

Technische Universität München

TUM School of Engineering and Design

Automatisierte Auslegung elektrischer Antriebsmaschinen zur anwendungsspezifischen Optimierung

Svenja Kalt, M. Sc.

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades einer

Doktorin der Ingenieurwissenschaften

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Michael W. Gee

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp

2. Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling

Die Dissertation wurde am 04.02.2021 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 26.04.2021 angenommen.

For my family

Kurzfassung

Elektrische Antriebsstränge haben vor allem durch ihren hohen Wirkungsgrad im Vergleich zu Verbrennungsmotoren das Potential, die Zukunft der Mobilität nachhaltiger und effizienter zu gestalten. Um die von der Bundesrepublik Deutschland geplanten Ziele zur Reduzierung von Treibhausgasen durch die Elektrifizierung des Transportsektors erfüllen zu können, besteht allerdings noch hoher Entwicklungsbedarf.

Neben der Verbesserung der Batterietechnologie und der Leistungselektronik, ist die Optimierung von elektrischen Maschinen ein bedeutender Stellhebel, um eine Elektrifizierung des Antriebsstranges zu ermöglichen. Eine applikationsspezifische Auslegung der elektrischen Maschine ermöglicht eine Optimierung der Betriebseffizienz, Leistung, Kosten, Baugröße und Gewicht an die dynamischen Anforderungen im Fahrzeug. Durch ein optimales Zusammenspiel der Antriebsstrangkomponenten kann die verfügbare Energiekapazität der Batterie und somit die Reichweite erhöht und eine Überdimensionierung des Antriebsstranges vermieden werden.

Da standardisierte Fahrzyklen keinen auslegungsrelevanten Charakter haben, müssen OEM weiterhin auf eigens erstellte Lastzyklen zur Maschinenauslegung zurückgreifen, um den tatsächlichen Anforderungen gerecht zu werden. Die speziellen Anforderungen an elektrische Traktionsmaschinen (z.B. hochgradig dynamische Belastung) werden dabei meist vernachlässigt. Dies hat zur Folge, dass sich die Betriebspunkte konventioneller Fahrzyklen im Teillastbereich (mittlere bis höhere Drehzahlen und niedrige Drehmomente) befinden. Dies kann je nach Maschinenart zu einer Diskrepanz zwischen den Bereichen mit hohem Wirkungsgrad und den Bereichen mit einer Vielzahl an Betriebspunkten führen und resultiert in einem höheren Energieverbrauch und somit reduzierter Fahrzeugreichweite.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Methodik zur automatisierten Auslegung elektrischer Maschinen anhand realer Nutzerverhalten vorgestellt. Ziel ist es, den realitätsfernen, konventionellen Auslegungsprozess zu optimieren, und auf die realen Anforderungen im Fahrbetrieb anzupassen. Durch die realitätsnahe Auslegung elektrischer Maschinen erfolgt eine effizientere Kennfeldausnutzung im Fahrbetrieb. Dabei wird gleichzeitig eine Optimierung der Zielgrößen *Betriebseffizienz*, *Package* und *Kosten* ermöglicht. Das Resultat ist eine signifikante Verbesserung der Gesamteffizienz im realen Fahrbetrieb und eine Verringerung in Bezug auf Gewicht, Größe und Kosten. Zudem ist anhand der automatisierten Auslegung eine Anpassung an das dynamische Verhalten von Traktionsmaschinen und eine Auflösung bestehender starrer Prozesse möglich.

If you can't explain it in a simplified way to a monkey, you didn't really understand it in the first place.

– Albert Einstein.

Yesterday is history, tomorrow is a mystery, but today is a gift. That's why it is called present.

- Kung Fu Panda und Eleanor Roosevelt.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München zwischen 2017 und 2021.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp für die Betreuung dieser Arbeit. Durch fachlich anregende Diskussionen sowie Unterstützung im Forschungsprojekt hat er wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Durch das von ihm entgegengebrachte Vertrauen sowie die im Rahmen der Arbeitsgestaltung gewährten Freiheiten ermöglichte er mir, stets meine Ideen zu verwirklichen. Ebenfalls bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling für die Zweitprüfung sowie bei Prof. Dr.-Ing. Michael W. Gee für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Zudem möchte ich meinen Projektpartnern im Rahmen des Forschungsprojektes *DeTailED* herzlich für die tolle Zusammenarbeit danken. Sie haben mich stets in meiner Rolle als Projektleitung unterstützt und voller Tatendrang zum Erfolg des Projektes beigetragen. Dadurch ermöglichten Sie mir die Chance, mich stetig fortzubilden sowie mein gelerntes Wissen in der Industrie einzusetzen. Meinem Projektpartner Bayern Innovativ möchte ich in diesem Rahmen zudem herzlich danken, weil ohne ihn das Forschungsprojekt nicht möglich gewesen wäre.

Meinen Kollegen im Projekt *aCar* möchte ich zudem herzlich danken. Wir haben als Team enorm viel geleistet und ein eigenständiges Fahrzeug von Grund auf komplett selbst entwickelt und aufgebaut. Ich habe in dieser Zeit unglaublich viel gelernt und werde die tolle Zeit nie vergessen. Einen besonderen Dank möchte ich meinen Kollegen Sebastian Wolff, Matthias Brönnner, Xue Lin, Matthias Steinträger und Adrian König aussprechen, die immer für eine kritische fachliche Diskussion zur Stelle standen und somit einen wesentlichen Beitrag zum Inhalt und Qualität dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein besonderer Dank geht vor allem an meine Familie, meine Eltern, meinen Bruder und meinen Mann, die mir während der gesamten Zeit Rückhalt gegeben haben und mich während der Anfertigung dieser Arbeit stets unterstützt und mir das alles ermöglicht haben.

Ein großer Dank geht zudem an meine Studenten, vor allem an Jonathan Erhard, von denen ich selbst viel lernen konnte und an unsere FTM Buchhaltung, das Sekretariat und die Werkstätten, auf die immer Verlass war.

Ich habe so viel in meiner Zeit am Lehrstuhl fachlich und über mich selbst und meine Interessen und Fähigkeiten gelernt und hatte dafür immer die Unterstützung alles zu verwirklichen. Ich bedanke mich für die wunderschöne Zeit am FTM und werde mit schweren Herzen den Lehrstuhl verlassen, um das nächste Kapitel in meinem Leben zu beginnen.

Garching, im Januar 2021

Svenja Kalt

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	III
Formelzeichen.....	V
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	2
1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit	4
2 Stand der Wissenschaft und Technik.....	9
2.1 Auslegung elektrischer Maschinen	9
2.1.1 Elektrische Maschinentopologien	10
2.1.2 Grobauslegung und Hauptabmessungen	14
2.1.3 Stator- und Rotorentwurf.....	16
2.2 Ansteuerung	23
2.3 Verlustverteilung und Thermik.....	25
2.4 Anwendungsspezifische Maschinenauslegung.....	26
2.4.1 Dynamische Anforderungen von Traktionsmaschinen	28
2.4.2 Nutzerverhalten und Fahrzyklen	30
2.5 Kritik am Stand der Wissenschaft und Technik	32
3 Modellierung	37
3.1 Automatisierte Maschinenauslegungsmethodik.....	38
3.1.1 Aufbau Maschinenauslegungstool.....	40
3.1.2 Optimierter Statorwurf	46
3.2 Mehrzieloptimierung und Gesamtkonzept.....	49
3.2.1 Aufbau Optimierungsalgorithmus NSGA II	49
3.2.2 Fahrdatenerhebung und Datengrundlage.....	52
3.2.3 Fahrzykluserstellung	53
3.2.4 Längsdynamiksimulation	54
3.2.5 Kostenmodellierung	55
4 Validierung	57
4.1 Verifizierung der Fahrzyklen auf dem Rollenprüfstand	57

4.2	Maschinenauslegungsmethodik.....	58
4.2.1	Validierung der Hauptabmessungen	58
4.2.2	Verifizierung der elektromagnetischen Kenngrößen.....	63
5	Ergebnisse und Diskussion	65
5.1	Automatisierte Maschinenauslegungsmethodik.....	66
5.2	Optimierter Statorwurf.....	68
5.3	Generierte Fahrzyklen anhand realer Fahrdaten.....	72
5.4	Sensitivitätsanalyse Maschinenparameter	76
5.4.1	Fahrzyklus	76
5.4.2	Kühlungsart.....	77
5.4.3	Maschinentopologie.....	79
5.4.4	Magnetanordnung.....	80
5.4.5	Variable Maschinentopologie.....	81
5.5	Optimale Maschinenauslegung verschiedener Nutzerverhalten.....	82
5.5.1	Kleinstfahrzeug - VW e-up!.....	83
5.5.2	Kompaktklasse - BMW i3.....	86
5.5.3	Mittelklasse - Tesla Model 3	90
5.5.4	Gesamtfahrzeugbetrachtung	91
5.5.5	Anforderungen zukünftiger Traktionsmaschinen	92
6	Zusammenfassung und Ausblick	95
	Abbildungsverzeichnis	i
	Tabellenverzeichnis.....	v
	Literaturverzeichnis.....	vii
	Vorveröffentlichungsliste	xxiii
	Anhang	xxvii

Abkürzungsverzeichnis

ASM	Asynchronmaschine
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug (Battery electric vehicle)
CF	Constant flux
EM	Elektrische Maschine
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EU	Europäische Union
FEM	Finite-Elemente-Methode
FSM	Fremderregte Synchronmaschine
GA	Genetische Algorithmen
GM	Gleichstrommaschine
HEV	Hybridfahrzeug (Hybrid electric vehicle)
HSM	Hybrid-Synchronmaschine
IPSM	Innenliegende Magnete (Interior permanent-magnet PSM)
KL	Kullback-Liebler-Divergenz
LDS	Längsdynamiksimulation
MA	Maximum Ampere
MEAPA	<u>M</u> odell für den <u>E</u> ntwurf und die <u>A</u> nalyse einer <u>P</u> SM oder <u>A</u> SM
MTPA	Maximum Torque per Ampere
MTPV	Maximum Torque per Volt
NEFZ	Neue Europäische Fahrzyklus
NSGA II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
OEM	Original Equipment Manufacturer
Pkw	Personenkraftwagen
PM	Permanentmagnete
PSM	Permanenterregte Synchronmaschine
RM	Reluktanzmaschine
SMPSM	Oberflächenmagnete (Surface-mounted PSM)
TCO	Total Cost of Ownership

TFM	Transversalflussmaschine
TUM	Technische Universität München
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
a	-	Anzahl Parallelschaltungen
a_x	$\frac{m}{s^2}$	Beschleunigung/Verzögerung in Fahrtrichtung
A	-	Stirnfläche
A	$\frac{A}{mm}$	Strombelag
A_L	mm^2	Leiterquerschnittsfläche
A_n	mm^2	Nutquerschnittsfläche
b_n	mm^2	Nutbreite
b_z	mm^2	Zahnbreite
\hat{B}_δ	T	Scheitelwert der Luftspaltinduktion
B_m	T	Mittelwerte der Luftspaltinduktion
B_r	T	Rückeninduktion
B_z	T	Zahninduktion
c_w	-	c_w -Wert (Luftwiderstandsbeiwert)
C_s	-	Ausnutzungsfaktor (Esson'scher Faktor)
d_{iso}	mm	Nutisolation
d_i	mm	Leiterdurchmesser
d_a	m	Außendurchmesser Rotor
D_a	m	Außendurchmesser
D_i	m	Innendurchmesser
e_i	-	Massefaktor
E_h	V	Induzierte Spannung
f	Hz	Frequenz
f_R	-	Rollwiderstandsbeiwert des Fahrzeuges
F_x	N	Zugkraft
g	$\frac{m}{s^2}$	Erdbeschleunigung
h_n	mm	Nuthöhe
h_r	mm	Rückenhöhe

Formelzeichen

i_G	-	Getriebeübersetzung
i_{Diff}	-	Differenzialübersetzung
I_{Str}	A	Strangstrom
I_{Zw}	A	Zweigstrom
I_μ	A	Magnetisierungsstrom
k	-	Spulenzahl, Sättigungsfaktor
$k_{s,d}$	-	Sättigungsfaktor für die Längsachse
$k_{s,q}$	-	Sättigungsfaktor für die Querachse
$k_{h,q}$	-	Zusatzformfaktor für die Querachse
k_c	-	Carter-Faktor
k_h	-	Koeffizient für Hystereseverluste
l	m	Länge
l_{Fe}	m	Reine Eisenlänge des Blechpakets
l_i	m	Ideelle Statorlänge
l_m	m	Mittlere Windungslänge
l_v	m	Kanalbreite der Kühl- bzw. Ventilationskanäle
L_h	H	Ungesättigte Hauptinduktivität
$L_{h,d}$	H	Ungesättigte Hauptinduktivität Längsachse
$L_{h,q}$	H	Ungesättigte Hauptinduktivität Querachse
L_σ	H	Streuinduktivität
$L_{\sigma,nz}$	H	Nut- und Zahnkopfstreuinduktivität
$L_{\sigma,o}$	H	Oberwellenstreuinduktivität
$L_{\sigma,w}$	H	Wicklungskopfstreuinduktivität
m	-	Strangzahl
m	kg	Masse
M	Nm	Drehmoment
M_{Verl}	Nm	Übertragungsverluste im Antriebsstrang zwischen Rad und Maschine
M_R	Nm	Angreifende Moment an der Radnabe
$M_{Wicklung}$	-	Wicklungs-Matrix
n	$\frac{1}{\text{min}}$	Drehzahl
n_{obj}	-	Anzahl Zielgrößen im Optimierungsalgorithmus
n_{var}	-	Anzahl Designvariablen im Optimierungsalgorithmus
n_N	$\frac{1}{\text{min}}$	Nenn Drehzahl

n_v	-	Anzahl der Kühlkanäle
N	-	Nutenzahl
$N_{Gmax,Iter}$	-	Max. Anzahl Iterationen zur Nutformgestaltung
p	-	Polpaarzahl
P	W	Leistung
$P_{s,N}$	W	Nennscheinleistung
P_{mech}	W	Mechanische Leistung
$P_{i,j}$	-	Übergangsmatrix Markov-Ketten
Q	-	Qualitätskennzahl
q	-	Lochzahl
q_n	-	Nenner der Statorlochzahl
q_z	-	Zähler der Statorlochzahl
r_{dyn}	m	Dynamischer Reifendurchmesser
R	Ω	Ohmscher Widerstand
s_j	-	Zustand Markov-Ketten
s	-	Schlupf
S	$\frac{A}{mm^2}$	Stromdichte
S	-	Sehnung
U	V	Spannung
U_{Str}	V	Strangspannung
v	$\frac{m}{s}$	Fahrzeuggeschwindigkeit
$V_{Bohrung}$	m^3	Bohrungsvolumen
w_{Str}	-	Strangwindungszahl
w_{PM}	-	Magnetweite
y	-	Wicklungsschritt bzw. Spulenteilung/Spulenspannweite
z_n	-	Anzahl der Leiter je Nut

Griechische Zeichen

α	-	Steigungswinkel
α_i	-	ideeller Polbedeckungsfaktor
α_n	°	Nutenwinkel
γ	-	Hilfsfaktor Carter-Faktor
δ	mm	Luftspaltlänge
η	-	Wirkungsgrad
ϑ	K	Temperatur

Formelzeichen

$\theta_{(1)}$	A	Durchflutung der Hauptwelle
λ	-	Relative Länge
λ_{nz}	-	Relativer Nut-Zahnkopf-Streuleitwert
λ_w	-	Relativer Streuleitwert
μ_0	$\frac{H}{m}$	Magnetische Feldkonstante
ν	-	Oberwellenordnung
ϵ	-	Grenzwert nach WANG
ξ	-	Wicklungsfaktor
ξ_p	-	Wicklungsfaktor der Hauptwelle
$\xi_{s(\nu)}$	-	Sehnungsfaktor
$\xi_{z(\nu)}$	-	Zonenfaktor
ρ_L	$\frac{kg}{m^3}$	Luftdichte
η_N	-	Wirkungsgrad im Nennpunkt
σ_o	-	Streukoeffizient der Oberwellenstreuung
τ_n	m	Nutteilung
$\tau_{n,min}$	m	Minimale Nutteilung
τ_p	m	Polteilung
$\cos \varphi$	-	Leistungsfaktor
φ_n	-	Nutfüllfaktor
Φ	Wb	Magnetischer Fluss
Φ_h	Wb	Hauptwellenfluss
Φ_δ	Wb	Luftspaltwellenfluss
ω_m	$\frac{rad}{s}$	Mechanische Winkelgeschwindigkeit

Indizes

N	-	Nennwert
o	-	Oben
u	-	Unten
n	-	Nut
z	-	Zahn (Stator und Rotor)
r	-	Rücken (Stator und Rotor)
k	-	Keil
1	-	Stator
2	-	Rotor

1 Einleitung

Bereits zu Beginn der Entwicklung des Automobils vor ca. 150 Jahren, spielten neben den Verbrennungsmotoren auch elektrische Antriebe eine bedeutende Rolle [1]. Damals war vor allem das Fehlen effizienter Leistungselektronik und Batterietechnologien ausschlaggebend für das Verdrängen des elektrischen Antriebsstranges aus der Fahrzeuganwendung in den vorwiegend industriellen und stationären Bereich [2]. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts hatte sich aufgrund sinkender Ölpreise der Verbrennungsmotor durchgesetzt und wurde stetig für die Fahrzeuganwendung optimiert. Die elektrische Maschine (EM) entwickelte sich zu einem Nischen-Produkt und fand in der mobilen Anwendung lediglich als Bahnantrieb mit direkter Anbindung an das Versorgungsnetz Verwendung [1]. Somit wurden auch Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an der EM in den darauffolgenden Jahren vorwiegend in stationären Industrieanwendungen und mobilen Bahnanwendungen durchgeführt, die sich von den speziellen Anforderungen der Fahrzeugtraktion stark unterscheiden. Erst durch die Ölkrise der 1980er Jahre und den seitdem stetig steigenden Treibhausgasemissionen rückten elektrische Maschinen als Traktionsantrieb wieder in den Fokus der Öffentlichkeit und Fahrzeughersteller [1].

Vor allem, um die CO₂-Emissionen und ihre Folgen zu begrenzen, hat sich die Europäische Union (EU) auf Basis des Pariser Abkommens, ehrgeizige Ziele zur Reduzierung der Treibhausgase gesetzt. Die Treibhausgasemissionen sollen bis 2030 um 55 % und bis 2050 um mindestens 80 % gegenüber 1990 reduziert werden [3], [4], [5]. Der Transportsektor hat einen großen Einfluss auf die Erreichung dieser Ziele, weil er ca. 20 % der Treibhausgasemissionen der EU verursacht [4]. Dabei ist der Transportsektor jedoch der einzige Sektor mit steigenden Treibhausgasemissionen seit 1990 und auch der einzige Sektor, für den die EU bis 2050 keine Reduzierung um 80 % erwartet [4].

Gesetzliche Regelungen hinsichtlich der Emissionswerte sowie die Abhängigkeit von öl- und gasexportierenden Ländern, vergrößern den Drang zur Erschließung neuer Energiequellen, zur Verbesserung bestehender Transportsysteme sowie zur Entwicklung effizienterer und elektrifizierter Fahrzeuge [6]. Um diesem Ziel gerecht zu werden, sind sowohl Hybrid- (HEV) als auch batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) Bestandteil umfangreicher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich der Fahrzeugtechnik [6]. So befanden sich im Jahr 2019 bereits 33 elektrische Fahrzeugmodelle deutscher Hersteller auf dem Markt [7], [8], bis Ende 2020 wird die Anzahl auf 60 Fahrzeugmodelle ansteigen [8].

Trotz der Vorteile von Elektrofahrzeugen, wie die lokale Emissionsfreiheit, die mögliche Nutzung regenerativer Energien, ein dynamischeres Beschleunigungsverhalten sowie hohe Systemwirkungsgrade, ist die Elektromobilität noch ausbaufähig [9], [10]. Zum einen ist die geringere reale Reichweite (ca. 200 - 500 km [11]) im Vergleich zu verbrennungsmotorischen Fahrzeugen (ca. 600 - 1000 km) sowie eine lange Ladezeit und die Ladeinfrastruktur zu erwähnen, die sich derzeit noch im Aufbau befindet [12]. Zum anderen führen hohe Batterie- und Entwicklungskosten zu hohen Anschaffungspreisen für den Nutzer [12].

1.1 Motivation

Konventionelle Entwicklungsprozesse von Traktionsantrieben für Elektrofahrzeuge orientieren sich produkt- und prozessseitig an Standardprozessen für stationäre Industriemaschinen sowie an Literaturwerten und Expertenwissen von Konstrukteuren [13]. Der konventionelle Auslegungsprozess elektrischer Maschinen besteht zudem aus einer Vielzahl von Konstruktionsschritten, die eine feste statische Reihenfolge einhalten [1], wodurch wenig Möglichkeit für Iterationsschleifen geboten wird.

Als Konsequenz dieser empirischen Auslegung werden elektrische Antriebsstränge derart ausgelegt, dass die elektrische Maschine die maximal geforderte Leistung dauerhaft und jederzeit abgeben kann – sie erfüllt stets 100 % der Anforderungen [14], [15]. Es resultieren hohe Sicherheitsreserven, die zu höheren Gesamtkosten, Effizienzeinbußen sowie einer Überdimensionierung der Maschine hinsichtlich der Größe, des Gewichts und der Leistung führen [16]. Dies hat erhebliche Auswirkungen auf den Wirkungsgrad der elektrischen Maschinen, ist in den meisten Fällen nicht erforderlich und widerspricht auch dem Anforderungsleichtbau sowie dem Entwicklungsprozess konventioneller, verbrennungsmotorisch angetriebener Fahrzeuge [17].

In der Praxis wird zur Produktion von EM meist bestehende Infrastruktur eingesetzt. Um die Kosten für die Auslegung elektrischer Maschinen für neue Anwendungsfälle gering zu halten, wird dafür vorwiegend auf die bereits existierende Produktpalette vorhandener Lieferanten bzw. Bauteilmaschinen zurückgegriffen [18]. Dadurch werden einzelne Aspekte der Maschinenauslegung sowie deren Parameter vordefiniert und eine Limitierung des Lösungsraumes bereits vor der Auslegung vorgenommen.

Weil auf den Einsatz eines mehrgängigen Getriebes in BEV in der Regel verzichtet wird [19], muss die elektrische Maschine zur Traktion des Fahrzeuges im Vergleich zu stationären industriellen Applikationen in einer Vielzahl von Arbeitspunkten, je nach Geschwindigkeit, Brems- oder Beschleunigungsvorgang bzw. Drehzahl und Drehmoment, über das gesamte Kennfeld betrieben werden. Daher ist für Traktionsmaschinen nicht die maximale Effizienz in einem Bereich des Kennfeldes, sondern der Wirkungsgrad über die Verteilung der Betriebspunkte im gesamten Kennfeld relevant [20]. Ziel bei der Auslegung der elektrischen Maschine im Fahrzeug ist die Übereinstimmung der Betriebsbereiche mit der höchsten Effizienz und den Betriebspunkten einer Fahrzeugapplikation. Eine Schwierigkeit liegt dabei in der Wahl eines oder mehrerer passender Fahrzyklen, die das Fahrverhalten des Nutzers in einer spezifischen Applikation abbilden [21].

Der Einsatz von standardisierten Fahrzyklen wie den Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure (WLTP) ermöglicht dem Endnutzer einen direkten Vergleich zwischen einer Vielzahl an Fahrzeugen [22]. Um ein konkurrenzfähiges Fahrzeug auf den Markt zu bringen, werden daher von vielen Komponentenherstellern die Betriebspunkte des WLTP bei der Auslegung berücksichtigt [23], [24]. Allerdings weichen die im WLTP auftretenden Betriebspunkte meist von den tatsächlichen Betriebspunkten im realen Gebrauch ab. Auf die Kundenakzeptanz hat dieses Vorgehen einen negativen Effekt, weil sich der Kunde auf die Angaben der Hersteller verlässt. Meist werden jedoch Abweichungen von bis zu 40 km zwischen den Herstellerangaben und der tatsächlich möglichen Reichweite bemängelt [25]. Je nach Fahrweise, Nutzung der Heizung oder Klimaanlage sowie Außentemperatur kann diese Abweichung sogar bis zu 50 % der angegebenen Reichweite ausmachen [26], [27]. Dies liegt vor allem an der Tatsache, dass eine Auslegung nach standardisierten Fahrzyklen zu „Allrounder“-Antriebssträngen führen, die keine

Berücksichtigung vorliegender Nutzerverhalten vornehmen und sich die Betriebspunkte im tatsächlichen Betrieb nicht in den höchsten Effizienzbereichen des Maschinenkennfeldes befinden [23], [28]. Im Zusammenspiel mit aktuellen Trends in Richtung höhere Leistungsklassen, höhere Reichweiten bei gleichzeitig durch den Kunden geforderten möglichst geringen Verbrauch und geringe Kosten führt die Auslegung zu einem Zielkonflikt zwischen Kosten, Effizienz im Zyklus sowie Package im Antriebsstrang [25].

Dieser Zielkonflikt wird die Automobilhersteller zukünftig weiterhin beschäftigen, wenn auch mit einem neuen Fokus. Betrachtet man die zukünftige Entwicklung der Elektromobilität, rückt das Thema „Shared Mobility“ und autonomes Fahren mit Hinblick auf die Nutzung anstelle des Besitzens in den Mittelpunkt [25]. Nach dem Prinzip „Mobility on Demand“ kann sich der Endnutzer zu Beginn jeder Fahrt das optimale Fahrzeug in Hinsicht auf Leistung, Reichweite, Größe und Verbrauch individuell auswählen [25] oder die Entscheidung wird ihm durch die Verfügbarkeit autonomer Taxis abgenommen [29]. Der Fokus des Endnutzers verschiebt sich dadurch vom Fahrzeugbesitzer zum Mobilitätsnutzer und der Anbieter des Sharing-Services wird der Kunde der Fahrzeughersteller [25]. Die Ansprüche des Endnutzers, zur maximalen Leistung, maximalen Reichweite sowie geringen Anschaffungskosten und geringem Verbrauch werden durch das Ziel des Sharing-Anbieters, ein möglichst energieeffizientes Fahrzeug für den abzudeckenden Anwendungsfall zu erhalten, ersetzt [25].

Eine anwendungsspezifische Antriebsstrangoptimierung ist dabei abhängig von den Betriebspunkten des jeweiligen Nutzerszenarios. So unterscheiden sich die Betriebspunkte eines Nutzers, der vorwiegend im Stadtverkehr unterwegs ist, von einem Langstreckenpendler mit großem Autobahnanteil (Abbildung 1.1). Wird ein Fahrzeug durch den Nutzer gleichzeitig zum Pendeln in der Stadt, zur Langstreckenfahrt in den Urlaub sowie zur Fahrt in die Berge eingesetzt, hat er folglich nie das energieeffizienteste Fahrzeug mit dem optimalen Antriebsstrang in seinem Besitz [25].

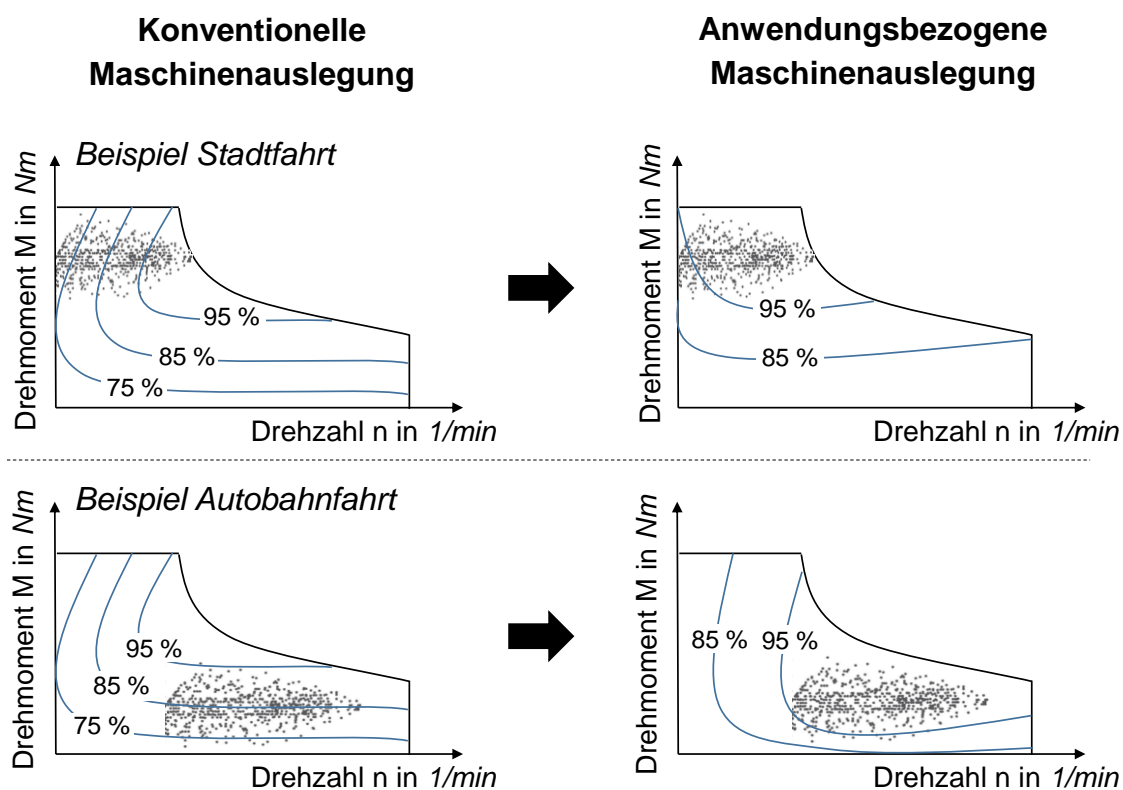


Abbildung 1.1: Konventionelle und anwendungsbezogene Maschinenauslegung.

Die elektrische Traktionsmaschine sowie die Batterie stellen dabei einen zentralen Bestandteil des elektrischen Antriebsstrangs dar [1]. Um den Gesamtmaschinenwirkungsgrad im realen Betrieb zu optimieren, müssen Bereiche mit hohem Maschinenwirkungsgrad (bestimmt durch die Maschinenkonstruktion und den resultierenden Verlusten) auf häufige Betriebspunkte (bestimmt durch Fahrzeugparameter) eines Anwendungsfalls angepasst werden. Ein anwendungsbezogenes Maschinendesign nach Nutzerverhalten ermöglicht die Optimierung der elektrischen Maschine durch die Zusammenführung von realen Betriebspunkten mit den jeweiligen Maschinenwirkungsgraden.

1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer ganzheitlichen Entwurfsmethodik zur automatisierten Auslegung und Analyse permanenterregter Synchronmaschinen und Asynchronmaschinen. Die Methodik dient dazu, Auslegungstopologien, Kennfelderermittlungen sowie Wirkungsgradanalysen unterschiedlicher Maschinenkonzepte bereits in einer frühen Konzeptphase zu simulieren und optimieren. Dabei sollen die realen Belastungen bzw. Betriebspunkte durch den Endkunden im Fahrbetrieb widergespiegelt werden, um somit eine Überdimensionierung des Antriebsstranges zu vermeiden. Das resultierende Tool wurde bereits in KALT [30] Open-Source veröffentlicht. In Abbildung 1.2 ist der Aufbau der Arbeit dargestellt. Dabei werden folgende zwei Hauptziele dieser Arbeit definiert:

- (1) Automatisierte Auslegungsmethodik: Simulative und automatisierte Auslegung einer elektrischen Traktionsmaschine (Kapitel 2.1, Kapitel 3.1 und Kapitel 5.1) sowie die Entwicklung eines optimierten Statorentwurfs, der mit Hilfe von Parameter Permutation das globale Optimum der Auslegung ermöglicht (Kapitel 3.1.2).
- (2) Anwendungsspezifische Maschinenauslegung: Auslegung elektrischer Maschinen anhand von realen Belastungen und Betriebspunkten und Auflösen des Zielkonflikts zwischen *Package*, *Kosten* sowie *Zykluseffizienz* (Kapitel 2.3, Kapitel 3.2 und Kapitel 5.5)

Dabei ist der Fokus der vorliegenden Arbeit die Auflösung des starren Auslegungsprozesses elektrischer Maschinen durch die Entwicklung einer automatisierten Auslegungsmethodik basierend auf den physikalischen Grundlagen der konventionellen Auslegung. Dabei soll vor allem ein Vergleich einer Vielzahl elektrischer Maschinen ermöglicht, subjektive Prozessschritte durch Experten sowie bestehenden Produktionsketten vermieden, sowie die Vorauswahl verschiedener Maschinenparameter zu Beginn der Auslegung automatisiert unterstützt werden. Dabei dienen wenige Parameter, wie die Leistung, die Spannungsebene, die Polpaarzahl, die Drehzahl sowie die Kühlungsart, als Eingangsgrößen der entwickelten Auslegungsmethodik *MEAPA* [30]. Als Output des entwickelten Auslegungstools werden die Wirkungsgradkennfelder der Maschine sowie deren Dimensionierung generiert.

Allerdings sind reale Angaben zu existierenden elektrischen Maschinen meist unter Geheimhaltung der jeweiligen Hersteller, was eine Validierung zur realistischen simulativen Berechnung und Auslegung der Maschinen erschwert [14]. Daher wurde im Laufe dieser Arbeit die Optimierung des Berechnungsvorgangs und die Untersuchung von Verbesserungspotentialen des klassischen Entwurfsvorgangs, vor allem hinsichtlich des Stator- bzw. Wicklungsentwurfs von Drehstrommaschinen (Optimierter Statorentwurf Kapitel 3.1.2) vorgenommen. Der optimierte

Statorwurf dient dazu, mit Hilfe von Parameter Permutation das globale Optimum der Maschinenauslegung unter Berücksichtigung aller physikalisch möglichen Maschinenparameter in jedem Schritt der Auslegung zu bestimmen. Dadurch können fehlende Parameter in Datenblättern bestehender elektrischer Maschinen ermittelt, ein Vergleich aller physikalisch möglichen Maschinenparameter durchgeführt und somit die optimale Statorauslegung bestimmt werden.

Die Validierung der jeweiligen Teilmodelle und eine vollständige Dokumentation werden zudem zur Absicherung des Auslegungstools durchgeführt. Die Validierung der Modelle erfolgt anhand vorhandener Datenblätter elektrischer Maschinen aus dem Automotive-Bereich sowie Messungen auf einem entwickelten Maschinenprüfstands Aufbau.

Neben der Automatisierung und Optimierung der Auslegung einer spezifischen elektrischen Maschine wird mit dem zweiten Hauptziel die gesamtheitliche Betrachtung einer anwendungsspezifischen Maschinenauslegung angestrebt (Abbildung 1.2). Dafür werden in einem ersten Schritt Nutzeranforderungen definiert. Hierzu werden Fahrzyklen basierend auf realen Fahrdaten sowie Extremzustände der elektrischen Maschine, zum Beispiel starke Brems- und Beschleunigungsvorgänge sowie eine dauerhafte Maximalbelastung, erstellt und zur weiteren Optimierung eingesetzt.

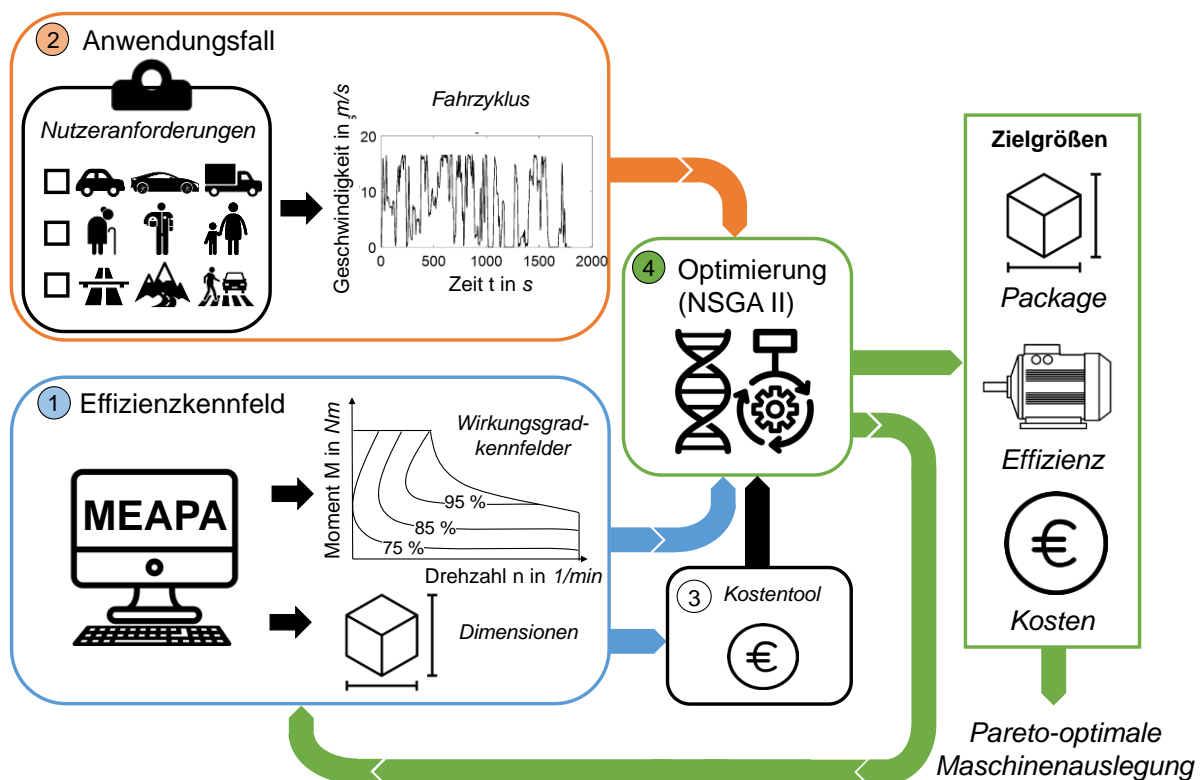


Abbildung 1.2: Aufbau der vorliegenden Arbeit – (1) Vorstellung der automatisierten Maschinenauslegungsmethodik (Kapitel 2.1, Kapitel 3.1 und Kapitel 4.1), (2) Definition des Anwendungsfalls durch Nutzeranforderungen und deren Überführung in repräsentative Fahrzyklen (Kapitel 2.2.2, Kapitel 3.2.2, Kapitel 3.2.3 und Kapitel 4.2), (3) Kostentool [31] (Kapitel 3.2.5), (4) Zusammenführung im Optimierungsalgorithmus zur Pareto-optimale Maschinenauslegung (Kapitel 2.2, Kapitel 3.2 und Kapitel 4.2).

Anmerkung: MEAPA – Modell für den Entwurf und die Analyse einer PSM oder ASM (Das in dieser Arbeit entwickelte Auslegungstool für elektrische Maschinen)

In Kombination mit den in MEAPA erstellten Wirkungsgradkennfeldern kann eine Längsdynamiksimulation (LDS) durchgeführt werden, die als Output die *Zykluseffizienz* eines spezifischen

Anwendungsfalls liefert. Gleichzeitig dienen die in *MEAPA* berechneten Maschinendimensionen als Input für die Kostenberechnung der Maschine. Das Kostentool basiert dabei auf ANGERER [31] und generiert als Output die Zielgröße *Kosten*.

In Kombination mit den berechneten Maschinendimensionen aus *MEAPA*, kann der Zielkonflikt zwischen den Zielgrößen *Package*, *Kosten* sowie *Zykluseffizienz* analysiert werden. Um eine Vielzahl an Freiheitsgraden und eine Optimierung der Maschinenauslegung in dieser Hinsicht zu ermöglichen, wird der Mehrzieloptimierungsalgorithmus NSGA II verwendet. Dieser generiert in jeder Iteration die Eingangsparameter für *MEAPA*. Die durchgeführten Untersuchungen können mit Hilfe der Mehrzieloptimierung einen Pareto-optimalen Lösungsraum der Maschinenauslegung in Bezug auf den Zielkonflikt zwischen *Package*, *Kosten* sowie *Zykluseffizienz* für ein spezifisches Nutzerverhalten bestimmen.

Zur Umsetzung der angestrebten Zielsetzung, wird im folgenden Kapitel 2 auf den Stand der Wissenschaft und Technik eingegangen, der die Basis für das Vorgehen und die Modellierung bildet. Dabei wird zunächst auf die konventionelle Maschinenauslegungsmethodik näher eingegangen. Daraufhin werden zur anwendungsspezifischen Auslegung notwendige Anforderungen dynamischer Vorgänge sowie Nutzerverhalten vorgestellt. Zum Abschluss des Kapitels werden der Stand der Wissenschaft und Technik kritisch hinterfragt und die Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit definiert.

Das Kapitel 3 beschreibt das Vorgehen und die Modellierung der vorliegenden Arbeit. Dabei wird zunächst die in dieser Arbeit entwickelte Maschinenauslegungsmethodik vorgestellt. Darauffolgend wird der Aufbau des Optimierungsalgorithmus' dargestellt, die Fahrdatenerhebung und Analyse konventioneller und realer Fahrzyklen und die Komponenten der Längsdynamiksimulation (LDS) sowie Kostenmodellierung näher erläutert. Eine anschließende Validierung der Simulationsmodelle zeigt die Güte der erzielten Ergebnisse und der Methodik in Kapitel 4 auf.

In Kapitel 5 werden die Ergebnisse der Arbeit aufgeführt. Dort werden die anhand realer Erprobungsdaten generierten Fahrzyklen sowie die Ergebnisse der optimierten Auslegungsmethodik dargestellt und daraus Rückschlüsse auf die Anforderungen für zukünftige elektrische Antriebe gezogen. In einem letzten Schritt werden die Pareto-Fronten des Optimierungsalgorithmus' aufgeführt. Basierend auf einer Sensitivitätsanalyse der Maschinenparameter, werden die Stellhebel der Maschinenauslegung bestimmt. Daraufhin wird die optimale Maschinenauslegung für verschiedene Nutzerverhalten vorgestellt, die sich zunächst lediglich auf die elektrische Maschine und in einem letzten Schritt auf den gesamten Antriebsstrang beziehen.

Im letzten Kapitel wird ein Ausblick auf Optimierung- und Erweiterungsmöglichkeiten des Vorgehens gegeben. Das entwickelte Auslegungsverfahren wird dabei nicht allein für eine Fahrzeug- bzw. Leistungsklasse optimiert, sondern soll eine fahrzeugklassenübergreifende Gültigkeit besitzen. Das Ergebnis dieser Arbeit ist zum einen ein Simulationstool zur automatisierten Auslegung elektrischer Maschinen, sowie die Methodik des optimierten Statorentwurfs. Zum anderen die anwendungsbezogene Analyse hinsichtlich einer Mehrzieloptimierung für *Kosten*, *Zykluseffizienz* und *Package*, woraus Rückschlüsse auf die Anforderungen für zukünftige elektrische Antriebe gezogen werden können.

Die Beantwortung der Forschungsfragen (Kapitel 2.4) sowie die Entwicklung einer Methodik zur automatisierten Auslegung elektrischer Maschinen stellen den wissenschaftlichen Neuigkeitswert dieser Arbeit dar. Dabei ist die vorliegende Auslegungsmethodik Limitierungen ausgesetzt. Zum einen werden lediglich ASM und PSM betrachtet. Eine Auslegung von beispielsweise einer FSM wird mit dem vorliegenden Auslegungstool nicht betrachtet, weil diese in der Applikation im Fahrzeug in der Realität nahezu keine Verwendung findet [19]. Zum anderen wird lediglich eine

Strangzahl von $m = 3$ betrachtet. Dies liegt vor allem in der Verfügbarkeit notwendiger empirischer Richtwerte und Auslegungsformeln in der Literatur, die größtenteils für symmetrische dreisträngige Wicklungen angegeben sind. Für das Leitermaterial werden ausschließlich Kupferdraht und Aluminiumdraht bzw. Aluminiumguss berücksichtigt, weil dies die geläufigsten Materialien für Wicklungen sind [32]. Die Verschaltung der Statorwicklung wird auf die Sternschaltung beschränkt, weil Dreieckschaltungen bei bestimmten Konfigurationen von PSM durch harmonische Oberwellen große Ringströme und dadurch unvorhersehbare Zusatzverluste erzeugen [33, p. 117]. Die Kühlung des Stators ist mittels einer Luft- bzw. Flüssigkeitskühlung als Auswahlmöglichkeit umgesetzt. Die Magnetanordnung im Rotor einer PSM ist auf eine einschichtige, radiale IPSM (tangential, V-Form, eingelassen) und eine radiale SMPSM Anordnung limitiert. Die Berücksichtigung von Aussenläufern, zum Beispiel Radnabenmotoren, wird dabei ausgeschlossen und es wird ausschließlich der Anwendungsfall im Personenkraftwagen (Pkw) betrachtet. Die der Fahrzeugklasse zugeteilten Mobilitätsparameter werden vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur [34] zur Verfügung gestellt (Anhang C.6 und C.7).

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Im folgenden Kapitel wird der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik zur automatisierten Auslegung von elektrischen Maschinen anhand von realen Anwendungsfällen vorgestellt. Es wird zunächst auf die konventionelle Maschinenauslegung eingegangen, daraufhin die Grundlagen der eingesetzten Mehrzieloptimierung und die definierten Anwendungsfälle vorgestellt.

2.1 Auslegung elektrischer Maschinen

Die elektrische Maschine stellt als elektromechanischer Energiewandler eine wesentliche Komponente im elektrischen Antriebsstrang dar. Die EM wandelt die in der Batterie gespeicherte elektrische Energie in mechanische Bewegungsenergie für den Vortrieb des Fahrzeuges und bildet somit das Bindeglied zwischen elektrischen und mechanischen Komponenten im Antriebsstrang [12], [35]. In Bezug auf die Funktionsweise und Grundlagen elektrischer Maschinen sowie die Materialauswahl wird auf die vorhandene Standardliteratur verwiesen [13], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46].

Der konventionelle Maschinenauslegungsprozess besteht aus einer Vielzahl an aufeinanderfolgenden Konstruktionsschritten (Abbildung 2.1). Er basiert dabei auf Literatur- sowie Erfahrungswerten von Experten und Konstrukteuren [14].

In einem ersten Schritt wird der Anwendungsfall, zum Beispiel Fahrzeugklasse oder Einsatzgebiet (Stadt-, Langstreckenfahrzeug etc.), definiert. Hier werden die wesentlichen Fahrzeugeigenschaften, wie die maximale Geschwindigkeit, Steigfähigkeit, Beschleunigung von 0 - 100 km/h und die aerodynamischen Eigenschaften, sowie die Maschinenparameter und das daraus erforderliche maximale Drehmoment und die maximale Drehzahl der Maschine festgelegt. In dem folgenden Schritt wird die Grobauslegung der Hauptabmessungen bestimmt sowie die Hauptwerkstoffe ausgewählt [13]. Daraufhin kann die elektromagnetische und thermische Auslegung auf Basis der zuvor festgelegten Anforderungen durchgeführt werden. Der elektromagnetische Entwurf umfasst die Wicklungsauslegung, die Berechnung der möglichen Magnetkreise sowie die Erregung und Leistungsverteilung [36]. Bei der thermischen Auslegung wird der realisierte Maschinenentwurf hinsichtlich der kritischen Grenztemperatur (Bei der PSM bestimmt durch die Entmagnetisierung des Magnetmaterials [47]) der Komponenten untersucht. Danach folgt der mechanische Entwurf, mit dem untersucht wird, ob zum Beispiel die Lager der Maschine ausreichend ausgelegt sind [20], [32].

Ist dieser Teil der Maschinenauslegung abgeschlossen, kann eine Berechnung des Wirkungsgradkennfeldes sowie eine Analyse der Anforderungserfüllung durchgeführt werden. Ist die Maschinenauslegung abgeschlossen, kann ein Prototyp erstellt und geprüft werden [13].

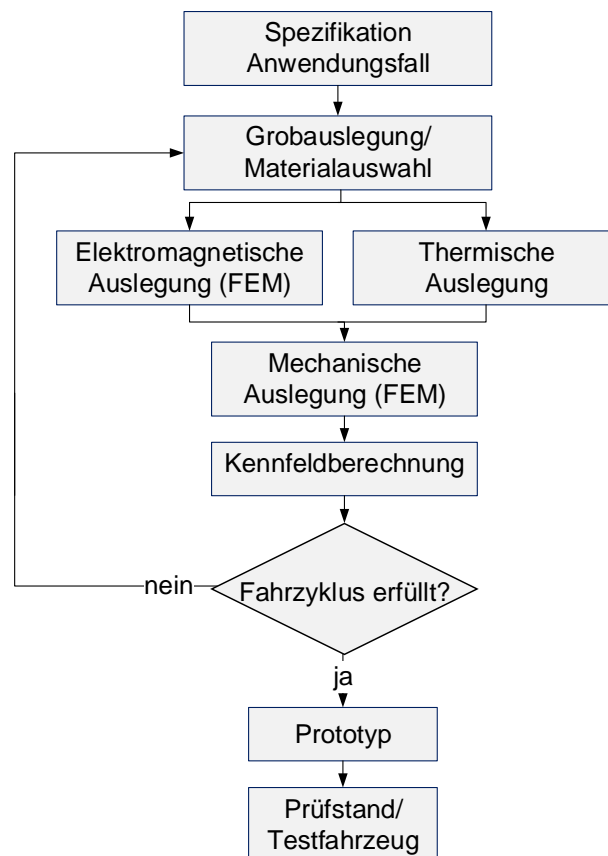


Abbildung 2.1: Übersicht des konventionellen Maschinenauslegungsprozesses [13], [20], [32].

Die Spezifikation des Anwendungsfalls ist in Kapitel 3.2.2 bzw. Kapitel 5.3 aufgeführt. In den folgenden Unterkapiteln wird auf die einzelnen Bestandteile des konventionellen Maschinenauslegungsprozesses näher eingegangen. Dabei bezieht sich die Auslegung ausschließlich auf Innenpolmaschinen (Erregung im Rotor) für den Einsatz als Traktionsmaschinen in Personenkraftwagen mit einer Leistungsklasse zwischen 50 - 200 kW pro Maschine sowie einer Spannungsebene von 200 - 400 V. Nicht im Text deklarierte Parameter sind im Kapitel Formelzeichen zu Beginn dieser Arbeit deklariert.

2.1.1 Elektrische Maschinentopologien

Durch die historisch bedingte Variation an Einsatzzwecken für elektrische Maschinen hat sich eine Vielzahl von Maschinenarten entwickelt. Diese unterscheiden sich in Bezug auf ihre Stromart in Gleichstrommaschinen (GM) sowie Drehstrommaschinen, wobei letzteres eine weitere Unterteilung nach ihrem Funktionsprinzip in Synchron- und Asynchronmaschine ermöglicht [48].

Bis Mitte des 20. Jahrhunderts wurden aufgrund ihrer einfachen Steuerung vorwiegend GM für drehzahlvariable Elektroantriebe verwendet. Allerdings sind sie aufgrund der notwendigen Schleifkontakte störanfällig sowie wartungsintensiv und bieten einen vergleichsweise niedrigen Wirkungsgrad [49]. Durch die Entwicklung moderner Leistungselektronik in den 1980er Jahren wurde auch die Regelung von Drehstrommaschinen ermöglicht. Sie weisen im Vergleich zu GM eine höhere Leistungsdichte sowie höhere Wirkungsgrade und einen wartungsfreien Betrieb und somit eine höhere Zuverlässigkeit auf. Für die Anwendung als Traktionsantrieb im Fahrzeug

werden demnach in heutigen Fahrzeugmodellen ausschließlich Drehstrommaschinen eingesetzt und die GM findet vorwiegend als Hilfsmotor wie beispielsweise als Fensterheber Einsatz [38].

Im Bereich der Drehstrommaschinen sind in den letzten Jahren verschiedene neuartige Konzepte entwickelt worden, die Unterscheidungsmerkmale in Bezug auf ihre Baugröße, ihren Wirkungsgrad, Geschwindigkeitsbereich sowie Zuverlässigkeit aufweisen (Abbildung 2.2). So ermöglicht eine geschaltete Reluktanzmaschine (GRM) eine einfache robuste Konstruktion mit niedrigeren Herstellungskosten als die PSM oder ASM, weil weder Permanentmagnete noch Wicklungen auf dem Rotor angebracht werden müssen [49]. Hierbei muss sich für eine korrekte Funktionsweise, die Anzahl der Zähne im Stator und im Rotor unterscheiden [50]. Durch die Änderung des magnetischen Widerstandes (Reluktanz) im Luftspalt entsteht eine Kraft, die eine möglichst geringe Reluktanz anstrebt [38]. Durch die resultierende geringe Wärmebildung eignet sie sich für hohe Drehzahlen und kurzzeitige Überlastbarkeit. Lediglich die geringe Leistungsdichte sowie das vergleichsweise hohe Drehmomenttrippel und den daraus resultierenden akustischen Nachteilen sowie der hohe Blindleistungsbedarf machen sie für den Traktionsantrieb weniger anwendungstauglich [49].

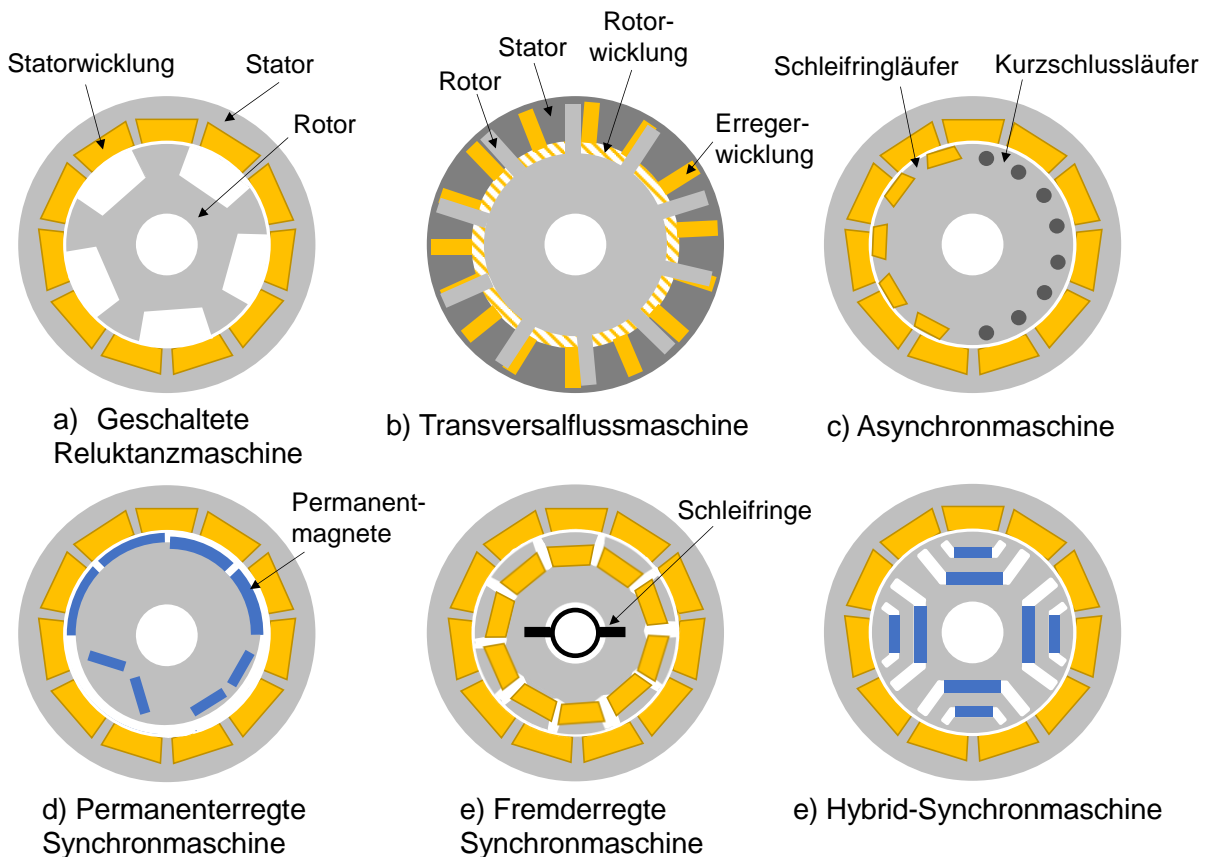


Abbildung 2.2: Beispielhafter Aufbau verschiedener Maschinentopologien.

Die sogenannte Transversalflussmaschine (TFM) ermöglicht geringe Verluste und somit eine einfache Kühlung im gesamten Kennfeldbereich. Sie erfordert allerdings aufgrund der dreidimensionalen Führung des magnetischen Flusses eine komplexe Konstruktion und weist ähnlich zur Reluktanzmaschine zudem akustische Probleme auf [51].

Obwohl alle Motortopologien bereits in Prototypen und Forschungsprojekten im Fahrzeug integriert wurden, werden in der Praxis größtenteils (>90 % [19]) Synchron- und

Asynchronmaschinen eingesetzt [38]. Bei der Asynchronmaschine folgt die charakteristische Namensgebung aus der Funktionsweise, dass die Rotordrehzahl n_2 asynchron zu dem aus den durchströmten Statorwicklungen hervorgerufenen magnetischen Drehfeld n_1 läuft und somit durch die entstehende Kraftbildung ein Drehmoment erzeugt wird [52]. Solange der Rotor einer ASM asynchron zum Statorfeld läuft, wird gemäß des Faraday'schen Induktionsgesetz eine Spannung in den Rotorwicklungen induziert [50]. Je größer die relative Geschwindigkeit, auch Schlupf s genannt, desto häufiger tritt eine Änderung des Magnetfeldes und somit eine höhere Induktionsspannung E_h auf [42]. Hierbei ist die Käfig- bzw. Schleifringläufermaschine zu unterscheiden. Durch das Kurzschließen der Rotorwicklung kann die induzierte Spannung einen Stromfluss in den Wicklungen des Rotors aufbauen. Der Käfigläufer ermöglicht somit durch den zu den Feldlinien des rotierenden Magnetfeldes senkrechten Stromfluss, dass sich eine tangential gerichtete Lorentzkraft bildet, die wiederum zu der notwendigen Drehmomentbildung im Rotor führt [42]. Die Höhe der entstehenden Lorentzkraft ist dabei direkt proportional zur induzierten Spannung E_h und folglich des vorhandenen Schlupfs s .

Das beschriebene Prinzip der Drehmomentbildung einer ASM liefert das Nutzmoment bzw. die Grundwelle des Statorfeldes [50]. Zusätzlich können jedoch auch Oberwellen des Statorfeldes im Rotor eine Spannung bzw. einen Strom erzeugen. Diese entstehen beispielsweise durch induzierte Rotoroberströme und bilden ein Drehmoment, das sich mit dem Grundwellendrehmoment überlagert, die Drehmomentkurve verzerrt, den Anlauf der Maschine stört und somit unerwünscht sind [53]. Maßnahmen zur Unterdrückung von Oberwellendrehmomente in Bezug auf die Auslegungsmethodik werden in den kommenden Kapiteln thematisiert.

Die Verknappung sowie Ausführbeschränkung der seltenen Erden für die PSM, führen bei vielen Fahrzeugherstellern zum Einsatz von Asynchronmaschinen, weil sie trotz ihrer niedrigeren Drehmomentendichte (ca. 4 - 6 Nm/kg) und geringeren Wirkungsgraden eine hohe Robustheit sowie kurzzeitig hohe Überlastbarkeit (ASM um ca. Faktor 2 - 5, PSM ca. Faktor 1 - 2) ermöglichen [54], [14]. Allerdings nehmen diese robusteren Maschinen einen größeren Bauraum (ASM fallen bei gleicher Leistung etwa 10 - 15 % schwerer und größer als PSM aus [55]) in Anspruch. Asynchronmaschinen werden in Serienfahrzeugen wie beispielsweise dem Audi e-tron [56], Tesla Model S und Model X [57], [58], [59] und Renault Twizy [58], [60] eingesetzt.

Der Stator einer Synchronmaschine ist ähnlich einer ASM aufgebaut. Eine Unterscheidung findet sich in der Konstruktion des Rotors – die Rotordrehzahl läuft bei der SM synchron zum Statorfeld und besitzt somit keinen Schlupf [42]. Dabei erfolgt eine weitere Unterscheidung in Bezug auf die Entstehung des Magnetfeldes im Rotor – durch eine fremderregte Wicklung (FSM) oder Permanentmagnete.

Der Vorteil einer FSM liegt in der variablen Einstellung des Erregerstromes im Rotor, wodurch bestimmte Betriebspunkte gezielt angesteuert werden können [50]. Allerdings erfordert die elektrische Erregung zur Übertragung des Stromes auf den Rotor Schleifkontakte, die mit erhöhtem Verschleiß und Wartungsaufwand einhergehen [61]. Die FSM findet in den Fahrzeugmodellen Renault Fluence Z.E. und Renault ZOE Verwendung [55].

Im Vergleich zu stationären Anwendungen unterscheidet sich der dynamische Betrieb der elektrischen Traktionsmaschine vor allem darin, dass die Drehmomentdichte (gemessen in Newtonmeter pro Kilogramm [62]) sowie ein hoher Wirkungsgrad im gesamten Drehzahlbereich von Bedeutung sind. Daher rücken permanenterrregte Synchronmaschinen (PSM) im Bereich mobiler Anwendungen in den Fokus. Im Vergleich zur Asynchronmaschine (ASM) weisen sie eine höhere Leistungsdichte (ASM ca. 1,7 - 2,2 kW/kg, PSM ca. 2 - 3 kW/kg [19], [55]) und Effizienz (ASM ca. 90 %, PSM ca. 95 % maximaler Wirkungsgrad [55]) auf [50], [63]. Weil die

Erregung des Rotors durch Permanentmagnete erfolgt und der Rotor somit stromfrei ist [64], treten nahezu keine Rotorverluste auf [50], [63].

Der Entfall der komplexen Erregereinrichtung einer ASM durch die Permanentmagnete bei der PSM führt zu Bauraumvorteilen und somit einer höheren Leistungsdichte der PSM im Vergleich zur FSM. Ein Nachteil der PSM sind jedoch die erhöhten Kosten für die seltenen Erden der Permanentmagnete (PM) [52] (seltene Erden wie Neodym und Dysprosium machen 25 % der PM aus [55]), sowie eine geringere thermische Rotorbelastbarkeit bis ca. 150°C im Vergleich zu 180°C bei einer ASM und FSM [65]. Zudem treten bei PSM, zum Beispiel bei Abschleppen des Fahrzeuges, im Vergleich zu den anderen Topologien Schleppverluste an der nicht angesteuerten Achse auf [66]. Kann die angetriebene Achse nicht elektrisch entkoppelt werden, arbeitet die elektrische Maschine während eines Abschleppvorganges als Generator und erzeugt elektrischen Strom, der wiederum die Batterie erhitzen oder die Fahrzeugelektronik beschädigen kann [67].

Die PSM kann weiterhin nach ihrer Magnetanordnung klassifiziert werden. So ermöglicht die Anordnung mit Oberflächenmagneten (SMPSM - Surface Mounted PSM) oder innenliegende Magnete (IPSM – Internal magnet PSM) eine unterschiedliche Betriebscharakteristik der Maschine. Die an der Oberfläche montierten Magnete bietet aus Fertigungs- und Kostensicht Vorteile, weil die Magnete auf den Rotor aufgeklebt werden können [12], [35]. Dies führt jedoch bei hohen Drehzahlen dazu, dass sich die Magnete durch die erhöhte Zentrifugalkraft ablösen können, wodurch eine zusätzliche mechanische Sicherungsschicht aufgebracht werden muss [36], [46]. Dies kann durch eingelassene Magnete umgangen werden. Die PSM wird im Nissan Leaf [58], [68] und VW e-Golf eingesetzt [58], [69].

In derzeitigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten [70], [71], [72], [73] wird vor allem die vorteilhafte Kombination aus einer IPSM unter Verwendung der Reluktanzkraft einer GRM, die Hybrid-Synchronmaschine (HSM), untersucht. Diese Maschinenart bietet eine kompakte Baugröße (HSM ist 15 % kleiner als eine vergleichbare ASM [74]) und reduzierten Magnetmasse [63] sowie einen erhöhten Wirkungsgrad über einen breiteren Drehzahlbereich als die PSM und ASM und kombiniert somit die Vorteile der beiden Maschinenarten miteinander [35]. Unter anderem kann dadurch bei gleichbleibendem Permanentmagnetvolumen das Drehmoment deutlich erhöht werden bzw. bei unverändertem Drehmoment das Volumen der PM reduziert werden [71], [72]. Die HSM ist in zahlreichen elektrifizierten Serienfahrzeugen implementiert, wie beispielsweise im Tesla Model 3 [58], Toyota Prius, Nissan Leaf, BMW i3 [75] und Chevrolet Bolt [76].

In Bezug auf die Verteilung des Wirkungsgrades im Kennfeld der jeweiligen Maschinentopologie ergibt sich eine Einteilung gemäß Abbildung 2.3. Dort sind die Wirkungsgradbereiche mit $\eta > 85\%$ für die ASM, FSM, PSM und GRM exemplarisch aufgezeigt. Es ist zu erkennen, dass sich die hohen Wirkungsgrade der PSM im Bereich der Nenndrehzahl befinden. Die ASM und GRM weisen im Bereich hoher Drehzahlen, Bereiche niedriger Verluste auf. Die Bereiche hoher Wirkungsgrade der FSM befindet sich bei mittleren bis höheren Drehzahlen und mittlerem Drehmoment [77].

Über die Auswahl einer geeigneten elektrischen Maschinentopologie für den Einsatz im Fahrzeug kann eine allgemeingültige Aussage zur optimalen Maschine nur anhand von vorher definierten Rahmenbedingungen und Anforderungen getroffen werden [77]. Die Auswahl der Maschinentopologie im Fahrzeug hängt dabei von der individuellen Anforderung des Herstellers ab [78]. Aufgrund der aufgeführten Eigenschaften werden in der Praxis, genauso wie in dieser Arbeit, die PSM und ASM favorisiert [1].

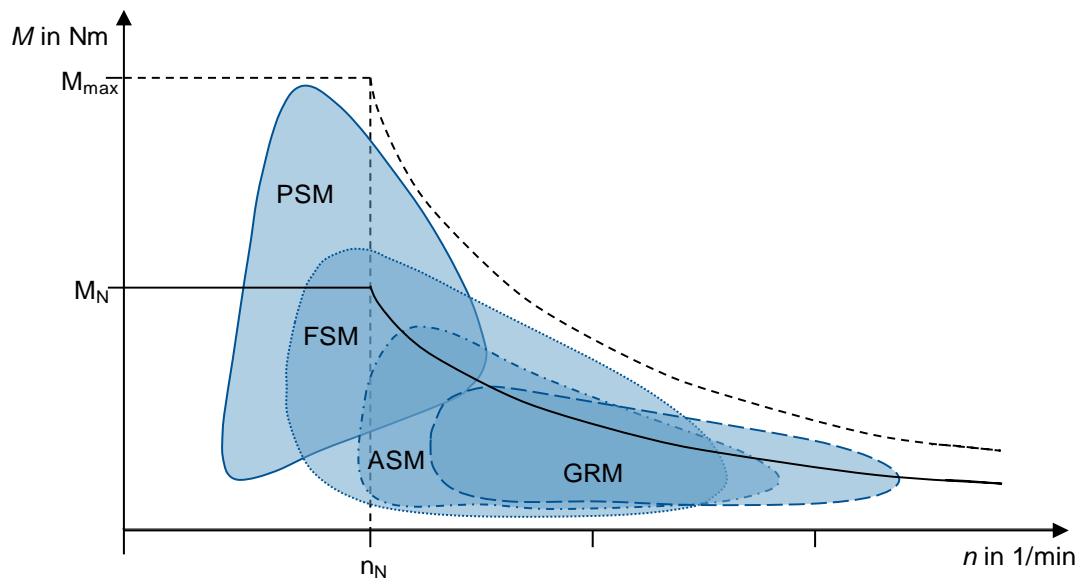


Abbildung 2.3: Wirkungsgrad $\eta > 85\%$ für betrachtete Maschinentopologien nach [77].

Wenn nicht gekennzeichnet, gelten aufgeführte physikalische Zusammenhänge in den folgenden Unterkapiteln gleichermaßen für die PSM und ASM.

2.1.2 Grobauslegung und Hauptabmessungen

Nachdem ein Anwendungsfall spezifiziert und die passende Maschinentopologie ausgewählt wurde, wird zu Beginn der Maschinenauslegung die Grobauslegung der aktiven Maschinenteile, also der Komponenten, die am Energieumsatz beteiligt sind, vorgenommen. Diese werden analytisch bestimmt, sodass eine grobe Dimensionierung aus der geforderten Nennleistung und Nenndrehzahl sowie Polpaarzahl abgeleitet wird [77]. Hierzu werden die notwendigen Bemessungsgrößen und Richtwerte festgelegt und daraufhin eine Grobauslegung der Hauptabmessungen durchgeführt, wie zum Beispiel Statoraußendurchmesser, geometrischer Luftspalt, Rotordurchmesser, axiale Länge aktiver Teile und die Gestaltung der Nutform [32].

Die Bemessungsgrößen stellen die Eingangsgrößen für die Maschinenauslegung dar, wie beispielsweise die Nenndaten der Maschine, die Polpaarzahl, den Leistungsfaktor und die Strangzahl. Daraus werden sekundäre Parameter wie das Leitermaterial der Statorwicklung, die Verschaltung der Stränge, die Kühlung des Stators sowie die Magnetanordnung im Rotor bestimmt. Die Richtwerte basieren auf Erfahrungswerten aus der Literatur von bereits realisierten elektrischen Maschinen und können in Anhang A eingesehen werden. Sie umfassen beispielsweise Richtwerte für die minimale Statornutteilung $\tau_{1n,min}$, die maximale Zahn- und Rückeninduktion B_r und B_z sowie die Dicke der Nutisolierung d_{iso} [13].

Daraufhin kann die Grobabschätzung der aktiven Komponenten durchgeführt werden. Die Grundlage dazu bildet die Ermittlung der Hauptabmessungen, die beispielsweise bei einer SM mit der Entwurfs Gleichung (2.1) berechnet werden kann [13]. Der Ausnutzungsfaktor C_s beschreibt die elektromagnetische Beanspruchung einer elektrischen Maschine, unterscheidet sich je nach Maschinentyp und wird meist basierend auf Erfahrungswerten aus der Literatur bestimmt [13]. Je höher der Ausnutzungsfaktor der elektrischen Maschine, desto größer ist die volumetrische und gravimetrische Leistungsdichte. Begrenzend wirken der Mittelwert der Luftspaltinduktion B_m und der Strombelag A [13].

$$P_{s,N} = C_s D_i^2 l_i n_N = \frac{P_{mech}}{\eta_N} \cos \varphi_N \text{ mit } \begin{cases} C_s = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \xi \frac{U}{E_h} A \hat{B}_\delta, PSM \\ C_s = \frac{\pi^3}{2\sqrt{2}} \xi \eta \cos \varphi \frac{U}{E_h} A B_m, ASM \end{cases} \quad (2.1)$$

Der maximal zulässige Strombelag wird maßgeblich durch die Kühlung bestimmt [13]. Dabei sollten für hoch ausgenutzte Maschinen, wie es im Einsatz als Traktionsmaschine vorkommt, Werte im oberen Grenzbereich des jeweiligen Maschinenparameters gewählt werden. Ist der Ausnutzungsfaktor bestimmt, kann das Bohrungsvolumen gemäß Gleichung (2.1) berechnet werden [13].

$$V_{Bohrung} = D_i^2 l_i \frac{\pi}{4} = \frac{P_{s,N}}{n_N C_s} \frac{\pi}{4} \quad \text{mit } \lambda = \frac{l_i}{\tau_p} \quad \text{und } \tau_p = \frac{D_i \pi}{2p} \quad (2.2)$$

Dabei entspricht die Polteilung τ_p der am Statorumfang gemessenen Länge zwischen zwei Polen und die relative Länge λ in Richtung der rotierenden Achse kann Richtwerten der Literatur entnommen werden [13]. Ein kleiner Wert für die relative Länge bedeutet, dass eine kürzere Maschine mit größerem Durchmesser entsteht und ein großer Wert für die relative Länge, dass eine längere Maschine mit kleinerem Durchmesser entsteht. Für kürzere Maschinen müssen in der mechanischen Auslegung die steigenden Fliehkraftbelastungen bei maximaler Drehzahl beachtet werden [32], [50]. Durch Einsetzen in die Entwurfsgleichung und Umstellen nach dem Statorinnendurchmesser D_i kann dieser sowie die ideale Länge l_i bestimmt werden, Gleichung (2.3) [32].

$$D_i = \sqrt[3]{\frac{P_s 2p}{n_N C_s \lambda \pi}} \quad \text{und} \quad l_i = \frac{P_s}{C_s D_i^2 n_N} \quad (2.3)$$

Mit der Festlegung des Innendurchmessers wird der maximal benötigte Statoraußendurchmesser $D_{a,max}$ bestimmt, Gleichung (2.4) [32].

$$D_{a,max} = D_i + \frac{2,5 A}{S \varphi_n \left(1 - \frac{\hat{B}_\delta}{B_{z,max}}\right)} + \frac{\hat{B}_\delta \tau_p}{B_{r,max}} \quad \text{und} \quad A = \frac{C_s \frac{E_h}{U_{Str}} \sqrt{2}}{\pi^2 \hat{B}_\delta \xi_p} \quad (2.4)$$

Die Stromdichte S spiegelt die elektrische Beanspruchung des Leiters wider und der Nutfüllfaktor φ_n das Verhältnis zwischen reiner Leiterquerschnittsfläche einer Nut zu Nutquerschnitt, weil aus fertigungstechnischer Sicht, die Querschnittsfläche einer Nut nicht komplett mit Leitermaterial gefüllt werden kann [32]. Die Strangspannung U_{Str} kann durch die Nennspannung und Verschaltung der Statorwicklung bestimmt werden, es gilt $U_{Str} = \frac{U_N}{\sqrt{3}}$ bzw. $I_{Str} = I_N$ für Stern-Schaltungen bzw. $U_{Str} = U_N$ bzw. $I_{Str} = \frac{I_N}{\sqrt{3}}$ für Dreieck-Schaltungen [79]. Die induzierte Spannung ist dabei abhängig von der Strangspannung, dem Leistungsfaktor sowie der Erregung der Maschine. Bei einem Leistungsfaktor von 1 entspricht die induzierte Spannung in etwa der Strangspannung $E_h \approx U_{Str}$ [13].

Der geometrische Luftspalt δ_g und der Rotordurchmesser können gemäß Gleichung (2.5) in Abhängigkeit von der Polpaarzahl berechnet werden. Bei langsam drehenden Maschinen mit

hohem Drehmoment wird der Luftspalt meist so klein wie möglich gewählt, für schnell drehende Maschinen muss er aufgrund auftretender Luftspaltüberwellen größer gewählt werden [46].

$$\begin{aligned}
 p = 1 & \quad \begin{cases} \delta_g = 0,2 + 0,01 P_N^{0,4} \text{ mm (PSM)} \\ \delta_g = 0,4 \sqrt[4]{\frac{P_N}{\text{kW}}} \text{ (ASM)} \end{cases} \\
 p > 1 & \quad \begin{cases} \delta_g = 0,18 + 0,006 P_N^{0,4} \text{ mm (PSM)} \\ \delta_g = 0,25 \sqrt[4]{\frac{P_N}{\text{kW}}} \text{ (ASM)} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Aus fertigungstechnischen Gründen darf die Länge des Luftspaltes dabei allerdings 0,2 mm nicht unterschreiten [13]. Für eine Maschinenausführung mit Oberflächenmagneten muss der Luftspalt zusätzlich um 60 % erhöht werden, um auftretende Verluste an der Rotoroberfläche gering zu halten [46]. Daraufhin kann der Außendurchmesser des Rotors aus der Differenz des Statorinnendurchmessers und dem zweifachen Luftspalt gemäß Gleichung (2.6) bestimmt werden.

$$d_a = D_i - 2 \delta_g \tag{2.6}$$

Der Rotorinnendurchmesser stellt dabei den maximalen Durchmesser der Antriebswelle dar [58]. Durch die bereits ermittelte ideale Länge kann die absolute Statorlänge l und die reine Eisenlänge des Blechpaketes l_{Fe} gemäß Gleichung (2.7) bestimmt werden [13], [32].

$$l = l_{Fe} + n_v \gamma_v l_v \quad \text{mit} \quad l_{Fe} = l_i - 2 \delta_g \quad \text{und} \quad \gamma_v = \frac{1}{1 + 5 \left(\frac{\delta_g}{l_v} \right)} \tag{2.7}$$

Bei einer Wasserkühlung oder einer Blechpaketlänge kürzer als 200 mm werden keine Kühlkanäle umgesetzt, wodurch die absolute Statorlänge der Eisenlänge entspricht. Der Hilfsfaktor γ_v korrigiert diesen Einfluss der Kühlkanäle auf das Luftspaltfeld [13]. Mit der Bestimmung der axialen Länge ist die Größenabschätzung der aktiven Teile sowie die Bestimmung der Hauptabmessungen abgeschlossen.

2.1.3 Stator- und Rotorentwurf

Der nächste Schritt in der Auslegung elektrischer Maschinen nach Festlegung der Hauptabmessungen ist der Stator- und Rotorentwurf. Dieser Teil der Auslegung befasst sich mit der Auswahl einer geeigneten Wicklungsart, deren Verschaltung und der Gestaltung der Nutform. Dazu wird in einem ersten Schritt das Wicklungsschema sowie die Wicklungsfaktoren aus der festgelegten Grobauslegung bestimmt. Die Strangwindungszahl sowie die notwendige Nutgeometrie werden derart ausgelegt, dass die Wicklungen in den Nuten aufgenommen werden können und gleichzeitig die zulässigen Induktionen in den Zähnen und Rücken eingehalten werden. Im Rotorentwurf wird zwischen der Auslegung für die ASM und PSM differenziert. Bei der PSM werden die Dimensionierungen der Permanentmagnete, deren Anordnung und Eigenschaften des Magnetmaterials bestimmt. Für die ASM werden in diesem Schritt die Wicklungen sowie der magnetische Kreis des Rotors ausgelegt [32]. Die im Stator- und Rotorentwurf zu betrachteten Maschinenparameter sind in Abbildung 2.4 zusammengefasst.

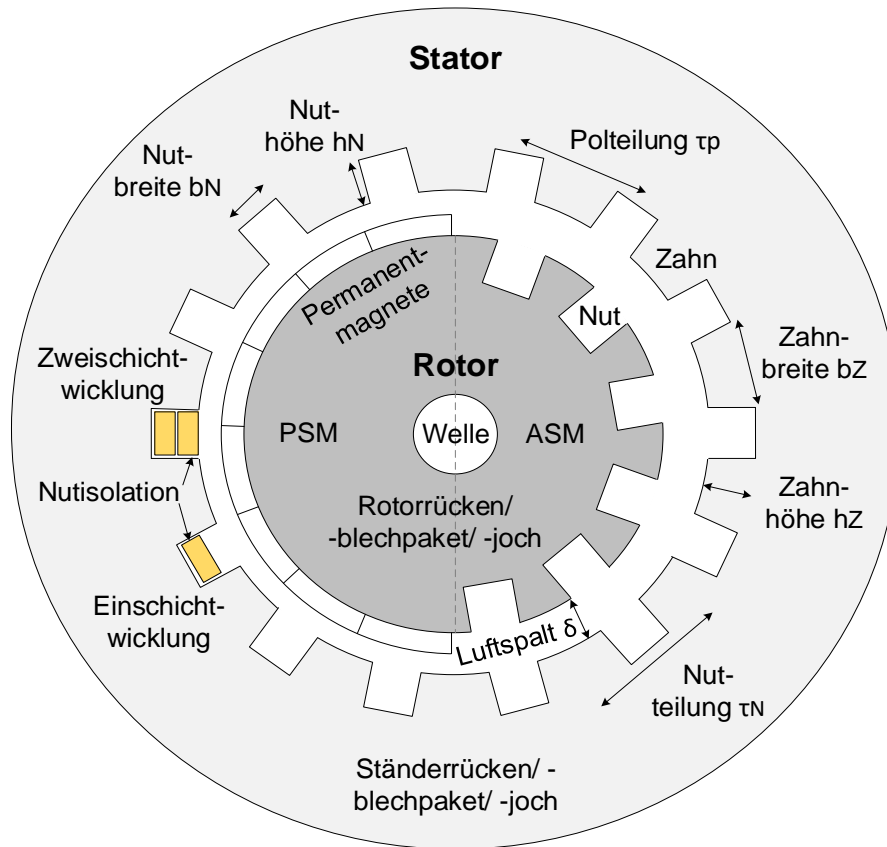


Abbildung 2.4: Aufbau Stator und Rotor elektrischer Maschinen (PSM und ASM).

Das Ziel der Wicklungsauslegung ist die Minimierung des Wicklungsfaktors für die Oberwellen und die gleichzeitige Maximierung des Faktors für die Grundwelle durch die Wahl der Nutenzahl N und der Sehnung der Wicklung S . Dabei wird vor allem auf die Reduzierung zwischen der ersten Oberwelle und der 11. Oberwelle fokussiert, weil diese durch ihre Proportionalität $1/\nu$ die größten Oberwellen darstellen [50]. Diese sind stark abhängig von der Wicklungsart und der dazugehörigen Strangzahl. Eine Ganzlochwicklung beispielsweise umfasst nur ganzzahlige Oberwellen mit ungeraden nicht durch die Strangzahl teilbaren Ordnungszahlen [50]. Für die genaue Berechnung der jeweiligen Oberwellen sowie deren Ordnungszahlen wird auf die Fachliteratur verwiesen [13], [32], [50].

