drehzahlen. Dieser Aspekt ist im Bild 3.3(b) durch die dritte Dimension des Zielkonflikts angedeutet und wird in Abschnitt 3.3.2 näher erläutert. Je geringer der Erfüllungsgrad der Fahranforderung gewichtet wird, desto höher ist dagegen das Potential der Kraftstoffeinsparung, da das Nachladen elektrischer Energie somit ausschließlich in effizienten Betriebsbereichen erfolgt. Die hieraus resultierende geringere Energiemenge führt dazu, dass die notwendige elektrische Antriebsleistung in bestimmten Situationen nicht zur Verfügung steht. Dies hat zur Folge, dass das Hybridfahrzeug in diesen Situationen dem Geschwindigkeitsprofil nicht folgen kann.

Sowohl die Antriebseffizienz als auch die Leistungsfähigkeit werden in dieser Arbeit als kundenrelevante Anforderungen betrachtet, welche einen Konzeptentscheid beeinflussen. Innerhalb dieser Arbeit wird eine Kompromisslösung als ungeeignet betrachtet, da ein Fahrzeug, welches keine der beiden genannten kundenrelevanten Anforderungen vollständig erfüllt, als unattraktiv für den Kunden angenommen wird. Diese Annahme impliziert, dass Anforderungen an die Leistungsfähigkeit und die Antriebseffizienz aus technischer Sicht gleichermaßen erfüllt werden müssen. Unter Berücksichtigung der theoretischen Zusammenhänge der multikriteriellen Optimierung ist somit eine Betrachtung des Problems an den jeweiligen Grenzen der Pareto-Front erforderlich. Dies erfordert die Bewertung beider Auslegungsziele

auf Basis spezifischer Fahrprofile. Zum einen soll das Hybridkonzept in alltäglichen Fahrsituationen eine hohe Antriebseffizienz aufweisen. Diese Fahrsituationen bewegen sich typischerweise innerhalb der leistungsseitigen Systemgrenzen des Hybridantriebs. Zum anderen ist von Interesse, ob das Hybridkonzept die Leistungsanforderungen der konventionellen Positionierung erfüllen kann beziehungsweise wie sich die Erfüllung dieser Anforderungen auf die leistungsseitige Auslegung des elektrischen Antriebssystems auswirkt. Somit stellt die Beantwortung dieser Frage aus technischer Sicht eine *Anforderungsanalyse* dar, deren Ergebnis die Definition der notwendigen leistungsseitigen Systemgrenzen ist. Die Frage, ob die Leistungsfähigkeit des Hybridkonzepts ausschließlich durch dieselben Anforderungen an ein konventionelles Fahrzeug definiert ist, wird dabei an anderer Stelle und unter Berücksichtigung übergeordneter Unternehmensziele auf Basis der Anforderungsanalyse beantwortet. Die Beantwortung wird dabei nicht zuletzt durch den Einfluss auf den Fahrkomfort aufgrund geänderter Prämissen der Betriebsstrategie beeinflusst.

Der erläuterte Sachverhalt zeigt die Notwendigkeit einer Lösung der Problemstellung aus zwei unterschiedlichen Perspektiven. Eine Überführung der an den Antriebsstrang gestellten Anforderungen in Entscheidungsgrundlagen und Auslegungsempfehlungen auf Basis gesamtsystemischer Zusammenhänge erfordert demnach die Definition zweier unterschiedlicher Untersuchungsrahmen. Hierbei stellt die Optimierung der Antriebseffizienz eine in der Literatur häufig behandelte Problemstellung dar. Die Bewertung der Leistungsfähigkeit des neuen Hybridkonzepts im Kontext der Kundenrelevanz ist indes ein weitgehend unbeachtetes Problem, dessen Lösung einen zentralen Aspekt in der Entwicklung der Methodik darstellt. Aus diesem Grund umfasst die methodische Vorgehensweise ebenfalls die Identifikation notwendiger neuer Einfluss- und Zielgrößen. Eine dieser neuen Zielgrößen dient der Quantifizierung der Leistungsanforderung an die Komponenten und wird im nächsten Abschnitt vorgestellt. Dieser Abschnitt stellt eine Erweiterung der vom Autor in der Arbeit [65] zuvor veröffentlichten Inhalte zur zeitgewichteten Belastungsanalyse dar.

### 3.1.2 Quantifizierung der Leistungsanforderung

Anhand der vorhergehend erläuterten Zusammenhänge zeigt sich, dass die Leistungsfähigkeit des Antriebssystems von der Betriebsstrategie abhängig ist. Die gesamte Systemleistung des hybriden Antriebsstrangs ist hierbei dann verfügbar, wenn die HV-Batterie genügend Energie bereitstellt und die Leistungsabgabe des elektrischen

Systems nicht aufgrund des thermischen Bauteilschutzes begrenzt ist. Typischerweise wird die Leistungsfähigkeit von elektrischen Komponenten zum einen anhand des *Dauerleistungswerts* und zum anderen anhand einer kurzzeitig verfügbaren *Peakleistung* charakterisiert. Dabei stellt sich im Dauerleistungsbetrieb für  $t \rightarrow \infty$  der stationäre Endwert der Temperatur ein [98]. Dem hingegen führt ein dauerhafter Betrieb mit einer höheren Leistung als der Dauerleistung zu einer unzulässigen Erwärmung des Antriebssystems [72]. Eine einfache Art der Quantifizierung der Leistungsanforderung für die thermische Auslegung der elektrischen Komponenten ist die Berechnung von statistischen Kennwerten. Beispiele hierfür sind der maximal auftretende Leistungswert, der arithmetische Mittelwert oder der Effektivwert. Die Erwärmung hängt in der Praxis jedoch insbesondere von den zeitlichen Zusammenhängen der auftretenden Leistungsspitzen und -pausen ab, im Folgenden als *Belastung* bezeichnet. Dieser Sachverhalt ist in Bild 3.4 anhand zweier beispielhaften Belastungen  $P_1(t)$  und  $P_2(t)$  schematisch dargestellt, welche bezüglich statistischer Merkmale wie Minima, Maxima, Mittel- und Effektivwert identisch sind.

Die Diagramme verdeutlichen, dass unterschiedliche zeitliche Abfolgen der Belastungen zu unterschiedlichen Temperaturverläufen  $\vartheta_1$  und  $\vartheta_2$  führen. Eine für die Problemstellung in dieser Arbeit geeignete Methode zur Quantisierung der leistungsseitigen Auslegungsbedarfe des elektrischen Antriebssystems liefert demnach Kennwerte analog zu den oben genannten Peak- und Dauerleistungswerten. Eine geeignete Beschreibung der notwendigen Leistungsfähigkeit einer Komponente zur Erfüllung einer bestimmten Fahranforderung, erfolgt demnach in Form des Betrags und der zeitlichen Verfügbarkeit der Leistung. Ein Beispiel hierfür ist die Verfügbarkeit einer Leistung von 200 kW für 10 s. Hierbei wird ersichtlich, dass keiner der aufgeführten statistischen Kennwerte die genannten Informationen liefert.

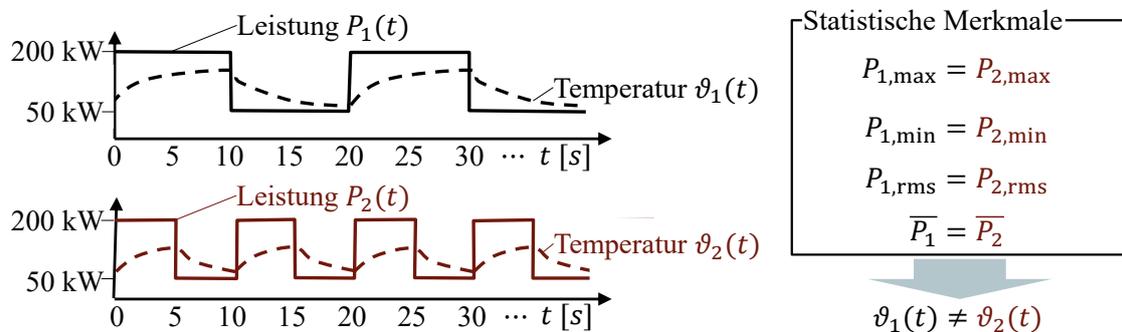


Bild 3.4: Beispielhafte Darstellung des Temperatureinflusses zweier statistisch gleicher Belastungen, modifiziert vgl. [65, 87].



Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit das im Transportwesen unter der Bezeichnung *Zeitwichtung* bekannte Verfahren verwendet, welches seit geraumer Zeit zur Analyse und Bewertung von Belastungen elektrischer Antriebskomponenten in der Bahntechnik genutzt wird [40, 59, 93]. Eine erstmalige Adaption der Methode im Automotivebereich erfolgt in der Dissertation [87] mit dem Ziel der Optimierung von Auslegungsprozessen und Komponententests auf der Grundlage von realen Fahrzeugmessungen und Simulationen bestehender Antriebsstränge. Für die Vorstellung des Zeitwichtungsverfahrens dient die zuvor genannte Arbeit als Grundlage, welche dem Leser ebenfalls für eine detaillierte Herleitung der Methode empfohlen wird.

Das Zeitwichtungsverfahren ist in Anlehnung an [87] in Bild 3.5 schematisch dargestellt. Die Grundlage zur Analyse ist der Leistungsverlauf  $P(t)$ . Da die Leistungsverläufe in dieser Arbeit die Ergebnisse von Simulationen sind, liegen diese in diskreter Form mit der verwendeten Schrittweite  $\Delta t = 0,1 \text{ s}$  vor. Die Größe  $N$  bezeichnet dabei die Anzahl der Werte des diskreten Zeitverlaufs. Die Idee des Zeitwichtungsverfahrens ist es, ein sogenanntes Zeitfenster  $\tau$  über den Zeitverlauf mit der Schrittweite  $\Delta t$  zu schieben, innerhalb welchem zu jedem Zeitschritt  $n$  der quadratische Mittelwert (Root Mean Square - kurz RMS) berechnet wird. Der hierbei maximal auftretende RMS-Wert wird gespeichert und kennzeichnet den geforderten Kennwert, zum Beispiel 200 kW für ein Zeitfenster von  $\tau = 10 \text{ s}$ . Im weiteren Verlauf wird der Wert für  $\tau$  kontinuierlich bis zu einer gewünschten maximalen Zeitfensterbreite erhöht und der Vorgang wiederholt. Ein Verschieben der maximalen Zeitfensterbreite bis zum letztmöglichen Wert  $T$  wird indes mittels künstlicher periodischer Verlängerung des Leistungsverlaufs bis zum Zeitpunkt  $t_{\text{ges}}$  mittels

$$t_{\text{ges}} \geq T + \tau_{\text{max}} \quad (3.1)$$

ermöglicht. Dieser Aspekt ist in Bild 3.5 durch die graue Kurve am Ende des Zeitverlaufs gekennzeichnet.

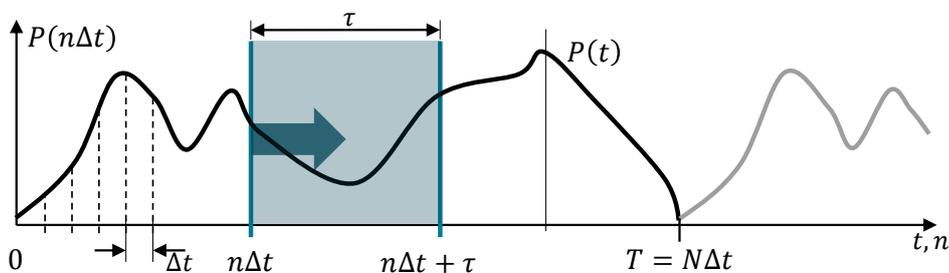


Bild 3.5: Schematische Darstellung der Zeitwichtung, modifiziert vgl. [87].

Das Ergebnis des dargestellten Zeitwichtungsverfahrens ist die sogenannte *zeitgewichtete Belastungsdauerkurve*  $Z(\tau)$ , welche die Grundlage zur Quantifizierung der Leistungsanforderung an einen Hybridantrieb in dieser Arbeit darstellt. Die Belastungsdauerkurve wird nach [87] mittels des Algorithmus

$$Z(\tau) = \max \left( \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{n\Delta t}^{n\Delta t + \tau} P(t)^2 \Delta t} \right) \text{ mit } \tau \geq \Delta t \text{ und } n = 1, 2, \dots, N \quad (3.2)$$

berechnet. Der Term innerhalb der max-Funktion stellt den quadratischen Mittelwert des betrachteten Zeitverlaufs  $P(t)$  für das Zeitfenster  $\tau$  dar. Die Belastungsdauerkurve trägt somit die jeweiligen maximalen RMS-Werte über der Zeitfensterbreite auf. Anhand von Bild 3.6 wird dieser Sachverhalt verdeutlicht und eine Interpretation von zeitgewichteten Belastungsdauerkurven in Anlehnung an [87] gegeben. Die Grundlage der beiden Kurven bilden die beispielhaften Leistungsverläufe aus Bild 3.4. Hierfür generiert der Algorithmus jeweils eine Kurve der maximalen RMS-Werte als Funktion der Zeitfensterbreiten. Im Beispiel impliziert der Funktionswert  $Z_1(\tau = 10 \text{ s})$ , dass eine effektive Leistung von 200 kW mindestens einmal für 10 s am Stück abgerufen wird. Im Gegensatz sind es bei  $Z_2(\tau = 10 \text{ s})$  lediglich 150 kW. Da in der Praxis sowohl kurzzeitige Leistungspeaks als auch die dauerhaft erforderliche Leistung von Interesse sind, werden logarithmische Zeitachsen zur geeigneten Darstellung großer Zeitfensterbereiche verwendet. Die Tatsache, dass der unterschiedliche Verlauf von  $Z_2$  eine niedrigere Belastung der Komponenten als jener Verlauf von  $Z_1$  darstellt, unterstreicht die Relevanz der Zeitwichtung zur Bewertung der Leistungsanforderung hinsichtlich einer kundenrelevanten Antriebsauslegung. Die anhand von bestimmten Zeitfenstern definierten Dauer- und Peakleistungswerte können nun für unterschiedliche Leistungsverläufe bestimmt werden. In dieser Arbeit erfolgen hierfür die Definitionen der Kurzzeitleistung anhand des Zeitfensters von  $\tau = 30 \text{ s}$  beziehungsweise der Dauerleistung bei  $\tau = 30 \text{ min}$ .

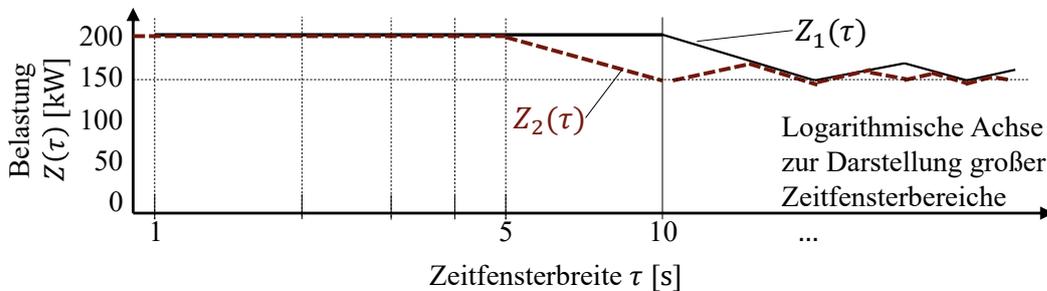


Bild 3.6: Beispielhafte Belastungsdauerkurven, modifiziert vgl. [65, 87].

## 3.2 Objektivierung von kundenrelevanten Fahranforderungen

Sowohl die Generierung von Auslegungsempfehlungen der Antriebskomponenten hinsichtlich deren Effizienz als auch die Anforderungsanalyse dienen der Bewertung von kundenrelevanten Anforderungen. Zur Berücksichtigung des Spannungsfelds aus Antriebseffizienz, Leistungsfähigkeit und Fahrkomfort sind unterschiedliche Fahranforderungen in Form von Fahrzyklen notwendig. Zum einen ist ein Fahrzyklus erforderlich, welcher repräsentativ für das alltägliche Fahrverhalten von Kunden einer Leistungspositionierung der betrachteten Fahrzeugklasse ist. Zum anderen ist die Identifikation eines Fahrzyklus erforderlich, welcher als Basis der Anforderungsanalyse prägend für die leistungsseitige und energetische Auslegung des Antriebs ist. Im Folgenden werden die Vorgehensweisen zur Generierung der beiden genannten Klassen von Fahrzyklen erläutert. Hierbei wird zunächst das Vorgehen zur Identifikation eines Lastfalls für die Anforderungsanalyse auf Basis des Zeitwichtungsverfahrens erläutert. Im Anschluss daran wird die Methode für die Generierung synthetischer Fahrzyklen zur Abbildung eines repräsentativen Alltagsfahrverhaltens vorgestellt.

### 3.2.1 Identifikation von prägenden Lastfällen

*Prägende Lastfälle* beschreiben in dieser Arbeit Fahranforderungen, welche die erforderliche Leistungsfähigkeit des (elektrischen) Antriebssystems definieren. Unter Berücksichtigung der Kundenrelevanz bedeutet dies, dass eine solche Fahranforderung die hardwareseitigen Systemgrenzen der entsprechenden Leistungspositionierung im öffentlichen Straßenverkehr abdeckt. Aufgrund der Verfügbarkeit und Eignung werden in dieser Arbeit Messdaten aus Straßendauerläufen herangezogen. Diese Fahrten werden zwar von ausgebildeten Fahrern durchgeführt, jedoch bewegen sich diese innerhalb der Straßenverkehrsordnung und unter realen Verkehrsbedingungen. Demnach sind die Messdaten repräsentativ bezüglich der Systemgrenzen, welche im realen Kundenbetrieb erforderlich sind.

Die Systemgrenzen sind in dieser Arbeit vorwiegend durch den Energieinhalt der HV-Batterie und die erforderliche Dauerleistung der elektrischen Komponenten bestimmt. Zwar ist die Peak-Leistung insbesondere für die Beschleunigungswerte des Fahrzeugs relevant, spielt zur Bewertung der dauerhaften Leistungsfähigkeit jedoch eine untergeordnete Rolle.

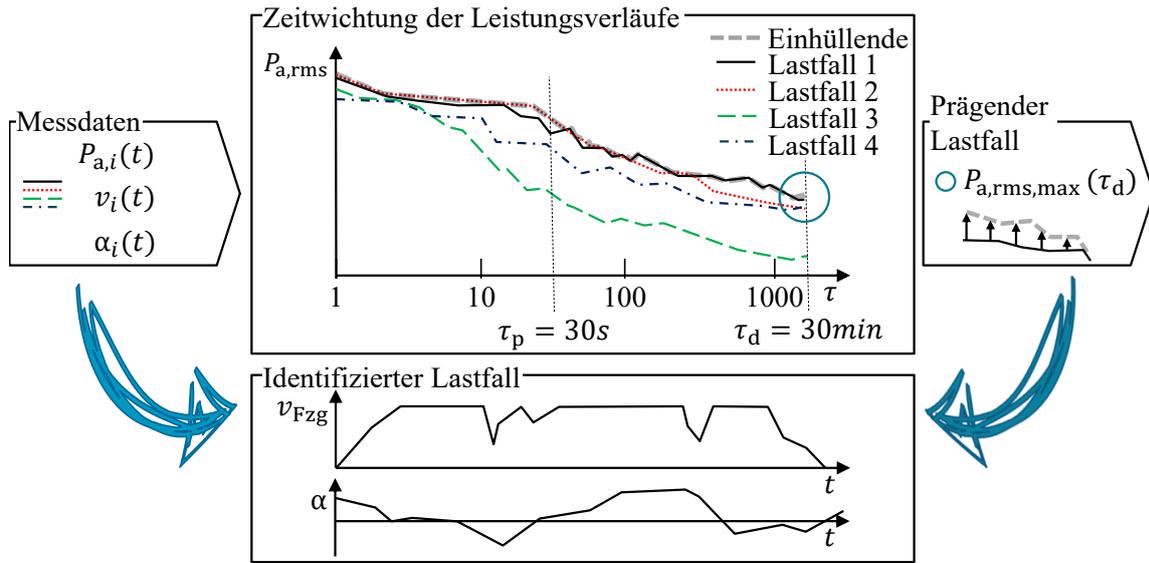


Bild 3.7: Identifikation von prägenden Lastfällen.

Demnach stellt ein geeigneter Lastfall primär hohe Anforderungen an die verfügbare Dauerleistung des Antriebssystems. Eine dauerhaft hohe Leistungsanforderung stellt zudem eine signifikante Anforderung an den notwendigen Energieinhalt der HV-Batterie dar. Das Vorgehen zur Identifikation eines prägenden Lastfalls mittels des Zeitgewichtungsverfahrens ist in Bild 3.7 schematisch dargestellt.

Im Beispiel besteht der Messdatensatz aus vier aufgezeichneten Messfahrten. Die zur Objektivierung von Fahransforderungen in Form von Fahrzyklen notwendigen Größen sind hierbei die Fahrzeuggeschwindigkeit und der Steigungswinkel  $\alpha(t)$ . Für die Identifikation des prägenden Lastfalls ist zudem die Antriebsleistung  $P_a(t)$  erforderlich. Im mittleren Teil der Grafik sind die mittels des Algorithmus in Gl. (3.2) auf Basis der Antriebsleistungen berechneten zeitgewichteten Belastungsdauerkurven dargestellt. Relevant für die Auswahl eines geeigneten Lastfalls sind hierbei die effektiven Dauerleistungswerte bei  $\tau = 30\text{ min}$  als primäres Identifikationsmerkmal sowie die Einhüllende der Kurvenschar. Ersteres ist durch den blauen Kreis im Bild gekennzeichnet. Im Kontext der zeitgewichteten Belastungsdauerkurven beschreibt die Einhüllende die in unterschiedlichen Zeitfensterbereichen auftretenden maximalen Leistungsanforderungen innerhalb des Messdatensatzes. Diese kann dabei vollständig durch einen einzelnen Lastfall beschrieben werden, wird im obigen Beispiel jedoch durch die Belastungsdauerkurven mehrerer Lastfälle geformt. Als sekundäres Identifikationsmerkmal dient in dieser Arbeit die Differenz einer Belastungsdauerkurve zur Einhüllenden, um hohe Leistungsanforderungen ebenfalls in weiteren relevan-

ten Zeitfensterbereichen zu berücksichtigen. Die Relevanz des sekundären Identifikationsmerkmals wird anhand der Belastungsdauerkurven von Lastfall 2 und Lastfall 4 ersichtlich. Die Kurven haben zwar denselben Dauerleistungswert, jedoch verläuft die Kurve von Lastfall 4 stets weit unterhalb der Einhüllenden. Somit beschreibt der blaue Strich-Punkt Verlauf einen insgesamt weniger anfordernden Lastfall. Anhand dieser Identifikationsmerkmale wird im gezeigten Beispiel Lastfall 1 als prägende Fahranforderung identifiziert. Zwar ist die Einhüllende zu großen Teilen durch die Belastungsdauerkurve von Lastfall 2 beschrieben, jedoch liegt deren Dauerleistungswert unterhalb dessen der Belastungsdauerkurve von Lastfall 1. Darüber hinaus verläuft letztere in weiten Zeitfensterbereichen nur unwesentlich unterhalb der Einhüllenden. Die beiden verbleibenden Kurven 3 und 4 spielen im Kontext prägender Lastanforderungen indes keine Rolle. Eine ergänzende Analyse der Betriebspunktverteilungen der identifizierten prägenden Lastfälle dient im weiteren Verlauf zur Bewertung der Repräsentativität der Fahranforderung, für welche eine möglichst hohe Varianz der Betriebspunkte angenommen wird.

Im Gegensatz zu prägenden Fahranforderungen bilden kundenrelevante Fahrzyklen zur Bewertung der Antriebseffizienz typische (alltägliche) Fahranforderungen ab. Das heißt, obige Fahranforderungen treffen auf einen kleinen Anteil von Kunden zu, wohingegen die folgend abgeleiteten Fahrzyklen für typische Fahranforderungen des gesamten Kundenkreises repräsentativ sind.

### 3.2.2 Generierung synthetischer Fahrzyklen

Dieser Abschnitt enthält teilweise Formulierungen und Zitate der vom Autor dieser Arbeit vorab veröffentlichten Methode zur Generierung von synthetischen Fahrzyklen [65]. Hierbei werden die zum Verständnis der Arbeit relevanten Inhalte und Gedankengänge zusammengefasst. Für tiefergehende Einblicke und detaillierte Herleitungen wird auf die oben aufgeführte Arbeit verwiesen.

Das Ziel der Entwicklung synthetischer Fahrzyklen ist die Abbildung repräsentativer Fahranforderungen bezüglich des typischen Kundenbetriebs in möglichst kurzen Fahrprofilen zur praktikablen Anwendung in Simulationen [103]. Neben der Entwicklung der eigentlichen Methoden zur Fahrzyklensynthese stellt die Wahl der Zielkriterien, nach welchen ein Fahrzyklus als repräsentativ angesehen wird, einen zentralen Aspekt dieses Forschungsthemas dar. Die Methode in dieser Arbeit basiert dabei

auf dem Ansatz der Micro-Trip Kombination, welcher durch Aspekte der stochastischen Modellierung ergänzt wird. Neben des bekannten Konzepts der *Mean Tractive Force* (vgl. [37, 81]) wird in dieser Arbeit erstmals die Repräsentativität des synthetischen Zyklus bezüglich zeitlicher Zusammenhänge typischer Leistungsanforderungen mittels des Zeitwichtungsverfahrens bewertet. Des Weiteren wird durch die Berücksichtigung der Markow-Eigenschaft im synthetischen Fahrzyklus angenommen, dass die Aufeinanderfolge von Micro-Trips mit bestimmten statistischen Eigenschaften jener Aufeinanderfolge in den Messdaten entspricht.

Die Verwendung von Micro-Trips ist dabei hinsichtlich der Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse vorteilhaft. Da diese reale Fahranteile darstellen, wird angenommen, dass Ergebnisse auf Basis des resultierenden Fahrzyklus auf eine höhere Akzeptanz stoßen als solche, die anhand von vollsynthetischen Geschwindigkeits- und Steigungsverläufen (vgl. beispielsweise [81, 104]) erzielt werden. Des Weiteren eignen sich Fahrzyklen, welche repräsentativ bezüglich statistischer Merkmale sind [24, 56, 124, 128], zwar zur energetischen Analyse des Antriebsstranges und somit zur Bewertung der Antriebseffizienz. Jedoch erfordert eine geeignete Bewertung von Komfort- und Fahrbarkeitsaspekten die Berücksichtigung repräsentativer Abfolgen von Leistungsspitzen und -pausen. Die Repräsentativität der Sequenz aus Micro-Trips bezüglich zeitlicher Leistungsanforderungen ist demnach insbesondere ein im Rahmen der Betriebsstrategievalidierung wichtiger Aspekt. Die Methode zur Generierung von synthetischen kundenrelevanten Fahrzyklen ist in Bild 3.8 schematisch dargestellt.

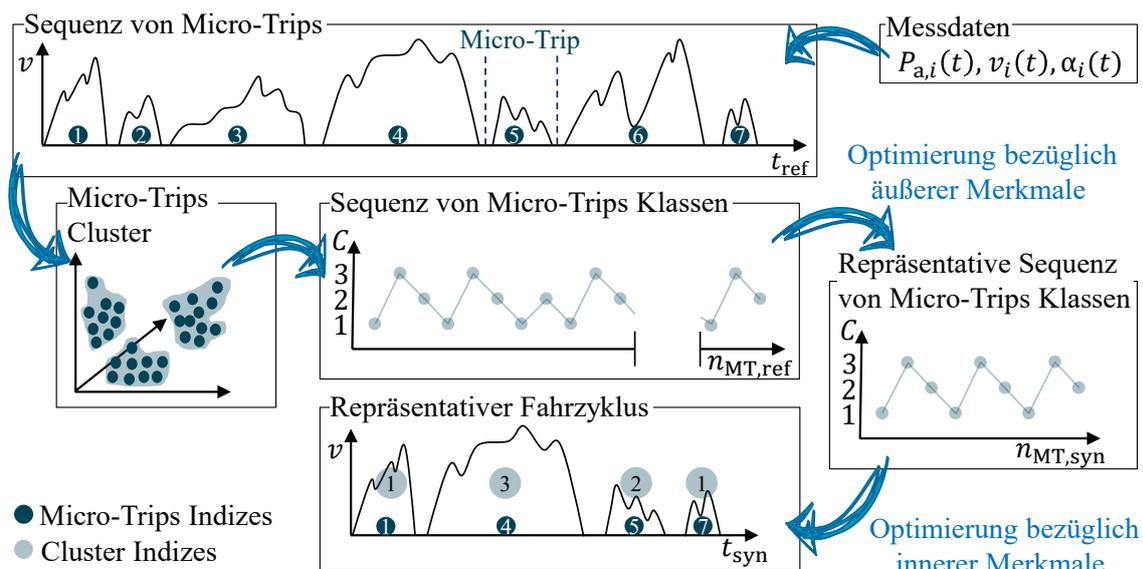


Bild 3.8: Schematische Darstellung der Fahrzyklensynthese, modifiziert vgl. [65].

Hierbei dienen ebenfalls sämtliche für die Leistungspositionierung einer bestimmten Fahrzeugklasse verfügbaren Dauerlaufmessdaten als Datenbasis. Diese werden zunächst in sogenannte *Micro-Trips* segmentiert. Micro-Trips stellen eine kinematische Sequenzen dar, das heißt Geschwindigkeitsprofile und die dazugehörigen Verläufe des Steigungswinkels zwischen einer Start- und einer Stoppphase (Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{\text{Fzg}} = 0$ ). Das Ziel der Methode ist es dann, einen kleinen Anteil von Micro-Trips aus der Grundgesamtheit der Messdaten zu einer kurzen repräsentativen Sequenz zusammenzufassen. Die in Bild 3.8 gezeigte Vorgehensweise basiert dabei auf einem Optimierungsgerüst, anhand welchem die Fahrzyklensynthese in zwei Optimierungsebenen erfolgt. Diese Vorgehensweise ist durch eine bessere Übersicht des Optimierungsprozesses und somit durch eine Erhöhung der Nachvollziehbarkeit des Lösungsweges motiviert. Im Folgenden werden die einzelnen Optimierungsebenen und die darin verwendeten Zielkriterien kurz vorgestellt.

### Optimierung bezüglich äußerer Merkmale

Mittels des in Abschnitt 2.2.1 vorgestellten K-Means Algorithmus, werden die Micro-Trips anhand der durchschnittlichen Geschwindigkeit sowie der mittleren positiven und negativen Steigung in Cluster  $C_k$  gruppiert. Somit ergibt sich in dieser Arbeit ein dreidimensionaler Raum, dessen Koordinatenachsen die oben genannten Merkmale bezeichnen. Diese Merkmale werden im Folgenden als „äußere Merkmale“ bezeichnet, da sie zunächst die äußere Gestalt des Fahrzyklus definieren. Zur Optimierung bezüglich der äußeren Merkmale ist ein Zielkriterium  $J_c$  erforderlich, welches eine Bewertung der Ähnlichkeit zwischen den äußeren Gestalten des synthetischen Zyklus und der Micro-Trip Sequenz der Referenzdaten erlaubt. Die Ähnlichkeit wird hierbei insbesondere anhand der relativen Häufigkeit und der Aufeinanderfolge charakteristischer Merkmale definiert. Ein Beispiel zur Optimierung einer repräsentativen Sequenz von charakteristischen äußeren Merkmalen ist in Bild 3.9 schematisch dargestellt.

Das Ziel der Optimierung ist es, einen repräsentativen Parametervektor  $p_c$  zu finden. Dieser beinhaltet die Indizes der Cluster  $k$  und wird als repräsentativ angenommen, wenn die Häufigkeit und Aufeinanderfolge der Indizes eine hohe Ähnlichkeit zur Häufigkeit und Aufeinanderfolge der Cluster Indizes im originalen Messdatenverlauf aufweist. Der Vektor  $p_c$  stellt somit eine Art Klassenrahmen dar, innerhalb welchem im späteren Verlauf die jeweiligen Micro-Trips gesucht werden.

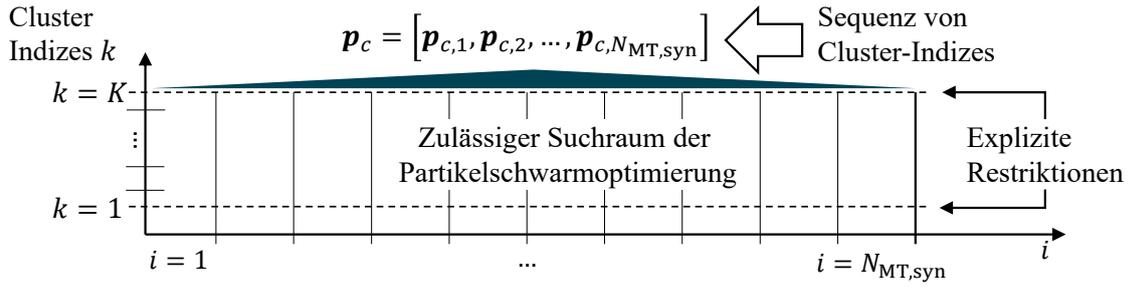


Bild 3.9: Schematische Darstellung der Optimierung einer repräsentativen Sequenz von charakteristischen äußeren Merkmalen  $\mathbf{p}_c$ .

Die Anzahl der Vektorelemente  $N_{\text{MT,syn}}$  wird vom Anwender festgelegt und definiert bereits zu diesem Zeitpunkt die spätere Anzahl der Micro-Trips im synthetischen Fahrzyklus. Des Weiteren kennzeichnet die Anzahl der Cluster  $K$  nach [65] die obere Parametergrenze für die Anwendung der PSO auf das Optimierungsproblem

$$\mathbf{p}_c^* = \arg \min_{\mathbf{p}_c} (J_c(\mathbf{p}_c)), \quad (3.3)$$

*u.B.v.*  $1 \leq p_{c,i} \leq K$  und  $i = 1, 2, \dots, N_{\text{MT,syn}}$ .

Das Zielkriterium  $J_c$  dient der Bewertung der Repräsentativität des synthetischen Fahrzyklus bezüglich äußerer statistischer Merkmale. Als objektive Maße zur Bewertung der Repräsentativität bezüglich Häufigkeit und Aufeinanderfolge der Cluster Indizes werden zum einen die relative Häufigkeit  $h$  und zum anderen die Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix  $\Theta$  (vgl. Abschnitt 2.2.2) verwendet. Letztere bildet anhand ihrer Einträge  $\Theta_{i,j}$  die Übergangswahrscheinlichkeiten vom aktuellen Cluster Index zum folgenden Cluster Index ab. Mittels der Methode der gewichteten Summe wird das Zielkriterium  $J_c$  nach [65] anhand von

$$J_c(\mathbf{p}_c) = w_c J_{c,1}(\mathbf{p}_c) + (1 - w_c) J_{c,2}(\mathbf{p}_c) \text{ mit}$$

$$J_{c,1} = \sqrt{\frac{1}{K^2} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K (\Theta_{d,i,j} - \Theta_{c,i,j})^2} \text{ und} \quad (3.4)$$

$$J_{c,2} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (h_{d,k} - h_{c,k})^2}$$

berechnet. Die Zielgröße ergibt sich zum einen aus dem *Root Mean Square Error* (RMSE) zwischen den  $K^2$  Matrixeinträgen in  $\Theta_{d,i,j}$  (Referenzdaten) und in  $\Theta_{c,i,j}$  (synthetischer Zyklus) und zum anderen aus dem RMSE der relativen Häufigkeiten  $h$  der Cluster-Indizes. Zwar sind in den Übergangswahrscheinlichkeiten die rela-



tiven Häufigkeiten bereits implizit berücksichtigt. Aufgrund der Tatsache der vorab definierten Anzahl der Elemente im Vektor  $\mathbf{p}_c^*$  kann die Konvergenz jedoch nicht garantiert werden. Die Konvergenz wird im Falle der Simulation von Markow-Ketten insbesondere durch eine ausreichende Länge der Sequenz erreicht.

### Optimierung bezüglich innerer Merkmale

Die Sequenz der Cluster-Indizes stellt eine repräsentative Abfolge von Micro-Trips Gruppen anhand derer statistischer äußerer Merkmale dar. Das heißt, dass diese Sequenz unabhängig von der Wahl der in den Clustern verfügbaren Micro-Trips bereits über eine Ähnlichkeit zu den Referenzdaten bezüglich statistischer Merkmale verfügt. Wie bereits in Abschnitt 3.1.2 diskutiert, bedarf es für eine vollständige Charakterisierung der Leistungsanforderung der Berücksichtigung zeitlicher Zusammenhänge. Die Fahrplanforderung stellt hierbei direkt die Leistungsanforderung an das Fahrzeug. In dieser Arbeit wird die Repräsentativität eines synthetischen Fahrzyklus erstmals zusätzlich zu statistischen Merkmalen anhand von zeitlichen Zusammenhängen der aus dem Fahrprofil resultierenden Leistungsanforderung bewertet. Dies wird als „innere Merkmale“ bezeichnet.

Das Ziel der Optimierung ist es, die Aufeinanderfolge von Micro-Trips so zu wählen, dass die inneren Merkmale des synthetischen Fahrzyklus eine hohe Ähnlichkeit zu den inneren Merkmalen der Messdaten aufweisen. Hierzu wird der Parametervektor  $\mathbf{p}_s$  definiert, dessen Kopplung mit der vorhergehenden Optimierung bezüglich äußerer Merkmale in Bild 3.10 schematisch dargestellt ist. Der Wert eines Vektorelements  $p_{s,i}$  ist stets ein Index eines Micro-Trips. Die repräsentative Sequenz der Cluster Indizes  $\mathbf{p}_c^*$  hat hierbei zweierlei Einflüsse. Zum einen definiert diese die obere Parametergrenze für jeden Parameter in  $\mathbf{p}_s$ .

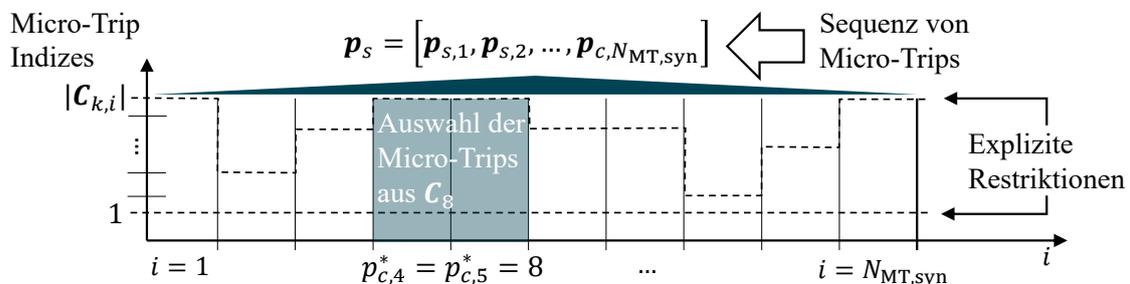


Bild 3.10: Schematische Darstellung der Optimierung einer repräsentativen Sequenz von Micro-Trips  $\mathbf{p}_s$  bezüglich innerer Merkmale.

Zum anderen definiert die Sequenz der Cluster Indizes den Pool der Micro-Trip Indizes für jedes Vektorelement, aus welchem der PSO-Algorithmus geeignete Micro-Trips auswählen kann. Das heißt, dass die in den jeweiligen Clustern gruppierten Micro-Trips eindeutig anhand ganzzahliger Indizes gekennzeichnet sind. Im Bild 3.10 wird der Sachverhalt anhand der Vektorelemente  $i = 4$  und  $i = 5$  verdeutlicht. An diesen Stellen hat die Sequenz der Cluster Indizes jeweils den Wert 8. Somit können an diesen Stellen Micro-Trips aus dem Cluster  $\mathbf{C}_8$  ausgewählt werden. Die Anzahl der im Cluster vorhandenen Micro-Trips  $|\mathbf{C}_k|$  stellt die obere Parametergrenze an den beiden Stellen  $i = 4$  und  $i = 5$  dar. Die expliziten Restriktionen der Parameter  $p_{s,i}$  sind somit anhand der jeweiligen Cluster Indizes definiert. Das Optimierungsproblem zur Synthese des Fahrzyklus wird nach [65] mittels

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_s^* &= \arg \min_{\mathbf{p}_s} (J_s(\mathbf{p}_s)), \\ u.B.v. \quad T_{\text{syn}}(\mathbf{p}_s) &\leq T_{\text{max}}, \\ 1 \leq p_{s,i} &\leq |\mathbf{C}_k|, \quad k = p_{s,i}^* \quad \text{und} \quad i = 1, 2, \dots, N_{\text{MT,syn}} \end{aligned} \quad (3.5)$$

formuliert. Die Ungleichungsbedingung in Gl. (3.5) stellt eine harte Nebenbedingung dar, welche verhindert, dass der synthetische Zyklus eine vorab definierte Maximaldauer  $T_{\text{max}}$  überschreitet.

Die Optimierung der repräsentativen Sequenz von Micro-Trips erfolgt bezüglich Zielkriterien  $J_{s,1}$  und  $J_{s,2}$ , welche neben kinetischen Zusammenhängen auch zeitliche Zusammenhänge der Leistungsanforderung berücksichtigen. Ein geeignetes, in der Literatur häufig verwendetes Zielkriterium zur Beschreibung kinetischer Zusammenhänge ist die Mean Tractive Force  $\bar{F}_{\text{trac}}$ , welche nach [37] mittels

$$\bar{F}_{\text{trac}} = \frac{1}{x_{\text{tot}}} \int_{t \in \tau_{\text{trac}}} F_a(t) v_{\text{Fz}}(t) dt \quad (3.6)$$

berechnet wird. Hierbei beschreibt  $F_a(t)$  die Antriebskraft, welche sich aus der Bewegungsgleichung unter Berücksichtigung der Fahrwiderstände ableitet. Die relevanten Fahrwiderstände werden im nächsten Unterkapitel detailliert erläutert. Die Größe  $x_{\text{tot}}$  bezeichnet den gesamten zurückgelegten Weg im Fahrprofil und die Menge  $\tau_{\text{trac}}$  beinhaltet sämtliche Zeitintervalle, in welchen das Fahrzeug (motorisch) angetrieben wird. Zwar impliziert die Bezeichnung „Mean Tractive Force“ eine mittlere Antriebskraft, die Formulierung in Gl. (3.6) stellt jedoch eine Energieanforderung über der Wegstrecke dar. Somit objektiviert diese Größe den mittleren Energiebedarf eines Fahrzeugs für einen bestimmten Fahrzyklus.

Neben dem notwendigen mittleren Energiebedarf erfolgt mittels des Zeitwichtungsverfahrens die Berücksichtigung zeitlicher Zusammenhänge der Leistungsanforderung  $P_a(t) = F_a(t)v_{Fzg}(t)$ . Hierzu wird die Ähnlichkeit der jeweiligen Belastungsdauerkurve  $Z_{syn}$  des synthetischen Fahrzyklus mit der Belastungsdauerkurve der Referenzdaten  $Z_d$  verglichen. Letztere ist in Bild 3.7 in Abschnitt 3.2.1 durch die Einhüllende der Kurvenschar beschrieben, da sämtliche Fahrsituationen im Referenzdatensatz analysiert werden. Die Einhüllende beschreibt die höchste Leistungsanforderung innerhalb der Messdaten und quantifiziert somit lediglich die Systemgrenzen. Da dies als nicht repräsentativ für die typischen Leistungsanforderungen der Mehrheit der Kunden angesehen wird, erfolgt die Definition einer geeigneteren Belastungsdauerkurve. Die als Zielkriterium herangezogene Kurve  $Z_d$  wird hierzu aus dem Median der Kurvenschar berechnet. Der Median der Kurvenschar ist dabei weniger sensitiv bezüglich Ausreißern als der arithmetische Mittelwert. Ausreißer ergeben sich typischerweise aufgrund einzelner extremer Belastungen und werden beispielsweise durch eine Vollastbeschleunigung verursacht.

Auf Basis der vorgestellten Konzepte wird das Zielkriterium zur Optimierung bezüglich innerer Merkmale nach [65] anhand von

$$J_s(\mathbf{p}_s) = w_s J_{s,1}(\mathbf{p}_s) + (1 - w_s) J_{s,2}(\mathbf{p}_s) \text{ mit}$$

$$J_{s,1} = \sqrt{\frac{1}{\tau_{\max}} \sum_{\tau=1}^{\tau_{\max}} (Z_d - Z_{syn})^2} \text{ und} \quad (3.7)$$

$$J_{s,2} = |\bar{F}_{trac,d} - \bar{F}_{trac,syn}|$$

formuliert. Hierbei bezeichnet  $J_{s,1}$  den RMSE zwischen der Belastungsdauerkurve der Referenzdaten  $Z_d$  und der Belastungsdauerkurve des synthetischen Zyklus  $Z_{syn}$ . Das Zielkriterium  $J_{s,2}$  bezeichnet die absolute Differenz zwischen den Mean Tractive Forces  $\bar{F}_{trac,d}$  und  $\bar{F}_{trac,syn}$ . Da die beiden Terme der gewichteten Summe einheitenbehaftet sind, ist eine Normierung der Größen auf einen gemeinsamen Wertebereich erforderlich.

Die Optimierung bezüglich beider Merkmale erfolgt mittels des in Abschnitt 2.3.2 vorgestellten Partikelschwarmalgorithmus. Hierbei wird die Anzahl der Population  $N_i$  jeweils höher als die der Micro-Trips im synthetischen Zyklus  $N_i > N_{MT,syn}$  gewählt. Das Optimierungsverfahren arbeitet typischerweise mit kontinuierlichen Variablen, weshalb die Werte in den Vektoren  $\mathbf{p}_c$  und  $\mathbf{p}_s$  nach Auswahl durch den Algorithmus auf deren nächste ganze Zahlen gerundet werden.

### 3.3 Objektivierung von Antriebsstranganforderungen

Die Fahranforderung in Form eines Fahrzyklus bestimmt die Leistungsanforderung an den Antriebsstrang und somit die energetische Anforderung an die Energiespeicher (HV-Batterie und Kraftstofftank). Um Antriebskonzepte mittels Simulation zu analysieren und gesamtsystemische Zusammenhänge zu visualisieren ist es erforderlich, die relevanten physikalischen Zusammenhänge innerhalb des Antriebsstrangs zu modellieren. Das heißt im Kontext einer energetischen Betrachtung, dass die Fahranforderung durch entsprechende Betriebspunkte in den Antriebskomponenten abgebildet wird. Anhand dieser Betriebspunkte ergibt sich dann zum einen der Kraftstoffverbrauch und zum anderen die notwendige elektrische Energie aus der HV-Batterie. Im Folgenden wird zunächst das physikalische Antriebsstrangmodell vorgestellt. Im Anschluss erfolgt die Erläuterung der Betriebsstrategie, welche sowohl für die Bewertung der Antriebseffizienz als auch die Bewertung der Leistungsfähigkeit unter Berücksichtigung des Fahrkomforts eingesetzt wird. Hierzu werden Fuzzy-Systeme zur Realisierung von weichen Nebenbedingungen im Optimalsteuerungsproblem und zur gezielten Beeinflussung des Steuerungsverhaltens verwendet. Diese werden in Abschnitt 3.3.3 vorgestellt und deren Einfluss innerhalb einer darauffolgenden Verifikation des Betriebsstrategieansatzes überprüft.

#### 3.3.1 Antriebsstrangmodell

In diesem Abschnitt wird zunächst das physikalische Antriebsstrangmodell vorgestellt, dessen Komponenten und funktionale Zusammenhänge anhand eines Blockschaltbilds in Bild 3.11 dargestellt sind. Hierbei werden nach Stand der Technik für energetische Simulationen vorwiegend quasistationäre Längsdynamikmodelle eingesetzt [3, 25, 72, 79, 89], sofern die Auslegungsziele eine Berücksichtigung von querdynamischen Aspekten oder Ladungswechseln im Verbrennungsmotor [53, 94] nicht zwingend erfordern. Da die Problemstellung in dieser Arbeit die Untersuchung von energetischen Zusammenhängen erfordert, für welche die Dynamik des Ladezustands der HV-Batterie maßgebend sind, wird im weiteren Verlauf ein quasistationäres Längsdynamikmodell verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit ist des Weiteren die Bewertung der Leistungsfähigkeit von Hybridkonzepten von besonderem Interesse, weshalb ein vorwärtsgerichteter Modellansatz verwendet wird. Das heißt, dass der Signalfuss der Drehmomente mit der physikalischen Wirkrichtung im realen Antriebsstrang (von den Drehmomentquellen zum Rad) übereinstimmt [35].

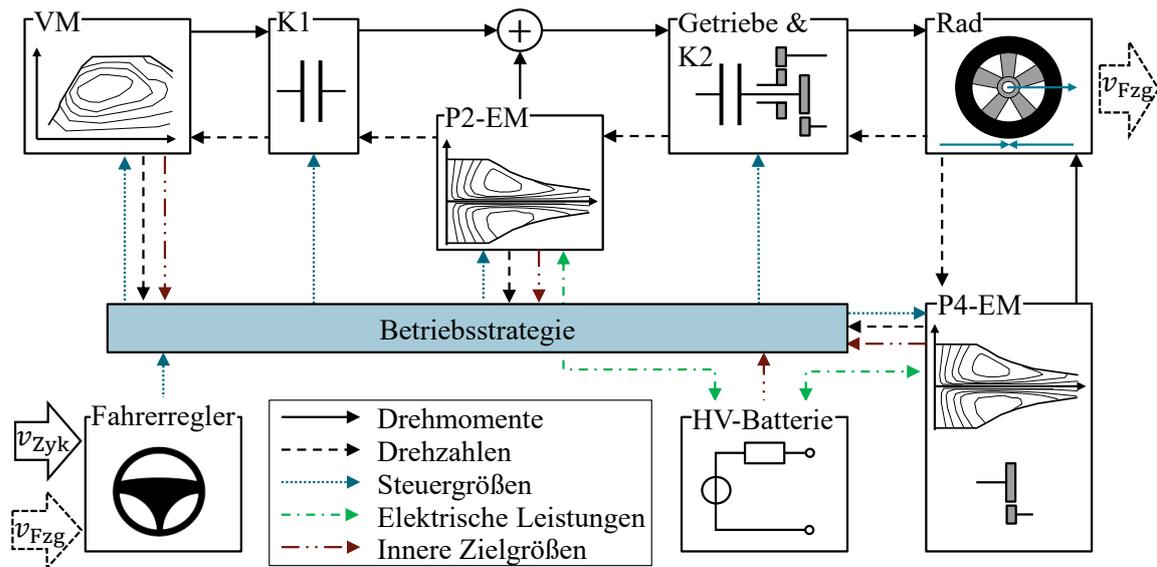


Bild 3.11: Blockschaltbild des entwickelten Antriebsstrangmodells.

Im Gegensatz zu rückwärtsgerichteten Modellansätzen (Signalfluss vom Rad zu den Drehmomentquellen) erlaubt dies eine Analyse auch der Fahrsituationen, in welchen das Hybridfahrzeug die Fahranforderung aufgrund der Systemgrenzen nicht erfüllen kann. Des Weiteren trägt eine reale Wirkrichtung zur Erhöhung der Nachvollziehbarkeit von innersystemischen Zusammenhängen der Betriebsstrategie bei. Die Umsetzung des vorwärtsgerichteten Modellansatzes erfordert jedoch den Einsatz eines Fahrermodells, wodurch sich die Komplexität des Modells erhöht.

Das Blockschaltbild in Bild 3.11 zeigt die zur Modellierung des P24-Konzepts notwendigen Komponenten und deren funktionalen Zusammenhänge anhand des Signalflusses. Die Komponenten umfassen dabei zum einen eine erste elektrische Maschine, welche zwischen dem Verbrennungsmotor und dem Getriebeeingang angeordnet ist und im weiteren Verlauf als *P2-EM* bezeichnet wird. Zum anderen wird eine zweite elektrische Maschine an der Hinterachse des Fahrzeugs angeordnet, welche im Folgenden als *P4-EM* bezeichnet wird. Zusätzlich zur HV-Batterie und dem Verbrennungsmotor werden ein schaltbares mechanisches Getriebe und zwei Kupplungen berücksichtigt. Neben den mittels Drehzahl und Drehmoment begründeten physikalischen Beziehungen sind zusätzlich die Schnittstellen der Betriebsstrategie zu den Komponentenmodellen dargestellt. Diese sind zum einen durch Steuergrößen und zum anderen durch Zustandsgrößen, beziehungsweise innere Zielgrößen der Betriebsstrategie (vgl. Abschnitt 2.1.2) definiert.

Die Grundlage der Antriebsstrangsteuerung bildet stets die Fahranforderung, welche

in Anlehnung an die Literatur (vgl. [35, 79]) mittels eines PI-Fahrerregler in eine Stellgröße umgerechnet wird. Diese basiert auf der Abweichung zwischen der durch den Fahrzyklus vorgegebenen Soll-Geschwindigkeit und der am Rad berechneten Ist-Geschwindigkeit  $v_{\text{Fzg}}$ , welche sich durch die Lösung der Bewegungsgleichung

$$\dot{v}_{\text{Fzg}} = \frac{1}{m_{\text{Fzg}} e_G} \left( \frac{T_{\text{Rad}}(t)}{r_{\text{Dyn}}} - F_{\text{W}}(t) \right) \quad (3.8)$$

ergibt. Hierbei beschreibt  $m_{\text{Fzg}}$  die Fahrzeugmasse und  $r_{\text{Dyn}}$  den dynamischen Radhalbmesser. Die notwendige Kraft zur rotatorischen Beschleunigung der im Antriebsstrang vorhandenen drehbaren Massen wird durch einen vom Getriebegang  $G$  abhängigen Drehmassenzuschlagsfaktor  $e_G$  berücksichtigt [53]. Das Drehmoment  $T_{\text{Rad}}(t)$  wird durch den Antriebsstrang beziehungsweise die mechanische Bremse bereitgestellt und sorgt für eine Beschleunigung des Fahrzeugs sofern dieses größer als das zur Überwindung der Fahrwiderstände  $F_{\text{W}}(t)$  notwendige Drehmoment ist. In Anlehnung an die Literatur sind für energetische Simulationen der Rollwiderstand  $F_{\text{R}}(t)$ , der Steigungswiderstand  $F_{\text{S}}(t)$  und der Luftwiderstand  $F_{\text{L}}(t)$  relevant, sodass

$$F_{\text{W}}(t) = F_{\text{R}}(t) + F_{\text{S}}(t) + F_{\text{L}}(t) = m_{\text{Fzg}} g (f_{\text{R}} \cos \alpha + \sin \alpha) + \frac{\rho}{2} c_{\text{w}} A_{\text{f}} v_{\text{Fzg}}^2. \quad (3.9)$$

Neben den Umgebungsgrößen Erdbeschleunigung  $g$  und Luftdichte  $\rho$  hängt der Fahrwiderstand weiterhin von den Fahrzeugparametern Rollwiderstandsbeiwert  $f_{\text{R}}$ , Stirnfläche  $A_{\text{f}}$  und Luftwiderstandsbeiwert  $c_{\text{w}}$  sowie von den anhand des Fahrzyklus definierten Verläufen des Steigungswinkels  $\alpha$  und der Geschwindigkeit  $v_{\text{Fzg}}$  ab. Diese Größen bestimmen im Wesentlichen die Fahranforderung, welche durch das entsprechende Antriebsdrehmoment am Rad erfüllt wird. Im Modell wird zur Lösung von Gl. 3.8 das durch die Antriebsaggregate bereitgestellte Drehmoment dem Signalfluss entsprechend auf ein Rad bezogen. Dabei wird  $T_{\text{Rad}}(t)$  zusätzlich zu den bereits genannten Komponentengrenzen durch den Kraftschluss der Reifen mit der Straße begrenzt. Im betrachteten Längsdynamikmodell wird dieser Effekt anhand der Traktionsgrenzen sowohl für die Vorderachse  $T_{\text{VA,max}}(t)$  als auch für die Hinterachse  $T_{\text{HA,max}}(t)$  berücksichtigt. Auf eine Herleitung wird an dieser Stelle verzichtet und stattdessen auf die einschlägige Literatur [38] verwiesen.

