

Wissenschaftliche Reihe
Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

RESEARCH

Nikolaos Karras

Optimierung der Wärmeabfuhr eines Fahrzeug-Elektromotors und Auswirkungen auf den Gesamtkühlkreislauf



Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

Herausgegeben von

M. Bargende, Stuttgart, Deutschland

H.-C. Reuss, Stuttgart, Deutschland

J. Wiedemann, Stuttgart, Deutschland

Das Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) an der Universität Stuttgart erforscht, entwickelt, appliziert und erprobt, in enger Zusammenarbeit mit der Industrie, Elemente bzw. Technologien aus dem Bereich moderner Fahrzeugkonzepte. Das Institut gliedert sich in die drei Bereiche Kraftfahrwesen, Fahrzeugantriebe und Kraftfahrzeug-Mechatronik. Aufgabe dieser Bereiche ist die Ausarbeitung des Themengebietes im Prüfstandsbetrieb, in Theorie und Simulation.

Schwerpunkte des Kraftfahrwesens sind hierbei die Aerodynamik, Akustik (NVH), Fahrdynamik und Fahrermodellierung, Leichtbau, Sicherheit, Kraftübertragung sowie Energie und Thermomanagement – auch in Verbindung mit hybriden und batterieelektrischen Fahrzeugkonzepten.

Der Bereich Fahrzeugantriebe widmet sich den Themen Brennverfahrensentwicklung einschließlich Regelungs- und Steuerungskonzeptionen bei zugleich minimierten Emissionen, komplexe Abgasnachbehandlung, Aufladesysteme und -strategien, Hybridsysteme und Betriebsstrategien sowie mechanisch-akustischen Fragestellungen.

Themen der Kraftfahrzeug-Mechatronik sind die Antriebsstrangregelung/Hybride, Elektromobilität, Bordnetz und Energiemanagement, Funktions- und Softwareentwicklung sowie Test und Diagnose.

Die Erfüllung dieser Aufgaben wird prüfstandsseitig neben vielem anderen unterstützt durch 19 Motorenprüfstände, zwei Rollenprüfstände, einen 1:1-Fahrsimulator, einen Antriebsstrangprüfstand, einen Thermowindkanal sowie einen 1:1-Aeroakustikwindkanal.

Die wissenschaftliche Reihe „Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart“ präsentiert über die am Institut entstandenen Promotionen die hervorragenden Arbeitsergebnisse der Forschungstätigkeiten am IVK.

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende
Lehrstuhl Fahrzeugantriebe,
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann
Lehrstuhl Kraftfahrwesen,
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss
Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik,
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Nikolaos Karras

Optimierung der Wärmeabfuhr eines Fahrzeug-Elektromotors und Auswirkungen auf den Gesamtkühlkreislauf

Nikolaos Karras
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2016

D93

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart
ISBN 978-3-658-17803-1 ISBN 978-3-658-17804-8 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-17804-8

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IVK/FKFS der Universität Stuttgart. Grundlage war das Forschungsvorhaben „e-generation – Schlüsseltechnologien für die nächste Generation der Elektrofahrzeuge“.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann für das große Interesse an der Arbeit, das mir entgegengebrachte Vertrauen sowie für die Übernahme des Hauptberichts.

Ebenso möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Böttinger für die Übernahme des Mitberichts bedanken.

Bei Herrn Dr.-Ing. Timo Kuthada und Herrn Dipl.-Ing. Nils Widdecke möchte ich mich herzlich für die gute, freundschaftliche und kompetente Zusammenarbeit und die stetige Diskussionsbereitschaft bedanken.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Verbundpartnern des Forschungsvorhabens. Insbesondere möchte ich mich bei meinem Teilprojektleiter Herrn Dr.-Ing. Mirosław Brzoza (Porsche AG) recht herzlich für die stets gute Zusammenarbeit bedanken.

Ferner gilt mein Dank allen Kollegen des Bereichs Fahrzeugaerodynamik und Thermomanagement für die kooperative Zusammenarbeit, Hilfsbereitschaft sowie stete Diskussionsbereitschaft. Zudem bedanke ich mich auch bei den zahlreichen Studenten, die im Rahmen ihrer Bachelor-, Studien- und Masterarbeiten oder als Hilfwissenschaftler diese Arbeit unterstützt haben.