Statorentwurf

Als Eingangsgrößen für die Statorauslegung wird zunächst der Hauptwellenfluss $\phi_h \approx \phi_\delta$ bestimmt sowie der notwendige Strangstrom $I_{1,Str}$ und der daraus resultierende Durchmesser der Spulendrähte gemäß Gleichung (2.8) berechnet [13].

$$I_{1,Str} = \frac{P_N}{m U_{1,Str} \cos\varphi \eta_N} \quad (2.8)$$

Eine Eingrenzung erfolgt anhand der Symmetriebedingungen der Wicklung über die Lochzahl q gemäß Gleichung (2.9).

$$q = \frac{N}{2 m p} \text{ mit } \begin{cases} q \in \mathbb{N} \text{ für Ganzlochwicklungen} \\ q = \frac{qz}{q_N} \text{ mit } q_N \neq 1 \text{ für Bruchlochwicklungen} \end{cases} \quad (2.9)$$

Bei einer ungesehnten Wicklung (Sehnung $S = 1$), muss die Anzahl bewickelter Nuten pro Pol eine natürliche Zahl sein. Für gesehnte Wicklungen wird in der Praxis meist eine Sehnung von $5/6$ bzw. $2/3$ favorisiert [50]. Nach dem Festlegen der Nutenzahl und der Sehnung können die Wicklungsfaktoren (Zonung ξ_z und Sehnung ξ_s) nach BINDER [50] bestimmt werden. Der Wicklungsfaktor $\xi_{p(v)}$ setzt sich daraufhin aus dem Produkt des Sehnungs- und Zonungsfaktors zusammen [32]. Mit Hilfe des Wicklungsfaktors kann die Strangwindungszahl w_{Str} aus dem Induktionsgesetz gemäß Gleichung (2.10) berechnet werden [13].

$$w_{Str} = \frac{\sqrt{2} E_h}{2\pi f_N \xi_p \phi_h} = \frac{N z_n}{2 a m} \quad \text{mit} \quad \phi_h = \frac{2}{\pi} \hat{B}_\delta \tau_p l_i \quad (2.10)$$

Mit Festlegen der Strangwindungszahl können der Hauptwellenfluss ϕ_h , die Luftspaltinduktion \hat{B}_δ sowie der Strombelag A korrigiert werden. Dabei hängt die Luftspaltinduktion und somit die Leistung der Maschine von der Magnethöhe ab - eine Vergrößerung führt zu einem steigenden magnetischen Fluss und somit auch des Drehmoments der Maschine. Die Luftspaltinduktion ist zudem begrenzt durch die elektromagnetischen Eigenschaften des Elektroblechs [13], sowie durch die auftretenden Sättigungseffekte, wodurch die Vergrößerung der Magnete ab einer bestimmten Höhe keinen Leistungsmehrwert bringt [77].

Die in der Praxis zum Einsatz kommenden Wicklungsarten können anhand einer Kombination der folgenden Wicklungsausführungen zusammengeführt werden – Einschicht- oder Zweischichtwicklung, Ganzloch- oder Bruchlochwicklung sowie verteilte oder konzentrierte Wicklung. Die beispielhafte Anordnung der Leiter in einer Einschicht- bzw. Zweischichtwicklung sind in Abbildung 2.5 aufgeführt.

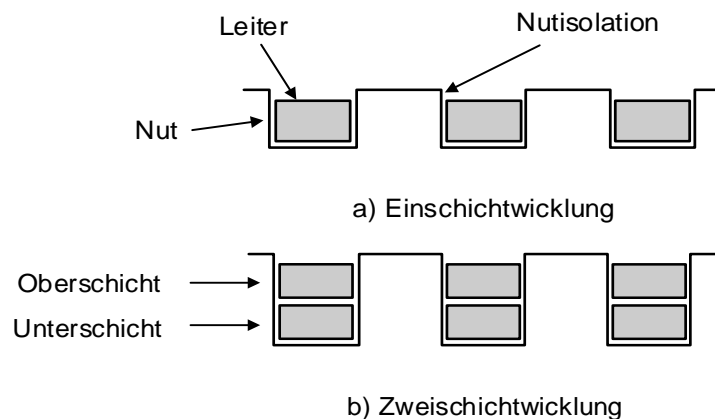


Abbildung 2.5: Aufbau einer a) Einschicht- und b) Zweischichtwicklung nach [80]. Die Nutisolation befindet sich zwischen der Nutwand und der jeweiligen Wicklung.

Die Vorteile einer Zweischichtwicklung sind unter anderem geringere Oberwellen sowie eine vereinfachte Wickelkopfkonstruktion und Fertigung [50]. Bei der Einschichtwicklung hingegen kann der Wickelkopf durch konzentrische Spulen kompakt gehalten werden, weil die Anzahl der Spulen bei gleicher Nutenzahl halbiert ist [13], [81].

Die Ganzloch- bzw. Bruchlochwicklung kann anhand der Lochzahl q bestimmt werden – für Ganzlochwicklungen ist q eine ganze Zahl, bei Bruchlochwicklungen eine Bruchzahl [50]. Die Bruchlochwicklung bietet die Möglichkeit einer Anpassung der Felderregerkurve an bestimmte Anforderungen, wobei jedoch geradzahlige Oberwellen entstehen [46], [50].

Die Einteilung in verteilte und konzentrierte Wicklungen erfolgt ebenfalls anhand der Lochzahl q . Ist $q \geq 1$, handelt es sich um eine verteilte Wicklung, für $q < 1$ liegt eine konzentrierte Wicklung

vor [13] (Abbildung 2.6). Somit kann eine Ganzlochwicklung nur als verteilte und eine Bruchlochwicklung sowohl als verteilte als auch als konzentrierte Wicklung ausgeführt werden [13].

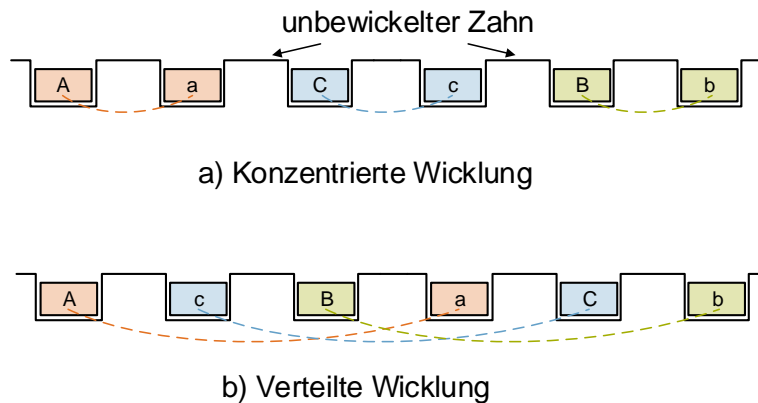


Abbildung 2.6: Aufbau einer a) konzentrierten und b) verteilten Wicklung [80].

Eine konzentrierte Wicklung bietet den Vorteil einer einfachen Fertigung und somit geringeren Kosten und die Gestaltung des Wickelkopfes fällt kompakt aus [82]. Allerdings ist diese Wicklungsart durch höhere Oberwellen des Luftspaltfeldes und somit entstehenden höheren Rotorverlusten und Drehmomentwelligkeit gekennzeichnet [50], [82]. In Traktionsmaschinen wird somit vor allem die verteilte Wicklungsart aufgrund ihrer geringeren Oberwellen, geringen Drehmomentwelligkeit und geringem Bauraum bevorzugt [77], [83]. Allerdings ist sie aufgrund ihrer erhöhten Magnetverluste bei einer PSM nur für niedrigere Drehzahlen mit hohen Wirkungsgraden einsetzbar. Eine verteilte Wicklung bietet trotz größerer Wickelkopflängen und den dadurch entstehenden höheren Kupferverlusten und geringeren Leistungsdichten, einen hohen Wirkungsgrad vor allem bei höheren Drehzahlen [77].

Um die Felderreggerkurve einem möglichst sinusförmigen Verlauf anzunähern, kann eine Zonung oder Sehnung vorgenommen werden (Abbildung 2.7).

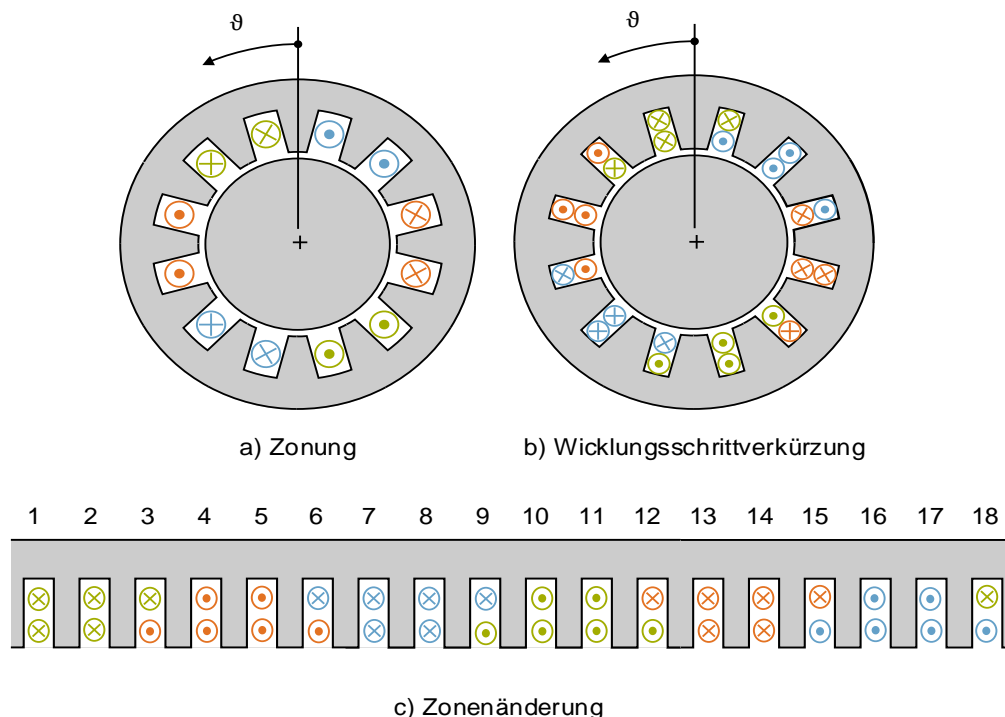


Abbildung 2.7: Sehnung anhand einer a) Zonung, b) Wicklungsschrittverkürzung und c) Zonenänderung [13], [84].

Die Zonung führt durch die Aufteilung einer Spule von einer Nut auf mehrere Nuten dazu, dass sich die Lochzahl q erhöht [41]. Je höher die Lochzahl q gewählt werden kann, desto mehr nähert sich die Durchflutungsverteilung einer Sinusform an, es gilt $q > 1$ [36]. Die Sehnung ermöglicht eine weitere Annäherung an eine ideale Sinusform zur Unterdrückung der Oberwellen und kann durch die Sehnung der Spulen mittels einer Zonenänderung oder Strangverschachtelung, bzw. Wicklungsschrittverkürzung oder -verlängerung erreicht werden [46], [85].

Der letzte Schritt in der Statorauslegung ist die Nutformgestaltung, sodass alle Leiter der Statorwicklung in der jeweiligen Nut untergebracht und die Zahn- und Rückeninduktionen optimiert werden können. Die Literatur nennt zwei Methodiken, eine Nutform zu bestimmen – mittels einer Grobabschätzung durch physikalische Grundlagen (beispielsweise nach MÜLLER [13]) oder über eine automatisierte Nutraumbilanz nach MEYER [32]. Für beide Methodiken muss zunächst der erforderliche Nutquerschnitt A_n und Leiterquerschnitt A_L nach Gleichung (2.11) berechnet werden [13].

$$A_n = \frac{z_n A_L}{\varphi_n} \quad \text{mit} \quad A_L = \frac{I_{Zw}}{S} = \frac{I_{Str}}{S a} \quad (2.11)$$

In der Grobabschätzung der Nutgeometrie nach MÜLLER [13] wird inkrementell zunächst die mittlere Nutbreite b_n , Nuthöhe h_n und Zahnbreite b_z bestimmt und daraus die Zahninduktion und Rückenhöhe h_r berechnet. Dieses Verfahren bietet wenig Optimierungs- und Anpassungsmöglichkeiten während der Auslegungsphase. In der automatisierten Nutraumbilanz nach MEYER [32] wird solange iterativ die Nutform entsprechend der optimalen Zahn- und Rückeninduktion vergrößert, bis der erforderliche Nutquerschnitt erreicht ist. Dafür muss zunächst die Nutform (beispielsweise Trapezform) sowie die dazugehörigen Geometriegrößen nach Abbildung 2.8 bestimmt werden. Die fertigungsbedingte minimale Nutteilung kann über den Bohrungsumfang des Statorinnendurchmessers anhand von Richtwerten je nach Größe der Maschine bestimmt werden [13], [46]. In der Praxis beträgt sie etwa 7 bis 70 mm [32].

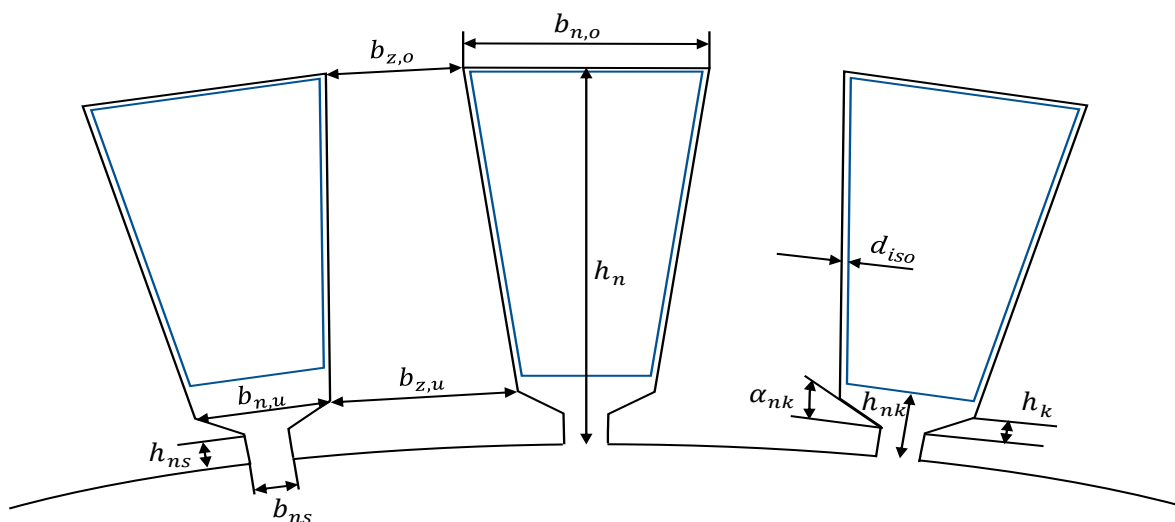


Abbildung 2.8: Übersicht der Parameter einer trapezförmigen Nutgeometrie [32].

Mit der Festlegung der notwendigen Geometrieparameter kann die automatisierte Nutformgenerierung nach Abbildung 2.9 durchgeführt werden. Diese beginnt mit der Festlegung einer Startnut in Trapezform [32].

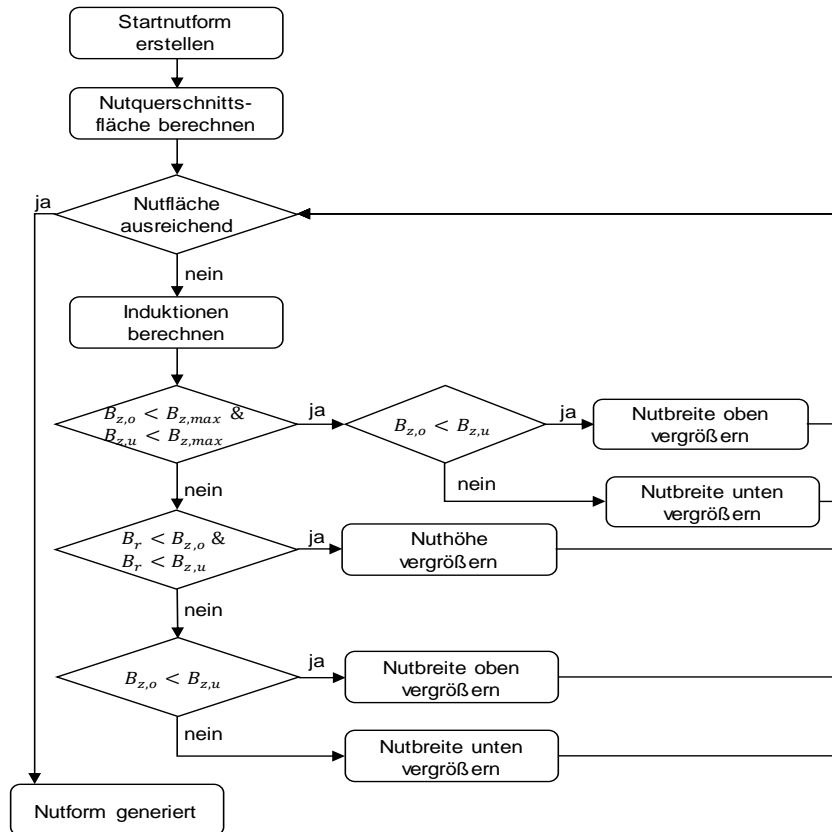


Abbildung 2.9: Flussplan der automatisierten Nutformgenerierung nach MEYER [32].

Dabei wird die Nut in jedem iterativen Schritt immer an der Stelle der geringsten Induktion vergrößert, wobei sie zunächst in die Breite (bis zur zulässigen Zahninduktion) und daraufhin in die Höhe inkrementiert werden [32]. Die Dicke der Nutsolierung wird dabei zu Beginn erfahrungsgemäß auf $d_{iso} = 0,3 \text{ mm}$ festgelegt [32].

Die Bestimmung der Nutform ermöglicht die Berechnung der ideellen Luftspatllänge δ_i unter Berücksichtigung der Nutung sowie des Carter-Faktors k_c , der den Einfluss der Nutung auf den geometrischen Luftspalt nach Gleichung (2.12) berücksichtigt.

$$\delta_i = k_c \delta_g \quad \text{mit} \quad k_c = \frac{\tau_n}{\tau_n - \gamma b_{ns}} \quad \text{und} \quad \gamma = \frac{1}{1 + 5 \frac{\delta_g}{b_{ns}}} \quad (2.12)$$

Nach einer Korrektur der Rückenlänge sowie des Statoraußendurchmessers ist der elektromagnetische Entwurf des Stators abgeschlossen [32].

Rotorentwurf

Der Rotorentwurf dient der Dimensionierung der Permanentmagnete, deren Anordnung sowie der Berücksichtigung von Magnetmaterialeigenschaften (PSM) bzw. verläuft analog zum Statorentwurf (ASM). Für die Auslegung einer PSM können in diesem Schritt durch eine spezifische Anordnung der PM beispielsweise die Verluste oder die Feldschwäche beeinflusst werden [86], [87], [88]. Dazu ist aufgrund der Nichtlinearitäten eine numerische Analyse mit Hilfe von computergestützten Finite-Elemente-Methoden (FEM) sinnvoll. Allerdings kann die Komplexität des Rotorentwurfs auf die grobe Dimensionierung und Anordnung der Magnete mittels analytischer Gleichungssysteme ebenfalls durchgeführt werden [49]. Dazu werden die Auslegungsgleichungen von IONEL [89] für die Dimensionierung der PM herangezogen, die auf Basis empirischer Faktoren mittels FEM ermittelt und anhand von Experimenten validiert wurden (Anhang A).

Die Magnetweite w_{PM} in Richtung der Magnetisierung sowie die Magnetdicke l_{PM} ergeben sich differenziert für eine SMPMSM und eine IPMSM aus dem Durchflutungs- und dem Induktionsgesetz nach Gleichung (2.13) [89].

$$w_{PM} = \begin{cases} \alpha_i \tau_p, & SPMSM \\ \frac{d_a - d_i}{2}, & IPMSM \end{cases} \quad \text{und} \quad l_{PM} = \frac{2 \mu_{mr} k_{so} k_c \delta_g}{\left(\frac{B_{r,PM}}{\hat{B}_\delta} - \left(\frac{\alpha_i}{k_\sigma} \frac{\pi D_i}{2 p k_b w_{PM}} \right) \right)} k_h \quad (2.13)$$

Mit der Auswahl einer Magnetanordnung und den dazugehörigen Materialeigenschaften (nach Anhang A) ist die Berechnung der Abmessungen der PM vollständig durchgeführt. Da bei hohen Drehzahlen große mechanische Belastungen durch Fliehkräfte auftreten, werden Magnete für solche Anwendungsfälle meist vergraben [77]. Das Magnetmaterial ist dabei vollständig von Elektroblech umgeben und die Streuflüsse steigen, weil sich ein Großteil der magnetischen Feldlinien bereits im Rotor schließen können (magnetischer Kurzschluss – trägt nicht zur Drehmomentbildung bei) [77]. Um diesem Effekt entgegen zu wirken, müssen die Magnete möglichst dünn ausgelegt werden, was bei einer Serienproduktion im Stanzvorgang der Bleche eine Herausforderung darstellt [77].

Mit der Magnetauswahl kann die synchrone Induktivität der Längs- bzw. Querachse sowie der Wicklungswiderstand bestimmt werden. Dafür wird die ungesättigte Hauptinduktivität L_h nach Gleichung (2.14) bestimmt [13].

$$L_h = \frac{m \mu_0}{2} \frac{2}{\delta_i \pi} \tau_p l_i \frac{4}{\pi} \frac{(w_{Str} \xi_{p(1)})^2}{2 p} \quad (2.14)$$

Eine weitere wichtige elektromagnetische Kenngröße ist die Streuinduktivität L_σ , die die Proportionalität zwischen der Streuflussverkettung und aufbauenden Strom in der Wicklung gemäß Gleichung (2.15) darstellt [13].

$$L_\sigma = L_{\sigma,nz} + L_{\sigma,w} + L_{\sigma,o} = 2 \mu_0 l_i \frac{w_{Str}^2}{p} \frac{\lambda_{nz}}{q} + 2 \mu_0 l_i \frac{w_{Str}^2}{p} \lambda_w + \sigma_o L_h \quad (2.15)$$

Die Leiterlänge des Wickelkopfs l_w ergibt sich gemäß Gleichung (2.16) aus der mittleren Windungslänge der Wicklungen l_m und der absoluten Statorlänge.

$$l_w = \frac{1}{2} (l_m - l) \quad \text{mit} \quad l_m = 2 \left[l + 1,3 \tau_p + \left(0,03 + 0,02 \frac{U_{Str}}{kV} \right) m \right] \quad (2.16)$$

Die Kenntnis der Hauptinduktivität und der Streuinduktivität führt zur Berechnung der synchronen Induktivität der Längs- und Querachse nach Gleichung (2.17) [13].

$$\begin{aligned} L_d &= L_{h,d} + L_\sigma \\ L_q &= L_{h,q} + L_\sigma \end{aligned} \quad \text{mit} \quad L_{h,d} = L_h \frac{\frac{\delta_i}{\delta_i + \frac{k_h l_{PM}}{2 \mu_{mr}}}}{k_{s,d}} \quad \text{und} \quad L_{h,q} = L_h \frac{\frac{\delta_i}{\delta_i + k_{h,q} \frac{l_{PM}}{\mu_{mr}}}}{k_{s,q}} \quad (2.17)$$

Der Widerstand eines Wicklungsstranges R_s kann daraufhin nach Gleichung (2.18) berechnet [13] und der Rotorentwurf für die PSM soweit abgeschlossen werden.

$$R_s = \frac{w_{Str} l_m}{a A_L} \rho \quad (2.18)$$

Bei der Ermittlung der Hauptabmessungen muss die Wahl der Richtwerte an die maschinenspezifischen Eigenschaften einer ASM oder PSM angepasst werden. Zudem muss bei der finalen Wicklungswahl berücksichtigt werden, dass bei einer ASM ein niedriger Streukoeffizient der Oberwellenstreuung aufgrund parasitärer Effekte höher bewertet werden muss, als bei einer vergleichbaren PSM [13].

Für den Rotorentwurf müssen beide Maschinentopologien differenziert behandelt werden. Die ASM weist im Rotor eine Wicklung auf, die bei einer Käfigläufermaschine aus Stäben und Kurzschlussringen besteht, bei einer PSM sind die PM zu dimensionieren und deren Anordnung am Rotor entsprechend zu bewerten. In Abbildung 2.10 ist die gängige Auswahl an Rotorvariationen für PSM dargestellt, die in der Maschinenauslegungsmethodik implementiert werden.

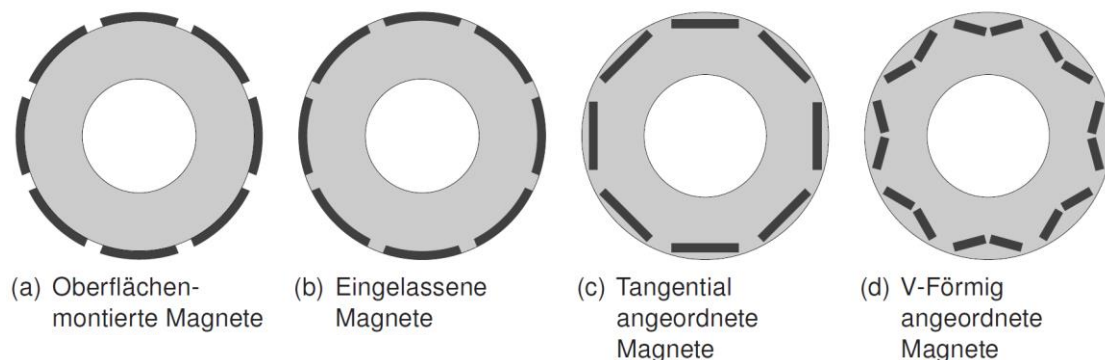


Abbildung 2.10: Übersicht gängiger Rotorvarianten für PSM [12].

In Bezug auf die Nachrechnung liegt der Fokus der PSM-Auslegung auf den Längs- und Querachseninduktivitäten und dem Statorwiderstand. Die ASM muss hinsichtlich der Gesamtinduktivitäten sowie des Stator- und Rotorwiderstands analysiert werden. Durch einen zusätzlichen Feinentwurf kann eine thermische Nachrechnung sichergestellt werden, sodass Betriebspunkte im Überlastbereich nicht zum thermischen Ausfall der Maschine führen [90].

2.2 Ansteuerung

Das Kennfeld elektrischer Maschinen kann mittels spezifischer Freiheitsgrade gemäß Abbildung 2.11 auf eine bestimmte Applikation angepasst werden. Die Auswirkungen weiterer Freiheitsgrade wie Rotorbauform, Wicklungsart, Windungszahl, Polpaarzahl und Rotorradius sowie Effekte verschiedener Optimierungsmaßnahmen wie die Variation der Zahnform, Wicklung bzw. Magnetanordnung bestimmen dabei unmittelbar die Auslegung der Maschine [77]. Eine Erhöhung der Polpaarzahl führt beispielsweise zu einem erhöhten Drehmoment (Faktor abhängig von Maschinentopologie [13]) und somit zu einer reduzierten Statorjochdicke (eine Erhöhung der Polpaarzahl führt zu einem kleineren Flussbeitrag pro Polpaar, wodurch das Statorjoch dünner ausgelegt werden kann [91]), wodurch Statornuten bzw. der Rotordurchmesser (siehe Anhang F.9) erhöht werden. Zudem führt eine höhere Polpaarzahl zu einer Verringerung der Wickelkopflänge und somit der Baulänge der Maschine, sodass zwar die Leistungsdichte erhöht werden kann, jedoch die Eisen- und Magnetverluste überproportional ansteigen [20]. Allerdings führt eine höhere Polpaarzahl gleichzeitig zu einer Abnahme der Magnetbreite, wodurch sich der relative Streuflussanteil und somit die Luftspaltinduktivität reduziert, woraus wiederum ein

reduziertes Drehmoment resultiert. Eine Erhöhung der Polpaarzahl ist ab einer bestimmten optimalen Grenze, die individuell durch die jeweilige Applikation bestimmt wird, somit nicht weiter sinnvoll [77].

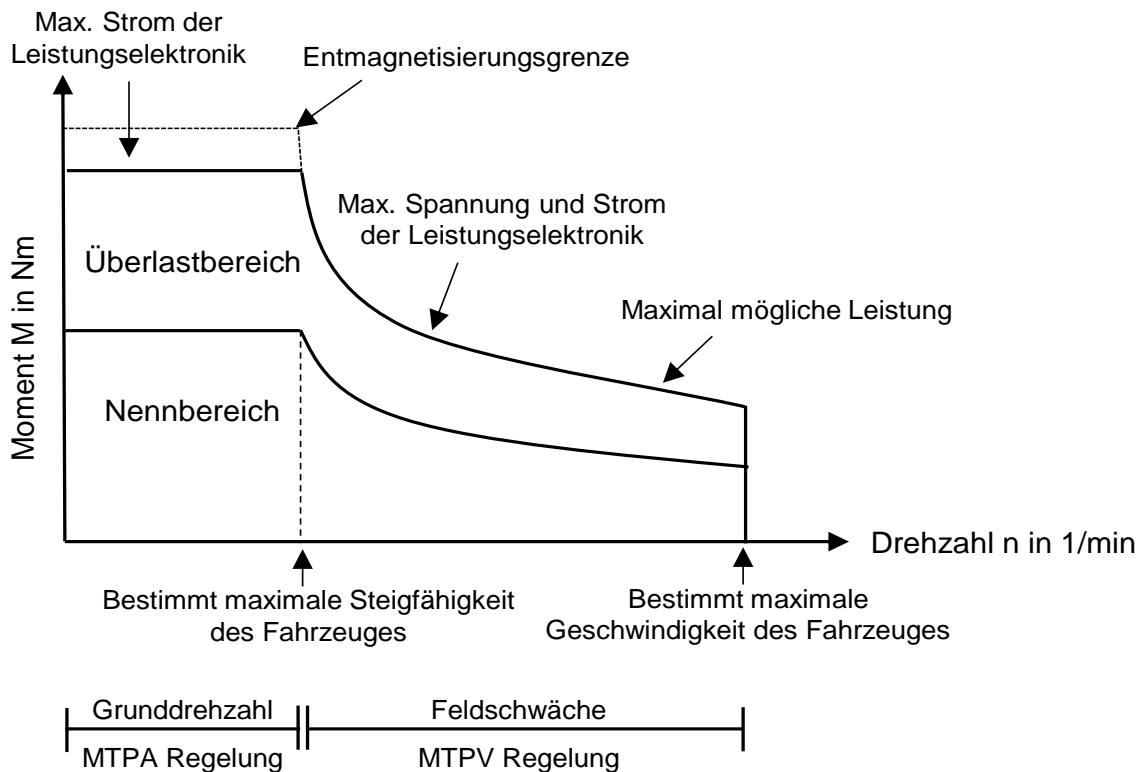


Abbildung 2.11: Beispielhafte Einflussfaktoren eines Kennfeldes [66].

Neben der Optimierung der Maschinengeometrie hat auch die Ansteuerung einen signifikanten Einfluss auf die Eigenschaften einer elektrischen Maschine [77]. Die Auswahl der Momentensteuerung ermöglicht die Berechnung der Spannungen und Ströme sowie deren Grenzwerte, die für einen bestimmten Betriebspunkt und zur Berechnung des maximalen Drehmoments benötigt werden. Dabei ist bei der ASM vor allem die Berechnung der Grenzwerte des Stators relevant, weil der Einfluss der Grenzen im Rotorkäfig unter Annahme eines kleinen Schlupfes vernachlässigt werden kann [92]. Bei niedrigen Drehzahlen im Grunddrehzahlbereich wird meist die Maximum Torque per Ampere Control (MTPA-Regelung) angewendet und unter Beachtung der Strombegrenzung, das Drehmoment mit minimalem Strom maximiert bzw. der Strom unter Vorgabe einer Momentenreferenz minimiert. Im Feldschwächebereich müssen die Spannungs- und Strombegrenzung beachtet werden und das Drehmoment unter diesen Nebenbedingungen maximiert werden. Sobald die maximale Spannung erreicht wird, kann die MTPA-Regelung bzw. die Constant Flux Control (CF-Regelung) nicht mehr verwendet werden [92]. Für höhere Drehzahlen muss beispielsweise das Feld der PM durch ein Gegenfeld, das durch die d-Komponente des Stroms erzeugt wird, geschwächt werden [42]. Im Feldschwächebereich findet somit die Maximum Ampere Control (MA-Regelung) und die Maximum Torque per Voltage Control (MTPV-Regelung) Anwendung. Die MTPV-Regelung kann als erweiterte MTPA-Regelung betrachtet werden, weil wie bei dieser das Drehmoment innerhalb der Grenzen maximiert wird [92].

Die resultierende Volllastkennlinie kann zur Beschreibung des maximalen Drehmoments pro Drehzahl unter Berücksichtigung der Grenzwerte für Strom und Spannung bestimmt werden. Für den Motorbetrieb werden dabei stets positive Werte für die d- und q-Komponente des Statorstroms vorausgesetzt, um ein positives Drehmoment zu erhalten. Bei der PSM hat die

Längskomponente des Stroms (i_d) keine Wirkung auf das Drehmoment und ihr Sollwert kann auf Null gesetzt werden. Somit bestimmt die Querkomponente maßgeblich das Drehmoment [38]. Durch Einsetzen der Drehzahlen von 0 - n_{max} kann für jede Drehzahl das Optimierungsproblem gelöst und das maximale Drehmoment pro Drehzahl berechnet werden. Es wird dann ein Gitter aus Betriebspunkten über den gültigen Betriebsbereich gelegt und anschließend für jeden Betriebspunkt des Gitters die Ströme und Spannungen berechnet [93].

2.3 Verlustverteilung und Thermik

Die thermische Auslegung elektrischer Maschinen wird durch die maximal zulässige Grenztemperatur bestimmt und ist vor allem hinsichtlich der Überlastfähigkeit, Alterung und Wartung von großer Bedeutung [32]. Dabei ist in Bezug auf eine PSM die Temperatur der Magnete zu berücksichtigen, weil diese zu einer irreversiblen Demagnetisierung und somit zu einer Zerstörung der Maschine führen kann. Um die thermischen Betriebsgrenzen einzuhalten, wird anhand von Messungen die Dauerleistung im Dauerbetrieb (S1) bestimmt, aber nicht überschritten. Im Kurzzeitbetrieb (S2) bzw. im Aussetzbetrieb (S3) wird die Maschine für einen bestimmten Zeitraum (30 Sekunden Kurzzeitbetrieb und 60 Sekunden Aussetzbetrieb) in Überlast betrieben. Für den Einsatz in dynamischen Anwendungen wie beispielsweise Fahrzeugen ist dabei vor allem die zeitliche Verteilung der Betriebspunkte sowie die Verluste pro Fläche, die zur Kühlung zur Verfügung stehen, relevant [77]. Dabei hat die Dauer und Höhe der maximal geforderten Dauerleistung einen proportionalen Einfluss auf die Baugröße, Masseträgheitsmomente und Fertigungskosten [32].

Elektrische Maschinen können bei gleichbleibender Leistung und steigender Drehzahl kleiner und kompakter ausgelegt werden, sofern die Verlustwärme über die reduzierte Fläche abgeführt werden kann und mit einem erhöhten Kühlbedarf kalkuliert wird. Allerdings muss hierbei berücksichtigt werden, dass erhöhte Drehzahlen zu überproportional ansteigenden Eisenverlusten führen und somit der Wirkungsgrad sinkt [14], [77]. Das Einsparpotential fällt dabei für ASM größer aus als für die PSM, allerdings weist die PSM in den in [14] gezeigten Simulationen insgesamt einen höheren Wirkungsgrad auf.

Die thermisch kritischen Maschinenkomponenten sind dabei die Statorwicklungsköpfe, die Demagnetisierungsfestigkeit der Magnete (bei PSM), die Stromführungsgrenze der Leiter, die Grenzen der Leistungselektronik sowie die eingesetzten Isolationsstoffe. Eine genaue Kenntnis dort vorherrschender Temperaturen muss bei der Auslegung und Überlastbetrachtung berücksichtigt werden, sodass einer Beschädigung der Maschine oder permanenten Entmagnetisierung der PM vorgebeugt werden kann [47]. Gemäß IEEE-Standard 101 [14] verdoppelt sich die erwartete Lebensdauer der Wicklungsisolierung für jede 10 °C Reduzierung der Betriebstemperatur [94].

Die in der Maschine auftretenden Verluste, können in elektrische (Kupferverluste bzw. Ohm'sche Verluste), magnetische bzw. Eisenverluste (Hystereseverluste, Wirbelstromverluste) und mechanische Verluste (Reibverluste) unterteilt werden [95]. Aufgrund der hohen auftretenden Drehzahlen in elektrischen Fahrzeugen und den dadurch resultierenden hohen Frequenzen, bilden Eisenverluste einen signifikanten Anteil an den Gesamtverlusten [20]. Die Leistungsbilanz einer Asynchronmaschine wird dabei beispielsweise gemäß Abbildung 2.12 aufgeteilt [96].

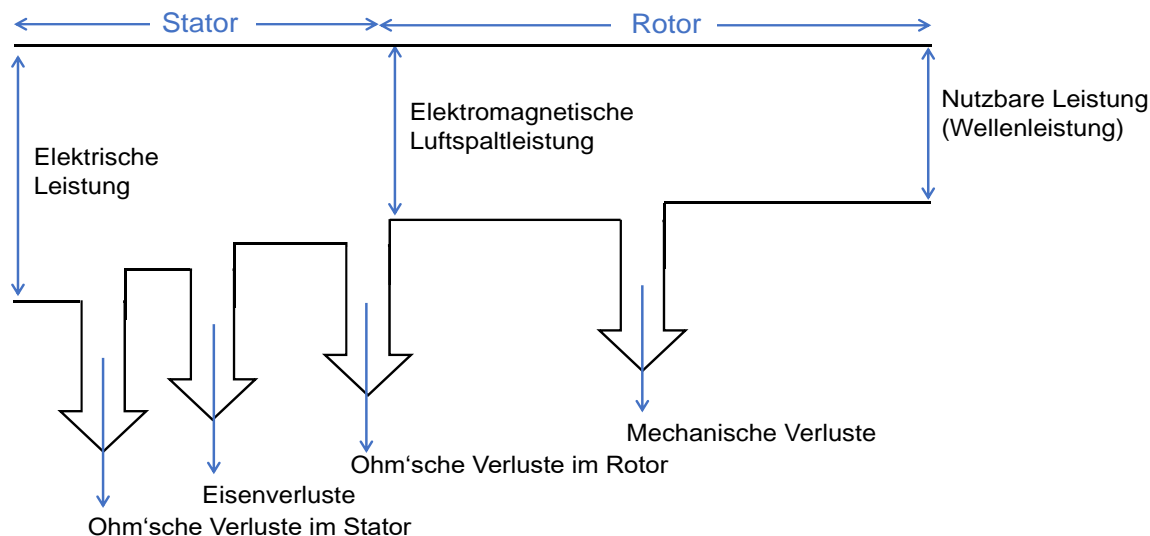


Abbildung 2.12: Beispielhafte Leistungsbilanz einer ASM [96].

Eine Verbesserung des Wirkungsgrades ist abhängig von Maschinentyp und dem jeweiligen Betriebsbereich. Bei niedrigen Drehzahlen überwiegen die Ohm'schen Verluste in den Kupferleitern. Der Wirkungsgrad bei hohen Drehzahlen wird vorwiegend durch die Eisenverluste bestimmt und kann durch Maßnahmen zur Reduzierung der magnetischen Permeabilität verbessert werden [77].

Für die genaue Berechnung der einzelnen Verlustanteile wird auf die Fachliteratur [13], [32], [46] sowie Veröffentlichungen des Autors [80], [97] verwiesen.

2.4 Anwendungsspezifische Maschinenauslegung

Im Bereich stationärer Industrieanwendungen elektrischer Maschinen stehen vor allem die Gesamtkosten des Betriebs (Total Cost of Ownership (TCO)) im Vordergrund und die Anforderungen an die Dimensionierung und das Gewicht spielen eine nebensächliche Rolle [1]. Zudem kann durch den Betrieb in einem spezifischen Nennpunkt bei stationärem Drehmoment und Drehzahl der Wirkungsgrad der Maschine auf einen Betriebspunkt optimiert werden.

Durch den Einsatz der elektrischen Maschine als Traktionsmaschine im Antriebsstrang von Fahrzeugen, entstehen zusätzliche Anforderungen und Ansprüche an die Auslegungsprozesse von Antriebsstrangkomponenten. Dabei rücken beispielhaft Eigenschaften wie Akustik, Gewicht, Dynamik, Kosten, Effizienz, Robustheit und Festigkeit, Bauraum (Package), Leistungsdichte, Entwicklungsdauer, Qualität und Nachhaltigkeit immer mehr in den Vordergrund für die Auslegung elektrischer Maschinen [1]. Diese fordert somit neue Entwicklungsansätze für Fahrzeuge, weg vom konventionellen Conversion Design und hin zum Purpose Design, wobei der spezifische Anwendungsfall und reale Fahrbetrieb berücksichtigt werden [1]. Der Anstieg der Anforderungen an die elektrische Maschine und ihre Auslegungsmethodik im Antriebsstrang führen zu der Entstehung eines Zielkonflikts vor allem zwischen Kosten, Dimensionierung und Effizienz (Abbildung 2.13) [20]. Wobei eine weitere Unterscheidung zwischen Kosten der Maschine und des Gesamtsystems sowie zwischen der Effizienz der Maschine und des gemittelten Gesamt-Systemwirkungsgrades während einer Fahrt getroffen werden muss [77].

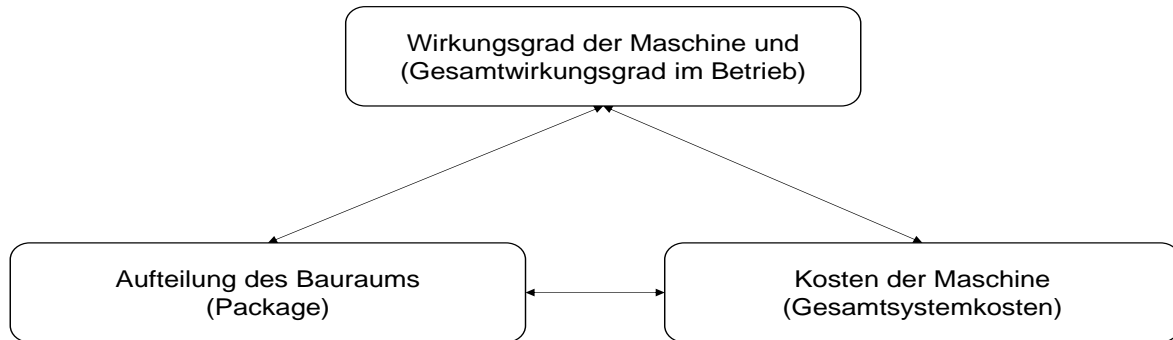


Abbildung 2.13: Auslegungsdreieck und Zielkonflikt der Auslegung elektrischer Maschinen nach [20].

Hinzu kommen zusätzliche Anforderungen auf Systemebene des Antriebsstrangs wie beispielsweise die verfügbare Spannung, der maximale Strom des Inverters sowie thermische und geometrische Beschränkungen des Fahrzeugkonzepts [98]. Beispielsweise muss das Gewicht eines Elektromotors stets mit dem Fahrzeug mitbeschleunigt werden, was zusätzlich Energie beansprucht und zu einer erhöhten notwendigen Batteriekapazität führt. Ein kompakter Elektromotor kann also unter bestimmten Randbedingungen eine bessere Gesamtenergiebilanz erzielen, als eine Referenzlösung, deren Elektromotor zwar einen hohen Wirkungsgrad aufweist, aber auch entsprechend groß und schwer ist [20].

Die Einschränkung des Bauraums im Fahrzeug im Vergleich zu einer stationären Anwendung kann dazu führen, dass das optimale Verhältnis zwischen Länge und Durchmesser sowie das Verhältnis zwischen Bohrungs- und Außendurchmesser der Maschine nicht frei wählbar ist [20]. Die Verlängerung des Stator- bzw. Rotorbleches ist dabei linear zu der umsetzbaren Leistung der Maschine bei gleichbleibendem Durchmesser und Kühlungsbedingungen [1]. Die maximale Fahrzeuggeschwindigkeit hängt maßgeblich von der Getriebekonstruktion und -übersetzung ab, welche die Bauräumteilung zwischen Getriebe und Maschine festlegt [20]. Da die maximale Fahrzeuggeschwindigkeit meist zu Beginn der Antriebsstrangauslegung festliegt, muss ein Kompromiss zwischen möglicher Leistungsdichte und vorhandenem Bauraum erfolgen.

Direkte Aussagen von Original Equipment Manufacturers (OEM) zu Schwerpunkten in Auslegungsprozessen sind nicht öffentlich einsehbar. Es gibt jedoch vereinzelte Angaben, die Rückschluss auf mögliche Schwerpunkte setzen, wie beispielsweise durch die BMW AG und Nissan Automobil AG:

BMW: „Die elektrischen Maschinen der BMW Group sind im Vergleich zu anderen E-Traktionsanwendungen hinsichtlich Dauerleistung- und Dauerdrehmomentdichte optimiert. Eine hohe Dauerleistung wird mit geringstmöglichem Einsatz von Gewicht erreicht und eine hohe Dauerdrehmomentdichte mit möglichst geringem Anspruch an den volumetrischen Bauraum.“ [1]

Nissan: “In developing components for EVs we pursue compactness, light weight and high efficiency.” [99]

Eine solche Optimierung führt in der Konstruktion zu Kompromissen zwischen mehreren konkurrierenden Zielgrößen. Für solche Problemstellungen gibt es eine Vielzahl an Mehrziel-Optimierungstechniken, die bereits in der frühen Auslegungsphase eingesetzt werden können [100]. Etablierte Techniken hierfür sind beispielsweise genetische Algorithmen (GA) [101], [102], Particle-Swarm Optimierung [16] und Monte-Carlo Simulation [103], [104].

Optimierungsalgorithmen beschäftigen sich als Teilgebiet der angewandten Mathematik mit der Bestimmung optimaler Parameter eines komplexen Systems. Ein Optimierungsproblem mit

gleichzeitig mehreren in Konflikt stehenden Zielgrößen, wird multikriterielles Problem bzw. Pareto-Optimierung (Trade-Off optimaler Lösungsraum) genannt [105]. Aufgrund der Vielzahl an Lösungen, werden diese Problemstellungen meist mit evolutionären bzw. genetischen Algorithmen gelöst, deren Funktionsweise evolutionären Prozessen in der Natur nachempfunden wird [105], [106].

Der Vorteil dieser Algorithmen liegt in der Generierung von Pareto-Fronten, die den Lösungsraum der konkurrierenden Designvariablen n_{var} aufdecken und somit eine Auswahl geeigneter und gleichwertig „optimaler“ Maschinendesigns für eine bestimmte Applikation unter gegebenen Rahmenbedingungen ermöglicht [100]. Ein endgültiger Pareto-optimaler Entwurf hängt dann von der individuellen Auswahl der Gewichtungen eines Konstrukteurs ab. Der Fokus liegt dementsprechend darin, eine sorgfältige Auswahl der konkurrierenden Zielgrößen sowie Randbedingungen durchzuführen, weil sie den möglichen Pareto-Lösungsraum maßgeblich definieren [100].

Im Rahmen derzeitiger Mehrzieloptimierungsalgorithmen hat sich vor allem der evolutionäre Algorithmus Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA II) durchgesetzt. Er bietet den Vorteil bei einer verringerten Rechendauer, jede Zielgröße gleichzeitig zu optimieren, ohne durch eine vorgegebene oder vorangegangene Lösung dominiert zu werden [107].

2.4.1 Dynamische Anforderungen von Traktionsmaschinen

Die Anforderungen der dynamischen Anwendung im Automobilbereich unterscheiden sich deutlich von den stationären Anforderungen. Dementsprechend sind an den wesentlichen Komponenten wie der elektrischen Maschine, der Batterie, dem Getriebe und der Leistungselektronik, Entwicklungs- und Optimierungsarbeiten notwendig, um deren Potenzial auf das Niveau heutiger verbrennungsmotorischer Fahrzeuge abzustimmen [1].

Elektrische Maschinen sind je nach ihrer Bauart für eine kurze Zeit überlastbar (ASM um ca. Faktor 2 - 5, PSM ca. Faktor 1 - 2 [14]) und ermöglichen somit, das geforderte Drehmoment für Beschleunigungs- und Überholvorgänge sowie für kurze Strecken hoher Steigung zur Verfügung zu stellen [108]. Dabei gilt die Annahme, dass ein Antrieb im Bereich niedriger Drehzahlen ($< n_{\text{Eck}}$) kurzzeitig überlastet werden kann, um das geforderte Drehmoment zu erreichen [14]. Im Bereich hoher Drehzahlen ($> n_{\text{Eck}}$) ist eine solche Drehmomentsteigerung mittels einer kurzzeitigen Überlastung aufgrund der Kippmomentbegrenzung nicht gleichermaßen möglich [90]. Dabei wird der Kurzzeitbetrieb (S2-Betrieb) bei ca. 1/4 der Belastungsdauer des jeweiligen Dauerbetriebs mit konstanter Belastung definiert [109]. Die maximal mögliche Überlast wird durch den maximalen Strom (thermische Begrenzung durch Gefahr der Entmagnetisierung der Magnete) bzw. der Wärmekapazität der Maschine bestimmt. Dabei gilt, je kleiner die Dimensionierung der Maschine, desto schneller führt es zu einer Überhitzung bzw. zu einem thermischen Versagen. Ist die Maschine zu groß dimensioniert, entstehen Nachteilen für Package und Gewicht [110]. Es muss stets ein Kompromiss zwischen der thermischen Belastung der Maschine, der Dimensionierung sowie der Maschinenalterung und dem Verschleiß gefunden werden.

In Bezug auf die Bereiche hohen Wirkungsgrades wird ein möglichst großer Feldschwächebereich für die Anwendung elektrischer Maschinen als Traktionsantrieb bevorzugt, damit möglichst lange mit konstanter Leistung beschleunigt werden kann [111]. Bei einem Verhältnis zwischen Eckdrehzahl und Maximaldrehzahl von 1/3 kann es beispielsweise bei Überlandfahrten zu einem Mehrverbrauch von 24 % kommen im Vergleich zu einer Ausführung ohne Feldschwächebereich [77].

Die Betriebspunktverteilung hängt von den Eigenschaften des Fahrzeuges ab, wie beispielsweise der Fahrzeugmasse und dem notwendigen Beschleunigungsverhalten. Das Gesamtgewicht des Fahrzeuges bestimmt bei gleichbleibender Fahrdynamik das notwendige Drehmoment, d.h. ein höheres Fahrzeuggewicht führt zu einem höheren Drehmoment [77]. Zudem sorgt ein Fahrverhalten mit erhöhtem Beschleunigungsverhalten ebenfalls für ein höheres notwendiges Drehmoment im Vergleich zu einer gemäßigten Fahrweise. Der mögliche Steigungswinkel des Fahrzeuges muss zudem definiert werden, um das Anfahren und eine Konstantfahrt in bestimmten Geschwindigkeitsbereichen zu ermöglichen [77].

Der Gesamtenergieverbrauch der Traktionsmaschine hängt dabei direkt von der Häufigkeitsverteilung der Betriebspunkte im Effizienzkennfeld ab [77]. Typische Fahrprofile für Stadtfahrten weisen Charakteristiken niedriger Maximalgeschwindigkeiten und einer Vielzahl an Brems- und Beschleunigungsvorgängen auf [112]. Die Betriebspunkte befinden sich dabei hauptsächlich bei geringen Drehzahlen im gesamten Drehmomentbereich (Abbildung 2.14) [112]. Für diesen Anwendungsfall eignet sich vor allem der Einsatz von PSM, weil in diesem Bereich des Kennfeldes der Wirkungsgrad maximal wird. Wird hingegen ein Fahrprofil mit höheren Geschwindigkeiten betrachtet, wie beispielsweise Autobahnfahrten, verschieben sich die Betriebspunkte hin zu höheren maximalen Drehzahlen und werden somit in die Bereiche hoher Effizienz der ASM verlagert. Der erforderliche Drehzahl- und Drehmomentbereich wird dabei durch die vorgegebene Maximaldrehzahl der Applikation festgelegt [77].

In der folgenden Abbildung 2.14 ist eine Verteilung der typischen Betriebspunkte für eine klassische Stadt-, Überland- sowie Autobahnfahrt abgebildet [77]. Der Nennbereich des Kennfeldes wird dabei vor allem aus der Kühlfähigkeit bestimmt, die notwendig ist, um für jeden angestrebten Betriebspunkt die anfallenden Verluste äquivalent abführen zu können [13]. Dies bedeutet vor allem, dass der Wicklungsstrom einer kühlen Maschine deutlich höher ausfallen kann, als im bereits erwärmten Zustand [14].

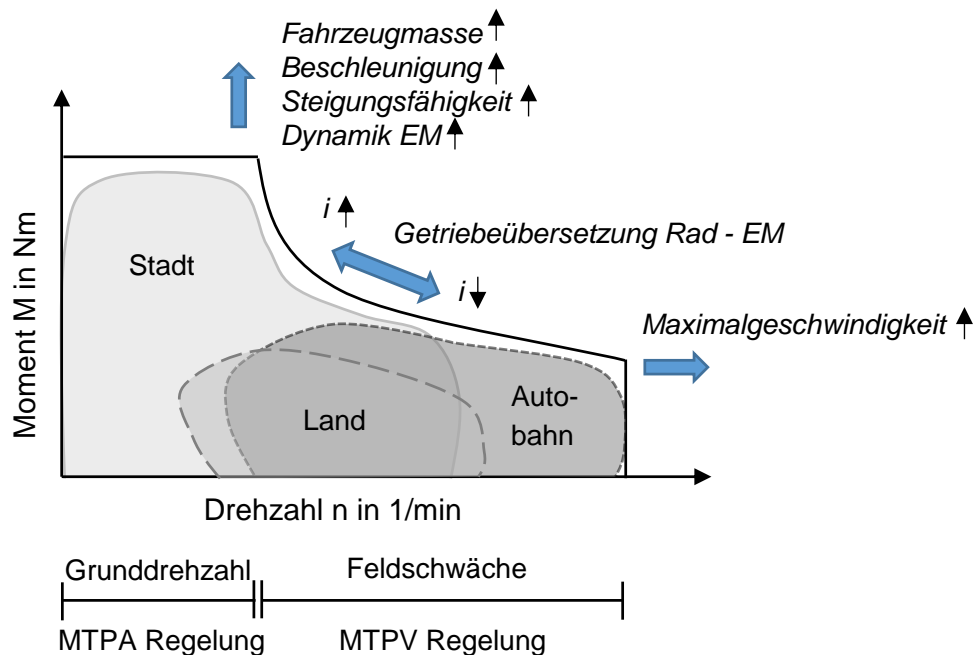


Abbildung 2.14: Verteilung der Betriebspunkte für verschiedene Fahrzustände [77].

Das typische Drehzahlband elektrischer Maschinen von ca. 0 – 20 000 1/min sorgt dafür, dass die Antriebsstrangtopologie mittels eines Eingangsgtriebes, Geschwindigkeiten von bis zu

200 km/h ermöglicht [1]. Ein Review vorhandener Fahrzeugmodelle auf dem Markt von GRUNDITZ [19] führt zu der Annahme, dass elektrische Maschinen meist mit einer Maximaldrehzahl zwischen 9 500 – 16 000 1/min eingesetzt werden. Es wird ein Verhältnis zwischen Nenn- und Maximaldrehzahl zwischen 1,75 - 4,4 gewählt [19]. Dies führt zu Leistungsdichten von 135 - 410 W/kg für Sportfahrzeuge, 37 - 105 W/kg für Mittelklasse Fahrzeuge und 27 - 80 W/kg für Kleinfahrzeuge [19].

Durch den vergrößerten Betriebsbereich im Vergleich zur stationären Anwendung, kann eine elektrische Traktionsmaschine nicht auf einen Betriebspunkt mit Dauerbetrieb ausgelegt werden, ohne diesen thermisch zu überlasten. Es ist vielmehr die zeitliche Abfolge der Belastung durch die aufeinanderfolgenden Betriebspunkte relevant, damit die Erwärmung bzw. Kühlung der Maschine während des Betriebs gewährleistet werden kann und es nicht zu vorzeitigen Alterungseffekten kommt [90]. Hierbei spielen vor allem zusätzliche Anforderungen an die Traktionsmaschine wie beispielsweise das notwendige Drehmoment bzw. die maximale Geschwindigkeit und Steigfähigkeit eine wesentliche Rolle [90].

2.4.2 Nutzerverhalten und Fahrzyklen

Eine Möglichkeit, das Nutzerverhalten über die Lebensdauer eines Fahrzeuges in komprimierter Form darzustellen sind Fahrzyklen [113]. Diese meist Geschwindigkeits-Zeit-Verläufe spielen eine wichtige Rolle im Entwicklungsprozess von Fahrzeugen, um das Verhalten eines Fahrzeuges zu simulieren und so einen Einblick im realen Betrieb zu ermöglichen [113]. Sie können aus realen Fahrdaten und spezifischen Anwendungsfällen bzw. Anforderungen generiert werden und umfassen meist eine Dauer von wenigen Minuten (Japan 15 Mode) bis zu 30 Minuten (WLTP) [114]. Der derzeit wichtigste Vertreter zur Repräsentierung des weltweiten Fahrverhaltens ist der WLTP. Der WLTP basiert auf ca. 765.000 km realer Fahrdaten unterschiedlicher Fahrzeuge, Straßenverhältnisse und Verkehrsbedingungen aus verschiedenen Ländern wie beispielsweise Europa, Japan, Korea und Indien [115].

Die Erstellung eines Fahrzyklus‘ erfolgt zunächst durch eine Unterteilung in verschiedene Fahrtabschnitte anhand typischer Merkmale. So weist die Einteilung verschiedener Fahrzeugklassen, wie beispielsweise Kleinfahrzeuge, Oberklasse oder Nutzfahrzeuge (Anhang C.6), sowie Fahrmuster und Streckenart wie zum Beispiel Stadt-, Überland- und Autobahnverkehr unterschiedliche Mobilitätsverhalten auf und führen zu unterschiedlichen Anforderungen an den Antriebsstrang [77].

Zur Charakterisierung in Stadt-, Überland- bzw. Autobahnanteil kann das Geschwindigkeits- sowie Beschleunigungsprofil und die Leerlaufdauer nach ANDRÉ [116] herangezogen werden. Die Fahrbedingungen erstrecken sich dabei von dichtem Stadtverkehr über Landstraßen mit gleichmäßiger Fahrgeschwindigkeit bis hin zu Autobahnfahrten, die kaum einen Stoppanteil aufweisen [116]. Die folgenden Eigenschaften stellen Stellhebel zur realistischen Darstellung des Fahrverhaltens mittels Fahrzyklen dar [77]: gefahrene bzw. maximale Geschwindigkeiten, angeforderte Beschleunigungen, Gesamtdauer bzw. Streckenlänge, Standdauer und Distanz zwischen zwei Anhaltspunkten, Fahrmuster abhängig von der Geschwindigkeit sowie eine Unterscheidung zwischen der Art der Nutzung (zum Beispiel Taxi oder Privatpersonen).

Hierbei charakterisiert beispielsweise die maximale Geschwindigkeit die Verkehrssituation. Je höher die maximale Geschwindigkeit, desto wahrscheinlicher ist eine Verkehrssituation bei freier Fahrt bzw. auf der Autobahn. Eine niedrigere Durchschnittsgeschwindigkeit sowie eine hohe Standzeit weisen auf zähfließenden Verkehr hin. Der kontinuierliche Energieverbrauch durch

Klimaanlage bzw. Heizung (Reichweitenreduzierung bis zu 40 % möglich [26], [27]), Beleuchtung oder Radio sind unabhängig von der Fahrsituation; es ergibt sich ein konstanter Energieverbrauch pro Fahrt [116].

Es gibt verschiedene Methodiken, einen Fahrzyklus anhand realer Fahrdaten zu erstellen, wobei die gebräuchlichsten Methoden die Verwendung von Mikrotrips, Beschleunigungs-Geschwindigkeitsmatrizen (AV-Matrix), Clustern oder Markov-Ketten sind [117]. Für die genaue Modellierung der stochastischen Prozesse wird auf die jeweilige Fachliteratur verwiesen [116], [117], [118], [119].

Weil Rohdaten meist in unterschiedlich langen Fahrabschnitten von wenigen Minuten bis zu mehreren Stunden vorliegen, können diese nicht direkt für die Erstellung eines Fahrzyklus verwendet werden. Daher müssen diese zunächst in kurze Geschwindigkeits-Zeit-Sequenzen von zwei aufeinander folgenden Stopps (Geschwindigkeit $v = 0$), sogenannten Mikrotrips, unterteilt werden [117]. Diese Methode, bei der Anfangs- und Endpunkt eine Geschwindigkeit von Null aufweisen, findet in der Praxis Anwendung und wurde erstmals von AUSTIN [119] vorgestellt. Die einzelnen Mikrotrips werden daraufhin zufällig zusammengefügt [120]. Wird diese Methode zur Unterteilung von Autobahnfahrten bzw. Fahrten mit fließendem Verkehr herangezogen, kann es dazu führen, dass die Dauer nicht im Bereich der vorgegebenen Zykluslänge liegt. SHUMING et al. [117] haben daher einen Mikrotrip mit einer maximalen Dauer von 300 Sekunden festgelegt, bei dem die Beschleunigung am Anfang und am Ende gleich Null ist. Grundsätzlich ist eine Konstruktion mit Mikrotrips bei Fahrten mit einer Vielzahl an Haltepunkten pro Minute geeignet, weil hier eine Vielzahl an Mikrotrips kombiniert wird. Eine Einschränkung dieser Methode besteht darin, dass es nicht möglich ist, einen einzigen Mikrotrip nach verschiedenen Arten von Fahrbedingungen bzw. -verhalten zu klassifizieren [114].

Eine AV-Matrix ist eine Methode zur Kategorisierung des Fahrverhaltens. In der AV-Matrix sind Beschleunigungs- und Geschwindigkeitswerte einer Fahrsequenz über eine Frequenz verknüpft. Die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsachse ist in gleiche Intervalle unterteilt, so dass jeder einzelne Punkt einer Fahrsituation in der Matrix eindeutig zugeordnet werden kann [116].

Bei clusteranalytischen Methoden werden die Datensätze zu homogenen Gruppen, sogenannten Clustern, zusammengefasst, die alle ein Clusterzentrum, auch als Schwerpunkt bezeichnet, besitzen [118]. Die k-means-Cluster-Methode ist eine Partitionierungsmethode, bei welcher der Datensatz zunächst in eine bestimmte Anzahl von Clustern unterteilt wird. Jeder Datenpunkt wird dann dem ihm am nächsten liegenden Zentrum zugeordnet. Nach dieser Zuordnung werden die Zentren unter Verwendung der aktuellen Cluster neu berechnet und die Datenpunkte den nächstgelegenen Zentren neu zugeordnet. Dieser Algorithmus wird wiederholt, bis die Zentren kaum oder nicht mehr unterscheidbar sind [121].

Markov-Ketten modellieren zufällige Vorgänge, bei denen die Zustandsübergänge mit vorgegebenen Wahrscheinlichkeiten unabhängig von der Vorgeschichte stattfinden [122]. Dabei wird in jedem Schritt des stochastischen Prozesses, der zukünftige Zustand durch die Kenntnis einer festgelegten Anzahl an vorheriger Zustände bestimmt (Anhang C.8). Es handelt sich um eine Markov-Kette 1. Ordnung, wenn der nächste Zustand nur von dem aktuellen Zustand abhängt. Eine Markov-Kette 2. Ordnung berücksichtigt zur Auswahl des nächsten Zustandes die letzten zwei Zustände [122]. Die Erzeugung von Markov-Ketten höherer Ordnung sind möglich, bringen jedoch einen erhöhten Rechenaufwand mit sich [123]. Zur Verkettung der Segmente muss gewährleistet werden, dass identische Geschwindigkeiten an den Verknüpfungspunkten herrschen. Es werden zur Erstellung von Fahrzyklen basierend auf realen Fahrdaten meist die Methodik der Markov-Ketten und Mikrotrips eingesetzt [124], [125].

2.5 Kritik am Stand der Wissenschaft und Technik

Zwar existieren bereits eine Vielzahl von Veröffentlichungen zu Grundlagen der Maschinenauslegung, allerdings greifen diese lediglich auf einzelne isolierte Teilbereiche des untersuchten Zielkonflikts zwischen *Zykluseffizienz*, *Package* und *Kosten* zurück.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Methodik erarbeitet, die eine Zykluskonstruktion auf Basis realer Fahrdatensätze fahrzeugspezifisch ermöglicht. Gezielte Eingriffe in die Zykluskonstruktion sollen die Möglichkeit schaffen, mithilfe einer gesammelten Datenbasis Fahrzyklen unter Berücksichtigung der individuellen Fahreigenschaften zu generieren. Es sollen hierbei gezielt Betriebspunkte durch einen Fahrzyklus abgebildet werden, die für die Dimensionierung des Antriebsstranges relevant sind.

Das hauptsächliche Forschungsfeld dieser Arbeit stellt der Auslegungsprozess elektrischer Maschinen dar. Heutzutage werden elektrische Maschinen meist nicht speziell für neue Anwendungen entwickelt, weil dieser Prozess zeit- und kostenintensiv ist und zur verbesserten Wirtschaftlichkeit auf bereits bestehende Produktionsinfrastruktur und Fertigungsmaschinen zurückgegriffen wird [13], [126]. Stattdessen werden bestehende Konzepte übernommen und an neue Anwendungen angepasst. Daraus ergibt sich eine Reihe von vordefinierten Maschinenkonstruktionen, zum Beispiel Wicklungstypen, die mit geringfügigen Modifikationen an eine bestimmte Anwendung angepasst werden. Die tatsächlichen Anforderungen und Betriebspunkte einer bestimmten Anwendung werden nicht berücksichtigt [13], [126].

Bei der konventionellen Auslegung wird dabei auf Methodiken der Maschinenauslegung von stationären Anwendungen gesetzt [16]. Diese beruhen meist auf einem starren Auslegungsprozess, wenig iterativen Überprüfungen sowie auf Literaturangaben und Expertenwissen. Dies führt in Anwendungen mit dynamischen Betriebspunkten meist zu hohen Sicherheitsmargen, zur industrietypischen Überdimensionierung der Maschine sowie die daraus folgende Reduzierung der Leistung und des Wirkungsgrades im Betrieb sowie erhöhten Kosten [16], [100].

Zudem wird bei der energetischen und topologischen Berechnung mit Hilfe von Optimierungstools in der Regel die Anzahl elektrischer Maschinen in einem Antriebsstrang freigestellt. Als Resultat werden meist zwei Motoren gewählt, um einen minimalen Energieverbrauch zu erzielen [127]. Der eine Motor wird im Rahmen einer solchen Konfiguration zur Abdeckung der Grundlast eingesetzt, der andere um die zeitlich begrenzten Beschleunigungsphasen mit hohem zusätzlichem Drehmomentbedarf zu ermöglichen. Dabei wird simulativ die kleinste Energiemenge im Gesamtsystem verbraucht, weil beide Maschinen für einen bestimmten Effizienzbereich in Kombination mit deren Last ausgelegt werden können [14]. Allerdings werden bei dieser Auslegungsmethode keine Kosten- und Bauraumoptimierungen berücksichtigt [128].

Der Stand der Wissenschaft und Technik zur auslegungsspezifischen Maschinenauslegung ist in Tabelle 2.1 dargestellt. Konventionelle Methoden zur Bestimmung der Statorauslegung von elektrischen Maschinen nutzen Literatur als auch Erfahrungswerte oder Expertenwissen von Konstrukteuren und folgen einer festen sequentiellen Abfolge von Konstruktionsschritten [16], [30]. Aufgrund des sequentiellen Ansatzes wird der Lösungsraum der möglichen Parameterkombinationen in jedem Schritt des Entwurfsprozesses reduziert. Durch die frühzeitige Reduktion des Lösungsraumes wird ein lokales Optimum definiert und die Maschinenauslegung, die ein mögliches globales Optimum darstellt, möglicherweise vorzeitig aus dem Lösungsraum eliminiert.

Die meisten Methoden konzentrieren sich dabei zudem nur auf einen einzigen Wicklungstyp [48], [49] oder können nicht auf neue Wicklungskonfigurationen angewendet werden. Diverse Forschungsarbeiten [14], [48], [129], [130] analysieren den Einfluss von Statorwicklungen, wobei der Schwerpunkt auf den Oberwellen, verschiedenen Wicklungskonfigurationen oder der Optimierung eines einzelnen Wicklungstyps für ein bestimmtes Optimierungsziel liegt.

Tabelle 2.1: Übersicht der Literatur zum Stand der Wissenschaft und Technik.

	EM-Auslegung nach Fahrzyklen	EM-Auslegung nach Fahrdaten	Grundlagen elektrischer Maschinen	Open-Source: Datenbank oder Auslegungstool	Auslegung durch Mehrzieloptimierung
[13], [32], [46]					
[68], [75], [76]					
[110], [131]					
[19]					
[16], [121], [132]					
[77], [129], [133]					
[31], [134], [135]					
[14], [130], [127]					
[136], [137]					
[90], [112], [138]					
Eigene Veröffentlichungen	[139]	[140], [141]	[80], [126]	[97], [30]	[142], [143]
	Nicht betrachtet	Erster Ansatz	...	Ausführlich betrachtet	Sehr ausführlich

Für die elektrische Kennfeldermittlung in Bezug auf das Überlastpotential besteht bereits ein erster Ansatz durch vorangegangene Dissertation am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der TU München [13], [130], [127]. Diese haben aufgrund der mangelnden Validierung sowie Plausibilisierung eine Abweichung von etwa 10 - 15 % im Effizienzbereich und können daher nicht für eine präzise Kennfeldermittlung eingesetzt werden. Die physikalischen Grundlagen des Modells sollen im Laufe dieser Arbeit jedoch als Basis genommen und optimiert werden.

Die automatisierte Nutformgenerierung nach MEYER [32] mittels einer Nutraumbilanz ermöglicht eine iterative Bestimmung der Nutform, ist aber durch eine feste Eingabe zu Beginn des Auslegungsprozesses begrenzt, weil sie nur für bereits definierte Wicklungsarten und Wicklungsparameter anwendbar ist.

Ein detaillierter und realistischer elektrischer Maschinenentwurf bzw. dessen Validierung kann zudem nur realisiert werden, wenn möglichst viele Maschinenparameter genau bekannt sind. Da bestehende elektrische Maschinen Geheimhaltungsvereinbarungen der Hersteller unterliegen, sind Maschinendatenblätter meist unvollständig, was eine genaue Simulation und Validierung erschwert [98]. Die wesentlichen Nachteile der vorgestellten Methoden sind die eingeschränkten Eingabeparameter, eine fehlende Validierung, eine lokale Optimierung und die vernachlässigte Berücksichtigung aller physikalisch möglichen Parameterkombinationen im Gesamtentwurfsprozess.

Im Rahmen dieser Arbeit wird daher ein neuartiges Entwurfsmodell für elektrische Maschinen vorgestellt, um den konventionellen sequenziellen Entwurf aufzulösen und eine ganzheitliche Betrachtung aller Maschinenparameterkombinationen zu ermöglichen. Ziel ist es, bekannte Literaturwerte und Verfahren mit einem neuen Stator- und Wicklungsentwurf sowie einer interaktiven Schnittstelle zu integrieren und optimieren, um den Anwender in die Lage zu versetzen, mit wenigen Eingabeparametern eine elektrische Maschine und die entsprechenden Wirkungsgraddiagramme automatisiert auszulegen [30]. Dabei soll vor allem eine optimierte simulative Auslegungsmethodik elektrischer Maschinen entwickelt und folgende Forschungsfrage beantwortet werden:

Kann durch eine Automatisierung und Optimierung der konventionellen Auslegungsmethodik die elektrische Maschine in Bezug auf die Zielgrößen Effizienz, Package und Kosten optimiert werden?

Die zweite Säule dieser Arbeit umfasst den Einsatz einer Mehrzieloptimierung zur holistischen Auslegung elektrischer Maschinen für dynamische Anwendungen. Konventionelle Auslegungsmethodiken analysieren meist einen einzelnen Aspekt des in Kapitel 2.3 vorgestellten Auslegungsdreiecks. Dabei wird jedoch nicht berücksichtigt, dass eine minimale Änderung einer der drei Zielgrößen, *Effizienz*, *Kosten* und *Package*, zu einer überproportionalen Änderung der anderen Zielgrößen führen kann [137]. Dafür soll folgende Forschungsfrage im weiteren Verlauf der Arbeit untersucht werden:

Wie sieht das reale Nutzerverhalten eines spezifischen Anwendungsfalls aus und welchen Einfluss haben diese realen, dynamischen Anforderungen auf die drei Zielgrößen?

Eine weitere Herausforderung besteht in der realitätsgetreuen Abbildung des Kundenverhaltens in verschiedenen Fahrbedingungen [144], weil standardisierte Fahrzyklen an ihre Grenzen stoßen, wenn es darum geht, eine Vielzahl von Fahrzeugklassen und Fahrverhalten realistisch darzustellen [145], [146]. So können sie zwar eine erste Einschätzung liefern, spiegeln aber in der Regel nur bedingt den Fahralltag wider und sind daher für eine realitätsnahe Auslegung nicht signifikant anwendbar [14].

Vom Gesetzgeber festgelegte Zyklen wie den WLTP zur Typgenehmigung, Verbrauchs- und Emissionsbestimmung werden von Fachleuten hinsichtlich ihrer Realitätsnähe kritisch beurteilt [147]. Diese können zur Auslegung und Dimensionierung von Antriebstrangkomponenten nicht direkt eingesetzt werden. Selbst für den gesetzesmäßigen Anwendungsfall der Verbrauchs- und Emissionsbestimmung unterschätzt der WLTP die realen Werte um etwa 20 % [148]. Laut VDA [22] ist der WLTP lediglich ein Laborverfahren, das die real ausgestoßenen Emissionen nicht widerspiegelt, sondern nur versuche, unter reproduzierbaren, stets gleichen Bedingungen, die Effizienz zwischen Fahrzeugen verschiedener Hersteller vergleichbar zu machen.

Zudem werden extremes Fahrverhalten, Steigung, starke Zuladung oder Fahrereigenschaften nicht eingebunden, was beispielsweise bei der Auslegung eines Kleinwagens im Vergleich zu

einem Sportwagen von hoher Wichtigkeit ist [22], [149]. Zwar wird zwischen drei verschiedenen Fahrzeugklassen im WLTP unterschieden, jedoch fallen fast alle in der EU verkäuflichen Fahrzeuge in die dritte Klasse, wodurch hier nicht von einer differenzierten Betrachtung gesprochen werden kann [149]. Dieser Eindruck bestätigt sich bei Betrachtung der Datengrundlage des WLTP. Die Fahrdaten wurden mit verschiedenen Fahrzeugen auf verschiedenen Straßentypen unter verschiedenen Verkehrsbedingungen eingefahren. Für die Erstellung des in Deutschland geltenden WLTP, wurden Fahrdaten aus Europa, Indien, Korea, Japan und den USA herangezogen [115]. Diese weichen aufgrund der Fahrweise sowie Straßen- und Verkehrsbedingungen stark voneinander ab, weil beispielsweise Fahrgeschwindigkeiten in Europa deutlich höher sind. Durch den Vergleich der Fahrdatenanteile der unterschiedlichen Länder wird erkenntlich, dass ca. 70 % der aufgenommenen Fahrdaten in Europa unterhalb der vom WLTP vorgegebenen maximale Geschwindigkeit von 130 km/h verlaufen. Etwa 30 % liegen deutlich über 130 km/h und werden somit nicht berücksichtigt [115].

Die Dimensionierung und Auslegung von Antriebstrangkomponenten, basierend auf diesen Anforderungen, führt zu der Entstehung von „Allrounder“-Fahrzeugen, die nicht für ihren spezifischen Anwendungsfall ausgelegt und effizient sind und lediglich dazu dienen, marketing-technisch möglichst viel Reichweite aufzuweisen [23], [28]. Zudem wurde der WLTP ausschließlich basierend auf Fahrdaten verbrennungsmotorischer Fahrzeuge ausgelegt, dessen Anforderungen vor allem in Bezug auf die Maximalgeschwindigkeit und das Beschleunigungsverhalten stark von den Eigenschaften elektrischer Antriebsstränge abweichen [149]. Die Dimensionierung nach einem solchen Fahrzyklus würde beispielsweise für die Kompaktklasse und einen Sportwagen eine ähnliche elektrische Maschine ergeben.

Aus den beiden Säulen dieser Arbeit sowie der Tatsache, dass der Stand der Wissenschaft und Technik derzeit keine anwendbare Methodik zur holistischen, automatisierten Maschinenauslegung unter Berücksichtigung realer Anforderungen und der vorgestellten Zielgrößen bereitstellt, ergibt sich folgendes gesamtheitliches Ziel dieser Arbeit:

„Auslegung einer optimalen elektrischen Maschine für einen spezifischen Anwendungsfall in Bezug auf Package, Effizienz und Kosten“

3 Modellierung

Das Vorgehen zur Modellierung der automatisierten Maschinenauslegungsmethodik sowie die Mehrzieloptimierung der Zielgrößen *Kosten*, *Package* und *Effizienz* der vorliegenden Arbeit, ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

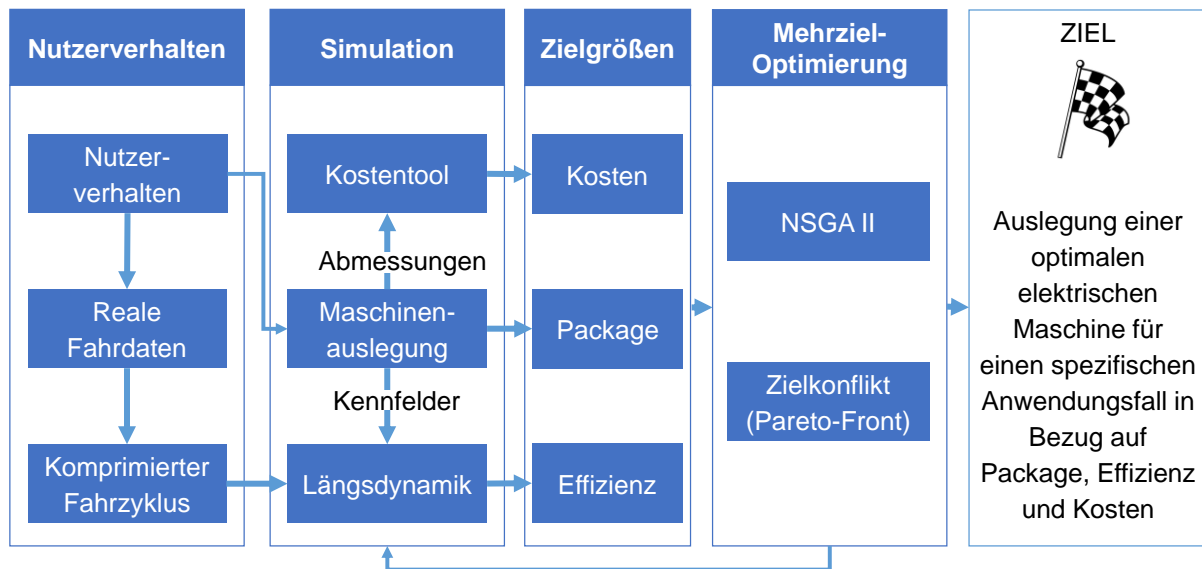


Abbildung 3.1: Vorgehen zur Modellbildung dieser Arbeit. Das zur Simulation eingesetzte Kostentool basiert auf ANGERER [31], das Maschinenauslegungstool wurde durch KALT [30] bereits veröffentlicht und die Längsdynamiksimulation stammt aus KÖNIG [150].

Das Ziel der vorliegenden Methodik ist es, die Anforderungen an elektrische Maschinen (Betriebspunkte, Leistungskenngrößen etc.) für verschiedene Nutzerverhalten zu identifizieren, um somit die jeweils optimale Maschine auszulegen. Dabei bildet die Definition des Nutzerverhaltens den ersten Schritt der Methodik. Dieser besteht aus der Fahrdatenerhebung und Bestimmung des Anwendungsfalls, sowie der daraus resultierenden Fahrzykluserstellung und wird in Kapitel 3.2.3 näher erläutert. Der Fahrzyklus sowie relevante Fahrzeugparameter (Fahrzeugmasse, Stirnfläche, c_w -Wert, Reifenradius, Batteriekapazität, Nebenverbraucher und Getriebeübersetzung [150]) eines definierten Anwendungsfalls dienen als Input für die Simulation.

Die Simulation beginnt mit dem entwickelten Tool zur automatisierten Maschinenauslegung (MEAPA – Modell für den Entwurf und die Analyse einer PSM oder ASM). Dieses dient dazu, mit einer geringen Anzahl an Eingangsparametern (je nach Detaillierungsgrad der Maschinenparameter 7 - 47 variierbare Eingangsparameter) eine Maschinenauslegung zu ermöglichen. Dabei müssen folgende Maschinenparameter definiert werden: maximale Drehzahl, Maschinentopologie, Nennleistung, Nenn Drehzahl, Nennspannung, max. Drehmoment sowie Kühlungsart für jede Auslegung bekannt sein. Für die übrigen 40 Eingangsparameter stehen im Auslegungstool Standardwerte aus MÜLLER [13], [36] zur Verfügung.

Die berechneten Abmessungen der Maschinendimensionierung werden in das Kostentool von ANGERER [31] übergeben und somit die Gesamtkosten der Maschine bestimmt. Die simulierten Kennfelder werden parallel in eine Längsdynamiksimulation überführt, wodurch anhand eines jeweiligen Fahrzyklus‘ die Gesamtzykluseffizienz berechnet wird. Sobald die Zielgrößen bestimmt sind, wird der genetische Algorithmus NSGA II angewendet. Dadurch kann die Auslegung einer optimalen Maschine, bei deren Entwurf das Hauptaugenmerk auf der Auslegung anhand spezifischer realen Nutzeranforderungen liegt, unter Berücksichtigung des Zielkonflikts zwischen *Kosten*, *Package* und *Effizienz* erzielt werden.

3.1 Automatisierte Maschinenauslegungsmethodik

Die in dieser Arbeit entwickelte Auslegungsmethodik ist in Matlab® umgesetzt und dient zur Berechnung der Maschinenparameter von ASM und PSM (Abbildung 3.2). Sie steht als Open-Source Modell in KALT [30] zur Verfügung und wird im weiteren Verlauf detaillierter vorgestellt.