Da Entscheidungen der Betriebsstrategie und somit die gesamtsystemischen Zusammenhänge neben der Fahranforderung insbesondere auf den Komponenteneigenschaften des Antriebsstrangs (innere Zielgrößen, vgl. Bild 3.11) basieren, werden die einzelnen Modelle im Folgenden kurz erläutert. Hierbei wird im weiteren Verlauf zur besseren Übersicht auf die explizite Darstellung der Zeitabhängigkeit verzichtet.

## Verbrennungsmotor

Die Modellierung von Verbrennungsmotoren erfolgt in dieser Arbeit mittels quasistationärer Verbrauchskennfelder (vgl. beispielhafte Darstellung in Bild 3.12(a)). Diese bilden den Zusammenhang zwischen den Eingangsgrößen Drehmoment  $T_{\text{VM}}$  und Drehzahl  $n_{\text{VM}}$  und der Ausgangsgröße Kraftstoffmassenstrom  $\dot{m}_{\text{Kr}}$  mittels

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{Kr}} &= f(n_{\text{VM}}, T_{\text{VM}}), \\ T_{\text{VM,GKL}} &= T_{\text{VM,max}}(n_{\text{VM}}),\end{aligned}\tag{3.10}$$

ab. Zusätzlich erfolgt eine Begrenzung des maximalen Drehmoments als Funktion der Motordrehzahl. Die sich ergebende Kurve  $T_{\text{VM,GKL}}$  wird im weiteren Verlauf als *Grenzkennlinie* (GKL) bezeichnet.

## Getriebe und Kupplungen

Das in dieser Arbeit behandelte P24-Hybridkonzept beinhaltet eine elektrische Antriebseinheit zum Antrieb der Hinterachse und eine Antriebseinheit bestehend aus der Kombination eines Verbrennungsmotors und einer weiteren elektrischen Maschine. Diese kombinierte Antriebseinheit ist mittels eines automatisierten Getriebes mechanisch an die Vorderachse gekoppelt. Die Modellierung des Getriebes umfasst hierbei zum einen die Übersetzungen des Eingangsdrehmoments  $T_{\text{Getr,ein}}$  beziehungsweise der Eingangsdrehzahl  $n_{\text{Getr,ein}}$  zum Abtrieb, zum anderen die Wirkungsgradkette vom Getriebeeingang zum Getriebeausgang. Die Wirkungsgradkette wird ebenfalls anhand von Kennfeldern abgebildet, wodurch sich das Getriebemodell zu

$$\begin{aligned}\eta_{\text{Getr},G} &= f(n_{\text{Getr,ein}}, T_{\text{Getr,ein}}, G), \\ T_{\text{Getr,aus}} &= i_G \eta_{\text{Getr},G} T_{\text{Getr,ein}}, \\ n_{\text{Getr,aus}} &= \frac{1}{i_G} n_{\text{Getr,ein}} \text{ und } G = 1, 2, \dots, G_{\text{max}}\end{aligned}\tag{3.11}$$

ergibt. Die im Wirkungsgradkennfeld (vgl. Bild 3.12(b)) berücksichtigten Verlustmomente ergeben sich aus Messungen der Betriebspunkte für den jeweiligen Getriebeengang  $G$  und beinhalten neben Reibungsverlusten der Verzahnung und Lagerung ebenfalls Kupplungsverluste. Hierbei wird die im Getriebemodell vorhandene Kupplung als K2 bezeichnet. Ein Öffnen dieser Kupplung unterbricht den Drehmomentfluss durch das Getriebe und entkoppelt die Antriebseinheit somit mechanisch von den Rädern.

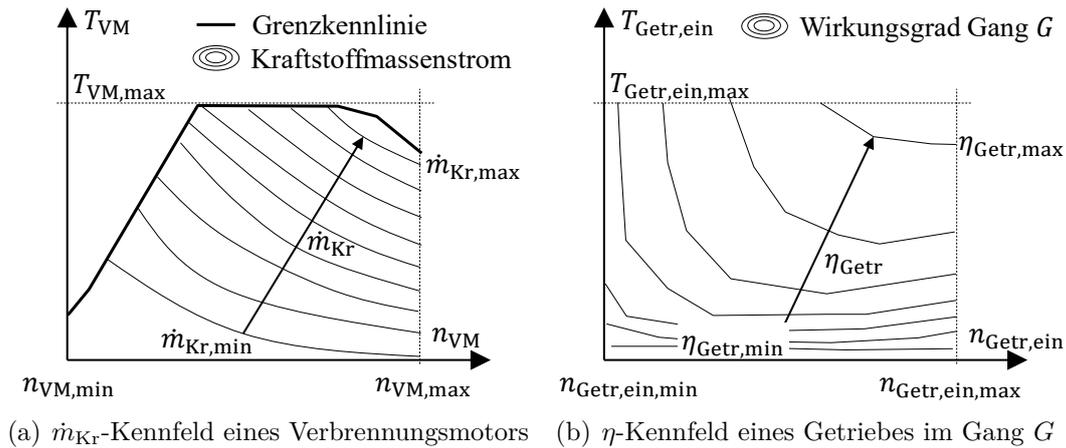


Bild 3.12: Beispiele für Verbrauchs- und Wirkungsgradkennfelder.

Des Weiteren enthält der hybride Antriebsstrang eine zusätzliche Lamellenkupplung  $K1$ , welche die mechanische Kopplung zwischen dem Verbrennungsmotor und der P2-EM darstellt. Diese ist im vorliegenden Konzept notwendig, um eine elektrische Fahrt sowie die Rekuperation mittels der P2-EM zu ermöglichen. Im geschlossenen Zustand wird die Kupplung  $K1$  in Anlehnung an [35] als verlustfrei angenommen. Im offenen Zustand (beispielsweise bei rein elektrischer Fahrt) wirkt dagegen ein Schleppmoment, welches als Kennlinie über der Differenzdrehzahl zwischen Verbrennungsmotor und Getriebeeingang dargestellt ist, sodass sich

$$T_{\text{Verl},K1} = f(n_{\text{Getr,ein}} - n_{\text{VM}}) \quad (3.12)$$

ergibt. Die Modellierung der Kupplungen erfolgt dabei unter Vernachlässigung dynamischer Effekte. Die Berücksichtigung der Kupplungsdynamik ist beispielsweise für Untersuchungen des Anfahrverhaltens relevant [105]. Für die energetischen Analysen in dieser Arbeit spielt dieser Aspekt jedoch keine Rolle, da der Energieverbrauch einer Schaltung nicht vom Drehmomentverlauf während des Schliess- beziehungsweise Öffnungsvorgangs der Kupplung abhängt [37]. Des Weiteren ist die Dynamik eines Schaltvorgangs in der Regel sehr viel schneller als jene der Längsdynamik des Fahrzeuges und des SoC, was diese Vereinfachung zusätzlich stützt.

### Elektrische Maschinen und HV-Batterie

Analog zu den VM-Kennfeldern erfolgt die Modellierung der elektrischen Maschinen ebenfalls mittels quasistationärer Kennfelder, welche neben dem mechanischen Dreh-



moment  $T_{EM}$  und der Drehzahl  $n_{EM}$  zusätzlich von der Spannungslage  $U_{DC}$  abhängen. Die Ausgangsgröße ist die an der Batterieklemme anliegende Leistung

$$P_{DC} = f(n_{EM}, T_{EM}, U_{DC}), \quad (3.13)$$

wobei in  $P_{DC}$  sämtliche Verluste der elektrischen Maschine (beispielsweise Reibungs- und Kupferverluste) sowie Verluste der Leistungselektronik berücksichtigt sind. Je nach Betriebspunkt (Kombination aus  $T_{EM}$  und  $n_{EM}$ ) kann die Klemmenleistung sowohl ein positives als auch negatives Vorzeichen aufweisen. Demnach existieren zwei spannungsabhängige Grenzkennlinien (vgl. Bild 3.13), eine für den *motorischen Betrieb* ( $T_{EM} \geq 0$ ) und eine für den *generatorischen Betrieb* ( $T_{EM} < 0$ )

$$\begin{aligned} T_{GKL, Mot} &= T_{Mot, max}(n_{EM}, U_{DC}), \\ T_{GKL, Gen} &= -T_{Gen, max}(n_{EM}, U_{DC}). \end{aligned} \quad (3.14)$$

Da innerhalb dieser Arbeit die Leistungsfähigkeit des Hybridkonzepts von Interesse ist, wird insbesondere in der Modellierung der elektrischen Maschinen der Aspekt der Komponentenbelastung (vgl. Abschnitt 3.1.2) berücksichtigt. Hierbei ist die Nennleistung basierend auf den Grenzkennlinien in Gl. (3.14) aufgrund der thermischen Beanspruchung typischerweise nicht dauerhaft verfügbar. Bei Untersuchungen bezüglich der Antriebseffizienz wird dieser Aspekt in der Betriebsstrategie mittels einer situationsabhängigen Begrenzung der EM-Leistung berücksichtigt. Eine Besonderheit ergibt sich für die Ausführung der Kennfelder der P4-EM. Diese ist über eine Getriebebestufe mechanisch an die Hinterachse gekoppelt, wodurch zum einen Drehmomente und Drehzahlen übersetzt werden und zum anderen weitere Getriebeverluste auftreten. Die verwendeten Kennfelder beinhalten hierbei sämtliche Verluste des Getriebes, der EM sowie deren Leistungselektronik und bilden somit den Zusammenhang zwischen dem mechanisch verfügbarem Achsmoment sowie der Achsdrehzahl und der hieraus resultierenden DC-Leistung am Wechselrichter der P4-EM ab.

Die für den Antrieb der elektrischen Maschinen notwendigen DC-Leistungen werden von der HV-Batterie bereitgestellt ( $P_{DC} > 0$ ). Im Falle des generatorischen Betriebes ( $P_{DC} < 0$ ) führen die elektrischen Maschinen der HV-Batterie und dem Bordnetz elektrische Energie zu. Im Wesentlichen bildet ein geeignetes Batteriemodell dabei die Änderung des SoC und der Klemmenspannung in Abhängigkeit der elektrischen Leistungsanforderungen des hybriden Antriebsstrangs ab. Die Zustandsgröße *SoC* wird dabei anhand der Formulierung der Batterieleistung  $P_{Bat}$  als innere Zielgröße innerhalb der Betriebsstrategie berücksichtigt.

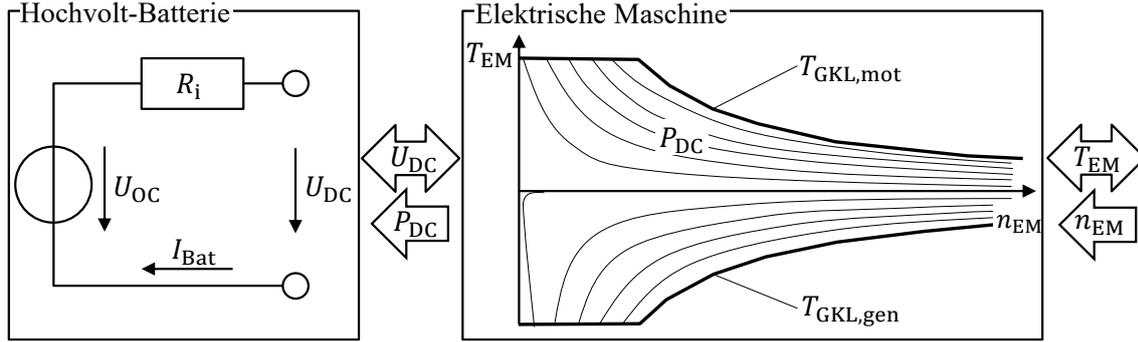


Bild 3.13: Schematische Darstellung der Kopplung von EM- und Batteriemodell.

Im Stand der Technik des System-Level Designs wird hauptsächlich ein vereinfachter, auf einem Ersatzschaltbild basierender, Modellansatz verwendet (vgl. [25, 35, 55, 79]). Das Ersatzschaltbild besteht hierbei aus einer internen Spannungsquelle und einem in Reihe geschalteten Innenwiderstand  $R_i$ . Die relevanten Größen und Zusammenhänge des Batteriemodells sind links im Bild 3.13 dargestellt. Durch Anwendung des 2. Kirchhoffschen Gesetzes und Lösung des sich ergebenden Gleichungssystems werden die Zusammenhänge im Batteriemodell anhand von

$$\begin{aligned}
 \dot{SoC} &= -\frac{1}{Q_0} I_{\text{Bat}} \text{ mit} \\
 I_{\text{Bat}} &= \frac{U_{\text{OC}}(SoC) - \sqrt{U_{\text{OC}}^2(SoC) - 4R_i(SoC)P_{\text{DC}}}}{2R_i(SoC)} \quad (3.15)
 \end{aligned}$$

formuliert. Mittels des in Abhängigkeit der Klemmenleistung berechneten Batteriestroms  $I_{\text{Bat}}$  wird die Änderung des SoC durch Division mit der Batteriekapazität  $Q_0$  bestimmt. Hierbei sind die Leerlaufspannung  $U_{\text{OC}}$  und der Innenwiderstand Funktionen des Ladezustands, welche anhand von auf Messungen basierenden Kennlinien abgebildet werden. Da sich die Verluste der HV-Batterie während Ladevorgängen von denen während Entladevorgängen unterscheiden, liegen die Kennlinien des Innenwiderstands gesondert für beide Fälle vor. Die als innere Zielgröße der Betriebsstrategie verwendete Batterieleistung  $P_{\text{Bat}} = I_{\text{Bat}}U_{\text{OC}}$  beinhaltet im Gegensatz zur Klemmenleistung somit die internen Verluste der HV-Batterie [35].

### 3.3.2 Betriebsstrategie

Das im vorangegangenen Abschnitt erläuterte Modell des hybriden Antriebsstrangs berücksichtigt drei Drehmomentquellen. Diese sind der Verbrennungsmotor und ei-

ne elektrische Maschine am Getriebeeingang (P2), welche beide auf die Vorderachse wirken sowie eine weitere elektrische Maschine (P4), welche mittels einer Getriebestufe an die Hinterachse des Hybridfahrzeugs gekoppelt ist. Hierbei besteht keine mechanische Verbindung zwischen der P4-EM und der Kombination aus Verbrennungsmotor und P2-EM. Demnach erlaubt das Hybridkonzept nach [64] die Darstellung der in Tabelle 3.1 aufgeführten Betriebsmodi.

Tabelle 3.1: Darstellbare Betriebsmodi zum Antrieb des P24-Hybridkonzepts

Modus	Drehmomentaufteilung			Zustände		
	VM	P2-EM	P4-EM	$x_{VM}$	$x_{K1}$	$x_{K2}$
EV1	$T_{VM} = 0$	$T_{P2} > 0$	$T_{P4} = 0$	0	0	1
EV2	$T_{VM} = 0$	$T_{P2} = 0$	$T_{P4} > 0$	0	0	0
EV3	$T_{VM} = 0$	$T_{P2} > 0$	$T_{P4} > 0$	0	0	1
PH1	$T_{VM} > 0$	$T_{P2} = 0$	$T_{P4} \neq 0$	1	1	1
PH2	$T_{VM} > 0$	$T_{P2} \neq 0$	$T_{P4} = 0$	1	1	1
PH3	$T_{VM} > 0$	$T_{P2} \neq 0$	$T_{P4} \neq 0$	1	1	1
Seriell	$T_{VM} > 0$	$T_{P2} = -T_{VM}$	$T_{P4} \neq 0$	1	1	0

Hiernach ergeben sich sowohl drei Modi zur rein elektrischen Fahrt (EV) als auch drei Parallelhybridmodi (PH). Des Weiteren ermöglicht das Konzept einen seriellen Hybridmodus, wobei die Kombination aus Verbrennungsmotor und P2-EM als Generatoreinheit elektrische Leistung aus dem Kraftstoff erzeugt und die P4-EM die Fahraufgabe vollständig übernimmt. Hierfür wird die Generatoreinheit mittels Öffnung der Kupplung im Getriebe (K2) von der Vorderachse entkoppelt. Der Status von Kupplungen wird im Rahmen dieser Arbeit anhand der Beziehungen „1 = geschlossen“ und „0 = offen“ beschrieben. Im Gegensatz zu den Antriebsmodi werden bei Bremsvorgängen beide elektrische Maschinen als Generatoren zur Rekuperation der freiwerdenden elektrischen Energie verwendet.

Ziel der Betriebsstrategie ist es nun, die vorgegebene Fahraufgabe hinsichtlich bestimmter Zielkriterien in der am besten geeigneten Art und Weise zu erfüllen [37]. Typischerweise ist das übergeordnete Zielkriterium hierbei die Minimierung des Kraftstoffverbrauchs anhand einer geeigneten Aufteilung der Drehmomentanforderung zwischen den Antriebsaggregaten. Ein minimaler Kraftstoffverbrauch ergibt sich dann, wenn die Antriebsaggregate stets in effizienten Betriebsbereichen arbeiten. Hierfür stellt ein regelbasierter Betriebsstrategieansatz im Sinne der Nachvollziehbarkeit die am besten geeignete Methode dar, da dieser typischerweise auf Erfahrungs-

werten basiert. Aufgrund der Vielfalt verfügbarer Modi in Kombination mit nicht-linearen Zusammenhängen innerhalb der Wirkungsgradketten zwischen den Energiespeichern und der am Rad verfügbaren Drehmomente ist die optimale Steuerung der Drehmomentaufteilung im Vorfeld der Analyse des P24-Hybridkonzepts nicht bekannt. Dieser Sachverhalt stellt eine grundlegende Annahme zur Entwicklung eines geeigneten Betriebsstrategieansatzes dar. Im Folgenden wird der entwickelte Betriebsstrategieansatz erläutert.

### Entwickelter Betriebsstrategieansatz

Ein für die Problemstellung in dieser Arbeit geeigneter Betriebsstrategieansatz ist nach dem vorhergehend beschriebenen Sachverhalt in der Lage, die grundlegende Aufgabe der effizienten Antriebsstrangsteuerung ohne Vorwissen über die systemischen Zusammenhänge zu erfüllen. Dieser Aspekt begrenzt die Wahl der Betriebsstrategie auf die Klasse der optimierungsbasierten Methoden, da regelbasierte Ansätze typischerweise ein hohes Maß an Vorwissen und Erfahrung voraussetzen. Hinsichtlich der einfachen Nachvollziehbarkeit von Ergebnissen stellt der in [84] erstmals vorgestellte Ansatz der *Equivalent Consumption Minimization Strategy* (ECMS) ein hierfür geeignetes Verfahren dar. Zum einen basiert die Berechnung der Drehmomentaufteilung lediglich auf einem einzelnen Parameter, zum anderen kann dieser Ansatz in ein vorwärtsgerichtetes Modell implementiert werden. Als vorab veröffentlichtes Teilergebnis dieser Arbeit erfolgt in [64] erstmalig eine Erweiterung der ursprünglichen ECMS zur Verwendung in der Systemanalyse von P24-Hybridkonzepten, welche als *2D-ECMS* bezeichnet wird. Im Folgenden werden für das Verständnis dieser Arbeit relevante Eigenschaften des Betriebsstrategieansatzes kurz erläutert. Auf eine detaillierte Herleitung der Methode wird dabei verzichtet und stattdessen auf die Arbeit [64] verwiesen.

Das Betriebsstrategiesystem umfasst die in Bild 3.14 dargestellten Subsysteme. Zur Reduktion der Komplexität, erfolgt die Rekuperation der bei Bremsvorgängen frei werdenden Energie vereinfacht durch eine konstante 50/50-Aufteilung der entsprechenden generatorischen Drehmomente auf die P2-EM und die P4-EM, weshalb die Funktion innerhalb dieses Abschnitts nicht näher ausgeführt wird. Im Betriebsstrategiesystem enthalten sind eine auf Fuzzy-Logik basierende Schaltstrategie, welche den Getriebegang anhand der Fahrpedalstellung  $u_D = \{u_D \in \mathbb{R} | u_D \in [0, 1]\}$ , des im Folgenden Abschnitt näher erläuterten Äquivalenzfaktors  $\lambda$  sowie der Getriebeeingangsdrehzahl bestimmt.

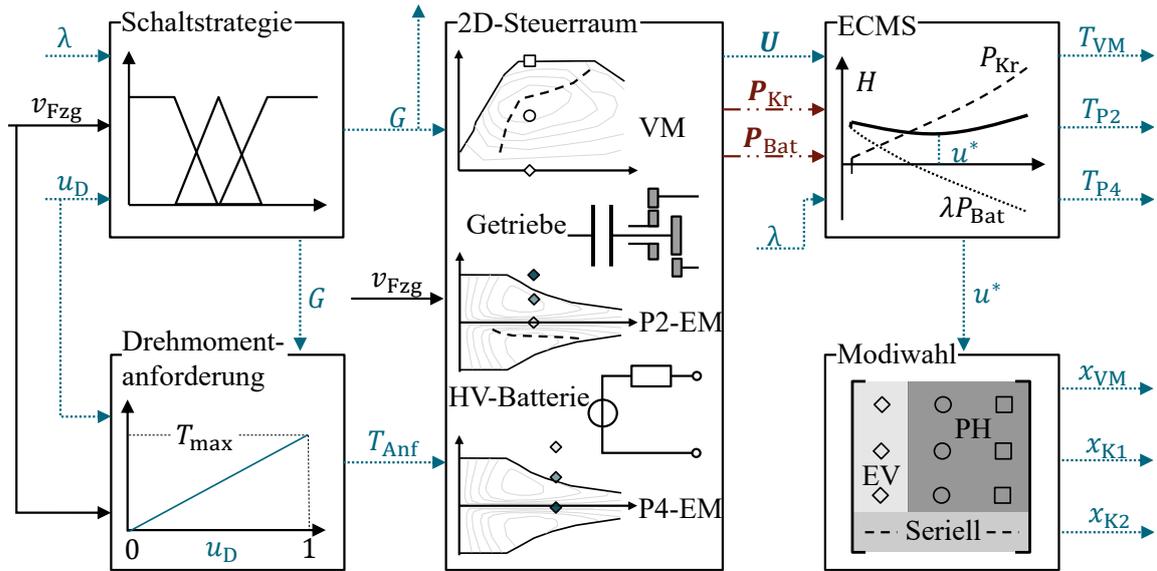


Bild 3.14: Schematische Darstellung der Betriebsstrategie und deren Schnittstellen.

Diese und weitere für die Betriebsstrategie notwendige Drehzahlen werden hierbei aus der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{Fzg}$  berechnet. Des Weiteren wird die Fahrpedalstellung  $u_D$  anhand des aktuell durch den Antriebsstrang verfügbaren Summendrehmoments in eine Drehmomentanforderung  $T_{Anf}$  übersetzt. Diese Drehmomentanforderung ist bezogen auf den Getriebeeingang und ermöglicht somit das in [64] vorgestellte Diskretisierungsschema zur Definition des Steuerraums  $\mathbf{U}$ , welcher so gewählt ist, dass sämtliche in Tabelle 3.1 aufgeführten Betriebsmodi darstellbar sind. Der Steuerraum ist im mathematischen Sinne eine Matrix  $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{I+1 \times J}$ . Die Dimension der Diskretisierung wird mittels  $I$  und  $J$  im Vorfeld der Simulation festgelegt. Die zusätzliche Zeile kennzeichnet die Berücksichtigung des seriellen Modus. Eine beispielhafte Darstellung des Steuerraums der 2D-ECMS ist in Bild 3.15 gezeigt.

Hierbei definiert jedes Element des Steuerraums  $u_{i,j}$  eine Drehmomentaufteilung, welche die Fahranforderung erfüllt. Jedes Element  $u_{i,j}$  ruft dabei andere Betriebspunkte in den Antriebskomponenten hervor. Die Berechnung der optimalen Drehmomentaufteilung  $u^*$  bezüglich der Kraftstoffeffizienz benötigt dann interne Zielgrößen auf Basis der durch  $\mathbf{U}$  definierten Betriebspunkte. Damit diese Betriebspunkte den tatsächlichen im Antriebsstrang auftretenden Zusammenhängen entsprechen, ist eine Abbildung der gesamten Wirkungsgradkette bezüglich der Drehmomentanforderung innerhalb der Steuerraumdefinition erforderlich. Die Identifikation der optimalen Drehmomentaufteilung  $u^*$ , das heißt das Matrixelement  $u_{i^*,j^*}$ , erfolgt auf Basis der Auswertung des Lösungsraums  $\mathbf{P}_{\text{Äq}} \in \mathbb{R}^{I+1 \times J}$ .

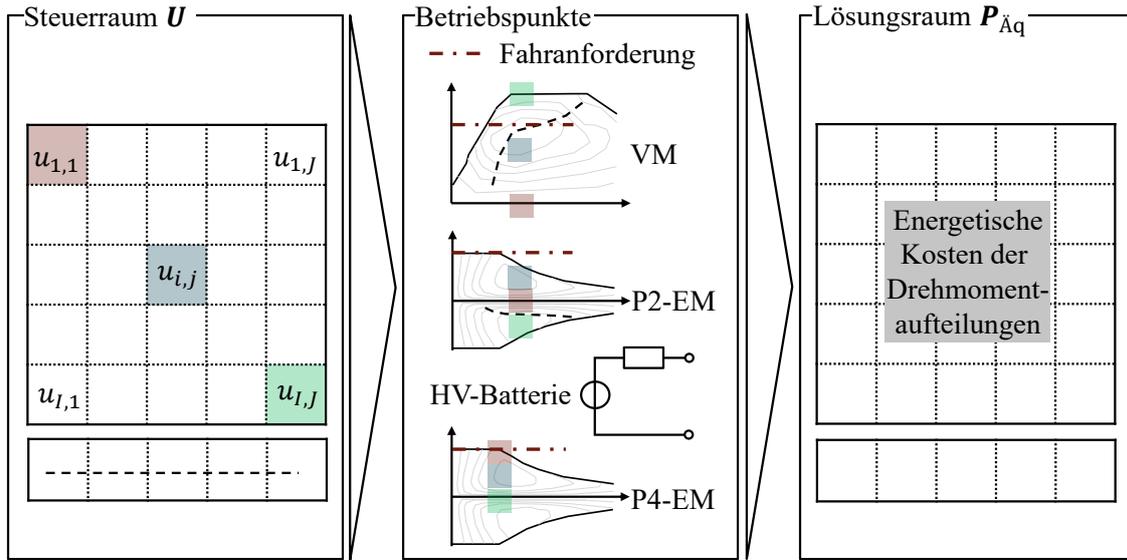


Bild 3.15: Schematische Darstellung von Steuer- und Lösungsraum der 2D-ECMS.

Eine nähere Erläuterung des Zielkriteriums  $P_{\text{Äq}}$  findet im folgenden Abschnitt statt. Anhand der optimalen Drehmomentaufteilung ist das von den Antriebskomponenten aufzubringende mechanische Drehmoment zur Erfüllung der Fahranforderung vollständig definiert. Die Modiwahl erfolgt ebenfalls mittels  $u^*$  und ist somit auch ein Ergebnis der Optimierung, wonach die gesamte Antriebsstrangsteuerung auf der Minimierung der zur Bewertung der Kraftstoffeffizienz herangezogenen Zielfunktion basiert. Dieser Sachverhalt ermöglicht somit die Analyse der optimalen Betriebsweise des hybriden Antriebsstrangs ohne die Notwendigkeit vorab vorhandenen Wissens über die genauen Zusammenhänge einer effizienten Antriebssteuerung.

### Equivalent Consumption Minimization Strategy

Die Eingänge des ECMS-Blocks in Bild 3.14 sind neben dem Steuerraum die internen Zielgrößen Batterieleistung  $P_{\text{Bat}}$  und Kraftstoffleistung  $P_{\text{Kr}}$ , anhand welcher sich die Zielgröße der ECMS, auch als Äquivalenzleistung bezeichnet, nach [107] zu

$$P_{\text{Äq}} = P_{\text{Kr}} + \lambda P_{\text{Bat}} = \dot{m}_{\text{Kr}} H_{\text{u}} + \lambda P_{\text{Bat}} \quad (3.16)$$

ergibt. Hierin erfolgt mittels des unteren Heizwerts des Kraftstoffes  $H_{\text{u}}$  und des Kraftstoffmassenstroms  $\dot{m}_{\text{Kr}}$  aus Gl. (3.10) die Berechnung der sogenannten Kraftstoffleistung  $P_{\text{Kr}}$ . Die ursprüngliche Idee der ECMS basiert darauf, dass die HV-Batterie im Charge-Sustaining Betrieb ( $\text{SoC}(t_0) = \text{SoC}(t_f)$ ) lediglich als Zwischenspeicher dient,

wobei zum Antrieb entnommene elektrische Energie zu einem späteren Zeitpunkt aus dem fossilen Kraftstoff nachgeladen wird [82]. Unter Berücksichtigung der typischen Wirkungsgrade eines elektrischen Antriebssystems und eines Verbrennungsmotors implizieren  $P_{Kr}$  und  $P_{Bat}$  demnach, welche Leistungen aufgrund der Fahranforderung durch die Energiespeicher bereitzustellen sind. Mittels des *Äquivalenzfaktors*  $\lambda$  werden diese Zielgrößen zueinander gewichtet. Hierbei kann  $\lambda$  im physikalischen Sinne als eine Größe verstanden werden, welche die starken Unterschiede der Wirkungsgrade bei der Umwandlung der petrochemischen und der elektrochemischen Energie in mechanische Leistungen ausgleicht [82].

Nach den vorangegangenen Erläuterungen definiert das Minimum der Äquivalenzleistung die optimale Drehmomentaufteilung  $u^*$  im Stellraum  $\mathbf{U}$ . Die Motivation der ursprünglichen Formulierung der EMCS besteht in [83] darin, das Optimalsteuerungsproblem von hybriden Antriebssträngen auf eine unmittelbare Minimierung der Hamilton-Funktion im aktuellen Zeitschritt  $t$  zu reduzieren. Im Kontext der 2D-ECMS ergibt sich das Optimierungsproblem nach [64] zu

$$u^*(t) = \arg \min_{\mathbf{U}(t)} [P_{\text{Äq}}(\mathbf{U}(t))]. \quad (3.17)$$

Im Vergleich zu den Zusammenhängen der Optimalsteuerung (vgl. Abschnitt 2.1.2) kann die ECMS somit als eine kausale Implementierung von Pontryagins Minimumprinzip verstanden werden, wobei die Hamilton-Funktion anhand der Äquivalenzleistung in jedem Zeitschritt approximiert wird. Im Folgenden bezieht sich die Bezeichnung „Optimum“ im Kontext der Betriebsstrategie daher stets auf ein approximiertes Optimum. Dieser Aspekt wird zur Verifikation des Betriebsstrategieansatzes in Abschnitt 3.3.4 erneut aufgegriffen und näher erläutert.

### Lösungsraum der ECMS im zeitlichen Kontext

Unter Berücksichtigung der theoretischen Grundlagen der Optimalsteuerung in Abschnitt 2.1.2 beschreibt der Stellraum  $\mathbf{U}$  die zulässige Menge der Steuergrößen. Bis zu dieser Stelle ist dieser frei von Restriktionen. Das heißt, dass prinzipiell Drehmomentaufteilungen berücksichtigt werden, welche aufgrund von Komponentengrenzen nicht zulässig sind. Dieser Sachverhalt wird im mittleren Block von Bild 3.14 durch die außerhalb der Grenzkennlinien liegenden Betriebspunkte verdeutlicht. Die Berücksichtigung von Komponentengrenzen erfolgt durch die Formulierung harter Nebenbedingungen, welche anhand von Straftermen implementiert werden [64].

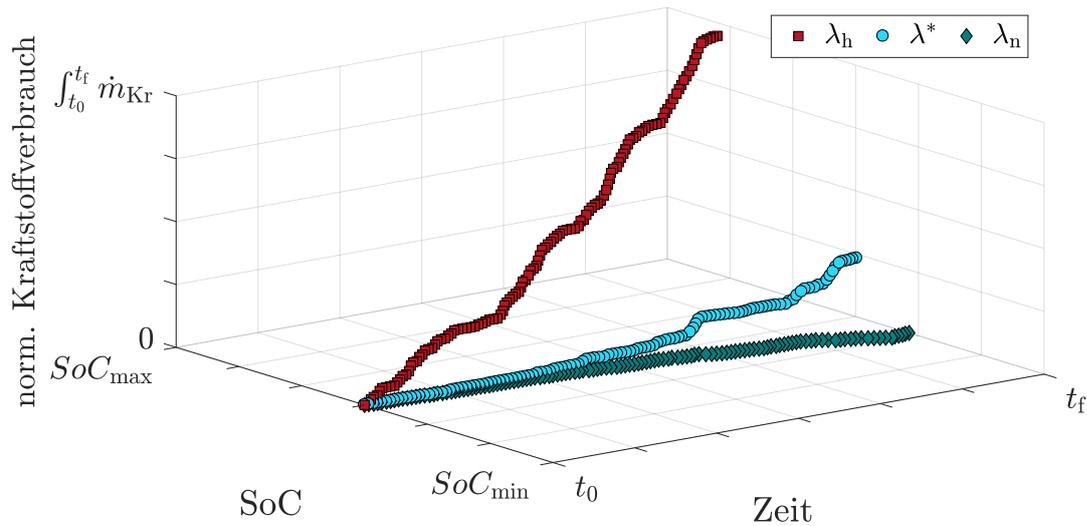


Bild 3.16: Beispielhafte Ladezustandstrajektorien des P24-Hybridkonzepts auf Basis des WLTC (Darstellung in Anlehnung an [50]).

Nachdem der Lösungsraum der ECMS anhand der Hamilton-Funktion bisher in einem Zeitschritt betrachtet wird, zeigt Bild 3.16 den Lösungsraum anhand der Ausprägungen unterschiedlicher Ladezustandstrajektorien in einem zeitlichen Kontext. Die Trajektorien ergeben sich hierbei auf Basis der Fahranforderungen des WLTC. Wie vorhergehend beschrieben, erfolgt die Modiwahl anhand der aktuellen energetischen Kosten, welche neben der Fahranforderung maßgeblich durch den Äquivalenzfaktor definiert werden. Dies wird im Bild verdeutlicht, wobei jede der Trajektorien auf einem unterschiedlichen konstanten Wert für  $\lambda$  basiert. Ein sehr hoher Wert  $\lambda_h$  führt hierbei dazu, dass die nicht zum Antrieb erforderliche Leistung aus dem fossilen Kraftstoff in Form von elektrischer Energie in die HV-Batterie geladen wird. Im Gegensatz hierzu resultiert ein sehr kleiner Wert von  $\lambda_n$  in einer rein elektrischen Fahrt im gesamten Zyklus, wodurch die HV-Batterie entladen wird. Die verbleibende Trajektorie beschreibt die optimale Lösung mit  $\lambda^*$ , welche die globale Bedingung  $SoC(t_0) = SoC(t_f)$  erfüllt. Somit stellen die beiden erstgenannten Lösungen die Grenzen des zeitlichen Lösungsraums und das innerhalb dieser Grenzen aufgespannte Feld die Lösungsmöglichkeiten in Abhängigkeit des Äquivalenzfaktors dar. Hierbei ist zu beachten, dass dieses Feld einzigartig für die betrachtete Antriebsauslegung und die gewählte Fahranforderung ist.

Die Betriebsstrategie identifiziert die bezüglich der Kraftstoffeffizienz optimale Betriebsweise des Antriebsstrangs parametrisiert mit  $\lambda^*$ . Mit Ausnahme der harten Ne-



benbedingungen zur Einhaltung von Komponentengrenzen (GKL), bleiben aus diesem Grund bisher jegliche Nebenbedingungen unberücksichtigt, welche auf unvollständigem Wissen basieren. Im Kontext der Kundenrelevanz erfordert die Berücksichtigung von Komfortaspekten jedoch die Einführung von weichen Nebenbedingungen, um etwa ein zu häufiges Starten des Verbrennungsmotors zu verhindern.

Zudem fokussiert sich diese Arbeit auf die Analyse der Leistungsfähigkeit des Antriebsstrangs. Hierbei kommt der Einfluss des Äquivalenzfaktors zum Tragen, welcher mittels einer zeitlichen Variation ein im Rahmen der physikalischen Grenzen beliebiges Steuerungsverhalten erlaubt. Eine im Sinne der Nachvollziehbarkeit interessante Eigenschaft des Faktors  $\lambda$  ist dabei dessen Bedeutung im Kontext einer energetischen Kostenbewertung der Fahranforderung. Ist zu einem Zeitpunkt das Minimum der Äquivalenzleistung beispielsweise durch eine rein elektrische Fahrt definiert, bedeutet dies, dass elektrische Energie aktuell günstiger bewertet ist, als jene aus fossilem Kraftstoff. Das Nachladen von elektrischer Leistung aus dem Kraftstoff wird hingegen dann priorisiert, wenn elektrische Energie teuer ist. Demnach können komplexe Zusammenhänge innerhalb des Steuerungsverhaltens basierend auf dem Parameter  $\lambda$  anhand der einfachen Bezeichnungen *teuer* und *günstig* erklärt werden. Hierbei ist zu beachten, dass sowohl eine zeitliche Variation von  $\lambda$  als auch die Berücksichtigung von weichen Nebenbedingungen zu einer anderen SoC-Trajektorie führt.

### 3.3.3 Beeinflussung des Steuerungsverhaltens

Das Steuerungsverhalten der ECMS wird hauptsächlich durch die Wahl des Äquivalenzfaktors bestimmt. Aus der Literatur ist hierzu bekannt, dass ein konstanter Wert  $\lambda^*$  existiert, anhand welchem die globale Nebenbedingung  $SoC(t_0) = SoC(t_f)$  erfüllt wird. Dieser Aspekt ist insbesondere zur Bewertung der Antriebseffizienz beziehungsweise zur Analyse der repräsentativen Betriebspunktverteilung als Basis einer Detailoptimierung der Komponenten relevant. Da eine repräsentative Betriebspunktverteilung zur Bewertung der Komponentenauslegung nach Stand der Technik unabhängig vom Einfluss der Betriebsstrategie ist, ist es erforderlich, dass die Steuerung  $u^*(t)$  bestimmten Anforderungen an deren Ergebnisgüte genügt. Dieser Sachverhalt wird in Abschnitt 3.3.4 im Detail erläutert.

Die Verwendung eines konstanten Werts  $\lambda^*$  eignet sich nicht für Realfahrzeugawendungen, da mit diesem Wert eine einzelne Trajektorie auf der exakten Vorgabe

des Fahrzyklus berechnet wird. Bereits geringe Abweichungen von der zugrundegelegten Fahranforderung erfordern eine neue Berechnung der Steuertrajektorie  $u^*(t)$ . In der Literatur existieren deshalb Ansätze, welche mittels einer zeitlichen Adaption von  $\lambda$  die Implementierbarkeit der ECMS in Realfahrzeuganwendungen erhöhen [57, 74, 92, 106]. Ein oftmals berücksichtigter Aspekt ist dabei das zulässige SoC-Fenster, innerhalb welchem die Steuertrajektorie gültig ist. Diese Begrenzung ist insbesondere bei der Betrachtung von autarken Hybriden mit geringem Energieinhalt der HV-Batterie von Interesse, welche zudem auf unterschiedlichen (unbekannten) Fahrzyklen bewertet werden. Da in dieser Arbeit eine Analyse der Antriebseffizienz auf einem bekannten kundenrelevanten Fahrzyklus (vgl. Abschnitt 3.2.2) erfolgt, wird für diese Untersuchungen auf eine Adaption verzichtet. Im Falle der Anforderungsanalyse ist eine solche Adaption vor dem Hintergrund des Spannungsfelds aus Antriebseffizienz, Leistungsfähigkeit und Fahrkomfort jedoch notwendig. Zum einen stellt die Adaption eine zeitliche Anpassung der energetischen Kosten dar und erlaubt somit eine situationsbedingte Gewichtung der Zielkriterien. Zum anderen erlaubt dies die Berücksichtigung einer Schnittstelle zur Schaltstrategie, sodass das Schaltverhalten in Abhängigkeit der energetischen Kosten angepasst werden kann.

### **Adaption des Äquivalenzfaktors**

Die Anforderungsanalyse identifiziert die hardwareseitigen Systemgrenzen des Hybridantriebs unter Berücksichtigung betriebsstrategischer Einflüsse. Ein zentraler Aspekt zum Erhalt der Leistungsfähigkeit ist dabei das Vorhalten eines ausreichenden Energieinhalts in der HV-Batterie, sodass die volle Systemleistung des Antriebs in entsprechenden Fahrsituationen verfügbar ist. Demnach ist es erforderlich, die Kosten der elektrischen Energie im Falle eines geringen Ladezustands beziehungsweise zur Aufrechterhaltung eines bestimmten Energievorhalts zu erhöhen. Die Anforderungsanalyse erfolgt auf der Basis von prägenden Lastfällen, wobei angenommen wird, dass hierbei der Kraftstoffverbrauch eine untergeordnete Rolle spielt. Demnach dient die situationsabhängige Erhöhung der Kosten der elektrischen Energie ausschließlich der Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit und erfolgt unabhängig von der Antriebseffizienz. Ein Beispiel hierfür ist das Nachladen der HV-Batterie in Fahrsituationen mit geringer Lastanforderung (zum Beispiel eine Fahrt bei konstanter Reisegeschwindigkeit). Je nach Dringlichkeit ist es dabei erforderlich, die Schaltstrategie so anzupassen, dass die Gangwahl ebenfalls hinsichtlich der Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit erfolgt. Ein niedriger Getriebeingang erlaubt dabei das

Nachladen der HV-Batterie mit hohen Leistungen aufgrund der höheren Drehzahlen von VM und P2-EM. Ein hierbei nicht zu vernachlässigender Aspekt ist die Beeinflussung des Fahrkomforts aufgrund der Anpassung der Schaltstrategie und der damit verbundenen Auswirkungen auf das Drehzahlniveau des Verbrennungsmotors. Dieser Sachverhalt ist in geeigneter Art und Weise bei der Adaption des Äquivalenzfaktors zu berücksichtigen.

Sowohl das System zur Adaption des Äquivalenzfaktors als auch die Schaltstrategie werden mittels Fuzzy-Systemen implementiert. Die grundlegende Struktur ist im Blockschaltbild in Bild 3.17 dargestellt. Das Fuzzy-System der Schaltstrategie liefert dabei die Entscheidung, ob eine Schaltung oder ein Verbleiben im aktuellen Gang erfolgt. Die grundlegende Implementierung basiert auf Erfahrungen und der Intuition, nach welcher eine Schaltung effizient und komfortabel erfolgt. Die Fuzzy-Schaltstrategie ersetzt hierbei die in Realfahrzeuganwendungen eingesetzten Schaltkennlinien. In Abhängigkeit vom Äquivalenzfaktor wird das Schaltverhalten angepasst, sodass im Fall von hohen Werten für  $\lambda$  ein Hochschalten erst bei höheren Drehzahlen und möglichst unabhängig von der Fahrpedalstellung erfolgt. Dem hingegen werden Schaltungen bei niedrigen Kosten beziehungsweise Werten nahe eines typischen optimalen Wertes  $\lambda^*$  eher hinsichtlich des Betriebs in effizienten Betriebsbereichen durchgeführt. Diese Zusammenhänge sind im Bild 3.17 anhand der Kennlinien schematisch gezeigt. Hierbei erfolgt die Erläuterung der Schaltstrategieadaptation anhand der Kosten elektrischer Energie und den dazugehörigen Begriffen „teuer“ und „günstig“. Sowohl das Fuzzy-System der Schaltstrategie als auch jenes zur Adaption des Äquivalenzfaktors sind als Singleton-Systeme ausgeführt.

Das Fuzzy-System zur  $\lambda$ -Adaption stellt einen Zusammenhang zwischen den Eingangsgrößen  $\Delta E_{\text{Bat}}$ ,  $v_{\text{Fzg}}$  sowie  $u_{\text{D}}$  und der Ausgangsgröße  $\lambda$  her.

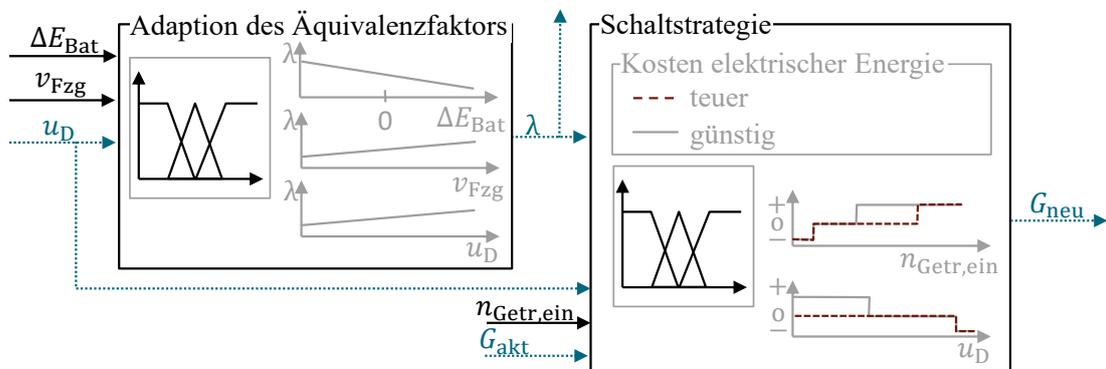


Bild 3.17: Blockschaltbild der  $\lambda$ -Adaption inklusive Schaltstrategieanpassung.

Hierbei wird die Abhängigkeit von der Fahrpedalstellung zur Berücksichtigung von Komfortaspekten verwendet. Das Ziel ist es, das notwendige Nachladen elektrischer Energie auf Bereiche zu beschränken, in welchen eine Entkopplung des Drehmoments und der Drehzahl des Verbrennungsmotors von der Fahranforderung möglichst unauffällig ist. In Anlehnung an [2, 68] wird demnach ein starkes Nachladen mittels Lastpunktanhebung insbesondere bei hohen Fahrzeuggeschwindigkeiten fokussiert. Des Weiteren wird angenommen, dass eine Lastpunktanhebung während einer Beschleunigungsphase aufgrund der ohnehin hohen Lastanforderung an den Antrieb als weniger störend empfunden wird. Das Fuzzy-System zur Adaption des Äquivalenzfaktors wird somit zur Handhabung des Zielkonflikts zwischen der Leistungsfähigkeit des Antriebs und des Fahrkomforts entwickelt. Dieser ergibt sich aufgrund der Tatsache, dass die Begrenzung von Nachlademöglichkeiten konträr zur dauerhaften Aufrechterhaltung eines bestimmten Energieinhalts in der HV-Batterie ist.

Die Eigenschaften der Fuzzy-Systeme zur Adaption des Äquivalenzfaktors und der Schaltstrategie sind in Tabelle 3.2 aufgeführt. Hierbei werden im Vorgriff auf die Untersuchungen zwei Fuzzy-Systeme mit unterschiedlicher Parametrierung zur  $\lambda$ -Adaption aufgeführt.

Tabelle 3.2: Eigenschaften der verwendeten Fuzzy-Systeme

Eigenschaft	$\lambda$ -Adaption	Schaltstrategie
Eingänge	$\Delta E_{\text{Bat}}, v_{\text{Fzg}}, u_{\text{D}}$	$u_{\text{D}}, n_{\text{Getr,ein}}, \lambda$
Zugehörigkeitsfunktionen pro Eingang	4/3/3, 3/3/3	3/5/2
Ausgang	$\lambda, \lambda$	Schaltsbefehl
Zugehörigkeitsfunktionen pro Ausgang	5, 5	3
Anzahl der Regeln	5, 17	18

Da zum Verständnis des weiteren Verlaufs der Arbeit lediglich die Kenntnis über die grundlegenden Funktionsweisen und funktionalen Zusammenhänge der Fuzzy-Systeme ausreichend ist, wird an dieser Stelle auf eine detaillierte Darstellung der Zugehörigkeitsfunktionen sowie der Regelbasen verzichtet und auf die Anhänge A.1 und A.3 verwiesen. Neben der Adaption des Äquivalenzfaktors wird das Steuerungsverhalten insbesondere durch weiche Nebenbedingungen beeinflusst, welche im Folgenden vorgestellt werden.

### Weiche Nebenbedingungen zur Berücksichtigung von Komfortaspekten

Die Wahl der Betriebsmodi erfolgt auf Basis der Entscheidung zur Drehmomentaufteilung durch die ECMS. Das heißt, dass der Algorithmus innerhalb des anhand der Komponentengrenzen beschränkten Suchraums bis dato beliebige Modiwechsel von einem zum nächsten Zeitschritt vornimmt. Somit besteht beispielsweise die Möglichkeit einer hohen Frequenz von Motorstarts und -stopps, welche sich auf den Fahrkomfort und auf Aspekte der Fahrbarkeit auswirken. Im Folgenden werden die in dieser Arbeit verwendeten weichen Nebenbedingungen zur Berücksichtigung von Komfort- und Fahrbarkeitsaspekten innerhalb des Lösungsraums erläutert. Hierbei werden sämtliche weiche Nebenbedingungen anhand von Straftermen implementiert. Diese sind bei einer Verletzung der Nebenbedingung aktiv und werden in Form von Strafkosten  $P_{\text{pen}}$  zu den entsprechenden Werten  $P_{\ddot{A}q,i,j}$  im Lösungsraum  $\mathbf{P}_{\ddot{A}q}$  addiert. Da es sich im vorliegenden Fall um ein diskretes Optimierungsproblem handelt, ist die vereinfachte Verwendung von konstanten Werten der Strafterme zulässig. Bei kontinuierlichen Optimierungsproblemen wird indes auf die Verwendung sogenannter Barrierefunktionen (vgl. Abschnitt 2.1) zurückgegriffen.

Komponentengrenzen wie beispielsweise die maximale Drehzahl der EM oder deren Grenzkennlinie stellen unerlaubte Zustände im Optimierungsproblem dar. Somit ist die Auswahl einer Drehmomentaufteilung  $u_{i,j}$  zu verhindern, welche zu Betriebspunkten außerhalb dieser Grenzen führt. Dies erfolgt durch harte Nebenbedingungen. In diesem Fall werden die entsprechenden Elemente  $P_{\ddot{A}q,i,j}$  mit sehr hohen Straferten (beispielsweise  $10^8$  W) belegt. Weiche Nebenbedingungen hingegen werden zur gezielten Beeinflussung des Steuerverhaltens verwendet.

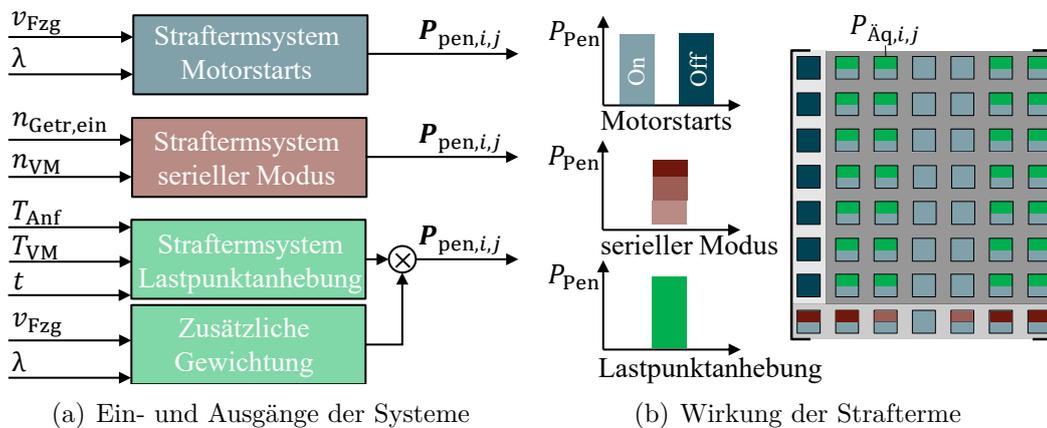
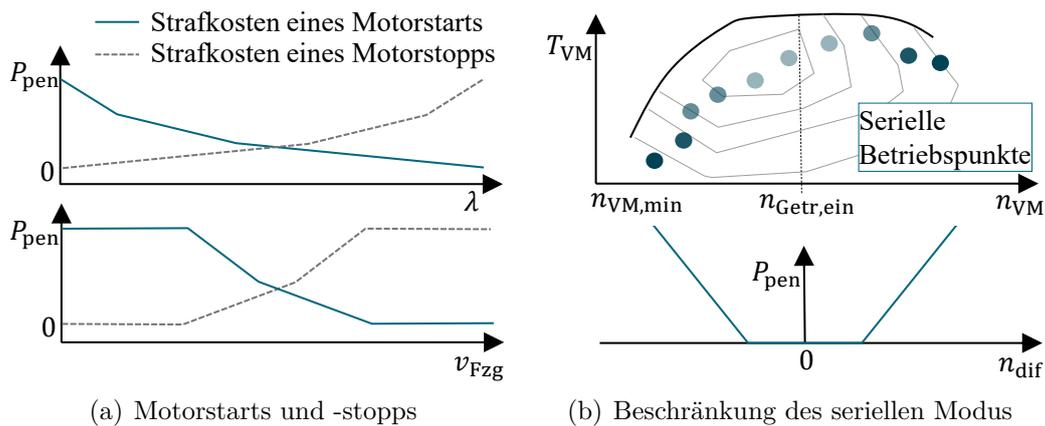


Bild 3.18: Systeme zur Implementierung weicher Nebenbedingungen.

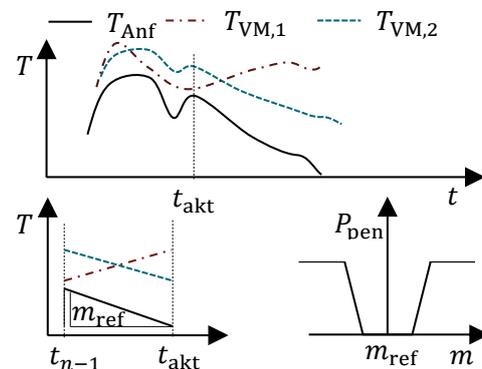
Ohne die Verwendung von weichen Nebenbedingungen entscheidet die ECMS stets auf Basis der niedrigsten Äquivalenzleistung, das heißt hinsichtlich einer Verbesserung der Antriebseffizienz. Durch eine Belegung bestimmter Elemente  $P_{\text{Äq},i,j}$  mit niedrigen Strafkosten erfolgt eine implizite Gewichtung der Zielkriterien im Optimierungsproblem. Die Wertebereiche der Strafterme in dieser Arbeit orientieren sich an der in [64] gezeigten Studie zur Reduzierung von Motorstarts. Bild 3.18 zeigt eine Übersicht der Systeme zur Implementierung von weichen Nebenbedingungen und deren Wirkung auf den Lösungsraum. Folgend werden die funktionalen Zusammenhänge zur Berechnung der Strafterme anhand von Bild 3.19 näher erläutert.

