

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Fachgebiet Energiewandlungstechnik

Energetisch optimal bemessene elektrische Maschinen für Mildhybridfahrzeuge

Markus Dirnberger

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Ralph Kennel

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herzog
2. Prof. Dr.-Ing. Bernard Bäker,
Technische Universität Dresden

Die Dissertation wurde am 23.05.2019 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 02.07.2019 angenommen.

Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herzog der technischen Universität München für die wissenschaftliche Betreuung der vorliegenden Dissertation. Durch den sehr vertrauensvollen und konstruktiven Austausch hat er wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernard Bäker für die Erstellung des Zweitgutachtens.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der Robert Bosch GmbH, welcher ich zu besonderem Dank verpflichtet bin. Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei Herrn Dr.-Ing. Roberto Retana für die Betreuung und die Unterstützung im Rahmen des Doktorandenprogramms.

Großer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Kurt Reutlinger der mich im besonderen Maße mit seinem hohen Fachwissen unterstützt hat. Ebenfalls gilt großer Dank Herrn Dr. rer. nat. Ronald Müller für die wissenschaftlichen Diskussionen.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Studenten die ich während Ihrer Abschlussarbeit betreuen durfte. Darüber hinaus danke ich Herrn Thomas Kammerer, M.Sc. und Herrn Michael Siegle M.Sc., welche mir durch ihr hohes Engagement und anregende Diskussionen neue Blickwinkel eröffnet haben.

Besonders großer Dank gilt allen die mich in meinem Werdegang unterstützt haben und mir stets durch Ihr Wirken mentalen Rückhalt geboten haben.

Mein größter Dank gilt meiner Frau Elisabeth für den unerschöpflichen Beistand und Zuspruch.

Kurzzusammenfassung

Die Hybridisierung von Fahrzeugen muss vorangetrieben werden, um den globalen CO₂-Ausstoß zu verringern und somit den Klimawandel zu verlangsamen. Hybridfahrzeuge besitzen neben der Verbrennungskraftmaschine eine elektrische Maschine. Nur wenn beide Energiewandler optimal aufeinander abgestimmt sind, kann das gesamte System optimal agieren und das maximale CO₂-Einsparpotential des Triebstrangs ausgeschöpft werden. In der vorliegenden Arbeit wird aus diesem Grund die elektrische Maschine eines Mildhybridfahrzeugs energetisch optimal auf die Verbrennungskraftmaschine abgestimmt.

Heute sind hierzu numerische Verfahren weit verbreitet, die neben einem adäquaten Optimierungsalgorithmus ein detailliertes Modell des Fahrzeugs benötigen, was zu langen Rechenzeiten und folglich zu begrenzter Flexibilität führt. Des Weiteren ist auch die Analyse von Wirkzusammenhängen bei solchen Verfahren schwierig.

Die Entwicklungsmethode in dieser Arbeit konzentriert sich im ersten Schritt auf eine analytische Beschreibung des Triebstrangs, anhand derer Einzelmaßnahmen bestimmte Auswirkungen zugeordnet werden können. So kann in Energieanteile unterschieden werden, die sich vorteilhaft bzw. nachteilig auf den CO₂-Ausstoß bei Skalierung der elektrischen Maschine auswirken. Denn im Allgemeinen darf die elektrische Maschine weder über- noch unterdimensioniert sein, um energetisch optimal im Triebstrang zu arbeiten. Zum Beispiel können zu klein bemessene elektrische Maschinen aufgrund ihrer begrenzten Möglichkeit, Energie aus den Verzögerungen des Fahrzeugs zurückzugewinnen, nicht optimal agieren. Hingegen führen zu groß bemessene elektrische Maschinen zu negativen Effekten. Hierzu zählt unter anderem das zusätzliche Gewicht der elektrischen Maschine, welches stets mitgeführt werden muss.

Neben der analytischen Betrachtung des Triebstrangs gliedert sich die Arbeit in die Wachstumsgesetze der elektrischen Maschine, eine detaillierte Modellbildung der elektrischen Maschine sowie eine numerische Methode zum Vergleich der Baugrößen im Gesamtsystem. Dabei stehen die Themengebiete in gegenseitiger Wechselwirkung.

Des Weiteren setzen sich die vorgestellten Methoden aus numerischen und analytischen Ansätzen zusammen. Es entsteht ein effektives Werkzeug, um Triebstränge energetisch optimal auszulegen. So erlaubt es die vorgestellte Methode, Mildhybridfahrzeuge über die Skalierung der elektrischen Maschine energetisch zu optimieren.

Abstract

The hybridization of vehicles must be pushed forward in order to globally reduce CO₂ emissions and therefore slow down climate change. Hybrid electric vehicles have, besides the internal combustion engine, an electrical machine. Only if both energy converters are optimally matched to each other, it is possible for the whole system to work optimally. This way it is possible to achieve the maximal CO₂ savings of a drive train, only. The thesis describes the energetic optimization of an electrical machine to the internal combustion engine of a mild hybrid electric vehicle.

Today, it is common to use numerical approaches, which need, next to an adequate optimization algorithm, a detailed model of the vehicle. This approach leads to long simulation times and therefore to a decreased flexibility. Using such approaches, it is also problematic to find the relationships between causes and effects.

The development method in this thesis focuses on an analytical description of the drive train, which allows assigning causes to effects in a useful way. Moreover positive or negative effects of scaling the electrical machine can be distinguished to the CO₂ emission. In general, the electrical machine cannot be too large or too small to work energetically optimal in the drive train. For example, too small electrical machines cannot work optimally, because of their limited capacity to recuperate the energy from decelerations of the vehicle. However, too large electrical machines lead to negative effects. One of these negative effects is the additional weight of the electrical machine, which must be carried all the time.

Following the analytical observation of the drive train, the thesis also deals with the fundamental laws of electrical machines, a detailed model of the electrical machine, and additionally a numerical method to compare sizes of the electrical machine. As the thesis shows the topics are bound by strong interactions.

Furthermore, the introduced method is combined by analytical and numerical approaches. This creates an effective tool to design an energetically optimal drive train. Using the presented approach allows to energetically optimize a mild hybrid electric vehicle.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Motivation und Ziel der Arbeit	1
1.2. Aufbau und Methode der Arbeit	3
2. Grundlagen und Randbedingungen der Arbeit	5
2.1. Topologien für Hybridfahrzeuge	5
2.2. Betriebsstrategie und deren Optimierung	8
2.2.1. Optimale Steuerung	8
2.2.2. Minimierung des äquivalenten Kraftstoffverbrauchs	9
2.2.3. Regelbasierte Strategien	9
2.2.4. Verwendete Betriebsstrategie und deren Optimierung	10
2.2.4.1. Arten von Algorithmen	11
2.2.4.2. Eingesetzter Optimierungsalgorithmus	14
2.3. Elektrische Maschine	15
2.3.1. Eingesetzte elektrische Maschine	16
2.3.1.1. Aufbau und Wirkungsweise der Klauenpolmaschine	16
2.3.1.2. Bauliche Vergrößerung der Klauenpolmaschine	19
2.3.2. Berechnung des Betriebsverhaltens der Klauenpolmaschine	20
2.4. Untersuchte Szenarien	20
3. Energetische Betrachtung des Triebstrangs	23
3.1. Darstellung der grundlegenden Idee	23
3.2. Bemessungsleistung der Basismaschine	25
3.2.1. Energiefluss außerhalb des Fahrzeugs	25
3.2.2. Energiefluss im Inneren des Fahrzeugs während der Rekuperationsphase	26
3.3. Berechnung der Energieanteile	28
3.3.1. Energie aus Rekuperationsphasen des Fahrzeugs	29
3.3.1.1. Fall 1: $ E_{Batt}(k_{vol}) < E_{Last}$	29
3.3.1.2. Fall 2: $ E_{Batt}(k_{vol}) > E_{Last}$	29
3.3.2. Energie zum Antrieb des Fahrzeugs ($E_{Vortrieb}$)	30
3.3.3. Berücksichtigung der Massenträgheit des Rotors ($E_{Trägheit}$)	30
3.3.3.1. Allgemeine Abhängigkeiten	32
3.3.3.2. Verlust beim Beschleunigen und Abbremsen des Rotors	32
3.3.3.3. Verluste aufgrund von Schaltvorgängen des Getriebes	34
3.3.4. Berücksichtigung der Schleppverluste der elektrischen Maschine	38
3.3.5. Größenverhältnisse der Energieanteile	39
3.4. Analyse eines Compact-Fahrzeugs	39
3.5. Unsicherheiten und Gültigkeitsanalyse des Ansatzes	40
3.6. Ergebnisse und Zusammenfassung des Kapitels	42
4. Wachstumsgesetze der elektrischen Maschine	44
4.1. Wachstum bei konstanter Materialbelastung	44
4.2. Wachstum bei gleicher thermischer Oberflächenbelastung	45

4.3. Wachstum bei konstanter Luftspaltflussdichte und konstantem Strombelag	45
4.3.1. Untersuchung der Wachstumsgesetze für die gegebenen Randbedingungen	47
4.3.2. Leiterzahlanpassung und deren Auswirkung	50
5. Modellierung der elektrischen Maschine	52
5.1. Berechnung der Schleppverluste der elektrischen Maschine	52
5.1.1. Verluste durch das Lüfterrad	52
5.1.2. Elektromagnetische Schleppverluste	54
5.1.3. Gesamtschleppverluste der elektrischen Maschine	65
5.2. Aktiver Betrieb der Klauenpolmaschine	66
5.2.1. Verluste in der Leistungselektronik	68
5.2.2. Erregerverluste	68
5.2.3. Kupferverluste im Stator	68
5.2.4. Eisenverluste auf der Rotoroberfläche	70
5.2.5. Eisenverluste im Stator der Maschine	72
5.2.6. Ergebnisse für die Basismaschine	75
5.2.7. Auswertung und Diskussion der Ergebnisse	76
5.3. Betriebsbereiche der elektrischen Maschine	76
5.3.1. Rekuperationsbetrieb	78
5.3.2. Drehmomentenunterstützung	80
5.3.3. Generatorbetrieb	80
5.3.4. Betriebsbereiche der elektrischen Maschine im Fahrzyklus	81
5.3.5. Kennfelder skaliertes elektrischer Maschinen	82
5.4. Zusammenfassung des Kapitels	82
6. Bewertung und Optimierung im Gesamtsystem	84
6.1. Penalty-Methode	85
6.2. Bestimmung des Penalty-Faktors	85
6.3. Analytische Beschreibung des Penalty-Faktors	85
6.4. Bestimmung der Konstante a	86
6.4.1. Fall 1: Hohe Bordnetzlast	87
6.4.2. Fall 2: Geringe Bordnetzlast	87
6.5. Grenzen der Methode	88
6.6. Zusammenfassung des Kapitels	90
6.7. Ergebnisse der gesamten Optimierungsmethode	91
7. Zusammenfassung	93
A. Anhang	95
A.1. Energetisch sinnvolle Bereiche der Maschinengröße	95
A.2. Rotordurchflutung	101
A.3. Gültigkeitsbetrachtung der Penalty-Methode	103
A.4. Ergebnisse der gesamten Methode	109
Abbildungsverzeichnis	114
Tabellenverzeichnis	117
Literaturverzeichnis	118

Abkürzungsverzeichnis

Verwendete Formelzeichen:

A	Fläche, Strombelag der elektrischen Maschine	k_n	Faktor zur Berücksichtigung der realen Anordnung
a	Konstante	k_{satt}	Sättigungsfaktor des Eisens
B	Flussdichte	k_{vol}	volumenbezogener Skalierungsfaktor
B_m	mittlere Flussdichte	k_w	Hilfsparameter zur Bestimmung der Wicklungsoberwelle
B_{max}	abgeplattete maximale Flussdichte im Luftspalt	k_0	Materialkonstante zur Bestimmung der Oberwellenverluste
B_N	Flussdichte der Nutoberwelle	L	Induktivität, Kostenfunktion
B_n	Flussdichte der Nutungs oberwelle	L/N	Leiterzahl pro Nut
B_{rT}	Remanenz	l	Länge
\hat{B}_{1*}	Spitzenwert der Grundwelle	m	Masse, Anzahl der Phasen
b	Breite, y-Achsenabschnitt	N	Anzahl der Nuten, Nutoberwelle
b_s	Nutbreite	n	Drehzahl
b_z	mittlere Zahnbreite	P	Leistung, Penalty-Term
C	Ausnutzung	P_{Metro}	Metropolis-Wahrscheinlichkeit
C_{ed}, C_{ad}	Polformfaktoren	p	Parameter, Polzahl, Drehimpuls
C_{aq}		Q	Quotient
c	Konstante zur Berechnung der Lüfterleistung	R	elektrischer oder magnetischer Widerstand
c_w	Strömungswiderstandskoeffizient	$R_{DS,ON}$	Widerstand von MOSFET's im leitenden Zustand
D	Durchmesser, Statordurchmesser	r	Radius
E	Energie	S	Stromdichte, Schaltungsfaktor
f, F	Funktion, Frequenz	s	Strecke
g	Erdbeschleunigung	T	Endzeit des Fahrzyklus
H	Hamilton-Funktion, Heizwert des Kraftstoffs, magnetische Feldstärke	t	Zeit
h	Höhe, Nebenbedingung	U	Spannung
I	Strom	U_b	Equi. Faktor zwischen Kraftstoffverbrauch und CO ₂ -Ausstoß
I_{1m}	Phasenstrom	$u(t)$	Steuergröße
i	Übersetzungsverhältnis	V	magnetische Spannung
J	Gütefunktional, Trägheitsmoment	v	Geschwindigkeit
k	Skalierungsfaktor, Sättigungsgrad	W_m	Aktivierung der Metropolis-Wahrscheinlichkeit
k_c	Carterfaktor	w	Windungszahl
k_{Cu}	Kupferfüllfaktor	x	Variable, Umfang der elektrischen Maschine
k_{Fe}	Stapelfaktor	x^*	Kennzeichnung des Minimums einer Funktion
k_{KL}	Einflussfaktor für parasitäre Effekte	Z	Anzahl der Zähne
$k_{n,1}$	Faktor zur Berücksichtigung der Stromverdrängung	z	Zahn
		z_h	Anzahl der Leiter übereinander

α_p	Abplattungsfaktor	ρ	Dichte, spezifischer Widerstand
$\varphi(\beta),$ $\Psi(\beta), \beta$	Hilfsfunktionen zur Bestimmung der Stromverdrängung	σ_h, σ_{wb}	Beiwerte zur Bestimmung von Eisenverlusten
γ	Hilfsfaktor zur Berechnung k_c	τ_p	Polteilung einer elektrischen Ma- schine
Δ	Unterschied	τ_N	Nutteilung einer elektrischen Maschine
δ	Luftspalt	Φ	Funktion zur Einbindung ei- ner Nebenbedingung, magneti- scher Fluss
η	Wirkungsgrad, Nutzungsgrad	$\Phi_{\sigma,ns}$	Streuflüsse in der Nut
Θ	magnetische Durchflutung	$\Phi_{\sigma,z1}, \Phi_{\sigma,z2}$	
ϑ	Temperatur	$\Phi_{\sigma,n1}, \Phi_{\sigma,n2}$	Amplitude der Streuflüsse in der Nut
κ	spezifische Leitfähigkeit	Ψ	Verketteter magnetischer Fluss
$\lambda(t)$	zeitabhängiger Kozustand	ω	Winkelgeschwindigkeit
λ_σ	Streuleitwerte in der Nut	∇	Nabla Operator
$\lambda_{\sigma,k}, \lambda_{\sigma,ns}$		\vec{e}_x	Einheitsvektor
μ	Penalty-Faktor		
μ_{Reib}	Reibkoeffizient		
μ_r	relative Permeabilität		
μ_0	magnetische Feldkonstante		

Verwendete Indizes:

<i>A</i>	Nutoberwelle	<i>ges</i>	Gesamt
<i>a</i>	Nutoberwelle (modifiziert)	<i>i</i>	Zeitschritt, ideelle Betrachtung
<i>ab</i>	abwärts gerichteter Gangwechsel	<i>ind</i>	induziert
<i>auf</i>	aufwärts gerichteter Gang- wechsel	<i>Kraftst</i>	Kraftstoff
<i>Batt</i>	Batterie	<i>Ke</i>	Kern
<i>ber</i>	Berechnung	<i>Kin</i>	kinetisch
<i>Cu</i>	Kupfer	<i>ka</i>	Klaue
<i>cw</i>	Strömungswiderstand	<i>j</i>	Joch
<i>DC</i>	Gleichgröße	<i>LE</i>	Leistungselektronik
<i>Dif</i>	Differential	<i>Masch</i>	elektrische Maschine
<i>Dr</i>	Drehmomentenunterstützung in der Betriebsstrategie	<i>mag</i>	Magnet
<i>d</i>	d-Achse	<i>max,el</i>	maximal elektrisch
<i>diff</i>	Differentiell	<i>mess</i>	Messung
<i>el</i>	elektrisch	<i>mech</i>	mechanisch
<i>Err</i>	elektrische Erregung	<i>N</i>	Nut
<i>Fe</i>	Eisen	<i>n</i>	ganzzahliger Index
<i>Fzg</i>	Fahrzeug	<i>PM</i>	Permanentmagnet
<i>Ge</i>	Generatorbetrieb in der Be- triebsstrategie	<i>p</i>	Pol
		<i>q</i>	q-Achse
		<i>R</i>	ohmsch
		<i>Riem</i>	Riemen

<i>Re</i>	Rekuperationsbetrieb in der Betriebsstrategie	<i>sim</i>	simuliert
<i>Reku</i>	Rekuperation	<i>VKM</i>	Verbrennungskraftmaschine
<i>Reku'</i>	Rekuperation ohne Batteriewirkungsgrad	<i>v</i>	Verlust
<i>Rot</i>	Rotor der elektrischen Maschine	<i>vol</i>	Volumen
<i>rot</i>	rotatorisch	<i>WK</i>	Wickelkopf
<i>rot1</i>	rotatorisch Beschleunigung des Rotors	<i>wo</i>	Wicklungsoberwelle
<i>rot2</i>	rotatorisch Verzögerung des Rotors	<i>z</i>	Zahn
<i>S</i>	Stator	<i>Zy</i>	Zyklus
<i>Schlepp</i>	schleppen	0	Oberfläche
<i>Still</i>	Stillstand	1, 2, ..., m, i	laufender Index
<i>sp</i>	Speiche	1	Grundwelle
		Δ	Änderung
		δ	Luftspalt der elektrischen Maschine
		σ	Streuung

Verwendete Abkürzungen:

VKM	Verbrennungskraftmaschine	PWM	Pulsweitenmodulation
Li-Ionen	Lithium-Ionen	NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
DC	Gleichgröße	WLTC	Worldwide Harmonized Light-duty Vehicles Test Cycle
ECMS	Equivalent Consumption Minimization Strategy	SComp	Subcompact-Fahrzeug
SOC	State of Charge	Compact	Mittelklassewagen
Fib	Fibonacci-Zahl	SUV	Sport Utility Vehicle
		FEM	Finite Elemente Methode

1. Einleitung

1.1. Motivation und Ziel der Arbeit

Massive Herausforderungen erwarten uns durch den stark steigenden Energiebedarf unserer Gesellschaft. Zum einen werden die zur Deckung des Bedarfs eingesetzten fossilen Brennstoffe immer knapper und deren Förderung zunehmend schwieriger. Aktuelle Prognosen zeigen, dass die Ölvorkommen in rund 50 Jahren erschöpft sein werden [1]. Zum anderen resultieren aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe Treibhausgase, welche die klimatischen Bedingungen zum Negativen verändern. Nach dem UN-Klimabericht ist Kohlenstoffdioxid (CO₂) das stärkste Treibhausgas und somit der stärkste Treiber der klimatischen Veränderung [2]. Die Abbildung 1.1 zeigt den CO₂-Ausstoß unterschiedlicher Branchen [3]. Dabei entfallen auf das Transportwesen 23% der emittierten CO₂-Gase.

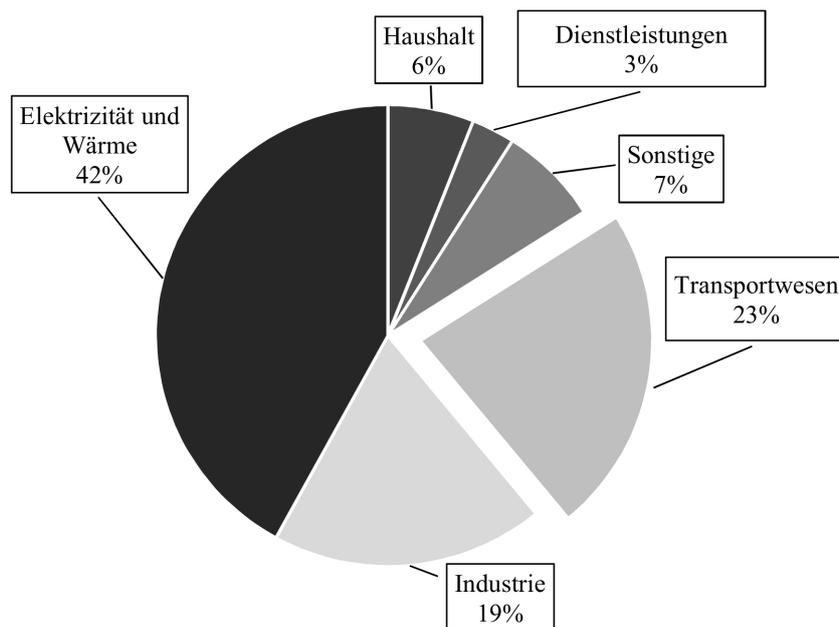


Abbildung 1.1.: Der CO₂-Ausstoß unterschiedlicher Branchen nach [3]

Der hohe Anteil des Transportwesens am CO₂-Ausstoß zieht Automobilhersteller in die gesellschaftliche Verantwortung. Die daraus folgende Verordnung der Europäischen Kommission sieht ab dem Jahr 2021 einen CO₂-Ausstoß von 95 g CO₂/km, bezogen auf die Neuwagenflotte, vor [4]. Wobei der erlaubte CO₂-Ausstoß von allen zugelassenen Fahrzeugen eines Automobilherstellers abhängt.

Den Handlungsbedarf der einzelnen Automobilhersteller zeigen [5], [6]. Dort wurden Prognosen erarbeitet, wann die unterschiedlichen Automobilhersteller das Ziel eines CO₂-Ausstoßes von 95 g CO₂/km bei gleichbleibender Entwicklung erreichen werden, vgl. Abbildung 1.2.

Wann würden die Automobilhersteller ihre europäischen CO₂-Ziele für 2021 erreichen?

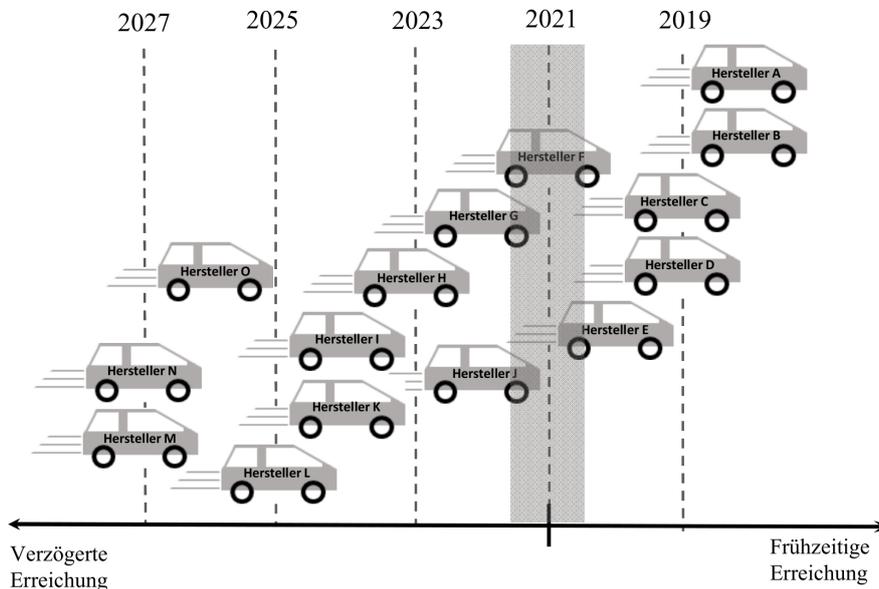


Abbildung 1.2.: Prognose zur Erreichung der CO₂-Ziele unterschiedlicher Automobilhersteller [5], [6]

Es ist deutlich zu erkennen, dass gerade Automobilhersteller im linken Bereich der Abbildung 1.2 Verbesserungen erzielen müssen, um der Verordnung nachzukommen. Ein möglicher Weg ist die Hybridisierung des Antriebstrangs, bei welchem neben der herkömmlichen VKM meistens eine elektrische Maschine zum Antrieb des Fahrzeugs beiträgt. Dabei ermöglicht die elektrische Maschine, Energie aus den Verzögerungsphasen des Fahrzeugs zurückzugewinnen und im Falle des Vollhybrid auch elektrisch zu fahren. Hieraus ergeben sich erhebliche Änderungen am Triebstrang, welche sich insbesondere in den hohen Produktionskosten des Fahrzeugs bemerkbar machen.

Geringere Kosten sind zu erwarten, wenn der konventionelle Triebstrang in großen Teilen übernommen wird, was zu einem guten Verhältnis zwischen Aufwand und Nutzen führt. Bei Mildhybridfahrzeugen wird genau dieses Ziel verfolgt. Es erfolgen wenige Adaptionen und Modifikationen am Triebstrang, wodurch eine Elektrifizierung des Antriebsstrangs erreicht wird. Häufig wird der ohnehin vorhandene Bordnetzgenerator modifiziert, um Energie aus Verzögerungsphasen zu rekuperieren und die VKM zeitweise motorisch zu unterstützen. So ein Konzept hat, angesichts der Abbildungen 1.1 und 1.2 dargestellten Herausforderungen, Potential, sich weit zu verbreiten und die Hybridisierung des Antriebstrangs erschwinglich zu gestalten.

Mildhybridfahrzeuge weisen eine verglichen mit Vollhybridfahrzeugen kleine Elektrifizierung auf, was ein geringeres CO₂-Einsparpotential nach sich zieht. Umso hochauflösender müssen Methoden zur energetischen Optimierung sein, um Komponenten und deren Einfluss auf den CO₂-Ausstoß darzulegen. Die Abbildung 1.3 zeigt den Kraftstoffausstoß in Abhängigkeit der Hybridisierung $\left(\frac{P_{el, Maschine}}{P_{VKM}}\right)$ eines Vollhybriden. Außerdem ist die geforderte Auflösung zur energetischen Optimierung eines Mildhybridfahrzeugs dargestellt.¹

¹Die Daten des Diagramms wurden [7] entnommen.

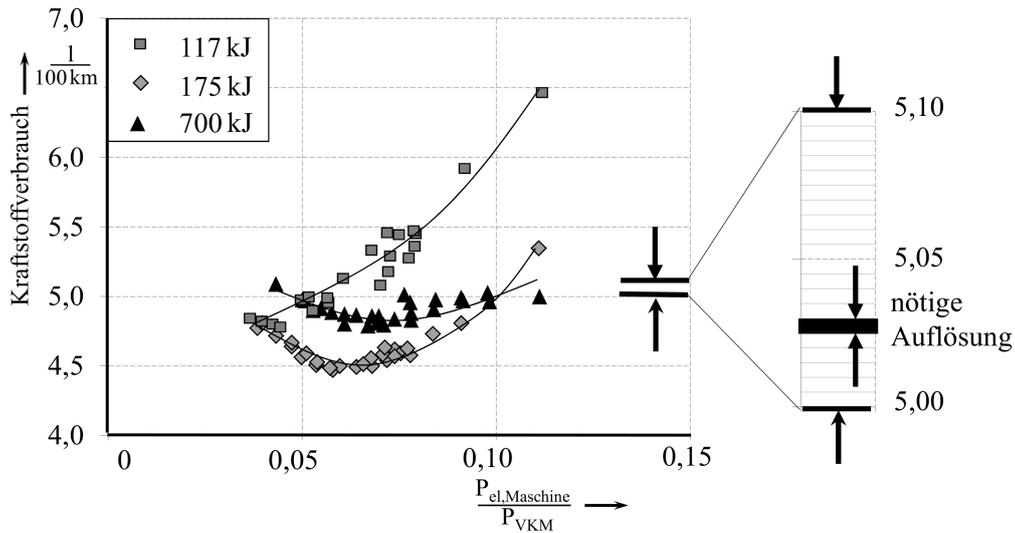


Abbildung 1.3.: Kraftstoffverbrauch eines Vollhybridfahrzeugs in Abhängigkeit einer zunehmenden Elektrifizierung und unterschiedlicher Batteriegrößen [7], zusätzlich ist die nötige Auflösung für die energetische Optimierung eines Mildhybridfahrzeugs eingezeichnet

Es ergeben sich somit große Herausforderungen, um das in dieser Arbeit untersuchte Mildhybridfahrzeug hinsichtlich seines CO_2 -Ausstoßes bzw. seines Kraftstoffverbrauchs zu optimieren.

1.2. Aufbau und Methode der Arbeit

Um das Ziel einer energetischen Optimierung zu erreichen, wird in dieser Arbeit ein durchgängiger Entwicklungsprozess vorgestellt. Dieser Entwicklungsprozess orientiert sich am sog. V-Modell der Systementwicklung, bei dem zu Beginn eine Anforderung an das zu entwickelnde Produkt gestellt wird, siehe Abbildung 1.4.

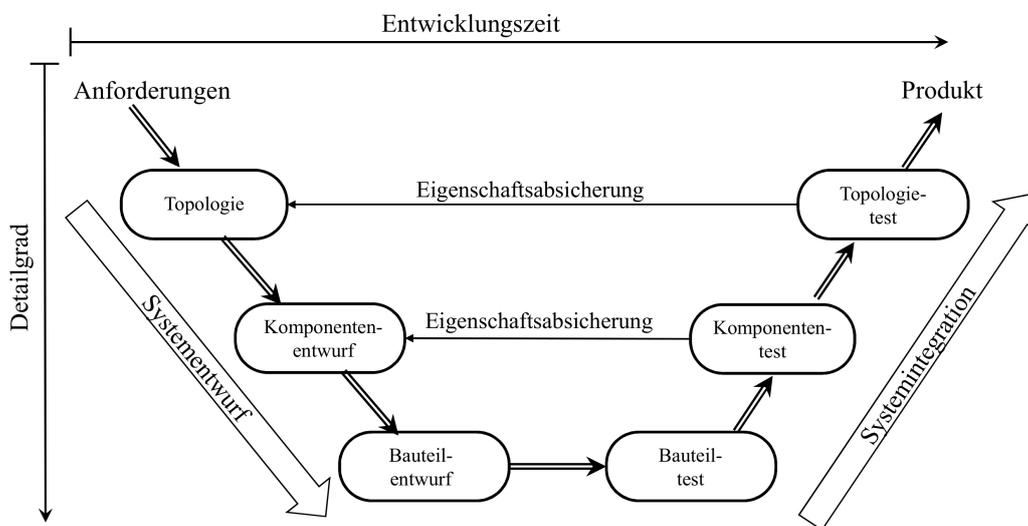


Abbildung 1.4.: V-Modell der Systementwicklung

Nachdem die Anforderung definiert wurde, kann eine Topologie ausgewählt werden. Ob die gewählte Topologie den Anforderungen entspricht, wird durch die Eigenschaftsabsicherung gewährleistet. Kann mit der gewählten Topologie die gewünschte Anforderung erreicht werden, können die Komponenten im System untersucht werden. Analog zur Topologie wird auf Komponentenebene auch eine Eigenschaftsabsicherung genutzt, um sicherzustellen, dass die Komponenten den Anforderungen entsprechen. In gleicher Weise wird mit der Bauteilebene verfahren. Durchläuft man anschließend die Systemintegration, erhält man ein Produkt, welches den Anforderungen entspricht.

Um der Herausforderung nach der Suche eines energetischen Optimums gerecht zu werden, muss die gegenseitige Abhängigkeit zwischen den Komponenten und dem System betrachtet werden. Für das Beispiel eines Mildhybridfahrzeugs zeigt die Abbildung 1.5 das Vorgehen.

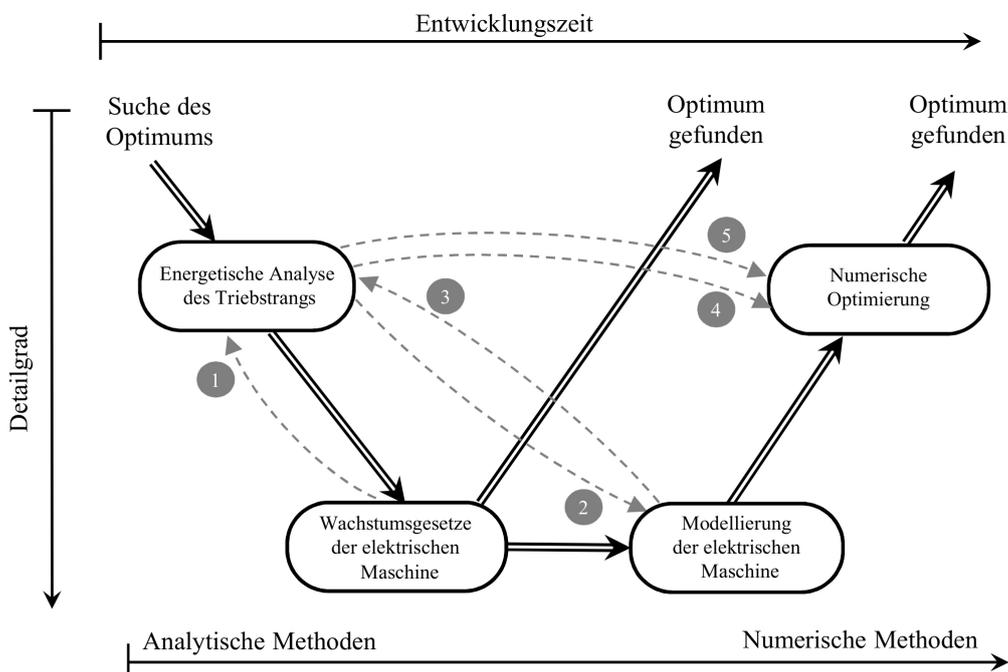


Abbildung 1.5.: Vorgehen in der vorliegenden Arbeit

Zu Beginn der Arbeit wird der Triebstrang auf analytische Weise untersucht. Danach folgt die Betrachtung der elektrischen Maschine über Wachstumsgesetze. Eine Detailanalyse der elektrischen Maschine wird durch ein iteratives Modell ermöglicht. Zum Abschluss wird eine numerische Optimierung durchgeführt.

Die nummerierten Pfeile zwischen den einzelnen Blöcken in Abbildung 1.5 zeigen, an welchen Stellen es zu einer Interaktion zwischen den einzelnen Themen kommt. So ist z.B. eine Kopplung zwischen der „Modellierung der elektrischen Maschine“ und der „Energetischen Analyse des Triebstrangs“ vorhanden (Kopplungsweg 3). Dabei handelt es sich um die Schleppkennlinie der elektrischen Maschine, welche in einem iterativen Verfahren ermittelt wird. Auf dieses Wissen ist die energetische Analyse des Triebstrangs angewiesen.

Weitere Kopplungswege werden im Laufe der Arbeit beschrieben, wobei die Abbildung 1.5 zur Navigation durch die gesamte Arbeit dient. Es wird zu gegebener Zeit auf die Abbildung 1.5 verwiesen. Am Ende der Arbeit wird die Abbildung 1.5 nochmals aufgegriffen und abschließend beleuchtet. Bevor nun das Verfahren nach Abbildung 1.5 im Detail erläutert wird, müssen die allgemeinen Grundlagen und die Randbedingungen der Arbeit genauer dargestellt werden.

2. Grundlagen und Randbedingungen der Arbeit

In diesem Kapitel werden die allgemeinen Grundlagen gelegt, welche für das Verständnis der Arbeit wichtig sind. Als ein weiterer wichtiger Punkt wird in diesem Kapitel der Stand der Technik dargestellt und die für diese Arbeit geltenden Randbedingungen erläutert.

2.1. Topologien für Hybridfahrzeuge

Hybridfahrzeuge bestehen meist aus zwei Energiewandlern und zwei Energiespeichern. Hybrid-elektrische Antriebsstränge nehmen dabei heute die gängigste Variante dieser Fahrzeuge ein. Dabei versorgt die über einen Kraftstofftank angeschlossene Verbrennungskraftmaschine (VKM) den zweiten Energiewandler. Bei diesem zweiten Energiewandler handelt es sich um eine elektrische Maschine. Neben den hybridelektrischen Fahrzeugen existieren weitere Varianten von Hybridfahrzeugen, wie z.B. hydraulische oder pneumatische Ansätze [8]. Diese Konzepte werden in dieser Arbeit nicht betrachtet und man versteht das Weiteren Hybridfahrzeuge als hybrid-elektrische Fahrzeuge.

Eine Unterscheidung von Hybridfahrzeugen erfolgt anhand der drei folgenden Topologien.

- **Parallelhybrid:** Bei dieser Art von Hybridfahrzeug können beide Energiewandler, d.h. elektrische Maschine und VKM, simultan zur Fortbewegung des Fahrzeug eingesetzt werden, (siehe Abbildung 2.1 a). Prinzipiell kann die elektrische Maschine an unterschiedlichen Stellen des Triebstrangs angebracht werden, gängig ist aber die Anbringung am Getriebeeingang oder -ausgang oder in den Radnaben. Beide Energiewandler können auch mechanisch über die Straße gekoppelt sein, dies zeigt der „through the road“ Hybrid. Bei diesem liegen die Energiewandler an unterschiedlichen Antriebsachsen. Des Weiteren kann bei vielen dieser Topologien die elektrische Maschine über eine Kupplung vom Triebstrang abgekoppelt werden, um Schleppverluste der elektrischen Maschine zu vermeiden.
- **Serieller Hybrid:** Die VKM arbeitet bei dieser Topologie im Bereich eines hohen Wirkungsgrads. Erreicht wird dies durch den Einsatz von zwei elektrischen Maschinen, welche jeweils als Motor bzw. als Generator eingesetzt werden. Das Fahrzeug wird von einer elektrischen Maschine angetrieben, welche durch die VKM in Kombination mit einem Generator versorgt wird. Ein elektrischer Energiespeicher ermöglicht das Abdecken von Lastspitzen, (siehe Abbildung 2.1 b).
- **Mischhybrid und leistungsverzweigter Hybrid:** Die Grundlage der sog. Mischhybriden bilden die eben vorgestellten Topologien. Bei den Mischhybriden ist ein serieller und paralleler Betrieb durch das Umschalten einer Kupplung oder durch den Einsatz eines Planetengetriebes möglich.

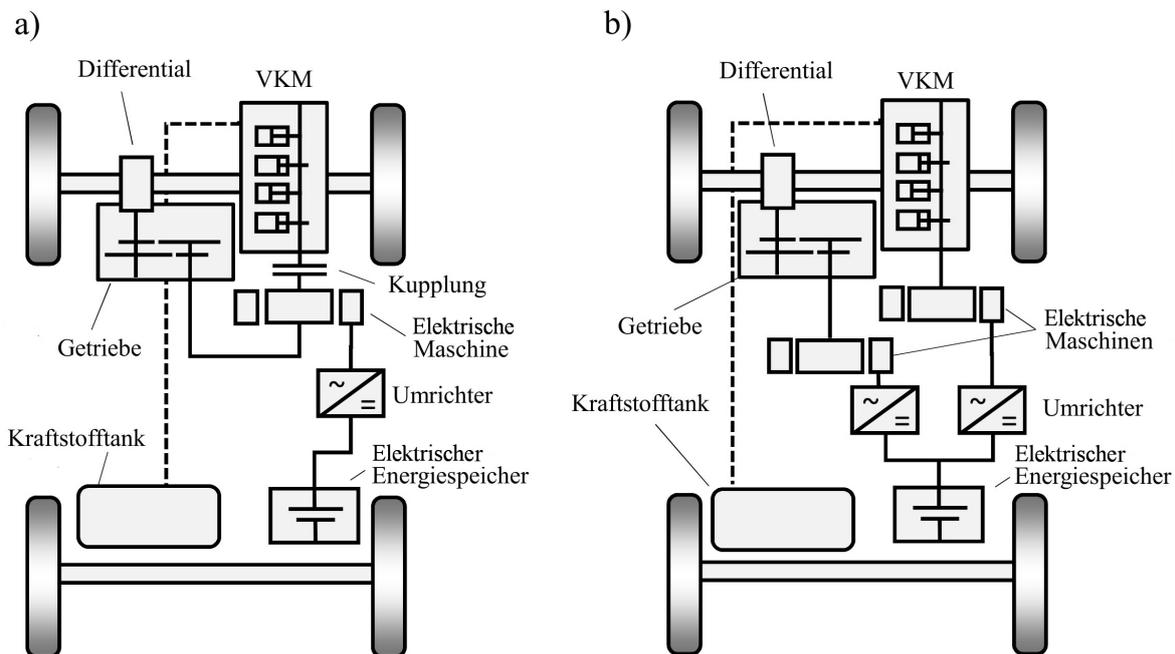


Abbildung 2.1.: Topologie eines parallelen Hybridfahrzeugs a) und eines seriellen Hybridfahrzeugs b)

Neben der Unterscheidung nach der Topologie kann anhand des Leistungsverhältnisses zwischen der VKM und der elektrischen Maschine unterschieden werden. Es gilt:

- **Mikrohybrid:** Bei Mikrohybridfahrzeugen ermöglicht die Start-Stopp-Funktionalität und die Rekuperationsfunktion Einsparungen beim CO₂-Ausstoß. Die Start-Stopp-Funktion ist im innerstädtischen Bereich durch die dort häufig vorkommenden Stillstandsphasen von Vorteil. Des Weiteren kann durch die Rekuperationsfunktion ein Teil der Verzögerungsenergie des Fahrzeugs zurückgewonnen werden. Vorteile dieses Hybrids sind die geringen Änderungen des Triebstrangs gegenüber konventionellen Fahrzeugen sowie das gute Verhältnis zwischen Aufwand und Nutzen [9].
- **Mildhybrid:** Die größer dimensionierte elektrische Maschine (bis ca. 20 kW) ermöglicht es, mehr Energie aus den Verzögerungsphasen des Fahrzeugs zurückzugewinnen. Des Weiteren kann die elektrische Maschine genutzt werden, um die VKM während des Fahrbetriebs zu unterstützen. Das gute Verhältnis zwischen Aufwand und Nutzen bleibt gegenüber dem Mikrohybrid unverändert hoch.
- **Vollhybrid:** Im Gegensatz zu dem Mikro- und Mildhybrid ist ein Vollhybrid in der Lage, rein elektrisch zu fahren. Hierzu müssen der Energiespeicher und die elektrische Maschine vergrößert werden. Verglichen mit dem Mild- und Mikrohybrid zieht die Vergrößerung der Komponenten einen höheren Integrationsaufwand der entsprechenden Komponenten nach sich.
- **Plug-In-Hybrid:** Diese Art des Hybrids erlaubt es, den internen elektrischen Energiespeicher durch das externe Stromnetz zu laden. Die eingesetzte VKM dient zur Überwindung hoher Lasten und zur Reichweitenerhöhung.

Je nach Topologie haben die unterschiedlichen Hybridfahrzeuge ganz spezifische Vorteile, wie z.B. der Mildhybrid, bei dem der Aufwand in einem guten Verhältnis zum Nutzen steht. Der geringe Aufwand ermöglicht es den Automobilherstellern, das Konzept auf einfache Weise in den bestehenden Triebstrang zu integrieren. Ein Mildhybridfahrzeug ist sehr zielführend, da neben einer überschaubaren Zeit bis zur Markteinführung auch eine große Zahl an Fahrzeugen entsprechend ausgestattet werden kann. Im nachfolgenden Kapitel wird deshalb ein Mildhybridfahrzeug vorgestellt, welches in der Arbeit näher betrachtet wird.

Topologie des untersuchten Mildhybridfahrzeugs Das in dieser Arbeit untersuchte Mildhybridfahrzeug nutzt den riemengetriebenen Bordnetzgenerator, um die Energie aus den Bremsphasen zu rekuperieren und die VKM motorisch zumindest zeitweise zu unterstützen. Die Abbildung 2.2 zeigt die Topologie des Fahrzeugs. Deutlich zu erkennen ist, dass die elektrische Maschine über den Riemen permanent mit der VKM verbunden ist. Ein Abkoppeln der elektrischen Maschine vom Rest des Triebstrangs ist nur über die herkömmliche Kupplung möglich. Des Weiteren weist die Topologie zwei Netze auf unterschiedlichen Spannungsebenen auf.

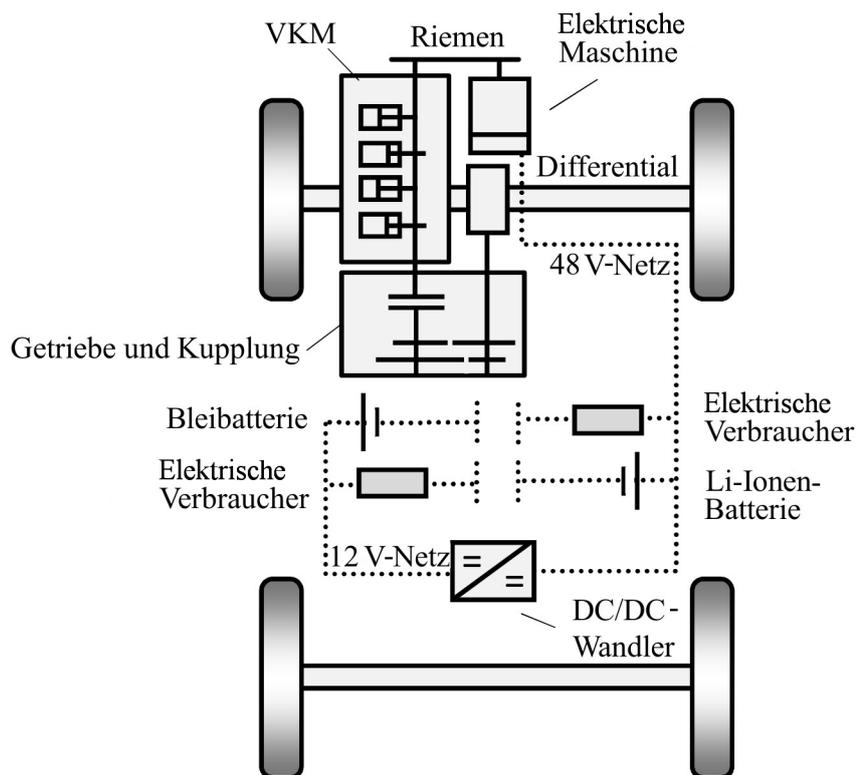


Abbildung 2.2.: Topologie des untersuchten Mildhybridfahrzeugs

An das 48 V-Bordnetz können Verbraucher mit hoher Leistung angeschlossen werden, ohne dass es zu einem hohen Stromfluss kommt. Dabei verfügt dieses Bordnetz über eine Li-Ionen-Batterie, welche es ermöglicht Energie aus den Rekuperationsphasen zu speichern. Verbraucher, welche auf 12 V ausgelegt sind, können ebenso betrieben werden. Hierfür ist ein separates Bordnetz verfügbar. Das 12 V-Bordnetz ist über einen DC/DC-Wandler an das 48 V-Netz angekoppelt.

2.2. Betriebsstrategie und deren Optimierung

Die Betriebsstrategie ist eine der Topologie des Hybridfahrzeugs übergeordnete Steuerung, welche den Leistungsfluss koordiniert. Die betrachteten Modi der elektrischen Maschine unterteilen sich in zwei Generatorzustände und einen Motorzustand:

1. Generatorzustände:

- a) Rekuperationsbetrieb: Bei diesem Zustand wird Energie während Verzögerungsphasen des Fahrzeugs zurückgewonnen. Dieser Betriebszustand kann nur für eine gewisse Zeit ausgeführt werden, da sonst die thermische Grenze der elektrischen Maschine überschritten wird.
- b) Konventioneller Generatorbetrieb: Wurde die Batterie weit entladen, z.B. durch eine hohe Last des Bordnetzes, so muss sofort Energie in die Batterie eingebracht werden, um einer Tiefentladung und einer einhergehenden Beschädigung der Batterie entgegen zu wirken. Dabei arbeitet die elektrische Maschine als konventioneller Generator.

2. Motorzustand:

- a) Wird die elektrische Maschine als Motor betrieben, spricht man von Drehmomentenunterstützung. Hierbei wird gezielt der Ladezustand der Batterie bei hohen Geschwindigkeiten und in Beschleunigungsphasen verringert, um in den anschließenden Verzögerungsphasen Energie zurück in die Batterie speisen zu können.

Als Randbedingung muss die Betriebsstrategie dem Wunsch des Fahrers nach Vortrieb nachkommen, den CO₂-Ausstoß so gering wie möglich halten und Beschädigungen an Komponenten vorbeugen. Des Weiteren muss im vorliegenden Fall die Ladebilanz der Batterie ausgeglichen sein, um eine valide energetische Aussage treffen zu können. Zur Erfüllung der Anforderungen werden in der Literatur im Wesentlichen drei unterschiedliche Ansätze verfolgt.

Diese sind

1. die optimale Steuerung,
2. die Verfahren zur Minimierung des äquivalenten Kraftstoffverbrauchs und
3. die regelbasierten Verfahren.

2.2.1. Optimale Steuerung

Die Optimierungsaufgabe einer Betriebsstrategie kann als Problem der optimalen Steuerung aufgefasst werden, falls das Geschwindigkeitszeitprofil bekannt ist. Es wird das Gütefunktional J gebildet, welches über die Steuergröße $u(t)$ minimiert werden kann [10], [11], [12].

$$J = m_{Krst}(T) = \int_0^T \dot{m}_{Krst}[t, u(t)] dt \quad (2.1)$$

In Gleichung (2.1) bildet $m_{Krst}(T)$ die Masse des benötigten Kraftstoffs zum Ende des Fahrzyklus T . Um Nebenbedingungen, wie z.B. die Ladebilanz der Batterie einzubringen, muss die Gleichung (2.1) erweitert werden. Es folgt die um die Funktion $\Phi(T)$ erweiterte Gleichung (2.2).

$$J = \Phi[x, (T)] + \int_0^T L[t, u(t)]dt \quad (2.2)$$

Um die gesuchte Funktion $u(t)$ zu finden, können Methoden der numerischen Optimierung eingesetzt werden [13].

2.2.2. Minimierung des äquivalenten Kraftstoffverbrauchs

Die Minimierung des äquivalenten Kraftstoffverbrauchs² kann aus dem Problem der optimalen Steuerung abgeleitet werden, dazu wird die Hamilton-Funktion nach Gleichung (2.3) eingeführt [14].

$$H(t, x, u, \lambda) = L(t, u) + \lambda(t)f(t, x, u) \quad (2.3)$$

In Gleichung (2.3) ist $L(t, u)$ die Kostenfunktion, $f(t, x, u)$ entspricht der Dynamik der Zustandsvariablen und $\lambda(t)$ ist der Kozustand, welcher dem Lagrange-Multiplikator nahekommt. Für das Minimum muss für $\lambda(t)$ die Gleichung (2.4) gelten.

$$\dot{\lambda}(t) = -\frac{\partial}{\partial x}H(t, x, u, \lambda) = -\frac{\partial}{\partial x}f[t, x(t), u(t)] \quad (2.4)$$

Um die Gleichung (2.4) zu vereinfachen, wird häufig die Annahme getroffen, dass die Zustandsdynamik nicht vom Zustand selbst abhängt. Diese Annahme führt dazu, dass $\dot{\lambda} = 0$ wird bzw. λ konstant ist. Folglich kann die Hamilton-Funktion zu jedem Zeitpunkt durch die Funktion $u(t)$ gelöst werden.

Der Term $\lambda f(t, x, u)$ kann für Hybridfahrzeuge als Addition eines äquivalenten Kraftstoffverbrauchs interpretiert werden. Dieser zeigt an, welcher zusätzliche Kraftstoffverbrauch nötig ist, um die Ladebilanz der Batterie auszugleichen. Da der Kozustand λ als konstant angenommen wird, gibt dieser den Zusammenhang zwischen mechanischer und elektrischer Energie an, vgl. Kapitel 6. Demzufolge muss λ im Vorfeld bestimmt werden, da dieser vom Fahrzyklus und der Topologie des Hybrids abhängt. In vielen Fällen kann dies durch die Betrachtung mittlerer Wirkungsgrade und dem als bekannt angenommenen Fahrzyklus geschehen [11]. Andere Verfahren ermitteln λ iterativ durch mehrfache Simulation [12], [15].

Die beiden vorgestellten Methoden haben den Nachteil, dass der Fahrzyklus bekannt sein muss, um ein optimales Ergebnis zu erzielen. Um diesen Nachteilen entgegenzuwirken, wurden adaptive Methoden entwickelt, die λ entsprechend anpassen [16]. Dennoch kann jede so abgeleitete Betriebsstrategie im realen Fahrbetrieb nur suboptimal sein.

2.2.3. Regelbasierte Strategien

Als weitere Methode zur Umsetzung von Betriebsstrategien stehen die regelbasierten Strategien zur Verfügung. Bei diesen Strategien handelt es sich um Verzweigungen, welche nach dem „Wenn-Dann“-Prinzip funktionieren. Die Verzweigung erfolgt meist nach mathematischen, heuristischen und physikalischen Verfahren [17], [18]. Der Vorteil regelbasierter Strategien liegt in der Einfachheit, in ihrer leicht verständlichen Struktur und der hohen Praxistauglichkeit.

²engl. Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS)

2.2.4. Verwendete Betriebsstrategie und deren Optimierung

Bei der in dieser Arbeit verwendeten regelbasierten Betriebsstrategie hängt die momentane Leistung der Maschine vom Ladezustand³ (SOC) der Batterie ab, siehe Abbildung 2.3.

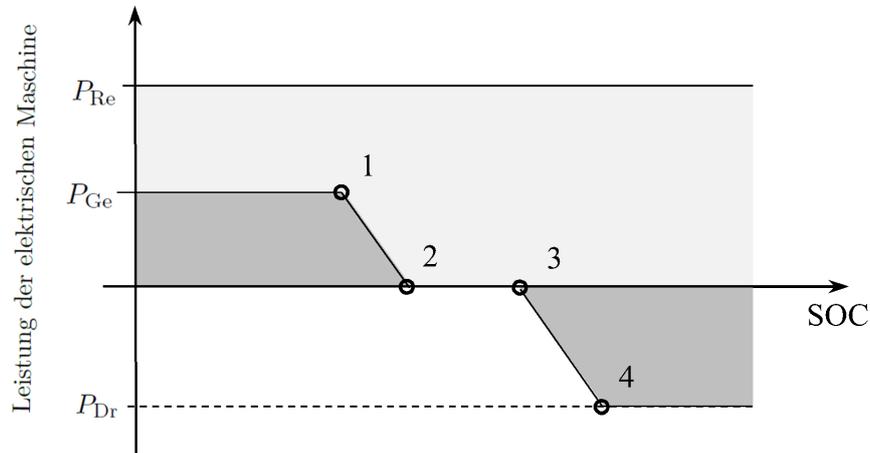


Abbildung 2.3.: SOC-abhängige Betriebsstrategie des Fahrzeugs

Die Ordinate der Abbildung 2.3 zeigt die Leistung der elektrischen Maschine in den unterschiedlichen Betriebsmodi. Der SOC der Batterie ist auf der Abszisse aufgetragen. Falls die Batterie weit entladen ist, agiert die elektrische Maschine als konventioneller Generator, was Energie in die Batterie befördert. Die maximale Leistung im Generatorbetrieb ist durch P_{Ge} gekennzeichnet und kann über die SOC-Grenzen 1 und 2 beeinflusst werden. Der Modus Drehmomentunterstützung ist erst bei höheren Ladezuständen sinnvoll. Auch bei diesem Modus kann die Leistung P_{Dr} über zwei SOC-Grenzen adaptiert werden (SOC-Grenzen 3 und 4). Die Leistung der elektrischen Maschine im Rekuperationsbetrieb ist vom SOC unabhängig, da das gesuchte energetische Optimum voraussetzt, dass die gesamte mögliche Energie aus Verzögerungen eines Fahrzyklus rekuperiert wird, unabhängig vom Ladezustand der Batterie.⁴

Für die Optimierung der verwendeten Betriebsstrategie müssen die SOC-Grenzen so gewählt werden, dass zum einen der CO_2 -Ausstoß minimal wird und zum anderen der Ladezustand der Batterie am Anfang und am Ende des Fahrzyklus gleich ist.