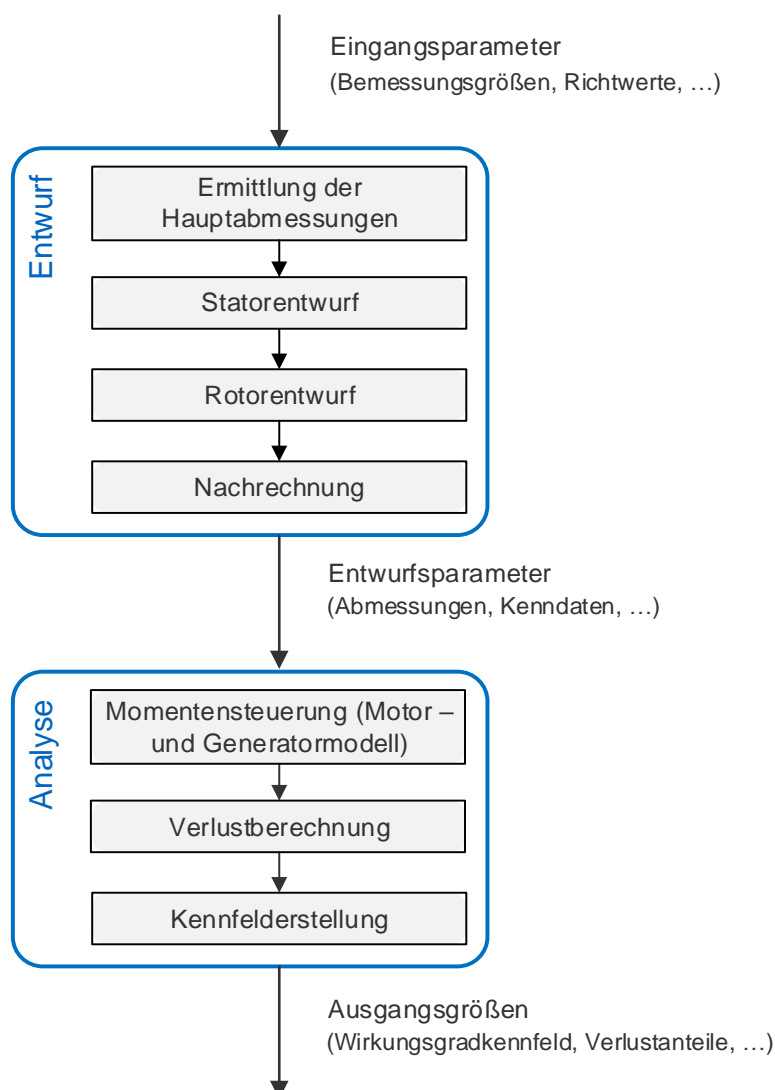


Abbildung 3.2: Aufbau der automatisierten Maschinenauslegungsmethodik [84].

In einem ersten Schritt der automatisierten Maschinenauslegungsmethodik werden die wesentlichen Maschinenparameter, wie das erforderliche Drehmoment und die Drehzahl der elektrischen Maschine, für die jeweilige Anwendung, festgelegt. Diese werden anhand der Fahrzeugparameter der definierten Nutzerverhalten (z.B. Fahrzeuge für den Stadt-, Langstrecken- oder Renneinsatz) entnommen. Zusammen mit den Fahrzyklen und entsprechenden Richtwerten und Bemessungsgrößen aus der Literatur wird der Entwurf der Maschine initiiert und in einem ersten Schritt werden die Hauptabmessungen wie der Außendurchmesser von Stator und Rotor bestimmt, sowie die Hauptwerkstoffe ausgewählt.

Daraufhin folgen der Stator- und Rotorentwurf, welche die elektromagnetische, thermische und mechanische Auslegung auf Basis der zuvor festgelegten Anforderungen durchführen. Der elektromagnetische Entwurf umfasst im Wesentlichen die Wicklungsauslegung, die Berechnung der möglichen Magnetkreise sowie die Erregung und Leistungsverteilung [36]. Nachdem der Entwurf der elektrischen Maschine abgeschlossen ist, kann die Analyse initialisiert werden. Diese beginnt zunächst mit der Momentensteuerung, welche die Ströme und Spannungen mittels eines Motor- und Generatormodells für Betriebspunkte im gültigen Betriebsbereich berechnet und führt daraufhin anhand der Verlustberechnung zur Kennfelderstellung.

Für die Nutform wurde eine trapezförmige Grundnutform gewählt, weil diese bei Käfigläufermaschinen vorwiegend Verwendung findet [32], [70]. Für die Wickelkopfausführung wird unabhängig von der Ausführungsart die mittleren Windungslängen der Wicklungen $l_{1,m}$ nach MÜLLER [13] approximiert.

Die folgende Tabelle 3.1 zeigt die notwendigen Inputparameter zur Maschinenauslegung, die eingeklammerten Größen weisen den validierten Teilbereich auf. Die notwendigen Richtwerte aus der Literatur wurden aus MÜLLER [13], [36] und IGELSPACHER [50] herangezogen und sind in Anhang F aufgeführt.

Tabelle 3.1: Notwendige Inputparameter zur Maschinenauslegung.

Parameter	Formelzeichen	Einheit	Limitierung
Nennleistung	P_N	kW	3,0 – 150
Nendrehzahl	n_N	1/min	1000 – 12000
Nennspannung	U_N	V	200 – 450
Polpaarzahl	p	-	1 – 16
Leistungsfaktor	$\cos \varphi_N$	-	0,8 – 1,0
Strangzahl	m	-	3
Leitermaterial Stator	-	-	Kupferdraht, Aluminiumdraht, -guss
Schaltung	-	-	Stern
Kühlung Stator	-	-	Luft, Flüssig
Magnetanordnung Rotor	-	-	SMPSM, IPSM (radial)

Die Gesamtstruktur des implementierten Auslegungsmodells basiert, wenn nicht anders angegeben, auf dem in der Literatur beschriebenen physikalischen Grundlagen und ersten Ansätzen aus HORLBECK [14], WACKER [130] und PESCE [129].

Zum einen wird der gesamte Statorauslegungsprozess optimiert, um die Berechnung des globalen Optimums für den Statorentwurf im Hinblick auf die Gesamtanforderungen zu ermöglichen. Der allgemeine Vorgang wird in Kapitel 3.1.2 sowie in Veröffentlichungen von KALT [80], [126] näher erläutert. Zum anderen wird der vorgegebene sequentielle Entwurfsprozess des konventionellen Maschinenentwurfs durch die Implementierung von Iterationsschleifen in jedem Schritt des Entwurfsprozesses optimiert. Die in dieser Arbeit entwickelte Maschinenauslegungsmethodik kann autark betrieben werden und benötigt nur die in der Tabelle 3.1 aufgeführten Eingangsparameter zum Maschinenentwurf. Die Einstellung dieser Parameter wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit durch den angewendeten Optimierungsalgorithmus übernommen.

Die in einer PSM auftretenden Effekte der Sättigung und Streuung erschweren eine detaillierte analytische Auslegung. Eine umfassende Kenntnis der Magnetfeld- und Verlustverteilung ist jedoch gerade zur Optimierung und Wirkungsgradsteigerung notwendig, wodurch sich zur Berechnung der elektromagnetischen Feldverteilung, die numerische Finite-Elemente Methode (FEM) als ein wesentliches Werkzeug etabliert hat [151]. Daher ist bei der Berechnungsmethodik der PSM ein zusätzlicher Zwischenschritt zwischen Entwurf und Analyse möglich, welcher die Werte der Längs- und Querachseninduktivität und des verketteten Flusses der PM, mit Hilfe einer ANSYS-Schnittstelle, korrigiert. Zudem ermöglicht eine weitere Schnittstelle zu CATIA eine direkte Integration der ausgelegten Maschine in ein Gesamtfahrzeug- oder Antriebsstrangmodell.

3.1.1 Aufbau Maschinenauslegungstool

Der Auslegungsprozess wird im entwickelten Tool für ASM und PSM insofern modelliert, dass Synergien bei der Maschinenauslegung ausgenutzt werden. Sowohl die Entwurfs- als auch die Analysemodellierung haben optionale grafische Benutzeroberflächen (Anhang F.2 – F.4).

Ein Überblick über die Modellstruktur und die verschiedenen Funktionen ist in Anhang F.14 dargestellt. Zusätzlich zu den beiden Hauptkomponenten werden zwei Bibliotheken erstellt, die von der Entwurf- und Analysekomponente verwendet werden. In der Parameter-Bibliothek werden unter anderem die aus der Literatur entnommenen Referenzwerte entsprechend des jeweiligen Maschinentyps gespeichert. Die Kennwerte der Materialien werden in der Materialbibliothek gespeichert. Für die Elektrobleche sind zum Beispiel Materialparameter wie die B-H- und Eisenverlustkurve des Herstellers *Vacuumschmelze* integriert [152].

Mittels eines Datenspeichersystems kann die Maschinenkonstruktion jederzeit gespeichert und später fortgesetzt werden. Es ist zudem möglich, eine bereits konstruierte Maschine aufzurufen und mit gewünschten Änderungen neu zu berechnen. Dies ermöglichen einen Export der Geometriedaten in das CAD-Datenformat *.dxf (fct saveDXF)*, die Ausgabe des Ergebnis-Workspace als *.mat*-Datei und ein Export der Konstruktionsergebnisse in eine Excel-Datei (*fct export_table, fct saveExcel*). Die CAD-Daten können zum Beispiel in ein FEM-Programm importiert und für weitere Berechnungen verwendet werden. Dies ist insbesondere für die IPSM relevant, um die Induktivitäten der Quer- und Längsachsen genau berechnen zu können.

Die physikalischen Grundlagen basieren dabei auf BINDER [50], PYRHOENEN [46], MÜLLER [13], [36] und MEYER [32]. Jedoch werden die Berechnungsschritte in Bezug auf die dynamischen Anforderungen und den Einsatz im Antriebsstrang eines BEV angepasst und um den optimierten Statorwurf erweitert.

Entwurf

Der Aufbau für den beispielhaften elektromagnetischen Entwurf einer ASM ist in Abbildung 3.3 zu sehen. Zunächst werden die Hauptabmessungen der Maschine, ausgehend von Eingangsparametern in Form von Bemessungsgrößen, Richtwerten oder Optionen, berechnet.

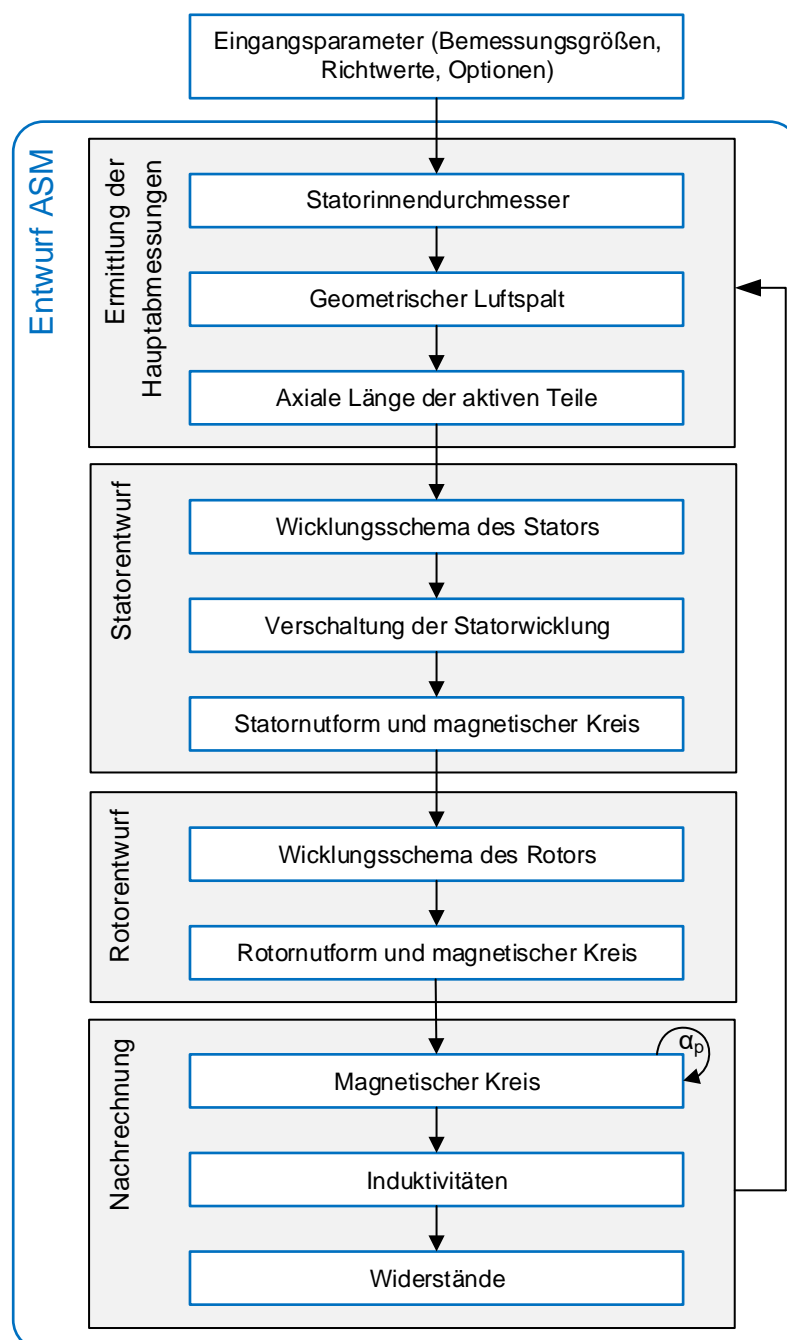


Abbildung 3.3: Aufbau für den elektromagnetischen Entwurf einer ASM [84].

Dabei stellen die Bemessungsgrößen die angestrebten Nenndaten der Maschine (Leistung, Drehzahl und Spannung) dar. Die Richtwerte (Anhang F.1) bilden Erfahrungswerte aus der Literatur ab, die anhand bereits realisierter elektrischer Maschinen ermittelt wurden und sind teilweise abhängig von den Bemessungsgrößen und Optionen der Auslegung. Die Richtwerte werden bedingt durch eine hohe Ausnutzung der Maschine aus dem jeweils oberen Gültigkeitsbereich gewählt [13].

Die Optionen der Auslegung sind zur Ausführung der Kühlungsart, der Maschinentopologie, des Wicklungsaufbaus sowie der Materialienwahl notwendig (Anhang F.5). Ziel der Ermittlung der Hauptabmessungen ist vor allem die Bestimmung des Statorinnendurchmessers, des geometrischen Luftspalts sowie der axialen Länge des Blechpakets. Die Berechnung der Hauptabmessungen ist dabei für beide Maschinentypen ähnlich. Der Hauptunterschied zwischen der Berechnungsmethode einer PSM und einer ASM liegt vor allem in der Wahl der Richtwerte, die in der spezifischen Literatur von MÜLLER [36] und MEYER [32] zu finden sind.

Bei der Statorauslegung gibt es keine wesentlichen Unterschiede zwischen der Auslegung einer PSM und ASM, die sich direkt auf den Entwurfsprozess auswirken, weil beide Maschinentypen Wicklungen zur Erzeugung des erforderlichen Drehfeldes benötigen. Daher kann der entwickelte optimale Stator-Entwurf von KALT [80], [126] sowohl für ASM als auch für PSM identisch umgesetzt werden (Kapitel 3.1.2). Der einzige Unterschied liegt hier bei der Auswahl einer endgültigen Wicklungsoption. So ist zum Beispiel bei einer ASM ein geringerer Streukoeffizient für die Oberschwingungen aufgrund parasitärer Effekte höher zu bewerten als bei einer PSM, bei dem die Oberschwingungen weniger kritisch zu bewerten sind [36].

Die in dieser Arbeit entwickelte Maschinenauslegungsmethodik ermöglicht in Bezug auf die Stator- bzw. Wicklungsauslegung eine Auswahl zwischen drei Optionen – *Klassisch*, *Optimierung* und *Manuell*. Die Option *Klassisch* entspricht dem konventionellen Berechnungsvorgang nach MÜLLER [13]. Dabei wird zunächst eine Wicklungsart gewählt und dem Statorentwurf als Eingangsparameter übergeben, sodass der magnetische Kreis ausgelegt werden kann. Der Hauptfokus dieser Auslegungsoption liegt in der Reduzierung der Oberwellen durch eine relative Spulenweite $W_{1,Sp,rel}$ von $5/6$ oder $2/3$, sowie einer hohen Nutenzahl.

Mit der Option *Optimierung* (Benutzeroberfläche Anhang F.6) kann der optimierte Statorentwurf initiiert werden, der im Laufe dieser Arbeit entwickelt und in Kapitel 3.1.2 erläutert wird. Ziel ist es, alle physikalisch möglichen Parameterkombinationen zu berechnen, um anschließend das globale Optimum für ein spezifisches Auswahlkriterium zu bestimmen. Dabei wird die Aussortierung des globalen Optimums innerhalb des Prozesses in der Hinsicht vereinfacht, dass alle Parameterkombinationen aussortiert werden, die in allen der festgelegten Kriterien oder Auslegungsparametern schlechter sind als eine andere Parameterkombination.

Die Option *Manuell* (Benutzeroberfläche Anhang F.7) ermöglicht eine individuelle Auswahl einer spezifischen Wicklungskonfiguration durch die manuelle Eingabe des Zonenplans der Wicklung und basiert auf der entwickelten optimierten Statorauslegungsmethodik (Kapitel 3.1.2). Somit kann eine vorher bekannte Maschine exakt nachgebildet und bei der Optimierung ausgeschlossene Wicklungskonfigurationen betrachtet werden. Dadurch wird die Berechnung von Wicklungskonfigurationen mit beliebigen Zonenänderungen und Strangverschachtelungen ermöglicht. Bei der Eingabe der Konfiguration muss eine bestimmte Notation eingehalten werden. Die drei Stränge werden mit A, B und C dargestellt sowie anhand von Großbuchstaben (positive Spulenseite) und Kleinbuchstaben (negative Spulenseite) gekennzeichnet und mit Hilfe eines Trennzeichens „|“ in die jeweilige Nut abgegrenzt [153]. Die Grundlage für die Konfiguration

der Wicklung wird dabei anhand der Wicklungsmatrix $M_{Wicklung}$ des Zonenplans dargestellt. Liegt ein Zonenplan für die spezifizierte Wicklung nicht vor, wird dieser mit Hilfe des Tingley-Plans aus [32] abgeleitet. Die Berechnung des Wicklungsfaktors wird bei dieser Option anhand eines Nuttensterns realisiert. Dieser stellt ein Polardiagramm dar, das die induzierte Spannung abhängig von der räumlichen Nuttenverteilung abbildet [81], [154]. Die Auslegung der Nutengeometrie gestaltet sich für alle drei Optionen mit geringfügigen Änderungen nach dem iterativen Verfahren von MEYER [32].

Im Vergleich zum Entwurf des Stators müssen die Wicklung (ASM) bzw. der magnetische Kreis oder die Permanentmagnete (PSM) des Rotors im nächsten Schritt ausgelegt werden. Zusätzlich zu den Maßnahmen zur Unterdrückung von Oberwellen aus dem Statorentwurf, spielt bei der Auslegung des Rotors vor allem die Wahl der Rotornutenzahl N_2 eine wesentliche Rolle zur Reduzierung der Oberwellen (Tabelle 3.2). Dabei wird zur Vermeidung zusätzlicher Verluste meist die kleinstmögliche Nuttenzahl gewählt [13].

Tabelle 3.2: Auswahl der Rotornutenzahl N_2 zur Reduzierung auftretender Oberwellen [13].

Effekt	Bedingung
Unterdrückung synchroner Oberwellenmomente	$N_2 \leq 1,25 N_1$
Unterdrückung asynchroner Oberwellenmomente	$N_2 \neq N_1$ und $N_2 \neq N_1 \pm 2p$

Der Rotoraufbau unterscheidet sich für die beiden Maschinentypen. Bei einer ASM ist im Rotor eine Wicklung untergebracht, die bei der Käfigläufermaschine aus Stäben und Kurzschlussringen besteht. Außerdem müssen die Nutengeometrie und der Magnetkreis analog zur Statorauslegung bestimmt werden. Bei einer PSM müssen die PM in der Rotorausführung dimensioniert und entsprechend im Rotor angeordnet werden. Für die Nachrechnung wurde ein mehrstufiges Vorgehen entwickelt, um die Korrekturen rückkoppeln zu können (Abbildung 3.4).

Mit Hilfe einer Nachrechnung können nach Abschluss des Rotorentwurfs die charakteristischen elektromagnetischen Größen der Maschine berechnet werden. Die Nachrechnung umfasst im Wesentlichen die Berechnung des Magnetkreises, der Induktivitäten und der Widerstände. Dabei ist das Hauptziel der Nachrechnung des magnetischen Kreises die Berechnung der Durchflutung der Hauptwelle $\Theta_{(1)}$ oder des Magnetisierungsstroms I_μ zur Bestimmung der gesättigten Induktivitäten.

Die Berechnung der charakteristischen Induktivitäten, der Haupt- und Streuinduktivitäten, sowie der Koppelinduktivität kann daraufhin durchgeführt werden [13]. Die Wicklungswiderstände von Stator und Rotor werden neben der Geometrie der Leiter von den eingesetzten Materialien sowie deren Temperaturen beeinflusst. Die materialspezifischen Widerstände müssen dabei zur Bestimmung der spezifischen Leitfähigkeit aus der Literatur entnommen werden [13].

Unterschiede zwischen ASM und PSM gibt es zudem hinsichtlich der Nachrechnung. Bei einer PSM liegt der Schwerpunkt auf der Bestimmung der Längs- und Querachseninduktivitäten und des Statorwiderstandes. Im Gegensatz dazu sind die Gesamtinduktivitäten von Stator und Rotor sowie deren Widerstände für die Analyse in der ASM relevanter. Zusätzlich ist die Neuberechnung des Magnetkreises erforderlich, um die Geometrie zu korrigieren und den Magnetisierungsstrom zu bestimmen. Die gesamten zu berechnenden Maschinenparameter sind in Anhang F.8 aufgeführt.

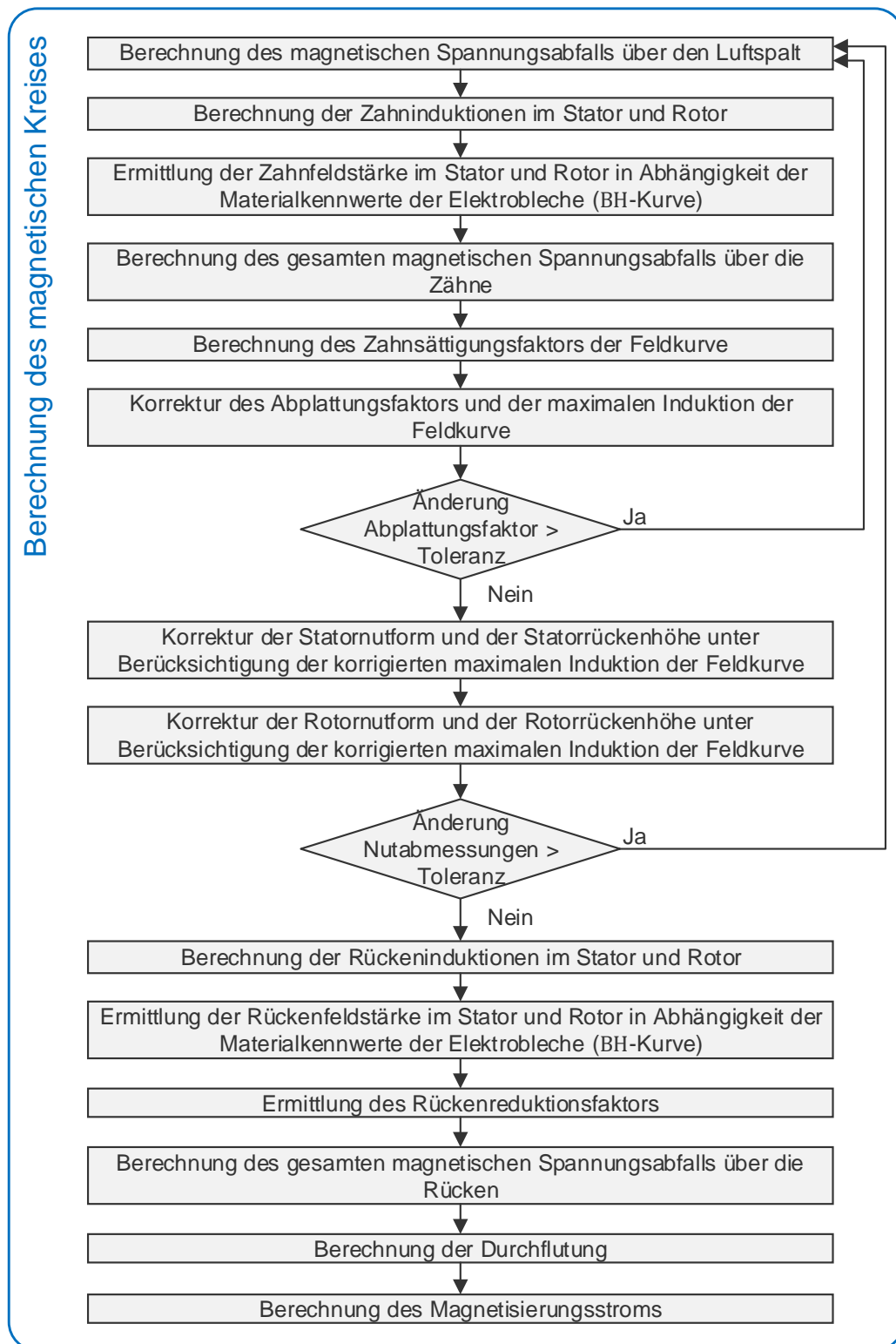


Abbildung 3.4: Mehrstufiges Vorgehen zur Nachberechnung des Magnetkreises [84].

Analyse

Die Analyse nach Abschluss des Entwurfs der Maschine dient dazu, Verlust- und Wirkungsgradkennfelder zu dimensionieren und zu berechnen. Die im Entwurf berechneten

Maschinenparameter dienen als Eingangsparameter. Sie können anhand der jeweiligen Optionen der zu berücksichtigenden Verlusten, der Auflösung des Kennfeldes sowie der maximalen Strom- und Spannungsansteuerung (Tabelle 3.3) spezifiziert und ausgewählt werden. Bei den Verlusten kann zudem angegeben werden, ob die Gesamtverluste oder lediglich die Wicklungs-, Ummagnetisierungs-, Eisen-, mechanische bzw. Zusatzverluste einzeln berücksichtigt werden sollen.

Tabelle 3.3: Auswahloptionen zur Analyse.

Parameter	Formelzeichen/Option	Einheit
Generatorbereich	Ja/Nein	-
Max. Drehzahl (Kennfeldbereich)	N_{\max}	1/min
Auflösung Drehzahl	t_{ics_n}	-
Auflösung Drehmoment	t_{ics_M}	-
Ansteuerung max. Spannung	$U_{1,\max}$	V
Ansteuerung max. Strom	$I_{1,\max}$	A
Verlustarten	Gesamt-, Wicklungs-, Ummagnetisierungs-, Eisen-, mechanische bzw. Zusatzverluste	-

Durch das Momentensteuerungsverfahren können Spannungen und Ströme für einen bestimmten Betriebspunkt bzw. das maximalen Drehmoment unter Berücksichtigung der Strom- und Spannungsgrenzen berechnet werden [32]. Die Maximalwerte für Strom und Spannungen stellen die hauptsächlichen Eingangsparameter dar. Durch eine entsprechende Anpassung dieser Werte kann die Maschine im Überlastbetrieb simuliert werden. Es erfolgt jedoch keine thermische Überprüfung, weil der Hauptfokus dieser Methodik auf einer präzisen holistischen Auslegungsmethodik liegt. Für die Bestimmung der Überlast wird auf HORLBECK [14] verwiesen.

Das Motormodell berechnet die Betriebsgrenzen sowie die Ströme und Spannungen für ein Raster aus Betriebspunkten bestehend aus einer Drehzahl- und Drehmomentkombination. Das Raster wird dabei in Intervalle gleicher Länge eingeteilt, die durch die eingegebene Auflösung bestimmt werden. Bei der Drehmomentregelung für das Motor- und Generatormodell werden die Verfahren MTPA, MA, MTPV zur Drehmomentregelung zu einer Mindeststrom-Drehmomentregelung für beide Maschinentypen kombiniert. Die Vollastkennlinie wird zur Begrenzung durch die maximale Drehzahl- zu Drehmomentkombination bestimmt [32].

Das Generatormodell wird durch Umkehren der q-Komponente aus dem Berechnungsvorgang des Motormodells erzeugt. Zur Bestimmung der Effizienz einer Maschine müssen daraufhin die einzelnen auftretenden Verluste nach [13] berechnet werden. Das Optimierungsproblem, das zur Berechnung der Ströme verwendet wird, muss je nach Maschinentyp mit den jeweiligen Systemgleichungen gelöst werden.

Zur Berechnung der Eisenverluste wurde der Modellansatz von JORDAN [155] in der Auslegungsmethodik umgesetzt, weil dieser eine Auftrennung der auftretenden Hysterese- und Wirbelstromverluste ermöglicht. In Bezug auf die Verlustberechnung sind die zugrunde liegenden Berechnungen zwischen den beiden Maschinentypen ähnlich. Allerdings müssen die unterschiedlichen Eigenschaften der Verlustkomponenten berücksichtigt werden.

In dem letzten Schritt der Analyse der Maschine wird die Wirkungsgradberechnung, durch das Verhältnis aus mechanischer Leistung an der Antriebswelle zur gesamten Verlustleistung, für die einzelnen Betriebspunkte durchgeführt. Mit der Erstellung der Wirkungsgradkennfelder ist die Analyse der Maschine abgeschlossen und die Ergebnisse des Entwurfs sowie ausgewählte Kennfelder der Analyse können als Matlab®- sowie Excel-Datei abgespeichert werden.

3.1.2 Optimierter Statorentwurf

Der entwickelte optimierte Statorentwurf zielt darauf ab, den konventionellen Konstruktionsprozess aus einer starren sequentiellen Abfolge aufzulösen und einen holistischen Ansatz zur Bestimmung des globalen Optimums aller physikalisch möglicher Parameterkombination zu identifizieren. Das Ziel ist es, durch eine iterative Betrachtung aller Parameterkombinationen in jedem Schritt des Auslegungsprozesses den globalen Lösungsraum ohne vorherige Einschränkungen zu bestimmen.

Für die optimierte Statorauslegung wurde in dieser Arbeit der mathematische Ansatz der Parameter Permutation aufgrund der geringen Komplexität und notwendiger Rechenleistung gewählt. Alternativen wie eine Monte-Carlo Simulation oder Partikelschwarmoptimierung sind ebenfalls möglich und können bei Bedarf ebenfalls im vorliegenden Modell umgesetzt werden (Abbildung 3.5) [100], [136].

Wird der optimale Statorentwurf im Auslegungsprozess gewählt, werden zunächst verschiedene Näherungswerte für die minimale Nutteilung, die initiale Nutform, die Nutisulationsdicke sowie die maximale Anzahl an definierten Iterationen für die Nutformauslegung als Eingangsparameter festgelegt (Tabelle 3.4).

Tabelle 3.4: Näherungswerte als Eingangsparameter für die optimale Statorauslegung.

Parameter	Formelzeichen	Einheit	Wert/Bezeichnung
Minimale Nutteilung	$\tau_{n,min}$	m	0,007
Initiale Nutform	-	-	Trapez
Nutisulationsdicke	d_{iso}	mm	0,3
Max. Anzahl Iterationen zur Nutformgestaltung	$NG_{max,Iter}$	-	10^6

In einem ersten Schritt des optimierten Statorentwurfs werden alle physikalisch möglichen Wicklungstypen definiert, einschließlich aller Kombinationen von ein- und zweischichtigen, Ganzloch- und Bruchloch sowie konzentrierten und verteilten Wicklungen. Um die Fertigbarkeit zu berücksichtigen, werden einige spezifische Wicklungskombinationen eliminiert [3]:

- einschichtige Bruchlochwicklungen mit ungewickelten Nuten, d.h. alle Nuten müssen Teilwicklungen aufnehmen
- zweischichtige Integral-Wicklung ohne Sehnung (dasselbe elektrische Verhalten wie einschichtige Integral-Wicklungen, aber höhere Anzahl von Leitern)
- Zweifach gesehnte Wicklungen (abgesehen von gesehnten Bruchlochwicklungen mit natürlicher Zonenvariation)

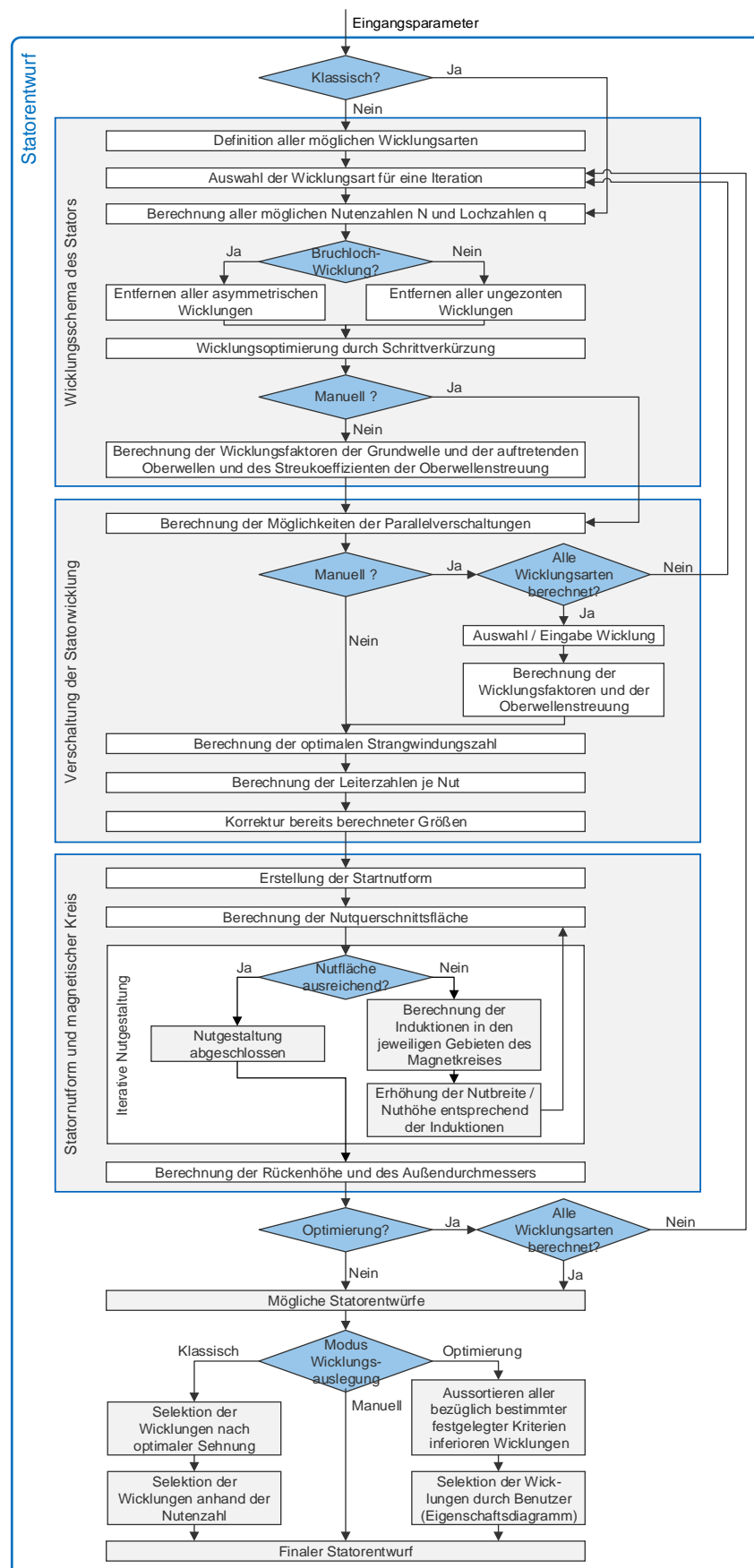


Abbildung 3.5: Vorgehen des entwickelten optimierten Statorentwurfs [84].

Der ganzheitliche Ansatz der optimierten Statorentwurfsmethode kann für unterschiedliche Analysen verwendet werden, um

1. eine global optimale Statorauslegung für neue elektrische Maschinen und Fahrzeugkonzepte zu ermöglichen.
2. fehlende Parameter in Datenblättern vorhandener elektrischer Maschinen zu berechnen und ergänzen, ohne die Notwendigkeit eines Prüfstands.
3. eine Analyse neuer und bereits bestehender Wicklungs- und Stator-Konfigurationen für spezifische Anwendungen bestehender elektrischer Maschinen oder neue Fahrzeugkonzepte zu ermöglichen.
4. die Optimierungsziele der Konstrukteure für bestehende elektrische Maschinen zu identifizieren.

Die folgende Übersicht in Abbildung 3.6 zeigt alle umsetzbaren Wicklungstypen, die für die optimierte Statorauslegungsmethode verwendet werden. Dabei dient die einschichtige Bruchlochwicklung als Startwicklung für den iterativen Entwurfsprozess.

In dem resultierenden Lösungsraum entspricht jede Zeile der Parameterkombination eines möglichen Stator-Entwurfs und die Spalten enthalten die jeweiligen Maschinenparameter (Wicklungsparameter aus Anhang F.8), zum Beispiel die Nutzahl N und die Anzahl der Nuten pro Pol und Phase q .

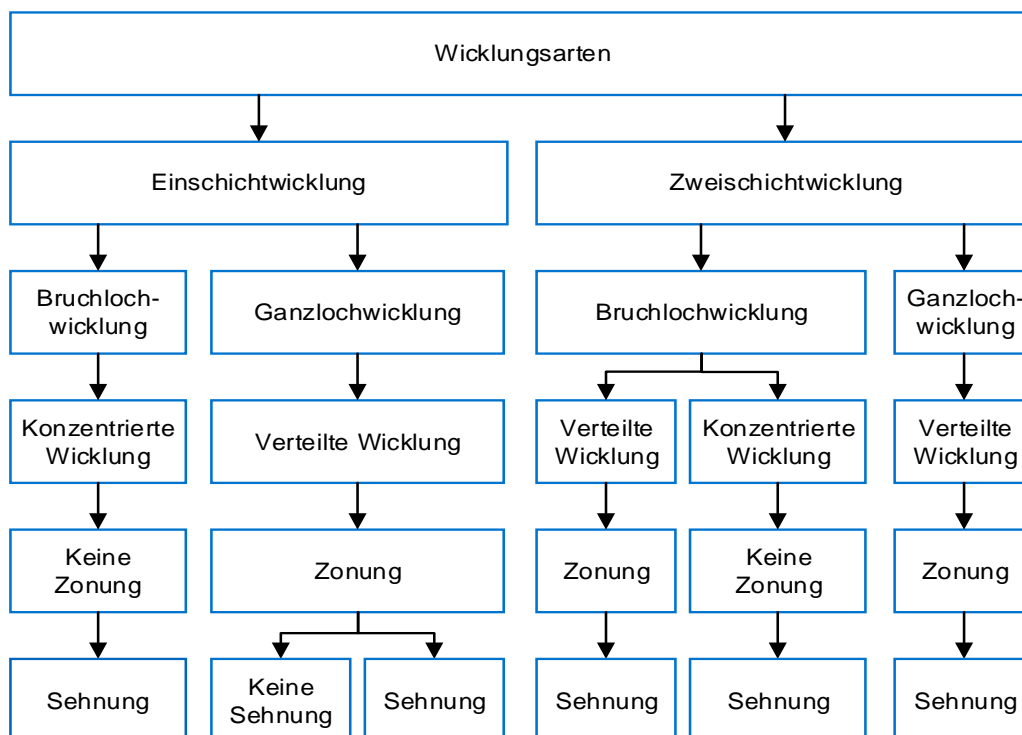


Abbildung 3.6: Auswahl möglicher Wicklungskonfigurationen [84].

Bei einer Bruchlochwicklung ist ein Zwischenschritt erforderlich, um alle Nutzahlen, die nicht den Symmetriebedingungen aus MEYER [32] entsprechen, vom weiteren Entwurfsprozess auszuschließen. Ganzlochwicklungen sind stets symmetrisch, sodass dieser Schritt überflüssig ist.

Anschließend wird die Wicklungsoptimierung durchgeführt und die Anzahl der Leiter und Parallelschaltungen für jede Parameterkombination bestimmt. Nach einer iterativen Korrekturschleife für den magnetischen Hauptfluss Φ_h , die Luftspaltflussdichte B_δ und die lineare Stromdichte A

schließt die Verschaltung aller möglichen Leiterverbindungen den Wicklungsentwurf ab. Die Lösungsraumtabelle des Wicklungsentwurfs enthält alle physikalisch möglichen Kombinationen der betrachteten Wicklungsparameter für die potenziellen Statorausführungen.

Die Nutformgenerierung ist der letzte Schritt des Statorentwurfs. Sie definiert die gleichmäßige Verteilung der Nuten entlang des Statordurchmessers und ist das Hauptmerkmal des Blechschnitts [32]. Nachdem eine initiale Nutform definiert ist, wird die iterative Nutformgestaltung gestartet (Anhang F.15). Dazu wird zunächst iterativ die Nutbreite vergrößert, bis die zulässige Zahninduktivität erreicht ist. Daraufhin wird die Nuthöhe erhöht.

Die automatisierte Nutformgenerierung nach MEYER [32] ermöglicht eine iterative Bestimmung der Nutform, ist aber durch eine feste Eingabe einer anfänglichen Nutform, vordefinierten Wicklungstypen und Wicklungsparametern begrenzt. Dieser Nachteil wird durch die gesamtheitliche Betrachtung aller möglichen Wicklungstypen im weiteren Verlauf verbessert bzw. eliminiert.

Der Entwurf der Nutform kann abgeschlossen werden, sobald alle Statorwicklungsleiter in den jeweiligen Nuten aufgenommen werden können und gleichzeitig die maximal zulässige Induktion in den Zähnen und im Joch des Stators nicht überschritten wird. Daraus ergibt sich in jedem Iterationsschritt eine Tabelle, die alle möglichen Kombinationen von Nutform und Wicklungsauslegungsparametern in einem Lösungsraum für einen betrachteten Wicklungstyp aufweist. Daraufhin beginnt die nächste Iteration für die übrigen Wicklungstypen. Das globale Optimum aller möglichen Statorausführungen kann entsprechend der definierten Anwendung, der Anforderungen oder der Optimierungsziele der Entwicklungsingenieure bestimmt werden.

3.2 Mehrzieloptimierung und Gesamtkonzept

Wie bereits zu Beginn von Kapitel 3 aufgeführt, findet die Mehrzieloptimierung der Zielgrößen *Effizienz*, *Kosten* und *Package* mittels des genetischen Algorithmus' NSGA II statt. In den folgenden Unterkapiteln wird näher auf den eingesetzten Optimierungsalgorithmus' eingegangen, sowie die Schnittstellen zur Längsdynamiksimulation und Kostenmodellierung erläutert. Zudem werden die in der Maschinenauslegung zu variierenden Parameter aufgeführt, die dem Optimierungsalgorithmus als Freiheitsgrade dienen.

3.2.1 Aufbau Optimierungsalgorithmus NSGA II

Der NSGA II ist ein multikriterieller genetischer Algorithmus von DEB [156], der in dieser Arbeit in der Implementierung von SONG [157] angewandt wird. Dabei wird basierend auf der angegebenen Populationsgröße und Anzahl an Generationen, zunächst eine Population konkurrierender Individuen gebildet. Diese werden in jedem darauffolgenden Schritt nach ihrem Grad der nichtdominierten Lösungen sortiert und mit Hilfe eines Evolutionären Algorithmus' in einem neuen Lösungsraum mit den erzeugten Nachkommen kombiniert. Dieser Algorithmus konnte bereits in einer Vielzahl Publikationen erfolgreich zur Optimierung im Antriebsstrang angewandt werden [31], [158], [159], [160], [161].

Die Aufgabe einer Mehrzieloptimierung ist es nicht, das global optimale Design zu bestimmen, sondern den Trade-Off optimaler Lösungen für alle angestrebten Zielgrößen zu finden, die meist im Konflikt zueinander stehen [162]. Somit kann sichergestellt werden, dass Maschinenkonzepte,

die in einer Zielgröße geringfügig schlechter sind, allerdings bei den anderen Zielgrößen einen deutlichen Vorteil haben, nicht zu Beginn des Auslegungsprozesses ausgeschlossen werden. Dies kann im NSGA II jedoch dazu führen, dass er im Laufe der Evolution in einem bestimmten Bereich eines lokalen Optimums verweilt und keine weiteren Variationen ausserhalb des gefundenen lokalen Optimums vornimmt. Zudem ist ein weiterer Nachteil des angewandten Optimierungsalgorithmus', eine hohe Rechenleistung und -dauer, weil eine hohe Anzahl Generationen zur Generierung der Pareto-Fronten notwendig ist [106]. Allerdings kann dieser Problematik entgegengewirkt werden, weil der NSGA II eine schnelle Konvergenz gegen die globale Pareto-Front ermöglicht (Anhang E.4). Dabei gilt, je breiter die Individuen einer einzelnen Generation streuen, desto langsamer konvergieren sie, allerdings senkt eine hohe Diversität der Individuen gleichzeitig das Risiko, dass der Algorithmus gegen lokale Minima läuft [159], [163].

Weil die angestrebten Simulationen dieser Arbeit eine Zielgrößenanzahl von $n_{Obj} = 3$ nicht überschreiten, bietet der NSGA II eine adäquate Kompromisslösung zwischen Rechen- und Konvergenzzeit für das vorliegende multikriterielle Optimierungsproblem [107], [156], [157].

Zur Mehrzieloptimierung werden zunächst die definierten Zielgrößen im Optimierungsproblem als zu minimierende Zielfunktion festgelegt. Mit dem Ziel einer verbrauchs-, kosten- und packageeffizienten Antriebsmaschine, wird die Effizienz in den Berechnungen negativ gesetzt, sodass die Zielgrößen *Package* und *Kosten* minimiert und die Zielgröße *Effizienz* gleichzeitig maximiert wird. Der Einsatz eines multikriteriellen Optimierungsproblems ermöglicht es, nach mehreren Zielgrößen gleichzeitig zu optimieren und somit das globale Auslegungsoptimum zu finden.

Die Zielfunktion zur Optimierung der Zielgrößen *Package*, *Effizienz* und *Kosten* wird als mathematische Funktion f wie folgt mit Gleichung 3.1 beschrieben:

$$\min f(\vec{x}) = \vec{y} \quad (3.1)$$

Dabei repräsentiert der Vektor \vec{x} eine Lösung innerhalb des Lösungsraumes, wobei die einzelnen Designvariablen durch den angegebenen Lösungsraum festgelegt werden. Der Vektor \vec{y} stellt die Zielgrößen der Zielfunktion dar:

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} \textit{Maschinentyp} \\ \textit{Polpaarzahl} \\ \textit{Nennspannung} \\ \textit{Nennleistung} \\ \textit{Nenndrehzahl} \\ \textit{Wicklungstyp} \\ \textit{Magnetanordnung} \\ \textit{Kühlungsart} \\ \textit{Batteriekapazität} \\ \textit{Getriebeübersetzung} \\ \textit{Anzahl Maschinen} \end{bmatrix} \begin{array}{l} \left. \vphantom{\begin{matrix} \textit{Maschinentyp} \\ \textit{Polpaarzahl} \\ \textit{Nennspannung} \\ \textit{Nennleistung} \\ \textit{Nenndrehzahl} \\ \textit{Wicklungstyp} \\ \textit{Magnetanordnung} \\ \textit{Kühlungsart} \end{matrix}} \right\} \text{Maschinenparameter} \\ \left. \vphantom{\begin{matrix} \textit{Batteriekapazität} \\ \textit{Getriebeübersetzung} \\ \textit{Anzahl Maschinen} \end{matrix}} \right\} \text{Fahrzeugparameter} \end{array} \quad (3.2)$$

$$\vec{y} = \begin{bmatrix} \textit{Kosten} \\ -\textit{Zykluseffizienz} \\ \textit{Abmessungen} \end{bmatrix}$$

Das Ergebnis des Optimierungsalgorithmus‘ stellt eine Pareto-Front bzw. ein Pareto-Optimum dar. Dabei wird ein Pareto-optimaler (bestmöglicher) Zustand erreicht, der es nicht ermöglicht, eine Zielgröße zu verbessern, ohne eine andere gleichzeitig zu verschlechtern [164]. Dabei werden folgende Maschinen- und Fahrzeugparameter im Laufe der Ergebnisgenerierung variiert und an den Optimierungsalgorithmus als Freiheitsgrad übergeben (Tabelle 3.5).

Tabelle 3.5: Auswahl der Maschinen- und Fahrzeugparameter als Freiheitsgrad für den NSGA II.

Maschinenparameter	Grenzen Optimierungsalgorithmus
Maschinentopologie/-typ	ASM, PSM
Polpaarzahl	2 – 8
Nennspannung	200 – 800 V
Nennleistung	70 – 300 kW
Nenndrehzahl	1000 – 15000 1/min
Wicklungstyp	A (Ganzloch, Einschicht, ungesehnt, gezont), B (Ganzloch, Zweischicht, geseht, gezont), C (Bruchloch, Zweischicht, geseht, gezont)
Magnetanordnung	SMPSM, IPSM (tangential, V-Form, eingelassen)
Kühlungsart	Flüssig, Luft
Fahrzeugparameter	Grenzen Optimierungsalgorithmus
Getriebeübersetzung	2 – 10, Einganggetriebe
Batteriekapazität	20 - 250 kWh
Anzahl Maschinen	1 – 2 (Bei 2 Maschinen, eine pro Achse und jeweils mit Getriebe)

Die gewählten Grenzbereiche der einzelnen Parameter wurden anhand existierender Fahrzeugkonzepte gewählt [19]. Als konstante Parameter für alle Simulationen wurden folgende Parameter in Tabelle 3.6 gewählt.

Tabelle 3.6: Festgelegte Maschinenparameter für den NSGA II.

Maschinenparameter	Wert	Maschinenparameter	Wert
Maximaldrehzahl	12000 - 19000 1/min	Leistungsfaktor	0,95
Strangzahl	3	Eisenmaterial	VACOFLUX 50
Verschaltung	Stern	Leitermaterial	Kupfer
Spulenform Stator	Runddraht	Magnetmaterial	VACODYM 238 TP
Nutform Stator	Trapezform (eckig)	Option Wicklungsauslegung	Klassisch

Der Optimierungsalgorithmus kann in den Auslegungsprozess integriert werden und übernimmt die Eingabe der Inputparameter für die Maschinenauslegung. Lediglich die für die Längsdynamiksimulation notwendigen Fahrzyklen sowie die Auswahl der variablen Maschinen- und Fahrzeugparameter müssen zu Beginn jeder Simulation festgelegt werden.

Die erstellten Fahrzyklen dienen als Input für die vorliegende Methodik. Dieser Schritt muss zu Beginn lediglich einmalig durchgeführt werden und kann, durch direktes Einsetzen erstellter Fahrzyklen, in fortführenden Untersuchungen übergangen werden. Die Generierung der Ergebnisse der zugrundeliegenden Arbeit basiert vor allem auf der vorhandenen Fahrdatengrundlage (Kapitel 3.2.2) sowie der definierten Nutzerverhalten, die in den folgenden Unterkapiteln näher erläutert werden.

3.2.2 Fahrdatenerhebung und Datengrundlage

Zur Fahrzykluserstellung wird zunächst eine umfangreiche Fahrdatengrundlage nach dem Vorgehen nach WANG [165] zur individuellen Bestimmung der notwendigen Fahrdaten benötigt, um verschiedene Fahrsituationen abzubilden. Die in dieser Arbeit eingesetzten Fahrdaten werden aus einer Vielzahl an Quellen bezogen. Die Fahrdaten wurden vom Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der TU München (TUM) in unterschiedlichen Projekten und Nutzergruppen im Privat- und Gewerbebereich verschiedener Fahrzeuge aufgezeichnet [166], [167]. Die erforderlichen Signale wie GPS-Position (Längen- und Breitengrad), Höhe, Uhrzeit, Geschwindigkeit und Beschleunigungswerte (mittels GPS) für die jeweiligen Einzelfahrten wurden mit Sensoren in Smartphones unter Verwendung einer Aufzeichnungsrate von 1 Hz aufgenommen [168].

Die aufgezeichneten Daten setzen sich aus 4 034 Fahrten für Privatfahrzeuge und 162 540 Datensätze für Taxis zusammen. Die privaten Fahrdaten wurden durch das Forschungsprojekt sun2car innerhalb der e-GAP-Modellgemeinde Garmisch-Partenkirchen aufgenommen und konzentrieren sich auf die Untersuchung der Kundenakzeptanz von Elektrofahrzeugen [18]. Die Datensätze wurden durch 58 Privatanwender aufgenommen, die einen Audi A1 e-tron oder A3 g-tron gefahren sind. Die Taxidaten wurden von 90 Taxifahrern innerhalb des Projekts VEM-Taxi im Großraum München aufgezeichnet, darunter Fahrzeuge wie der Mitsubishi iMIEV, Mercedes eVito und Tesla Model S, sowie einige mittelgroße Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Insgesamt wurde eine Gesamtstrecke von 4 347 194 km und 145 869 Fahrstunden aufgezeichnet [17].

Erweitert wurde der Datensatz durch aufgezeichnete Fahrten in Deutschland, der Schweiz und Italien. Diese umfassen zusätzlich ca. 3 950 km und eine gesamte zeitliche Dauer von 66 Stunden.

Zur Abbildung von extremen Fahrmanövern und hoher Maschinenbelastung werden von deutschen OEM eigene Fahrdaten auf dem Nürburgring zur Auslegung ihrer Maschinen verwendet [74], [169]. Im Rahmen dieser Arbeit wird hierzu die Nürburgringfahrt eines Porsche Taycan verwendet [170]. Eine weitere Quelle zur Fahrzyklenerstellung für hohe Maschinenbelastungen entspringt dem Projekt *Roborace* am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der TUM [171].

Durch die Verwendung der unterschiedlichen Datensätze werden neben unterschiedlichen Fahrverhalten wie Stadt-, Überland- oder Autobahnfahrten die Einflüsse der Fahrweise, der Fahrzeugklasse und der Antriebsart untersucht. Eine präzise Anforderungsanalyse des Nutzerverhaltens ist notwendig, weil die Anforderungen an die Maschine die Inputparameter der

Auslegung beeinflussen. Die Betriebspunkte der generierten Fahrverhalten bilden eine Forderung von beispielsweise Leistungsklasse, Spannungsniveau, maximaler Geschwindigkeit und erforderlichem Drehmoment für die Maschinenauslegung [151].

3.2.3 Fahrzykluserstellung

Die Erstellung der Fahrzyklen anhand realer Fahrdaten erfolgt im Rahmen dieser Arbeit in zwei Schritten. Zuerst werden die vorhandenen Fahrdaten analysiert und klassifiziert. Daraufhin wird anhand einer qualifizierten Datenbank der entsprechende Fahrzyklus generiert und bewertet. Dafür wird ein Filterverfahren festgelegt, weil die Qualität der in den Endgeräten verbauten Sensoren (vor allem GPS-Sensor im Stillstand) starkem Rauschen unterliegt. Zur besseren Vergleichbarkeit wird die Filtermethode verwendet, die als Grundlage in der Entwicklung des WLTP verwendet wurde – der Glättungsalgorithmus T4253H der IBM SPSS Software [115], [172].

Die Umsetzung der aufgeführten Schritte zur Klassifizierung und Aufbereitung der Fahrdaten wurde daraufhin in Matlab® mit graphischer Oberfläche (Anhang C.1) umgesetzt [139], [173]. Dies ermöglicht es dem Anwender, mehrere reale Datensätze oder konventionelle Fahrzyklen einzulesen, die Fahrdaten zu filtern, klassifizieren und durch die Aufbereitung der Geschwindigkeit-, Beschleunigungs- und Höhenverlauf sowie der Kartenaufzeichnung mit Here-Maps auf optische Auffälligkeiten zu prüfen [139].

Als Vergleich der im Stand der Wissenschaft und Technik vorgestellten Methodiken zur Erstellung von Fahrzyklen wurde die Qualitätskennzahl von IMMEL [174] herangezogen. Diese beruht in der Definition einer Qualitätskennzahl Q , die die relativen Abweichungen sowie euklidische Distanz einer Häufigkeitsverteilung einsetzt [174]. Dabei ist die Qualitätskennzahl unter anderem von der Dauer des Fahrzyklus' abhängig. Die Untersuchung der optimalen Dauer der Fahrzyklen für die vorliegenden Fahrdaten ergab, dass die Verbesserung der Qualitätskennzahl ab einer Dauer von ca. 1 750 Sekunden abnimmt. Somit wurde im weiteren Verlauf eine Zyklusdauer von ca. 1 800 Sekunden mit einer Toleranz von 250 Sekunden definiert.

Die Generierung von Fahrzyklen mittels Mikrotrips erfolgt zunächst in der Wahl der Kriterien zur Auftrennung der Fahrdaten. In dieser Arbeit wird eine Auftrennung der Fahrdaten bei Beschleunigung $a = 0 \text{ m/s}^2$ sowie einer festgelegten Trip-Dauer gewählt. Dafür werden die verwendeten Datensätze nacheinander in die gewünschten Abschnitte unterteilt und in einer Gesamtmatrix mit Anfangs- und Startgeschwindigkeit und -beschleunigung gespeichert und zur Generierung zufällig ausgewählt. Das in dieser Arbeit entwickelte und zur Generierung der Fahrzyklen mit Hilfe von Mikrotrips eingesetzte Tool ist von KALT [139] Open-Source veröffentlicht.

Um die Repräsentativität der verwendeten Daten zu gewährleisten und einen Informationsverlust durch eine spezifische Auswahl einzelner Datensätze zu vermeiden, wurde das Vorgehen nach WANG [165] eingesetzt und angepasst [173]. Dieses Vorgehen bestimmt die benötigte Menge an Fahrdaten anhand einer Gauss'schen Häufigkeitsverteilung der Geschwindigkeit der ersten Fahrt. In jedem Schritt des Vorgehens werden weitere Fahrdaten hinzugefügt, dieser Prozess wiederholt und mittels der Kullback-Liebler-Divergenz (KL-Divergenz) verglichen. Dieser Wert beschreibt die Ähnlichkeiten der bestimmten Kerndichten und nähert sich bei steigender Ähnlichkeit dem Wert Null an. Nach WANG [165] ist eine ausreichende Menge an Fahrdaten vorhanden, wenn eine Ähnlichkeit von $\epsilon = 10^{-4}$ erreicht wird. Eine Problematik dieses Vorgehens

ist, dass ein weiteres Hinzufügen zusätzlicher Fahrdaten nach erstmaliger Unterschreitung dieses Wertes nicht berücksichtigt wird, obwohl er im nächsten Schritt wiederum überschritten werden kann und ein Schwanken um den Grenzwert ϵ entsteht [165]. Aus diesem Grund wurde mit Hilfe der Statistikberatung der TUM [175] die Methodik in zwei Punkten optimiert. Erstens wird nicht die erste Fahrt der Datenbank, sondern eine zufällige Fahrt innerhalb der Datenbank als Startpunkt gewählt, um eine erhöhte Ähnlichkeit einer Folgefahrt auszuschließen. Zweitens wurde in jedem Schritt des Vorgehens nicht eine weitere Fahrt, sondern mehrere zufällig gewählte Fahrten hinzugefügt und die Kullback-Liebler-Divergenz gebildet. Dadurch kann eine deutlich gleichmäßigere Annäherung an den Grenzwert erfolgen (Anhang C.2 und Anhang C.15).

Es werden im Rahmen dieser Arbeit folgende Nutzerverhalten definiert und daraus repräsentative Fahrzyklen generiert bzw. verwendet – Stadtzyklus, Landzyklus, Autobahnzyklus, Gesamtzyklus (Stadt, Land, Autobahn), WLTP (Vergleichszyklus), Roborace- bzw. Nürburgringzyklus (Abdeckung extremer Anforderungen an den Antriebsstrang), Lastzyklus und Allrounder (WLTP, Rennzyklus, Lastzyklus).

Um die Anforderungen des Fahrzyklus‘ an die Eigenschaften der eingesetzten Fahrzeuge anzupassen, wurden drei Fahrzeugklassen definiert (Tabelle 3.7). Diese werden im weiteren Verlauf dazu verwendet, Fahrzyklen anhand realer Fahrten unter Berücksichtigung individueller Beschleunigungs- und Geschwindigkeitscharakteristika zu generieren.

Tabelle 3.7: Verwendete Fahrzeuge für die Berücksichtigung in der Fahrzyklenerstellung.

Parameter	Einheit	Kleinstfahrzeug [176]	Kompaktklasse [177]	Mittelklasse [178]
Maximale Fahrzeuggeschwindigkeit	km/h	130	150	225
Fahrzeugleistung	kW	60	125	225
Beschleunigung	m/s ²	2,25	3,86	4,96

Dabei wird der Volkswagen e-up! als Kleinstfahrzeug, der BMW i3 (2016er Version, 60 Ah) als Kleinfahrzeug bzw. Kompaktklasse und der Tesla Model 3 (2018er Version) als repräsentatives Fahrzeug der Mittelklasse gewählt.

3.2.4 Längsdynamiksimulation

Neben der Quer- (Y-Achse) und Vertikaldynamik (Z-Achse), stellt die Längsdynamik (X-Achse) die dritte Säule zur Beschreibung der Bewegungszustände in der Fahrdynamik dar. Sie stellt für die Untersuchungen in dieser Arbeit den wesentlichen Schwerpunkt dar, weil Fahrzyklen zur Verbrauchs- bzw. Effizienzbestimmung längsdynamische Vorgänge abbilden. Ein Längsdynamik-Modell kann zur Abbildung des Fahrverhaltens, der Fahrleistung und des Verbrauchs verwendet werden und bietet eine Methode zur Auslegung und Optimierung elektrischer Antriebsstränge. Dadurch können Belastungsgrößen wie die Drehzahl und das Drehmoment der elektrischen Maschine ausgelegt werden [179]. So kann für ein spezifisches Nutzerverhalten und Fahrzeug die Antriebsleistung zur Fortbewegung sowie das zugehörige Drehmoment bestimmt werden [180]. Dabei wird das Drehmoment über ein Getriebe an die elektrische Maschine weitergeleitet, die wiederum über eine Leistungselektronik mit der Traktionsbatterie verbunden ist [181].

Das Hauptmerkmal liegt auf den Auslegungsparametern der elektrischen Maschine. Die Batterie wird als Blackbox in Form der variablen Angabe der Batteriekapazität, das Getriebe wird über die variable Angabe der Getriebeübersetzung zwischen $i_G = 2 - 10$ dargestellt, weil diese bei vorhandenen Elektrofahrzeugen typischerweise auftreten [19]. Dabei wird zunächst mit einer einzelnen elektrischen Maschine im Antriebsstrang gerechnet. In einem letzten Schritt kann aufbauend auf ANGERER [31] eine Integration von bis zu drei elektrischen Maschinen untersucht werden. Dieser Ansatz wird jedoch in den Ergebnissen dieser Arbeit nicht aufgeführt.

Die erstellten Fahrzyklen werden im weiteren Verlauf der Methodik als Inputparameter für die LDS verwendet. Diese können anhand spezifischer Kennwerte, das Maschinenmoment sowie die zugehörige Maschinendrehzahl und Effizienz, sowie daraus den Energieverbrauch und die theoretische Reichweite des Fahrzeuges bestimmen. Das zur Abbildung dieser Vorgänge angewandte Längsdynamiktool wird in Anhang C.9 näher erläutert und basiert auf den Grundlagen aus LIEBL [74] und MITSCHKE [182]. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf ein am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der TUM bestehendes Matlab[®]-Tool zurückgegriffen [150]. Dafür werden drei Fahrzeugklassen zur Bewertung der Fahrzyklen herangezogen (Tabelle 3.8).

Tabelle 3.8: Verwendete Fahrzeuge für die Längsdynamiksimulation.

Parameter	Einheit	VW e-up!	BMW i3	Tesla Model 3
Fahrzeugmasse	kg	1160 [183]	1640 [184]	1.847 [185]
c_w	-	0,31 [186]	0,3 [187]	0,23 [185]
Stirnfläche	m ²	2,08 [188]	2,38 [187]	2,22 [189]
Reifenradius	m	0,2978 [190]	0,3498 [187]	0,3344 [185]
Batteriekapazität	kWh	32,3 [186]	22 [191]	75 [185]
Getriebeübersetzung	-	8,16 [192]	9,7 [193]	9,73 [194]
Wirkungsgrad EM - Reifen	%	95 (Annahme)	95 (Annahme)	95 (Annahme)

Die Inputparameter der LDS sind dabei die festgelegte Umgebungsparameter, die Fahrzeugparameter und der jeweilige Fahrzyklus des spezifischen Anwendungsfalls, sowie aus der Maschinenauslegung die Dimensionierungen (Abmessungen/Volumen) der ausgelegten elektrischen Maschine. Als Output liefert die LDS die Effizienz im Fahrzyklus, den Energieverbrauch sowie die Reichweite des Fahrzeuges und trägt somit die Zielgröße *Effizienz* zum Optimierungsalgorithmus bei.

3.2.5 Kostenmodellierung

Das Modell zur Kostenberechnung der elektrischen Maschine basiert auf der Implementierung von ANGERER [31]. Die Kosten der EM können mit Hilfe eines validierten Ersatzmodells berechnet werden und umfassen die gesamten Produktionskosten (Fertigungs-, Material- und Anbauteilkosten) [142]. Es werden zur Ableitung einer Prototypen-, Serien- und Massenproduktion drei virtuelle Produktionsszenarien betrachtet und mit realen Produktionswerten von KAMPKER [195] validiert. Alle Kosten werden separat für eine ASM und eine PSM bestimmt

und berücksichtigen keine Ausgaben für Forschung und Entwicklung oder andere Gemeinkosten [31].

Die Ableitung der Fertigungskosten basiert auf einer virtuellen Produktionslinie. Sie werden in einem Greenfield-Ansatz berechnet, der Kapitalbindung und Gebäude, Ausrüstung (einschließlich Werkzeuge und Maschinen), Arbeitskosten auf der Grundlage verschiedener Schichtmodelle, Energie und Wartung umfasst [142]. Die Fertigungskosten werden in Abhängigkeit des Standortes (Deutschland, USA, Rumänien und Tschechien) sowie der gewählten Stückzahl berechnet. Dabei wird für jeden Standort der Stundenlohn in €/h sowie die Kosten für die Bebauung in €/m² berücksichtigt [142]. Es werden der Abschreibungszeitraum für Gebäude und Maschinen, Investitionskosten für Anlagen, die Arbeitstage pro Jahr, Schichten pro Tag, Stunden pro Schicht, die erforderliche Hallenfläche, der Kapitalzinssatz sowie der Energiekostenanteil in Abhängigkeit von der Stückzahl (2 000 bis 500 000 Stück) berechnet.

Die Materialkosten werden auf Grundlage der Komponentengewichte berechnet und umfassen dabei vor allem Elektrolech [195], Kupferdraht [195], Aluminium sowie Stahllegierungen [196] und Magnetwerkstoff [197]. Für die Magnetpreise kann zwischen stabilem (Durchschnittskosten), sinkendem (niedrigsten Materialkosten des Preistrends für Neodym seit 2010) oder steigendem (hohe Kosten aus Handelsbeschränkungen oder Monopolpositionen einzelner Länder [198]) Preisniveau (€/kg) gewählt werden [199]. Falls nicht anders vermerkt, wird in den Ergebnissen dieser Arbeit ein stabiles Preisniveau gewählt. Die Kosten für Kleber, Harz sowie Isoliermaterial werden mit der Nennleistung skaliert [195]. Zusätzlich werden Materialverluste durch Stanzen und spanende Bearbeitung berücksichtigt [195], [199], [200]. Zudem wird ein Stapelfaktor von 0,96 nach DIN46400 definiert [31]. Die Anbauteile umfassen jegliche stückzahlabhängigen Resolver (Rotorlagesensor), Stecker, NTC-Thermistoren (Temperatursensoren), Schrauben, Lager und kleinere Anbauteile [195].

Die Kostenmodellierung erhält als Input von der Maschinenauslegung die Dimensionierung der Bauteile sowie die Nennwerte der jeweiligen Maschine. Als Output trägt die Kostenmodellierung je Iteration die Zielgröße *Kosten* zur Optimierung bei.

4 Validierung

Die Validierung der Fahrzyklusauslegung sowie der Auslegungsmethodik wird in den folgenden Unterkapiteln vorgestellt. Dabei wird zunächst auf die Fahrzyklusgenerierung und daraufhin auf die Maschinenauslegungsmethodik eingegangen.

4.1 Verifizierung der Fahrzyklen auf dem Rollenprüfstand

Zur Verifizierung der Fahrzyklusauslegung wurde eine Fahrbarkeitsprüfung am Rollenprüfstand durchgeführt. Dadurch wird gezeigt, dass ein ausgelegter Fahrzyklus für ein bestimmtes Fahrzeug in der Realität die geforderten Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsraten sowie die Dynamik des Zyklus aufbringen kann. Dafür wird ein Ein-Achs-Rollenprüfstand mit ca. 2 m Rollendurchmesser am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der TUM verwendet. Die nicht angetriebene Achse des Versuchsfahrzeuges wird über eine Fixierung der Reifen eingespannt. Als Versuchsfahrzeug dient ein VW eGolf mit Frontantrieb, dessen maximale Beschleunigung bei $a_{beschl,max} = 3 \text{ m/s}^2$ und Höchstgeschwindigkeit bei $v_{max} = 140 \text{ km/h}$ liegt [201]. Durch diese Versuchsanordnung ergibt sich eine Einschränkung, weil Bremsungen, die nahe einer Gefahrenbremsung liegen oder eine ABS-Regelung erfordern, auf dem Rollenprüfstand nicht getestet werden können.

Die Folge der Geschwindigkeitsvorgabe durch den Fahrzyklus erfolgt über die Regelung eines Pedalroboters, der das Gas- und Bremspedal betätigt. Zur Regelung des Pedalroboters wird ein bestehendes Simulink-Modell genutzt, dessen Regelung aus einem PI-Regler [202]. Aufgrund der Antriebsgrenzwerte des vorhandenen Versuchsfahrzeuges werden nur Zyklen für die Fahrzeugklasse *Kleinwagen BEV* und *Kompaktklasse BEV* getestet. Eine Übersicht der zur Validierung eingesetzten Fahrzyklen ist in Tabelle 4.1 ersichtlich.

Tabelle 4.1: Übersicht der Validierungszyklen.

Fahrzeugklasse	Stadtzyklus 600 s	Überland- zyklus 600 s	Autobahn- zyklus 600 s	Gesamtzyklus 900 s	Lastzyklus 450 s
Kleinwagen BEV $a_{max} < 1.5 \text{ m/s}^2$	Anhang D.1	Anhang D.2	Anhang D.3	Anhang D.4	Anhang D.5
Kompaktklasse BEV $a_{max} < 2.9 \text{ m/s}^2$	Anhang D.6 Anhang D.7	Anhang D.8	Anhang D.9	Anhang D.10	Anhang D.11

Die beiden untersuchten Fahrzeugklassen unterscheiden sich dabei vor allem in der maximalen Beschleunigung. Für die kleinere Fahrzeugklasse wird diese mit $a_{max} = 1,5 \text{ m/s}^2$ angesetzt, sodass bei Abfahren eines solchen Zyklus' das Versuchsfahrzeug nur im unteren Bereich der Beanspruchung betrieben wird. Für die zweite Reihe der Zyklen werden die Grenzen des Versuchsfahrzeuges hinsichtlich der Beschleunigungsvorgabe ausgereizt. Hierfür wird eine maximale Zyklusbeschleunigung $a_{max} = 2,9 \text{ m/s}^2$ angesetzt. Für die beiden untersuchten Fahrzeugklassen werden isolierte Stadt-, Land- und Autobahnzyklen getestet. In einem komprimierten Gesamtzyklus können anschließend alle Bereiche an einem Stück abgefahren werden. Die maximalen Verzögerungswerte sind auf $a_{brems,max} = -3 \text{ m/s}^2$ begrenzt.

Es kann festgehalten werden, dass die prädierte maximal mögliche Beschleunigungsgrenze durch die Zykluskonstruktion in jedem Punkt eingehalten wird und diese mit den realen Grenzwerten des Versuchsfahrzeuges übereinstimmt. Auch die geforderte Dynamik des Fahrzyklus' kann bei einem direkten Abfahren eingehalten werden (Anhang D).

4.2 Maschinenauslegungsmethodik

Die Validierung der Auslegungsmethodik wird in zwei Schritten auf der Grundlage der verfügbaren Maschinendaten durchgeführt. Im ersten Schritt wird die Validierung der Hauptabmessungen der aktiven Teile mit realen Maschinen verschiedener Hersteller durchgeführt. Zu diesem Zweck werden die Konstruktionswerte der verfügbaren Datenblätter als Eingabeparameter verwendet und die Ergebnisse dann mit den bekannten Abmessungen verglichen. Der zweite Schritt ist die Validierung der elektromagnetischen Parameter.

4.2.1 Validierung der Hauptabmessungen

Die Validierung wird aus den Datenblättern der Hersteller und aus Benchmarking-Berichten abgeleitet. Der gültige Wertebereich ist so gewählt, dass hoch ausgelastete Maschinen im Antriebsstrang eines BEV simuliert werden können.

Zur Validierung des PSM-Modellteils wurden Maschinendaten der Hersteller für den BMW i3 [58], [68], [75], [203], [204], Nissan Leaf [58], [155] und VW e-Golf [58], [69] und Maschinen der Firma BRUSA [205] verwendet. Zur Validierung des ASM-Modellteils wurden Maschinendaten der Hersteller für den Audi e-tron [56], [206], Tesla Model S [57], [59], [75], Renault Twizy [58], [60] und ein Berechnungsbeispiel von Müller [13], [36], [207] verwendet. Die Eingangsparameter sind in Anhang B aufgeführt. Die folgenden Unterabschnitte veranschaulichen die Ergebnisse aus KALT [30] der Maschinendaten, die für die Validierung der ASM- und PSM-Modellierung verwendet wurden.

BMW i3 (PSM)

Die Tabelle 4.2 zeigt die Ergebnisse der Validierung des Entwurfsprozesses für die EM des BMW i3. Die Entwurfsergebnisse weisen eine maximale Abweichung von 1,02 % im Vergleich zu den Abmessungen der Referenzmaschine auf. Diese geringe Abweichung ist ein Indiz für die richtige Wahl der Eingangsgrößen sowie die für die Wicklung entscheidende Nutenzahl im Stator.

Tabelle 4.2: Ergebnisse Validierung Hauptabmessungen – BMW i3 [58], [68], [89], [203].

	Referenzmaschine	Entwurf	Relative Abweichung
Statordurchmesser außen	242,1 mm	242,3 mm	+0,08 %
Statordurchmesser innen	180,0 mm	180,2 mm	+0,11 %
Rotordurchmesser außen	178,6 mm	178,7 mm	+0,06 %
Rotordurchmesser innen	59 mm	59,6 mm	+1,02 %
Blechpaketlänge	132,3 mm	131,1 mm	-0,91 %
Luftspaltlänge	0,7 mm	0,7 mm	0,00 %
Bohrungsvolumen	3366,6 cm ³	3378,4 cm ³	+0,35 %

Nissan Leaf (PSM)

Die Tabelle 4.3 zeigt die Ergebnisse der Validierung des Entwurfsprozesses für die EM des Nissan Leafs. Die Auslegung einer Maschine mit den Nenndaten des Nissan Leaf führt zu deutlichen Abweichungen bei den Abmessungen; sie werden durchschnittlich um ca. 50 % zu groß berechnet und das Volumen der Maschine weicht um über 200 % von dem der realen Maschine ab. Der Grund dieser Abweichung liegt in den zur Auslegung verwendeten Nenndaten, weil diese höchstwahrscheinlich den Maximaldaten (Leistung und Drehmoment) entsprechen, sie aber in Herstellerdatenblättern als Nennwerte deklariert sind [58], [164]. Ein Vergleich mit Bohrungsvolumina und Drehmomenten der restlichen untersuchten Maschinen unterstützt die These der Maximaldaten.

Tabelle 4.3: Ergebnisse Validierung Hauptabmessungen – Nissan Leaf [58], [164].

	Referenzmaschine	Entwurf	Relative Abweichung
Statordurchmesser außen	198,1 mm	266,5 mm	+ 34,53 %
Statordurchmesser innen	131,0 mm	190,5 mm	+ 45,42 %
Rotordurchmesser außen	130,0 mm	189,1 mm	+ 45,46 %
Rotordurchmesser innen	43,0 mm	63,0 mm	+ 46,51 %
Blechpaketlänge	151,4 mm	233,2 mm	+ 54,03 %
Luftspaltlänge	1,0 mm	0,7 mm	- 30,00 %
Bohrungsvolumen	2040,6 cm ³	6269,8 cm ³	+ 207,25 %

In Anbetracht der Proportionalität zwischen Drehmoment und Bohrungsvolumen und dem technologischen Fortschritt im Bereich der elektrischen Maschinen, erscheint es nicht möglich, bei dem deutlich erhöhten Drehmoment, eine Halbierung des Durchmessers zu erreichen.

VW e-Golf (PSM)

Die Tabelle 4.4 zeigt die Ergebnisse der Validierung des Entwurfsprozesses für die EM des VW e-Golf. Bei der Anwendung des Modells mit Nenndaten des VW e-Golf ergibt sich eine maximale Abweichung von 5,57 %. Die Auslegung des Rotordurchmessers weist eine Abweichung von 1,33 % auf. Demnach resultiert die Abweichung des Statordurchmessers sowie der Blechlänge aus der implementierten Wicklung im Stator. Bei dieser handelt es sich um eine Hair-Pin Wicklung, die durch den Hersteller nicht weiter definiert ist.

Tabelle 4.4: Ergebnisse Validierung Hauptabmessungen – VW e-Golf [58], [69].

	Referenzmaschine	Entwurf	Relative Abweichung
Statordurchmesser außen	220,0 mm	209,7 mm	- 4,68 %
Statordurchmesser innen	k.A.	149,3 mm	k.A.
Rotordurchmesser außen	150,0 mm	148,0 mm	-1,33 %
Rotordurchmesser innen	50,0 mm	49,3 mm	- 1,40 %
Blechpaketlänge	210,0 mm	221,7 mm	+ 5,57 %
Luftspaltlänge	k.A.	0,6 mm	k.A.
Bohrungsvolumen	3760,7 cm ³	3636,3 cm ³	- 3,31 %

BRUSA (PSM)

Um den unteren Leistungsbereich abzudecken, wird für die Auslegung der PSM eine Maschine der Firma BRUSA [205] herangezogen. Dies soll zur Überprüfung dienen, ob die vorgestellte Auslegungsmethodik leistungsmäßig kleine Maschinen valide auslegen kann. Die Tabelle 4.5 zeigt die Ergebnisse der Validierung des Entwurfsprozesses für die Maschine der Firma BRUSA. Die maximale Abweichung beträgt unter 2 %.

Tabelle 4.5: Ergebnisse Validierung Hauptabmessungen – BRUSA IPM1-61.7.04.

	Referenzmaschine	Entwurf	Relative Abweichung
Statordurchmesser außen	240,0 mm	244,7 mm	+ 1,96 %
Statordurchmesser innen	k.A.	166,3 mm	k.A.
Rotordurchmesser außen	165,0 mm	165,2 mm	- 0,12 %
Rotordurchmesser innen	k.A.	55,1 mm	k.A.
Blechpaketlänge	41 mm	40,2 mm	- 1,95 %
Luftspaltlänge	k.A.	0,6 mm	k.A.
Bohrungsvolumen	887,3 cm ³	899,1 cm ³	+ 1,33 %

Audi e-tron (ASM)

Die Tabelle 4.6 zeigt die Ergebnisse der Validierung des Entwurfsprozesses für den Audi e-tron. Die Entwurfsergebnisse für den Statoraußen-, Statorinnen-, Rotoraußendurchmesser und die Blechpaketlänge weisen mit einer Abweichung von weniger als 2 % eine geringe Abweichung zu den Werten der Referenzmaschine auf. Die Luftspaltlänge kann exakt ermittelt werden. Das Bohrungsvolumen hingegen wurde für den Audi e-tron zu klein berechnet, weil der Statorinnendurchmesser ebenfalls kleiner ausfällt. Die Abweichung von ca. 4 % beim Rotorinnendurchmesser entsteht durch die unbekanntenen Werte der Referenzmaschine für die Induktionen im Rotor. Diese können durch Anpassung der Rotorrückeninduktion und der Rotorzahninduktion verringert werden.

Tabelle 4.6: Ergebnisse Validierung Hauptabmessungen – Audi e-tron [56], [206].

	Referenzmaschine	Entwurf	Relative Abweichung
Statordurchmesser außen	245,0 mm	244,5 mm	-0,20 %
Statordurchmesser innen	157,2 mm	154,5 mm	-1,72 %
Rotordurchmesser außen	156,0 mm	153,2 mm	-1,79 %
Rotordurchmesser innen	70,0 mm	66,8 mm	-4,57 %
Blechpaketlänge	120,0 mm	120,1 mm	+0,08 %
Luftspaltlänge	0,6 mm	0,6 mm	0,00 %
Bohrungsvolumen	2329,0 cm ³	2250,3 cm ³	-3,38 %

Tesla Model S (ASM)

Die Tabelle 4.7 zeigt die Ergebnisse der Validierung des Entwurfsprozesses für den Model S. Abgesehen von der Berechnung des Rotorinnendurchmessers und der Luftspaltlänge beträgt die maximale Abweichung 1 %.

Tabelle 4.7: Ergebnisse Validierung Hauptabmessungen – Tesla Model S [57], [59], [75].

	Referenzmaschine	Entwurf	Relative Abweichung
Statordurchmesser außen	254,0 mm	255,6 mm	+0,63 %
Statordurchmesser innen	157,0 mm	157,1 mm	+0,06 %
Rotordurchmesser außen	155,8 mm	155,7 mm	-0,06 %
Rotordurchmesser innen	50,0 mm	54,5 mm	+9,0 %
Blechpaketlänge	152,6 mm	152,8 mm	+0,13 %
Luftspaltlänge	0,6 mm	0,7 mm	+16,67 %
Bohrungsvolumen	2954,2 cm ³	2961,9 cm ³	+0,26 %

Vor allem die das Volumen der Maschine bestimmenden Abmessungen werden annähernd genau (0,26 % Abweichung von der Referenzmaschine) berechnet. Die relative Abweichung der Luftspaltlänge von 16,67 % kann zunächst nicht verbessert werden, weil die Luftspaltlänge im Entwurfsprozess einzig von der Polpaarzahl, der Nennleistung und einem empirischen Faktor abhängt.