Bild 3.19(a) zeigt hierzu die funktionalen Zusammenhänge zur Bestrafung von Motorstarts und -stopps. Ein in der Literatur häufig gezeigtes Vorgehen ist die Formulierung eines konstanten Strafkostenterms. Hierdurch erfolgt ein Motorstart nur dann, wenn dieser einen anhand der Äquivalenzleistung gemessenen Verbrauchsvorteil erbringt, welcher mindestens den Strafkosten entspricht.



(a) Motorstarts und -stopps

(b) Beschränkung des seriellen Modus



(c) Beschränkung der Lastpunktanhebung

Bild 3.19: Schematische Darstellung der weichen Nebenbedingungen.

In der Anforderungsanalyse existieren Fahrsituationen, in welchen ein Motorstart zur Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit notwendig ist. In diesem Fall werden die Leistungsfähigkeit stärker gewichtet als die Erfüllung von Komfortanforderungen und somit die Strafkosten eines Motorstarts bei zunehmenden elektrischen Kosten reduziert. Selbiges gilt für zunehmende Geschwindigkeiten, da in diesen Bereichen der PH-Modus aufgrund der Entlastung des elektrischen Antriebssystems und der Möglichkeit der weniger auffälligen Lastpunktanhebung dem EV-Modus vorzuziehen ist. Die beschriebenen funktionalen Zusammenhänge werden mittels eines Fuzzy-Systems (vgl. Anhang A.2) implementiert. Die Strafterme für Motorstarts- und -stopps sind dabei in Abhängigkeit des Motorzustands aktiv beziehungsweise inaktiv.

Neben der Reduzierung der Häufigkeit von Motorstarts erfolgt eine Bestrafung des Wechsels in den seriellen Modus in bestimmten Situationen (vgl. Bild 3.19(b)). Die Entscheidungsmöglichkeiten im seriellen Modus belaufen sich dabei auf vorab definierte Betriebspunkte, welche die jeweils effizientesten Kombinationen aus Drehmoment und Drehzahl für eine bestimmte Ladeleistung darstellen [64]. Da in diesem Fall die Drehzahl des VM beziehungsweise der P2-EM unabhängig von der Fahranforderung durch die ECMS gewählt wird, ergibt sich das Risiko von Drehzahlsprüngen. Dieses Risiko wird durch die formulierte weiche Nebenbedingung minimiert, da lediglich Betriebspunkte im seriellen Modus gewählt werden, welche keinen großen Drehzahlsprung zur Folge haben. Als Referenz dient dabei die Differenzdrehzahl  $n_{\text{dif}}$  zwischen der Getriebeeingangs- und Motordrehzahl im aktuellen Zeitschritt. Die Implementierung der Nebenbedingung erfolgt mittels eines Strafterms, welcher als trichterförmige Funktion der Drehzahldifferenz aufgeführt ist. Weitere Informationen zur Parametrierung dieser Funktion finden sich in Anhang A.2.

Das Ziel der Nebenbedingung in Bild 3.19(c) ist es, die NVH-seitigen Auswirkungen der Entkopplung des Motordrehmoments von der Fahranforderung zu minimieren. Nach [12] werden Geräusche im Antriebsstrang als unangenehm empfunden, welche nicht zum Fahrzustand passen. Demnach wird insbesondere ein der Drehmomentanforderung des Fahrers  $T_{\text{Anf}}$  entgegengesetzter Drehmomentverlauf  $T_{\text{VM},1}$  des Verbrennungsmotors als kritisch bezüglich der Komfortanforderungen angenommen. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn im Anschluss an eine Beschleunigungsphase zwar die Fahrpedalstellung zurückgenommen wird, der Motor jedoch nicht in korrespondierender Weise das Drehmoment reduziert. Um solchen Situationen entgegenzuwirken, werden Betriebspunkte bestraft, deren Wahl zu stark unterschiedlichen Gradienten  $m$  im Vergleich zum Gradienten der Drehmomentanforderung  $m_{\text{ref}}$  führen. Diese Maßnahme führt zu dem Drehmomentverlauf  $T_{\text{VM},2}$ . Zur Berücksichtigung des Ziel-

konflikts aus Leistungsfähigkeit und Fahrkomfort werden die Strafkosten zusätzlich in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit und  $\lambda$  (vgl. Anhang A.2) gewichtet. Der serielle Modus bleibt indes von dieser Nebenbedingung unberührt, da dessen prinzipbedingter Vorteil die freie Wahl des Betriebspunktes ist.

Jede der genannten Nebenbedingungen stellt eine Veränderung des ursprünglichen Lösungsraums dar. Hierbei werden implizit weitere Zielkriterien innerhalb des Optimalsteuerungsproblems berücksichtigt. Da die Formulierung der ECMS ausschließlich auf der Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs basiert, ist eine Überprüfung des Einflusses der weichen Nebenbedingungen auf die Ergebnisgüte notwendig. Obwohl Komfort- und Fahrbarkeitsaspekte prinzipiell den Freiheitsgrad der Betriebsstrategie zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs einschränken, stellt deren Berücksichtigung einen relevanten Beitrag zur Steigerung der Akzeptanz der Ergebnisse dar, da diese aufgrund der genannten Einschränkungen praxisnäher sind.

### 3.3.4 Verifikation des Betriebsstrategieansatzes

Im Abschnitt 3.3.2 wird die mittels der EMCS gefundene Drehmomentaufteilung als approximiertes Optimum bezeichnet. Dies ist der Fall, da die Äquivalenzleistung lediglich eine Approximation der aus Pontryagins Minimumprinzip bekannten Hamilton-Funktion ist. Nach [50] erfüllt das Minimumprinzip für die Anwendung auf das Optimalsteuerungsproblem eines Hybridfahrzeugs unter bestimmten Voraussetzungen neben einer notwendigen Bedingung auch die hinreichende Bedingung eines Optimums. Die Lösung stellt hierbei ein globales Optimum dar, sofern für einen konstanten Kozustand  $\lambda^*$  eine eindeutige Ladezustandstrajektorie gefunden wird, welche die notwendigen Bedingungen des Minimumprinzips erfüllt. Des Weiteren wird vorausgesetzt, dass die Ladezustandsänderung hierbei nicht vom Ladezustand selbst abhängt. Unter Berücksichtigung des Batteriemodells in Gl. (3.15) wird jedoch deutlich, dass die inneren Zusammenhänge des Modells abhängig vom SoC sind. Nichtsdestotrotz ist die Unabhängigkeit der Ladezustandsänderung vom Ladezustand eine im Bereich der Betriebsstrategieentwicklung häufig getroffene Annahme, welche für kleine SoC-Fenster im Charge-Sustaining Betrieb in guter Näherung zutrifft [3, 37, 50, 79]. Darüber hinaus existieren in der Literatur Vergleichsstudien der Lösungsgüte der ECMS gegenüber des globaloptimalen Ansatzes der Dynamischen Programmierung (vgl. beispielsweise [74, 107]). Hierbei zeigt sich, dass das mittels der ECMS approximierte Optimum nahe am globalen Optimum liegt. Dies motiviert



dazu, auf einen weiteren Vergleich der Ergebnisgüte des in dieser Arbeit entwickelten Betriebsstrategieansatzes im Kontext der globalen Optimierung zu verzichten.

Im weiteren Verlauf wird die anhand eines konstanten Äquivalenzfaktors gefundene Ladezustandstrajektorie im Charge-Sustaining Betrieb als Benchmark verwendet. In der Arbeit des Autors [64] erfolgt bereits die Verifikation der grundlegenden Funktion der entwickelten 2D-ECMS auf Basis einer energetischen Analyse im WLTC. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle auf eine erneute Darstellung des grundlegenden Steuerungsverhaltens verzichtet und stattdessen anhand der folgenden Variationsstudie die Sensitivität der optimalen Lösung bezüglich der in Abschnitt 3.3.3 vorgestellten weichen Nebenbedingungen bewertet. Hierbei wird für die Charge-Sustaining Simulation ein Oberklassefahrzeug mit P24-Antriebsstrang und entsprechender Auslegung konfiguriert. Für jede Studie wird darüber hinaus dieselbe Diskretisierung des Steuerraums  $\mathbf{U}$  verwendet. Für die Benchmarklösung sind dabei sämtliche weiche Nebenbedingungen deaktiviert. Der Untersuchungsrahmen der Variationsstudie ist in Tabelle 3.3 dargestellt.

Tabelle 3.3: Variationsstudie zur Verifikation der Betriebsstrategie

Studie	Straftermsysteme bezüglich der/des		
	Motorstarts	Seriellen Modus	Lastpunktanhebung
Benchmark	inaktiv	inaktiv	inaktiv
S1	aktiv	inaktiv	inaktiv
S2	inaktiv	aktiv	inaktiv
S3	inaktiv	inaktiv	aktiv
S4	aktiv	aktiv	aktiv

Hiernach werden neben der Benchmarklösung insgesamt vier Simulationen auf Basis des WLTC durchgeführt, wobei jeweils der isolierte Einfluss einer aktiven Nebenbedingung analysiert wird. In der Studie S4 sind sämtliche in Bild 3.19 gezeigten weichen Nebenbedingungen aktiv. In jeder Studie wird der Äquivalenzfaktor  $\lambda$  angepasst, sodass die notwendige Bedingung  $SoC(t_0) = SoC(t_f)$  erfüllt ist und die Bewertung der Sensitivität des Kraftstoffverbrauchs erfolgt bezüglich der Variation der Nebenbedingungen. Tabelle 3.4 zeigt die quantitativen Ergebnisse der Variationsstudie. Hierbei zeigt sich, dass die Sensitivität der optimalen Lösung bezüglich der berücksichtigten weichen Nebenbedingungen gering ist. Mittels der Beschränkung von Motorstarts werden diese von 87 auf 25 in Studie S1 beziehungsweise auf 20 in Studie S4 reduziert.

Tabelle 3.4: Ergebnis der Verifikationsstudie

Studie	Einfluss auf			
	$\Delta$ Kraftstoffverbrauch	Motorstarts	$N_{\text{Seruell}}$	$\lambda^*$
Benchmark	-	87	5	2.677
S1	0,3 %	25	17	2.643
S2	0,0 %	90	0	2.677
S3	0,3 %	47	0	2.608
S4	0,3 %	20	0	2.623

Des Weiteren beeinflusst die Beschränkung der Lastpunktanhebung die Häufigkeit der Motorstarts indirekt, wodurch sich diese auf 47 reduzieren. Der serielle Modus wird auf Basis der gewählten Konfiguration selten und für kurze Zeitintervalle in Studie S1 und der Benchmarklösung verwendet. Die Häufigkeit der Wahl des seriellen Modus ist durch  $N_{\text{Seruell}}$  gekennzeichnet. Demnach liefert der serielle Modus für die gewählte Konfiguration keine signifikanten Verbrauchsvorteile. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus der Arbeit [64] ist die Effizienz des seriellen Modus ausschließlich durch die Komponentenauslegung und die Fahrzeugparameter begründet. Neben der Sensitivität des Kraftstoffverbrauchs bezüglich der aktiven Straftermsysteme sind die hieraus resultierende Einflüsse auf die Ladezustandstrajektorien hinsichtlich der Optimierung der Antriebskomponenten relevant.

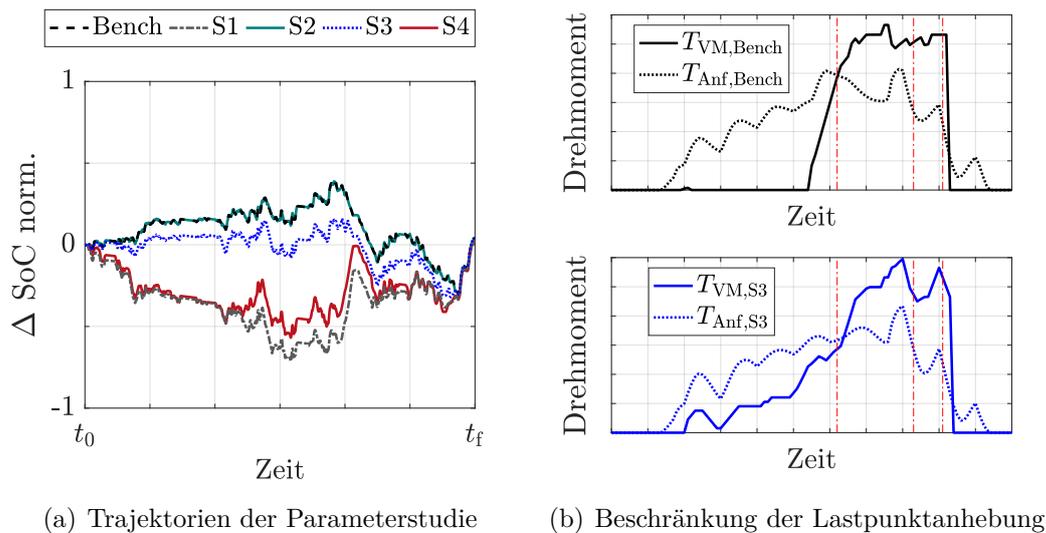


Bild 3.20: Einfluss der berücksichtigten weichen Nebenbedingungen.

Die Trajektorien sind in Bild 3.20(a) dargestellt und sind durch die unterschiedlichen optimalen Äquivalenzfaktoren begründet. Hierbei zeigt sich, dass die Trajektorien unterschiedlich zueinander ausgeprägt sind (mit Ausnahme derer aus Studie S2 bezüglich der Benchmarklösung). Die Studien, in welchen Motorstarts bestraft werden (S1 und S4), führen dabei zu einer Entladung der HV-Batterie im ersten Drittel des Zyklus. Des Weiteren erfolgt ein stärkeres Nachladen zu Beginn des letzten Drittels, wohingegen die Trajektorien der verbleibenden Studien ein Entladen der HV-Batterie beschreiben. Die darauffolgenden qualitativen Verläufe sind dabei für alle Studien ähnlich. Demnach ergeben sich unterschiedliche Verläufe insbesondere im Intervall mit vergleichsweise niedrigen Geschwindigkeiten. Dieser Sachverhalt ist insbesondere für die Detailoptimierung der Komponentenkennfelder relevant, da unterschiedliche Trajektorien selbst bei identischem Kraftstoffverbrauch typischerweise durch verschiedene Betriebspunktverteilungen begründet sind.

Neben der qualitativen Bewertung der Trajektorien wird der Einfluss der Beschränkung der Lastpunktanhebung in Bild 3.20(b) dargestellt. Die Diagramme zeigen einen kurzen Ausschnitt der simulierten Drehmomentverläufe. Die vertikalen roten Linien beschreiben dabei beispielhafte Vergleichsstellen, an welchen die Verläufe des VM-Drehmoments  $T_{VM}$  und der Drehmomentanforderung am Getriebeeingang  $T_{Anf}$  innerhalb der Benchmarklösung gegenläufig sind. Das untere Diagramm zeigt die Verläufe der Studie S3. Die Gradienten des VM-Drehmoments und der Drehmomentanforderung an den Vergleichsstellen sind dabei ähnlich und verifizieren somit die Wirksamkeit der weichen Nebenbedingung. Die im Bild 3.20(b) ersichtlichen geringfügigen Abweichungen zwischen den Drehmomentanforderungen im oberen und unteren Diagramm ergeben sich durch geringe Differenzen der Stellgröße des Fahrerreglers  $u_D$ . Diese wirken sich jedoch nur marginal auf die Erfüllung der Fahrenanforderung aus. Zwischen den Geschwindigkeitsverläufen der Benchmarkstudie und der Studie S3 ergibt sich ein RMSE von  $< 0,1$  km/h im betrachteten Zeitintervall.

Im Gegensatz zum Charge-Sustaining Betrieb, welcher relevant für die Detailoptimierung der elektrischen Antriebsstrangkomponenten bezüglich der Antriebseffizienz ist, werden in der Anforderungsanalyse Zielkriterien bezüglich der Leistungsfähigkeit stärker gewichtet. Diese Gewichtung erfolgt anhand der Adaption des Äquivalenzfaktors  $\lambda$  und dient der Beantwortung einer anderen Fragestellung. Da in diesem Zusammenhang das ursprüngliche Zielkriterium der ECMS (der Kraftstoffverbrauch) lediglich implizit berücksichtigt wird, existiert für die Anforderungsanalyse keine Benchmarklösung. Eine Validierung erfolgt für diesen Fall vielmehr basierend auf den analysierten gesamtsystemischen Zusammenhängen in Abschnitt 4.1.2.

## 3.4 Gesamtsystemische Zusammenhänge

Als zentraler Bestandteil des Hybridkonzepts liefert der entwickelte Betriebsstrategieansatz für einen Fahrzyklus die gesamtsystemischen Zusammenhänge zwischen Einflussparametern und Zielgrößen. Die mit der Adaption des Äquivalenzfaktors verbundene Gewichtung der Zielkriterien in Kombination mit der Definition eines prägenden Lastfalls erlaubt dabei erstmals die Analyse des Zielkonflikts zwischen Leistungsfähigkeit und Fahrkomfort unter Berücksichtigung des Einflusses der Betriebsstrategie. Diese dient als Analysewerkzeug und identifiziert die am besten geeignete Drehmomentaufteilung im P24-Konzept zur Erfüllung der Fahranforderung. Hierbei basieren sämtliche Zustände des Antriebsstranges, anhand welcher sich die gesamtsystemischen Zielgrößen ergeben, auf der Entscheidung der ECMS. Ferner werden Komfortaspekte mittels der vorhergehend beschrieben Straftermsysteme berücksichtigt. Die berechneten Steuertrajektorien zur Bewertung der Optimierungspotentiale in der Komponentenauslegung zeichnen sich somit durch eine höhere Praxisrelevanz aus. Im Folgenden werden die in dieser Arbeit berücksichtigten Einflussparameter sowie die verwendeten Zielgrößen zur Definition gesamtsystemischer Zusammenhänge vorgestellt. Die jeweiligen Kombinationen aus Parametern und Zielgrößen werden anschließend anhand zweier Untersuchungsrahmen zur Anforderungsanalyse sowie zur Bewertung der Antriebseffizienz zusammengefasst.

### 3.4.1 Definition von Einflussparametern

Grundlegende Einflussparameter im System-Level Design betreffen häufig Auslegungsparameter der Antriebskomponenten wie zum Beispiel die Leistungen des Verbrennungsmotors sowie der elektrischen Maschinen. Eine Verwendung dieser Parameter innerhalb eines ganzheitlichen Optimierungsprozesses erfordert dann die Entwicklung von skalierbaren Komponentenmodellen, welche die entsprechenden Verbrauchskennfelder in Abhängigkeit der berücksichtigten Parameter abbilden [25, 114, 118]. Da der Fokus dieser Arbeit auf der Analyse und Visualisierung gesamtsystemischer Zusammenhänge liegt und dabei eine Steigerung der Akzeptanz der Ergebnisse in Entscheidungsgremien angestrebt wird, wird eine geeignete Anzahl von Kennfeldern vorab ausgelegter Komponenten verwendet. Diese Kennfelder weisen bereits einen hohen Reifegrad auf, wodurch die Akzeptanz und Vergleichbarkeit der Ergebnisse gesteigert wird. Somit beschreiben die Einflussparameter der Komponentendimensionierung jeweils eine diskrete Auswahl von Vorentwicklungskennfeldern des Verbren-

nungsmotors und der elektrischen Maschinen. Eine Verwendung von skalierbaren Komponentenmodellen, wie zum Beispiel bei ganzheitlichen Optimierungsansätzen im System-Level Design, ist in dieser Arbeit nicht notwendig. Der zeitliche Aufwand der Entwicklung solcher Modelle wird dabei zumeist durch die hohe Anzahl durchzuführender Simulationen bei Optimierungsansätzen gerechtfertigt [33].

Die Antriebsstrangsteuerung wird maßgeblich durch den Äquivalenzfaktor  $\lambda$  beeinflusst. Die Analyse gesamtsystemischer Zusammenhänge wird auf Basis eines Fahrzyklus durchgeführt und stellt im Kontext einer Optimierung ein statisches Problem dar. Das heißt, die Auswertung der gesamtsystemischen Zielgrößen erfolgt stets auf Basis einer vollständigen Simulation der Fahraufgabe in Abhängigkeit der dafür berechneten Steuertrajektorie. Um dennoch den Einfluss geänderter Betriebsstrategien zu bewerten, werden im Rahmen dieser Arbeit zwei unterschiedlich parametrisierte Fuzzy-Systeme zur Adaption von  $\lambda$  variiert (vgl. Abschnitt 3.3.3). Der innersystemische Einfluss der Betriebsstrategie wird somit zwar nicht direkt visualisiert, kann jedoch aufgrund dessen Nachvollziehbarkeit anhand der energetischen Kosten für tiefere Erläuterungen und Rückfragen verwendet werden.

Die Anforderungsanalyse liefert die leistungsseitigen und energetischen Handlungsbedarfe bezüglich der Auslegung des elektrischen Antriebssystems zur Erfüllung einer prägenden Fahranforderung. Des Weiteren werden Auswirkungen auf den Fahrkomfort analysiert. Da die Anforderungsanalyse als Basis eines Konzeptentscheids dient, werden neben den Einflüssen der Betriebsstrategie und der Komponentendimensionierung zudem Maßnahmen zur Entspannung des Zielkonflikts zwischen Leistungsfähigkeit und Fahrkomfort untersucht. Eine solche Maßnahme ist in dieser Arbeit die Reduzierung der Höchstgeschwindigkeit des Hybridfahrzeugs. Die Variation der Höchstgeschwindigkeit erlaubt dabei die Bewertung des Handlungsspielraums hinsichtlich einer Reduzierung ursprünglicher Anforderung an den Antriebsstrang. Hierzu wird das Geschwindigkeitsprofil des prägenden Fahrzyklus entsprechend begrenzt. Der Einfluss der Begrenzung auf die Zeitdauer zum Durchfahren des Zyklus wird mittels Interpolation auf Basis derselben Wegstrecke sowohl für das Geschwindigkeits- als auch das Steigungsprofil berücksichtigt.

### 3.4.2 Definition von gesamtsystemischen Zielgrößen

Ein übergeordnetes Zielkriterium im System-Level Design hybrider Antriebsstränge ist der Kraftstoffverbrauch. Hierbei erfolgt die Analyse der Antriebseffizienz unter

Berücksichtigung der in Abschnitt 3.3.3 vorgestellten weichen Nebenbedingungen, welche den Lösungsraum anhand von Zielkriterien des Fahrkomforts beschränken.

Zudem erfordert die Methode die Formulierung geeigneter Zielgrößen für die Anforderungsanalyse bezüglich der Leistungsfähigkeit des Hybridkonzepts. Hierzu erfolgt mit der Definition des *Energievorhalts* in der HV-Batterie erstmals die Formulierung einer Zielgröße, welche die Bewertung der Batteriedimensionierung im Spannungsfeld aus Antriebseffizienz, Leistungsfähigkeit und Fahrkomfort erlaubt. Dieser Sachverhalt wird anhand von Bild 3.21 erläutert. Der Energievorhalt  $E_v$  beschreibt dabei die größte Differenz zwischen einem lokalen Maximum und einem lokalen Minimum in dem auf Basis des prägenden Lastfalls resultierenden Energieverlauf. Die größte Differenz ergibt sich dabei typischerweise in einem besonders anfordernden Abschnitt des Lastfalls, in welchem die Systemleistung des Antriebs über weite Strecken abgerufen wird. Dieser Abschnitt wird in dieser Arbeit als *Region of Interest* (RoI) bezeichnet. In diesem Fall ist das oberste Ziel der Erhalt der Leistungsfähigkeit. Demnach beschreibt der Energievorhalt die minimale notwendige Energiereserve in der HV-Batterie, um die Leistungsfähigkeit des Antriebs in der RoI zu erhalten. Eine hierfür geeignete Maßnahme ist die Ausschöpfung des betriebsstrategischen Potentials zur Reduzierung des Energievorhalts, sofern die Lage der RoI dies erlaubt. Im Verlauf in Bild 3.21 führt das Nachladen im Bereich der möglichen betriebsstrategischen Maßnahmen zu einem künstlichen Energievorhalt, wodurch kein „hardwareseitiger“ Energievorhalt  $E_{v,HW}$  notwendig ist, da der Ladezustand nicht unter die Batteriegrenze  $SoC_{min}$  abfällt ( $\Delta E_{Bat} > 0$  für alle  $t$ ). Ein hardwareseitiger Energievorhalt ist beispielsweise dann notwendig, wenn die Region of Interest bereits den Beginn des Zyklus beschreibt und sich der Ladezustand der HV-Batterie zum Start im Arbeitspunkt  $SoC(t_0) = SoC_{min}$  befindet. Durch die Realisierung eines hardwareseitigen Energievorhalts können sich Auswirkungen auf die elektrische Reichweite und somit die Antriebseffizienz ergeben, da in diesem Fall eine Verschiebung des Arbeitspunkts der HV-Batterie vorausgesetzt wird.

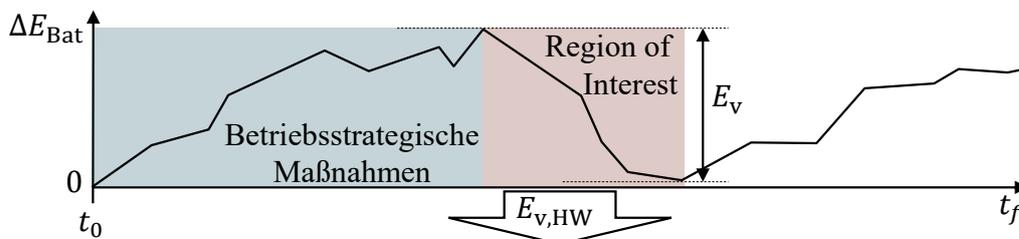


Bild 3.21: Schematische Darstellung der Definition des Energievorhalts  $E_v$ .

Die betriebsstrategischen Maßnahmen zum Erhalt des notwendigen Energieinhalts beeinflussen dabei die erforderlichen Peak- und Dauerleistungswerte der HV-Batterie und der elektrischen Maschinen. Zur Bewertung des Zielkonflikts werden für die Anforderungsanalyse die erforderlichen Peak- und Dauerleistungswerte der HV-Batterie und der elektrischen Maschinen als Zielgrößen verwendet.

Weiterhin werden Aspekte des Fahrkomforts als Zielkriterien berücksichtigt. Da der Verbrennungsmotor im Hybridkonzept typischerweise wesentlich kleiner dimensioniert ist als im konventionellen Antriebsstrang, steigt prinzipbedingt die Häufigkeit eines Betriebs an dessen Leistungsgrenzen. Dies wird durch die in Abschnitt 3.3.3 vorgestellte Anpassung der Schaltstrategie weiterhin verschärft. In diesem Fall wird das Drehzahlverhalten des Verbrennungsmotors von der Fahranforderung entkoppelt. Zur Bewertung dieser Entkopplung wird in dieser Arbeit ein Kennwert  $\kappa$  entwickelt, welcher als *Drehzahlniveau* bezeichnet wird. Dieser Kennwert objektiviert dabei den Fahrkomfort anhand der Abweichung des Drehzahlverhaltens des VM zwischen dem Hybridkonzept und der zugrundeliegenden konventionellen Leistungspositionierung und wird mittels

$$\kappa = \frac{\bar{n}_{\text{VM,hyb}}(\tau_{\text{ref}})}{\bar{n}_{\text{VM,kon}}(\tau_{\text{ref}})} \quad (3.18)$$

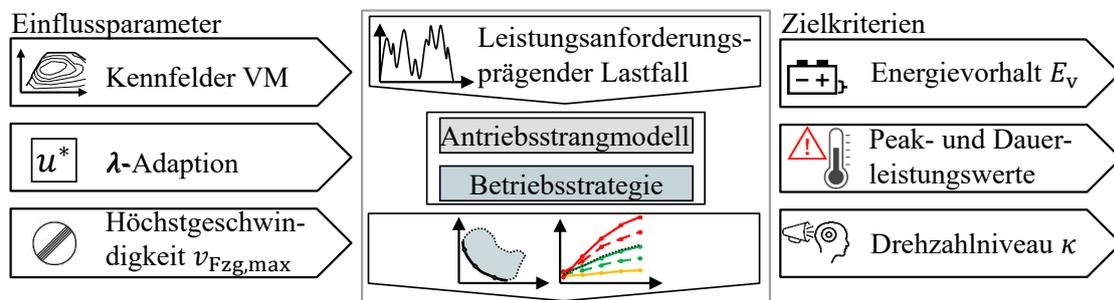
berechnet. Der Kennwert  $\kappa$  beschreibt, um welchen Faktor das Drehzahlniveau des Hybridantriebs im Mittel über ( $\kappa > 1$ ) beziehungsweise unter ( $\kappa < 1$ ) dem des konventionellen Fahrzeugs liegt. Zur Erhöhung der Aussagekraft werden die zum Vergleich der Drehzahlverläufe verwendeten Werte auf die Menge  $\tau_{\text{ref}}$  begrenzt. Diese Menge beinhaltet jene Zeitpunkte, in welchen der Verbrennungsmotor des Hybridfahrzeugs zum Antrieb verwendet wird.

### 3.4.3 Analyse und Visualisierung

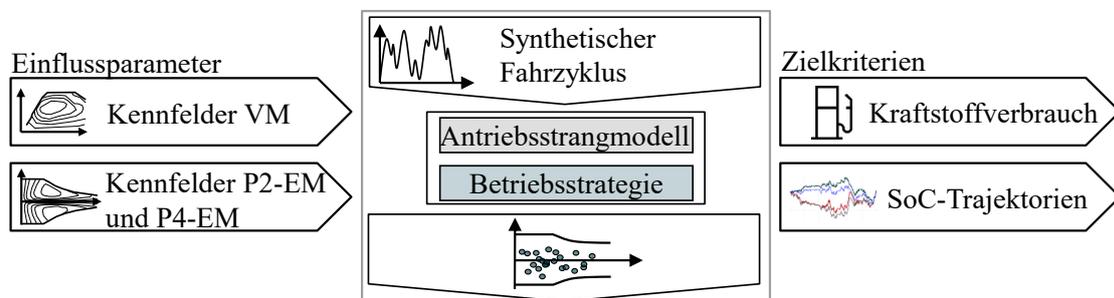
Die im vorherigen Abschnitt erläuterten Einflussparameter und Zielgrößen werden im Folgenden innerhalb zweier Untersuchungsrahmen zusammengefasst. Diese sind in Bild 3.22 anhand einer Systemdarstellung visualisiert und dienen zum einen der Generierung einer Entscheidungsbasis für einen Konzeptentscheid basierend auf gesamtsystemischen Zusammenhänge (vgl. Bild 3.22(a)). Hierzu werden die Einflüsse der verfügbaren Verbrennungsmotorleistung sowie der Höchstgeschwindigkeit in Kombination mit unterschiedlichen Fuzzy-Systemen zur Adaption des Äquivalenzfaktors und deren Wechselwirkungen untersucht. Die Anforderungsanalyse liefert hierzu den notwendigen Energievorrat der HV-Batterie sowie die erforderlichen Peak- und

Dauerleistungswerte des elektrischen Antriebssystems zum Erhalt der Leistungsfähigkeit. Mittels des Kennwerts  $\kappa$  werden zudem die Einflüsse auf Komfortaspekte analysiert. Als Entscheidungsgrundlage werden sowohl die Parametereinflüsse auf die Zielgrößen anhand von ICE-Plots als auch die jeweiligen Zielkonflikte zwischen den Zielgrößen visualisiert. Die auf Basis eines prägenden Lastfalls ermittelten Komponentendimensionen definieren im Anschluss die hardwareseitigen Systemgrenzen.

Unter Berücksichtigung der ermittelten Systemgrenzen dient der in Bild 3.22(b) gezeigte Untersuchungsrahmen der Identifikation von Optimierungspotentialen in der Komponentenauslegung des elektrischen Antriebssystems. Hierzu werden unterschiedliche Kombinationen aus VM, P2-EM und P4-EM variiert, welche die Leistungsanforderungen erfüllen. Für jede dieser Auslegungsvarianten wird auf Basis des entwickelten synthetischen Kundenzyklus deren optimale Betriebsstrategie anhand des konstanten Äquivalenzfaktors  $\lambda^*$  bestimmt. Auf Basis des Kraftstoffverbrauchs und eines Vergleichs der Ladezustandstrajektorien wird die Sensitivität des Gesamtsystems bezüglich der Kennfeldvariationen analysiert. Diese Analyse ist relevant, um die Aussagekraft der ermittelten Betriebspunktverteilungen als Grundlage einer Detailoptimierung der Antriebskomponenten zu untermauern.



(a) Untersuchungsrahmen der Anforderungsanalyse



(b) Untersuchungsrahmen zur Bewertung der Antriebseffizienz

Bild 3.22: Systemdarstellung der Untersuchungsrahmen.



In beiden Untersuchungsrahmen werden dabei dieselben weichen Nebenbedingungen verwendet. Die globale Nebenbedingung des Charge-Sustaining-Betriebs wird jedoch nur zur Bewertung der Antriebseffizienz berücksichtigt. Da keine Benchmarklösung als Vergleich für die Anforderungsanalyse existiert, ist die Ladezustandsneutralität in diesem Fall optional. Hierbei ist es in Abhängigkeit des Lastfalls möglich, dass ein ausgeglichener Ladezustand am Ende des Zyklus aufgrund der Systemgrenzen nicht erreicht werden kann.

Im Folgenden Kapitel wird die vorgestellte Methode zur Analyse und Visualisierung von gesamtsystemischen Zusammenhängen anhand eines praxisnahen Anwendungsbeispiels validiert.



## 4 Anwendung der Methode

In diesem Kapitel erfolgt die Anwendung der Methode zur Konzeptbewertung für den Einsatz in zwei beispielhaften Leistungspositionierungen. Hierzu wird eine der Leistungspositionierungen anhand eines Plug-In Hybridkonzepts (*PHEV*) und die andere Leistungspositionierung anhand eines autarken Hybridkonzepts (*HEV*) bewertet. Obwohl beide Anwendungsfälle mit einem P24-Konzept realisiert werden können, unterscheiden sich deren spezifische Anforderungen grundlegend. Zur Darstellbarkeit eines hohen Anteils der Fahranforderungen im EV-Modus, verfügt die PHEV-Anwendung über einen vergleichsweise hohen Energieinhalt in der HV-Batterie sowie einen größeren Beitrag des elektrischen Antriebssystems zur Gesamtsystemleistung. Im Gegensatz hierzu, werden für eine HEV-Anwendung in dieser Arbeit geringere Anforderungen hinsichtlich der elektrischen Reichweite und der elektrischen Leistungsfähigkeit des Antriebs festgelegt, wodurch sich sowohl der notwendige Energieinhalt der HV-Batterie und die elektrische Leistung der Komponenten als auch das Fahrzeuggewicht reduziert. Die HEV-Anwendung stellt somit ein Beispiel für eine geringere Leistungspositionierung als jene der PHEV-Anwendung dar.

In Tabelle 4.1 werden die zum Verständnis der Ergebnisse notwendigen Eckdaten der beispielhaften Anwendungsfälle zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Eckdaten der betrachteten Anwendungsfälle

<b>Fahrzeugdaten</b>	<b>PHEV</b>	<b>HEV</b>
Gesamtsystemleistung	355 - 425 kW	315 - 365 kW
Fahrzeuggewicht	>2350 kg	>2050 kg
Aufbauart	Limousine	Limousine
Summenleistung der EMs	255 kW	195 kW

Die angegebenen Wertebereiche der Gesamtsystemleistungen bezeichnen dabei die

jeweiligen Gesamtsystemleistungen der im Folgenden betrachteten Auslegungsvarianten. In Abhängigkeit der Verbrennungsmotorleistung stellt die maximale Summenleistung der elektrischen Maschinen einen jeweils anderen prozentualen Anteil der Gesamtsystemleistung dar. Hierzu wird eine überdimensionierte HV-Batterie angenommen, welche die Leistungsfähigkeit des Hybridantriebs in jeder Variante gewährleistet. Die HV-Batterien können hierbei die jeweiligen Peak-Summenleistung der elektrischen Maschinen darstellen. Im Folgenden wird der maximale Energieinhalt der HV-Batterie für die HEV-Anwendung auf 20 % des Energieinhalts der PHEV-Anwendung normiert.

Für die beiden Anwendungsfälle erfolgt im Abschnitt 4.1 die Anforderungsanalyse, anhand welcher die notwendigen hardwareseitigen Systemgrenzen zur Erfüllung einer prägenden Fahranforderung in Abhängigkeit der Einflussparameter identifiziert werden. Anhand geeigneter Visualisierungen wird der technische Handlungsspielraum analysiert, welcher dann als Grundlage der Entscheidungsfindung genutzt werden kann. Im Anschluss werden in Abschnitt 4.2 Optimierungspotentiale in der Komponentenauslegung identifiziert, welche einen Konzeptentscheid zusätzlich beeinflussen können. Aus Gründen der Übersichtlichkeit erfolgt eine umfassende Darstellung der Ergebnisse in diesem Kapitel nur für die PHEV-Anwendung. Analog hierzu werden die Ergebnisse der HEV-Anwendung im Anhang B.2 aufgeführt, auf welche im Rahmen der Ergebnisinterpretation und -diskussion referenziert wird.

## 4.1 Anforderungsanalyse bezüglich der Leistungspositionierung

Die Anforderungsanalyse beantwortet im Wesentlichen die Frage, ob eine bestimmte konventionelle Leistungspositionierung durch einen P24-Hybrid ersetzt werden kann und welche Konsequenzen sich hieraus für die Antriebsstrangauslegung ergeben. Die Bewertung der Einsatztauglichkeit unter Berücksichtigung der Kundenrelevanz erfordert deshalb zunächst die Auswahl einer geeigneten Fahranforderung, welche prägend für die in der Realität tatsächlich vorkommende Leistungsanforderung ist. Die Anforderungsanalyse erfolgt in diesem Abschnitt detailliert für die PHEV-Anwendung, wobei die gesamtsystemischen Zusammenhänge visualisiert und analysiert werden. Darauf basierend werden der Handlungsspielraum und die Handlungsbedarfe unter Berücksichtigung der Ergebnisse der HEV-Anwendung diskutiert und die Einsatztauglichkeit des P24-Konzepts bewertet.

### 4.1.1 Identifizierte Fahranforderung und Simulationsprämissen

Zur Validierung der Methode wird eine prägende Fahranforderung nach dem in Abschnitt 3.2.1 gezeigten Vorgehen für die PHEV-Anwendung identifiziert. Die zugrunde gelegte Datenbasis umfasst dabei 3501 Dauerlaufmessungen für eine bestimmte Leistungspositionierung der betrachteten Fahrzeugklasse auf deutschen Bundesautobahnen. Ein Kriterium zur Selektierung geeigneter Daten ist, dass die zulässige Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs in der Messung erreicht wird. In Tabelle 4.2 sind die grundlegenden Merkmale der Fahranforderung zusammengefasst.

Tabelle 4.2: Merkmale der prägenden Fahranforderung für die PHEV-Anwendung

Merkmale	Wert
Zykluslänge	6879 s
Zurückgelegte Wegstrecke	267,4 km
Mittlere Geschwindigkeit	140 km/h
Mittlere Steigung / Gefälle	1,9 % / 2,0 %

Die identifizierte Fahranforderung  $\Lambda(t) = [v(t), \alpha(t)]^T$  wird für die Simulation aufbereitet und dient als Basis für die folgenden Variationsstudien in Abschnitt 4.1.2. Zur Visualisierung der Fahranforderung und der damit einhergehenden Anforderungen an den Antriebsstrang ist ein Ergebnis aus der Variationsstudie in Bild 4.1 dargestellt. Das Diagramm zeigt neben dem Geschwindigkeitsverlauf die Leistungsverläufe der Antriebsmaschinen sowie die Energiebilanz der HV-Batterie  $\Delta E_{\text{Bat}}$ . Hierbei sind sämtliche Leistungswerte auf die jeweiligen Maxima der entsprechenden Antriebsmaschinen normiert. Analog hierzu wird die Energiebilanz auf den installierten Energieinhalt der Batterie normiert. Der Ladezustand zu Beginn der Simulation wird als Arbeitspunkt der Batterie  $SoC_{\text{min}}$  angenommen und bildet stets die Referenz zur Berechnung des notwendigen Energievorhalts. In der ersten Hälfte des Fahrzyklus wird die Höchstgeschwindigkeit kurzzeitig an einer Stelle erreicht, eine Geschwindigkeit von 200 km/h wird selten überschritten. Der Verbrennungsmotor liefert über weite Bereiche eine Leistung zwischen 30 % und 50 % bezogen auf dessen Maximalleistung. Die P2-EM wird in der ersten Hälfte überwiegend im generatorischen Betrieb verwendet, wohingegen die P4-EM mit Ausnahme der Rekuperationphasen für den Antrieb des Fahrzeugs genutzt wird. Die Erfüllung der Fahraufgabe im als Region of Interest bezeichneten Bereich (vgl. Abschnitt 3.4.2) stellt hohe Anforderungen an den Antriebsstrang.

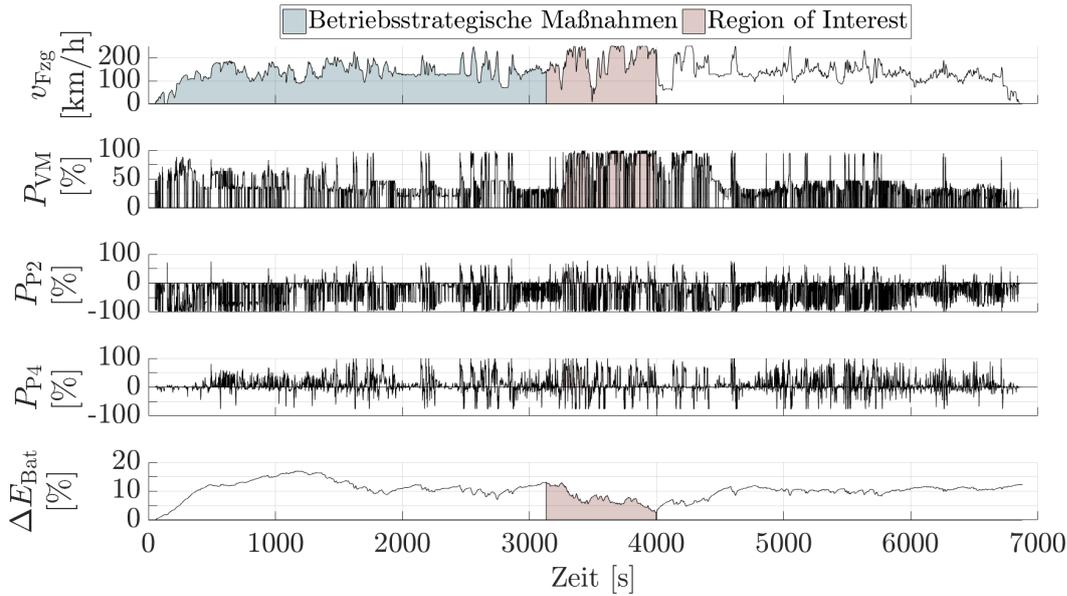


Bild 4.1: Simulationsergebnis einer Auslegungsvariante der PHEV-Anwendung im prägenden Lastfall der Anforderungsanalyse.

Der Verbrennungsmotor wird hierbei nahezu im gesamten Bereich mit maximaler Leistung betrieben und die P2-EM wird vergleichsweise häufig als zusätzliche Antriebsquelle genutzt. In diesem Bereich wird die P4-EM ebenfalls häufig an deren Leistungsgrenze betrieben. Im restlichen Zeitverlauf zeigen sich ähnliche Leistungsverläufe wie jene der Leistungen in der ersten Hälfte des Fahrzyklus. Anhand der im Diagramm gekennzeichneten Region of Interest wird der notwendige Energievorrat im Rahmen der Anforderungsanalyse bewertet. Die Region of Interest erstreckt sich dabei über einen Zeitraum von 750s, in welchem die mittlere Geschwindigkeit 198 km/h beträgt. Hierbei ist zu beachten, dass sich der zeitliche Rahmen der Region of Interest in Abhängigkeit der jeweiligen Antriebsstrangkonfiguration verändert. Der, der Region of Interest vorangestellte, Zeitverlauf bezeichnet einen Bereich, in welchem der Ladezustand der Batterie mittels geeigneter Adaption von  $\lambda$  auf ein bestimmtes Niveau angehoben werden kann, um im Folgenden den hardwareseitigen Energievorrat  $E_{v,HW}$  zu reduzieren. Die Anforderungsanalyse quantifiziert den Handlungsbedarf hinsichtlich der notwendigen leistungsseitigen und energetischen Auslegung der Komponenten des elektrischen Antriebssystems. Da ein solcher Handlungsbedarf in dieser Arbeit lediglich auf Basis des vorgestellten Fahrzyklus quantifiziert wird, erfolgt die Parametrierung der Betriebsstrategie nahezu unabhängig von der Fahranforderung. Somit erfolgt nach dem Durchfahren der Region of Interest ein erneutes Nachladen der Batterie analog zum blau gekennzeichneten Zeitintervall.

Dieser Aspekt trägt zur Akzeptanz der Ergebnisse bei, da die Fahranforderung in der Realität in der Regel im Vorfeld nicht bekannt ist. Auf der anderen Seite verhindert dies einen fairen Vergleich des Kraftstoffverbrauchs, da der Ladezustand am Ende des Zyklus nicht dem Wert des SoC zu Beginn der Fahrt entspricht. Da der Kraftstoffverbrauch im Rahmen der Anforderungsanalyse eine untergeordnete Rolle spielt, kann dieses Vorgehen als geeignet angesehen werden.

Für die folgenden Variationsstudien zur Anforderungsanalyse werden die grundlegenden Simulationsprämissen in Tabelle 4.3 zusammengefasst.

Tabelle 4.3: Grundlegende Simulationsprämissen der Anforderungsanalyse

<b>Einflussgröße</b>	<b>Wert/Einstellung</b>
Beschränkung von Motorstarts	aktiv
Beschränkung des seriellen Modus	aktiv
Beschränkung der Lastpunktanhebung	aktiv
Diskretisierung des Steuerraums $\mathbf{U}$	$\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{21 \times 20}$

Somit sind für die folgenden Simulationen sämtliche in Bild 3.19 dargestellten weichen Nebenbedingungen aktiv, deren Parametrierung identisch mit jener in der Verifikation der Betriebsstrategie verwendet ist (vgl. Anhang A.2). Des Weiteren wird die Diskretisierung des Steuerraums  $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{21 \times 20}$  verwendet. Die Simulationsprämissen sind dabei für die PHEV- und HEV-Anwendungen identisch.

### 4.1.2 Einflussanalyse der Auslegungsparameter

Das Spannungsfeld aus Antriebseffizienz, Leistungsfähigkeit und Fahrkomfort ist durch die Reduzierung der VM-Leistung begründet. Für die in dieser Arbeit betrachteten Hybridkonzepte wird die konventionelle Verbrennungsmotorleistung durch eine Erhöhung der Leistung des elektrischen Antriebssystems substituiert. Die Reduzierung der verbrennungsmotorischen Leistung im Systemverbund wirkt sich dabei positiv auf den Bauraum, die Kosten sowie das Fahrzeuggewicht aus. Nach Stand der Technik ist die Leistung des Verbrennungsmotors maßgebend für die dauerhafte Höchstgeschwindigkeit  $v_{\text{Fzg,max}}$ , weshalb deren Reduzierung in den Anforderungen eine geeignete Maßnahme zum Ausgleich der reduzierten VM-Leistung darstellt. Prinzipiell kann somit die Höchstgeschwindigkeit auch dann erreicht werden, wenn sich

die RoI gleich zu Beginn des prägenden Lastfalls einstellt. Zusätzlich zur  $v_{\text{Fzg,max}}$ -Reduzierung erfolgt eine Variation der Betriebsstrategie, sodass sich die in Tabelle 4.4 aufgeführten Realisierungen der Einflussparameter ergeben. Hierbei definieren die Indizes 1-4 der VM-Varianten aufsteigende Leistungsstufen. Diese bewegen sich im Bereich von 100 kW bis 170 kW. Zur Wahrung der Vergleichbarkeit weisen die VM-Kennfelder eine ähnliche Charakteristik auf. Die verwendeten Auslegungen der P2-EM und der P4-EM sind identisch für jede der untersuchten Varianten.

Tabelle 4.4: PHEV: Realisierungen der Einflussparameter zur Anforderungsanalyse

<b>Einflussparameter</b>	<b>Realisierungen</b>			
VM-Variante ( $P_{\text{VM}}$ [kW])	VM1 (100)	VM2 (120)	VM3 (140)	VM4 (170)
Forderung $v_{\text{Fzg,max}}$ [km/h]	210	230	250	
Fuzzy-System	A		B	

Die Leistungen der elektrischen Maschinen sind dabei so gewählt, dass sowohl Konfigurationen mit einem höheren als auch solche mit einem geringeren Systemleistungsgewicht im Vergleich zum konventionellen Fahrzeug existieren, wodurch der Handlungsspielraum erweitert wird. Dieser Sachverhalt motiviert ebenfalls die Untersuchung des Einflusses der Höchstgeschwindigkeitsanforderung. Die betrachtete konventionelle Leistungspositionierung erreicht eine Höchstgeschwindigkeit von 250 km/h, welche um je 20 km/h bis 210 km/h reduziert wird. Des Weiteren wird ein Fuzzy-System untersucht, welches den Äquivalenzfaktor ausschließlich in Abhängigkeit der Energiebilanz  $\Delta E_{\text{Bat}}$  hinsichtlich des Erhalts der Leistungsfähigkeit anpasst (Variante A). Zur Berücksichtigung von Komfortaspekten erfolgt zudem die Untersuchung des in Bild 3.17 vorgestellten Fuzzy-Systems zur Adaption von  $\lambda$  (Variante B). Eine detaillierte Beschreibung der Fuzzy-Systeme wird im Anhang A.3 gezeigt.

Sämtliche Varianten erfüllen die Fahranforderung, mit Ausnahme bei Verwendung von VM1 und VM2 im originalen Fahrzyklus mit einer Höchstgeschwindigkeitsanforderung von 250 km/h. Hierbei ergibt sich in Beschleunigungsphasen bei  $v_{\text{max}} > 230$  km/h aufgrund des höheren Leistungsgewichts eine höhere Regelabweichung. Da die Anzahl dieser Situationen sowie deren Zeitanteile gering sind, wirkt sich dieser Aspekt jedoch nicht auf die im Folgenden gezeigten gesamtsystemischen Zusammenhänge aus. Eine ergänzende Zusammenfassung der Simulationsergebnisse anhand von statistischen Merkmalen ist in Tabelle B.1 im Anhang B.1 gegeben.



## Analyse bezüglich des Energievorhalts und des Drehzahlbereichs

Die Analyse gesamtsystemischer Zusammenhänge dient der Bewertung des Handlungsbedarfes und -spielraums, welcher aus der Erfüllung von kundenrelevanten Anforderungen resultiert. Die Analyse erfolgt in dieser Arbeit auf Basis geeigneter Visualisierungen der gesamtsystemischen Zusammenhänge mittels ICE-Plots. Hierzu zeigt Bild 4.2 die Einflüsse der Auslegungsparameter auf die Zielgrößen hardwareseitiger Energievorhalt  $E_{v,HW}$  und Drehzahlbereich  $\kappa$ , deren Werte durch die Ordinate beschrieben werden. Die Normierung der Werte erfolgt dabei analog zur Normierung in Bild 4.1. Die Abszisse bezeichnet die jeweiligen Realisierungen des betrachteten Parameters  $p_S$ . Im Bild 4.2(a) ist  $p_S$  die VM-Leistung  $P_{VM}$  und die Kurvenschar zeigt die Einflüsse der restlichen Parameter Höchstgeschwindigkeitsanforderung  $v_{Fzg,max}$  und Fuzzy-System zur Adaption des Äquivalenzfaktors. Die Darstellung erfolgt in Bild 4.2(b) analog für  $p_S = v_{Fzg,max}$ . Aus Diagramm 4.2(a) ist ersichtlich, dass der notwendige hardwareseitige Energievorhalt mit zunehmender VM-Leistung abnimmt.

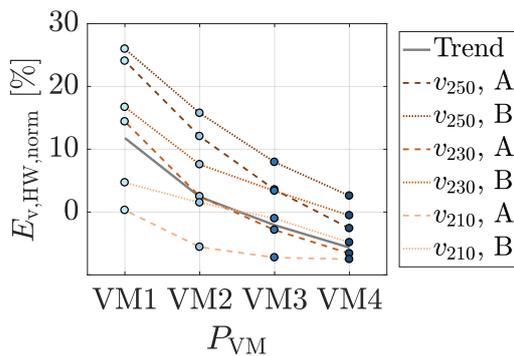
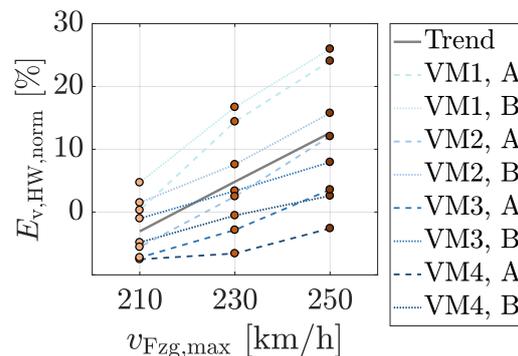
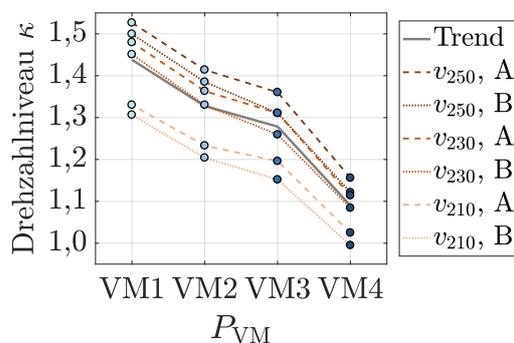
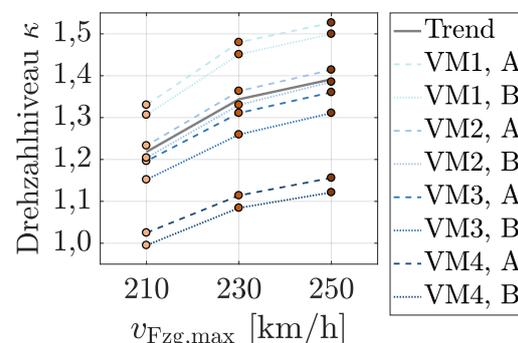
(a) Einfluss von  $P_{VM}$  auf  $E_{v,HW}$ (b) Einfluss von  $v_{Fzg,max}$  auf  $E_{v,HW}$ (c) Einfluss von  $P_{VM}$  auf  $\kappa$ (d) Einfluss von  $v_{Fzg,max}$  auf  $\kappa$ 

Bild 4.2: PHEV: Einflüsse auf den Energievorhalt und das Drehzahlbereich.