Formal gestaltet sich die Optimierungsaufgabe so: Minimiere/Maximiere

$$F(x) = [f_1(x_1) \dots f_m(x_m)]^T \quad x \in \mathbb{R}^n \quad (2.5)$$

unter Berücksichtigung

$$h(x) = 0 \quad x \in \mathbb{R}^k . \quad (2.6)$$

Die Grafik 2.4 zeigt ein Beispiel für die Abbildung des Suchraums auf die Zielfunktion. Das Minimum der Zielfunktion ist mit dem Lösungsvektor x^* gekennzeichnet und dessen Wert mit $F(x^*)$.

³engl. State of Charge

⁴Ausgenommen einer Überladung der Batterie

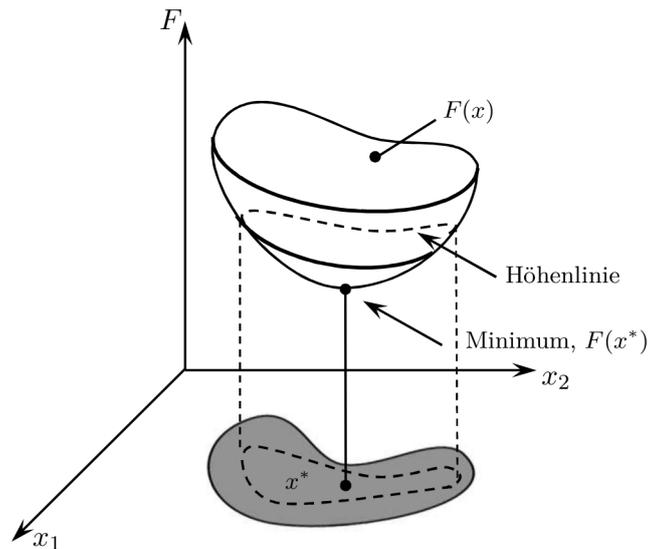


Abbildung 2.4.: Abbildung des Parameterraums auf die Zielfunktion

Die Zuweisung der Parameter $x_1 \dots x_m$ in die Zielfunktion F ist rechenintensiv und wird im vorliegenden Fall von Computern übernommen. Um einen Optimierungsprozess so effektiv wie möglich zu gestalten, muss neben einer akzeptablen Simulationszeit der Modelle ein Optimierungsalgorithmus eingesetzt werden, welcher tauglich für die Optimierungsaufgabe ist und gute Konvergenzeigenschaften für das untersuchte Problem aufweist. Aus diesem Grund werden die Optimierungsalgorithmen im Folgenden kategorisiert. Anschließend erfolgt die Vorstellung des verwendeten Algorithmus sowie die Plausibilisierung der Optimierungsergebnisse.

2.2.4.1. Arten von Algorithmen

Im Allgemeinen ist ein Optimierungsalgorithmus eine Arbeitsanweisung, die zeigt, wie eine gewisse Aufgabe gelöst werden kann. Entsprechend gibt es für die unterschiedlichsten Problemstellungen entsprechende Verfahren, welche im Folgenden kurz erläutert werden.

Im Groben kann die Art der Algorithmen in

- iterativ
- rekursiv
- dynamisch
- zufallsgesteuert
- genetisch
- probabilistisch
- heuristisch

unterteilt werden [19].

Iterative Algorithmen: Ausgehend von einem Startpunkt werden schrittweise neue Werte nach einem vorgeschriebenen Verfahren ermittelt, welche das Problem lösen. Die Berechnung findet ein Ende, wenn die ermittelten Werte das Problem bis auf eine gewisse Abweichung lösen.

Rekursive Algorithmen: Im Gegensatz zur Iteration wird bei der Rekursion das Problem in einfach zu lösende Teilprobleme unterteilt. Zum Schluss werden die Lösungen der Teilprobleme zur Gesamtlösung zusammengesetzt.

Dynamische Algorithmen: Bei diesen Optimierungsalgorithmen wird zuerst das kleinste Teilproblem ermittelt und die Lösung des Teilproblems gespeichert [20]. So muss ein mehrfach benötigtes Ergebnis lediglich ein einziges Mal berechnet werden. Zur Veranschaulichung kann die Berechnung der Fibonacci-Zahlen herangezogen werden.

Die Fibonacci-Zahlen sind definiert als Summe ihrer zwei Vorgänger, $f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$. Die Abbildung 2.5 zeigt die Berechnung der Fibonacci-Zahlen bis fünf. Es ist zu erkennen, dass z.B. die Berechnung von $\text{Fib}(2)$ dreimal durchgeführt werden muss. Werden, wie im Falle von dynamischen Algorithmen, diese mehrfach benötigten Teile detektiert und deren Lösung zwischengespeichert, gestaltet sich die Berechnung um ein Vielfaches schneller.

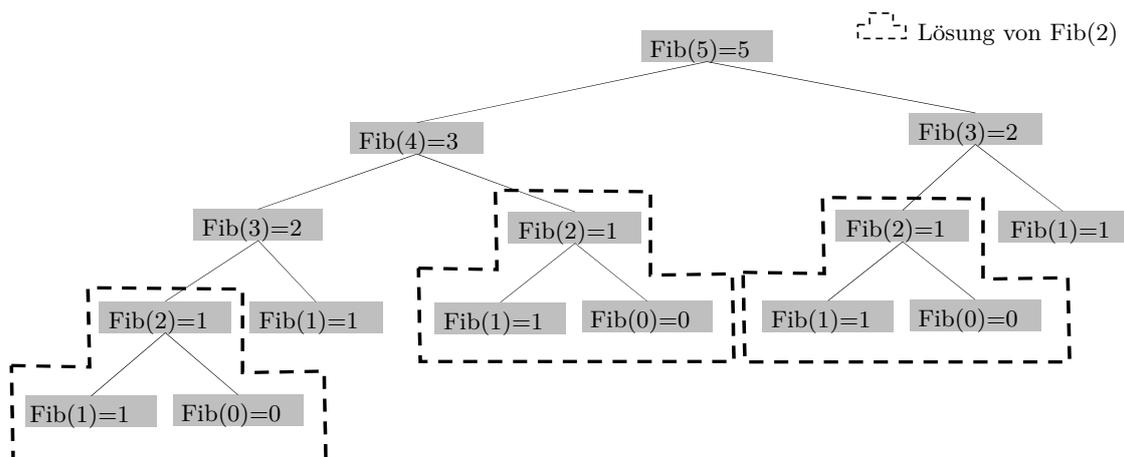


Abbildung 2.5.: Berechnung der Fibonacci-Zahlen bis $\text{Fib}(5)$

Zufallsgesteuerte Algorithmen: Ein bekannter zufallsgesteuerter Algorithmus ist Simulated Annealing, welcher sich an dem Abkühlverhalten von Körpern orientiert [21]. Erwärmte Körper streben den minimalen Energiezustand an, was der Suche nach einem Minimum entspricht. Bereits in den 1980er Jahren wurde dieser Ansatz für Optimierungsaufgaben genutzt [22].

Bei diesem Verfahren wird folgendermaßen vorgegangen: Von einem Startpunkt x_0 werden während des Optimierungsprozesses iterativ vom letzten Punkt x_i aus neue Werte für x_{i+1} zufallsgesteuert ermittelt. Ist $f(x_{i+1})$ kleiner als $f(x_i)$ wurde ein Fortschritt während des Optimierungsprozesses erreicht. Für den Fall, dass $f(x_{i+1})$ größer als $f(x_i)$ ist, wurde zwar kein kleinerer Wert gefunden, dennoch wird der Wert mit der sog. Metropolis-Wahrscheinlichkeit P_{Metro} akzeptiert [22]. Die Definition der Metropolis-Wahrscheinlichkeit zeigt die Gleichung (2.7).

$$P_{Metro} = \begin{cases} 1 & \text{für } f(x_{i+1}) < f(x_i) \\ e^{-\frac{f(x_{i+1})-f(x_i)}{W_m}} & \text{für } f(x_{i+1}) \geq f(x_i) \end{cases} \quad (2.7)$$

In Gleichung (2.7) ist $W_m > 0$ einzusetzen. Durch die Übernahme von größeren Werten ist es möglich, das globale Minimum zu finden.

Genetische Algorithmen: Aus der Evolutionslehre lässt sich der in [23] vorgeschlagene Optimierungsablauf ableiten. Es werden Individuen erzeugt, welchen zufällig generierte Gene zugrunde liegen. Die so entstandene Generation pflanzt sich folgendermaßen fort:

Zuerst erfolgt die Auswahl von zwei Individuen, welche anhand einer Fitnessfunktion in Hinblick auf das zu lösende Problem beurteilt werden. Das stärkere der beiden Individuen wird das Mutterindividuum. Dieses Individuum wird mit einem Vaterindividuum kombiniert, welches auf die gleiche Weise ermittelt wurde wie das Mutterindividuum. So entsteht ein Kind, welches aus dem starken Mutter- und dem starken Vaterindividuum hervorgeht und das eine höhere Fitness aufweist. Bei der Vermischung der Mutter- und Vatergene wird mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eine Mutation, d.h. eine Veränderung der Gene eingeleitet. Diese ermöglicht, lokale Minima zu überwinden. Diese Art der Optimierung wird heute in vielen Industriezweigen genutzt, um Produkte hinsichtlich ihrer Beschaffenheit, Leistungsmerkmale, Ansteuerung und Kosten zu optimieren [24], [25], [26], [27].

Probabilistische Algorithmen: Hier orientiert man sich an den Methoden der Probabilistik, welche inzwischen in Ingenieurwissenschaften erfolgreich eingesetzt werden [28], [29], [30]. Anstatt des schwierigen Problems löst man ein anderes, einfacheres Problem, das zu einer hohen Wahrscheinlichkeit der Lösung des schwierigen Problems entspricht. Man geht dabei wie folgt vor:

Als erstes wird versucht, das Problem einfacher zu gestalten, damit wenig Aufwand zur Lösung nötig ist. Anschließend wird betrachtet, inwiefern die Vereinfachung noch zur Lösung des ursprünglichen Problems geeignet ist. Dann erfolgt die Lösung des vereinfachten Problems. Im nächsten Schritt wird entschieden, ob die entstandenen Fehler hingenommen werden können oder nicht [19]. Eine weitere Möglichkeit, welche zunehmend eingesetzt wird, sind die Methoden der künstlichen Intelligenz [31].

Methoden der künstlichen Intelligenz: Diese Algorithmen sind in großer Vielfalt verfügbar [32], [33]. Aus diesem Grund soll an dieser Stelle nur auf zwei Verfahren eingegangen werden, zum einen auf die Schwarmintelligenz und zum anderen auf die neuronalen Netze.

Die Schwarmintelligenz beruht auf der Bewegung von Tieren, die sich in einem Schwarm bewegen, z.B. Ameisen, welche zwischen mehreren Ameisenstädten pendeln [34], [35]. Ziel der Ameisen ist es, die kürzeste Verbindung zwischen allen Städten zu finden. Der sog. Ameisenalgorithmus geht dabei auf folgende Prämissen zurück:

- Eine Ameise ruht nicht, sie bewegt sich stets.
- Sie hinterlässt auf ihrem Weg von der einen zur anderen Ameisenstadt eine Duftmarkierung, welche mit zunehmender Länge abnimmt.
- Die Ameise wählt ihre Wege entsprechend der Intensität der Duftmarkierung.

Zu Beginn werden die Ameisen noch chaotisch zwischen den Städten verkehren. Nach einiger Zeit werden die Ameisen jedoch auf dem kürzesten Weg agieren.

Eine weitere Methode der künstlichen Intelligenz sind die sog. neuronalen Netze [36], [37], [38]. Die ersten neuronalen Netze wurden bereits 1943 vorgestellt [39]. Bei diesen Algorithmen wird das Gehirn nachgebildet, indem einzelne Neuronen miteinander interagieren. Im Wesentlichen besteht ein neuronales Netz aus drei Teilen: der Eingabeschicht, der Ausgabeschicht und den verdeckten Schichten [19]. Die Eingabeschicht nimmt die Informationen auf, woraufhin die Verarbeitung in den verdeckten Schichten erfolgt und schließlich über die Ausgabeschicht nach außen abgegeben wird.

Die einzelnen Neuronen sind stärker oder schwächer miteinander gekoppelt, was mathematisch gesehen einer Gewichtung jeder Verbindung entspricht. So werden die Eingänge eines einzelnen Neurons mit einem Gewichtungsfaktor multipliziert und zu einer Summe, der sog. Aktivierungsfunktion, verrechnet. Der Ausgang des Neurons wirkt somit als Funktion der Aktivierungsfunktion. In vielen Fällen wird das Netz über Beispiele oder Problemstellungen trainiert, deren Lösung bereits bekannt ist. So wird eine Grundfitness des Netzes erreicht. Während des Betriebs lernt das Netz immer weiter und verfeinert seine Verhaltensweise.

Heuristische Algorithmen: Diese Art von Algorithmen beruht auf Erfahrungen. Ein Zusammenhang kann somit nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit angenommen werden. Die Ergebnisse eines solchen Algorithmus hängen somit stark von der korrekten statistischen Abbildung des Problems ab. Eine Plausibilisierung der Optimierungsergebnisse sollte bei dem Einsatz solcher Algorithmen erfolgen, um die Tauglichkeit des Algorithmus darzulegen. Im Gegenzug bieten solche Algorithmen sehr gute Konvergenzeigenschaften und erlauben, bereits mit überschaubaren Ressourcen gute Optimierungsergebnisse zu erzielen. Ein Beispiel für einen solchen Algorithmus wird im nächsten Abschnitt gegeben.

Die oben genannten Arten von Algorithmen unterscheiden sich in vielen Punkten. Gewisse Algorithmen scheinen sich für bestimmte Problemstellungen besser zu eignen als andere [19]. So wurde z.B. der heuristisch arbeitende DIRECT-Algorithmus [40] bei unterschiedlichen ingenieurwissenschaftlichen Problemen erfolgreich eingesetzt [41], [42], [43], [44]. Unter anderem zeigt dieser Algorithmus gute Konvergenzeigenschaften für Problemstellungen der Fahrzeugtechnik, im Besonderen für energetische Betrachtungen des Antriebstrangs und des Bordnetzes [45], [46], [47], [48]. Dieser Algorithmus greift auf ein heuristisches Verfahren zurück, welches im nächsten Abschnitt vorgestellt wird.

Wie oben angedeutet, kann ein heuristisches Verfahren nur so gut sein, wie der verwendete statistische Zusammenhang der Realität entspricht. Aus diesem Grund ist eine Plausibilisierung der Optimierungsergebnisse erforderlich, welche ebenfalls im nächsten Abschnitt erfolgt.

2.2.4.2. Eingesetzter Optimierungsalgorithmus

Bei dem verwendeten DIRECT-Algorithmus handelt es sich um einen heuristischen Algorithmus. Der Algorithmus unterteilt den Parameterraum in Rechtecke oder ggf. in Hyperrechtecke im mehrdimensionalen Raum [49], [50]. Ein Beispiel für einen zweidimensionalen Parameterraum zeigt die Abbildung 2.6. Der Algorithmus evaluiert die Zielfunktion zur Initialisierung gleichmäßig über den gesamten Parameterraum (Abbildung 2.6 a). Iterativ wird anschließend der Parameterbereich in Rechtecke unterteilt, siehe Abbildung 2.6 b) und c).

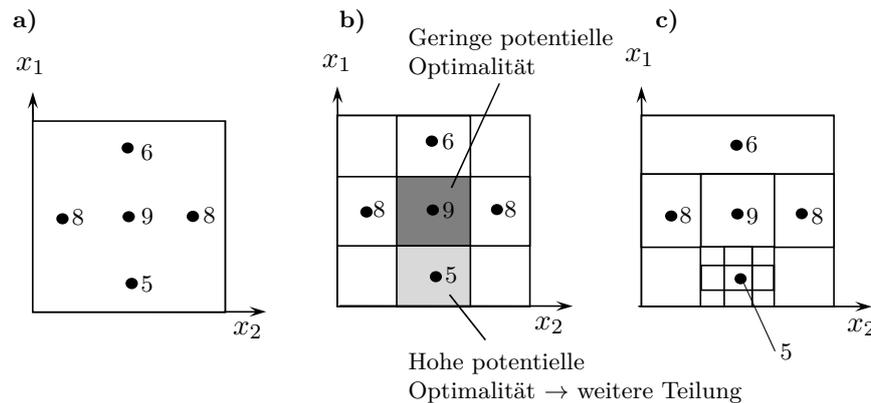


Abbildung 2.6.: Streben nach einem Minimum des DIRECT-Algorithmus mit beispielhaften Zahlenwerten

Die Entscheidung einer weiteren Unterteilung eines Rechtecks in kleinere Rechtecke erfolgt anhand der folgenden Attribute:

1. Fläche des Rechtecks
2. Wert der Zielfunktion inmitten des Rechtecks

Anhand dieser Attribute legt der Algorithmus eine Liste der potentiell optimalen Rechtecke an. Eine hohe potentielle Optimalität ist dann gegeben, wenn sich ein geringer Wert inmitten eines großen Rechtecks befindet, siehe Abbildung 2.6 b). Geringe potentielle Optimalität ergibt sich hingegen aus einem hohen Wert und einer kleinen Fläche des Rechtecks. Nach dieser Strategie lässt sich das globale Minimum des Problems nach einigen Iterationsschleifen finden.

Zur Plausibilisierung der Ergebnisse wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit Untersuchungen vorgenommen, die im Folgenden kurz dargestellt werden [51], [52]. Es sind neun Optimierungsdurchgänge eines Gesamtfahrzeugmodells mit modifiziertem Wirkungsgradkennfeld der elektrischen Maschine durchlaufen worden. Das Wirkungsgradkennfeld wurde ausgehend von 83% gleichmäßig um ± 10 Prozentpunkte in einer Schrittweite von 2,5 Prozentpunkten variiert. Der Optimierungsalgorithmus adaptiert die Parameter der Betriebsstrategie für den konventionellen Generatorbetrieb, um den geringsten CO_2 -Ausstoß zu finden, siehe Abschnitt 2.2.4. Die auf diese Weise erhaltenen Ergebnisse sind in Abbildung 2.7 mit schwarzen Dreiecken dargestellt. Demgegenüber stehen die Ergebnisse der energetischen Betrachtung des Triebstrangs des 3. Kapitels, welche mit weißen Dreiecken dargestellt sind. Die Abbildung 1.5 zeigt diesen Abgleich durch den Kopplungsweg 5.

Es ist zu erkennen, dass die Ergebnisse der energetischen Analyse des Triebstrangs nahezu mit den Ergebnissen aus der Optimierung übereinstimmen. So kann davon ausgegangen werden, dass sich der Algorithmus zur Lösung des Problems eignet.

2.3. Elektrische Maschine

Neben einer optimalen Betriebsstrategie müssen aufeinander abgestimmte Einzelkomponenten im Triebstrang eingesetzt werden, um den CO_2 -Ausstoß so gering wie möglich zu halten. Einen großen Einfluss auf den CO_2 -Ausstoß hat die maximale Leistung (Bemessungsleistung) der elektrischen Maschine.

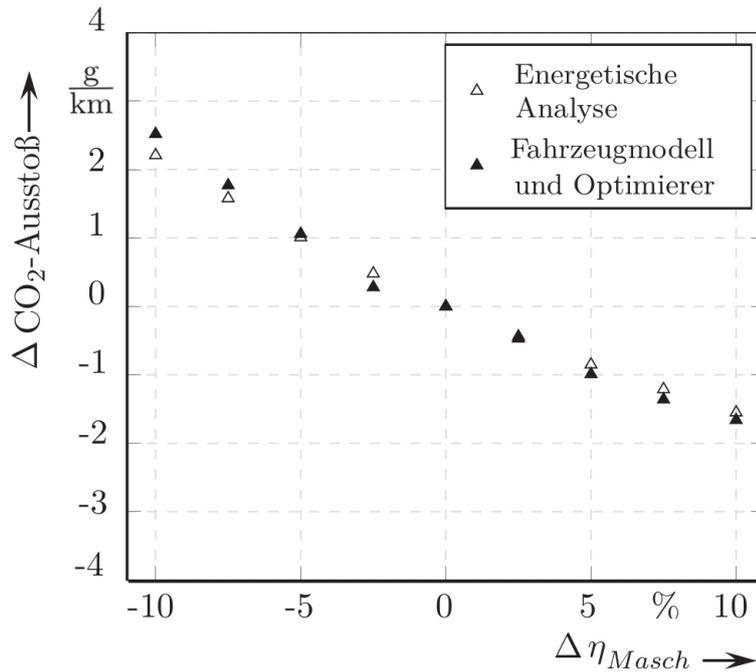


Abbildung 2.7.: Vergleich zwischen energetischer Betrachtung und dem numerischen Fahrzeugmodell [51]

2.3.1. Eingesetzte elektrische Maschine

Die Bemessungsleistung kann von unterschiedlichen Maschinentypen zur Verfügung gestellt werden. In [7] werden z.B. die klassische permanenterrregte Synchronmaschine und die Asynchronmaschine in einem Vollhybridfahrzeug miteinander verglichen. Andere Veröffentlichungen zeigen z.B. eine Transversalfussmaschine in linearer Anordnung [53], eine Axialflussmaschine als geschaltete Reluktanzmaschine [54], [55] und eine Homopolarmaschine [56] als potentiellen Maschinentyp für Hybridfahrzeuge.

Im Bereich der Kraftfahrzeuggeneratoren hat sich jedoch mit der Klauenpolmaschinen ein anderes Maschinenkonzept bewährt. Einen Vergleich zu anderen Maschinentypen zeigen [57], [58], [59]. Bei diesen Arbeiten wurde die Klauenpolmaschine als Favorit benannt. Aufgrund der weiten Verbreitung der Klauenpolmaschine als Kraftfahrzeuggenerator und der einhergehenden verfügbaren Produktionsstätten wird in der vorliegenden Arbeit ebenfalls dieser Maschinentyp untersucht. Die Abbildung 2.8 zeigt einen Kraftfahrzeuggenerator, welchem eine Klauenpolmaschine zugrunde liegt.

2.3.1.1. Aufbau und Wirkungsweise der Klauenpolmaschine

Bei der Klauenpolmaschine handelt es sich um eine fremd- oder hybriderregte Synchronmaschine. Dabei stellt die Klauenpolmaschine eine Sonderform der weitverbreiteten Schenkelpolmaschine dar. Der Rotor besteht im Gegensatz zu vielen anderen Maschinen nicht aus Blechen, sondern aus massivem Eisen, welches die Klauen bildet. Die Klauen umschließen die konzentrische Erregerspule, deren Bestromung über Schleifringe erfolgt, siehe Abbildung 2.9.

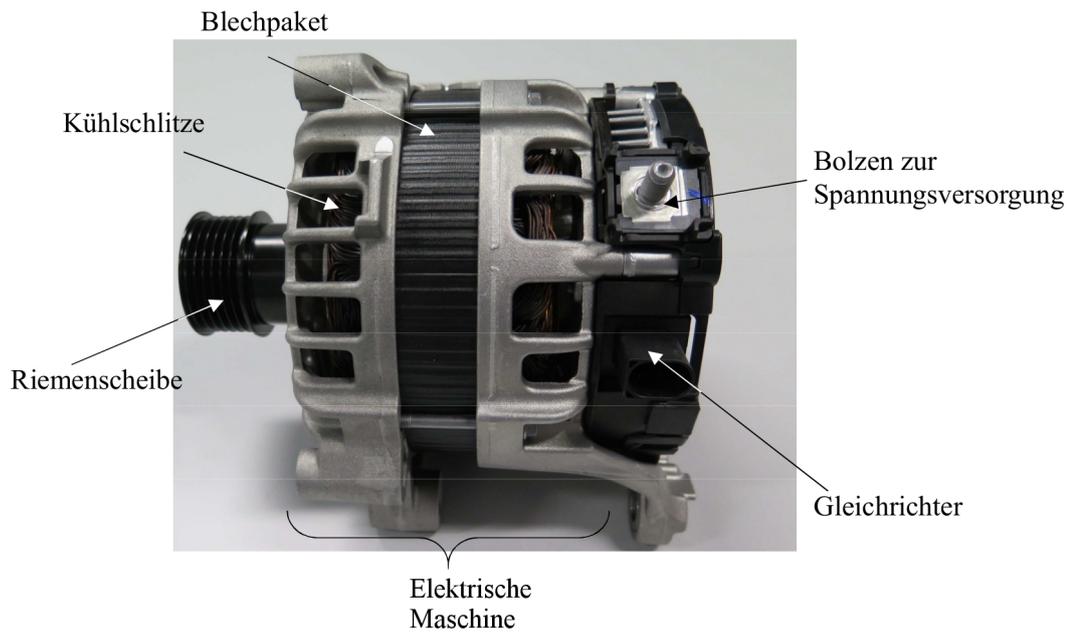


Abbildung 2.8.: Kraftfahrzeuggenerator in Klauenpolausführung

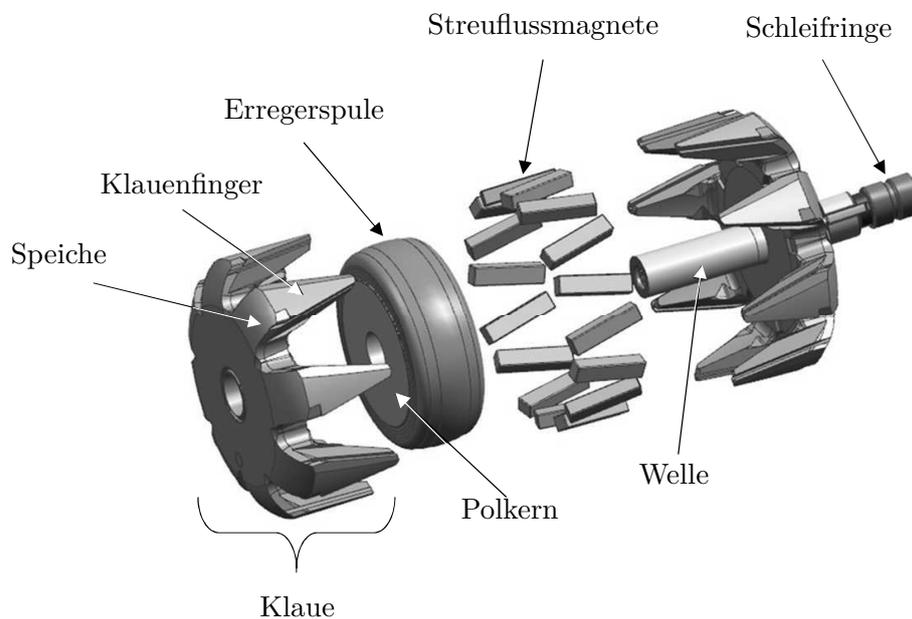


Abbildung 2.9.: Explosionszeichnung des Rotors einer hybriderregten Klauenpolmaschine

Die zwei Klauen bilden zusammen mit dem Polkern den flussführenden Pfad des Rotors, siehe Abbildung 2.10. Da der Streufluss zwischen den Klauenfingern hohe Werte annehmen kann, werden zwischen die Finger der Klauen Permanentmagnete, sog. Streuflussmagnete, gesetzt,

um diesem entgegen zu wirken. Mit den Permanentmagneten und der Erregerspule verfügt die Maschine über zwei Erregungsmöglichkeiten, weshalb die Maschine als hybriderregt bezeichnet wird.

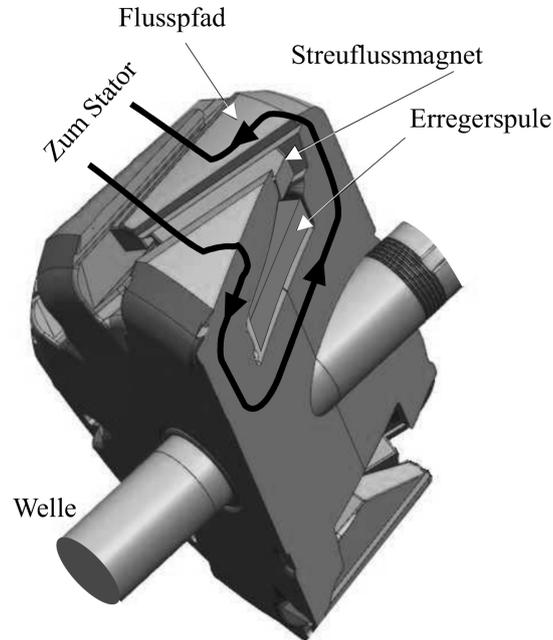


Abbildung 2.10.: Rotorfluss im Betrieb der Klauenpolmaschine

Der Stator besteht aus geblechtem Eisen. Die Wicklung ist bei dem untersuchten Typ der Maschine als Wellenwicklung in Einzugstechnik ausgeführt. Die Stränge des Stators sind im sog. Drudenfuß verschaltet. Dies zeigt die Abbildung 2.11.

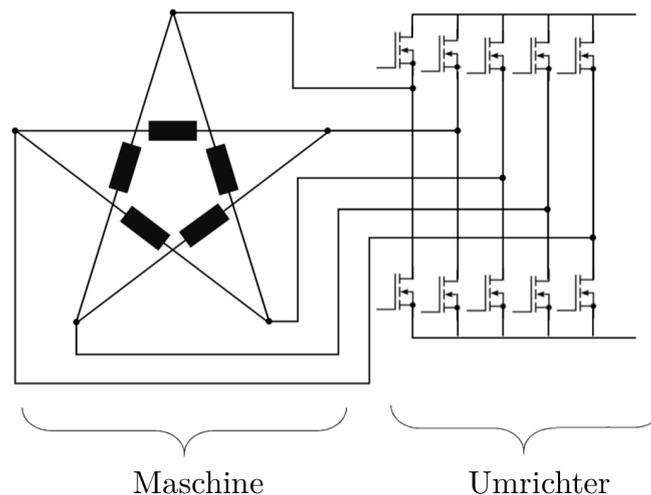


Abbildung 2.11.: Übersicht der Verschaltung des Umrichters und der elektrischen Maschine

Der Umrichter der Maschine besteht aus einer B10-Brücke, welche über eine Mikrocontroller-Logik angesteuert wird. Dabei variiert die Art der Ansteuerung von Pulsweitenmodulation (PWM) bei kleinen Drehzahlen bis hin zu einer Block-Ansteuerung bei hohen Drehzahlen. Die Umschaltung zwischen dem PWM-Betrieb und der Block-Ansteuerung ist fließend und erfolgt

im Bereich zwischen 3000 min^{-1} bis 4000 min^{-1} . Die Abbildung 2.12 zeigt schematisch die Art der Ansteuerung der elektrischen Maschine in Abhängigkeit der Drehzahl.

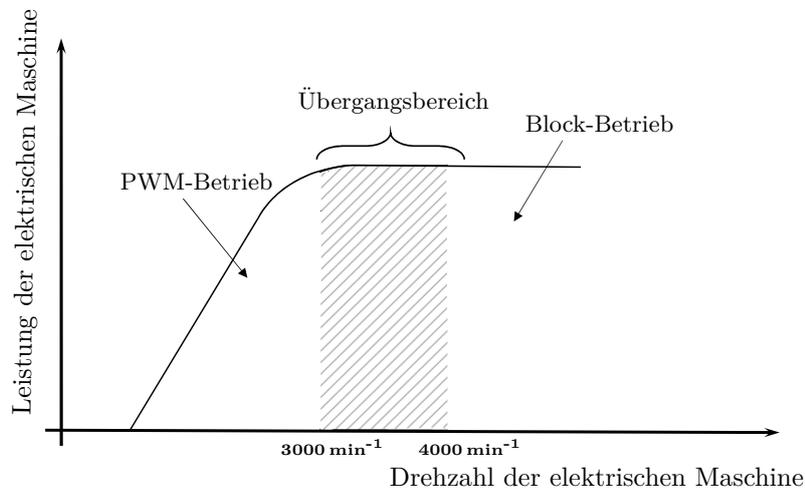


Abbildung 2.12.: Betriebsbereiche der elektrischen Maschine

2.3.1.2. Bauliche Vergrößerung der Klauenpolmaschine

Zur Variation der Bemessungsleistung muss das bauliche Volumen der Maschine geändert werden. Um zu verhindern, dass verschiedene flussführende Teile der Maschine während der Skalierung unterschiedliche Sättigungsverhältnisse erfahren, wird in dieser Arbeit die zentrische Streckung favorisiert. Des Weiteren wirkt diese Art der Streckung der Aufweitung von Klauenfingern bei hohen Drehzahlen entgegen. Für die zentrische Streckung ändern sich die Abmessungen der Maschine in Abhängigkeit eines Skalierungsfaktors k wie folgt:

- Längen $\sim k$
- Flächen $\sim k^2$
- Volumina $\sim k^3 = k_{vol}$

Aufgrund der Fahrzeugtopologie und massentauglicher Produktion müssen folgende Randbedingungen bei der Skalierung der Maschine eingehalten werden:

1. Für alle Baugrößen der Maschine kommt dieselbe elektronische Erregereinheit zur Bestromung der Erregerwicklung zum Einsatz.
2. Die elektrische Maschine ist mit einem starren Bordnetz von 48 Volt verbunden.
3. Der Luftspalt zwischen Rotor und Stator soll gleich bleiben unabhängig von der Skalierung der Maschine.
4. Für alle Baugrößen kommt das gleiche Ansteuerverfahren zum Einsatz. Dies bedeutet, dass die Ströme in der d- und q-Achse bei allen Baugrößen verhältnisgleich eingepreßt werden und sich lediglich in ihrer Amplitude unterscheiden.
5. Die Luftkühlung der Maschine und der Elektronik soll beibehalten werden.

Unter diesen Randbedingungen wird die Klauenpolmaschine im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

2.3.2. Berechnung des Betriebsverhaltens der Klauenpolmaschine

Die Berechnungsverfahren der Klauenpolmaschine gehen auf die Theorie der Schenkelpolmaschine zurück. Entsprechend der Schenkelpolmaschine wird das Betriebsverhalten anhand eines Zeigerdiagramms dargestellt [60], [61], [62], [63]. Aus diesem Verfahren erhält [60] akzeptable Ergebnisse, dennoch wird angemerkt, dass das Verfahren auf wesentlichen Annahmen beruht. Als Resultat reagiert das Verfahren nur minimal oder gar fehlerhaft auf geometrische Änderungen der Maschine. So wird beispielsweise die Form der Pole nicht exakt erfasst und kann im Betriebsverhalten nicht berücksichtigt werden [60].

Um die Polformen zu approximieren, können Reluktanznetzwerke eingesetzt werden. Auch Streuwege im Rotor lassen sich so nachbilden. Dennoch führt die Diskretisierung durch die einzelnen Reluktanzen immer zu einer limitierenden Aussage. Erschwerend kommt hinzu, dass die dreidimensionale Flussführung eine hohe Anzahl an Diskretisierungspunkten fordert [64], [65], [66]. Die hohe Anzahl an Diskretisierungspunkten führt zu einer hohen Komplexität des zu lösenden Gleichungssystems. Mit gewissen Zeitaufwendungen und Rechenressourcen lassen sich diese Probleme dennoch numerisch lösen. Als Folge sind numerische Verfahren weitverbreitet, um die Klauenpolmaschine zu berechnen. Grob lassen sich die numerischen Verfahren, neben den Reluktanznetzwerken, in die Methode der finiten Elemente und die Methode der finiten Differenzen gliedern. 1980 wurde begonnen, finite Differenzen einzusetzen, um dreidimensionale Berechnungen der Klauenpolmaschine durchzuführen.

Die Methode der finiten Elemente kommt ebenfalls zum Einsatz, so wurde dieses Verfahren 1990 in [67] bereits eingesetzt, um die Klauenpolmaschine zu berechnen. Die Methode der finiten Elemente hat sich als Stand der Technik durchgesetzt und wird typischerweise verwendet, um die Klauenpolmaschine zu simulieren und zu analysieren [68], [69], [70]. Leider sind solche Verfahren äußerst zeit- und ressourcenintensiv. So sind für die Berechnung eines Betriebspunktes einige Stunden oder bis zu einigen Tagen nötig.

Folglich sind solche Verfahren zu zeitaufwendig, um komplette Kennfelder zu generieren, welche in dieser Arbeit benötigt werden. Anstatt der numerischen Verfahren wird in dieser Arbeit eine Methode vorgestellt, welche es erlaubt, innerhalb von kurzer Zeit den Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Drehzahl und der Abgabeleistung zu generieren.

2.4. Untersuchte Szenarien

Die in dieser Arbeit dargestellte Methode wird exemplarisch an drei unterschiedlichen Fahrzeugklassen durchlaufen. Dies soll der Einschätzung von Größenverhältnissen und der Erkennung von Trends dienen. Es wird ein Kleinwagen (Subcompact, SComp), ein Mittelklassewagen (Compact) und ein Sport Utility Vehicle (SUV) untersucht. Um Ausstattungsmerkmale in die Untersuchung einfließen zu lassen, werden die Fahrzeuge mit einer hohen und niedrigen elektrischen Bordnetzlast analysiert. Details hierzu zeigen die Tabellen 2.1 und 2.2.

Eine objektive Bewertung des CO₂-Ausstoßes eines Fahrzeugs gelingt nur, wenn standardisierte Rahmenbedingungen geschaffen werden. So existiert eine große Vielfalt an Testprozeduren, in welchen Geschwindigkeitszeitprofile definiert sind. Ein gängiges Geschwindigkeitsprofil zeigt der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ), siehe Abbildung 2.13 a) [71]. Der NEFZ besteht aus Abschnitten geradliniger Geschwindigkeitsan- oder abstiege, was gleichbedeutend mit konstanten Beschleunigungen ist. Als Folge hieraus ergibt sich eine geringe Anzahl an Betriebspunkten oder Betriebslinien, welche auf die Komponenten des Systems einwirken. Des Weiteren besteht der

	Formelzeichen	Einheit	SComp	Compact	SUV
Fahrzeugmasse	m_{Fzg}	kg	900	1550	2200
Strömungswiderstandskoeffizient	$c_w \cdot A_{Fzg}$	m ²	0,68	0,66	1,0
Reibkoeffizient der Reifen	μ_{Reib}	-	0,0075	0,008	0,011
Schleppleistung der VKM	$P_{Schlepp}$	W	1250	2000	3550
Übersetzung des Differentials	i_{Dif}	-	3,95	4,26	3,64
Getriebeübersetzung:	i_{Gang}	-			
1er Gang	-	-	5,34	3,62	3,72
2er Gang	-	-	2,56	1,95	2,41
3er Gang	-	-	1,68	1,28	1,78
4er Gang	-	-	1,25	0,97	1,41
5er Gang	-	-	1,00	0,78	1,17
6er Gang	-	-	-	0,65	1,00
7er Gang	-	-	-	-	0,87
8er Gang	-	-	-	-	0,53
Radius des Rads	r_{Rad}	m	0,282	0,3065	0,354

Tabelle 2.1.: Fahrzeugspezifische Parameter

	Formelzeichen	Einheit	Wert
Luftdichte	ρ_{Luft}	kg/m ³	1,2
Erdbeschleunigung	g	m/s ²	9,81
Equi. Faktor zwischen l/100 km und CO ₂ -Ausstoß	U_b	g CO ₂ /l	2320
Heizwert des Kraftstoffs	H	J/kg	43,5·10 ⁶
Dichte des Kraftstoffs	ρ	kg/l	0,76
Riemenübersetzung	i_{Riem}	-	3
Stillstandsrehzahl	n_{Still}	min ⁻¹	750
Batteriewirkungsgrad	η_{Batt}	-	0,93
Riemenwirkungsgrad	η_{Riemen}	-	0,95
Differentialwirkungsgrad	η_{Dif}	-	0,90
Maschinenwirkungsgrad	η_{Masch}	-	0,85
Differentieller Wirkungsgrad der VKM	$\eta_{VKM,diff}$	-	0,42

Tabelle 2.2.: Allgemeine Parameter der Fahrzeuge und der Umgebung

NEFZ aus einem städtischen Teil, welcher durch moderate Geschwindigkeiten und Beschleunigungen gekennzeichnet ist. Dieser wird viermal hintereinander durchlaufen. Im Anschluss folgt der Überland- bzw. Autobahnteil. Es ergibt sich eine gesamte Länge des Fahrzyklus von ca. 11 km. Weitere Kenndaten sind in Tabelle 2.3 aufgelistet. Ein weiteres Geschwindigkeitsprofil richtet sich nach dem Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle (WLTC), in Version 5 zeigt dies die Abbildung 2.13 b [72].

Bei der Erstellung des WLTC wurden Messungen realer Fahrzyklen zugrunde gelegt. Entsprechend existieren keine Phasen konstanter Beschleunigung mehr.⁵ Auch die maximale Geschwin-

⁵Ausgenommen Stillstandsphasen

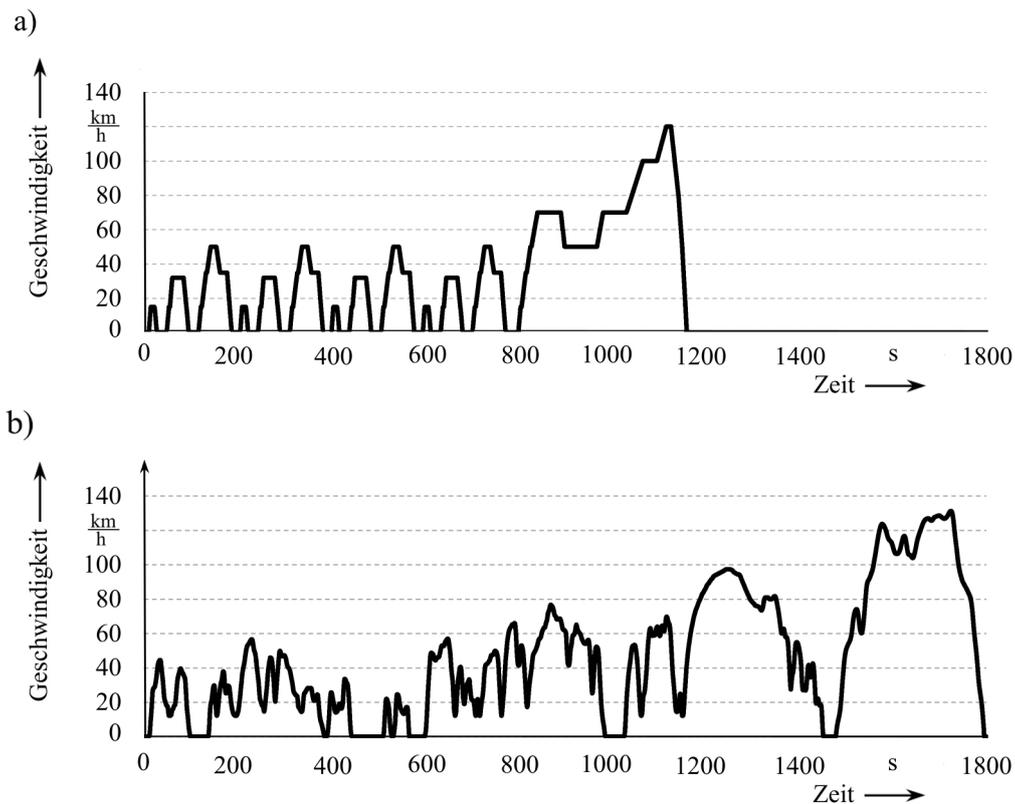


Abbildung 2.13.: Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ) a) und Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle (WLTC) b)

	Einheit	WLTC	NEFZ
Strecke	m	23266	11024
Zyklusdauer	s	1800	1180
Max. Geschwindigkeit	km/h	131	120
Duchschnittsgeschwindigkeit	km/h	46,53	33,4
Max. Beschleunigung	m/s ²	1,67	1,04
Max. Verzögerung	m/s ²	1,50	1,39

Tabelle 2.3.: Übersicht der Kenndaten der untersuchten Fahrzyklen

digkeit und die maximale Beschleunigung wurden im Vergleich mit dem NEFZ erhöht. Dies führt zu einem höheren Energiebedarf, um den Zyklus zu bewältigen. Ähnlich dem NEFZ setzt sich auch der WLTC aus Teilen zusammen. Es werden die Geschwindigkeitsteile Low, Medium, High und extra High unterschieden.

Nachdem in diesem Kapitel die Randbedingungen und Grundlagen der Arbeit dargestellt wurden, kann nun das Mildhybridfahrzeug betrachtet werden. Entsprechend der Abbildung 1.5 wird mit der energetischen Analyse des Triebstrangs begonnen.

3. Energetische Betrachtung des Triebstrangs

Die energetische Analyse des Triebstrangs bildet einen zentralen Punkt in dieser Arbeit. Eine Vielzahl an Informationen lässt sich durch diese gewinnen. Ersichtlich wird dies durch die vielen Kopplungen in andere Bereiche, vgl. Abbildung 1.5.

3.1. Darstellung der grundlegenden Idee

Um eine Methode mit der in Abbildung 1.3 dargestellten Auflösung zu realisieren, wird auf die Berechnung von Absolutwerten verzichtet. Stattdessen wird immer auf eine Basismaschine bezogen, welche dem energetischen Optimum nahe kommt. Wird im Allgemeinen die elektrische Maschine vergrößert, führt dies im ersten Moment zu einer Reduktion des CO₂-Ausstoßes. Bei einer übermäßigen Vergrößerung zeigt sich aber ein Mehrausstoß an CO₂, siehe Abbildung 3.1.

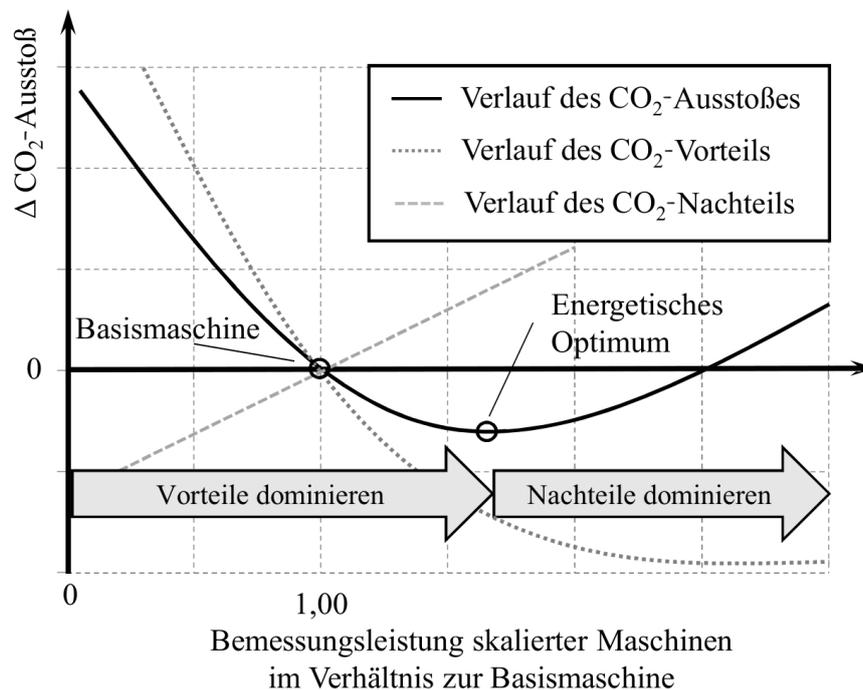


Abbildung 3.1.: Grundidee zur Berechnung des energetischen Optimums

Der Vorteil einer größeren Maschine liegt in der gesteigerten Bemessungsleistung, welche es ermöglicht, mehr Energie aus den Verzögerungsphasen zu rekuperieren.⁶ Der CO₂-Vorteil aufgrund einer Vergrößerung der elektrischen Maschine weist deshalb einen asymptotischen Verlauf auf, siehe Abbildung 3.1. CO₂-Nachteile sind hingegen auf wachsende Schleppverluste, zunehmendes Gewicht sowie steigende Massenträgheit bei Vergrößerung der Maschine zurückzuführen.

⁶Bei kleinen Maschinen muss die überschüssige Energie in den Bremsen des Fahrzeugs dissipiert werden.

3. Energetische Betrachtung des Triebstrangs

Der Verlauf des CO₂-Ausstoßes ergibt sich aus der Addition der energetischen Vor- bzw. Nachteile. Im Detail zeigt dies die Gleichung (3.1).

$$\Delta \text{CO}_2 \sim \Delta E = E_{Reku} + E_{Trägheit} + E_{Vortrieb} + E_{Schlepp} \quad (3.1)$$

Der ΔCO_2 -Ausstoß und die Änderung der Energie ΔE stehen dabei in gegenseitiger Proportionalität und können entsprechend linear ineinander umgerechnet werden. Ermöglicht wird dies durch die sog. Willans-Linien bzw. durch den differentiellen Wirkungsgrad der VKM, da lediglich Änderungen gegenüber der Basismaschine aufgezeigt werden, siehe Gleichung (3.2).

$$\Delta \text{CO}_2 = \frac{\Delta E \cdot U_b}{H \cdot \rho \cdot \eta_{VKM,diff}} \quad (3.2)$$

Die in Gleichung (3.1) dargestellten Energieanteile $E_{Trägheit}$, $E_{Vortrieb}$ und $E_{Schlepp}$ sind nachteilig für den CO₂-Ausstoß. Wobei diese Energieanteile die steigende Massenträgheit, das zusätzliche Gewicht und die höheren Schleppverluste einer vergrößerten elektrischen Maschine berücksichtigen.

Hingegen stellt E_{Reku} den vorteilhaften Energieanteil dar. Dieser berücksichtigt die rekuperierbare Energie, die von der Bemessungsleistung der elektrischen Maschine abhängt.

Bevor die Analyse der Energieanteile in Gleichung (3.1) beginnt, wird als erstes die Bemessungsleistung der Basismaschine benötigt. Um im Folgenden analytisch vorgehen zu können, werden die folgenden Prämissen, Definitionen und Vereinfachungen getroffen:

1. Die Leistung der elektrischen Maschine ist über den gesamten Drehzahlbereich konstant.
2. Für alle Komponenten im Triebstrang wird jeweils ein konstanter Wirkungsgrad bzw. Nutzungsgrad angenommen.
3. Des Weiteren wird die Batterie als ausreichend groß angenommen, um die gesamte Energie aus den Rekuperationsphasen speichern zu können.
4. In den Rekuperationsphasen wird die Einspritzung von Kraftstoff in die VKM gestoppt. Es kommt zum Schleppen der VKM.
5. In Kapitel 4 wird gezeigt, dass sich die Leistung der elektrischen Maschine auch unter produktionstechnischen Aspekten proportional zu ihrer Baugröße verhält. (Kopplungsweg 1 in Abbildung 1.5)
6. Energie, welche die VKM aufbringen muss, wird positiv gezählt.
7. Rekuperationsphasen treten immer ein, wenn in einem Zeitschritt i die Energie am Rad des Fahrzeugs negativ ist ($E_{Rad} < 0$).
8. Für eine energetische Betrachtung kann das Bordnetz aus zwei Spannungslagen zusammengefasst und durch eine konzentrierte Last sowie eine einzige Batterie dargestellt werden, siehe Abbildung 3.2.

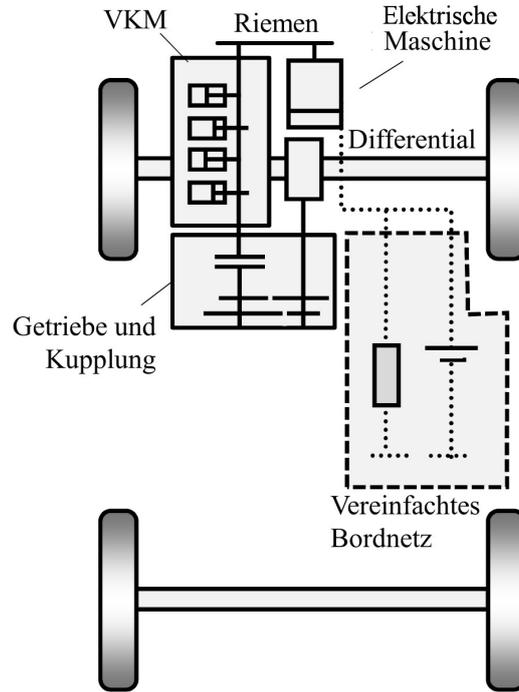


Abbildung 3.2.: Topologie des Mildhybridfahrzeugs mit vereinfachtem Bordnetz

3.2. Bemessungsleistung der Basismaschine

Das wichtigste Merkmal der Basismaschine ist ihre Bemessungsleistung. Zur Berechnung dieser ist es notwendig, zwischen dem Energiefluss innerhalb und außerhalb des Fahrzeugs zu unterscheiden. Dabei stellt die Energie am Rad $E_{Rad,i}$ die entsprechende Trennung her.

3.2.1. Energiefluss außerhalb des Fahrzeugs

Außerhalb des Fahrzeugs wirken die Energieanteile der Rollreibung der Reifen E_{Roll} , der Energieanteil der Luftreibung E_{cw} und der Energieanteil aus der Geschwindigkeit des Fahrzeugs E_{Kin} . Der Energieumsatz am Rad in jedem Zeitschritt i des Fahrzeugs ergibt sich zu Gleichung (3.3).

$$E_{Rad,i} = E_{Kin,i} + E_{Roll,i} + E_{cw,i} \quad (3.3)$$

Die kinetische Energie aus der Geschwindigkeit des Fahrzeugs in jedem Zeitschritt i zeigt die Gleichung (3.4).

$$E_{Kin,i} = \frac{1}{2} \cdot m_{Fzg} \cdot (v_{i+1}^2 - v_i^2) \quad (3.4)$$

Hierbei gibt m_{Fzg} die Masse des Fahrzeugs sowie v_i und v_{i+1} die Geschwindigkeit im jeweiligen Zeitschritt an. Der Energieanteil der Rollreibung ergibt sich zu Gleichung (3.5).

3. Energetische Betrachtung des Triebstrangs

$$E_{Roll,i} = m_{Fzg} \cdot g \cdot \mu_{Reib} \cdot (s_{i+1} - s_i) \quad (3.5)$$

Hierin ist g die Erdbeschleunigung, μ_{Reib} der Reibkoeffizient der Reifen, m_{Fzg} die Masse des Fahrzeugs und $(s_{i+1} - s_i)$ die Differenz der Strecke, welche im jeweiligen Zeitschritt zurückgelegt wurde.

Die Energie $E_{cw,i}$, welche aufgrund von Luftreibung auftritt, zeigt die Gleichung (3.6).

$$E_{cw,i} = \frac{1}{2} \cdot A_{Fzg} \cdot c_w \cdot \rho_{Luft} \cdot v_i^2 \cdot (s_{i+1} - s_i) \quad (3.6)$$

Anmerkung: Die beiden Energieanteile in den Gleichungen (3.5) und (3.6) werden positiv gezählt, da die VKM Energie liefern muss, um diese zu überwinden, vgl. Punkt 7 auf Seite 24. Die kinetische Energie aus Gleichung (3.4) wird in Rekuperationsphasen ($v_{i+1} < v_i$) hingegen negativ gezählt, somit gilt in Rekuperationsphasen $E_{Rad,i} < 0$.

3.2.2. Energiefluss im Inneren des Fahrzeugs während der Rekuperationsphase

Zur Bestimmung der Bemessungsleistung der Basismaschine wird der Energiefluss im Fahrzeuginneren während der Rekuperationsphase betrachtet, d.h. wenn $E_{Rad,i} < 0$ erfüllt ist, siehe Abbildung 3.3. Bei der Analyse dieser Nutzungsgradkette spielt die Bemessungsleistung $P_{max,el}$ der elektrischen Maschine eine große Rolle. Dies bedeutet, dass die Energie $E_{Reku'}$, welche ins Bordnetz gelangt, in hohem Maße von der Bemessungsleistung der elektrischen Maschine abhängt. Es ergibt sich die Abhängigkeit: $E_{Reku'}(P_{max,el})$. Dies wird im nächsten Abschnitt genauer analysiert.