Renault Twizy

Die Tabelle 4.8 zeigt die Ergebnisse der Validierung des Entwurfsprozesses für den Renault Twizy. Die Ergebnisse des Entwurfs für den Renault Twizy decken sich weitestgehend mit den Daten der Referenzmaschine, bei einer maximalen Abweichung von weniger als 3 %. Durch die kleineren Werte für die Blechpaketlänge und den Rotoraußendurchmesser wird auch das Bohrungsvolumen geringfügig zu klein (1,65 % Abweichung von der Referenzmaschine) berechnet. Der Rotorinnendurchmesser und die Luftspaltlänge können aufgrund fehlender Vergleichsdaten der Referenzmaschine nicht verglichen werden.

Tabelle 4.8: Ergebnisse Validierung Hauptabmessungen – Renault Twizy [58], [75].

	Referenzmaschine	Entwurf	Relative Abweichung
Statoraußendurchmesser	200,0 mm	198,2 mm	-0,9 %
Statorinnendurchmesser	k.A.	124,7 mm	k.A.
Rotoraußendurchmesser	124,0 mm	123,8 mm	-0,16 %
Rotorinnendurchmesser	k.A.	53,3 mm	k.A.
Blechpaketlänge	120,0 mm	116,7 mm	-2,75 %
Luftspaltlänge	k.A.	0,4 mm	k.A.
Bohrungsvolumen	1449,2 cm ³	1425,3 cm ³	-1,65 %

Berechnungsbeispiel nach MÜLLER

Tabelle 4.9 zeigt die Ergebnisse der Validierung des Beispiels von MÜLLER [13], [36], [207].

Tabelle 4.9: Ergebnisse Validierung Hauptabmessungen – MÜLLER [13], [36], [207].

	Referenzmaschine	Entwurf	Relative Abweichung
Statoraußendurchmesser	160,0 mm	159,3 mm	-0,44 %
Statorinnendurchmesser	99,0 mm	99,3 mm	+0,30 %
Rotoraußendurchmesser	98,3 mm	98,7 mm	+0,41 %
Rotorinnendurchmesser	35,0 mm	36,1 mm	+3,14 %
Blechpaketlänge	112,3 mm	112,4 mm	+0,09 %
Luftspaltlänge	0,35 mm	0,33 mm	-5,71 %
Bohrungsvolumen	864,5 cm ³	870,5 cm ³	+0,69 %

Die Entwurfsergebnisse sind mit einer maximalen Abweichung von ca. 5 % nah an den Werten der Referenzmaschine. Abgesehen von den Abweichungen der Luftspaltlänge und dem Rotorinnendurchmesser werden die Maschinenparameter annähernd genau berechnet.

4.2.2 Verifizierung der elektromagnetischen Kenngrößen

Da die charakteristischen Werte der Maschinen nicht von den Herstellern zur Verfügung gestellt werden, werden die Referenzergebnisse des Konstruktionsprozesses mit Hilfe des kommerziellen numerischen Berechnungsprogramms *RMxpvt* von *Ansys* generiert, indem die Maschinen mittels der Ergebnisse des Auslegungsprozesses im Programm *RMxpvt* nachgebildet und anschließend berechnet werden. Zuerst erfolgt erneut die Prüfung der Implementierung anhand des theoretischen Berechnungsbeispiels von MÜLLER [207]. Die Tabelle 4.10 zeigt die beispielhaften Ergebnisse der Validierung der Eingangsparameter für die Aufzeichnungen von MÜLLER [207].

Bis auf die Abweichung des Magnetisierungsstroms und der Streuinduktivität des Stators, sind die elektromagnetischen Kenngrößen des Entwurfs mit einer maximalen Abweichung von 5 % gering im Vergleich zur Referenzmaschine. Vor allem die Induktionen weisen eine gute Übereinstimmung auf, wobei die Widerstände hingegen zu maximal 5% abweichen. Die Abweichung von ca. 11 % beim Magnetisierungsstrom resultiert aus dem verwendeten Eisenmaterial. Im Referenzbeispiel werden lediglich generische Materialdaten verwendet, die zwar ähnlich zum im Berechnungstool verwendeten Eisenmaterial M800-50A sind, jedoch Unterschiede in der BH-Kurve aufweisen. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Werte für die Feldstärken, die magnetischen Spannungsabfälle und die Durchflutung und somit auch der Magnetisierungsstrom weichen voneinander ab.

Vor allem die elektromagnetischen sowie betriebsrelevanten Parameter, wie der Magnetisierungsstrom, die gesättigte Hauptinduktivität und die Induktivitäten in den einzelnen Abschnitten des Magnetkreises, können mit annähernder Genauigkeit zu den vom *RMxpvt*-Berechnungsprogramm ermittelten Werten berechnet werden. Lediglich die Streuinduktivitäten und der Statorwiderstand weisen eine Abweichung in den berechneten Werten auf und sind im Vergleich zu den Werten der Referenzmaschinen zu groß berechnet.

Vor allem die Berechnung der Induktionen sowie der Strombelag (ca. 1 - 4 % Abweichung zur Referenzmaschine) sowie die gesättigte Hauptreaktanz können genau bestimmt werden. Größere Abweichungen treten in der Bestimmung des Magnetisierungsstromes sowie der Streuinduktivitäten (bis zu 14% Abweichung zur Referenzmaschine) auf, die primär durch die mittlere Wicklungslänge bestimmt werden.

Eine Verbesserung kann zukünftig anhand von detaillierteren Datensätzen von Referenzmaschinen in Bezug auf die Wicklungsköpfe sowie der Anpassung des relativen Streuleitwertes erzielt werden. Eine weitere Abweichung bilden die Eisenverluste, die nicht anhand des entwickelten Auslegungstools, sondern des Berechnungsprogramms *RMxpvt* in Bezug auf die spezifischen Eisenverluste des Elektroblechs modifiziert werden. Eine Validierung des gesamten Kennfeldbereiches konnte jedoch aufgrund fehlender Referenzdaten nicht durchgeführt werden.

Tabelle 4.10: Ergebnisse Validierung Elektromagnetische Kenngrößen MÜLLER [207].

	Referenzmaschine	Entwurf	Relative Abweichung
Statorwiderstand	7,23 Ω	7,49 Ω	+3,60 %
Rotorwiderstand	6,70 Ω	7,04 Ω	+5,07 %
Magnetisierungsstrom	1,96 A	1,74 A	-11,22 %
Streuinduktivität Stator	22,03 mH	25,1 mH	+13,94 %
Streuinduktivität Rotor	23,65 mH	23,9 mH	+1,06 %
Wicklungsfaktor Grundwelle	0,960	0,960	0,00 %
Induktion Statorzähne	1,68 T	1,67 T	-0,60 %
Induktion Rotorzähne	1,71 T	1,71 T	0,00 %
Induktion Statorrücken	1,68 T	1,70 T	+1,19 %
Induktion Rotorrücken	1,60 T	1,60 T	0,00 %
Luftspaltinduktion	0,835 T	0,805 T	-3,59 %
Strombelag	25,0 A/mm	24,13 A/mm	-3,48 %

5 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse der optimierten Maschinenauslegung vorgestellt. Abschließend werden die generierten Fahrzyklen für die definierten Nutzerverhalten und daraufhin die gewonnenen Erkenntnisse mit Hilfe des Optimierungsalgorithmus' aufgeführt.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Gesamtmethodik zur Auslegung elektrischer Maschinen wird um den Optimierungsalgorithmus NSGA II erweitert, sodass dieser die Variation der Eingangsparameter übernimmt. Die variierten Fahrzeug- sowie Maschinenparameter der in diesem Kapitel durchgeführten Untersuchungen sind in Abbildung 5.1 dargestellt.

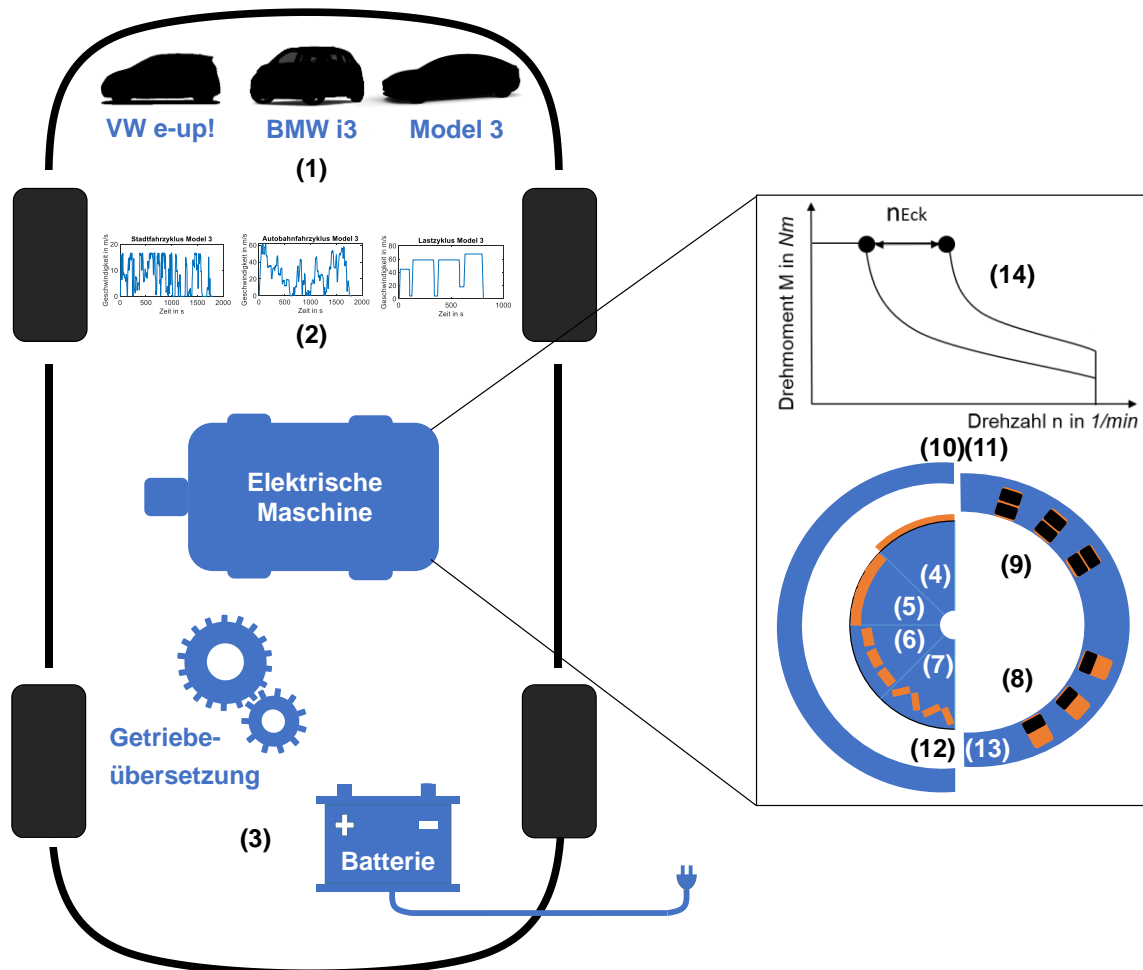


Abbildung 5.1: Variierte Eingangsparameter der Untersuchungen dieser Arbeit. (1) Fahrzeugklasse (VW e-up!, BMW i3, Tesla Model 3), (2) Nutzerverhalten (reale und standardisierte Fahrzyklen), (3) Gesamtantriebsstrang (Batteriekapazität und Getriebeübersetzung), (4) Oberflächenmagnete, (5) eingelassene Magnetanordnung, (6) tangentielle Magnetanordnung, (7) V-förmig Magnetanordnung, (8) Einschichtwicklung, (9) Zweischichtwicklung, (10) Flüssigkühlung, (11) Luftkühlung, (12) PSM, (13) ASM und (14) Verhältnis n_{Eck}/n_{max} .

Eine Sensitivitätsanalyse der Maschinenparameter anhand des Optimierungsalgorithmus‘ dient dazu, den Einfluss einzelner Maschinenparameter als Stellhebel der Auslegung zu identifizieren. Daraufhin werden alle auslegungsrelevanten Maschinenparameter für den Optimierungsalgorithmus als Freiheitsgrad übergeben und eine optimale Maschinenauslegung für die einzelnen generierten Nutzerverhalten angestrebt. In einem letzten Schritt wird der Fokus auf den Gesamtantriebsstrang gelegt und neben der elektrischen Maschine auch die Batteriekapazität und Getriebeübersetzung im Antriebsstrang als Freiheitsgrad im Optimierungsalgorithmus gewählt. Eine Simulation des Optimierungsalgorithmus‘ mit ca. 100 Generationen und 100 Populationen dauert auf einem *Dell Latitude E5470* (Intel Core i7 Prozessor) ca. 46 Stunden.

5.1 Automatisierte Maschinenauslegungsmethodik

Die entwickelte Maschinenauslegungsmethodik optimiert und automatisiert die konventionelle Maschinenauslegung. In den folgenden Unterkapiteln werden die Möglichkeiten des entwickelten optimierten Maschinenauslegungstools sowie beispielhafte Ergebnisse des optimierten Statorentwurfs anhand Maschinendaten der betrachteten Fahrzeuge VW e-up!, BMW i3 sowie Tesla Model 3 dargestellt (Tabelle 5.1). Die Quellen sind hinter den jeweiligen Werten beigefügt. Mit * gekennzeichnete Parameter stellen eine Annahme dar, die anhand der optimierten Statorauslegung (Kapitel 3.1.2) generiert wurden.

Tabelle 5.1: Betrachtete Maschinendaten.

Parameter	Einheit	Kleinstfahrzeug (VW e-up!)	Kompaktklasse (BMW i3 (60Ah))	Mittelklasse (Tesla Model 3)
Maschinentyp	-	PSM [208] (eingelassen)	HSM [203] (tangential) [68]	PSM [209] (V-Form)
Nennleistung	kW	40*	75 [203]	124*
Maximalleistung	kW	60 [208]	125 [203]	190 [185]
Nenndrehzahl	1/min	2600 [208]	4800 [203]	5700 [209]
Nennspannung	V	418 [208]	360 [203]	400 [209]
Max. Drehzahl	1/min	10 000 [208]	11 400 [203]	17 900
Max. Drehmoment	Nm	210 [208]	250 [203]	380 [194]
Polpaarzahl	-	5 [208]	6 [68]	3 [58]
Strangzahl	-	3 [208]	3 [68]	3 [58]
Kühlungsart	-	Flüssig [208]	Flüssig [68]	Flüssig [209]
Wicklungstyp	-	Einschicht, Ganzloch*	Einschicht, Ganzloch [68]	Einschicht, Ganzloch [58]

Mit Hilfe des vorgestellten Maschinenauslegungstools, können eine Vielzahl an Untersuchungen für elektrische Maschinen durchgeführt werden. Zum einen dient das Tool der Wirkungsgradkennfelderstellung sowie der Analyse diverser Verlustarten (Berechnung nach Modellansatz Jordan). Zum anderen können mittels des optimierten Statorentwurfs (Kapitel 3.1.2), neuartige oder bereits bestehende Wicklungs- und Stator-Konfigurationen für spezifische Anwendungen analysiert werden. In Abbildung 5.2 sind die Wirkungsgradkennfelder unter Betrachtung der einzelnen Verlustarten für die BMW i3 Maschine dargestellt. Die Differenz zwischen den betrachteten Verlustarten und den Gesamtverlusten stellt die Zusatzverluste dar.

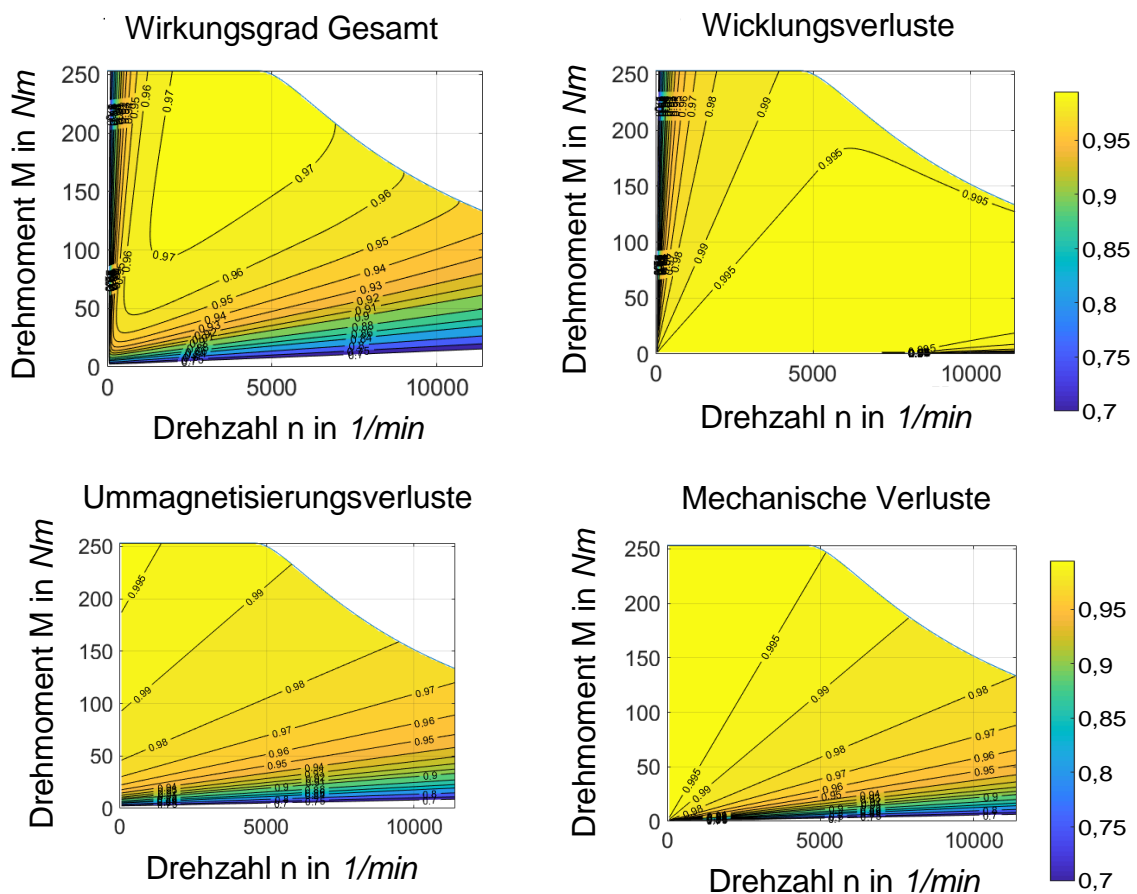


Abbildung 5.2: Wirkungsgradkennfelder einzelner Verlustarten für die BMW i3 Maschine im WLTP aus KALT [143].

Die Wicklungsverluste (Kupferverluste) der EM des BMW i3 treten vor allem in Bereichen mit niedrigem Drehmoment und hohen Drehzahlen auf. Die Ummagnetisierungsverluste (Eisenverluste) bzw. mechanischen Verluste treten meist im Grunddrehzahlbereich auf und befinden sich in Bereichen mit hohem Drehmoment und niedrigerer Drehzahl als die Kupferverluste und sind daher vor allem im Überlastbereich des Wirkungsgraddiagramms relevant.

Die dazugehörigen Betriebspunkte des BMW i3 im WLTP sind in Abbildung 5.3 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass sich die meisten Betriebspunkte des WLTP nicht in den Bereichen höchsten Wirkungsgrades (gelbe Bereiche) des Kennfeldes befinden. Im Hinblick auf die Gesamtverluste liegen die Bereiche mit dem höchsten Wirkungsgrad bei Betriebspunkten mit mittlerem bis hohem Drehmoment und mittlerer bis hoher Drehzahl. Um den Wirkungsgrad im Fahrzyklus für eine Autobahn oder einen gemischten Verkehr zu optimieren, müssen daher die

Eisen- und mechanischen Verluste reduziert werden. Für städtische Fahrzyklen sind die Kupferverluste die relevanteste Verlustart, die bei der Maschinenkonstruktion zu berücksichtigen ist.

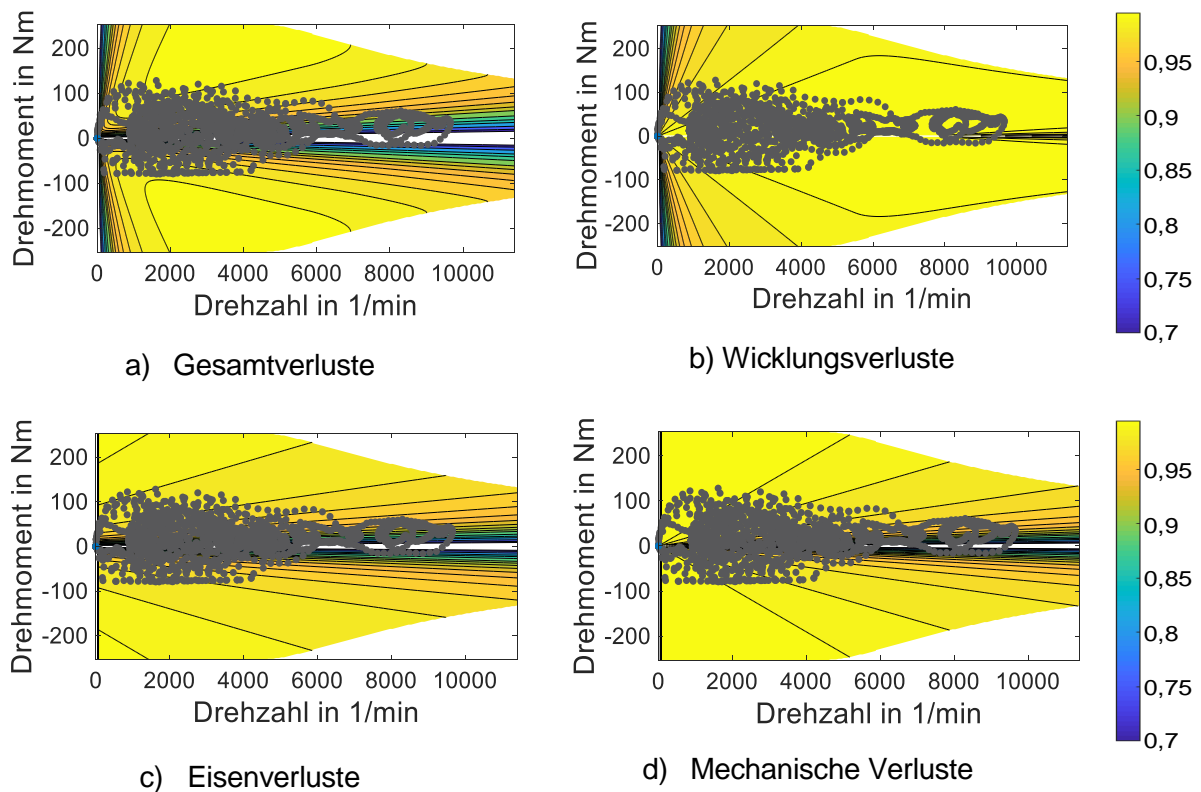


Abbildung 5.3: Wirkungsgradkennfeld und Betriebspunkte für die BMW i3 Maschine aus KALT [143].

Im Hinblick auf die Eisenverluste sollte die Qualität der integrierten Eisenbleche verbessert, sowie die Frequenz für das Magnetfeld an die bevorzugten Betriebspunkte verringert werden [13]. Im Hinblick auf die mechanischen Verluste sind die Reibung an der Oberfläche des Rotors und der Lager zu verbessern, sowie die Maximaldrehzahl zu reduzieren, zum Beispiel durch Änderung der Getriebeübersetzung [13].

5.2 Optimierter Statorwurf

Der optimierte Statorwurf stellt eine in dieser Arbeit entwickelte Methodik dar, mit der anhand des mathematischen Konzepts der Parameter Permutation ein optimale Statoranordnung (Wicklungsaufbau und Nutgeometrie) für eine spezifische Anwendung bestimmt werden kann. Der optimierte Statorwurf ist ebenfalls im Gesamtauslegungstool unter dem Open-Source Link [80], [126] in der Vorveröffentlichungsliste enthalten. Um exemplarische Ergebnisse aufzuzeigen, wird in diesem Kapitel eine Analyse der optimierten Statorauslegungsmethode anhand der elektrischen Maschine des BMW i3 vorgestellt, weil für diese Maschine nicht alle Maschinenparameter vom OEM veröffentlicht sind. Wie bereits zu Beginn von Kapitel 5.1 aufgeführt, handelt es sich bei der elektrischen Maschine des BMW i3 um eine PSM mit Reluktanzanteil, zweischichtigen tangentialen PMs, einer Flüssigkeitskühlung und einem Gesamtgewicht von ca. 55 kg [75].

Mit Hilfe des optimierten Statorentwurfs kann anhand der vorhandenen Daten, das reale Stator-design des BMW i3 ermittelt werden (Analyse 3, Kapitel 3.1.2). Nach dem Vorgehen aus Kapitel 3.1.2 kann ein Lösungsraum mit 76 möglichen Statorauslegungen bestimmt werden, der alle Eingangsparameter und Anforderungen für die betrachtete Anwendung erreicht. Der Wertebereich des Lösungsraums für einen Auszug verschiedener Maschinenparameter unter Verwendung der optimierten Statorauslegungsmethodik ist in Tabelle 5.2 dargestellt. Die vom OEM bekannten Werte des BMW i3 sind hervorgehoben [1], [75], [210], [211].

Tabelle 5.2: Parameterbereich optimierter Statorentwurf - BMW i3 (2016 model) [1], [75], [210], [211].

Maschinenparameter	Formelzeichen	BMW i3
Wicklungstyp	-	A ,B,C
Nutenzahl	N	[9, 18, 36, 45, 54, 63, 72]
Lochzahl	q	[0,25, 0,5, 1,25, 1, 1,5, 1,75, 2]
Spulenteilung/Spulenspannweite	y	[1,5, 3, 6 , 7,5, 9, 10,5, 12]
Sehnung	S	[3/3, 6/6 , 2/3, 4/6, 5/6, 1/0,75, 1/1,5, 3/3,75, 3/4,5, 4/4,5, 4/5,25, 5/5,25]
Anzahl Parallelschaltungen	a	[1, 2, 3, 4, 5, 6 , 12]
Außendurchmesser	$D_{a, \text{stator}}$	[240, ..., 242 , ..., 259] mm
Anzahl Leiter in Nut	Z_N	[2, ..., 64]
Strangzahl	w_{Str}	[18, ..., 36]
Nutquerschnitt	A_N	[75,21, ..., 827,29] mm ²
Leiterdurchmesser	d_l	[1,4, ..., 4,9] mm
Leiterquerschnitt	A_L	[1,57, ..., 18,80] mm ²
Nuthöhe	h_N	[20,4, ..., 30] mm
Obere Nutbreite	b_N	[4,35, ..., 52,58] mm
Wicklungsfaktor	ξ_{cz}	[0,83, ..., 1]

Die Nutzahl N und dementsprechend die Lochzahl q sind innerhalb des berechneten Bereiches hoch gewählt, was zu kleinen Streuinduktivitäten für ein hohes Spitzendrehmoment sowie zu einer reduzierten harmonischen Streuung führt [50]. Die Spulenteilung und der Sehnungsfaktor sind Mittelwerte im abgeleiteten Wertebereich der jeweiligen Parameterkombinationen, wobei die Anzahl der Parallelschaltungen pro Phase $a = 6$ für die gegebenen Eingangsparameter hoch gewählt wird. Die Verwendung von Parallelschaltungen ist notwendig, wenn eine große Nutzahl vorgegeben wird. Eine hohe Anzahl von Parallelschaltungen pro Phase führt zu kleinen Querschnittsflächen der Leiter. Dies führt zu einer Verringerung der Leiterhöhe in der Nut, d.h. die

Nuthöhe kann verringert werden, was zu einem verringerten Maschinendurchmesser führt. Außerdem kann der Leiterstrom I in Abhängigkeit von der Anzahl der Parallelschaltungen pro Phase a auf I/a reduziert werden. Dies führt zu einer beachtlichen Reduzierung der Stromverdrängung in jedem einzelnen Leiter [13].

Der Vergleich der Parameterbereiche des optimierten Statordesigns zeigt, dass alle bekannten Maschinenparameter in dem jeweiligen Wertebereich des Lösungsraums des optimierten Statorentwurfs enthalten sind. Die aus der optimierten Statorauslegungsmethode für den BMW i3 abgeleitete Lösungsraumtabelle mit 76 möglichen Parameterkombinationen kann durch Einfügen der bekannten Parameter des Datenblattes reduziert werden.

Die Auswahl der möglichen Parameterkombinationen mit dem entsprechenden Wicklungstyp und den entsprechenden Werten für die Nutanzahl, die Lochzahl, die Spulenteilung, die Sehnen und den Außendurchmesser führt zu einer verbleibenden Anzahl von 4 möglichen Statorausführungen.

Der Vergleich der verbleibenden Statorausführungen in Bezug auf beispielhafte Maschinenparameter ist in Abbildung 5.4 dargestellt, wobei das äußere Polygon des Radardiagramms einen hohen Parameterwert innerhalb des jeweiligen Parameterbereichs darstellt [80].

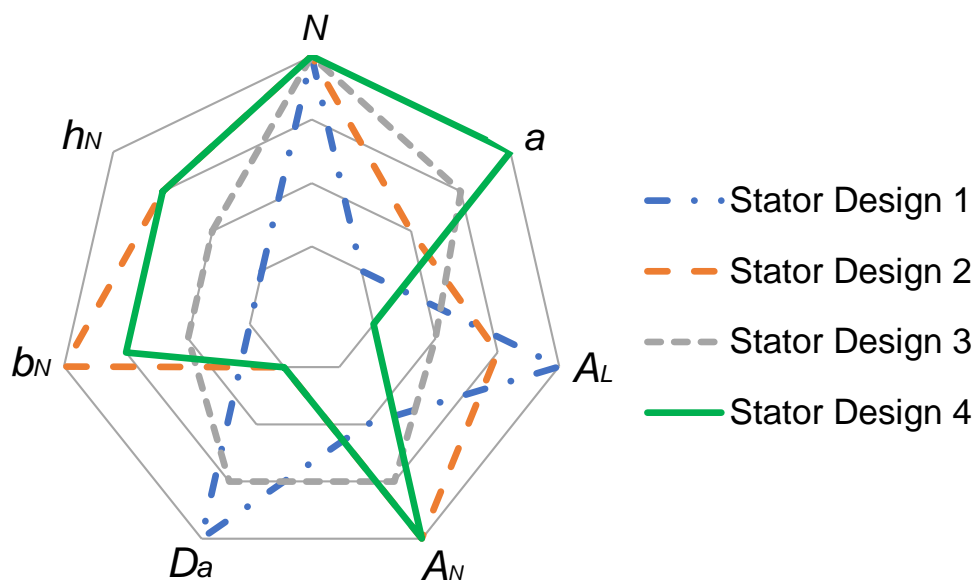


Abbildung 5.4: Vergleich potentieller Stator designs für den BMW i3 aus KALT [80].

Nach zusätzlichem Einfügen der Anzahl an Parallelschaltungen, stellt das Stator Design 4 die reale elektrische Maschine des BMW i3 dar. Das abgeleitete Stator design kann dann zur Vervollständigung der Datenblattinformationen für fehlende Maschinenparameter verwendet werden (Tabelle 5.3). Die Anzahl der Leiter pro Nut z_N ist aufgrund der hohen Anzahl von Nuten eher gering, was zu gleichmäßig verteilten Leitern und einem hohen Wicklungsfaktor von ca. $\xi_{cz} = 0,97$ führt. Lediglich durch die Optimierung der Wicklungsauslegung bei ansonsten gleichbleibenden Maschinen- sowie Fahrzeugparametern, ist mit Hilfe des optimierten Statorentwurfs eine Steigerung der Zykluseffizienz von 1% im WLTP möglich. Die entsprechende Reichweite kann ebenfalls um ca. 1% gesteigert werden. Im Bereich der Kosten kann eine Einsparung von 2% erzielt werden. Der Bauraum der Maschine kann um 1% verringert werden.

Tabelle 5.3: Abgeleitete Maschinenparameter des optimierten Statorentwurfs für den BMW i3.

Maschinenparameter	Formelzeichen	BMW i3 (2016 model)
Anzahl Leiter in Nut	Z_N	15
Strangzahl	w_{Str}	30
Nutquerschnitt	A_N	94,01 mm ²
Leiterdurchmesser	d_l	1,99 mm
Leiterquerschnitt	A_L	3,13 mm ²
Nuthöhe	h_N	20,68 mm
Obere Nutbreite	b_N	5,85 mm
Wicklungsfaktor	ξ_{cz}	0,97

In einem nächsten Schritt können mit dem abgeleiteten Stator-Design die Optimierungsziele der Konstrukteure der elektrischen Maschine für den BMW i3 ermittelt werden (Analyse 4, Kapitel 3.1.2).

Für den BMW i3 wurde eine einschichtige Ganzlochwicklung und eine trapezförmige Nutform gewählt [75]. Eine einschichtige Wicklung ermöglicht eine einfache Wicklungskonfiguration, einen höheren Wicklungsfaktor und eine reduzierte Nuthöhe, was zu einem reduzierten Gesamtdurchmesser der Maschine führt. Ein weiterer Vorteil dieses Wicklungstyps sind die geringeren Oberwellen und damit geringeren Rotorverluste und unerwünschten Geräuschemissionen. Allerdings führt dieser Wicklungstyp im Vergleich zu einer konzentrierten Wicklung zu einem größeren Wicklungsüberhang und höheren Produktionskosten [13]. Dies führt zu dem Schluss, dass die Konstrukteure der elektrischen Maschine des BMW i3 eine Reduzierung unerwünschter Oberwellen und damit der Geräuschemissionen und -verluste als eines der Hauptoptimierungsziele für diese Maschine gewählt haben. Ein hoher Wirkungsgrad und damit reduzierte Betriebskosten werden ebenfalls mit dem implementierten Stator-Design erreicht.

Eine ähnliche Wicklungskonfiguration kann auch mit der Implementierung des Stator-Designs 2 aus Abbildung 5.4 erreicht werden. Dieses Stator-Design bietet bei gleichbleibender Ausgangsleistung ein vergleichbares Maschinenverhalten im Betriebszustand wie die derzeitige implementierte Wicklungskonfiguration, jedoch mit einer deutlich geringeren Anzahl von Parallelschaltungen pro Phase a . Eine hohe Anzahl von Parallelschaltungen pro Phase hat günstige Auswirkungen auf die durch Fertigungstoleranzen verursachte Rotorexzentrität [212]. Zudem kann eine hohe Anzahl paralleler Schaltungen pro Phase verwendet werden, wenn eine nachträgliche Erhöhung der bestehenden Spannungsebene bei gleichbleibender Maschinenauslegung angestrebt wird und dies ggf. ein zukünftiges Antriebsstrangziel der BMW AG ist. Eine niedrigere Anzahl von Parallelschaltungen a ermöglicht jedoch günstigere Kühlbedingungen und reduziert die Gesamtkosten der Maschine sowie die Kupferverluste aufgrund einer geringeren Anzahl an Leitern [13]. Der größte Nachteil von Stator Design 2 gegenüber der implementierten Stator-Konfiguration ist eine größere Nutbreite und ein größerer Leiterquerschnitt.

Der optimierte Statorwurf stellt eine Methodik dar, die mit anhand physikalischer Grundlagen berechneten Maschinenparametern, das globale Optimum für eine spezifische Applikation bestimmen kann. In Bezug auf die Rechenzeit hat die optimierte Statorauslegungsmethode einen vernachlässigbaren Einfluss (Verringerte Rechenzeit um 4 %).

5.3 Generierte Fahrzyklen anhand realer Fahrdaten

Für den generierten Autobahnfahrzyklus treten differenzierte Geschwindigkeitsverhalten auf, weil die Maximalgeschwindigkeiten der betrachteten Fahrzeuge voneinander abweichen (Abbildung 5.5).

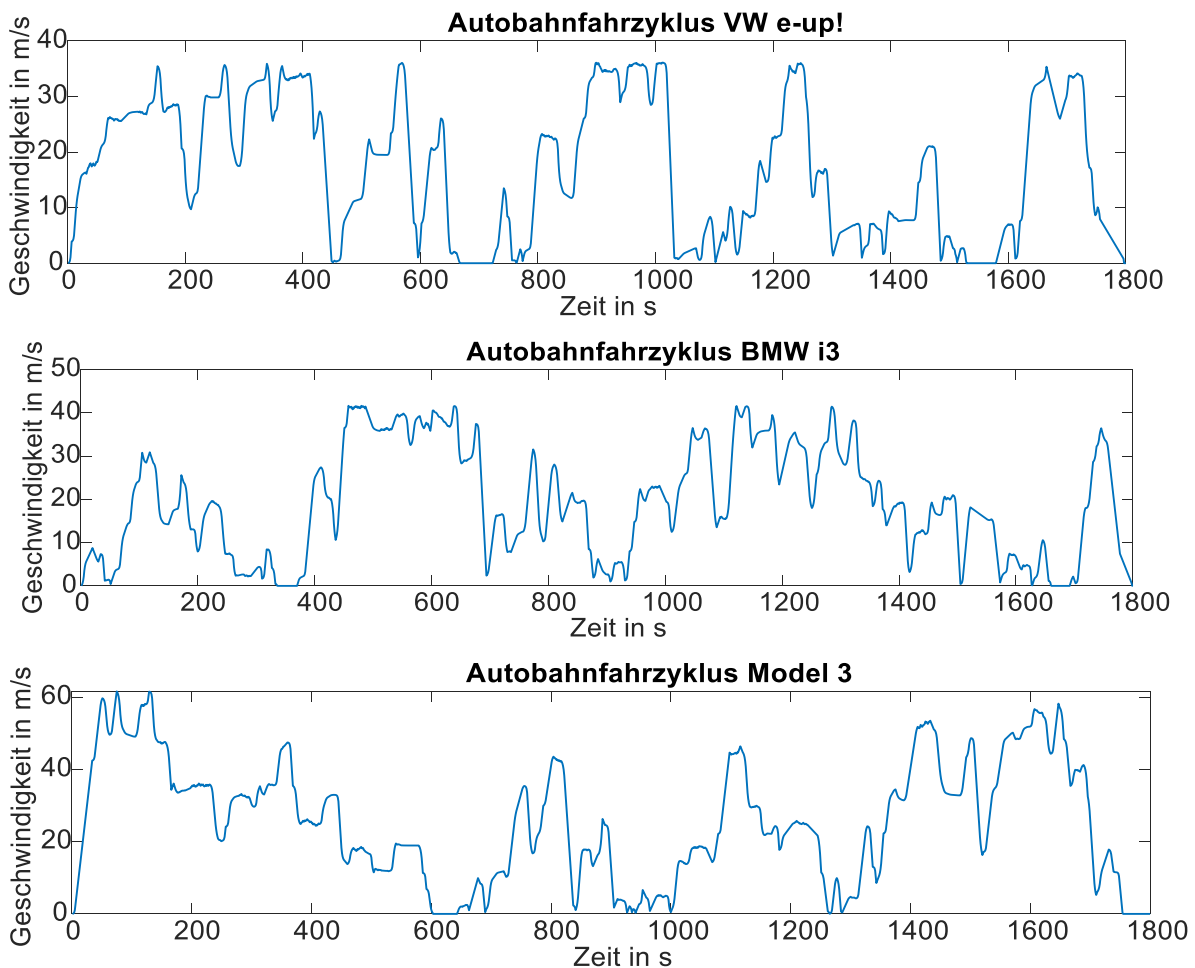


Abbildung 5.5: Generierter Fahrzyklus für Autobahnverkehr – VW e-up!, BMW i3, Tesla Model 3.

Die entsprechenden erstellten Fahrzyklen für den Stadt- bzw. den Landverkehr sind in Anhang C. 13 und C.14 aufgeführt. Ein realer Gesamtfahrzyklus bestehend aus einer realitätsgetreuen Aufteilung zwischen Stadt-, Land- und Autobahnfahrt ist in Anhang C.11 dargestellt. Dieser bietet einen Vergleich zum WLTP (Abbildung 5.6), der ebenfalls das gesamtheitliche Verhalten eines Fahrzeuges im Stadt-, Land- sowie Autobahnverkehr für Verbrenner abbildet.

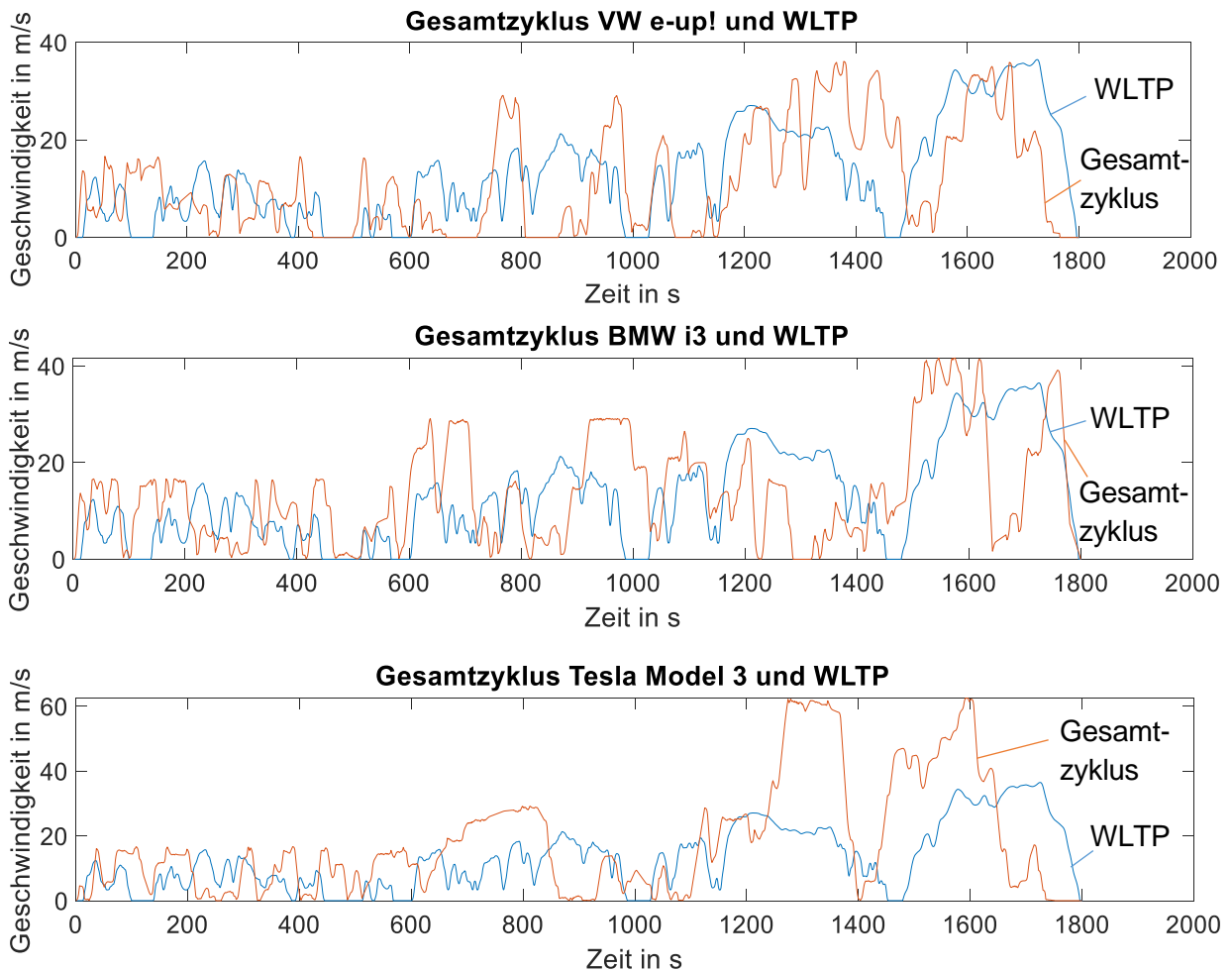


Abbildung 5.6: Vergleich Gesamtfahrzyklus (Orange) und WLTP (Blau) – VW e-up!, BMW i3, Tesla Model 3.

Die Brems- und Beschleunigungsgradienten sind für den Gesamtzyklus aller betrachteten Fahrzeuge höher als im WLTP (maximale Beschleunigung im WLTP: $1,6 \text{ m/s}^2$, maximale Beschleunigung Gesamtzyklus BMW i3: $2,9 \text{ m/s}^2$) [139]. Der zeitliche Verlauf des WLTP ist in Anhang C.4 gemäß [112] aufgeführt. Der zeitliche Verlauf des Lastzyklus' sowie des Roboracezyklus' sind in Anhang C.12 und C.13 aufgeführt.

Eine Gesamtübersicht der generierten Fahrzyklen ist in Tabelle 5.4 entsprechend der betrachteten Fahrzeugklassen sowie Nutzerverhalten dargestellt. Im Vergleich zum WLTP sind zu den auf Basis realer Fahrdaten generierten Fahrzyklen Unterschiede erkennbar. Zum einen wird in Bezug auf die maximale Drehzahl von allen Fahrzyklen, mit Ausnahme des reinen Stadt- und Landzyklus', höhere Drehzahlen angefordert als im WLTP. Dafür ist das notwendige Drehmoment im Stadt- und Landzyklus deutlich höher als das im WLTP.

Tabelle 5.4: Übersicht generierter Fahrzyklen für Nutzerverhalten und Fahrzeugklasse.

	Kleinstfahrzeug VW e-up!	Kleinfahrzeug BMW i3 (60Ah)	Mittelklasse Tesla Model 3
Stadt	Stadtfahrzyklus VW e-up! Geschwindigkeit in m/s vs Zeit in s (0-2000s)	Stadtfahrzyklus BMW i3 Geschwindigkeit in m/s vs Zeit in s (0-2000s)	Stadtfahrzyklus Model 3 Geschwindigkeit in m/s vs Zeit in s (0-2000s)
Land	Landfahrzyklus VW e-up! Geschwindigkeit in m/s vs Zeit in s (0-2000s)	Landfahrzyklus BMW i3 Geschwindigkeit in m/s vs Zeit in s (0-2000s)	Landfahrzyklus Model 3 Geschwindigkeit in m/s vs Zeit in s (0-2000s)
Autobahn	Autobahnfahrzyklus VW e-up! Geschwindigkeit in m/s vs Zeit in s (0-2000s)	Autobahnfahrzyklus BMW i3 Geschwindigkeit in m/s vs Zeit in s (0-2000s)	Autobahnfahrzyklus Model 3 Geschwindigkeit in m/s vs Zeit in s (0-2000s)
Gesamtzyklus (Stadt, Land, Au- tobahn)	Gesamtfahrzyklus VW e-up! Geschwindigkeit in m/s vs Zeit in s (0-2000s)	Gesamtfahrzyklus BMW i3 Geschwindigkeit in m/s vs Zeit in s (0-2000s)	Gesamtfahrzyklus Model 3 Geschwindigkeit in m/s vs Zeit in s (0-2000s)
Lastzyklus	Lastzyklus VW e-up! Geschwindigkeit in m/s vs Zeit in s (0-1000s)	Lastzyklus BMW i3 Geschwindigkeit in m/s vs Zeit in s (0-1000s)	Lastzyklus Model 3 Geschwindigkeit in m/s vs Zeit in s (0-1000s)
Roborace	Roborace Hongkong Geschwindigkeit in m/s vs Zeit in s (0-600s)		Roborace Paris Geschwindigkeit in m/s vs Zeit in s (0-600s)
Allrounder (WLTP, Robo- race, Lastzyklus)	Allrounder VW e-up! Geschwindigkeit in m/s vs Zeit in s (0-4000s)	Allrounder BMW i3 Geschwindigkeit in m/s vs Zeit in s (0-4000s)	Allrounder Model 3 Geschwindigkeit in m/s vs Zeit in s (0-4000s)

Die dazugehörigen Betriebspunkte der aufgeführten Fahrzyklen sind in Tabelle 5.5 dargestellt. Die Verteilung der Betriebspunkte beim WLTP befindet sich eher bei niedrigeren Drehzahlen, die anhand realer Fahrdaten generierten Fahrzyklen weisen in dieser Hinsicht jedoch eine Verteilung der Betriebspunkte über den gesamten Drehzahl- und Drehmomentbereich auf. Vor allem in Bezug auf die notwendige maximale Drehzahl (WLTP: 10 000 1/min, Gesamtzyklus: 15 000 1/min) sind höhere Anforderungen zu verzeichnen und auch höhere Drehmomente sowie häufigere Brems- und Beschleunigungsvorgänge werden im realen Betrieb gefordert.

Tabelle 5.5: Übersicht der Betriebspunkte für die generierten Fahrzyklen.

	Kleinstfahrzeug VW e-up!	Kleinfahrzeug BMW i3 (60Ah)	Mittelklasse Tesla Model 3
Stadt			
Land			
Autobahn			
Gesamtzyklus (Stadt, Land, Autobahn)			
Lastzyklus			
Roborace			
WLTP			
Allrounder (WLTP, Robo- race, Lastzyklus)			

5.4 Sensitivitätsanalyse Maschinenparameter

Zunächst soll mit einer Sensitivitätsanalyse der Einfluss einzelner Maschinenparameter isoliert betrachten werden, um somit in fortführenden Untersuchungen (mit einer Vielzahl an Freiheitsgraden), spezifische Einflüsse identifizieren zu können. Dafür werden die Parameter Maschinentopologie (ASM/PSM), Magnetanordnung (V-Form, eingelassen, tangential, Oberflächenmagnet), Kühlungsart (Flüssig, Luft), Verhältnis von n_{max} zu n_{nenn} , Wicklungsart, Getriebeübersetzung sowie der eingesetzte Fahrzyklus als Freiheitsgrad im Optimierungsalgorithmus gewählt. Die Abweichungen der einzelnen Ergebnisse resultieren dabei lediglich aus der jeweiligen Parametervariation, alle restlichen Parameter verbleiben unverändert. Soweit nicht anders vermerkt, wird als Fahrzeug für die Durchführung als Basis der BMW i3 und folgende Parameterbereiche als Freiheitsgrade für den Optimierungsalgorithmus gewählt: Nennleistung [70-200], Nenndrehzahl [1 000-10 000], Nennspannung [200-800], Polpaarzahl [4-8]. Diese Parameterbereiche wurden anhand realer Fahrzeuge auf dem aktuellen Markt nach GRUNDITZ [19] definiert. Alle angegebenen Wertebereiche der Simulation sind aufgerundet.

5.4.1 Fahrzyklus

Der Einfluss des Fahrzyklus‘ wurde zunächst anhand konventioneller Fahrzyklen untersucht. In Abbildung 5.7 ist der Vergleich zwischen dem WLTP (Blau) und dem NEFZ (Grün) für eine PSM mit tangentialer Magnetanordnung und Flüssigkeitskühlung in 3D und jeweiliger 2D-Anordnung aufgeführt. Dabei stellt jeder Punkt auf den jeweiligen Pareto-Fronten eine Pareto-optimale Maschinenauslegung dar, welche die gewählten Parameterbereiche und Anforderungen erfüllt.

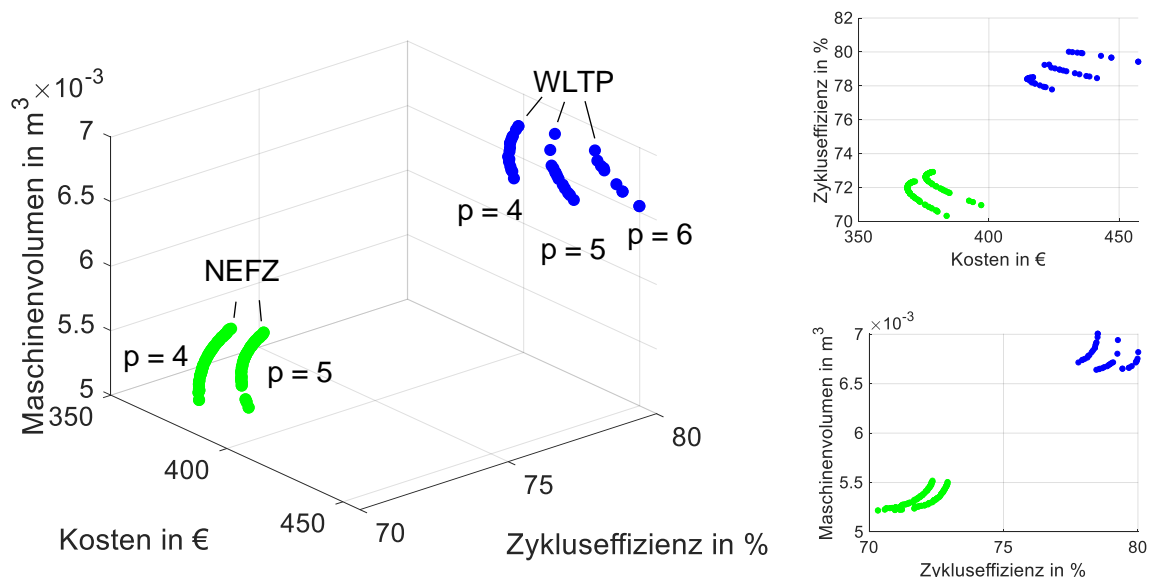


Abbildung 5.7: Sensitivitätsanalyse Fahrzyklus – WLTP (Blau) und NEFZ (Grün).

Die Anzahl der Pareto-Fronten resultiert aus unterschiedlichen Polpaarzahlen. So werden die drei Pareto-Fronten des WLTPs durch die Polpaarzahlen $p = 4$, 5 , 6 und die beiden des NEFZ durch $p = 4$, 5 bestimmt. Die Anordnung der Pareto-Fronten der verschiedenen Polpaarzahlen ist in den folgenden Abbildungen ebenfalls in chronologischer Reihenfolge von links nach rechts aufgeführt. Die optimale Maschinenauslegung in Bezug auf die Kosten, Zykluseffizienz und das

Maschinenvolumen ist für beide Zyklen unterschiedlich; der Wertebereich wird in Tabelle 5.6 aufgezeigt. Dabei ist zu erkennen, dass die optimale Maschinenauslegung für den WLTP eine deutlich höhere Zykluseffizienz, Gesamtkosten sowie Maschinenvolumen im Vergleich zum NEFZ aufweist. Innerhalb der einzelnen Pareto-Fronten kann der jeweilige Maschinenentwickler die optimale Maschinenauslegung in Bezug auf die bevorzugten Zielgrößen wählen.

Tabelle 5.6: Optimale Maschinenauslegung – WLTP und NEFZ.

Fahrzyklus	Zykluseffizienz [%]	Kosten [€]	Maschinenvolumen [$\times 10^{-3} \text{ m}^3$]
WLTP	77 - 80	410 - 460	6,6 - 7
NEFZ	70 - 73	365 - 400	5,2 – 5,6

Die Sensitivitätsanalyse mittels des Japan 15 Mode und der USA FTP 75 ist in Anhang E.2 aufgeführt. Die Sensitivitätsanalyse verschiedener Fahrzyklen für die ASM sowie den betrachteten Wicklungsarten ist in Anhang E.10 und E.11 aufgeführt.

5.4.2 Kühlungsart

Im Bereich der Kühlung der elektrischen Maschine wird in dieser Arbeit wahlweise eine Flüssigkeits- oder Luftkühlung betrachtet. In Abbildung 5.8 ist der Vergleich zwischen einer Flüssigkeits- (Blau) und Luftkühlung (Grün) im WLTP für eine PSM mit tangentialer Magnetanordnung und Wicklung B (Ganzlochwicklung, Zweischicht, geseht, gezont) aufgeführt.

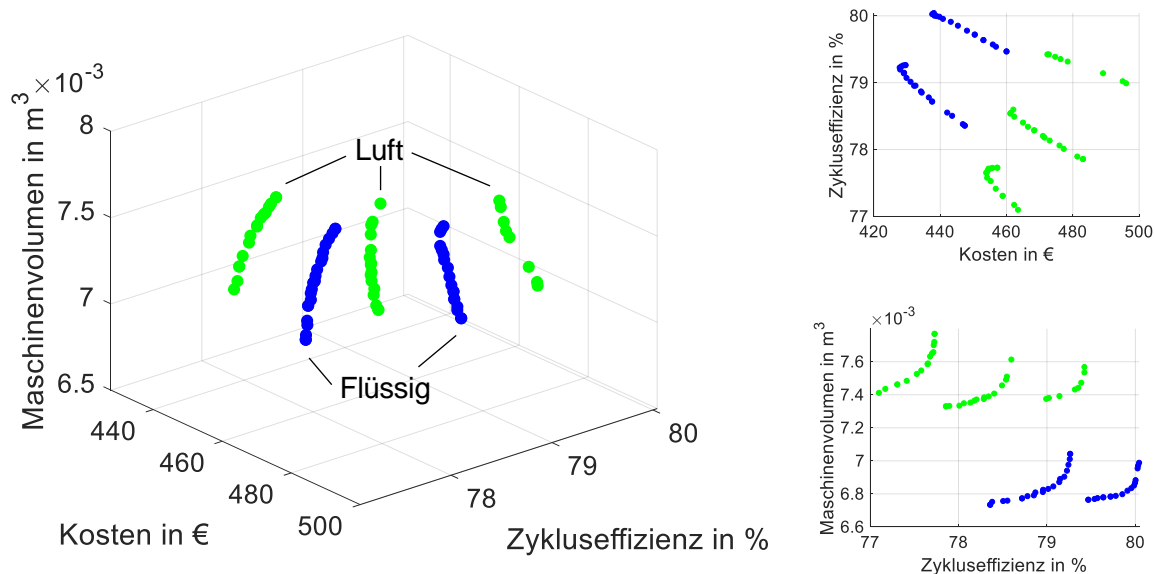


Abbildung 5.8: Sensitivitätsanalyse Kühlungsart – Flüssigkeits- (Blau), Luftkühlung (Grün) einer PSM.

Die optimale Maschinenauslegung in Bezug auf die Kosten, Zykluseffizienz und das Maschinenvolumen ist in Tabelle 5.7 aufgezeigt. Die Flüssigkeitskühlung weist in allen drei Zielgrößen einen Vorteil gegenüber der Luftkühlung auf. Die Anzahl der Pareto-Fronten der Flüssigkeitskühlung wird dabei durch die Polpaarzahlen $p = 4, 5$ und die der Luftkühlung durch $p = 4, 5, 6$ bestimmt.

Tabelle 5.7: Optimale Maschinenauslegung – Kühlungsart Flüssig, Luft (PSM).

Kühlungsart	Zykluseffizienz [%]	Kosten [€]	Maschinenvolumen [$\times 10^{-3}$ m ³]
Flüssig	78 - 80	420 - 460	6,7 – 7,1
Luft	77 - 80	450 - 485	7,3 – 7,8

In Abbildung 5.9 ist der Vergleich zwischen einer Flüssigkeits- (Grün) und Luftkühlung (Blau) im WLTP für eine ASM (Käfigläufer) und Wicklung A (Ganzlochwicklung, Einschicht, ungesieht, gezont) aufgeführt.

Im Vergleich zur PSM weist die Flüssigkeitskühlung nicht in allen drei Zielgrößen einen Vorteil gegenüber der Luftkühlung auf. Diese Tatsache kann darauf zurückgeführt werden, dass die implementierte Flüssigkeitskühlung lediglich am Stator angebracht werden kann, weil eine Rotorkühlung produktionstechnisch schwierig ist.

Dadurch, dass eine ASM aufgrund der vorhandenen Rotorwicklung erhöhte Rotorverluste im Vergleich zur PSM aufweist, können diese Verluste schlechter abgetragen werden und führen somit zu einem Effizienzverlust im Betrieb [52]. Um diesen Nachteil zu verringern, hat Porsche beispielsweise in der elektrischen Hinterachsmaschine des 918 Spyder neben der Flüssigkeitskühlung eine zusätzliche Luftkühlung zur Unterstützung der Rotorkühlung angebracht [213].

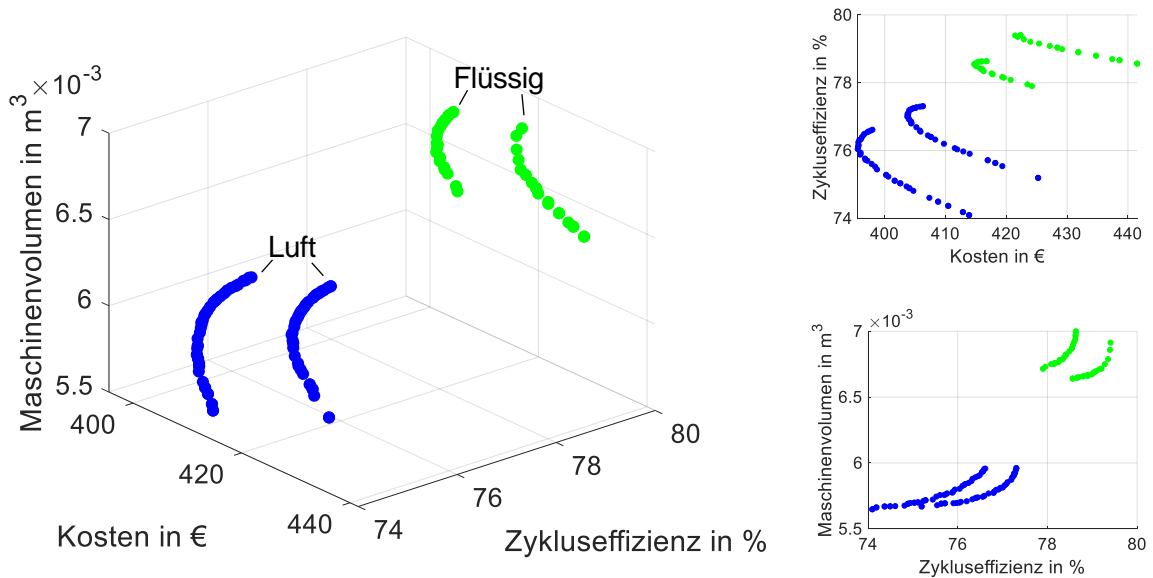


Abbildung 5.9: Sensitivitätsanalyse Kühlungsart – Flüssigkeits- (Grün), Luftkühlung (Blau) einer ASM.

Die optimale Maschinenauslegung in Bezug auf die Kosten, Zykluseffizienz und das Maschinenvolumen ist in Tabelle 5.8 aufgezeigt.

Tabelle 5.8: Optimale Maschinenauslegung – Kühlungsart Flüssig, Luft (ASM).

Kühlungsart	Zykluseffizienz [%]	Kosten [€]	Maschinenvolumen [$\times 10^{-3}$ m ³]
Luft	74 - 78	395 - 430	5,6 - 6
Flüssig	77 - 80	410 - 440	6,6 - 7

Die Anzahl der Pareto-Fronten resultiert aus den unterschiedlichen Polpaarzahlen. So werden die Pareto-Fronten der Flüssigkeitskühlung durch die Polpaarzahlen $p = 4, 5$ und die der Luftkühlung durch $p = 5, 6$ bestimmt. Dabei ist bei der Luftkühlung erstmals nicht die möglichst kleinste Polpaarzahl durch den Optimierungsalgorithmus gewählt.

5.4.3 Maschinentopologie

Für die Sensitivitätsanalyse der Maschinentopologie werden PSM und ASM betrachtet. In Abbildung 5.10 ist der Vergleich zwischen der Maschinentopologie einer PSM (tangential) (Blau) und einer ASM (Grün) im WLTP mit Flüssigkeitskühlung und Wicklung A aufgeführt.

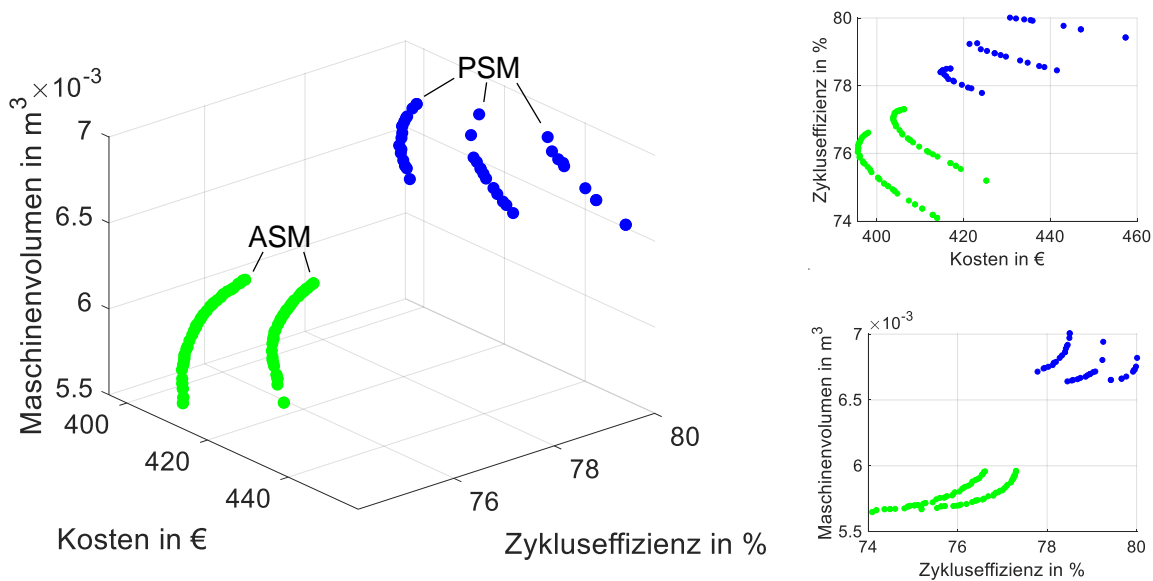


Abbildung 5.10: Sensitivitätsanalyse Maschinentopologie – PSM (Blau), ASM (Grün).

Die optimale Maschinenauslegung in Bezug auf die Kosten, Zykluseffizienz und das Maschinenvolumen ist in Tabelle 5.9 aufgezeigt.

Tabelle 5.9: Optimale Maschinenauslegung – Maschinentopologie PSM und ASM.

Maschinentopologie	Zykluseffizienz [%]	Kosten [€]	Maschinenvolumen [$\times 10^{-3} \text{ m}^3$]
PSM	77 - 80	410 - 460	6,6 - 7
ASM	74 - 78	395 - 430	5,6 - 6

Dabei weist die PSM zwar aufgrund der PM eine höhere Zykluseffizienz als die ASM auf, jedoch ist diese Anordnung auch mit höheren Kosten verbunden und die Anbringung der PM führt zudem zu einem erhöhten Maschinenvolumen. Dieses Verhalten wird auch in der Literatur nachgewiesen [214], [215]. Die Pareto-Fronten der PSM werden durch die Polpaarzahlen $p = 4, 5, 6$ und die der ASM durch $p = 4, 5$ bestimmt.

5.4.4 Magnetanordnung

In Abbildung 5.11 ist der Vergleich zwischen den im Material verankerten Magnetanordnungen, tangential (Blau) und V-Form (Grün), im WLTP für eine PSM mit Flüssigkeitskühlung und Wicklung A aufgeführt.

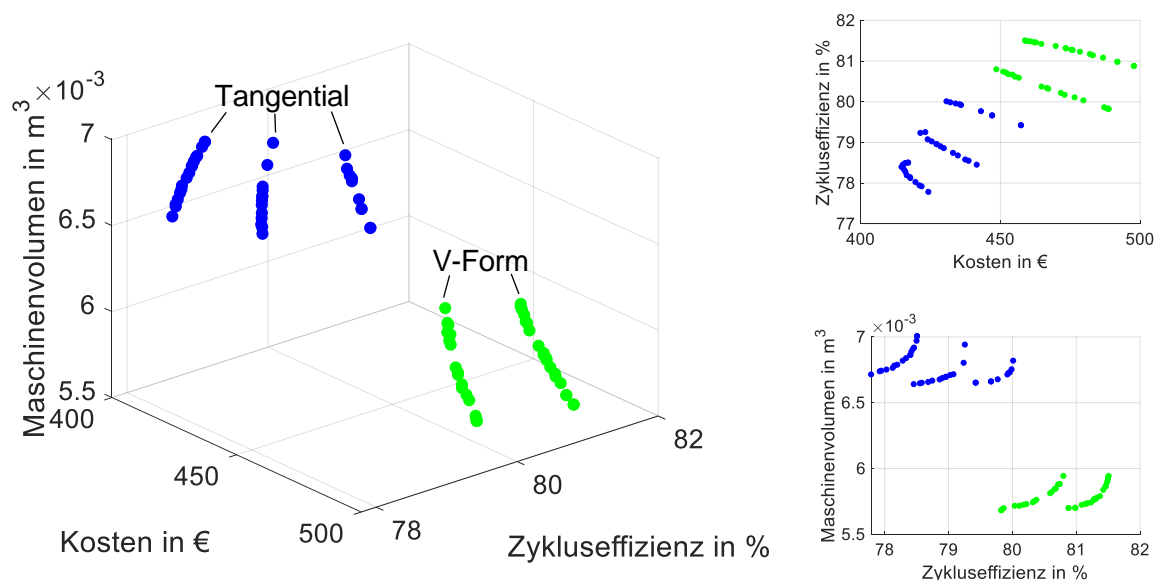


Abbildung 5.11: Sensitivitätsanalyse Magnetanordnung – Tangential (Blau), V-Form (Grün).

Die optimale Maschinenauslegung in Bezug auf die Kosten, Zykluseffizienz und das Maschinenvolumen ist in Tabelle 5.10 aufgezeigt. Die Magnetanordnung V-Form weist zwar eine höhere Zykluseffizienz und ein geringeres Maschinenvolumen im Vergleich zur tangentialen Anordnung auf, jedoch entstehen durch diese Anordnung erhöhte Gesamtkosten der Maschine.

Tabelle 5.10: Optimale Maschinenauslegung – Magnetanordnung tangential, V-Form.

Magnetanordnung	Zykluseffizienz [%]	Kosten [€]	Maschinenvolumen [$\times 10^{-3}$ m ³]
Tangential	77 - 80	410 - 460	6,6 - 7
V-Form	80 - 82	450 - 500	5,7 - 5,9

Die Anzahl der Pareto-Fronten resultiert aus den unterschiedlichen Polpaarzahlen. So werden die Pareto-Fronten der tangentialen Magnetanordnung durch die Polpaarzahlen $p = 4, 5, 6$ und die der V-Form durch $p = 4, 5$ bestimmt.

Die Ergebnisse des Optimierungsalgorithmus' der entsprechenden Magnetanordnungen an der Oberfläche der Maschine (SMPSM und eingelassen) sind in Anhang E.8 für den WLTP dargestellt. Die Variation der Magnetanordnung (eingelassene und Oberflächenmontierte Magnete) sowie der Kühlungsart, Getriebeübersetzung und des variablen Verhältnis' n_{\max} zu n_{enn} sind in Anhang E.5, E.6, E.7 und E.12 aufgeführt.

5.4.5 Variable Maschinentopologie

Wird die Maschinentopologie dem Optimierungsalgorithmus als Freiheitsgrad übergeben, erfolgt die Pareto-optimale Maschinenauslegung gemäß Abbildung 5.12 im WLTP für eine Flüssigkeitskühlung mit Wicklung A.

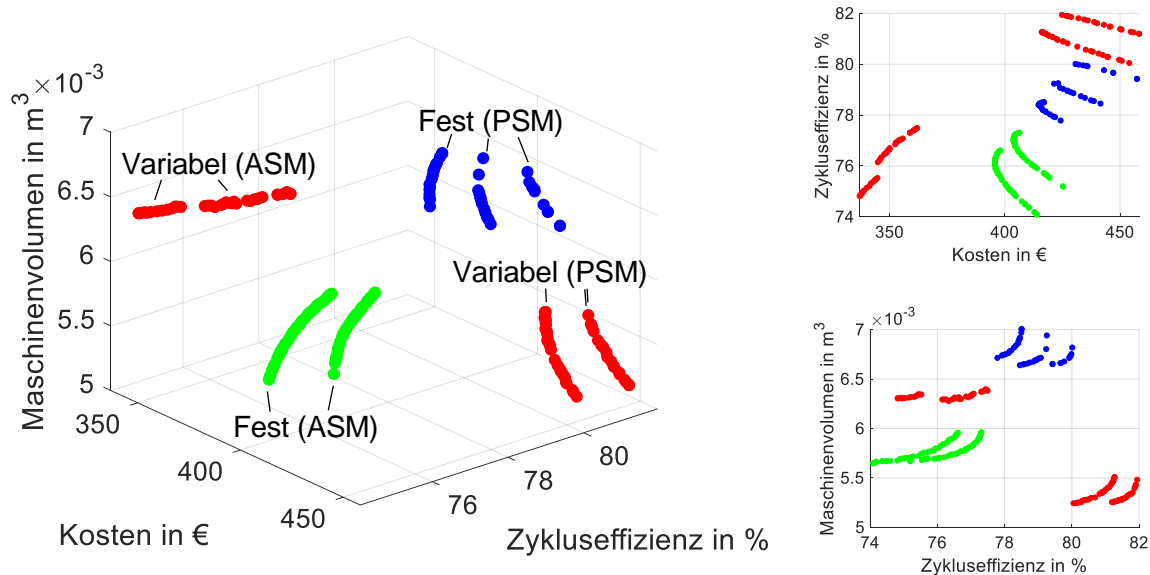


Abbildung 5.12: Sensitivitätsanalyse Maschinentopologie – fest PSM (Blau), fest ASM (Grün), variabel (Rot).

Die optimale Maschinenauslegung in Bezug auf die Kosten, Zykluseffizienz und das Maschinenvolumen ist in Tabelle 5.11 aufgezeigt. Wird die Maschinentopologie als Freiheitsgrad an den Optimierungsalgorithmus übergeben, wird eine ähnliche optimale Maschinenauslegung berechnet wie mit einer festgelegten ASM Topologie.

Tabelle 5.11: Optimale Maschinenauslegung – Maschinentopologie fest, variabel.

Maschinentopologie	Zykluseffizienz [%]	Kosten [€]	Maschinenvolumen [$\times 10^{-3}$ m ³]
fest PSM	77 - 80	410 - 460	6,6 - 7
fest ASM	74 - 78	395 - 430	5,6 - 6
variabel	74 - 82	330 - 460	5,2 - 6,4

Durch die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse können eine Vielzahl an Analysen durchgeführt und resultierende Zusammenhänge festgehalten werden:

1. Die Anforderungen eines Nutzerverhaltens führen zu unterschiedlichen Pareto-optimale Maschinenauslegungen sowie Wertebereichen der Zielgrößen (Sensitivitätsanalyse Fahrzyklus).
2. Die Kühlungsart bei der PSM beeinflusst primär Volumen und Kosten und nicht signifikant die Effizienz. Bei der ASM hat die Kühlungsart auf alle Zielgrößen einen signifikanten Einfluss, vor allem auf die Zykluseffizienz. Hierbei wird für die Luftkühlung nicht die kleinste Polpaarzahl angestrebt (Sensitivitätsanalyse Kühlungsart, Anhang E.6).

3. Die Maschinentopologie hat einen Einfluss auf alle Zielgrößen, vor allem auf Effizienz und Kosten. Die PSM ist dabei zwar effizienter, allerdings teurer als die ASM (Sensitivitätsanalyse Maschinentopologie).
4. Die Variation der Magnetanordnung weist starke Unterschiede auf. Eine V-förmige Anordnung weist eine höhere Effizienz auf, als eine tangentiale Anordnung, ist dafür jedoch teurer und kleiner bei ähnlichen magnetischen Eigenschaften. Die SMPSM ist kostengünstiger als eine eingelassene Bauweise, diese ist jedoch kleiner und effizienter als eine SMPSM (Sensitivitätsanalyse Magnetanordnung, Anhang E.5).
5. Die drei gewählten Wicklungsarten haben nahezu keinen Effekt auf die optimale Maschinenauslegung in Bezug auf die Zielgrößen (Sensitivitätsanalyse Wicklungsarten, Anhang E.11).
6. Wird eine variable Getriebeübersetzung im Optimierungsalgorithmus gewählt, kann zwar eine höhere Effizienz erreicht werden, jedoch ist dies mit höheren Kosten sowie Bauvolumen verbunden. Der Optimierungsalgorithmus wählt in dem angegebenen Wertebereich [2 - 10] eher kleinere Getriebeübersetzungen zwischen 3 und 6 (Sensitivitätsanalyse Getriebeübersetzung, Anhang E.7).
7. Eine variable Maschinentopologie im Optimierungsalgorithmus ermöglicht geringere Kosten und Maschinenvolumen bei einer ähnlichen Zykluseffizienz. Dabei ist eine große Spannbreite zwischen der PSM und ASM erkennbar (Sensitivitätsanalyse variable Maschinentopologie).
8. Wird das Verhältnis zwischen n_{Nenn} und n_{Max} variabel gewählt, so kann bei ansonsten gleichbleibenden Maschinen- bzw. Fahrzeugparametern und Nutzeranforderungen, eine Verbesserung in allen Zielgrößen erreicht werden. Dabei wurde vom Optimierungsalgorithmus stets die maximal mögliche Nenndrehzahl im Wertebereich gewählt (Sensitivitätsanalyse Variation Drehzahlverhältnis durch Optimierungsalgorithmus, Anhang E.12).

5.5 Optimale Maschinenauslegung verschiedener Nutzerverhalten

Nachdem der Einfluss einzelner Maschinenparameter im Optimierungsalgorithmus mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse untersucht wurde, wird im folgenden Unterkapitel ein gesamtheitlicher Ansatz zur Simulation der Maschinenauslegung gewählt. Dazu werden dem Optimierungsalgorithmus als Freiheitsgrade die Nennleistung, -drehzahl, -spannung, die Polpaarzahl, die Maschinentopologie, die Kühlungsart, die Magnetanordnung sowie der Wicklungstyp übergeben. Es werden der VW e-up!, der BMW i3 und der Tesla Model 3 als Grundlage für die LDS verwendet, um den Einfluss der Maschinenauslegung auf die in Kapitel 5.3 vorgestellten Nutzerverhalten zu analysieren.

Falls nicht anders angegeben werden bei der Erstellung der Pareto-Fronten als Freiheitsgrade für den Optimierungsalgorithmus folgende Parameterbereiche gewählt: Nennleistung [70-200], Nenndrehzahl [7 000-15 000], Nennspannung [200-800], Polpaarzahl [4-6], Maschinentopologie

[ASM, PSM], Kühlungsart [Flüssig, Luft], Magnetanordnung [tangential, V-Form, eingelassen, SMPSM], Wicklungsart [A, B, C].

5.5.1 Kleinstfahrzeug - VW e-up!

Werden die gewählten Maschinenparameter gesamtheitlich an den Optimierungsalgorithmus als variable Eingangsparameter übergeben, erfolgt eine Pareto-optimale Maschinenauslegung für den VW e-up! nach Abbildung 5.13. Dabei wird zunächst der WLTP (Blau) mit dem für den VW e-up! generierten Gesamtfahrzyklus (Grün), der einen Stadt-, Land- sowie Autobahnanteil aus realen Fahrdaten beinhaltet, verglichen. Auch hier ist eine deutliche Unterscheidung zwischen den gewählten Auslegungen für die ASM und PSM erkennbar.

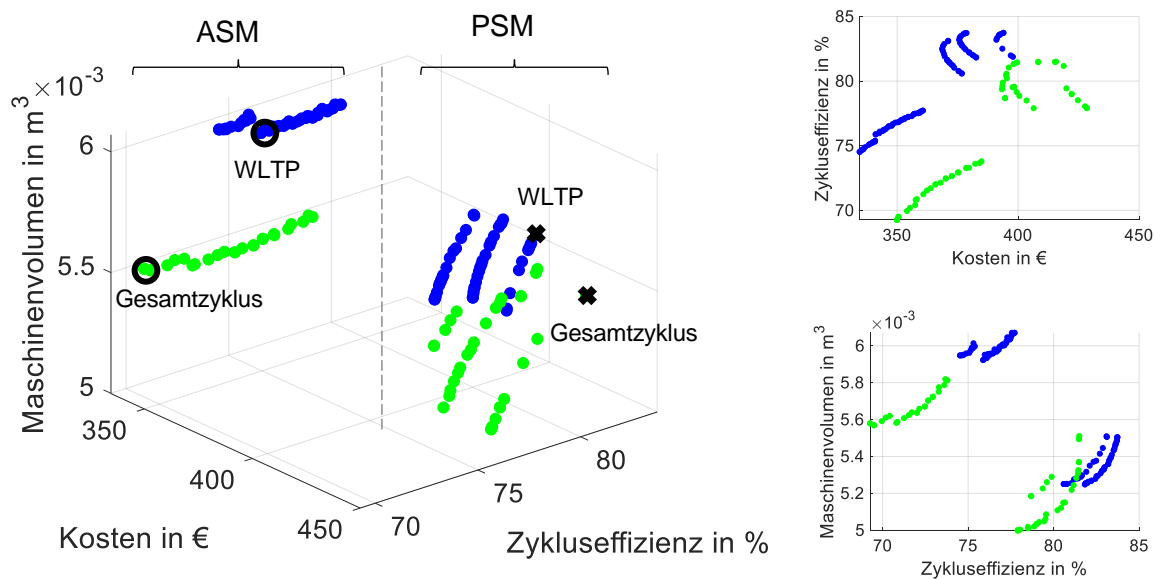


Abbildung 5.13: Nutzerverhalten VW e-up! – WLTP (Blau), Gesamtzyklus (Grün). Die jeweilige Maschinenauslegung mit möglichst geringen Kosten und Bauraum ist mit einem O gekennzeichnet. Die jeweilige Maschinenauslegung mit der höchsten Zykluseffizienz ist durch ein X gekennzeichnet.

Die optimale Maschinenauslegung in Bezug auf die Kosten, Zykluseffizienz und das Maschinenvolumen ist in Tabelle 5.12 aufgezeigt.

Tabelle 5.12: Optimale Maschinenauslegung VW e-up! – WLTP, Gesamtzyklus.