Dabei fallen die Werte bei Verwendung von VM4 mit Ausnahme einer Variante unter den Wert Null, was bedeutet, dass in diesen Fällen das im Vorfeld der Region of Interest geschaffene Energieniveau zum Durchfahren derselben ausreicht. Des Weiteren zeigt sich, dass die Berücksichtigung von Komfortaspekten mittels des Fuzzy-Systems B zu jeweils höheren Werten des notwendigen Energievorhalts im Vergleich zu den Varianten mit Fuzzy-System A führt. Bei Verwendung von VM1 und Fuzzy-System B resultiert die Erfüllung der ursprünglichen Fahranforderung ohne Geschwindigkeitsbegrenzung ( $v_{250}$ ) in einem notwendigen Energievorhalt von  $E_{v,HW} = 26\%$  des installierten Energieinhalts der HV-Batterie. Durch die Verwendung von VM4 wird der Wert von  $E_{v,HW}$  auf  $4\%$  reduziert. Erfolgt zudem eine Reduzierung der maximalen Höchstgeschwindigkeit auf  $230\text{ km/h}$ , ergibt sich der notwendige Energievorhalt zu Null. Der Einfluss der Reduzierung der  $v_{Fzg,max}$ -Anforderung zeigt sich hierbei insbesondere anhand der Wertebereiche, welche die jeweilige Kurve einer Geschwindigkeitsvariante abbildet. Somit wird bei niedrigerer Höchstgeschwindigkeit ein geringerer Energievorhalt benötigt. Der Einfluss von  $v_{Fzg,max}$  auf die Zielgröße steigt dabei mit fallender VM-Leistung. Dieser Zusammenhang wird in 4.2(b) verdeutlicht, wobei die Kurven der Varianten mit geringerer VM-Leistung höhere Gradienten aufweisen. Aus diesem Diagramm ist zudem ersichtlich, dass ein Energievorhalt von  $0\%$  bei Verwendung von VM1 lediglich unter Vernachlässigung von Komfortaspekten (Verwendung von Fuzzy-System A) und einer Reduzierung von  $v_{Fzg,max}$  auf  $210\text{ km/h}$  erreicht wird. Dem hingegen erlaubt die Verwendung von VM4 die Berücksichtigung von Komfortaspekten mittels Fuzzy-System B bis zu einer  $v_{Fzg,max}$ -Anforderung von  $230\text{ km/h}$  ohne Notwendigkeit eines hardwareseitigen Energievorhalts.

Der Einfluss der Auslegungsparameter auf Komfortaspekte wird in den unteren beiden Diagrammen auf Basis des Drehzahlniveaus  $\kappa$  gezeigt. Ein Wert von  $\kappa = 1$  entspricht dabei einem identischen mittleren Drehzahlniveau des Verbrennungsmotors des hybriden Antriebsstrangs im Vergleich zum konventionellen Referenzfahrzeug. Dieser Wert wird nach Diagramm 4.2(c) bei Verwendung von VM4, Fuzzy-System B und einer Reduzierung von  $v_{Fzg,max}$  auf  $210\text{ km/h}$  erreicht. Das Drehzahlniveau steigt dabei mit sinkender VM-Leistung auf bis zu  $152\%$  des Referenzwerts bei Verwendung von VM1 an. Die Zielgröße  $\kappa$  wird dabei maßgeblich durch die verfügbare verbrennungsmotorische Leistung beeinflusst. Dieser Zusammenhang wird ebenfalls in Diagramm 4.2(d) verdeutlicht, wobei die Leveffekte (Differenz zwischen den Kurven bezüglich der Ordinate) der VM-Varianten höher wiegen als die Gradienten der entsprechenden Kurven. Diese Erkenntnis wird zudem durch die Verläufe der jeweiligen Trendlinie untermauert. Die betriebsstrategischen Maßnahmen bieten in diesem Sze-

nario nahezu unabhängig von der Höchstgeschwindigkeit ein Potential zur Reduktion des Drehzahl-niveaus um ca. 2 Prozentpunkte. Dieses Potential erhöht sich bei Verwendung des Verbrennungsmotors VM3 auf ca. 5 Prozentpunkte. Die gepunkteten Kurven, welche die Verwendung von Fuzzy-System B bezeichnen, verlaufen dabei stets unterhalb der entsprechenden Kurven bei Verwendung von Fuzzy-System A. Demnach besteht unter Berücksichtigung der Zusammenhänge in den Diagrammen 4.2(a) und 4.2(b) ein Zielkonflikt zwischen dem Energievorhalt und dem Drehzahl-niveau, welcher in Abschnitt 4.1.3 näher untersucht wird.

Die zentralen qualitativen Erkenntnisse aus der Analyse bezüglich des Energievorhalts und des Drehzahl-niveaus werden wie folgt zusammengefasst:

**Erkenntnis 1:** Sowohl eine Erhöhung der VM-Leistung als auch eine Reduzierung der Höchstgeschwindigkeit verringern den notwendigen Energievorhalt.

**Erkenntnis 2:** Das Drehzahl-niveau wird maßgeblich durch die Leistung des Verbrennungsmotors beeinflusst.

**Erkenntnis 3:** Mit sinkender VM-Leistung steigt der Einfluss einer  $v_{\text{Fzg,max}}$ -Reduzierung auf den notwendigen Energieinhalt an.

**Erkenntnis 4:** Es besteht ein Zielkonflikt zwischen der Reduzierung des Energievorhalts und der Reduzierung des Drehzahl-niveaus.

Hierbei sind die Erkenntnisse 3 und 4 nur durch die ICE-Plots ersichtlich. Solche Erkenntnisse werden im Folgenden analog zu obigem Beispiel hervorgehoben.

### **Analyse bezüglich der leistungsseitigen HV-Batterieauslegung**

Nach der vorangegangenen Analyse der gesamtsystemischen Zusammenhänge bezüglich des Fahrkomforts und der energetischen Auslegung der Batterie, werden im Folgenden die Einflüsse auf die leistungsseitige Auslegung der HV-Batterie visualisiert. Die Struktur der in Bild 4.3 gezeigten Diagramme ist dabei identisch zu jener in Bild 4.2, mit Ausnahme der zur Analyse herangezogenen Zielgrößen. Die Leistungswerte sind hierbei auf die maximale mechanische Systemleistung des elektrischen Antriebs normiert, bestehend aus der P2-EM und der P4-EM. Diese Normierung ist sinnvoll, da eine theoretische HV-Batterie angenommen wird, deren Maximalleistung stets oberhalb der Summenleistung der EMs liegt. Diese Annahme erlaubt die Analyse des vom Antriebssystem geforderten Leistungsbedarfs an die HV-Batterie.

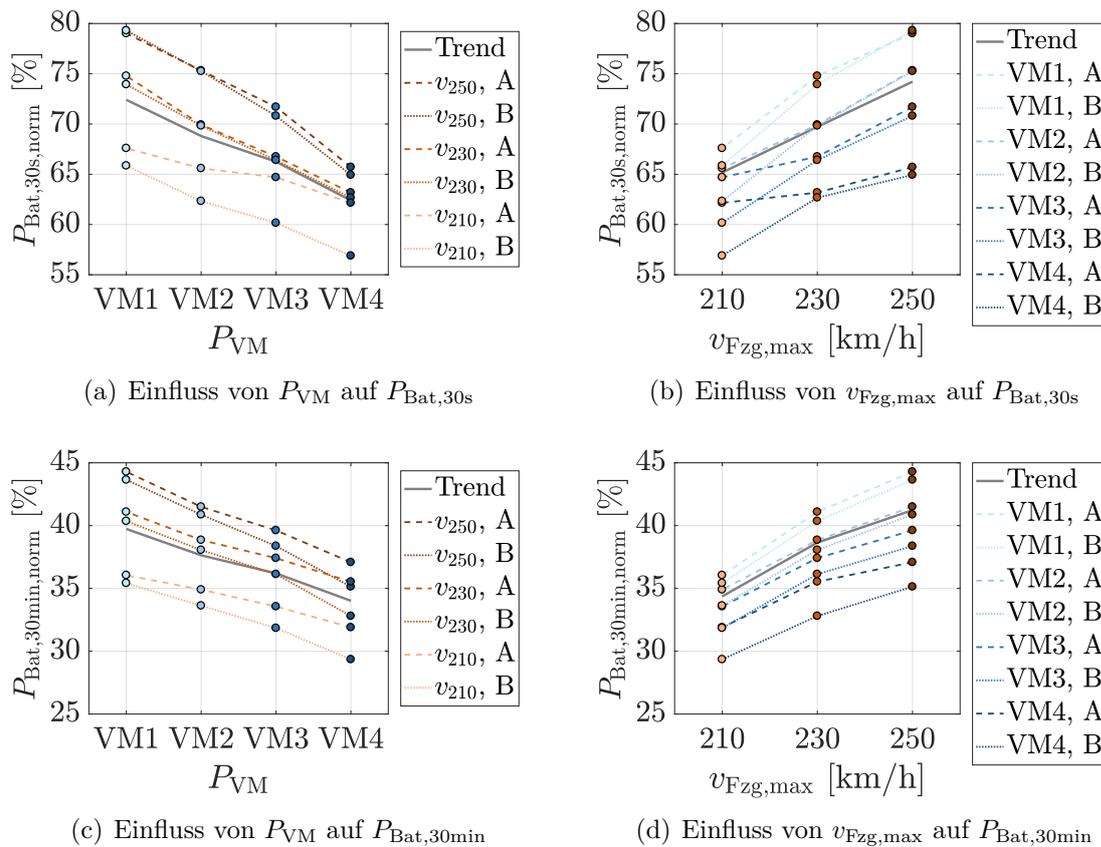


Bild 4.3: PHEV: Einflüsse auf die Peak- und Dauerleistungswerte der Batterie.

Die Werte der Ordinaten entsprechen den jeweiligen 30 s- und 30 min-Werten, welche anhand der zeitgewichteten Belastungsdauerkurven ermittelt werden. Hierbei ist zu beachten, dass die zugrundeliegenden Leistungsverläufe sowohl positive als auch negative Werte aufweisen. Da die zeitgewichteten Belastungsdauerkurven die Effektivwerte des Leistungsverlaufs abbilden, sind die in der Analyse auftretenden Werte stets positiv.

Das Diagramm 4.3(a) zeigt, dass die in Abhängigkeit der Verbrennungsmotorleistung erforderliche Peak-Leistung der HV-Batterie Werte zwischen 57 % und 80 % der maximalen Systemleistung des elektrischen Antriebs annimmt. Mit steigender VM-Leistung nimmt der 30 s-Wert für sämtliche Varianten ab. Im Mittel (Trendkurve) wird der Wert zwischen VM1 und VM4 dabei von 72,5 % auf 62,5 % reduziert. Der Einfluss der betriebsstrategischen Maßnahmen erhöht sich hierbei insbesondere bei steigender VM-Leistung. Die Kurven der Varianten mit Verwendung von Fuzzy-System B verlaufen dabei unterhalb der entsprechenden Kurven der Varianten mit Fuzzy-System A (mit Ausnahme bei der Verwendung von VM1 im origi-

nenalen Geschwindigkeitsverlauf). Dieser Zusammenhang ist durch die Beschränkung von Nachladephasen mit hohen elektrischen Leistungen auf Bereiche mit geringen Auswirkungen auf den Fahrkomfort begründet. Die Zusammenhänge in Bild 4.3(b) zeigen zudem eine deutliche Wechselwirkung zwischen dem Einfluss von  $v_{\text{Fzg,max}}$  und dem Einfluss von betriebsstrategischen Maßnahmen, welcher mit sinkender Höchstgeschwindigkeit zunimmt. Das größte betriebsstrategische Potential zur Reduzierung der notwendigen Peak-Leistung der HV-Batterie ergibt sich bei der höchsten verbrennungsmotorischen Leistung und einer Reduzierung von  $v_{\text{Fzg,max}}$  auf 210 km/h.

Die grundlegenden Zusammenhänge bezüglich der Dauerleistungswerte der Batterie in den unteren Diagrammen sind ähnlich zu jenen Zusammenhängen bezüglich der Peak-Leistungswerte. Die Simulationen der unterschiedlichen Varianten resultieren dabei in Dauerleistungswerten im Bereich von 29 % und 44 % der maximalen elektrischen Systemleistung. Hierbei nimmt der Einfluss von  $v_{\text{Fzg,max}}$  bei sinkender VM-Leistung leicht zu. Die Stärke der Wechselwirkungen zwischen der Verbrennungsmotorleistung beziehungsweise der Höchstgeschwindigkeit und dem Einfluss der Betriebsstrategie wird gegenüber der Analyse der 30 s-Werte reduziert.

Die zentralen qualitativen Erkenntnisse aus der Analyse bezüglich der leistungsseitigen Batterieauslegung werden wie folgt zusammengefasst:

**Erkenntnis 1:** Sowohl eine Erhöhung der VM-Leistung als auch eine Reduzierung von  $v_{\text{Fzg,max}}$  verringern die notwendige Peak- und Dauerleistung der Batterie.

**Erkenntnis 2:** Das betriebsstrategische Potential zur Reduzierung der notwendigen Dauerleistung steigt mit zunehmender VM-Leistung.

**Erkenntnis 3:** Mit sinkender VM-Leistung steigt der Einfluss der  $v_{\text{Fzg,max}}$ -Reduzierung auf die notwendige Dauerleistung der Batterie.

### **Analyse bezüglich der leistungsseitigen Auslegung von P2-EM und P4-EM**

In diesem Abschnitt erfolgt die Analyse der erforderlichen Dauerleistungswerte der P2-EM und der P4-EM. Diese sind auf die jeweilige Maximalleistung der entsprechenden elektrischen Maschine normiert. Die Anordnung der gezeigten Diagramme in Bild 4.4 erfolgt dabei analog zu den vorangegangenen ICE-Plots, wobei die oberen Grafiken den Einfluss auf den 30 min-Wert der P2-EM und die unteren Grafiken den Einfluss auf den 30 min-Wert der P4-EM beschreiben.

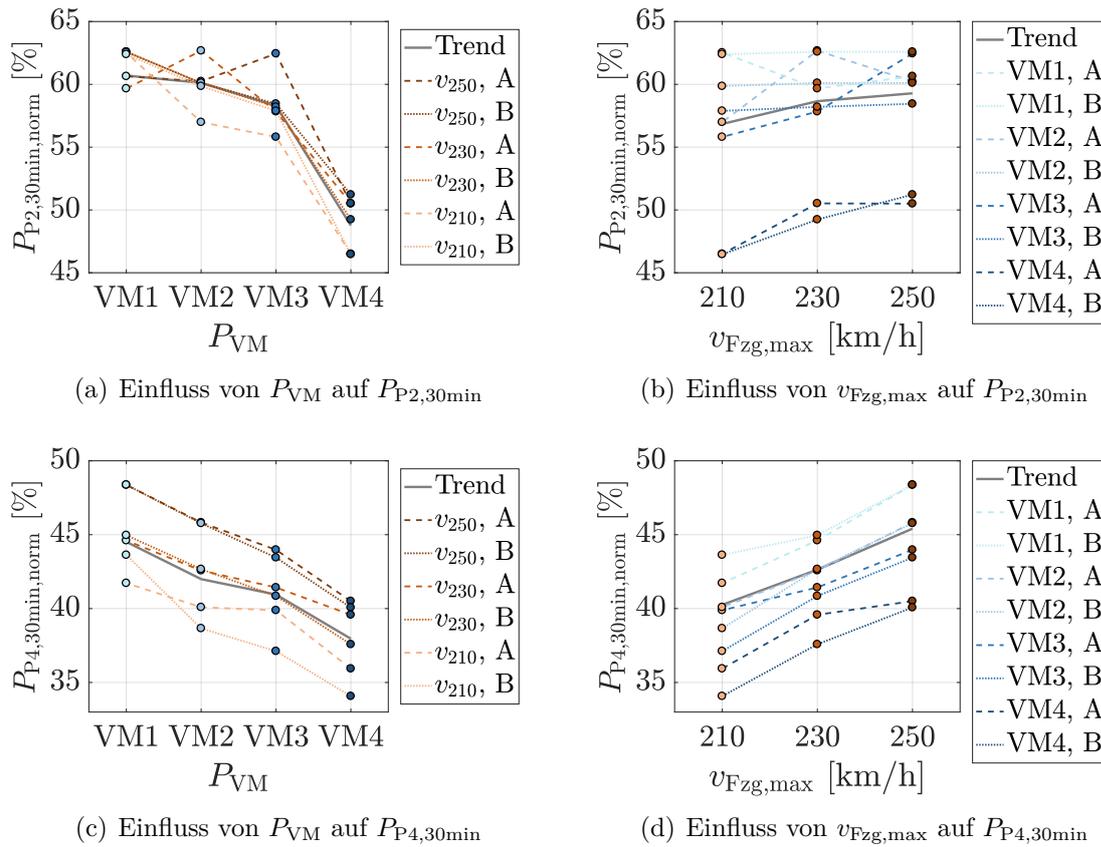


Bild 4.4: PHEV: Einflüsse auf die Dauerleistungswerte von P2- und P4-EM.

Die Trendkurve im Diagramm 4.4(a) fällt mit steigender VM-Leistung ab, wobei sich der größte Gradient zwischen VM3 und VM4 einstellt. Die qualitativen Verläufe der Einflüsse bei Verwendung von Fuzzy-System B sind dabei ähnlich zueinander. Im Gegensatz hierzu unterscheiden sich die Verläufe der Kurven für die verschiedenen Varianten im Bereich von VM1-VM3 deutlich. Dieser Zusammenhang ergibt sich aufgrund der Funktionsweise der ECMS in Kombination mit der verwendeten Adaption des Äquivalenzfaktors. Da die Adaption mittels des Fuzzy-Systems A lediglich auf der aktuellen Energiebilanz basiert, ergeben sich für die unterschiedlichen Energietrajektorien verschiedene Werte des Äquivalenzfaktors zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Dies führt dann zu einer unterschiedlichen Drehmomentaufteilung und somit letztlich zu verschiedenen Betriebspunkten. Da sich die Dauerleistungswerte aus einer zusammenhängenden zeitlichen Sequenz berechnen, führt dies zu den im Diagramm gezeigten auffälligen Zusammenhängen. Diese Effekte zeigen sich bei der Verwendung von Fuzzy-System B nicht, da die Adaption durch die Berücksichtigung weiterer zyklusabhängiger Eingangsgrößen zur Sicherstellung des Fahrkomforts

robuster gegenüber Änderungen der Fahrzeugkonfiguration ist. Dieser Sachverhalt wird auch in Diagramm 4.4(b) verdeutlicht, wobei die notwendigen Dauerleistungen der P2-EM mit höheren Geschwindigkeitsgrenzen leicht zunehmen (Trendkurve). Der Einfluss der Höchstgeschwindigkeit ist im Vergleich zu den Einflüssen der VM-Leistung und der Betriebsstrategie gering. Dieser Zusammenhang ergibt sich durch die überwiegende Verwendung der P2-EM zur Lastpunktanhebung, wobei die Höhe der möglichen Nachladeleistung mit der verfügbaren VM-Leistung korreliert. Aufgrund der hohen Varianz der erforderlichen Dauerleistungswerte der P2-EM bezüglich der Betriebsstrategie empfiehlt sich eine Auslegung dieser Komponente auf Basis der Trendkurve.

In Diagramm 4.4(c) ergeben sich ähnliche Zusammenhänge wie jene der Analyse hinsichtlich der Batteriedauerleistung in Bild 4.3(c). Die notwendigen Dauerleistungen der P4-EM umfassen Werte im Bereich von 34 % bis 48 % der maximalen EM-Leistung. Der niedrigste Dauerleistungswert ergibt sich bei Verwendung von VM4 und Fuzzy-System B in Kombination mit einer Reduzierung von  $v_{\text{Fzg,max}}$  auf 210 km/h. Der höchste Wert von 48 % ist zur Erfüllung der originalen Fahranforderung und bei Verwendung von VM1 notwendig. Insgesamt fällt die notwendige Dauerleistung der P4-EM mit steigender Leistung des Verbrennungsmotors. Der Einfluss von Komfortmaßnahmen (Fuzzy-System B) wirkt sich bei höheren VM-Leistungen und geringerer Höchstgeschwindigkeit stärker auf die Zielgröße aus. Dies wird anhand der Differenzen zwischen den jeweiligen Varianten, welche sich lediglich durch das verwendete Fuzzy-System unterscheiden, in Bild 4.4(d) weiterhin verdeutlicht. Ein Vergleich der Leistungsverläufe (vgl. Anhang B.1) der Varianten „VM4,  $v_{210}$ , A“ und „VM4,  $v_{210}$ , B“ zeigt, dass sich über weite Bereiche ein dem optimalen Äquivalenzfaktor ähnlicher konstanter Wert für  $\lambda$  bei Verwendung des Fuzzy-Systems A einstellt. Dies hat zur Folge, dass die elektrische Energie in diesen Bereichen günstiger bewertet wird als in denselben Bereichen bei Verwendung von Fuzzy-System B. Hieraus resultiert ein Steuerungsverhalten, welches die P4-EM hinsichtlich einer Verbesserung der Antriebseffizienz stärker ausnutzt und somit höhere Leistungen abrufen. Die genannten Bereiche verlängern sich dabei mit steigender Verbrennungsmotorleistung sowie der Reduzierung der Höchstgeschwindigkeit, da die Energiebilanz in diesen Fällen häufiger auf einem günstigen Niveau verläuft. Demnach ergibt sich ein erhöhter Freiheitsgrad der Betriebsstrategie hinsichtlich einer Verbesserung der Antriebseffizienz bei einer „Entschärfung“ der Fahranforderung bzw. Erhöhung der verbrennungsmotorischen Leistung.

Die zentralen qualitativen Erkenntnisse aus der Analyse bezüglich der leistungssei-

tigen Auslegung von P2-EM und P4-EM werden wie folgt zusammengefasst:

**Erkenntnis 1:** Sowohl eine Erhöhung der VM-Leistung als auch eine Reduzierung von  $v_{\text{Fzg,max}}$  verringern die notwendigen Dauerleistungen der elektrischen Maschinen.

**Erkenntnis 2:** Die Verfügbarkeit hoher VM-Leistungen in Kombination mit einer  $v_{\text{Fzg,max}}$ -Reduzierung bieten betriebsstrategisches Potential zur Verringerung der notwendigen Dauerleistung der P4-EM.

**Erkenntnis 3:** Die notwendige Dauerleistung der P2-EM wird maßgeblich durch die verfügbare Verbrennungsmotorleistung beeinflusst.

**Erkenntnis 4:** Die Korrelation zwischen Betriebsstrategie und Leistung des Verbrennungsmotors führt zu einer hohen Varianz der notwendigen Dauerleistungswerte der P2-EM.

### 4.1.3 Handlungsbedarfe und Handlungsspielraum

Im vorangegangenen Abschnitt erfolgt die Analyse gesamtsystemischer Zusammenhänge anhand von ICE-Plots, welche die Einflüsse der Auslegungsparameter auf die jeweiligen Zielgrößen visualisieren. Im Folgenden werden die hieraus gewonnenen Erkenntnisse um eine Analyse der vorhandenen Zielkonflikte zwischen den Auslegungszielen erweitert. Auf Basis der gesamtsystemischen Zusammenhänge wird am Ende dieses Abschnitts eine Diskussion der Handlungsbedarfe sowie des Handlungsspielraums als Grundlage eines fundierten Konzeptentscheids durchgeführt.

#### Zielkonfliktanalyse

Neben des bereits identifizierten Zielkonflikts zwischen der Reduzierung des hardwareseitigen Energievorhalts und der Verbesserung des Fahrkomforts durch Verringerung des Drehzahlniveaus wird aus Bild 4.5 ein weiterer Zielkonflikt zwischen dem Energievorhalt und der notwendigen Dauerleistung der Batterie ersichtlich. Hierbei wird insbesondere der Handlungsspielraum mittels betriebsstrategischer Maßnahmen analysiert. Varianten, welche sich lediglich durch das verwendete Fuzzy-System unterscheiden, werden durch die Verbindung mittels einer Linie gekennzeichnet. Die Steigungen der Geraden beschreiben dabei für sämtliche Varianten die Grenzkosten der Zielkonflikte  $\frac{\Delta E_{v,HW}}{\Delta \kappa}$  und  $\frac{\Delta E_{v,HW}}{\Delta P_{\text{Bat},30\text{min}}}$ .



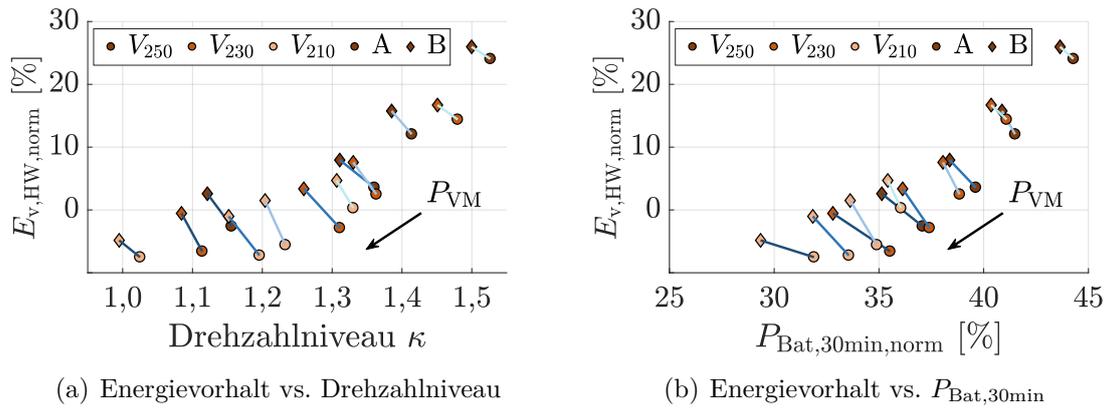


Bild 4.5: PHEV: Analyse der Zielkonflikte hinsichtlich der Auslegungsziele.

Unter Berücksichtigung der Theorie zur multikriteriellen Optimierung (vgl. Abschnitt 2.1.1) beschreibt die Linie zwischen den beiden Punkten im linken unteren Bereich von Diagramm 4.5(a) die Pareto-Front. Aufgrund der Tatsache, dass der Fokus in dieser Arbeit auf der Analyse und Visualisierung gesamtsystemischer Zusammenhänge und nicht auf der Optimierung liegt, erfolgt eine äquivalente Darstellung auch für die dominierten Lösungen. Die bisherigen Erkenntnisse spiegeln sich in der Visualisierung der Lösungen wieder, wobei höhere VM-Leistungen und geringere Höchstgeschwindigkeiten die Werte beider Zielgrößen verbessern. Für jede dieser Varianten ergibt sich ein Zielkonflikt zwischen dem notwendigen Energievorhalt und der Erfüllung von Komfortanforderungen. Bei Erfüllung der originalen Fahranforderung ( $v_{Fzg,max}=250$  km/h) mit VM4 (dunkle Linie) kann somit das Drehzahlniveau anhand der Betriebsstrategie um 4 % reduziert werden, wodurch sich jedoch ein vorhandenes Energiepolster (negativer Zahlenwert des Energievorhalts) von 3 % in einen notwendigen hardwareseitigen Energievorhalt von 3 % der installierten Batterieleistung umschlägt. Der identifizierte Zielkonflikt ist durch die unterschiedliche Ausnutzung des Nachladepotentials im Vorfeld der Region of Interest begründet. Hierbei erfolgt bei Verwendung von Fuzzy-System A eine stärkere Gewichtung des Auslegungsziels eines geringen Energievorhalts, wohingegen Fuzzy-System B auf die Erfüllung von Anforderungen an den Fahrkomfort abzielt.

Dieser Sachverhalt erklärt zum Teil ebenfalls den Zielkonflikt zwischen dem notwendigen Energievorhalt und der notwendigen Dauerleistung der HV-Batterie (vgl. Diagramm 4.5(b)). Die stärkere Ausnutzung des Nachladepotentials erfolgt dabei durch hohe Ladeleistungen in Abhängigkeit der Energiebilanz, wodurch ein höheres Energieniveau im Vorfeld der Region of Interest erreicht wird. Diese Maßnah-

me reduziert somit den notwendigen Energievorhalt in der Batterie auf Kosten einer höheren Dauerleistung der HV-Batterie. Ein zweiter Aspekt ist die stärkere Ausnutzung des Potentials bezüglich der Antriebseffizienz bei Verwendung von Fuzzy-System A, welcher bereits anhand der Zusammenhänge bezüglich der EM-Anforderungen in Bild 4.4 analysiert wird. Eine Zusammenfassung der Erkenntnisse zeigt, dass die Reduzierung des Energievorhalts mittels betriebsstrategischer Maßnahmen bei identischer Komponentenauslegung und Höchstgeschwindigkeitsanforderung die Leistungsbedarfe der HV-Batterie erhöht und dabei stets zu Lasten des Fahrkomforts geht.

Durch die in dieser Arbeit entwickelte Methode besteht zum ersten Mal die Möglichkeit, sowohl den Energie- und Leistungsbedarf der elektrischen Komponenten als auch den Einfluss auf den Fahrkomfort im Kontext kundenrelevanter Anforderungen zu quantifizieren (Handlungsbedarf). Die Visualisierung gesamtsystemischer Zusammenhänge zwischen den Einflussparametern und der Zielgrößen stellt dabei den Handlungsspielraum dar. Dieser wird im Folgenden auf Basis der Ergebnisse formuliert und die sich hieraus ergebenden Konsequenzen werden diskutiert.

### **Diskussion der Ergebnisse**

Im Spannungsfeld aus Antriebseffizienz, Leistungsfähigkeit und Fahrkomfort stellt die HV-Batterie die zentrale technische Komponente zur Erfüllung kundenrelevanter Anforderungen dar. Ihr Energieinhalt sichert in Kombination mit einer ausreichenden Peak- und Dauerleistung die Leistungsfähigkeit des Antriebs im prägenden kundenrelevanten Szenario. Ist es dabei notwendig, einen hardwareseitigen Energievorhalt zu definieren, verringert dieser die verfügbare Energie für die rein elektrische Fahrt und damit die elektrische Reichweite des Fahrzeugs. Das Ziel einer kundenrelevanten Auslegung ist es demnach, prägende Fahranforderungen ohne die Notwendigkeit eines hardwareseitigen Energievorhalts zu erfüllen.

Die Motivation einer signifikanten Reduzierung der verbrennungsmotorischen Leistung ergibt sich durch die prinzipielle Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs in alltäglichen Fahrsituationen, was Gegenstand der Untersuchungen bezüglich der Antriebseffizienz in Abschnitt 4.2 ist. Zudem können hierdurch Kosten- und Bauraumpotentiale generiert werden. Letzteres ist hinsichtlich der Integration des elektrifizierten Antriebsstrangs eine relevante Größe, wobei die in dieser Arbeit untersuchten VM-Varianten denselben Hubraum aufweisen und somit die jeweilige Motorpe-

riperie (Turbolader, Kühlung) entscheidend ist. Diesen Vorteilen steht ein erhöhter Anspannungsgrad in der energetischen und leistungsseitigen Auslegung des elektrischen Antriebssystems gegenüber. Als *Anspannungsgrad* wird verstanden, dass die erforderlichen Leistungsbedarfe des elektrischen Antriebssystems und die notwendige Batteriedimensionierung ein Risiko für die Erreichung von Kostenzielen darstellt. Des Weiteren ist die technische Realisierbarkeit nicht garantiert. Die Diskussion einer kundenrelevanten Systemauslegung hat somit vor dem Hintergrund einer gesamtheitlichen Kosten-Nutzen Bewertung stattzufinden. Hierbei stehen ein mögliches Kraftstoffeinsparungspotential sowie eine mögliche Kosteneinsparung in der VM-Entwicklung der Notwendigkeit eines höheren Energieinhalts, höherer Peak- und Dauerleistungswerte sowie einer Erhöhung der Einflüsse auf den Fahrzeugkomfort gegenüber. Zwar kann letzteres anhand von Betriebsstrategiemeasures positiv beeinflusst werden, einen signifikanten Einfluss auf den Zielkonflikt hat neben der verbrennungsmotorischen Leistung jedoch insbesondere die Höchstgeschwindigkeitsanforderung. Somit eröffnet sich die zusätzliche Dimension der Anforderungsreduzierung innerhalb der Kosten-Nutzen Bewertung.

Eine wichtige Erkenntnis im Zusammenhang zwischen Höchstgeschwindigkeitsanforderung und Kundenrelevanz ergibt sich dabei wie folgt: Soll die Höchstgeschwindigkeit dauerhaft darstellbar sein, ist die hieraus resultierende Leistungsanforderung an den Antrieb stets durch die Dauerleistung des VMs zu erfüllen. Als Maß für die Auslegung des elektrischen Antriebssystems kann das Beschleunigungsvermögen angesetzt werden, welches im Wesentlichen den vom Kunden erlebbaren Fahrspaß definiert. Hierbei wirken sich insbesondere Beschleunigungsmanöver zur Erreichung der Höchstgeschwindigkeit auf die leistungsseitige Belastung der Komponenten und somit auf die kundenrelevante Auslegung aus. Eine Anforderungsreduzierung entlastet dabei zum einen das elektrische Antriebssystem und erlaubt zudem eine Reduzierung der verbrennungsmotorischen Leistung. Dieser Zusammenhang wird anhand der Bilder B.2 und B.3 im Anhang B.2 verdeutlicht. Die Höchstgeschwindigkeit in der PHEV-Variante „VM4,  $v_{250}$ “ kann hierbei an einigen Stellen allein durch den VM der höchsten Leistungsstufe realisiert werden. Stellen, an denen die Leistungsanforderung bei  $v_{Fzg} = 250$  km/h oberhalb der VM-Leistung liegt, sind durch hohe Fahrbahnsteigungen gekennzeichnet. Hingegen werden im Falle einer Reduzierung der Höchstgeschwindigkeit auf 210 km/h sämtliche Leistungsanforderungen der Konstantfahrt durch den Verbrennungsmotor erfüllt.

Eine Analyse der sich mittels Zeitwichtung ergebenden 30 min-Werte der Verläufe der Antriebsleistungen der beiden diskutierten Varianten der PHEV-Anwendung

zeigt, dass diese ein geeigneter Indikator für die Bestimmung der notwendigen VM-Leistung darstellen. Diese sollte zur Reduzierung des Anspannungsgrades in der Auslegung des elektrischen Antriebssystems oberhalb der Dauerleistungswerts der Fahranforderung liegen. Der Sachverhalt verdeutlicht sich anhand folgender Beobachtung: Zum einen beträgt der 30 min-Wert zur Erfüllung der originalen Fahranforderung 38 % der Gesamtsystemleistung (VM4 hat einen Anteil von ca. 40 % an der Gesamtsystemleistung), zum anderen 32 % bei einer Reduzierung von  $v_{\text{Fzg,max}}$ . Im Vergleich zu den gesamtsystemischen Zusammenhängen erfordert indes keine der beiden Varianten einen hardwareseitigen Energievorhalt. Die Korrelation zwischen der VM-Leistung und der  $v_{\text{Fzg,max}}$ -Anforderung zeigt somit den Handlungsspielraum in deutlicher Art und Weise auf. Die Erfüllung von prägenden Fahranforderungen auf Basis der konventionellen Leistungspositionierung verhindert ohne Anforderungsreduzierung eine signifikante Reduktion der VM-Leistung vor dem Hintergrund einer Kosten-Nutzen Bewertung. Dieser Sachverhalt wird durch die in Anhang B.2 gezeigte Anforderungsanalyse der HEV-Anwendung zusätzlich bestätigt. Der Vergleich der Ergebnisse zwischen der in diesem Abschnitt gezeigten PHEV-Anwendung und der im Anhang ausführlich beschriebenen Anforderungsanalyse der HEV-Anwendung mit den in Tabelle 4.1 auf S. 95 gezeigten Fahrzeug- und Antriebseigenschaften, bestätigt die qualitative Übereinstimmung der gesamtsystemischen Zusammenhänge und damit die in diesem Abschnitt diskutierten Aspekte. Da sich signifikante Unterschiede lediglich in den exakten Werten der gesamtsystemischen Zusammenhänge ergeben, wird auf eine ausführliche Darstellung in diesem Abschnitt verzichtet.

Aufgrund der Erkenntnisse werden in der folgenden Analyse zur Antriebseffizienz lediglich die Verbrennungsmotorvarianten VM3 und VM4 betrachtet. Die Verwendung der VM-Varianten mit hohen Leistungen reduziert dabei den Anspannungsgrad bezüglich der Auslegung des elektrischen Antriebssystems. Die Ergebnisse der Anforderungsanalyse kennzeichnen die notwendigen leistungsseitigen Systemgrenzen des Antriebs. Somit ist es sinnvoll, VM-Varianten für die Analyse der Optimierungspotentiale auszuschließen, welche zu unrealistischen Handlungsbedarfen und den damit verbundenen Kosten führen. Da in der Anforderungsanalyse sowohl für die PHEV- als auch für die HEV-Anwendung dieselbe P2-EM angenommen wird und die jeweiligen Dauerleistungswerte nur geringfügige Unterschiede zueinander aufweisen, ergeben sich Potentiale zur Modularisierung der Komponente in Kombination mit den VM-Varianten in unterschiedlichen Leistungspositionierungen. Dieses Modularisierungspotential wird somit ebenfalls im Rahmen der Antriebseffizienz bewertet, welche im Folgenden auf Basis der PHEV- und HEV-Anwendung untersucht wird.

## 4.2 Analyse bezüglich der Antriebseffizienz

In diesem Abschnitt erfolgt die Analyse der Antriebseffizienz innerhalb der vorab identifizierten leistungsseitigen Systemgrenzen. Hierzu werden für die PHEV- und HEV-Anwendung mittels ECMS effiziente Betriebspunktverteilungen auf Basis der jeweiligen kundenrelevanten Fahranforderungen sowie des WLTC ermittelt. Diese Analysen dienen dazu, häufige Betriebspunkte im elektrischen Antriebssystem zu identifizieren, welche im Folgenden als Basis einer Detailoptimierung der elektrischen Maschinen und damit deren Kennfelder genutzt werden können.

Für die Detailoptimierung der elektrischen Komponenten ist es vorteilhaft, wenn der Einfluss der Betriebsstrategie möglichst gering ist. Das heißt, dass eine Änderung der Komponenten nicht zu signifikant unterschiedlichen Ladezustandstrajektorien führt. Um die Sensitivität der Trajektorien bezüglich Komponentenänderungen zu bewerten, werden im Folgenden ebenfalls die Kennfelder der elektrischen Maschinen nach dem Modell der Untersuchungsrahmen (vgl. Bild 3.22, S. 93) variiert.

### 4.2.1 Synthetische kundenrelevante Fahrzyklen

Zur Synthese kundenrelevanter Fahrzyklen wird das in Abschnitt 3.2.2 vorgestellte Optimierungsgerüst angewendet. Die hierzu verwendeten Datenbasen für die PHEV- sowie die HEV-Anwendung sind in Tabelle 4.5 zusammengefasst.

Tabelle 4.5: Verwendete Datenbasen der repräsentativen synthetischen Fahrzyklen

<b>Merkmale</b>	<b>PHEV</b>	<b>HEV</b>
Gesamtdauer der Messfahrten $T_{d,ges}$	45,8 h	50 h
Gesamtlänge der Messfahrten $x_{d,ges}$	1873,7 km	1664,4 km
Geografische Ausprägungen	Stadt/Überland	Stadt/Überland

Die Messungen ergeben sich aus Dauerläufen der konventionellen Leistungspositionierungen und umfassen sowohl Stadt- als auch Überlandfahrten, deren Anteile innerhalb dieser Arbeit ausgeglichen sind. Autobahnabschnitte werden indes vernachlässigt, da diese zum einen bereits in der Anforderungsanalyse Anwendung finden. Zum anderen basiert die Methode auf der Verwendung von Micro-Trips, welche im

Fälle von Autobahnfahrten in der Regel eine für die Rechenzeit praktikable Dauer überschreiten.

Die Parametrierung des Optimierungsgerüsts ist für die Fahrzyklensynthese in beiden Anwendungsfällen identisch und wird in Tabelle 4.6 dargestellt. Sämtliche Optimierungen werden in diesem Abschnitt mittels der Partikelschwarmoptimierung durchgeführt. Die Populationsgröße sowie die Anzahl der maximalen Iterationen der PSO basieren dabei auf Erfahrungswerten und werden unter Berücksichtigung der Praktikabilität bezüglich der Rechenzeit definiert.

Tabelle 4.6: Parametrierung des Optimierungsgerüsts

Parameter	Wert/Einstellung
Äußere Merkmale: Population PSO $N_i$	500
Äußere Merkmale: Maximale Iterationsanzahl	500
Innere Merkmale: Population PSO $N_i$	$3N_{\text{MT, syn}}$
Innere Merkmale: Maximale Iterationsanzahl	150
Gewünschte Zykluslänge $T_{\text{des}}$	3600 s

Die gewünschte Zykluslänge  $T_{\text{des}}$  ist dabei ein Orientierungswert, auf dessen Basis die Anzahl der verwendeten Micro-Trips  $N_{\text{MT, syn}}$  berechnet wird

$$N_{\text{MT, syn}} = T_{\text{d, ges}} \frac{1}{\bar{T}_{\text{MT}}}, \quad (4.1)$$

wobei  $\bar{T}_{\text{MT}}$  die mittlere Dauer eines Micro-Trips bezeichnet. Für den synthetischen Zyklus der PHEV-Anwendung ergibt sich beispielsweise die Anzahl der verwendeten Micro-Trips auf Basis der Datengrundlage zu 37. Im Folgenden werden beginnend mit der PHEV-Anwendung die Ergebnisse der Fahrzyklengenerierung vorgestellt.

### Fahrzyklensynthese der PHEV-Anwendung

Der synthetische Fahrzyklus der PHEV-Anwendung ist in Bild 4.6 dargestellt. Die Diagramme zeigen den Geschwindigkeitsverlauf  $v_{\text{Fzg}}(t)$  und den Steigungsverlauf  $\alpha(t)$  sowie die Leistung am Rad, welche bezüglich der maximalen VM-Leistung der konventionellen Leistungspositionierung normiert ist. Die Gesamtdauer des Zyklus ergibt sich zu 2200 s und entspricht somit 1,3 % der Gesamtdauer der Messfahrten.

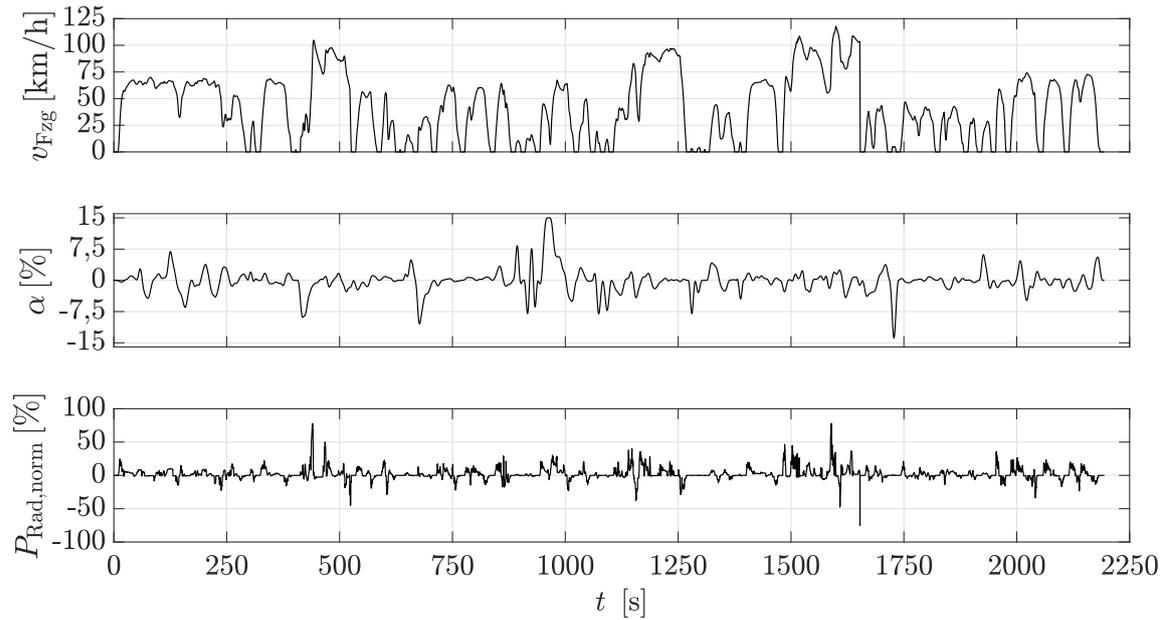


Bild 4.6: Synthetischer Fahrzyklus der PHEV-Anwendung.

Anhand des Geschwindigkeitsprofils zeigt sich, dass im Fahrzyklus sowohl Stadt- als auch Überlandanteile analog zu den Messdaten vorhanden sind. Die Antriebsleistung nimmt mit Ausnahme zweier hoher Lastanforderungen Werte unterhalb von 50 % an. Der Steigungsverlauf ist im mittleren Diagramm gezeigt. Insbesondere im Verlauf des mittels GPS bereit gestellten Höhenprofils sind Ungenauigkeiten nicht auszuschließen, welche zu unplausiblen Steigungswerten führen. Aus diesem Grund wird der Steigungsverlauf im Rahmen der Segmentierung auf das Intervall  $[-15, 15]$  % beschränkt. Des Weiteren äußert sich ein Nachteil der Verwendung von Micro-Trips in der Schwierigkeit, einen zusammenhängenden Steigungsverlauf zu erzeugen [126]. Dieser Nachteil wirkt sich jedoch nicht auf die Aussagen der folgenden Untersuchungen aus, da die resultierenden Leistungsverläufe maßgebend für die Repräsentativität des Fahrzyklus sind. Das heißt, dass die Wirkung der charakteristischen Merkmale des Fahrzyklus relevant ist und nicht deren Ursache. Die Repräsentativität des Fahrzyklus wird in dieser Arbeit anhand innerer und äußerer Merkmale bewertet, wobei letzteres die äußere Gestalt des Zyklus beschreibt.

Die äußere Gestalt bezeichnet die Häufigkeit und die Aufeinanderfolge bestimmter Klassen, welche anhand von statistischen Merkmalen mittels Clusteranalyse definiert werden. Auf Basis der Ellbogen-Methode wird hierzu die Anzahl der Klassen  $K = 8$  festgelegt. Das Ergebnis der Clusteranalyse für die PHEV-Anwendung ist in Bild 4.7 dargestellt. Jeder der Punkte in der Grafik bezeichnet dabei einen Micro-Trip.

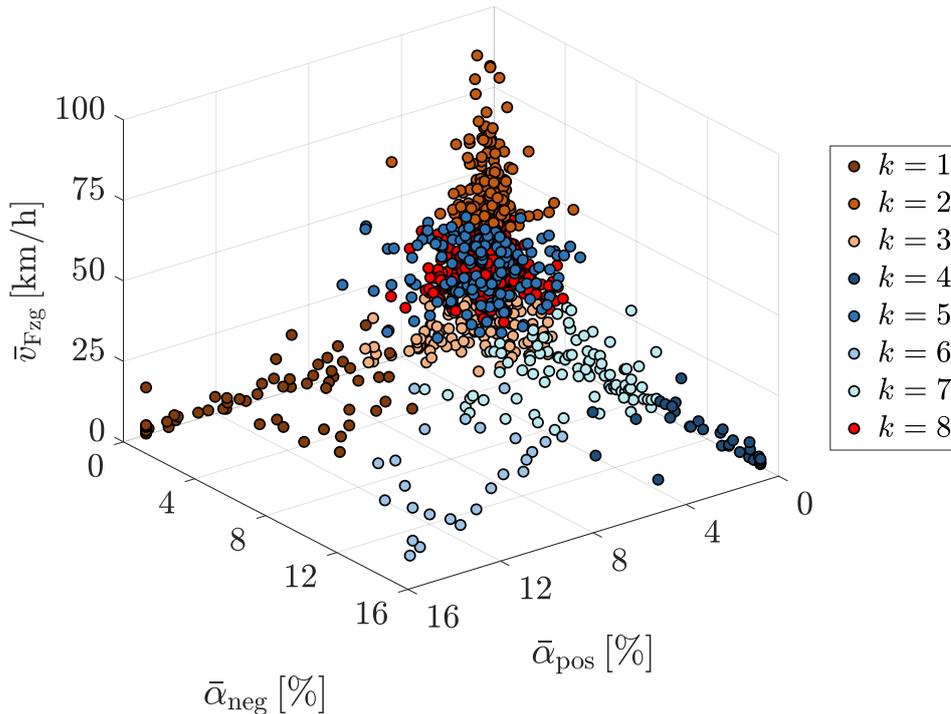
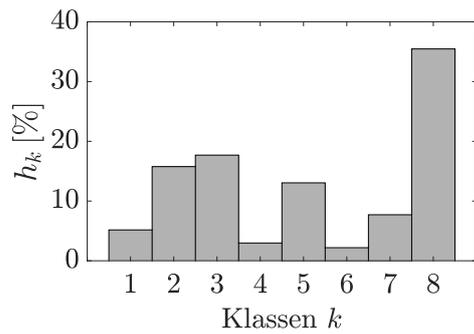


Bild 4.7: Clusteranalyse des synthetischen Fahrzyklus der PHEV-Anwendung.

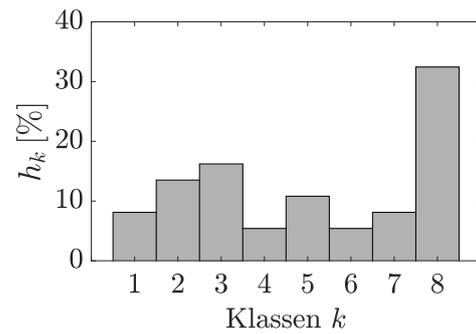
Der K-means++ Algorithmus liefert für den verwendeten Datensatz die gezeigte Gruppierung der Micro-Trips in acht Cluster. Hierbei zeigt sich, dass die Cluster 2, 3, 5 und 8 eine vergleichsweise gleichmäßige Verteilung der Micro-Trips bezüglich der drei äußeren Merkmale  $\bar{v}_{Fzg}$ ,  $\bar{\alpha}_{pos}$  und  $\bar{\alpha}_{neg}$  aufweisen. Die genannten Cluster umfassen einen Großteil der segmentierten Micro-Trips, wobei die Klasse 2 (hinten oben) beispielsweise sämtliche Überlandfahrten abdeckt. Diese zeichnen sich durch vergleichsweise hohe mittlere Geschwindigkeiten und niedrige mittlere Steigungen und Gefälle aus. Die Klassen 1 (hinten links) und 4 (hinten rechts) hingegen umfassen jeweils einen großen Bereich der mittleren Steigung beziehungsweise des mittleren Gefälles bei niedrigen Geschwindigkeiten. Die Klassen 6 und 7 weisen eine hohe Varianz bezüglich der Steigung und des Gefälles auf. Die letztgenannte Klassen beinhalten vergleichsweise wenige Micro-Trips. Dies ist plausibel, da diese Klassen Extrema bezüglich der gewählten äußeren Merkmale und somit seltenere Fahrsituationen darstellen. Ein Beispiel ist die Klasse 4, deren Micro-Trips Fahrten mit hohem Gefälle und niedriger Geschwindigkeit darstellen.

Die ermittelten Micro-Trip Klassen sind die Basis der Optimierung bezüglich äußerer Merkmale, deren Ergebnis in Bild 4.8 dargestellt ist.





(a) Messdaten: Klassenhäufigkeiten



(b) Fahrzyklus: Klassenhäufigkeiten

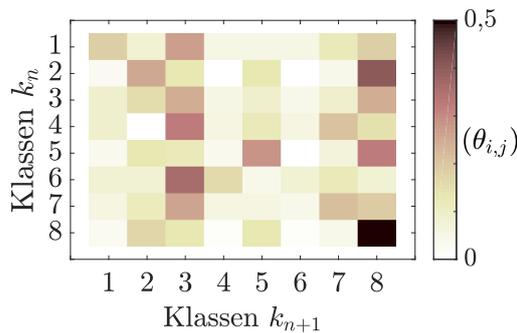
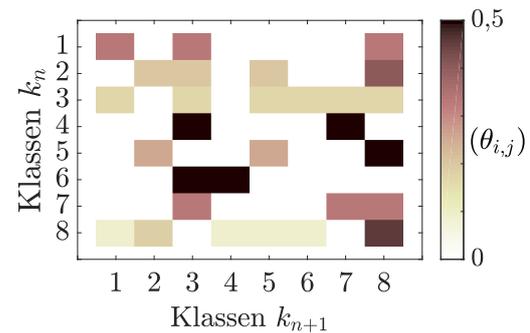
(c) Messdaten: Übergangswahrscheinlichkeiten von Klasse  $i$  zu Klasse  $j$  mit  $i = n$  und  $j = n + 1$ (d) Fahrzyklus: Übergangswahrscheinlichkeiten von Klasse  $i$  zu Klasse  $j$  mit  $i = n$  und  $j = n + 1$ 

Bild 4.8: PHEV: Ergebnis der Optimierung bezüglich äußerer Merkmale.

Hierbei stellen die oberen beiden Diagramme die relativen Häufigkeiten  $h_k$  der Klassen  $k$  in den Messdaten (Bild 4.8(a)) und im synthetischen Zyklus (Bild 4.8(b)) dar. Die Häufigkeitsverteilungen zeigen dabei insgesamt eine hohe Übereinstimmung. Im Vergleich zu den Messdaten ergeben sich Abweichungen in den Häufigkeiten von bis zu 4% insbesondere für Klassen, welche in den Messdaten seltener vorhanden sind. Dies resultiert aus der deutlich geringeren Anzahl von Klassenindizes innerhalb des synthetischen Zyklus, wonach die Verwendung einer „seltenen“ Klasse in Relation zur Gesamtanzahl der Klassen in der Berechnung der Häufigkeiten schwerer wiegt. Die Anzahl der verfügbaren Klassenindizes beeinflusst neben den relativen Häufigkeiten insbesondere die Übergangswahrscheinlichkeiten von einer Klasse  $k_n$  zur nächsten Klasse  $k_{n+1}$ . Ein Vergleich zwischen den Messdaten und dem synthetischen Zyklus erfolgt in den unteren beiden Diagrammen. Die Farben der Kästchen bezeichnen dabei die Wahrscheinlichkeit eines Klassenübergangs, wobei helle Farben niedrige Werte und dunkle Farben hohe Werte beschreiben. Das Ergebnis zeigt eine grundlegende Ähnlichkeit bezüglich der signifikanten Übergangswahrscheinlichkeiten.