Ich danke meinen Eltern und meinem Bruder Petro, die durch ihre uneingeschränkte Förderung meiner Ausbildung und ihre Unterstützung die Anfertigung der vorliegenden Arbeit erst ermöglicht haben.

Mein besonders herzlicher Dank gebührt meiner liebevollen, zukünftigen Frau Stefanie. Sie hat durch ihr Verständnis und ihre steten Ermunterungen einen großen Anteil an der Fertigstellung dieser Arbeit.

Nikolaos Karras

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XVII
Abkürzungsverzeichnis	XIX
Formelzeichen	XXI
Zusammenfassung	XXV
Abstract	XXIX

1 Einleitung 1

2 Grundlagen und Stand der Technik..... 3

2.1 Grundlagen.....	3
2.1.1 Hydrodynamik	3
2.1.2 Wärmeübertragungsmechanismen	7
2.1.3 Elektromotoren und ihre Verlustleistungen	12
2.2 Stand der Technik	18
2.2.1 Kühlkonzepte für Elektromotoren.....	18
2.2.2 Kühlplatten- und Wassermantelkühlung.....	20
2.2.3 Thermomanagement an Hybrid- und Elektrofahrzeugen	26

3 Entwicklungswerkzeuge des Thermomanagements..... 29

3.1 Messtechnik	29
3.1.1 Strömungsmesstechnik.....	29
3.1.2 Kühlfluid-Konditioniereinheit.....	31
3.1.3 Wärmebildkamera	32
3.2 Simulationswerkzeuge	33
3.2.1 Thermisches Fahrzeugmodell Stuttgart.....	33
3.2.2 KULI	35
3.2.3 Exa PowerFLOW / PowerTHERM.....	35
3.2.4 Kopplungsmethodik	37
3.3 Fahrzyklen	39

4	Optimierung der Wärmeabfuhr des Elektromotors	43
4.1	Messung.....	43
4.1.1	Versuchsmodell.....	44
4.1.2	Versuchsaufbau.....	45
4.2	Simulation.....	49
4.3	Validierungsergebnisse	51
4.3.1	Messergebnisse	51
4.3.2	Simulationsergebnisse.....	54
4.4	Validierung der Parallelgeometrie	60
4.5	Optimierung der Wassermantelgeometrie.....	62
4.5.1	Konzepte für Kühlplatten.....	62
4.5.2	Entwurf des optimierten Wassermantels.....	69
4.6	Implementierung in die Gesamtsystems simulation	75
5	Optimierung des Gesamtkühlsystems	77
5.1	Fahrzeugmodell	77
5.2	Kühlsystemtopologie	78
5.3	Validierung der Gesamtsystems simulation	81
5.3.1	TheFaMoS-Validierung	82
5.3.2	KULI-Validierung.....	90
5.4	Optimierungsmaßnahmen am Kühlkreislauf	98
5.4.1	Verschlauchung.....	99
5.4.2	Pumpentyp	101
5.4.3	Kühlervariation	103
5.4.4	Einfluss des Konzeptwassermantels	106
5.4.5	Regelung/Steuerung.....	108
5.4.6	Luftkühlung der Elektromotoren.....	109
5.5	Optimierungsmaßnahme am Gesamtfahrzeug	111
5.6	Betrachtung der kombinierten Optimierungsmaßnahmen im Gesamtsystem	113
6	Diskussion der aufgezeigten Potenziale	117
	Literaturverzeichnis	121
	Anhang.....	129