Fahrzyklus	Zykluseffizienz [%]	Kosten [€]	Maschinenvolumen [$\times 10^{-3}$ m ³]
WLTP	74 - 84	330 - 400	5,2 - 6,1
Gesamtzyklus VW e-up!	69 - 82	350 - 450	4,8 - 6,2

Ist beispielsweise eine Maschine mit möglichst geringen Kosten und Bauraum erwünscht, könnte eine mögliche Maschinenauslegung die in Abbildung 5.13 mit einem Kreis markierte Auslegung darstellen. Ist jedoch eine hohe Zykluseffizienz erwünscht, könnte die mit einem X dargestellte Maschinenauslegung gewählt werden. Für die mit der höchsten Zykluseffizienz ausgewählte (mit X markierte) Maschinenauslegung wurde vom Optimierungsalgorithmus die Parameterkombination in Gleichung (5.1) simuliert.

Es ist zu erkennen, dass die Maschinenauslegung je nach Auswahl der Zielgrößen deutliche Unterschiede für die spezifischen Fahrzyklen aufweist. Bei der Gewichtung auf eine möglichst hohe Zykluseffizienz wird für beide betrachteten Fahrzyklen als Maschinentopologie eine PSM mit Polpaarzahl 4 und einer ähnlichen Nennspannung von ca. 320 V gewählt. Allerdings ist für die Durchführung des WLTPs eine geringere Nennleistung (WLTP: 70 kW, Gesamtzyklus: 119 kW) sowie eine geringere Nenndrehzahl (WLTP: 10 000 1/min, Gesamtzyklus: 15 000 1/min) Pareto-optimal. Die Wahl des Wicklungstyps fällt für beide Fahrzyklen auf Wicklung A (Ganzlochwicklung, Einschicht, ungesehnt, gezont). Für die optimale Maschinenauslegung anhand des Nutzerverhaltens im WLTP wird eine eingelassene Magnetanordnung sowie eine Luftkühlung gewählt.

$$\vec{x}_{\text{Zykluseffizienz}} = \begin{bmatrix} \text{Maschinentyp} \\ \text{Polpaarzahl} \\ \text{Nennspannung} \\ \text{Nennleistung} \\ \text{Nenndrehzahl} \\ \text{Wicklungstyp} \\ \text{Magnetanordnung} \\ \text{Kühlungsart} \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} PSM \\ 4 \\ 329 \\ 70 \\ 10000 \\ A \\ \text{eingelassen} \\ \text{Luft} \end{bmatrix}, \text{WLTP} \\ \begin{bmatrix} PSM \\ 4 \\ 324 \\ 119 \\ 15000 \\ A \\ \text{tangential} \\ \text{Flüssig} \end{bmatrix}, \text{Gesamt} \end{cases} \quad (5.1)$$

$$\vec{y}_{\text{Zykluseffizienz}} = \begin{bmatrix} \text{Kosten} \\ -\text{Zykluseffizienz} \\ \text{Abmessungen} \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 393,9 \\ -83,73 \\ 5,504 \end{bmatrix}, \text{WLTP} \\ \begin{bmatrix} 441,23 \\ -81,56 \\ 5,979 \end{bmatrix}, \text{Gesamt} \end{cases}$$

Für die optimale Maschinenauslegung im Gesamtzyklus des VW e-up! wird eine tangentielle Magnetanordnung sowie eine Flüssigkühlung notwendig. Dies liegt vor allem an der Vielzahl an Brems- und Beschleunigungsvorgängen sowie höheren Drehzahlen für den Gesamtfahrzyklus (WLTP: 10 000 1/min, Gesamtfahrzyklus 15 000 1/min). Eine eingelassene Magnetanordnung ist aufgrund der Verklebungen für höhere Drehzahlen (abhängig von Klebeverbindung und Auslegung der Bandage zur Absicherung der Magnete gegen Fliehkräfte [74]) nicht geeignet, weil ein Auflösen der Klebeverbindung aufgrund hoher Zentrifugalkräfte zu einer Zerstörung der Maschine führen würden [36], [46].

Für die im Gesamtzyklus mit möglichst geringen Kosten und Bauraum ausgewählte (mit O markierte Auslegung in Abbildung 5.13) Maschinenauslegung wurde vom Optimierungsalgorithmus folgende Parameterkombination in Gleichung (5.2) gewählt. Wird der Fokus der Zielgrößen vor allem auf geringe Kosten und Bauraum gesetzt, wird automatisch durch den Optimierungsalgorithmus eine ASM sowie eine höhere Polpaarzahl $p = 5$ vorgeschlagen.

$$\vec{x}_{Kosten\&Package} = \begin{bmatrix} \text{Maschinentyp} \\ \text{Polpaarzahl} \\ \text{Nennspannung} \\ \text{Nennleistung} \\ \text{Nenn Drehzahl} \\ \text{Wicklungstyp} \\ \text{Magnetanordnung} \\ \text{Kühlungsart} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{ASM} \\ 5 \\ 332 \\ 70 \\ 10000 \\ A \\ \text{Käfigläufer} \\ \text{Flüssig} \end{bmatrix}, \text{WLTP}$$

$$\vec{x}_{Kosten\&Package} = \begin{bmatrix} \text{ASM} \\ 5 \\ 312 \\ 100 \\ 15000 \\ A \\ \text{Käfigläufer} \\ \text{Flüssig} \end{bmatrix}, \text{Gesamt} \quad (5.2)$$

$$\vec{y}_{Kosten\&Package} = \begin{bmatrix} \text{Kosten} \\ -\text{Zykluseffizienz} \\ \text{Abmessungen} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 334,54 \\ -74,53 \\ 5,95 \end{bmatrix}, \text{WLTP}$$

$$\vec{y}_{Kosten\&Package} = \begin{bmatrix} 349,9 \\ -69,27 \\ 5,579 \end{bmatrix}, \text{Gesamt}$$

Die Leistung sowie Nenn Drehzahl ist für beide Fahrzyklen ähnlich zu der optimalen Maschinenauslegung nach hoher Effizienz (siehe (5.1)). Allerdings wird hier für den WLTP statt einer Luftkühlung eine Flüssigkeitskühlung gewählt. Die drei Zielgrößen für die betrachteten Fahrzyklen und spezifischen Gewichtungen sind in Abbildung 5.14 dargestellt.

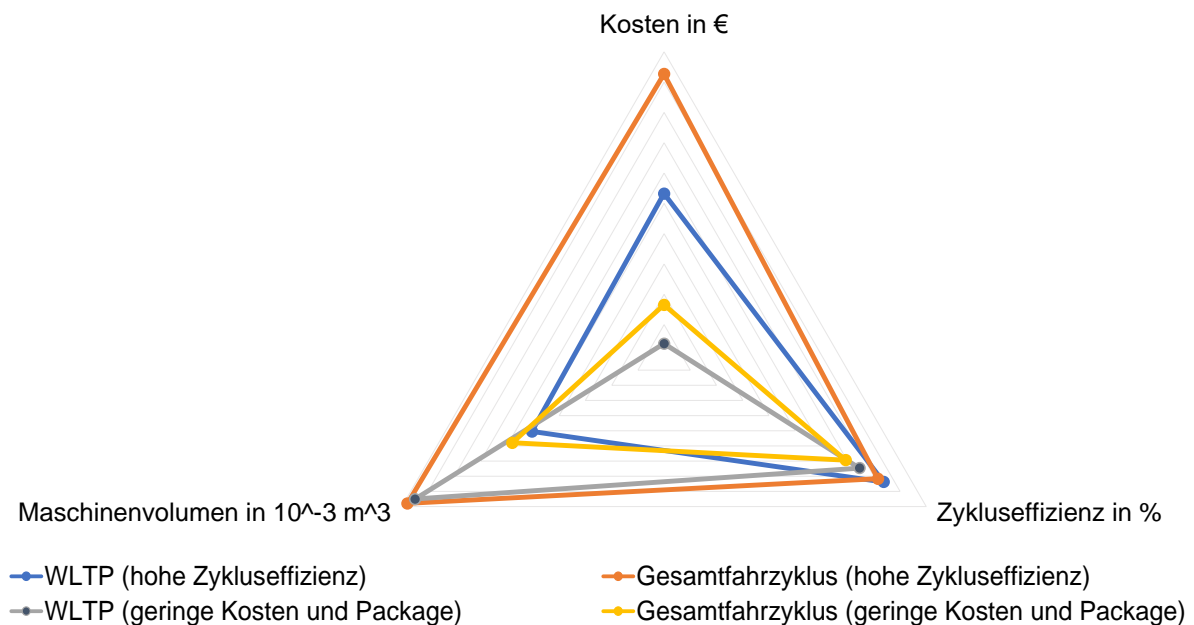


Abbildung 5.14: Nutzerverhalten VW e-up! – Stadt- (Blau), Land- (Grün), Autobahn (Rot). Skala Zykluseffizienz [65 - 85], Maschinenvolumen [5-6] und Kosten [330-445].

Es ist erkennbar, dass bei der Betrachtung einer optimalen Maschinenauslegung mit Gewichtung auf der Zykluseffizienz, stets höhere Kosten anfallen und in Bezug auf das Maschinenvolumen, das Nutzerverhalten einen wesentlichen Einfluss hat.

Der Vergleich des generierten Stadt- (Blau), Land- (Grün) und Autobahnzyklus‘ (Rot) ist in Abbildung 5.15 für den VW e-up! aufgeführt.

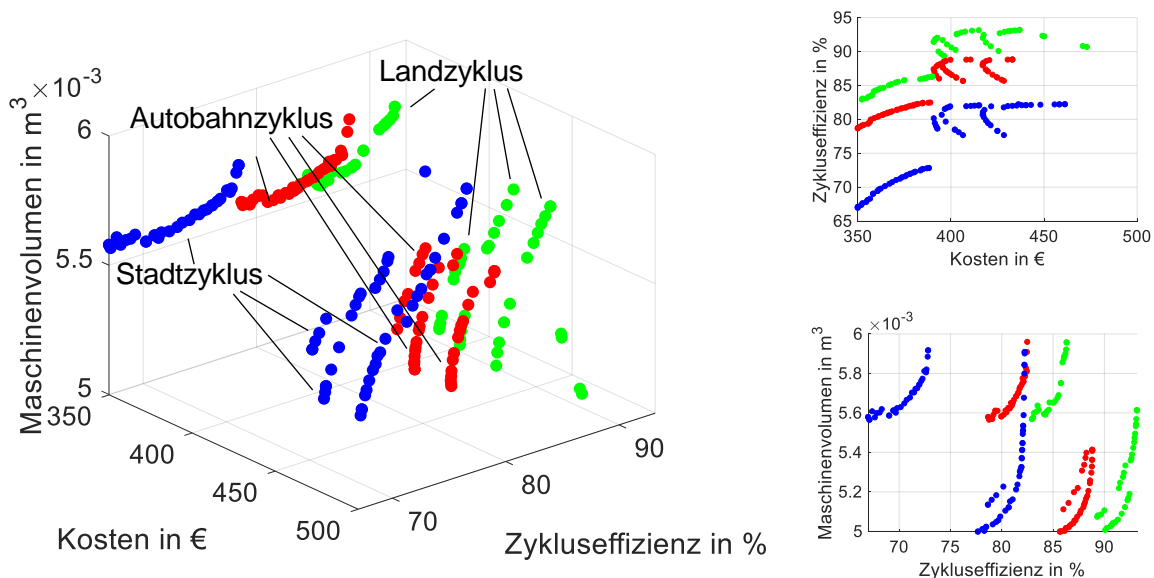


Abbildung 5.15: Nutzerverhalten VW e-up! – Stadt- (Blau), Land- (Grün), Autobahn (Rot).

Die optimale Maschinenauslegung in Bezug auf die *Kosten*, *Zykluseffizienz* und das *Maschinenvolumen* ist in Tabelle 5.13 aufgezeigt. Die optimale Maschinenauslegung für den Autobahn- und Landzyklus können bei gleichbleibendem Maschinenvolumen und ähnlichen Gesamtkosten eine höhere Zykluseffizienz erreichen als im Stadtzyklus. Dies liegt hauptsächlich an der hohen Anzahl an Brems- und Beschleunigungsvorgänge im Stadtverkehr.

Tabelle 5.13: Optimale Maschinenauslegung VW e-up! – Stadt-, Land-, Autobahnzyklus.

Fahrzyklus	Zykluseffizienz [%]	Kosten [€]	Maschinenvolumen [$\times 10^{-3}$ m ³]
Stadtzyklus	66 - 84	340 - 470	5 - 6
Landzyklus	82 - 94	340 - 480	5 - 6
Autobahnzyklus	78 - 90	350 - 440	5 - 6

Der VW e-up! erzielt seine höchste Zykluseffizienz im Landzyklus. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass Autobahnzyklen aufgrund ihrer geringen Brems- und Beschleunigungsvorgängen generell effizienter für den Antriebsstrang im realen Betrieb ausfallen.

5.5.2 Kompaktklasse - BMW i3

Werden die Maschinenparameter gesamtheitlich als Freiheitsgrad an den Optimierungsalgorithmus übergeben, erfolgt eine Pareto-optimale Maschinenauslegung für den BMW i3 nach

Abbildung 5.16 für den in Kapitel 5.3 generierten Stadt- (Blau), Land- (Grün) und Autobahnfahrzyklus (Rot) aus realen Fahrdaten.

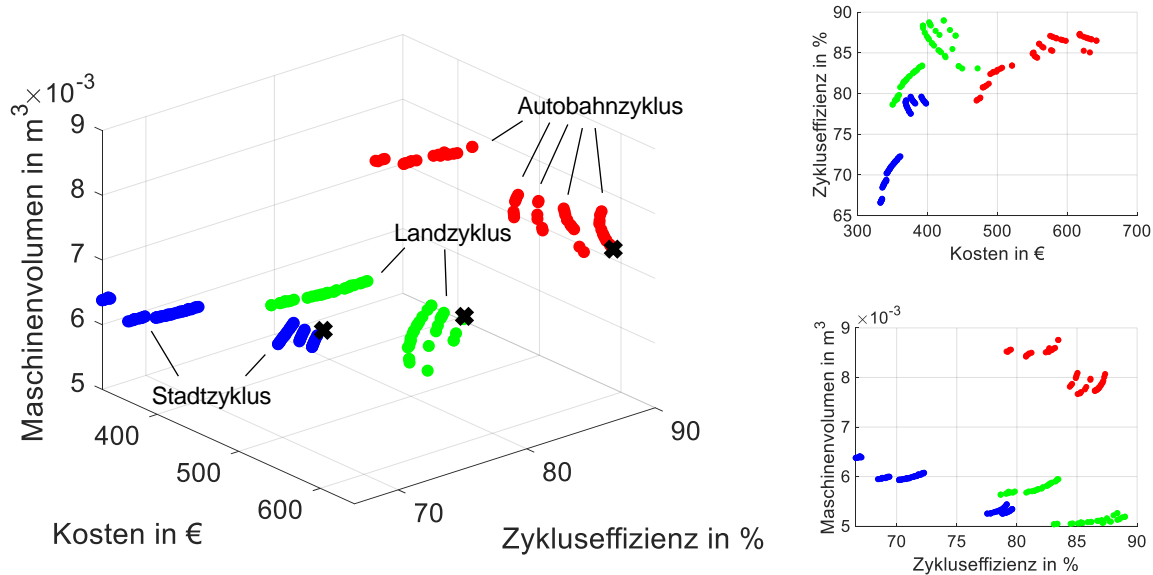


Abbildung 5.16: Nutzerverhalten BMW i3 – Stadt- (Blau), Land- (Grün), Autobahnzyklus (Rot). Die jeweilige Maschinenauslegung mit der höchsten Zykluseffizienz ist durch ein X gekennzeichnet.

Die optimale Maschinenauslegung in Bezug auf die *Kosten*, *Zykluseffizienz* und das *Maschinenvolumen* ist in Tabelle 5.14 aufgezeigt. Der BMW i3 erzielt seine höchste Zykluseffizienz im Land- und Autobahnzyklus, wodurch Rückschluss auf sein Auslegungsziel gezogen werden kann.

Tabelle 5.14: Optimale Maschinenauslegung BMW i3 – Stadt-, Land-, Autobahnzyklus.

Fahrzyklus	Zykluseffizienz [%]	Kosten [€]	Maschinenvolumen [$\times 10^{-3} \text{ m}^3$]
Stadt	66 - 80	330 - 400	5,2 - 6,6
Land	79 - 89	330 - 455	5,2 - 6,1
Autobahn	78 - 87	340 - 480	5,2 - 6,1

Für die im Stadt-, Land- und Autobahnzyklus mit der höchsten Zykluseffizienz ausgewählte (in Abbildung 5.16 mit X markierte) Maschinenauslegung wird vom Optimierungsalgorithmus im jeweiligen Zyklus folgende Parameterkombination in Gleichung (5.3) gewählt. Für alle Fahrzyklen wird ähnlich zu dem VW e-up! durch den Optimierungsalgorithmus eine PSM mit eingelassenen Magneten sowie eine Polpaarzahl $p = 4$ gewählt. Der Stadt- und Landzyklus fordert eine Pareto-optimale Auslegung bei einem Spannungsniveau von $U_{Nenn} \approx 420 \text{ V}$. Wobei der Autobahnzyklus eine notwendige Spannung von ca. $U_{Nenn} \approx 700 \text{ V}$ fordert. Die notwendige Leistung steigt von 70 kW im Stadtzyklus auf 200 kW im Autobahnzyklus. Die Nenndrehzahl wurde in allen drei Zyklen maximal aus dem Wertebereich (15 000 1/min) gewählt. Im Stadtzyklus wurde durch den Optimierungsalgorithmus zur Erzielung einer maximalen Zykluseffizienz, eine Luftkühlung gewählt, der Land- und Autobahnzyklus benötigen hingegen beide eine Flüssigkeitskühlung, um den erhöhten Leistungsanforderungen gerecht zu werden.

$$\vec{x}_{\text{Zykluseffizienz}} = \begin{bmatrix} \text{Maschinentyp} \\ \text{Polpaarzahl} \\ \text{Nennspannung} \\ \text{Nennleistung} \\ \text{Nenn Drehzahl} \\ \text{Wicklungstyp} \\ \text{Magnetanordnung} \\ \text{Kühlungsart} \end{bmatrix} = \left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} \text{PSM} \\ 4 \\ 427 \\ 70 \\ 10000 \\ A \\ \text{eingelassen} \\ \text{Luft} \end{bmatrix}, \text{Stadt} \\ \begin{bmatrix} \text{PSM} \\ 4 \\ 424 \\ 100 \\ 15000 \\ B \\ \text{eingelassen} \\ \text{Flüssig} \end{bmatrix}, \text{Land} \\ \begin{bmatrix} \text{PSM} \\ 4 \\ 710 \\ 200 \\ 15000 \\ A \\ \text{eingelassen} \\ \text{Flüssig} \end{bmatrix}, \text{Autobahn} \end{array} \right. \quad (5.3)$$

$$\vec{y}_{\text{Zykluseffizienz}} = \begin{bmatrix} \text{Kosten} \\ -\text{Zykluseffizienz} \\ \text{Abmessungen} \end{bmatrix} = \left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} 391,3 \\ -79,61 \\ 5,345 \end{bmatrix}, \text{Stadt} \\ \begin{bmatrix} 423,2 \\ -88,99 \\ 5,193 \end{bmatrix}, \text{Land} \\ \begin{bmatrix} 618 \\ -87,34 \\ 8,07 \end{bmatrix}, \text{Autobahn} \end{array} \right.$$

Die Pareto-optimale Maschinenauslegung für den BMW i3 im WLTP (Blau), den Roborace- (Grün) mit dem Lastzyklus (Rot) aus realen Fahrdaten ist in Abbildung 5.17 aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass der BMW i3 eine hohe Zykluseffizienz im Rennzyklus erfährt, somit gut für die jeweiligen Anforderungen ausgelegt ist. Der Lastzyklus erfährt aufgrund seiner häufigen Beschleunigungs- und Bremsvorgänge die geringste Zykluseffizienz, jedoch auch die geringsten Kosten und Maschinenvolumen.

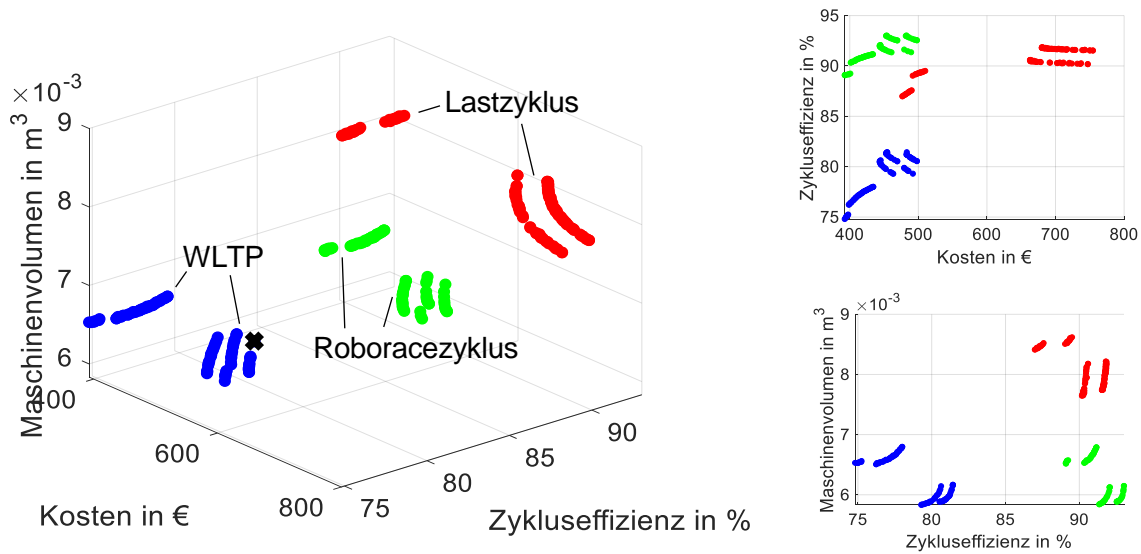


Abbildung 5.17: Nutzerverhalten BMW i3 – WLTP (Blau), Roborace- (Grün), Lastzyklus (Rot).

Die optimale Maschinenauslegung in Bezug auf die *Kosten*, *Zykluseffizienz* und das *Maschinenvolumen* ist in Tabelle 5.15 aufgezeigt.

Tabelle 5.15: Optimale Maschinenauslegung BMW i3 – WLTP, Roborace-, Lastzyklus.

Fahrzyklus	Zykluseffizienz [%]	Kosten [€]	Maschinenvolumen [$\times 10^{-3} \text{ m}^3$]
WLTP	74 - 84	380 - 500	5,8 - 6,8
Roborace	89 - 93	380 - 500	5,8 - 6,8
Lastzyklus	66 - 80	330 - 400	5,2 - 6,6

Durch den Einsatz der mit X in Abbildung 5.17 markierten elektrischen Maschine bei ansonsten gleichbleibenden Maschinen- sowie Fahrzeugparametern, kann eine Verbesserung im Vergleich zu der derzeitigen elektrischen Maschine im BMW i3 erzielt werden. Die durch den Optimierungsalgorithmus gewählte elektrische Maschine mit der höchsten Zykluseffizienz im WLTP führt zu einer Verbesserung der Reichweite von ca. 7,5 % (Tabelle 5.16). Dabei wird durch den Optimierungsalgorithmus eine flüssigkeitsgekühlte PSM mit einer Polpaarzahl von $p = 4$ (im Vergleich zu $p = 6$), eine Spannungsebene von $U_n = 301 \text{ V}$ (im Vergleich zu $U_n = 360 \text{ V}$), sowie eine Nennleistung von $P_N = 114 \text{ kW}$ (im Vergleich zu $P_N = 75 \text{ kW}$) gewählt.

Tabelle 5.16: Vergleich der optimalen Maschinenauslegung zur Serienmaschine des BMW i3 im WLTP.

Fahrzyklus	Zykluseffizienz [%]	Kosten [€]	Maschinenvolumen [$\times 10^{-3} \text{ m}^3$]
Optimale Maschinenauslegung	84,22	438,16	5,9
Serienmaschine des BMW i3	74,35	516,9	9,1
Verbesserung durch Optimierung	+ 13,3 %	- 15,2 %	- 35,2 %

5.5.3 Mittelklasse - Tesla Model 3

Die Pareto-optimale Maschinenauslegung des Tesla Model 3 für den WLTP (Blau), den Land- (Grün) mit dem Stadtzyklus (Rot) aus realen Fahrdaten ist in Abbildung 5.18 aufgeführt.

Die höchste Zykluseffizienz wird für den Tesla Model 3 im Landzyklus erzielt, die geringsten Kosten im WLTP und das geringste Maschinenvolumen im Stadtzyklus. Hier muss die jeweilige Maschinenauslegung so gewählt werden, dass die favorisierte Gewichtung der Zielgrößen erreicht wird.

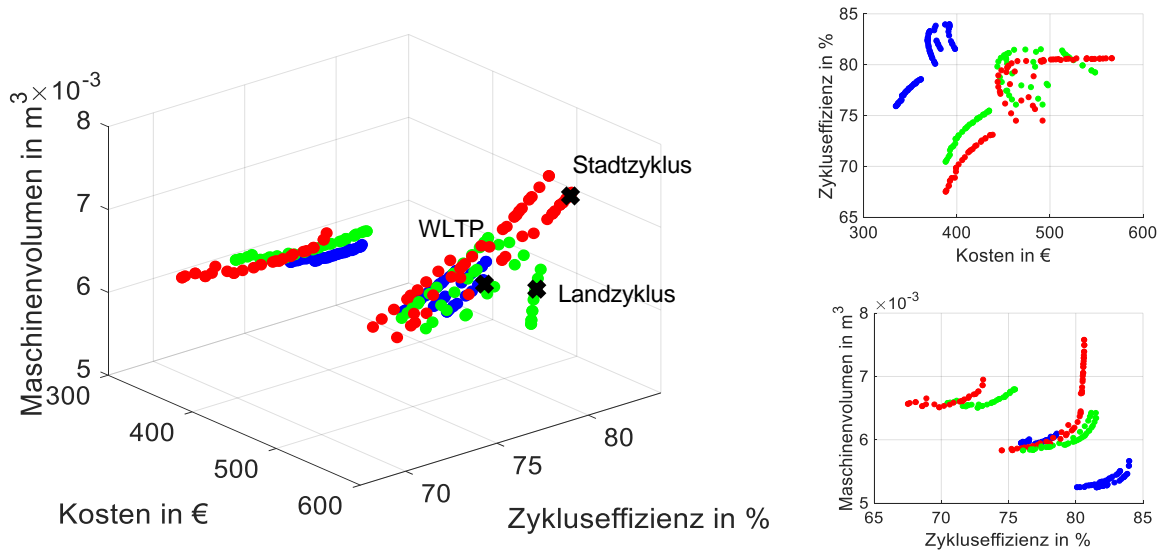


Abbildung 5.18: Nutzerverhalten Model 3 – WLTP (Blau), Land- (Grün), Stadtzyklus (Rot). Die jeweilige Maschinenauslegung mit der höchsten Zykluseffizienz ist durch ein X gekennzeichnet.

Die optimale Maschinenauslegung in Bezug auf die Kosten, Zykluseffizienz und das Maschinenvolumen sind in Tabelle 5.17 aufgezeigt.

Tabelle 5.17: Optimale Maschinenauslegung Model 3 – WLTP, Stadt-, Landzyklus.

Fahrzyklus	Zykluseffizienz [%]	Kosten [€]	Maschinenvolumen [$\times 10^{-3} \text{ m}^3$]
WLTP	75 - 84	330 - 400	5,2 - 6,1
Landzyklus	75 - 85	340 - 500	4,8 - 6
Stadtzyklus	66 - 81	380 - 500	5,8 - 7

Mit Hilfe der Längsdynamiksimulation können die Betriebspunkte einer ausgewählten Maschinenauslegung (mit X markierte Maschinenauslegung in Abbildung 5.18) im jeweiligen Zyklus dargestellt werden. Dafür sind in Abbildung 5.19 die Betriebspunkte des Zyklus‘ im jeweiligen Maschinenkennfeld aus Abbildung 5.18 aufgeführt.

Dabei stellt die gelb eingefärbte Fläche den höchsten Wirkungsgrad und die dunkelblau eingefärbte Fläche den geringsten Wirkungsgrad der Maschine dar. Die grauen Punkte zeigen die einzelnen Betriebspunkte der Simulation. Es ist zu erkennen, dass durch den Optimierungsalgorithmus nicht die kleinstmögliche Maschine gewählt wird. Zudem wird die optimale Maschinenauslegung für die realen Fahrzyklen in Bezug auf die Eckdrehzahl und das maximale Drehmoment deutlich höher gewählt als für den WLTP.

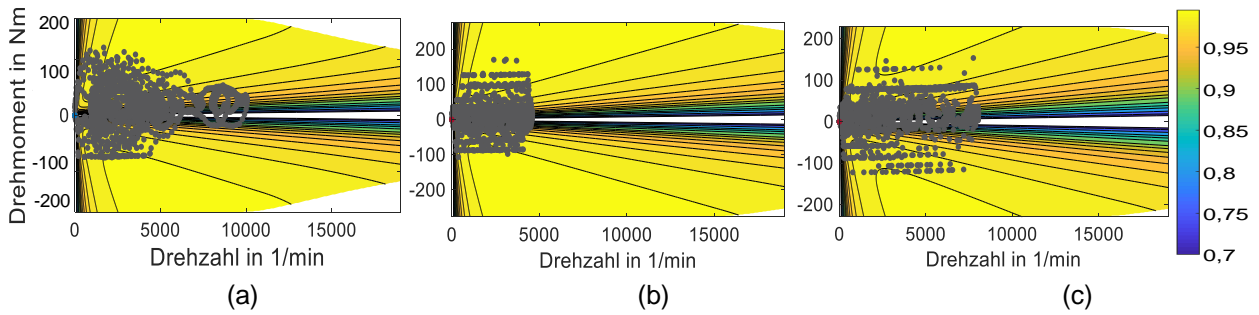


Abbildung 5.19: Effizienzkennfelder und Betriebspunkte – (a) WLTP, (b) Land- (c) Stadtzyklus.

In Tabelle 5.18 ist der Vergleich des Energieverbrauchs der optimalen elektrischen Maschine im jeweiligen Fahrzyklus aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass die optimale Maschinenauslegung für die Nutzeranforderung im WLTP den geringsten Energieverbrauch im Vergleich zu den realen Zyklen aufweist. Zudem können im realen Betrieb eine deutlich geringere Reichweite bzw. zurückgelegte Distanz im Zyklus erreicht werden. Der Energieverbrauch ist zudem im Stadt- und Landzyklus höher als im WLTP.

Tabelle 5.18: Maschinenauslegung aus Pareto-Front für den Model 3 – WLTP, Stadt-, Landzyklus.

	WLTP	Stadtzyklus	Landzyklus
Zurückgelegte Distanz [m]	23 262,39	14 063,94	21 031,17
Energieverbrauch [kWh/100 km]	25,16	29,36	26,89
Reichweite [km]	310,4	265,97	290,49

5.5.4 Gesamtfahrzeugbetrachtung

Werden gleichzeitig die betrachteten Maschinen- sowie die Fahrzeugparameter (Getriebe, Batterie und Nebenverbraucher) gesamtheitlich als Freiheitsgrad an den Optimierungsalgorithmus übergeben, erfolgt eine Pareto-optimale Maschinenauslegung für die Fahrzeugklasse des BMW i3 nach Abbildung 5.20. Dabei wird der BMW i3 im WLTP für eine Optimierung lediglich der Maschinenparametern (Blau) sowie als Gesamtfahrzeugbetrachtung (Grün) aufgeführt.

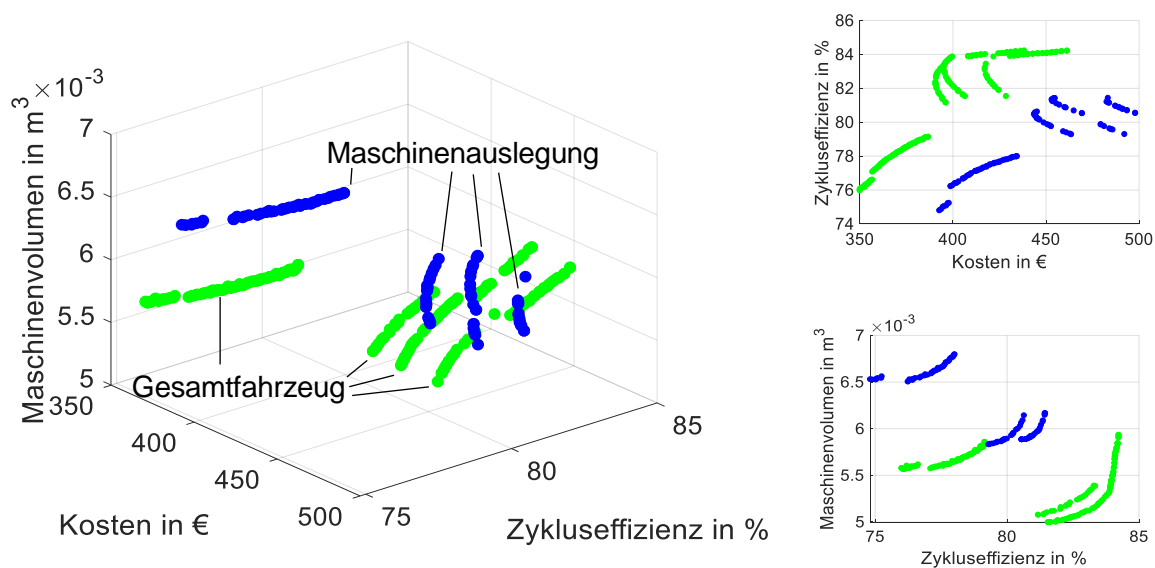


Abbildung 5.20: WLTP Maschinenauslegung (Blau), WLTP Gesamtfahrzeug (Grün) für den BMW i3.

Die optimale Maschinenauslegung in Bezug auf die Kosten, Zykluseffizienz und das Maschinenvolumen ist in Tabelle 5.19 aufgezeigt.

Tabelle 5.19: Optimale Maschinenauslegung – WLTP BMW i3.

Fahrzyklus	Zykluseffizienz [%]	Kosten [€]	Maschinenvolumen [$\times 10^{-3} \text{ m}^3$]
WLTP (Maschine)	74 - 82	380 - 500	5,8 - 6,8
WLTP (Gesamtfahrzeug)	76 - 86	350 - 460	5 – 5,9

Die simultane Betrachtung von elektrischer Maschine, Batteriekapazität sowie Getriebeübersetzung führt dazu, dass die optimale Maschinenauslegung bei gleichbleibenden Nutzeranforderungen (WLTP) eine höhere Zykluseffizienz bei geringerem Maschinenvolumen und geringeren Kosten ermöglicht. Somit ist die Berücksichtigung der restlichen Antriebsstrangkomponenten für eine holistische Auslegung unabdingbar.

5.5.5 Anforderungen zukünftiger Traktionsmaschinen

Die in den vorangegangenen Kapiteln aufgezeigten Untersuchungen zeigen einen exemplarischen Ausschnitt der möglichen Analysen des entwickelten Maschinenauslegungstools sowie des Optimierungsalgorithmus'. Sie dienen vor allem dazu, den Zielkonflikt zwischen *Kosten*, *Effizienz* und *Package* aufzulösen und die Forschungsfragen (Kapitel 2.4) zu beantworten. Dabei ist das Ziel, eine optimale Maschine für ein bestimmtes Nutzerverhalten auszulegen.

In Bezug auf verschiedene Fahrzeug- sowie Maschinenparameter können anhand der durchgeführten Analysen, Trends für zukünftige Fahrzeugkonzepte ermittelt werden:

- Der Trend des Optimierungsalgorithmus' geht für alle Analysen, ausgenommen die Variation der Kühlmethode in der Sensitivitätsanalyse, zu kleinen Polpaarzahlen im gewählten Optimierungsbereich.
- In einem Großteil der durchgeführten Analysen, wird durch den Optimierungsalgorithmus eine PSM bevorzugt.
- Der Optimierungsalgorithmus weist eine Tendenz in Richtung niedrigere Getriebeübersetzungen auf (Sensitivitätsanalyse Kapitel 5.4).
- Der Trend der Nenndrehzahl geht in Bezug auf die Fahrdaten und verschiedene Nutzerszenarien in Richtung höhere n_{Nenn} im simulierten Wertebereich.
- Der Trend der Spannungsebene geht in Richtung höhere Spannungsebenen zwischen 400 V und 700 V. Dies spiegelt die aktuellen Entwicklungen der Industrie wider [216]. Jedoch wird in den angegebenen Spannungsgrenzen der jeweiligen Analysen nicht die maximale Spannungsebene (800 V) gewählt. Heutzutage sind die meisten Serienfahrzeuge mit einer Batteriespannungsebene von ca. 400 V ausgestattet [19].
- Die Leistungsklasse ist signifikant vom jeweiligen Nutzerverhalten abhängig. Je höher die Anforderungen an die maximale Geschwindigkeit und Beschleunigungsdeltas, desto höher die notwendige Leistung der Antriebseinheit. Im Gegensatz

dazu, tendiert der Optimierungsalgorithmus zu möglichst niedrigen Maschinenleistungen.

- Der Trend in Bezug auf die Kühlungsart ist in Richtung Flüssigkeitskühlung, wie es auch in den meisten Serienfahrzeugen umgesetzt wird. Lediglich für den Stadtzyklus wurde eine Luftkühlung bevorzugt.

Aus den Trends der Anforderungen zukünftiger Traktionsmaschinen kann zudem ein Trend in der Leistungsdichte gemäß Tabelle 5.20 erfolgen:

Tabelle 5.20: Leistungsdichte Nutzerverhalten – BMW i3.

	Stadtzyklus	Landzyklus	Autobahnzyklus	WLTP
Leistungs- dichte [kW / 10 ⁻³ m ³]	$\frac{70}{5,345} = 13,1$	$\frac{100}{5,193} = 19,3$	$\frac{200}{8,07} = 24,8$	$\frac{70}{5,5} = 12,7$

Die Leistungsdichte wird dabei nicht nach Maschinengewicht in *kg* sondern nach Maschinenvolumen bewertet. Dabei beträgt die Leistungsdichte einer Pareto-optimalen Maschinenauslegung bei einer Gewichtung nach höchster Zykluseffizienz für den generierten Stadtzyklus des BMW i3 13,1 kW/ 10⁻³ m³, für den Landzyklus 19,3 kW/ 10⁻³ m³ und für den Autobahnzyklus 24,8 kW/10⁻³ m³. Durch den Vergleich einer Pareto-optimale Auslegung nach WLTP entsteht eine Maschinenauslegung mit einer Leistungsdichte von 12,7 kW/10⁻³ m³, die vergleichbar ist mit den Anforderungen des Stadtfahrzyklus⁴ nach realen Fahrdaten.

Alle Maschinenauslegungen auf den Pareto-Fronten sind für den Anwendungsfall Pareto-optimal und erfüllen alle durch den Fahrzyklus gestellten Anforderungen an den Antriebsstrang. Die Pareto-Fronten dienen in erster Linie dazu, mit wenigen anfänglichen Anforderungen (Fahrzyklus des Nutzerverhaltens), die Maschinenparameter für eine optimale Maschinenauslegung auszuwählen. Diese können zum Beispiel zu einer ersten Einschätzung dienen, ob eine ASM oder PSM bzw. eine bestimmte Wicklungskonfiguration für ein Nutzerverhalten und Fahrzeug am geeignetsten ist. Im Anschluss muss der Entwickler lediglich anhand dieser ersten Grobabschätzung je nach Kundenbedürfnis die Gewichtung der Zielgrößen *Kosten*, *Effizienz* und *Package* festlegen.

In Bezug auf die Anforderungen zukünftiger Traktionsmaschinen können diese Trends eingesetzt werden, um den elektrischen Antriebsstrang auf die realen Anforderungen und Nutzerverhalten auszulegen. Somit kann das Ziel zur optimalen Auslegung elektrischer Maschinen für einen definierten Anwendungsfall in Bezug auf *Package*, *Effizienz* und *Kosten* beantwortet werden. Wird zukünftig nicht nach Fahrzeugklasse, sondern nach Nutzer Anwendungsfall ausgelegt, so können die elektrischen Maschinen effizienter, kostengünstiger und Package-optimierter ausgelegt werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Auslegung elektrischer Maschinen basiert nur teilweise auf streng physikalischen Grundlagen und wird stark beeinflusst durch von Wissenschaftlern und Ingenieuren gesammelten Erfahrungswerten sowie bekannten Standardprozessen aus dem Bereich von Industriemaschinen [76]. Die speziellen Anforderungen an elektrische Traktionsmaschinen (z.B. hochgradig dynamische Belastung) werden dabei jedoch meist vernachlässigt, was zwangsläufig zu einer Überdimensionierung hinsichtlich Größe, Gewicht, Leistung und Kosten führt [76]. Dies hat zur Folge, dass sich die Betriebspunkte nicht im höchsten Effizienzbereich der elektrischen Maschinen befinden [30].

Die konventionelle Maschinenauslegung besteht dabei aus einer Vielzahl von Konstruktionschritten, die nach einer festen Abfolge durchlaufen werden. Aufgrund des sequentiellen Ansatzes wird der Lösungsraum der möglichen Parameterkombinationen in jedem Schritt des Entwurfsprozesses reduziert. Es wird daher ein jeweiliges lokales Optimum definiert. Durch die frühzeitige Reduktion des Lösungsraumes wird die Kombination, die ein mögliches globales Optimum darstellt, möglicherweise vorzeitig aus dem Lösungsraum eliminiert.

Aus diesem Grund, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein ganzheitlicher Ansatz zur automatisierten Auslegung elektrischer Maschinen im realen Nutzerverhalten des Antriebsstrangs eines batterieelektrischen Fahrzeugs entwickelt und Open-Source veröffentlicht. Dafür wurden zunächst basierend auf realen Fahrzeugdaten, Fahrzyklen für verschiedene Nutzerszenarien definiert. Diese basieren auf realen Beschleunigungs- und Bremsverhalten sowie charakteristischen Fahrverhalten im Stadt-, Land- sowie Autobahnverkehr in Deutschland. Ziel ist es, unter Berücksichtigung der realen Betriebspunkte, die Maschinenauslegung hinsichtlich einer maximalen Betriebseffizienz und -leistung über das gesamte Drehmoment-Drehzahl-Kennfeld im realen Betrieb zu ermöglichen.

Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neuartiges Maschinenauslegungsmodell vorgestellt, um das konventionelle, sequenzielle Maschinendesign aufzulösen und eine ganzheitliche Betrachtung aller Maschinenparameterkombinationen zu ermöglichen. Ziel ist es, bekannte Literaturwerte und Verfahren mit einem neuen Stator- und Wicklungsdesign sowie einer interaktiven Schnittstelle zu kombinieren, um dem Anwender die Möglichkeit zu geben, mit wenigen Eingabeparametern eine elektrische Maschine und die zugehörigen Wirkungsgradkennfelder auszulegen.

Die einzelnen Modelle sind anhand von realen Maschinendaten von Herstellern und am Rollenprüfstand erfolgreich teilvalidiert. Ein Teil der generierten Fahrzyklen konnte erfolgreich auf dem Rollenprüfstand nachgefahren und mit Hilfe einer Längsdynamiksimulation mit den Messdaten verifiziert werden.

Dabei stellt die entwickelte Methodik sowie die Ergebnisse zur Auslegung einer optimalen elektrischen Maschine für einen definierten Anwendungsfall in Bezug auf *Package*, *Effizienz* und

Kosten, den wissenschaftlichen Neuigkeitswert dieser Arbeit dar. Das in dieser Arbeit entwickelte Auslegungstool kann vor allem in der Vorentwicklung zukünftiger Fahrzeugkonzepte zur ersten Grobauslegung von Antriebsstrangkomponenten Einsatz finden. Es dient dazu, für ein bestimmtes Nutzerverhalten eine erste Grobauslegung zu ermöglichen und den Entwickler in einer ersten Entscheidung über diverse Maschinenparameter wie Spannungsebene, Kühlungsart, Topologie etc. zu unterstützen.

Dafür wurden die generierten realen Fahrzyklen mit der entwickelten Auslegungsmethodik für elektrische Maschinen mit einer Längsdynamiksimulation [179], [182] sowie einem Kostentool [31] kombiniert und mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmus (NSGA II) in Bezug auf die Zielgrößen *Package*, *Effizienz* und *Kosten* analysiert. Dadurch kann zum einen, eine optimale Maschinenauslegung nach realen Anforderungen generiert werden, die für bestehende Fahrzeugklassen und auch zukünftige Fahrzeugkonzepte wie beispielsweise autonome Fahrzeuge anwendbar ist. Zum anderen wird die konventionelle Maschinenauslegung an die dynamischen Anforderungen elektrischer Maschinen im Fahrzeug angepasst und zuletzt der Zielkonflikt in der Antriebsstrangauslegung gelöst. Die entwickelte Auslegungsmethodik kann somit nicht nur für zukünftige Maschinenauslegungen, sondern Gesamtantriebsstranguntersuchungen Einsatz finden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde gezeigt, dass die Betriebspunkte realer Nutzeranforderungen von den im Testbetrieb eingesetzten Fahrzyklen signifikant abweichen. Es konnten optimale elektrische Maschinen für die jeweiligen definierten Nutzerverhalten ausgelegt werden. Es wurde zudem gezeigt, dass die Auslegung einer möglichst kostengünstigen Maschine nicht zu einer global optimalen Maschine führen kann, weil vor allem die Betrachtung des gesamten Antriebsstrang zu einer Verbesserung in allen Zielgrößen führt. Dies liegt vor allem an der Tatsache, dass bei einer erhöhten Maschineneffizienz bzw. einem verringerten Maschinenbauraum oder einem erhöhten Spannungsniveau, die Batterie kleiner und somit kostengünstiger ausgelegt werden kann, was zu einer günstigeren und effizienten Gesamtopologie führt.

Eine Möglichkeit, die Methodik in dieser Arbeit zu erweitern, liegt zum einen darin, die generierten Fahrzyklen zukünftig um die Steigfähigkeit des Fahrzeuges im Zyklus zu erweitern und die Auswirkung dieser auf den Energieverbrauch zu untersuchen. Zum anderen liegt eine sinnvolle Maßnahme in der Erweiterung des Maschinenauslegungstools um eine direkte Einbindung eines thermischen Maschinenmodells, um Aussagen über die Überlastfähigkeit sowie den Wirkungsgrad bei Überlast zu treffen. Dafür müssen zukünftig vor allem das Sättigungsverhalten und die Induktionen in den jeweiligen Betriebspunkten integriert werden. Zudem könnten moderne Trends in der Wicklungstechnik wie beispielsweise Hair-Pin Wicklungen und eine erhöhte Strangzahl integriert werden.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Konventionelle und anwendungsbezogene Maschinenauslegung.	3
Abbildung 1.2: Aufbau der vorliegenden Arbeit – (1) Vorstellung der automatisierten Maschinenauslegungsmethodik (Kapitel 2.1, Kapitel 3.1 und Kapitel 4.1), (2) Definition des Anwendungsfalls durch Nutzeranforderungen und deren Überführung in repräsentative Fahrzyklen (Kapitel 2.2.2, Kapitel 3.2.2, Kapitel 3.2.3 und Kapitel 4.2), (3) Kostentool [31] (Kapitel 3.2.5), (4) Zusammenführung im Optimierungsalgorithmus zur Pareto-optimalen Maschinenauslegung (Kapitel 2.2, Kapitel 3.2 und Kapitel 4.2).	5
Abbildung 2.1: Übersicht des konventionellen Maschinenauslegungsprozesses [13], [20], [32].	10
Abbildung 2.2: Beispielhafter Aufbau verschiedener Maschinentopologien.	11
Abbildung 2.3: Wirkungsgrad $\eta > 85\%$ für betrachtete Maschinentopologien nach [77].	14
Abbildung 2.4: Aufbau Stator und Rotor elektrischer Maschinen (PSM und ASM).	17
Abbildung 2.5: Aufbau einer a) Einschicht- und b) Zweischichtwicklung nach [80]. Die Nutisolation befindet sich zwischen der Nutwand und der jeweiligen Wicklung.	18
Abbildung 2.6: Aufbau einer a) konzentrierten und b) verteilten Wicklung [80].	19
Abbildung 2.7: Sehnung anhand einer a) Zonung, b) Wicklungsschrittverkürzung und c) Zonenänderung [13], [84].	19
Abbildung 2.8: Übersicht der Parameter einer trapezförmigen Nutgeometrie [32].	20
Abbildung 2.9: Flussplan der automatisierten Nutformgenerierung nach MEYER [32].	21
Abbildung 2.10: Übersicht gängiger Rotorvarianten für PSM [12].	23
Abbildung 2.11: Beispielhafte Einflussfaktoren eines Kennfeldes [66].	24
Abbildung 2.12: Beispielhafte Leistungsbilanz einer ASM [96].	26
Abbildung 2.13: Auslegungsdreieck und Zielkonflikt der Auslegung elektrischer Maschinen nach [20].	27
Abbildung 2.14: Verteilung der Betriebspunkte für verschiedene Fahrzustände [77].	29
Abbildung 3.1: Vorgehen zur Modellbildung dieser Arbeit. Das zur Simulation eingesetzte Kostentool basiert auf ANGERER [31], das Maschinenauslegungstool wurde durch KALT [30] bereits veröffentlicht und die Längsdynamiksimulation stammt aus KÖNIG [150].	37
Abbildung 3.2: Aufbau der automatisierten Maschinenauslegungsmethodik [84].	38
Abbildung 3.3: Aufbau für den elektromagnetischen Entwurf einer ASM [84].	41
Abbildung 3.4: Mehrstufiges Vorgehen zur Nachberechnung des Magnetkreises [84].	44

Abbildung 3.5: Vorgehen des entwickelten optimierten Statorentwurfs [84].	47
Abbildung 3.6: Auswahl möglicher Wicklungskonfigurationen [84].	48
Abbildung 5.1: Variierte Eingangsparameter der Untersuchungen dieser Arbeit. (1) Fahrzeugklasse (VW e-up!, BMW i3, Tesla Model 3), (2) Nutzerverhalten (reale und standardisierte Fahrzyklen), (3) Gesamtantriebsstrang (Batteriekapazität und Getriebeübersetzung, (4) Oberflächenmagnete, (5) eingelassene Magnetanordnung, (6) tangentiale Magnetanordnung, (7) V-förmig Magnetanordnung, (8) Einschichtwicklung, (9) Zweischichtwicklung, (10) Flüssigkühlung, (11) Luftkühlung, (12) PSM, (13) ASM und (14) Verhältnis n_{Eck}/n_{max} .	65
Abbildung 5.2: Wirkungsgradkennfelder einzelner Verlustarten für die BMW i3 Maschine im WLTP aus KALT [143].	67
Abbildung 5.3: Wirkungsgradkennfeld und Betriebspunkte für die BMW i3 Maschine aus KALT [143].	68
Abbildung 5.4: Vergleich potentieller Stator designs für den BMW i3 aus KALT [80].	70
Abbildung 5.5: Generierter Fahrzyklus für Autobahnverkehr – VW e-up!, BMW i3, Tesla Model 3.	72
Abbildung 5.6: Vergleich Gesamtfahrzyklus (Orange) und WLTP (Blau) – VW e-up!, BMW i3, Tesla Model 3.	73
Abbildung 5.7: Sensitivitätsanalyse Fahrzyklus – WLTP (Blau) und NEFZ (Grün).	76
Abbildung 5.8: Sensitivitätsanalyse Kühlungsart – Flüssigkeits- (Blau), Luftkühlung (Grün) einer PSM.	77
Abbildung 5.9: Sensitivitätsanalyse Kühlungsart – Flüssigkeits- (Grün), Luftkühlung (Blau) einer ASM.	78
Abbildung 5.10: Sensitivitätsanalyse Maschinentopologie – PSM (Blau), ASM (Grün).	79
Abbildung 5.11: Sensitivitätsanalyse Magnetanordnung – Tangential (Blau), V-Form (Grün).	80
Abbildung 5.12: Sensitivitätsanalyse Maschinentopologie – fest PSM (Blau), fest ASM (Grün), variabel (Rot).	81
Abbildung 5.13: Nutzerverhalten VW e-up! – WLTP (Blau), Gesamtzyklus (Grün). Die jeweilige Maschinenauslegung mit möglichst geringen Kosten und Bauraum ist mit einem O gekennzeichnet. Die jeweilige Maschinenauslegung mit der höchsten Zykluseffizienz ist durch ein X gekennzeichnet.	83
Abbildung 5.14: Nutzerverhalten VW e-up! – Stadt- (Blau), Land- (Grün), Autobahn (Rot). Skala Zykluseffizienz [65 - 85], Maschinenvolumen [5-6] und Kosten [330-445].	85
Abbildung 5.15: Nutzerverhalten VW e-up! – Stadt- (Blau), Land- (Grün), Autobahn (Rot).	86
Abbildung 5.16: Nutzerverhalten BMW i3 – Stadt- (Blau), Land- (Grün), Autobahnzyklus (Rot). Die jeweilige Maschinenauslegung mit der höchsten Zykluseffizienz ist durch ein X gekennzeichnet.	87
Abbildung 5.17: Nutzerverhalten BMW i3 – WLTP (Blau), Roborace- (Grün), Lastzyklus (Rot).	89

Abbildung 5.18: Nutzerverhalten Model 3 – WLTP (Blau), Land- (Grün), Stadtzyklus (Rot). Die jeweilige Maschinenauslegung mit der höchsten Zykluseffizienz ist durch ein X gekennzeichnet.	90
Abbildung 5.19: Effizienzkennfelder und Betriebspunkte – (a) WLTP, (b) Land- (c) Stadtzyklus.	91
Abbildung 5.20: WLTP Maschinenauslegung (Blau), WLTP Gesamtfahrzeug (Grün) für den BMW i3.	91
Abbildung 6.1: Iterative Nutformberechnung nach [32].....	lxxxix

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Übersicht der Literatur zum Stand der Wissenschaft und Technik.	33
Tabelle 3.1: Notwendige Inputparameter zur Maschinenauslegung.....	39
Tabelle 3.2: Auswahl der Rotornutenzahl N_2 zur Reduzierung auftretender Oberwellen [13]. .	43
Tabelle 3.3: Auswahloptionen zur Analyse.	45
Tabelle 3.4: Näherungswerte als Eingangsparameter für die optimale Statorauslegung.	46
Tabelle 3.5: Auswahl der Maschinen- und Fahrzeugparameter als Freiheitsgrad für den NSGA II.....	51
Tabelle 3.6: Festgelegte Maschinenparameter für den NSGA II.	51
Tabelle 3.7: Verwendete Fahrzeuge für die Berücksichtigung in der Fahrzyklenerstellung.	54
Tabelle 3.8: Verwendete Fahrzeuge für die Längsdynamiksimulation.	55
Tabelle 4.1: Übersicht der Validierungszyklen.....	57
Tabelle 4.2: Ergebnisse Validierung Hauptabmessungen – BMW i3 [58], [68], [89], [203].	59
Tabelle 4.3: Ergebnisse Validierung Hauptabmessungen – Nissan Leaf [58], [164].....	59
Tabelle 4.4: Ergebnisse Validierung Hauptabmessungen – VW e-Golf [58], [69].	60
Tabelle 4.5: Ergebnisse Validierung Hauptabmessungen – BRUSA IPM1-61.7.04.....	60
Tabelle 4.6: Ergebnisse Validierung Hauptabmessungen – Audi e-tron [56], [206].	61
Tabelle 4.7: Ergebnisse Validierung Hauptabmessungen – Tesla Model S [57], [59], [75].....	61
Tabelle 4.8: Ergebnisse Validierung Hauptabmessungen – Renault Twizy [58], [75].	62
Tabelle 4.9: Ergebnisse Validierung Hauptabmessungen – MÜLLER [13], [36], [207].	62
Tabelle 4.10: Ergebnisse Validierung Elektromagnetische Kenngrößen MÜLLER [207].	64
Tabelle 5.1: Betrachtete Maschinendaten.	66
Tabelle 5.2: Parameterbereich optimierter Statorentwurf - BMW i3 (2016 model) [1], [75], [210], [211].....	69
Tabelle 5.3: Abgeleitete Maschinenparameter des optimierten Statorentwurfs für den BMW i3.	71
Tabelle 5.4: Übersicht generierter Fahrzyklen für Nutzerverhalten und Fahrzeugklasse.	74
Tabelle 5.5: Übersicht der Betriebspunkte für die generierten Fahrzyklen.	75
Tabelle 5.6: Optimale Maschinenauslegung – WLTP und NEFZ.	77
Tabelle 5.7: Optimale Maschinenauslegung – Kühlungsart Flüssig, Luft (PSM).	78
Tabelle 5.8: Optimale Maschinenauslegung – Kühlungsart Flüssig, Luft (ASM).	78

Tabelle 5.9: Optimale Maschinenauslegung – Maschinentopologie PSM und ASM.	79
Tabelle 5.10: Optimale Maschinenauslegung – Magnetanordnung tangential, V-Form.	80
Tabelle 5.11: Optimale Maschinenauslegung – Maschinentopologie fest, variabel.	81
Tabelle 5.12: Optimale Maschinenauslegung VW e-up! – WLTP, Gesamtzyklus.	83
Tabelle 5.13: Optimale Maschinenauslegung VW e-up! – Stadt-, Land-, Autobahnzyklus.	86
Tabelle 5.14: Optimale Maschinenauslegung BMW i3 – Stadt-, Land-, Autobahnzyklus.	87
Tabelle 5.15: Optimale Maschinenauslegung BMW i3 – WLTP, Roborace-, Lastzyklus.	89
Tabelle 5.16: Vergleich der optimalen Maschinenauslegung zur Serienmaschine des BMW i3 im WLTP.	89
Tabelle 5.17: Optimale Maschinenauslegung Model 3 – WLTP, Stadt-, Landzyklus.	90
Tabelle 5.18: Maschinenauslegung aus Pareto-Front für den Model 3 – WLTP, Stadt-, Landzyklus.	91
Tabelle 5.19: Optimale Maschinenauslegung – WLTP BMW i3.	92
Tabelle 5.20: Leistungsdichte Nutzerverhalten – BMW i3.	93

Literaturverzeichnis

- [1] S. Juraschek, A. Buchner und B. Schinnerl, *Die elektrische Antriebstechnologie der BMW Group*, 39. Internationales Wiener Motorensymposium, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 807, Band 2, 2018.
- [2] A. Wenzlaff, „MADE IN GERMANY“ – 125 Jahre Automobil: Eine nicht nur statistische Rückschau. Sonderbeitrag Verkehr. [Online]. Verfügbar: <https://www.muenchen.de/rathaus/dam/jcr:0b136320-6159-4ddf-9c9d-94437658bcb8/mb110403.pdf> (Zuletzt geprüft am: 11.Jan.2021).
- [3] Our World in Data, *Carbon dioxide emissions by sector - World*. [Online]. Verfügbar: <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector> (Zuletzt geprüft am: 25.Okt.2020).
- [4] European Commission, *The roadmap for transforming the EU into a competitive, low-carbon economy by 2050*. [Online]. Verfügbar: https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/2050_roadmap_en.pdf (Zuletzt geprüft am: 02.Apr.2020).
- [5] Die Bundesregierung, *CO₂-Emissionen*. [Online]. Verfügbar: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/energiewende/co2-kohlenstoffdioxid-oder-kohlendioxid-emission-614692> (Zuletzt geprüft am: 20.Okt.2020).
- [6] Szenarien der Elektromobilität in Deutschland, *EBP-Hintergrundbericht*. [Online]. Verfügbar: https://www.ebp.ch/sites/default/files/unterthema/uploads/2018-04-20_EBP_D_EmobSzen_PKW_2018_0.pdf (Zuletzt geprüft am: 20.Okt.2020).
- [7] Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), *Fortschrittsbericht 2018 – Markthochlaufphase*. [Online]. Verfügbar: http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/NPE_Fortschrittsbericht_2018_barrierefrei.pdf (Zuletzt geprüft am: 25.Okt.2020).
- [8] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, *Elektromobilität in Deutschland*. [Online]. Verfügbar: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/elektromobilitaet.html> (Zuletzt geprüft am: 20.Okt.2020).
- [9] H. D. Futschik, A. Achleitner, G. Döllner, C. Burgers, J. K.-H. Friedrich, C. H. Mohrdieck, H. Schulze, M. Wöhr, P. Antony, M. Urstöger, K. E. Noreikat, M. Wagner, E. Berger, M. Gruber und G. Kiesgen, *Formen und neue Konzepte*: Springer Fachmedien Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-01690-6, doi: 10.1007/978-3-658-01691-3_4, 2013.
- [10] S. Jeschke, *Grundlegende Untersuchungen von Elektrofahrzeugen im Bezug auf Grundlegende Untersuchungen von Elektrofahrzeugen im Bezug auf Energieeffizienz und EMV mit einer skalierbaren Power-HiL-Umgebung*. Dissertation, http://www.ets.uni-duisburg-essen.de/download/public/Jeschke_Diss.pdf, Universität Duisburg/Essen, 2016.
- [11] ADAC/Uwe Rattay, *Stromverbrauch Elektroautos: Aktuelle Modelle im ADAC Test*. [Online]. Verfügbar: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/tests/elektromobilitaet/stromverbrauch-elektroautos-adac-test/> (Zuletzt geprüft am: 28.Nov.2020).

- [12] A. Kampker, D. Vallée und A. Schnettler, *Elektromobilität*. Springer Berlin Heidelberg, ISBN: 978-3-642-31985-3, doi: 10.1007/978-3-642-31986-0, 2018.
- [13] G. Müller, K. Vogt, B. Ponick, Ed., *Berechnung elektrischer Maschinen*, 6th ed.: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.
- [14] L. Horlbeck, *Auslegung elektrischer Maschinen für automobile Antriebsstränge unter Berücksichtigung des Überlastpotentials*. Dissertation, TU München, ISBN: 978-3981876932, 2018.
- [15] A. Eisele, L. Horlbeck, M. Hann, B. Jäger und M. Lienkamp, *Real-life data based analysis of driving cycles regarding their insufficient cycle duration, IEEE 19th Int. Conf. Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, doi: 10.1109/ITSC.2016.7795587, 2016.
- [16] S. A. Semidey und Y. Duan, *Optimal Electromagnetic-Thermo-Mechanical Integrated Design Candidate Search and Selection for Surface-Mount Permanent-Magnet Machines Considering Load Profiles, IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 47, No. 6, doi: 10.1109/TIA.2011.2168589, 2011.
- [17] J. Ungermann, *Zuverlässigkeitsnachweis und Zuverlässigkeitsentwicklung in der Gesamtfahrzeugerprobung*. Dissertation, Cuvillier Verlag, ETH, Zürich, 2009.
- [18] M. Hagedorn, S. Hartmann, D. Heilert, C. Harter, I. Olschewski, L. Eckstein, M. Baum, T. Henzelmann und T. Shclick, *Automobile Wertschöpfung 2030/2050: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie - Endbericht*. [Online]. Verfügbar: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/automobile-wertschoepfung-2030-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=16 (Zuletzt geprüft am: 30.Nov.2020).
- [19] E.A. Grunditz und T. Thiringer, *Performance Analysis of Current BEVs Based on a Comprehensive Review of Specifications, IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 3. September 2016, Vol. 2, No. 3, doi: 10.1109/TTE.2016.2571783, 2016.
- [20] M. Hombitzer, Ed., *Permanenterregter Traktionsantrieb für ein Elektrofahrzeug: Bauraum, Wirkungsgrad und Kosten - das Auslegungsdreieck*. Essen, 2014.
- [21] H. Schäfer, *Trends in der elektrischen Antriebstechnologie für Hybrid- und Elektrofahrzeuge*. Renningen: expert Verlag, ISBN: 978-3-8169-3100-3, 2012.
- [22] VDA, *WLTP – weltweit am Start für realitätsnähere Ergebnisse beim Kraftstoffverbrauch* (Zuletzt geprüft am: 25.Okt.2020).
- [23] OSWOS, *Achsantrieb für Elektrofahrzeuge: Vergleich von Antriebsarchitekturen*. [Online]. Verfügbar: https://oswos.com/achsenantrieb/?cli_action=1606730228.881 (Zuletzt geprüft am: 30.Nov.2020).
- [24] G. Rösel, P. Moenius, N. Daun, S. Spas, W. Hackmann, B. Schmitt und A. Reich, *Konzept für einen hocheffizienten 800 V Achsantrieb*. [Online]. Verfügbar: <https://www.continental.com/resource/blob/223722/0ecc321596f8a61edf954f0936929e14/20200604-weitere-information-zu-800v-antrieb-de-data.pdf> (Zuletzt geprüft am: 30.Nov.2020).
- [25] M. Baumgart, P. Rittmeyer, B. Dietz, M. Hermann, S. Schwiebert und I. Heller, *Electro Future 2030 Report: Was Kunden bewegt und Experten antreibt*. [Online]. Verfügbar: https://www.electrive.net/wp-content/uploads/2017/12/Electrofuture_2030_Report_Endstand.pdf (Zuletzt geprüft am: 28.Nov.2020).

- [26] Elektroauto-News.net, *Studie: Reichweite eines typischen Elektroautos sinkt bei etwa -7 Grad Celsius um bis zu 41 Prozent*. [Online]. Verfügbar: <https://www.elektroauto-news.net/2019/studie-reichweite-elektroauto-sinkt-bei-7-grad-celsius-um-41-prozent> (Zuletzt geprüft am: 02.Dez.2020).
- [27] EFahrer, *Reichweitenrechner*. [Online]. Verfügbar: <https://efahrer.chip.de/reichweitenrechner> (Zuletzt geprüft am: 02.Dez.2020).
- [28] Dassault Systemes, *Certify with certainty: Digital Solutions for WLTP*. [Online]. Verfügbar: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/trends/wltp/> (Zuletzt geprüft am: 30.Nov.2020).
- [29] RWTH Aachen in Zusammenarbeit mit dem Bundesministerium für Bildung und Forschung, *UnicarAgil - Die Idee*. [Online]. Verfügbar: <https://www.unicaragil.de/de/projektinformationen.html> (Zuletzt geprüft am: 29.Nov.2020).
- [30] S. Kalt, J. Erhard und M. Lienkamp, *Electric Machine Design Tool for Permanent Magnet Synchronous Machines and Induction Machines*, *Machines* 2020, 8(1), 15, doi: 10.3390/machines8010015, 2020.
- [31] C. R. Angerer, *Antriebskonzept-Optimierung für batterieelektrische Allradfahrzeuge*, TU München, ISBN: 978-3-8439-4388-8, 2020.
- [32] W. Meyer, *Automatisierter Entwurf elektromechanischer Wandler*. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, TU München, München, 2009.
- [33] G. Müller, K. Vogt, and B. Ponick, *Berechnung elektrischer Maschinen*, 6th ed. Weinheim: Wiley-VCH, ISBN: 9783527405251, 2011. [Online]. Verfügbar: http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=2930836&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm
- [34] Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), *Mobilität in Deutschland*. [Online]. Verfügbar: <http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/> (Zuletzt geprüft am: 14.Feb.2020).
- [35] J. Teigelkötter, *Energieeffiziente elektrische Antriebe*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, ISBN: 978-3-8348-1938-3, 2013.
- [36] G. Müller und B. Ponick, *Grundlagen elektrische Maschinen*: Wiley VCH Verlag GmbH, ISBN: 978-3-527-41205-1, 2014.
- [37] E. Nolle und A. Beshta, *Elektrische Maschinen und Antriebe*, ISBN: 978 - 966 - 350 - 418 - 6, 2013.
- [38] H. Tschöke, *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs: Basiswissen*. Stuttgart: Springer-Vieweg, ISBN: 9783658046439, 2015.
- [39] R. Richter, *Kurzes Lehrbuch der elektrischen Maschinen: Wirkungsweise - Berechnung - Messung*. Berlin: Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, ISBN: 978-3-6429-2534-4, 1949.
- [40] W. Schuisky, *Elektromotoren: Ihre Eigenschaften und ihre Verwendung für Antriebe*. Wien: Springer Verlag, ISBN: 978-3-662-25872-9, 1951.
- [41] E. Bolte, *Elektrische Maschinen: Grundlagen, Magentfelder, Erwärmung, Funktionsprinzipien, Betriebsarten, Einsatz, Entwurf und Wirtschaftlichkeit*. Springer Vieweg, ISBN: 978-3-662-54688-8, 2018.
- [42] D. Schröder, *Elektrische Antriebe*: Springer Verlag, ISBN: 978-3-540-72764-4, 2008.

- [43] H. O. Seinsch, *Grundlagen elektrischer Maschinen und Antriebe*: Vieweg + Teubner, ISBN: 978-3-519-06164-9, 1993.
- [44] J. F. Gieras, *Electrical Machines: Fundamentals of Electromechanical Energy Conversion*: CRC Press Taylor & Francis Group, ISBN: 978-1-4987-0883-8, 2017.
- [45] R. Fischer, *Elektrische Maschinen*: Hanser Fachbuchverlag, ISBN: 978-3-4464-0613-1, 2003.
- [46] J. Pyrhönen, T. Jokinen und V. Hrabovcova, *Design of Rotating Electrical Machines*: John Wiley & Sons Ltd, ISBN: 978-1-1187-0159-1, 2013.
- [47] A. Huber, T. Nguyen-Xuan, N. Brossardt, F. Eckstein und M. Pfitzner, Ed., *Thermische Simulation eines hochdetaillierten Wickelkopfmodells einer elektrischen Antriebsmaschine*, 2014.
- [48] R. Fischer, *Elektrotechnik für Maschinenbauer*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-12514-1, 2016.
- [49] H. Wöhl-Brunn, *Synchronmaschine mit eingebetteten Magneten und neuartiger variabler Erregung für Hybridantriebe*. Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig, 2010.
- [50] A. Binder, *Elektrische Maschinen und Antriebe*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, ISBN: 978-3-540-71849-9, 2012.
- [51] P. L. Daan Moreels, *High Efficiency Axial Flux Machines -Why Axial Flux Motor and Generator Technology Will Drive the Next Generation of Electric Machines*, 2018. Zuletzt geprüft am: Okt. 20 2020. [Online]. Verfügbar: <https://images.engineeringnet.eu/RSS/images/MagnaxAxialFluxMachines-whitepaper.pdf>
- [52] P. Hofmann, *Hybridfahrzeuge*. Wien: Springer Verlag, ISBN: 978-3-7091-1779-8, 2014.
- [53] G. Müller und B. Ponick, *Theorie elektrische Maschinen*. Weinheim: Wiley VCH Verlag GmbH, ISBN: 978-3-5274-0526-8, 2009.
- [54] VDE Verlag GmbH, Ed., *Methode für die Auslegung von Asynchronmaschinen in Elektrofahrzeugen: Design method for induction machines in electric vehicles*. Berlin: VDE, 2013.
- [55] A. Füßel, *Technische Potenzialanalyse der Elektromobilität: Stand der Technik, Forschungsausblick und Projektion auf das Jahr 2025*: Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-16695-3, doi: 10.1007/978-3-658-16696-0, 2017.
- [56] S. Pint, N. Ardey, G. Mendl, G. Fröhlich, R. Straßer, T. Laudénbach und J. Doerr, *The new full electric drivetrain from Audi*, 39. Internationales Wiener Motoren-symposium, doi: 10.1007/s35658-018-0037-6, 2018.
- [57] Tesla Inc., *Technische Daten Tesla Model S*. [Online]. Verfügbar: https://www.tesla.com/sites/default/files/model_s_owners_manual_north_america_en_us.pdf (Zuletzt geprüft am: 30.Mai.2019).
- [58] A2MAC1 EURL, *A2MAC1 Automotive Benchmarking*. [Online]. Verfügbar: <https://www.a2mac1.com/> (Zuletzt geprüft am: 11.Jan.2021).
- [59] F. Schüppel, M. Schlüter, J. Gacnik, *Design of battery electric vehicles in accordance with legal standards and manufacturers' and customers' requirements: Der Antrieb von morgen 2017 (Proceedings)*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-19223-5, doi: 10.1007/978-3-658-19224-2_2, 2017.

- [60] Renault Deutschland AG, *Technische Daten Renault Twizy*. [Online]. Verfügbar: <https://cdn.group.renault.com/ren/at/renaultat/downloadcenter/twizy/twizy-preisliste.pdf> (Zuletzt geprüft am: 30.Mai.2019).
- [61] H. O. Seinsch, *Grundlagen elektrische Maschinen und Antriebe*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, ISBN: 978-3-663-12159-6, 1993.
- [62] A. Binder, *BLDC - Motoren für Hochstromanwendungen: Automotive Dialogue Continental Schwalbach*. [Online]. Verfügbar: https://www.ew.tu-darmstadt.de/media/ew/vortrag/090918_binder_blcdc_hochstrom.pdf (Zuletzt geprüft am: 12.Nov.2020).
- [63] S. Pischinger und U. Seiffert, *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Vieweg, ISBN: 978-3-658-09528-4, 2016.
- [64] H.-H. Braess und U. Seiffert, *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [65] A. B. Thanheiser, *Energetische Modellierung und Echtzeitsimulation von elektrischen Fahrzeugantrieben*. Dissertation, TU München, München, 2015.
- [66] G. Pellegrino, A. Vagati, B. Boazzo und P. Guglielmi, *Comparison of Induction and PM Synchronous Motor Drives for EV Application Including Design Examples, IEEE Transactions on Industry Applications*, doi: 10.1109/TIA.2012.2227092, 2012.
- [67] Saving-Volt, *Elektroauto abschleppen – Pannenhilfe beim Elektroauto*. [Online]. Verfügbar: <https://www.saving-volt.de/2015/04/elektroauto-abschleppen-pannenhilfe-beim-elektroauto/> (Zuletzt geprüft am: 10.Jan.2021).
- [68] B. Ozpineci, *Oak Ridge National Laboratory Annual Progress Report for the Power Electronics and Electric Motors Program - 2014*. [Online]. Verfügbar: <https://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub52422.pdf> (Zuletzt geprüft am: 30.Sep.2018).
- [69] H. Jelden, P. Lück, G. Kruse und J. Tosen, *Der elektrische Antriebsbaukasten von Volkswagen, Springer Link, MTZ Motortech*, doi: 10.1007/s35146-014-0032-2, 2014.
- [70] M. Barcaro, N. Bianchi und F. Magnussen, *Design considerations to maximize performance of an IPM motor for a wide flux-weakening region, XIX International Conference on Electrical*, 978-1-4244-4174-7, doi: 10.1109/ICELMACH.2010.5607926, 2010.
- [71] S. Yang, N. J. Baker, B.C. Mecrow, C. Hilton, G. Sooriyakumar, D. Kostic-Perovic und A. Fraser, *Cost reduction of a permanent magnet in-wheel electric vehicle traction motor, International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 978-1-4799-4389-0., doi: 10.1109/ICELMACH.2014.6960218, 2014.
- [72] S. Yoshioka, S. Morimoto, M. Sanada und Y. Inoue, *Influence of magnet arrangement on the performance of IPMSMs for automotive applications, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 978-1-4799-5776-7, doi: 10.1109/ECCE.2014.6954018, 2014.
- [73] Y. Yang, S. M. Castano, R. Yang, M. Kasprzak, B. Bilgin, A. Sathyan, H. Dadkhah und A. Emadi, *Design and Comparison of Interior Permanent Magnet Motor Topologies for Traction Applications, IEEE Transactions on Transportation Electrification*, doi: 10.1109/TTE.2016.2614972, 2016.
- [74] J. Liebl, M. Lederer, K. Rohde-Brandenburger, J.-W. Biermann, M. Roth und H. Schäfer, *Energiemanagement im Kraftfahrzeug: Optimierung von CO₂-Emissionen und Verbrauch*

- konventioneller und elektrifizierter Automobile*: Springer Vieweg Verlag, ATZ/MTZ-Fachbuch, doi: 10.1007/978-3-658-04451-0, 2014.
- [75] D. Staton und J. Goss, *Open Source Electric Motor Models for Commercial EV & Hybrid Traction Motors: Motor Design Software by Motor Design Engineers*. Motor Design Limited. Berlin, 2017. Zuletzt geprüft am: Okt. 20 2020. [Online]. Verfügbar: www.motor-design.com
- [76] S. Chowdhury, *Enabling Technologies for Compact Integrated Electric Drives for Automotive Traction Applications*, *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, doi: 10.1109/ITEC.2019.8790594, 2019.
- [77] T. Finken, *Fahrzyklusgerechte Auslegung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge*. Dissertation, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-0607-0, RWTH Aachen, Aachen, 2011.
- [78] T. Finken, M. Felden und K. Hameyer, *Comparison and design of different electrical machine types regarding their applicability in hybrid electrical vehicles*, *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, doi: 10.1109/ICELMACH.2008.4800044, 2008.
- [79] A. Farschtschi, *Elektromaschinen in Theorie und Praxis: Aufbau, Wirkungsweisen, Anwendungen, Auswahl- und Auslegungskriterien*, ISBN: 978-3-8007-2964-7, VDE VERLAG; 2. aktualisierte und erweiterte Edition, Berlin, 2007.
- [80] S. Kalt, J. Erhard und M. Lienkamp, *Holistic Analysis of Potential Stator Designs using Parameter Permutation*, *IEEE*, doi: 10.1109/EVER.2019.8813523, 2019.
- [81] F. Heiles, *Wicklungen Elektrischer Maschinen: Und Ihre Herstellung*: Springer Berlin Heidelberg, ISBN: 978-3-6621-3433-7, doi: 10.1007/978-3-662-13433-7, 1953.
- [82] D. Gerling, *Frisch gewickelt - Effizienz- und Kostenoptimierung elektrischer Antriebe*, *AUTOCAD & Inventor Magazin*. [Online]. Verfügbar: <https://dokumente.unibw.de/pub/bscw.cgi/7060267##>, 2012.
- [83] D. Pinhal und D. Gerling, *Driving Cycle Simulation of Wound-Rotor Synchronous Machine with Hairpin Windings Considering AC-Losses*, *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, doi: 10.1109/ITEC.2019.8790556, 2019.
- [84] J. Erhard, *Entwicklung einer optimalen ganzheitlichen Entwurfs- und Analysemethodik für ASM und PMSM*. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, TU München, München, 2019.
- [85] B. Dotz und D. Gerling, *Windings with various numbers of turns per phasor*, *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, doi: 10.1109/IEMDC.2017.8002007, 2017.
- [86] K. Yamazaki, Y. Kato, T. Ikemi, und S. Ohki, *Reduction of rotor losses in multi layer interior permanent magnet synchronous motors by introducing novel topology of rotor flux barriers*, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 5, doi: 10.1109/TIA.2014.2303423, 2013.
- [87] M. Barcaro, N. Bianchi, und F. Magnussen, *Design considerations to maximize performance of an IPM motor for a wide flux-weakening region*, *The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010*, doi: 10.1109/ICELMACH.2010.5607926, 2010.

- [88] T. Li und G. Slemon, *Reduction of cogging torque in permanent magnet motors*, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 24, no. 6, doi: 10.1109/20.92282, 1988.
- [89] D.M. Ionel, J.F. Eastham, T.J.E Miller und E. Demeter, Ed., *Design considerations for permanent magnet synchronous motors for flux weakening applications*, 145th ed.: IEE Proc-Electr. Power Appl., 1998.
- [90] J. Igelspacher, C. Bertram, S. Flügel, W. Meyer, H.-G Herzog, *Methode für die Auslegung von Asynchronmaschinen in Elektrofahrzeugen - Design method for induction machines in electric vehicles*, *Internationaler ETG-Kongress*. [Online]. Verfügbar: <https://www.researchgate.net/publication/258351076##>, 2013.
- [91] J. Böcker, *Geregelte Drehstromantriebe: Universität Paderborn - Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik*. [Online]. Verfügbar: https://ei.uni-paderborn.de/fileadmin/elektrotechnik/fg/lea/Lehre/GDA/Dokumente/Geregelte_Drehstromantriebe_DE.pdf
- [92] E. Spring, *Elektrische Maschinen*: Springer Berlin Heidelberg, ISBN: 978-3-642-00884-9, doi: 10.1007/978-3-642-00885-6, 2009.
- [93] K.H. Nam, *AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications*: CRC Press, ISBN: 978-1-4398-1963-0, 2010.
- [94] IEEE Guide for the Statistical Analysis of Thermal Life Test Data, *ANSI/IEEE Std 101-1987(R2010) (Revision of IEEE Std 101-1972)*, doi: 10.1109/IEEESTD, 1988.
- [95] A. Eilenberger, *Elektrofahrzeuge mit Permanentmagnet-Synchronmaschinen*, *e&i Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 2011, doi: 10.1007/s00502-011-0804-z.
- [96] N. Beeli und F. Jenni, *Effizienter Betrieb von Asynchronmaschinen*, *Schweizerische Eidgenossenschaft, Bundesamt für Energie BFE*, vol. 2010. [Online]. Verfügbar: https://www.researchgate.net/publication/283495890_Effizienter_Betrieb_von_Asynchrontoren
- [97] S. Kalt, J. Erhard, B. Danquah und M. Lienkamp, *Electric Machine Design Tool for Permanent Magnet Synchronous Machines*, *IEEE*, doi: 10.1109/EVER.2019.8813601, 2019.
- [98] D. Bobba, S. Guy Min und B. Sarlioglu, *Effects of Winding and Slot-Pole Configurations on Sizing of Permanent Magnet Synchronous Machines*, *ITEC*, doi: 10.1109/ITEC.2019.8790601, 2019.
- [99] M. Toriumi, *Nissan's Electric Powertrain Strategy*, 39. *Internationales Wiener Motoren-symposium*, Reihe 12, Nr. 807, Band 2, 2018.
- [100] M. Amrhein, T. C. O'Connell und J. R. Wells, Ed., *An Integrated Design Process for Optimized High-Performance Electrical Machines*: IEEE, 2013.
- [101] B. N. Cassimere und S. D. Sudhoff, *Population-based design of surface-mounted permanent-magnet synchronous machines*, *Trans. IEEE Energy Conversion*, doi: 10.1109/TEC.2009.2016150, 2009.
- [102] N. Bianchi und S. Bolognani, *Design optimisation of electric motors by genetic algorithms*, *Proc. IEE Electric Power Applications*, doi: 10.1049/ip-epa:19982166, 1998.
- [103] J. A. Moses, J. L. Kirtley, J. H. Lang, R. D. Tabors und F. de Caudra, *A computer-based design assistant for induction motors*, *Trans. IEEE Industry Applications*, doi: 10.1109/TIA.1994.350340, 1994.