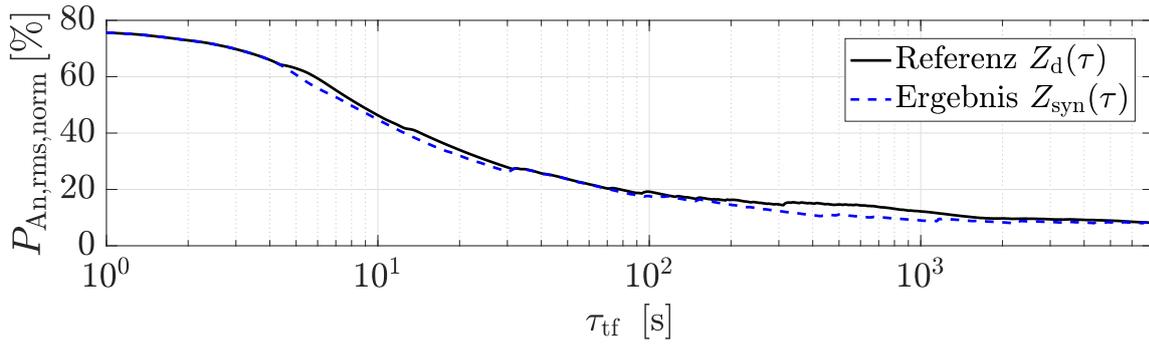


Bild 4.9: PHEV: Ergebnis der Optimierung bezüglich innerer Merkmale.

Somit sind die in den Messdaten häufig vorhandenen Übergänge 2-8, 4-3, 5-8, 6-3 und 8-8 ebenfalls im synthetischen Zyklus vorhanden. Selbiges trifft auf die signifikanten hellen Kästchen zu (2-1, 2-4, 2-6, 4-2 und 5-6). Bestimmte Übergänge in den Messdaten werden indes aufgrund der geringeren Anzahl verfügbarer Klassenindizes im synthetischen Fahrzyklus vernachlässigt. Demnach kann eine grundlegende Ähnlichkeit bezüglich der definierten äußeren Merkmale erreicht werden, welche jedoch in Abhängigkeit der Datenbasis und der Zykluslänge in der Genauigkeit begrenzt ist. Eine gute Repräsentativität des Fahrzyklus bezüglich der Messdaten ergibt sich somit insbesondere durch die Optimierung hinsichtlich der inneren Merkmale, deren Teilergebnis in Bild 4.9 dargestellt ist.

Das Diagramm zeigt die zeitgewichtete Belastungsdauerkurve der normierten Antriebsleistung des synthetischen Fahrzyklus im Vergleich zur Referenzkurve  $Z_d(\tau)$  (vgl. Abschnitt 3.2.2). Das Ziel der Optimierung bezüglich innerer Merkmale ist es, eine hohe Übereinstimmung der beiden Kurven zu erreichen. Die Abweichungen betragen im Zeitfensterbereich von 300s-1000s maximal 4% der normierten Antriebsleistung, wodurch die RMS-Leistungsanforderung im Zyklus um diesen Betrag geringer ist. In Kombination mit einer geringen Abweichung von  $<0,1\%$  zwischen den Mean Tractive Forces der Referenzdaten  $\bar{F}_{trac,d}$  und des synthetischen Zyklus  $\bar{F}_{trac,syn}$  wird das Ergebnis als repräsentativ für die folgenden Analysen bewertet.

### Fahrzyklensynthese der HEV-Anwendung

Analog zum vorangegangenen Abschnitt wird im Folgenden das Ergebnis der Fahrzyklensynthese für den HEV-Anwendungsfall vorgestellt. Das zugrundeliegende konventionelle Fahrzeug unterscheidet sich dabei in den Fahrzeugprämissen (zum Beispiel das Gewicht) und insbesondere durch die verfügbare Antriebsleistung gegenüber

der zugrundeliegenden Datenbasis der PHEV-Anwendung. Hieraus ergeben sich unterschiedliche Fahr Anforderungen, weshalb die Synthese eines spezifischen Fahrzyklus für die HEV-Anforderung notwendig ist. Beispielsweise resultieren Vollastbeschleunigungen in niedrigeren Leistungspeaks als bei der höheren Leistungspositionierung. Des Weiteren wird ein anderes Kundenfahrverhalten aufgrund der geringeren Leistungsfähigkeit des Antriebs angenommen.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit erfolgt die Darstellung des Ergebnis in zusammengefasster Form und wird durch die entsprechenden Grafiken im Anhang B.3 ergänzt. Hierzu zeigt Bild 4.10 den synthetischen Fahrzyklus anhand der Verläufe von  $v_{Fzg}(t)$ ,  $\alpha(t)$  und der normierten Antriebsleistung bezogen auf die maximale VM-Leistung des konventionellen Fahrzeugs am Rad  $P_{Rad, norm}(t)$ . Im Vergleich zum vorhergehenden Fahrzyklus der PHEV-Anwendung werden in diesem Fall keine Geschwindigkeiten oberhalb von 100 km/h erreicht. Des Weiteren ergibt sich eine mittlere normierte Antriebsleistung von 5,4 % und ein Maximalwert der Leistung von 38,4 %. Eine Besonderheit im synthetischen kundenrelevanten Fahrzyklus der HEV-Anwendung ist, dass dieselben Micro-Trips mehrfach verwendet werden (beispielsweise im Bereich von 2000-2400 s und ab 3300 s). Dieser Micro-Trip ist zugleich durch eine hohe Varianz im Steigungsverlauf charakterisiert. Mit einer Gesamtdauer von 3585 s und einer Gesamtlänge von 41,8 km ist der Zyklus in Bild 4.10 um 1391 s und 16,8 km länger als der Fahrzyklus der PHEV-Anwendung.

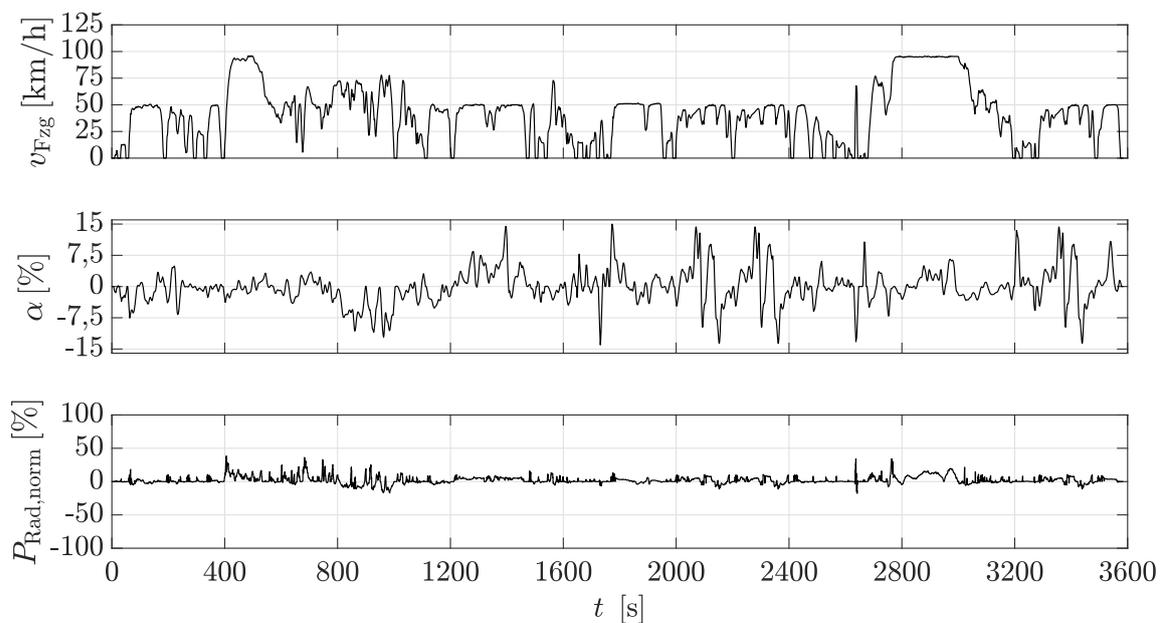


Bild 4.10: Synthetischer Fahrzyklus der HEV-Anwendung.

Das Ergebnis der Optimierung bezüglich äußerer Merkmale (vgl. Bild B.9 im Anhang B.3) zeigt ein ähnliches Optimierungsergebnis wie jenes der Fahrzyklensynthese für die PHEV-Anwendung. Hierbei ergibt sich ebenfalls eine hohe Übereinstimmung der relativen Häufigkeitsverteilung. Der Vergleich der Übergangswahrscheinlichkeiten zeigt zudem, dass die signifikanten Übergänge in den Messdaten ebenfalls im synthetischen Fahrzyklus berücksichtigt werden. Des Weiteren finden die weniger wahrscheinlichen Klassenübergänge keine Anwendung im Fahrzyklus. Analog zur Synthese des Zyklus im vorangegangenen Abschnitt wird die Repräsentativität bezüglich der energetischen Zusammenhänge in den Messdaten ebenfalls durch die Optimierung hinsichtlich der inneren Merkmale erreicht. Hierbei ergibt sich sowohl eine hohe Übereinstimmung der zeitgewichteten Belastungsdauerkurven (vgl. Bild B.11 in Anhang B.3) als auch eine minimale relative Abweichung zwischen den Mean Tractive Forces von  $<0,1\%$ . Im Folgenden wird die Repräsentativität der synthetischen Fahrzyklen der PHEV- und HEV-Anwendung diskutiert.

### Diskussion der Repräsentativität

In Tabelle 4.7 wird ein Vergleich auf Basis der relativen Abweichungen typischer statistischer Merkmale der Fahrzyklensynthese zwischen den Messdaten und dem synthetischen Zyklus angestellt.

Tabelle 4.7: Fahrzyklensynthese: Relative Abweichung statistischer Merkmale zwischen Messdaten und synthetischem Zyklus

Statistisches Merkmal	Relative Abweichungen [%]	
	Zyklus PHEV	Zyklus HEV
Mittlere Geschwindigkeit	5,7	0,8
Mittlere Beschleunigung	47,8	16,7
Mittlere Verzögerung	39,2	11,8
Mittlere Steigung	2,7	14,4
Mittleres Gefälle	13,6	0,7

Hierbei zeigt sich, dass der Großteil der Abweichungen innerhalb einer  $15\%$ -Grenze liegt, welche in der Literatur häufig zur Bewertung der Repräsentativität verwendet wird (vgl. [5, 104]). Hohe Abweichungen ergeben sich insbesondere bei der mittleren Beschleunigung und der mittleren Verzögerung für den Zyklus der PHEV-Anwendung. In dieser Arbeit erfolgt die Definition, wonach Fahrzyklen repräsentativ

tiv für die Analysen zur Antriebseffizienz im Kontext der Kundenrelevanz sind, sofern die innerhalb der Optimierung verwendeten Bewertungskriterien erfüllt werden. Hierbei wird angenommen, dass die jeweiligen Ursachen einer Leistungsanforderung gegenüber der Leistungsanforderung selbst eine untergeordnete Rolle bezüglich der Repräsentativität der Betriebspunkte spielt. Somit sind die leistungsseitigen Auswirkungen von auftretenden Beschleunigungsmanövern oder Steigungsfahrten maßgebend für die Effizienzanalysen. Die Erfüllung statistischer Kennwerte kann dabei als wünschenswertes jedoch nicht notwendiges Qualitätskriterium betrachtet werden.

Die in diesem Abschnitt generierten Fahrzyklen haben eine hohe Übereinstimmung bezüglich der zeitlichen Zusammenhänge in den Leistungsverläufen und der Mean Tractive Force. Somit sind die Zyklen repräsentativ für die energetische Bewertung und eignen sich für die folgenden Untersuchungen. Des Weiteren wird die Ähnlichkeit bezüglich der Aufeinanderfolge von Micro-Trips analog zu den Messdaten bestätigt, wodurch die Repräsentativität zusätzlich erhöht wird.

## 4.2.2 Repräsentative Betriebspunktverteilung

In diesem Abschnitt erfolgt auf Basis einer Analyse der effizientesten Betriebsweise des P24-Konzepts die Identifikation von Optimierungspotentialen bezüglich der Komponentenauslegung der elektrischen Maschinen für die untersuchten Leistungspositionierungen. Hierzu wird zunächst die Sensitivität der Ergebnisse von Charge-Sustaining-Simulationen anhand der jeweiligen Ladezustandstrajektorien und der ermittelten normierten Kraftstoffverbräuche bezüglich Änderungen der Auslegungsvarianten bewertet. Das Ergebnis der Analyse in diesem Abschnitt ist eine Visualisierung der Betriebspunktverteilungen bezüglich der P2-EM und der P4-EM.

Die Bewertung der Sensitivität der Ergebnisse ist zur Bewertung von Optimierungspotentialen bezüglich der EM-Auslegung relevant, da repräsentative Betriebspunkte möglichst unabhängig vom Einfluss der Betriebsstrategie sind. Das heißt, eine Variation der Komponenten und die damit verbundene Neuberechnung der optimalen Betriebsweise führt nicht zu signifikant unterschiedlichen Ladezustandstrajektorien und Kraftstoffverbräuchen. Hierzu werden Variationsstudien mit unterschiedlichen Komponentenauslegungen durchgeführt, welche die im Abschnitt 4.1 ermittelten leistungsseitigen Anforderungen erfüllen. Tabelle 4.8 zeigt die verwendeten Kennfelder der PHEV-Anwendung, wobei dieselben Varianten des Verbrennungsmotors wie in der Anforderungsanalyse zum Einsatz kommen.

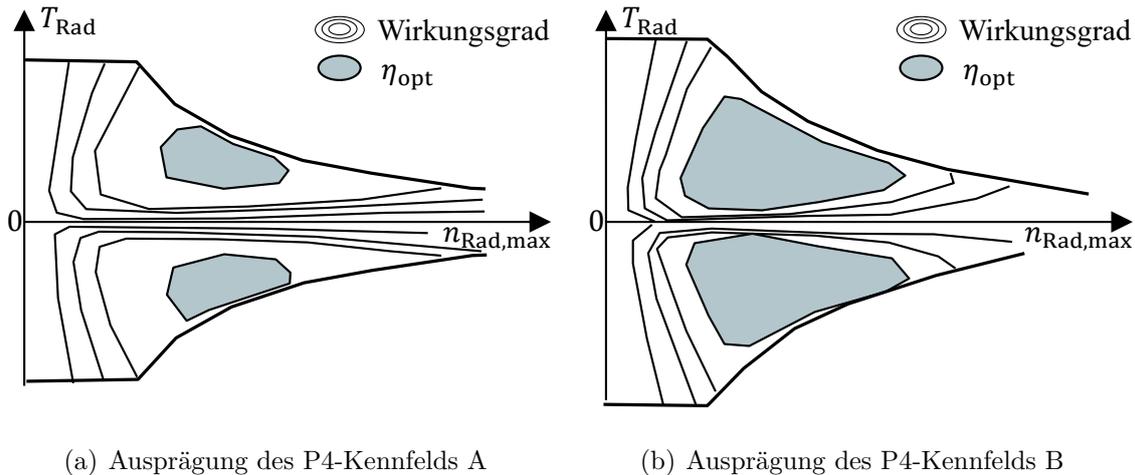


Bild 4.11: PHEV: Prinzipbild unterschiedlicher Kennfeldausprägungen der P4-EM.

Dabei beschränkt sich die Analyse auf die Leitungsstufen VM3 und VM4, da diese den größten Handlungsspielraum hinsichtlich einer kundenrelevanten Systemauslegung des P24-Konzepts liefern. Des Weiteren beschreiben die Kennfeld-Varianten A die in der Anforderungsanalyse verwendeten Kennfelder der P2-EM und der P4-EM. Die Varianten B bezeichnen elektrische Maschinen derselben Leistungsklasse wie jene der Varianten A, weisen dabei jedoch unterschiedlich ausgeprägte Wirkungsgradkennfelder auf. Dieser Zusammenhang ist in Bild 4.11 am Beispiel der P4-Kennfelder gezeigt. Die farbig hervorgehobenen Wirkungsgradbereiche kennzeichnen die effizientesten Betriebsbereiche, welche in beiden Fällen einen identischen Wert  $\eta_{\text{opt}}$  besitzen. Jedoch sind diese verschieden ausgeprägt, sodass sich dieselben Betriebspunkte unterschiedlich auf die Berechnung der Äquivalenzleistung in der ECMS auswirken. Dieses Vorgehen dient der Bewertung der Sensitivität der mittels ECMS berechneten Ladezustandstrajektorien gegenüber Änderungen der Komponenteneigenschaften und wird analog für die verbleibenden Varianten durchgeführt.

Tabelle 4.8: PHEV: Verwendete Kennfelder zur Analyse der Betriebspunktverteilung

Kennfelder	Realisierungen	
Kennfeld VM	VM3	VM4
Kennfeld P2-EM	A	B
Kennfeld P4-EM	A	B

Zur Untersuchung der HEV-Anwendung werden analog zur PHEV-Anwendung die

Verbrennungsmotorvarianten VM3 und VM4 sowie die Varianten A und B der P2-EM verwendet. Des Weiteren erfolgt der Einsatz der aus der Anforderungsanalyse bekannten P4-EM (Variante C). Kennfeld D beschreibt indes ein unterschiedliches Wirkungsgradverhalten bei ähnlichen Leistungsdaten. Da es sich bei der HEV-Anwendung um eine geringere Leistungspositionierung als bei der PHEV-Anwendung handelt, verfügen die P4-EM C und D über eine geringere Maximalleistung.

Tabelle 4.9: HEV: Verwendete Kennfelder zur Analyse der Betriebspunktverteilung

Kennfelder	Realisierungen	
Kennfeld VM	VM3	VM4
Kennfeld P2-EM	A	B
Kennfeld P4-EM	C	D

Nach den Tabellen 4.8 und 4.9 ergeben sich für jeden der Anwendungsfälle acht Systemauslegungen, welche im Folgenden Abschnitt sowohl auf Basis des jeweiligen synthetischen Fahrzyklus (vgl. Abschnitt 4.2.1) als auch auf Basis des WLTC analysiert werden. Letzterer wird in dieser Arbeit zwar nicht als kundenrelevanter Fahrzyklus bezeichnet, jedoch ist dieser einer der aktuell geltenden Zertifizierungszyklen, weshalb dessen Verwendung relevant ist und zusätzlich zur Akzeptanz und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse beiträgt.

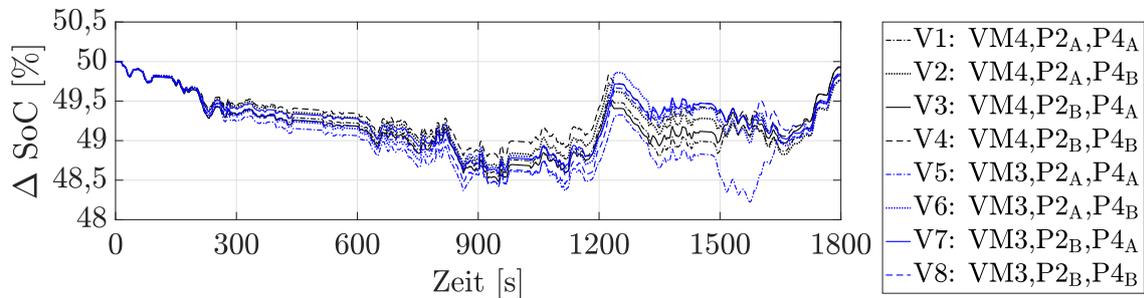
### Sensitivitätsanalyse

Die Bewertung der Sensitivität erfolgt in diesem Abschnitt anhand der jeweiligen Ausprägungen der Ladezustandstrajektorien für die untersuchten Systemauslegungen. Ergänzend hierzu werden die Simulationsergebnisse in Anhang B.4 detailliert aufgeführt. Eine Voraussetzung zur Bewertung der Ergebnisse im Kontext der Antriebseffizienz ist dabei die Einhaltung des Charge-Sustaining-Kriteriums, das heißt das Erreichen eines ausgeglichenen SoC bezogen auf den Start- und Endwert der Simulation, welches sich nach [60] anhand von

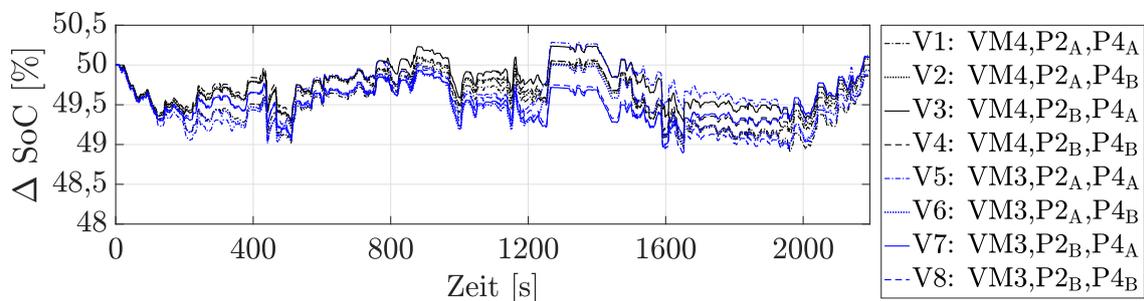
$$\text{NEC}_{\text{Tol}} = \frac{|\Delta E_{\text{Bat}}(t_f)|}{H_u \int_{t=0}^{t_f} \dot{m}_{\text{Kr}}} \leq 1 \quad (4.2)$$

ergibt. Hierbei bezeichnet die Größe  $\text{NEC}_{\text{Tol}}$  die Toleranz der Abweichung des Energieinhalts in der HV-Batterie am Ende des Fahrzyklus und die Multiplikation des

unteren Heizwerts  $H_{\text{u}}$  mit der verbrauchten Kraftstoffmenge  $\int_{t=0}^{t_f} \dot{m}_{\text{Kr}}$  beschreibt die aus dem Kraftstoff stammende Energie. Die Einführung dieses Kriteriums ist an dieser Stelle hinsichtlich der Praktikabilität der Methode relevant, da die vollständige Ausgeglichenheit des SoC ( $\Delta E_{\text{Bat}}(t_f) = 0$ ) insbesondere durch die Berücksichtigung weicher Nebenbedingungen in der Zielfunktion der ECMS nicht immer erreicht werden kann. Eine Abweichung des Energieinhalts wirkt sich des Weiteren auf die Vergleichbarkeit der Kraftstoffverbräuche aus. Beispielsweise verbessert ein niedrigerer SoC als jener zu Beginn der Simulation den Verbrauch, wohingegen ein höherer SoC selbigen verschlechtert. Aus diesem Grund werden die in Anhang B.4 gezeigten normierten Kraftstoffverbrauchswerte nach Stand der Technik korrigiert. Das Verfahren zur Korrektur basiert auf der Idee, dass eine Schätzung des notwendigen Kraftstoffverbrauchs zum Nachladen der fehlenden elektrischen Energie zum resultierenden Kraftstoffverbrauch addiert wird (bei zu niedrigem SoC am Zyklusende). Analog hierzu wird der Schätzwert bei zu hohem SoC vom Kraftstoffverbrauch subtrahiert. Das Verfahren berücksichtigt die mittleren Wirkungsgrade des elektrischen und petrochemischen Leistungspfad und ist detailliert im Anhang aufgeführt. Bild 4.12 zeigt die resultierenden Ladezustandstrajektorien für die PHEV-Anwendung auf Basis des WLTC (vgl. Bild 4.12(a)) und des synthetischen Fahrzyklus (vgl. Bild 4.12(b)).



(a) WLTC



(b) Synthetischer Fahrzyklus

Bild 4.12: PHEV: Ladezustandstrajektorien der verschiedenen Varianten.



Der Ladezustand SoC bezieht sich dabei auf die in der Anforderungsanalyse verwendete HV-Batterie. Hierbei zeigt sich, dass die Trajektorien sowohl im WLTC als auch im synthetischen Fahrzyklus ähnlich ausgeprägt sind. In Bild 4.12(a) unterscheiden sich die Verläufe der Trajektorien hauptsächlich anhand von Levelleffekten (Verschiebung einer Trajektorie auf der Ordinate bei gleichem Verlauf). Eine Ausnahme bildet die Trajektorie der Variante V5, welche im Vergleich zu den verbleibenden Verläufen im Bereich von 1500 s-1600 s im WLTC stark sinkt. In diesem Bereich wird der EV-Modus anstelle des in den anderen Varianten gewählten PH-Modus verwendet. Im Anschluss erfolgt ein stärkeres Nachladen mittels des seriellen Modus. Im Vorgriff auf die Untersuchungen zur Robustheit der Methode in Abschnitt 5 zeigt sich, dass die Ladezustandstrajektorie der Variante V5 bei Verwendung identischer Kennfelder mit geringerer Auflösung ähnlich ausgeprägt ist wie die verbleibenden Trajektorien in Bild 4.12. Demnach ergibt sich das gezeigte Verhalten durch die spezielle Kombination aus Kennfeldern und Äquivalenzfaktor sowie der aktiven Straftermsysteme. Letztere können bei der numerischen Lösung des Optimierungsproblems zu einem unplausiblen Steuerungsverhalten führen. Die Trajektorie der Variante V5 wird als unplausibel bewertet, da das gezeigte Steuerungsverhalten im Bereich von 1500 s-1600 s lediglich für diese Variante beobachtet wird. Im Weiteren Verlauf bleibt diese Variante somit für die Analyse des Betriebspunktverhaltens unberücksichtigt. Die verschiedenen Verläufe der verbleibenden Trajektorien resultieren aus den Unterschieden im Wirkungsgradverhalten der verwendeten Kennfelder, weshalb die Sensitivität dieser Ladezustandstrajektorien bezüglich der Betriebsstrategie gering ist. Dieser Sachverhalt wird zusätzlich durch die Zeitanteile der verwendeten Betriebsmodi verdeutlicht, welche sich zwischen den Varianten lediglich geringfügig unterscheiden (vgl. Tabelle B.5 im Anhang). Demnach führen im Fahrzyklus identische „mechanische“ Betriebspunkte zu unterschiedlichen Ladeleistungen und umgekehrt. Hierdurch ergeben sich geringfügige Unterschiede im Kraftstoffverbrauch, welcher sich für die PHEV-Anwendung im WLTC um maximal -2,3 % bezogen auf den höchsten Verbrauch verringert (vgl. Tabelle B.5). Das Kriterium in Gl. 4.2 wird hierbei für sämtliche Varianten der PHEV-Anwendung erfüllt.

Analog zur Sensitivitätsanalyse der PHEV-Anwendung werden in Bild 4.13 die Ladezustandstrajektorien der HEV-Anwendung gezeigt. Die Ordinate bezeichnet dabei den SoC bezogen auf die in der Anforderungsanalyse verwendete HV-Batterie der HEV-Anwendung. Die Verläufe unterscheiden sich über weite Bereiche lediglich durch Levelleffekte, wodurch die Sensitivität der Trajektorien bezüglich der Betriebsstrategie ebenfalls gering ist.

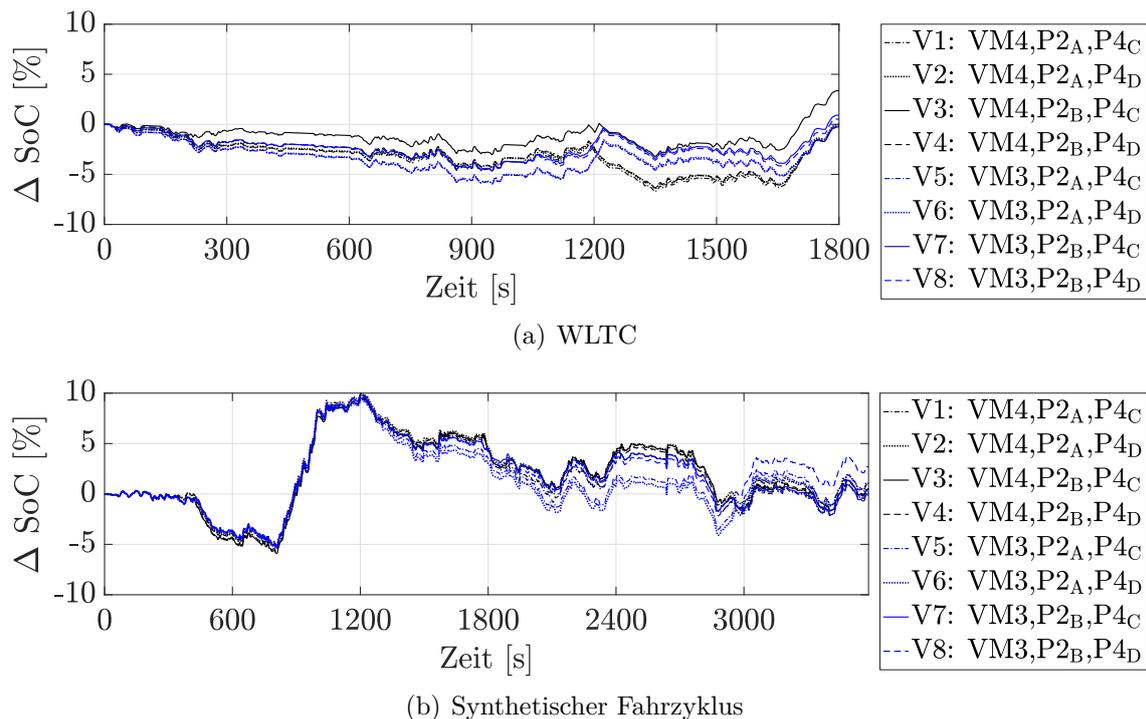


Bild 4.13: HEV: Ladezustandstrajektorien der verschiedenen Varianten.

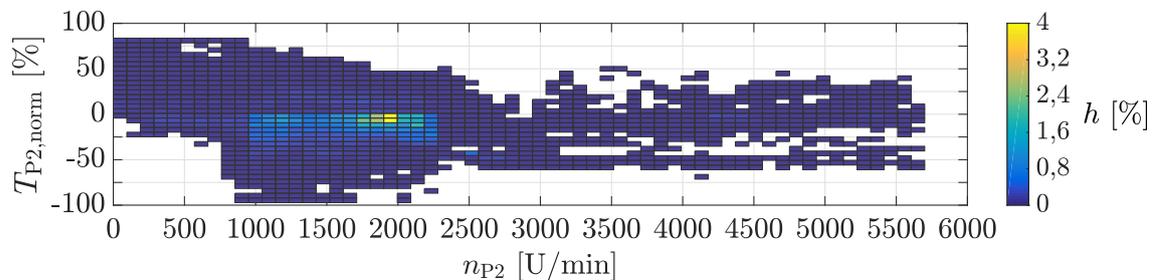
Die Verbrauchsunterschiede belaufen sich auf maximal 2,8 % im WLTC (vgl. Tabelle B.7) beziehungsweise 4,4 % im synthetischen kundenrelevanten Zyklus (vgl. Tabelle B.8). Dabei unterscheiden sich die jeweiligen Zeitanteile der Betriebsmodi in beiden Zyklen lediglich geringfügig. Auffallend in Bild 4.13 sind die Ladezustandstrajektorien der Variante V3 im WLTC sowie jene der Variante V8 im synthetischen Zyklus, welche jeweils einen hohen Überschuss des Energieinhalts am Ende des Fahrzyklus aufweisen. In den genannten Fällen wird das Charge-Sustaining-Kriterium nicht erfüllt, weshalb die hieraus resultierenden Betriebspunkte in der folgenden Analyse weggelassen werden. Die Abweichungen ergeben sich aufgrund der Berücksichtigung zahlreicher weicher Nebenbedingungen in der Zielfunktion der ECMS. Diese können im Sinne der unmittelbaren Optimierung zu Unstetigkeiten innerhalb der Hamilton-Funktion führen, weshalb die anhand des Äquivalenzfaktors eigentlich vorgesehenen Drehmomentaufteilungen in bestimmten Zeitpunkten nicht realisiert werden können. Eine Summierung dieses Sachverhalts führt dazu, dass die Trajektorien entweder in einem zu niedrigen oder zu hohen SoC am Ende des Zyklus resultieren.

Die Sensitivitätsanalysen bestätigen die Repräsentativität der Betriebspunkte, welche im folgenden Abschnitt analysiert werden. Zudem kann anhand der Ergebnisse das Modularisierungspotential der verwendeten Verbrennungsmotoren und der

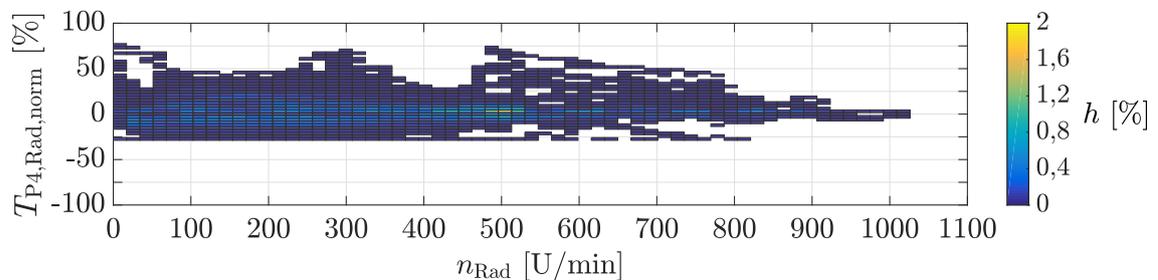
P2-EM bewertet werden. Hierbei zeigen sich lediglich geringfügige Unterschiede im Kraftstoffverbrauch zwischen den beiden verwendeten Verbrennungsmotoren VM3 und VM4 in Kombination mit den jeweiligen Kennfeldern der P2-EM. Dieser Aspekt unterstützt den Konzeptentscheid zusätzlich, da die Entscheidung für eine VM-Variante nach den Erkenntnissen in diesem Abschnitt vorrangig auf Basis der gesamtsystemischen Zusammenhänge der Anforderungsanalyse und im Rahmen einer Kosten-Nutzen Bewertung getroffen werden kann.

### Analyse der Betriebspunktverteilungen

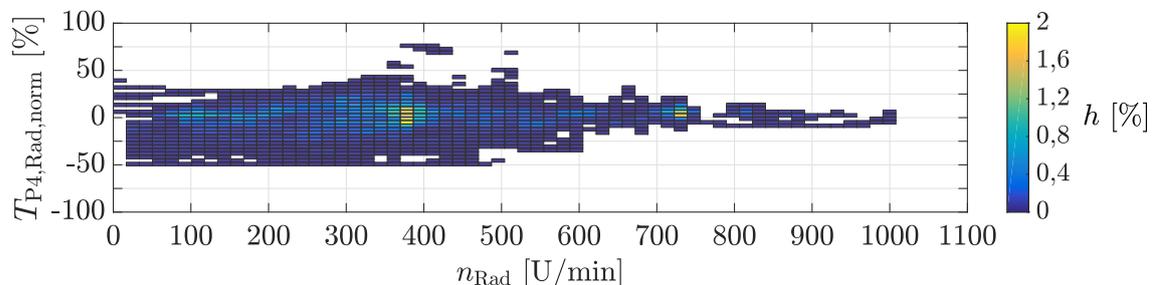
Die Visualisierung der Häufigkeitsverteilungen in Bild 4.14 dient der Identifikation von Potentialen zur Detailoptimierung der elektrischen Komponenten.



(a) P2-EM bezüglich des Getriebeeingangs



(b) PHEV: P4-EM bezüglich der Hinterachse



(c) HEV: P4-EM bezüglich der Hinterachse

Bild 4.14: Repräsentative Betriebspunktverteilungen der elektrischen Maschinen.

Hierbei zeigt Bild 4.14(a) die gesamten Betriebspunkte der P2-EM aus den Variationsstudien der beiden Anwendungsfälle. Da in der PHEV- und HEV-Anwendung grundlegend unterschiedliche P4-EMs verwendet werden, erfolgt die Darstellung derer Betriebspunkte separat in den Bildern 4.14(b) und 4.14(c). Die Ordinatenachsen werden hierbei auf die jeweiligen Maximal- und Minimalwerte der Grenzkennlinien normiert und bezeichnen verschiedene Wertebereiche der Drehmomente. Des Weiteren werden die Betriebspunkte der P4-EMs bezüglich des Raddrehmoments und der Raddrehzahl dargestellt, was eine zusätzliche Bewertung des Optimierungspotentials hinsichtlich der Getriebestufe an der Hinterachse erlaubt. Für sämtliche Betriebspunktverteilungen werden die Nulllastverluste, das heißt zum Beispiel die Grundlast des Wechselrichters bei  $T = 0 \text{ Nm}$ , zur Verhinderung der Beeinflussung durch Standzeiten vernachlässigt.

Die Diagramme zeigen, dass die P2-EM hauptsächlich im Bereich im generatorischen Bereich zwischen  $1000 \text{ U/min}$  und  $2500 \text{ U/min}$  verwendet wird. Hierbei wird insbesondere der Bereich von  $0\%$  bis  $-50\%$  des maximalen generatorischen Drehmoments genutzt. Die Häufigkeit der verbleibenden Betriebspunkte ist dabei vernachlässigbar gering. Diese ergeben sich im synthetischen Zyklus beispielsweise durch vereinzelte Anfahrvorgänge mit hoher Last (vgl. Bild 4.6). Demnach existiert das höchste Potential zur Verbesserung der Antriebseffizienz durch effizienzsteigernde Maßnahmen im generatorischen Teillastbereich.

Ein Großteil der Betriebspunkte der P4-EM kennzeichnen für die PHEV-Anwendung den Bereich von  $-15\%$  bis  $25\%$  und resultieren insbesondere aus der Rekuperation und der elektrischen Fahrt. Hierbei ist der Drehzahlbereich von  $0 \text{ U/min}$  bis ca.  $650 \text{ U/min}$  relevant. Die häufigsten Betriebspunkte ergeben sich bei der Raddrehzahl  $n_{\text{Rad}} = 500$ , welche einer Geschwindigkeit von ca.  $55 \text{ km/h}$  entspricht. Auffällig ist die Beschränkung der Betriebspunkte auf den Bereich von  $T_{\text{P4,Rad,norm}} > -30\%$ , welcher anhand einer Begrenzung der durch Rekuperation realisierbaren Verzögerungen von  $1,5 \text{ m/s}^2$  pro Fahrzeugachse definiert ist.

Selbiges trifft auf die Betriebspunkte der P4-EM der HEV-Anwendung zu, wobei die Grenze zur Rekuperation ca.  $50\%$  des maximalen generatorischen Drehmoments beträgt. Der Bereich der häufigsten Betriebspunkte zeigt eine ähnliche Ausprägung wie jener der P4-EM in der PHEV-Anwendung. Da die in der HEV-Anwendung verwendeten P4-Kennfelder C und D eine niedrigere Leistungsklasse bezeichnen, entspricht das normierte Drehmoment am Rad im Bereich von  $-25\%$  bis  $25\%$  geringeren exakten Drehmomentwerten. Die niedrigeren Anforderungen an die Komponenten

resultieren zum einen aus den unterschiedlichen Leistungsanforderungen des synthetischen Fahrzyklus und zum anderen aus dem niedrigeren Fahrzeuggewicht der HEV-Anwendung.

Die Ergebnisse in diesem Abschnitt weisen die relevanten Betriebspunkte in alltäglichen Fahrsituationen aus. Eine Optimierung der ermittelten Kennfeldbereiche kann somit zur Erhöhung der Antriebseffizienz beitragen. Die gezeigten Betriebspunktverteilungen stellen demnach eine begründete Auslegungsempfehlung für die Detailoptimierung der elektrischen Maschinen im P24-Konzept auf Basis der effizientesten Betriebsweise und auf Basis kundenrelevanter Fahranforderungen dar. Gleichzeitig unterstützen diese den Konzeptentscheid zusätzlich zu den Ergebnissen der Anforderungsanalyse. Sämtliche Ergebnisse und die gewonnenen Erkenntnisse aus der Anwendung der Methode werden im Folgenden Kapitel kritisch diskutiert.



## 5 Diskussion

In diesem Kapitel werden die Relevanz der Ergebnisse dieser Arbeit sowie die gewonnenen Erkenntnisse im Kontext der Problemstellung diskutiert. Des Weiteren erfolgt eine kritische Reflexion der methodischen Vorgehensweise zur Beantwortung der Forschungsfragen, welche mit der Hypothese in einem Fazit überprüft werden.

### 5.1 Relevanz der Ergebnisse und Erkenntnisse

Anhand der in dieser Arbeit vorgestellten Methode wird die in der Systemoptimierung bisher gestellte Frage umgekehrt, welche Ziele mit selbst auferlegten Anforderungen an die Komponentenauslegung im besten Fall erreicht werden können. Stattdessen wird die Frage beantwortet, welche Herausforderungen sich durch eine Erfüllung von kundenrelevanten Anforderungen für die Systemauslegung ergeben und welche Maßnahmen der Anforderungsreduktion signifikante Auswirkungen auf den Anspannungsgrad haben. Die wichtigsten Erkenntnisse und deren Relevanz für die Systemauslegung hybrider Antriebsstränge werden folgend diskutiert.

In der frühen Phase der Entwicklung erfolgt ein Konzeptentscheid anhand der Überprüfung grundlegender Verkaufsargumente und unter Berücksichtigung der Einflussmöglichkeiten durch relevante systemische Stellhebel. Die transparente Darstellung des technischen Handlungsbedarfs forciert eine Überprüfung des Anwendungsfalls und der damit verbundenen kundenrelevanten Anforderungen im Kontext einer Kosten-Nutzen Bewertung. Zum Beispiel wird die Erreichung der Höchstgeschwindigkeit einer konventionellen Leistungspositionierung nach Definition in dieser Arbeit als kundenrelevante Anforderung angenommen. Die Ergebnisse der Methode zeigen anhand der ermittelten Peak- und Dauerleistungswerte sowie des Energievorhalts der HV-Batterie, „wieviel“ elektrische Leistung und Energie im Hybridkonzept zur Substitution einer bestimmten Leistungspositionierung erforderlich sind.

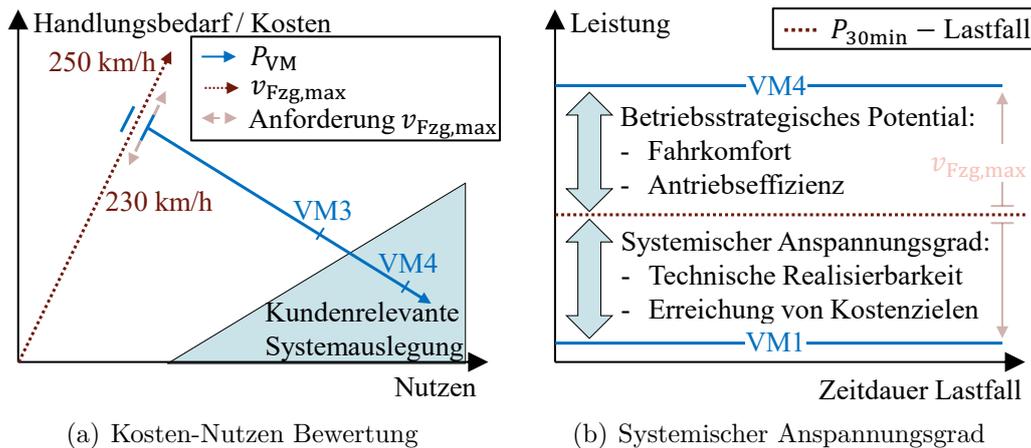


Bild 5.1: Erkenntnisse der Anforderungsanalyse.

Im Falle der PHEV-Anwendung kann beispielsweise durch die Verwendung von VM4 auch für  $v_{Fzg,max} = 250 \text{ km/h}$  das Ziel einer kundenrelevanten Systemauslegung erreicht werden. Diese Zusammenhänge sind in Bild 5.1(a) schematisch für die PHEV-Anwendung dargestellt. Im Gegensatz hierzu zeigt die Analyse des P24-Konzepts in der HEV-Anwendung, dass das Ziel einer kundenrelevanten Systemauslegung nicht immer erreicht wird. Hierbei resultiert die Erfüllung des Lastfalls selbst bei Verwendung von VM4 in Anforderungen an die HV-Batterie, welche auf Basis der aktuell verfügbaren Zelltechnologie und unter Berücksichtigung der Kostenziele nicht erfüllt werden können. Somit bringen auch die untersuchten  $v_{Fzg,max}$ -Reduzierungen das Gesamtsystem nicht ins Ziel einer kundenrelevanten Systemauslegung. Anhand der frühzeitigen Identifikation solcher Ausschlusskriterien im Rahmen der Konzeptionierung hybrider Antriebsstränge liefert die Methode einen wichtigen Beitrag zu dem in der Motivation beschriebenen Trichterprozess. Die vorgestellte Methode quantifiziert dabei die erforderlichen Peak- und Dauerleistungen des elektrischen Antriebssystems sowie den notwendigen Energievorhalt. In Kombination mit der transparenten Darstellung der Handlungsmöglichkeiten zeigt die Methode erstmals im System-Level Design die Notwendigkeit einer Anforderungsdiskussion in der Entscheidungsfindung auf. Die Beantwortung der Frage, ob beispielsweise die  $v_{Fzg,max}$ -Anforderung des konventionellen Antriebsstrangs eine entscheidende kundenrelevante Anforderung an ein Hybridkonzept darstellt, bedarf einer tiefgehenden Analyse von Daten über das Kundenfahrverhalten in den entsprechenden Märkten.

Die aufgezeigten Handlungsmöglichkeiten erlauben des Weiteren eine Bewertung des Potentials betriebsstrategischer Maßnahmen im Spannungsfeld aus Antriebseffizienz,



Leistungsfähigkeit und Fahrkomfort. Insbesondere die mittels des Drehzahlneaus bewerteten Auswirkungen auf den Fahrkomfort sowie die Erhaltung der Leistungsfähigkeit durch die Aufrechterhaltung des Ladezustands sind mittels einer geeigneten Antriebsstrangsteuerung beeinflussbar. Das Potential dieser Maßnahmen hängt vom systemischen Anspannungsgrad des Anwendungsfalls ab. Dieser Anspannungsgrad ist in Bild 5.1(b) schematisch dargestellt und äußert sich wie folgt: Eine niedrigere VM-Leistung als der 30 min-Wert des Lastfalls verhindert die Ausnutzung des Nachladepotentials zur Generierung eines ausreichenden „Energiepolsters“. Des Weiteren steigt die Leistungsanforderung an das elektrische Antriebssystem (Kosten), welche mit höherer  $v_{\text{Fzg,max}}$ -Anforderung weiter zunimmt. Somit kann das Potential der Betriebsstrategie zur Verbesserung des Fahrkomforts oder zur Verbesserung der Antriebseffizienz (Nutzen) in prägenden Fahranforderungen nur dann ausgeschöpft werden, wenn die Leistungsanforderung nicht dauerhaft der Leistungsfähigkeit des VM entspricht. Somit ist eine ausreichende VM-Leistung in Kombination mit geeigneter  $v_{\text{Fzg,max}}$ -Anforderung entscheidend für eine kundenrelevante Systemauslegung im Spannungsfeld aus Antriebseffizienz, Leistungsfähigkeit und Fahrkomfort.

Neben den in der Anforderungsanalyse identifizierten Handlungsbedarfen hinsichtlich der Erfüllung leistungs- und komfortseitiger Anforderungen stellt die Erreichung der CO<sub>2</sub>-Flottenziele ein maßgebliches Kriterium für einen Konzeptentscheid dar. Die in dieser Arbeit entwickelte Methode liefert aufgrund der Detaillierungstiefe der verwendeten Modelle in der frühen Phase der Entwicklung keine exakten Verbrauchswerte. Dennoch erlaubt die Gegenüberstellung der relativen Verbrauchsunterschiede zwischen den untersuchten Systemauslegungen eine Schätzung der Optimierungspotentiale bezüglich der Antriebseffizienz und trägt somit zur Reduktion der Variantenvielfalt bei. Da sich die relativen Verbrauchswerte der untersuchten Auslegungsvarianten lediglich geringfügig voneinander unterscheiden, eignen sich prinzipiell sämtliche der untersuchten Konzeptauslegungen zur Erfüllung der Anforderungen an die Antriebseffizienz. Die zur Analyse der Konzepte entwickelte 2D-ECMS kann zudem als Basis einer Applikation im Realfahrzeug dienen. Eine interessante Erkenntnis ergibt sich dabei aus der Analyse der verwendeten Betriebsmodi in den verschiedenen Untersuchungen der Anforderungsanalyse und der Antriebseffizienz. Der zeitliche Anteil des seriellen Modus im synthetischen Zyklus ist vernachlässigbar gering. Dem hingegen wird dieser Modus im prägenden Lastfall der PHEV-Anwendung häufig zum Laden der HV-Batterie verwendet. Somit ergibt sich ein Potential zur Verringerung des Applikationsaufwands, da der serielle Modus beispielsweise ausschließlich als Teilfunktion eines Sport-Modus implementiert werden kann.

## 5.2 Kritische Reflexion der methodischen Vorgehensweise

Das Ziel der Methodik ist die Analyse von gesamtsystemischen Zusammenhängen bezüglich kundenrelevanter Anforderungen, auf deren Basis ein Konzeptentscheid erfolgt und somit die Variantenvielfalt in der Entwicklung zukünftiger Hybridkonzepte reduziert wird. Die Methode wird hinsichtlich der Bewertung komplexer P24-Konzepte entwickelt und basiert auf der grundlegenden Annahme, dass eine Erhöhung der Transparenz und der Nachvollziehbarkeit der technischen Zusammenhänge zu einer gesteigerten Akzeptanz der Ergebnisse gegenüber der Verwendung komplexer Optimierungsverfahren führen. Die im Rahmen der Anwendung diskutierten Ergebnisse bestätigen diese Annahme.

### Analyse gesamtsystemischer Zusammenhänge

Ein wichtiger Aspekt zur Erhöhung der Transparenz und der Nachvollziehbarkeit der Zusammenhänge ist die Verwendung eines vorwärtsgerichteten Simulationsansatzes und der Einsatz von vergleichbaren Kennfeldern der elektrischen Maschinen. Des Weiteren wird die Komplexität der inneren Zusammenhänge der Betriebsstrategie anhand der Definition des Äquivalenzfaktors  $\lambda$  signifikant reduziert. Das Steuerungsverhalten, das heißt die Entscheidungen der ECMS, kann mittels der einfachen Bezeichnungen „teurer“ und „günstiger“ elektrischer Energie erklärt werden. Die entscheidende Maßnahme zur Erhöhung der Nachvollziehbarkeit komplexer Zusammenhänge im hybriden Antriebsstrang ist der Einsatz der ICE-Plots. Diese Visualisierungstechnik stellt den Einfluss mehrerer Parameter in höherdimensionalen Untersuchungsräumen in einer nachvollziehbaren und transparenten Art und Weise dar. Da durch die Anwendung von ICE-Plots einige wenige Simulationen im Vergleich zu einer Antriebsstrangoptimierung mittels stochastischer Algorithmen (zum Beispiel genetische Algorithmen oder die PSO) für eine repräsentative Analyse ausreichend sind, wird gleichzeitig der Rechenaufwand reduziert. Die gezeigte Vorgehensweise erlaubt dabei auf Basis der gesamtsystemischen Zusammenhänge die unmittelbare Bewertung von Auswirkungen einer Parameteränderung (Änderung von Anforderungen) auf die definierten Zielgrößen. Insbesondere die Analyse der Leistungsanforderungen an die elektrischen Maschinen und die HV-Batterie mittels des Zeitwichtungsverfahrens stellt für die Bewertung von kundenrelevanten Anforderungen in der

Gesamtsystemauslegung hybrider Antriebsstränge eine Neuerung dar. In Kombination mit der Bewertung des notwendigen Energievorhalts in der HV-Batterie erfolgt dabei zum ersten Mal eine vollständige Charakterisierung der Leistungsfähigkeit. Anders ausgedrückt, es wird eine Bewertung der Auswirkungen auf die Batteriedimensionierung zum Erhalt der erforderlichen Leistungsfähigkeit unter Berücksichtigung betriebsstrategischer Einflüsse vorgenommen. Letztere sind zur Analyse des Handlungsspielraums bezüglich der Erreichung von Komfortzielen relevant. Genaue Aussagen bezüglich NVH-relevanter Aspekte wie beispielsweise ein häufiges Auftreten bestimmter Drehzahlbereiche können auf Basis des Drehzahlniveaus zwar nicht getroffen werden. Dennoch erlaubt die Kenngröße  $\kappa$  eine Bewertung darüber, ob die VM-Drehzahl im Mittel zur erwarteten Drehzahl bei Erfüllung der Fahranforderung mit einem konventionellen Fahrzeug passt. Die Gewichtung des Drehzahlniveaus bezüglich dessen Auswirkungen auf die Kundenrelevanz erfordert indes eine tiefgehende Analyse der Ergebnisse in den verantwortlichen Fachbereichen.

### **Objektivierung von Antriebsstranganforderung**

Ein zentraler Bestandteil der Objektivierung von Antriebsstranganforderungen stellt in der vorliegenden Arbeit der entwickelte Betriebsstrategieansatz dar. Hierzu wird die bekannte Equivalent Consumption Minimization Strategy erstmalig für die Analyse von P24-Konzepten erweitert. Die Entwicklung der Betriebsstrategie erfolgt dabei auf der Annahme, dass die Wahl der optimalen Drehmomentaufteilung für komplexe Hybridkonzepte im Voraus nicht bekannt ist. Aus diesem Grund wird der Lösungsraum nicht durch heuristische Regeln hinsichtlich einer Verbesserung des Kraftstoffverbrauchs beschränkt. Die grundlegende Steuerung des Antriebsstrangs erfolgt in diesem Fall auf Basis des Äquivalenzfaktors  $\lambda$ , welcher zur spezifischen Beeinflussung des Steuerverhaltens gezielt adaptiert wird. Dieser Aspekt ist insbesondere für die Anforderungsanalyse von großer Relevanz, da hierdurch eine implizite Gewichtung der Zielkriterien zur Erhaltung der Leistungsfähigkeit mittels einer gezielten Ausnutzung des Ladepotentials in prägenden Fahranforderungen erfolgen kann. Die hierfür verwendeten Fuzzy-Systeme eignen sich besonders im Kontext der Nachvollziehbarkeit, da diese die Formulierung eines gewünschten Steuerungsverhaltens auf Basis einfacher Wenn-Dann-Beziehungen erlauben. Des Weiteren sind Fuzzy-Systeme an variable Rahmenbedingungen adaptierbar. Dieser Aspekt ist ein wichtiges Merkmal hinsichtlich der Implementierung von weichen Nebenbedingungen zur Berücksichtigung von Komfortaspekten. Auf Basis der Diskussionen im Rahmen

der Anforderungsanalyse ist es somit möglich, vage formulierte technische Zusammenhänge für die Gesamtsystemanalyse konkret zu machen. Ein Beispiel hierfür ist das Erlauben eines Nachladens mit hoher Leistung eher bei hohen Geschwindigkeiten und hohen Lastanforderungen um die Auswirkungen auf den Fahrkomfort zu reduzieren, da in diesem Fall Windgeräusche signifikanter sind als Motorgeräusche. Die Berücksichtigung solcher Aspekte als Kriterium des Konzeptentscheids reduziert das Risiko eines erhöhten Applikationsaufwands und erhöhter Kosten im Rahmen folgender Entwicklungsumfänge. Der Verzicht auf einen in der Literatur häufig gezeigten Vergleich der Ergebnisgüte der ECMS und der Dynamischen Programmierung ist in dieser Arbeit vertretbar. Zwar ist die Ergebnisgüte bezüglich des Kraftstoffverbrauchs ein wichtiges Kriterium zum Vergleich von Konzeptauslegungen, das Ziel der Arbeit ist jedoch nicht die Identifikation einer optimalen Variante mit geringfügig besserer Effizienz. Letzteres wurde anhand zahlreicher Studien im Stand der Technik bestätigt, weshalb die Ergebnisgüte der ECMS in dieser Arbeit als hinreichend genau angenommen wird. Die Eignung der methodischen Vorgehensweise wird ferner durch die Identifikation repräsentativer Betriebspunkte bestätigt, wobei die resultierenden Ladezustandstrajektorien und die Verbrauchsunterschiede zwischen den untersuchten Varianten plausibel und aussagekräftig sind.