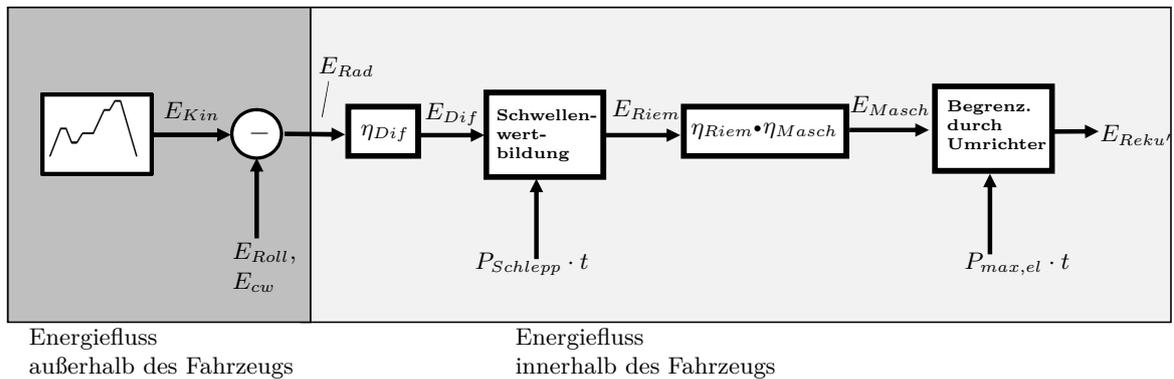


Abbildung 3.3.: Übersicht des Energieflusses während einer Rekuperationsphase

Vom Fahrzeugäußeren gelangt die Energie an das Rad des Fahrzeugs, wo sie mit dem Nutzungsgrad des Differentials multipliziert zur VKM gelangt, siehe Gleichung (3.7).

$$E_{Dif,i} = E_{Rad,i} \cdot \eta_{Dif} \quad \forall \quad E_{Rad,i} < 0 \quad (3.7)$$

Die VKM führt aufgrund der abgeschalteten Kraftstoffeinspritzung zu einer Schwelle im Energiefluss, welche überwunden werden muss. Diese wirkt sich in jedem Zeitschritt als Schleppleistung aus. Die Differenz zwischen Schleppleistung und Leistung im Zeitschritt i gelangt an

den Riemen. Es ergibt sich die Gleichung (3.8), wobei $P_{Schlepp}$ die Schleppleistung der VKM darstellt.

$$E_{Riem,i} = \begin{cases} E_{Dif} - P_{Schlepp} \cdot (t_{i+1} - t_i), & \forall i \in E_{Dif,i}(t_{i+1} - t_i) > E_{Schlepp}(t_{i+1} - t_i) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.8)$$

Die so erhaltene Energie $E_{Riem,i}$ vor dem Riemen ergibt multipliziert mit dem Riemennutzungsgrad η_{Riem} und dem Maschinennutzungsgrad η_{Masch} die Energie, welche die Maschine an den Umrichter abgibt, siehe Gleichung (3.9).

$$E_{Masch,i} = E_{Riem,i} \cdot \eta_{Riem} \cdot \eta_{Masch} \quad (3.9)$$

Der Umrichter begrenzt die Leistung aufgrund seiner thermischen Grenzen und definiert somit die Bemessungsleistung $P_{max,el}$. Die Leistung $P_{Reku'}$, welche ins Bordnetz gelangt, ergibt sich für jeden Zeitschritt aus der Gleichung (3.10).

$$P_{Reku',i} = \frac{\min \{E_{Masch,i}, P_{max,el,i} \cdot (t_{i+1} - t_i)\}}{t_{i+1} - t_i} \quad (3.10)$$

Die Abbildung 3.4 zeigt den zeitlichen Verlauf der Leistung $P_{Reku'}$ für eine elektrische Maschine mit einer Bemessungsleistung von $P_{max,el} = 6 \text{ kW}$. Das Geschwindigkeitsprofil in Abbildung 3.4 entspricht den ersten 40 Sekunden des WLTC. In Verzögerungsphasen des Fahrzyklus kann Energie rekuperiert werden, was zum Ansteigen der Leistung $P_{Reku'}$ führt. Ab einer Leistung von 6 kW zeigt sich die eingebrachte Grenze der Bemessungsleistung aus Gleichung (3.10).

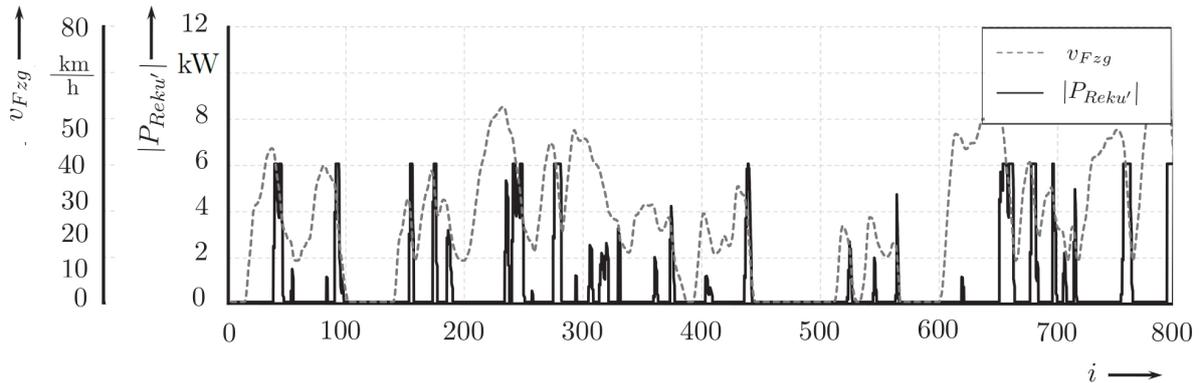


Abbildung 3.4.: Übersicht der Energieflüsse während einer Rekuperationsphase

Die rekuperierte Energie über dem kompletten Fahrzyklus berechnet sich aus der Summe aller Energieportionen der Zeitschritte i , siehe Gleichung (3.11).

$$E_{Reku'} = \sum_{i=0}^{i_{Ende}} \min \{E_{Masch,i}, P_{max,el,i} \cdot (t_{i+1} - t_i)\} \quad (3.11)$$

Wird die rekuperierbare Energie $E_{Reku'}$ über die Bemessungsleistung $P_{max,el}$ aufgetragen, ergibt sich die Abbildung 3.5 a) für den NEFZ und Abbildung 3.5 b) für den WLTC. Des Weiteren wurde diese Abhängigkeit für alle drei Fahrzeugklassen dargestellt.

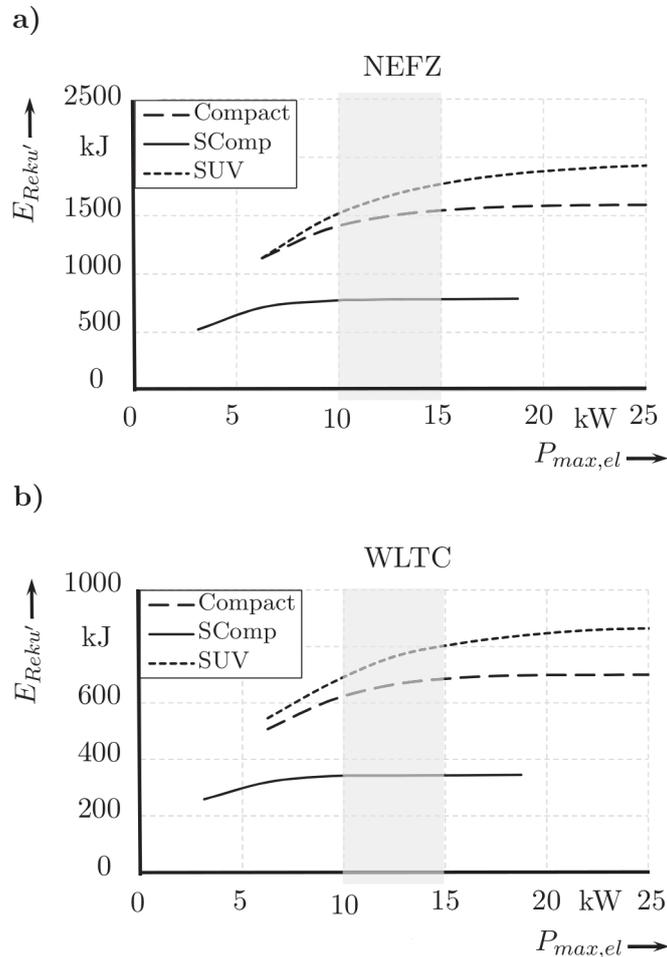


Abbildung 3.5.: Rekuperierbare elektrische Energie in Abhängigkeit der Bemessungsleistung der elektrischen Maschine für den NEFZ a) und für den WLTC b)

Die Kurven zeigen mit zunehmender Bemessungsleistung $P_{max,el}$ ein Abflachen der rekuperierten Energie. Im Falle des SComp-Fahrzeugs führt eine weitere Erhöhung der Bemessungsleistung des Antriebs ab ca. 7 kW zu keinem nennenswerten Anstieg der rekuperierbaren Energie. Beim Compact-Fahrzeug und beim SUV tritt das Abflachen des Verlaufs deutlich später ein, entsprechend ermöglicht eine elektrische Maschine mit höherer Bemessungsleistung auch eine weitere Erhöhung der rekuperierbaren Energie. Eine Bemessungsleistung von 10 kW bis 15 kW eignet sich für alle Fahrzeugklassen und für beide Fahrzyklen (grauer Bereich in Abbildung 3.5). Aus diesem Grund wird eine Basismaschine mit einer Bemessungsleistung von 12,5 kW gewählt.

3.3. Berechnung der Energieanteile

Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, müssen alle Energieanteile in Abhängigkeit der Größe der elektrischen Maschine und in Relation zur Basismaschine berechnet werden. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Energieanteile analytisch beschrieben.

3.3.1. Energie aus Rekuperationsphasen des Fahrzeugs

Während der Bremsphasen des Fahrzeugs kann Energie in das Bordnetz geleitet werden. Diese Energie kann einerseits genutzt werden, um die VKM in Beschleunigungsphasen zu unterstützen. Andererseits kann die Energie eingesetzt werden, um den Energiebedarf hoher Bordnetzlasten zu decken. Die Rekuperationsphasen des Fahrzeugs wurden bereits in den Gleichungen (3.4) bis (3.11) beschrieben. Hierbei wurde bewusst darauf verzichtet, sekundäre Effekte der Maschinenskalisierung zu betrachten.

Um Skalierungseffekte auflösen zu können, muss der Gleichungssatz des letzten Abschnitts erweitert werden. Wird die Maschine in ihrer Bemessungsleistung variiert, ändert sich ihr Volumen proportional, siehe Kapitel 4 bzw. Kopplungsweg 1 in Abbildung 1.5. Die damit einhergehende Vergrößerung beeinflusst z.B. wiederum die Masse der Maschine, was sich auf die Energieanteile auswirkt. Aus diesem Grund hängt die Masse des kompletten Fahrzeugs m vom Skalierungsfaktor k_{vol} der elektrischen Maschine ab. Es ergibt sich hieraus die Änderung des Gewichts des Fahrzeugs nach Gleichung (3.12).

$$m(k_{vol}) = m_{Fzg} + (k_{vol} - 1) \cdot m_{Masch} \quad (3.12)$$

Hierin ist m_{Fzg} die Masse des Fahrzeugs mit dem Gewicht der Basismaschine. Der zweite Term gibt die Änderung des Fahrzeuggewichts aufgrund der Maschinengröße an. Wird der Zusammenhang in Gleichung (3.12) in die vorangegangenen Gleichungen eingesetzt, werden diese vom Skalierungsfaktor k_{vol} der elektrischen Maschine abhängig.⁷

Während den Rekuperationsphasen wird eine hohe Energiemenge in kurzer Zeit in das Bordnetz geleitet. Der größte Teil dieser Energie wird vorübergehend in der Batterie gespeichert, bevor sie später zur Deckung der Bordnetzlast oder zur Unterstützung der VKM verwendet wird. Aus diesem Grund wird der Batterienutzungsgrad quadratisch in Gleichung (3.13) gewichtet.

$$E_{Batt}(k_{vol}) = \eta_{Batt}^2 \cdot E_{Reku}(k_{vol}) \quad (3.13)$$

3.3.1.1. Fall 1: $|E_{Batt}(k_{vol})| < E_{Last}$

Ist der Energiebedarf der Bordnetzlast größer als die Energie E_{Batt} , ergibt sich der Fall, dass der VKM Energie entnommen werden muss, um den Energiebedarf der Bordnetzlast zu decken. Es gilt der Fall 1 in Gleichung (3.14).

3.3.1.2. Fall 2: $|E_{Batt}(k_{vol})| > E_{Last}$

Für den Fall, dass E_{Batt} größer ist als die für die Bordnetzlast benötigte Energie E_{Last} , wird die überschüssige Energie genutzt, um die VKM zu unterstützen. Es gilt Fall 2 in Gleichung (3.14).

⁷Ausgenommen Gleichung (3.6)

$$E_{Reku}(k_{vol}) = \begin{cases} \frac{E_{Last} - |E_{Batt}(k_{vol})|}{\eta_{Riem} \cdot \eta_{Masch}}, & \text{für Fall 1: } E_{Last} > |E_{Reku}(k_{vol})| \\ (E_{Last} - |E_{Batt}(k_{vol})|) \cdot \eta_{Riem} \cdot \eta_{Masch}, & \text{für Fall 2: } E_{Last} < |E_{Reku}(k_{vol})| \end{cases} \quad (3.14)$$

Anmerkung: Im Fall 2 gilt $E_{Last} < |E_{Reku}(k_{vol})|$. Dies bedeutet, dass Energie im Bordnetz zur Verfügung steht, um die VKM zu unterstützen. Folglich wirkt sich der Energieaufwand, welcher sich aus der Differenz zwischen E_{Last} und $|E_{Batt}|$ multipliziert mit dem Nutzungsgrad des Riemens und der Maschine zusammensetzt, positiv auf den CO₂-Ausstoß aus. Tritt der Fall 1 ($E_{Last} > |E_{Reku}(k_{vol})|$) auf, muss der VKM Energie entnommen werden, um den Energiebedarf der Bordnetzlast zu decken. Die Differenz zwischen E_{Last} und $|E_{Batt}|$ wird durch den Riemennutzungsgrad und den Nutzungsgrad der Maschine dividiert.

Nachdem der Energieanteil E_{Reku} berechnet wurde, wird nun der Energieanteil analysiert, welcher zum Vortrieb des Fahrzeugs aufgrund der Maschinenskalierung nötig ist.

3.3.2. Energie zum Antrieb des Fahrzeugs ($E_{Vortrieb}$)

Die Energie $E_{Rad,i}$ zeigt an, ob im Zeitschritt i eine Energiemenge über das Rad abgegeben oder aufgenommen wird. Ist $E_{Rad,i}$ negativ, gelangt Energie über das Rad nach innen (Rekuperationsphase). Nimmt $E_{Rad,i}$ einen positiven Wert an, muss Energie zum Vortrieb des Fahrzeugs aufgebracht werden. Hieraus ergibt sich der Zusammenhang in Gleichung (3.15) für den Vortrieb des Fahrzeugs.

$$E_{Vortrieb}(k_{vol}) = \frac{1}{\eta_{Dif}} \sum_{i=0}^{i_{Ende}} E_{Rad,i}(k_{vol}) \quad i \in E_{Rad,i}(k_{vol}) > 0 \quad (3.15)$$

Es ist zu beachten, dass die Energie $E_{Vortrieb}$ positiv gezählt wird, da die VKM Energie zur Verfügung stellen muss.

3.3.3. Berücksichtigung der Massenträgheit des Rotors der Maschine ($E_{Trägheit}$)

Der Rotor der Maschine muss aufgrund seiner permanenten Anbindung an die VKM entsprechend des Geschwindigkeitsprofils des Fahrzyklus beschleunigt und verzögert werden. Die Energie, welche benötigt wird, um den Rotor zu beschleunigen, stellt die VKM über den verlustbehafteten Riemen zur Verfügung. Verringert sich die Drehzahl des Rotors, kann die Energie aus der Rotation verlustbehaftet zurückgewonnen werden.

Betrachtet man das beispielhafte Geschwindigkeitsprofil in Abbildung 3.6 erkennt man während der Beschleunigungsphasen, dass sich die Winkelgeschwindigkeit des Rotors der elektrischen Maschine, ausgenommen den Schaltvorgängen, verhältnismäßig mit der Geschwindigkeit des Fahrzeugs erhöht. Während des Vorgangs wird Energie in den Rotor eingebracht (E_{rot1}).

Kommt es zu einem Schaltvorgang in einen höheren Gang des Getriebes, bricht die Drehzahl schlagartig ein und verläuft auf niedrigerem Niveau weiter. Es dissipiert die Energie $E_{v,auf}$. Wird hingegen in einen kleineren Gang geschaltet dissipiert die Energie $E_{v,ab}$.

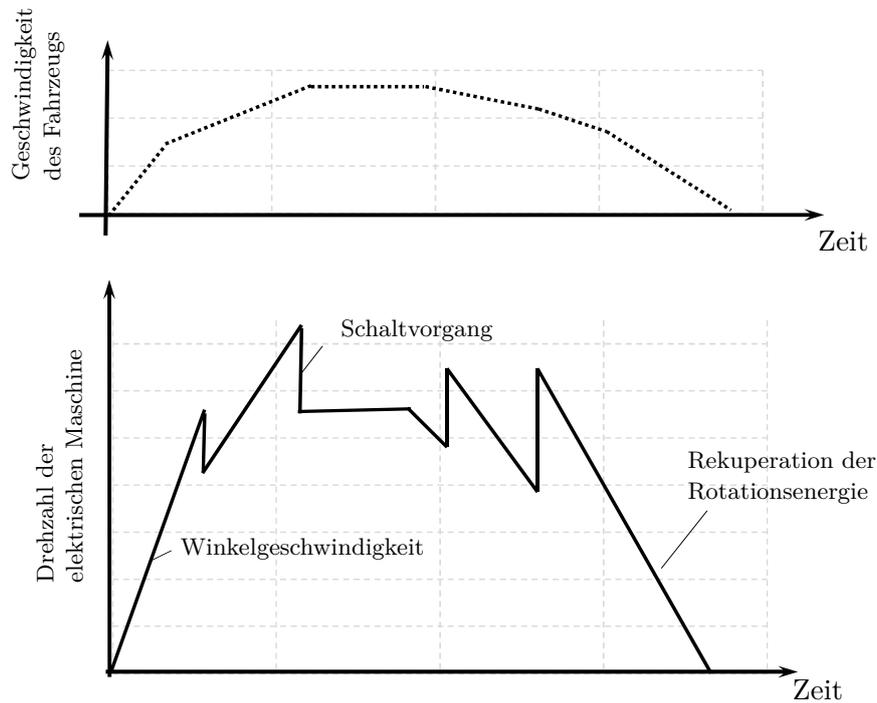


Abbildung 3.6.: Beispielhaftes Geschwindigkeitsprofil mit Drehzahl der elektrischen Maschine

Betrachtet man das Abbremsen am Ende des Geschwindigkeitsprofils, nimmt die Winkelgeschwindigkeit der Maschine und somit auch die gespeicherte Energie im Rotor ab. Während dieses Vorgangs kann verlustbehaftete Energie zurück in das Bordnetz geführt werden, welche zuvor durch Beschleunigung in die rotierende Masse gesteckt wurde (E_{rot2}).

Zusammengefasst ergeben sich die drei Energieanteile:

- E_{rot1} aufgrund der Beschleunigung des Rotors der Maschine.
- E_{rot2} durch die Rekuperation der Rotationsenergie.
- Durch die Schaltvorgänge ergeben sich die Energieanteile $E_{v,auf}$ und $E_{v,ab}$, welche neben dem Skalierungsfaktor k_{vol} von den Getriebeübersetzungen $i_{Gang,i}$ und $i_{Gang,i+1}$ abhängen.

Folglich gilt die Gleichung (3.16) zur Berechnung des Energieanteils $E_{Trägheit}$.

$$E_{Trägheit}(k_{vol}, i_{Gang,i}, i_{Gang,i+1}) = E_{rot1}(k_{vol}) + E_{rot2}(k_{vol}) + E_{v,ab}(k_{vol}, i_{Gang,i}, i_{Gang,i+1}) + E_{v,auf}(k_{vol}, i_{Gang,i}, i_{Gang,i+1}) \quad (3.16)$$

Bevor diese einzelnen Energieanteile nach Gleichung (3.16) berechnet werden, wird dargestellt, wie sich das Massenträgheitsmoment des Rotors und dessen Drehgeschwindigkeit auf die Rotationsenergie auswirken.

3.3.3.1. Allgemeine Abhängigkeiten

Im Allgemeinen hängt die rotatorische Energie E_{rot} eines zylinderförmigen Körpers vom Quadrat der Winkelgeschwindigkeit ω und dem Trägheitsmoment J ab, siehe Gleichung (3.17).

$$E_{rot}(k_{vol}) = \frac{1}{2} \cdot J_{Masch}(k_{vol}) \cdot \omega_{Masch}^2 \quad (3.17)$$

Das Massenträgheitsmoment ist von der Maschinengröße abhängig, es ergibt sich die Gleichung (3.18). Hierin stellt m_{Rot} die Masse des Rotors, D_{Rot} den Durchmesser des Rotors und k den Skalierungsfaktor dar.

$$J_{Masch}(k_{vol}) \sim \frac{m_{Rot}}{2} \cdot \left(\frac{D_{Rot}}{2}\right)^2 \sim k^3 \cdot k^2 \sim k^5 \quad (3.18)$$

3.3.3.2. Verlust beim Beschleunigen und Abbremsen des Rotors

Die Energie, welche durch die Drehzahlerhöhung aufgewendet werden muss, wird direkt von der VKM über den Riemen zur elektrischen Maschine transportiert. Es ergibt sich während einer Beschleunigungsphase der Zusammenhang in Gleichung (3.19). Hierin ist $E_{VKM,rot}$ die Energie, welche die VKM über den Riemen zur Beschleunigung des Rotors aufbringen muss. Die Energie E'_{rot} bezeichnet die im Rotor gespeicherte Energie. Die Differenz beider ergibt den gesuchten Energieanteil E_{rot1} .

$$\begin{aligned} E_{rot1}(k_{vol}) &= E_{VKM,rot}(k_{vol}) - E'_{rot}(k_{vol}) \\ \implies E_{rot1}(k_{vol}) &= \frac{1}{\eta_{Riem}} \cdot E'_{rot}(k_{vol}) - E'_{rot}(k_{vol}) \\ \implies E_{rot1}(k_{vol}) &= E'_{rot}(k_{vol}) \cdot \left(\frac{1}{\eta_{Riem}} - 1\right) \\ \implies E_{rot1}(k_{vol}) &= \frac{1}{2} \cdot J_{Masch}(k_{vol}) \cdot \left(\frac{1}{\eta_{Riem}} - 1\right) \cdot \omega^2 \end{aligned} \quad (3.19)$$

Für den gesamten Energieanteil ergibt sich die Gleichung (3.20).

$$\begin{aligned} E_{rot1}(k_{vol}) &= \frac{1}{2} \cdot J_{Masch}(k_{vol}) \cdot \left(\frac{1}{\eta_{Riem}} - 1\right) \sum_{i=0}^{i_{Ende}} (\omega_{i+1}^2 - \omega_i^2) \\ \forall i \in \omega_{i+1} > \omega_i \cap i_{Gang,i+1} &= i_{Gang,i} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Dieser Zusammenhang gilt nur in Beschleunigungsphasen und berücksichtigt keine Schaltvorgänge des Getriebes, vgl. Abbildung 3.7. Beim Verzögern des Fahrzeugs kann die gespeicherte Rotationsenergie im Rotor zurück in das Bordnetz gespeist werden, siehe Abbildung 3.8. Der Maschinennutzungsgrad geht dabei einfach und der Batterienutzungsgrad im Quadrat in die Gleichung (3.21) ein.

$$\begin{aligned} E_{rot2}(k_{vol}) &= \frac{1}{2} \cdot J_{Masch}(k_{vol}) \cdot \left(1 - \eta_{Masch} \cdot \eta_{Batt}^2\right) \sum_{i=0}^{i_{Ende}} (\omega_{i+1}^2 - \omega_i^2) \\ \forall i \in \omega_{i+1} < \omega_i \cup i_{Gang,i+1} &= i_{Gang,i} \end{aligned} \quad (3.21)$$

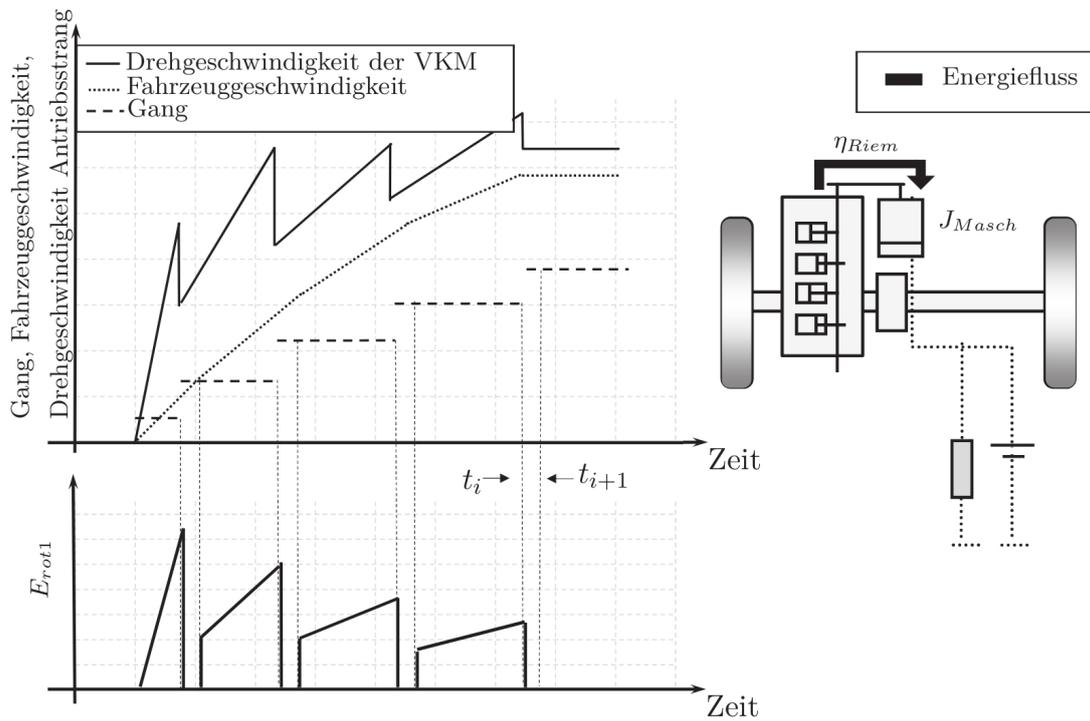


Abbildung 3.7.: Übersicht des Energieflusses beim Beschleunigen des Fahrzeugs und dessen Einfluss auf den Energieanteil E_{rot1}

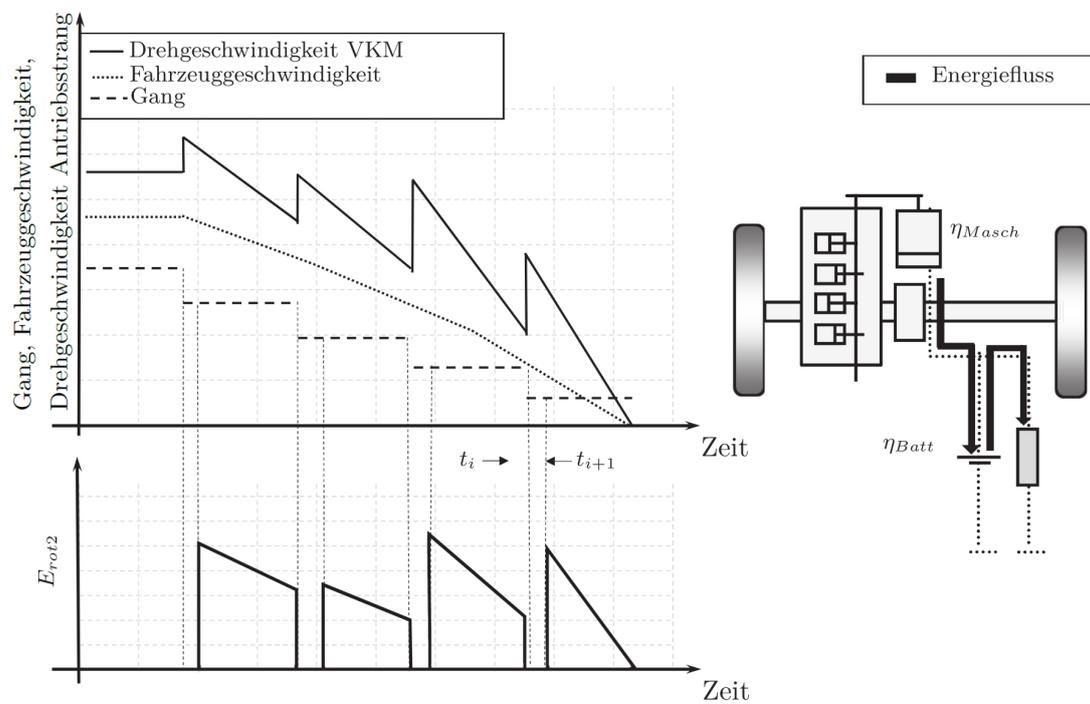


Abbildung 3.8.: Übersicht des Energieflusses beim Verzögern des Fahrzeugs und dessen Einfluss auf den Energieanteil E_{rot2}

3.3.3.3. Verluste aufgrund von Schaltvorgängen des Getriebes

Während eines Schaltvorgangs wird die Kupplung geöffnet und das Übersetzungsverhältnis zwischen Rad und VKM geändert. Beim Schließen der Kupplung treffen zwei rotierende Massen aufeinander, was zu Verlusten führt.

Um die Analyse des Schaltvorgangs zu erlauben, wird die Kupplung in zwei Hälften geteilt. Es wird eine Antriebs- und eine Abtriebsseite nach Abbildung 3.9 definiert. Zur Antriebsseite gehört die VKM und die über den Riemen angebundene elektrische Maschine. Für die Massenträgheit der Antriebsseite gilt die Gleichung (3.22), wobei $J'_{Antrieb}$ die Massenträgheit der Basismaschine enthält.

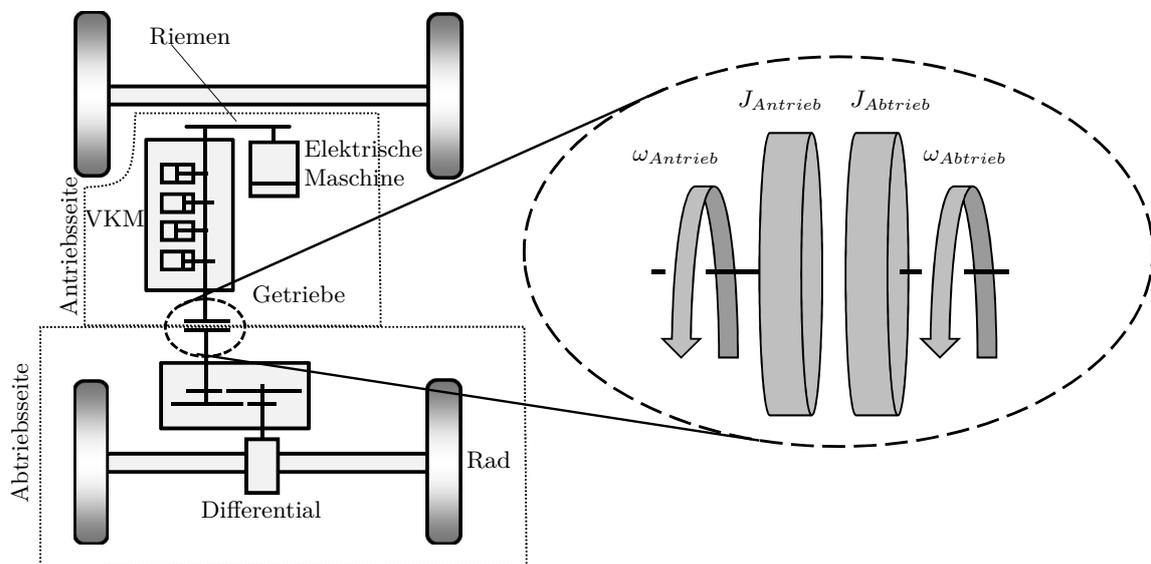


Abbildung 3.9.: Definition der Antriebs- und Abtriebsseite sowie konzentriertes Ersatzbild der Kupplung

$$J_{Antrieb}(k_{vol}) = J'_{Antrieb} + i_{Masch} \cdot \left(k_{vol}^{5/3} - 1\right) \cdot J_{Masch} \quad (3.22)$$

Auf der Abtriebsseite befinden sich das Differential, das Rad und das Getriebe. Es ergibt sich die Gleichung (3.23).

$$J_{Abtrieb}(k_{vol}) = \frac{m_{Fzg}(k_{vol})}{i_{Gang}^2 \cdot i_{Dif}^2 \cdot i_{Rad}^2} \quad (3.23)$$

Werden alle Antriebs- und Abtriebsträgheiten nach den Gleichungen (3.22) und (3.23) definiert, ergibt sich das Ersatzbild mit den konzentrierten Massenträgheiten $J_{Antrieb}$ und $J_{Abtrieb}$ in Abbildung 3.9. Darin sind die Winkelgeschwindigkeiten $\omega_{Antrieb}$ und $\omega_{Abtrieb}$ eingezeichnet. Dieses Ersatzbild wird im Folgenden verwendet, um die Verluste durch das Schalten des Getriebes zu berechnen [73].

Ist die Kupplung geöffnet, berechnet sich der gesamte Drehimpuls p der beiden rotierenden Massen entsprechend der Gleichung (3.24).

$$p = J_{Antrieb} \cdot \omega_{Antrieb} + J_{Abtrieb} \cdot \omega_{Abtrieb} \quad (3.24)$$

Wird die Kupplung geschlossen, drehen sich beide Massen mit derselben Winkelgeschwindigkeit ω' , es resultiert die Gleichung (3.25).

$$p' = (J_{Antrieb} + J_{Abtrieb}) \omega' \quad (3.25)$$

Der Gesamtimpuls der Kupplung bleibt erhalten, es gilt: $p = p'$. Hieraus ergibt sich für die Winkelgeschwindigkeit nach dem Schließen der Kupplung die Gleichung (3.26), [74].

$$\omega' = \frac{J_{Antrieb} \cdot \omega_{Antrieb} + J_{Abtrieb} \cdot \omega_{Abtrieb}}{J_{Antrieb} + J_{Abtrieb}} \quad (3.26)$$

Die Winkelgeschwindigkeit $\omega_{Antrieb}$ berechnet sich vor dem Einlegen des nächsten Gangs (Zeitpunkt i) nach der Gleichung 3.27.

$$\omega_{Antrieb} = i_{Rad} \cdot i_{Dif} \cdot i_{Gang,i} \cdot v_{Fzg} \quad (3.27)$$

Nach dem Schalten in den nächsten Gang (Zeitpunkt $i+1$) ergibt sich die Winkelgeschwindigkeit $\omega_{Abtrieb}$ nach der Gleichung (3.28).

$$\omega_{Abtrieb} = i_{Rad} \cdot i_{Dif} \cdot i_{Gang,i+1} \cdot v_{Fzg} \quad (3.28)$$

Aus den Gleichungen (3.27) und (3.28) ergibt sich eine Fallunterscheidung zwischen dem Schalten in einen höheren Gang und dem Schalten in einen niedrigeren Gang. Es gilt:

1. Wird in einen höheren Gang geschaltet, verringert sich die Übersetzung des Getriebes $i_{Gang,i+1}$, wodurch sich die Winkelgeschwindigkeit $\omega_{Abtrieb}$ gegenüber der Antriebsseite verringert. Es gilt somit $\omega_{Antrieb} > \omega' > \omega_{Abtrieb}$.
2. Erfolgt das Schalten in einen niedrigeren Gang, erhöht sich das Übersetzungsverhältnis des Getriebes $i_{Gang,i+1}$, dies führt zu: $\omega_{Antrieb} < \omega' < \omega_{Abtrieb}$.

Beide Fälle werden im Folgenden analysiert, begonnen wird mit der Verkleinerung der Getriebeübersetzung. Im Anschluss erfolgt die Betrachtung der Vergrößerung der Getriebeübersetzung.

Schalten in einen höheren Gang Es gilt, wie schon angemerkt: $\omega_{Antrieb} > \omega' > \omega_{Abtrieb}$. Die Abbildung 3.10 zeigt den zeitlichen Verlauf einer Beschleunigungsphase und eines Schaltvorgangs.

Betrachtet man die Änderungen der Energien von Antrieb und Abtrieb vor dem Schaltvorgang ($\omega_{Abtrieb}$ bzw. $\omega_{Antrieb}$) und nach dem Schaltvorgang (ω'), ergeben sich die Gleichungen (3.29) und (3.30).

3. Energetische Betrachtung des Triebstrangs

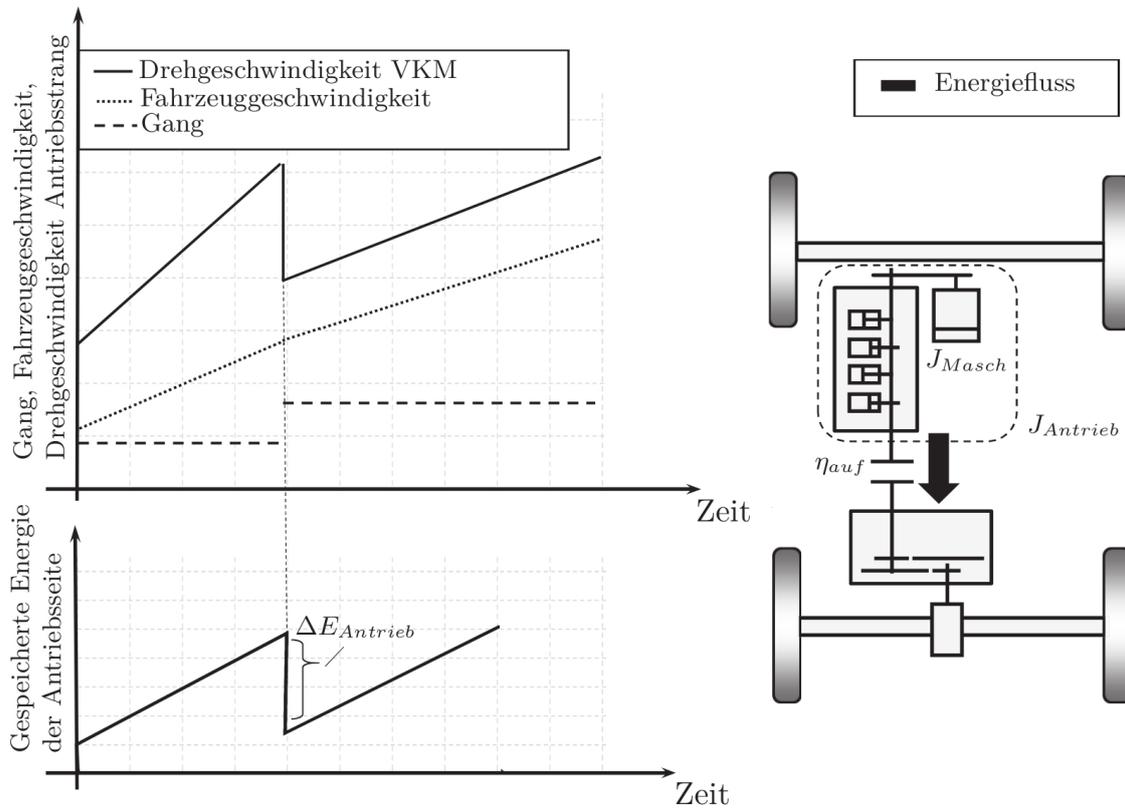


Abbildung 3.10.: Übersicht des Energieflusses beim Schalten in einen höheren Gang und die damit verbundenen Verluste

$$\Delta E_{Abtrieb} = \frac{1}{2} \cdot J_{Abtrieb} \cdot (\omega'^2 - \omega_{Abtrieb}^2) \quad (3.29)$$

$$\Delta E_{Antrieb} = \frac{1}{2} \cdot J_{Antrieb} \cdot (\omega'^2 - \omega_{Antrieb}^2) \quad (3.30)$$

Hieraus ergibt sich wegen $\omega_{Antrieb} > \omega' > \omega_{Abtrieb}$: $\Delta E_{Antrieb} < 0$ und $\Delta E_{Abtrieb} > 0$, was bedeutet, dass Energie von der Antriebsseite zur Abtriebsseite fließt. Es fließt somit die Energie $\Delta E_{Abtrieb}$ in die Kupplung und die Energie $\Delta E_{Antrieb}$ aus ihr heraus. Dieses Erkenntnis ermöglicht die Definition eines Nutzungsgrads während des Gangwechsels nach [73], siehe Gleichung (3.31).

$$\eta_{auf} = \frac{|\Delta E_{Abtrieb}|}{|\Delta E_{Antrieb}|} = \frac{|J_{Abtrieb} \cdot \omega'^2 - J_{Abtrieb} \cdot \omega_{Abtrieb}^2|}{|J_{Antrieb} \cdot \omega'^2 - J_{Antrieb} \cdot \omega_{Antrieb}^2|} \quad (3.31)$$

Setzt man die Gleichung (3.26) für die resultierende Winkelgeschwindigkeit bei geschlossener Kupplung in die Gleichung (3.31) ein, ergibt sich der Zusammenhang in Gleichung (3.32).

$$\eta_{auf} = \frac{J_{Abtrieb} \cdot \left\{ \left(\frac{J_{Antrieb} \cdot \omega_{Antrieb} + J_{Abtrieb} \cdot \omega_{Abtrieb}}{J_{Antrieb} + J_{Abtrieb}} \right)^2 - \omega_{Abtrieb}^2 \right\}}{J_{Antrieb} \cdot \left\{ \omega_{Antrieb}^2 - \left(\frac{J_{Antrieb} \cdot \omega_{Antrieb} + J_{Abtrieb} \cdot \omega_{Abtrieb}}{J_{Antrieb} + J_{Abtrieb}} \right)^2 \right\}} \quad (3.32)$$

Des Weiteren können für $\omega_{Abtrieb}$ und $\omega_{Antrieb}$ die Gleichungen (3.27) und (3.28) eingesetzt werden. Es lässt sich die Geschwindigkeit des Fahrzeugs v_{Fzg} eliminieren, wodurch die Gleichungen (3.33) bzw. (3.34) entstehen.

$$\eta_{auf} = \frac{J_{Abtrieb} \cdot \left\{ \left(\frac{J_{Antrieb} \cdot i_{Gang,i} + J_{Abtrieb} \cdot i_{Gang,i+1}}{J_{Antrieb} + J_{Abtrieb}} \right)^2 - i_{Gang,i+1}^2 \right\}}{J_{Antrieb} \cdot \left\{ i_{Gang,i}^2 - \left(\frac{J_{Antrieb} \cdot i_{Gang,i} + J_{Abtrieb} \cdot i_{Gang,i+1}}{J_{Antrieb} + J_{Abtrieb}} \right)^2 \right\}} \quad (3.33)$$

$$J_{Abtrieb} = \frac{m_{Fzg}}{i_{Gang,i+1}^2 + i_{Dif}^2 + i_{Rad}^2} \quad (3.34)$$

Somit ergibt sich der Energieanteil, welcher durch das Schalten des Getriebes in einen höheren Gang entsteht, zu Gleichung (3.35).

$$E_{v,auf} = \frac{1}{2} \cdot J_{Antrieb}(k_{vol}) \sum_{i=0}^{i_{Ende}} \omega_{Antrieb,i}^2 \cdot (1 - \eta_{auf}(k_{vol}, i_{Gang,i+1}, i_{Gang,i})) \quad (3.35)$$

$$\forall i \in i_{Gang,i+1} < i_{Gang,i} \cap v_{i+1} \geq v_i$$

Schalten in einen geringeren Gang Analog zum letzten Abschnitt kann die Berechnung des Energieanteils durch die Vergrößerung der Getriebeübersetzung erfolgen. Für das Herabschalten in einen kleineren Gang gilt: $\omega_{Antrieb} < \omega' < \omega_{Abtrieb}$. Bei diesem Vorgang wird von der Abtriebsseite Energie zur Antriebsseite übertragen. Die Abbildung 3.11 zeigt die prinzipiellen Verläufe. Im Gegensatz zum Wechsel in einen höheren Gang gilt für die Gleichungen (3.33) und (3.34): $\Delta E_{Antrieb} > 0$ und $\Delta E_{Abtrieb} < 0$. Daraus ergibt sich die Gleichung (3.36) für den Nutzungsgrad beim Schalten in einen geringeren Gang.

$$\eta_{ab} = \frac{|\Delta E_{Antrieb}|}{|\Delta E_{Abtrieb}|} = \frac{|J_{Antrieb} \cdot \omega'^2 - J_{Antrieb} \cdot \omega_{Antrieb}^2|}{|J_{Abtrieb} \cdot \omega'^2 - J_{Abtrieb} \cdot \omega_{Abtrieb}^2|} \quad (3.36)$$

Werden die Gleichungen (3.26) bis (3.28) in (3.36) eingesetzt und v_{Fzg} eliminiert, folgen die Gleichungen (3.37) und (3.38) zur Berechnung des Nutzungsgrads beim Schaltvorgang.

$$\eta_{ab} = \frac{J_{Antrieb} \cdot \left\{ \left(\frac{J_{Antrieb} \cdot i_{Gang,i} + J_{Abtrieb} \cdot i_{Gang,i+1}}{J_{Antrieb} + J_{Abtrieb}} \right)^2 - i_{Gang,i}^2 \right\}}{J_{Abtrieb} \cdot \left\{ i_{Gang,i+1}^2 - \left(\frac{J_{Antrieb} \cdot i_{Gang,i} + J_{Abtrieb} \cdot i_{Gang,i+1}}{J_{Antrieb} + J_{Abtrieb}} \right)^2 \right\}} \quad (3.37)$$

$$J_{Abtrieb} = \frac{m_{Fzg}}{i_{Gang,i+1}^2 + i_{Dif}^2 + i_{Rad}^2} \quad (3.38)$$

3. Energetische Betrachtung des Triebstrangs

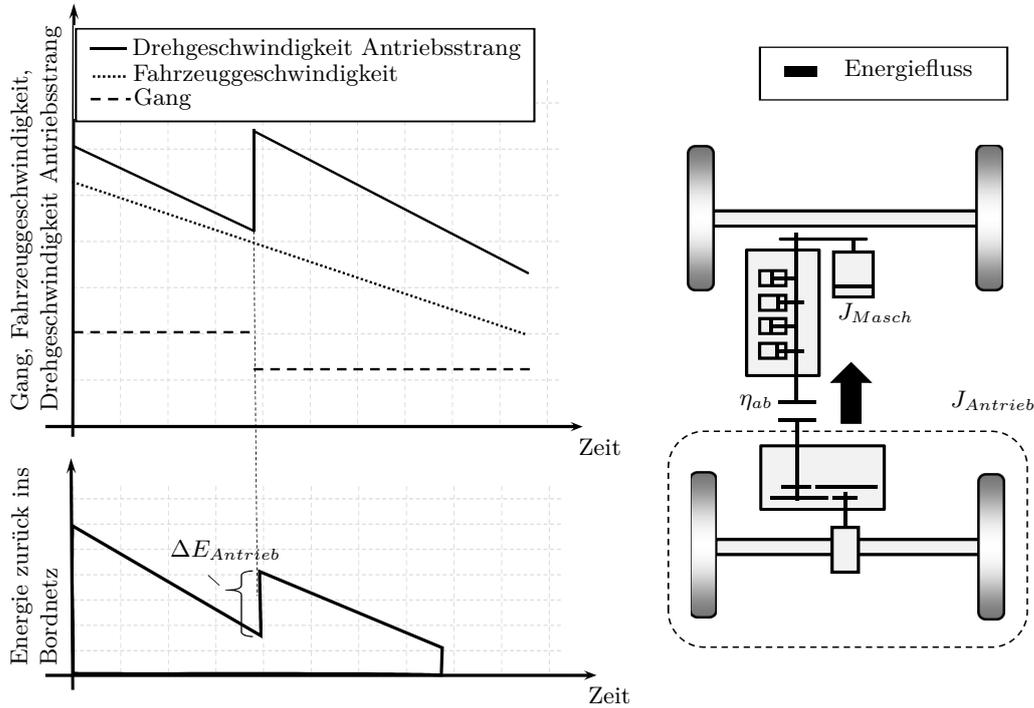


Abbildung 3.11.: Übersicht des Energieflusses beim Schalten in einen geringeren Gang und die damit verbundenen Verluste

Die Gleichung (3.39) zeigt die Energie, welche während dieses Vorgangs verloren geht.

$$E_{v,ab} = \frac{1}{2} \cdot J_{Abtrieb}(k_{vol}) \sum_{i=0}^{i_{Ende}} \omega_{Abtrieb,i}^2 \cdot (1 - \eta_{ab}(k_{vol}, i_{Gang,i+1}, i_{Gang,i})) \quad (3.39)$$

$$\forall i \in i_{Gang,i+1} > i_{Gang,i} \cap v_{i+1} \leq v_i$$

Mit den nun bekannten Energieanteilen kann die Energie $E_{Trägheit}(k_{vol}, i_{Gang,i}, i_{Gang,i+1})$ ermittelt werden, welche zur Vervollständigung der Gleichung (3.16) benötigt wird.

3.3.4. Berücksichtigung der Schleppverluste der elektrischen Maschine

Die elektrische Maschine ist über einen Riemen permanent an die VKM angebunden. Dies bedeutet, dass die Maschine Schleppverluste erzeugt. Diese sind zum einen auf die im letzten Abschnitt erläuterten Verluste aufgrund der rotierenden Massen zurückzuführen. Zum anderen treten auch Schleppverluste auf, welche sich aus elektromagnetischen Verlusten und Lüfterverlusten zusammensetzen. In Kapitel 5 wird ein iteratives Verfahren zur Berechnung von $P_{Schlepp}(n_{Masch}, k_{vol})$ vorgestellt. Die Energie, welche von der VKM durch das Schleppen der Maschine aufgebracht werden muss, zeigt die Gleichung (3.40).

$$E_{Schlepp} = \frac{1}{\eta_{Riem}} \sum_{i=0}^{i_{Ende}} P_{Schlepp}(n_{Masch}, k_{vol}) \cdot (t_{i+1} - t_i) \quad \forall i \in E_{Rad} > 0 \quad (3.40)$$

3.3.5. Größenverhältnisse der Energieanteile

In den letzten Abschnitten wurden die Energieanteile berechnet, die nötig sind, um eine energetisch optimale Maschine zu finden. Die Abbildung 3.12 zeigt den Einfluss der Maschinengröße auf den CO_2 -Ausstoß für die einzelnen Energieanteile am Beispiel eines Compact-Fahrzeugs.

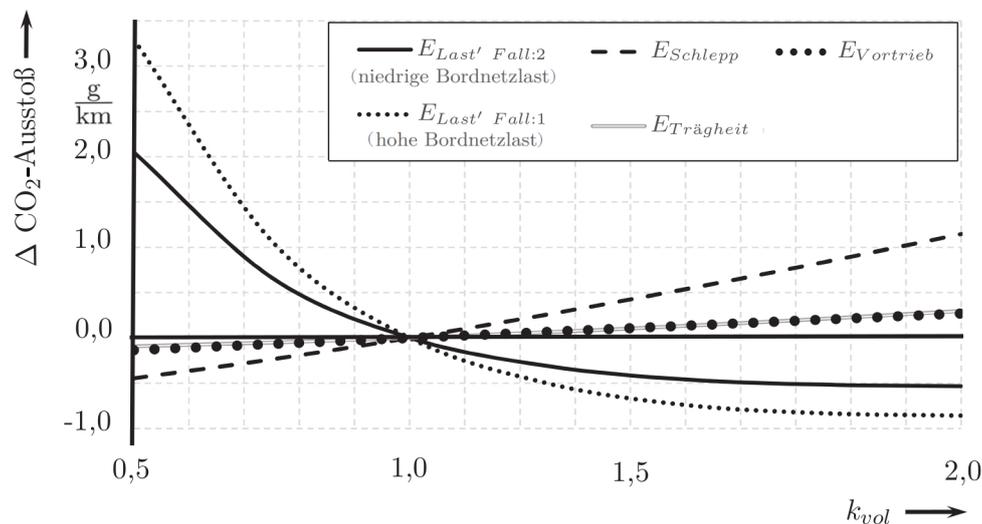


Abbildung 3.12.: Größenverhältnisse der Energieanteile eines Fahrzeugs der Compact-Klasse

Es ist zu erkennen, dass die Energieanteile $E_{Schlepp}$, $E_{Vortrieb}$ und $E_{Trägheit}$ bei einer Vergrößerung der Maschine steigen. Demgegenüber steht der Einfluss der rekuperierbaren Energie, welche bei einer Vergrößerung der Maschine abflacht.

3.4. Analyse eines Compact-Fahrzeugs

Im letzten Abschnitt wurden die Energieanteile berechnet, welche nötig sind, um den Ansatz aus dem Abschnitt 3.1 zu komplettieren. Die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse beziehen sich auf die Fahrzyklen sowie die Fahrzeugklassen aus dem Abschnitt 2.4. Als Beispiel werden die Ergebnisse des Compact-Fahrzeugs im WLTC dargestellt.

Die Abbildung 3.13 zeigt die Ergebnisse für ein Compact-Fahrzeug für zwei Bordnetzlasten nach Gleichung (3.14), Fall 1 und Fall 2. Betrachtet man den Verlauf der Kennlinie bei geringer Bordnetzlast, ergibt sich unterhalb der Basismaschine ein positiver Wert des ΔCO_2 -Ausstoßes, was einem zusätzlichen Ausstoß gegenüber dem Fahrzeug mit Basismaschine gleichzusetzen ist. Bei hohen Werten für k_{vol} ergibt sich ein Anstieg des ΔCO_2 -Ausstoßes aufgrund der Nachteile einer zu großen Maschine.

Bei einer hohen Bordnetzlast fällt der ΔCO_2 -Ausstoß im Vergleich zur Basismaschine weiter ab. Aus energetischer Sicht bietet es sich an, die Maschine um den Faktor 1,2 zu vergrößern. Das energetische Optimum befindet sich in diesem Fall bei einer 16 kW Maschine. Wird die Maschine weiter vergrößert, führt dies zu den oben genannten Nachteilen, welche den ΔCO_2 -Ausstoß wieder ansteigen lassen.