- [104] M. Amrhein und P. T. Krein, *Rotor designs for small inverter-dedicated induction machines*, *Proc. IEEE Int'l Electric Machines and Drives Conference*, doi: 10.1109/IEMDC.2003.1210404, 2003.
- [105] K. Deb, *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. New York: John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-471-87339-6, 2001.
- [106] C.A. Coello Coello, G.B. Lamont und D.A. Van Veldhuizen, *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*, 2nd ed.: Springer Verlag, ISBN: 978-0-387-36797-2.
- [107] Y. Yusoff, M. Salihin, N. Azlan und M. Zain, *Overview of NSGA-II for Optimizing Machining Process Parameters*, *Advanced in Control Engineering and Information Science*, Elsevier ScienceDirect, doi: 10.1016/j.proeng.2011.08.745, 2011.
- [108] A. Colotti, *Grundlagen der Antriebstechnik: 2. Gestaltung und Dimensionierung*, Zürich, 2017.
- [109] Elektro Motoren Werk Brienz AG, *Betriebsarten*. [Online]. Verfügbar: http://www.emwb.ch/fileadmin/user_upload/Technologiepool/pdf/Betriebsarten.pdf (Zuletzt geprüft am: 20.Okt.2020).
- [110] G. Choi und T.M. Jahns, *Design of Electric Machines for Electric Vehicles Based on Driving Schedules*, *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2013 IEEE International*, doi: 10.1109/IEMDC.2013.6556192, 2013.
- [111] M. Ehsani, K. Rahman und T.A. Hamid, *Propulsion System Design of Electric and Hybrid Vehicles*, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 44, no. 1, doi: 10.1109/41.557495, 1997.
- [112] T.J. Barlow, S. Latham, I.S. McCrae und P.G. Boulter, *A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions*. Bundesministerium für Bildung und Forschung, 3rd ed.: TRL Limited Published Project Report PPR354, 2009. Zuletzt geprüft am: Okt. 21 2020. [Online]. Verfügbar: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/4247/ppr-354.pdf
- [113] P. Reupold, *Lösungsraumanalyse für Hauptantriebsstränge in batterieelektrischen Straßenfahrzeugen*. Dissertation, TU München, 2012. Zuletzt geprüft am: Okt. 20 2020. [Online]. Verfügbar: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1120693/1120693.pdf>
- [114] Z. Dai, D. Niemeier und D. Eisinger, *Driving Cycles: A new cycle-building method that better represents real-world Emission*, *UC Davis Caltrans*. [Online]. Verfügbar: https://www.researchgate.net/publication/265495453_Driving_cycles_a_new_cycle-building_method_that_better_represents_real-world_emissions##, 2008.
- [115] M. Tutuianu, P. Bonnel, B. Ciuffo, T. Haniu, N. Ichikawa, A. Marotta, J. Pavlovic und H. Steven, *Development of the World-wide harmonized Light duty Test Cycle (WLTC) an a possible pathway for its introduction in the European legislation*, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, doi: 10.1016/j.trd.2015.07.011, 2015.
- [116] M. André, *The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions*, *The Science of the total environment*, doi: 10.1016/j.scitotenv.2004.04.070, 2004.
- [117] S. Shi, S. Wei, H. Kui, L. Liu, C. Huang und M. Liu, *Improvements of the design method of transient driving cycle for passenger car*, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, doi: 10.1109/VPPC.2009.5289594, 2009.

- [118] P. Stein und S. Vollnhals, *Grundlagen clusteranalytischer Verfahren*, Universität Duisburg-Essen. [Online]. Verfügbar: https://www.uni-due.de/imperia/md/content/soziologie/stein/skript_clusteranalyse_sose2011.pdf##, 2011.
- [119] T.C. Austin, F. J. DiGenova, T.R. Carlson, R. W. Jo, und K.A. Gianlini, *Characterization of Driving Patterns and Emissions from Light-Duty Vehicles in California: Final Report*. [Online]. Verfügbar: <https://www.osti.gov/biblio/7045631-characterization-driving-patterns-emissions-from-light-duty-vehicles-california-final-report##>, 1993.
- [120] W. T. Hung, H. Y. Tong, C. P. Lee, K. Ha und L. Y. Pao, *Development of a practical driving cycle construction methodology: A case study in Hong Kong, Research Part D: Transport and Environment, Transportation*, Bd. 12, Rn. 2, doi: 10.1016/j.trd.2007.01.002, 2007.
- [121] L. Hammersein et al., *Clusteranalyse: K-Means*. [Online]. Verfügbar: <https://www-m9.ma.tum.de/material/felix-klein/clustering/Methoden/K-Means.php> (Zuletzt geprüft am: 14.Feb.2020).
- [122] M. Scheutzow, *Stochastische Modelle*. Vorlesungsskript, Technische Universität Berlin, Berlin, 2019. Zuletzt geprüft am: Okt. 21 2020. [Online]. Verfügbar: <https://www3.math.tu-berlin.de/Vorlesungen/WS11/StoMo/stochmod.pdf>
- [123] M. Fries, A. Baum, M. Wittmann und M. Lienkamp, *Derivation of a real-life driving cycle from fleet testing data with the Markov-Chain-Monte-Carlo Method*, *21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, doi: 10.1109/ITSC.2018.8569547, 2018.
- [124] J.I. Huertas, L. F. Quirama, M. D. Giraldo und J. Diaz, *Comparison of driving cycles obtained by the Micro-trips, Markov-chains and MWD-CP methods*, *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, doi: 10.5278/ijsepm.2554, 2019.
- [125] A. Braun, *Effiziente Elektrofahrzeuge: Fahrumgebung, Fahrmuster und Verbrauch batteriebetriebener Pkw unter Realbedingungen*: Springer Vieweg, ISBN: 978-3-658-26880-0, 2019.
- [126] S. Kalt, J. Erhard und M. Lienkamp, *Optimized stator design method using machine parameter permutation*, *Forschung im Ingenieurwesen - Engineering Research*, doi: 10.1007/s10010-019-00385-y, 2019.
- [127] T. Pesce, *Ein Werkzeug zur Spezifikation von effizienten Antriebstopologien für Elektrofahrzeuge*. Dissertation, ISBN: 978-3-8439-1624-0, TU München, 2014.
- [128] M. Salameh, I. P. Brown und M. Krishnamurthy, *Driving Cycle Analysis Methods Using Data Clustering for Machine Design Optimization*, *ITEC, IEEE*, doi: 10.1109/ITEC.2019.8790523, 2019.
- [129] A. Mahmoudi, W. L. Soong, G. Pellegrino und E. Armando, *Efficiency Maps of Electrical Machines*, *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 2791–2799, doi: 10.1109/ECCE.2015.7310051, 2015.
- [130] P. Wacker, *Effizienzsteigerung im Antriebsstrang von Elektrofahrzeugen mittels aktiver Batteriepackerschaltung*. Dissertation, Technische Universität München, ISBN: 978-3-8439-3824-2, München, 2018.

- [131] P.-H. Nguyen, E. Hoang und M. Gabsi, *Power Loss Evaluation of Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Machine During Two Hybrid Electric Vehicle Driving Cycles*, *Journal of Asian Electric Vehicles* 9(1), doi: 10.4130/jaev.9.1465, 2011.
- [132] L. Chen, J. Wang, P. Lazari und X. Chen, *Optimization of a Permanent Magnet Machine Targeting Different Driving Cycles for Electric Vehicles*, *International Electric Machines & Drives Conference*, doi: 10.1109/IEMDC.2013.6556198, 2013.
- [133] D. Gerling, G. Dajaku und K. Mühlbauer, *Electric Machine Design Tailored for Powertrain Optimization*, *The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition*. [Online]. Verfügbar: [https://dokumente.unibw.de/pub/bscw.cgi/d6071771/2010%20EVS-25%20\(Gerling%20-%20Dajaku%20-%20M%C3%BChlbauer\).pdf##](https://dokumente.unibw.de/pub/bscw.cgi/d6071771/2010%20EVS-25%20(Gerling%20-%20Dajaku%20-%20M%C3%BChlbauer).pdf##), 2010.
- [134] A. Nordelöf, E. Grunditz, A-M. Tillmann, T. Thiringer und M. Alatalo, *A Scalable Life Cycle Inventory of an Electrical Automotive Traction Machine*, *The International Journal of Life Cycle Assessment volume*, Springer Verlag, doi: 10.1007/s11367-017-1308-9, 2017.
- [135] A. Kampker, P. Burggräf und C. Nee, Ed., *Costs, quality and scalability: Impact on the value chain of electric engine production*: IEEE, 2012.
- [136] Y. Duan, R.G. Harley und T.G. Habetler, *Multi-objective Design Optimization of Surface Mount Permanent Magnet Machine with Particle Swarm Intelligence*, *Swarm Intelligence Symposium*, doi: 10.1109/SIS.2008.4668319, 2008.
- [137] F. Bittner, *Modellgestützte multikriterielle Optimierung von permanenterregten Synchronmaschinen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge*. Dissertation, Audi-Dissertationsreihe, Band 103, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen-Nürnberg, 2015.
- [138] M. Centner, *Machine Design Software for Induction Machines*. [Online]. Verfügbar: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4800202/authors##>, 2008.
- [139] M. Zähringer, S. Kalt, M. Lienkamp, *Compressed Driving Cycles Using Markov Chains for Vehicle Powertrain Design*, *MDPI World Electric Vehicle Journal*, doi: 10.3390/wevj11030052, 2020.
- [140] S. Kalt, M. Brönnner, M. Lienkamp, *Application-Based Design of Electric Machines for New Vehicle Concepts in Developing Countries: IEEE, 2019 Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, doi: 10.1109/EVER.2019.8813520, 2019.
- [141] S. Kalt, L. Brenner und M. Lienkamp, *Requirements for Electric Machine Design based on Operating Points from Real Driving Data in Cities*, *WEVJ MDPI*, doi: 10.3390/wevj10040060, 2019.
- [142] C. Angerer, M. Felgenhauer, I. Eroglu, M. Zähringer, S. Kalt und M. Lienkamp, Ed., *Scalable Dimension-, Weight- and Cost-Modeling for Components of Electric Vehicle Powertrains*: IEEE, 2018.
- [143] S. Kalt, S. Wolff und M. Lienkamp, *Impact of Electric Machine Design Parameters and Loss Types on Driving Cycle Efficiency*, *IEEE*, doi: 10.1109/ICPSE49633.2019.9041132, 2020.
- [144] W. Zhou, K. Xu, Y. Yang, und J. Lu, *Driving Cycle Development for Electric Vehicle Application using Principal Component Analysis and K-means Cluster: With the Case of Shenyang, China*, *Energy Procedia*, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.620, 2017.

- [145] J. Lin und D. A. Niemeier, *Estimating Regional Air Quality Vehicle Emission Inventories: Constructing Robust Driving Cycles*, *Transportation Science* © 2003 INFORMS, Ausgabe 37, No. 3, S. 330–346, doi: 10.1287/trsc.37.3.330.16045, 2003.
- [146] P. Mock, J. Kühlwein, U. Tietge, V. Franco, A. Bandivadekar und J. German, *The WLTP: How a new test procedure for cars will affect fuel consumption values in the EU*, *The International Council on Clean Transportation (icct)*. [Online]. Verfügbar: <https://theicct.org/publications/wltp-how-new-test-procedure-cars-will-affect-fuel-consumption-values-eu###>, 2014.
- [147] G. Fontaras, B. Ciuffo, N.G. Zacharof, S. Tsiakmakis, A. Marotta, J. Pavlovic, K. Anagnostopoulos, *The difference between reported and real-world CO2 emissions: How much improvement can be expected by WLTP introduction?*, *Transportation Research Procedia*, doi: 10.1016/j.trpro.2017.05.333, 2017.
- [148] manager magazin, *Schöne neue Scheinwelt für die Autoindustrie - Neues Messverfahren WLTP verschleiern mehr als es hilft*. [Online]. Verfügbar: <https://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/abgasskandal-messverfahren-wltp-verschleiern-mehr-als-es-hilft-a-1225694.html> (Zuletzt geprüft am: 03.Feb.2020).
- [149] A. Hofacker und C. Köllner, *WLTP und NEFZ im Vergleich*. [Online]. Verfügbar: <https://www.springerprofessional.de/fahrzeugtechnik/emissionen/wltp-und-nefz-im-vergleich/6560846> (Zuletzt geprüft am: 25.Feb.2020).
- [150] A. König, L. Nicoletti, S. Kalt, K. Moller, A. Koch und M. Lienkamp, *An Open-Source Modular Quasi Static Longitudinal Simulation for Full Electric Vehicles*, *Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2020.
- [151] U. Vollmer, *Entwurf, Auslegung und Realisierung eines verlustoptimierten elektrischen Antriebs für Hybridfahrzeuge*. Dissertation, TU Berlin, Berlin, doi: 10.14279/depositonce-3417, 2012.
- [152] G. Vaerst, *Magnetisierungskurven VACOFLUX 50 und VACOFLUX 48*, 2019.
- [153] Emeter AB, *Electric motor winding calculator*. [Online]. Verfügbar: <https://www.emeter.com/windings/>
- [154] T. Boedefeld und H. Sequenz, *Elektrische Maschinen: Eine Einführung in die Grundlagen*, 8th ed. Wien: Springer Verlag, ISBN: 978-3-662-28800-9, 1971.
- [155] Z. Neuschl, *Rechnerunterstützte experimentelle Verfahren zur Bestimmung der lastunabhängigen Eisenverluste in permanentmagnetisch erregten elektrischen Maschinen mit additionallem Axialfluss*. Dissertation, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Cottbus, 2007. Zuletzt geprüft am: Okt. 21 2020. [Online]. Verfügbar: <https://core.ac.uk/download/pdf/33427783.pdf>
- [156] K. Deb, S. Agrawal, A. Pratap und T. Meyarivan, *A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II*, *International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*, doi: 10.1007/3-540-45356-3_83, 2000.
- [157] Lin Song, *NGPM -- A NSGA-II Program in Matlab*. [Online]. Verfügbar: https://www.researchgate.net/profile/Marc_Azzopardi/post/where_i_can_find_matlab_code_of_NSII_for_ZDT1/attachment/5b83860dcfe4a76455ee7b4a/AS%3A664104205316106%401535346189910/download/NGPM+manual+v1.4.pdf (Zuletzt geprüft am: 09.Apr.2020).

- [158] M. Tschochner, *Comparative Assessment of Early Development Phase Powertrain Concepts*. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, ISBN: 978-3-8440-6461-2, TU München, 2018.
- [159] M.J. Fries, *Maschinelle Optimierung der Antriebsauslegung zur Reduktion von CO₂-Emissionen und Kosten im Nutzfahrzeug*, TU München, ISBN: 978-3-8439-3988-1, 2019.
- [160] S. Matz, *Nutzerorientierte Fahrzeugkonzeptoptimierung in einer multimodalen Verkehrsumgebung*. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, ISBN: 978-3-8439-2140-4, Technische Universität München, 2015.
- [161] F. Weiß, *Optimale Konzeptauslegung elektrifizierter Fahrzeugantriebsstränge: Eine computergestützte Methodik zur Beschleunigung des Auslegungsprozesses*. Wiesbaden: Springer Verlag, ISBN: 978-3-658-22097-6, 2018.
- [162] R. Niemeier und M. Stokmaier, *Optimierung von Wirkungsgrad-Kennfeldern bei elektrischen Motoren mit Metamodellen*, TAE-Symposium, Dynardo dynamik software & engineering. [Online]. Verfügbar: https://www.dynardo.de/fileadmin/Material_Dynardo/bibliothek/Optimierung_Sensitivitaet/MOPs_und_Kennfelder_final_dt_P.pdf##, 2018.
- [163] T. Goel und N. Stander, *A non-dominance-based online stopping criterion for multi-objective evolutionary algorithms*, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Bd. 84, Rn. 6, doi: 10.1002/nme.2909, 2010.
- [164] Gabler Wirtschaftslexikon, *Pareto-Optimum*. [Online]. Verfügbar: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/pareto-optimum-45936> (Zuletzt geprüft am: 06.Mai.2020).
- [165] W. Wang, C. Liu und D. Zhao, *How Much Data Are Enough? A Statistical Approach With Case Study on Longitudinal Driving Behavior*, *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, doi: 10.1109/TIV.2017.2720459, 2017.
- [166] M. Wittmann, J. Lohrer, J. Betz, B. Jäger, M. Kugler, M. Klöppel, A. Waclaw, M. Hann und M. Lienkamp, *A holistic framework for acquisition, processing and evaluation of vehicle fleet test data*, *20th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, Yokohama, doi: 10.1109/ITSC.2017.8317637, 2017.
- [167] B. Jäger, R. Schawohl, W. Christl, F. Bachmann, M. Hann, J. Betz, C. Frank und M. Lienkamp, *Virtuelle Elektromobilität im Taxi- und Gewerbeverkehr München: Neuartiger Ansatz zur Untersuchung von technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten einer elektrifizierten Fahrzeugflotte*, doi: 10.2314/GBV:871992922, 2016.
- [168] M. Kugler, S. Osswald, C. Frank und M. Lienkamp, *Mobility Tracking System for CO₂ Footprint Determination*, *AutomotiveUI 2014*, Seattle, USA, doi: 10.1145/2667317.2667334, 2014.
- [169] Herr Dr. Kai Brune, Audi AG, Ingolstadt, *Persönliches Gespräch Projekttreffen DeTairIED Projekt*.
- [170] Porsche, *Onboard Lap - Porsche Taycan Sets a Record at the Nürburgring-Nordschleife*. [Online]. Verfügbar: <https://www.youtube.com/watch?v=8m31EgQkswg> (Zuletzt geprüft am: 30.Mrz.2020).
- [171] A. Heilmeier, A. Wischnewski, L. Hermansdorfer, J. Betz, M. Lienkamp und B. Lohmann, *Minimum curvature trajectory planning and control for an autonomous race car*, *Vehicle System Dynamics*, doi: 10.1080/00423114.2019.1631455, 2019.

- [172] IBM, *T4253H Function (CREATE command)*. [Online]. Verfügbar: https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/fi/SSLVMB_23.0.0/spss/base/syn_create_t4253h_function.html (Zuletzt geprüft am: 07.Apr.2020).
- [173] L. Nohe, *Erstellung von komprimierten Fahrzyklen mittels Markov-Ketten und re-alen Fahrdaten*. Semesterarbeit, 2020.
- [174] G. Immel, *Synthese von Prüfzyklen für Straßenfahrzeuge*, Energie-und-Management-Verl.-Ges., ISBN: 3-9805179-1-8, Herrsching, 1997.
- [175] TUM|Stat, *Statistikberatung an der TUM*. [Online]. Verfügbar: <https://www.groups.ma.tum.de/statistics/tumstat/> (Zuletzt geprüft am: 10.Jan.2021).
- [176] Auto Motor Sport, *VW Up Technische Daten*. [Online]. Verfügbar: <https://www.auto-motor-und-sport.de/marken-modelle/vw/up/technische-daten/> (Zuletzt geprüft am: 31.Mrz.2020).
- [177] Auto Motor Sport, *BMW i3 Technische Daten*. [Online]. Verfügbar: <https://www.auto-motor-und-sport.de/marken-modelle/bmw/i3/technische-daten/> (Zuletzt geprüft am: 31.Mrz.2020).
- [178] Auto Motor Sport, *Tesla Model 3 Technische Daten*. [Online]. Verfügbar: <https://www.auto-motor-und-sport.de/marken-modelle/tesla/model-3/technische-daten/> (Zuletzt geprüft am: 31.Mrz.2020).
- [179] D. Tscharnuter, *Optimale Auslegung des Antriebsstrangs von Kraftfahrzeugen*. Dissertation, Universitätsbibliothek der TU München, TU München, München, 2002. Zuletzt geprüft am: Okt. 21 2020. [Online]. Verfügbar: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/602014/602014.pdf>
- [180] A. Karle, *Elektromobilität*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, ISBN: 978-3-446-44339-6, doi: 10.3139/9783446444171, 2015.
- [181] A. Haubrock, *Degradationsuntersuchungen von Lithium-Ionen Batterien bei deren Einsatz in Elektro- und Hybridfahrzeugen*, 1st ed. Göttingen:: Cuvillier Verlag, ISBN: 978-3-8695-5831-8, 2011.
- [182] M. Mitschke und H. Wallentowitz, *Dynamik der Kraftfahrzeuge*: Springer Vieweg Fachmedien Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-05067-2, 2014.
- [183] VW Newsroom, *Technische Daten e-up!* [Online]. Verfügbar: <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/der-e-up-das-up-grade-5583/technische-daten-5590> (Zuletzt geprüft am: 30.Mrz.2020).
- [184] BMW i, *THE BMW i3. OWNER'S MANUAL*. [Online]. Verfügbar: <http://www.i3guide.com/pdf/BMWi3-owners-manual.pdf> (Zuletzt geprüft am: 30.03.2020ö).
- [185] ADAC, *Testbericht Model 3*. [Online]. Verfügbar: https://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT5850_Tesla_Model_3_Long_Range_AWD/Tesla_Model_3_Long_Range_AWD.pdf (Zuletzt geprüft am: 30.Mrz.2020).
- [186] VW Newsroom, *Der e-up!* [Online]. Verfügbar: <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/der-e-up-das-up-grade-5583/download> (Zuletzt geprüft am: 21.Okt.2020).
- [187] ADAC, *Autotest BMW i3*. [Online]. Verfügbar: https://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT5053_BMW_i3/BMW_i3.pdf (Zuletzt geprüft am: 30.Mrz.2020).

- [188] ADAC, *Autotest VW up! 1.0 TSI BMT beats*. [Online]. Verfügbar: https://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT5535_VW_up_1_0_TSI_BMT_beats/VW_up_1_0_TSI_BMT_beats.pdf (Zuletzt geprüft am: 30.Mrz.2020).
- [189] InsideEVs, *Engineering Explained Calculates How Efficient A Tesla Really Is*. [Online]. Verfügbar: <https://insideevs.com/news/406163/engineering-explained-how-efficient-tesla-is/> (Zuletzt geprüft am: 30.Mrz.2020).
- [190] ADAC, *Autotest VW e-up!* [Online]. Verfügbar: https://www.adac.de/_ext/itr/tests/autotest/AT5046_VW_e_up/VW_e_up.pdf (Zuletzt geprüft am: 30.Mrz.2020).
- [191] ADAC, *BMW i3 (94 Ah)*. [Online]. Verfügbar: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/bmw/i3/1generation/255581/> (Zuletzt geprüft am: 30.Mrz.2020).
- [192] B. Schmidt, *Fahrtbericht VW e-up! Fährt sich angenehm, nur viel zu kurz*. [Online]. Verfügbar: <https://www.faz.net/aktuell/technik-motor/motor/fahrberichte/fahrtbericht-zum-elektroauto-vw-e-up-12828603-p2.html> (Zuletzt geprüft am: 30.Mrz.2020).
- [193] BMW, *Technische Daten. BMW i3*. [Online]. Verfügbar: http://www.motornews.at/wp-content/uploads/2013/11/BMW_i3_Technische_Daten_ab_0314.pdf (Zuletzt geprüft am: 30.Mrz.2020).
- [194] Tesla, *Tesla Model 3 Aufbau*. [Online]. Verfügbar: https://tesla3.de/tesla_model_3_aufbau (Zuletzt geprüft am: 30.Mrz.2020).
- [195] A. Kampker, *Elektromobilproduktion*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, ISBN: 978-3-642-42022-1, 2014.
- [196] S. Fuchs, *Verfahren zur parameterbasierten Gewichtsabschätzung neuer Fahrzeugkonzepte*. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, TU München, München, 2014.
- [197] Institut seltene Erden und Commodity Trade GmbH, *Neodym Preis und Markt*. [Online]. Verfügbar: <https://institut-seltene-erden.de/seltene-erden-und-metalle/seltene-erden/neodym/> ; <http://www.neodym-preis.de/> (Zuletzt geprüft am: 10.Apr.2020).
- [198] C. Angerer, B. Mößner, M. Lüst, A. Holtz, F. Sträußl und M. Lienkamp, *Parameter-Adaption for a Vehicle Dynamics Model for the Evaluation of Powertrain Concept Designs, International Conference on New Energy Vehicle and Vehicle Engineering (NEVVE)*, doi: 10.1051/mateconf/201927201022, 2018.
- [199] F. Marscheider-Weidemann, S. Langkau, T. Hummen, L. Erdmann, L.T. Espinoza und G. Angerer, Ed., *Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016*, 2016.
- [200] A.H. Fritz und G. Schulze, *Fertigungstechnik*. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag, ISBN: 978-3-662-46555-4, 2012.
- [201] Auto Motor und Sport, *VW Golf Typ 5G: Technische Daten zu allen Motorisierungen - auto motor und sport*. [Online]. Verfügbar: <https://www.auto-motor-und-sport.de/marken-modelle/vw/golf/vii-typ-5g/technische-daten/>
- [202] Benedikt Danquah, *Entwicklung und Umsetzung einer Längsdynamikregelung für ein Elektrofahrzeug am Rollenprüfstand*. Masterarbeit, TU München, 2017.
- [203] BMW AG, *Technische Daten BMW i3*. [Online]. Verfügbar: <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/attachment/T0273661DE/392973> (Zuletzt geprüft am: 30.Sep.2018).

- [204] J. Hendershot und T. Burress, *E-Car Project Insight Tutorial: BMW i3 electric traction drive: Oak Ridge, CWIEME Chicago*. [Online]. Verfügbar: <https://www.youtube.com/watch?v=xt-nfcwv6Kc##>, 2017.
- [205] Brusa, *Drive - Motor 400 V*. [Online]. Verfügbar: <https://www.brusa.biz/en/products/drive/motor-400-v.html>
- [206] J. Doerr, T. Attensperger, L. Wittmann und T. Enzinger, *Die neuen elektrischen Achsantriebe von Audi, ATZelextronik*, doi: 10.1007/s35658-018-0037-6, 2018.
- [207] G. Müller, *Berechnungsbeispiel Induktionsmaschine*. [Online]. Verfügbar: http://application.wiley-vch.de/books/sample/3527405259_bispiele.zip (Zuletzt geprüft am: 30.Mai.2019).
- [208] H. Jelden, P. Lück, G. Kruse und J. Tosen, *Der elektrische Antriebsbaukasten von Volkswagen*. [Online]. Verfügbar: <https://link-springer-com.eaccess.ub.tum.de/content/pdf/10.1007/s35146-014-0032-2.pdf> (Zuletzt geprüft am: 21.Okt.2020).
- [209] Tesla, *Model 3 Owner's Manual*. [Online]. Verfügbar: https://www.tesla.com/sites/default/files/model_3_owners_manual_europe_en.pdf
- [210] BMW Group, *Technische Daten BMW i3: gültig ab 07/2016*. [Online]. Verfügbar: <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/attachment/T0259598DE/359586> (Zuletzt geprüft am: 04.Jan.2019).
- [211] Elektroauto-News.net, *Test- und Fahrbericht des BMW i3 – eine Woche elektrifiziert unterwegs*. [Online]. Verfügbar: <https://www.elektroauto-news.net/bmw-i3-test-fahrbericht-erfahrung> (Zuletzt geprüft am: 08.Jan.2019).
- [212] A. Burakov und A. Arkkio, *Comparison of the Unbalanced Magnetic Pull Mitigation by the Parallel Paths in the Stator and Rotor Windings, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.43, No. 12*, doi: 10.1109/TMAG.2007.906885, 2007.
- [213] J. Kerner, L. Spiegel, C. Hauck und S. Rüter, *The Innovative High-Performance Plug-In Hybrid Drivetrain in the New Porsche 918 Spyder, 22. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik*. [Online]. Verfügbar: https://www.aachener-kolloquium.de/images/tagungsunterlagen/2013_22._ACK/A5.3_Kerner_Porsche.pdf##, 2013.
- [214] J. Fleischer, S. Haag und J. Hofmann, *Quo Vadis Wickeltechnik? Eine Studie zum aktuellen Stand der Technik und zur Recherche zukünftiger Trends im Automobilbau: Institut für Produktionstechnik (wbk) Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*. [Online]. Verfügbar: https://www.wbk.kit.edu/downloads/2017_01_23_Studie_Wickeltechnik_final_DE.pdf
- [215] H. Neudorfer, *Bauarten von elektrischen Antrieben und deren Kühlung, Verluste, Vor- und Nachteile*. [Online]. Verfügbar: http://app.claas.com/2013/university-symposia/download/wieselburg/13_Neudorfer_Traktionssysteme.pdf (Zuletzt geprüft am: 02.Mai.2020).
- [216] K. Specht, M. Gall und G. Scheidhammer, *Von 400 auf 800 V - Auswirkungen auf das Hochvoltbordnetz, ATZ Elektron*, doi: 10.1007/s35658-019-0072-y, 2019.
- [217] Here Maps, *Location for developers*. [Online]. Verfügbar: <https://developer.here.com/> (Zuletzt geprüft am: 07.Apr.2020).

- [218] H. Wöhl-Bruhn, *Vergleich von Rotoren mit Oberflächenmagneten und eingebetteten Magneten*. [Online]. Verfügbar: <https://www.tu-braunschweig.de/index.php?eID=dump-File&t=f&f=30121&token=44ce494b0b857a9c84c078fb69fb5a5e2622411c> (Zuletzt geprüft am: 02.Mai.2020).
- [219] H. Schäfer, *Die Integration elektrischer Achsantriebe in Hybrid- und Elektrofahrzeugen*. [Online]. Verfügbar: https://moam.info/die-integration-elektrischer-antriebe-in-hybrid-und-elektrofahrzeuge-_59cc997b1723ddab3bbe007e.html
- [220] H. Perassi, *Feldorientierte Regelung der permanenterregten Synchronmaschine ohne Lagegeber für den gesamten Drehzahlbereich bis zum Stillstand*. Dissertation, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, 2007.
- [221] M. Buchert, A. Manhart und J. Sutter, *Studie: Untersuchung zu Seltenen Erden: Permanentmagnete im industriellen Einsatz in Baden-Württemberg*, Öko-Institut e. V., Freiburg. [Online]. Verfügbar: <https://www.oeko.de/oekodoc/2053/2014-630-de.pdf##>, 2014.

Vorveröffentlichungsliste

Zeitschriften; peer-reviewed; Scopus

- [126] Svenja Kalt, Jonathan Erhard, Markus Lienkamp. „Optimized Stator Design Method using Machine Parameter Permutation“. In: *Forschung im Ingenieurwesen Journal*, Springer Link, 8. *Conference on Future Automotive Technology (CoFAT)*, Mai 2019.
- [141] Svenja Kalt, Lucas Brenner, Markus Lienkamp. „Requirements for Electric Machine Design based on Operating Points from Real Driving Data in Cities“. In: *World Electric Vehicle Journal*, Vol. 10, 60, September 2019.
- Svenja Kalt, Karl Ludwig Stolle, Philipp Neuhaus, Thomas Herrmann, Alexander Koch, Markus Lienkamp. „Dependency of Machine Efficiency on the Thermal Behavior of Induction Machines“. In: *MDPI machines*. Februar 2020.
- [30] Svenja Kalt, Jonathan Erhard, Markus Lienkamp. „Electric Machine Design Tool for Permanent Magnet Synchronous Machines and Induction Machines“. In: *MDPI machines*. März 2020.
- [139] Maximilian Zähringer, Svenja Kalt, Markus Lienkamp. „Compressed Driving Cycles Using Markov Chains for Vehicle Powertrain Design“. In: *MDPI world electric vehicles 2020*.
- Sebastian Wolff, Moritz Seidenfus, Karim Gordon, Sergio Alvarez Pascual, Svenja Kalt, Markus Lienkamp. „Scalable Life-Cycle Inventory for Heavy-Duty Vehicles“. In: *MDPI Sustainability*. July 2020.
- Alexander Koch, Olaf Teichert, Svenja Kalt, Aybike Ongel, Markus Lienkamp. „Powertrain optimization for electric autonomous buses under optimal energy-efficient driving“. In: *MDPI Energies*. Dezember 2020

Konferenzen, Magazine etc.; peer-reviewed; Scopus

- [80] Svenja Kalt, Jonathan Erhard, Markus Lienkamp. „Holistic Analysis of Potential Stator Designs using Parameter Permutation“. In: *Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. IEEE. Monaco, 08.-10. Mai 2019.
- [140] Svenja Kalt, Matthias Brönnner, Markus Lienkamp. „Application-Based Design of Electric Machines for New Vehicle Concepts in Developing Countries“. In: *Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. IEEE. Monaco, 08.-10. Mai 2019.
- [97] Svenja Kalt, Jonathan Erhard, Benedikt Danquah, Markus Lienkamp. „Electric Machine Design Tool for Permanent Magnet Synchronous Machines“. In: *Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. IEEE. Monaco, 08.-10. Mai 2019. Open Source Link: https://github.com/TUMFTM/Electric_Machine_Design.

- [143] Svenja Kalt, Sebastian Wolff, Markus Lienkamp. „Impact of Electric Machine Design Parameters and Loss Types on Driving Cycle Efficiency“. In: *8th International Conference on Power Science and Engineering*. IEEE. Dublin, Dezember 2019.
- Matthias Brönnner, Svenja Kalt, Sascha Koberstaedt, Martin Šoltés. „A Methodological Approach for Selecting the Assembly Concept for Mounting All-Electric Vehicles within Existing Assembly Lines“. In: *IEEE 9th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT 2018)*. Südafrika, 2018.
- Sascha Koberstaedt, Martin Šoltés, Svenja Kalt, Markus Lienkamp, Maximilian Eiba. „Definition of Requirements for a New Vehicle Concept for Sub-Saharan Africa – Load collectives for chassis and frame“. In: *International Conference on Electrical Machines and Systems 2018 (ICEMS)*. IEEE. Korea, 7.-10. Oktober 2018.
- Sascha Koberstaedt, Maximilian Eiba, Manuel Huber, Svenja Kalt, Martin Šoltés, Markus Lienkamp. „Development of a process model for a customized vehicle testing for new vehicle concepts in new markets – Application example Sub-Saharan Africa“. In: *Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. IEEE. Monaco, 2018.
- Katharina Minnerup, Svenja Kalt, Xue Lin, Sascha Koberstaedt, Markus Lienkamp. „A 48V drive train for a utility vehicle designed for rural Africa - review and analysis“. In: *International Conference on Electrical Machines and Systems 2018 (ICEMS)*. IEEE. Korea, 7.-10. Oktober 2018.
- Sascha Koberstaedt, Svenja Kalt, Laura Fürst, Xue Lin, Markus Lienkamp. „Definition of Requirements for a New Vehicle Concept for Sub-Saharan Africa – Load Collectives for Battery and Electric Motor“. In: *International Conference on Electrical Machines and Systems 2018 (ICEMS)*. IEEE. Korea, 7.-10. Oktober 2018.
- [142] Christian Angerer, Matthias Felgenhauer, Isaak Eroglu, Maximilian Zähringer, Svenja Kalt, Markus Lienkamp. „Scalable Dimension-, Weight- and Cost-Modeling for Components of Electric Vehicle Powertrains“. In: *International Conference on Electrical Machines and Systems 2018 (ICEMS)*. IEEE. Korea, 7.-10. Oktober 2018.
- Benedikt Danquah, Stefan Riedmaier, Johannes Rühm, Svenja Kalt, Markus Lienkamp. „Statistical Model Verification and Validation Concept for Automotive Vehicle Dynamics Simulations“. In: *30th CIRP Design*. Elsevier, Science Direct. July 2020.
- [150] Adrian König, Lorenzo Nicoletti, Svenja Kalt, Korbinian Moller, Alexander Koch, Markus Lienkamp. „An Open-Source Modular Quasi Static Longitudinal Simulation for Full Electric Vehicles“ In: *Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. IEEE. Monaco, 2020.
- Svenja Kalt, Philipp Neuhaus, Karl Ludwig Stolle, Matthias Steinsträter, Markus Lienkamp. „Dependency of Efficiency on Stator Temperature in Permanent Magnet Synchronous Machines“. In: *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. IEEE. August 2020.
- Sebastian Wolff, Svenja Kalt, and Markus Lienkamp. „Influence of Powertrain Topology on Efficiency and Performance of Battery Electric Heavy-Duty Trucks“. In: *MDPI Energies*. Januar 2021.

Open Source Tool Veröffentlichungen

Auslegungstool Elektrische Maschine permanenterregte Synchronmaschine. Link: https://github.com/TUMFTM/Electric_Machine_Design

Thermische Netzwerksimulation der Asynchronmaschine. Link: <https://github.com/TUMFTM/Efficiency-and-Thermal-Behavior-IM>

Gesamtauslegungstool PSM und ASM. Link: https://github.com/TUMFTM/Electric_Machine_Design

Tool zur Generierung der Fahrzyklen. Link: <https://github.com/TUMFTM/Vehicle-specific-Driving-Cycles->

Betreute Studienarbeiten

Nicolai Sprogies: „Entwicklung eines Antriebsstrangs im Rahmen des aCar Mobility Projekts“. Semesterarbeit, Projekt: aCar Mobility. Abgabe: 03.10.2017.

Franz-Thomas Mitterer: „Entwicklung, Konstruktion und Inbetriebnahme eines Getriebes im Rahmen des aCar Mobility Projekts“. Masterarbeit, Projekt: aCar Mobility. Abgabe: 29.09.2017.

Alexander Heider: „Konzipierung und Umsetzung des Packages für das Gesamtfahrzeug sowie Konstruktion und Integration der Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs im Rahmen des aCar mobility Projekts“. Bachelorarbeit, Projekt: aCar Mobility. Abgabe: 11.10.2017.

Filip Tomsic: „Konzipierung, Konstruktion und Umsetzung einer Vorrichtung zum Testen von elektrischen Maschinen im Rahmen des aCar mobility Projekts“. Bachelorarbeit, Projekt: aCar Mobility. Abgabe: 23.09.2017.

Michael Baumann: „Konzipierung, Konstruktion und Umsetzung eines elektrischen Bordnetzes im Rahmen des aCar mobility Projekts“. Bachelorarbeit, Projekt: aCar Mobility. Abgabe: 06.10.2017.

Alexander Hammerl: „Wirkungsgradanalyse des Antriebsstranges und Fahrzyklusuntersuchung im Rahmen des aCar Mobility Projekts“. Semesterarbeit, Projekt: aCar Mobility. Abgabe: 11.05.2018.

Konstantin Lützwow: „Untersuchung, Aufbau und Test von prototypischen und serienreifen Motoren am Prüfstand sowie simulative Betrachtung der Motorenauslegung“. Bachelorarbeit, Abgabe: 15.04.2018.

Laura Fürst: „Analyse von Lastkollektiven sowie Durchführung einer Nutzeranalyse der Erprobungsdaten im Rahmen des aCar Mobility Projekts“. Masterarbeit, Projekt: aCar Mobility. Abgabe: 01.05.2018.

Jonathan Erhard: „Weiterentwicklung und Optimierung einer Auslegungsmethodik für permanenterregte Synchronmaschinen“. Semesterarbeit, Abgabe: 30.09.2018. Lucas

Heinke und Luis Onoma: „Gesamtfahrzeugerprobung im Rahmen des aCar Mobility Projekts auf Basis eines Prototypenentwicklungsprozesses“. Semesterarbeit, Projekt: aCar Mobility. Abgabe: 16.10.2018.

- [84] Jonathan Erhard: „Entwicklung einer optimalen ganzheitlichen Entwurfs- und Analysemethodik für ASM und PMSM“. Masterarbeit, Abgabe: 30.04.2019.
- Raphael Sämann: „Weiterentwicklung und Optimierung einer Auslegungsmethodik für permanenterregten Synchronmaschinen mit Überlastfähigkeit“. Masterarbeit, Abgabe: 19.11.2018.
- Thomas Schwarz: „Entwicklung eines Modells zur Erstellung synthetischer Fahrzyklen anhand realer Fahrdaten“. Semesterarbeit, Abgabe: 01.05.2019.
- Lucas Brenner: „Entwicklung eines Datenverarbeitungsmodells zur Ermittlung realer Betriebspunkte elektrischer Maschinen“. Semesterarbeit, Abgabe: 04.05.2019.
- Sven Haag: „Fahrdatenanalyse realer Belastungen von elektrischen Maschinen“. Semesterarbeit.
- Maximilian Untersteiner: „Anforderungsanalyse elektrischer Maschinen und Erstellung eines Lastenhefts für zukünftige Elektrofahrzeuge“. Bachelorarbeit, Abgabe: 01.10.2019.
- Yasin Meral: „Anforderungsanalyse zukünftiger elektr. Maschinen – Datenanalyse und Potentialrecherche“. MSE-Praktikant, Abgabe: 01.10.2019.
- Philipp Neuhaus: „Fahrdatenanalyse zur Untersuchung des Einflusses der Thermik auf den Wirkungsgrad einer elektrischen Maschine“. Bachelorarbeit, Abgabe: 29.10.2019.
- Ludwig Stolle: „Thermische Belastung und Effizienz von Elektromaschinen in E-Fahrzeugen – Thermische Netzwerksimulation der Asynchronmaschine“. Semesterarbeit, Abgabe: 24.10.2019.
- Johannes Reng: „Erweiterung eines agilen Vorgehensmodells für die Absicherung und Qualitätssicherung des Bordnetzes eines Leichtelektromobils (LEM)“, Semesterarbeit, Abgabe: 01.08.2019.
- Maximilian Zähringer: „Komprimierte Fahrzyklen mit Hilfe von Markov-Ketten“, Semesterarbeit, Abgabe: 28.02.2020.
- [173] Lasse Nohe: „Erstellung von komprimierten Fahrzyklen mittels Markov-Ketten und realen Fahrdaten“, Semesterarbeit, Abgabe: 15.03.2020.
- Johannes Eyb: „Analyse der thermischen Belastung von elektrischen Maschinen für Elektrofahrzeuge“, Semesterarbeit, Abgabe: 13.04.2020.
- Edgar Hoover: „Development and Analysis of a Thermal Model for Electrical Machines“, Semesterarbeit, Abgabe: 01.05.2020.
- Filip Tomic: „Entwicklung eines Fügeprozesses zur Herstellung von ISCAD_Statoren mit massiven Phasenstäben und kunststoffisolierten Statornuten“, Semesterarbeit, Abgabe: 06.07.2020.
- Ludwig Stolle: „Grundsatzuntersuchungen von der Anforderung an die Dynamik in einem Gesamtsystem bestehend aus Leistungselektronik, Übertrager und E-Maschine“. Masterarbeit, Abgabe: 01.04.2021

Anhang

Anhang A	Richtwerte Maschinenauslegung.....	xxviii
Anhang B	Maschinendaten und Validierungsdaten	xxxix
Anhang C	Fahrzyklusgenerierung und Fahrdatenanalyse	xxxviii
Anhang D	Validierung Fahrzyklen	xlix
Anhang E	Mehrzieloptimierung	lx
Anhang F	Maschinenauslegungstool	lxxi

Anhang A Richtwerte Maschinenauslegung

Tabelle A.1: Richtwerte für die relative Länge einer Maschine [13].

Beschreibung	Einheit	$p = 1$	$p > 1$
Relative Länge λ	mm	1 ... 4	0,5 ... 2,5

Tabelle A.2: Richtwerte für die Induktivitäten [13].

Beschreibung	Einheit	SM mit $L_q = L_d$	SM mit $L_d \neq L_q$
Luftspaltinduktion \hat{B}_δ	T	0,75 ... 1,05	0,8 ... 1,05
Zahninduktion B_z	T	1,6 ... 2,0	1,6 ... 2,0
Rückeninduktion B_r	T	1,1 ... 1,5	1,0 ... 1,45

Tabelle A.3: Richtwerte Strombelag, die Stromdichte und den Nutzfüllfaktor Richtwerte für den Strombelag, die Stromdichte und den Nutzfüllfaktor [13], [68], [213].

Beschreibung	Einheit	Wertebereich	Anmerkung
Strombelag A	A/mm	35 ... 65	
Stromdichte S	A/mm ²	4 ... 6,5	
Nutzfüllfaktor φ_n	-	0,3 ... 0,5	Runddraht

Tabelle A.4: Rotorabmessungen aktueller BEV [58].

Fahrzeug	Rotoraußendurchmesser in mm	Rotorinnendurchmesser in mm	Verhältnis
BMW i3	179 (Messwert)	59 (Messwert)	0,3296
Nissan Leaf	130 (Messwert)	43 (Messwert)	0,3308
Opel Ampera	135 (Messwert)	40 (Messwert)	0,2963
Tesla Model 3	148 (Messwert)	47 (Messwert)	0,3176
VW e-Golf	150 (Messwert)	50 (Messwert)	0,3000

Tabelle A.5: Erfahrungswerte für Nutschlitzbreite und Nutschlitzhöhe [32].

Statorinnendurchmesser in m	Nutschlitzbreite in mm	Nutschlitzhöhe in mm
0,05	1,5	0,5
0,20	3	1
0,30	3	1
0,45	3	2

Tabelle A.6: Empirische Faktoren für die PM Auslegungsgleichungen [89].

Formelzeichen	SPMSM	IPMSM (radial)	Beschreibung
k_{so}	1,1 ... 1,3	1,1 ... 1,3	Sättigungsfaktor für die Längsachse im Leerlauf
α_i	0,667	0,9 ... 1,0	Ideeller Polbedeckungsfaktor
k_σ	0,95 ... 1,0	0,9 ... 0,95	PM Streuflussfaktor
k_p	1	2	Anzahl PM verantwortlich für polaren Fluss
k_n	2	1	Anzahl, wie oft die Flusslinie die PM durchquert

Tabelle A.7: Eigenschaften unterschiedlicher PM Materialien (s.=gesintert, a.=anisotrop, i.=isotrop, k.=kunststoffgebunden, g.=gegossen) [13].

PM Material	Remanenzinduktion in T	Relative Permeabilität
Hartferrite s., i.	0,19 ... 0,23	1,25
Hartferrite s., a.	0,38 ... 0,45	1,05 ... 1,10
Hartferrite k., i.	0,08 ... 0,15	1,30
Hartferrite k., a.	0,22 ... 0,29	1,10
AlNiCo g., i.	0,58 ... 0,62	4,0 ... 6,0
AlNiCo g., a.	0,80 ... 1,35	3,0 ... 5,0
SmCo ₅ , s., a.	0,85 ... 1,05	1,08
Sm ₂ Co ₁₇ , s., a.	0,98 ... 1,15	1,08
Neodym-Eisen-Bor s., a.	1,05 ... 1,52	1,05
Neodym-Eisen-Bor k., i.	0,52 ... 0,74	1,20
Neodym-Eisen-Bor k., a.	0,85 ... 1,00	1,20 ... 1,80

Tabelle A.8: Hilfsfaktoren zur Berechnung der Streuung mehrsträngiger Wicklungen [13].

Sehnung	Hilfsfaktor k_1	Hilfsfaktor k_2
2/3	0,8196	0,7500
5/6	0,9105	0,8750
1	1	1

Tabelle A.9: Empirische Faktoren zur Berechnung der Induktivitäten der Längs- bzw. Querachse [89].

Formelzeichen	SPMSM	IPMSM	Beschreibung
$k_{h,q}$	1	0	Zusatzformfaktor für die Querachse
$k_{s,d}$	1,1 ... 1,3	1,1 ... 1,3	Sättigungsfaktor für die Längsachse
$k_{s,q}$	1,1 ... 1,3	relativ hoch	Sättigungsfaktor für die Querachse

Tabelle A.9: Leitermaterialspezifische Abhängigkeiten [13].

Leitermaterial	Spezifischer Widerstand bei 20 °C in $mm^2/(S m)$	Temperaturbeiwert in $1/K$
Kupferdraht	0,017241	0,000392
Aluminiumdraht	0,027027	0,0004
Kupferdraht	0,017241	0,000392

Anhang B Maschinendaten und Validierungsdaten

Tabelle B.1: Eingabeparameter für die Validierung der Hauptabmessungen – MÜLLER [207].

Nennwerte			
Nennleistung	3 kW	Anzahl Polpaare	2
Nenndrehzahl	1500 1/min	Nennfrequenz	50 Hz
Nennspannung	400 V	Anzahl Phasen	3
Richtwerte			
relative Rotorlänge	1,45	Stator minimaler Nutabstand	0,008 m
Breite der Lüftungskanäle	0,01 m	Stator Eisen-Füllfaktor	0,95
Luftspaltinduktion	0,58 T	Rotorstab Stromdichte	4,2 A/mm ²
Stator Stromdichte	6,9 A/mm ²	Rotorring Stromdichte	5,0 A/mm ²
Stator maximale Joch-Induktivität	1,65 T	maximale Jochinduktivität des Rotors	1,6 T
Stator maximale Zahninduktivität	1,65 T	maximale Zahninduktivität des Rotors	1,65 T
Stator Nutenfüllfaktor	0,4	Rotor minimale Schlitzteilung	0,007 m
Windungsfaktor Grundwelle	0,96	Rotor Eisen-Füllfaktor	0,95
Optionen			
Maschinentyp	Käfigläufer	Eisenmaterial Stator	M800-50A
Verbindungsart Wicklungen	Dreieck	Leitermaterial Stator	Kupfer
Spulenform Stator	Runddraht	Temperatur Leiter Stator	95°C
Spulenform Rotor	Runddraht	Eisenmaterial Rotor	M800-50A
Nutform Stator	Trapez	Leitermaterial Rotor	Aluminium
Nutform Rotor	Trapez	Temperatur Leiter Rotor	115°C
Kühlungsart	Luft	Option für die Wicklung	Manuell

Tabelle B.2: Eingabeparameter für die Validierung der Hauptabmessungen — Audi e-tron [56], [206].

Nennwerte			
Nennleistung	40 kW	Anzahl Polpaare	2
Nenndrehzahl	5000 1/min	Nennfrequenz	166,67 Hz
Nennspannung	360 V	Anzahl Phasen	3
Richtwerte			
relative Rotorlänge	1,0	Stator minimaler Nutabstand	0.007 m
Breite der Lüftungskanäle	0,01 m	Stator Eisen-Füllfaktor	0.95
Luftspaltinduktion	0,58 T	Rotorstab Stromdichte	4,0 A/mm ²
Stator Stromdichte	7,0 A/mm ²	Rotorring Stromdichte	3,8 A/mm ²
Stator maximale Joch-Induktivität	1,5 T	maximale Jochinduktivität des Rotors	1,8 T
Stator maximale Zahninduktivität	1,8 T	maximale Zahninduktivität des Rotors	2,0 T
Stator Nutenfüllfaktor	0,5	Rotor minimale Schlitzteilung	0,007 m
Windungsfaktor Grundwelle	0,96	Rotor Eisen-Füllfaktor	0,95
Optionen			
Maschinentyp	Käfigläufer	Eisenmaterial Stator	VACOFLUX 48
Verbindungsart Wicklungen	Stern	Leitermaterial Stator	Kupfer
Spulenform Stator	Runddraht	Temperatur Leiter Stator	90°C
Spulenform Rotor	Runddraht	Eisenmaterial Rotor	VACOFLUX 48
Nutform Stator	Trapez (eckig)	Leitermaterial Rotor	Aluminiumguss
Nutform Rotor	Trapez (eckig)	Temperatur Leiter Rotor	115°C
Kühlungsart	Flüssig	Option für die Wicklung	Manuell

Tabelle B.3: Eingabeparameter für die Validierung der Hauptabmessungen – Renault Twizy.

Nennwerte			
Nennleistung	8 kW	Anzahl Polpaare	2
Nenndrehzahl	2100 1/min	Nennfrequenz	70 Hz
Nennspannung	48 V	Anzahl Phasen	3
Richtwerte			
relative Rotorlänge	1,2	Stator minimaler Nutabstand	0,007 m
Breite der Lüftungskanäle	0,01 m	Stator Eisen-Füllfaktor	0,95
Luftspaltinduktion	0,58 T	Rotorstab Stromdichte	4,0 A/mm ²
Stator Stromdichte	7,0 A/mm ²	Rotorring Stromdichte	3,8 A/mm ²
Stator maximale Joch-Induktivität	1,4 T	maximale Jochinduktivität des Rotors	1,5 T
Stator maximale Zahninduktivität	1,8 T	maximale Zahninduktivität des Rotors	1,5 T
Stator Nutenfüllfaktor	0,5	Rotor minimale Schlitzteilung	0,007 m
Windungsfaktor Grundwelle	0,96	Rotor Eisen-Füllfaktor	0,95
Optionen			
Maschinentyp	Käfigläufer	Eisenmaterial Stator	M800-50A
Verbindungsart Wicklungen	Stern	Leitermaterial Stator	Kupfer
Spulenform Stator	Runddraht	Temperatur Leiter Stator	90°C
Spulenform Rotor	Runddraht	Eisenmaterial Rotor	M800-50A
Nutform Stator	Trapez (eckig)	Leitermaterial Rotor	Aluminiumguss
Nutform Rotor	Trapez (eckig)	Temperatur Leiter Rotor	115°C
Kühlungsart	Flüssig	Option für die Wicklung	Manuell

Tabelle B.4: Eingabeparameter für die Validierung der Hauptabmessungen – Tesla Model S.

Nennwerte			
Nennleistung	69 kW	Anzahl Polpaare	2
Nenndrehzahl	6000 1/min	Nennfrequenz	200 Hz
Nennspannung	320 V	Anzahl Phasen	3
Richtwerte			
relative Rotorlänge	1,25	Stator minimaler Nutabstand	0,007 m
Breite der Lüftungskanäle	0,01 m	Stator Eisen-Füllfaktor	0,95
Luftspaltinduktion	0,58 T	Rotorstab Stromdichte	4,0 A/mm ²
Stator Stromdichte	7,0 A/mm ²	Rotorring Stromdichte	3,8 A/mm ²
Stator maximale Joch-Induktivität	1,4 T	maximale Joch-Induktivität des Rotors	1,5 T
Stator maximale Zahninduktivität	1,8 T	maximale Zahninduktivität des Rotors	1,9 T
Stator Nutenfüllfaktor	0,5	Rotor minimale Schlitzteilung	0,007 m
Windungsfaktor Grundwelle	0,96	Rotor Eisen-Füllfaktor	0,95
Optionen			
Maschinentyp	Käfigläufer	Eisenmaterial Stator	VACOFLUX 48
Verbindungsart Wicklungen	Stern	Leitermaterial Stator	Kupfer
Spulenform Stator	Runddraht	Temperatur Leiter Stator	90°C
Spulenform Rotor	Runddraht	Eisenmaterial Rotor	VACOFLUX 48
Nutform Stator	Trapez (eckig)	Leitermaterial Rotor	Kupfer
Nutform Rotor	Trapez (eckig)	Temperatur Leiter Rotor	115°C
Kühlungsart	Flüssig	Option für die Wicklung	Manuell

Tabelle B.5: Eingabeparameter für die Validierung der Hauptabmessungen – BMW i3.

Nennleistung	75 kW	Polpaarzahl	6
Nenndrehzahl	4800 1/min	Leistungsfaktor	0,95
Nennspannung	360 V	Strangzahl	3
Richtwerte			
Relative Ankerlänge	2,81	Wicklungstyp	Gesehnte Zweischicht-Ganzlochwicklung
Luftspaltinduktion	0,85 T	Min. Nutteilung	0,007 m
Max. Rückeninduktion	1,4 T	Eisenfüllfaktor	0,95
Max. Zahninduktion	1,8 T	Temperatur Wicklung	75 °C
Nutfüllfaktor	0,5	Material PM	NdFeB s.,a.
Wicklungsfaktor Grundwelle	0,92	Remanenzinduktion	1,16 T
Stromdichte	7 A/mm ²	Relative Permeabilität	1,06
Sekundärdaten			
Leitermaterial Stator	Kupferdraht	Kühlung Stator	Luft
Schaltung	Stern	Magnetanordnung Rotor	IPMSM

Tabelle B.6: Eingabeparameter für die Validierung der Hauptabmessungen – VW e-Golf.

Nennwerte			
Nennleistung	50 kW	Polpaarzahl	5
Nenndrehzahl	3.000 1/min	Leistungsfaktor	0,95
Nennspannung	320 V	Strangzahl	3
Richtwerte			
Relative Ankerlänge	4,43	Wicklungstyp	Gesehnte Zweischicht-Ganzlochwicklung
Luftspaltinduktion	0,85 T	Min. Nutteilung	0,007 m
Max. Rückeninduktion	1,4 T	Eisenfüllfaktor	0,95
Max. Zahninduktion	1,8 T	Temperatur Wicklung	75 °C
Nutfüllfaktor	0,5	Material PM	NdFeB s.,a.
Wicklungsfaktor Grundwelle	0,92	Remanenzinduktion	1,16 T
Stromdichte	7 A/mm ²	Relative Permeabilität	1,06
Sekundärdaten			
Leitermaterial Stator	Kupferdraht	Kühlung Stator	Luft
Schaltung	Stern	Magnetanordnung Rotor	IPMSM

Tabelle B.7: Eingabeparameter für die Validierung der Hauptabmessungen – Nissan Leaf.

Nennwerte			
Nennleistung	80 kW	Polpaarzahl	4
Nenndrehzahl	2.700 1/min	Leistungsfaktor	0,95
Nennspannung	360 V	Strangzahl	3
Richtwerte			
Relative Ankerlänge	2,94	Wicklungstyp	Gesehnte Zweischicht-Ganzlochwicklung
Luftspaltinduktion	0,85 T	Min. Nutteilung	0,007 m
Max. Rückeninduktion	1,4 T	Eisenfüllfaktor	0,95
Max. Zahninduktion	1,8 T	Temperatur Wicklung	75 °C
Nutfüllfaktor	0,5	Material PM	NdFeB s.,a.
Wicklungsfaktor Grundwelle	0,92	Remanenzinduktion	1,16 T
Stromdichte	7 A/mm ²	Relative Permeabilität	1,06
Sekundärdaten			
Leitermaterial Stator	Kupferdraht	Kühlung Stator	Luft
Schaltung	Stern	Magnetanordnung Rotor	IPMSM

Tabelle B.8: Eingabeparameter für die Validierung der Hauptabmessungen – Brusa IPM1-61.7.04.

Nennwerte			
Nennleistung	33 kW	Polpaarzahl	3
Nenndrehzahl	8.000 1/min	Leistungsfaktor	0,95
Nennspannung	400 V	Strangzahl	3
Richtwerte			
Relative Ankerlänge	0,475	Wicklungstyp	Gesehnte Zweischicht-Ganzlochwicklung
Luftspaltinduktion	0,85 T	Min. Nutteilung	0,007 m
Max. Rückeninduktion	1,4 T	Eisenfüllfaktor	0,95
Max. Zahninduktion	1,8 T	Temperatur Wicklung	75 °C
Nutfüllfaktor	0,5	Material PM	NdFeB s.,a.
Wicklungsfaktor Grundwelle	0,92	Remanenzinduktion	1,16 T
Stromdichte	7 A/mm ²	Relative Permeabilität	1,06
Sekundärdaten			
Leitermaterial Stator	Kupferdraht	Kühlung Stator	Luft
Schaltung	Stern	Magnetanordnung Rotor	IPMSM

Tabelle B.8: Veröffentlichte Maschinendaten zum Stator design - BMW i3 [75], [1], [210], [211].

Maschinenparameter	Formelzeichen	BMW i3 (2016 model)
Anzahl Nuten	N	72
Lochzahl	q	2
Spulenteilung/Spulenspannweite	y	6 Nuten
Sehnung	S	1
Anzahl Parallelschaltung	a	6
Außendurchmesser	$D_{a, \text{stator}}$	0,242 m

Abbildung B.9 zeigt mögliche Parameterkombinationen in Bezug auf die mittlere Strangzahl w_{Str} .

Aus allen möglichen Parameterkombinationen wurde in Bezug auf die Parameterbereiche eine mittlere Strangzahl w_{Str} gewählt (Abbildung B.9). Der entsprechende Parameter für den BMW i3 ist gekennzeichnet.

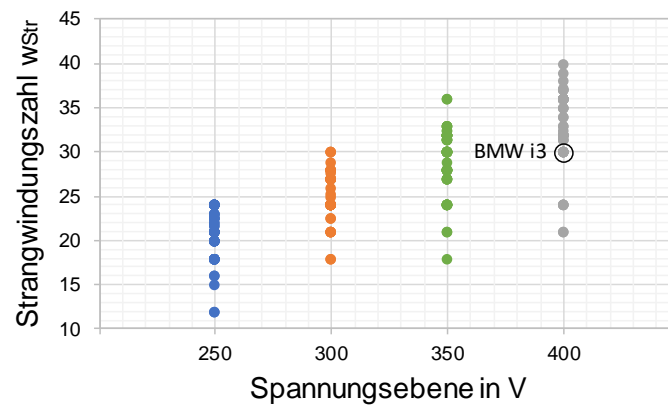


Abbildung B.9: Lösungsraum für Spannungsebene und Strangwindungszahl – BMW i3 [80].

Die Strangwindungszahl w_{Str} steigt mit einem höheren Spannungsniveau. Ein hoher Wert für w_{Str} führt zu einem hohen Gesamtstromfluss, aber zu einem kleinen Stromfluss pro Leiter und somit zu einer Erhöhung des Wirkungsgrades durch geringere Kupferverluste in den einzelnen Leitern [13].

Anhang C Fahrzyklusgenerierung und Fahrdatenanalyse

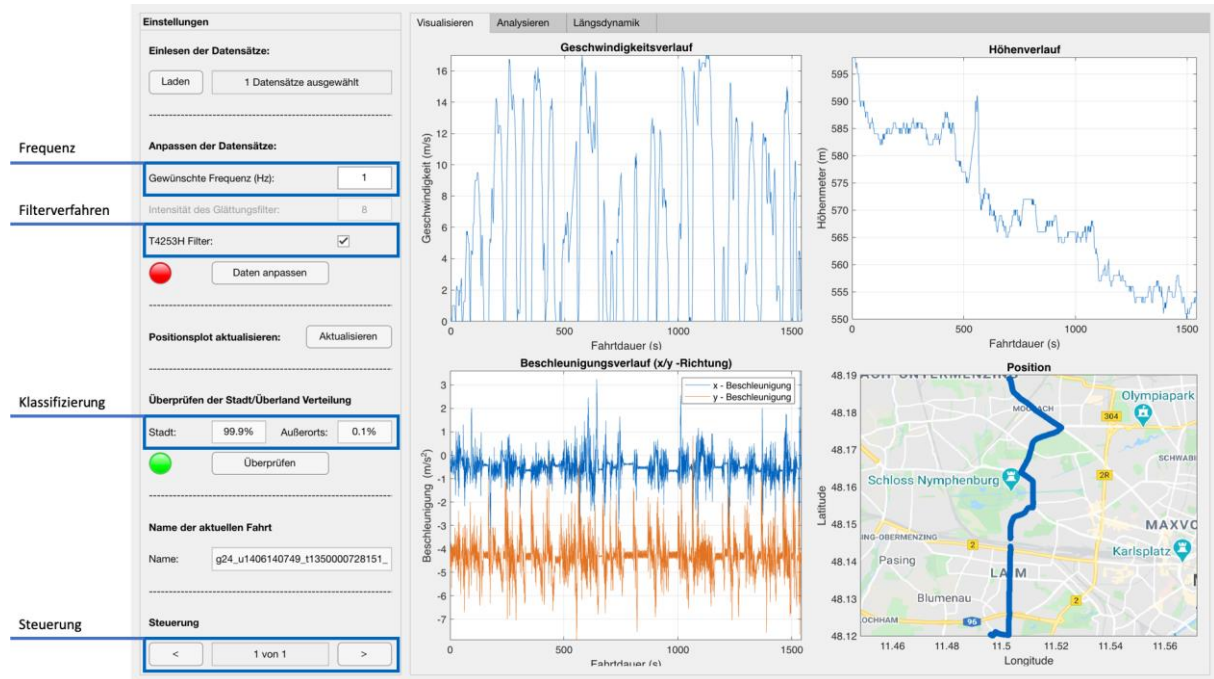


Abbildung C.1: Tool zur Analyse und Klassifizierung der Fahrdaten [173].

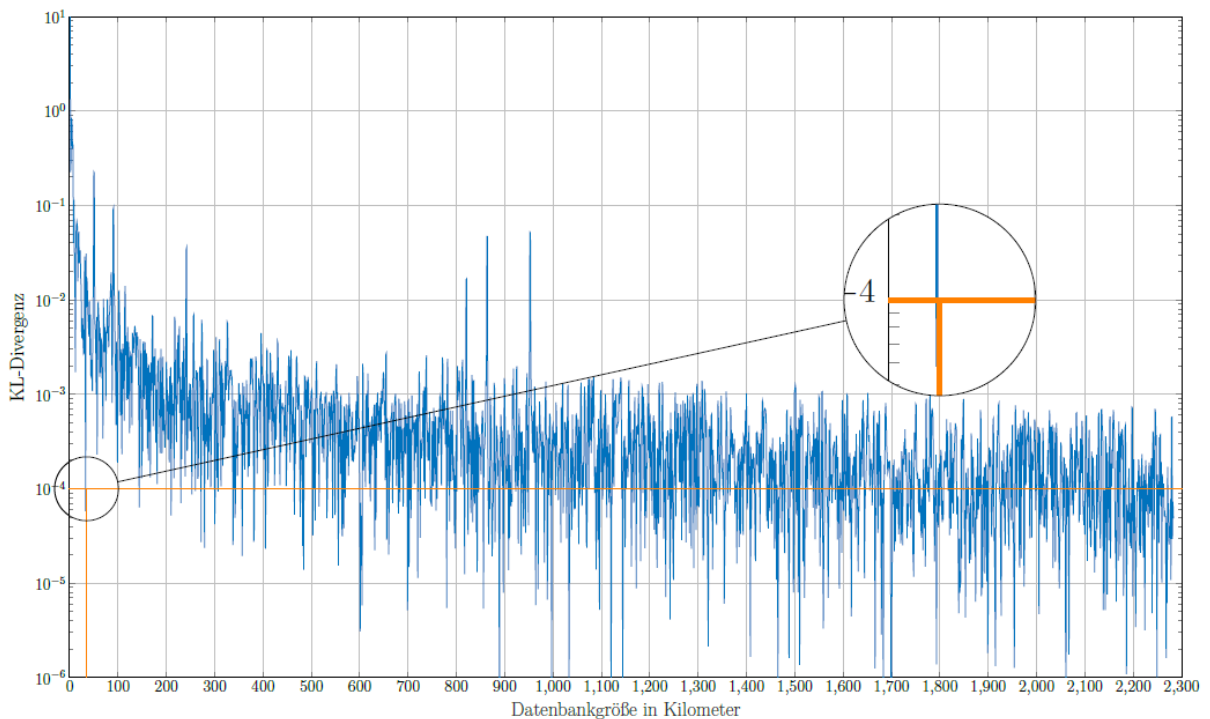


Abbildung C.2: Annäherung der KL-Divergenz nach Wang [173].

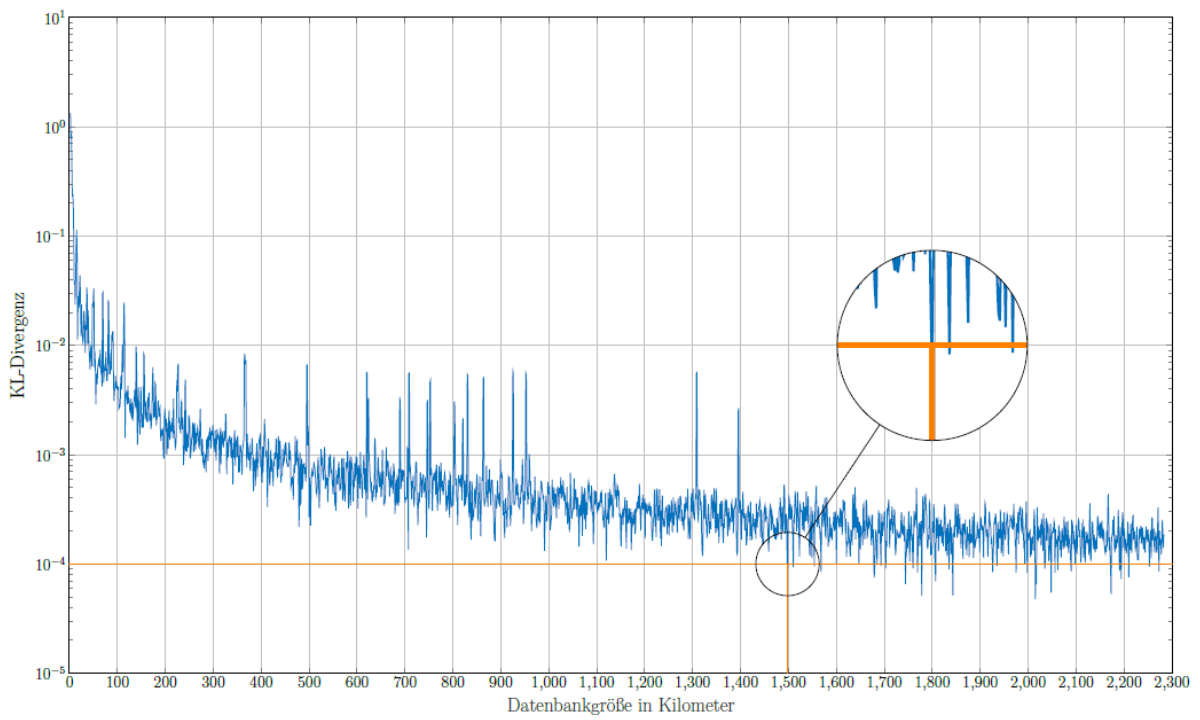


Abbildung C.3: Modifizierte Annäherung der KL-Divergenz [173].

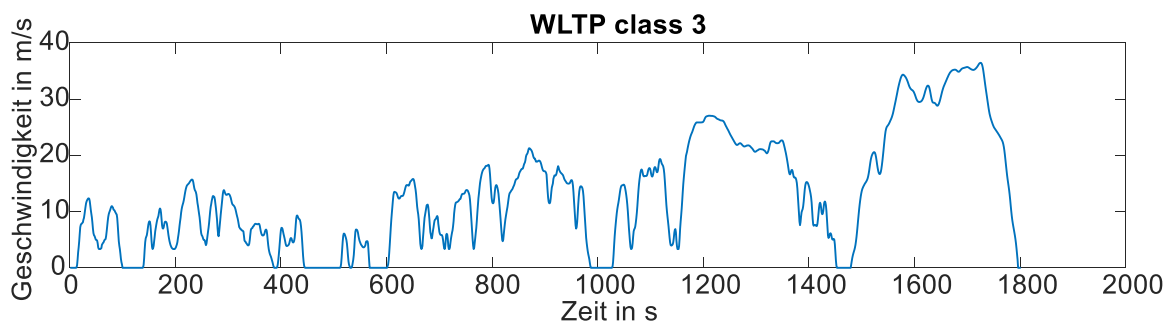


Abbildung C.4: WLTP class 3 [112].

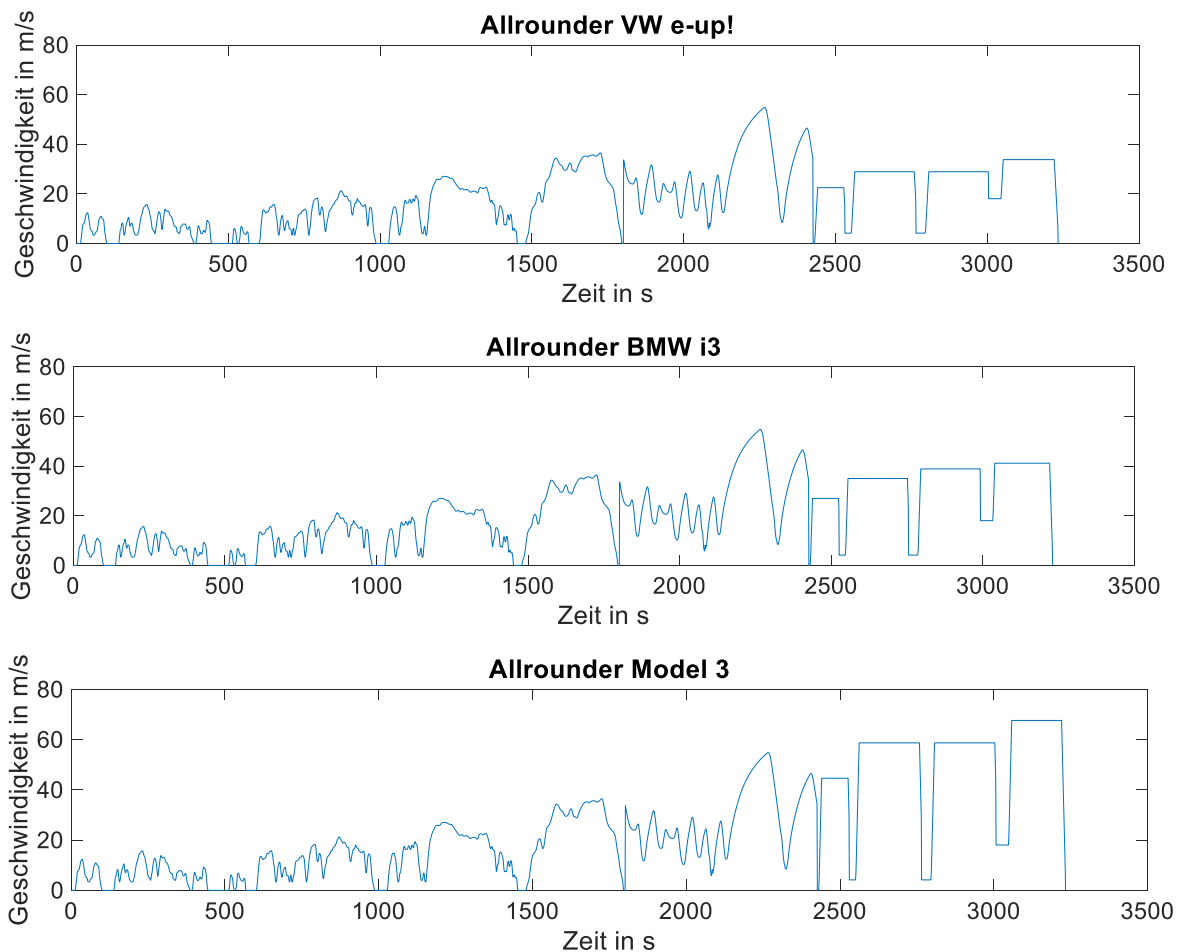


Abbildung C.5: Allrounder (WLTP, Roborace, Lastzyklus) – VW e-up!, BMW i3, Tesla Model 3.

Anhang C.6 zeigt Einteilung der Fahrzeugklassen über die ISO 3833:1977

Die Einteilung der Fahrzeugklassen wird nach technischen Merkmalen international über die ISO 3833:1977 definiert. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Einteilung des Kraftfahrtbundesamtes (KBA) verwendet. Diese stimmt in weiten Teilen mit der ISO 3833:1977 überein und wird auch für die Erstellung des „Mobilität in Deutschland“-Portals (MiD) herangezogen [34]. Das KBA unterscheidet vier Hauptfahrzeugklassen:

- Klasse M: Kraftfahrzeug für die Beförderung von Personen
- Klasse N: Kraftfahrzeug für den Transport von Gütern
- Klasse O: Anhänger für Güter und Personen
- Klasse L: Kleinkrafträder und Kleinkraftfahrzeuge

Anhang C.7 zeigt die Einteilung der Hauptfahrzeugklasse M (Pkw)

Die Hauptfahrzeugklasse M lässt sich, zur weiteren Präzisierung, in folgende Untergruppen aufteilen [34]:

- Kleinwagen, durchschnittliche Jahresfahrleistung 11520,1 km
- Kompaktwagen, durchschnittliche Jahresfahrleistung 14340,1 km
- Mittelklasse, durchschnittliche Jahresfahrleistung 17099,2 km
- Große Wagen, durchschnittliche Jahresfahrleistung 16954,5 km

Somit ist bei den zwei größten Fahrzeugklassen die durchschnittliche, jährliche Fahrleistung am größten. Neben der Fahrzeugklasseneinteilung aufgrund technischer Charakteristiken kann auch eine Einteilung nach Verwendungszweck des Fahrzeugs stattfinden. Die Unterschiede können ebenfalls mittels des MiD untersucht werden [34]. Die durchschnittliche Wegstrecke aller Fahrten zu ihren verschiedenen Zwecken sind in Tabelle C.7 dargestellt.

Tabelle C.7: Durchschnittliche Wegstrecke je Verwendungszweck nach MiD 2017 [34].

Fahrzweck	Arbeit/dienstlich	Ausbildung	Besorgungen	Freizeit	Nach Hause
Durchschnittliche Wegstrecke in km	17,0	6,8	7,8	15,1	12,6

Hierbei wird ersichtlich, dass dienstliche Fahrten durchschnittlich am meisten Wegstrecke für eine einzelne Fahrt benötigen. Danach folgen Freizeitfahrten und Fahrten nach Hause. Eher weniger Wegstrecke wird für Besorgungen und den Weg zur Ausbildungsstelle benötigt.

Anhang C.8 zeigt die mathematische Definition von Markov-Ketten

Mathematisch ist eine Markov-Kette wie folgt definiert [122]:

„Sei P eine $k \times k$ -Matrix mit den Einträgen $(P_{i,j})_{i,k=1,\dots,k}$. Ein zeitdiskreter stochastischer Prozess (X_0, X_1, \dots) mit endlichem Zustandsraum $\{s_1, \dots, s_k\}$ heißt homogene Markov-Kette mit Übergangsmatrix P genau dann, wenn für alle $n \in \mathbb{N}$, alle $i, j \in \{1, \dots, k\}$ und $i_0, \dots, i_{n-1} \in \{1, \dots, k\}$ gilt [122]:

$$\mathbb{P}(X_{n+1}=s_j | X_n=s_i, X_{n-1}=s_{i_{n-1}}, \dots) = \mathbb{P}(X_{n+1}=s_j | X_n=s_i) = P_{i,j} \quad (\text{C.8})$$

Die Einträge der sogenannten Übergangsmatrix P stellen dabei die Übergangswahrscheinlichkeiten dar. $P_{i,j}$ ist dann die Wahrscheinlichkeit, sich zum Zeitpunkt $n+1$ in Zustand s_j zu befinden, gegeben, dass es sich zum Zeitpunkt n in Zustand s_i befindet.

Anhang C.9 zeigt die Grundlagen der Längsdynamiksimulation

Grundsätzlich wird zur Bildung des Modells auf der Fahrwiderstandsgleichung, basierend auf Rad-, Luft-, Steigungs- und Beschleunigungswiderstand, am Fahrzeug aufgebaut, wodurch Drehmoment, Leistung sowie Verbrauch bestimmt werden können. Dabei stellt der Radwiderstand die auftretenden Kräfte am Rad dar, der sich aus den Reib-, Walk-, Lufteigenschaften des Reifens sowie der Fahrbahnoberflächen nach Gleichung 1 zusammensetzt [182].

$$F_{Rad} = f_R m g \cos \alpha \quad (C.1)$$

Mit dem Rollwiderstandsbeiwert f_R des Fahrzeuges, der Masse m und der Erdbeschleunigung g sowie dem Winkel α , der die Steigung der Fahrbahn beschreibt.

Der Luftwiderstand beschreibt die durch die umgebene Luft auf einen bewegten Körper wirkende Kraft und setzt sich aus den Reibungswerten der Karosserie, dem Druckaufbau der Front, den Verwirbelungseffekten sowie schräger Fahrzeuganströmung nach Gleichung 2 zusammen [74].

$$F_L = c_w A \frac{\rho_L}{2} (v_{Fahrzeug} \pm v_W)^2 \quad (C.2)$$

Mit dem dimensionslosen Luftwiderstandsbeiwert, auch c_w -Wert genannt, der Stirnfläche A , Luftdichte ρ_L , sowie der Relativgeschwindigkeit des Fahrzeuges zur Luft [74].

Mit dem Steigungswiderstand wird die Kraft beschrieben, die zur Steigung benötigt wird:

$$F_{St} = m g \sin \alpha \quad (C.3)$$

Die Veränderung der Fahrzeuggeschwindigkeit aufgrund der Trägheit der Fahrzeugmasse setzt sich unter Zuhilfenahme des Massenfaktors e_i , der Trägheitsmomente sowie der Beschleunigung/Verzögerung in Fahrtrichtung a_x zusammen und beschreibt den Beschleunigungswiderstand [74]:

$$F_a = (e_i m_F + m_{Zul}) a_x \quad (C.4)$$

Der Gesamtwiderstand setzt sich aus den einzelnen Teilwiderständen zusammen und beschreibt somit die Kraft, die ein Fahrzeug zum Beschleunigen überwinden muss. Prinzipiell gilt es in der Fahrzeugauslegung, die Fahrwiderstände zu reduzieren [74].

Zur Überleitung aus den Fahrwiderständen zu auslegungsrelevanten Maschinenparametern, kann eine Leistungsbilanz gezogen werden. Hierfür muss zunächst das angreifende Moment M_R an der Radnabe mit Hilfe der Zugkraft F_x und des dynamischen Reifendurchmessers nach Gleichung 5 bestimmt werden.

$$M_R = F_x r_{dyn} = (M_{Maschine} - M_{Verl}) i_G i_{Diff} \quad (C.5)$$

Mit der Getriebeübersetzung i_G , Differenzialübersetzung i_{Diff} und der Übertragungsverluste im Antriebsstrang M_{Verl} zwischen Rad und Maschine. Das Maschinenmoment $M_{Maschine}$ kann dann durch umstellen der Gleichung berechnet werden.

Anhang C.10 zeigt die elektrische Leistung des Tesla Model 3 und VW e-up! im jeweiligen Stadtzyklus

Bei den Betriebspunkten ist der Unterschied der charakteristischen Eigenschaften der Fahrzyklen zu erkennen. Der Autobahn-, Gesamt-, Last-, Roborace- und Allrounderzyklus weisen höhere Drehzahlen auf als der Stadt- und Landzyklus. Auch im Bereich des Drehmoments sind Unterschiede zu erkennen. Der Stadt- und Lastzyklus weisen, aufgrund der frequenteren Beschleunigungs- und Bremsvorgänge, höhere Drehmomente auf als die restlichen Fahrzyklen. In Abbildung C.10 ist die elektrische Leistung der elektrischen Maschine in kW für den Tesla Model 3 und den VW e-up! im jeweiligen Stadtzyklus dargestellt.