### **Objektivierung kundenrelevanter Fahranforderungen**

Die Objektivierung des Attributs der Kundenrelevanz erfordert insbesondere die Auswahl und Modellierung repräsentativer Fahrzyklen als Basis der energetischen Simulation. Hierzu stellt das Zeitwichtungsverfahren ein geeignetes Werkzeug zur Identifikation von prägenden Lastfällen dar. Die Auswahl eines Lastfalls anhand der maximalen Dauerleistungswerte in Kombination mit einer Varianzanalyse der relevanten Betriebspunktverteilungen in den Messdaten ist für die Problemstellung in dieser Arbeit und die damit verbundenen Aussagen im Rahmen der Anforderungsdiskussion geeignet. Ein nach dieser Methode identifizierter Lastfall beschreibt dabei die extremste Fahrsituation, welche im realen Straßenverkehr mit einem Fahrzeug in der betrachteten Leistungspositionierung auf Basis der Messdaten tatsächlich aufgetreten ist. Somit beschränken sich die Aussagen auf den kritischsten Fall für die Systemauslegung. Eine umfassende Bewertung der Repräsentativität des Lastfalls bezüglich kundenrelevanter Anforderung erfordert indes die Ausweisung einer statistischen Sicherheit. Somit ist die Frage nach den signifikanten Kriterien einer im Sinne der Anforderungsanalyse kundenrelevanten Fahranforderung nicht abschließend ge-

klärt. Ein für die Anforderungsdiskussion relevanter Aspekt bezeichnet dabei, mit welcher Häufigkeit prägende Fahrsituationen im Kundenfeld tatsächlich auftreten und welche Varianz bezüglich relevanter Merkmale in den Messdaten vorliegt. Anhand einer solchen Analyse kann beispielsweise bewertet werden, wie häufig kritische Fahranforderungen im Kundenfeld tatsächlich vorkommen.

Die Frage, welche Kriterien für einen Fahrzyklus zur Bewertung der Antriebseffizienz im Kontext der Kundenrelevanz repräsentativ sind, wird in dieser Arbeit mit der Übereinstimmung typischer zeitlicher Leistungsverläufe und des mittleren mechanischen Energiebedarfs beantwortet. Die erstmalige Verwendung des Zeitwichtungsverfahrens innerhalb der Fahrzyklensynthese zeigt vielversprechende Ergebnisse. Die vorgestellte Methode zielt darauf ab, auf Basis einer möglichst hohen Anzahl von Ähnlichkeitsmerkmalen die Repräsentativität des Fahrzyklus bezüglich der Messdaten zu erhöhen. Zum einen dient die aus der Anwendung von Markow-Ketten bekannte Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix als Maß für die Übereinstimmung der Aufeinanderfolge charakteristischer Fahrsituationen. Zum anderen wird eine repräsentative zeitgewichtete Belastungsdauerkurve als Ähnlichkeitsmaß für zeitliche Zusammenhänge der Leistungsanforderung genutzt. Die resultierenden Zyklen sind dabei unter Berücksichtigung der Einschränkungen im Optimierungsprozess aufgrund der Verwendung von Micro-Trips plausibel und weisen die aus der Literatur bekannten Schwächen (zum Beispiel die Schwierigkeit der Darstellung eines kontinuierlichen Steigungsverlaufs zwischen zwei Micro-Trips) auf. Die reduzierte Flexibilität in der Optimierung führt dabei insbesondere zu Abweichungen bezüglich der äußeren Merkmale, welche zunächst die Qualität des Ergebnis infrage stellen. Im Kontext der Problemstellung werden die in dieser Arbeit verwendeten synthetischen Fahrzyklen dennoch als geeignet bewertet, da die relevanten Kriterien einer repräsentativen Betriebspunktverteilung erfüllt werden. Diese resultieren hauptsächlich aus einer repräsentativen Leistungsanforderung, wobei die Ähnlichkeit bezüglich äußerer Merkmale wünschenswert ist, jedoch eine untergeordnete Rolle spielt.

### **Robustheit der Methode bezüglich der Qualität der Datenbasis**

Ein für die Praxistauglichkeit der vorgestellten Methode relevantes Kriterium ist deren Verlässlichkeit. Insbesondere in der frühen Phase der Entwicklung kann eine ausreichende Qualität der verwendeten Datenbasis nicht immer garantiert werden. Dieser Sachverhalt äußert sich beispielsweise in der Fahrzyklensynthese, wobei die Messdaten zum einen eine niedrigere zeitliche Auflösung als die in der Simulation

geforderte Schrittweite von 0,1s aufweisen. Zudem weist das zur Berechnung des Steigungswinkels herangezogene GPS-Höhenverlaufsignal zum Beispiel aufgrund von Tunnelfahrten Messfehler auf und hat oftmals eine nicht ausreichende Genauigkeit. Aus diesem Grund werden die Daten in dieser Arbeit entsprechend vorverarbeitet.

Die Bereitstellung einer verlässlichen Basis der Entscheidungsfindung erfordert eine Robustheit der Methode bezüglich Änderungen in der Qualität der Datenbasis. Die vorgestellten Ergebnisse resultieren aus Simulationen mit hochaufgelösten Komponentenkennfeldern. Zur Bewertung der Robustheit der Anforderungsanalyse werden die Kennfelder des VM, der P2-EM und der P4-EM künstlich „verschlechtert“ und die Auswirkungen auf die bisherigen Aussagen diskutiert. Hierzu wird die Anzahl der Stützstellen in den Kennfeldern je Dimension um den Faktor drei reduziert. Bild 5.2 zeigt hierzu die gesamtsystemischen Zusammenhänge bezüglich des Energievorhalts und des Drehzahl-niveaus für die PHEV-Anwendung bei Verwendung rudimentärer Komponentenkennfelder.

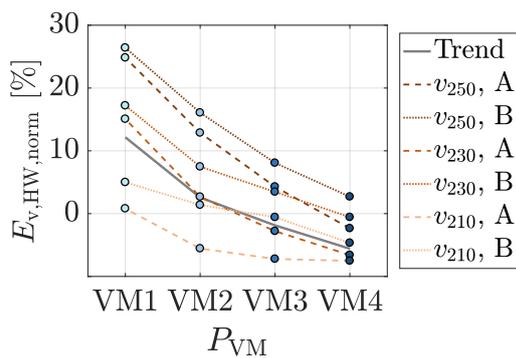
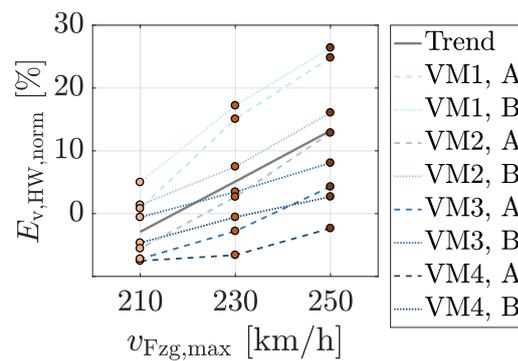
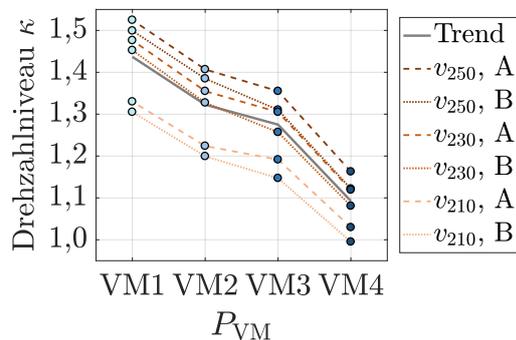
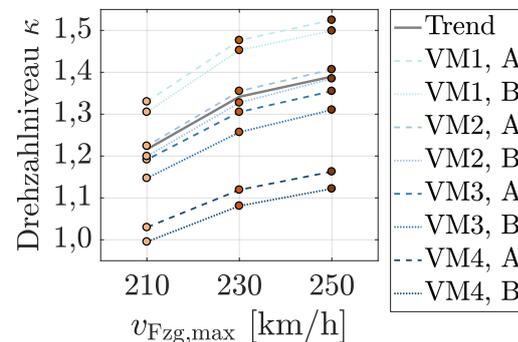
(a) Einfluss von  $P_{VM}$  auf  $E_{v,HW}$ (b) Einfluss von  $v_{Fzg,max}$  auf  $E_{v,HW}$ (c) Einfluss von  $P_{VM}$  auf  $\kappa$ (d) Einfluss von  $v_{Fzg,max}$  auf  $\kappa$ 

Bild 5.2: PHEV: Einflüsse auf den Energievorhalt und das Drehzahl-niveau bei Verwendung rudimentärer Kennfelder.

Im Vergleich zu den analysierten gesamtsystemischen Zusammenhängen in Bild 4.2 in Abschnitt 4.1.2 ergeben sich vernachlässigbar geringe Abweichungen, womit sämtliche Aussagen weiterhin Bestand haben. Selbiger Sachverhalt ergibt sich für die gesamtsystemischen Zusammenhänge bezüglich der Auslegungsbedarfe der Batterie und der elektrischen Maschinen (vgl. Anhang C). Demnach wird die Robustheit der Anforderungsanalyse bezüglich der verwendeten Kennfeldqualität bestätigt.

Analog hierzu erfolgt in Bild 5.3 ein Vergleich der resultierenden Ladezustandstrajektorien aus den Charge-Sustaining Simulationen zur Analyse der Antriebseffizienz der PHEV-Varianten V1 und V5. Ergänzend zeigt Tabelle 5.1 die Abweichungen in den korrigierten Kraftstoffverbräuchen und in den Zeitanteilen  $\tau$  der Betriebsmodi zwischen den untersuchten Varianten.

Tabelle 5.1: Ergebnis zur Robustheit der Ladezustandstrajektorien

Variante	$\Delta B_{\text{Kor}}$ [%]	$\lambda$ [-]	$\tau_{\text{EV}}$ [%]	$\tau_{\text{PH}}$ [%]	$\tau_{\text{Seruell}}$ [%]
V1 original	-	2,702	66,60	33,40	0
V1 rudimentär	-0,30	2,702	65,62	34,37	0,01
V5 original	-	2,640	63,94	33,28	2,78
V5 rudimentär	-0,94	2,646	63,00	33,16	3,84

In der Grafik unterscheiden sich die Ladezustandstrajektorien der Variante V1 lediglich durch Levelleffekte, wodurch die Lösung in diesem Fall auch bei Verwendung von Kennfeldern mit niedrigerer Auflösung robust ist. Wird hierbei derselbe Äquivalenzfaktor verwendet, ist zur Erfüllung des Charge-Sustaining Kriteriums für die Variante V5 hingegen eine Anpassung des Werts von 2,640 auf 2,646 erforderlich. Hierdurch verschwindet der im Bild gezeigte gegenläufige Verlauf der Trajektorie im Bereich von 1500 s-1600 s mit Verwendung der rudimentären Kennfelder.

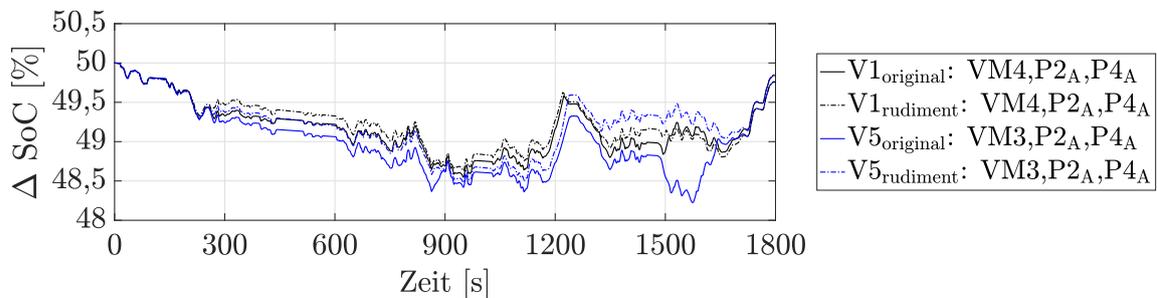


Bild 5.3: Robustheit der Ladezustandstrajektorien bezüglich der Kennfeldqualität.

Anhand der geringen Abweichungen sowohl in den korrigierten Kraftstoffverbräuchen als auch in den Zeitanteilen  $\tau$  der Betriebsmodi (vgl. Tabelle 5.1) wird die Robustheit der Analysen bezüglich einer repräsentativen Betriebspunktverteilung bestätigt. Ferner wird die Möglichkeit des Auftretens unerwünschter Effekte in der Analyse von Betriebspunktverteilungen durch weiche Nebenbedingungen in der ECMS aufgezeigt und damit das gezeigte Vorgehen einer der Betriebspunktanalyse vorangestellten Sensitivitätsanalyse bestätigt.

## 5.3 Fazit

Das Ziel dieser Arbeit, eine Methode zu entwickeln, welche den technischen Handlungsbedarf und den möglichen Handlungsspielraum zur Erfüllung von kundenrelevanten Anforderungen an den Antriebsstrang in nachvollziehbarer Art und Weise analysiert und visualisiert, wird erfüllt. Als ergänzender Bestandteil im Trichterprozess der Antriebsentwicklung unterstützt die Methode einen Konzeptentscheid und forciert darüber hinaus eine Anforderungsdiskussion auf Basis gesamtsystemischer Zusammenhänge, welche bisher nicht in dieser Qualität möglich war. Da die Ergebnisse der Methode zu einer begründeten Auswahl geeigneter Konzeptauslegungen führen, liefert die vorliegende Arbeit zudem einen wichtigen Beitrag zur Beherrschung der Variantenvielfalt im System-Level Design.

Die Motivation dieser Arbeit resultiert aus der Varianten- und Anforderungsvielfalt in der Entwicklung hybrider Antriebsstränge. Der Fokus liegt dabei auf der Bewertung der Einsatztauglichkeit komplexer Hybridkonzepte, wie das beispielhaft behandelte P24-Konzept, deren Systemleistungen maßgeblich durch das elektrische Antriebssystem definiert sind. Insbesondere im Bereich von leistungsstarken Fahrzeugen ist das aus dem Attribut der Kundenrelevanz resultierende Spannungsfeld aus Antriebseffizienz, Leistungsfähigkeit und Fahrkomfort für die Systemauslegung von großer Relevanz. Die Ergebnisse der Anforderungsanalyse bestätigen die formulierte **Hypothese**. Eine Substitution bestimmter Leistungspositionierungen durch das P24-Konzept erfordert einen Anteil der VM-Leistung an der Gesamtsystemleistung, welcher mindestens der Dauerleistungsanforderung des Lastfalls entspricht. Eine zusätzliche Erhöhung der VM-Leistung wirkt sich positiv auf den Anspannungsgrad bezüglich der technischen Realisierbarkeit des notwendigen elektrischen Antriebssystems sowie der Erreichung von Kostenzielen aus.



Die **Forschungsfrage 1**, wie das Attribut der Kundenrelevanz zur Bewertung von Hybridkonzepten objektiviert wird, wird durch das gezeigte separate Vorgehen der Anforderungs- und Antriebseffizienzanalyse beantwortet. Hierzu erfordert ersteres die Definition relevanter systemischer Stellhebel sowie repräsentativer Zielgrößen zur Quantifizierung des technischen Handlungsbedarfs in der Auslegung des elektrischen Antriebssystems. Des Weiteren ist die Definition von spezifischen kundenrelevanten Fahranforderungen sowohl zur Anforderungsanalyse als auch zur Analyse der repräsentativen Betriebspunktverteilung erforderlich. Ein zentraler Bestandteil der Objektivierung der Kundenrelevanz ist die Definition einer geeigneten Betriebsstrategie, anhand welcher Zielkriterien situationsbedingt gewichtet werden. Ein geeigneter Betriebsstrategieansatz setzt zur Analyse des jeweils am besten geeigneten Betriebsverhaltens keine vollständige Kenntnis über die Wechselwirkungen im hybriden Antriebsstrang voraus. Dies stellt zugleich die Beantwortung der **Forschungsfrage 3** nach einer geeigneten simulationsgestützten Methode zur Bewertung gesamtsystemischer Zusammenhänge dar, wonach die entwickelte 2D-EMCS deren zentraler Bestandteil ist. Zudem erfolgt die Übersetzung der Fahranforderungen in Antriebsstranganforderungen anhand eines Simulationsmodells des P24-Konzepts. Für viele Bestandteile des Modells sind dabei aus der Literatur bekannte und validierte Teilmodelle wie beispielsweise das verwendete Batteriemodell ausreichend.

**Forschungsfrage 2** widmet sich der Definition gesamtsystemischer Zusammenhänge sowie deren Aufbereitung als Basis eines Konzeptentscheids und wird wie folgt beantwortet: Relevante gesamtsystemische Zusammenhänge bezeichnen zur Möglichkeit einer Anforderungsdiskussion den Einfluss relevanter systemischer Stellhebel auf repräsentative Zielgrößen der Systemauslegung. Als Beispiele dafür können die in dieser Arbeit gewählte Höchstgeschwindigkeitsanforderung beziehungsweise die notwendigen Peak- und Dauerleistungen der Komponenten sowie Auswirkungen auf den Fahrkomfort genannt werden. Relevante gesamtsystemische Zusammenhänge liefern somit die im Rahmen einer Kosten-Nutzen Analyse maßgeblichen Handlungsbedarfe und Handlungsmöglichkeiten in der Systemauslegung. Eine geeignete Visualisierung stellt den Einfluss der Parameter auf die Zielgrößen in vereinfachter und nachvollziehbarer Art und Weise auch in höherdimensionalen Lösungsräumen dar. Hierzu eignen sich besonders Methoden aus dem Bereich der Systemidentifikation und des Maschinellen Lernens, wie die in dieser Arbeit verwendeten ICE-Plots. Unabhängig von der gewählten Visualisierungstechnik ist die Anzahl der zu untersuchenden Varianten aus Gründen der Praktikabilität auf das für die Analyseziele notwendige Minimum zu reduzieren.

Die Beantwortung der **Forschungsfrage 4**, welche Betriebspunkte relevant für eine Detailoptimierung der Antriebsmaschinen sind, erfolgt anhand der mittels 2D-ECMS identifizierten repräsentativen Betriebspunktverteilung in den elektrischen Maschinen. Diese befinden sich sowohl im Motor- als auch im Generatorbetrieb im Teillastbereich. Hierbei wird die P2-EM hauptsächlich zur Lastpunktanhebung genutzt und eine Optimierung des Wirkungsgrades im motorischen Bereich der P4-EM bietet hohes Potential zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs, da die elektrische Fahrt hauptsächlich durch die elektrische Maschine an der Hinterachse dargestellt wird. Repräsentative Betriebspunkte resultieren dabei aus den Drehmomentaufteilungen in den jeweiligen Betriebsmodi, deren Auswahl hinsichtlich der effizientesten Betriebsweise erfolgt.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Substitution bestimmter Leistungspositionierungen im Produktportfolio durch Hybrdikonzepte ist zur Einhaltung gesetzlicher Anforderungen notwendig und trägt ferner dazu bei, dem gestiegenen gesellschaftlichen Umweltbewusstsein zu genügen. Hierzu bieten komplexe Hybridkonzepte ein hohes Potential zur Erreichung von kundenrelevanten Auslegungszielen wie beispielsweise eine Verringerung des Kraftstoffverbrauchs. Die Gesamtsystemleistung des Antriebs definiert sich dabei zunehmend durch die Leistungsfähigkeit des elektrischen Antriebssystems, wonach sich die verbrennungsmotorische Leistung entsprechend reduziert. Nach Definition in dieser Arbeit erfüllt eine kundenrelevante Systemauslegung insbesondere die Erwartungen an die Leistungsfähigkeit und den Fahrkomfort im Vergleich zu einem konventionellen Fahrzeug, wodurch sich ein Anspannungsgrad für eine bedarfsgerechte Auslegung des elektrischen Antriebssystems ergibt. Das hieraus resultierende Spannungsfeld aus Antriebseffizienz, Leistungsfähigkeit und Fahrkomfort erfordert eine Umkehrung der bisher gestellten Frage im System-Level Design, welche Auslegungsziele mit selbst auferlegten Anforderungen erreicht werden können. In dieser Arbeit wird stattdessen zum ersten Mal die Frage beantwortet, welcher Bedarf bezüglich der Leistungsfähigkeit des elektrischen Antriebssystems aus der Erfüllung ursprünglicher Anforderungen resultiert und wie sich diese auf die weiteren Auslegungsziele der Antriebseffizienz und des Fahrkomforts auswirken. Als Basis eines Konzeptentscheids werden die Einflüsse relevanter systemischer Stellhebel, beispielsweise eine Anforderungsreduzierung, auf die genannten Auslegungsbedarfe und -ziele in transparenter und nachvollziehbarer Art und Weise visualisiert.

Die Bewertung der Leistungsbedarfe erfordert eine Methode zur vollständigen Charakterisierung der aus der Fahranforderung resultierenden Belastung des elektrischen Antriebssystems. Dies erfolgt mittels des Zeitwichtungsverfahrens, welches einen der zentralen Bestandteile der vorgestellten Methode beschreibt. Neben der Verwendung zur Zielgrößendefinition trägt das Verfahren zur Identifikation und Synthese von kundenrelevanten Fahranforderungen bei. Eine weitere Neuerung zur Realisierung

der Methode stellt der entwickelte Betriebsstrategieansatz zur Analyse komplexer Hybridkonzepte mit zwei elektrischen Traktionsmaschinen dar. Dieser kombiniert die Stärken der optimierungsbasierten Equivalent Consumption Minimization Strategy mit den Vorteilen nachvollziehbarer Fuzzy-Systeme. Zum einen handhabt die Optimierungskomponente der ECMS komplexe nichtlineare Zusammenhänge im Antriebsstrang, zum anderen erlauben die Fuzzy-Systeme eine gezielte Beeinflussung des Steuerungsverhaltens auf Basis von Erfahrungen und Intuition. Letzteres ermöglicht die in dieser Arbeit durchgeführten transparenten Analysen der Hybridkonzepte im Spannungsfeld aus Antriebseffizienz, Leistungsfähigkeit und Fahrkomfort. Die Bewertung der Einsatztauglichkeit des Hybridkonzepts in bestimmten Leistungspositionierungen erfordert aufgrund des genannten Spannungsfelds eine separate Betrachtung innerhalb zweier Untersuchungsrahmen. Diese sind die Anforderungsanalyse und die Analyse bezüglich der Antriebseffizienz. Hierzu liefert die Anforderungsanalyse den Einfluss relevanter systemischer Stellhebel auf die leistungsseitigen Auslegungsbedarfe des elektrischen Antriebssystems, die erforderliche Dimensionierung der HV-Batterie sowie die Auswirkungen auf den Fahrzeugkomfort anhand des resultierenden Drehzahlniveaus. Der Einsatz von ICE-Plots zur Visualisierung dieser gesamtsystemischen Zusammenhänge erlaubt eine Bewertung der technischen Handlungsbedarfe im Kontext einer Kosten-Nutzen-Analyse und der Auswirkungen nachträglicher Maßnahmen der Anforderungsreduzierung. Ferner identifiziert die Anforderungsanalyse die notwendige verbrennungsmotorische Leistung zur Erfüllung kundenrelevanter Fahranforderungen. Auf Basis dieser Ergebnisse werden im Rahmen einer nachgelagerten Analyse der repräsentativen Betriebspunktverteilung Potentiale zur Komponenteoptimierung hinsichtlich der Antriebseffizienz bewertet. Diese Analyse wird hauptsächlich durch den Einsatz des entwickelten Betriebsstrategieansatzes ermöglicht. Die Berücksichtigung von Komfortaspekten innerhalb des Steuerungsproblems trägt hierbei zur Praxisrelevanz der Ergebnisse bei.

Die Anwendung der Methode zur exemplarischen Bewertung der Einsatztauglichkeit eines P24-Konzepts in zwei unterschiedlichen Anwendungsfällen bestätigt die Notwendigkeit einer Anforderungsanalyse in der Konzeptionierung zukünftiger hybrider Antriebsstränge. Der auf Basis gesamtsystemischer Zusammenhänge visualisierte Handlungsspielraum bietet dabei eine fundierte technische Grundlage zur Bewertung von Hybridkonzepten im Kontext der Kundenrelevanz. Die analysierten Handlungsbedarfe bezüglich der notwendigen Leistungsfähigkeit des elektrischen Antriebssystems tragen im System-Level Design ferner zur Handhabung der Varianten- und Anforderungsvielfalt bei, da Ausschlusskriterien frühzeitig im Entwicklungspro-

zess identifiziert werden können. Des Weiteren forcieren die Ergebnisse der Methode eine notwendige Diskussion darüber, ob ursprüngliche Anforderungen von konventionellen Antriebssträngen unter den Gesichtspunkten der Kundenrelevanz und zur Erreichung übergeordneter Auslegungsziele haltbar sind. Dieser Aspekt unterstreicht zusätzlich die Praxisrelevanz der gezeigten Methode, welche somit einen wichtigen Beitrag zum Forschungsstand im System-Level Design leistet.

## **Ausblick**

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen die Relevanz der Methode innerhalb der Konzeptionierung von hybriden Antriebssträngen. Als Teil des Trichterprozesses im System-Level Design kann die Methode als fester Bestandteil der Bewertung von zukünftigen Hybridkonzepten bezüglich kundenrelevanter Anforderungen entscheidend zur Beherrschung der Variantenvielfalt beitragen. Des Weiteren können die Analysen des Betriebsverhaltens in prägenden und alltäglichen Fahrsituationen als Applikationsbasis einer geeigneten Betriebsstrategie für P24-Konzepte verwendet werden. Die vorliegende Arbeit liefert darüber hinaus einen grundlegenden Ansatz zur Definition und Bewertung von kundenrelevanten Anforderungen im System-Level Design hybrider Antriebsstränge. Die entwickelte Methode wird bereits zur Anforderungsanalyse in der Konzeptfindung hybrider Antriebsstränge im Rahmen der Vorentwicklungsumfänge bei der Mercedes-Benz AG verwendet. Aufgrund der praktischen Relevanz der Ergebnisse ist der Einsatz der Methode zur Ergänzung des bisherigen Auslegungsprozesses für zukünftige Antriebsprojekte in der Vorentwicklung fest eingeplant.

Die Frage, welche kundenrelevante Anforderungen für zukünftige Antriebskonzepte entscheidend sind, bietet weiterhin ein hohes Forschungspotential und wird auch in dieser Arbeit nicht abschließend geklärt. In zukünftigen Forschungsarbeiten kann dabei insbesondere eine differenziertere Definition der kundenrelevanten Leistungsanforderungen an den Antriebsstrang anhand tiefgreifender Analysen des repräsentativen Kunden- und Nutzungsverhaltens erfolgen. Die Erweiterung der Methode um neue Zielkriterien und Modellierungsansätze sowie die Berücksichtigung neuer Aspekte in der Fahrzyklensynthese bieten das Potential einer Bewertung der statistischen Sicherheit der in dieser Arbeit gemachten Aussagen bezüglich des relevanten Nutzungsverhaltens. Potentiale zur weiteren Verbesserung der Methode bestehen zudem in der Definition neuer Fuzzy-Systeme zur Adaption des Äquivalenzfaktors. Hierbei kann eine automatisierte und zyklenunabhängige Erkennung der Region of Interest zu einer Steigerung der Akzeptanz der Ergebnisse beitragen. Dieser Aspekt

erlaubt dann beispielsweise ein gezielteres Nachladen der notwendigen Energie in die HV-Batterie im Vorfeld der Region of Interest oder die Erreichung eines ausgeglichenen SoC am Ende des Zyklus, falls dies für zukünftige Aussagen als relevant angesehen wird. Für die Anwendbarkeit in unterschiedlichen Antriebsprojekten und zur Übertragbarkeit auf weitere Anwendungsfälle im Forschungsbereich des System-Level Design ist eine Erweiterung der Methode auf weitere Antriebstopologien wünschenswert, wie zum Beispiel Brennstoffzellenfahrzeuge.

# A Adaptionssysteme

In Anhang A werden die verwendeten Systeme zur Beeinflussung des Steuerungsverhaltens und deren Parametrierung detailliert aufgeführt.

## A.1 Schaltstrategie

Die Zugehörigkeitsfunktionen der Schaltstrategie sind in Bild A.1 dargestellt.

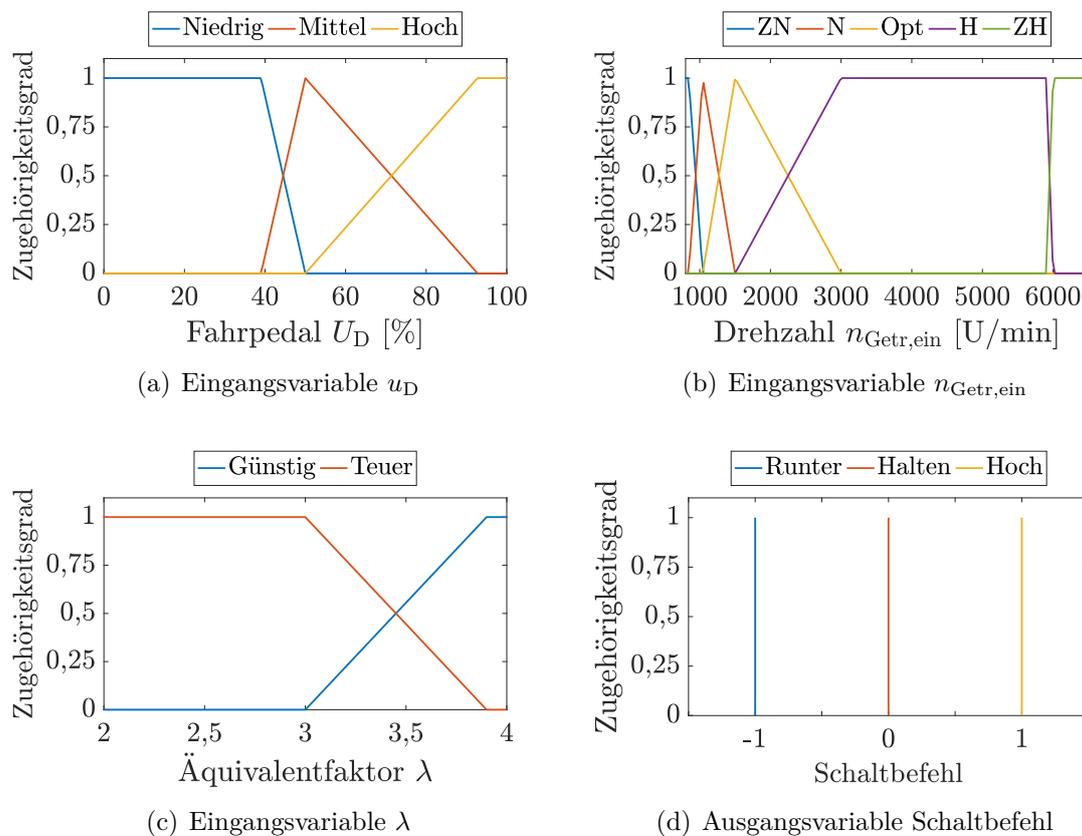


Bild A.1: Zugehörigkeitsfunktionen der Fuzzy-Schaltstrategie.

Die Fuzzy-Schaltstrategie berechnet aus den Eingangsgrößen Fahrpedal  $u_D$ , Getriebeeingangsdrehzahl  $n_{\text{Getr,ein}}$  und dem Äquivalenzfaktor  $\lambda$  den Schaltbefehl, welcher die Ausgangsgröße darstellt und Werte im Bereich  $[-1, 1]$  annehmen kann. Das Fuzzy-System liefert dabei in Abhängigkeit der in Tabelle A.1 gezeigten Regelbasis kontinuierliche Ausgangswerte. Der aktuelle Gang  $G$  wird erhöht, sofern der auf den nächsten ganzzahligen Wert gerundete Schaltbefehl 1 beträgt. Analog dazu erfolgt bei dem Wert Schaltbefehl = -1 eine Reduzierung des Getriebegangs und der Wert 0 stellt ein Verbleiben im aktuellen Gang dar.

Tabelle A.1: Regelbasis der Fuzzy-Schaltstrategie

$N_R$	Wenn	Dann
$R_1$	$n_{\text{Getr,ein}}=\text{ZN}$	Schaltbefehl=Runter
$R_2$	$n_{\text{Getr,ein}}=\text{ZH}$	Schaltbefehl=Hoch
$R_3$	$u_D=\text{Niedrig}$ und $n_{\text{Getr,ein}}=\text{N}$ und $\lambda=\text{Günstig}$	Schaltbefehl=Halten
$R_4$	$u_D=\text{Niedrig}$ und $n_{\text{Getr,ein}}=\text{Opt.}$ und $\lambda=\text{Günstig}$	Schaltbefehl=Halten
$R_5$	$u_D=\text{Niedrig}$ und $n_{\text{Getr,ein}}=\text{H}$ und $\lambda=\text{Günstig}$	Schaltbefehl=Hoch
$R_6$	$u_D=\text{Mittel}$ und $n_{\text{Getr,ein}}=\text{N}$ und $\lambda=\text{Günstig}$	Schaltbefehl=Halten
$R_7$	$u_D=\text{Mittel}$ und $n_{\text{Getr,ein}}=\text{Opt.}$ und $\lambda=\text{Günstig}$	Schaltbefehl=Halten
$R_8$	$u_D=\text{Mittel}$ und $n_{\text{Getr,ein}}=\text{H}$ und $\lambda=\text{Günstig}$	Schaltbefehl=Hoch
$R_9$	$u_D=\text{Hoch}$ und $n_{\text{Getr,ein}}=\text{N}$ und $\lambda=\text{Günstig}$	Schaltbefehl=Runter
$R_{10}$	$u_D=\text{Hoch}$ und $n_{\text{Getr,ein}}=\text{Opt.}$ und $\lambda=\text{Günstig}$	Schaltbefehl=Halten
$R_{11}$	$u_D=\text{Hoch}$ und $n_{\text{Getr,ein}}=\text{H}$	Schaltbefehl=Halten
$R_{12}$	$u_D=\text{Niedrig}$ und $n_{\text{Getr,ein}}=\text{N}$ und $\lambda=\text{Teuer}$	Schaltbefehl=Runter
$R_{13}$	$u_D=\text{Niedrig}$ und $n_{\text{Getr,ein}}=\text{Opt.}$ und $\lambda=\text{Teuer}$	Schaltbefehl=Runter
$R_{14}$	$u_D=\text{Niedrig}$ und $n_{\text{Getr,ein}}=\text{H}$ und $\lambda=\text{Teuer}$	Schaltbefehl=Halten
$R_{15}$	$u_D=\text{Mittel}$ und $n_{\text{Getr,ein}}=\text{N}$ und $\lambda=\text{Teuer}$	Schaltbefehl=Runter
$R_{16}$	$u_D=\text{Mittel}$ und $n_{\text{Getr,ein}}=\text{Opt.}$ und $\lambda=\text{Teuer}$	Schaltbefehl=Runter
$R_{17}$	$u_D=\text{Mittel}$ und $n_{\text{Getr,ein}}=\text{H}$ und $\lambda=\text{Teuer}$	Schaltbefehl=Halten
$R_{18}$	$u_D=\text{Hoch}$ und $n_{\text{Getr,ein}}=\text{N}$ und $\lambda=\text{Teuer}$	Schaltbefehl=Runter

In der Tabelle sowie in Bild A.1 bezeichnen die Abkürzungen ZN, N, Opt., H und ZH die linguistischen Terme „Zu Niedrig“, „Niedrig“, „Optimal“, „Hoch“ und „Zu Hoch“. Aus der Regelbasis wird ersichtlich, dass sämtliche Regeln mit der Prämisse  $\lambda=\text{Teuer}$  ( $R_{12}$ - $R_{18}$ ) bezogen auf die elektrische Energie entweder zu einem Runterschalten führen beziehungsweise ein Halten des aktuellen Gangs zur Folge haben. Dieser Aspekt sorgt innerhalb der Anforderungsanalyse für den Erhalt der Leistungsfähigkeit, da in Abhängigkeit der energetischen Kosten und damit auf Basis der Energiebilanz die Drehzahl des Verbrennungsmotors situationsbedingt erhöht werden kann, um gegebenenfalls höherer Ladeleistungen zu erreichen.



## A.2 Implementierung der weichen Nebenbedingungen

### Bestrafung von Motorstarts- und stopps

Die verwendeten Regelbasen zur Bestrafung von Motorstarts beziehungsweise -stopps sind in den Tabellen A.2 und A.3 gezeigt. Hierbei sind die Prämissen beider Systeme identisch, jedoch führen diese zu unterschiedlichen Konklusionen. Die Konklusionen des Systems zur Bestrafung von Motorstarts sind dabei jeweils umgekehrt zu jenen Konklusionen des Systems zur Bestrafung von Motorstopps.

Tabelle A.2: Regelbasis des Fuzzy-Systems zur Bestrafung von Motorstarts

$N_R$	Wenn	Dann
$R_1$	$\lambda$ =Günstig und $v_{Fzg,max}$ =Niedrig	$P_{En,on}$ =Hoch
$R_2$	$\lambda$ =Günstig und $v_{Fzg,max}$ =Mittel	$P_{En,on}$ =Mittel
$R_3$	$\lambda$ =Günstig und $v_{Fzg,max}$ =Hoch	$P_{En,on}$ =Null
$R_4$	$\lambda$ =Optimal und $v_{Fzg,max}$ =Niedrig	$P_{En,on}$ =Mittel
$R_5$	$\lambda$ =Optimal und $v_{Fzg,max}$ =Mittel	$P_{En,on}$ =Niedrig
$R_6$	$\lambda$ =Optimal und $v_{Fzg,max}$ =Hoch	$P_{En,on}$ =Null
$R_7$	$\lambda$ =Teuer	$P_{En,on}$ =Null

Tabelle A.3: Regelbasis des Fuzzy-Systems zur Bestrafung von Motorstopps

$N_R$	Wenn	Dann
$R_1$	$\lambda$ =Günstig und $v_{Fzg,max}$ =Niedrig	$P_{En,off}$ =Null
$R_2$	$\lambda$ =Günstig und $v_{Fzg,max}$ =Mittel	$P_{En,off}$ =Niedrig
$R_3$	$\lambda$ =Günstig und $v_{Fzg,max}$ =Hoch	$P_{En,off}$ =Hoch
$R_4$	$\lambda$ =Optimal und $v_{Fzg,max}$ =Niedrig	$P_{En,off}$ =Niedrig
$R_5$	$\lambda$ =Optimal und $v_{Fzg,max}$ =Mittel	$P_{En,off}$ =Mittel
$R_6$	$\lambda$ =Optimal und $v_{Fzg,max}$ =Hoch	$P_{En,off}$ =Hoch
$R_7$	$\lambda$ =Teuer	$P_{En,off}$ =Hoch

Die Zugehörigkeitsfunktionen der Eingangsvariablen  $\lambda$  und  $v_{Fzg,max}$  sowie die der Ausgangsvariablen  $P_{En,on}$  und  $P_{En,off}$  sind in Bild A.2 dargestellt. Diese sind für die beiden Fuzzy-Systeme identisch, wobei sich der Index der Ausgangsvariablen lediglich anhand der Bezeichnung „on“ beziehungsweise „off“ unterscheidet. Die möglichen Strafkosten bewegen sich dabei im Bereich von 0 W bis 6000 W, welche zu den jeweiligen Werten der Äquivalenzleistung addiert werden.

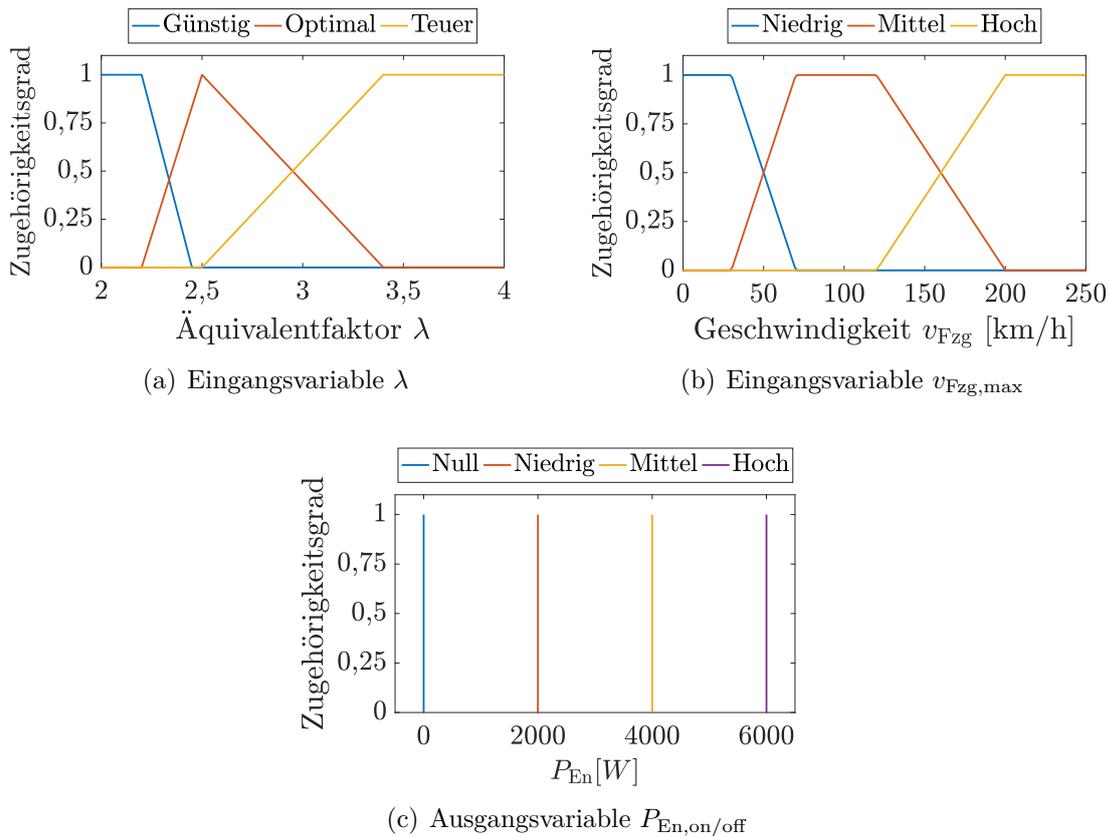


Bild A.2: Fuzzy-System zur Bestrafung von Motorstarts und -stops

## Bestrafung des seriellen Modus

Neben der Bestrafung der Motorstarts und -stops erfolgt eine Bestrafung des Wechsels in den seriellen Modus zur Verhinderung von hohen Drehzahlprüngen.

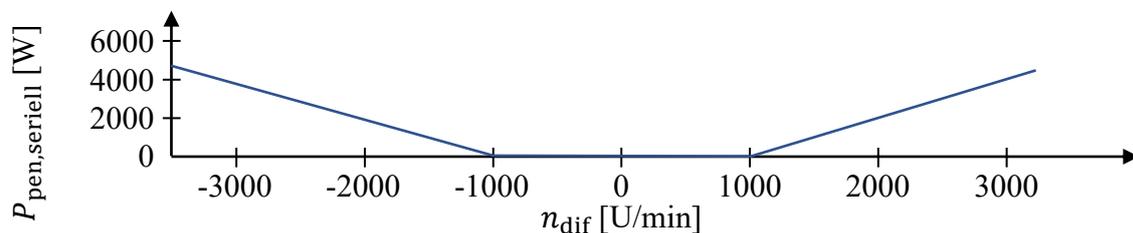


Bild A.3: Funktion zur Bestrafung des Wechsels in den seriellen Modus.

Dies erfolgt anhand einer trichterförmigen Funktion, welche die Berechnung der Strafkosten  $P_{pen,seriell}$  auf Basis der Drehzahlabweichung  $n_{dif}$  zwischen dem Getriebeingang und der VM-Drehzahl im seriellen Modus erlaubt (vgl. Bild A.3).

## Beschränkung der Lastpunktanhebung

Eine Beschränkung der Lastpunktanhebung soll verhindern, dass sich ein der Fahranforderung  $T_{\text{Anf}}$  gegensätzlicher Drehmomentverlauf des Verbrennungsmotors ergibt, etwa durch das Nachladen der Batterie (die Fahranforderung fällt ab, während das Motordrehmoment steigt). Dies erfordert zunächst die Formulierung der Strafkosten, welche in Abhängigkeit der Abweichungen der Drehmomentverläufe berechnet werden. Die Berechnung erfolgt auf Basis eines Referenzdrehmoments

$$T_{\text{VM,ref}}(t_n) = \beta [mT_{\text{VM}}(t_{n-1})] + (1 - \beta) [\Delta T_{\text{Anf}} + T_{\text{VM}}(t_{n-1})],$$

$$m = \frac{T_{\text{Anf}}(t_n)}{T_{\text{Anf}}(t_{n-1})}, \Delta T_{\text{Anf}} = T_{\text{Anf}}(t_n) - T_{\text{Anf}}(t_{n-1}), \beta \in [0, 1] \quad (\text{A.1})$$

wobei abweichende Verbrennungsmotormomente im Steuerungsraum  $\mathbf{U}$  bestraft werden. Hierbei beschreibt  $m$  den Gradienten zwischen der Drehmomentanforderung bezogen auf den Getriebeeingang  $T_{\text{Anf}}$  im aktuellen Zeitschritt  $t_n$  und im vergangenen Zeitschritt  $t_{n-1}$ . Hierbei kann der berechnete Gradient insbesondere bei Änderungen der Drehmomentanforderungen in sehr kleinen Wertebereichen zu einer unvorteilhaften Berechnung des Soll-Drehmoments des VM führen. Aus diesem Grund wird die Änderung der Drehmomentanforderung  $\Delta T_{\text{Anf}}$  im Wertebereich als weiteres Kriterium zur Bewertung des qualitativen Drehmomentverlaufs verwendet. Für die Untersuchungen in dieser Arbeit werden die beiden Kriterien anhand einer Gewichtung von  $\beta = 0,5$  gleichermaßen verwendet. Anhand des Referenzdrehmoments  $T_{\text{VM,ref}}(t_n)$  wird die Spalte im Steuerungsraum  $\mathbf{U}$  (vgl. Bild 3.18(b)) mit dem ähnlichsten Wert des Verbrennungsmotordrehmoments bestimmt. Links und rechts daneben liegende Spalten werden indes in aufsteigender Form mit den Strafkosten 500 W, 2000 W und 4000 W belegt. Die restlichen Spalten des Steuerungsraums  $\mathbf{U}$  werden mit Ausnahme der Spalte des EV-Modus mit dem Wert 4000 W belegt.

Die weiche Nebenbedingung ist eine Maßnahme zur Verbesserung des Fahrkomforts, welche in Abhängigkeit von der Fahranforderung jedoch situativ mehr oder weniger zu gewichten ist. Hierfür wird das durch die Zugehörigkeitsfunktionen in Bild A.4 und die Regelbasis in Tabelle A.4 definierte Fuzzy-System verwendet. Der Ausgangswert des Fuzzy-Systems wird mit den Strafkosten multipliziert. Dabei erfolgt eine Abschwächung der Strafkosten bei hohen Geschwindigkeiten und wenn elektrische Energie als teuer bewertet wird. Die Aussage „ $\lambda \neq$  Sehr Teuer“ trifft zu, wenn  $\lambda$  nicht als „Sehr Teuer“ bewertet wird. Das heißt, die unscharfen Werte „ $\lambda =$  Teuer“ oder „ $\lambda =$  Optimal“ oder „ $\lambda =$  Günstig“ führen zu hohen Erfüllungsgraden.

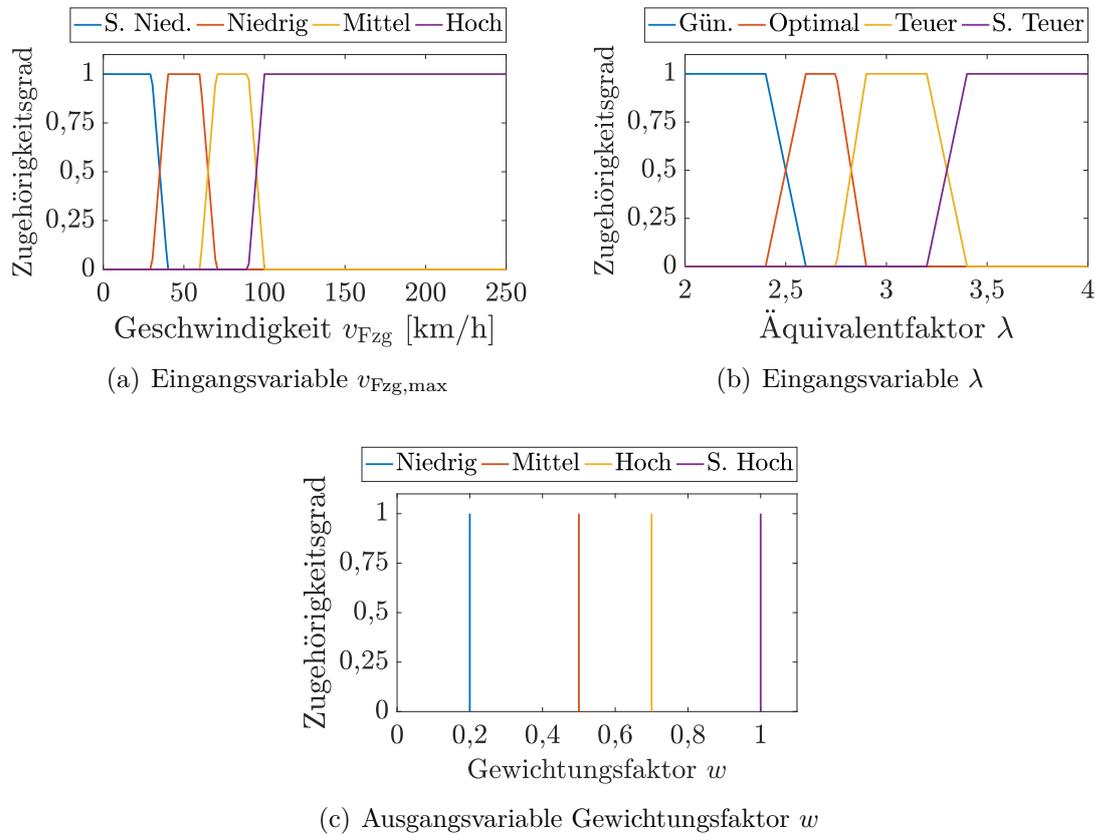


Bild A.4: Fuzzy-System zur Gewichtung des Strafterms der Lastpunktanhebung.

Tabelle A.4: Regelbasis zur Gewichtung des Strafterms der Lastpunktanhebung

$N_R$	Wenn	Dann
$R_1$	$v_{Fzg,max}$ =Sehr Niedrig und $\lambda \neq$ Sehr Teuer	Gewichtung=Sehr Hoch
$R_2$	$v_{Fzg,max}$ =Niedrig und $\lambda \neq$ Sehr Teuer	Gewichtung=Sehr Hoch
$R_3$	$v_{Fzg,max}$ =Mittel und $\lambda$ =Günstig	Gewichtung=Sehr Hoch
$R_4$	$v_{Fzg,max}$ =Mittel und $\lambda$ =Optimal	Gewichtung=Hoch
$R_5$	$v_{Fzg,max}$ =Mittel und $\lambda$ =Teuer	Gewichtung=Mittel
$R_6$	$v_{Fzg,max}$ =Hoch und $\lambda$ =Günstig	Gewichtung=Hoch
$R_7$	$v_{Fzg,max}$ =Hoch und $\lambda$ =Optimal	Gewichtung=Mittel
$R_8$	$v_{Fzg,max}$ =Hoch und $\lambda$ =Teuer	Gewichtung=Niedrig
$R_9$	$\lambda$ =Sehr Teuer	Gewichtung=Niedrig

## A.3 Adaption des Äquivalenzfaktors

In der Anforderungsanalyse wird für die PHEV- und HEV-Anwendung der Einfluss der Betriebsstrategie mittels zweier Adaptionen des Äquivalenzfaktors untersucht.

### PHEV-Anwendung

Bei Verwendung des Fuzzy-System A wird dabei ausschließlich das Ziel verfolgt, den Ladezustand der Batterie mittels vollständiger Ausnutzung des Nachladepotentials auf einem bestimmten Niveau zu halten. Die hierzu definierten Zugehörigkeitsfunktionen des Systems zur Adaption des Äquivalenzfaktors sind in Bild A.5 dargestellt.

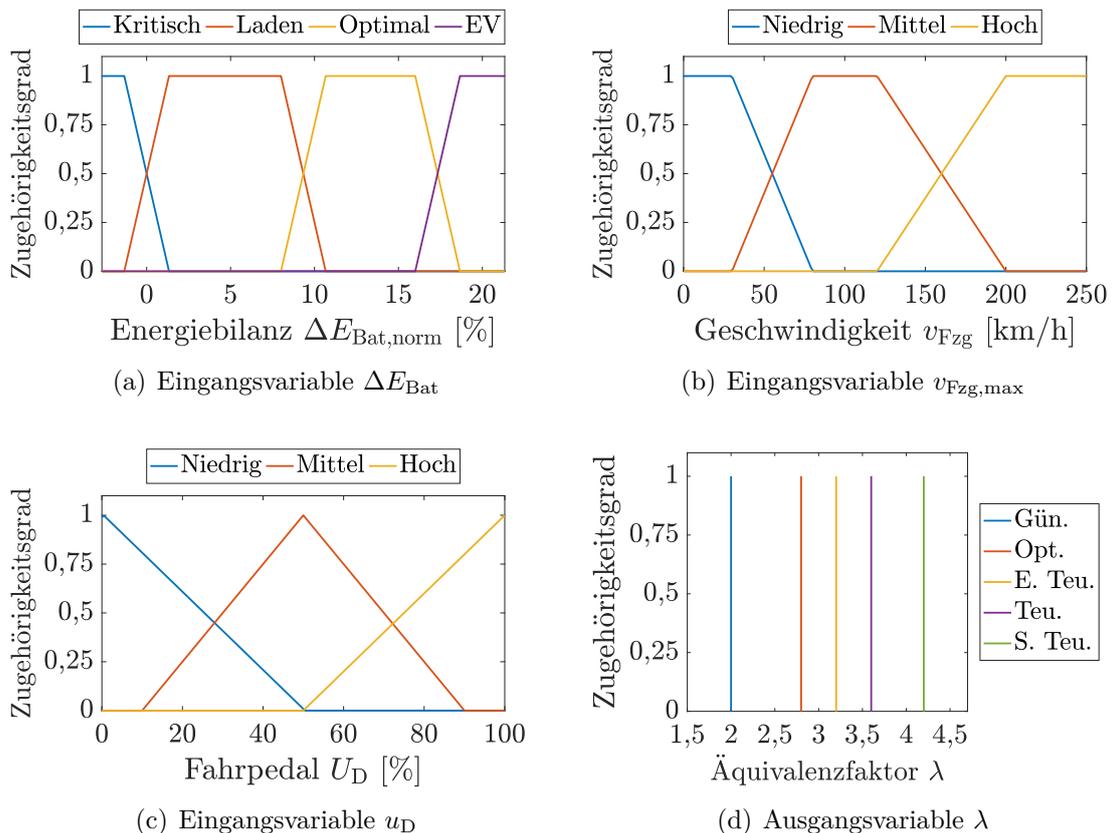


Bild A.5: PHEV:Zugehörigkeitsfunktionen des Fuzzy-Systems A.