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Geschwindigkeitsprofile einer laminaren und turbulenten Rohrströmung [16].....	5
Abbildung 2.2:	Moody-Diagramm zur Bestimmung der Druckverlustbeiwerte ζ [18].....	6
Abbildung 2.3:	Wärmeleitung in einer ebenen Platte [13].....	8
Abbildung 2.4:	Natürliche Konvektion an einer senkrechten Wand [14].....	9
Abbildung 2.5:	Einlauf (links) sowie ausgebildete Strömung (rechts) in einem Rohr.....	10
Abbildung 2.6:	Schnittbild einer PSM zur Erläuterung des prinzipiellen Aufbaus [25]	13
Abbildung 2.7:	Explosionsdarstellung einer stationär betriebenen ASM [26]	14
Abbildung 2.8:	Leistungsfluss eines Elektromotors [28].....	15
Abbildung 2.9:	Durch den sich ändernden magnetischen Zustand eines Metalls resultierende Hystereseschleife in der Induktions-Feldstärke-Ebene (B-H-Ebene) [24].....	16
Abbildung 2.10:	Prinzipskizzen der drei Hauptkühlmethoden der Norm für „Drehende elektrische Maschinen“ DIN EN 60034-6 (VDE 0530-6).....	19
Abbildung 2.11:	Wassermantel und Ölkreislauf eines konventionellen Verbrennungsmotors [30]	20
Abbildung 2.12:	Vergleich der elliptischen (links) und rautenförmigen Profile anhand der resultierenden Oberflächentemperaturverteilung [32].....	22
Abbildung 2.13:	Konventionelle Wasserkühlung mit Temperaturgradienten (links). Im Vergleich dazu die gradientenfreie Wasserkühlung (mittig) mit Hilfe der ShowerPower® Struktur (rechts) [33]	22
Abbildung 2.14:	Strömungssimulation zur Ermittlung der Fluidtemperaturen im Wassermantel eines Elektromotors [40]	23
Abbildung 2.15:	Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten verschiedener Wassermantelkonzepte.	24
Abbildung 2.16:	Strömungsanalyse einer herkömmlichen Umlenkung mit konstantem Strömungsquerschnitt und der "Bananen"-Umlenkung mit unstetigem Querschnitt [11].....	25

Abbildung 2.17:	Im Kokillen-Gussverfahren hergestelltes Aluminium-Motorgehäuse. Die Wassermantelgeometrie hat eine spezielle Wabenstruktur. [43].....	25
Abbildung 2.18:	Erläuterung der verschiedenen Batteriekühlmethoden durch Luftkühlung, Kältemittelkühlung und Kühlmittelkühlung [48].....	28
Abbildung 3.1:	Mantel- (links) und Drahtthermoelement (rechts) [51].....	29
Abbildung 3.2:	Aufbauschema zur Messung des statischen Drucks p_{stat} innerhalb eines Strömungskanals	30
Abbildung 3.3:	Anschlüsse und Komponenten des Hot Water Rig (HWR)	31
Abbildung 3.4:	Tragbare Wärmebildkamera der Fa. FLIR [55]	32
Abbildung 3.5:	Rückwärtsrechendes Modell für batterieelektrische Fahrzeuge	33
Abbildung 3.6:	ASM-Verlustleistungen unter Betrachtung der räumlichen Verteilung und die sich ergebenden Wärmeleitpfade eines wassergekühlten Motors.....	34
Abbildung 3.7:	Zwei-Wege-Kopplungsmethodik von PowerFLOW und PowerTHERM	37
Abbildung 3.8:	Zwei-Wege-Kopplungsmethodik von TheFaMoS und KULI	38
Abbildung 3.9:	Geschwindigkeitsprofil des CADC 150 [69]	40
Abbildung 3.10:	Geschwindigkeitsprofil des Autobahnzyklus.....	40
Abbildung 3.11:	Geschwindigkeitsprofil Nardò	41
Abbildung 4.1:	Versuchsmodell mit eingefräster mäanderförmiger Kühlkanalgeometrie in der Grundplatte (links) sowie im endmontierten Zustand mit Temperatur- und Drucksensoranschlüssen (rechts)	44
Abbildung 4.2:	Fräsverfahren [73].....	45
Abbildung 4.3:	Aluminium-Heizblock mit den drei eingepassten Heizpatronen	46
Abbildung 4.4:	Temperaturverteilung auf der Kontaktfläche bzw. Oberseite des Heizblocks bei eingestellten 80 °C, aufgenommen mit einer Infrarotkamera.....	47
Abbildung 4.5:	Verteilung der Mantelthermoelemente und Drucksensoren über dem Kühlkanal sowie dem Zu- und Ablauf	48
Abbildung 4.6:	Versuchsaufbau inklusive Druck- und Temperatursensoren. Die Heizplatte ist mit einer thermischen Isolierung zur Umgebung versehen.	48
Abbildung 4.7:	PowerTHERM-Simulationsmodell	50