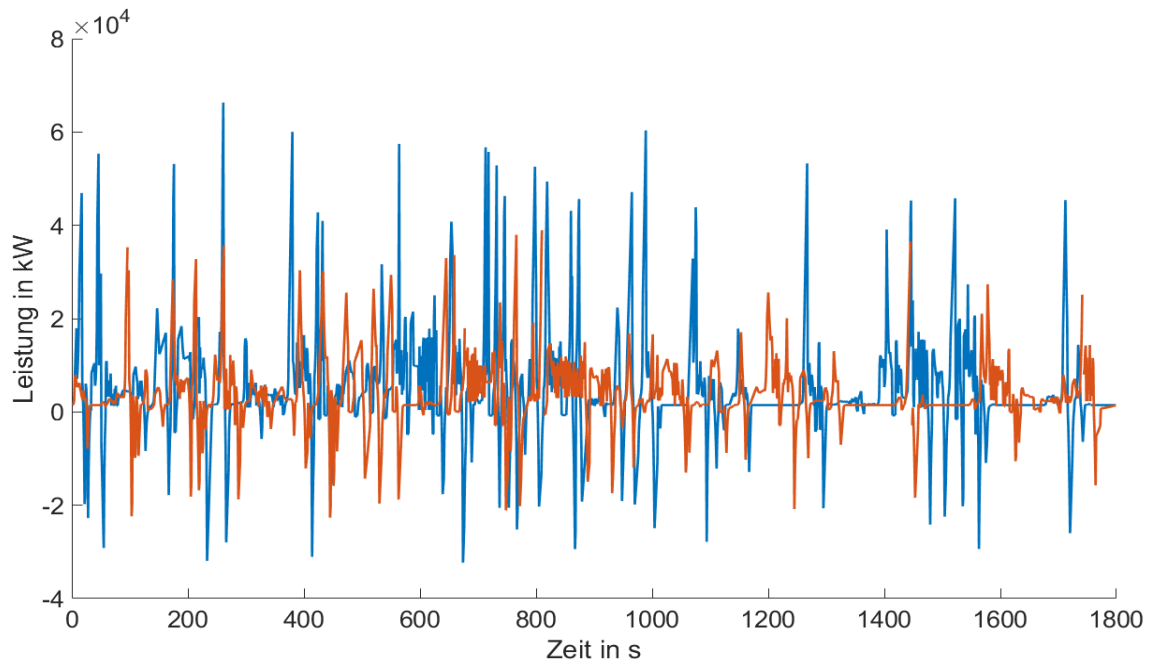


Abbildung C.10: Leistung im jeweiligen generierten Stadtzyklus – VW e-up! und Tesla Model 3.

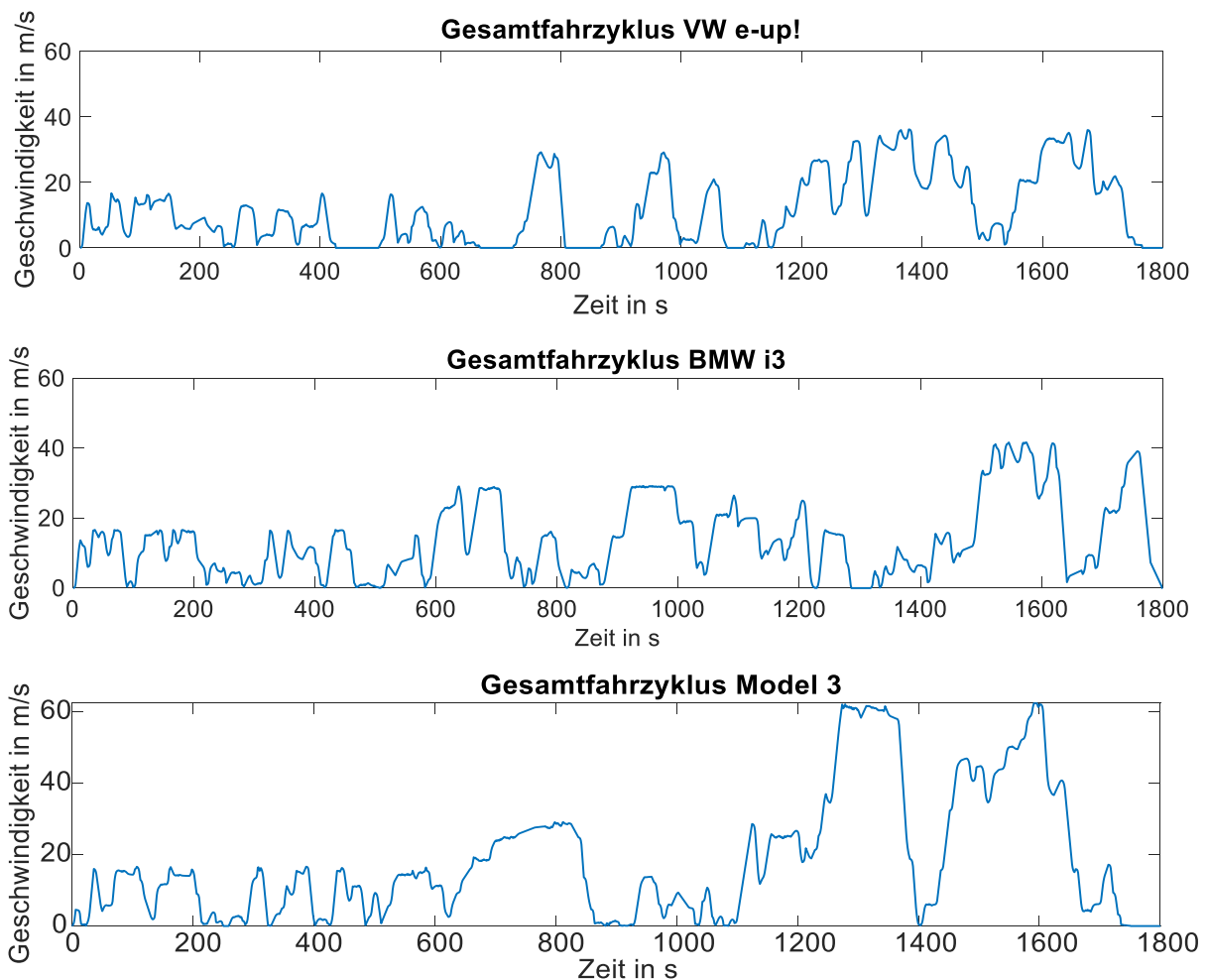


Abbildung C.11: Generierter Gesamtfahrzyklus– VW e-up!, BMW i3, Tesla Model 3.

Zusätzlich zu der Darstellung realer Fahrverhalten im Stadt-, Land- und Autobahnverkehr, wird bei OEM zur Auslegung elektrischer Maschinen ein Lastzyklus generiert, der eine außerordentliche Belastung der Maschine in Extremsituationen darstellt. Darunter zählen starke Beschleunigungs- und Bremsmanöver sowie das Aufrechterhalten hoher bis zu maximalen Geschwindigkeiten über einen längeren Zeitraum (Abbildung C.11).

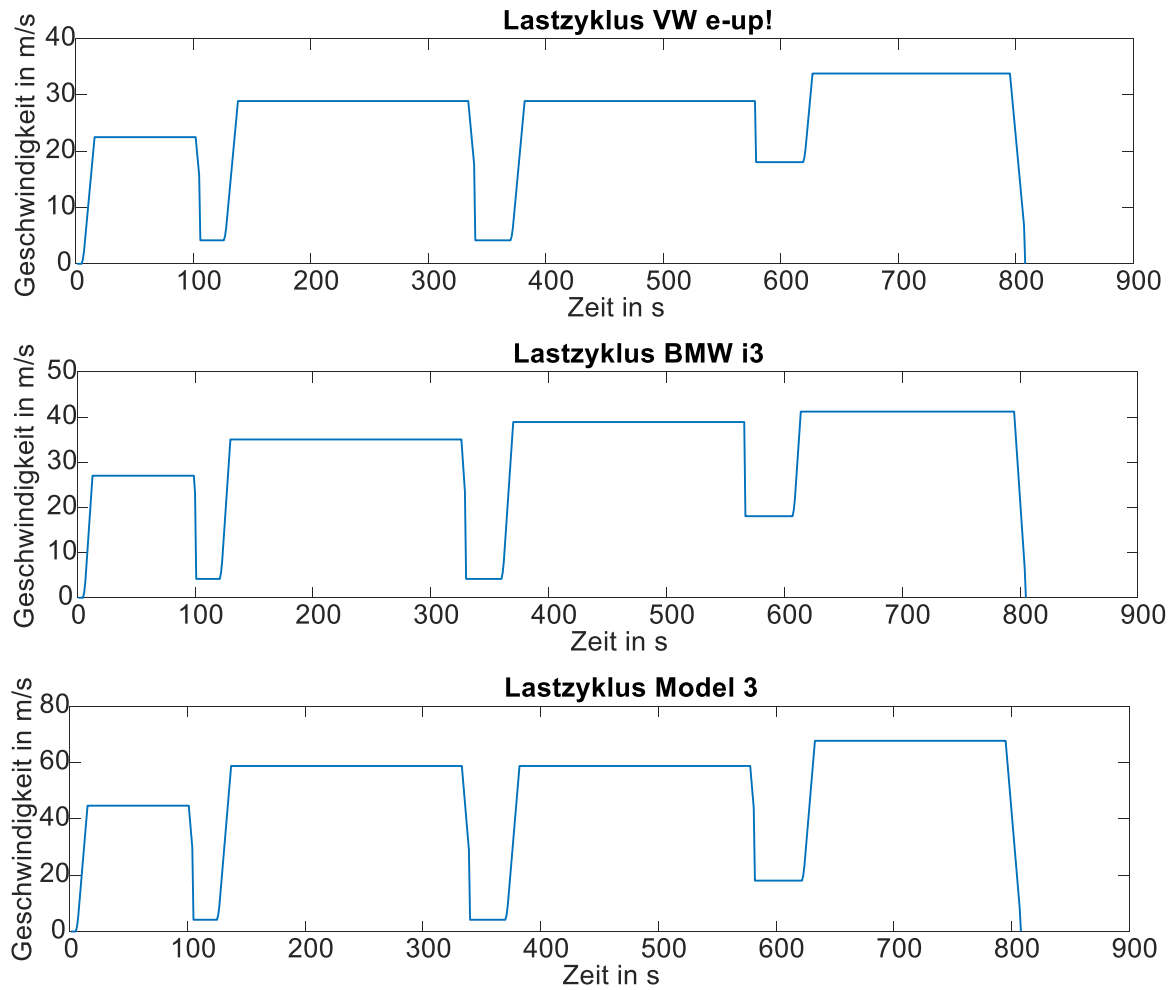


Abbildung C.11: Generierter Lastzyklus – VW e-up!, BMW i3, Tesla Model 3.

Zusätzlich zu einem Lastzyklus verwenden Entwickler von elektrischen Maschinen zur Auslegung sogenannte Rennzyklen. Dabei wird meist ein Zyklus anhand von Fahrten auf dem Nürburgring gewählt, weil dieser im Vergleich zu Lastzyklen ebenfalls stark dynamische Fahrvorgänge abbilden kann. Ein solcher Zyklus ist jedoch weder öffentlich zugänglich, weil jeder OEM seinen eigenen Zyklus abfährt, noch im Rahmen dieser Arbeit nachfahrbar. Aus diesem Grund wurde auf die Fahrdatengrundlage aus dem Projekt Roborace [171], wie bereits in Kapitel 3.1.1 beschrieben, zurückgegriffen. In Abbildung C.12 sind die aus den Renndaten generierten Fahrzyklen der Formula-E Strecken in Hongkong und Paris.

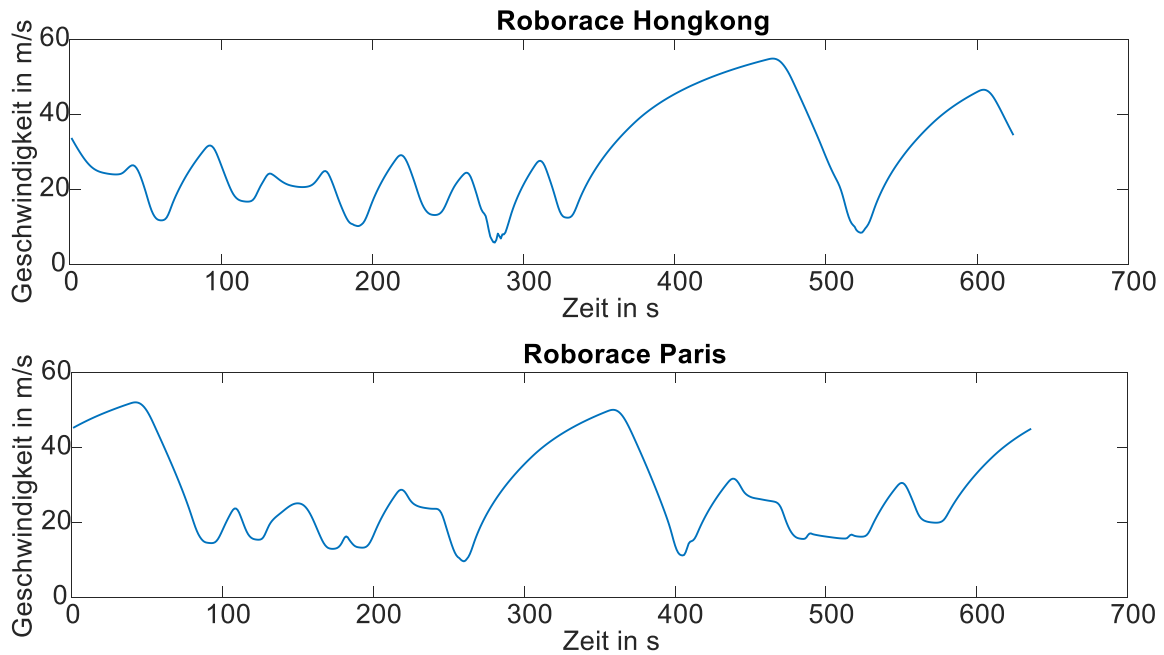


Abbildung C.12: Roborace Fahrzyklus – Hongkong und Paris.

Der generierte Fahrzyklus zur Darstellung des Stadtverkehrs ist in Abbildung C.13 dargestellt.

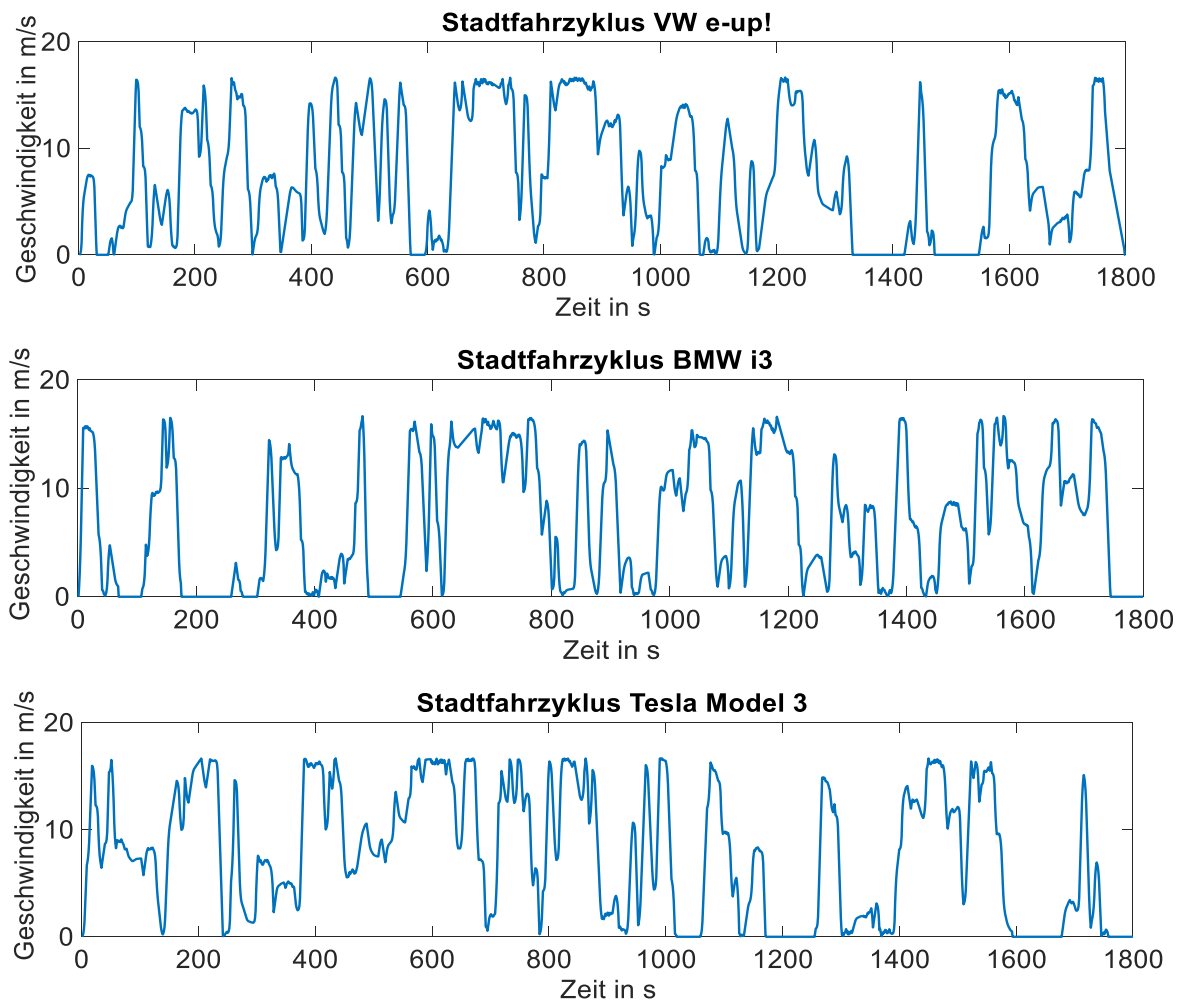


Abbildung C.13: Generierter Fahrzyklus für Stadtverkehr – VW e-up!, BMW i3, Tesla Model 3.

Der Fahrzyklus zur Darstellung der Fahrzeugeigenschaften in Bezug auf das Beschleunigungs- und Bremsverhalten einer Landstraße ist in Abbildung C.14 dargestellt.

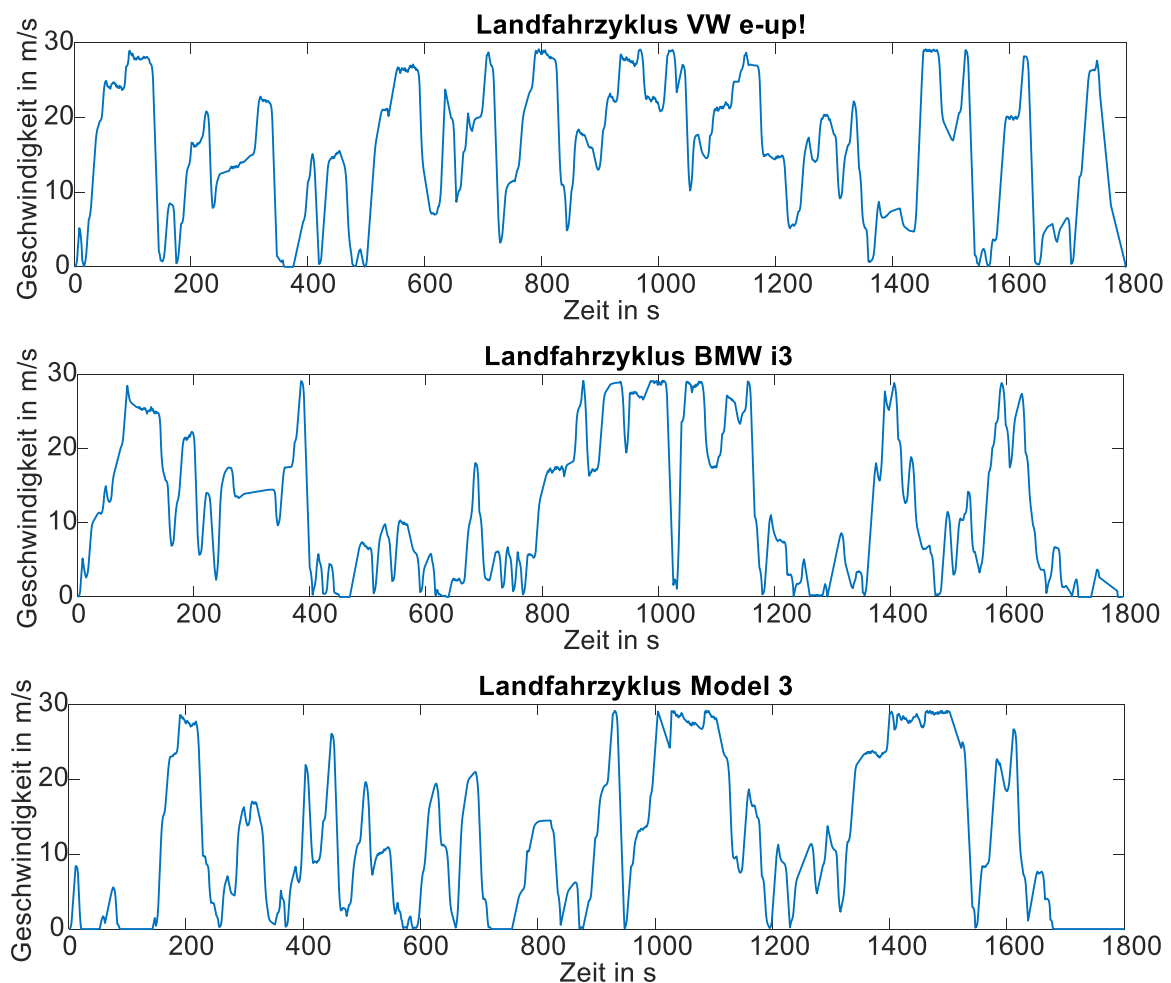


Abbildung C.14: Generierter Fahrzyklus für Landverkehr – VW e-up!, BMW i3, Tesla Model 3.

Anhang C.15: Durch die Anwendung und Anpassung dieser Methodik konnten folgende Mindestdatenmengen zur ausreichenden Darstellung der einzelnen Nutzerprofile ermittelt werden:

- Innerstädtisch: 2 600 km
- Außerstädtisch: 1 500 km
- Mischfahrten: 2 000 km

Das Ziel der Betrachtung verschiedener Fahrzyklen für beispielsweise innerstädtische bzw. außerstädtische Nutzungszwecke ist die Berücksichtigung der individuellen Bedingungen. Die Grenze für beispielsweise innerstädtische Nutzerverhalten wird in der Literatur dabei meist auf 50 km/h festgelegt. Dies spiegelt jedoch nicht die Realität wieder, wodurch in dieser Arbeit mit Hilfe der Entwicklerschnittstelle von Here Maps [217] neben der Zuordnung der Straßenart auch die reale Geschwindigkeitsverläufe berücksichtigt und die Fahrdaten in drei Fahrprofile eingeteilt wurden:

- Innerstädtisch: Stadtanteil > 95 %
- Mischfahrten: 40 % < Stadtanteil < 60 %
- Außerstädtisch: Stadtanteil < 20 %

Anhang D Validierung Fahrzyklen

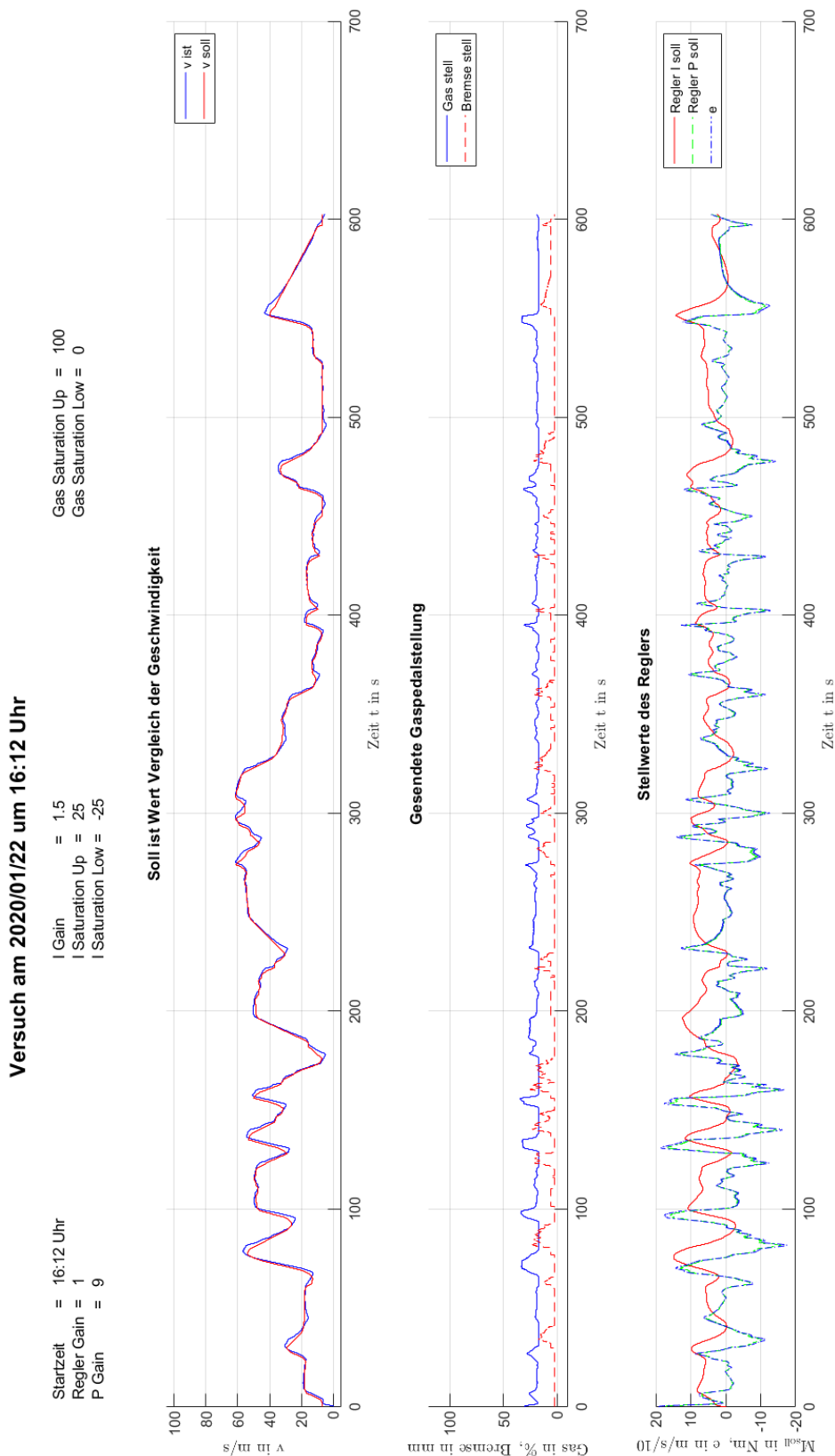


Abbildung D.1: Zyklus dc_stadt_1 für die Fahrzeugklasse Kleinwagen BEV.

Versuch am 2020/01/23 um 09:50 Uhr

Startzeit = 09:50 Uhr
 Regler Gain = 1
 P Gain = 9

I Gain = 1.5
 I Saturation Up = 25
 I Saturation Low = -25

Gas Saturation Up = 100
 Gas Saturation Low = 0

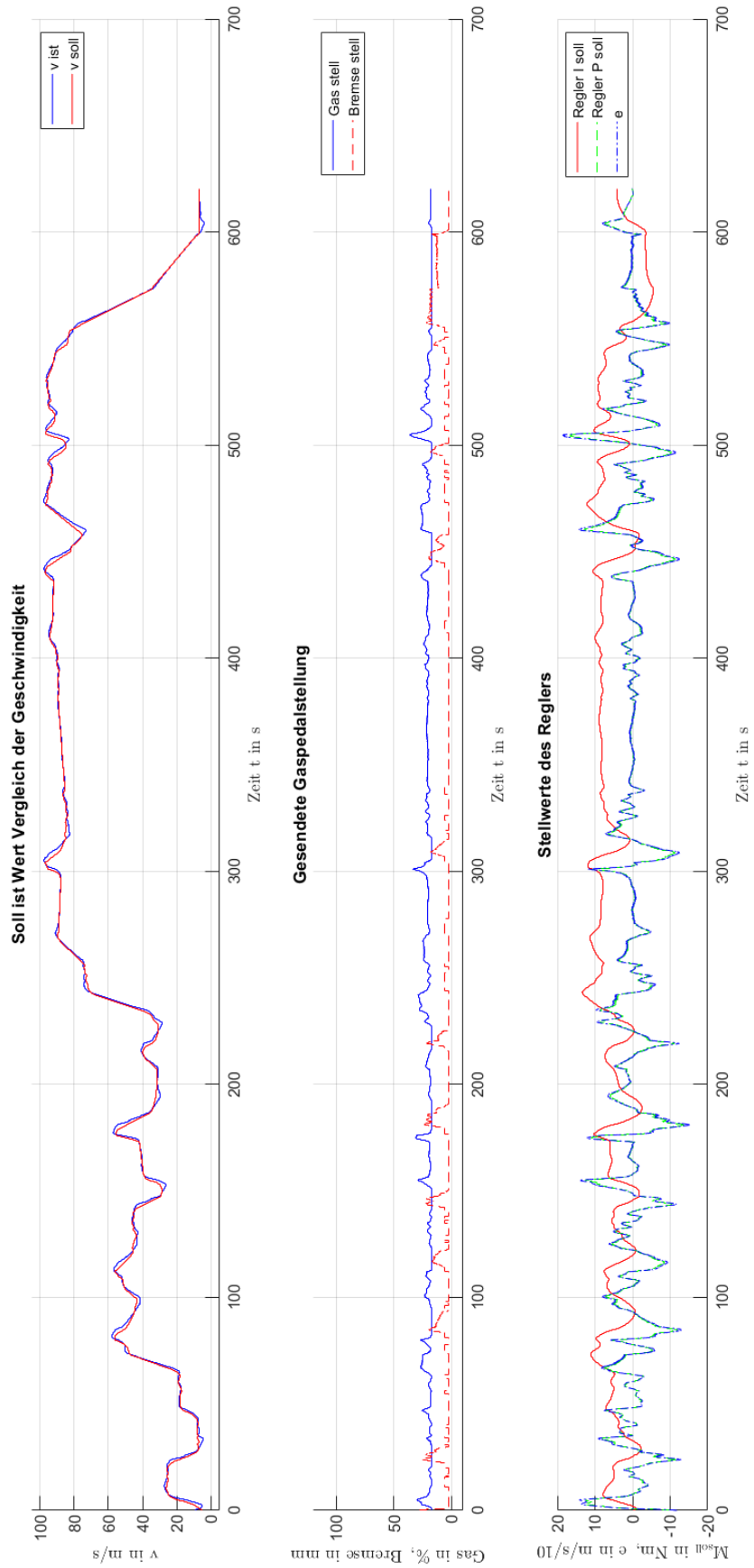


Abbildung D.2: Zyklus *stadt_land_z_1* für die Fahrzeugklasse *Kleinwagen BEV*.

Versuch am 2020/01/23 um 10:04 Uhr

Startzeit = 10:04 Uhr
 Regler Gain = 1
 P Gain = 9

I Gain = 1.5
 I Saturation Up = 25
 I Saturation Low = -25

Gas Saturation Up = 100
 Gas Saturation Low = 0

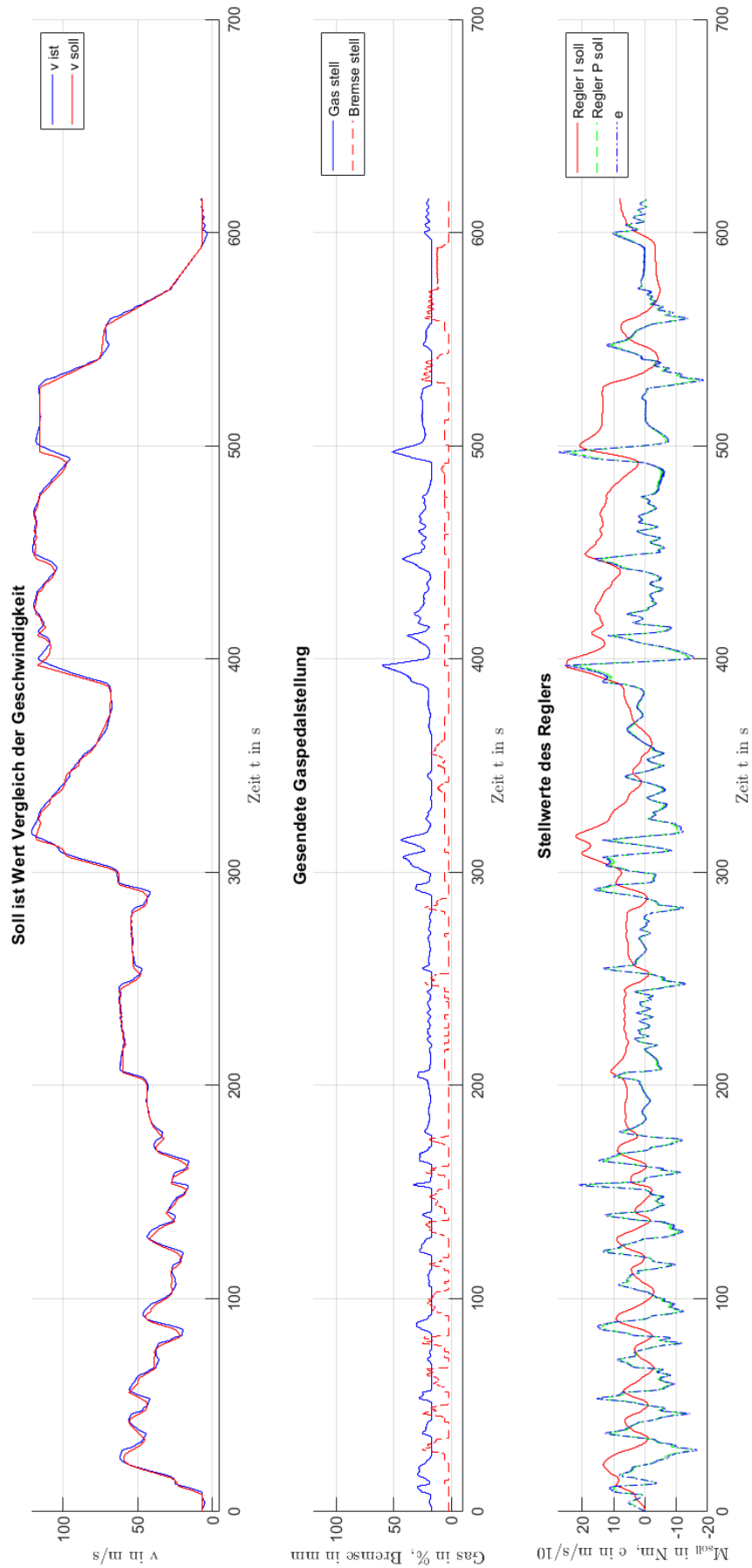


Abbildung D.3: *dc_autobahn_1* für die Fahrzeugklasse *Kleinwagen BEV*.

Versuch am 2020/01/24 um 08:44 Uhr

Startzeit = 08:44 Uhr
 Regler Gain = 1
 P Gain = 9

I Gain = 1.5
 I Saturation Up = 25
 I Saturation Low = -25

Gas Saturation Up = 100
 Gas Saturation Low = 0

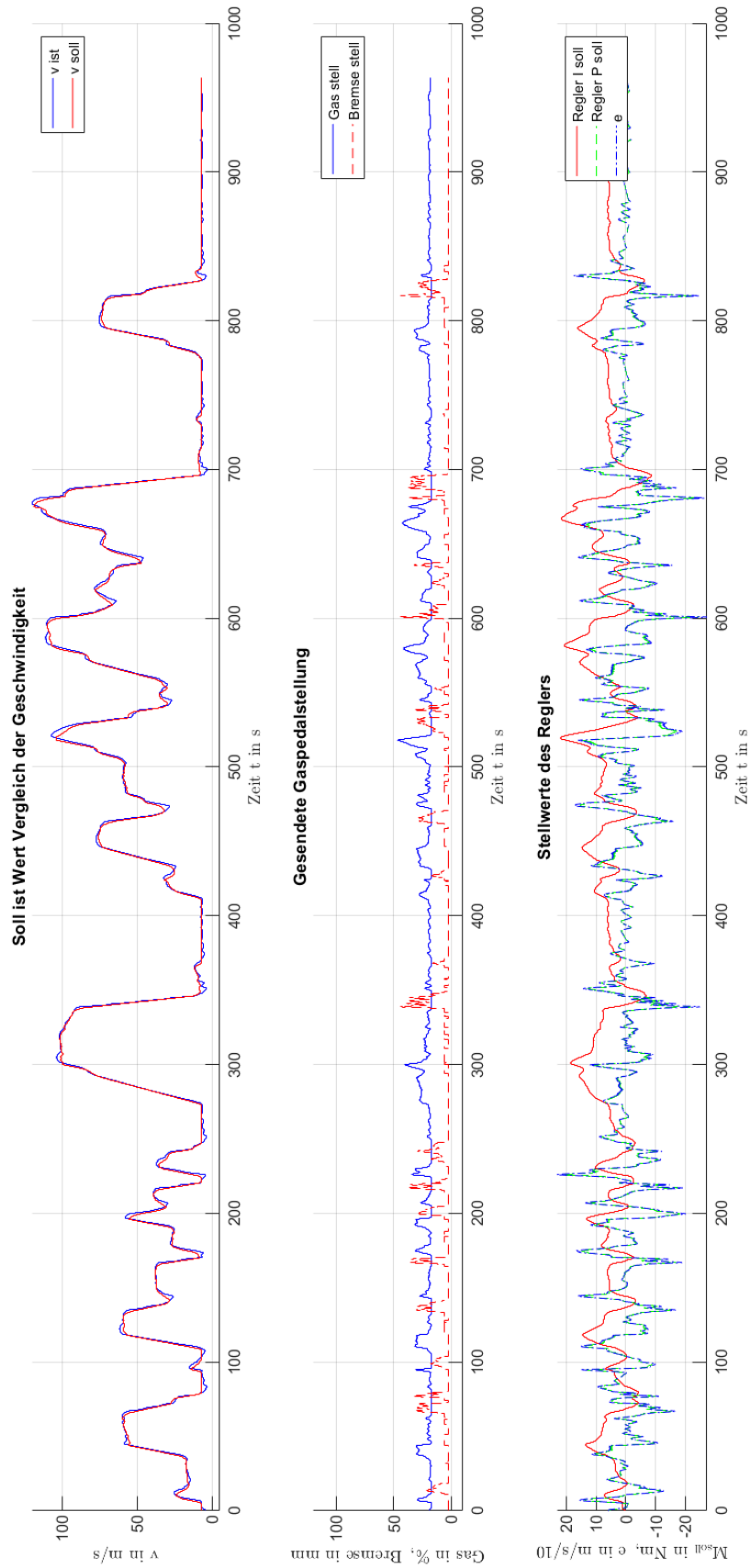


Abbildung D.4: *dc_complete_1* für die Fahrzeugklasse Kleinwagen BEV.

Versuch am 2020/01/24 um 09:21 Uhr

Startzeit = 09:21 Uhr
 Regler Gain = 1
 P Gain = 9

I Gain = 1.5
 I Saturation Up = 25
 I Saturation Low = -25

Gas Saturation Up = 100
 Gas Saturation Low = 0

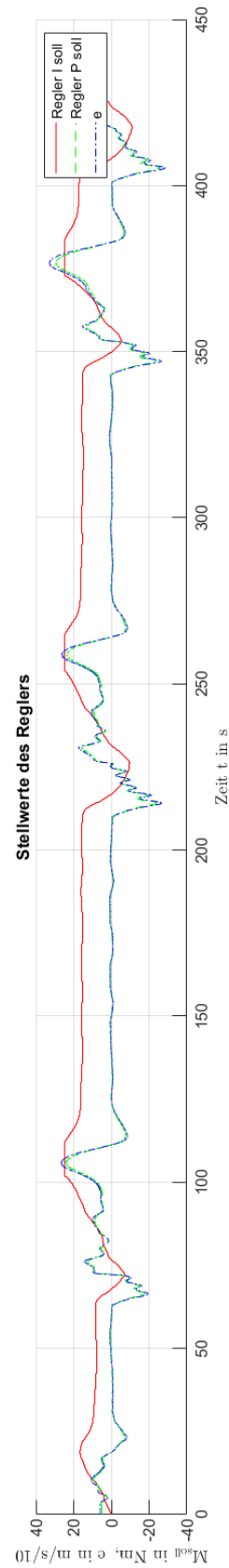
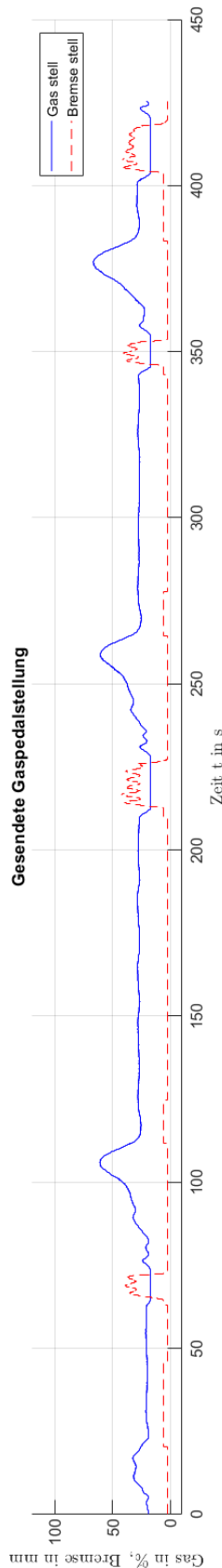
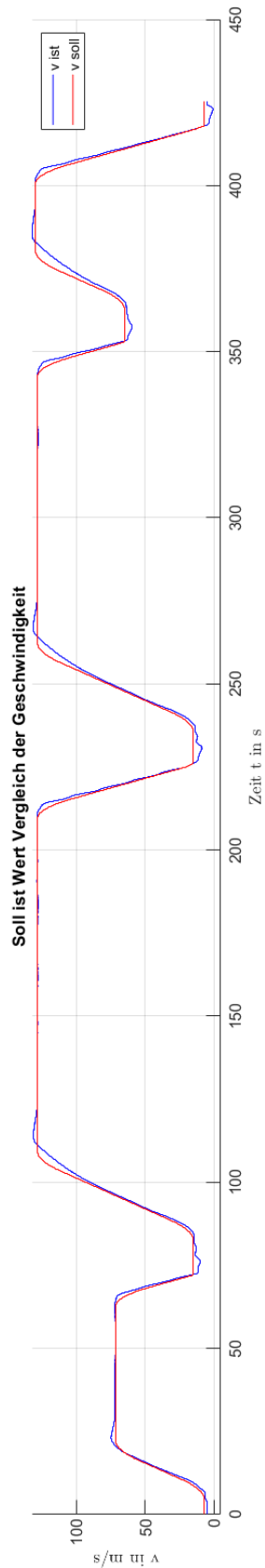


Abbildung D.5: *dc_extrem_z_1* für die Fahrzeugklasse *Kleinwagen BEV*.

Versuch am 2020/01/23 um 09:19 Uhr

Startzeit = 09:19 Uhr
 Regler Gain = 1
 P Gain = 9

I Gain = 1.5
 I Saturation Up = 25
 I Saturation Low = -25

Gas Saturation Up = 100
 Gas Saturation Low = 0

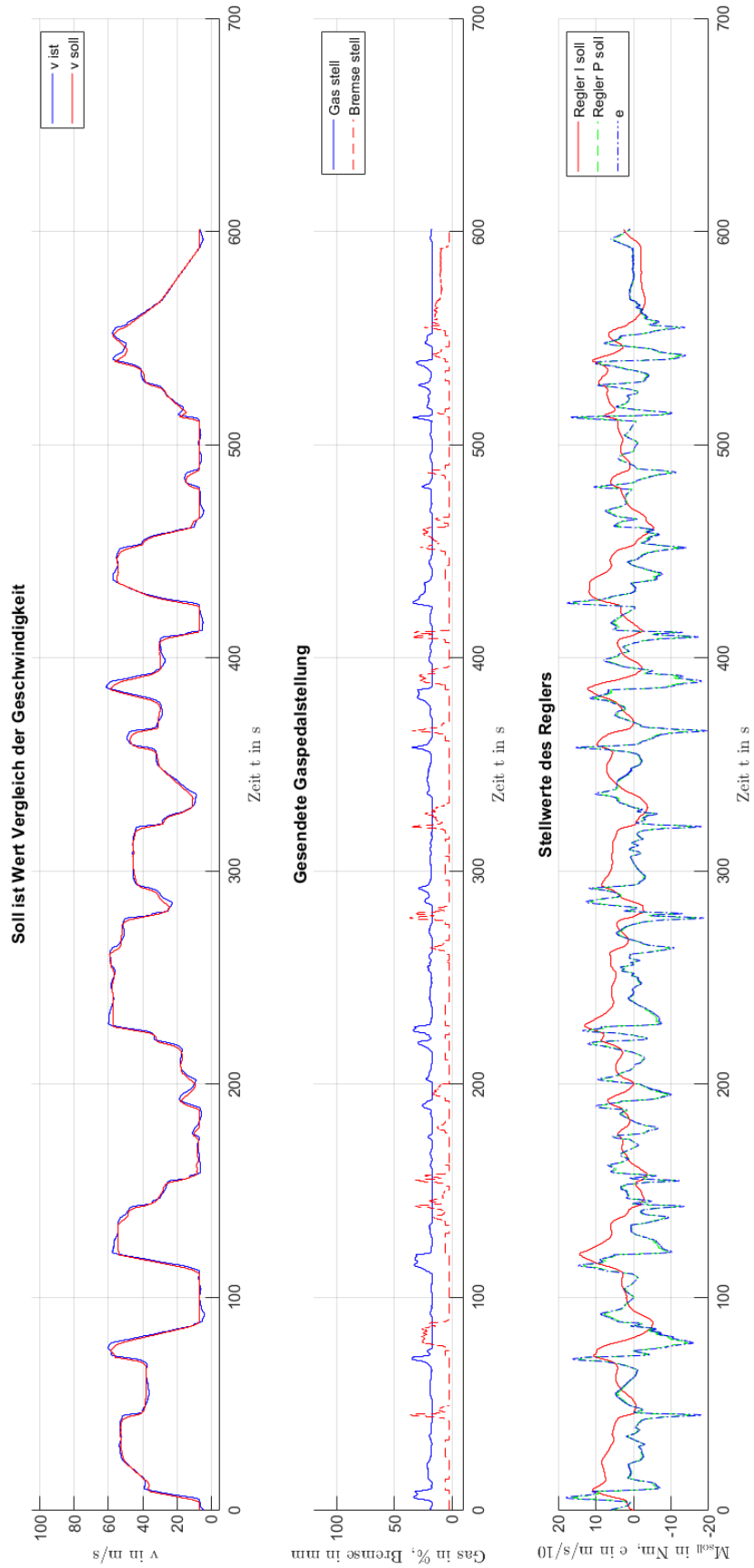


Abbildung D.6: $dc_stadt_z_2$ für die Fahrzeugklasse *Kompaktklasse BEV*.

Versuch am 2020/01/23 um 09:37 Uhr

Startzeit = 09:37 Uhr
 Regler Gain = 1
 P Gain = 9

I Gain = 1,5
 I Saturation Up = 25
 I Saturation Low = -25

Gas Saturation Up = 100
 Gas Saturation Low = 0

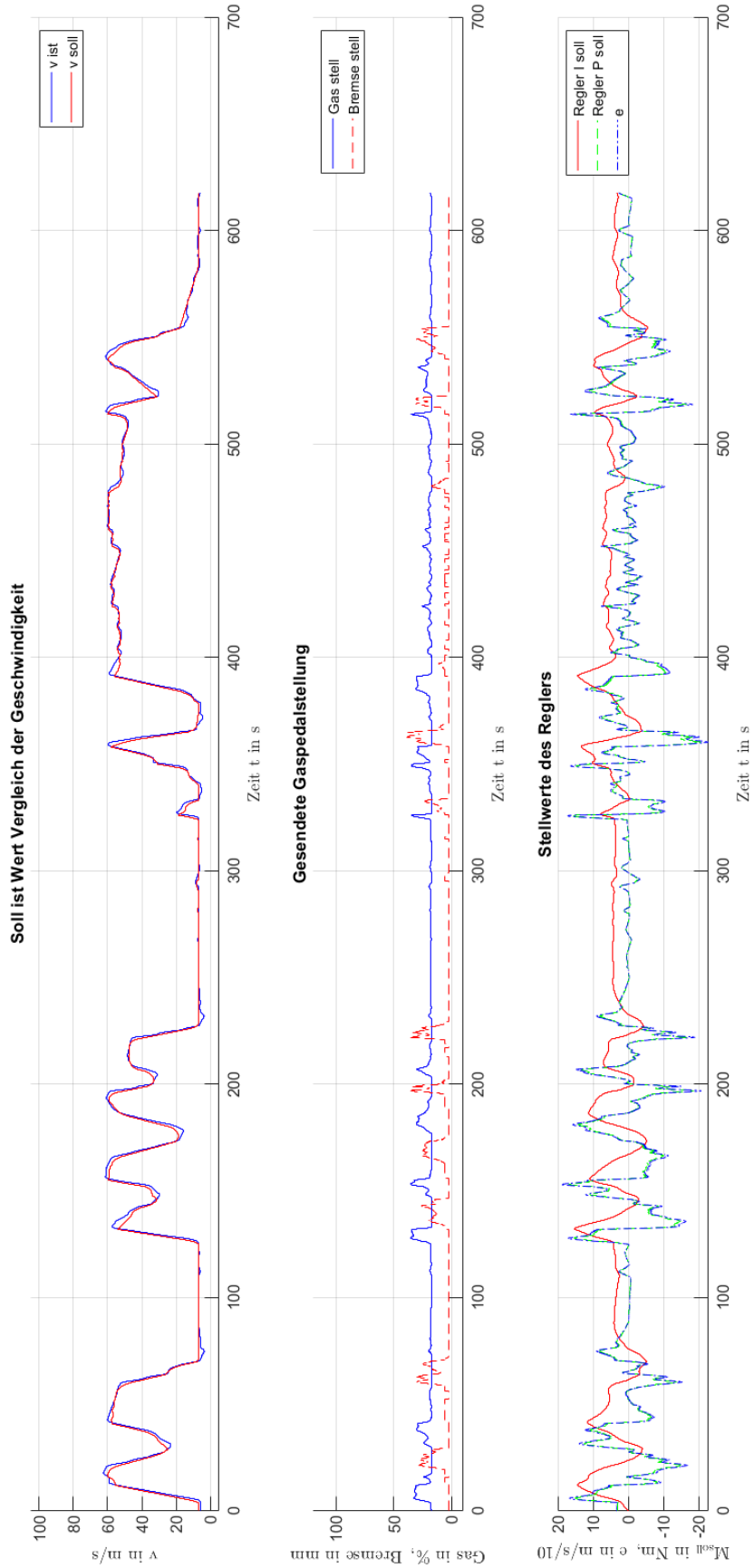


Abbildung D.7: $dc_stadt_z_3$ für die Fahrzeugklasse *Kompaktklasse BEV*.

Versuch am 2020/01/23 um 10:17 Uhr

Startzeit = 10:17 Uhr
 Regler Gain = 1
 P Gain = 9

I Gain = 1,5
 I Saturation Up = 25
 I Saturation Low = -25

Gas Saturation Up = 100
 Gas Saturation Low = 0

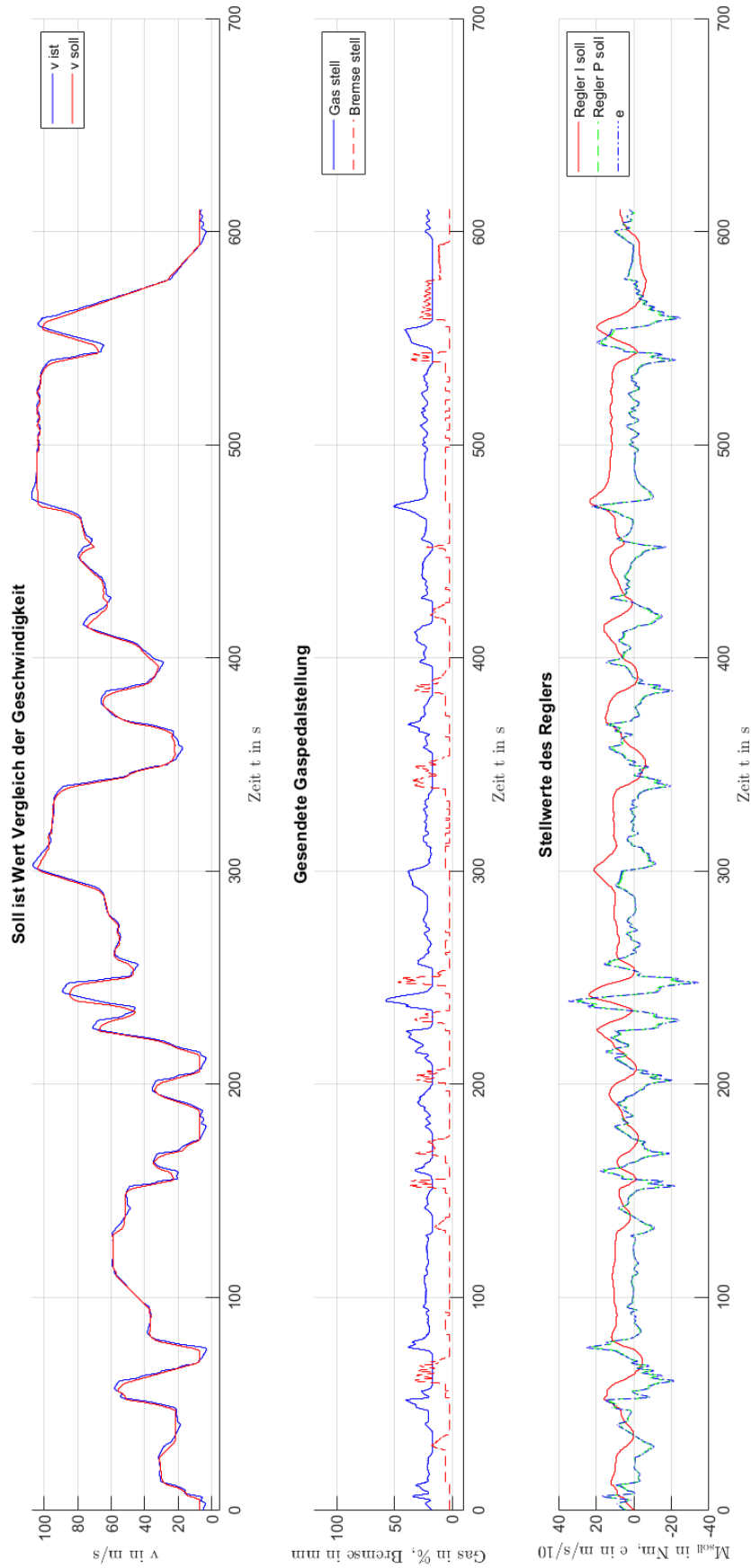


Abbildung D.8: *stadt_land_z_2* für die Fahrzeugklasse *Kompaktklasse BEV*.

Versuch am 2020/01/23 um 10:32 Uhr

Startzeit = 10:32 Uhr
 Regler Gain = 1
 P Gain = 9

I Gain = 1.5
 I Saturation Up = 25
 I Saturation Low = -25

Gas Saturation Up = 100
 Gas Saturation Low = 0

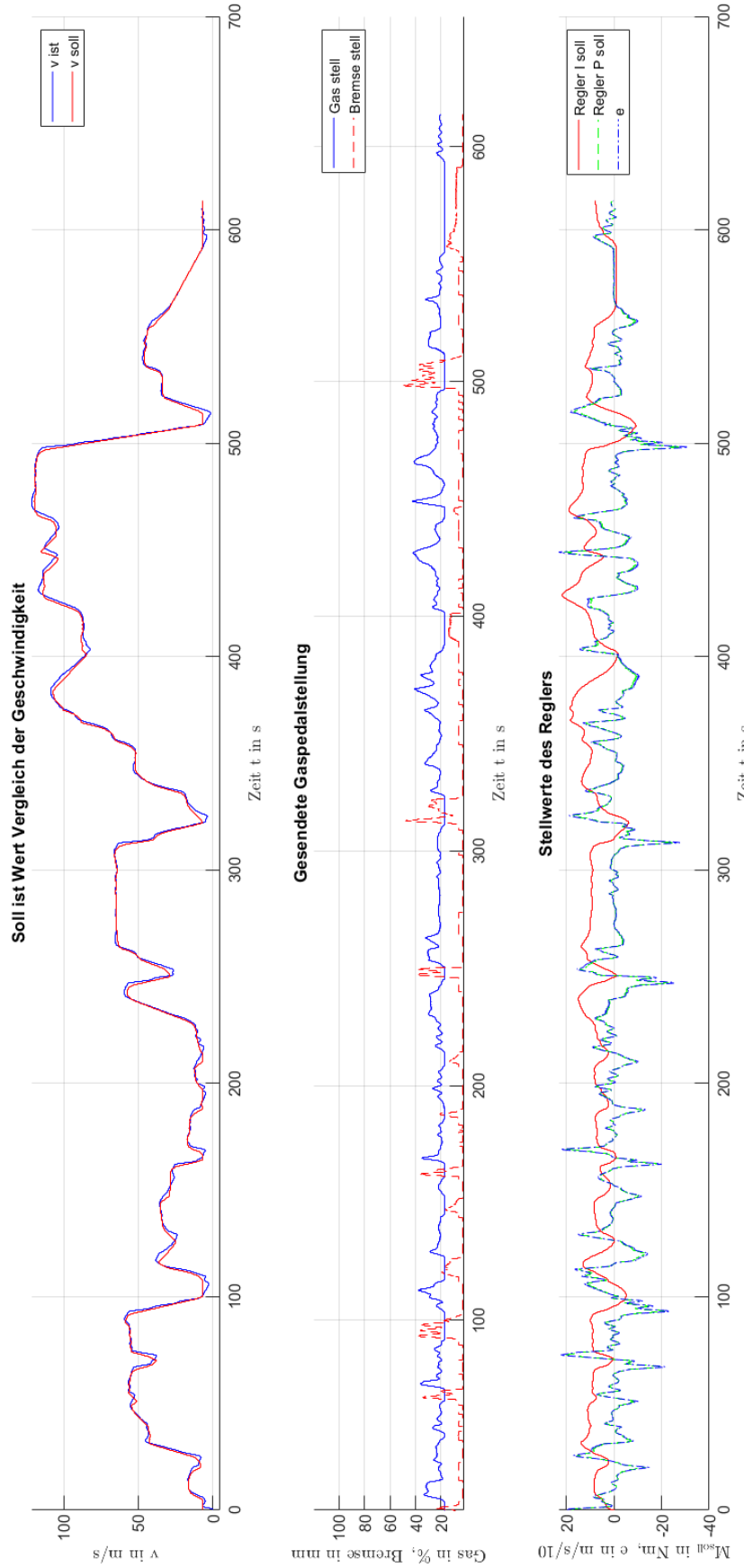


Abbildung D.9: *dc_autobahn_2* für die Fahrzeugklasse *Kompaktklasse BEV*.

Versuch am 2020/01/24 um 09:02 Uhr

Startzeit = 09:02 Uhr
 Regler Gain = 1
 P Gain = 9

I Gain = 1.5
 I Saturation Up = 25
 I Saturation Low = -25

Gas Saturation Up = 100
 Gas Saturation Low = 0

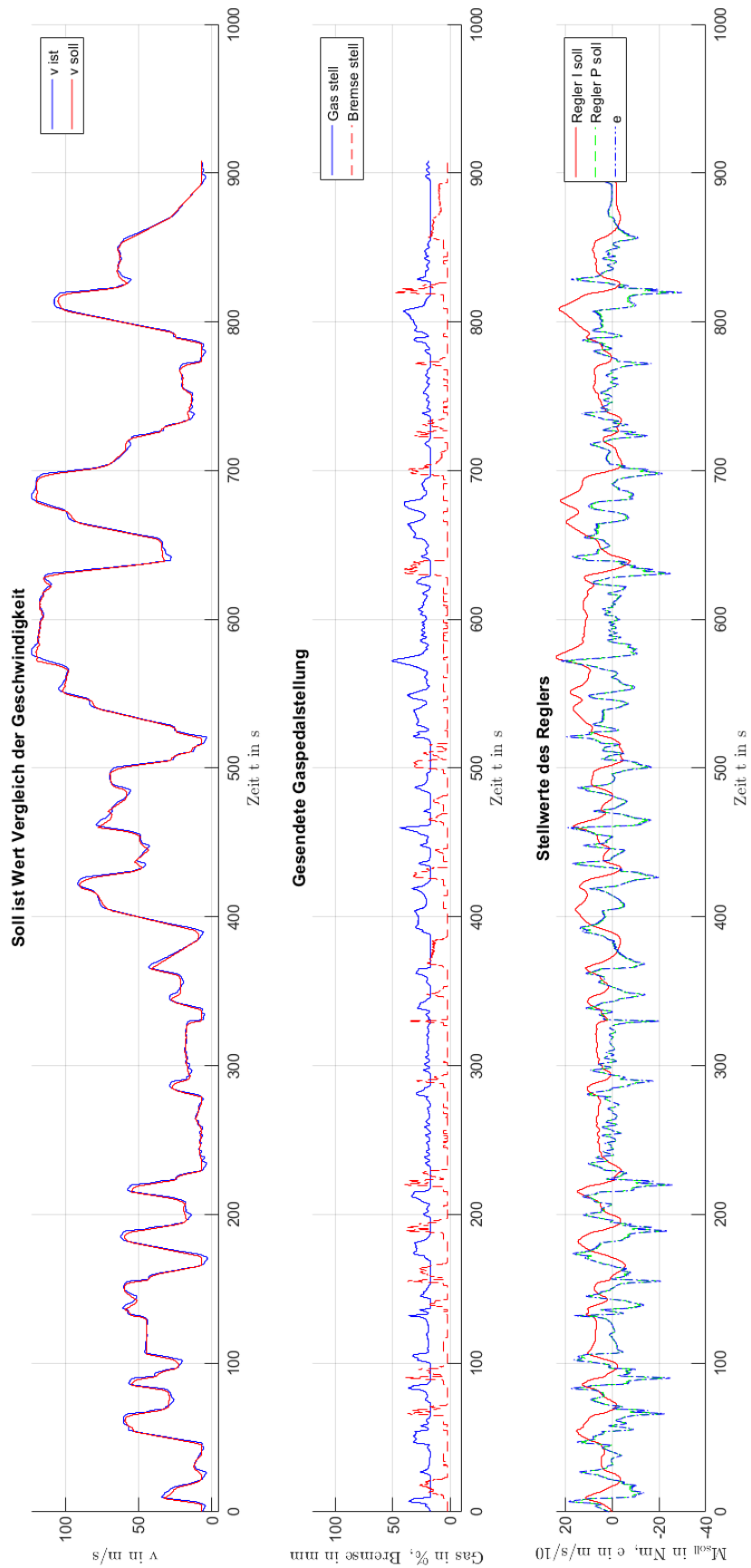
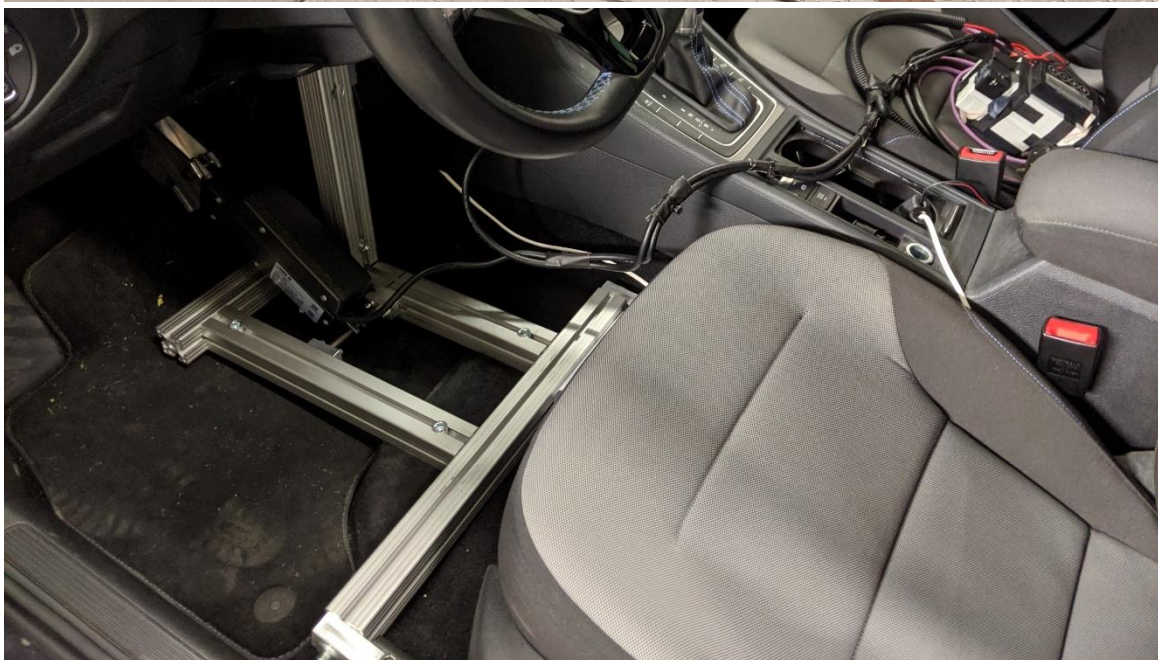


Abbildung D.10: *dc_complete_z_2* für die Fahrzeugklasse *Kompaktklasse BEV*.

Anhang D.11 zeigt den Zyklus *dc_extrem_z_2* für die Fahrzeugklasse *Kompaktklasse BEV*. Beschleunigungswerte bei hohen Geschwindigkeiten nicht umsetzbar, daher wurde der Zyklus nicht abgefahren.

Anhang D.12 zeigt den Aufbau des Versuchsfahrzeuges auf dem Rollenprüfstand sowie den Pedalroboter



Anhang E Mehrzieloptimierung

Tabelle E.1: Umgebungsparameter der Längsdynamiksimulation.

Formelzeichen	Parameter	Parameterwerte
ρ_{Luft}	Dichte der Luft	1,2 kg/m ³
f_R	Rollwiderstandsbeiwert	0,0161
α	Steigung der Fahrbahn	0°
g	Erdbeschleunigung	9,81 m/s ²
e_{Fzg}	Drehmassenzuschlagsfaktor	1
r_{dyn}	Dynamischer Reifenradius	0,28 m

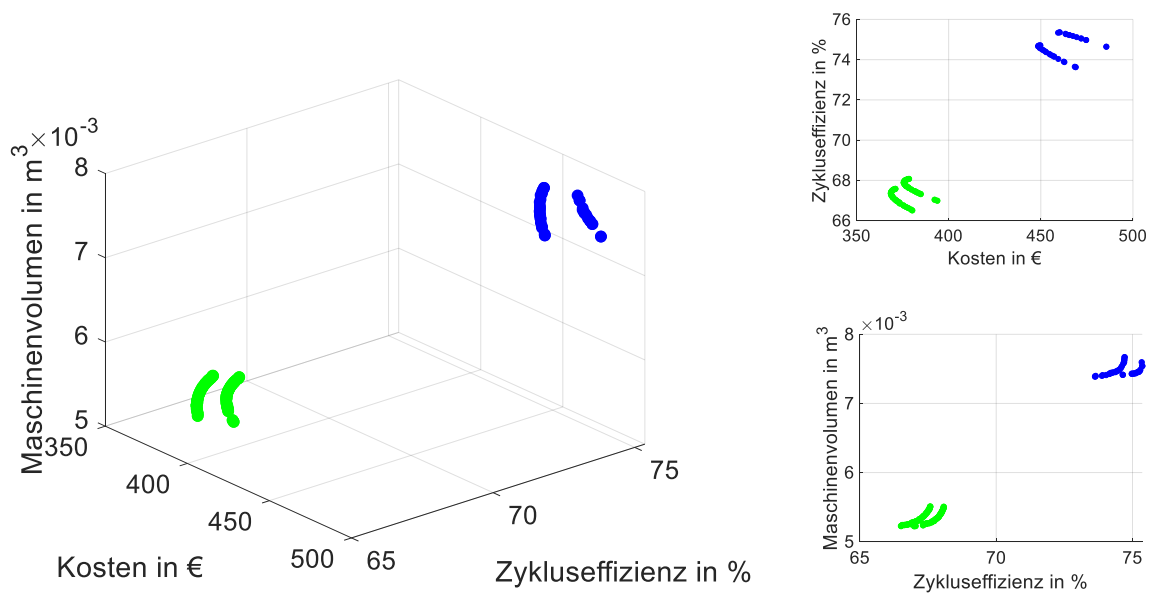


Abbildung E.2: Sensitivitätsanalyse des Japan 15 Mode (Grün) und USA FTP 75 (Blau).

In Abbildung E.3 ist der Vergleich zwischen dem WLTP (Blau) und dem Roboracezyklus (Hong-Kong) (Grün) für eine ASM (Käfigläufer), Wicklung A und Flüssigkeitskühlung aufgeführt.

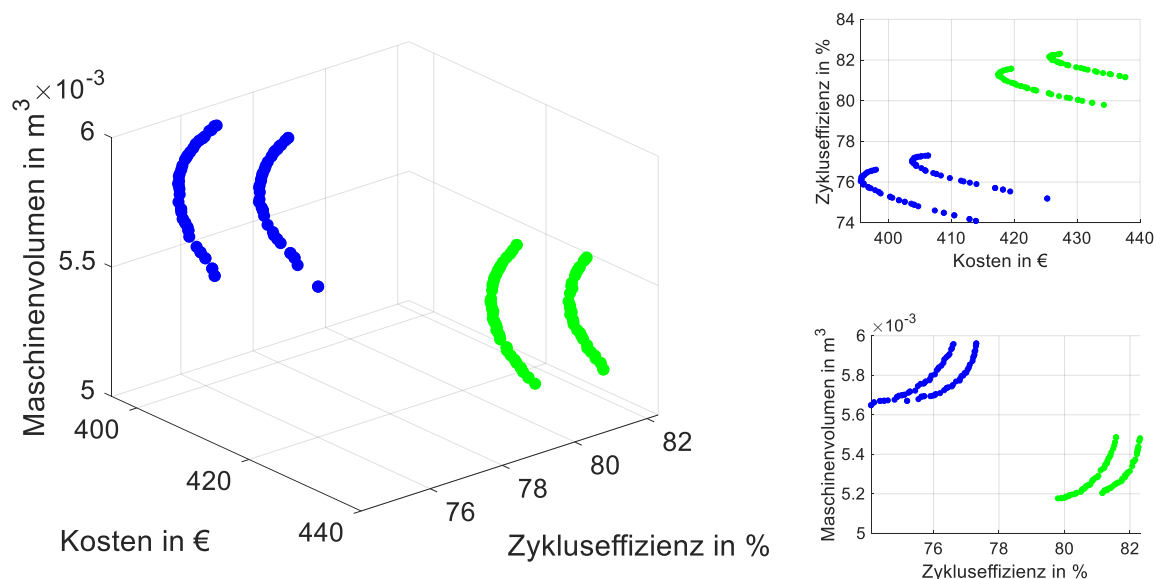


Abbildung E.3: Sensitivitätsanalyse Fahrzyklus – WLTP (Blau) und Roboracezyklus (Grün)

Dabei wurden als Freiheitsgrade für den Optimierungsalgorithmus für die Simulation des WLTP folgende Parameterbereiche gewählt: Nennleistung [80-200], Nenndrehzahl [1000-10000], Nennspannung [100-400], Polpaarzahl [4-6]. Bei den Freiheitsgraden des Optimierungsalgorithmus für den Roboracezyklus gelten folgende Parameterbereiche in der Simulation: Nennleistung [130-300], Nenndrehzahl [10000-18000], Nennspannung [300-800], Polpaarzahl [4-6].

Die Anzahl der Pareto-Fronten kommt von unterschiedlichen Polpaarzahlen. So werden die drei Pareto-Fronten des WLTPs durch die Polpaarzahlen $p = 4, 5, 6$ und die beiden des Roboracezyklus durch $p = 4, 5$ bestimmt. Die optimale Maschinenauslegung in Bezug auf die Kosten, Zykluseffizienz und das Maschinenvolumen ist für beide Zyklen unterschiedlich und wird in Tabelle E.3 aufgezeigt.

Tabelle E.3: Optimale Maschinenauslegung – WLTP und Roborace.

Fahrzyklus	Zykluseffizienz [%]	Kosten [€]	Maschinenvolumen [m ³]
WLTP	74 - 78	395 - 430	5,6 - 6
Roborace	80 - 83	415 - 440	5,2 - 5,5

Dabei ist zu erkennen, dass die optimale Maschinenauslegung für den WLTP zwar geringer Kosten aufweist, jedoch kann für die optimale Maschinenauslegung anhand des Roboracezyklus bei ähnlichem bis kleinerem Maschinenvolumen eine höhere Zykluseffizienz erreicht werden.

In Abbildung E.4 ist der Verbesserungsanteil in jedem Schritt der Evolution für eine beispielhafte Simulation aus Kapitel 4.3 aufgeführt, welche aufzeigt, dass der Algorithmus konvergiert.

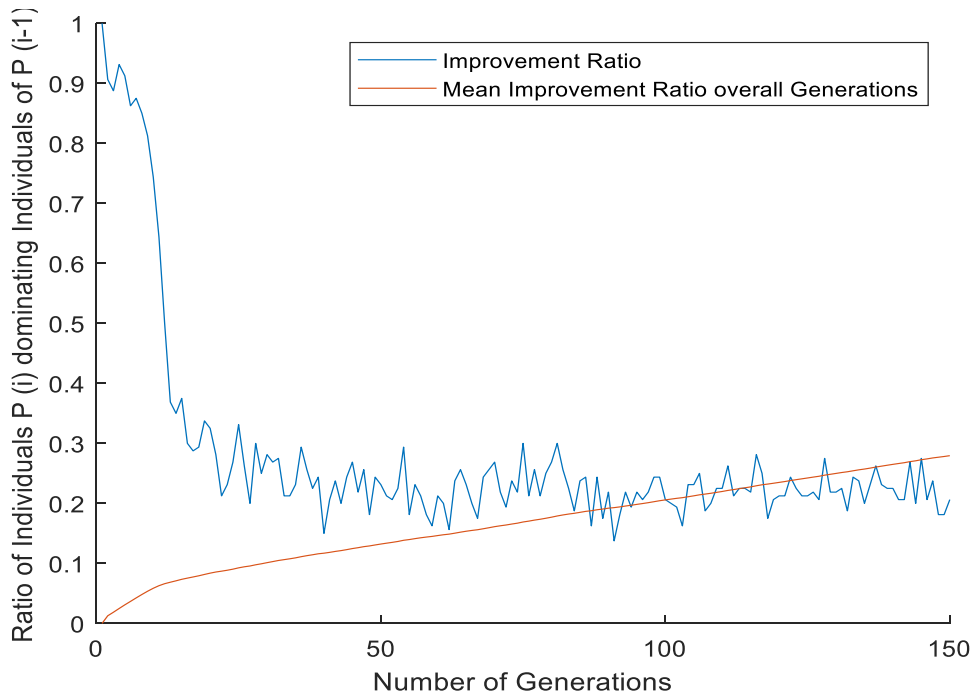


Abbildung E.4: Verbesserungsanteil in jedem Schritt der Evolution.

Anhang E.5 zeigt die Variation der Magnetanordnung

Variable Magnetanordnung

Wird die Magnetanordnung einer PSM dem Optimierungsalgorithmus variabel übergeben, erfolgt die Pareto-optimale Maschinenauslegung gemäß Abbildung E.5 im WLTP für eine PSM mit Flüssigkeitskühlung und Wicklung A aufgeführt.

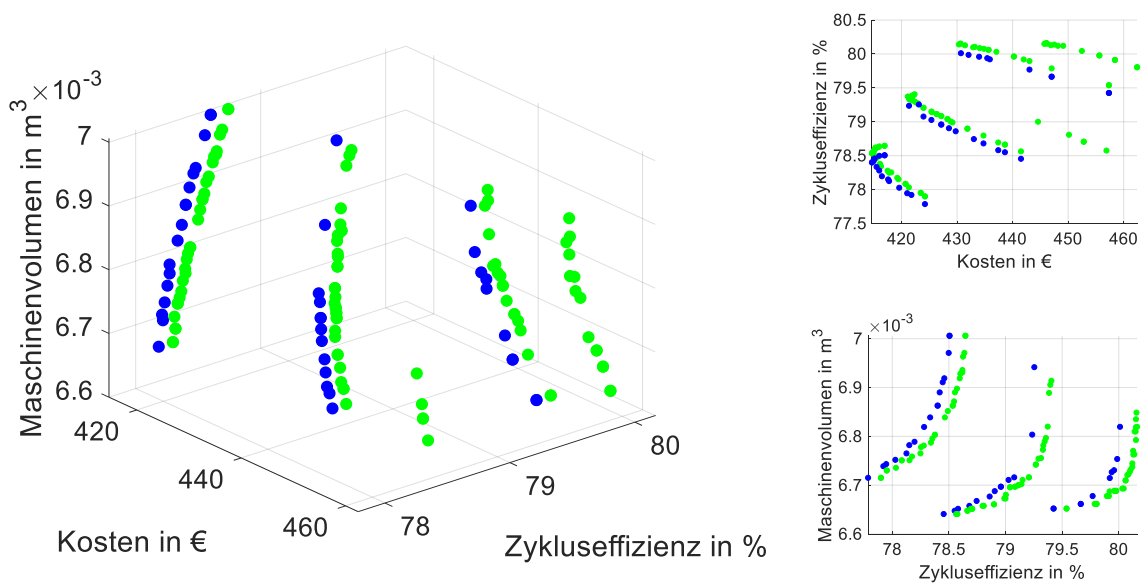


Abbildung E.5: Sensitivitätsanalyse Magnetanordnung – fest (Blau), variabel (Grün).

Die optimale Maschinenauslegung in Bezug auf die Kosten, Zykluseffizienz und das Maschinenvolumen ist in Tabelle E.5 aufgezeigt. Die Magnetanordnung variabel zu halten, birgt keine Veränderungen im Vergleich zu einer festgelegten Magnetanordnung. Die optimale Maschinenauslegung verhält sich in beiden Fällen ähnlich.

Tabelle E.5: Optimale Maschinenauslegung – Magnetanordnung fest, variabel.

Magnetanordnung	Zykluseffizienz [%]	Kosten [€]	Maschinenvolumen [$\times 10^{-3} \text{ m}^3$]
fest	77 - 80	410 - 460	6,6 - 7
variabel	77 - 80	410 - 470	6,6 - 7

Bei der Erstellung der Pareto-Fronten wurden als Freiheitsgrade für den Optimierungsalgorithmus für die Simulation der festen Magnetanordnung folgende Parameterbereiche gewählt: Nennleistung [70-200], Nenndrehzahl [1000-7000], Nennspannung [100-400], Polpaarzahl [4-6]. Bei den Freiheitsgraden des Optimierungsalgorithmus für die variable Magnetanordnung gelten folgende Parameterbereiche in der Simulation: Nennleistung [70-200], Nenndrehzahl [1000-7000], Nennspannung [100-400], Polpaarzahl [4-6].

Die Anzahl der Pareto-Fronten resultiert aus den unterschiedlichen Polpaarzahlen. So werden die Pareto-Fronten der festen Magnetanordnung sowie die der variablen Magnetanordnung durch $p = 4, 5, 6$ bestimmt.

Anhang E.6 zeigt die Variation der Kühlungsart

Variable Kühlungsart

Wird die Kühlungsart dem Optimierungsalgorithmus als Freiheitsgrad übergeben, erfolgt die Pareto-optimale Maschinenauslegung gemäß Abbildung E.6 im WLTP für eine PSM (tangential) mit Wicklung A.

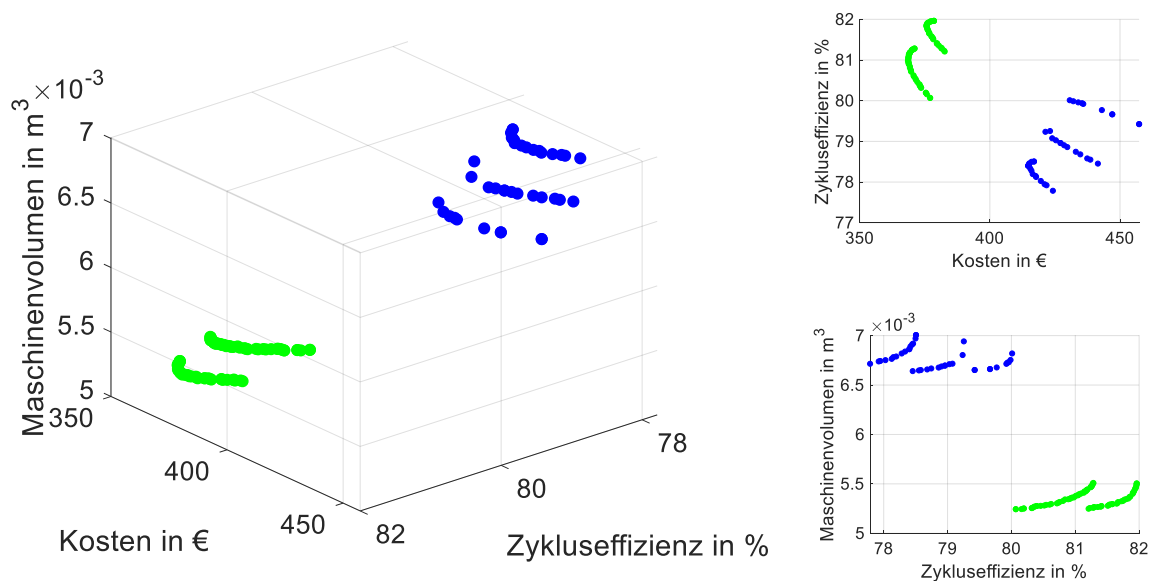


Abbildung E.6: Sensitivitätsanalyse Kühlungsart – fest (Blau), variabel (Grün).