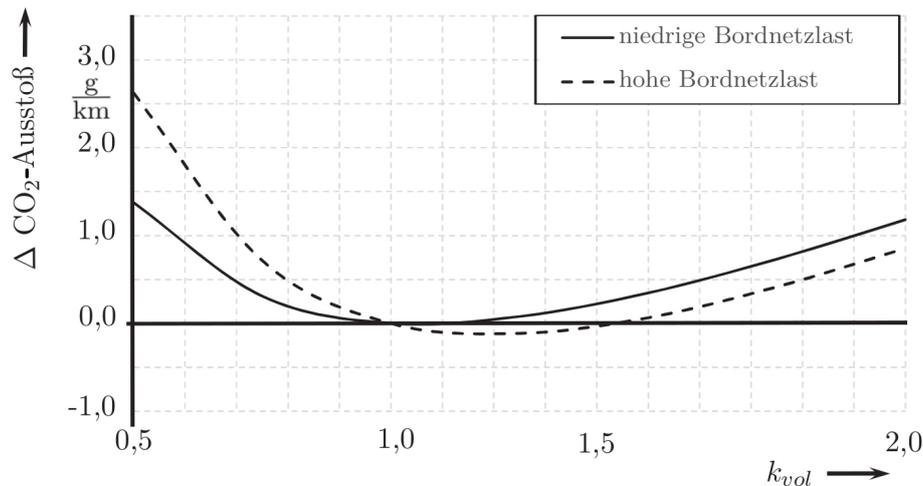


Abbildung 3.13.: Vergleich des CO_2 -Ausstoßes zwischen hoher und geringer Bordnetzlast in Abhängigkeit der Maschinenskalierung k_{vol}

3.5. Unsicherheiten und Gültigkeitsanalyse des Ansatzes

Der vorgestellte Ansatz beruht auf Prämissen, wie z.B. der Annahme konstanter Nutzungsgrade der Komponenten im Antriebsstrang. Die Komponenten weisen aber in der Regel ein betriebspunktabhängiges Verhalten auf. Des Weiteren wurden im letzten Abschnitt methodische Vereinfachungen getroffen. Zum Beispiel wurde der Nutzungsgrad der Batterie quadratisch gewichtet. Streng genommen gilt dies nur, wenn die rekuperierte Energie immer in der Batterie zwischengespeichert wird. Es fließt dennoch ein Teil der Energie direkt zur elektrischen Last des Bordnetzes, was eine Abweichung vom quadratischen Zusammenhang darstellt.

Diese Ungenauigkeiten methodischer Art und Unsicherheiten in den Nutzungs- bzw. Wirkungsgradannahmen führen zu einer Gesamtunsicherheit in den Kurven von Abbildung 3.13. Entsprechendes gilt somit auch für das energetische Optimum. Um den Aufenthaltsbereich des energetischen Optimums abzuleiten, werden die Unsicherheiten überlagert. Diese Überlagerung wird so vorgenommen, dass eine obere und eine untere Grenzkennlinie entsteht, welche zu einer größtmöglichen bzw. zu einer kleinstmöglichen elektrischen Maschine führt, siehe Abbildung 3.14.

Um den Einfluss unterschiedlicher Komponenteneigenschaften darzulegen, wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. In [75] wird der Wirkungsgrad einer Batterie mit einer neuartigen Elektrode mit 98 % angegeben. Demgegenüber steht der verwendete Wirkungsgrad in [8], welcher mit 80 % angegeben wird. Allerdings beinhaltet der Wirkungsgrad von 80 % bereits eine Ladeelektronik und berücksichtigt das Laden und Entladen der Batterie. In praktischen Applikationen liegt der Wirkungsgrad zwischen diesen Werten und wird mit 93 % +2 % und -3 % angenommen. Während der kurzen Rekuperationsphasen fließt Energie zur Bordnetzlast und zur Batterie, was dazu führt, dass der Batteriewirkungsgrad mit einem Exponenten < 2 zu gewichten ist. Um dies zu berücksichtigen wird, der Batteriewirkungsgrad im Grenzfall linear angenommen. Der Wirkungsgrad eines typischen Riemens liegt zwischen 90 % und 99 %, abhängig von der Art des Riemens und der Last [76]. Um ein weites Spektrum abzudecken, wird ein Wirkungsgrad von 95 % \pm 2 % angenommen. Ein wirkungsgradstarkes Differential in Verbindung mit einem Getriebe weist einen Wirkungsgrad von ca. 90 % auf [77]. Um Unsicherheiten abzudecken, wird eine Toleranz von \pm 2 % eingeräumt. Der Wirkungsgrad der Basismaschine beträgt maximal

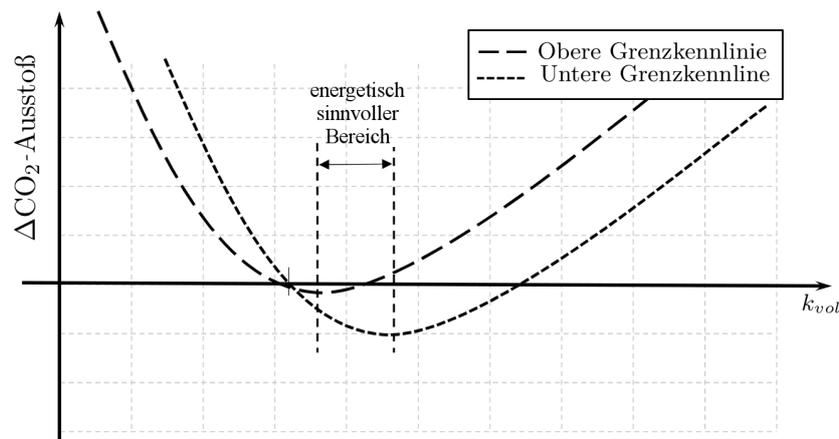


Abbildung 3.14.: Prinzipdarstellung der beiden Grenzkennlinien

88 % [78]. Die Betriebspunkte im Fahrzyklus führen aber zu einer Abweichung vom maximalen Wirkungsgrad aufgrund des zeitweiligen Betriebs im Teillastbereich. Aus diesem Grund kann mit einem mittleren Wirkungsgrad von $83\% \pm 2\%$ gerechnet werden [51]. Die Bemessungsleistung der elektrischen Maschine wurde unabhängig von der Drehzahl angenommen. In der Praxis trifft dies erst ab einer Drehzahl von ca. 4000 min^{-1} zu.⁸ Somit muss mit einer Unsicherheit von 5 % gerechnet werden. Die zu schleppenden VKM bildet während den Rekuperationsphasen eine energetische Hürde. Die Leistung, welche zur Überwindung aufgebracht werden muss, hängt von der Drehzahl der VKM ab. Die Abbildung 3.15 zeigt eine typische Drehzahlverteilung der VKM, welche für ein Compact-Fahrzeug gilt.

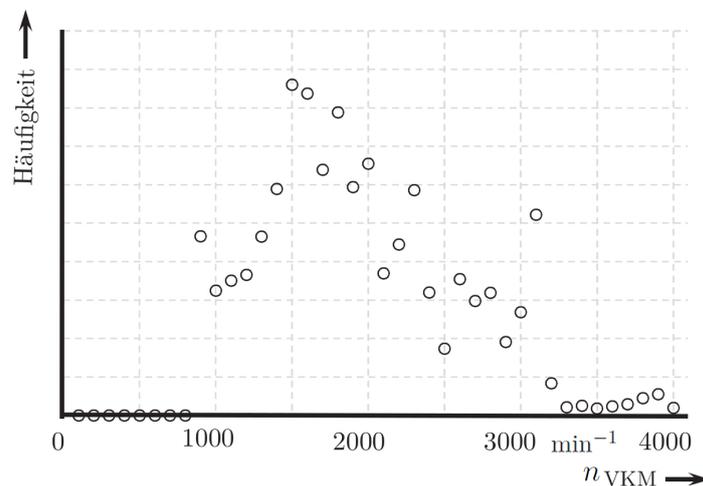


Abbildung 3.15.: Häufigkeitsverteilung der VKM-Drehzahlen im WLTC bei einem Compact-Fahrzeug

Mit der drehzahlabhängigen Schleppleistung ergibt sich die mittlere Schleppleistung zu ca. 2000 W. Werden andere Fahrzyklen betrachtet, ergeben sich abweichende Schleppleistungen, mit einer Unsicherheit von $\pm 20\%$ werden die meisten Fälle abgedeckt.

⁸Ab dieser Drehzahl beginnt der Feldschwächebetrieb

3. Energetische Betrachtung des Triebstrangs

Das verlustbehaftete Beschleunigen und Abbremsen des Rotors sowie die Schaltvorgänge des Getriebes führen zu Verlusten. Der Energieanteil durch das Schalten des Getriebes verursacht einen Energieübertrag durch einen unelastischen Stoß über die Kupplung. Bei diesem Vorgang geht ein Teil der Energie verloren, siehe Abschnitt 3.3.3.3. Im energetisch ungünstigsten Fall kann jedoch die gesamte Energie verloren gehen. In diesem Fall ergibt sich E_{rot2} zu Gleichung (3.41).

$$E_{rot2} = \frac{1}{2} \cdot J_{Masch}(k_{vol}) \cdot (\omega_{Masch,i}^2 - \omega_{Masch,i+1}^2) \quad (3.41)$$

Für den energetisch ungünstigsten Fall ergeben sich diese Verluste über die komplette Dauer des Fahrzyklusses. Des Weiteren ist der Betrag der Schleppleistung in Abhängigkeit der Maschinengröße schwer zu bestimmen, aus diesem Grund wird eine Unsicherheit von $\pm 20\%$ zugestanden. In Tabelle 3.1 sind alle Einflussgrößen sowie deren Auswirkung auf die obere und untere Grenze dargestellt.

Größte elektrische Maschine	Mittel	Kleinste elektrische Maschine
- 5 %	$P_{el,max}$	+ 5 %
+ 2 %	η_{Masch}	- 2 %
Über Impulserhaltung (niedrigere Verluste)	Verluste Massenträgheit beim Schalten	Energie geht verloren (höhere Verluste)
- 20 %	$P_{Schlepp,el}$	+ 20 %
Nur wenn gilt: $E_{Rad} > 0$	Berücksichtigung Schleppverluste	Über gesamte Dauer des Fahrzyklus
+ 2 %	η_{Dif}	- 2 %
- 20 %	$P_{Schlepp,VKM}$	+ 20 %
+ 2 %	η_{Riem}	- 2 %
+ 2 %	η_{Batt}	- 3 %
linear	Berücksichtigung von η_{Batt}	quadratisch

Tabelle 3.1.: Übersicht der Abweichungen

3.6. Ergebnisse und Zusammenfassung des Kapitels

Aus den Unsicherheiten der Tabelle 3.1 ergeben sich die Bereiche für k_{vol} , in denen die energetisch optimale Maschinengröße zu finden ist, siehe Tabelle 3.2.

Werte für k_{vol}	Hohe Bordnetzlast		Niedrige Bordnetzlast	
	NEFZ	WLTC	NEFZ	WLTC
SComp	0,48 – 0,87	0,58 – 0,88	0,46 – 0,76	0,56 – 0,85
Compact	0,94 – 1,44	1,04 – 1,54	0,87 – 1,32	0,86 – 1,40
SUV	1,12 – 1,87	1,28 – 1,97	1,06 – 1,54	1,06 – 1,85

Tabelle 3.2.: Bereiche der energetisch optimalen Maschinengröße der betrachteten Fahrzeugklassen

Beispielhaft zeigt die Abbildung 3.16 den Verlauf der beiden Grenzkurven eines Fahrzeugs der Compact-Klasse im WLTC für eine hohe Bordnetzlast. Weitere Abbildungen sind im Anhang A.1 zu finden.

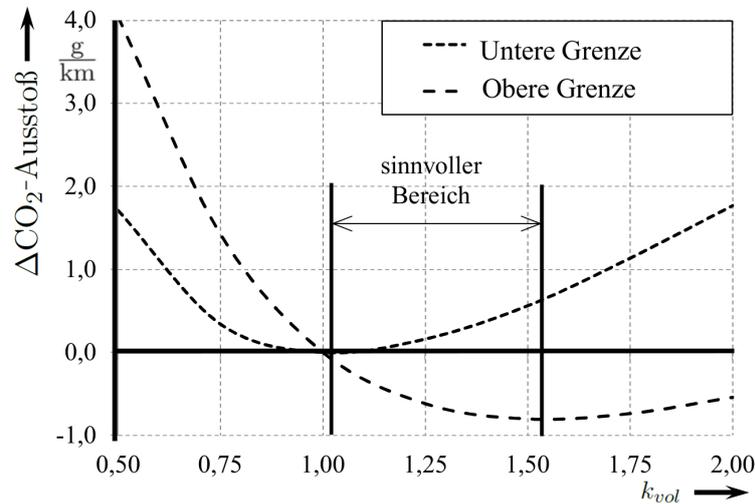


Abbildung 3.16.: Compact-Fahrzeug im WLTC bei hoher Bordnetzlast

Nachdem die Bereiche der energetisch optimalen Maschinengrößen der betrachteten Fahrzeugklassen bekannt sind, wird im nächsten Abschnitt die elektrische Maschine analysiert, vgl. Vorgehen in Abbildung 1.5.

4. Wachstumsgesetze der elektrischen Maschine

Zur Analyse von elektrischen Maschinen eignen sich die Wachstumsgesetze in besonderem Maße. Diese ermöglichen es, aus den baulichen Abmessungen der elektrischen Maschine sowie durch Annahmen über den speisenden Strom, Rückschlüsse auf die Bemessungsleistung zu ziehen.

In der Literatur wird eine Vielzahl von Wachstumsgesetzen vorgestellt. Beispielsweise zeigt [79] einen Skalierungsansatz, welcher das meist überdimensionierte Joch des Stators mit in Betracht zieht. Die bekanntesten Ansätze gehen jedoch auf die Betrachtung des Strombelags A und der Luftspaltflussdichte B_δ zurück. Die Ansätze nach [80] werden im Folgenden genauer betrachtet, da diese sich besonders gut analytisch beschreiben lassen und für die Praxis einen besonders hohen Wert haben. Des Weiteren wird für die untersuchte Klauenpolmaschine die zentrische Streckung zugrunde gelegt.

Ziel dieses Kapitels ist es herauszufinden, welches der Wachstumsgesetze für eine Klauenpolmaschine unter den im Abschnitt 2.3.1.2 auf Seite 19 genannten Randbedingungen zutreffend ist. Um diese Randbedingungen auf die Eigenschaften der elektrischen Maschinen zu übertragen, wird der Zusammenhang in Gleichung (4.1) genutzt.

$$P \sim B_\delta \cdot A \cdot D_{Rot}^2 \cdot l_{i,Rot} \quad (4.1)$$

Wobei D_{Rot} der Durchmesser des Rotors und $l_{i,Rot}$ die ideale Länge des Rotors ist.

4.1. Wachstum bei konstanter Materialbelastung

Bei diesem Ansatz wird von einer konstanten Flussdichte im Luftspalt B_δ und konstanter Stromdichte S in den Windungen des Stators ausgegangen. Dies führt dazu, dass die Kupferbereiche und die Eisenbereiche der Maschine bei Skalierung der Maschine gleich belastet werden. Die Annahme, dass die Stromdichte in der Statorwicklung konstant bleibt, zieht ein lineares Verhalten des Strombelags gegenüber dem Skalierungsfaktor k nach sich, vgl. Gleichung (4.2).

$$A \sim \frac{S \cdot A_{Nut,Cu}}{D} \sim \frac{k^2}{k} = k \quad (4.2)$$

In Gleichung (4.2) ist $A_{Nut,Cu}$ die mit Kupfer gefüllte Fläche einer Statornut. Das lineare Wachstum des Strombelags führt zu einem Wachstum der Leistung mit k^4 , siehe Gleichung (4.3).

$$P \sim B_\delta \cdot A \cdot D_{Rot}^2 \cdot l_{i,Rot} \sim k \cdot k^2 \cdot k = k^4 \quad (4.3)$$

Eine Abschätzung der Zuwächse für die Eisen- und Kupferverluste zeigen die Gleichungen (4.4) und (4.5).

$$P_{Cu} \sim S^2 \cdot m_{Cu} \sim k^3 \quad (4.4)$$

$$P_{Fe} \sim B^2 \cdot m_{Fe} \sim k^3 \quad (4.5)$$

Es ist zu erkennen, dass die Verluste mit k^3 , d.h. mit dem Volumen der Maschine, wachsen. Alle Flächen, auch die zur Verfügung stehende Kühlflächen, der Maschine wachsen aber nur quadratisch. Ein solches Wachstum kann folglich zur Überhitzung der Maschine führen.

4.2. Wachstum bei gleicher thermischer Oberflächenbelastung

Bei diesem Ansatz werden die Gleichungen (4.4) und (4.5) proportional zum Wachstum der Kühlflächen gesetzt. Es ergeben sich die Gleichungen (4.6) und (4.7).

$$P_{Cu} \stackrel{!}{\sim} k^2 \sim S^2 \cdot m_{Cu} \Rightarrow S \sim \frac{1}{\sqrt{k}} \quad (4.6)$$

$$P_{Fe} \stackrel{!}{\sim} k^2 \sim B^2 \cdot m_{Fe} \Rightarrow B \sim \frac{1}{\sqrt{k}} \quad (4.7)$$

Der Strombelag A ergibt sich proportional zu \sqrt{k} , da die Stromdichte $S \sim \frac{1}{\sqrt{k}}$ abnimmt, siehe Gleichung (4.8).

$$A \sim \frac{S \cdot A_{Cu}}{D} \sim \frac{\frac{1}{\sqrt{k}} \cdot k^2}{k} = \sqrt{k} \quad (4.8)$$

Das Wachstum der Leistung ergibt sich nach Gleichung (4.9) proportional zu k^3 .

$$P \sim B_\delta \cdot A \cdot D_{Rot}^2 \cdot l_{i,Rot} \sim \frac{1}{\sqrt{k}} \cdot \sqrt{k} \cdot k^2 \cdot k = k^3 \quad (4.9)$$

4.3. Wachstum bei konstanter Luftspaltflussdichte und konstantem Strombelag

Bei diesem Ansatz wird durch einen konstanten Strombelag und eine konstante Flussdichte die Ausnutzung C konstant gehalten. Die Gleichung (4.10) zeigt diesen Zusammenhang, [80].

$$C \sim A \cdot B_\delta \sim \text{konst.} \quad (4.10)$$

Für die so definierten Randbedingungen ergibt sich die Leistung der Maschine proportional zu k^3 , siehe Gleichung (4.11).

$$P \sim B_\delta \cdot A \cdot D_{Rot}^2 \cdot l_{i,Rot} \sim k^2 \cdot k = k^3 \quad (4.11)$$

Die Stromdichte nimmt bei Vergrößerung der Maschine mit $1/k$ ab, was die Gleichung (4.12) zeigt.

$$S \sim \frac{A \cdot D_{Rot}}{A_{N_{ut,Cu}}} \sim \frac{k}{k^2} = \frac{1}{k} \quad (4.12)$$

Bei diesem Ansatz verhält sich das Wachstum der Verluste entsprechend der Gleichungen (4.13) und (4.14).

$$P_{Fe} \sim B^2 \cdot m_{Fe} \sim k^3 \quad (4.13)$$

$$P_{Cu} \sim S^2 \cdot m_{Cu} \sim \left(\frac{1}{k}\right)^2 \cdot k^3 = k \quad (4.14)$$

Zusammengefasst stellt die Tabelle 4.1 die Unterschiede der Ansätze sowie deren Prämissen dar.

	Materialbelastung konstant	konstante thermische Oberflächenbelastung	konst. Luftspaltflussdichte, konst. Strombelag
Definitionen	$S = \text{konst.},$ $B_\delta = \text{konst.}$	$P_{Fe} \overset{!}{\sim} k^2,$ $P_{Cu} \overset{!}{\sim} k^2$	$A = \text{konst.},$ $B_\delta = \text{konst.}$
Auswirkungen	$A \sim k$	$S \sim \frac{1}{\sqrt{k}}$ $B \sim \frac{1}{\sqrt{k}}$ $A \sim \sqrt{k}$	$S \sim \frac{1}{k}$
Bemerkungen	- Konst. Belastung des Materials bei Skalierung - Sättigungsverhältnisse bleiben ähnlich	Fallende Ausnutzung des Materials bei Skalierung - Sättigungsverhältnisse verändern sich	- Fallende Belastung des Materials bei Skalierung - Sättigungsverhältnisse bleiben ähnlich
Leistung	$\sim k^4$	$\sim k^3 = k_{vol}$	$\sim k^3 = k_{vol}$

Tabelle 4.1.: Übersicht der Wachstumsgesetze

Beim Wachstum der Maschine mit konstanter Materialbelastung wächst die Leistung mit k^4 . Die als konstant angenommene Flussdichte führt dazu, dass die Sättigungsverhältnisse bei Skalierung ähnlich bleiben. Ebenfalls aufgrund der konstanten Flussdichte ist die Zunahme der Eisenverluste mit k^3 zu verzeichnen. Auch die Kupferverluste wachsen proportional zu k^3 . Die Zunahme der Eisen- und Kupferverluste mit k^3 führt dazu, dass die Maschine bei gleicher Wärmeabfuhr pro Flächeneinheit überhitzen kann. Der Grund hierfür ist, dass die Kühlflächen mit k^2 wachsen.

Soll die thermische Oberflächenbelastung konstant gehalten werden, müssen die Stromdichte und die Flussdichte mit $\frac{1}{\sqrt{k}}$ reduziert werden. Aufgrund der fallenden Flussdichte ändern sich bei diesem Ansatz die Sättigungsverhältnisse in der Maschine. Die Leistung der Maschine wächst hierbei mit k^3 bzw. mit dem Volumen.

Der Ansatz einer konstanten Flussdichte und eines konstanten Strombelags führt ebenfalls zu einem Wachstum der Leistung mit k^3 . Bei diesem Ansatz bleiben, im Gegensatz zum Ansatz konstanter thermischer Oberflächenbelastung, der Strombelag und Flussdichte konstant. Die konstante Flussdichte führt zu ähnlichen Sättigungsverhältnissen bei Skalierung der Maschine.

Der konstante Strombelag lässt die Belastung des Kupfers sinken, da die Stromdichte mit $\frac{1}{\sqrt{k}}$ abnimmt.

Die vorgestellten Ansätze beruhen auf Definitionen bzw. Annahmen, welche auf Anwendbarkeit in Bezug auf die Klauenpolmaschine untersucht werden müssen. Die nächsten Abschnitte zeigen, inwieweit die eben vorgestellten Ansätze auf die Klauenpolmaschine unter den Skalierungsbedingungen auf Seite 19 übertragbar sind.

4.3.1. Untersuchung der Wachstumsgesetze für die gegebenen Randbedingungen

Um die Untersuchung der Wachstumsgesetze im Hinblick auf die eingesetzte Klauenpolmaschine zu erlauben, wird zunächst die Rotordurchflutung betrachtet. Ausgehend von dieser können Rückschlüsse auf die induzierte Spannung in den Statorwicklungen und Erkenntnisse über das Verhalten der Flussdichte im Luftspalt gewonnen werden.

Jede Baugröße der elektrischen Maschine soll mit der gleichen Elektronik zur Erregung ausgestattet werden. Dies führt dazu, dass der Erregerstrom I_{Err} nicht mit der Baugröße skaliert wird. Die daraus folgende Rotordurchflutung gibt die Gleichung (4.15) wieder. Die Herleitung dieses Zusammenhangs kann dem Anhang A.2 oder [81] entnommen werden.

$$\Theta_{Err} \sim I_{Err} \cdot w_{Rot} \sim \sqrt{k} \quad (4.15)$$

Es ist zu erkennen, dass die Rotordurchflutung mit der Baugröße der Maschine steigt, es ergibt sich aber kein linearer Zusammenhang. Stattdessen stellt die Rotordurchflutung in Abhängigkeit des Skalierungsfaktors k eine Wurzelfunktion dar.

Um den Rückschluss der Durchflutung des Rotors auf die induzierte Spannung zu ermöglichen, wird der verkettete Fluss betrachtet. Dieser kann im Leerlauf aus der Rotordurchflutung und den magnetischen Widerständen in den Eisengebieten und im Luftspalt berechnet werden, siehe Gleichung (4.16).⁹

$$\Psi = \frac{\Theta_{Err}}{R_{\delta} + \sum_{i=1}^n R_{Fe,i}} \quad (4.16)$$

Hierin sind R_{δ} der magnetische Widerstand des Luftspalts und $\sum R_{Fe,i}$ die Summe aller magnetischen Widerstände in den Eisengebieten der Maschine. Da der Luftspalt bei Änderung der Baugröße der Maschine gleich bleibt, ergeben sich unterschiedliche Abhängigkeiten vom Skalierungsfaktor k für R_{δ} und $\sum R_{Fe,i}$. Der magnetische Widerstand des Eisens ist proportional zur Länge des Eisenwegs, welche der Fluss zurücklegen muss, und umgekehrt proportional zur Fläche, durch den der Fluss geführt wird.¹⁰ Es ergibt sich der Zusammenhang in Gleichung (4.17).

$$R_{Fe} \sim \frac{l_{Fe}}{A_{Fe}} \sim \frac{k}{k^2} = \frac{1}{k} \quad (4.17)$$

⁹Streuflüsse sind vernachlässigt.

¹⁰Sättigungseffekte bleiben dabei unberücksichtigt.

Es ist eine Abnahme des magnetischen Widerstandes mit $1/k$ festzustellen. Der magnetische Widerstand des Luftspaltes ist proportional zu dessen Weite sowie umgekehrt proportional zur ideellen Länge der Maschine und dem Durchmesser des Rotors, siehe Gleichung (4.18).

$$R_\delta \sim \frac{\delta}{l_i \cdot D_{Rot}} \sim \frac{1}{k^2} \quad (4.18)$$

Mit der konstanten Luftspaltweite ergibt sich die Abnahme des magnetischen Widerstands R_δ proportional zu $1/k^2$. Nach Gleichung (4.16) wird der verkettete Fluss in der Maschine durch die Summe der magnetischen Widerstände im Eisen und im Luftspalt bestimmt. Da sich diese in Abhängigkeit vom Skalierungsfaktor k unterschiedlich verhalten, wird eine obere bzw. untere Grenze betrachtet. Hierzu werden jeweils die magnetischen Widerstände des Luftspalts bzw. des Eisens als dominierende Teile in Gleichung (4.16) angenommen.

R_δ dominiert den magnetischen Gesamtwidestand ($R_\delta \gg R_{Fe}$) Setzt man den Zusammenhang ($R_\delta \gg R_{Fe}$) in Gleichung (4.16) ein, ergibt sich die Gleichung (4.19).

$$\Psi \sim \frac{\Theta}{R_\delta} \sim \frac{k^{1/2}}{1/k^2} = k^{2,5} \quad (4.19)$$

Die Anzahl der Statorwindungen ergeben sich hieraus proportional zu $k^{-2,5}$, siehe Gleichung (4.20).

$$U_{ind} \sim w_S \cdot \Psi \Rightarrow w_S \sim \frac{U_{ind}}{\Psi} \sim \frac{1}{k^{2,5}} = k^{-2,5} \quad (4.20)$$

$\sum R_{Fe,i}$ dominiert den magnetischen Gesamtwidestand ($R_\delta \ll R_{Fe}$) Die Gleichung (4.21) zeigt die Abhängigkeit des verketteten Flusses vom Skalierungsfaktor k für den Fall, dass $\sum R_{Fe,i}$ den magnetischen Gesamtwidestand dominiert.

$$\Psi \sim \frac{\Theta}{\sum_{i=1}^n R_{Fe,i}} \sim \frac{k^{1/2}}{1/k} = k^{1,5} \quad (4.21)$$

Es ergibt sich eine Proportionalität von $k^{1,5}$ für den verketteten Fluss. Für die induzierte Spannung bzw. die Statorwindungszahl ergibt sich die Abhängigkeit zu $k^{-1,5}$, siehe Gleichung (4.22).

$$U_{ind} \sim w_S \cdot \Psi \Rightarrow w_S \sim \frac{U_{ind}}{\Psi} \sim \frac{1}{k^{1,5}} = k^{-1,5} \quad (4.22)$$

Zusammenfassung der Leiterzahlenanpassung im Stator Unter der Berücksichtigung der Randbedingungen auf Seite 19 für die Skalierung der Klauenpolmaschine ergeben die Gleichungen (4.20) und (4.22) eine obere und eine untere Grenze. Falls der magnetische Widerstand des Eisens dominiert, ist $w_S \sim k^{-1,5}$. Im Falle, dass der magnetische Widerstand des Luftspalts dominiert gilt $w_S \sim k^{-2,5}$. In der Realität wird der magnetische Kreis weder alleine durch den Luftspalt noch durch die Eisenwege beschrieben. Es ist eher ein Verhalten zwischen $k^{-1,5}$ und $k^{-2,5}$ zu erwarten. Aus diesem Grund bietet sich eine Approximation mit k^{-2} an, welche einer

konstanten Flussdichte im Luftspalt entspricht. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird deshalb $B_\delta = \text{konst.}$ angenommen. Die Abbildung 4.1 zeigt die obere und untere Grenze nach den Gleichungen (4.20) und (4.22).

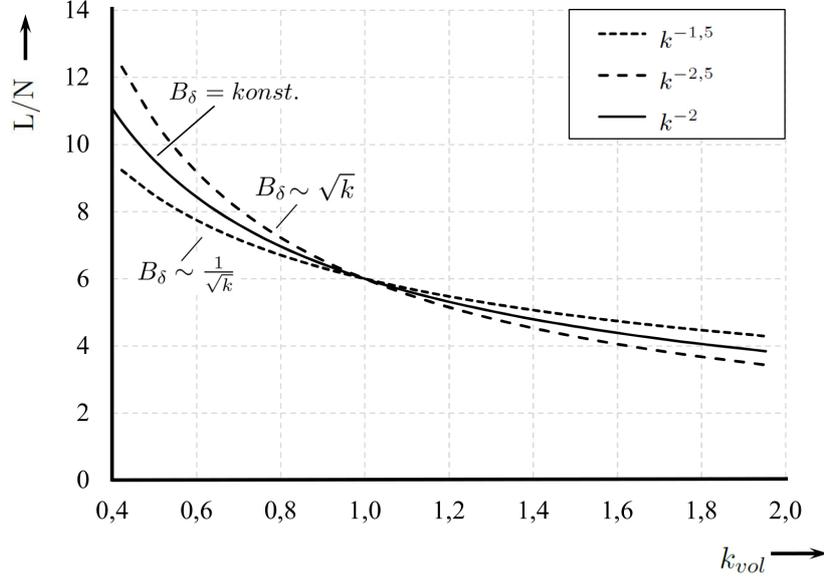


Abbildung 4.1.: Grenzen der Statorwindungszahl in Abhängigkeit des Skalierungsfaktors k_{vol}

Die konstante Flussdichte und die Forderung nach einer konstanten induzierten Spannung führt zu einer Absenkung der Strangwindungszahl bzw. der Leiterzahl pro Nut (L/N) mit k^{-2} . Die Gleichung (4.23) stellt den eben genannten Zusammenhang dar.

$$U_{ind} \sim w_S \cdot B_\delta \cdot \tau_p \cdot l_i \Rightarrow w_S \sim L/N \sim \frac{U_{ind}}{B_\delta \cdot \tau_p \cdot l_i} \sim \frac{1}{k^2} = k^{-2} \quad (4.23)$$

Hierin ist w_S die Statorwindungszahl und τ_p die Polteilung der Maschine.

Die zugrunde gelegte Basismaschine ($k_{vol} = 1,0$) weist eine geringe Strangwindungszahl auf, was auf die niedrige Spannungslage von 48 Volt zurückzuführen ist. Daraus folgt, dass nur wenige Leiter pro Nut im Stator liegen. Bei der Basismaschine sind dies lediglich sechs Leiter. Folglich wird die Leiterzahlanpassung nur zu wenigen diskreten Maschinengrößen führen, welche die oben beschriebenen Bedingungen erfüllen. Grund hierfür ist, dass die Anzahl der Leiter pro Nut nur in ganzen Zahlen skaliert werden kann. Für die Maschinengrößen gilt der Zusammenhang in Gleichung (4.24).

$$L/N_{S,skal} = L/N_{S,basis} \cdot \frac{1}{k^2} \quad \forall \quad L/N_{S,skal} \in \mathbb{N} \quad \text{und} \quad L/N_{S,basis} = 6 \quad (4.24)$$

Mit $k^3 = k_{vol}$ ergibt sich die Gleichung (4.25).

$$k_{vol} = \left(\frac{L/N_{S,basis}}{L/N_{S,skal}} \right)^{3/2} \quad \forall \quad L/N_{S,skal} \in \mathbb{N} \quad \text{und} \quad L/N_{S,basis} = 6 \quad (4.25)$$

Damit ergeben sich die diskreten Baugrößen bzw. Skalierungsfaktoren der Tabelle 4.2.

Skalierungsfaktor k_{vol}	Leiter pro Statornut	Leistung (kW)
1,84	4	23,000
1,31	5	16,375
1,00	6	12,500
0,79	7	9,875
0,65	8	8,125
0,54	9	6,750

Tabelle 4.2.: Diskrete Skalierungsfaktoren und zugehörige Leiterzahlen des Stators

Neben der als konstant gewählten Luftspaltflussdichte muss der Strombelag gewählt werden. Ein plausibles Vorgehen kann durch die Betrachtung der Verluste erfolgen. So führt die konstante Luftspaltflussdichte dazu, dass die Eisenverluste mit k^3 steigen, siehe Gleichung (4.13), was sich negativ auf das Temperaturverhalten auswirkt. Bei der Wahl des Strombelags bzw. der Stromdichte muss deshalb darauf geachtet werden, diesen Effekt nicht zu verstärken. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, den Strombelag konstant zu halten. Dies lässt die Leistung der Maschine proportional zu k^3 wachsen.

4.3.2. Leiterzahlanpassung und deren Auswirkung

Die letzten Abschnitte haben gezeigt, dass es aufgrund der gegebenen Randbedingungen erforderlich ist, die Maschine in diskreten Baugrößen zu skalieren. Es wurde ein Wachstumsansatz mit einer Proportionalität der Maschinenleistung zum Volumen favorisiert, d.h. $P \sim k_{vol} \sim k^3$ (Kopplungsweg 1 in Abbildung 1.5). Durch die einzelnen Baugrößen der Maschine verringert sich der Suchraum der energetisch optimalen Maschine. In manchen Fällen kann festgestellt werden, dass sich nur noch eine Maschinengröße im energetisch sinnvollen Bereich der energetischen Analyse des Triebstrangs befindet, siehe Abbildung 4.2. Hierbei wurde die Abbildung 3.16 aus Abschnitt 3.5 mit den diskreten Maschinengrößen aus Tabelle 4.2 überlagert.

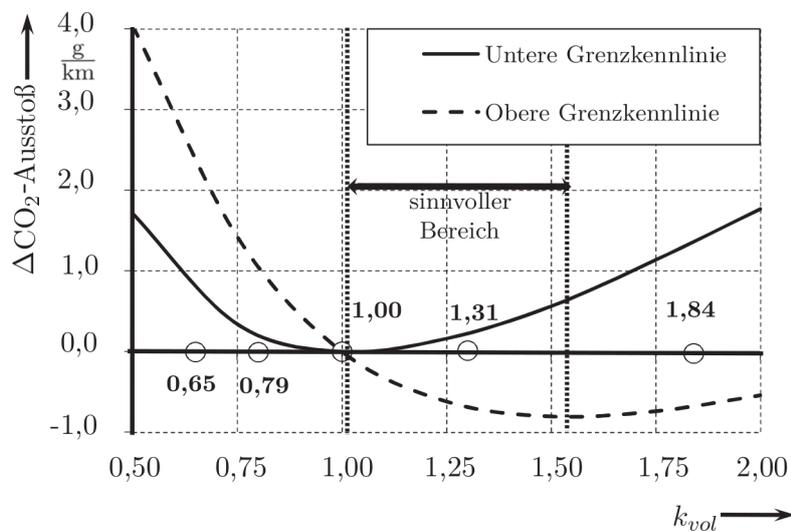


Abbildung 4.2.: Obere und untere Grenzkennlinie mit diskreten Skalierungsfaktoren bei einem Compact-Fahrzeug bei hoher Bordnetzlast

Es ist zu erkennen, dass sich im energetisch sinnvollen Bereich der Maschinengröße nur der Skalierungsfaktor 1,31 befindet. Für diesen Fall konnten alle anderen Maschinengrößen ausgeschlossen werden, und der Beweis über das Optimum gelingt indirekt (Beweis durch Ausschluss). In Abbildung 1.5 ist dies durch den Pfeil abgehend vom Block „Wachstumsgesetze der elektrischen Maschine“ hin zum Ziel „Optimum gefunden“ gekennzeichnet.

Dennoch tritt auch der Fall auf, dass mehrere Maschinengrößen das Potential haben, energetisch optimal zu sein. Dies zeigt die Abbildung 4.3. Hier wurde ein Compact-Fahrzeug bei geringer Bordnetzlast im WLTC untersucht. In diesem Fall bleibt die Entscheidung zwischen einer Maschine, die um den Faktor $k_{vol} = 1,31$ vergrößert wurde, und der Basismaschine ($k_{vol} = 1,0$).

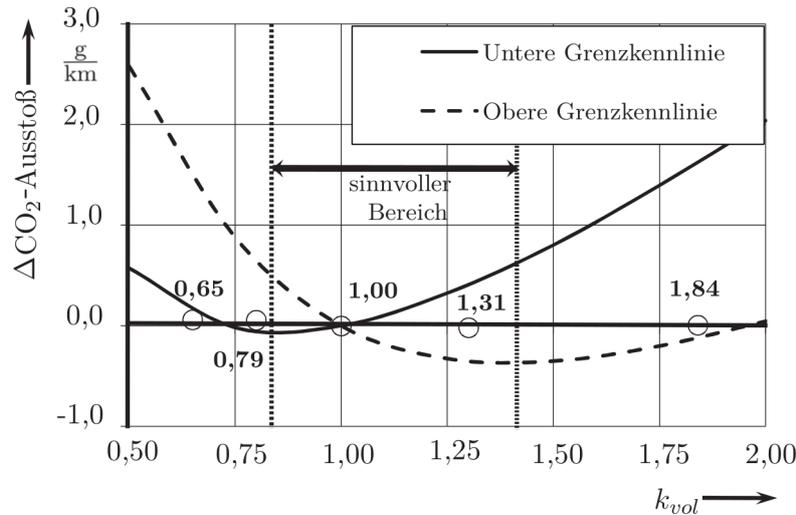


Abbildung 4.3.: Obere und untere Grenzkennlinie mit diskreten Skalierungsfaktoren bei einem Compact-Fahrzeug im WLTC bei geringer Bordnetzlast

Eine Übersicht der potentiell optimalen Maschinengrößen für weitere Fahrzeuge und Fahrzyklen zeigt die Tabelle 4.3.

Fahrzeug	Hohe Bordnetzlast				Niedrige Bordnetzlast				
	NEFZ		WLTC		NEFZ		WLTC		
SComp	0,54	0,65	0,79	0,65	0,79	0,65	0,54	0,65	0,79
Compact	1,0	1,31		1,31		1,0	1,31	1,0	1,31
SUV		1,31	1,84	1,31	1,84	1,31			1,31

Tabelle 4.3.: Potentiell optimale Maschinengrößen oder ggf. optimale Maschinengröße

Im Falle, dass mehrere Baugrößen der Maschinen im energetisch sinnvollen Bereich liegen, muss eine Gesamtsimulation des Fahrzeugs eingesetzt werden, um eine Entscheidung zwischen den Maschinengrößen zu ermöglichen. Das genaue Vorgehen wird in Kapitel 6 beschrieben.

Um valide Simulationen des Fahrzeugs zu ermöglichen, muss eine detaillierte Abbildung der elektrischen Maschine in Kennfeldern erfolgen. Ein entsprechendes Vorgehen zeigt das kommende Kapitel.

5. Modellierung der elektrischen Maschine

Der Betrieb der elektrischen Maschine lässt sich in den aktiven Betrieb und den Schleppbetrieb unterteilen. Der aktive Betrieb ist dadurch gekennzeichnet, dass die Statorwicklung und die Erregerwicklung bestromt sind. Hingegen findet im Schleppbetrieb keine Bestromung statt.

5.1. Berechnung der Schleppverluste der elektrischen Maschine

Die Schleppverluste entstehen zum einen durch das Drehen des Lüfterrads, welches direkt am Rotor angebracht ist, siehe Abbildungen 5.1 und 5.2. Zum anderen treten Eisenverluste in der Maschine auf, da die Maschine neben der abschaltbaren elektrischen Erregung auch eine permanente Erregung durch Magnete besitzt. Durch die Permanentmagnete kommt es stets zu einem magnetischen Fluss über den Luftspalt, was wiederum zu Verlusten im Eisen führt. Die Verluste durch das Schleppen der elektrischen Maschine sind charakteristisch für das untersuchte Gesamtsystem und fließen deshalb in die energetische Betrachtung des Triebstrangs nach Kapitel 3 ein. Dies wurde in Abbildung 1.5 durch den Kopplungsweg 4 kenntlich gemacht.



Abbildung 5.1.: Aufnahme des Rotors

Im Folgenden werden die Verluste durch das Drehen des Lüfterrads genauer untersucht. Zur Berechnung der elektromagnetischen Verluste wird ein iteratives Verfahren vorgeschlagen.

5.1.1. Verluste durch das Lüfterrad

Die beidseitig am Rotor angebrachten Lüfterräder saugen Luft zur Kühlung der elektrischen Maschine an. Die Luft wird axial durch die Lagerschilde geführt, über die Wickelköpfe geleitet und anschließend radial durch die Lüftungsschlitze abgeblasen. Zur Erfassung dieses komplexen

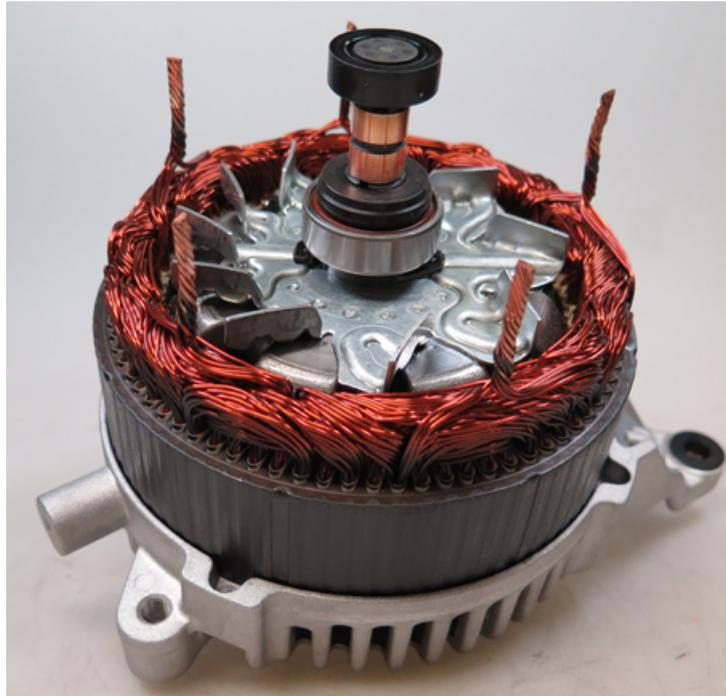


Abbildung 5.2.: Aufnahme des Rotors im Blechpaket des Stators

Vorgangs werden Messungen herangezogen, um die Betriebseigenschaften zu charakterisieren. Die gemessene Leistungskennlinie in Abhängigkeit der Drehzahl zeigt die Abbildung 5.3.

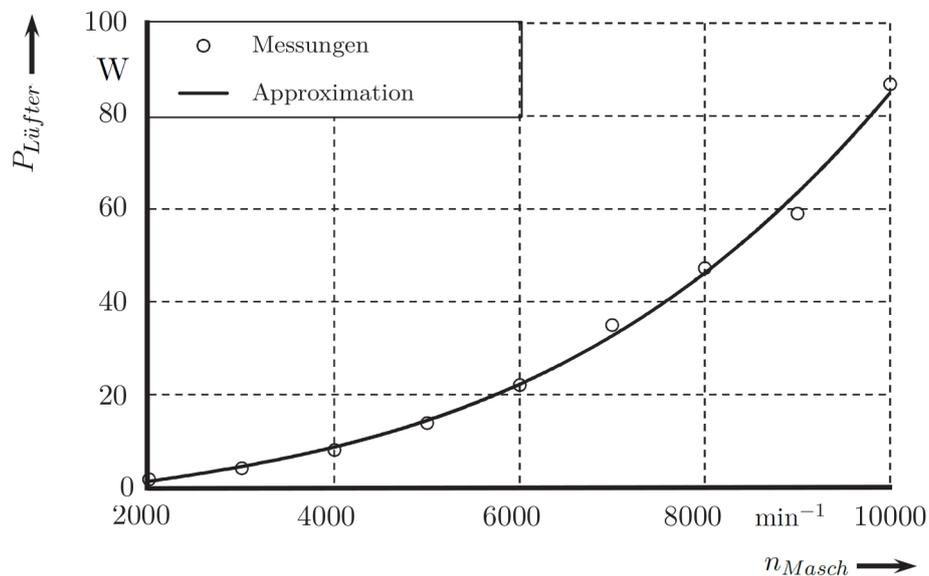


Abbildung 5.3.: Leistungskennlinie des Lüfters in Abhängigkeit von der Drehzahl

Nach [82] gilt für die Leistung in Abhängigkeit von der Drehzahl der Zusammenhang in Gleichung (5.1), wobei in der Konstanten c die Bauart und die Gestaltung des Lüferrades enthalten sind.

$$P_{Lüfter} = c \cdot \rho_{Luft} \cdot D_{Lüfter}^5 \cdot n_{Masch}^3 \quad (5.1)$$

In Gleichung (5.1) ist $D_{Lüfter}$ der Durchmesser des Lüfterrades, ρ_{Luft} entspricht der Luftdichte, und n_{Masch} gibt die Drehzahl wieder. Für elektrische Maschinen unterschiedlicher Baugröße verändern sich auch die Abmessungen des Lüfterrades. Nach Gleichung (5.1) verändert sich die Leistung des Lüfterrades mit k^5 , siehe Gleichung (5.2).

$$P_{Lüfter} \sim \rho_{Luft} \cdot D_{Lüfter}^5 \cdot n_{Masch}^3 \sim k^5 \quad (5.2)$$

Neben den eben beschriebenen Schleppverlusten durch das Lüfterrad kommt es auch zu elektromagnetischen Schleppverlusten in der Maschine.

5.1.2. Elektromagnetische Schleppverluste

Im Schleppbetrieb der Maschine ist die elektrische Erregung abgeschaltet, dennoch führen die Permanentmagnete zu einem Fluss, welcher sich zu einem großen Teil über den Polkern der Maschine schließen kann. Über die Polflächen A und B in Abbildung 5.4 gelangt dennoch ein Teil des Flusses über den Luftspalt in den Stator und führt somit zu Eisenverlusten.

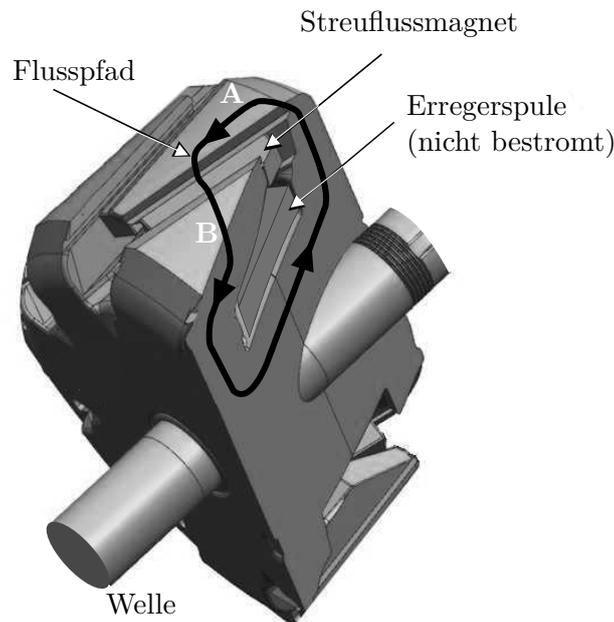


Abbildung 5.4.: Schnitt durch den Rotor der Klauenpolmaschine mit eingezeichnetem Flusspfad im nichterregten Zustand

In Rotor und Stator treten somit die folgenden Verluste auf:

- Hysterese- und Wirbelstromverluste im Statorjoch und in den Statorzähnen der Maschine
- Wirbelstromverluste auf der Oberfläche der Rotorklauen aufgrund der Nutung des Stators

Eisenverluste im Statorjoch und in den Statorzähnen der Maschine Um diese Verluste zu erfassen, wird auf die Steinmetz-Gleichungen zurückgegriffen. Diese lauten für das Joch bzw. für die Zähne der Maschine, wie in Gleichung (5.3) und Gleichung (5.4) angegeben.

$$P_j = m_{S,j} \cdot B_j^2 \cdot 1,8 \cdot \left(\sigma_h \cdot \frac{f}{50 \text{ Hz}} + \sigma_{wb} \cdot \left(\frac{f}{50 \text{ Hz}} \right)^2 \right) \quad (5.3)$$

$$P_z = m_{S,z} \cdot B_z^2 \cdot 1,8 \cdot \left(\sigma_h \cdot \frac{f}{50 \text{ Hz}} + \sigma_{wb} \cdot \left(\frac{f}{50 \text{ Hz}} \right)^2 \right) \quad (5.4)$$

Hierin sind, wie aus der Literatur bekannt, die Wirbelstromverluste quadratisch und die Hystereseverluste linear über der Frequenz gewichtet. Der Faktor von 1,8 berücksichtigt mehrere Effekte von Zusatzverlusten im Eisen [80]. Diese Faktoren rühren z.B. von Oberwellen in den Flussdichten her. Weitere Effekte sind rotierende Flussdichten im Joch sowie Veränderungen der magnetischen Eigenschaften durch die Bearbeitung des Materials. Die Faktoren σ_h und σ_{wb} sind durch den Epstein-Apparat für das verwendete Blech bestimmt. Die Massen des Statorjochs bzw. des Statorzahns sind durch $m_{S,j}$ bzw. $m_{S,z}$ gekennzeichnet.

Um die Verluste in der Maschine angeben zu können, müssen die Flussdichten im Joch B_j und B_z in der Zahnmitte bekannt sein. Hierzu wird eine iterative Vorgehensweise vorgeschlagen. Dies hat den Vorteil, dass keine langen Simulationszeiten, wie zum Beispiel bei FEM-Berechnungen, in Kauf genommen werden müssen. Weitere Verluste sind auf das massive Eisen des Rotors zurückzuführen, siehe folgender Abschnitt.

Wirbelstromverluste auf der Oberfläche der Rotorklauen aufgrund der Nutung des Stators (Nutungsoberwelle) Die Nutung des Stators führt zu einer Flussbündelung auf den gegenüberliegenden massiven Klauenfingern. Wobei dieser Effekt in [80] als Nutungsoberwelle bezeichnet wird. Bei Bewegung des Rotors werden Wirbelströme induziert, welche zu Verlusten führen. Nach [80] können die Wirbelstromverluste nach Gleichung (5.5) bestimmt werden.

$$P_0 = k_0 \cdot (Z \cdot n)^{3/2} \cdot \left(\hat{B}_n \cdot \tau_N \right)^2 \cdot A_0 \quad (5.5)$$

In Gleichung (5.5) ist n die Drehzahl und k_0 ist eine Materialkonstante, welche für Schmiedeeisen einen Wert von $23,3 \text{ W/m}^2$ annimmt [83]. Die Anzahl der Zähne entspricht Z , τ_N der Nutteilung, A_0 der Oberfläche aller Pole und \hat{B}_n ist der Spitzenwert der Nutungsoberwelle.

Die Flussdichte \hat{B}_n steht in direktem Zusammenhang zur Flussdichte im Luftspalt. Entsprechend der Gleichung (5.6) kann die Berechnung erfolgen [80].

$$\hat{B}_n = (k_c - 1) \cdot B_{max} \quad (5.6)$$

Hierbei ist k_c der Carter-Faktor und B_{max} die Flussdichte im Luftspalt, auf welche in den nächsten Abschnitten gesondert eingegangen wird.

Um die Berechnung der elektromagnetischen Schleppverluste in der Maschine durchzuführen können, müssen die folgenden Flussdichten berechnet werden:

1. die Flussdichte im Luftspalt B_{max} nach Gleichung (5.6),

2. die im Statorjoch herrschende Flussdichte B_j nach Gleichung (5.3) sowie
3. die Flussdichte im Statorzahn B_z nach Gleichung (5.4).

Iterative Bestimmung der Flussdichten im Schleppbetrieb Aufgrund der abgeschalteten elektrischen Erregung und den damit einhergehenden geringen Werten der Flussdichten können im Schleppbetrieb die folgenden Vereinfachungen getroffen werden:

- Streuflüsse werden vernachlässigt.
- Die magnetischen Spannungsabfälle in der Speiche und im Polkern sind sehr klein und werden ebenfalls vernachlässigt.

Prinzipielles Vorgehen Die Bestimmung der Flussdichten erfolgt iterativ, indem zu Beginn Initialwerte vorgegeben werden, welche gegen die Lösung konvergieren. Dabei beruht das Verfahren auf zwei Berechnungsblöcken. Zu Beginn wird aus den Initialwerten, welche u.a. eine magnetische Spannung beinhalten, ein erster Wert für die Flussdichten ermittelt. Anschließend werden die berechneten Flussdichten genutzt, um über eine Magnetkreisanalyse die magnetische Spannung, welche zur Initialisierung diente, erneut zu berechnen, siehe Abbildung 5.5. Stimmen nach einigen Iterationen die beiden Werte überein, ist das Verfahren konvergiert. Verfahren dieser Art gehen auf [80] und [84] zurück.

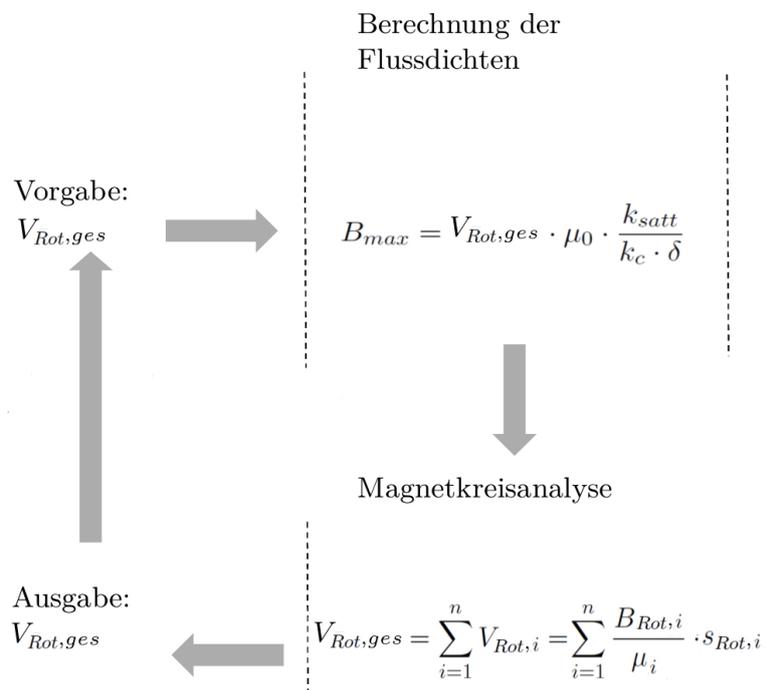


Abbildung 5.5.: Vorgehen zur Berechnung der Flussdichten

In den beiden Berechnungsblöcken kommen die Grundgleichungen der elektrischen Maschinen zum Einsatz, welche auf der Grundwellenverkettung basieren [80], [83], [85]. Oberwellen und deren Effekte werden getrennt erfasst.

Im ersten Schritt erfolgt die Berechnung der Flussdichten u.a. über die Vorgabe des magnetischen Spannungsabfalls des gesamten Rotors $V_{Rot,ges}$. Um von der magnetischen Spannung auf die Flussdichten zu schließen, wird in [80], [84] und [85] ein sog. Sättigungsfaktor benutzt.¹¹ Mit diesen Angaben kann ein erster Wert für die Flussdichte B_{max} im Luftspalt gefunden werden. Durch die geometrischen Abmessungen der Maschine lässt sich ebenfalls ein erster Wert für die weiteren Flussdichten, z.B. im Zahn oder im Joch, finden.

Im zweiten Schritt erfolgt eine Rückrechnung der magnetischen Rotorspannung aus den Flussdichten des ersten Schritts. Um die Rückrechnung auf die magnetische Spannung des Rotors zu ermöglichen, erfolgt eine Magnetkreisanalyse in der Form: $V_{Rot,ges} = \sum_{i=1}^n V_{Rot,i} = \sum_{i=1}^n H_{Rot,i} \cdot s_{Rot,i} = \sum_{i=1}^n B_{Rot,i} / \mu_i \cdot s_{Rot,i}$.