Abbildung 4.8:	Terminologie der Versuche und Übersicht der durchgeführten Messungen.....	52
Abbildung 4.9:	Reproduzierbarkeit der Druckverluste bei jeweils derselben Konfiguration: 40_60_3 und 50_80_5, dimensionsbehaftet und dimensionslos.....	53
Abbildung 4.10:	Untersuchung der Reproduzierbarkeit der Druckverlustverläufe anhand zweier Messungen der Konfiguration 40_60_3 (links) sowie 50_80_5 (rechts)	53
Abbildung 4.11:	Untersuchung der Reproduzierbarkeit der Temperaturerhöhung anhand zweier Messungen der Konfiguration 40_60_3 (links) sowie 50_80_5 (rechts)	54
Abbildung 4.12:	Konfiguration 40-60-3: Vergleich von Messung und Simulation anhand der dimensionslosen Druckbeiwerte und Temperaturen. ($\Delta = \text{Sim} - \text{Mess}$)	55
Abbildung 4.13:	Konfiguration 40-60-x: Untersuchung des Einflusses einer Volumen-stromänderung auf die Druck- und Temperaturberechnung, Eintritts- und Heizplattentemperatur bleiben konstant bei 40 °C bzw. 60 °C.....	55
Abbildung 4.14:	Konfiguration: 40-60-x: Abschnittsweise Betrachtung des Druckverlusts für verschiedene Volumenströme	56
Abbildung 4.15:	Vergleich der gemessenen (links) und berechneten (rechts) Oberflächentemperaturen der Kühlplatte für die Konfiguration 50-80-7	57
Abbildung 4.16:	Volumenvernetzte Kühlplatte	58
Abbildung 4.17:	Vergleich der gemessenen (links) und berechneten (rechts) Oberflächentemperaturen der Kühlplatten bei Verwendung einer volumenvernetzten Kühlplatte für die Konfiguration 50-80-7	58
Abbildung 4.18:	Vergleich der dimensionslosen Temperaturverläufe für das oberflächen- sowie volumenvernetzte thermische Simulationsmodell mit der Messung für die Konfiguration 50-80-7	59
Abbildung 4.19:	Vergleich der Druckverlustbeiwertentwicklung entlang des Kühlkanals für das oberflächen- sowie volumenvernetzte thermische Simulationsmodell mit der Messung für die Konfiguration 50-80-7	60
Abbildung 4.20:	Wärmeübertragende Aktivfläche der zweiten Kühlplatte.....	61

Abbildung 4.21:	Vergleich der gemessenen und simulierten Temperaturzunahmen und Druckverluste bei einer Fluideintrittstemperatur von 40 °C und einer Heizplattentemperatur von 60 °C bei verschiedenen Kühlmittelvolumenströmen	62
Abbildung 4.22:	Draufsicht der Kühlplatte mit Parallelgeometrie	63
Abbildung 4.23:	Die verschiedenen Evolutionsschritte der Kühlplattenentwicklung. Der Kühlmiteleintritt befindet sich jeweils am oberen Ende - der Austritt entsprechend am unteren.....	64
Abbildung 4.24:	Vergleich der verschiedenen Kühlplattenkonzepte anhand der errechneten Nusselt-Zahl Nu und dem Druckverlustbeiwert $c_{p,stat}$	65
Abbildung 4.25:	Gegenüberstellung der Geschwindigkeitsverteilungen für Evo3 (oben) und Evo4.....	66
Abbildung 4.26:	Gegenüberstellung der Geschwindigkeitsverteilungen für Evo4 (links) und Evo5 im Austrittsbereich	68
Abbildung 4.27:	Gegenüberstellung der Geschwindigkeitsverteilungen für Evo5 (oben) und Evo6.....	68
Abbildung 4.28:	Kühlkanalgeometrie eines generischen Wassermantels basierend auf dem Evo6-Konzept	70
Abbildung 4.29:	Abhängigkeit des Druckverlustbeiwerts und der Nu-Zahl von der Kanalhöhe der finalen Wassermantelkonstruktion.....	70
Abbildung 4.30:	Strömungsgeschwindigkeitsverteilung inkl. Oberflächenstromlinien in der Draufsicht für die Variante ohne Einströmelemente (links) als auch mit (rechts).	71
Abbildung 4.31:	Wärmeübergangskoeffizienten über der Mantelbreite aufgetragen bei einem KM-Volumenstrom von 10 l/min und einer Fluidtemperatur von 20 °C.....	72
Abbildung 4.32:	Vergleich der prozentual realisierten Druckverlustminderung und die sich ergebende, prozentual geringere Nu-Zahl des überarbeiteten Wassermantelkonzepts.....	74
Abbildung 4.33:	Gehäuse eines Elektromotors mit integriertem Wassermantel.....	74
Abbildung 4.34:	Simulativ ermitteltes dimensionsloses Wärmeübertragungskennfeld der finalen Wassermantelkonstruktion.....	75