Anhand der Regelbasis von Fuzzy-System A in Tabelle A.5 wird ersichtlich, dass zur Berechnung des Äquivalenzfaktors  $\lambda$  lediglich die Eingangsvariable  $\Delta E_{\text{Bat}}$  verwendet

wird. Darüber hinaus bleiben die linguistischen Terme „Eher Teuer“ und „Teuer“ der Singletons in der Regelbasis unberücksichtigt. Prinzipiell besteht das funktionale Fuzzy-System somit aus nur einer Eingangsvariablen und einer Ausgangsvariablen, welche anhand von drei Singletons definiert ist.

Tabelle A.5: PHEV:Regelbasis des Fuzzy-Systems A zur Adaption von  $\lambda$

$N_{\mathbf{R}}$	Wenn	Dann
$R_1$	$\Delta E_{\text{Bat}} = \text{Kritisch}$	$\lambda = \text{S. Teu.}$
$R_2$	$\Delta E_{\text{Bat}} = \text{Laden}$	$\lambda = \text{S. Teu.}$
$R_3$	$\Delta E_{\text{Bat}} = \text{Laden}$	$\lambda = \text{Opt.}$
$R_4$	$\Delta E_{\text{Bat}} = \text{EV}$	$\lambda = \text{Gün.}$

Diese Implementierung erfolgt dabei aus praktischen Gründen zur einfachen Umsetzbarkeit im verwendeten Simulationsmodell.

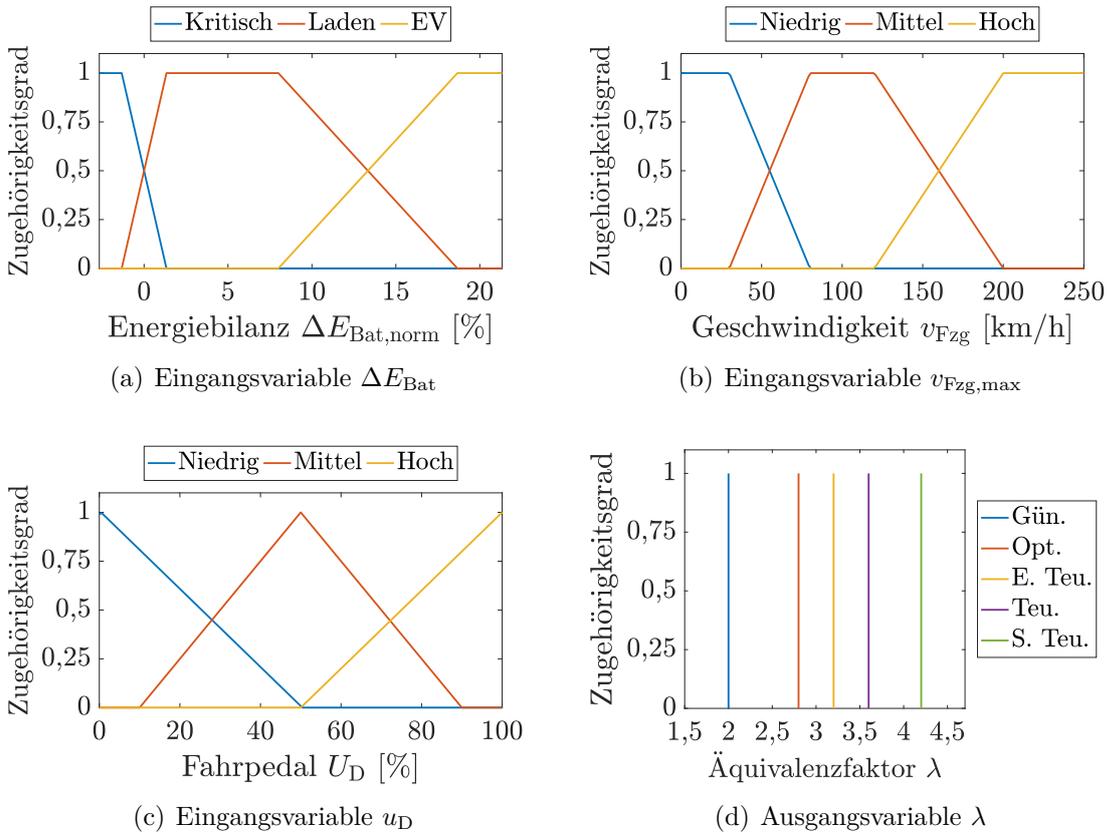


Bild A.6: PHEV:Zugehörigkeitsfunktionen des Fuzzy-Systems B.

Dies erlaubt demnach die Verwendung derselben Schnittstellen zur Implementierung des Fuzzy-System B, dessen Zugehörigkeitsfunktionen in Bild A.6 dargestellt sind. Im Gegensatz zu Fuzzy-System A werden in Fuzzy-System B mittels der in Tabelle A.6 gezeigten Regelbasis Komfortbedingungen situativ stärker oder weniger stark gewichtet. Hierbei sind die Definitionen der Eingangs- und Ausgangsvariablen mit Ausnahme jener der Variablen  $\Delta E_{\text{Bat}}$  identisch zum vorhergehenden Fuzzy-System. Die Gewichtung erfolgt dabei implizit anhand der Adaption des Äquivalenzfaktors und somit durch die Bewertung der Kosten von elektrischer Energie.

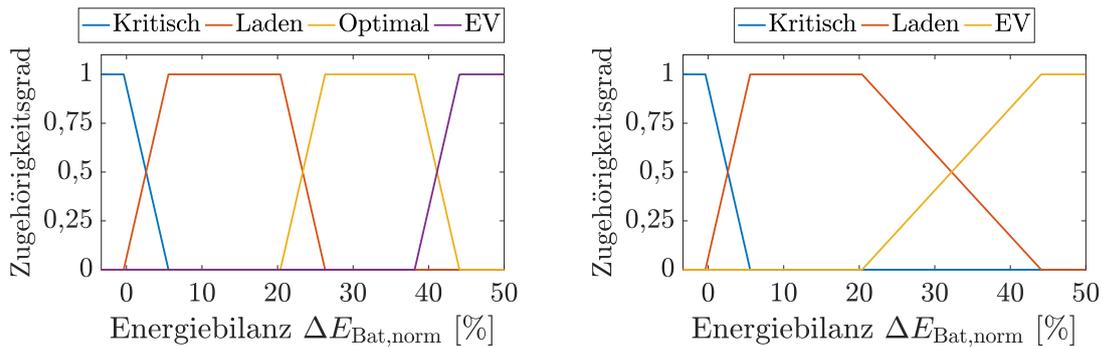
Tabelle A.6: PHEV:Regelbasis des Fuzzy-Systems B zur Adaption von  $\lambda$ 

$N_{\mathbf{R}}$	Wenn	Dann
$R_1$	$\Delta E_{\text{Bat}}=\text{Kritisch}$	$\lambda=\text{S. Teu.}$
$R_2$	$\Delta E_{\text{Bat}}=\text{Laden und } v_{\text{Fzg,max}}=\text{Niedrig und } u_{\text{D}}=\text{Niedrig}$	$\lambda=\text{Opt.}$
$R_3$	$\Delta E_{\text{Bat}}=\text{Laden und } v_{\text{Fzg,max}}=\text{Mittel und } u_{\text{D}}=\text{Niedrig}$	$\lambda=\text{Opt.}$
$R_4$	$\Delta E_{\text{Bat}}=\text{Laden und } v_{\text{Fzg,max}}=\text{hoch und } u_{\text{D}}=\text{Niedrig}$	$\lambda=\text{E. Teu.}$
$R_5$	$\Delta E_{\text{Bat}}=\text{Laden und } v_{\text{Fzg,max}}=\text{Niedrig und } u_{\text{D}}=\text{Mittel}$	$\lambda=\text{E. Teu.}$
$R_6$	$\Delta E_{\text{Bat}}=\text{Laden und } v_{\text{Fzg,max}}=\text{Mittel und } u_{\text{D}}=\text{Mittel}$	$\lambda=\text{S. Teu.}$
$R_7$	$\Delta E_{\text{Bat}}=\text{Laden und } v_{\text{Fzg,max}}=\text{hoch und } u_{\text{D}}=\text{Mittel}$	$\lambda=\text{S. Teu.}$
$R_8$	$\Delta E_{\text{Bat}}=\text{Laden und } v_{\text{Fzg,max}}=\text{Niedrig und } u_{\text{D}}=\text{Hoch}$	$\lambda=\text{Teu.}$
$R_9$	$\Delta E_{\text{Bat}}=\text{Laden und } v_{\text{Fzg,max}}=\text{Mittel und } u_{\text{D}}=\text{Hoch}$	$\lambda=\text{S. Teu.}$
$R_{10}$	$\Delta E_{\text{Bat}}=\text{Laden und } v_{\text{Fzg,max}}=\text{hoch und } u_{\text{D}}=\text{Hoch}$	$\lambda=\text{S. Teu.}$
$R_{11}$	$\Delta E_{\text{Bat}}=\text{EV und } v_{\text{Fzg,max}}=\text{Niedrig und } u_{\text{D}}=\text{Niedrig}$	$\lambda=\text{Gün}$
$R_{12}$	$\Delta E_{\text{Bat}}=\text{EV und } v_{\text{Fzg,max}}=\text{Niedrig und } u_{\text{D}}=\text{Mittel}$	$\lambda=\text{Gün}$
$R_{13}$	$\Delta E_{\text{Bat}}=\text{EV und } v_{\text{Fzg,max}}=\text{Mittel und } u_{\text{D}}=\text{Niedrig}$	$\lambda=\text{Gün}$
$R_{14}$	$\Delta E_{\text{Bat}}=\text{EV und } v_{\text{Fzg,max}}=\text{Mittel und } u_{\text{D}}=\text{Mittel}$	$\lambda=\text{Gün}$
$R_{15}$	$\Delta E_{\text{Bat}}=\text{EV und } v_{\text{Fzg,max}}=\text{hoch und } u_{\text{D}}=\text{Niedrig}$	$\lambda=\text{Opt.}$
$R_{16}$	$\Delta E_{\text{Bat}}=\text{EV und } v_{\text{Fzg,max}}=\text{hoch und } u_{\text{D}}=\text{Mittel}$	$\lambda=\text{Opt.}$
$R_{17}$	$\Delta E_{\text{Bat}}=\text{EV und } v_{\text{Fzg,max}}=\text{hoch und } u_{\text{D}}=\text{Hoch}$	$\lambda=\text{Opt.}$

## HEV-Anwendung

Die Fuzzy-Systeme A und B für die Anforderungsanalyse der HEV-Anwendung nutzen dieselben Regelbasen wie die in den Tabellen A.5 und A.6 gezeigten Regelbasen der PHEV-Anwendung. Zudem werden mit Ausnahme des Wertebereichs der Eingangsvariablen  $\Delta E_{\text{Bat}}$  dieselben Definitionen von Zugehörigkeitsfunktionen wie in den Bildern A.5 und A.6 verwendet. Der Energieinhalt der in der HEV-Anwendung verwendeten Batterie beträgt 20% des Energieinhalts der Batterie in der Studie

zum PHEV. Hierdurch ergibt sich ein größerer normierter Wertebereich der Variablen  $\Delta E_{\text{Bat}}$  in Bild A.7 im Vergleich zur PHEV-Anwendung. Die exakten Wertebereiche der Eingangsvariablen  $\Delta E_{\text{Bat}}$  werden auf Basis der Zusammenhänge des energetischen Lastfalls und hinsichtlich eines geeigneten Ergebnis eingestellt. Die Zugehörigkeitsfunktionen der Variablen  $\Delta E_{\text{Bat}}$  sind für Fuzzy-System A im Diagramm A.7(a) und für Fuzzy-System B im Diagramm A.7(a) dargestellt.



(a) Eingangsvariable  $\Delta E_{\text{Bat}}$  von Fuzzy-System A (b) Eingangsvariable  $\Delta E_{\text{Bat}}$  von Fuzzy-System B

Bild A.7: HEV: Unterschiedliche Zugehörigkeitsfunktionen der Fuzzy-Systeme A und B zur Adaption von  $\lambda$ .



## B Ergänzende Simulationsergebnisse

In diesem Anhang werden ergänzende Simulationsergebnisse und Informationen zur Anforderungsanalyse der PHEV-Anwendung bereitgestellt. Des Weiteren werden die Ergebnisse der Anforderungsanalyse der HEV-Anwendung analog zu Kapitel 4.1 in zusammengefasster Form dargestellt. Diese dienen als Basis für die Diskussion abweichender Zusammenhänge und neuer Erkenntnisse. Die Anhänge B.3 und B.4 beinhalten Ergänzungen zur Fahrzyklensynthese sowie zur Analyse der repräsentativen Betriebspunktverteilung im Rahmen der Untersuchungen zur Antriebseffizienz

### B.1 Ergänzungen zur Anforderungsanalyse für die PHEV-Anwendung

In diesem Abschnitt erfolgt zunächst in Tabelle B.1 eine Zusammenfassung der Simulationsergebnisse innerhalb der Variationsstudien der Anforderungsanalyse für die PHEV-Anwendung anhand von statistischen Merkmalen. Der Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch liefert in der Anforderungsanalyse Informationen bezüglich der Fahranforderung und des Betriebsstrategieeinflusses. In der Tabelle sind die Werte des Kraftstoffverbrauchs  $\int \dot{m}_{Kt}(t)dt$  bezüglich des in der Untersuchung maximal auftretenden Werts normiert. Somit nimmt der Kraftstoffverbrauch geringfügig durch Verwendung geringerer VM-Leistungen sowie die Verwendung von Fuzzy-System B ab. Eine Reduzierung der Höchstgeschwindigkeit verringert den Kraftstoffverbrauch für sämtliche Konfigurationen um bis zu 10 Prozentpunkte. Des Weiteren ergibt sich ein Trend innerhalb der Verteilung der Mittelwerte von  $\lambda$ , welche sich mit fallender Höchstgeschwindigkeit verringern. Im Gegensatz hierzu steigen die Mittelwerte bei einer Reduzierung der VM-Leistung an. Eine weitere Auffälligkeit ergibt sich anhand der zeitlichen Anteile  $\tau$  der verwendeten Modi. Im Mittel über sämtliche Varianten ist der zeitliche Anteil des EV-Modus bei Verwendung von Fuzzy-System B um 4 Prozentpunkte höher als bei Verwendung von Fuzzy-System A. Des Weiteren führt

die Verwendung von Fuzzy-System B stets zu einem geringeren Anteil des PH-Modus sowie mit Ausnahme der Variante 5 zu einem höheren Anteil des seriellen Modus.

Tabelle B.1: PHEV: Auswahl statistischer Merkmale der Anforderungsanalyse

Varianten				Statistische Merkmale				
#	$P_{VM}$	$v_{Fzg,max}$ [km/h]	Fuzzy-System	$\int \dot{m}_{Kr}$ [%]	$\bar{\lambda}$	$\tau_{EV}$ [%]	$\tau_{PH}$ [%]	$\tau_{Seriell}$ [%]
	-		-		-			
1	VM4	250	A	100,00	3,21	2,26	64,53	33,21
2	VM4	250	B	98,91	3,19	9,12	54,86	36,02
3	VM4	230	A	97,22	3,14	2,23	63,32	34,45
4	VM4	230	B	96,14	3,16	9,71	55,55	34,74
5	VM4	210	A	91,59	3,10	2,17	64,60	33,23
6	VM4	210	B	91,04	3,14	10,67	57,35	31,98
7	VM3	250	A	99,74	3,21	2,81	48,96	48,23
8	VM3	250	B	97,49	3,25	6,32	42,45	51,23
9	VM3	230	A	97,17	3,11	2,88	46,18	50,93
10	VM3	230	B	94,70	3,19	6,94	41,03	52,03
11	VM3	210	A	91,63	3,02	2,90	44,51	52,58
12	VM3	210	B	89,61	3,12	7,48	39,20	53,32
13	VM2	250	A	98,97	3,37	2,51	54,37	43,12
14	VM2	250	B	96,59	3,35	3,60	44,88	51,53
15	VM2	230	A	96,27	3,22	2,53	48,52	48,94
16	VM2	230	B	93,67	3,27	4,67	41,18	54,15
17	VM2	210	A	91,29	3,07	2,73	45,11	52,15
18	VM2	210	B	88,61	3,17	6,09	37,41	56,50
19	VM1	250	A	97,10	3,69	0,67	69,90	29,43
20	VM1	250	B	95,38	3,59	1,57	52,63	45,81
21	VM1	230	A	95,72	3,56	0,66	63,42	35,91
22	VM1	230	B	93,71	3,46	2,54	45,46	52,00
23	VM1	210	A	91,25	3,27	1,50	49,35	49,14
24	VM1	210	B	88,98	3,25	4,00	34,01	61,99

Die in der Tabelle aufgeführten Varianten 5 und 6 dienen im Folgenden als Basis zur Erläuterung des Betriebsstrategieinflusses auf die Batteriedauerleistung.

Das Diagramm in Bild B.1 zeigt Ausschnitte aus der Simulation der Varianten 5 und 6. Hierbei werden im oberen Diagramm die Leistungsverläufe der P4-EM gezeigt, welche sich zum einen durch die Verwendung von Fuzzy-System A und zum anderen durch die Verwendung von Fuzzy-System B ergeben. Das untere Diagramm zeigt die entsprechenden Verläufe von  $\lambda$ .

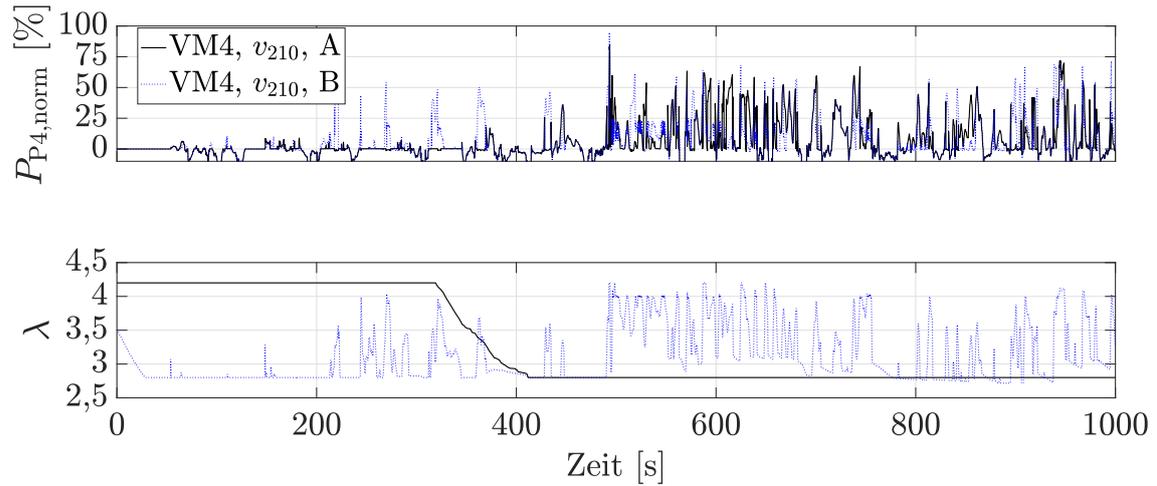


Bild B.1: Abhängigkeit der Leistungsverläufe der P4-EM vom Äquivalenzfaktor.

Die Zusammenhänge zeigen, dass die P4-EM bei geringeren Werten des Äquivalenzfaktors mit höheren Leistungen betrieben wird. Im Falle der Verwendung von Fuzzy-System A erfolgt somit ab dem Zeitpunkt 400s eine häufigere Nutzung der P4-EM mit hohen Antriebsleistungen als bei der Verwendung von Fuzzy-System B.

Die Bilder B.2 und B.3 zeigen Ausschnitte aus den Simulationen zur Anforderungsanalyse der Varianten 1 und 5. Die Verläufe der normierten Antriebsleistungen am Rad  $P_{a,norm}$  werden dabei durch den 30 min-Wert von VM4 ergänzt.

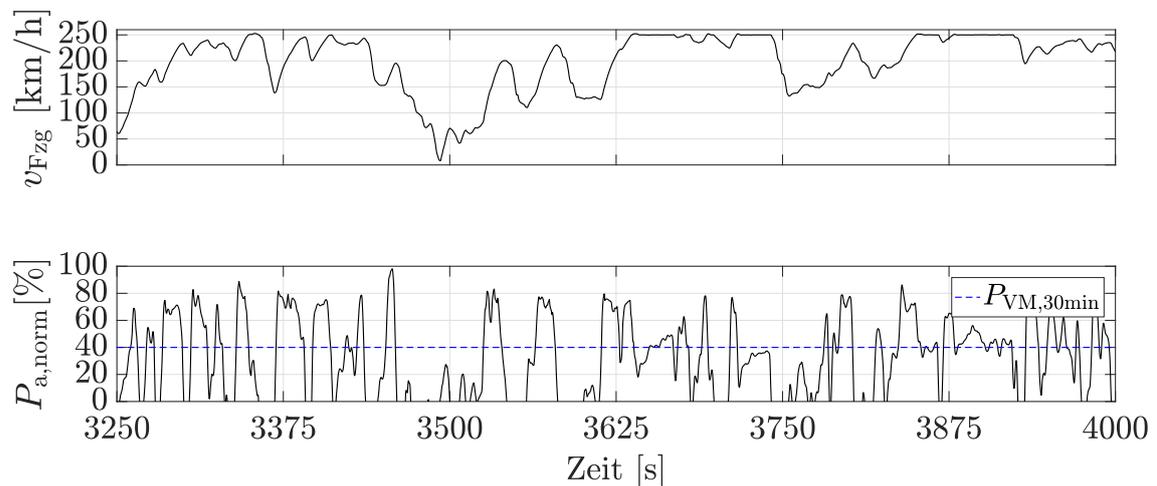


Bild B.2: Analyse der Leistungsanforderung bei  $v_{Fzg,max} = 250$  km/h.

Hierbei kann die Leistungsanforderung einer Konstantfahrt mit 250 km/h in einigen Fällen durch die VM-Leistung abgedeckt werden. Die unterschiedlichen Leistungsanforderungen bei den Konstantfahrten mit 250 km/h in Bild B.2 resultieren aus den

unterschiedlichen Fahrbahnsteigungen. Eine Konstantfahrt mit 210 km/h kann indes nahezu vollständig durch VM4 realisiert werden. Dies gilt auch für Bereiche mit hohen Steigungswiderständen. Des Weiteren werden die Dauern von Leistungspeaks während Beschleunigungsphasen durch eine Reduzierung von  $v_{Fzg,max}$  auf 210 km/h verringert.

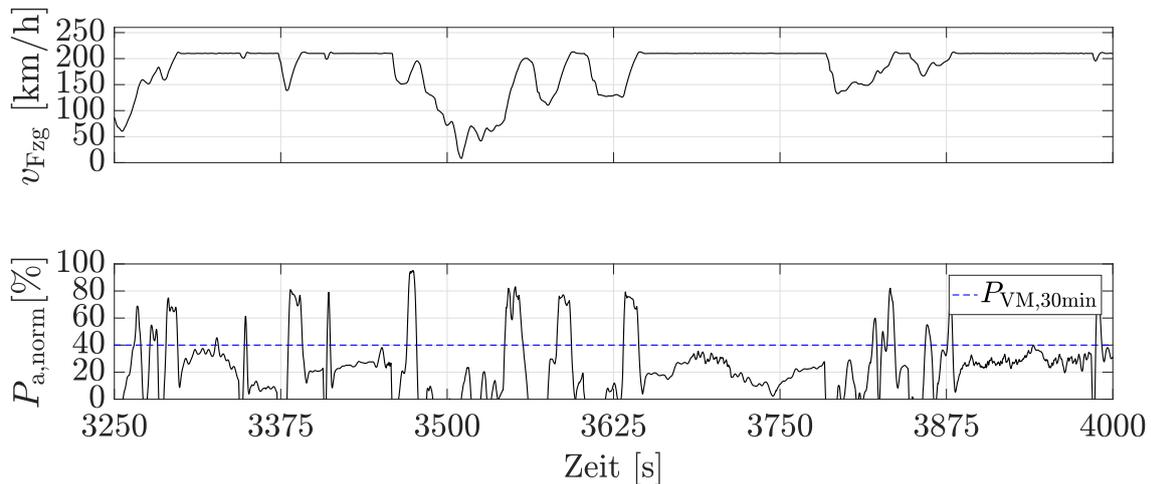


Bild B.3: Analyse der Leistungsanforderung bei  $v_{Fzg,max} = 210$  km/h.

## B.2 Anforderungsanalyse für die HEV-Anwendung

Die Merkmale der verwendeten leistungsanforderungsprägenden Fahranforderung der HEV-Anwendung sind in Tabelle B.2 zusammengefasst. Die Fahranforderung wird dabei ebenfalls aus vorhandenen Dauerlaufmessungen auf deutschen Bundesautobahnen identifiziert. Die Fahrzeugklasse ist dabei identisch zu jener der PHEV-Anwendung, jedoch unterscheiden sich die Leistungspositionierungen.

Tabelle B.2: Merkmale der prägenden Fahranforderung der HEV-Anwendung

Merkmals	Wert
Zykluslänge	21903 s
Zurückgelegte Wegstrecke	816,0 km
Mittlere Geschwindigkeit	134 km/h
Mittlere Steigung/Gefälle	0,6 % / 0,6 %

In Bild B.4 ist darüber hinaus das Ergebnis der Variationsstudie 13 (vgl. Tabelle B.4) in Form des Geschwindigkeitsverlaufs sowie der normierten Leistungsverläufe der Antriebsmaschinen und des normierten Verlaufs der Energiebilanz  $\Delta E_{\text{Bat}}$  dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass in dem Zyklus mehrere Sequenzen existieren, in welchen sämtliche Antriebsmaschinen nahe deren maximalen Leistungen betrieben werden. Die RoI erstreckt sich über eine Dauer von ca. 2000 s und erfordert in dieser Variante einen hardwareseitigen Energievorhalt von 50 % des Energieinhalts der Batterie.

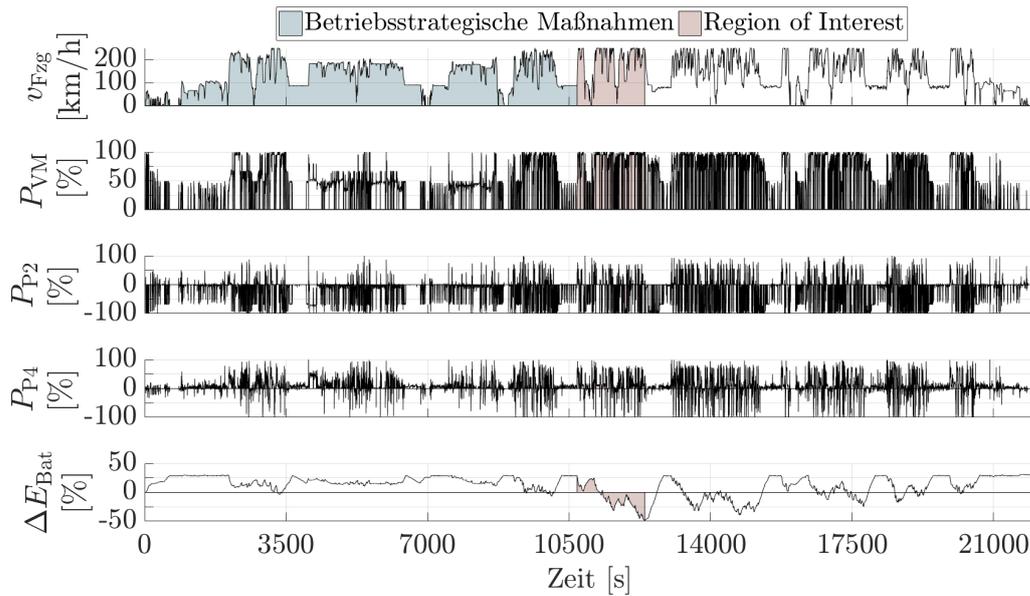


Bild B.4: Simulationsergebnis einer Auslegungsvariante der HEV-Anwendung.

Für die Anforderungsanalyse der HEV-Anwendung werden dieselben Einflussparameter und Zielgrößen wie in der PHEV-Anwendung verwendet. Ein Unterschied besteht in den Realisierungen der Verbrennungsmotorleistung, wobei auf die Untersuchung der Realisierung VM1 aufgrund der Prämissen des HEV-Anwendungsfalls verzichtet wird (vgl. Tabelle B.3).

Tabelle B.3: HEV: Realisierungen der Einflussparameter zur Anforderungsanalyse

<b>Einflussparameter</b>	<b>Realisierungen</b>		
VM-Variante ( $P_{\text{VM}}$ [%])	VM2 (120)	VM3 (140)	VM4 (170)
$v_{\text{Fzg,max}}$ [km/h]	210	230	250
Fuzzy-System	A		B

Für jede der Varianten wird dieselbe P2-EM wie in der PHEV-Anwendung verwendet. Im Gegensatz hierzu erfolgt der Einsatz einer leistungsreduzierten P4-EM. Die Leistungsgewichte sind dabei stets geringer als jene der konventionellen Leistungspositionierung, wobei im Falle der Verwendung von VM4 47% der Gesamtsystemleistung durch den Verbrennungsmotor dargestellt wird.

Die Zusammenfassung der Simulationsergebnisse anhand von statistischen Merkmalen ist in Tabelle B.4 dargestellt. Anhand der Realisierungen der Einflussparameter ergeben sich für die Untersuchung insgesamt 18 Varianten.

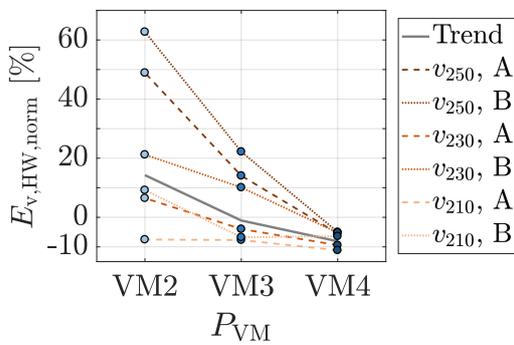
Tabelle B.4: HEV: Auswahl statistischer Merkmale der Anforderungsanalyse

Varianten				Statistische Merkmale				
#	$P_{VM}$ -	$v_{Fzg,max}$ [km/h]	Fuzzy-System -	$\int \dot{m}_{Kr}$ [%]	$\bar{\lambda}$ -	$\tau_{EV}$ [%]	$\tau_{PH}$ [%]	$\tau_{Seriell}$ [%]
1	VM4	250	A	100,00	3,09	15,83	69,77	14,40
2	VM4	250	B	99,95	3,10	31,84	59,32	8,84
3	VM4	230	A	94,50	3,02	15,61	71,40	12,99
4	VM4	230	B	94,53	3,09	31,93	60,26	7,81
5	VM4	210	A	86,10	2,90	15,95	72,09	11,96
6	VM4	210	B	86,14	2,96	33,89	61,12	4,99
7	VM3	250	A	98,43	3,22	22,01	56,71	21,28
8	VM3	250	B	98,12	3,18	24,15	52,68	23,17
9	VM3	230	A	93,48	3,08	23,06	55,36	21,57
10	VM3	230	B	92,95	3,13	26,83	52,27	20,90
11	VM3	210	A	84,65	2,94	22,89	57,19	19,93
12	VM3	210	B	85,23	3,04	30,09	54,16	15,75
13	VM2	250	A	96,95	3,35	19,45	61,25	19,30
14	VM2	250	B	96,60	3,33	20,71	55,91	23,38
15	VM2	230	A	92,30	3,20	22,66	56,08	21,26
16	VM2	230	B	91,74	3,18	23,43	52,49	24,08
17	VM2	210	A	84,66	2,99	23,08	56,58	20,33
18	VM2	210	B	84,47	3,12	26,32	53,74	19,94

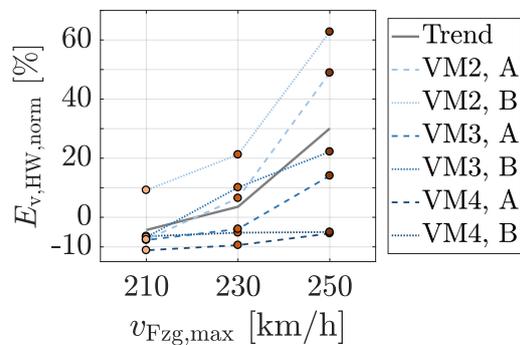
Hierbei reduziert sich der Kraftstoffverbrauch mit sinkender Höchstgeschwindigkeitsanforderung signifikant. Eine geringfügige Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs wird zudem durch die Reduzierung der verbrennungsmotorischen Leistung erreicht. Insbesondere bei Verwendung von VM4 ergibt sich ein deutlicher Unterschied des zeitlichen Anteils des EV-Modus zwischen den Varianten mit Fuzzy-System A und Fuzzy-System B, wobei die Verwendung von letzterem zu einem höheren Anteil der

rein elektrischen Fahrt und einem geringeren Anteil des seriellen Modus führt. Bei Verwendung von Fuzzy-System A hingegen sind die zeitlichen Anteile des EV- und des seriellen Modus stets ähnlich zueinander.

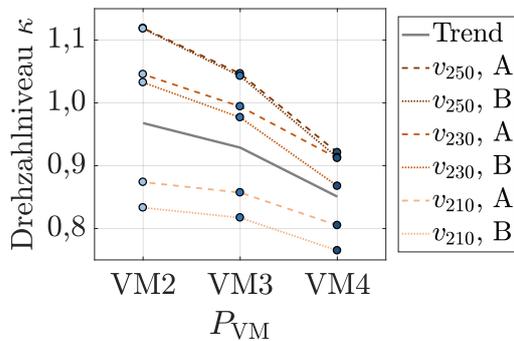
Die Visualisierung der gesamtsystemischen Zusammenhänge hinsichtlich des Energievorhalts und des Drehzahl-niveaus erfolgt in Bild B.5. Hierbei zeigt sich, dass der notwendige hardwareseitige Energievorhalt  $E_{v,HW}$  mit steigender Verbrennungsmotorleistung sinkt. Des Weiteren sinkt der Einfluss der Höchstgeschwindigkeit mit zunehmender Leistung des Verbrennungsmotors. Dabei führt die Berücksichtigung von Komfortaspekten mittels der Verwendung von Fuzzy-System B stets zu einer Erhöhung des notwendigen Energievorhalts.



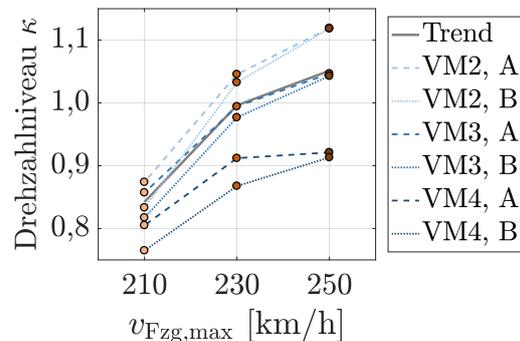
(a) Einfluss von  $P_{VM}$  auf  $E_{v,HW}$



(b) Einfluss von  $v_{Fzg,max}$  auf  $E_{v,HW}$



(c) Einfluss von  $P_{VM}$  auf  $\kappa$



(d) Einfluss von  $v_{Fzg,max}$  auf  $\kappa$

Bild B.5: HEV: Einflüsse auf den Energievorhalt und das Drehzahl-niveau.

Ein umgekehrtes Verhalten zeigt sich hinsichtlich des Drehzahl-niveaus, wobei die Verwendung von Fuzzy-System B stets zu einem geringeren Wert von  $\kappa$  führt. Eine Erhöhung der Leistung des Verbrennungsmotors führt dabei zu einer Reduzierung des Drehzahl-niveaus, welches jedoch maßgeblich durch die Höchstgeschwindigkeit

beeinflusst wird. Hierbei zeigen lediglich sechs der 18 Varianten ein höheres Drehzahlniveau als das konventionelle Referenzfahrzeug, wonach der Verbrennungsmotor häufig in effizienten Betriebsbereichen bei niedrigerer Drehzahl betrieben wird.

In Bild B.6 sind die gesamtsystemischen Zusammenhänge bezüglich der erforderlichen Peak- und Dauerleistungswerte der HV-Batterie dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass die notwendige Peakleistung bei  $v_{Fzg,max}$ -Anforderungen  $>230$  km/h und der Verwendung von VM2 signifikant ansteigt. Die Variation zwischen VM2 und VM3 beeinflusst die Zielgröße hingegen lediglich geringfügig. Insgesamt wird der 30 s-Wert der Batterieleistung mit steigender VM-Leistung reduziert. Mit Ausnahme bei der Verwendung von VM2 hat eine Reduzierung der  $v_{Fzg,max}$ -Anforderung einen geringen Einfluss auf die Zielgröße. Die Kurven der Varianten, in welchen Fuzzy-System B verwendet wird, verlaufen dabei stets unterhalb jener mit Fuzzy-System A.

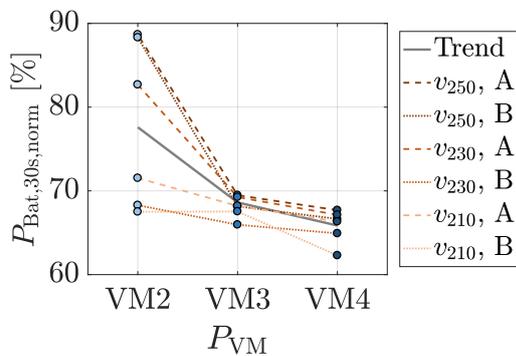
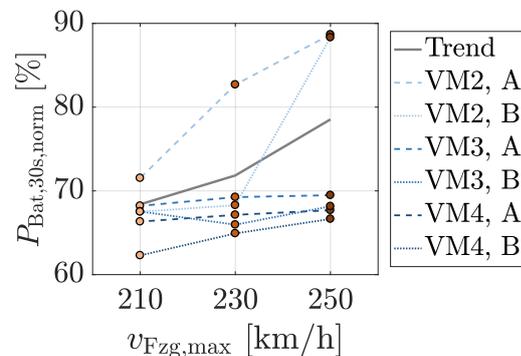
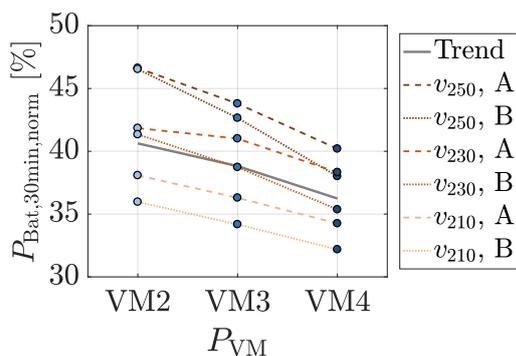
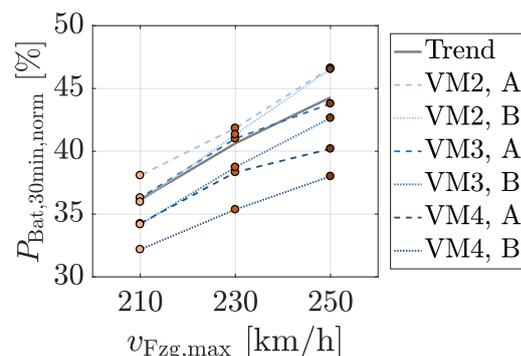
(a) Einfluss von  $P_{VM}$  auf  $P_{Bat,30s}$ (b) Einfluss von  $v_{Fzg,max}$  auf  $P_{Bat,30s}$ (c) Einfluss von  $P_{VM}$  auf  $P_{Bat,30min}$ (d) Einfluss von  $v_{Fzg,max}$  auf  $P_{Bat,30min}$ 

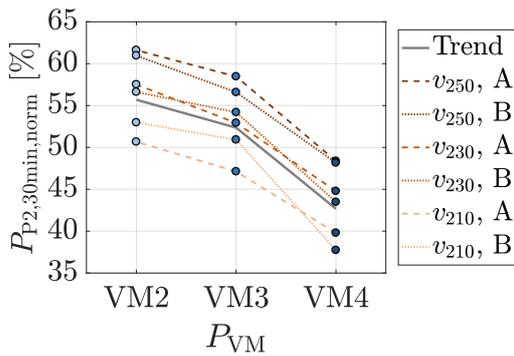
Bild B.6: HEV: Einflüsse auf die Peak- und Dauerleistungswerte der Batterie.

Ein ähnliches Verhalten zeigt sich in den unteren Diagrammen, welche die gesamtsystemischen Einflüsse hinsichtlich der notwendigen Dauerleistung visualisieren. Hierbei wird die Zielgröße mit zunehmender VM-Leistung beziehungsweise mit sinkender

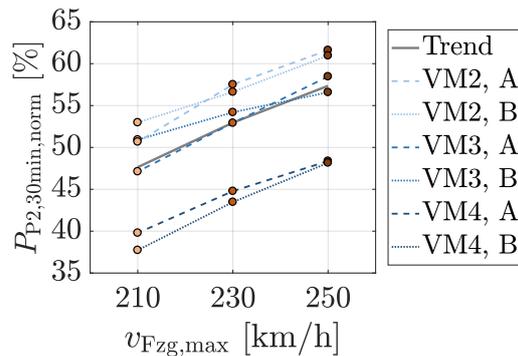


Höchstgeschwindigkeitsanforderung signifikant reduziert. Die Einflüsse beider Auslegungparameter sind dabei ähnlich zueinander.

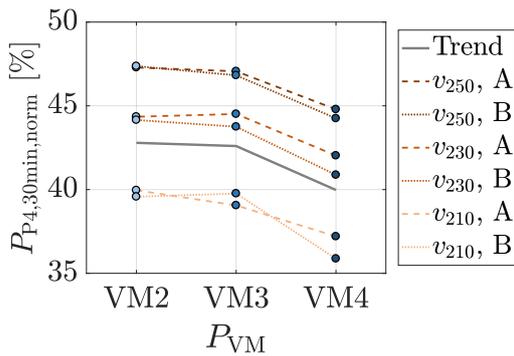
Die gesamtsystemischen Zusammenhänge bezüglich der Dauerleistungswerte der P2-EM und P4-EM in Bild B.7 zeigen ein ähnliches Verhalten wie jene der Batterie. Mit zunehmender VM-Leistung beziehungsweise sinkender  $v_{Fzg,max}$ -Anforderung nehmen die Werte der notwendigen Dauerleistung sowohl für die P2-EM als auch für die P4-EM ab. Letztere wird dabei stärker durch die  $v_{Fzg,max}$ -Anforderung beeinflusst. Des Weiteren zeigt sich, dass der Einfluss einer Variation zwischen VM2 und VM3 gering ist. Insbesondere in der Einflussanalyse der P2-EM ist hierbei kein eindeutiger Trend im Betriebsstrategieeinfluss zu erkennen. Die jeweiligen Überschneidungen der gepunkteten und gestrichelten Linien zeigen dabei Wechselwirkungen auf. Jedoch zeigt sich, dass der Einfluss der Betriebsstrategie mit steigender VM-Leistung und sinkender  $v_{Fzg,max}$ -Anforderung zunimmt.



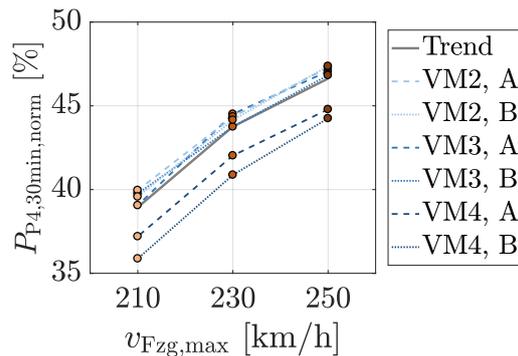
(a) Einfluss von  $P_{VM}$  auf  $P_{P2,30min}$



(b) Einfluss von  $v_{Fzg,max}$  auf  $P_{P2,30min}$



(c) Einfluss von  $P_{VM}$  auf  $P_{P4,30min}$



(d) Einfluss von  $v_{Fzg,max}$  auf  $P_{P4,30min}$

Bild B.7: HEV: Einflüsse auf die Dauerleistungswerte von P2- und P4-EM.

Die Zielkonfliktanalyse in Bild B.8 zeigt, dass die Berücksichtigung von Komfortaspekten anhand von Fuzzy-System B stets zu Lasten des hardwareseitigen Energie-

vorhalts geht. Des Weiteren erhöht sich der Energievorhalt mit sinkender Dauerleistung der HV-Batterie. Die Potentiale zur Reduzierung des Drehzahl-niveaus sowie zur Reduzierung der Dauerleistung verringern sich mit sinkender VM-Leistung beziehungsweise steigender Höchstgeschwindigkeitsanforderung.

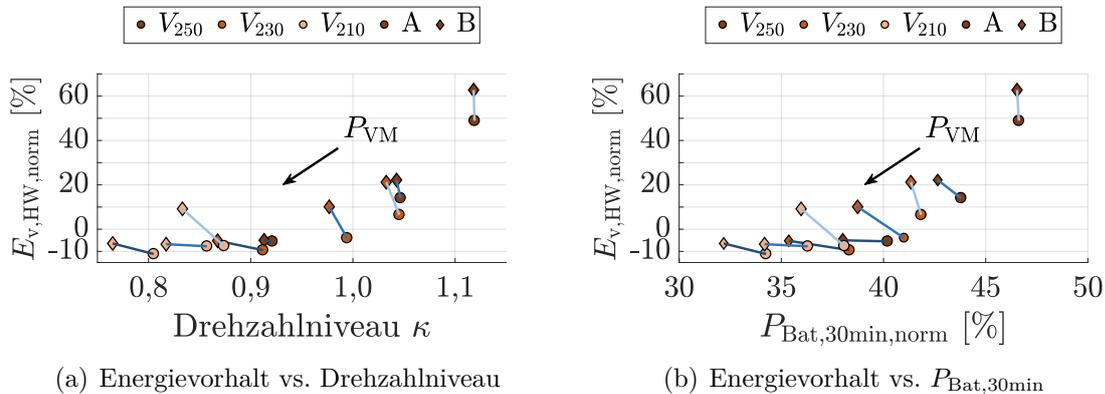


Bild B.8: HEV: Analyse der Zielkonflikte hinsichtlich der Auslegungsziele.

## B.3 Ergänzungen zur Fahrzyklensynthese der HEV-Anwendung

Dieser Abschnitt stellt ergänzende Informationen zur Fahrzyklensynthese der HEV-Anwendung bereit. Das Ergebnis der Optimierung bezüglich äußerer Merkmale für die HEV-Anwendung ist in Bild B.9 dargestellt. Die Häufigkeitsverteilungen der Klassen innerhalb der Daten und im synthetischen Fahrzyklus zeigen eine hohe Übereinstimmung. Auffallend dabei ist, dass die Klasse 7 innerhalb der Messdaten häufiger vorhanden ist als Klasse 6, wohingegen im synthetischen Zyklus die Klasse 6 häufiger vorhanden ist als die Klasse 7. Des Weiteren ergeben sich in den Daten geringfügige Unterschiede zwischen den Häufigkeiten der Klassen 2 und 4 sowie der Klassen 3 und 5. Im synthetischen Fahrzyklus weisen diese Klassenpaare dieselbe Häufigkeit auf. Die beiden unteren Diagramme zeigen, dass die wahrscheinlichsten Übergänge in den Messdaten im Fahrzyklus berücksichtigt werden (die Übergänge 2-2, 4-4 sowie 7-2). Des Weiteren werden weniger wahrscheinliche Klassenübergänge vernachlässigt. Dies erfolgt zum Beispiel für die Übergänge in die Klassen 6 und 7, welche durch die weißen Kästchen im rechten Teil von Diagramm B.9(c) gekennzeichnet sind.

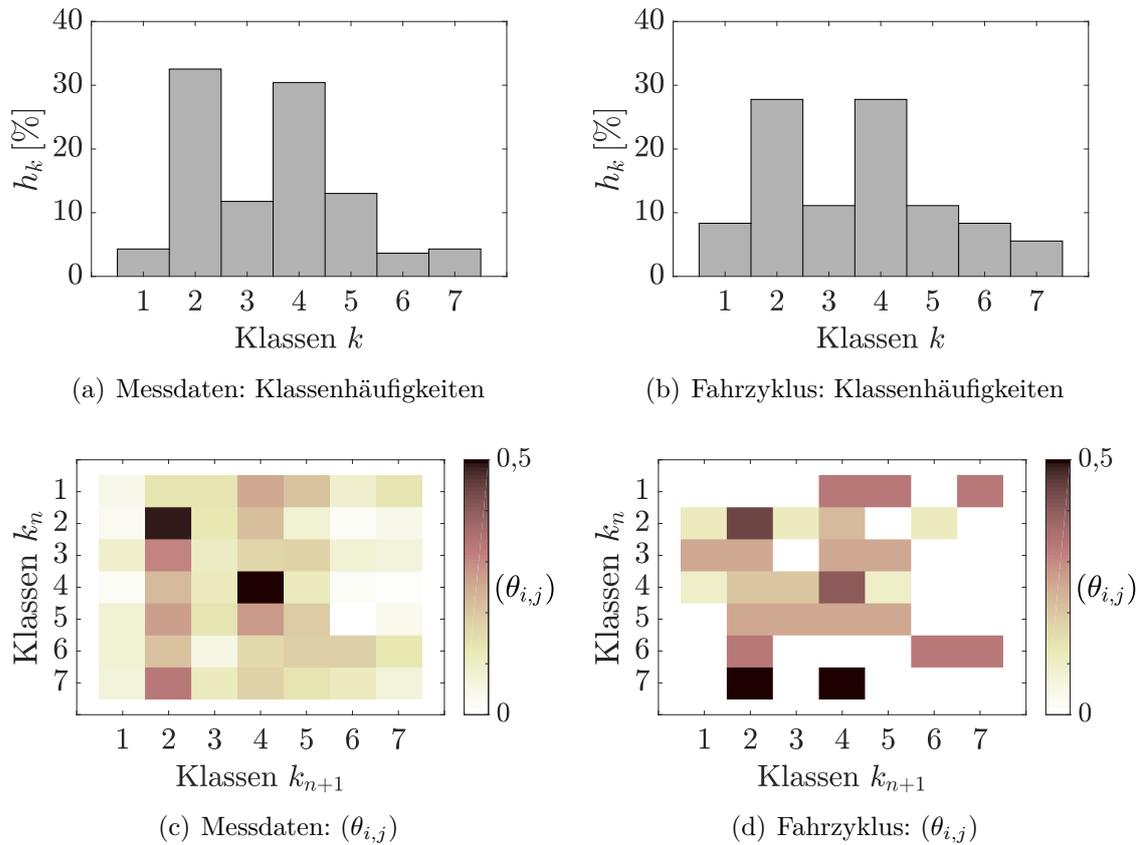


Bild B.9: HEV: Ergebnis der Optimierung bezüglich äußerer Merkmale.

Übergänge in die Klasse 1 werden im synthetischen Zyklus zum Großteil vernachlässigt. Die Klassen 1, 6 und 7 weisen die geringste Häufigkeit im Fahrzyklus auf.

Bild B.10 zeigt das Ergebnis der Clusteranalyse der Fahrzyklensynthese der HEV-Anwendung. Gleichmäßige Verteilungen bezüglich der äußeren Merkmale ergeben sich für die Klassen 2 und 4 hinten oben, welche zugleich die in den Messdaten am häufigsten vorhandenen Klassen darstellen (vgl. Bild B.9). Die Klassen 6 und 7 beinhalten Micro-Trips an den Rändern links hinten und rechts hinten. Diese Kennzeichen niedrige Geschwindigkeiten und variieren im Falle von Klasse 6 in den positiven Steigungen. Klasse 7 hingegen variiert hauptsächlich in den negativen Steigungen. Die Klassen 3 und 5 bezeichnen Punkte bei moderaten mittleren Geschwindigkeiten sowie moderaten mittleren Steigungen und Gefällen.

Analog zur Fahrzyklensynthese der PHEV-Anwendung erfolgt die Generierung eines repräsentativen Fahrzyklus auch in diesem Fall maßgeblich durch die Optimierung bezüglich der inneren Merkmale.

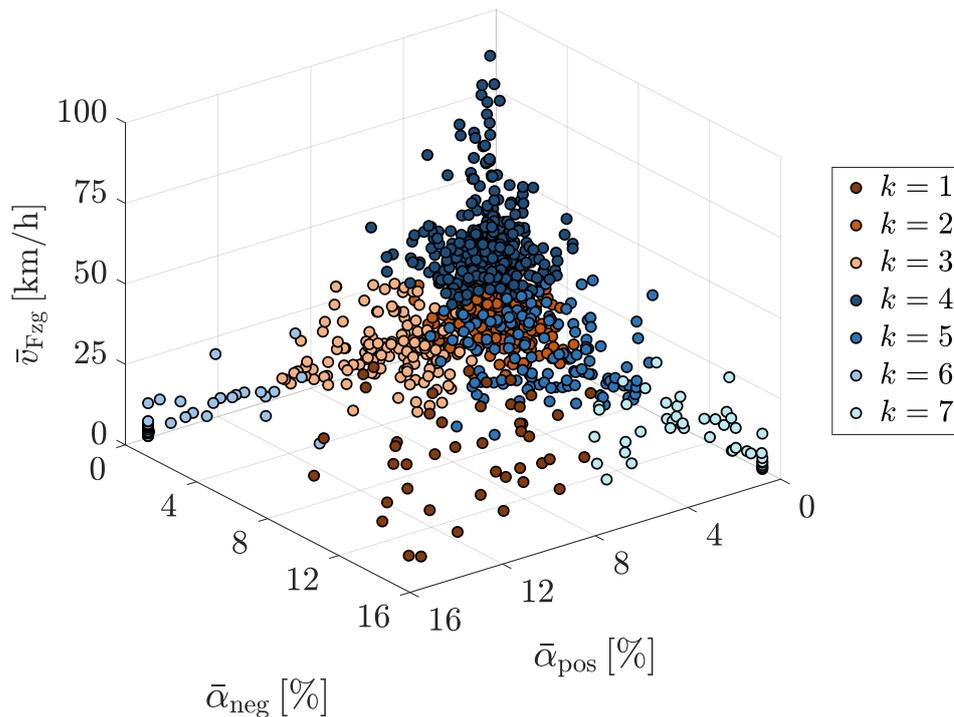


Bild B.10: Clusteranalyse des synthetischen Fahrzyklus der HEV-Anwendung.

Die Referenz-Belastungsdauerkurve  $Z_d(\tau)$  und die Belastungsdauerkurve des synthetischen Fahrzyklus  $Z_{syn}(\tau)$  für die HEV-Anwendung sind in Bild B.11 dargestellt.