Nach dem ersten Durchlauf der Magnetkreisberechnung steht ein neuer Wert als Spannungsabfall des Rotors $V_{Rot,ges,i}$ zur Verfügung, welcher in der zweiten Iteration als neuer Vorgabewert im ersten Berechnungsblock verwendet wird. Nun werden die eingesetzten Gleichungen und das Procedere im Detail erläutert.

Berechnung der Flussdichten Die Berechnung der nötigen Flussdichten B_{max} , B_z sowie B_j aus der Aufzählung auf Seite 56 erfolgt in den nächsten Abschnitten. Begonnen wird mit der Berechnung der Flussdichte im Luftspalt, gefolgt von der Berechnung der Flussdichte im Zahn und im Joch.

Luftspaltflussdichte Mit dem Initialwert der magnetischen Rotorspannung ergibt sich mit k_{satt} und k_c sofort ein erster Wert für B_{max} , siehe Gleichung (5.7), [80].

$$B_{max} = V_{Rot,ges} \cdot \mu_0 \cdot \frac{k_{satt}}{k_c \cdot \delta} \quad (5.7)$$

Zur Berechnung des Carter-Faktors k_c :

Aufgrund der Nutung des Stators kommt es zu einer Schwankung der Flussdichte im Luftspalt. Direkt unter dem Zahn wird eine höhere Flussdichte erreicht als unter der Nut, was durch den Carter-Faktor berücksichtigt wird, siehe Abbildung 5.6. Der Mittelwert aus dieser Schwankung stellt B_{max} dar.

Die Berechnung des Carter-Faktors erfolgt durch die Gleichungen (5.8) und (5.9) nach [80].

$$k_c = \frac{\tau_N}{\tau_N - \gamma \cdot b_s} \quad (5.8)$$

$$\gamma = \frac{1}{1 + 5 \cdot \frac{\delta}{b_s}} \quad (5.9)$$

In den Gleichungen (5.8) und (5.9) ist die Nutbreite durch b_s gekennzeichnet, γ stellt eine Hilfsgröße zur Berechnung von k_c dar.

¹¹Bei Klauenpolmaschinen ist es nötig einen Sättigungsfaktor für die d-Achse und für die q-Achse einzuführen.

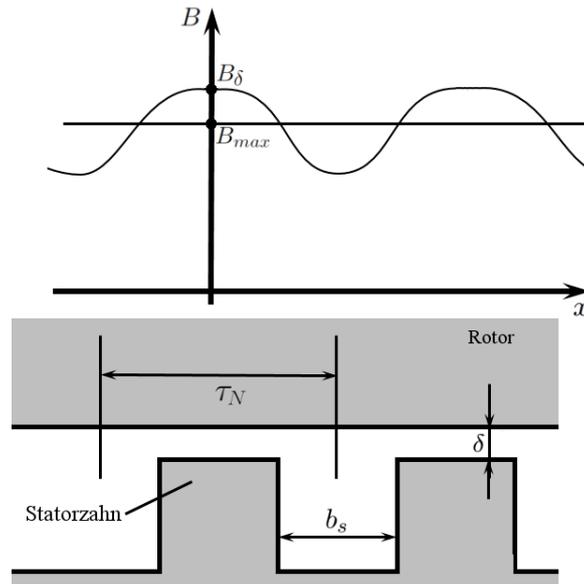


Abbildung 5.6.: Übersicht der geometrischen Parameter zur Berechnung des Carter-Faktors

Zur Berechnung von k_{satt} :

Den Sättigungsgrad k der Maschine definiert [85] als das Verhältnis der magnetischen Gesamtspannung der Ständer und Läuferzähne zur magnetischen Spannung im Luftspalt, siehe Gleichung (5.10).

$$k = \frac{V_{z1} + V_{z2}}{V_{\delta}} \quad (5.10)$$

Allerdings ist es für die Berechnung der Klauenpolmaschine zweckmäßig, den Sättigungsfaktor k_{satt} in Gleichung (5.7) in die d- und q-Achse aufzutrennen, da diese Maschine ein ausgeprägtes Schenkelpolverhalten aufweist. Eine Einführung in die Berechnung von Sättigungsfaktoren gibt [84]. Hier werden Verfahren vorgestellt, welche es ermöglichen, abschnittsweise die Sättigung der Maschine zu berechnen.

Diese Sättigungsfaktoren müssen in jedem Betriebspunkt der Maschine bestimmt werden, d.h. bei jeder vorgegebenen magnetischen Spannung des Rotors $V_{Rot,ges}$ werden auch die Sättigungsfaktoren in die d- und q-Richtung neu bestimmt.

Zahnflussdichte Zur Bestimmung der Zahnflussdichte muss das Luftspaltfeld weiter analysiert werden. Durch die Sättigung des Eisens kommt es zu einer Abplattung des sinusförmigen Verlaufs der Flussdichte im Luftspalt, siehe Abbildung 5.7. Daraus ergibt sich ein geringerer Spitzenwert, welcher durch den Abplattungsfaktor $\alpha_p(k)$ nach [85] beschrieben ist.

In Gleichung (5.11) ist B_m der Mittelwert der Flussdichte im Luftspalt, welcher sich gleichmäßig über den kompletten Pol der Maschine erstreckt.

$$B_m = \frac{B_{max}}{\alpha_p(k)} = V_{Rot,ges} \cdot \mu_0 \cdot \frac{k_{satt}}{k_c \cdot \alpha_p(k_{satt}) \cdot \delta} \quad (5.11)$$

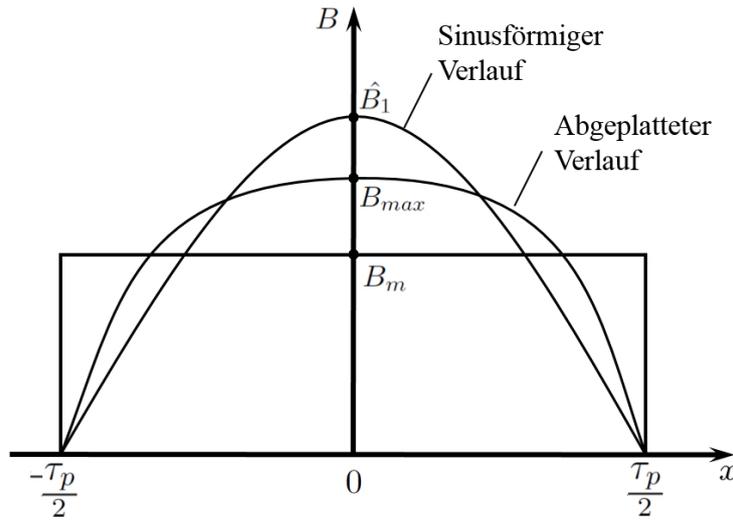


Abbildung 5.7.: Definition der Flussdichten nach [80]

Der Abplattungsfaktor ist abhängig vom Sättigungsfaktor k_{satt} der Maschine. In [80] bzw. in [85] wird eine Kurve angegeben, aus welcher der Zusammenhang zwischen dem Sättigungsgrad und dem Abplattungsfaktor entnommen werden kann. Entsprechend kann mit den Gleichungen (5.7) bis (5.11) die mittlere Luftspaltflussdichte B_m berechnet werden, welche einen rechteckigen Verlauf am Umfang der Maschine aufweist, siehe Abbildung 5.7. Der vorgeschlagene Ansatz beruht auf der Grundwellenverkettung, daher ergibt sich \hat{B}_1 zur Gleichung (5.12).

$$\hat{B}_1 = \frac{4}{\pi} \cdot B_m \quad (5.12)$$

Mit dem bekannten Spitzenwert der Luftspaltflussdichte ergibt sich der Spitzenwert der Flussdichte im Zahn zum Zusammenhang in Gleichung (5.13), welcher nach der Aufzählung auf Seite 56 gesucht ist.

$$\hat{B}_z = \hat{B}_1 \cdot \frac{\tau_N \cdot l_i}{l_{Fe} \cdot k_{Fe} \cdot b_z} \quad (5.13)$$

Dabei entspricht b_z der mittleren Zahnbreite.

Hinweis: Der Zusammenhang in Gleichung (5.13) stellt streng genommen eine Approximation der Zahnflussdichte B_z dar. Die Abbildung 5.8 zeigt den Verlauf der Grundwelle über den Zähnen des Stators. Es ist zu erkennen, dass sich die Flussdichte über der Nutteilung τ_N ändert und der Spitzenwert \hat{B}_1 nicht der mittleren Flussdichte im Zahn entspricht. Im vorliegenden Fall kann dieser Effekt in guter Näherung vernachlässigt werden, da sehr viele Nuten über einem Pol liegen. Es gilt: $\hat{B}_1 \approx \hat{B}_{1*}$. Nimmt die Nutteilung einen großen Teil der Polteilung ein, sollte der Effekt berücksichtigt werden. Im Allgemeinen ergibt sich der Zahnfluss aus Integration der Luftspaltflussdichte über eine Nutteilung.

Jochflussdichte Das Joch muss den halben Fluss tragen, der je Pol über den Luftspalt tritt. Der Fluss vom Rotor zum Stator kann über die Integration des Flussdichteverlaufes erfolgen, welcher maßgeblich durch die Beschaffenheit des Pols geprägt ist. Die Berücksichtigung der

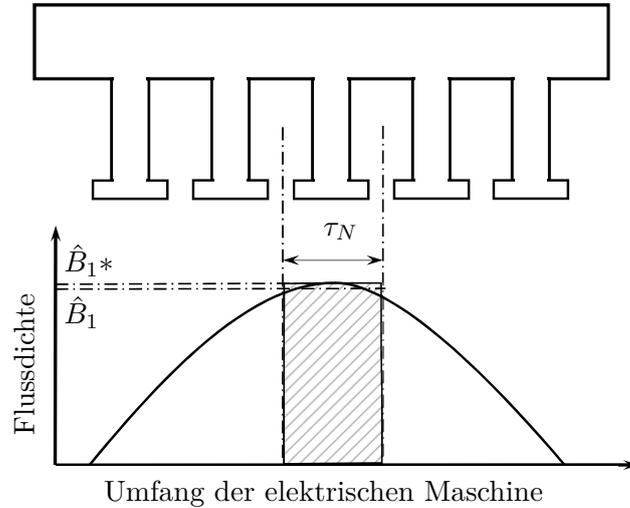


Abbildung 5.8.: Zusammenhang zwischen dem Luftspaltfluss und dem Zahnfluss

Polbeschaffenheit kann über sog. Polformfaktoren erfolgen. Die Berechnung des im Folgenden eingesetzten Polformfaktors stützt sich auf Verfahren in [80], [84] und [86]. Der eingeführte Polformfaktor C_{ed} ermöglicht die Umrechnung zwischen der mittleren Flussdichte B_m und der Amplitude der Grundwelle der Luftspaltflussdichte, siehe Gleichung (5.14).

$$\hat{B}_1 = C_{ed} \cdot B_m \quad (5.14)$$

Mit der Integration über eine Polteilung ergibt sich der Grundwellenfluss Φ_1 , siehe Gleichung (5.15). Dabei nimmt der Polformfaktor Werte $\leq 4/\pi$ an.

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= l_i \cdot p \int_{-\tau_p/2}^{+\tau_p/2} C_{ed} \cdot B_m \cdot \cos\left(x \cdot \frac{\tau_p}{\pi}\right) dx \\ &= \frac{2}{\pi} \cdot p \cdot C_{ed} \cdot B_m \cdot l_i \cdot \tau_p \end{aligned} \quad (5.15)$$

Die Jochflussdichte ergibt sich aus dem Luftspaltfluss Φ_1 zu dem in Gleichung (5.16) gezeigten Zusammenhang. Hierin ist h_j die Ständerjochhöhe.

$$B_j = \frac{\Phi_1}{2 \cdot p \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe} \cdot h_j} \quad (5.16)$$

Mit den Gleichungen (5.7), (5.13) und (5.16) sind die nötigen Flussdichten bekannt, welche zur Berechnung der Eisenverluste dienen, vgl. Aufzählung Seite 56. Nach der Abbildung 5.5 muss noch die Magnetkreisanalyse stattfinden, um das Verfahren zu komplettieren. Diese Analyse wird im folgenden Abschnitt gezeigt.

Magnetkreisanalyse Im vorausgegangenen Abschnitt wurden die Flussdichten dargestellt, welche für die Verlustberechnung benötigt werden. Um den Initialwert ($V_{Rot,ges}$) erneut zu erhalten, erfolgt die Magnetkreisberechnung über eine Summation in der Form: $V_{Rot,ges} = \sum V_{Rot,i} = \sum H_{Rot,i} \cdot s_{Rot,i} = \sum B_{Rot,i} / \mu_i \cdot s_{Rot,i}$. Die Abbildung 5.9 zeigt die einzelnen magnetischen Spannungsabfälle in der Maschine sowie das daraus folgende Ersatzschaltbild.

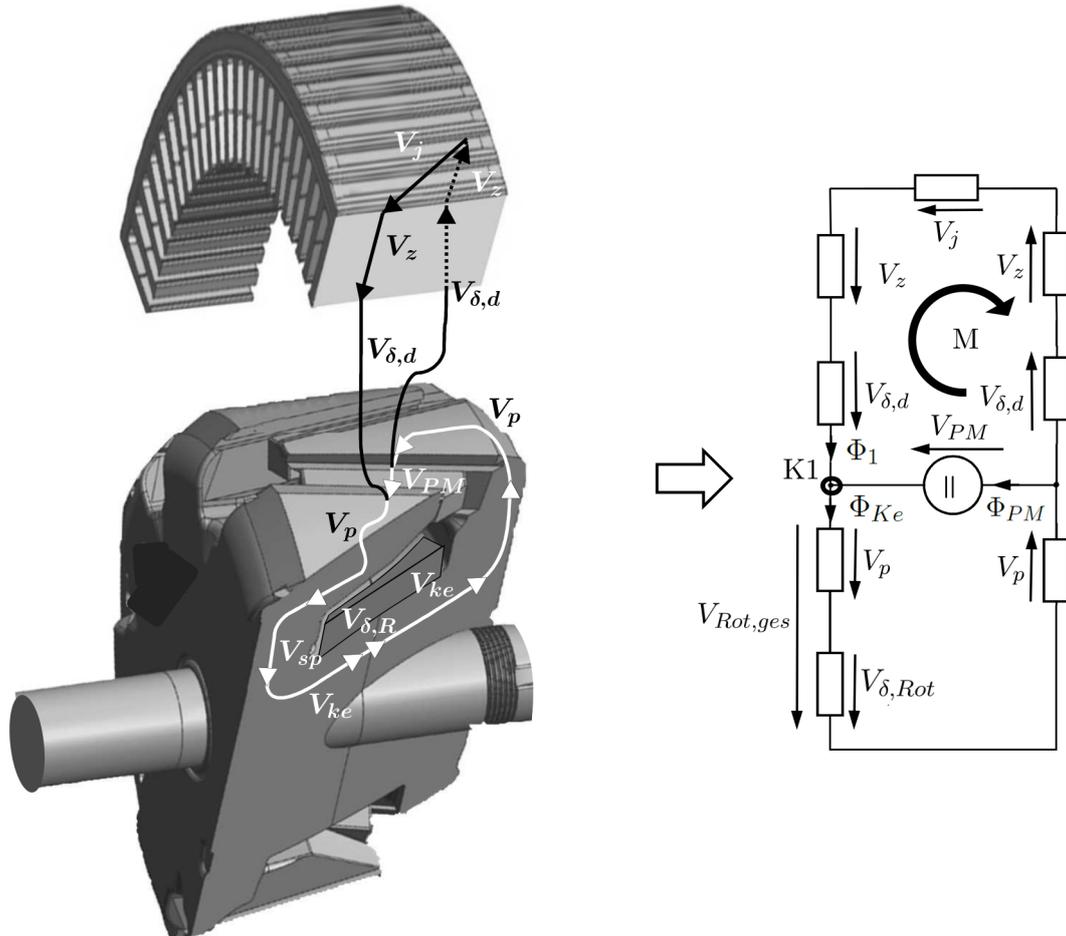


Abbildung 5.9.: Magnetisches Ersatzschaltbild

Im Stator treten die Spannungsabfälle V_z im Zahn und die Spannungsabfälle V_j im Joch auf. Das Luftspaltfeld wird in die d- und q-Achse zerlegt, ausschlaggebend im Leerlauf ist jedoch nur der magnetische Spannungsabfall in d-Richtung. Die Feldlinien verlassen den Pol in diesem Fall genau in der Mitte.

Die Pole weisen den Spannungsabfall V_p auf, welcher direkt an den Spannungsabfall des Luftspaltes gekoppelt ist. Die Speichen sowie der Kern des Rotors sind so massiv ausgeführt, dass bei den untersuchten Flussdichten im Leerlauf keine nennenswerten magnetischen Spannungsabfälle erzeugt werden ($V_{sp} \approx 0$, $V_{ke} \approx 0$). Der gesuchte magnetische Spannungsabfall des Rotors $V_{Rot,ges}$ setzt sich aus dem Spannungsabfall der Pole V_p und dem sekundären Luftspalt $V_{\delta,Rot}$ zusammen, vgl. Abbildung 5.9. Um $V_{Rot,ges}$ zu bestimmen, müssen alle Spannungsabfälle im Ersatzschaltbild berechnet werden. Im Folgenden werden zuerst die Spannungsabfälle im Luftspalt und im Stator beschrieben. Danach erfolgt die Beschreibung der Spannungsabfälle im Rotor. Den magnetischen Spannungsabfall über dem Luftspalt zeigt die Gleichung (5.17).

$$V_{\delta,d} = k_c \cdot \alpha_p(k_{satt}) \cdot \frac{\delta}{\mu_0} \cdot B_m \quad (5.17)$$

Um den Einfluss der Nutung sowie der Sättigung auf das Abplatteln des Flussdichteverlaufs zu berücksichtigen, werden in Gleichung (5.17) der Abplattungsfaktor sowie der Carter-Faktor verwendet.

In der Luft kann der magnetische Spannungsabfall über einen linearen Zusammenhang zwischen der magnetischen Feldstärke und der Flussdichte berechnet werden. Im Eisenteil der Maschine müssen hingegen Sättigungseigenschaften des Eisens berücksichtigt werden. Hierzu wird der Zusammenhang zwischen dem magnetischen Feld H und der Flussdichte B als Magnetisierungskurve in der Form $H = f(B)$ dargestellt. Mit den geometrischen Abmessungen des Zahns und der Zahnflussdichte nach der Gleichung (5.13) kann der magnetische Spannungsabfall am Zahn ermittelt werden, siehe Gleichung (5.18). In dieser werden die Feldstärken unterschiedlich gewichtet und anschließend aufsummiert [80]. Dies entspricht einer Integration längs des Zahns (Simpsonsche Fassgleichung).

$$V_z = \frac{h_z}{6} \cdot (H_z(0) + 4 \cdot H_z(h_N/2) + H_z(h_N)) \quad (5.18)$$

Der magnetische Spannungsabfall im Joch V_j berechnet sich aus der Gleichung (5.19), die Flussdichte B_j wird unter Kenntnis der mittleren Feldlinienlänge l_j im Joch aus Gleichung (5.16) entnommen.

$$V_j = H_j(B_j) \cdot l_j \quad (5.19)$$

Durch die Gleichungen (5.18) und (5.19) ergibt sich der magnetische Spannungsabfall im Stator der Maschine. Wird zu diesem noch der Spannungsabfall im Luftspalt addiert, erhält man den Spannungsabfall zwischen den Klauenfingern V_{PM} , siehe Masche M in Abbildung 5.9. Für diesen gilt die Gleichung (5.20).

$$V_{PM} = 2 \cdot (V_{\delta,d} + V_z) + V_j \quad (5.20)$$

Die Abbildung 5.10 zeigt zwei der Rotorklauen und einen Permanentmagneten dazwischen. Im regulären Betrieb der Maschine, d.h. bei bestromter Erregerwicklung, wirkt der Permanentmagnet dem Streufluss zwischen den Klauenfingern entgegen. Jedoch wirkt im Schleppbetrieb der Maschine dieser als Quelle in den Maschen des Ersatzschaltbildes der Abbildung 5.9.

Bei dem vorgestellten Procedere wird der magnetische Spannungsabfall des Rotors $V_{Rot,ges}$ iteriert, bis dieser konvergiert. Während dieses Prozesses kann es zu hohen Werten von $V_{Rot,ges}$ kommen. Aus diesen hohen Werten kann sich ein Fluss ergeben, der den Fluss des Permanentmagneten übertrifft. Aus diesem Grund besteht die Gleichung (5.21) aus zwei Teilen. Zum einen wird der Fluss $\Phi_{\sigma,p}$ gegen den Permanentmagneten berücksichtigt. Zum anderen kommt es zu einem Fluss aus dem Permanentmagneten Φ_{mag} selbst.

$$\begin{aligned} \Phi_{PM} &= \Phi_{mag} - \Phi_{\sigma,p} \\ &= \Phi_{mag} - k_{kl} \cdot 2 \cdot p \cdot \left(1 + \frac{l_{\sigma,p}}{h_{kl}}\right) \cdot A_{\sigma,rot} \cdot \mu_0 \cdot \frac{V_{PM}}{l_{\sigma,p}} \end{aligned} \quad (5.21)$$

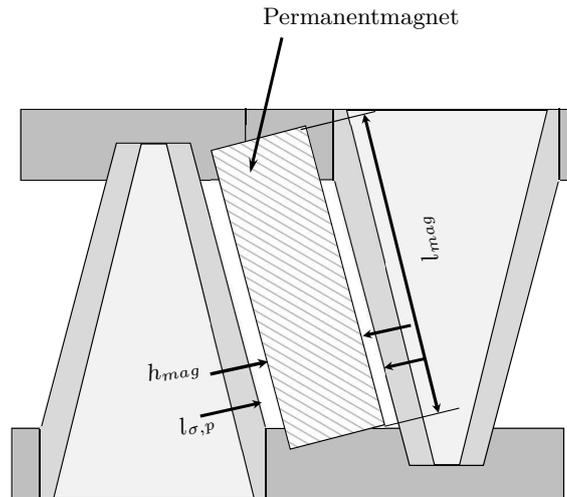


Abbildung 5.10.: Finger der Klauenpolmaschine mit eingelegtem Permanentmagnet und Bemessung

Der Fluss $\Phi_{\sigma,p}$ kann aus den geometrischen Abmessungen der Klauenfinger erfolgen, siehe hierzu Abbildung 5.10 und Abbildung 5.11.

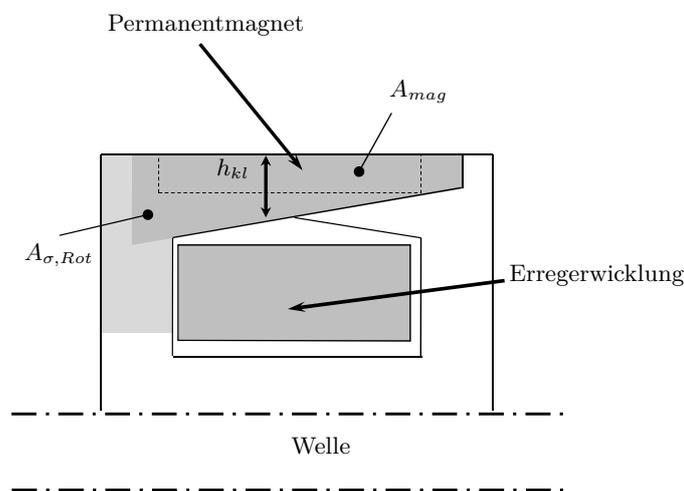


Abbildung 5.11.: Axialer Schnitt durch den Rotor (nur eine Hälfte dargestellt)

Der Permanentmagnet ist zwischen den Klauenfingern eingebettet. Die tatsächliche Beschaffenheit der Klauengeometrie und deren Interaktion mit dem Permanentmagneten ist schwer zu beschreiben. Aus diesem Grund wird der Faktor k_{kl} in Gleichung (5.15) eingeführt, um parasitäre Effekte zu berücksichtigen. Näherungsweise kann der Wert von $k_{kl} = 0,8$ eingesetzt werden, welcher sich aus Erfahrungen und Voruntersuchungen ergibt. Der Fluss des Permanentmagneten Φ_{mag} ergibt sich aus den Abmessungen und der Flussdichte B_{mag} , siehe Gleichung (5.22).

$$\Phi_{mag} = 2 \cdot p \cdot B_{mag} \cdot A_{mag} \quad (5.22)$$

Wobei sich die Flussdichte des Magneten aus der temperaturabhängigen Remanenz des Magneten B_{rT} berechnen lässt, siehe Gleichung (5.23).

$$B_{mag} = B_{rT}(\vartheta) \cdot \frac{h_{mag}}{\mu_r \cdot (l_{\sigma,p} - h_{mag}) + h_{mag}} \quad (5.23)$$

Mit der Addition des Flusses Φ_{PM} aus Gleichung (5.21) und dem Fluss Φ_1 aus Gleichung (5.15) kann der Gesamtfluss bestimmt werden, der durch den Kern der Maschine verläuft, siehe K1 in Abbildung 5.9 bzw. Gleichung (5.24).

$$\Phi_{Ke} = \Phi_1 + \Phi_{PM} \quad (5.24)$$

Der Fluss in den Klauenfingern nimmt von der Klauenspitze zur Klauenwurzel zu. Entsprechend erhöht sich auch die magnetische Spannung, dadurch ergibt sich der magnetische Spannungsabfall V_p über der Klaue als Summe von Teilstücken, siehe Gleichung (5.25).

$$V_p = \sum_{i=1}^n V_{p,i} \quad (5.25)$$

Der Rotor ist aus zwei Klauenhälften gefertigt. Dies bedeutet, dass beim Fügen der Klauenhälften ein sekundärer Luftspalt im Rotor entsteht. An diesem Luftspalt im Kern des Rotors kommt es zu einem magnetischen Spannungsabfall, welcher nicht zu vernachlässigen ist. Die Gleichung (5.26) zeigt die Berechnung der Flussdichte im Rotorkern. Wobei D_{Ke} den Außendurchmesser und $D_{Rot,i}$ den Innendurchmesser des Polkerns darstellen.

$$B_{Ke} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\Phi_{Ke}}{D_{Ke}^2 - D_{Rot,i}^2} \quad (5.26)$$

Mit der so berechneten Flussdichte ergibt sich der Spannungsabfall am sekundären Luftspalt δ_{Rot} zur Gleichung (5.27).

$$V_{\delta,Rot} = \delta_{Rot} \cdot \frac{B_{Ke}}{\mu_0} \quad (5.27)$$

Der magnetische Spannungsabfall am Rotor ergibt sich aus der Addition von V_p und $V_{\delta,Rot}$, siehe Gleichung (5.28).

$$V_{Rot,ges} = 2 \cdot V_p + V_{\delta,Rot} \quad (5.28)$$

Die Gleichungen (5.7) bis (5.28) erlauben es, den gesamten magnetischen Spannungsabfall des Rotors zu berechnen. Das Vorgehen nach Abbildung 5.5 ist somit komplett, und es können die elektromagnetischen Verluste im Schlepptrieb der Maschine berechnet werden.

Ergebnisse der elektromagnetischen Verlustberechnung im Schleppbetrieb Mit den konvergierten Werten des letzten Abschnittes können die Flussdichten und somit die Verluste ermittelt werden. Die Abbildung 5.12 zeigt die berechneten Verluste in Abhängigkeit der Drehzahl für die in Tabelle 4.2 aufgeführten Maschinengrößen.

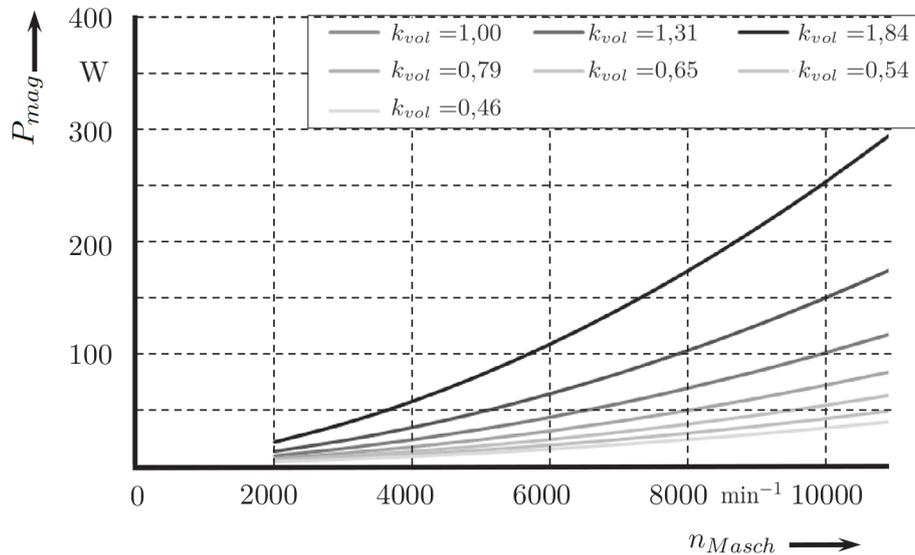


Abbildung 5.12.: Magnetische Schleppverluste in Abhängigkeit der Drehzahl und der Maschinenskalierung k_{vol}

5.1.3. Gesamtschleppverluste der elektrischen Maschine

In Abbildung 5.13 sind die berechneten und gemessenen Schleppverluste der Basismaschine dargestellt. Die magnetischen Schleppverluste sind durch Dreiecke gekennzeichnet. Die mit einem + gekennzeichneten Verluste durch die Lüfterräder nehmen proportional mit n^3 zu.

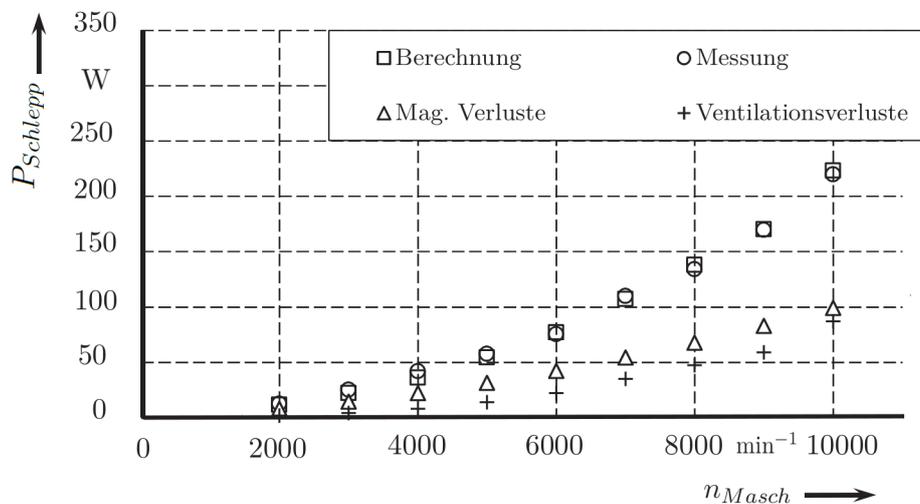


Abbildung 5.13.: Gesamte Schleppverluste in Abhängigkeit der Drehzahl der Basismaschine

Die Schleppverluste der elektrischen Maschine setzen sich aus den elektromagnetischen Schleppverlusten sowie den Verlusten durch die Lüfterräder zusammen. Bei der Berechnung beider Anteile wurden Annahmen getroffen, um eine analytische Berechnung der Schleppverluste zu erlauben. Um nicht berücksichtigte Effekte miteinzubeziehen, wird ein Korrekturfaktor von 1,2 eingeführt, siehe Gleichung (5.29).

$$P_{Schlepp} = 1,2 \cdot (P_{Lüfter} + P_{mag}) \quad (5.29)$$

Anmerkungen zum Verfahren Wird die Maschine in ihrer Baugröße verändert, ist das Verhalten des Lüfterrades und der damit verbundene Korrekturfaktor schwer einzuschätzen. Bei genauer Betrachtung der Abbildung 5.2 fällt auf, dass die einzelnen Flügel der Lüfterräder nicht symmetrisch am Umfang verteilt sind und zusätzlich in der Größe variieren.

Des Weiteren treffen die Annahmen, welche bei der Berechnung der magnetischen Schleppverluste getroffen wurden, unterschiedlich gut bei Vergrößerung bzw. Verkleinerung der Maschine zu. Aus diesen Gründen wird dem Verfahren eine Unsicherheit von $\pm 20\%$ auferlegt, welche in der energetischen Betrachtung des Triebstrangs berücksichtigt wurde, vgl. Abschnitt 3.5.

Neben dem passiven Schleppen der elektrischen Maschine muss der aktive Betrieb untersucht werden, um die Maschine richtig in dem Triebstrang abzubilden.

5.2. Aktiver Betrieb der Klauenpolmaschine

Einen zentralen Beitrag zur Analyse des aktiven Betriebs, d.h. bei bestromter Statorwicklung, leistet die Verlustberechnung der Maschine. Wenn die Verluste in jedem der Betriebspunkte bekannt sind, kann mit Hilfe der Leistungsbilanz ein Wirkungsgradkennfeld erzeugt werden. Hierbei wird dem Rechenverfahren ein Raster aus elektrischen Leistungen und Drehzahlen übergeben, woraus sich die Verluste ableiten lassen, siehe Abbildung 5.14.

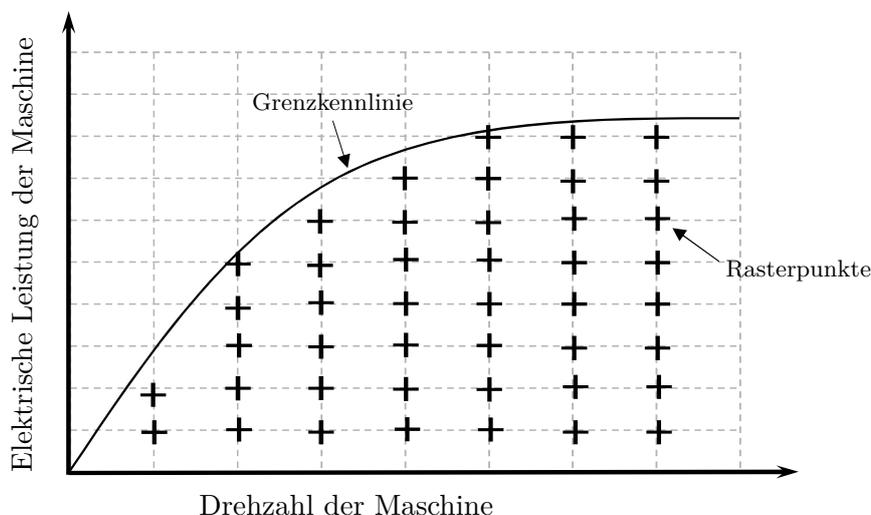


Abbildung 5.14.: Raster der untersuchten Betriebspunkte

Die Leistungselektronik stellt einen d- und einen q-Strom sowie den Erregerstrom für die Maschine. In Folge dessen wandelt die elektrische Maschine die elektrische Leistung P_{el} in eine mechanische Leistung P_{mech} um. Die Klauenpolmaschine weist ausgeprägte Verlustmechanismen auf, z.B. sind dies Wirbelströme, welche sich auf der Klauenoberfläche frei bewegen können. Des Weiteren kommt es zu hohen Strömen in der Statorwicklung, welche zu hohen Kupferverlusten führen. Diese Verlustmechanismen werden im Folgenden analysiert und so analytisch aufbereitet, dass diese skaliert werden können.

Im Rotor werden die folgenden Verlustquellen analysiert:

- Kupferverluste aufgrund der bestromten Erregerwicklung (P_{Err})
- Mechanische Verluste aufgrund der rotierenden Lüfterräder ($P_{Lüfter}$), siehe Abschnitt 5.1.1
- Eisenverluste aufgrund von Wirbelströmen auf der Oberfläche der Klauen ($P_{Fe, Rot}$)

Im Stator ergeben sich die folgenden Verluste:

- Kupferverluste aufgrund des hohen Stroms ($P_{Cu, S}$)
- Eisenverluste aufgrund von Hysterese- und Wirbelstromverlusten ($P_{Fe, S}$)

In der Elektronik werden lediglich die Verluste der MOSFETs (P_{LE}) berücksichtigt. Weitere Verluste, welche z.B. durch das Schleifringssystem oder durch die Aufbau- und Verbindungstechnik entstehen, werden vernachlässigt.¹² Die Abbildung 5.15 gibt einen Überblick der Verlustquellen und zeigt wo, diese auftreten.

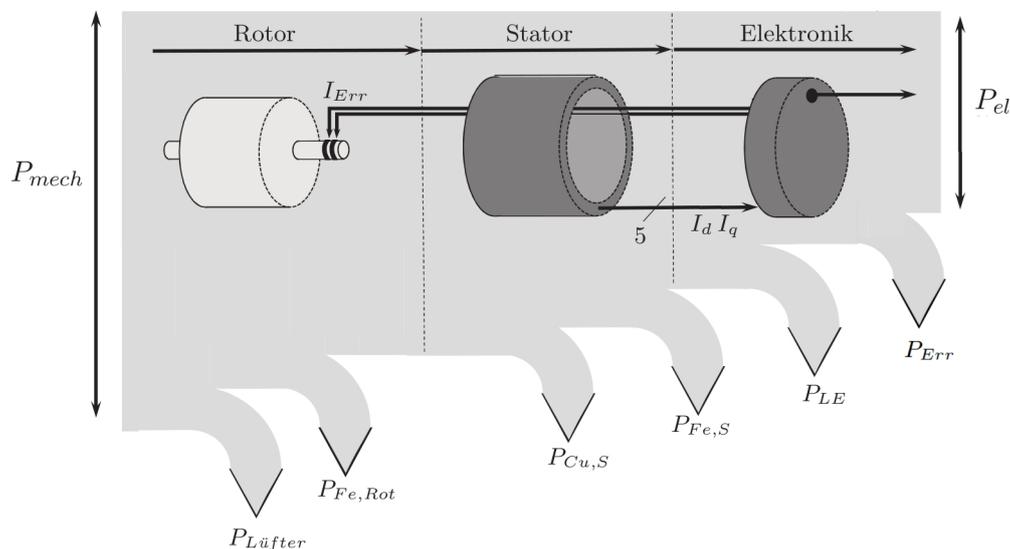


Abbildung 5.15.: Schematischer Überblick der Verluste

Die Verlustberechnung wird anhand der Basismaschine erläutert, eine Skalierung der Verluste erfolgt anschließend mit den angepassten Wicklungen sowie den geometrischen Änderungen nach Abschnitt 2.3.1.2. Begonnen wird mit der Berechnung der Verluste in der Leistungselektronik, anschließend werden die Erregerverluste betrachtet. Daraufhin werden die Kupferverluste im Stator berechnet. Die Verluste in den Eisengebieten werden am Ende des Abschnittes betrachtet.

¹²Die Verluste durch die Lagerreibung und weitere mechanische Verluste können ebenfalls vernachlässigt werden.

5.2.1. Verluste in der Leistungselektronik

Die MOSFETs im Umrichter verursachen Verluste, die sich in Schalt- und Durchgangsverluste unterscheiden lassen. Im Drehzahlbereich von Fahrzyklen dominieren die Durchgangsverluste, da sich die Maschine im Block-Betrieb befindet und die MOSFETs nicht im PWM-Takt geschaltet werden, vgl. Abbildung 2.12 auf Seite 19. Es ergibt sich der Zusammenhang in Gleichung (5.30). Hierin ist $R_{DS,ON}$ der Widerstand des MOSFETs im leitenden Zustand, m gibt die Anzahl der Stränge an und I_{1m} ist der Phasenstrom.

$$P_{LE} = m \cdot R_{DS,ON} \cdot I_{1m}^2 \quad (5.30)$$

5.2.2. Erregerverluste

Zur Erregung der Maschine wird der Rotor vom Erregerstrom durchflossen. Einerseits führt dieser zu Kupferverlusten in der Erregerwicklung, andererseits entstehen Verluste durch den Spannungsabfall U_{Δ} über die Regeleinheit, welche den Erregerstrom einstellt. Hieraus ergibt sich die Gleichung (5.31).

$$P_{Err} = U_{\Delta} \cdot I_{Err} + R_{Rot} \cdot I_{Err}^2 \quad (5.31)$$

5.2.3. Kupferverluste im Stator

In den Windungen der Statorwicklungen kommt es aufgrund der hohen Stromdichte zu erheblichen Verlusten. Für diese gilt die Gleichung (5.32), wobei sich der Widerstand R aus dem Gleichstromwiderstand und dem Widerstand aus der Stromverdrängung zusammensetzt.

$$P_{Cu,S} = m \cdot R \cdot I_{1m}^2 \quad (5.32)$$

Die Stromverdrängung herrscht primär in den Wicklungsabschnitten des Blechpakets. Natürlich kommt es auch zur Stromverdrängung in den Wickelköpfen. Diese ist dort aber deutlich geringer und gegenüber der Stromverdrängung im Bereich des Blechpakets zu vernachlässigen. Es ergibt sich aus diesen Überlegungen die Gleichung (5.33).

$$R = \frac{R_{DC}(\vartheta)}{S} \cdot \frac{k_{n,1} \cdot l_{Fe} + l_{WK}}{l_{Fe} + l_{WK}} \quad (5.33)$$

Hierin ist l_{Fe} die Eisenpaketlänge und l_{WK} die Länge des Wickelkopfs, siehe Abbildung 5.16. $R_{DC}(\vartheta)$ ist der wärmeabhängige Gleichstromwiderstand, und $k_{n,1}$ gibt die Überhöhung des Gleichstromwiderstands aufgrund der Stromverdrängung an. In Gleichung (5.32) kommt der Phasenstrom I_{1m} zum Einsatz, entsprechend wird der Widerstand durch den Schaltungsfaktor S dividiert. Dieser Faktor ermöglicht die Umrechnung zwischen Strang- und Phasengrößen.

In [80] wird ein Verfahren vorgestellt, das die Stromverdrängung analytisch ausdrückt. Dieses gilt streng genommen für rechteckige Leiter. In der Praxis werden oft runde Lackdrähte eingesetzt. Aus diesem Grund wurden die Zusammenhänge aus [80] auf Runddrähte erweitert [87]. Es gilt nach [87] der Zusammenhang in Gleichung (5.34) für $k_{n,1}$.

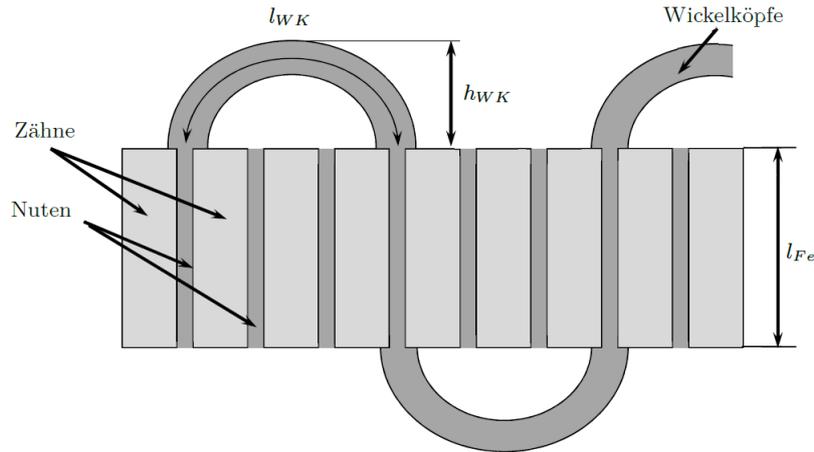


Abbildung 5.16.: Schematische Darstellung der Wickelköpfe sowie deren Bemaßung

$$k_{n,1} = \varphi(\beta) + \frac{z_h^2 - 1}{3} \cdot \Psi(\beta) \quad (5.34)$$

In der Gleichung (5.34) sind $\varphi(\beta)$ und $\Psi(\beta)$ Hilfsfunktionen, welche sich aus den Gleichungen (5.35) und (5.36) ergeben. Die Leiterzahl wird durch z_h dargestellt.

$$\varphi(\beta) = \beta \cdot \frac{\sinh(2\beta) + \sin(2\beta)}{\cosh(2\beta) - \cos(2\beta)} \quad (5.35)$$

$$\Psi(\beta) = 2\beta \cdot \frac{\sinh(\beta) - \sin(\beta)}{\cosh(\beta) + \cos(\beta)} \quad (5.36)$$

In den Gleichungen (5.35) und (5.36) entspricht β der Funktion in Gleichung (5.37).

$$\beta = D_{Cu} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{f \cdot \mu_0}{\rho_{Cu}} \cdot \sqrt{k_{Cu}}} \quad (5.37)$$

In Gleichung (5.37) ist D_{Cu} der Drahtdurchmesser, f die Frequenz ($f = p \cdot n/60$), μ_0 ist die magnetische Feldkonstante, k_{Cu} entspricht dem Kupferfüllfaktor und $\kappa_1 = \frac{1}{\rho_{Cu}}$ entspricht der spezifischen Leitfähigkeit des Kupfers.

Anmerkung Die Berechnung der Stromverdrängung in den Gleichungen (5.34) bis (5.37) bezieht sich auf die Grundwelle. Zusätzliche Stromwärmeverluste können aufgrund des Stromrippels, welcher auf das Takten des Umrichters zurückzuführen ist, entstehen. In [88] wird ein Verzerrungsstrom abgeleitet, welcher ein Maß für die zusätzlichen Kupferverluste in der Statorwicklung darstellt. Im vorliegenden Fall genügt es, die Grundwelle zu betrachten, zumal in weiten Bereichen des Kennfelds der Umrichter nicht im PWM-Betrieb agiert, siehe Abbildung 2.12.

5.2.4. Eisenverluste auf der Rotoroberfläche

Der Rotor der Klauenpolmaschine besteht aus massivem Eisen. Dies bedeutet, dass sich dort Wirbelströme ungehindert ausbreiten können. Die Wirbelströme bewegen sich auf der Oberfläche der Klauen und dringen nur wenig in das massive Eisen ein. Der Grund hierfür ist der Stromverdrängungseffekt. Dennoch können die Wirbelströme beträchtliche Werte annehmen. Die Ursachen hierfür sind:

- die Flussbündelungen durch die Nutung des Stators (Nutungsoberwellen, siehe Abschnitt 5.1.2),
- die Treppenform der Feldkurve im Luftspalt (Nutoberwellen) und
- Oberwellen durch das Drehfeld des Stators (WicklungsOberwellen).

Die Nutungsoberwellen wurden bereits im Abschnitt 5.1.2 berechnet. Der Fokus liegt im weiteren Verlauf deshalb auf den Nutoberwellen und den WicklungsOberwellen.

Nutoberwellen Nach [80] gilt zur Berechnung der Verluste durch die Nutoberwelle die Gleichung (5.38). Hierin ist N die Anzahl der Nuten und k_0 berücksichtigt Materialeigenschaften und der Faktor k_n spiegelt die realen Eigenschaften der Anordnung wieder, vgl. [83].

$$P_A = k_0 \cdot k_n (N \cdot n)^{3/2} \cdot \left(\frac{\tau_N^2 \cdot A}{\delta_0} \right)^2 \cdot A_0 \quad (5.38)$$

Die Gleichung (5.38) berücksichtigt keine Polformausführung und keine Abhängigkeit zwischen einer Bestromung in der d- bzw. in der q-Achse. Für die Klauenpolmaschine ist es aber von hoher Bedeutung diese Unterschiede zu berücksichtigen. Um diese Abhängigkeit zu berücksichtigen, kann man sich an der Herleitung in [80] orientieren, siehe Gleichung (5.39) und Abbildung 5.17.

$$\Theta_N = \oint H ds \rightarrow \Theta_N = \frac{B_N \cdot 2\delta}{\mu_0} \rightarrow B_N = \frac{\mu_0 \cdot \Theta_N}{2\delta} \quad (5.39)$$

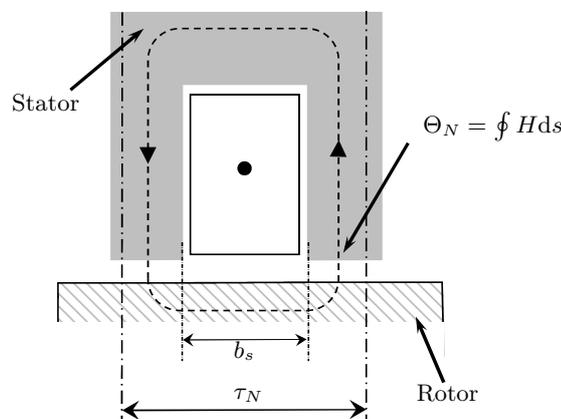


Abbildung 5.17.: Skizze zur Herleitung der Gleichung (5.39)

Im Allgemeinen ergibt sich die Amplitude der Nutoberwelle aus der Abweichung zwischen der kontinuierlichen Flussdichtenverteilung und der, die durch die Nutung entsteht, siehe Abbildung 5.18.

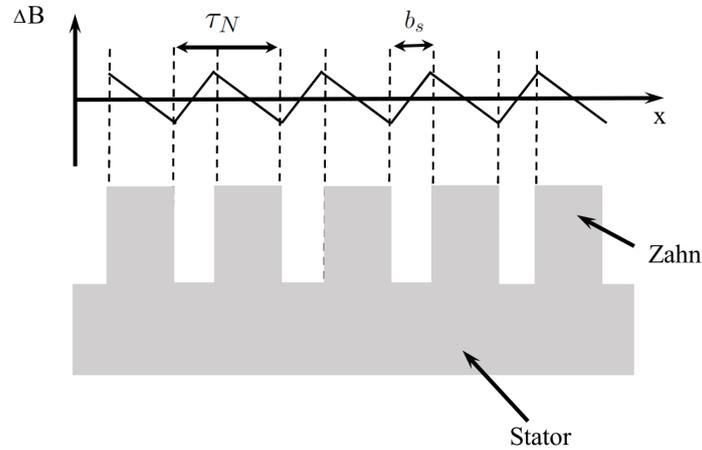


Abbildung 5.18.: Beispielhafter Verlauf der Nutoberwelle

Die Amplitude der Nutflussdichte B_N hängt vom Verhältnis zwischen Nutbreite und Nutteilung ab. Eine große Nutbreite ergibt eine kleine Amplitude und eine kleine Nutbreite eine hohe Amplitude. Aus diesem Grund wird die Gleichung (5.39) entsprechend erweitert, siehe Gleichung 5.40.

$$B_N = \frac{\mu_0 \cdot \Theta_N}{2\delta} \cdot \left(1 - \frac{b_s}{\tau_N}\right) \quad (5.40)$$

Anmerkung Die Grundwelle des dreieckförmigen Verlaufs der Nutoberwelle ist kleiner als ihr Spitzenwert. Die Werte aus Gleichung (5.40) bilden das Maximum des Verlaufs. Um die höherfrequenten Anteile dennoch zu berücksichtigen, wird im Folgenden der Spitzenwert verwendet.

Die Polform sowie die geometrische Lage des Strom, haben Einfluss auf die Verluste. Um dies zu berücksichtigen, muss die Durchflutung Θ_N in Gleichung (5.40) in Abhängigkeit der d- und q-Achse dargestellt werden. Dies zeigt die Gleichung (5.41) [89].

$$\Theta_N = \sqrt{\frac{2}{S}} \cdot \sqrt{(C_{ad} \cdot I_q)^2 + (C_{aq} \cdot I_d)^2} \cdot L/N \quad (5.41)$$

In Gleichung (5.41) entspricht L/N der Leiterzahl in einer Nut. Des Weiteren sind C_{ad} und C_{aq} Polformfaktoren, welche nach [80], [84], [86], [90] und [91] berechnet werden können. Aus der Gleichung (5.41) ist ersichtlich, dass der Polformfaktor in der d-Achse mit dem q-Strom multipliziert werden muss, da die Nuten unter dem Pol den q-Strom führen. Mit Gleichung (5.42) und den Zusammenhängen aus den Gleichungen (5.40) und (5.41) können nun die Verluste durch die Nutoberwelle im Falle der Klauenpolmaschine bestimmt werden.

$$P_a = k_0 \cdot \pi \cdot D_i \cdot l_i \cdot (Z \cdot n)^{3/2} \cdot (B_N \cdot \tau_N)^2 \quad (5.42)$$

Wicklungsoberwellen Durch das Drehfeld des Stators treten weitere Oberwellen auf, die sog. Wicklungsoberwellen. Diese weisen deutlich geringere Frequenzen und kleinere Amplituden auf als die Nut- und Nutungsoberwellen. Es genügt also die grobe Abschätzung dieser Verluste nach [80], siehe Gleichung (5.43).

$$P_{wo} = k_w \cdot l_{ka} \cdot A^2 \cdot \tau_p^2 \cdot \left(\frac{f}{50 \text{ Hz}} \right)^{1,5} \quad (5.43)$$

Hierin ist l_{ka} die Länge des Klauenfingers. Der Wert des Faktors k_w gibt [80] grafisch in Abhängigkeit des Luftspalts in der Polmitte δ_0 , der Polbedeckung τ_p und der Spulenweite W an.

5.2.5. Eisenverluste im Stator der Maschine

Zur Bestimmung der Eisenverluste im Stator der Maschine können die Steinmetz-Gleichungen verwendet werden, siehe Gleichung (5.3) und Gleichung (5.4). Die darin enthaltenen Flussdichten B_z und B_j müssen im Falle des aktiven Betriebs der elektrischen Maschine, d.h. bei bestromter Statorwicklung, unter Berücksichtigung von magnetischen Streuflüssen berechnet werden. Der Grund hierfür sind die deutlich stärker ausgeprägten Sättigungsverhältnisse im Eisen.

Berechnung der Zahnflussdichte Ohne Nutstreuung berechnet sich die Zahnflussdichte nach Gleichung (5.13), welche im Folgenden erweitert wird. Der erste Term der Gleichung (5.44) entspricht der Zahnflussdichte in der Zahnmitte ohne Streuflüsse. Durch den zweiten Term werden die Streuflüsse $\hat{\Phi}_{\sigma,z1}$ und $\hat{\Phi}_{\sigma,z2}$ berücksichtigt, siehe Abbildung 5.19.

$$\hat{B}_z = \frac{\tau_N \cdot l_i \cdot \hat{B}_1}{l_{Fe} \cdot b_z} + \frac{2 \cdot \hat{\Phi}_{\sigma,z1} + \hat{\Phi}_{\sigma,z2}}{Z \cdot l_{Fe} \cdot b_z} \quad (5.44)$$

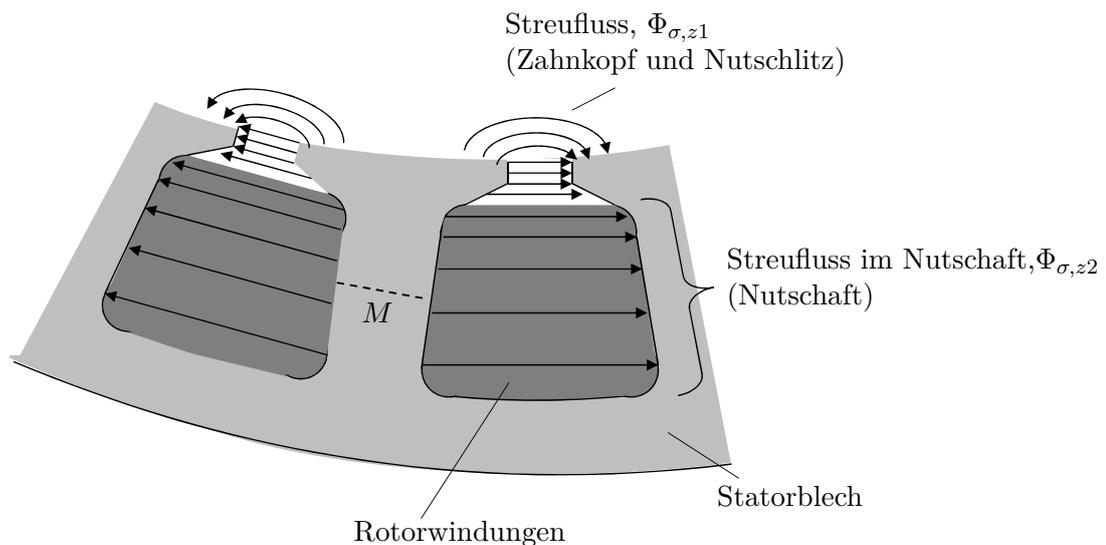


Abbildung 5.19.: Darstellung der Streuflüsse im Stator

Es ist zu beachten, dass sich der Streufluss nach beiden Nutseiten öffnet. Die Zahnmitte M trägt somit den Streufluss $\hat{\Phi}_{\sigma,z1}$ und den halben Streufluss $\hat{\Phi}_{\sigma,z2}$ zu jeder Nutseite. Um eine Aussage für einen Zahn der elektrischen Maschine zu erhalten, wird durch die Anzahl der Zähne Z geteilt.