Abbildung 5.1:	Porsche Boxster (981) [75]	77
Abbildung 5.2:	Antriebsstrangtopologie des Porsche Boxster e	78
Abbildung 5.3:	Heiz- (rot), Kühl- (gelb und hellblau) und Kältekreisläufe (dunkelblau) des Porsche Boxster e mit den relevanten Messstellen	80
Abbildung 5.4:	Verschaltung des Kühlsystems während des Schnellladevorgangs (hellblau)	81
Abbildung 5.5:	Vergleich der Drehmomentverläufe beider Elektromotoren für einen Beschleunigungs- und Rekuperationsvorgang auf der Teststrecke in Nardò	82
Abbildung 5.6:	Vergleich der Drehzahlverläufe beider Elektromotoren für einen Beschleunigungs- und Rekuperationsvorgang auf der Teststrecke in Nardò	83
Abbildung 5.7:	Vergleich der mechanischen Leistungsverläufe beider Elektromotoren für einen Beschleunigungs- und Rekuperationsvorgang auf der Teststrecke in Nardò	84
Abbildung 5.8:	Drehmoment- (links) und Drehzahldifferenzen (rechts) bei Konstantfahrten von 80 bis 200 km/h auf dem Zwei-Achs-Trommelfrühstand im Klimawindkanal bei einer Umgebungstemperatur von 35 °C, (Δ = Mess – Sim)	85
Abbildung 5.9:	Vergleich der HV-Batteriespannungs- (links) und – ladezustandsentwicklung (rechts) für den CADC bei einer Umgebungstemperatur von 35 °C	86
Abbildung 5.10:	Vergleich der HV-Batteriespannungs- (links) und – ladezustandsentwicklung (rechts) für die gesamte Nardò-Messfahrt	87
Abbildung 5.11:	Vergleich der Batterieströme (links) und Gesamtantriebswirkungsgrade (rechts) für einen Beschleunigungs- und Rekuperationsvorgang auf der Teststrecke in Nardò (Italien)	88
Abbildung 5.12:	Vergleich der Gesamtantriebswirkungsgrade für die gesamte Nardò-Messfahrt	89
Abbildung 5.13:	Wirkungsgradkennfeld der Vorderachsleistungselektronik	90
Abbildung 5.14:	Wirkungsgradkennfeld der PSM	90
Abbildung 5.15:	Vergleich der Fluidtemperaturverläufe an der Vorderachse für den CADC-Zyklus bei verschiedenen Umgebungstemperaturen und entsprechenden Betriebsarten des Kühlsystems	92