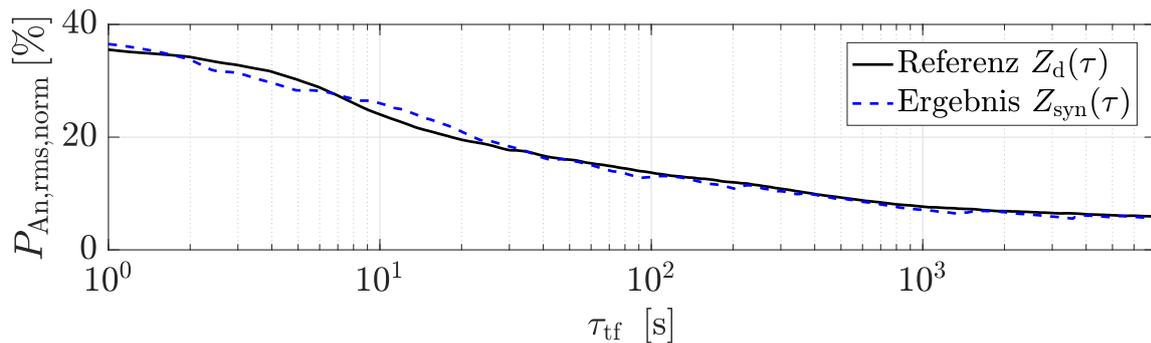


Bild B.11: HEV: Ergebnis der Optimierung bezüglich innerer Merkmale.

Die Bewertung der synthetischen Fahrzyklen erfolgt auf Basis der verwendeten Zielgrößen, weshalb die jeweiligen Ergebnisse der Optimierung bereits eine Verifikation der Repräsentativität implizieren.

## B.4 Ergänzungen zur Analyse der Betriebspunktverteilungen

Die folgenden Tabellen B.5, B.6, B.7 und B.8 führen die jeweiligen zeitlichen Anteile der verwendeten Hybridmodi auf. Des Weiteren wird die Erfüllung des Charge-Sustaining-Kriteriums für jede der PHEV- und HEV-Varianten bestätigt  $NEC < 1$  oder verneint  $NEC > 1$  (vgl. Gl. 4.2). Die in den Tabellen aufgeführten relativen Unterschiede im Kraftstoffverbrauch werden nach dem in [80] gezeigten Verfahren wie folgt korrigiert

$$B_{\text{Kor}} = \begin{cases} m_{\text{Kr}} - \frac{\Delta E_{\text{Bat}}}{H_{\text{u}}} \frac{1}{\bar{\eta}_{\text{Bat}} \bar{\eta}_{\text{P2}} \bar{\eta}_{\text{P4}} \bar{\eta}_{\text{VM}}}, & \text{für } \Delta E_{\text{Bat}} > 0 \\ m_{\text{Kr}} + \frac{\Delta E_{\text{Bat}}}{H_{\text{u}}} \frac{\bar{\eta}_{\text{Bat}} \bar{\eta}_{\text{P2}} \bar{\eta}_{\text{P4}}}{\bar{\eta}_{\text{VM}}}, & \text{für } \Delta E_{\text{Bat}} < 0 \end{cases}. \quad (\text{B.1})$$

Die Größe  $B_{\text{Kor}}$  bezeichnet dabei den korrigierten Kraftstoffverbrauch zur Kompensation eines zu hohen ( $\Delta E_{\text{Bat}} > 0$ ) beziehungsweise zu niedrigen ( $\Delta E_{\text{Bat}} < 0$ ) SoC am Ende des Fahrzyklus. Hierzu wird der im Zyklus tatsächlich verbrauchten Kraftstoffmenge  $m_{\text{Kr}}$  im Falle eines zu niedrigen SoC ein geschätzter Kraftstoffverbrauch hinzuaddiert, welcher sich durch das Nachladen der fehlenden Energie ergeben würde. Im umgekehrten Fall  $\text{SoC} > 0$  wird ein geschätzter Anteil von der Kraftstoffmenge  $m_{\text{Kr}}$  subtrahiert, welcher sich beispielsweise durch das Fahren im EV-Modus ergeben würde. Zur Berechnung der mittleren Wirkungsgrade  $\bar{\eta}_{\text{Bat}}$ ,  $\bar{\eta}_{\text{P2}}$ ,  $\bar{\eta}_{\text{P4}}$  und  $\bar{\eta}_{\text{VM}}$  werden die Betriebspunkte in den Kennfeldern ausgewertet.

Tabelle B.5: PHEV:Simulationsergebnis im WLTC

Varianten				Statistische Merkmale				
#	VM	P2-EM	P4-EM	$B_{\text{Kor}}$	NEC < 1	$\tau_{\text{EV}}$ [%]	$\tau_{\text{PH}}$ [%]	$\tau_{\text{Seriell}}$ [%]
1	VM4	A	A	98,62	ja	66,60	33,40	0
2	VM4	A	B	97,88	ja	67,63	30,85	1,51
3	VM4	B	A	100	ja	65,66	34,34	0
4	VM4	B	B	99,55	ja	65,74	33,31	0,94
5	VM3	A	A	98,30	ja	63,94	33,28	2,78
6	VM3	A	B	97,68	ja	66,61	25,08	8,31
7	VM3	B	A	98,62	ja	63,07	34,10	2,83
8	VM3	B	B	98,15	ja	65,09	28,81	6,10

Tabelle B.6: PHEV: Simulationsergebnis im synthetischen Zyklus

Varianten				Statistische Merkmale				
#	VM	P2-EM	P4-EM	$B_{\text{Kor}}$	NEC<1	$\tau_{\text{EV}}$ [%]	$\tau_{\text{PH}}$ [%]	$\tau_{\text{Seriell}}$ [%]
1	VM4	A	A	99,32	ja	61,49	37,54	0,98
2	VM4	A	B	96,89	ja	62,31	35,82	1,87
3	VM4	B	A	100	ja	60,31	39,30	0,38
4	VM4	B	B	97,66	ja	62,55	36,14	1,30
5	VM3	A	A	99,09	ja	58,40	40,40	1,20
6	VM3	A	B	96,08	ja	61,02	35,23	3,75
7	VM3	B	A	97,84	ja	58,53	40,13	1,34
8	VM3	B	B	96,01	ja	60,84	36,73	2,42

Tabelle B.7: HEV:Simulationsergebnis im WLTC

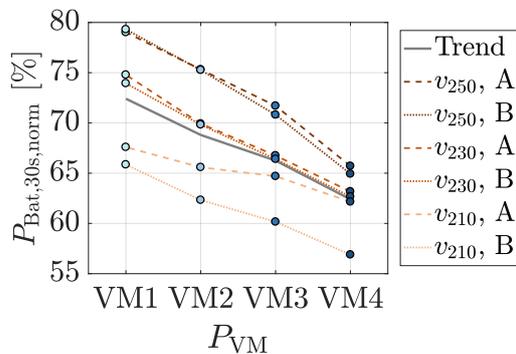
Varianten				Statistische Merkmale				
#	VM	P2-EM	P4-EM	$B_{\text{Kor}}$	NEC<1	$\tau_{\text{EV}}$ [%]	$\tau_{\text{PH}}$ [%]	$\tau_{\text{Seriell}}$ [%]
1	VM4	A	C	98,93	ja	69,50	30,50	0
2	VM4	A	D	98,97	ja	69,50	30,50	0
3	VM4	B	C	-	nein	65,91	34,09	0
4	VM4	B	D	100	ja	68,88	31,12	0
5	VM3	A	C	97,25	ja	67,01	31,63	1,36
6	VM3	A	D	97,16	ja	67,15	31,30	1,54
7	VM3	B	C	97,60	ja	64,95	34,44	0,61
8	VM3	B	D	97,81	ja	65,41	33,71	0,88

Tabelle B.8: HEV: Simulationsergebnis im synthetischen Zyklus

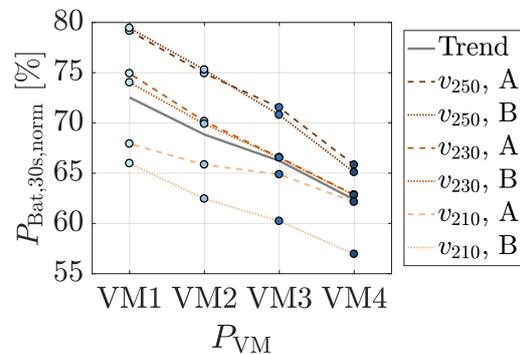
Varianten				Statistische Merkmale				
#	VM	P2-EM	P4-EM	$B_{\text{Kor}}$	NEC<1	$\tau_{\text{EV}}$ [%]	$\tau_{\text{PH}}$ [%]	$\tau_{\text{Seriell}}$ [%]
1	VM4	A	C	98,71	ja	72,66	27,34	0
2	VM4	A	D	97,23	ja	72,50	27,50	0
3	VM4	B	C	100	ja	71,80	28,20	0
4	VM4	B	D	99,03	ja	72,08	27,92	0
5	VM3	A	C	95,77	ja	70,90	27,78	1,32
6	VM3	A	D	95,56	ja	71,36	27,30	1,33
7	VM3	B	C	97,21	ja	70,27	29,55	0,17
8	VM3	B	D	-	nein	69,59	29,46	0,95

## C Zur Robustheit der Methode

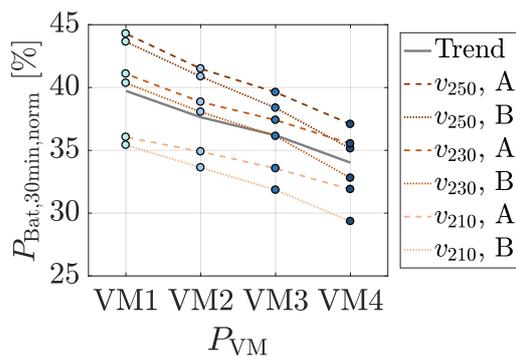
Zur Überprüfung der Robustheit wird die Anforderungsanalyse der PHEV-Anwendung mit Kennfeldern einer geringeren Auflösung wiederholt. Bild C.1 zeigt hierzu die gesamtsystemischen Zusammenhänge bezüglich der leistungsseitigen Batterieauslegung bei Verwendung rudimentärer Kennfelder in der Simulation.



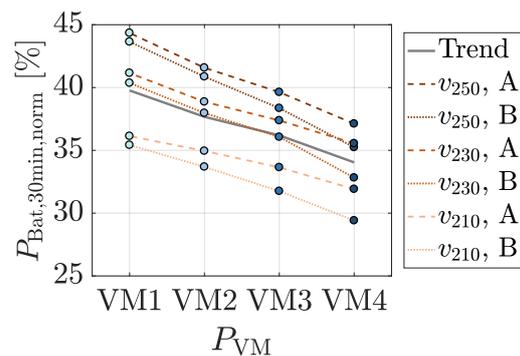
(a) Einfluss von  $P_{VM}$  auf  $P_{Bat,30s}$  (original)



(b) Einfluss von  $P_{VM}$  auf  $P_{Bat,30s}$  (rudimentär)



(c) Einfluss von  $P_{VM}$  auf  $P_{Bat,30min}$  (original)



(d) Einfluss von  $P_{VM}$  auf  $P_{Bat,30min}$  (rudimentär)

Bild C.1: PHEV: Einflüsse auf die Peak- und Dauerleistungswerte der Batterie bei Verwendung rudimentärer Kennfelder.

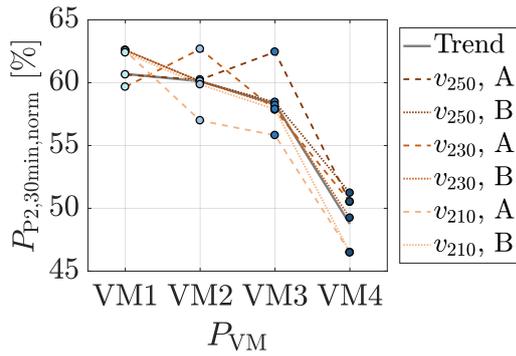
Die Zusammenhänge ergeben sich dabei auf Basis der in Tabelle C.1 dargestellten Kennfelder mit reduzierter Auflösung. Zur Generierung künstlicher „rudimentärer“

Kennfelder wird die Anzahl der Stützstellen bezüglich des originalen Kennfelds in jeder Dimension um den Faktor drei reduziert. Die Robustheit der Methode wird mittels des Vergleichs zu den analysierten gesamtsystemischen Zusammenhänge bei Verwendung der originalen Kennfelder in Abschnitt 4.1.2 bewertet.

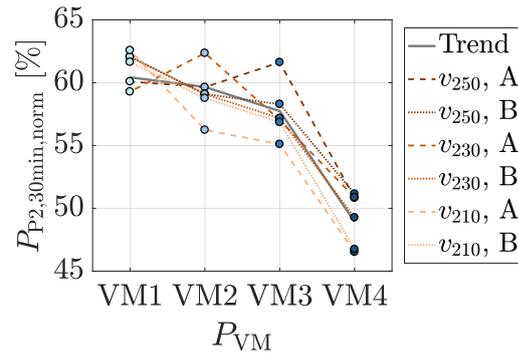
Tabelle C.1: Reduzierung der Kennfeldauflösung zur Bewertung der Robustheit

Kennfeld	$[T, n]$ -Dimension original	$[T, n]$ -Dimension rudimentär
VM1-VM3, VM4	$63 \times 56, 65 \times 56$	$22 \times 19$
P2-EM	$31 \times 91$	$11 \times 31$
P4-EM	$165 \times 34$	$55 \times 12$

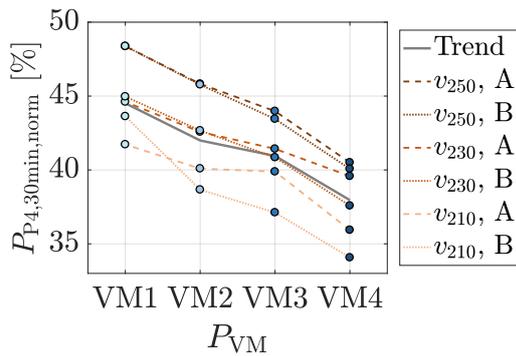
Die gesamtsystemischen Zusammenhänge bezüglich der Auslegungsbedarfe der P2-EM und P4-EM sind in Bild C.2 dargestellt.



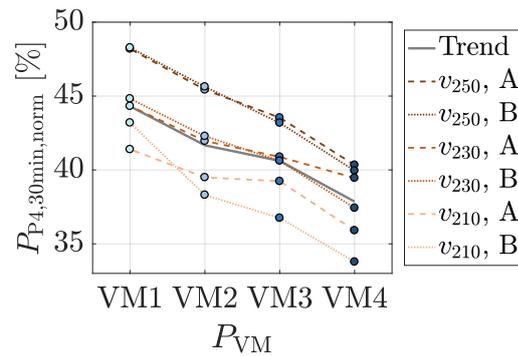
(a) Einfluss von  $P_{VM}$  auf  $P_{P2,30min}$  (original)



(b) Einfluss von  $P_{VM}$  auf  $P_{P2,30min}$  (rudimentär)



(c) Einfluss von  $P_{VM}$  auf  $P_{P4,30min}$  (original)



(d) Einfluss von  $P_{VM}$  auf  $P_{P4,30min}$  (rudimentär)

Bild C.2: PHEV: Einflüsse auf die Dauerleistungswerte von P2- und P4-EM bei Verwendung rudimentärer Kennfelder.



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematische Darstellung der Konzeptionierung hybrider Antriebsstränge. . . . .	2
1.2	Schematische Darstellung des System-Level Design hybrider Antriebsstränge, modifiziert vgl. [103]. . . . .	4
1.3	Schematische Darstellung von Anforderungen und Auslegungszielen im System-Level Design. . . . .	7
1.4	Klassifizierung grundlegender Betriebsstrategieansätze. . . . .	10
1.5	Schematische Darstellung des Forschungsbedarfs. . . . .	16
2.1	Schematische Darstellung eines Systems von Systemen am Beispiel hybrider Antriebsstrang. . . . .	21
2.2	Schematische Darstellung der Eigenschaften von Optimierungsproblemen. . . . .	23
2.3	Schematische Darstellung einer multikriteriellen Optimierung, modifiziert vgl. [16, 75]. . . . .	25
2.4	Anwendung von Pontryagins Minimumprinzip auf das Optimalsteuerungsproblem eines Hybridantriebs. . . . .	28
2.5	Arbeitsweise der dynamischen Optimierung, modifiziert vgl. [82]. . . . .	29
2.6	Schematische Darstellung des K-Means Algorithmus. . . . .	32
2.7	Schematische Darstellung der Simulation von Markow-Ketten. . . . .	34
2.8	Schematische Visualisierung der Einflüsse von Parametern mittels Individual Conditional Expectation Plots. . . . .	37
2.9	Schematische Darstellung der Inferenz eines Singleton-Fuzzy-Systems, modifiziert vgl. [75]. . . . .	40
2.10	Schematische Darstellung der Partikelschwarmoptimierung. . . . .	43
3.1	Schematische Darstellung des Methodenmodells. . . . .	45
3.2	Darstellung der in den Abschnitten entwickelten Verfahren. . . . .	46
3.3	Spannungsfeld aus Antriebseffizienz und Leistungsfähigkeit. . . . .	49

3.4	Beispielhafte Darstellung des Temperatureinflusses zweier statistisch gleicher Belastungen, modifiziert vgl. [65, 87]. . . . .	52
3.5	Schematische Darstellung der Zeitwichtung, modifiziert vgl. [87]. . . . .	53
3.6	Beispielhafte Belastungsdauerkurven, modifiziert vgl. [65, 87]. . . . .	54
3.7	Identifikation von prägenden Lastfällen. . . . .	56
3.8	Schematische Darstellung der Fahrzyklensynthese, modifiziert vgl. [65].	58
3.9	Schematische Darstellung der Optimierung einer repräsentativen Sequenz von charakteristischen äußeren Merkmalen $\mathbf{p}_c$ . . . . .	60
3.10	Schematische Darstellung der Optimierung einer repräsentativen Sequenz von Micro-Trips $\mathbf{p}_s$ bezüglich innerer Merkmale. . . . .	61
3.11	Blockschaltbild des entwickelten Antriebsstrangmodells. . . . .	65
3.12	Beispiele für Verbrauchs- und Wirkungsgradkennfelder. . . . .	68
3.13	Schematische Darstellung der Kopplung von EM- und Batteriemodell.	70
3.14	Schematische Darstellung der Betriebsstrategie und deren Schnittstellen.	73
3.15	Schematische Darstellung von Steuer- und Lösungsraum der 2D-ECMS.	74
3.16	Beispielhafte Ladezustandstrajektorien des P24-Hybridkonzepts auf Basis des WLTC (Darstellung in Anlehnung an [50]). . . . .	76
3.17	Blockschaltbild der $\lambda$ -Adaption inklusive Schaltstrategieanpassung. . . . .	79
3.18	Systeme zur Implementierung weicher Nebenbedingungen. . . . .	81
3.19	Schematische Darstellung der weichen Nebenbedingungen. . . . .	82
3.20	Einfluss der berücksichtigten weichen Nebenbedingungen. . . . .	86
3.21	Schematische Darstellung der Definition des Energievorhalts $E_v$ . . . . .	90
3.22	Systemdarstellung der Untersuchungsrahmen. . . . .	92
4.1	Simulationsergebnis einer Auslegungsvariante der PHEV-Anwendung im prägenden Lastfall der Anforderungsanalyse. . . . .	98
4.2	PHEV: Einflüsse auf den Energievorhalt und das Drehzahlniveau. . . . .	101
4.3	PHEV: Einflüsse auf die Peak- und Dauerleistungswerte der Batterie.	104
4.4	PHEV: Einflüsse auf die Dauerleistungswerte von P2- und P4-EM. . . . .	106
4.5	PHEV: Analyse der Zielkonflikte hinsichtlich der Auslegungsziele. . . . .	109
4.6	Synthetischer Fahrzyklus der PHEV-Anwendung. . . . .	115
4.7	Clusteranalyse des synthetischen Fahrzyklus der PHEV-Anwendung. . . . .	116
4.8	PHEV: Ergebnis der Optimierung bezüglich äußerer Merkmale. . . . .	117
4.9	PHEV: Ergebnis der Optimierung bezüglich innerer Merkmale. . . . .	118
4.10	Synthetischer Fahrzyklus der HEV-Anwendung. . . . .	119
4.11	PHEV: Prinzipbild unterschiedlicher Kennfeldausprägungen der P4-EM.	122
4.12	PHEV: Ladezustandstrajektorien der verschiedenen Varianten. . . . .	124

---

4.13	HEV: Ladezustandstrajektorien der verschiedenen Varianten. . . . .	126
4.14	Repräsentative Betriebspunktverteilungen der elektrischen Maschinen.	127
5.1	Erkenntnisse der Anforderungsanalyse. . . . .	132
5.2	PHEV: Einflüsse auf den Energievorrat und das Drehzahlniveau bei Verwendung rudimentärer Kennfelder. . . . .	138
5.3	Robustheit der Ladezustandstrajektorien bezüglich der Kennfeldqua- lität. . . . .	139
A.1	Zugehörigkeitsfunktionen der Fuzzy-Schaltstrategie. . . . .	147
A.2	Fuzzy-System zur Bestrafung von Motorstarts und -stopps . . . . .	150
A.3	Funktion zur Bestrafung des Wechsels in den seriellen Modus. . . . .	150
A.4	Fuzzy-System zur Gewichtung des Strafterms der Lastpunktanhebung.	152
A.5	PHEV:Zugehörigkeitsfunktionen des Fuzzy-Systems A. . . . .	153
A.6	PHEV:Zugehörigkeitsfunktionen des Fuzzy-Systems B. . . . .	154
A.7	HEV:Unterschiedliche Zugehörigkeitsfunktionen der Fuzzy-Systeme A und B zur Adaption von $\lambda$ . . . . .	156
B.1	Abhängigkeit der Leistungsverläufe der P4-EM vom Äquivalenzfaktor.	159
B.2	Analyse der Leistungsanforderung bei $v_{Fzg,max} = 250$ km/h. . . . .	159
B.3	Analyse der Leistungsanforderung bei $v_{Fzg,max} = 210$ km/h. . . . .	160
B.4	Simulationsergebnis einer Auslegungsvariante der HEV-Anwendung. .	161
B.5	HEV: Einflüsse auf den Energievorrat und das Drehzahlniveau. . . .	163
B.6	HEV: Einflüsse auf die Peak- und Dauerleistungswerte der Batterie. .	164
B.7	HEV: Einflüsse auf die Dauerleistungswerte von P2- und P4-EM. . .	165
B.8	HEV: Analyse der Zielkonflikte hinsichtlich der Auslegungsziele. . . .	166
B.9	HEV: Ergebnis der Optimierung bezüglich äußerer Merkmale. . . . .	167
B.10	Clusteranalyse des synthetischen Fahrzyklus der HEV-Anwendung. .	168
B.11	HEV: Ergebnis der Optimierung bezüglich innerer Merkmale. . . . .	168
C.1	PHEV: Einflüsse auf die Peak- und Dauerleistungswerte der Batterie bei Verwendung rudimentärer Kennfelder. . . . .	171
C.2	PHEV: Einflüsse auf die Dauerleistungswerte von P2- und P4-EM bei Verwendung rudimentärer Kennfelder. . . . .	172



# Tabellenverzeichnis

1.1	Beispiele typischer Parameter im System-Level Design . . . . .	5
3.1	Darstellbare Betriebsmodi zum Antrieb des P24-Hybridkonzepts . . . . .	71
3.2	Eigenschaften der verwendeten Fuzzy-Systeme . . . . .	80
3.3	Variationsstudie zur Verifikation der Betriebsstrategie . . . . .	85
3.4	Ergebnis der Verifikationsstudie . . . . .	86
4.1	Eckdaten der betrachteten Anwendungsfälle . . . . .	95
4.2	Merkmale der prägenden Fahranforderung für die PHEV-Anwendung . . . . .	97
4.3	Grundlegende Simulationsprämissen der Anforderungsanalyse . . . . .	99
4.4	PHEV: Realisierungen der Einflussparameter zur Anforderungsanalyse . . . . .	100
4.5	Verwendete Datenbasen der repräsentativen synthetischen Fahrzyklen . . . . .	113
4.6	Parametrierung des Optimierungsgerüsts . . . . .	114
4.7	Fahrzyklensynthese: Relative Abweichung statistischer Merkmale zwischen Messdaten und synthetischem Zyklus . . . . .	120
4.8	PHEV: Verwendete Kennfelder zur Analyse der Betriebspunktverteilung . . . . .	122
4.9	HEV: Verwendete Kennfelder zur Analyse der Betriebspunktverteilung . . . . .	123
5.1	Ergebnis zur Robustheit der Ladezustandstrajektorien . . . . .	139
A.1	Regelbasis der Fuzzy-Schaltstrategie . . . . .	148
A.2	Regelbasis des Fuzzy-Systems zur Bestrafung von Motorstarts . . . . .	149
A.3	Regelbasis des Fuzzy-Systems zur Bestrafung von Motorstopps . . . . .	149
A.4	Regelbasis zur Gewichtung des Strafterms der Lastpunktanhebung . . . . .	152
A.5	PHEV:Regelbasis des Fuzzy-Systems A zur Adaption von $\lambda$ . . . . .	154
A.6	PHEV:Regelbasis des Fuzzy-Systems B zur Adaption von $\lambda$ . . . . .	155
B.1	PHEV: Auswahl statistischer Merkmale der Anforderungsanalyse . . . . .	158
B.2	Merkmale der prägenden Fahranforderung der HEV-Anwendung . . . . .	160
B.3	HEV: Realisierungen der Einflussparameter zur Anforderungsanalyse . . . . .	161
B.4	HEV: Auswahl statistischer Merkmale der Anforderungsanalyse . . . . .	162

B.5	PHEV:Simulationsergebnis im WLTC . . . . .	169
B.6	PHEV: Simulationsergebnis im synthetischen Zyklus . . . . .	170
B.7	HEV:Simulationsergebnis im WLTC . . . . .	170
B.8	HEV: Simulationsergebnis im synthetischen Zyklus . . . . .	170
C.1	Reduzierung der Kennfeldauflösung zur Bewertung der Robustheit . .	172

---

## Literaturverzeichnis

- [1] ABRAHAM, A. (Hrsg.) ; HASSANIEN, A.-E. (Hrsg.) ; SIARRY, P. (Hrsg.) ; ENGELBRECHT, A. (Hrsg.): *Foundations of Computational Intelligence Volume 3*. Springer Berlin Heidelberg, 2009
- [2] ALIRAMEZANI, M. ; KHADEMNAHVI, M. ; DELKHOSH, M. : Optimal energy management strategy of a hybrid electric vehicle considering engine noise. In: *Journal of Vibration and Control* 24 (2018), Febr., Nr. 23, S. 5546–5555
- [3] AMBÜHL, D. : *Energy management strategies for hybrid electric vehicles*. Zürich, ETH/ Measurement and Control Laboratory, 2009
- [4] AMINI, M. R. ; FENG, Y. ; WANG, H. ; KOLMANOVSKY, I. ; SUN, J. : Thermal Responses of Connected HEVs Engine and Aftertreatment Systems to Eco-Driving. In: *2019 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, IEEE, Aug. 2019
- [5] AMIRJAMSHIDI, G. ; ROORDA, M. J.: Development of simulated driving cycles for light, medium, and heavy duty trucks: Case of the Toronto Waterfront Area. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 34 (2015), Jan., S. 255–266
- [6] ARTHUR, D. ; VASSILVITSKII, S. : k-means++: the advantages of careful seeding. In: *Proceedings of the Eighteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, 2007, S. 1027–1035
- [7] BAILEY, K. ; CIKANEK, S. ; SURESHBABU, N. : Parallel hybrid electric vehicle torque distribution method. In: *Proceedings of the 2002 American Control Conference (IEEE Cat. No. CH37301)*, IEEE, 2002
- [8] BERINGER, J. u. a.: Review of Particle Physics. In: *Physical Review D* 86 (2012), Jul., Nr. 1

- [9] BEZDEK, J. C.: *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*. Springer US, 1981
- [10] BIASINI, R. ; ONORI, S. ; RIZZONI, G. : A near-optimal rule-based energy management strategy for medium duty hybrid truck. In: *International Journal of Powertrains* 2 (2013), Nr. 2/3, S. 232
- [11] BISWAS, D. ; GHOSH, S. ; SENGUPTA, S. ; MUKHOPADHYAY, S. : A Predictive Supervisory Controller for an HEV Operating in a Zero Emission Zone. In: *2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2019
- [12] BLICKENDORFF, J. u. a.: Akustik. In: *Elektrifizierung des Antriebsstrangs*. Springer Berlin Heidelberg, 2019, S. 307–363
- [13] BORHAN, H. ; VAHIDI, A. ; PHILLIPS, A. M. ; KUANG, M. L. ; KOLMANOVSKY, I. V. ; CAIRANO, S. D.: MPC-Based Energy Management of a Power-Split Hybrid Electric Vehicle. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 20 (2012), Mai, Nr. 3, S. 593–603
- [14] BOUWMAN, K. ; PHAM, T. ; WILKINS, S. ; HOFMAN, T. : Predictive Energy Management Strategy Including Traffic Flow Data for Hybrid Electric Vehicles. In: *IFAC-PapersOnLine* 50 (2017), Jul., Nr. 1, S. 10046–10051
- [15] BRANKE, J. ; DEB, K. ; MIETTINEN, K. ; SŁOWIŃSKI, R. : *Multiobjective Optimization: Interactive and Evolutionary Approaches*. Springer Berlin Heidelberg, 2008
- [16] *Kapitel* Introduction to Multiobjective Optimization: Noninteractive Approaches. In: BRANKE, J. ; DEB, K. ; MIETTINEN, K. ; SŁOWIŃSKI, R. : *Multiobjective Optimization: Interactive and Evolutionary Approaches*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2008, S. 1–26
- [17] BUERGER, S. ; LOHMANN, B. ; MERZ, M. ; VOGEL-HEUSER, B. ; HALLMANN-SEGGER, M. : Multi-objective optimization of hybrid electric vehicles considering fuel consumption and dynamic performance. In: *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, IEEE, Sept. 2010
- [18] CAIRANO, S. D. ; BERNARDINI, D. ; BEMPORAD, A. ; KOLMANOVSKY, I. V.: Stochastic MPC With Learning for Driver-Predictive Vehicle Control and its Application to HEV Energy Management. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 22 (2014), Mai, Nr. 3, S. 1018–1031



- 
- [19] CARAMIA, G. ; CAVINA, N. ; CAGGIANO, M. ; PATASSA, S. ; MORO, D. : Battery state of charge management strategies for a real-time controller of a Plug-in Hybrid Electric Vehicle. In: *Energy Procedia* 148 (2018), Aug., S. 258–265
- [20] CASADEI, A. F. ; HUANG, H. H. ; BRANDAO, F. ; KASAB, J. J. ; THELEN, W. A. ; BRUSSTAR, M. ; CHERRY, J. ; CHIU, A. ; ELLIES, B. D. ; McDONALD, J. : Complex Systems Method Applied to Identify Carbon Dioxide Emission Reductions for Light-Duty Vehicles for the 2020-2025 Timeframe. In: *SAE Technical Paper Series*, SAE International, Apr. 2012
- [21] CHEN, Z. ; ZHANG, Q. ; LU, J. ; BI, J. : Optimization-based method to develop practical driving cycle for application in electric vehicle power management: A case study in Shenyang, China. In: *Energy* 186 (2019), Nov., S. 115766
- [22] CHENG, Y.-H. ; LAI, C.-M. ; TEH, J. : Application of Particle Swarm Optimization to Design Control Strategy Parameters of Parallel Hybrid Electric Vehicle with Fuel Economy and Low Emission. In: *2018 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C)*, IEEE, Dez. 2018
- [23] CHING, W.-K. ; HUANG, X. ; NG, M. K. ; SIU, T.-K. : *Markov Chains - Models, Algorithms and Applications*. Springer US, 2013
- [24] DEMBSKI, N. ; GUEZENNEC, Y. ; SOLIMAN, A. : Analysis and Experimental Refinement of Real-World Driving Cycles. In: *SAE Technical Paper Series*, SAE International, März 2002
- [25] EBBESEN, S. B.: *Optimal sizing and control of hybrid electric vehicles*. Zürich, ETH / Institute for Dynamic Systems and Control, 2012
- [26] FANG, L. ; QIN, S. ; XU, G. ; LI, T. ; ZHU, K. : Simultaneous Optimization for Hybrid Electric Vehicle Parameters Based on Multi-Objective Genetic Algorithms. In: *Energies* 4 (2011), März, Nr. 3, S. 532–544
- [27] FÖRSTER, D. ; INDERKA, R. B. ; GAUTERIN, F. : Data-Driven Identification of Characteristic Real-Driving Cycles Based on k-Means Clustering and Mixed-Integer Optimization. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 69 (2020), Nr. 3, S. 2398–2410

- [28] FOTOUHI, A. ; MONTAZERI-GH, M. : Tehran driving cycle development using the k-means clustering method. In: *Scientia Iranica* 20 (2013), Nr. 2, S. 286–293
- [29] FREITAG, M. : *Die Transformation in der Automobilindustrie wird teuer*. <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/roland-berger-transformation-der-automobilindustrie-wird-teuer-a-1256830.html>, 3 2019. – Online verfügbar: 09.03.2020
- [30] FRIEDMAN, J. H.: Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine. In: *The Annals of Statistics* 29 (2001), Okt., Nr. 5, S. 1189–1232
- [31] GEERING, H. P.: *Optimal Control with Engineering Applications*. 1. Aufl. Berlin Heidelberg : Springer Science & Business Media, 2007
- [32] GH, M. M. ; POURSAMAD, A. : Application of genetic algorithm for simultaneous optimisation of HEV component sizing and control strategy. In: *International Journal of Alternative Propulsion* 1 (2006), Nr. 1, S. 63–78
- [33] GLETTTER, C. ; MAYER, A. ; KALLO, J. ; WINSEL, T. ; NELLES, O. : A Novel Approach for Development of Neural Network based Electrical Machine Models for HEV System-level Design Optimization. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*, SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2019, S. 17–24
- [34] GOLDSTEIN, A. ; KAPELNER, A. ; BLEICH, J. ; PITKIN, E. : Peeking Inside the Black Box: Visualizing Statistical Learning With Plots of Individual Conditional Expectation. In: *Journal of Computational and Graphical Statistics* 24 (2015), Jan., Nr. 1, S. 44–65
- [35] GÖRKE, D. : *Untersuchungen zur kraftstoffoptimalen Betriebsweise von Parallelhybridfahrzeugen und darauf basierende Auslegung regelbasierter Betriebsstrategien*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016
- [36] GRAICHEN, K. : *Methoden der Optimierung und optimalen Steuerung*. Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik, Universität Ulm, 2013
- [37] GUZZELLA, L. ; SCIARRETTA, A. : *Vehicle Propulsion Systems*. Springer Berlin Heidelberg, 2013
- [38] HAKEN, K.-L. : *Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2011

- 
- [39] HASTIE, T. ; FRIEDMAN, J. ; TIBSHIRANI, R. : *The Elements of Statistical Learning*. Springer New York, 2001
- [40] HAUPTMANN, A. : *Beschreibung der Bahnbelastung im Hochgeschwindigkeitsverkehr*, Technische Universität Dresden, Dissertation, 1999
- [41] HOFMAN, T. ; DRUTEN, VAN, R. : Energy analysis of hybrid vehicle powertrains. In: *IEEE - VTS, Vehicle Power and Propulsion*, 2004, S. 6–
- [42] HOFMAN, T. ; STEINBUCH, M. ; DRUTEN, R. V. ; SERRARENS, A. : Rule-based energy management strategies for hybrid vehicles. In: *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles* 1 (2007), Nr. 1, S. 71
- [43] HORWATH, M. ; BELZ, J. ; NELLES, O. ; SCHMIDT, J. ; IDELBERGER, H. : Detection of purposeful design parameters using neural networks in the early product development of vehicle body components. In: *Proceedings of the NAFEMS Seminar on Optimization and Robust Design, Wiesbaden*, 2015, S. 129–141
- [44] HU, X. ; MOURA, S. J. ; MURGOVSKI, N. ; EGARDT, B. ; CAO, D. : Integrated Optimization of Battery Sizing, Charging, and Power Management in Plug-In Hybrid Electric Vehicles. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 24 (2016), Mai, Nr. 3, S. 1036–1043
- [45] JUNG, D. ; AHMED, Q. ; RIZZONI, G. : Design Space Exploration for Powertrain Electrification using Gaussian Processes. In: *2018 Annual American Control Conference (ACC)*, 2018, S. 846–851
- [46] KARBOWSKI, D. ; HALIBURTON, C. ; ROUSSEAU, A. : Impact of Component Size on Plug-In Hybrid Vehicle Energy Consumption Using Global Optimization. In: *World Electric Vehicle Journal* 2 (2008), Jun., Nr. 2, S. 92–100
- [47] KENNEDY, J. ; EBERHART, R. : Particle swarm optimization. In: *ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, 1995, S. 1942–1948
- [48] KEULEN, T. van ; GILLOT, J. ; JAGER, B. de ; STEINBUCH, M. : Solution for state constrained optimal control problems applied to power split control for hybrid vehicles. In: *Automatica* 50 (2014), Jan., Nr. 1, S. 187–192
- [49] KHARRAZI, S. ; ALMEN, M. ; FRISK, E. ; NIELSEN, L. : Extending Behavioral Models to Generate Mission-Based Driving Cycles for Data-Driven Vehicle

- Development. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 68 (2019), Febr., Nr. 2, S. 1222–1230
- [50] KIM, N. ; CHA, S. ; PENG, H. : Optimal Control of Hybrid Electric Vehicles Based on Pontryagin's Minimum Principle. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 19 (2011), Sept., Nr. 5, S. 1279–1287
- [51] KIVEKAS, K. ; VEPSALAINEN, J. ; TAMMI, K. : Stochastic Driving Cycle Synthesis for Analyzing the Energy Consumption of a Battery Electric Bus. In: *IEEE Access* 6 (2018), S. 55586–55598
- [52] KOLONKO, M. : *Stochastische Simulation*. Vieweg+Teubner, 2008
- [53] KRAFT, M. : *Methode zum fahrdynamikoptimalen Systementwurf elektrifizierter Antriebsstränge*, TU Darmstadt, Diss., Oktober 2017
- [54] KRUSE, R. ; BORGELT, C. ; KLAWONN, F. ; MOEWES, C. ; RUSS, G. ; STEINBRECHER, M. : *Computational Intelligence*. Vieweg + Teubner Verlag, 2011
- [55] LARSSON, V. ; JOHANNESSON, L. ; EGARDT, B. : Analytic Solutions to the Dynamic Programming Subproblem in Hybrid Vehicle Energy Management. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 64 (2015), Apr., Nr. 4, S. 1458–1467
- [56] LEE, T.-K. ; ADORNATO, B. ; FILIPI, Z. S.: Synthesis of Real-World Driving Cycles and Their Use for Estimating PHEV Energy Consumption and Charging Opportunities: Case Study for Midwest/U.S. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 60 (2011), Nov., Nr. 9, S. 4153–4163
- [57] LEI, Z. ; SUN, D. ; LIU, J. ; CHEN, D. ; LIU, Y. ; CHEN, Z. : Trip-Oriented Model Predictive Energy Management Strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicles. In: *IEEE Access* 7 (2019), S. 113771–113785
- [58] LI, G. ; GOERGES, D. : Hybrid Modeling and Predictive Control of the Power Split and Gear Shift in Hybrid Electric Vehicles. In: *2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2017, S. 1–6
- [59] LINGEN, J. von ; SCHMIDT, P. : Zeitgewichtete Belastung und Belastbarkeit und deren Nutzung für die Dimensionierung von Bahnenergieversorgungsanlagen. In: *Elektrie* 48 (1994), Nr. 11/12, S. 448–457

- 
- [60] LIU, W. : Hybrid Electric Vehicle Design and Performance Analysis. In: *Hybrid Electric Vehicle System Modeling and Control*. John Wiley & Sons, Ltd, Febr. 2017, S. 412–479
- [61] LOTOV, A. V. ; BUSHENKOV, V. A. ; KAMENEV, G. K.: *Interactive Decision Maps: Approximation and Visualization of Pareto Frontier*. Springer US, 2004
- [62] MACQUEEN, J. : Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability* Bd. 1: Statistics, University of California Press, Berkeley, Calif., 1967, S. 281–297
- [63] MAMUN, A.-A. ; LIU, Z. ; RIZZO, D. M. ; ONORI, S. : An Integrated Design and Control Optimization Framework for Hybrid Military Vehicle Using Lithium-Ion Battery and Supercapacitor as Energy Storage Devices. In: *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 5 (2019), März, Nr. 1, S. 239–251
- [64] MAYER, A. ; GLETTER, C. ; NELLES, O. ; KALLO, J. ; WINSEL, T. : Two-Dimensional ECMS for System Analysis of Hybrid Concepts featuring Two Electric Traction Motors. In: *2019 International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, IEEE, Okt. 2019, S. 1–8
- [65] MAYER, A. ; EISEMANN, E. ; PAULI, F. ; NELLES, O. : Synthesis of Representative Driving Cycles with Respect to Time-Dependent Load Conditions. In: *2020 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems (FISTS)*, 2020
- [66] MEIER, T. : *Multikriterielle Optimierung hybrider Antriebsstränge mittels statistischer Versuchsplanung* -. 1. Aufl. Aachen : Shaker Verlag, 2014
- [67] MEYWERK, M. : *CAE-Methoden in der Fahrzeugtechnik*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007
- [68] MILLO, F. ; ROLANDO, L. ; MALLAMO, F. ; FUSO, R. : Development of an optimal strategy for the energy management of a range-extended electric vehicle with additional noise, vibration and harshness constraints. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 227 (2012), Okt., Nr. 1, S. 4–16

- [69] MILLO, F. ; ROLANDO, L. ; SERVETTO, E. : Development of a Control Strategy for Complex Light-Duty Diesel-Hybrid Powertrains. In: *SAE Technical Paper Series*, SAE International, Sept. 2011
- [70] MIRO-PADOVANI, T. ; COLIN, G. ; KETFI-CHERIF, A. ; CHAMAILLARD, Y. : Implementation of an Energy Management Strategy for Hybrid Electric Vehicles Including Drivability Constraints. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 65 (2016), Aug., Nr. 8, S. 5918–5929
- [71] MOZAFFARI, A. ; VAJEDI, M. ; CHEHRESAZ, M. ; AZAD, N. L.: Multi-objective component sizing of a power-split plug-in hybrid electric vehicle powertrain using Pareto-based natural optimization machines. In: *Engineering Optimization* 48 (2015), Febr., Nr. 3, S. 361–379
- [72] MURGOVSKI, N. : *Optimal powertrain dimensioning and potential assessment of hybrid electric vehicles*, Göteborg, Chalmers University of Technology, Dissertation, 2012
- [73] MURGOVSKI, N. ; JOHANNESSON, L. ; SJÖBERG, J. ; EGARDT, B. : Component sizing of a plug-in hybrid electric powertrain via convex optimization. In: *Mechatronics* 22 (2012), Febr., Nr. 1, S. 106–120
- [74] MUSARDO, C. ; RIZZONI, G. ; STACCIA, B. : A-ECMS: An Adaptive Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Energy Management. In: *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*, 2005, S. 1816–1823
- [75] NELLES, O. : *Nonlinear System Identification*. Springer Berlin Heidelberg, 2001
- [76] NIELSEN, F. : *Introduction to HPC with MPI for Data Science*. Springer International Publishing, 2016
- [77] NISSEN, V. : *Einführung in Evolutionäre Algorithmen*. Vieweg + Teubner Verlag, 1997
- [78] NUESCH, T. ; OTT, T. ; EBBESEN, S. ; GUZZELLA, L. : Cost and fuel-optimal selection of HEV topologies using Particle Swarm Optimization and Dynamic Programming. In: *2012 American Control Conference (ACC)*, IEEE, Jun. 2012
- [79] NÜESCH, T. : *Energy Management of Hybrid Vehicles*. Zürich, ETH / Institute for Dynamic Systems and Control, 2014

- [80] NÜESCH, T. u. a.: Equivalent Consumption Minimization Strategy for the Control of Real Driving NOx Emissions of a Diesel Hybrid Electric Vehicle. In: *Energies* 7 (2014), Mai, Nr. 5, S. 3148–3178
- [81] NYBERG, P. ; FRISK, E. ; NIELSEN, L. : Using Real-World Driving Databases to Generate Driving Cycles With Equivalence Properties. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 65 (2016), Jun., Nr. 6, S. 4095–4105
- [82] ONORI, S. ; SERRAO, L. ; RIZZONI, G. : *Hybrid Electric Vehicles*. Springer London, 2016
- [83] PAGANELLI, G. ; DELPRAT, S. ; GUERRA, T. M. ; RIMAU, J. ; SANTIN, J. J.: Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains. In: *Vehicular Technology Conference. IEEE 55th Vehicular Technology Conference. VTC Spring 2002 (Cat. No.02CH37367)* Bd. 4, 2002, S. 2076–2081 vol.4
- [84] PAGANELLI, G. ; ERCOLE, G. ; BRAHMA, A. ; GUEZENNEC, Y. ; RIZZONI, G. : General supervisory control policy for the energy optimization of charge-sustaining hybrid electric vehicles. In: *JSAE Review* 22 (2001), Okt., Nr. 4, S. 511–518
- [85] PANT, M. ; THANGARAJ, R. ; ABRAHAM, A. : Particle Swarm Optimization: Performance Tuning and Empirical Analysis. In: *Foundations of Computational Intelligence Volume 3*. Springer Berlin Heidelberg, 2009, S. 101–128
- [86] PAPAGEORGIOU, M. ; LEIBOLD, M. ; BUSS, M. : *Optimierung*. Springer Berlin Heidelberg, 2015
- [87] PAULI, F. : *Allgemeingueltige Beschreibung der Lebensdauerbelastung elektrischer Antriebskomponenten in Pkw auf Basis von Mess- und Simulationsdaten*, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2016
- [88] PETERS, A. u. a.: Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt / Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim deutschen Bundestag. 2012 (153). – Forschungsbericht. – Online verfügbar: <http://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab153.pdf>
- [89] PFLIEGER, W. : *Ein methodischer Ansatz zur modularen Auslegung von Antriebsstrangkomponenten im Rahmen der Entwicklung von Hybridfahrzeugen*. Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie, 2015

- [90] PHILLIPS, A. M. ; BAILEY, K. E. ; JANKOVIC, M. : *Control system and method for a parallel hybrid electric vehicle*. 2004 U.S. Patent no. 6735502 B2
- [91] PING KAN ; LIHONG QIU ; LIJUN QIAN: Simulation of the control strategy of a plug-in 4WD hybrid electric car. In: *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 2014, S. 1–6
- [92] REZAEI, A. ; BURL, J. B. ; ZHOU, B. ; REZAEI, M. : A New Real-Time Optimal Energy Management Strategy for Parallel Hybrid Electric Vehicles. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 27 (2019), März, Nr. 2, S. 830–837
- [93] RÖHLIG, S. : *Beschreibung und Berechnung der Bahnbelastung von Gleichstrom-Nahverkehrsbahnen*, Hochschule für Verkehrswesen Dresden, Dissertation, 1992
- [94] RÜGER, S. : *Vollhybridantriebsstrang für ein sportliches Hybridfahrzeugkonzept*. AachenBraunschweig : ShakerUniv.-Bibl, 2015
- [95] SALMAN, M. ; SCHOUTEN, N. ; KHEIR, N. : Control strategies for parallel hybrid vehicles. In: *Proceedings of the 2000 American Control Conference. ACC (IEEE Cat. No.00CH36334)*, IEEE, 2000
- [96] SALMASI, F. R.: Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles: Evolution, Classification, Comparison, and Future Trends. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 56 (2007), Sept., Nr. 5, S. 2393–2404
- [97] SAUERMAN, R. ; BOJA, D. ; KIRSCHBAUM, F. ; NELLES, O. : Particle Swarm Optimization for Automotive Model-Based Calibration. In: *IFAC Proceedings Volumes* 43 (2010), Nr. 7, S. 733–738
- [98] SCHRÖDER, D. : *Elektrische Antriebe — Grundlagen*. Springer Berlin Heidelberg, 2000
- [99] SCHRÖDER, D. : *Intelligente Verfahren*. Springer Berlin Heidelberg, 2010
- [100] SCJARRETTA, A. ; GUZZELLA, L. : Control of hybrid electric vehicles. In: *IEEE Control Systems Magazine* 27 (2007), April, Nr. 2, S. 60–70
- [101] SERICOLA, B. : *Markov Chains - Theory, Algorithms and Applications*. John Wiley & Sons, Inc., 2013



- [102] SIEG, C. ; KÜÇÜKAY, F. : Benchmarking of Dedicated Hybrid Transmissions. In: *Vehicles* 2 (2020), Febr., Nr. 1, S. 100–125
- [103] SILVAS, E. ; HOFMAN, T. ; MURGOVSKI, N. ; ETMAN, L. ; STEINBUCH, M. : Review of Optimization Strategies for System-Level Design in Hybrid Electric Vehicles. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 66 (2017), Jan, Nr. 1, S. 57–70
- [104] SILVAS, E. ; HEREIJGERS, K. ; PENG, H. ; HOFMAN, T. ; STEINBUCH, M. : Synthesis of Realistic Driving Cycles With High Accuracy and Computational Speed, Including Slope Information. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 65 (2016), Jun., Nr. 6, S. 4118–4128
- [105] SIMON, D. : *Entwicklung eines effizienten Verfahrens zur Bewertung des Anfahrverhaltens von Fahrzeugen: Development of an efficient method for the evaluation on starting characteristics of vehicles*, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik, Universität Rostock, Dissertation, 2011
- [106] SIVERTSSON, M. : Adaptive Control Using Map-Based ECMS for a PHEV. In: *IFAC Proceedings Volumes* 45 (2012), Nr. 30, S. 357–362
- [107] SIVERTSSON, M. ; SUNDSTRÖM, C. ; ERIKSSON, L. : Adaptive Control of a Hybrid Powertrain with Map-based ECMS. In: *IFAC Proceedings Volumes* 44 (2011), jan, Nr. 1, S. 2949–2954
- [108] STOCKAR, S. ; MARANO, V. ; CANOVA, M. ; RIZZONI, G. ; GUZZELLA, L. : Energy-Optimal Control of Plug-in Hybrid Electric Vehicles for Real-World Driving Cycles. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 60 (2011), Sept., Nr. 7, S. 2949–2962
- [109] STURM, A. ; PIECHOTTKA, H. ; KÜÇÜKAY, F. ; GRAMS, S. : Synthese, Auslegung und Bewertung von zukünftigen Antriebsstrangkzepten. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 118 (2016), Nov., Nr. 12, S. 70–77
- [110] SUNDSTROM, O. ; GUZZELLA, L. : A generic dynamic programming Matlab function. In: *2009 IEEE Control Applications, (CCA) Intelligent Control, (ISIC)*, 2009, S. 1625–1630
- [111] TIMM, N. H.: *Applied Multivariate Analysis*. Berlin Heidelberg : Springer Science & Business Media, 2007

- [112] TORRES, O. ; BADER, B. ; ROMERAL, J. L. ; LUX, G. ; ORTEGA, J. A.: Multi-objective optimization of a Parallel Plug-in Hybrid Electric Vehicle considering the fuel consumption, acceleration and elasticity on the vehicle performance. In: *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, IEEE, Nov. 2013
- [113] UEBEL, S. : *Eine im Hybridfahrzeug einsetzbare Energiemanagementstrategie mit effizienter Längsführung*. Dr. Hut, 2019 (Schriftenreihe des Lehrstuhls Fahrzeugmechatronik der TU Dresden)
- [114] VAILLANT, M. ; ECKERT, M. ; GAUTERIN, F. : Energy management strategy to be used in design space exploration for electric powertrain optimization. In: *2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, IEEE, März 2014
- [115] VAN HARSELAAR, W. ; HOFMAN, T. ; BROUWER, M. : Automated Dynamic Modeling of Arbitrary Hybrid and Electric Drivetrain Topologies. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 67 (2018), Aug, Nr. 8, S. 6921–6934
- [116] VINOT, E. ; SCORDIA, J. ; TRIGUI, R. ; JEANNERET, B. ; BADIN, F. : Model simulation, validation and case study of the 2004 THS of Toyota Prius. In: *International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing* 3 (2008), Nr. 3
- [117] VORA, A. P. u. a.: Design-space exploration of series plug-in hybrid electric vehicles for medium-duty truck applications in a total cost-of-ownership framework. In: *Applied Energy* 202 (2017), Sept., S. 662–672
- [118] WEISS, F. : *Optimale Konzeptauslegung elektrifizierter Fahrzeugantriebsstränge*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018
- [119] WIERZCHOŃ, S. ; KŁOPOTEK, M. : *Modern Algorithms of Cluster Analysis*. Springer International Publishing, 2018
- [120] WIRASINGHA, S. G. ; EMADI, A. : Classification and Review of Control Strategies for Plug-In Hybrid Electric Vehicles. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 60 (2011), Jan., Nr. 1, S. 111–122

- [121] WON, J.-S. ; LANGARI, R. : Intelligent Energy Management Agent for a Parallel Hybrid Vehicle—Part II: Torque Distribution, Charge Sustainance Strategies, and Performance Results. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 54 (2005), Mai, Nr. 3, S. 935–953
- [122] WU, J. ; ZHANG, C. H. ; CUI, N. X.: Fuzzy energy management strategy for a hybrid electric vehicle based on driving cycle recognition. In: *International Journal of Automotive Technology* 13 (2012), Dez., Nr. 7, S. 1159–1167
- [123] XU, Q. ; LUO, X. ; JIANG, X. ; ZHAO, M. : Research on double fuzzy control strategy for parallel hybrid electric vehicle based on GA and DP optimisation. In: *IET Electrical Systems in Transportation* 8 (2018), Jun., Nr. 2, S. 144–151
- [124] YANG, Y. ; ZHANG, Q. ; WANG, Z. ; CHEN, Z. ; CAI, X. : Markov chain-based approach of the driving cycle development for electric vehicle application. In: *Energy Procedia* 152 (2018), Okt., S. 502–507
- [125] ZHANG, H. ; ZHANG, Y. ; YIN, C. : Hardware-in-the-Loop Simulation of Robust Mode Transition Control for a Series-Parallel Hybrid Electric Vehicle. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 65 (2016), März, Nr. 3, S. 1059–1069
- [126] ZHANG, M. ; SHI, S. ; LIN, N. ; YUE, B. : High-Efficiency Driving Cycle Generation Using a Markov Chain Evolution Algorithm. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 68 (2019), Febr., Nr. 2, S. 1288–1301
- [127] ZHUANG, W. ; ZHANG, X. ; YIN, G. ; PENG, H. ; WANG, L. : Mode Shift Schedule and Control Strategy Design of Multimode Hybrid Powertrain. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* (2019), S. 1–12
- [128] ZOU, Z. ; DAVIS, S. ; BEATY, K. ; O'KEEFE, M. ; HENDRICKS, T. ; REHN, R. ; WEISSNER, S. ; SHARMA, V. K.: A New Composite Drive Cycle for Heavy-Duty Hybrid Electric Class 4-6 Vehicles. In: *SAE Technical Paper Series*, SAE International, März 2004