Der Streufluss liegt in der gleichen Winkelposition wie die Bestromung des Stators. Hingegen weist der Luftspaltfluss eine lastabhängige Verschiebung gegenüber dem Streufluss auf. Die Beeinflussung des Streuflusses zeigen die Gleichungen (5.45) und (5.46) [89]. Der Winkel $\Delta\alpha$ gibt die Verschiebung zwischen Streufluss und Luftspaltfluss an.

$$\hat{\Phi}_{\sigma,z1} = \hat{\Phi}_{\sigma,n1} \cdot \cos(\Delta\alpha) \quad (5.45)$$

$$\hat{\Phi}_{\sigma,z2} = \hat{\Phi}_{\sigma,n2} \cdot \cos(\Delta\alpha) \quad (5.46)$$

Die Amplituden der Streuflüsse $\hat{\Phi}_{\sigma,n1}$ sowie $\hat{\Phi}_{\sigma,n2}$ in den Gleichungen (5.45) und (5.46) werden nach [80] berechnet. Für eine Streuinduktivität gilt im Allgemeinen der Zusammenhang in Gleichung (5.47).

$$L_\sigma = 2 \cdot \mu_0 w^2 l_i \cdot \frac{\lambda_\sigma}{p} = \frac{\Psi_\sigma}{I} = \frac{\Phi_\sigma \cdot w}{I} \quad (5.47)$$

Hierin ist L_σ die entsprechende Streuinduktivität und λ_σ der Streuleitwert des betrachteten Bereichs. Der Bereich, in dem der Streufluss $\Phi_{\sigma,z1}$ wirkt, kann in einen Zahnkopfbereich mit dem Streufluss $\Phi_{\sigma,k}$ und den Bereich des Nutschlitzes mit dem Streufluss $\Phi_{\sigma,ns}$ unterteilt werden. Für den Zahnkopfbereich zeigt die Gleichung (5.48) den entsprechenden Zusammenhang.

$$\hat{\Phi}_{\sigma,k} = 2 \cdot \mu_0 w \cdot l_i \cdot \frac{\lambda_{\sigma,k}}{p} \cdot I_{1m} \cdot \sqrt{\frac{2}{S}} \quad (5.48)$$

Wobei $\lambda_{\sigma,k}$ aus der Kennlinie bei [80] entnommen wurde. Es gilt näherungsweise die Gleichung (5.49).

$$\lambda_{\sigma,k} \approx \frac{\delta}{2b_s} - \frac{1}{6} \quad (5.49)$$

Im Nutschlitz gilt der gleiche Zusammenhang wie im Kopfbereich, lediglich der Leitwert wird angepasst. Es ergeben sich die Gleichungen (5.50) und (5.51).

$$\hat{\Phi}_{\sigma,ns} = 2 \cdot \mu_0 w \cdot l_i \cdot \frac{\lambda_{\sigma,ns}}{p} \cdot I_{1m} \cdot \sqrt{\frac{2}{S}} \quad (5.50)$$

$$\lambda_{\sigma,ns} = \frac{h_s}{b_s} + \frac{t_{zk} - h_s}{0,5 \cdot (C_h + b_s)} \quad (5.51)$$

Die geometrischen Abhängigkeiten der oben genannten Gleichungen sind der Abbildung 5.20 zu entnehmen.

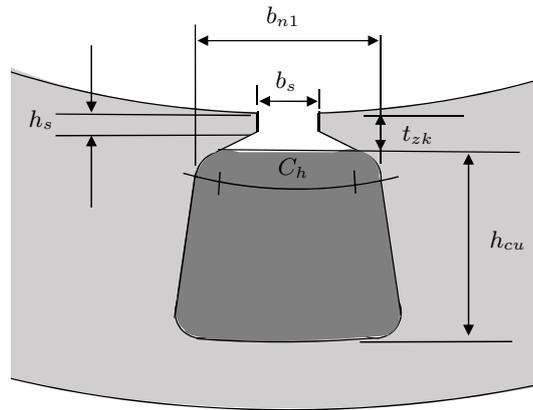


Abbildung 5.20.: Nutabmessung des Stators zur Berechnung der Streuflüsse

Für den Nutschaftbereich gilt, wie auch für den Nutschlitzbereich und den Kopfbereich, der allgemeine Zusammenhang in Gleichung (5.47). Es ergeben sich nach [80] die Gleichung (5.52) sowie die Gleichung (5.53) für den Leitwert des Streupfades.

$$\hat{\Phi}_{\sigma,z2} = 2 \cdot \mu_0 w \cdot l_i \cdot \frac{\lambda_{\sigma,z2}}{p} \cdot I_{1m} \cdot \sqrt{\frac{2}{S}} \quad (5.52)$$

$$\lambda_{\sigma,z2} = \frac{h_{Cu}}{3 \cdot b_{1n}} \quad (5.53)$$

Mit den bekannten Flüssen $\hat{\Phi}_{\sigma,z1}$, $\hat{\Phi}_{\sigma,z2}$ und der Amplitude der Flussdichte im Luftspalt \hat{B}_1 kann die Zahnflussdichte \hat{B}_z im aktiven Betrieb der Maschine berechnet werden, vgl. Gleichung (5.44). Die Flussdichte \hat{B}_1 kann durch ein iteratives Verfahren ähnlich dem in Abschnitt 5.1.2 berechnet werden kann.

Anmerkung Die Wickelkopfstromung wird vernachlässigt, da diese zu einem großen Teil in der Luft verläuft und gegenüber der Nutstromung um ein Vielfaches kleiner ist.

Berechnung der Jochflussdichte Das Joch trägt neben dem Hauptfluss Φ_1 die Streuflüsse $\Phi_{\sigma,z1}$ und $\Phi_{\sigma,z2}$, welche sich nach beiden Jochseiten symmetrisch aufteilen. Es ergibt sich hieraus die Flussdichte im Joch B_j nach Gleichung (5.54).

$$B_j = \frac{\Phi_1 + \Phi_{\sigma,z1} + \Phi_{\sigma,z2}}{2p \cdot l_{Fe} \cdot h_{1j}} \quad (5.54)$$

Zur Anwendung der Gleichung (5.54) muss der Hauptfluss Φ_1 bekannt sein. Dieser lässt sich mit den geometrischen Abmessungen der elektrischen Maschine und den Polformfaktoren in Flussdichten überführen [80], [84], [86]. Um die Flussdichten zu berechnen, können iterative Verfahren eingesetzt wie in Abschnitt 5.1.2.

Mit den Eisenverlusten im Statorjoch sind alle Verluste berechenbar, und der kommende Abschnitt zeigt die Ergebnisse des Verfahrens.

5.2.6. Ergebnisse für die Basismaschine

Über das Verfahren aus dem vorangegangenen Abschnitt kann die Verlustleistung in unterschiedlichen Betriebspunkten bestimmt werden. Anschließend ist es möglich, über die Leistungsbilanz auf die zugeführte bzw. abgeführte Leistung zu schließen. Beispielhaft dargestellt sind im Folgenden die Betriebspunkte bei einer Drehzahl von 4000 bzw. 8000 min^{-1} im Rekuperationsbetrieb der Maschine. Die Abbildungen 5.21 und 5.22 zeigen die mechanischen Leistungen der Maschine, welche mit dem Verlustberechnungsansatz berechnet wurden, im Vergleich zu Messungen. Auf der Abszisse sind Messungen aufgetragen, welchen verschiedene Kombinationen aus I_d , I_q und I_{Err} zugrunde liegen. Die Ströme wurden dabei schrittweise erhöht, um der Maschine eine höhere Leistung zu entnehmen.

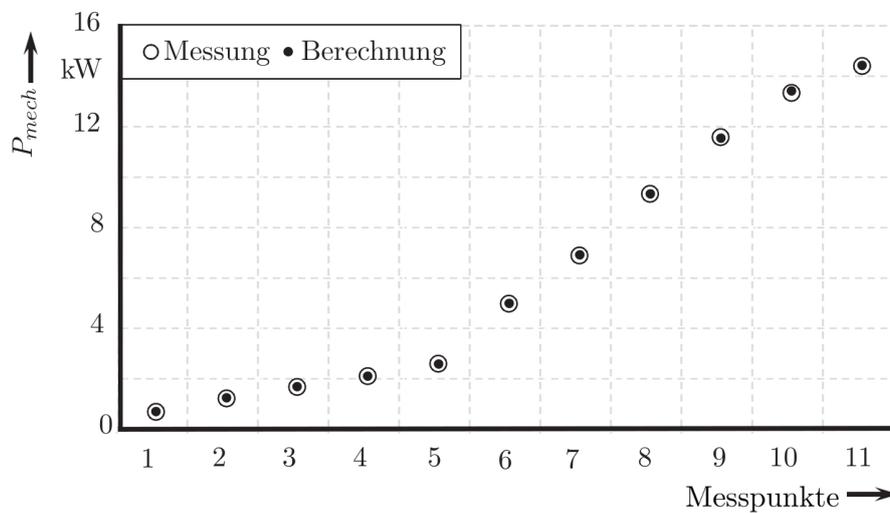


Abbildung 5.21.: Vergleich von berechneten Ergebnissen durch den Verlustansatz und Prüfstandsmessungen bei einer Drehzahl von 4000 min^{-1}

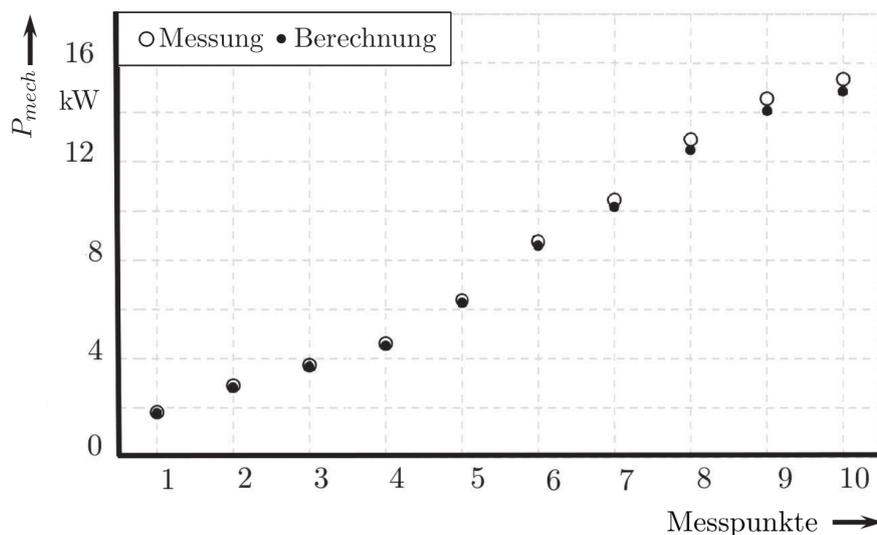


Abbildung 5.22.: Vergleich von berechneten Ergebnissen durch den Verlustansatz und Prüfstandsmessungen bei einer Drehzahl von 8000 min^{-1}

5.2.7. Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

Die Abbildung 5.21 lässt erkennen, dass die Verlustberechnung im Drehzahlbereich von 4000 min^{-1} besonders gut funktioniert, hier liegen die gemessenen und berechneten Werte sehr nahe beieinander, siehe Tabelle 5.1.

Messpunkt	$\Delta P_{mech} = \left \frac{P_{mech,ber}}{P_{mech,mess}} - 1 \right \cdot 100\%$	$\Delta P_v = P_{v,ber} - P_{v,mess}$ (W)	$\Delta \eta = \eta_{ber} - \eta_{mess}$ (%)
1	2,18	15	-0,91
2	2,21	27	-1,46
3	0,90	15	-0,67
4	0,48	10	-0,38
5	0,08	-2	0,06
6	0,30	15	-0,26
7	0,33	23	-0,29
8	0,11	10	-0,09
9	0,25	-29	0,22
10	0,64	85	-0,54
11	0,25	36	-0,21

Tabelle 5.1.: Auflistung der Ergebnisse des Verlustberechnungsansatzes und der Prüfstandsmessung bei einer Drehzahl von 4000 min^{-1}

Die maximale Abweichung zwischen der berechneten und der gemessenen mechanischen Leistung beträgt 2,21 % (Messpunkt 2). Dabei liegen die gemessenen Werte lediglich um 27 W voneinander entfernt, was in der Messtoleranz des Prüfstands liegt. Den Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Werten bei einer Drehzahl von 8000 min^{-1} zeigt die Tabelle 5.2.

Bei einer Drehzahl von 8000 min^{-1} zeigt die berechnete mechanische Leistung einen Unterschied gegenüber der Messung von maximal 3,42 % (Messpunkt 9). Eine mögliche Ursache könnten Ausgleichsströme zwischen den parallelen Drähten der Statorwicklung sein, welche sich erst bei höheren Drehzahlen bemerkbar machen. Analytisch ist dieser Effekt zu schwer zu erfassen, da die parallelen Leiter in Einzugstechnik in den Stator eingebracht werden und entsprechend in zufälliger Weise in der Nut verteilt sind.

Im nächsten Abschnitt wird gezeigt, dass vergleichsweise wenige Betriebspunkte eine höhere Drehzahl als 8000 min^{-1} aufweisen. In diesem Bereich spielen die Abweichungen der Berechnungsmethode eine nicht ganz so tragende Rolle. Hingegen ist es deutlich wichtiger, dass im Bereich einer Drehzahl von 4000 min^{-1} die Betriebspunkte präzise abgebildet werden, vgl. Abbildung 5.29 auf Seite 81.

5.3. Betriebsbereiche der elektrischen Maschine

Um das Verlustberechnungsverfahren der elektrischen Maschine wirkungsvoll anwenden zu können, wird in diesem Abschnitt die Anforderung hinsichtlich des benötigten Betriebsbereichs

Messpunkt	$\Delta P_{mech} = \left \frac{P_{mech,ber}}{P_{mech,mess}} - 1 \right \cdot 100\%$	$\Delta P_v = P_{v,ber} - P_{v,mess}$ (W)	$\Delta \eta = \eta_{ber} - \eta_{mess}$ (%)
1	2,69	-49	2,07
2	2,79	-81	2,37
3	2,14	-80	1,84
4	1,91	-88	1,66
5	2,44	-156	2,14
6	2,12	-186	1,85
7	2,75	-287	2,39
8	3,36	-433	2,88
9	3,42	-498	2,91
10	3,18	-488	2,68

Tabelle 5.2.: Auflistung der Ergebnisse des Verlustberechnungsansatzes und der Prüfstandsmessung bei einer Drehzahl von 8000 min^{-1}

gestellt. In einem Fahrzyklus treten nicht alle Betriebspunkte auf, welche der elektrischen Maschine abverlangt werden könnten. Zum Beispiel beträgt die Drehzahl der VKM im Leerlauf ca. 750 min^{-1} . Mit der Übersetzung von Faktor drei zwischen Kurbelwelle und der Welle der elektrischen Maschine beträgt die kleinst mögliche Drehzahl 2250 min^{-1} . Des Weiteren führen die durch den Fahrzyklus vorgegebenen Verzögerungen zu einer drehzahlabhängigen Verteilung der Betriebspunkte, welche auf die elektrische Maschine einwirken.

Diese Effekte führen dazu, dass in den untersuchten Fahrzyklen nicht das gesamte Wirkungsgradkennfeld der elektrischen Maschine benötigt wird. Es genügt ein Ausschnitt daraus. Dargestellt wird dies in Abbildung 1.5 durch den Kopplungsweg 2. Die folgenden Unterkapitel zeigen, welche Teile des Wirkungsgradkennfeldes in den Fahrzyklen betrachtet werden müssen.

Die Modi der elektrischen Maschine werden nachfolgend in der Reihenfolge

- Rekuperationsbetrieb,
- Drehmomentenunterstützung und
- konventioneller Generatorbetrieb

untersucht.

Die Tabelle 4.3 auf Seite 51 zeigt die potentiell optimalen Maschinengrößen in Verbindung mit der zugehörigen Fahrzeugklasse.

Im Einzelnen bedeutet dies:

- für das SComp-Fahrzeug kommen die Maschinengrößen $k_{vol} = 0,65$ und $k_{vol} = 0,79$ in Frage,
- für das Compact-Fahrzeug die Maschinengrößen $k_{vol} = 1,00$ und $k_{vol} = 1,31$ sowie
- für den SUV die Maschinengrößen $k_{vol} = 1,31$ und $k_{vol} = 1,84$.

5.3.1. Rekuperationsbetrieb

Die Gleichungen im dritten Kapitel beschreiben die Rekuperationsphase analytisch. Dies bedeutet, dass die Betriebspunkte, welche auf die elektrische Maschine einwirken, direkt abgeleitet werden können. Die Abbildung 5.23 zeigt die Betriebspunkte für das Compact-Fahrzeug mit den Maschinengrößen $k_{vol} = 1,00$ und $k_{vol} = 1,31$. Es ist zu erkennen, dass die Basismaschine für eine Leistung von 12,5 kW bemessen ist. Führt eine Verzögerungsphase des Fahrzeugs zu einer höheren Leistung, wird diese auf 12,5 kW begrenzt. Dies gilt auch für die um Faktor 1,31 vergrößerte Maschine, bei der sich die maximale Leistung auf 16,375 kW beläuft.

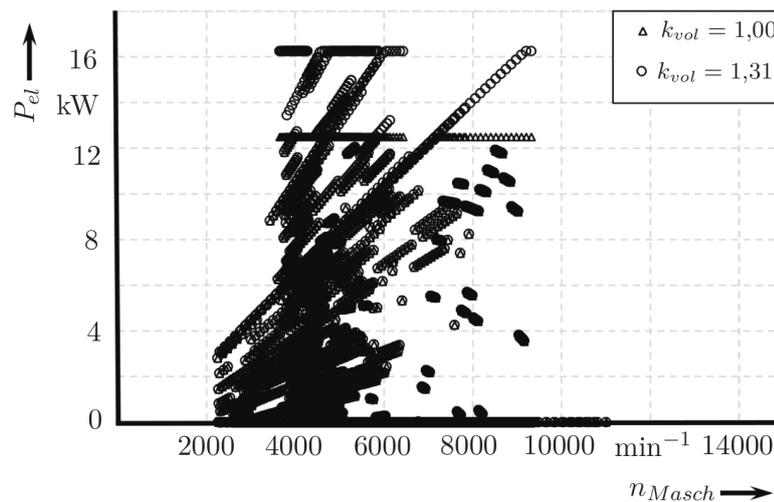


Abbildung 5.23.: Betriebspunkte der elektrischen Maschine für die Baugrößen $k_{vol} = 1,00$ und $k_{vol} = 1,31$ für ein Compact-Fahrzeug im WLTC

Betrachtet man die relativen Betriebspunkte der Maschinengrößen $k_{vol} = 0,65$ und $k_{vol} = 0,79$ des SComp-Fahrzeugs, ist gut zu sehen, dass sich dort deutlich höhere Drehzahlen einstellen. Gerade im Drehzahlbereich um 12000 min^{-1} sind bei diesem Fahrzeug noch Betriebspunkte zu erkennen, siehe Abbildung 5.24.

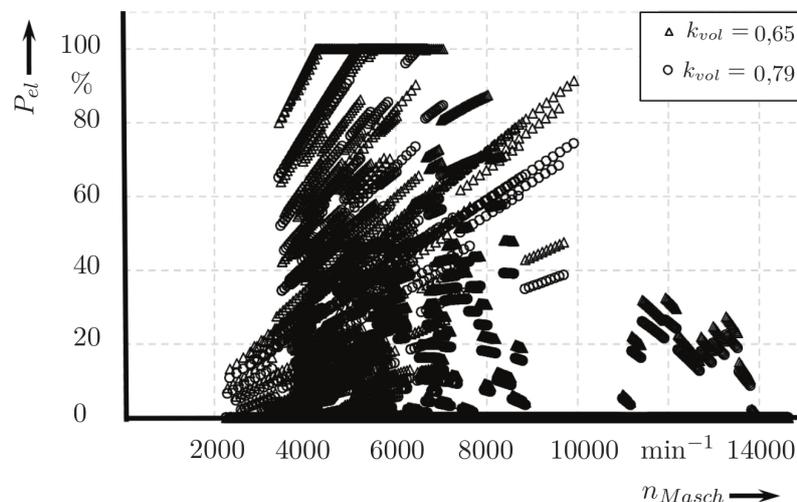


Abbildung 5.24.: Relative Betriebspunkte der elektrischen Maschine für die Baugrößen $k_{vol} = 0,65$ und $k_{vol} = 0,79$ für ein SComp-Fahrzeug im WLTC

Bei der Untersuchung des SUV kommen die Maschinengrößen $k_{vol} = 1,31$ sowie $k_{vol} = 1,84$ in Betracht. Die Betriebspunkte der Maschine zeigt die Abbildung 5.25.

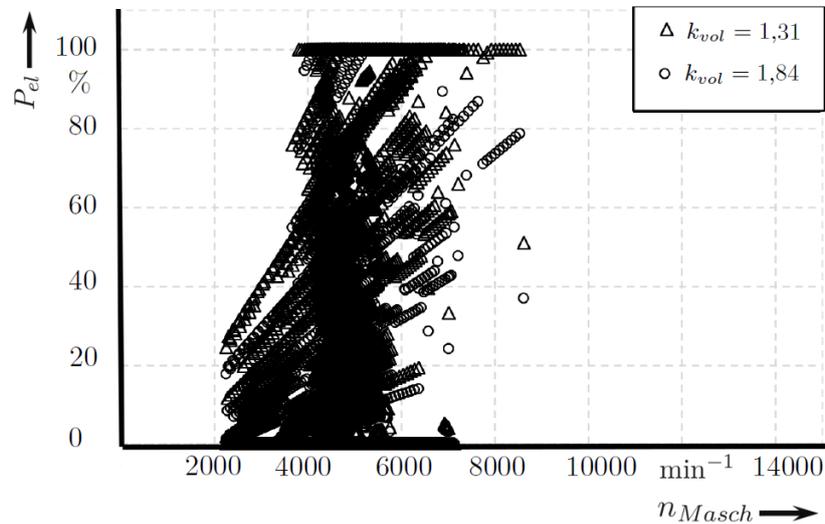


Abbildung 5.25.: Betriebspunkte der elektrischen Maschine für die Baugrößen $k_{vol} = 1,31$ und $k_{vol} = 1,84$ für einen SUV im WLTC

Überlagert man die Abbildungen 5.23 bis 5.25, erhält man den Bereich, in dem die elektrische Maschine während des Rekuperationsbetriebs im WLTC über alle Fahrzeugklassen hinweg betrieben wird. Wendet man das gleiche Prinzip auf den NEFZ an, kann dort ebenfalls der Bereich gefunden werden, welcher im Rekuperationsbetrieb vorkommt. Die Überlagerung des NEFZ und des WLTC zeigt die Abbildung 5.26.

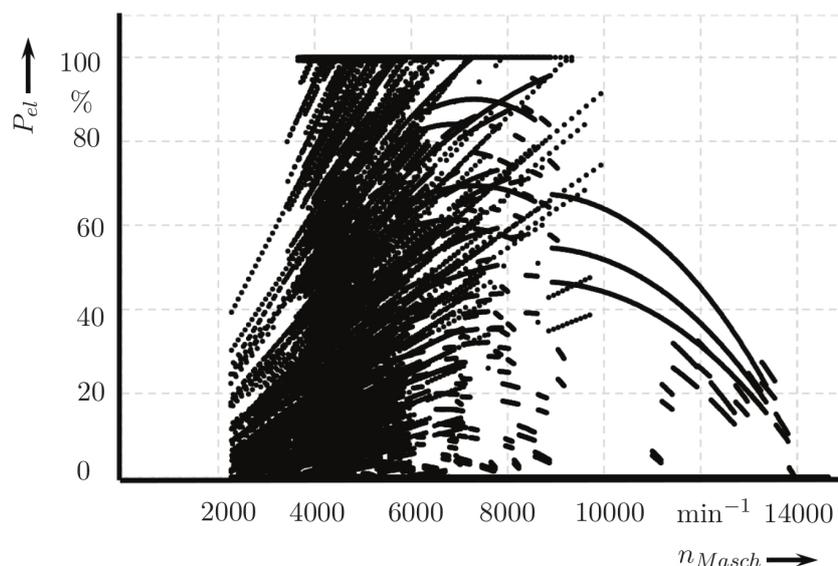


Abbildung 5.26.: Verteilung der Betriebspunkte aller relevanten Maschinengrößen und Fahrzyklen

Es ist ersichtlich, dass nicht jeder Betriebspunkt der Maschine benötigt wird, um eine Bewertung im Rekuperationsbetrieb vorzunehmen.

5.3.2. Drehmomentenunterstützung

Arbeitet die elektrische Maschine im Motorbetrieb, ist es schwer, die Betriebspunkte analytisch zu erfassen. Prinzipiell genügt es aber, einen Bereich abzuleiten, in welchem sich die Betriebspunkte aufhalten. Die maximale motorische Leistung ist auf ca. 50% der Bemessungsleistung begrenzt. Für die Basismaschine ergibt sich eine mechanische Leistung von ca. 6 kW. Diese Maßnahme führt dazu, dass die Energie gleichmäßig über den Zyklus abgegeben wird. Auch eine weichere Zuschaltung der elektrischen Maschine in den Triebstrang wird hierdurch erreicht, was zu Vorteilen im Komfort führt. Um den Drehzahlbereich, in dem sich die Maschine im motorischen Betrieb befindet, zu definieren, kann die Gesamtheit aller vorkommenden Drehzahlen im Fahrzyklus abzüglich der Drehzahlen im Rekuperationsbetrieb dienen. Die Abbildung 5.27 zeigt die Häufigkeitsverteilung des Compact-Fahrzeugs im WLTC.

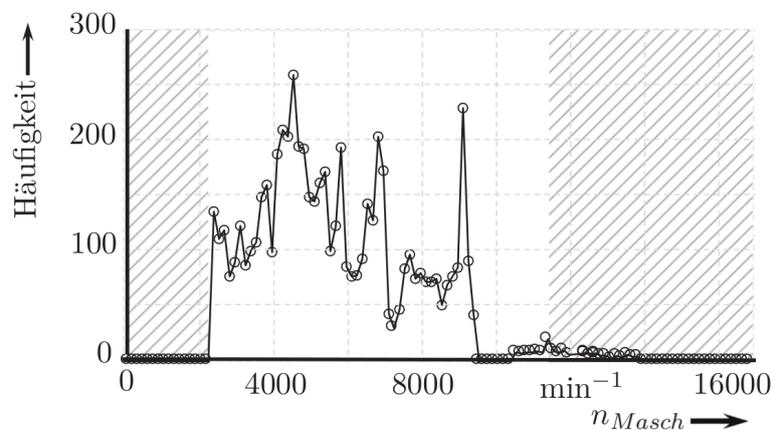


Abbildung 5.27.: Häufigkeitsverteilung der Betriebspunkte in Abhängigkeit der Drehzahl bei einem Compact-Fahrzeug im WLTC

In Abbildung 5.27 sind oberhalb von 11500 min^{-1} nur sehr wenige Betriebspunkte zu erkennen. Diese können in guter Näherung vernachlässigt werden. Für den motorischen Betrieb der elektrischen Maschine ergibt sich ein Bereich zwischen 2250 min^{-1} und 11500 min^{-1} . Für die anderen untersuchten Fahrzeugklassen und Fahrzyklen ergeben sich in gleicher Weise die Bereiche in Tabelle 5.3 für den motorischen Betrieb.

	Drehzahlbereich WLTC (min^{-1})	Drehzahlbereich NEFZ (min^{-1})
SComp-Fahrzeug	2250 - 14500	2250 - 11200
Compact-Fahrzeug	2250 - 11500	2250 - 8600
SUV	2250 - 7000	2250 - 7200

Tabelle 5.3.: Drehzahlbereich im Betriebsmodus Drehmomentenunterstützung

5.3.3. Generatorbetrieb

Neben dem Rekuperationsbetrieb und der Drehmomentenunterstützung kann die elektrische Maschine auch im konventionellen Generatorbetrieb arbeiten. Hierbei wird die Leistung der Maschine aufgrund der thermischen Grenze auf ca. 25% der Bemessungsleistung reduziert. Beim

Generatorbetrieb gelten dieselben Drehzahlbereiche wie bei der Drehmomentenunterstützung, vgl. Abbildung 5.28.

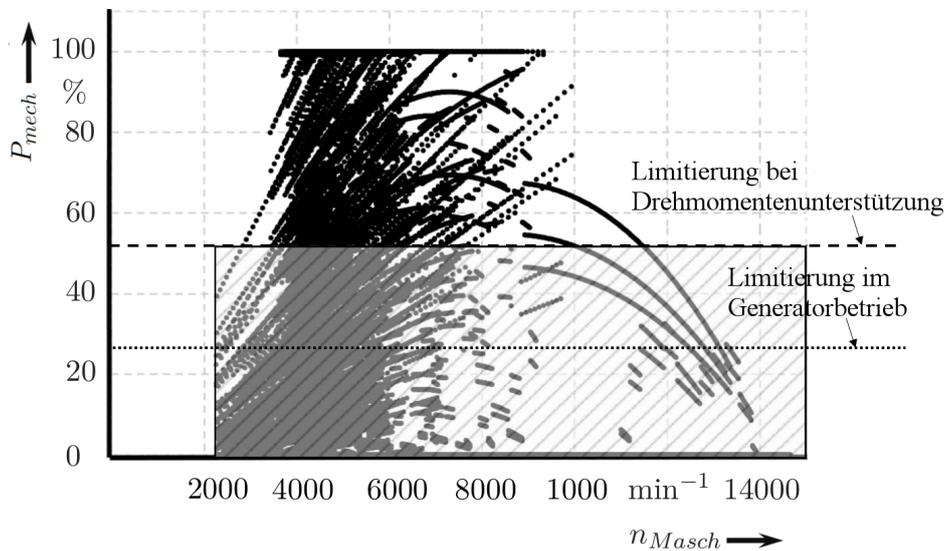


Abbildung 5.28.: Verteilung der Betriebspunkte

5.3.4. Betriebsbereiche der elektrischen Maschine im Fahrzyklus

Aus der Überlagerung der einzelnen Modi kann der Gesamtbetriebsbereich der elektrischen Maschine erstellt werden. Der Drehzahlbereich des SComp-Fahrzeugs umfasst im WLTC eine Drehzahl von 2250-14500 min^{-1} und ist damit am größten, vgl. Tabelle 5.3. Aus dieser Überlegung lässt sich der maximale Betriebsbereich in die Abbildung 5.28 einzeichnen. Zusätzlich zu den Betriebspunkten aus Abbildung 5.28 sind in Abbildung 5.29 Messpunkte eingezeichnet, bei welchen die elektrische Maschine auf dem Prüfstand vermessen wurde.

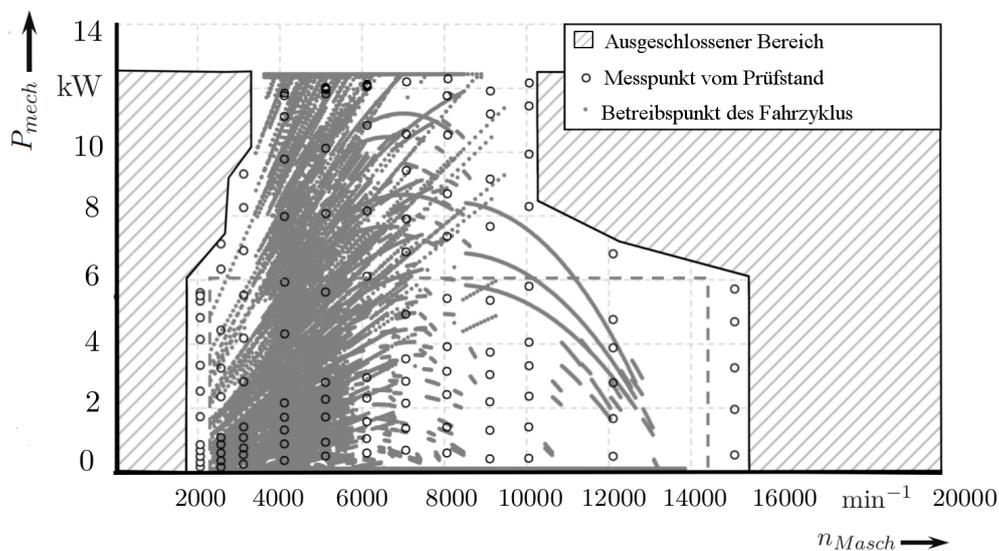


Abbildung 5.29.: Ausgeschlossene Bereiche des Kennfelds

Im schraffierten Bereich der Abbildung 5.29 wird die elektrische Maschine nicht betrieben. Es genügt also, Wirkungsgradkennfelder zwischen den Messpunkten zu generieren. Die Abbildung 5.30 zeigt das entsprechende Kennfeld für die Basismaschine.

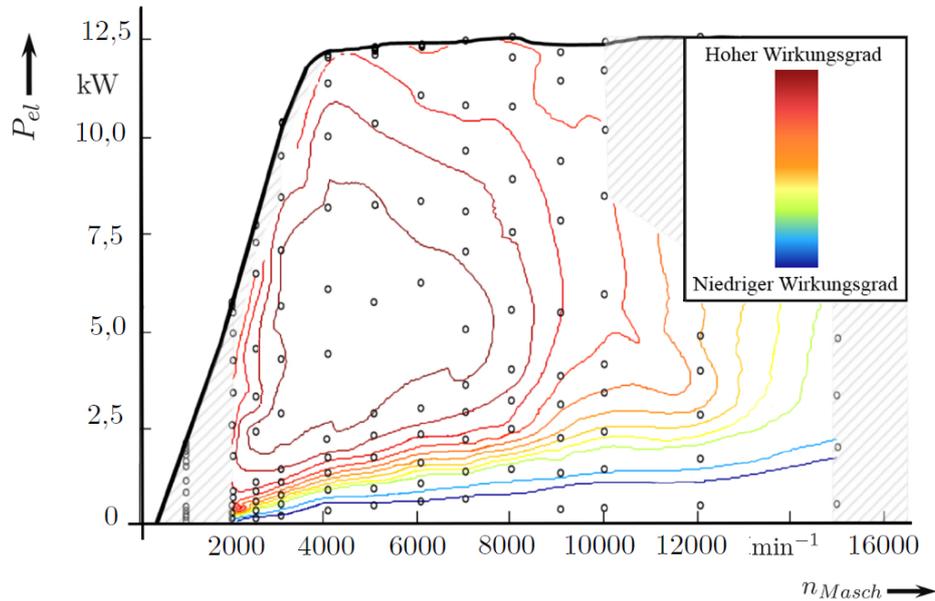


Abbildung 5.30.: Kennfeld für die Basismaschine

5.3.5. Kennfelder skaliert elektrischer Maschinen

Das erarbeitete Verfahren der letzten Abschnitte kann auf jede Maschinegröße in Tabelle 4.3 angewendet werden. Für eine um den Faktor 1,31 vergrößerte Maschine ergibt sich das Kennfeld in Abbildung 5.31 bzw. für eine Maschine, welche um den Faktor 0,79 verkleinert wird, das Kennfeld in Abbildung 5.32.

5.4. Zusammenfassung des Kapitels

Die FEM ermöglicht es, die Maschine und den damit verbundenen Magnetkreis in hoher Auflösung abzubilden. Leider sind solche Verfahren äußerst zeit- und ressourcenintensiv, was nicht zuletzt der dreidimensionalen Flussführung der Maschine geschuldet ist. Ein schnelleres Verfahren wurde in diesem Kapitel vorgestellt. Dabei wurde bewusst darauf verzichtet, die Maschine durch die innere Leistung bzw. über den verketteten Fluss zu beschreiben. Stattdessen werden die Verluste berechnet und unter Zuhilfenahme der Leistungsbilanz ein Kennfeld erstellt.

Das so erstellte Verfahren erlaubt es, innerhalb kurzer Zeit das Wirkungsgradkennfeld abzuleiten. Diese Wirkungsgradkennfelder werden im folgenden Kapitel genutzt, um die energetisch optimale Maschine zu ermitteln. Die Übersicht der in Frage kommenden Baugrößen zeigt die Tabelle 4.3 auf Seite 51. Des Weiteren wird die Effizienz des Verfahrens gesteigert, indem Betriebsbereiche der elektrischen Maschine aus der energetischen Analyse des Triebstrangs abgeleitet werden, vgl. Kopplungsweg 3 in Abbildung 1.5.

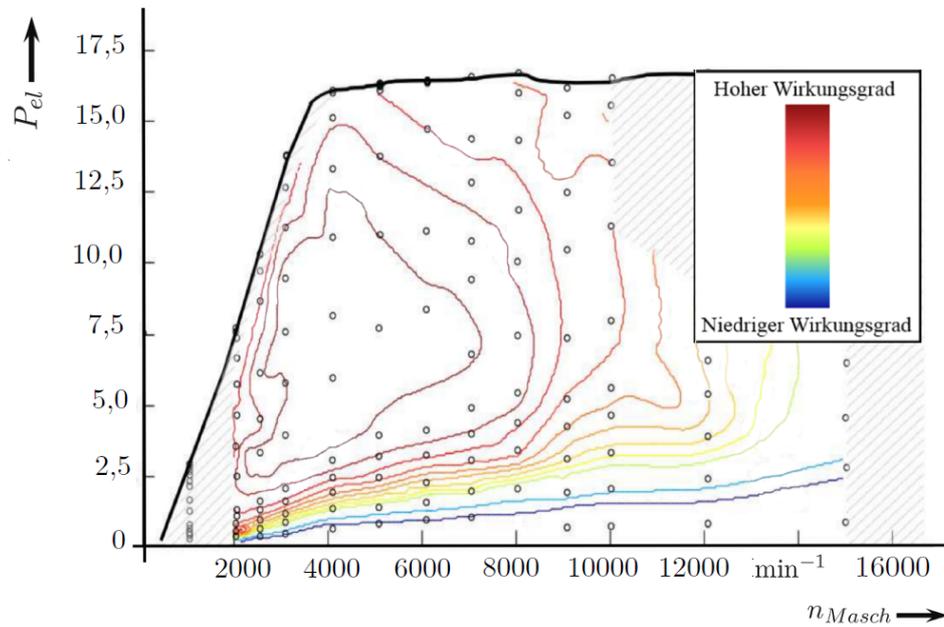


Abbildung 5.31.: Kennfeld für die um Faktor 1,31 vergrößerte Maschine

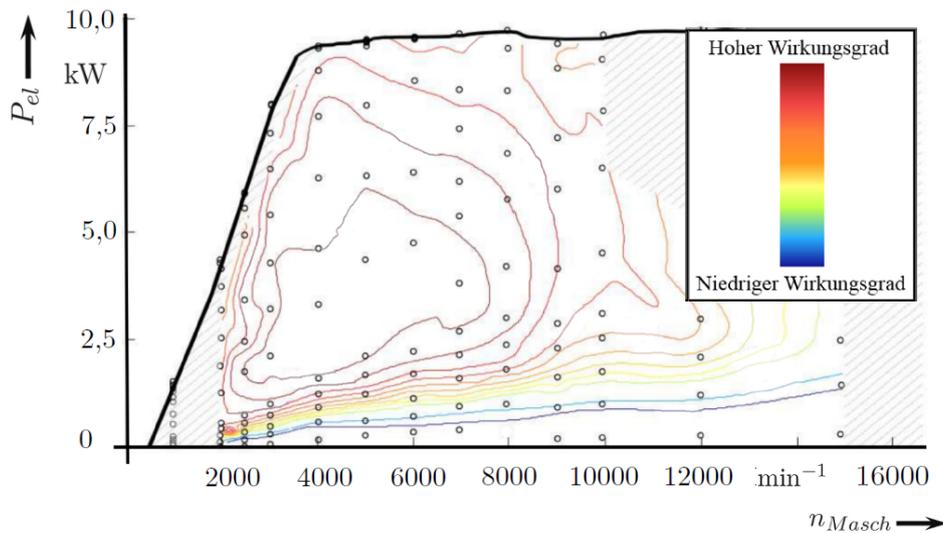


Abbildung 5.32.: Kennfeld für die um Faktor 0,79 verkleinerte Maschine

Die Kennfelder der potentiell optimalen Maschinengrößen liegen nun vor, und es kann begonnen werden, diese in einer Gesamtfahrzeugsimulation zu bewerten. Um valide energetische Aussagen des gesamten Fahrzeugs treffen zu können, muss der Ladezustand der Batterie vor und nach Beendigung des Fahrzyklus gleich sein. Zur Einbindung dieser Nebenbedingung wird im kommenden Kapitel ein Vorgehen dargestellt.

6. Bewertung und Optimierung im Gesamtsystem

Die Wirkungsgradkennfelder der elektrischen Maschine des letzten Kapitels ermöglichen es, den CO_2 -Ausstoß numerisch über eine Gesamtfahrzeugsimulation zu bestimmen. Auf diese Weise können die Eigenschaften der einzelnen Komponenten in hoher Genauigkeit berücksichtigt werden. Ziel ist es, aus den Maschinengrößen der Tabelle 4.3 die energetisch optimale Maschine auszuwählen.

Das Gesamtfahrzeugmodell basiert auf der Methode hierarchischer Blöcke, welche miteinander gekoppelt sind. Ähnliche Modelle sind in [46], [92] zu finden. Bei der Optimierung der Betriebsstrategie des Gesamtfahrzeugmodells muss darauf geachtet werden, dass die Li-Ionen-Batterie vor und nach Durchlaufen des Fahrzyklusses den gleichen Ladezustand aufweist, um eine valide energetische Aussage zu erhalten. Hierzu steht im Allgemeinen eine Vielzahl von Methoden zur Auswahl. Um die SOC-abhängige Betriebsstrategie aus dem Abschnitt 2.2 zu verwenden, bieten sich unter anderem SOC-Tracking, SOC-Optimization, die Penalty-Methode sowie die DIRECT-spezifische Hidden Constraints an [93]. Die Abbildung 6.1 zeigt den Vergleich der unterschiedlichen Methoden, welche das Ziel verfolgen, den Kraftstoffverbrauch zu minimieren. Diese Studie ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit entstanden und kann im Detail in [52] eingesehen werden. Es ist zu erkennen, dass die Penalty-Methode in diesem Vergleich gut abschneidet. Dies gilt allerdings nur, wenn ein passender Penalty-Faktor eingesetzt wird. Aus diesem Grund werden in den nächsten Abschnitten die Funktion der Penalty-Methode sowie die Wahl des Penalty-Faktors erläutert.

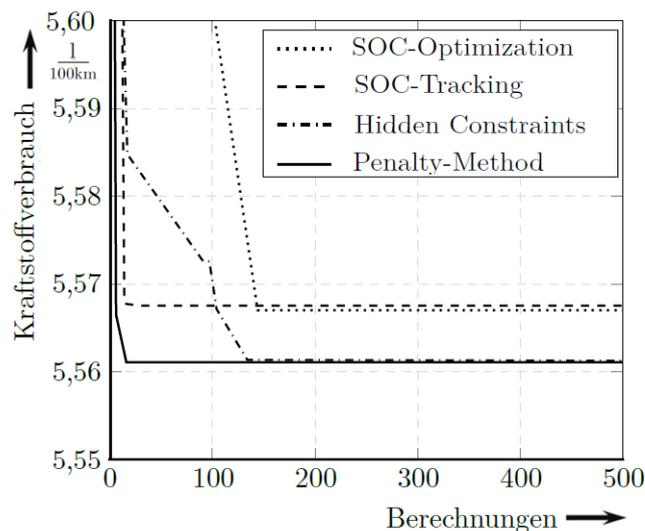


Abbildung 6.1.: Konvergenzverhalten unterschiedlicher Methoden zur Berücksichtigung von Nebenbedingungen [52]

6.1. Penalty-Methode

Die Penalty-Methode findet seit geraumer Zeit Einsatz, um Nebenbedingungen in einer Optimierungsaufgabe zu berücksichtigen. So wurde diese Methode bereits in den 1940ern eingesetzt [94] und findet heute noch Anwendung [95], [96], [97], [98]. Die grundlegende Idee ist, das nebenbedingungsbehaftete Problem $F(x)$ in ein Problem ohne Nebenbedingungen $\Phi(x, \mu)$ zu transformieren. Eine Abweichung von der Nebenbedingung wird mit einem positiven Wert $P(x, \mu)$ bestraft, um den Optimierungsalgorithmus zur Einhaltung der Nebenbedingung zu bewegen. Es ergeben sich die Gleichungen (6.1) und (6.2).

$$\Phi(x, \mu) = F(x) + P(x, \mu) \longrightarrow \min! \quad (6.1)$$

$$P(x, \mu) = \mu \cdot |h(x)|^n \quad (6.2)$$

In den Gleichungen (6.1) und (6.2) ist μ der sog. Penalty-Faktor und n der sog. Penalty-Exponent, der häufig zu zwei gewählt wird [99]. Prinzipiell besteht dennoch die Möglichkeit, andere Penalty-Exponenten einzusetzen [100], [101]. Um die Penalty-Methode anzuwenden, muss ein positiver Penalty-Faktor gewählt werden, welcher maßgeblich das Konvergenzverhalten des Optimierungsalgorithmus beeinflusst.

6.2. Bestimmung des Penalty-Faktors

Die Wahl des Penalty-Faktors wird in vielen Fällen experimentell vorgenommen, zu eins gewählt oder dessen Wert nicht angegeben [96], [99], [102], [103]. Neben der experimentellen Suche des Penalty-Faktors, welche sehr zeit- und ressourcenintensiv ist, wird in [104], [105] eine „minimal Penalty Rule“ vorgestellt. Dabei besagt diese Regel, dass der kleinstmögliche Penalty-Faktor, welcher noch zur Einhaltung der Nebenbedingung führt, ein gutes Konvergenzverhalten aufweist. Weitere Stellen in der Literatur verweisen auf diesen Zusammenhang [52], [96], [106].

Im Allgemeinen führt ein sehr hoher Penalty-Faktor dazu, dass die Zielfunktion $F(x)$ vom Penalty-Term $P(x, \mu)$ dominiert wird, vgl. Gleichung (6.1). Folglich weist der Optimierungsalgorithmus ein schlechtes Konvergenzverhalten auf. Ein kleiner Penalty-Faktor führt hingegen zu einer hohen Verletzung der Nebenbedingung. Wird der Penalty-Faktor im Grenzfall zu null gewählt, fließt die Betrachtung der Nebenbedingung nicht mehr in die Optimierung ein. Es entsteht ein Zusammenhang zwischen dem Penalty-Faktor μ und der Verletzung der Nebenbedingung h . Wie der nächste Abschnitt zeigt, kann der Penalty-Faktor analytisch bestimmt werden, wenn es möglich ist, die Zielfunktion F in Abhängigkeit von der Verletzung der Nebenbedingung h darzustellen.

6.3. Analytische Beschreibung des Penalty-Faktors

Betrachtet man den Gradienten der Gleichung (6.1) an der Stelle des Minimums, ergibt sich die Gleichung (6.3) (Karush-Kuhn-Tucker-Bedingung) [107].

$$0 = \nabla F + \mu \cdot \nabla |h|^n \quad (6.3)$$

Der Gradient am Minimum wird zu null, und die Beträge $|\nabla F|$ und $\mu \cdot \nabla |h|^n$ werden gleich, siehe Gleichung (6.4).

$$|\nabla F| = \mu \cdot \nabla |h|^n \quad (6.4)$$

Abhängig von der Anzahl der Dimensionen ergibt sich die Gleichung (6.5).

$$\frac{\partial |F|}{\partial x_1} \vec{e}_{x_1} + \frac{\partial |F|}{\partial x_2} \vec{e}_{x_2} + \dots = \mu \left(\frac{\partial |h|^n}{\partial x_1} \vec{e}_{x_1} + \frac{\partial |h|^n}{\partial x_2} \vec{e}_{x_2} + \dots \right) \quad (6.5)$$

Für die Richtung \vec{e}_{x_1} ergibt sich die Gleichung (6.6).¹³

$$\frac{\partial |F|}{\partial x_1} \cdot \vec{e}_{x_1} = \mu \frac{\partial |h|^n}{\partial x_1} \cdot \vec{e}_{x_1} \quad (6.6)$$

Aus Gleichung (6.6) ergibt sich μ zur Gleichung (6.7).

$$\mu = \frac{\partial |F(h)|}{\partial |h|^n} \quad (6.7)$$

In der Gleichung (6.7) wurde F partiell nach der Verletzung der Nebenbedingung h differenziert. Wird eine Linearisierung für $F(h)$ vorgenommen (Gleichung (6.8)), ergibt sich als Lösung die Gleichung (6.9).

$$F(h) = a \cdot h + b \quad (6.8)$$

$$\mu = \left| \frac{a}{n \cdot h^{n-1}} \right| \quad (6.9)$$

Mit der Gleichung (6.9) ist es möglich, den Penalty-Faktor zu berechnen. Es muss lediglich die Konstante a bekannt sein, welche die Änderung der Zielfunktion F ins Verhältnis zur Verletzung der Nebenbedingung h setzt.

6.4. Bestimmung der Konstante a

Die Gleichung (6.9) kann angewendet werden, falls F als Funktion von h bekannt ist. Dies bedeutet für Hybridfahrzeuge, dass der Zusammenhang zwischen dem CO₂-Ausstoß der VKM und dem Δ SOC in der Batterie bekannt sein muss. Dieser Zusammenhang kann durch die energetische Betrachtung des Fahrzeugs aus Kapitel 3 erfolgen, wobei die zu analysierende Wirkkette von der Bordnetzlast abhängt, siehe Gleichung (3.14) auf Seite 30. In Abbildung 1.5 ist dies durch den Kopplungsweg 4 dargestellt.

¹³Die Gleichung (6.6) gilt auch für jede andere Richtung.

6.4.1. Fall 1: Hohe Bordnetzlast

Bei hoher Bordnetzlast gilt Fall 1 aus Gleichung (3.14). Um hierfür den CO₂-Ausstoß in Relation zum Δ SOC zu setzen, wird die Energie, welche in der Batterie gespeichert ist, durch den Wirkungsgrad des Riemens und der Maschine dividiert, siehe Gleichung (6.10).

$$E_{VKM} = \frac{E_{Batt}}{\eta_{VKM,diff} \cdot \eta_{Riem} \cdot \eta_{Masch}} \quad (6.10)$$

Die Energie E_{VKM} , welche die VKM aufbringen muss, lässt sich in einen äquivalenten CO₂-Ausstoß umrechnen. Es ergibt sich die Gleichung (6.11).

$$\text{CO}_2 = \frac{E_{Batt}}{H \cdot \rho \cdot \eta_{VKM,diff} \cdot \eta_{Riem} \cdot \eta_{Masch}} \cdot U_b \quad (6.11)$$

Hierin sind H der Heizwert des Kraftstoffs, ρ dessen Dichte sowie U_b der Umrechnungsfaktor zwischen Kraftstoffverbrauch und CO₂-Ausstoß. Wird die Gleichung (6.11) durch die im Fahrzyklus zurückgelegte Strecke s_{Zy} dividiert, ergibt sich der Zusammenhang in Gleichung (6.12).

$$\frac{\text{CO}_2}{\text{km}} = \frac{E_{Batt}}{H \cdot \rho \cdot \eta_{VKM,diff} \cdot \eta_{Riem} \cdot \eta_{Masch}} \cdot U_b \cdot \frac{1}{s_{Zy}} \quad (6.12)$$

Ersetzt man in Gleichung (6.12) E_{Batt} mit $E_{Batt,max} \cdot \Delta$ SOC, erhält man die Energie, welche die VKM aufbringen muss, um den Ladezustand zu erhöhen, siehe Gleichung (6.13).

$$\underbrace{\frac{\text{CO}_2}{\text{km}}}_{F(h)} = \underbrace{\frac{E_{Batt,max}}{H \cdot \rho \cdot \eta_{VKM,diff} \cdot \eta_{Riem} \cdot \eta_{Masch}} \cdot U_b \cdot \frac{1}{s_{Zy}}}_a \cdot \underbrace{\Delta \text{ SOC}}_h \quad (6.13)$$

Bei der Analyse der Gleichung (6.13) stellt man fest, dass diese eine ähnliche Form hat wie die Gleichung (6.8), lediglich ist $b = 0$. So kann im Falle einer hohen Bordnetzlast die Konstante a bestimmt werden. Hieraus lässt sich dann wiederum der Penalty-Faktor als Funktion der Verletzung der Nebenbedingung ableiten, siehe Gleichung (6.9). Für eine geringe Bordnetzlast ergeben sich die Zusammenhänge des nächsten Abschnitts.

6.4.2. Fall 2: Geringe Bordnetzlast

Ist die Bordnetzlast gering, kann die elektrische Maschine als Motor agieren und die VKM in Beschleunigungsphasen des Fahrzeugs unterstützen. Es gilt Fall 2 in Gleichung (3.14). Analog zum vorangegangenen Abschnitt lässt sich der Zusammenhang zwischen dem CO₂-Ausstoß und der Verletzung der Nebenbedingung herleiten. Es gilt die Gleichung (6.14).

$$\underbrace{\frac{\text{CO}_2}{\text{km}}}_{F(h)} = \underbrace{\frac{E_{Batt,max} \cdot \eta_{Riem} \cdot \eta_{Masch}}{H \cdot \rho \cdot \eta_{VKM,diff}} \cdot U_b \cdot \frac{1}{s_{Zy}}}_a \cdot \underbrace{\Delta \text{ SOC}}_h \quad (6.14)$$

Es ist zu erkennen, dass der Wirkungsgrad des Riemens und der elektrischen Maschinen in Gleichung (6.14) sich nun im Zähler befinden anstatt wie in Gleichung (6.13) im Nenner, was auf die geänderte Energieflussrichtung zurückzuführen ist.

Der Penalty-Faktor kann so gewählt werden, dass eine gewisse, im Vorfeld berechenbare, Verletzung der Nebenbedingung eintritt. Entsprechend können die Konvergenzeigenschaften mit der Wahl des Penalty-Faktors beeinflusst werden. Bei der Anwendung der Methode treten jedoch Grenzen auf, welche im folgenden Abschnitt beleuchtet werden.

6.5. Grenzen der Methode

Die Abbildung 6.2 zeigt den Verlauf der Gleichung (6.9). Es ist zu erkennen, dass der Penalty-Faktor für kleine Verletzungen der Nebenbedingung sehr hoch gewählt werden muss. Die überproportionale Zunahme des Penalty-Faktors gegenüber der Verletzung der Nebenbedingung wirkt begrenzend, sodass nicht beliebig kleine Verletzungen der Nebenbedingung möglich sind. Der Grund hierfür sind Konvergenzprobleme des Algorithmus bzw. die schlechte Konditionierung des Optimierungsproblems.

Können gewisse Verletzungen der Nebenbedingung in Kauf genommen werden, kann der Penalty-Faktor kleiner gewählt werden, was dem Konvergenzverhalten entgegenkommt. Bei sehr geringen Werten des Penalty-Faktors zeigen die Kurven in Abbildung 6.2 allerdings nur noch eine sehr geringe Steigung. In diesem Bereich ergibt sich schon bei kleinerer Änderung des Penalty-Faktors eine große Änderung in der Verletzung der Nebenbedingung, welche sich limitierend auf die Methode auswirkt. Der Penalty-Faktor darf deshalb weder zu klein noch zu groß gewählt werden, um ein akzeptables Konvergenzverhalten zu gewährleisten.