Die optimale Maschinenauslegung in Bezug auf die Kosten, Zykluseffizienz und das Maschinenvolumen ist in Tabelle E.6 aufgezeigt. Durch die Wahl der Kühlungsart als Freiheitsgrad im

Optimierungsalgorithmus hat der Algorithmus die Möglichkeit, optimale Maschinenauslegungskombinationen mit höherer Zykluseffizienz, geringeren Kosten sowie einem geringeren Maschinenvolumen zu berechnen.

Tabelle E.6: Optimale Maschinenauslegung – Kühlungsart fest, variabel.

Kühlungsart	Zykluseffizienz [%]	Kosten [€]	Maschinenvolumen [$\times 10^{-3} \text{ m}^3$]
fest	77 - 80	410 - 460	6,6 - 7
variabel	80 - 82	368 - 384	5,2 – 5,5

Bei der Erstellung der Pareto-Fronten wurden als Freiheitsgrade für den Optimierungsalgorithmus für die Simulation der festen Kühlungsart folgende Parameterbereiche gewählt: Nennleistung [70-200], Nenndrehzahl [1000-7000], Nennspannung [100-400], Polpaarzahl [4-6]. Bei den Freiheitsgraden des Optimierungsalgorithmus für die variable Kühlungsart gelten folgende Parameterbereiche in der Simulation: Nennleistung [70-200], Nenndrehzahl [7000-10000], Nennspannung [300-800], Polpaarzahl [4-6].

Die Anzahl der Pareto-Fronten resultiert aus den unterschiedlichen Polpaarzahlen. So werden die Pareto-Fronten der festen Kühlungsart durch die Polpaarzahlen $p = 4, 5, 6$ und die der variablen Kühlungsart durch $p = 4, 5$ bestimmt.

Anhang E.7 zeigt die variable Getriebeübersetzung

Variable Getriebeübersetzung

In Abbildung E.7 ist der Vergleich zwischen den Ergebnissen einer Simulation mit fester Getriebeübersetzung des BMW i3 (Blau) und einer für den Optimierungsalgorithmus variabel übergebene Getriebeübersetzung (Grün) im WLTP für eine ASM mit Flüssigkeitskühlung und Wicklung A aufgeführt.

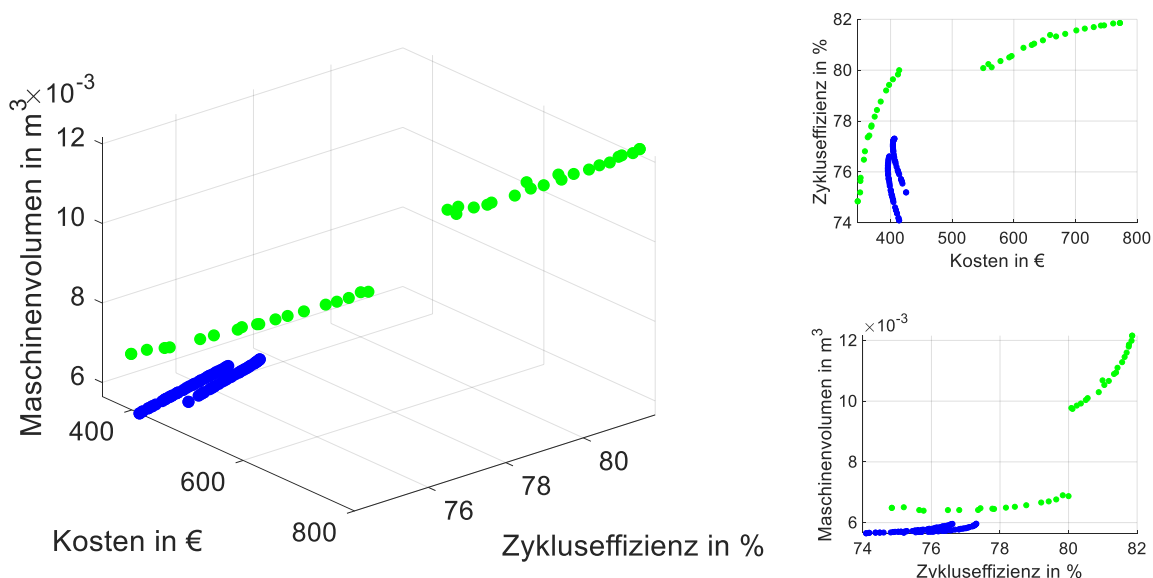


Abbildung E.7: Sensitivitätsanalyse Getriebeübersetzung – fest (Blau), variabel (Grün).

Die optimale Maschinenauslegung in Bezug auf die Kosten, Zykluseffizienz und das Maschinenvolumen ist in Tabelle E.7 aufgezeigt. Eine variable Getriebeübersetzung führt dazu, dass bei

einer ähnlichen Zykluseffizienz, ein deutlich größerer Bereich an Maschinenvolumen und somit Kosten einer Pareto-optimalen Maschinenauslegung entsteht.

Tabelle E.7: Optimale Maschinenauslegung – Getriebeübersetzung fest, variabel.

Getriebeübersetzung	Zykluseffizienz [%]	Kosten [€]	Maschinenvolumen [$\times 10^{-3} \text{ m}^3$]
fest	74 - 78	395 - 430	5,6 - 6
variabel	74 - 82	345 - 780	6,5 - 12,5

Die Anzahl der Pareto-Fronten resultiert aus den unterschiedlichen Polpaarzahlen. So werden die Pareto-Fronten der festen Getriebeübersetzung durch die Polpaarzahlen $p = 4, 5$ und die der variablen Getriebeübersetzung durch $p = 4, 5, 6$ bestimmt. Der Optimierungsalgorithmus wählt in dem angegebenen Wertebereich eher kleinere Getriebeübersetzungen zwischen 3 und 6.

Anhang E.8 zeigt die Sensitivitätsanalyse Magnetanordnung – Eingelassen (Blau), SMPSM (Grün)

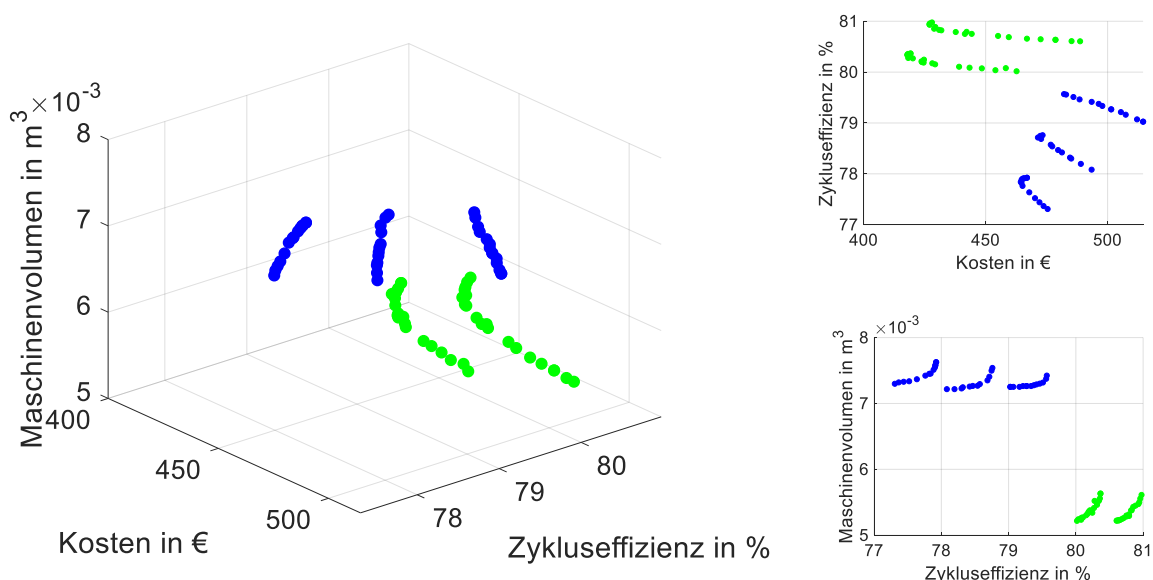


Abbildung E.8: Sensitivitätsanalyse Magnetanordnung – Eingelassen (Blau), SMPSM (Grün).

Die optimale Maschinenauslegung in Bezug auf die Kosten, Zykluseffizienz und das Maschinenvolumen ist in Tabelle E.8 aufgezeigt. Die eingelassene Magnetanordnung weist höhere Kosten auf, als die SMPSM, weil hier der Blechschnitt zur Einlassung angepasst werden muss und die SMPSM direkt auf die bestehende Konstruktion aufgeklebt werden kann. Allerdings weist sie im Vergleich zur SMPSM Anordnung eine niedrigere Zykluseffizienz und ein höheres Maschinenvolumen auf. Dies liegt vor allem an der Tatsache, dass durch die Oberflächenmagnete des Rotors die Ankerrückwirkung durch einen großen effektiven Luftspalt geringer ist und durch die daraus resultierende ausschließliche Belastung der Oberflächenmagnete, das Rotorjoch deutlich dünner gewählt werden kann [218]. Die Anordnung der Oberflächenmagnete sowie der eingelassenen Magnetanordnung ermöglichen im Vergleich zu den Anordnungen im Material zwar ein geringeres Trägheitsmoment, jedoch ist der nutzbare Überlastfaktor lediglich halb so groß [218].

Tabelle E.8: Optimale Maschinenauslegung – Magnetanordnung eingelassen, SMPSM.

Magnetanordnung	Zykluseffizienz [%]	Kosten [€]	Maschinenvolumen [$\times 10^{-3} \text{ m}^3$]
Eingelassen	80 - 81	460 - 500	5,2 - 5,7
SMPSM	77 - 80	410 - 480	7,2 - 7,7

Die Anzahl der Pareto-Fronten resultiert aus den unterschiedlichen Polpaarzahlen. So werden die Pareto-Fronten der eingelassenen Magnetanordnung durch die Polpaarzahlen $p = 4, 5, 6$ und die der SMPSM durch $p = 4, 5$ bestimmt.

Anhang E.10 zeigt die Sensitivitätsanalyse Fahrzyklus – Taxizyklus (Blau) und Roborace (Grün)

In der folgenden Abbildung E.10 ist der Vergleich des generierten Fahrzyklus‘ anhand realer Taxidaten sowie des Roboracezyklus‘ (Paris) aufgeführt (Kapitel 3.1.1). Auch hier wurden als festgelegte Parameter folgende gewählt: PSM (tangential), Flüssigkühlung, Wicklung A.

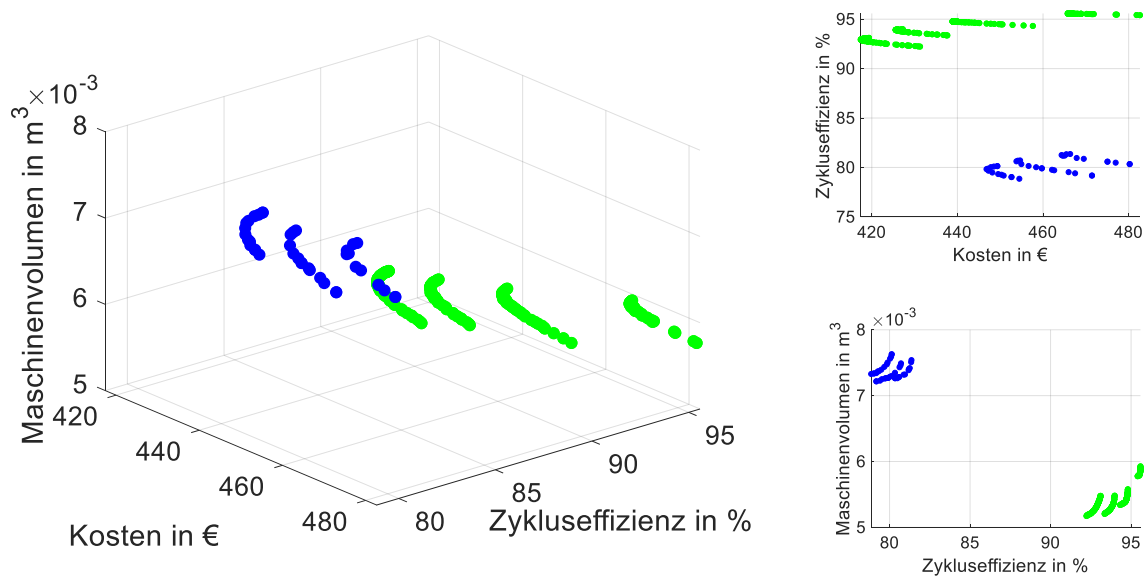


Abbildung E.10: Sensitivitätsanalyse Fahrzyklus – Taxizyklus (Blau) und Roborace (Grün).

Aufgrund der extremen Belastung im Rennzyklus ist ein deutlicher Unterschied zum generierten realen Taxizyklus zu erkennen. Die optimale Maschinenauslegung in Bezug auf die Kosten, Zykluseffizienz und das Maschinenvolumen ist in Tabelle E.8 aufgezeigt. Die optimale Maschinenauslegung weist bei der Roboracemaschine eine deutlich erhöhte Zykluseffizienz bei nahezu gleichbleibenden Kosten und einem reduzierten Maschinenvolumen auf.

Tabelle E.10: Optimale Maschinenauslegung – Taxi und Roborace.

Fahrzyklus	Zykluseffizienz [%]	Kosten [€]	Maschinenvolumen [$\times 10^{-3} \text{ m}^3$]
Taxi	79 - 82	445 - 480	7,2 – 7,7
Roborace	92 - 96	420 - 480	5 - 6

Bei den Freiheitsgraden des Optimierungsalgorithmus für den Roborace Zyklus gelten folgende Parameterbereiche in der Simulation: PSM (tangential), Flüssigkühlung, Wicklung A, Nennleistung [130-300], Nenndrehzahl [10000-18000], Nennspannung [300-800], Polpaarzahl [2-6].

Die Anzahl der Pareto-Fronten resultiert aus unterschiedlichen Polpaarzahlen. So werden die Pareto-Fronten des Taxi-Zyklus durch die Polpaarzahlen $p = 4, 5, 6$ und die beiden des Robo-racezyklus durch $p = 2, 3, 4, 5$ bestimmt.

Anhang E.11 zeigt die Sensitivitätsanalyse Wicklungsart

Wicklungsart

Wie bereits in Kapitel 3.2.2 vorgestellt, werden im Rahmen dieser Arbeit drei relevante Wicklungsarten (A, B, C) betrachtet:

- Wicklung A: Ganzlochwicklung, Einschicht, ungesehnt, gezont
- Wicklung B: Ganzlochwicklung, Zweischicht, gesehnt, gezont
- Wicklung C: Bruchlochwicklung, Zweischicht, gesehnt, gezont

Diese werden in Abbildung E.11 für eine PSM mit tangentialer Magnetanordnung und Flüssigkeitskühlung im WLTP dargestellt.

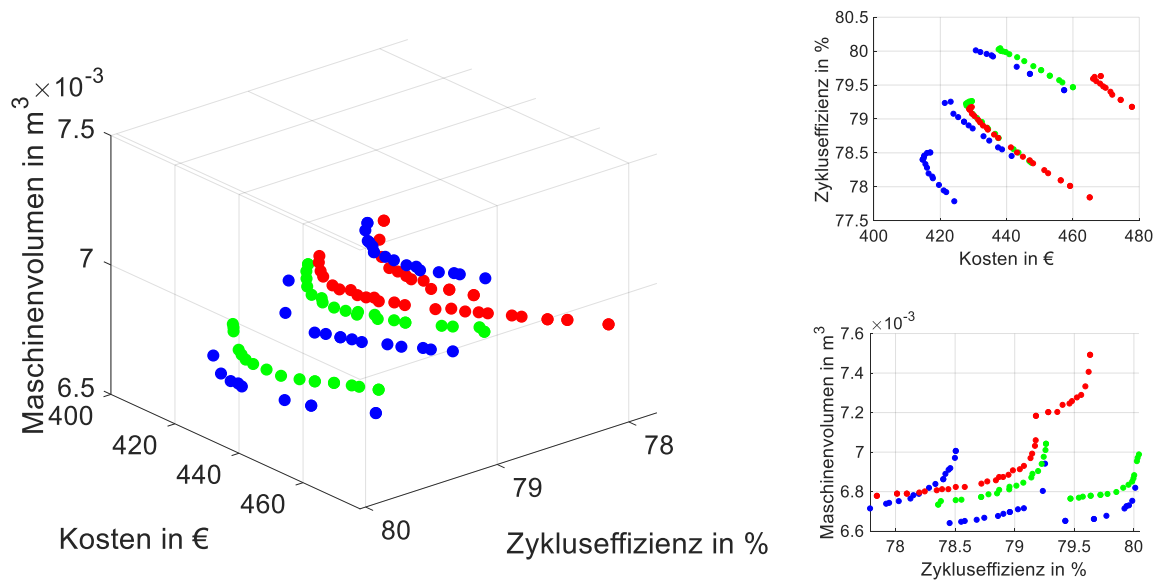


Abbildung E.11: Sensitivitätsanalyse Wicklungsart – A (Blau), B (Grün), C (Rot).

Die optimale Maschinenauslegung in Bezug auf die Kosten, Zykluseffizienz und das Maschinenvolumen ist in Tabelle E.11 aufgezeigt. Die optimale Maschinenauslegung weist bei Wicklung C ein leicht erhöhtes Maschinenvolumen auf, das aus der zweifach gesehnten Wicklung resultiert sowie der zweischichtigen Anordnung der Wicklungen. Wicklung A zeigt als Einschichtwicklung die geringste Zykluseffizienz sowie Maschinenvolumen, allerdings auch die geringsten Kosten auf. Der Einfluss einer einschichtigen Bruchlochwicklung im Vergleich zu einer zweischichtigen Bruchlochwicklung ist zwar gering, aber eine leichte Tendenz erkennbar. Somit kann eine leichte Erhöhung der Zykluseffizienz, Kosten sowie Maschinenvolumen durch die Einführung einer Zweischichtwicklung und einer Bruchlochwicklung im Vergleich zu einer einschichtigen Ganzlochwicklung vermerkt werden.

Tabelle E.11: Optimale Maschinenauslegung – Wicklung A, B, C.

Wicklung	Zykluseffizienz [%]	Kosten [€]	Maschinenvolumen [$\times 10^{-3}$ m ³]
Wicklung A	77 - 80	410 - 460	6,6 - 7
Wicklung B	78 - 80	420 - 470	6,7 - 7,1
Wicklung C	78 - 80	420 - 480	6,8 - 7,5

Die Anzahl der Pareto-Fronten entspringt auch hier unterschiedlichen Polpaarzahlen. So werden die Pareto-Fronten von Wicklung A durch die Polpaarzahlen $p = 4, 5, 6$, die von Wicklung B durch $p = 4, 5$ und die von Wicklung C durch $p = 4, 5$ bestimmt. Dabei wird wie auch in der Sensitivitätsanalyse der Fahrzyklen stets eine kleine Polpaarzahl angestrebt. Anhang E.12 zeigt die Sensitivitätsanalyse Variable n_{max} zu n_{nenn}

Variable n_{max} zu n_{nenn}

Wird das Verhältnis zwischen n_{max} zu n_{nenn} dem Optimierungsalgorithmus als Freiheitsgrad übergeben, erfolgt die Pareto-optimale Maschinenauslegung gemäß Abbildung E.12 im WLTP für eine PSM (tangential) mit Luftkühlung und Wicklung A. Dafür wurde ein variables n_{max} zwischen 12000-19000 1/min gewählt und ein Verhältnis $n_{max}/n_{nenn} = 2$.

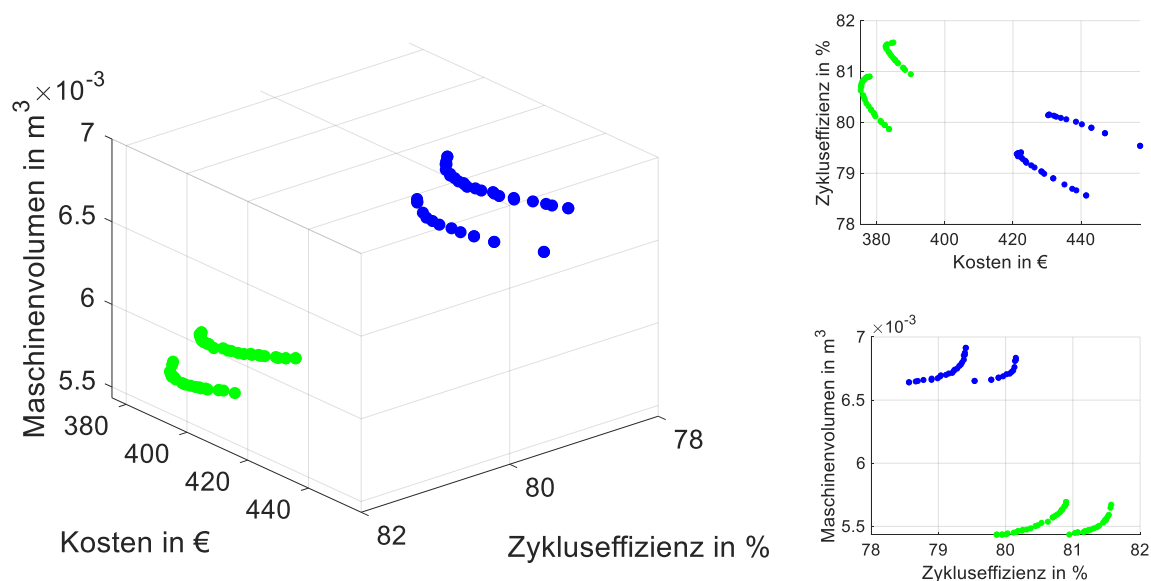


Abbildung E.12: Sensitivitätsanalyse Verhältnis n_{max} zu n_{nenn} – fest (Blau), variabel (Grün).

Die optimale Maschinenauslegung in Bezug auf die Kosten, Zykluseffizienz und das Maschinenvolumen ist in Tabelle E.12 aufgezeigt. Durch die Wahl des Verhältnisses n_{max} zu n_{nenn} als Freiheitsgrad im Optimierungsalgorithmus hat der Algorithmus die Möglichkeit, bei gleichbleibender Zykluseffizienz, die Kosten sowie das Maschinenvolumen zu reduzieren.

Tabelle E.12: Optimale Maschinenauslegung – Verhältnis n_{max} zu n_{nenn} fest, variabel.

Verhältnis n_{max} zu n_{nenn}	Zykluseffizienz [%]	Kosten [€]	Maschinenvolumen [$\times 10^{-3}$ m ³]
Fest (BMW i3)	78 - 81	420 - 460	6,6 - 6,9
variabel	80 - 82	374 - 390	5,4 - 5,7

Bei der Erstellung der Pareto-Fronten wurden als Freiheitsgrade für den Optimierungsalgorithmus für die Simulation eines variablen Verhältnis' n_{\max} zu n_{nenn} folgende Parameterbereiche in der Simulation gewählt: Nennleistung [70-200], Nenndrehzahl [12000-19000], Nennspannung [300-800], Polpaarzahl [4-6].

Die Anzahl der Pareto-Fronten resultiert aus den unterschiedlichen Polpaarzahlen. So werden die Pareto-Fronten des festen Verhältnis' n_{\max} zu n_{nenn} sowie die des variablen Verhältnis' n_{\max} zu n_{nenn} durch $p = 4, 5$ bestimmt. Wird das Verhältnis zwischen n_{nenn} und n_{Max} variabel gewählt, wurde vom Optimierungsalgorithmus stets die maximal mögliche Nenndrehzahl im Wertebereich gewählt.

Anhang E.13 zeigt die Variation der Kühlungsart

Für den Vergleich der verschiedenen elektrischen Maschinen, können folgende Einflussfaktoren für den Einsatz und die Auslegung einer spezifischen Applikation festgehalten werden:

- Bauvolumen: In Bezug auf die Baugröße weist die permanenterregte Synchronmaschine ein um 15 % kleineres Volumen als die ASM auf. Die FSM ergibt geringe Unterschiede [219].
- Wirkungsgrad: Der Wirkungsgrad einer Synchronmaschine ist höher als der einer ASM. Allerdings ist bei der PSM eine weitere Eingrenzung notwendig. Im oberen Drehzahlbereich ist der Wirkungsgrad hierbei geringer [219].
- Kosten: In Bezug auf die Herstellungskosten stellt die Beschaffung der seltenen Erden für die Magnetproduktion der PSM eine Herausforderung dar, weil sie aus wenigen Ländern bezogen werden können und somit einen hohen monetären Aufwand darstellen im Vergleich zur ASM und FSM [220], [221] sind ca. 20 % höher bei PSM [77]. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass ein höherer Wirkungsgrad die Batteriekapazität senken kann und somit wiederum deutliche Kosteneinsparungen im Gesamtsystem ermöglicht [77], [31].
- Anwendungsfall: Die ASM und GRM eignen sich besonders für hohe Drehzahlbereiche (längere Überland- oder Autobahnfahrten), die PSM zeichnet sich durch ihre hohen Wirkungsgrade für niedrigere Drehzahlen und höhere Drehmomente aus (urbaner Verkehr) [77].

Anhang E.14 zeigt die Analyse nach der Zielgröße Zykluseffizienz des Tesla Model 3

Für die mit der höchsten Zykluseffizienz ausgewählte (in Abbildung 4.19 mit X markierte) Maschinenauslegung wird vom Optimierungsalgorithmus im jeweiligen Zyklus folgende Parameterkombination gewählt:

$$\vec{x}_{WLTP} = \begin{bmatrix} \text{Maschinentyp} \\ \text{Polpaarzahl} \\ \text{Nennspannung} \\ \text{Nennleistung} \\ \text{Nenndrehzahl} \\ \text{Wicklungstyp} \\ \text{Magnetanordnung} \\ \text{Kühlungsart} \end{bmatrix} = \left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} \text{PSM} \\ 4 \\ 340 \\ 74 \\ 10000 \\ A \\ \text{tangential} \\ \text{Flüssig} \end{bmatrix}, \text{ WLTP} \\ \\ \begin{bmatrix} \text{PSM} \\ 4 \\ 335 \\ 130 \\ 15000 \\ A \\ \text{eingelassen} \\ \text{Flüssig} \end{bmatrix}, \text{ Stadtzyklus} \\ \\ \begin{bmatrix} \text{PSM} \\ 4 \\ 300 \\ 146 \\ 14970 \\ B \\ \text{eingelassen} \\ \text{Flüssig} \end{bmatrix}, \text{ Landzyklus} \end{array} \right.$$

$$\vec{y}_{WLTP} = \begin{bmatrix} \text{Kosten} \\ -\text{Zykluseffizienz} \\ \text{Abmessungen} \end{bmatrix} = \left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} 391,98 \\ -83,97 \\ 5,665 \end{bmatrix}, \text{ WLTP} \\ \\ \begin{bmatrix} 490,2 \\ -81,52 \\ 6,342 \end{bmatrix}, \text{ Stadtzyklus} \\ \\ \begin{bmatrix} 560,3 \\ -80,63 \\ 7,495 \end{bmatrix}, \text{ Landzyklus} \end{array} \right. \quad (6.1)$$

Für alle drei Zyklen wird eine PSM mit einer Polpaarzahl $p = 4$, einer Spannungsebene von ca. $U_{Nenn} = 300 \text{ V}$ und einer Flüssigkeitskühlung vom Optimierungsalgorithmus gewählt. Der WLTP weist die kleinste notwendige Leistung sowie Nenndrehzahl auf. Im generierten Stadt- und Landzyklus werden eingelassene Magnete gewählt, weil diese trotz der hohen Drehzahlen zu geringeren Kosten führen. Dafür und zur Erreichung der hohen Leistungsklasse wird für den Landzyklus eine zweischichtige Wicklung im Stator (Wicklung B) gewählt.

Anhang F Maschinenauslegungstool

Tabelle F.1: Richtwerte für Induktivitäten [13], [36] und [32].

Parameter	Formelzeichen	Einheit	Gültigkeitsbereich
Relative Ankerlänge	λ	-	0,6 – 1,0 für $p=1$ 1,0 - 4,0 für $p>1$
Kanalbreite der Ventilationskanäle	l_v	m	0,006 – 0,01
Mittelwert der Luftspaltinduktion	B_m	T	0,4 -0,65
Strombelag	A	A/mm	20,0 – 120,0
Stromdichte Stator	S_1	A/mm ²	3,0 – 7,0
Max. Statorrückeninduktion	$B_{1,r,max}$	T	1,3 – 1,65
Max. Statorzahninduktion	$B_{1,z,max}$	T	1,4 – 2,1
Statornutfüllfaktor	$\varphi_{1,n}$	-	0,3 – 0,5 für Runddraht
Wicklungsfaktor Grundwelle	$\xi_{1,(1)}$	-	0,92 – 0,96
Min. Statornutteilung	$\tau_{1,n,min}$	m	0,007 – 0,07
Eisenfüllfaktor Stator	$\varphi_{1,Fe}$	-	0,9 – 1,0
Stabstromdichte Rotor	$S_{2,s}$	A/mm ²	3,0 – 8,0 für Kupfer 3,0 – 6,5 für Aluminiumguss 3,0 – 6,5 für Aluminiumdraht
Ringstromdichte Rotor	$S_{2,r}$	A/mm ²	3,0 – 8,0 für Kupfer 3,0 – 6,5 für Aluminiumguss 3,0 – 6,5 für Aluminiumdraht
Max. Rotorrückeninduktion	$B_{2,z,max}$	T	0,4 – 1,6
Max. Rotorzahninduktion	$B_{r2,r,max}$	T	1,5 – 2,2
Min. Rotornutteilung	$\tau_{2,n,min}$	m	0,007 – 0,07
Eisenfüllfaktor Rotor	$\varphi_{2,Fe}$	-	0,9 – 1,0

GUI_Entwurf
Entwurf PMSM
 ID: Entwurf_PMSM_20200323_095139

Eingabe

Bemessungswerte

Nennleistung in kW	75
Nenndrehzahl in 1/min	4800
Nennspannung in V	360
Polpaarzahl Nennfrequenz in Hz	6 480
Leistungsfaktor (Default 1)	0.95
Strangzahl	3

Richtwerte - WARNING - Experts only Reset to Default

Relative Ankerlänge	2.5
Kanalbreite der Ventilationskanäle in m	0.01
Amplitude der Luftspaltinduktion in T	0.85

Stator

Stromdichte (Stator) in A/mm ²	7
max. Rueckeninduktion (Stator) in T	1.4
max. Zahninduktion (Stator) in T	1.8
Nutffuellfaktor (Stator)	0.5
Wicklungsfaktor Grundwelle (Stator)	0.96
min. Nutteilung (Stator) in m	0.007
Eisenffuellfaktor (Stator)	0.95

Rotor

Stab- bzw. Ringstromdichte (Rotor) in A/mm ²	0 0
max. Rueckeninduktion (Rotor) in T	1.4
max. Zahninduktion (Rotor) in T	0
Nutffuellfaktor (Rotor)	0
Wicklungsfaktor Grundwelle (Rotor)	0
min. Nutteilung (Rotor) in m	0
Eisenffuellfaktor (Rotor)	0.95

Optionen Maschine

Maschinenausführung: IPMSM (tangential)

Wicklung

Schaltung	Stern
Spulenform Stator	Runddraht
Spulenform Rotor	-
Nutform Stator	Trapezform (eckig)
Nutform Rotor	-

Kuehlung

Kuehlungsart: Wasser (direkt)

Stator Eisenmaterial

Material: VACOFLUX 50

Stator Leitermaterial

Material: Kupfer

Temperatur in °C: 90

Rotor Eisenmaterial

Material: VACOFLUX 50

Rotor Magnetmaterial

Material: VACODYM 238 TP

Remanenzinduktion in T: 1.37

Optionen Berechnung

Modus Wicklungsauslegung: Klassisch

Wicklungstyp: A

Buttons: BMW i3, Model 3, VW eGolf, Nissan Leaf, Entwurf starten, Weiter zu den Ergebnissen >>

Abbildung F.2: Benutzeroberfläche für den Entwurf des Maschinenauslegungstools.

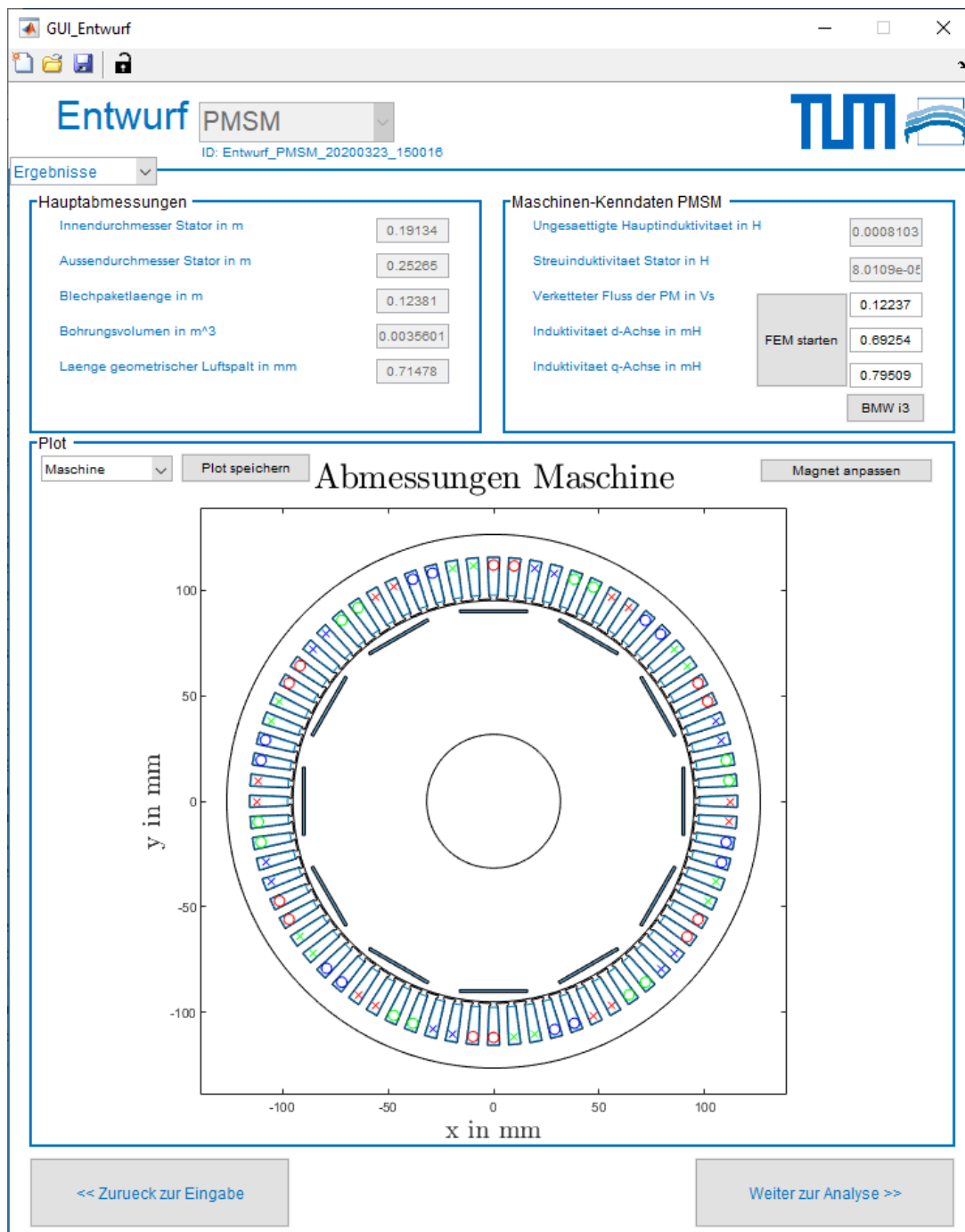


Abbildung F.3: Benutzeroberfläche Entwurf Induktivitäten und Abmessungen.

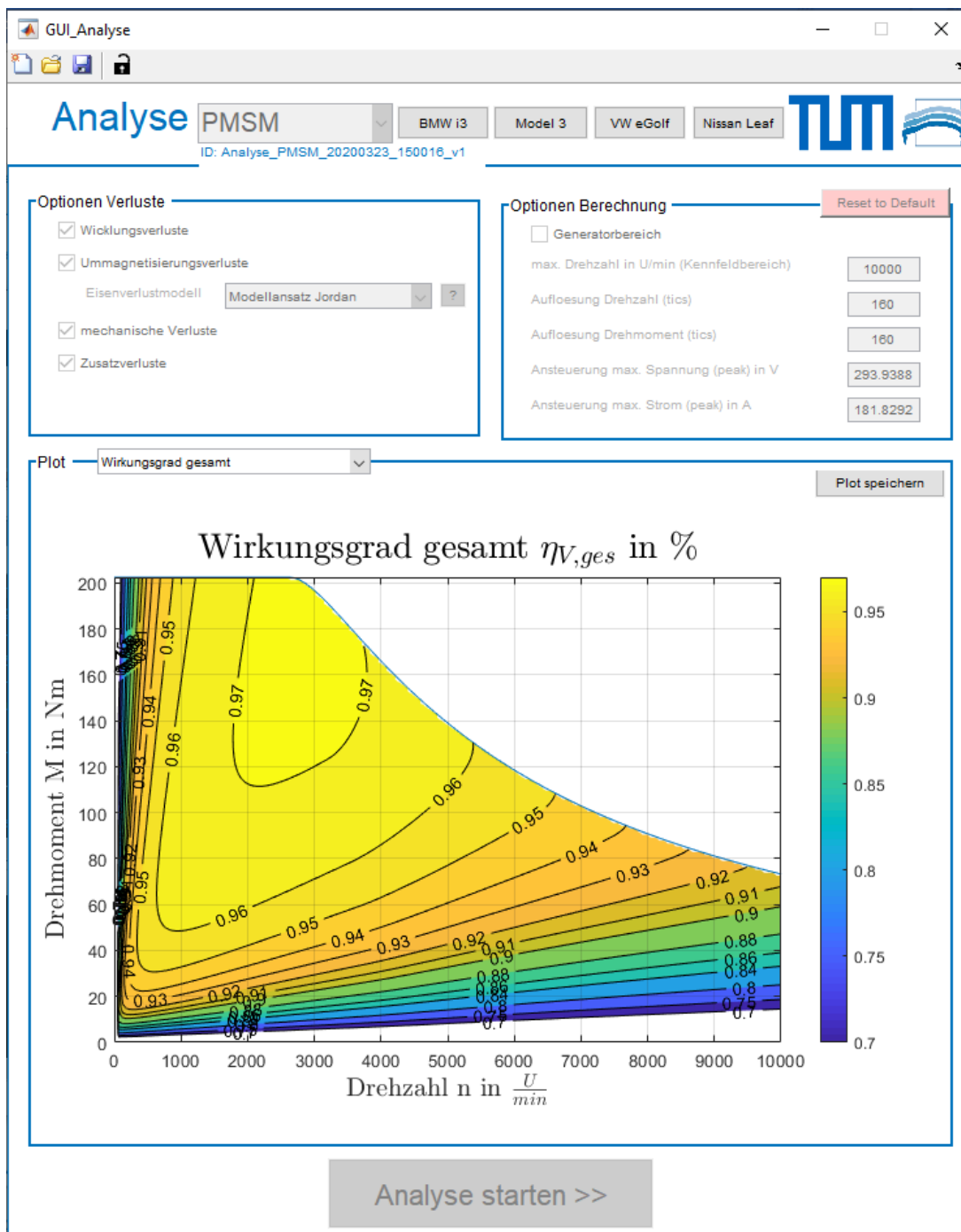


Abbildung F.4: Benutzeroberfläche für die Analyse des Maschinenauslegungstools.

Tabelle F.5: Optionen des Entwurfsvorgangs.

Parameter	Formelzeichen	Einheit	Wahlmöglichkeit
Maschinenausführung	-	-	Käfigläufer
Schaltung der Wicklung	-	-	Stern, Dreieck
Spulenform Stator	-	-	Runddraht
Spulenform Rotor	-	-	Runddraht
Nutform Stator	-	-	Trapezform (eckig)
Nutform Rotor	-	-	Trapezform (eckig)
Kühlungsart	-	-	Oberflächenkühlung, Innen-/ Kreislaufkühlung
Eisenmaterial Stator	-	-	VACOFLUX48, VACOFLUX50
Leitermaterial Stator	-	-	Kupfer, Aluminiumdraht, Aluminiumguss
Leitertemperatur Stator	ϑ_1	°C	-
Eisenmaterial Rotor	-	-	VACOFLUX48, VACOFLUX50
Leitermaterial Rotor	-	-	Kupfer, Aluminiumdraht, Aluminiumguss
Leitertemperatur Rotor	ϑ_2	°C	-
Modus Wicklungsauslegung	-	-	Klassisch, Optimierung, Manuell

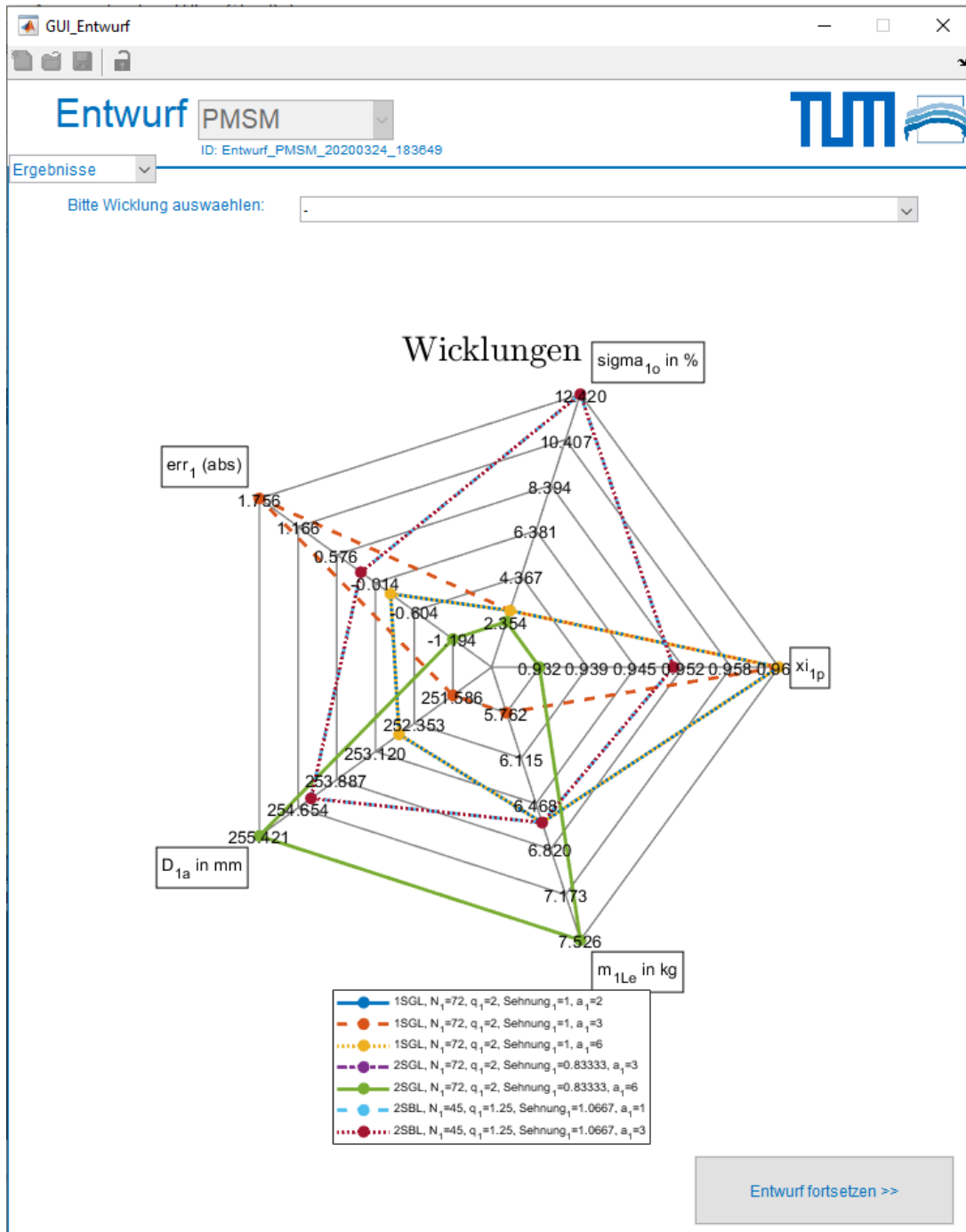


Abbildung F.6: Option Optimierung – Vergleich von Wicklungen anhand bestimmter Kriterien.

Tabelle F.8: Outputparameter des Maschinenauslegungstools – Code/Auszug aus MEAPA.

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
P_N	Nennleistung	kW
n_N	Nenndrehzahl	U/min
U_N	Nennspannung	V
p	Polpaarzahl	-
f_N	Nennfrequenz	Hz
cos_phi_N	Nennleistungsfaktor	-
m	Strangzahl	-
M_N	Nenndrehmoment	Nm
lambda	Relative Ankerlänge	-
l_v	Kanalbreite der Ventilationskanäle	m
B_m	Mittelwert der Luftspaltinduktion	T
B_p	Hauptwellenamplitude der Luftspaltinduktion	T
A	Strombelag	A/mm
S_1	Stromdichte (Stator)	A/mm ²
B_1r_max	max. Rückeninduktion (Stator)	T
B_1z_max	max. Zahninduktion (Stator)	T
phi_1n	Nutfüllfaktor (Stator)	-
xi_1p	Wicklungsfaktor Grundwelle (Stator)	-
tau_1n_min	min. Nutteilung (Stator)	m
phi_1Fe	Eisenfüllfaktor (Stator)	-
S_2	Stromdichte (Rotor)	A/mm ²
S_2s	Stabstromdichte (Rotor)	A/mm ²
S_2r	Ringstromdichte (Rotor)	A/mm ²
B_2r_max	max. Rückeninduktion (Rotor)	T
B_2z_max	max. Zahninduktion (Rotor)	T
phi_2n	Nutfüllfaktor (Rotor)	-
xi_2p	Wicklungsfaktor Grundwelle (Rotor)	-
tau_2n_min	min. Nutteilung (Rotor)	m
phi_2Fe	Eisenfüllfaktor (Rotor)	-
Maschinentyp	Maschinentyp	-
Maschinenausführung	Maschinenausführung	-
Schaltung	Schaltung	-
Spulenform_Stator	Spulenform Stator	-
Spulenform_Rotor	Spulenform Rotor	-
Nutform_Stator	Nutform Stator	-
Nutform_Rotor	Nutform Rotor	-
Kuehlungsart	Kuehlungsart	-
Stator_Eisenmaterial	Eisenmaterial Stator	-
Stator_Leitermaterial	Leitermaterial Stator	-
theta_1	Temperatur Leitermaterial Stator	°C
Rotor_Eisenmaterial	Eisenmaterial Rotor	-
Rotor_Leitermaterial	Leitermaterial Rotor	-

theta_2	Temperatur Leitermaterial Rotor	°C
Rotor_Magnetmaterial	Magnetmaterial Rotor	-
B_r_PM	Remanenzinduktion PM	T
Mode_Wicklung	Modus Wicklungsauslegung	-
Wicklungstyp	Wicklungstyp	-
U_1Str	Strangspannung (Stator)	V
E_h	Induzierte Spannung	V
eta_N	Nennwirkungsgrad	-
P_el_N	Elektrische Nennleistung	W
P_s	Nennscheinleistung	VA
I_1Str	Strangstrom (Stator)	A
I_N	Nennstrom	A
P_si	Innere Nennscheinleistung	VA
C_mech	Ausnutzungsfaktor ASM	kWmin/m ³
k_red	Reduktionsfaktor Ausnutzungsfaktor	-
C_mech_red	Reduzierter Ausnutzungsfaktor	kWmin/m ³
C	Ausnutzungsfaktor allgemein	kVAmin/m ³
C_s	Ausnutzungsfaktor SM	kVAmin/m ³
V_Bohrung	Bohrungsvolumen	m ³
D_1i	Bohrungsdurchmesser (Stator)	m
delta	Geometrische Luftspaltlänge	mm
D_2a	Außendurchmesser (Rotor)	m
tau_1p	Polteilung (Stator)	m
l_i	Ideelle Länge	m
n_v	Anzahl der Ventilationskanäle	-
gamma_v	Hilfsfaktor Ventilationskanäle	-
l	Blechpaketlänge	m
l_Fe	Reine Eisenlänge	m
Phi_delta	Luftspaltwellenfluss	Wb
Phi_h	Hauptwellenfluss	Wb
Phi_1r_max	max. Fluss im Ruedcken (Stator)	Wb
l_1m	Mittlere Windungslänge der Wicklungen (Stator)	m
h_1r_min	min. Rückenhöhe (Stator)	m
h_1r_max	max. Rückenhöhe (Stator)	m
h_1n_min	min. Nuthöhe (Stator)	m
h_1n_max	max. Nuthöhe (Stator)	m
D_1a_max	max. Außendurchmesser (Stator)	m
N_1max	max. Nutenzahl (Stator)	-
q_min_GL	min. Lochzahl für Ganzlochwicklungen	-
N_min_GL	min. Nutenzahl für Ganzlochwicklungen	-
N_1	Nutenzahl (Stator)	-
q_1	Lochzahl (Stator)	-
q_1z	Lochzahl Zähler (Stator)	-
q_1n	Lochzahl Nenner (Stator)	-

Anhang

ggT_q_1n_m	Größter gemeinsamer Teiler von Lochzahl Nenner und Strangzahl	
tau_1n	Nutteilung (Stator)	m
y_1Durchmesser	Durchmesserschnitt Wicklung (Stator)	-
Wicklungstyp_1	Wicklungstyp (Stator)	-
n_lay	Anzahl Wicklungsschichten	-
y_1	Wicklungsschritt (Stator)	-
y_1v	Schrittverkürzung Wicklung (Stator)	-
Sehnung_1	Sehnung Wicklungs (Stator)	-
sigma_1o	Streukoeffizient der Oberwellenstreuung (Stator)	-
xi_1p	Wicklungsfaktor Grundwelle (Stator)	-
a_1	Anzahl an Parallelschaltungen	-
w_1Str_opt	Optimale Strangwindungszahl (Stator)	-
w_1Str	Strangwindungszahl (Stator)	-
z_1n	Anzahl der Leiter je Nut	-
err_1	Abweichung von optimaler Strangwindungszahl (Stator)	-
I_1zw	Zweigstrom (Stator)	A
A_1L	Leiter Querschnittsfläche (Stator)	mm ²
d_1L	Leiter Durchmesser (Stator)	mm
V_1Le	Volumen Leiter (Stator)	m ³
m_1Le	Masse Leiter (Stator)	kg
A_1n	Nutquerschnitt (Stator)	mm ²
alpha_p	Abplattungsfaktor	-
B_max	max. Induktion der Feldkurve	T
b_1ns	Nutslitzbreite (Stator)	mm
h_1ns	Nutslitzhöhe (Stator)	mm
d_1iso	Dicke der Nutisolierung (Stator)	mm
alpha_1nk	Nutkeilwinkel (Stator)	rad
h_1k	Nutkeilhöhe (Winkel) (Stator)	mm
h_1nk	Nutkeilhöhe (Stator)	mm
b_1n_o	Nutbreite oben (Stator)	mm
b_1n_u	Nutbreite unten (Stator)	mm
b_1n_m	Nutbreite mitte (Stator)	mm
b_1z_o	Zahnbreite oben (Stator)	mm
b_1z_u	Zahnbreite unten (Stator)	mm
b_1z_m	Zahnbreite mitte (Stator)	mm
h_1n	Nuthöhe (Stator)	mm
A_1n_tat	Tatsächliche Nutfläche (Stator)	mm ²
B_1z_o	Zahninduktion oben (Stator)	T
B_1z_u	Zahninduktion unten (Stator)	T
B_1z_m	Zahninduktion mitte (Stator)	T
h_1r	Rückenhöhe (Stator)	mm
B_1r	Rückeninduktion (Stator)	T
h_1r_rel	Relative Rückenhöhe (Stator)	-
D_1a	Außendurchmesser (Stator)	m

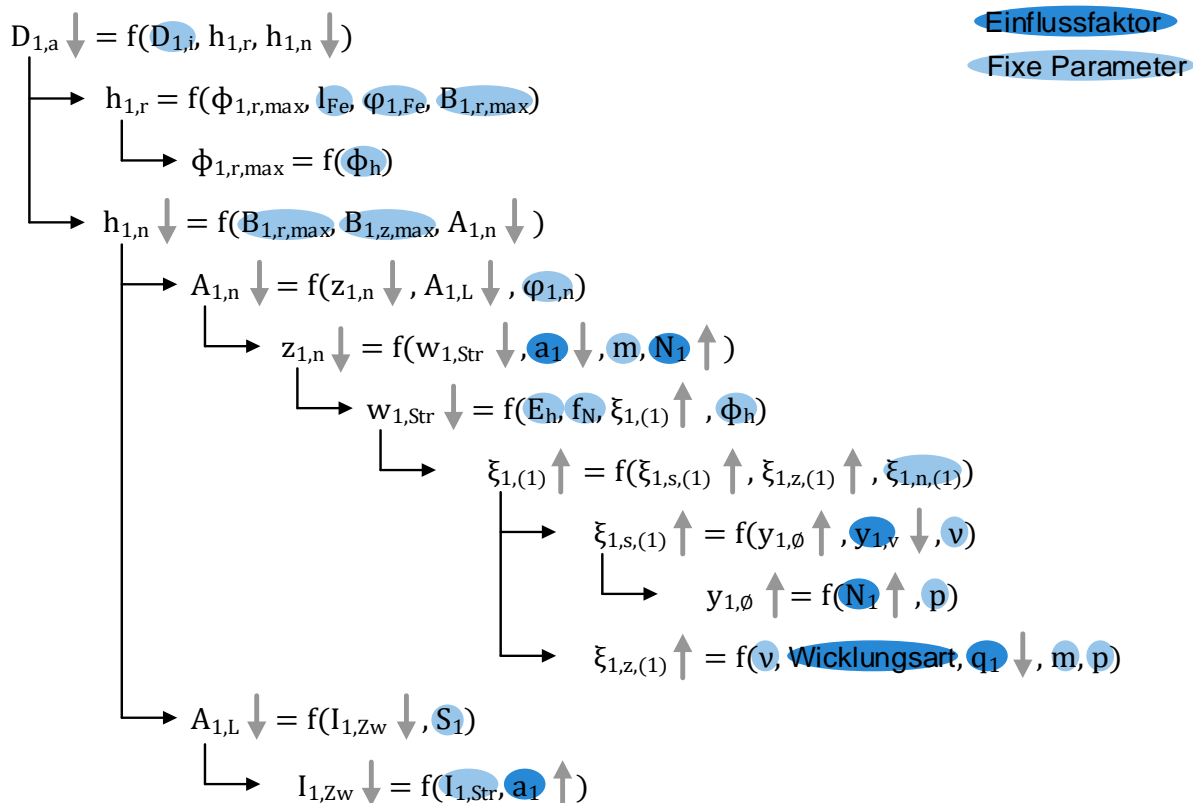
N_2max	max. Nutenzahl (Rotor)	-
N_2min	min. Nutenzahl (Rotor)	-
q_2max	max. Lochzahl (Rotor)	-
q_2min	min. Lochzahl (Rotor)	-
N_2	Nutenzahl (Rotor)	-
q_2	Lochzahl (Rotor)	-
I_2	Strom (Rotor)	A
I_2s	Stabstrom (Rotor)	A
I_2r	Ringstrom (Rotor)	A
A_2s	Stabquerschnitt (Rotor)	mm ²
A_2r	Ringquerschnitt (Rotor)	mm ²
A_2n	Nutquerschnitt (Rotor)	mm ²
tau_2n	Nutteilung (Rotor)	m
tau_2p	Polteilung (Rotor)	m
Phi_2r_max	max. Fluss im Ruecken (Rotor)	Wb
b_2ns	Nutslitzbreite (Rotor)	mm
h_2ns	Nutslitzhöhe (Rotor)	mm
d_2iso	Dicke der Nutisolierung (Rotor)	mm
alpha_2nk	Nutkeilwinkel (Rotor)	rad
h_2k	Nutkeilhöhe (Winkel) (Rotor)	mm
h_2nk	Nutkeilhöhe (Rotor)	mm
b_2n_o	Nutbreite oben (Rotor)	mm
b_2n_u	Nutbreite unten (Rotor)	mm
b_2n_m	Nutbreite mitte (Rotor)	mm
b_2z_o	Zahnbreite oben (Rotor)	mm
b_2z_u	Zahnbreite unten (Rotor)	mm
b_2z_m	Zahnbreite mitte (Rotor)	mm
h_2n	Nuthöhe (Rotor)	mm
A_2n_tat	Tatsächliche Nutfläche (Rotor)	mm ²
B_2z_o	Zahninduktion oben (Rotor)	T
B_2z_u	Zahninduktion unten (Rotor)	T
B_2z_m	Zahninduktion mitte (Rotor)	T
h_2r	Rückenhöhe (Rotor)	mm
B_2r	Rückeninduktion (Rotor)	T
h_2r_rel	Relative Rückenhöhe (Rotor)	-
D_2i	Innendurchmesser (Rotor)	m
l_PM	Länge PM	m
k_so	Sättigungsfaktor Längsachse im Leerlauf	-
alpha_i	Ideeler Polbedeckungsfaktor	-
b_PM	Breite PM	mm
k_sigma	Streufussfaktor PM	-
k_b	Anzahl PM verantwortlich für polaren Fluss	-
k_h	Anzahl, wie oft die Flusslinie die PM durchquert	-
k_vg	Verhältnis Amplitude zu Durchschnittswert vom Luftspaltfluss	-

k_h_q	Zusatz-Formfaktor für die Querachse	-
k_sd	Sättigungsfaktor für die Längsachse	-
k_sq	Sättigungsfaktor für die Querachse	-
h_PM	Höhe PM	mm
Phi_PM	Fluss durch den permanentmagnetischen Abschnitt	Wb
alpha_PM	Öffnungswinkel PM (V-Form)	rad
h_1_PM	Höhe1 der PM Konstruktion	mm
h_2_PM	Höhe2 der PM Konstruktion	mm
h_3_PM	Höhe3 der PM Konstruktion	mm
Abstand_PM_Rotoroberflaeche	Abstand zwischen PM und Rotoroberflaeche	mm
Abstand_PM_unten	Abstand zwischen den PM unten	mm
A_1r	Rückenfläche (Stator)	m ²
A_1z	Zahnfläche (Stator)	m ²
A_2r	Rückenfläche (Rotor)	m ²
A_2z	Zahnfläche (Rotor)	m ²
Vo_1r	Rückenvolumen (Stator)	m ³
Vo_1z	Zahnvolumen (Stator)	m ³
Vo_2r	Rückenvolumen (Rotor)	m ³
Vo_2z	Zahnvolumen (Rotor)	m ³
gamma_1	Hilfsfaktor Carter-Faktor (Stator)	-
k_1c	Carter-Faktor (Stator)	-
gamma_2	Hilfsfaktor Carter-Faktor (Rotor)	-
k_2c	Carter-Faktor (Rotor)	-
k_c	Carter-Faktor	-
V_delta	Magnetischer Spannungsabfall über dem Luftspalt	A
B_1zs_m	Scheinbare Zahninduktion mitte (Stator)	T
B_1zs_o	Scheinbare Zahninduktion oben (Stator)	T
B_1zs_u	Scheinbare Zahninduktion unten (Stator)	T
H_1z_o	Zahnfeldstärke oben (Stator)	A/m
H_1z_u	Zahnfeldstärke unten (Stator)	A/m
H_1z_m	Zahnfeldstärke mitte (Stator)	A/m
H_2z_o	Zahnfeldstärke oben (Rotor)	A/m
H_2z_u	Zahnfeldstärke unten (Rotor)	A/m
H_2z_m	Zahnfeldstärke mitte (Rotor)	A/m
V_1z	Magnetischer Spannungsabfall über den Zähnen (Stator)	A
V_2z	Magnetischer Spannungsabfall über den Zähnen (Rotor)	A
V_z	Magnetischer Spannungsabfall über den Zähnen	A
k	Zahnsättigungsfaktor	-
H_1r	Rückenfeldstärke (Stator)	A/m
H_2r	Rückenfeldstärke (Rotor)	A/m
tau_1r	Polteilung an der Grenzfläche zwischen Zahngebiet und Rücken (Stator)	m
tau_2r	Polteilung an der Grenzfläche zwischen Zahngebiet und Rücken (Rotor)	m
C_1r	Rückenreduktionsfaktor (Stator)	-

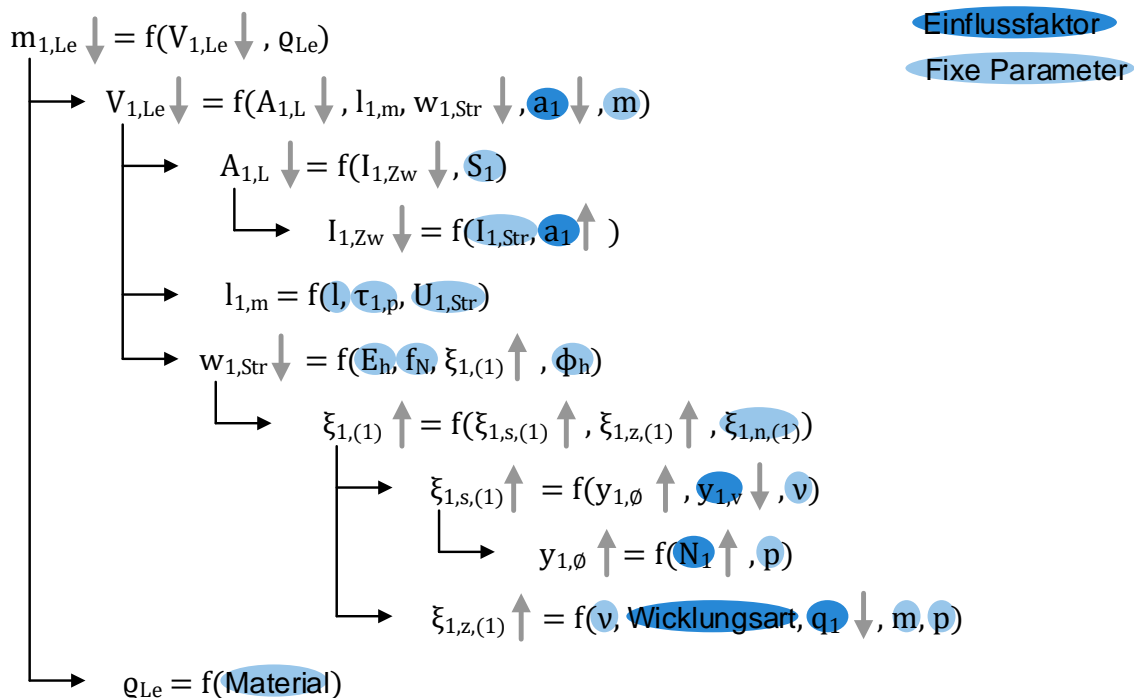
C_2r	Rückenreduktionsfaktor (Rotor)	-
V_1r	Magnetischer Spannungsabfall über dem Rücken (Stator)	A
V_2r	Magnetischer Spannungsabfall über dem Rücken (Rotor)	A
V_r	Magnetischer Spannungsabfall über dem Rücken	A
Theta_p	Durchflutung	A
I_mu	Magnetisierungsstrom	A
delta_i	Ideelle Luftspaltlänge	mm
L_1h	Ungesättigte Hauptinduktivität (Stator)	H
X_1h_ges	Gesättigte Hauptreaktanz (Stator)	Ohm
delta_i_ss	Ersatzluftspalt (Sättigung)	mm
L_1h_ges	Gesättigte Hauptinduktivität (Stator)	H
lambda_1z	Relativer Streuleitwert der Zahnkopfstromung (Stator)	-
lambda_2z	Relativer Streuleitwert der Zahnkopfstromung (Rotor)	-
h_1ue	Höhe über Leiter (Stator)	mm
h_1l	Höhe Leiter (Stator)	mm
b_1n	Breite Nut (Stator)	mm
b_1k	Breite Nutkeilgebiet (Stator)	mm
h_2ue	Höhe über Leiter (Rotor)	mm
h_2l	Höhe Leiter (Rotor)	mm
b_2n	Breite Nut (Rotor)	mm
b_2k	Breite Nutkeilgebiet (Rotor)	mm
lambda_1nz	Relativer Nut-Zahnkopf-Streuleitwert (Stator)	-
k_1	Hilfsfaktor 1 Nut-Zahnkopf-Streuleitwert (Stator)	-
k_2	Hilfsfaktor 2 Nut-Zahnkopf-Streuleitwert (Stator)	-
d	Abstand zwischen den Leitern bei Zweischichtwicklungen (Stator)	mm
L_1sigma_nz	Nut- und Zahnkopfstromung (Stator)	H
lambda_2nz	Relativer Nut-Zahnkopf-Streuleitwert (Rotor)	-
k_1	Hilfsfaktor 1 Nut-Zahnkopf-Streuleitwert (Rotor)	-
k_2	Hilfsfaktor 2 Nut-Zahnkopf-Streuleitwert (Rotor)	-
d	Abstand zwischen den Leitern bei Zweischichtwicklungen (Rotor)	mm
L_2sigma_nz	Nut- und Zahnkopfstromung (Rotor)	H
I_1w	Leiterlänge im Wicklungskopf (Stator)	m
lambda_1ws	Relativer Streuleitwert der Wickelkopfstromung (Stator)	-
lambda_1w	Relativer Streuleitwert der Wicklungsstromung (Stator)	-
L_1sigma_w	Wicklungskopfstromung (Stator)	H
I_2w	Leiterlänge im Wicklungskopf (Rotor)	m
lambda_2ws	Relativer Streuleitwert der Wickelkopfstromung (Rotor)	-
lambda_2w	Relativer Streuleitwert der Wicklungsstromung (Rotor)	-
L_2sigma_w	Wicklungskopfstromung (Rotor)	H
L_1sigma_o	Oberwellenstromung (Stator)	H
xi_schr_p	Wicklungsfaktor Schrägung (Hauptwelle)	-
sigma_schr	Streukoeffizient der Schrägungstromung	-

L_sigma_schr	Schrägungstreuung	H
L_1sigma	Streuinduktivität (Stator)	H
k_ad	Formfaktor für die Längsachse	-
k_aq	Formfaktor für die Querachse	-
L_hd	Hauptinduktivitaet der Längsachse	H
L_hq	Hauptinduktivitaet der Querachse	H
L_d	Synchrone Induktivität Längsachse	H
L_q	Synchrone Induktivität Querachse	H
k_phi	Verhältnis zwischen Hauptinduktivität und Gesamtinduktivität	-
Psi_PM	Verketteter PM-Fluss	Vs
ue_h	Reelles Übersetzungsverhältnis	-
L_2sigma_s	Streuinduktivität eines Stabs	H
lambda_2r	Relativer Streuleitwert eines Rings	-
D_2r	Mittlerer Ringdurchmesser	m
L_2sigma_r	Streuinduktivität eines Ringsegments	H
sigma_2o	Streukoeffizient der Oberwellenstreuung (Rotor)	-
L_2sigma	Streuinduktivität (Rotor)	H
L_11	Gesamtinduktivität (Stator)	H
L_12	Koppelinduktivität	H
L_21	Koppelinduktivität	H
L_2h	Hauptinduktivität (Rotor)	H
L_22	Gesamtinduktivität (Rotor)	H
sigma	Streuleitfaktor	-
sigma_1	Streuleitfaktor (Stator)	-
L_2sigma_trans	Streuinduktivität (Rotor) transformiert auf Statorseite	H
sigma_2	Streuleitfaktor (Rotor)	-
rho_1	Spezifischer Widerstand bei theta_1 (Stator)	mm ² /Sm
kappa_1	Spezifische Leitfähigkeit (Stator)	Sm/mm ²
R_1	Widerstand eines Wicklungsstrangs (Stator)	Ohm
rho_2	Spezifischer Widerstand bei theta_2 (Rotor)	mm ² /Sm
kappa_2	Spezifische Leitfähigkeit (Rotor)	Sm/mm ²
R_2s	Stabwiderstand (Rotor)	Ohm
l_2rm	Mittlere Ringsegmentlänge (Rotor)	m
R_2r	Widerstand eines Ringsegments (Rotor)	Ohm
R_2	Widerstand (Rotor)	Ohm
R_2_trans	Widerstand (Rotor) transformiert auf Statorseite	Ohm
type	Maschinentyp	-
nmax	Maximale Drehzahl	U/min
anzahl_PM	Anzahl Permanentmagnete	-

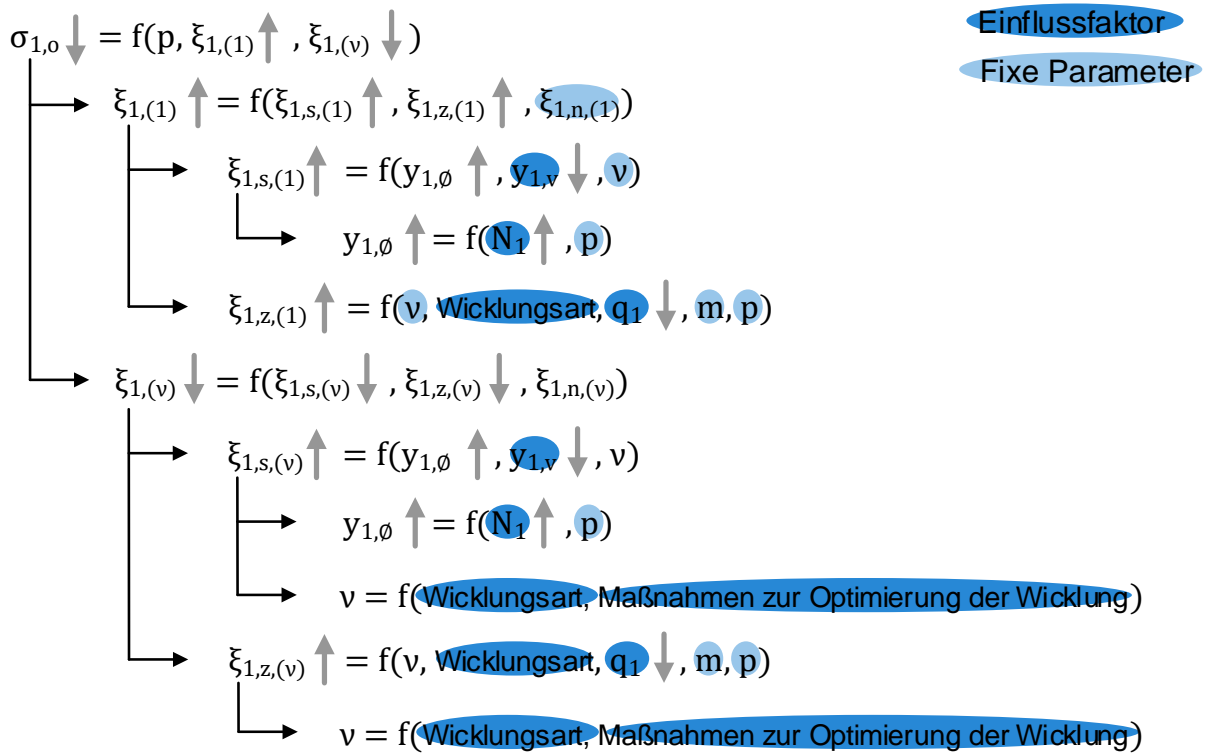
Anhang F.9 zeigt die Wirkungskette der Einflussfaktoren auf den Statoraußendurchmesser [84].



Anhang F.10 zeigt die Wirkungskette der Einflussfaktoren auf die Masse des Leitermaterials [84].



Anhang F.11 zeigt die Wirkungskette der Einflussfaktoren auf die Oberwellenstreuung [84].



Anhang F.12 zeigt den Zusammenhang verschiedener Maschinenparameter

Die Maschinendrehzahl hat beispielsweise einen maßgeblichen Einfluss auf den Bauraum der Maschine. Bei gleichbleibender Leistung und steigender Drehzahl, sinkt das erforderliche Drehmoment und somit das Bauvolumen der Maschine. Die Polpaarzahl bietet einen weiteren Stellhebel – je größer die Polpaarzahl gewählt werden kann, desto kleiner können die Wickelköpfe und Ohm'schen Verluste ausgelegt werden. Eine verringerte Polpaarzahl führt zu einer Vergrößerung der Magnetmasse und die daraus resultierenden steigenden Fliehkräfte sorgen für eine erhöhte notwendige Auslegung der Eisenstege im Rotor zur mechanischen Absicherung. Dies führt zu erhöhten Materialkosten sowie einer Reduzierung der Leistungsdichte der elektrischen Maschine [20].

Die Berechnung des Statoraußendurchmessers, welcher maßgeblich das Volumen der Maschine bestimmt, ist ebenfalls durch eine Wirkungskette aus Maschinenparametern (vor allem der Wicklungsparameter) bestimmt. Eine hohe Anzahl an Nuten sowie ein hoher Wicklungsfaktor der Grundwelle sind für die Reduzierung des Statoraußendurchmessers vorteilhaft. Zudem hat ein hoher Wicklungsfaktor der Grundwelle einen positiven Einfluss, welcher sich vor allem durch eine geringe Schrittverkürzung, eine niedrige Lochzahl sowie die Wahl einer geeigneten Wicklungsart bestimmt.

Für eine detaillierte Validierung der PSM, wurden verschiedene Maschinen unterschiedlicher Leistungsklassen mittels Variation der Bemessungsgrößen Nennleistung und Nenndrehzahl untersucht. Die Nennleistung wird in den Schritten 20 kW, 60 kW und 100 kW und die Nenndrehzahl für 1500 1/min und 4000 1/min variiert, wobei die restlichen Eingangsgrößen

konstant gehalten werden. Die Größen Strombelag und Stromdichte weisen mit einer maximalen Abweichung von ca. 2 % eine Übereinstimmung auf. Die Streuinduktivität im Nut- und Zahnkopf weist eine maximale Abweichung von ca. 12 % auf. Die durch das Auslegungsprogramm berechnete Zahn-, Statorrücken- und Rotorjochinduktion ist nah an den Werten des Rechenprogramms *RMxpert*.

Anhang F.13 zeigt die Korrelation zwischen Spannungsniveau und Außendurchmesser D_a

Die Korrelation zwischen dem Spannungsniveau der elektrischen Maschine und der Außendurchmesser D_a mittels des optimierten Statorentwurfs ist in Abbildung F.13 dargestellt. Die Statorauslegung des BMW i3 ist in schwarz gekennzeichnet.

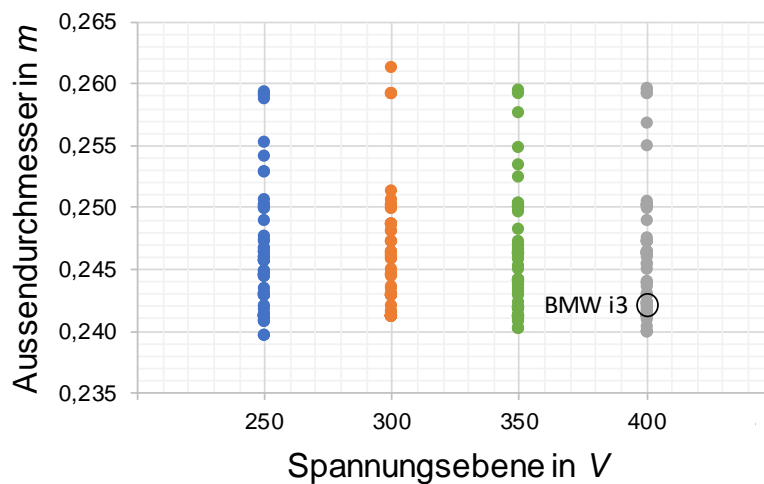


Abbildung F.13 Lösungsraum für Spannungsebene und Außendurchmesser – BMW i3 [80].

Anhang F.14 zeigt den Funktionsaufbau der automatisierten Maschinenauslegungsmethodik

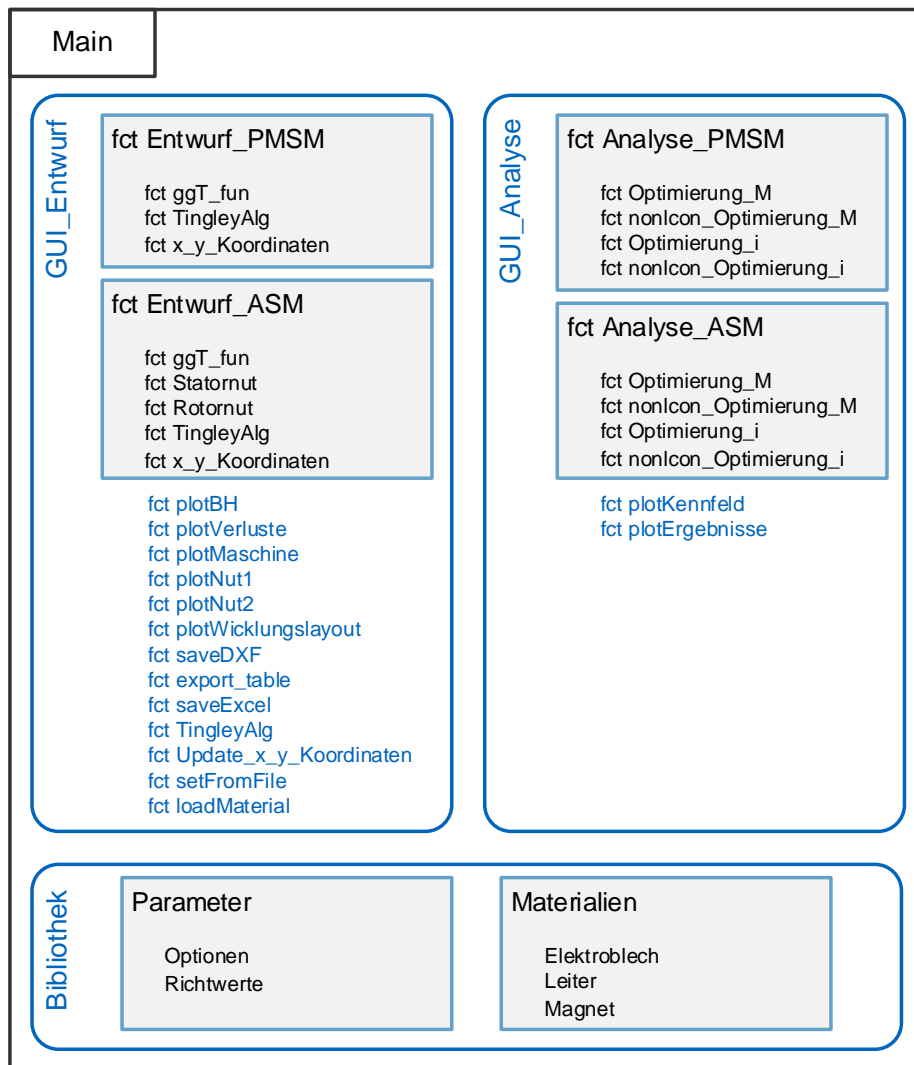


Abbildung F.14: Funktionsaufbau der automatisierten Maschinenauslegungsmethodik aus KALT [30].

Anhang F.14 zeigt die Iterative Nutformberechnung nach [32].

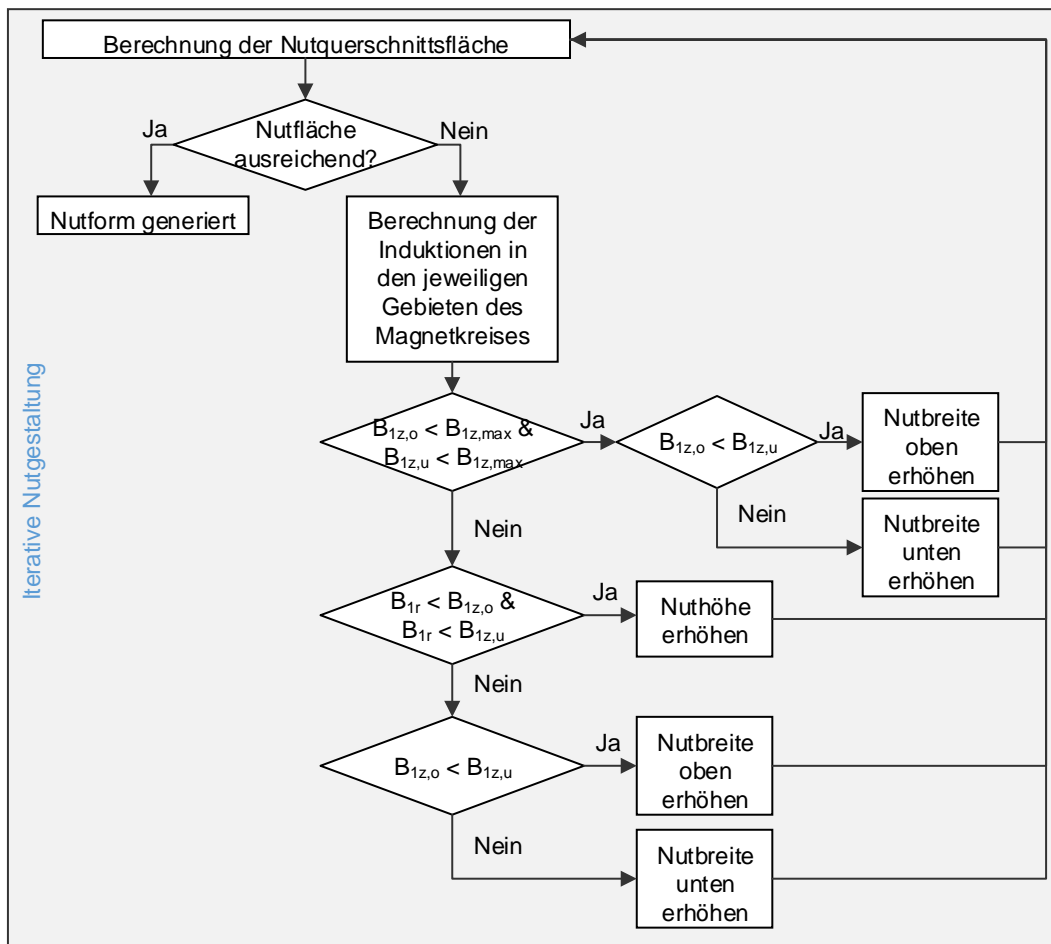


Abbildung 6.1: Iterative Nutformberechnung nach [32].