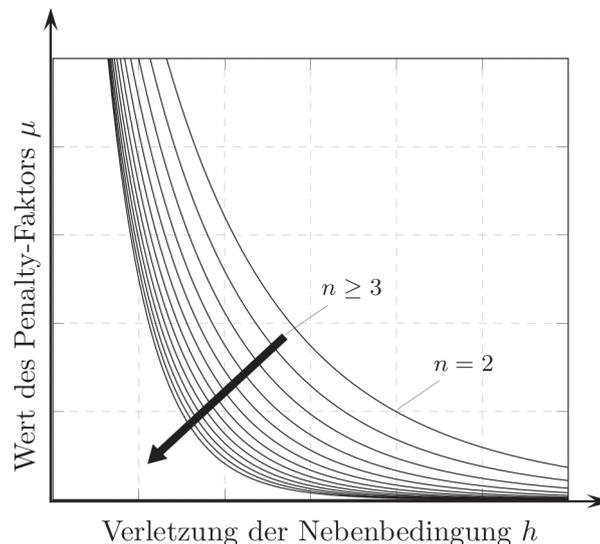


Abbildung 6.2.: Verlauf des Penalty-Faktors als Funktion der Verletzung der Nebenbedingung

Um Grenzen der Penalty-Methode zu erörtern, wird die Optimierung mit unterschiedlichen Penalty-Faktoren durchlaufen, um für extrem hohe und extrem kleine Werte von μ Abweichungen vom berechneten Verlauf nach Gleichung (6.9) zu erkennen. Die Abbildung 6.3 a) zeigt das Verhalten der berechneten Werte und den Ergebnissen aus der Optimierung am Beispiel des WLTC mit dem Penalty-Exponenten $n = 2$.

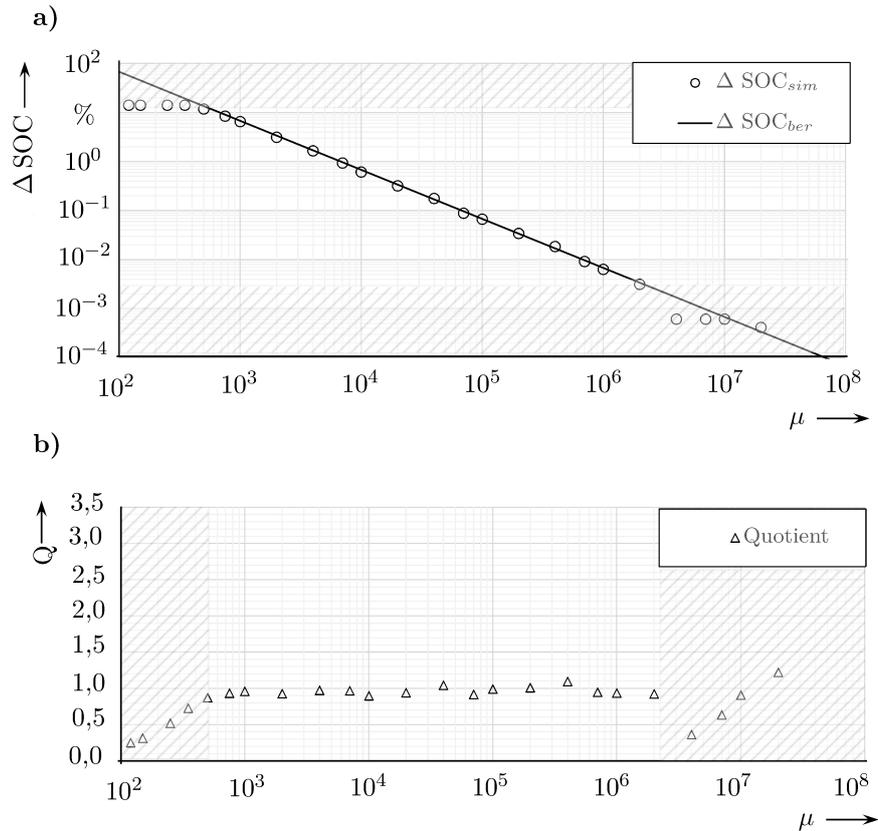


Abbildung 6.3.: Numerische Grenzen der Penalty-Methode und Interaktion mit dem Gesamtfahrzeugmodell für $n = 2$ im WLTC mit hoher Bordnetzlast

In einem sehr weiten Bereich liegen die Punkte auf dem analytischen Zusammenhang. Die Abweichungen zwischen den Ergebnissen aus der Optimierung und den berechneten Werten sind sehr gering. Hingegen sind an den Randgebieten der Abbildung 6.3 a) Abweichungen zu erkennen, welche auf die oben angeführten Effekte zurückzuführen sind (schraffierter Bereich). Ein Maß für die Abweichung zwischen den berechneten Werten (ΔSOC_{ber}) und den Werten aus dem Optimierungsprocedere (ΔSOC_{sim}) stellt der Quotient Q in Gleichung (6.15) dar.

$$Q = \frac{\Delta \text{SOC}_{ber}}{\Delta \text{SOC}_{sim}} \quad (6.15)$$

Die Quotientenbildung zeigt die Abbildung 6.3 b).

Wird der Penalty-Exponent $n = 3$ gewählt, ergibt sich die Abbildung 6.4 a), welche ebenfalls den Vergleich zwischen den Ergebnissen der Optimierung und den berechneten Werten zeigt.

Der Quotient zwischen den Ergebnissen der Optimierung und den berechneten Werten ist in der Abbildung 6.4 b) zu sehen. Weitere Ergebnisse sind im Anhang A.3 zu finden. Diese zeigen die weiteren Gültigkeitsbereiche im Falle anderer Fahrzyklen und Bordnetzlasten. Als Zusammenfassung ergeben sich die Gültigkeitsbereiche in Tabelle 6.1.

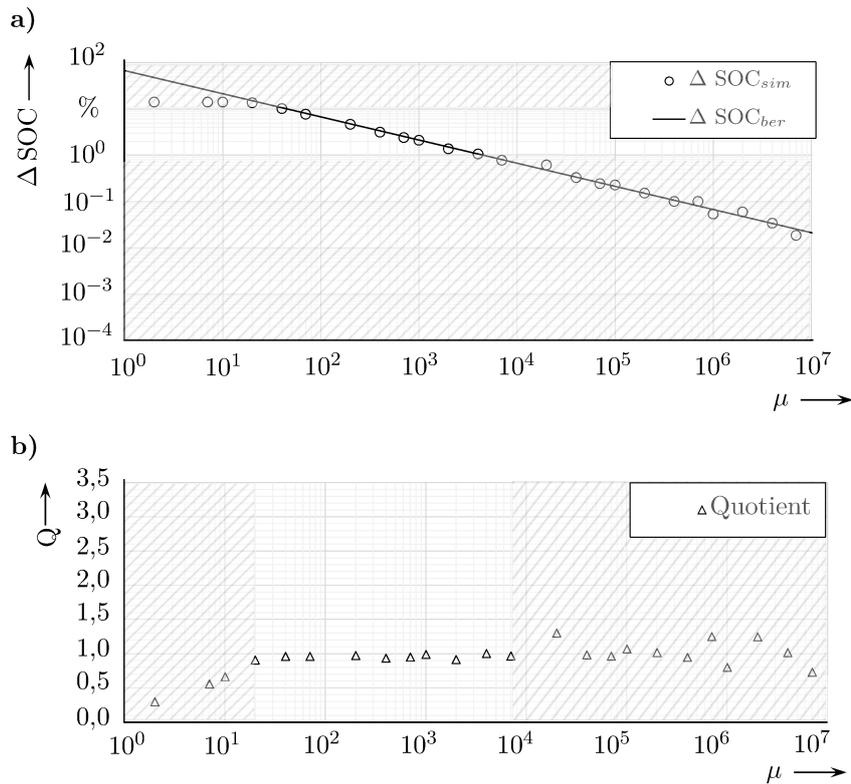


Abbildung 6.4.: Numerische Grenzen der Penalty-Methode und Interaktion mit dem Gesamtfahrzeugmodell für $n = 3$ im WLTC mit hoher Bordnetzlast

Gültiger Δ SOC-Bereich (%)	WLTC		NEFZ	
	$n = 2$	$n = 3$	$n = 2$	$n = 3$
Hohe Bordnetzlast	0,0031 – 11,81	0,77 – 13,66	0,13 – 12,50	0,092 – 6,63
Niedrige Bordnetzlast	0,23 – 23,04	0,039 – 17,47	0,091 – 23,95	0,19 – 4,15

Tabelle 6.1.: Gültigkeitsbereiche der Penalty-Methode für untersuchte Problemstellung

6.6. Zusammenfassung des Kapitels

Wird der Penalty-Faktor sehr hoch gewählt, dominiert nach Gleichung (6.1) der Teil zur Einbindung der Nebenbedingung die komplette Optimierungsaufgabe. Daraus entstehen Konvergenzprobleme. Wenn im Umkehrschluss der Penalty-Faktor sehr klein gewählt wird, kommt es im Extremfall zu keinerlei Berücksichtigung der Nebenbedingung mehr und Optimierungsergebnisse verlieren ihre Gültigkeit. In den Randbereichen der Abbildung 6.2 ist eine hohe gegenseitige Sensitivität zwischen dem Penalty-Faktor und dem Δ SOC zu beobachten. Dies führt zu Grenzen der Anwendbarkeit der Penalty-Methode, da sich in diesen Bereichen schon kleinste Änderungen stark auf das Ergebnis auswirken. Es ist aber ersichtlich, dass in einem weiten Bereich die Penalty-Methode eingesetzt werden kann.

Um die unterschiedlich großen elektrischen Maschinen im Triebstrang bewerten zu können, muss sichergestellt sein, dass Änderungen im Ladezustand nicht die Ergebnisse der Optimierung beeinflussen. Aus diesem Grund wird die Optimierung der Fahrzeuge so gestaltet, dass immer die

gleiche Abweichung von der SOC-Neutralität gewährleistet ist. Eine einheitliche Abweichung von 0,5% des Δ SOC wird deshalb im Folgenden zugelassen. Des Weiteren zeigt die Tabelle 6.1, dass die quadratische Penalty-Methode einen großen Anwendungsbereich abdeckt. So wurde die quadratische Penalty-Methode genutzt, um die Ergebnisse des nächsten Kapitels zu erzielen.

6.7. Ergebnisse der gesamten Optimierungsmethode

Für das Compact-Fahrzeug ergeben sich für eine hohe bzw. niedrige Bordnetzlast die Ergebnisse in den Abbildungen 6.5 und 6.6. Es zeigt sich ein hoher Grad der Übereinstimmung zwischen den Optimierungsergebnissen und den Verläufen der energetischen Betrachtung des Triebstrangs aus dem dritten Kapitel.

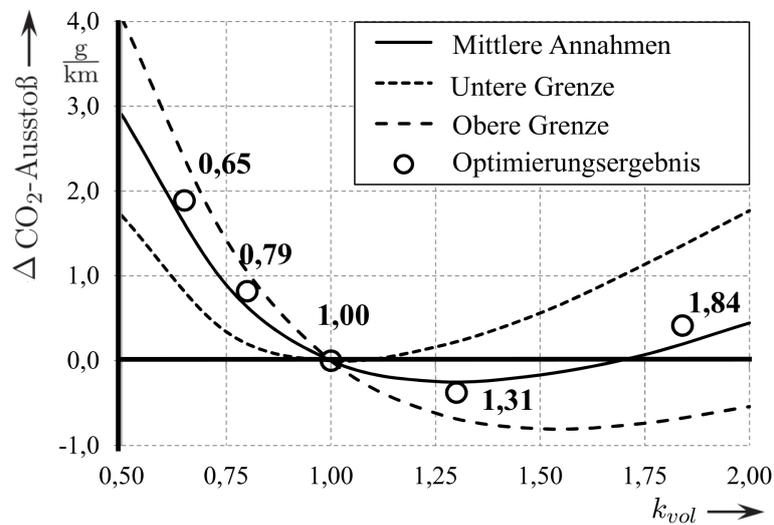


Abbildung 6.5.: CO₂-Einsparung in Abhängigkeit der Maschinengröße im WLTC bei einem Compact-Fahrzeug mit hoher Bordnetzlast

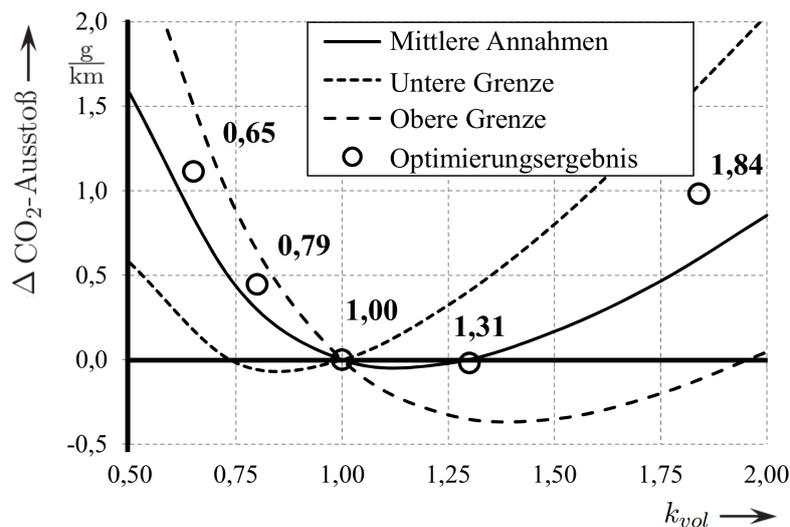


Abbildung 6.6.: CO₂-Einsparung in Abhängigkeit der Maschinengröße im WLTC bei einem Compact-Fahrzeug mit geringer Bordnetzlast

Die Kurven weiterer Fahrzeuge sind im Anhang unter A.4 zu finden. Eine Übersicht der Ergebnisse zeigt die Tabelle 6.2. Für den Fall, dass zwei Maschinengrößen zum gleichen CO₂-Ausstoß führen, wird jeweils die kleinere Maschinengröße als optimal in Tabelle 6.2 aufgeführt.

	Hohe Bordnetzlast		Niedrige Bordnetzlast	
	NEFZ	WLTC	NEFZ	WLTC
SComp-Fahrzeug	0,79	0,79	0,54	0,65
Compact-Fahrzeug	1,31	1,31	1,31	1,00
SUV	1,84	1,84	1,31	1,31

Tabelle 6.2.: Energetisch optimale Maschinengrößen

7. Zusammenfassung

Der Einsatz von elektrischen Maschinen zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes in Kraftfahrzeugen ist sinnvoll. Dennoch darf die elektrische Maschine nicht über- oder unterdimensioniert sein. Anhand eines Mildhybridfahrzeugs zeigt die Arbeit, welche Einflüsse betrachtet werden müssen, um die elektrische Maschine energetisch optimal in die untersuchte Triebstrangtopologie zu integrieren. Das untersuchte Mildhybridfahrzeuge nutzt den bereits im konventionellen Triebstrang vorhandenen Bordnetzgenerator, um einerseits Energie aus den Verzögerungsphasen zurückzugewinnen. Andererseits wird die elektrische Maschine genutzt, um die VKM zu unterstützen. Bei der untersuchten Topologie ist die elektrische Maschine permanent mit der VKM verbunden. Des Weiteren handelt es sich bei der eingesetzten elektrischen Maschine um eine Klauenpolmaschine.

An dieser Topologie wird eine durchgehende Entwicklungsmethodik dargestellt, welche sich in die vier Bereiche „Energetische Betrachtung des Triebstrangs“, „Wachstumsgesetze der elektrischen Maschine“, „Modellierung der elektrischen Maschine“ und „Bewertung und Optimierung im Gesamtsystem“ gliedert. So zeigt das Kapitel „Energetische Betrachtung des Triebstrangs“, dass eine zu klein dimensionierte Maschine nicht optimal zu agieren vermag, da sie nur wenig Energie aus Verzögerungsphasen des Fahrzeugs zurückgewinnen kann. Auf der anderen Seite erweist sich eine zu groß dimensionierte elektrische Maschine ebenfalls als nachteilig. Das hierdurch entstehende energetische Optimum weist eine ausgewogene Maschinengröße auf, welche weder zu klein noch zu groß ist.

Die energetische Betrachtung des Triebstrangs in Kapitel 3 beruht auf einer analytischen Vorgehensweise, die durch Annahmen, wie z.B. eines mittleren Wirkungsgrads von Komponenten, Unsicherheiten aufweist. Aus dieser Betrachtung kann ein Bereich abgeleitet werden, in welchem sich die energetisch optimale Maschinengröße befindet. Bei der Betrachtung der elektrischen Maschine in dem Kapitel „Wachstumsgesetze der elektrischen Maschine“ gelingt es, aufgrund der Windungszahlanpassung des Stators diskrete Maschinengrößen zu definieren. Die Überlagerung des diskretisierten Lösungsraums der Maschinengröße und des in Kapitel 3 abgeleiteten Bereichs führt zu einer endlichen Zahl an Lösungen. Im Falle eines Compact-Fahrzeugs führt diese Einschränkung schon zum Finden einer energetisch optimalen Maschinengröße. An diesem Beispiel zeigt sich, dass das energetische Optimum in manchen Fällen auch ohne Simulation und ohne den Einsatz von Optimierungsalgorithmen gefunden werden kann.

Falls mehrere Maschinengrößen in den energetisch sinnvollen Bereich fallen, muss auf numerische Simulationen zurückgegriffen werden, was eine betriebspunktabhängige Darstellung des Wirkungsgrads der Klauenpolmaschine nach sich zieht. Um Kennfelder dieser Art zu erzeugen, können numerische FEM-Analysen erfolgen, welche aber bei weitem zu zeitintensiv sind, um sie in dieser Arbeit wirkungsvoll einzusetzen. So wird die Maschine in Kapitel 5 über ihr Verlustverhalten beschrieben, welches auf den Grundzügen elektrischer Maschinen aufbaut. Es wird bewusst darauf verzichtet, die elektrische Maschine über die Flussverkettung bzw. über die innere Leistung zu beschreiben. Vielmehr ist es das Ziel, die ausgeprägten und analytisch gut beschreibbaren Verlustquellen zu betrachten und über die Leistungsbilanz auf das Wirkungsgradkennfeld der elektrischen Maschine zu schließen.

Das aus den Verlusten abgeleitete Wirkungsgradkennfeld der elektrischen Maschine ermöglicht die Bewertung der Maschinen mit numerischer Simulation und Optimierung. Dadurch ist es möglich, die im Fahrzeug eingesetzte Betriebsstrategie und deren Auswirkung auf den CO₂-Ausstoß zu simulieren. Bei der numerischen Simulation ist darauf zu achten, dass der Ladezustand der Batterie vor und nach Beendigung des Fahrzyklus bei jeder untersuchten Größe der elektrischen Maschine bzw. bei jedem untersuchten Fahrzeug ausgeglichen ist. Hierzu wird die Penalty-Methode verwendet, bei welcher sich die einzelnen Straffaktoren, die sog. Penalty-Faktoren, analytisch aus dem Kapitel 3 ableiten lassen.

Die durchgängige Entwicklungsmethode erlaubt es, die energetisch optimale Maschinengröße zu finden. Dabei beruht die Methode auf der Interaktion und der Abstimmung der einzelnen Kapitel. So kann Wissen von der Systembetrachtung in die Komponentenebene einfließen und umgekehrt. Beispielsweise wird auf der Komponentenebene die Schleppkennlinie der elektrischen Maschinen berechnet, welche Einfluss auf die energetische Analyse des Triebstrangs hat. Aus der Systembetrachtung ergeben sich hingegen die Betriebsbereiche, in welchen die elektrische Maschine arbeitet. Die Abbildung 7.1 zeigt nochmals das in der Einleitung vorgestellte Vorgehen, nun sind aber die Kopplungswege benannt.

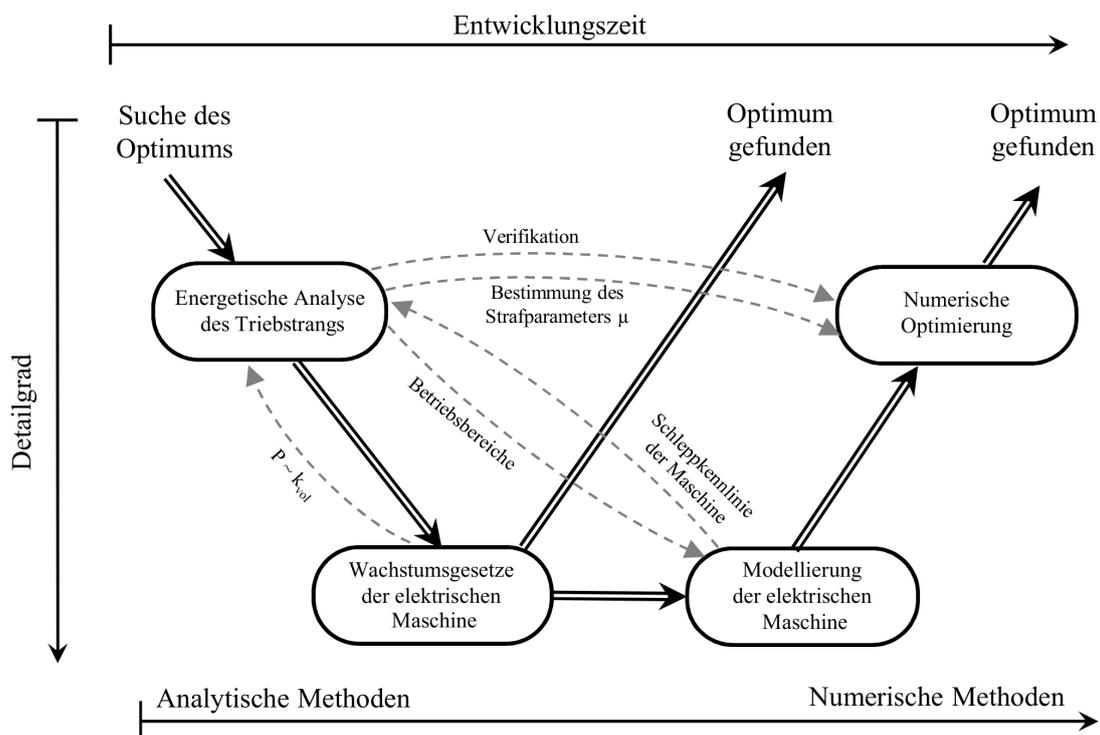


Abbildung 7.1.: Übersicht der Kopplungswege

Um diesen hohen Grad an gegenseitiger Abhängigkeit der einzelnen Themengebiete zu beherrschen bzw. Interaktionen zu erkennen, ist es nötig, unterschiedliche Themenbereiche gleichzeitig zu betrachten. In der vorliegenden Arbeit gelang es dadurch, ein energetisch optimales System auszulegen. Die vorgestellte Methode wurde anhand einer Triebstrangtopologie durchlaufen, wobei die Grundidee der Methode sich auf weitere Topologien übertragen lässt. Mit Hilfe der hier vorgestellten Methode kann gegebenenfalls schon im frühen Stadium der Systementwicklung eine Topologieauswahl vorgenommen werden. Anschließend kann eine gezielte Systemintegration der Komponente erfolgen.

A. Anhang

A.1. Energetisch sinnvolle Bereiche der Maschinengröße

Compact-Fahrzeug im WLTC

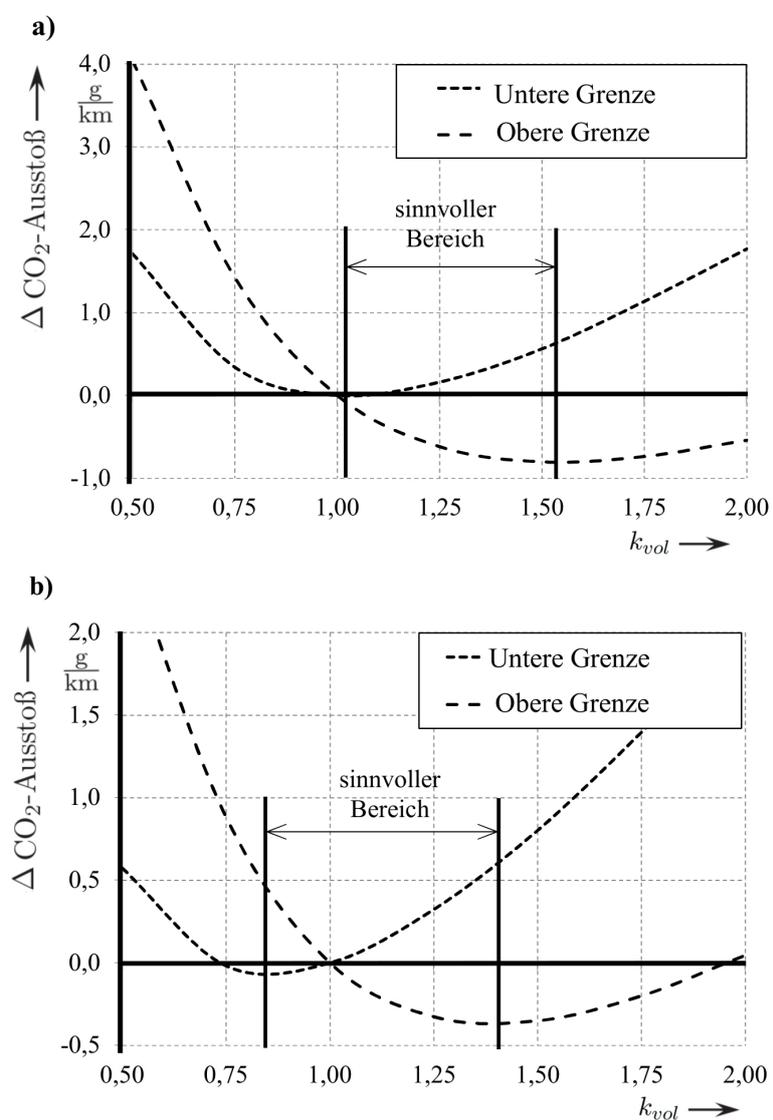


Abbildung A.1.: Compact-Fahrzeug im WLTC a) hohe Bordnetzlast b) geringe Bordnetzlast

SComp-Fahrzeug im WLTC

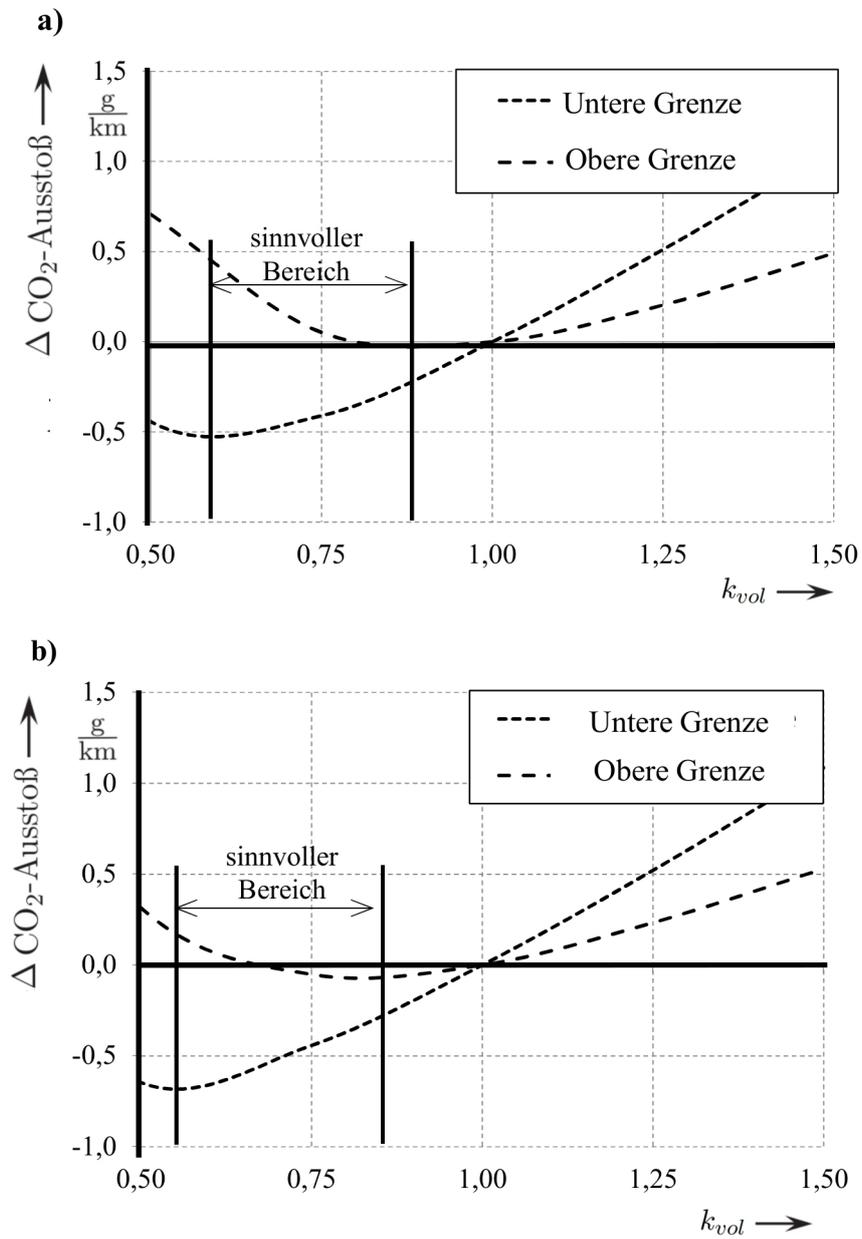


Abbildung A.2.: SComp-Fahrzeug im WLTC a) hohe Bordnetzlast b) geringe Bordnetzlast

SUV im WLTC

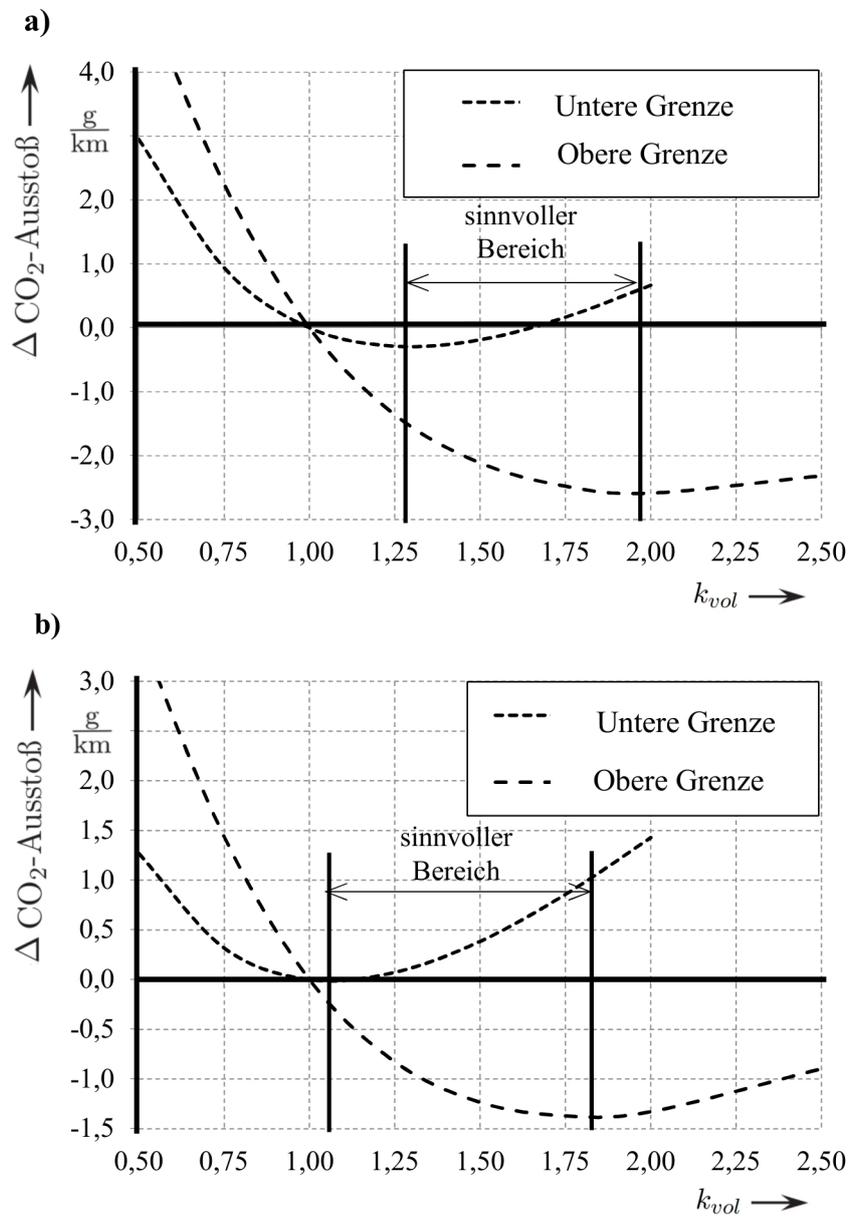


Abbildung A.3.: SUV im WLTC a) hohe Bordnetzlast b) geringe Bordnetzlast

Compact-Fahrzeug im NEFZ

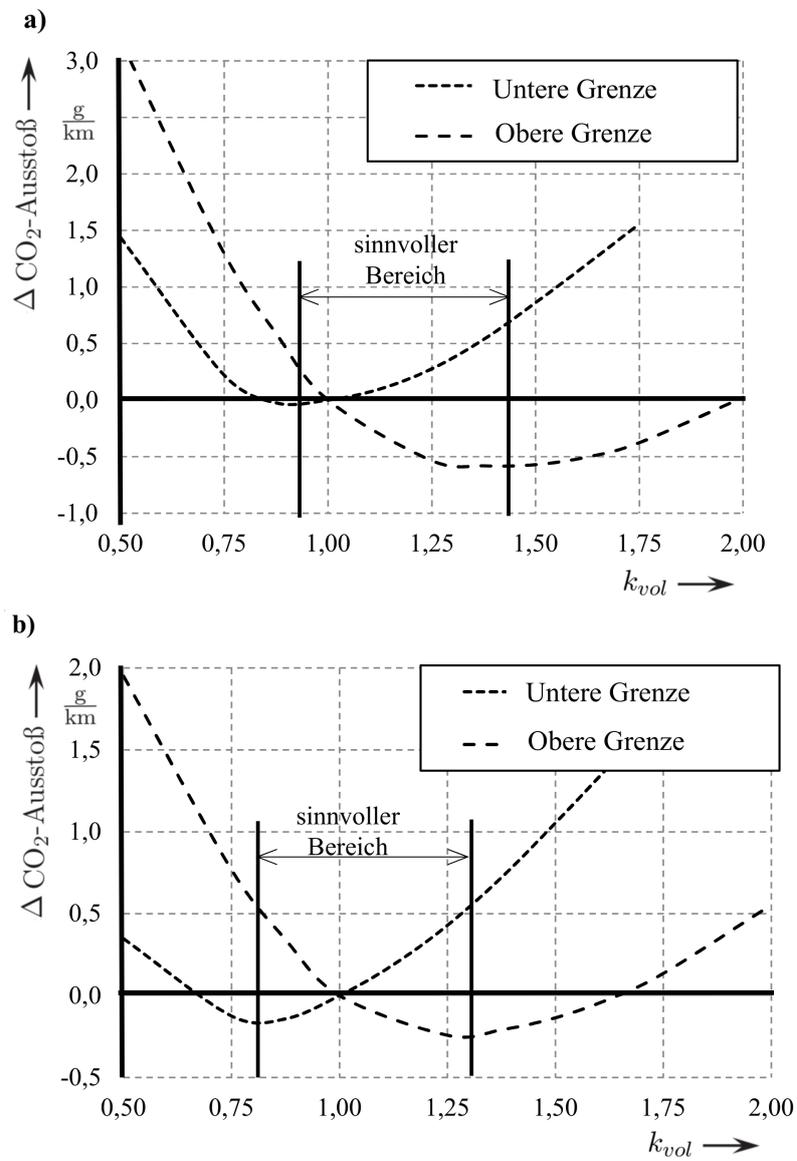


Abbildung A.4.: Compact-Fahrzeug im NEFZ a) hohe Bordnetzlast b) geringe Bordnetzlast

SComp-Fahrzeug im NEFZ

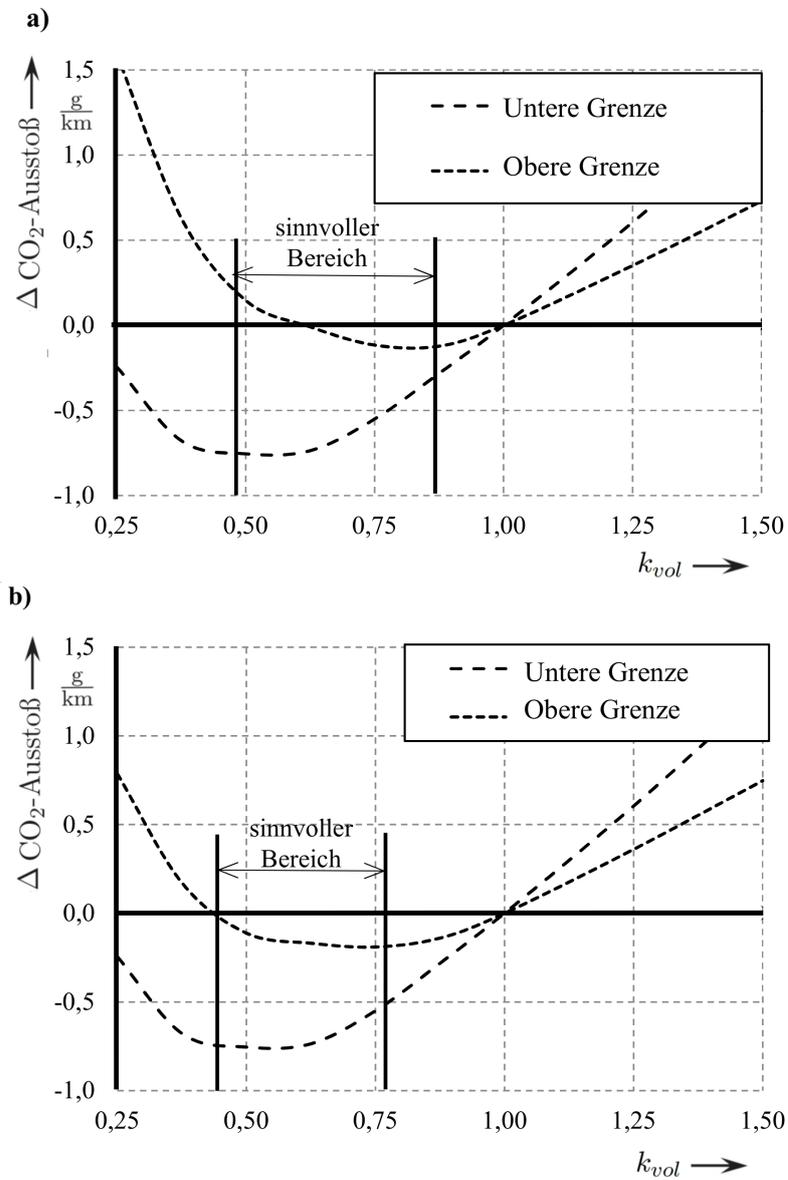


Abbildung A.5.: SComp-Fahrzeug im NEFZ a) hohe Bordnetzlast b) geringe Bordnetzlast

SUV im NEFZ

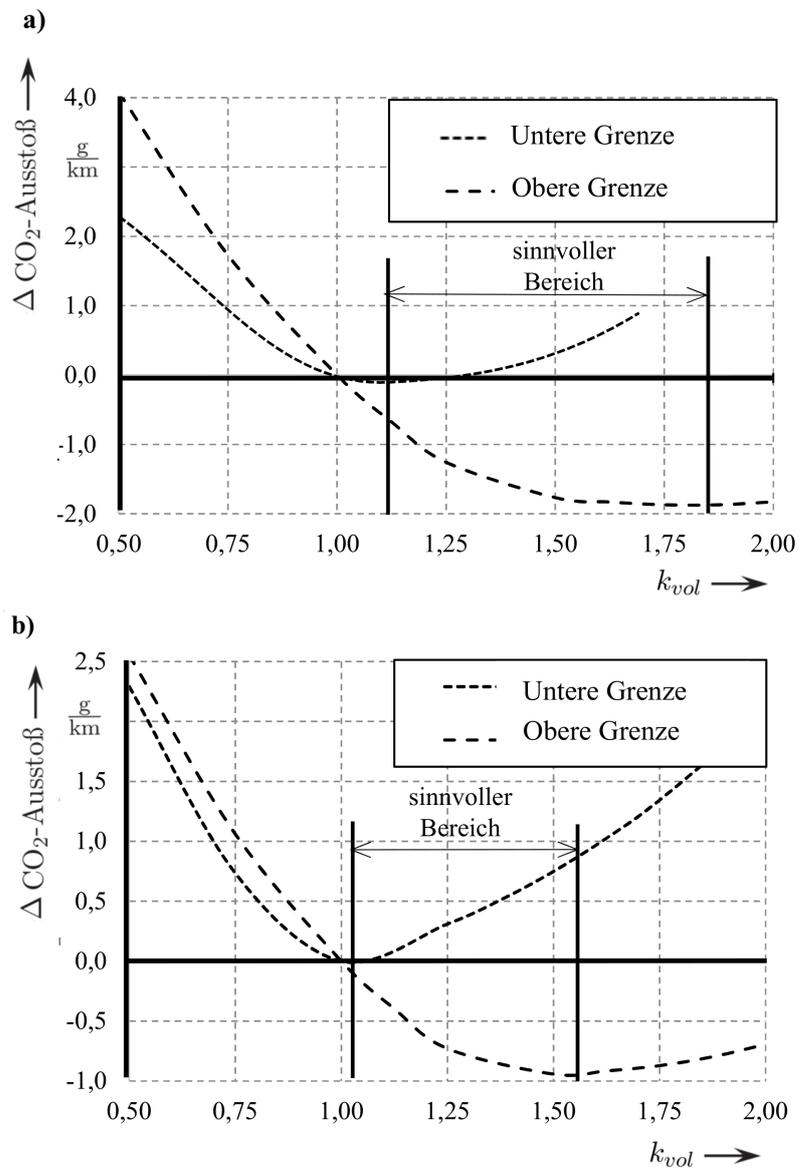


Abbildung A.6.: SUV im NEFZ a) hohe Bordnetzlast b) geringe Bordnetzlast

A.2. Rotordurchflutung

Der Kupferfüllfaktor im Rotor $\kappa_{Cu, Rot}$ wurde für alle untersuchten Maschinen als gleich angenommen. Es ergibt sich die Gleichung (A.1).

$$\kappa_{Cu, Rot} \sim \frac{w_R \cdot d_{Cu, Rot}}{A_{Nut, Rot}} \sim \text{konst.} \quad (\text{A.1})$$

Der Durchmesser des Kupferdrahtes ist mit $d_{Cu, Rot}$, die Anzahl der Windungen mit w_{Rot} und die Fläche des Wickelfensters im Rotor mit $A_{Nut, Rot}$ gekennzeichnet. Um für jede Maschinengröße dieselbe Erregereinheit verwenden zu können, muss der Widerstand der Erregerspule R_{Rot} gleich gehalten werden. Es gilt die Gleichung (A.2).

$$R_{Rot} \sim \frac{w_{Rot} \cdot d_{m, Rot}}{d_{Cu, Rot}} \sim \text{konst.} \quad (\text{A.2})$$

In der Gleichung (A.2) ist $d_{m, Rot}$ der mittlere Durchmesser des Wickelfensters der Erregerspule. Setzt man die Gleichung (A.1) in die Gleichung (A.2) ein, kann der Zusammenhang zwischen dem Skalierungsfaktor k und dem Durchmesser des Kupferdrahts gefunden werden, siehe Gleichung (A.3).

$$d_{Cu, Rot} \sim k^{3/4} \quad (\text{A.3})$$

Die Anzahl der Windungen kann ebenfalls in Abhängigkeit des Skalierungsfaktors k dargestellt werden. Hierzu werden wieder die Gleichungen (A.1) und (A.2) ineinander eingesetzt, eliminiert wird nun aber $d_{Cu, Rot}$. Es ergibt sich der Zusammenhang in Gleichung (A.4).

$$w_{Rot} \sim k^{1/2} \quad (\text{A.4})$$

Die Abbildung A.7 zeigt den berechneten Verlauf der Rotorwindungszahl in Abhängigkeit des Volumenskalierungsfaktors k_{vol} . Die exakten Werte aus der Berechnung nach Gleichung (A.4) müssen abgerundet werden, um sicherzustellen, dass die Windungen in das Wickelfenster des Rotors passen. In Tabelle A.1 sind die Werte für die Rotorwindungszahl bei unterschiedlichen Baugrößen der Maschine aufgeführt.¹⁴

¹⁴Den aufgeführten Baugrößen kommt im Folgenden noch besondere Bedeutung zu.

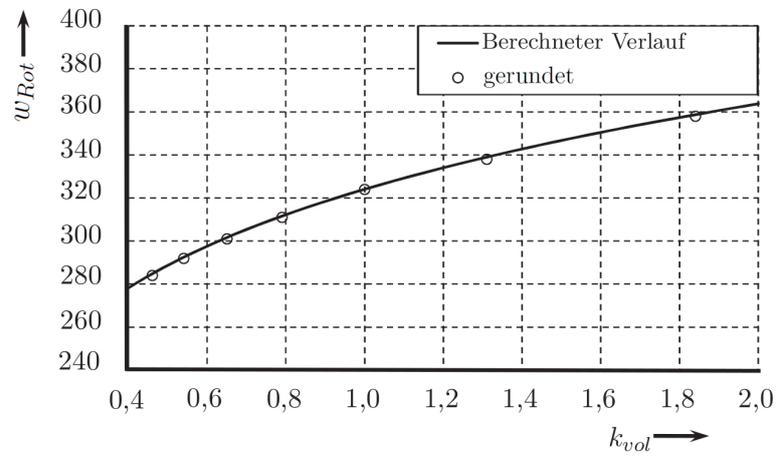


Abbildung A.7.: Verlauf der Rotorwindungszahl in Abhängigkeit des Skalierungsfaktors k_{vol}

k_{vol}	Berechnet	Angewendet
0,46	284,67	284
0,54	292,38	292
0,65	301,55	301
0,79	311,52	311
1,00	324,00	324
1,31	338,91	338
1,84	358,66	358

Tabelle A.1.: Vergleich zwischen den berechneten und den angewendeten Werten für die Rotorwindungszahl w_R

A.3. Gültigkeitsbetrachtung der Penalty-Methode

Betrachtungen im NEFZ bei hoher Bordnetzlast und einem Penalty-Exponenten von $n=2$

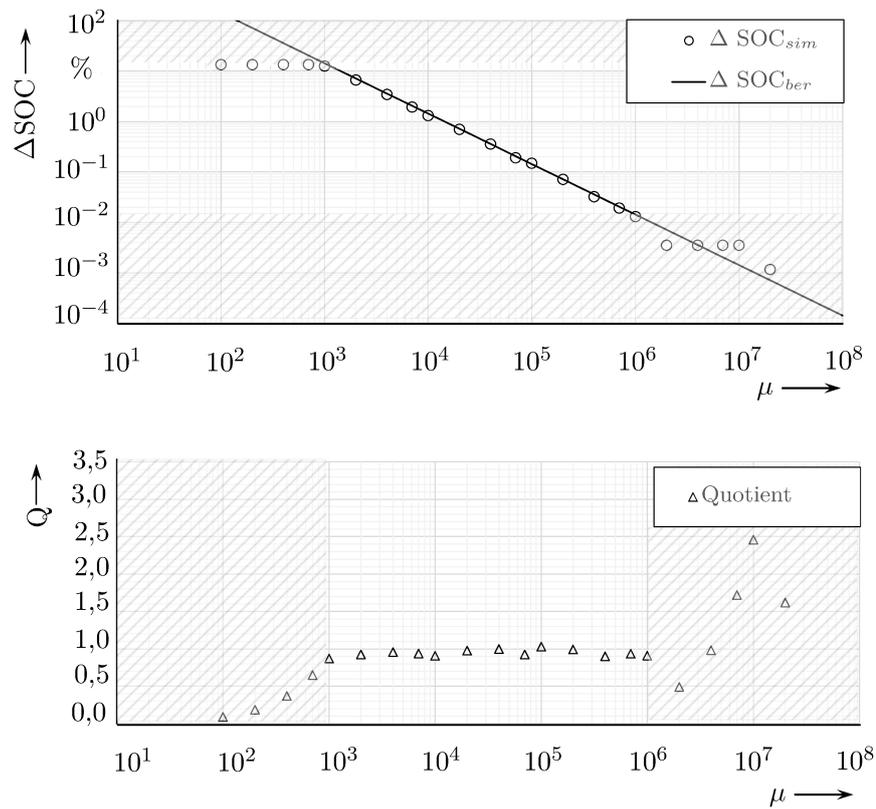


Abbildung A.8.: Gültigkeitsbereich im NEFZ bei hoher Bordnetzlast und einem Penalty-Exponent von $n = 2$

Betrachtungen im NEFZ bei hoher Bordnetzlast und einem Penalty-Exponent von $n=3$

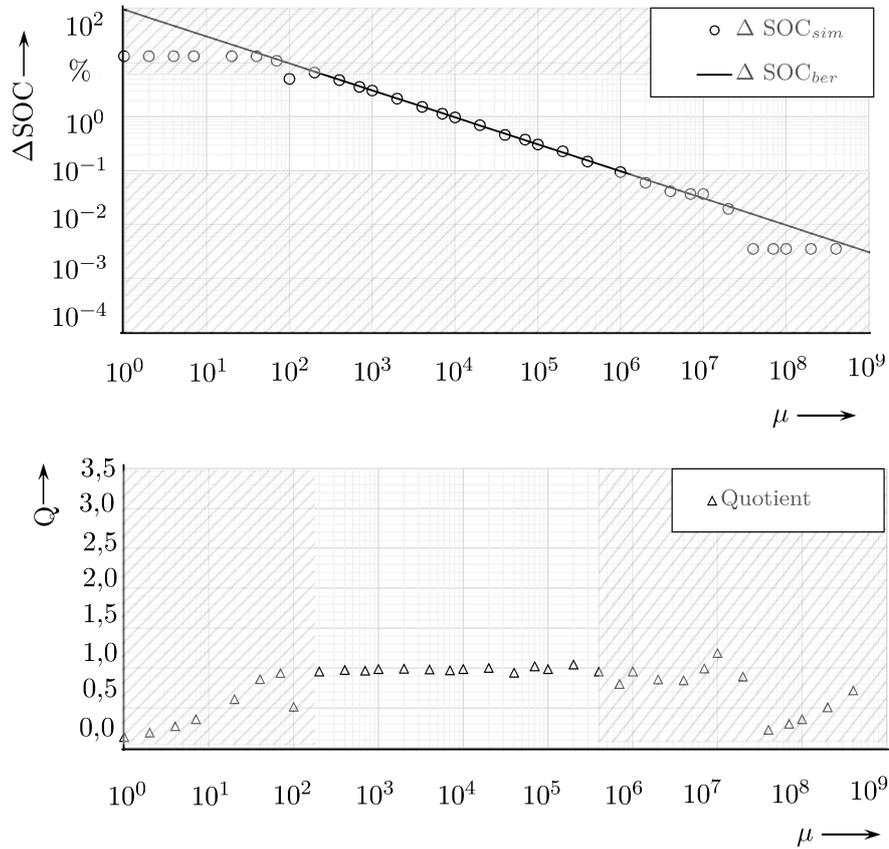


Abbildung A.9.: Gültigkeitsbereich im NEFZ bei hoher Bordnetzlast und einem Penalty-Exponent von $n = 3$

Betrachtungen im NEFZ bei niedriger Bordnetzlast und einem Penalty-Exponent von $n=2$

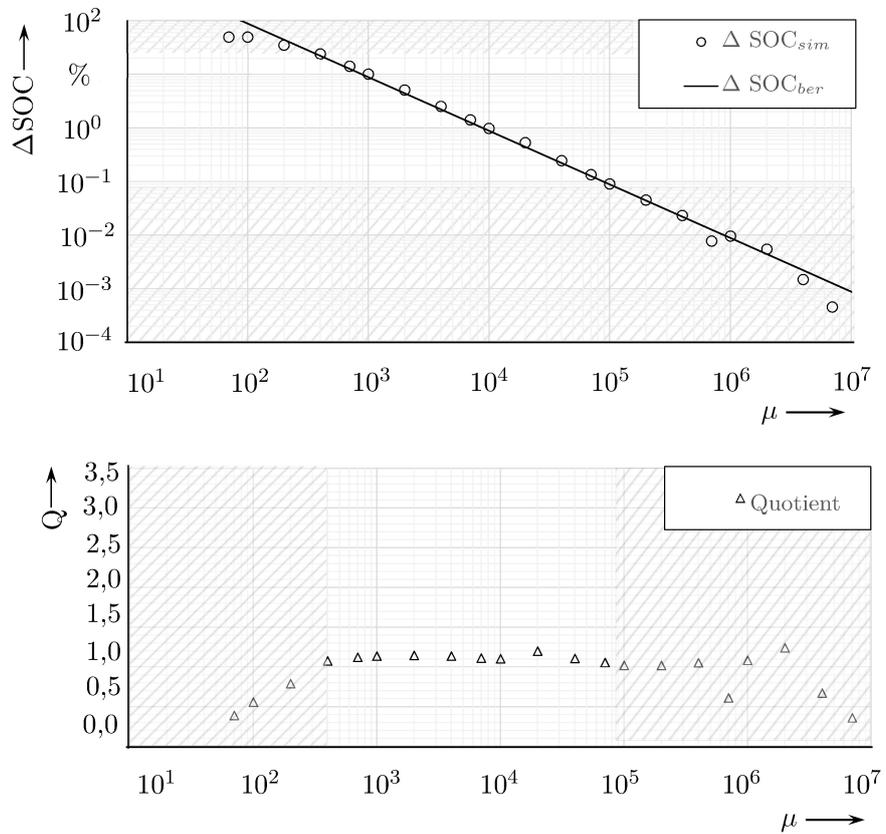


Abbildung A.10.: Gültigkeitsbereich im NEFZ bei niedriger Bordnetzlast einem Penalty-Exponent von $n = 2$

Betrachtungen im NEFZ bei niedriger Bordnetzlast und einem Penalty-Exponent von $n=3$

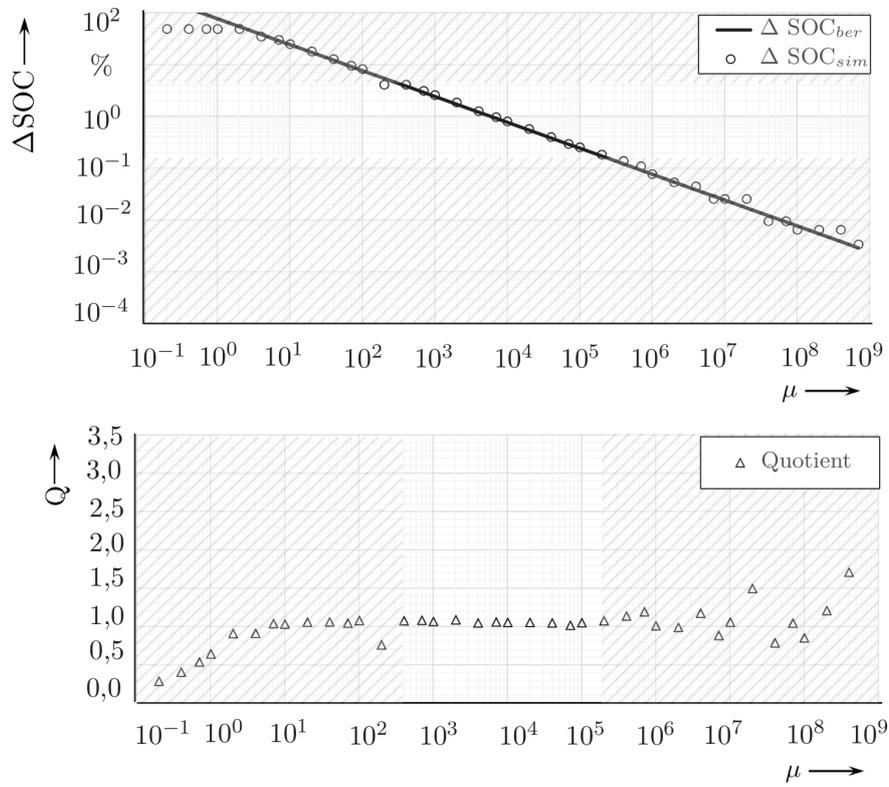


Abbildung A.11.: Gültigkeitsbereich im NEFZ bei niedriger Bordnetzlast einem Penalty-Exponent von $n = 3$

Betrachtungen im WLTC bei niedriger Bordnetzlast und einem Penalty-Exponent von $n=2$

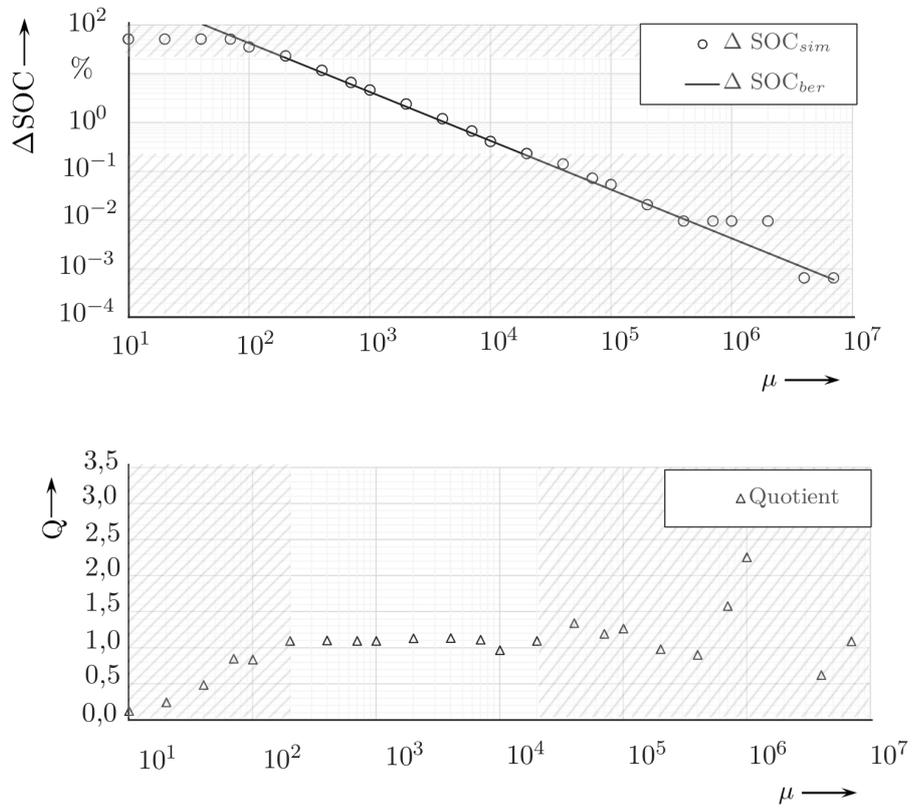


Abbildung A.12.: Gültigkeitsbereich im WLTC bei niedriger Bordnetzlast einem Penalty-Exponent von $n = 2$

Betrachtungen im WLTC bei niedriger Bordnetzlast und einem Penalty-Exponent von $n=3$

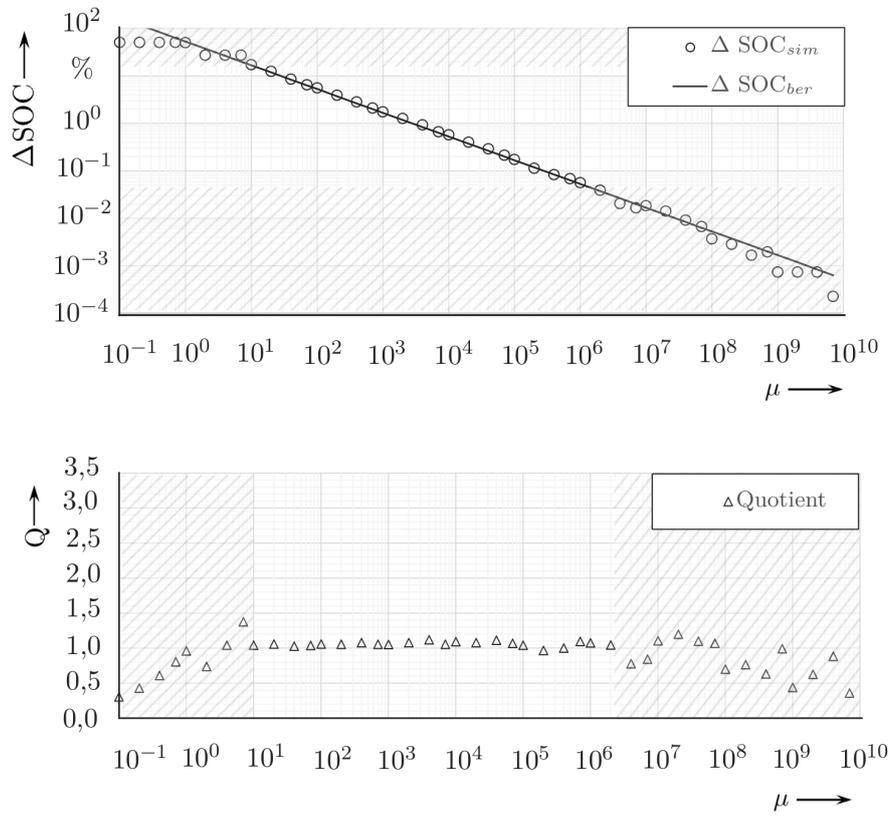


Abbildung A.13.: Gültigkeitsbereich im WLTC bei niedriger Bordnetzlast einem Penalty-Exponent von $n = 3$

A.4. Ergebnisse der gesamten Methode

SUV im WLTC

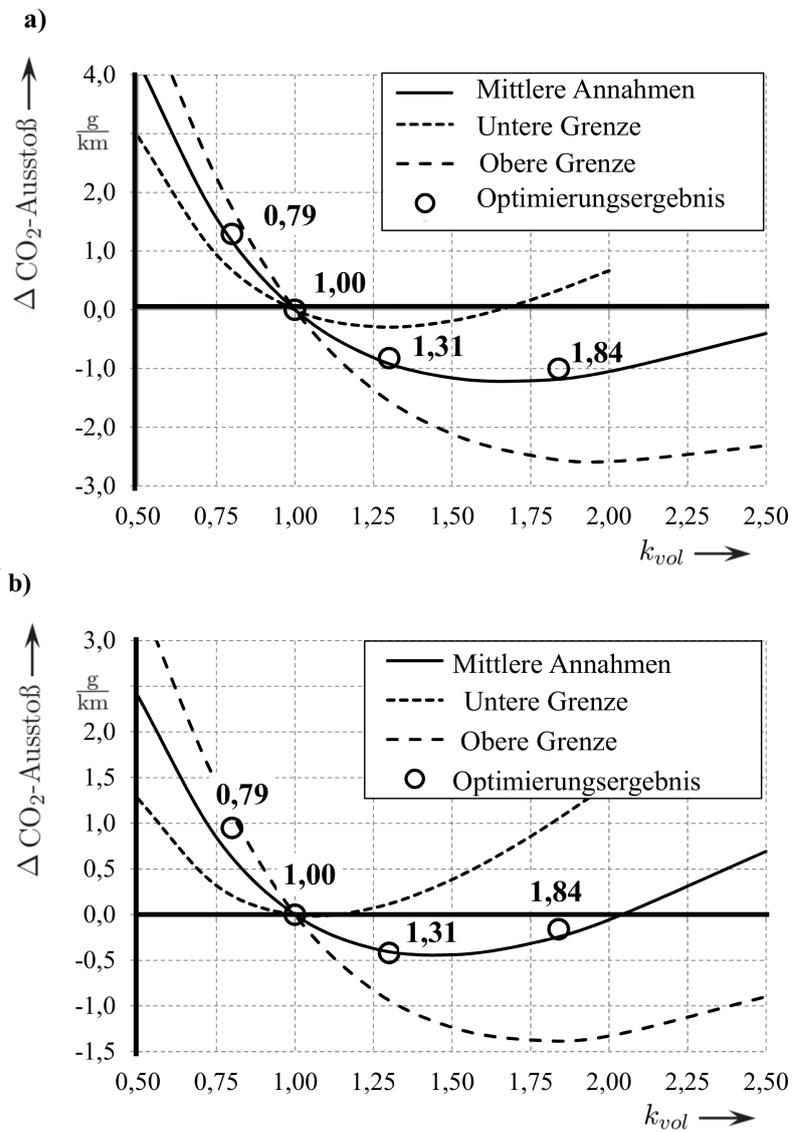


Abbildung A.14.: SUV im WLTC a) hohe Bordnetzlast b) geringe Bordnetzlast

SComp-Fahrzeug im WLTC

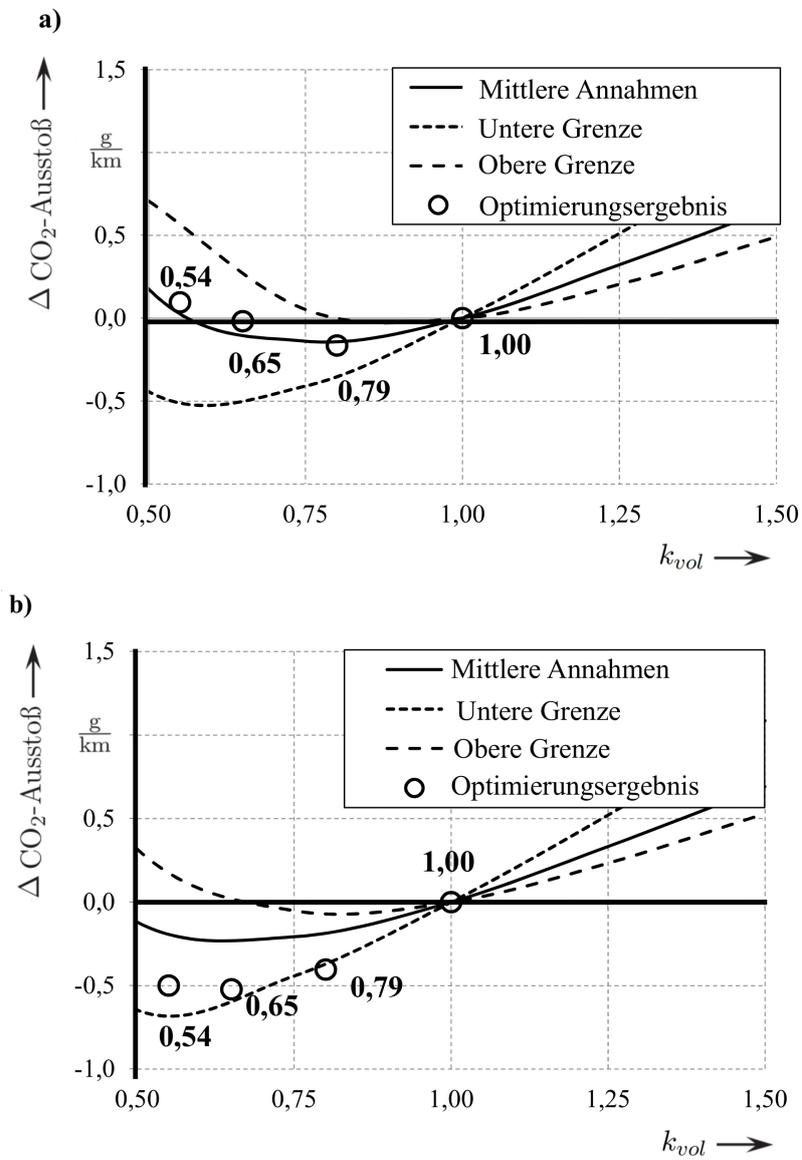


Abbildung A.15.: SComp-Fahrzeug im WLTC a) hohe Bordnetzlast b) geringe Bordnetzlast

Compact-Fahrzeug im NEFZ

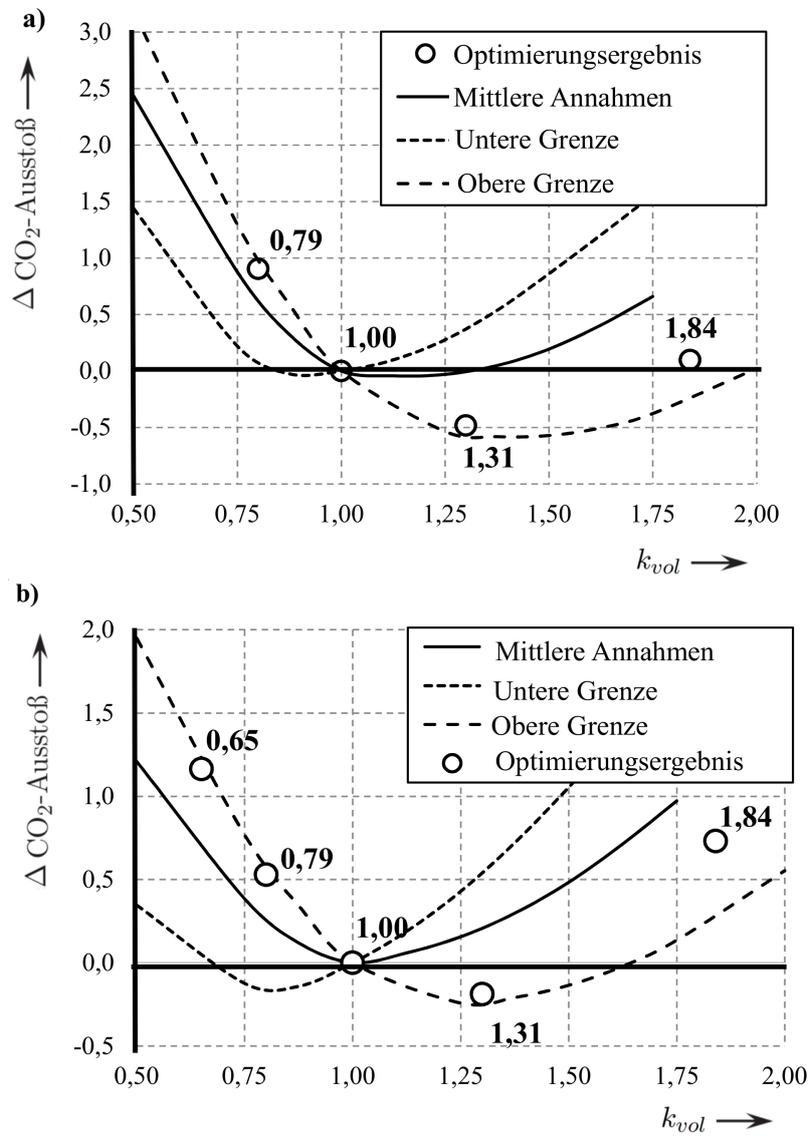


Abbildung A.16.: Compact-Fahrzeug im NEFZ a) hohe Bordnetzlast b) geringe Bordnetzlast

SComp-Fahrzeug im NEFZ

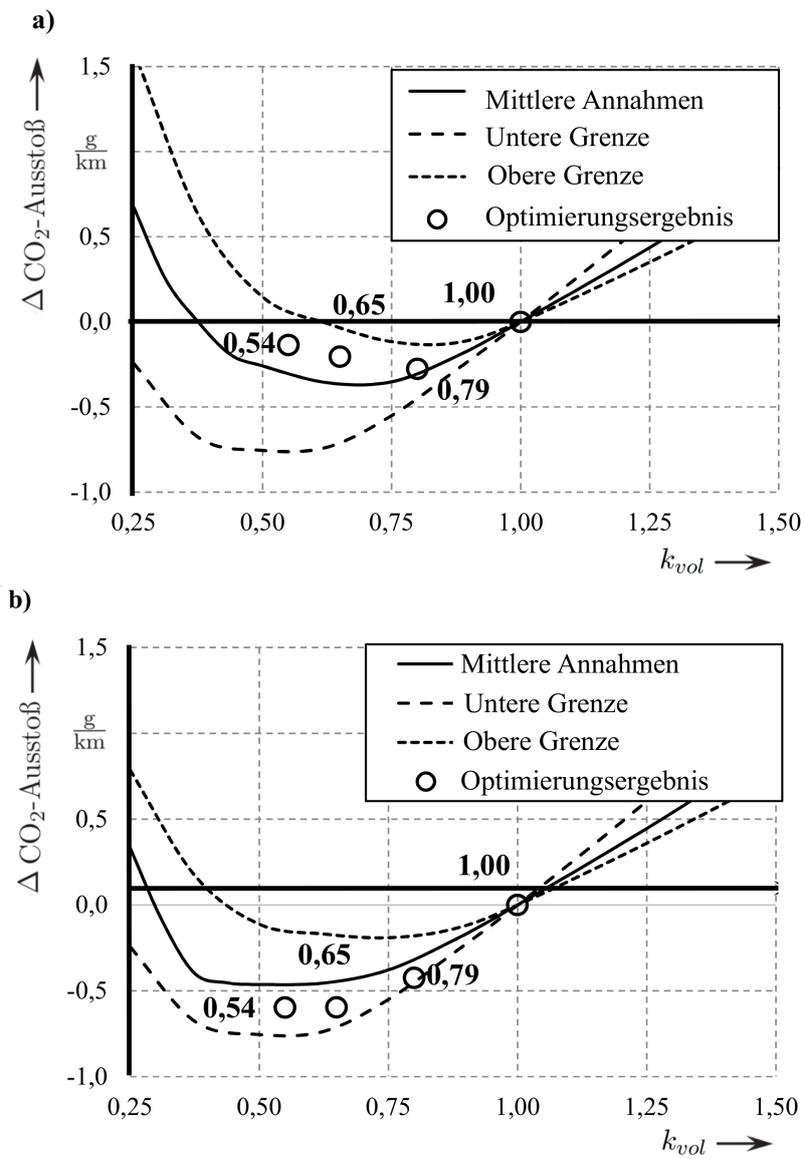


Abbildung A.17.: SComp-Fahrzeug im NEFZ a) hohe Bordnetzlast b) geringe Bordnetzlast

SUV im NEFZ

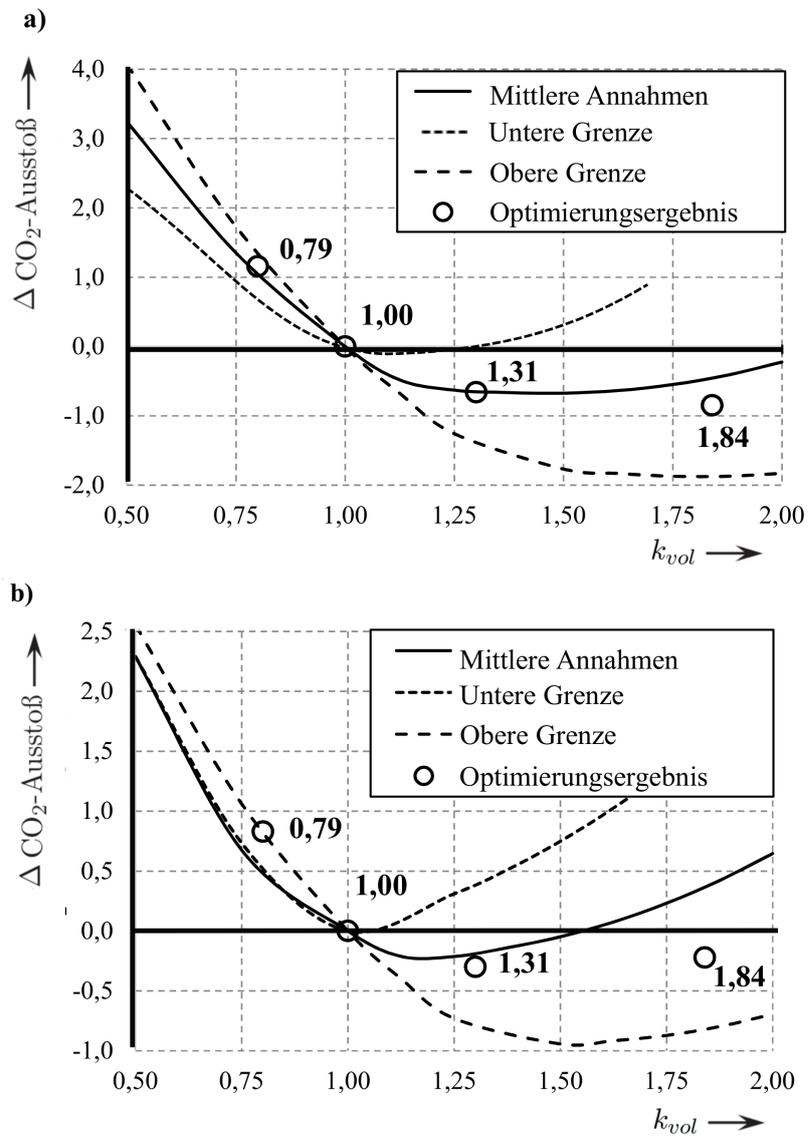


Abbildung A.18.: SUV im NEFZ a) hohe Bordnetzlast b) geringe Bordnetzlast

Abbildungsverzeichnis

1.1.	Der CO ₂ -Ausstoß unterschiedlicher Branchen nach [3]	1
1.2.	Prognose zur Erreichung der CO ₂ -Ziele unterschiedlicher Automobilhersteller [5], [6]	2
1.3.	Kraftstoffverbrauch eines Vollhybridfahrzeugs in Abhängigkeit einer zunehmenden Elektrifizierung und unterschiedlicher Batteriegrößen [7], zusätzlich ist die nötige Auflösung für die energetische Optimierung eines Mildhybridfahrzeugs eingezeichnet	3
1.4.	V-Modell der Systementwicklung	3
1.5.	Vorgehen in der vorliegenden Arbeit	4
2.1.	Topologie eines parallelen Hybridfahrzeugs a) und eines seriellen Hybridfahrzeugs b)	6
2.2.	Topologie des untersuchten Mildhybridfahrzeugs	7
2.3.	SOC-abhängige Betriebsstrategie des Fahrzeugs	10
2.4.	Abbildung des Parameterraums auf die Zielfunktion	11
2.5.	Berechnung der Fibonacci-Zahlen bis Fib(5)	12
2.6.	Streben nach einem Minimum des DIRECT-Algorithmus mit beispielhaften Zahlenwerten	15
2.7.	Vergleich zwischen energetischer Betrachtung und dem numerischen Fahrzeugmodell [51]	16
2.8.	Kraftfahrzeuggenerator in Klauenpolausführung	17
2.9.	Explosionszeichnung des Rotors einer hybriderregten Klauenpolmaschine	17
2.10.	Rotorfluss im Betrieb der Klauenpolmaschine	18
2.11.	Übersicht der Verschaltung des Umrichters und der elektrischen Maschine	18
2.12.	Betriebsbereiche der elektrischen Maschine	19
2.13.	Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ) a) und Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle (WLTC) b)	22
3.1.	Grundidee zur Berechnung des energetischen Optimums	23
3.2.	Topologie des Mildhybridfahrzeugs mit vereinfachtem Bordnetz	25
3.3.	Übersicht des Energieflusses während einer Rekuperationsphase	26
3.4.	Übersicht der Energieflüsse während einer Rekuperationsphase	27
3.5.	Rekuperierbare elektrische Energie in Abhängigkeit der Bemessungsleistung der elektrischen Maschine für den NEFZ a) und für den WLTC b)	28
3.6.	Beispielhaftes Geschwindigkeitsprofil mit Drehzahl der elektrischen Maschine	31
3.7.	Übersicht des Energieflusses beim Beschleunigen des Fahrzeugs und dessen Einfluss auf den Energieanteil E_{rot1}	33
3.8.	Übersicht des Energieflusses beim Verzögern des Fahrzeugs und dessen Einfluss auf den Energieanteil E_{rot2}	33
3.9.	Definition der Antriebs- und Abtriebsseite sowie konzentriertes Ersatzbild der Kupplung	34
3.10.	Übersicht des Energieflusses beim Schalten in einen höheren Gang und die damit verbundenen Verluste	36

3.11. Übersicht des Energieflusses beim Schalten in einen geringeren Gang und die damit verbundenen Verluste	38
3.12. Größenverhältnisse der Energieanteile eines Fahrzeugs der Compact-Klasse	39
3.13. Vergleich des CO ₂ -Ausstoßes zwischen hoher und geringer Bordnetzlast in Abhängigkeit der Maschinenskalierung k_{vol}	40
3.14. Prinzipdarstellung der beiden Grenzkennlinien	40
3.15. Häufigkeitsverteilung der VKM-Drehzahlen im WLTC bei einem Compact-Fahrzeug	41
3.16. Compact-Fahrzeug im WLTC bei hoher Bordnetzlast	43
4.1. Grenzen der Statorwindungszahl in Abhängigkeit des Skalierungsfaktors k_{vol}	49
4.2. Obere und untere Grenzkennlinie mit diskreten Skalierungsfaktoren bei einem Compact-Fahrzeug bei hoher Bordnetzlast	50
4.3. Obere und untere Grenzkennlinie mit diskreten Skalierungsfaktoren bei einem Compact-Fahrzeug im WLTC bei geringer Bordnetzlast	51
5.1. Aufnahme des Rotors	52
5.2. Aufnahme des Rotors im Blechpaket des Stators	53
5.3. Leistungskennlinie des Lüfters in Abhängigkeit von der Drehzahl	53
5.4. Schnitt durch den Rotor der Klauenpolmaschine mit eingezeichnetem Flusspfad im nichterregten Zustand	54
5.5. Vorgehen zur Berechnung der Flussdichten	56
5.6. Übersicht der geometrischen Parameter zur Berechnung des Carter-Faktors	58
5.7. Definition der Flussdichten nach [80]	59
5.8. Zusammenhang zwischen dem Luftspaltfluss und dem Zahnfluss	60
5.9. Magnetisches Ersatzschaltbild	61
5.10. Finger der Klauenpolmaschine mit eingelegtem Permanentmagnet und Bemaßung	63
5.11. Axialer Schnitt durch den Rotor (nur eine Hälfte dargestellt)	63
5.12. Magnetische Schleppverluste in Abhängigkeit der Drehzahl und der Maschinenskalierung k_{vol}	65
5.13. Gesamte Schleppverluste in Abhängigkeit der Drehzahl der Basismaschine	65
5.14. Raster der untersuchten Betriebspunkte	66
5.15. Schematischer Überblick der Verluste	67
5.16. Schematische Darstellung der Wickelköpfe sowie deren Bemaßung	69
5.17. Skizze zur Herleitung der Gleichung (5.39)	70
5.18. Beispielhafter Verlauf der Nutoberwelle	71
5.19. Darstellung der Streuflüsse im Stator	72
5.20. Nutabmessung des Stators zur Berechnung der Streuflüsse	74
5.21. Vergleich von berechneten Ergebnissen durch den Verlustansatz und Prüfstandsmessungen bei einer Drehzahl von 4000 min^{-1}	75
5.22. Vergleich von berechneten Ergebnissen durch den Verlustansatz und Prüfstandsmessungen bei einer Drehzahl von 8000 min^{-1}	75
5.23. Betriebspunkte der elektrischen Maschine für die Baugrößen $k_{vol} = 1,00$ und $k_{vol} = 1,31$ für ein Compact-Fahrzeug im WLTC	78
5.24. Relative Betriebspunkte der elektrischen Maschine für die Baugrößen $k_{vol} = 0,65$ und $k_{vol} = 0,79$ für ein SComp-Fahrzeug im WLTC	78
5.25. Betriebspunkte der elektrischen Maschine für die Baugrößen $k_{vol} = 1,31$ und $k_{vol} = 1,84$ für einen SUV im WLTC	79
5.26. Verteilung der Betriebspunkte aller relevanten Maschinengrößen und Fahrzyklen	79
5.27. Häufigkeitsverteilung der Betriebspunkte in Abhängigkeit der Drehzahl bei einem Compact-Fahrzeug im WLTC	80

5.28. Verteilung der Betriebspunkte	81
5.29. Ausgeschlossene Bereiche des Kennfelds	81
5.30. Kennfeld für die Basismaschine	82
5.31. Kennfeld für die um Faktor 1,31 vergrößerte Maschine	83
5.32. Kennfeld für die um Faktor 0,79 verkleinerte Maschine	83
6.1. Konvergenzverhalten unterschiedlicher Methoden zur Berücksichtigung von Nebenbedingungen [52]	84
6.2. Verlauf des Penalty-Faktors als Funktion der Verletzung der Nebenbedingung . .	88
6.3. Numerische Grenzen der Penalty-Methode und Interaktion mit dem Gesamtfahrzeugmodell für $n = 2$ im WLTC mit hoher Bordnetzlast	89
6.4. Numerische Grenzen der Penalty-Methode und Interaktion mit dem Gesamtfahrzeugmodell für $n = 3$ im WLTC mit hoher Bordnetzlast	90
6.5. CO ₂ -Einsparung in Abhängigkeit der Maschinengröße im WLTC bei einem Compact-Fahrzeug mit hoher Bordnetzlast	91
6.6. CO ₂ -Einsparung in Abhängigkeit der Maschinengröße im WLTC bei einem Compact-Fahrzeug mit geringer Bordnetzlast	91
7.1. Übersicht der Kopplungswege	94
A.1. Compact-Fahrzeug im WLTC a) hohe Bordnetzlast b) geringe Bordnetzlast . . .	95
A.2. SComp-Fahrzeug im WLTC a) hohe Bordnetzlast b) geringe Bordnetzlast	96
A.3. SUV im WLTC a) hohe Bordnetzlast b) geringe Bordnetzlast	97
A.4. Compact-Fahrzeug im NEFZ a) hohe Bordnetzlast b) geringe Bordnetzlast	98
A.5. SComp-Fahrzeug im NEFZ a) hohe Bordnetzlast b) geringe Bordnetzlast	99
A.6. SUV im NEFZ a) hohe Bordnetzlast b) geringe Bordnetzlast	100
A.7. Verlauf der Rotorwindungszahl in Abhängigkeit des Skalierungsfaktors k_{vol} . . .	102
A.8. Gültigkeitsbereich im NEFZ bei hoher Bordnetzlast und einem Penalty-Exponent von $n = 2$	103
A.9. Gültigkeitsbereich im NEFZ bei hoher Bordnetzlast und einem Penalty-Exponent von $n = 3$	104
A.10. Gültigkeitsbereich im NEFZ bei niedriger Bordnetzlast einem Penalty-Exponent von $n = 2$	105
A.11. Gültigkeitsbereich im NEFZ bei niedriger Bordnetzlast einem Penalty-Exponent von $n = 3$	106
A.12. Gültigkeitsbereich im WLTC bei niedriger Bordnetzlast einem Penalty-Exponent von $n = 2$	107
A.13. Gültigkeitsbereich im WLTC bei niedriger Bordnetzlast einem Penalty-Exponent von $n = 3$	108
A.14. SUV im WLTC a) hohe Bordnetzlast b) geringe Bordnetzlast	109
A.15. SComp-Fahrzeug im WLTC a) hohe Bordnetzlast b) geringe Bordnetzlast	110
A.16. Compact-Fahrzeug im NEFZ a) hohe Bordnetzlast b) geringe Bordnetzlast . . .	111
A.17. SComp-Fahrzeug im NEFZ a) hohe Bordnetzlast b) geringe Bordnetzlast	112
A.18. SUV im NEFZ a) hohe Bordnetzlast b) geringe Bordnetzlast	113

Tabellenverzeichnis

2.1. Fahrzeugspezifische Parameter	21
2.2. Allgemeine Parameter der Fahrzeuge und der Umgebung	21
2.3. Übersicht der Kenndaten der untersuchten Fahrzyklen	22
3.1. Übersicht der Abweichungen	42
3.2. Bereiche der energetisch optimalen Maschinengröße der betrachteten Fahrzeugklassen	42
4.1. Übersicht der Wachstumsgesetze	46
4.2. Diskrete Skalierungsfaktoren und zugehörige Leiterzahlen des Stators	50
4.3. Potentiell optimale Maschinengrößen oder ggf. optimale Maschinengröße	51
5.1. Auflistung der Ergebnisse des Verlustberechnungsansatzes und der Prüfstandsmessung bei einer Drehzahl von 4000 min^{-1}	76
5.2. Auflistung der Ergebnisse des Verlustberechnungsansatzes und der Prüfstandsmessung bei einer Drehzahl von 8000 min^{-1}	77
5.3. Drehzahlbereich im Betriebsmodus Drehmomentenunterstützung	80
6.1. Gültigkeitsbereiche der Penalty-Methode für untersuchte Problemstellung	90
6.2. Energetisch optimale Maschinengrößen	92
A.1. Vergleich zwischen den berechneten und den angewendeten Werten für die Rotorwindungszahl w_R	102

Literaturverzeichnis

- [1] BP (Hrsg.): *Statistical Review of World Energy*. Technischer Bericht, Juni 2016. <http://oilproduction.net/files/especial-BP/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf>, besucht: 30.12.2019.
- [2] Rodt S., et al.: *CO₂-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland -Mögliche Maßnahmen und ihre Minderungspotenziale- Ein Sachstandsbericht des Umweltbundesamtes*. Technischer Bericht, Umweltbundesamt, Mai 2010. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3773.pdf>, besucht: 30.12.2019.
- [3] International Energy Agency (Hrsg.): *CO₂ emissions from fuel combustion*. Technischer Bericht, 2016. https://emis.vito.be/sites/emis.vito.be/files/articles/3331/2016/CO2EmissionsfromFuelCombustion_Highlights_2016.pdf, besucht: 30.12.2019.
- [4] Europäisches Parlament: *Verordnung (EG) Nr. 443/2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen*, April 2009.
- [5] Transport und Environment (Hrsg.): *How clean are Europe's cars? An analysis of carmaker progress towards EU CO₂ targets in 2014*. Technischer Bericht, 2015. https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/2015_TE_cars_CO2_report_FINAL.pdf, besucht: 30.12.2019.
- [6] Transport und Environment (Hrsg.): *2025 CO₂ Regulation The next step to tackling transport emissions*. Technischer Bericht, Mai 2015. https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2015_06_2025_CO2_regulation_position_paper_long.pdf, besucht: 30.12.2019.
- [7] Bücherl D., Bertram C., Thanheiser A. und Herzog H.-G.: *Scalability as a degree of freedom in electric drive train simulation*. In: *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Seiten 1–5, Sept 2010.
- [8] Guzzella L. und Sciarretta A.: *Vehicle propulsion systems: Introduction to modeling and optimization*. Springer-Verlag, 3. Auflage, 2013, ISBN 364-23-59-124.
- [9] Bücherl D., Engstle A. und Herzog H.-G.: *Einsparpotenzial des Kraftstoffverbrauchs eines Oberklassefahrzeugs durch effizientes Energiemanagement im hybriden Antriebsstrang*. In: *Internationaler ETG-Kongress 2007*. VDE Verlag, 2007.
- [10] Koot M., Kessels J.T.B.A. und Jager B.: *Fuel reduction of parallel hybrid electric vehicles*. In: *2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Seiten 99–104, Sept 2005.
- [11] Paganelli G., Delprat S., Guerra T.M., Rimaux J. und Santin J.J.: *Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains*. In: *Vehicular Technology Conference. IEEE 55th Vehicular Technology Conference. VTC Spring 2002*, Seiten 2076–2081, Mai 2002.

-
- [12] Serrao L., Onori S. und Rizzoni G.: *ECMS as a realization of Pontryagin's minimum principle for HEV control*. In: *2009 American Control Conference*, Seiten 3964–3969, Juni 2009.
- [13] Papageorgiou M., Leibold M. und Buss M.: *Optimierung Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung*. Springer Verlag, 4. Auflage, 2015, ISBN 978-3-662-46935-4.
- [14] Sciarretta A. und Guzzella L.: *Control of hybrid electric vehicles*. IEEE Control Systems, 27(2):60–70, April 2007.
- [15] Delprat S., Guerra T.M. und Rimaux J.: *Control strategies for hybrid vehicles: synthesis and evaluation*. In: *2003 IEEE 58th Vehicular Technology Conference. VTC 2003-Fall*, Seiten 3246–3250, Okt 2003.
- [16] Koot M., Kessels J.T.B.A., Jager B., Heemels W.P.M.H., van den Bosch P.P.J. und Steinbuch M.: *Energy management strategies for vehicular electric power systems*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 54(3):771–782, Mai 2005.
- [17] Salmasi F.R.: *Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles: Evolution, Classification, Comparison, and Future Trends*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 56(5):2393–2404, Sept 2007.
- [18] Bücherl D., Bolvashenkov I. und Herzog H.-G.: *Verification of the optimum hybridization factor as design parameter of hybrid electric vehicles*. In: *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Seiten 847–851, Sept 2009.
- [19] Rimscha, M. von: *Algorithmen kompakt und verständlich*. Springer-Vieweg, 3. Auflage, 2014, ISBN 978-3-658-05617-9.
- [20] Danø, S.: *Nonlinear and Dynamic Programming: An Introduction*. Springer, 1. Auflage, 1975, ISBN 978-321-181-28-91.
- [21] Metropolis N., Rosenbluth A.W., Rosenbluth M.N., Teller A.H. und Teller E.: *Equation of State Calculations by Fast Computing Machines*. The Journal of Chemical Physics, 21(6):1087–1092, 1953.
- [22] Kirkpatrick S., Gelatt J.R. und Vecchi M.P.: *Optimization by simulated annealing*. Science (New York), 220(4598):671–680, 1983.
- [23] Bagley, J.D.: *The Behavior of Adaptive Systems Which Employ Genetic and Correlation Algorithms*. Dissertation, University of Michigan, 1967.
- [24] Li Y., Lu X. und Kar N.C.: *Rule-Based Control Strategy With Novel Parameters Optimization Using NSGA-II for Power-Split PHEV Operation Cost Minimization*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 63(7):3051–3061, 2014.
- [25] Adinolfi G., Graditi G., Siano P. und Piccolo A.: *Multiobjective Optimal Design of Photovoltaic Synchronous Boost Converters Assessing Efficiency, Reliability, and Cost Savings*. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 11(5):1038–1048, 2015.
- [26] Malagoli J.A., Camacho J.R., Valencia Ferreira da Luz M., Inacio Ferreira J.H. und Sobrinho A.M.: *Design of Three-Phase Induction Machine Using Differential Evolution Algorithm*. IEEE Latin America Transactions, 13(7):2202–2208, 2015.

- [27] Dang T.T., Ruellan M., Prévond L., Ahmed H. und Multon B.: *Sizing Optimization of Tubular Linear Induction Generator and Its Possible Application in High Acceleration Free-Piston Stirling Microcogeneration*. IEEE Transactions on Industry Applications, 51(5):3716–3733, 2015.
- [28] Alon N. und Spencer J.H.: *The Probabilistic Method*. John Wiley & Sons Inc., 3. Auflage, 2016, ISBN 978-111-9061-953.
- [29] Molloy M.S. und Reed B.: *Graph colouring and the probabilistic method*. Springer, 1. Auflage, 2002, ISBN 354-042-1394.
- [30] Voigt M.: *Probabilistische Simulation des strukturmeechanischen Verhaltens von Turbinenschaufeln*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2010, ISBN 978-394-129-86-99.
- [31] Russell S.J. und Novig P.: *Artificial intelligence: A modern approach*. Prentice-Hall, 3. Auflage, 2010, ISBN 978-013-6042-594.
- [32] Poole D.L. und Mackworth A.K.: *Artificial intelligence: Foundations of computational agents*. Cambridge Univ. Press, 2011, ISBN 978-051-173-0924.
- [33] Ertel W.: *Grundkurs Künstliche Intelligenz: Eine praxisorientierte Einführung*. Springer Vieweg, 3. Auflage, 2013, ISBN 978-383-4816-771.
- [34] Gambardella L.M. und Dorigo M.: *Solving symmetric and asymmetric TSPs by ant colonies*. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, Seiten 622–627, Mai 1996.
- [35] Dorigo M.: *Ant Algorithms Solve Difficult Optimization Problems*. In: *Proceedings of the 6th European Conference*, Seiten 11–22, Sept. 2001.
- [36] Tang Y., Gao H., Du W., Lu J., Vasilakos A.V. und Kurths J.: *Robust Multiobjective Controllability of Complex Neuronal Networks*. IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics, 13(4):778–791, Juli 2016.
- [37] Müller B., Reinhardt J. und Strickland M.T.: *Neural Networks: An Introduction*. Springer, 2. Auflage, 1995, ISBN 978-3540-602-071.
- [38] Ripley B.D.: *Pattern recognition and neural networks*. Cambridge Univ. Press, 1. Auflage, 2009, ISBN 978-0521-717-700.
- [39] McCulloch W.S. und Pitts W.: *A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity*. The Bulletin of Mathematical Biophysics, 5(4):115–133, 1943.
- [40] Jones D.R., Perttunen C.D. und Stuckman B.E.: *Lipschitzian optimization without the Lipschitz constant*. Journal of Optimization Theory and Applications, 79(1):157–181, 1993.
- [41] Madrid-Sanchez C., Alvarez Melcon A. und Quesada Pereira F.D.: *Characterization of dielectric materials with a modified DIRECT algorithm*. In: *Proceedings of the 10th European Conference on Antennas and Propagation*, Seiten 1–4, April 2016.
- [42] Carter R.G., Gablonsky J.M., Patrick A., Kelley C.T. und Eslinger O.J.: *Algorithms for Noisy Problems in Gas Transmission Pipeline Optimization*. Optimization and Engineering, 2(2):139–157, 2001.
- [43] Panday A. und Bansal H.O.: *Fuel efficiency optimization of input-split hybrid electric vehicle using DIRECT algorithm*. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Industrial and Information Systems*, Seiten 1–6, Dez. 2014.

-
- [44] Zhang L., Barakat G. und Yassine A.: *Design and optimal sizing of hybrid PV/wind/diesel system with battery storage by using DIRECT search algorithm*. In: *Proceedings of the 15th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Seiten 191–197, Sept. 2012.
- [45] Ruf F., Neiss A., Barthels A., Kohler T.P., Michel H.U., Fröschl J. und Herzog H.-G.: *Design optimization of a 14 V automotive power net using a parallelized DIRECT algorithm in a physical simulation*. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, Seiten 73–80, Mai 2012.
- [46] D. Bücherl, Meyer W. und Herzog H.-G.: *Simulation of the electrical machine’s fuel saving potential in parallel hybrid drive trains*. In: *Proceedings of the 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, Seiten 653–660, Mai 2009.
- [47] Bertram C., Bücherl D., Kohler T.P. und Herzog H.-G.: *DIRECT as Two-Level Optimization Method for Drive Train Design and Control of Hybrid Electric Vehicles*. In: *Proceedings of the 25th World Electric Vehicle Symposium and Exposition*, Jan. 2010.
- [48] Silvas E., Hofman T. und Steinbuch M.: *Review of Optimal Design Strategies for Hybrid Electric Vehicles*. IFAC Proceedings Volumes, 45(30):57 – 64, 2012.
- [49] Finkel D.E.: *DIRECT Version 2.0 User Guide*. Technischer Bericht, North Carolina State University, Center for Research in Scientific Computation, 2003. <https://projects.ncsu.edu/crsc/reports/ftp/pdf/crsc-tr01-08.pdf>, besucht: 30.12.2019.
- [50] Finkel D.E. und Kelley C.T.: *Convergence analysis of the DIRECT algorithm*. Technischer Bericht, North Carolina State University, Center for Research in Scientific Computation, 2004. <https://projects.ncsu.edu/crsc/reports/ftp/pdf/crsc-tr04-28.pdf>, besucht: 30.12.2019.
- [51] Dirnberger M. und Herzog H.-G.: *A verification approach for the optimization of mild hybrid electric vehicles*. In: *Proceedings of the IEEE International Electric Machines Drives Conference*, Seiten 1494–1500, Mai 2015.
- [52] Dirnberger M., Retana R., Hartmann S.O. und Herzog H.-G.: *Optimization loops as method for analysis of boost recuperation systems*. In: *Proceedings of the International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, Seiten 498–505, Mai 2014.
- [53] Li W., Lee C.H.T. und Ching T.W.: *A transverse flux permanent magnet linear generator for hybrid electric vehicles*. In: *2013 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Mai 2013.
- [54] Egana I., de Argandona I. R. und Madariaga J.: *Analytical electromagnetic model of modular axialflux switched-reluctance machine*. In: *2016 Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Seiten 1–8, April 2016.
- [55] Kim J.H., Li Y. und Sarlioglu B.: *Novel Six-Slot Four-Pole Axial Flux-Switching Permanent Magnet Machine for Electric Vehicle*. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 3(1):108–117, März 2017.
- [56] Lorilla L.M.: *Investigation of the Homopolar Inductor Alternator for Automotive Applications*. Masterarbeit, Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [57] Lorilla L.M., Keim T.A., Lang J.H. und Perreault D.J.: *Topologies for future automotive generators. Part I. Modeling and analytics*. In: *2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Seiten 74–85, Sept 2005.

- [58] Lorilla L.M., Keim T.A., Lang J.H. und Perreault D.J.: *Topologies for Future Automotive Generators - Part II: Optimization*. In: *2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Seiten 831–837, Sept 2005.
- [59] Lorilla L.M.: *Enhanced Next Generation Alternator*. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [60] Küppers S.: *Numerische Verfahren zur Berechnung und Auslegung von Drehstrom-Klauenpolgeneratoren*. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1996.
- [61] Arnold E.: *Die Wechselstromtechnik*. Springer, 1. Auflage, 1904.
- [62] Henneberger G.: *Elektrische Motorausrüstung: Starter, Generator, Batterie und ihr Zusammenwirken im Kfz-Bordnetz*. Vieweg+Teubner Verlag, 1. Auflage, 1990, ISBN 978-352-804-76-41.
- [63] Mäder G.: *Das Betriebsverhalten der Mittelfrequenzgeneratoren*. *Elektrie*, 14:386–391, 1960.
- [64] Elloumi D., Ibala A., Rebhi R. und Masmoudi A.: *Lumped Circuit Accounting for the Rotor Motion Dedicated to the Investigation of the Time-Varying Features of Claw Pole Topologies*. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(5):1–8, 2015.
- [65] Hecquet M. und Brochet P.: *Modeling of a claw-pole alternator using permeance network coupled with electric circuits*. *IEEE Transactions on Magnetics*, 31(3):2131–2134, 1995.
- [66] Elloumi D., Ibala A., Rebhi R. und Masmoudi A.: *3D MEC modeling of a hybrid-excited claw pole alternator incorporating the rotor motion*. In: *Proceedings of the International Conference on Sustainable Mobility Applications, Renewables and Technology*, Seiten 1–7, Nov. 2015.
- [67] Belmans R., Swaenen G., Geysen W. und Steenbergen R.: *Calculation of the characteristics of a claw pole generator*. *IEEE Transactions on Magnetics*, 26(2):952–955, März 1990.
- [68] Kähler C. und Henneberger G.: *Transient 3-D FEM computation of eddy-current losses in the rotor of a claw-pole alternator*. *IEEE Transactions on Magnetics*, 40(2):1362–1365, 2004.
- [69] Jurca F., Martis C., Birou I. und Biro K.: *Analysis of permanent magnet claw-pole synchronous machine*. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, Seiten 75–80, Mai 2008.
- [70] Zhang F., Zhang S., Bai H., Nolle E. und Gruenberger H.P.: *Magnetic Field Analysis and Performance Calculation for New Type of Claw Pole Motor with Permanent Magnet Outer Rotor*. In: *Proceedings of the CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Seiten 1–5, Aug. 2006.
- [71] Europäische Union (Hrsg.): *Regelung Nr. 101 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE)*, 2007.
- [72] Tutuiianu M., Marotta A., Steven H. und Ericsson E.: *Development of a Worldwide Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle (WLTC)*. Technischer Bericht, 2013. <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2014/wp29grpe/GRPE-68-03e.pdf>, besucht: 30.12.2019.

- [73] Siegle M.: *Skalierbare Modelle der Klauenpolmaschine zur Optimierung hybrid-elektrischer Fahrzeuge*. Bachelorarbeit, Hochschule Esslingen, 2015.
- [74] Dankert J. und Dankert H.: *Technische Mechanik*. Springer-Vieweg, 7. Auflage, 2013, ISBN 978-3-8348-1809-6.
- [75] Wang J., Bai Y., Wu M., Yin J. und Zhang W.F.: *Preparation and electrochemical properties of TiO₂ hollow spheres as an anode material for lithium-ion batteries*. Journal of Power Sources, 191(2):614–618, 2009.
- [76] Advanced Engineering Research Belt Technical Center (Hrsg.): *Energy Loss and Efficiency of Power Transmission Belts*. In: *Proceedings of the Third World Energy Engineering Congress*, 1980.
- [77] Volkswagen AG (Hrsg.): *Das DSG-Doppelkupplungsgetriebe: Umweltprädikat*, 2008. http://www.volkswagen.de/content/medialib/vwd4/de/Volkswagen/Nachhaltigkeit/service/download/umweltpraedikate/umweltpraedikat_dsgokt08/_jcr_content/renditions/rendition.file/umweltpraedikate_par_0029_file.pdf, besucht: 23.10.2014.
- [78] Robert Bosch GmbH (Hrsg.): *The BRS boost recuperation system: Increased power, enhanced comfort and lower fuel consumption*. http://www.bosch-presse.de/presseforum/download/de/BRS_Broschuere_RZ_en.pdf, besucht: 23.10.2014.
- [79] Lipo T.A.: *Introduction to AC Machine Design*. University of Wisconsin, 3. Auflage, 2007, ISBN 978-097-454-7022.
- [80] Vogt K.: *Berechnung rotierender elektrischer Maschinen*. VEB Verlag Technik, 2. Auflage, 1974.
- [81] Dirnberger M., Kammerer T. und Herzog H.-G.: *Scaling the claw pole machine for drive train optimization*. In: *Proceedings of the IEEE International Electric Machines Drives Conference*, Seiten 1864–1870, Mai 2015.
- [82] Carolus T.: *Ventilatoren: Aerodynamischer Entwurf, Schallvorhersage, Konstruktion*. Vieweg+Teubner Verlag, 3. Auflage, 2013, ISBN 978-383-4824-714.
- [83] Richter R. und Brüderlink R.: *Elektrische Maschinen: Zweiter Band: Synchronmaschinen und Einankerumformer*. Verlag von Julius Springer, 2. Auflage, 1929.
- [84] Reiche H. und Glöckner G.: *VEM-Handbuch Maschinelles Berechnen elektrischer Maschinen*. VEB Verlag Technik, 1. Auflage, 1972.
- [85] Nürnberg W.: *Die Asynchronmaschine*. Springer-Verlag, 2. Auflage, 1963.
- [86] Jordan H. und Weis M.: *Synchronmaschinen II*. Vieweg, 1. Auflage, 1971, ISBN 3-528-03305-3.
- [87] Müller J.: *Hochtouriges permanentmagneterregtes Bordnetzgeneratorsystem mit Scheibenläufer für konstante Ausgangsspannung*. Dissertation, Universität Stuttgart, 1995.
- [88] Jenni F. und Wüest D.: *Steuerverfahren für selbstgeführte Stromrichter*. vdf Hochschulverl. an der ETH, 1. Auflage, 1995, ISBN 3-7281-2141-X.
- [89] Reutlinger K.: *Klauenpolmaschine mit Magneten (KPM) Beschreibung eines Berechnungsblattes für die Berechnung einer Klauenpolmaschine mit Zusatzmagneten*. Interner Bericht, Robert Bosch GmbH, Feb. 2011.

- [90] Punga F.: *Elektromaschinenbau*. Demmig Verlag, 1. Auflage, 1948.
- [91] Rziha E.V.: *Starkstromtechnik - Taschenbuch für Elektrotechniker*. Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn, 8. Auflage, 1955.
- [92] Bürger S. und Huebner W.: *Optimization of the trade-off between fuel consumption and performance of PHEVs in different driving scenarios*. In: *Proceedings of the 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference*, Seiten 1–7, März 2012.
- [93] Gablonsky J.M.: *Modifications of the DIRECT Algorithm*. Dissertation, North Carolina State University, 2001.
- [94] Courant R.: *Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations*. Bulletin American Mathematical Society, 49(1):1–23, 1943.
- [95] Vilaça R. und Rocha A.M.A.C.: *An adaptive penalty method for DIRECT algorithm in engineering optimization*. In: *Proceedings of the AIP Conference*, Seiten 826–829, Sept. 2012.
- [96] Rocha A.M.A.C. und Vilaça R.: *A Computational Study on Different Penalty Functions with DIRECT Algorithm*. In: *Proceedings of the 13th International Conference Computational Science and Its Applications*, Seiten 318–332, April 2013.
- [97] Vardhan L., Ashoka D. und Arunachalam V.: *Evaluation of Penalty Function Methods for Constrained Optimization Using Particle Swarm Optimization*. In: *Proceedings of the 2nd. International Conference Image Information Process*, Seiten 487–492, Sept. 2013.
- [98] Sadeghi M. und Babaie Zadeh M.: *Incoherent Unit-Norm Frame Design via an Alternating Minimization Penalty Method*. IEEE Signal Processing Letters, 24(1):32–36, 2017.
- [99] Elbert P., Nuesch T., Ritter A., Murgovski N. und Guzzella L.: *Engine On/Off Control for the Energy Management of a Serial Hybrid Electric Bus via Convex Optimization*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 63(8):3549–3559, 2014.
- [100] Wang Z. und Liu S.: *A New Smooth Method for the l1 Exact Penalty Function for Inequality Constrained Optimization*. In: *Proceedings of the Third International Joint Conference on Computational Science and Optimization*, Mai 2010.
- [101] Bai F. und Wu Z.: *Quadratic smoothing approximation to 1 over 2-order exact penalty function*. In: *Proceedings of the International Conference on Green Circuits and Systems*, Seiten 409–413, Juni 2010.
- [102] Lin C.C., Peng H., Grizzle J.W und Kang J.M.: *Power Management Strategy for a Parallel Hybrid Electric Truck*. IEEE Transactions Control System Technology, 11(6):839–849, 2003.
- [103] Yeniay O.: *Penalty function methods for constrained optimization with genetic algorithms*. Mathematical and Computational Applications, 10(1):45–56, 2005.
- [104] Smith A.E. und Tate D.M.: *Genetic Optimization Using A Penalty Function*. In: *Proceedings of the 5th International Conference of Genetic Algorithms*, Seiten 499–505, 1993.
- [105] Richardson J.T., Palmer M.R., Liepins G.E. und Hilliard M.R.: *Some Guidelines for Genetic Algorithms with Penalty Functions*. In: *Proceedings of the 3rd International Conference of Genetic Algorithms*, Seiten 191–197, 1989.

- [106] Coello C.A.: *Theoretical and Numerical Constraint-Handling Techniques used with Evolutionary Algorithm: A Survey of the State of the Art*. Computer Methods Applied Mechanical Engineering, 191(11):1245–1287, 2002.
- [107] Gao D., Ruan N. und Xing W.: *Advances in Global Optimization*. Springer, 1. Auflage, 2015, ISBN 978-3-319-08377-3.
- [108] Bürger S.: *Multikriterielle Optimierung von Hybridantriebskonzepten hinsichtlich Verbrauch und Dynamik*. Dissertation, Technische Universität München, 2012.
- [109] Hamdi E.S.: *Design of Small Electrical Machines*. Wiley, 1. Auflage, 1994, ISBN 978-0471-952-022.
- [110] Sek A.J.: *Numerische Berechnung des Magnetfeldes in einem Klauenpolgenerator*. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, 2, 1988.
- [111] Sek A.J.: *Three-Dimensional Nonlinear Magnetic Field in Claw-Pole Alternators*. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Electric Machines*, Sept. 1984.