Abbildung 5.16:	Vergleich der Fluidtemperaturverläufe an der Hinterachse für den CADC-Zyklus bei verschiedenen Umgebungstemperaturen und entsprechenden Betriebsarten des Kühlsystems.....	93
Abbildung 5.17:	Vergleich der Leistungselektroniktemperaturverläufe an Vorder- (links) und Hinterachse (rechts) für den Nardò-Zyklus.....	94
Abbildung 5.18:	Vergleich der Kupferwicklungstemperaturverläufe beider Elektromotoren für den Nardò-Zyklus.....	95
Abbildung 5.19:	Vergleich der Fluid- und Zelltemperaturverläufe für den CADC bei einer Umgebungstemperatur von 35 °C	96
Abbildung 5.20:	Vergleich der Zelltemperaturen für den CADC bei verschiedenen Umgebungstemperaturen	97
Abbildung 5.21:	Vergleich der Zelltemperaturen für die Nardò-Messfahrt - einmal mit den Batterieströmen aus der Messung (Sim V1) und einmal mit den errechneten Anforderungen aus TheFaMoS (Sim V2).....	97
Abbildung 5.22:	Validierung der elektrischen Pumpenenergiemenge für den CADC bei verschiedenen Umgebungstemperaturen	98
Abbildung 5.23:	Anlagenkennlinie des MT- und NT-Kreislaufs für verschiedene Rohr- bzw. Schlauchinnendurchmesser ($T_{KM} = 0\text{ °C}$).....	100
Abbildung 5.24:	Einfluss der verschiedenen Schlauchinnendurchmesser auf die Energieaufnahme des Kühlsystems sowie des Gesamtfahrzeugs.....	101
Abbildung 5.25:	Vergleich des gesamten und anteiligen Kühlenergiebedarfs der 125 W- und 50 W-Pumpe im Nardò-Zyklus	102
Abbildung 5.26:	Reduzierung der Kühlerfläche um 40%.....	103
Abbildung 5.27:	Auswirkungen der Kühlergrößenvariation (100% und 2 x 60%) auf die maximalen Komponententemperaturen	104
Abbildung 5.28:	Vergleich des gesamten und anteiligen Kühlenergiebedarfs im Nardò-Zyklus bei unterschiedlicher Kühleranzahl.....	105
Abbildung 5.29:	Vergleich des Originalwassermantels der ASM mit dem im Rahmen dieser Arbeit konstruierten Wassermantels bzgl. der spezifischen Wärmeleistung $\alpha \cdot A$	106

Abbildung 5.30:	Bewertung des Wassermantelkonzepts anhand der erzielten spezifischen Wärmeleistung $\alpha \cdot A$ im Vergleich zum Originalmantel. Höherer maximaler KM-Volumenstrom beim Wassermantelkonzept dank seines geringeren Druckverlusts.....	107
Abbildung 5.31:	Auswirkungen verschiedener Regelungs- und Steuerungsmaßnahmen (sogenannte Varianten) des Kühlsystem auf die maximalen (links) und mittleren (rechts) Kupferwicklungstemperaturen der PSM und ASM und die dafür aufzuwendende Gesamtenergie des Kühlsystems.....	109
Abbildung 5.32:	Schnittdarstellung einer schematische dargestellten PSM mit kombinierter Luft-Wasser-Kühlung	110
Abbildung 5.33:	Sensibilität der maximalen und mittleren Kupferwicklungstemperaturen auf unterschiedliche Wärmeübergangskoeffizienten bei Berücksichtigung einer möglichen, zusätzlichen Luftkühlung in beiden Elektromotoren im Nardò-Zyklus.....	111
Abbildung 5.34:	Auswirkung des Luftwiderstands auf den Fahrzeugenergiebedarf unter Berücksichtigung der Rekuperation (EmRek) sowie auf die resultierende mittlere Gesamtverlustleistung der Antriebsstrangkomponenten.	113
Abbildung 5.35:	Vergleich der maximalen Komponenten-temperaturen im Nardò-Zyklus.....	115
Abbildung A.1:	Wirkungsgradkennfeld der Hinterachsleistungs-elektronik	129
Abbildung A.2:	Wirkungsgradkennfeld der ASM.....	129

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	Durchschnittsgeschwindigkeiten der betrachteten Fahrzyklen und deren Anwendungszweck.....	41
Tabelle 5.1:	Gemittelte Kühlmittelvolumenströme des MT- und NT-Kreislaufs bei verschiedenen Innendurchmessern	101
Tabelle 5.2:	Maximal erzielbare KM-Volumenströme der beiden betrachteten Kühlmittelpumpen in den Kreisläufen sowie die resultierenden maximalen Komponententemperaturen im Nardò-Zyklus	102
Tabelle 5.3:	Maximale Komponententemperaturen der Elektromotoren (PSM, ASM) sowie der Vorder- und Hinterachsleistungselektroniken (LE) für unterschiedliche Kühleranzahlen im Nardò-Zyklus.....	105
Tabelle 5.4:	Konfigurationen der verschiedenen Modellvarianten..	114
Tabelle 5.5:	Vergleich des gesamten und anteiligen Kühlenergiebedarfs im Nardò-Zyklus bei Anwendung aller gezeigten Optimierungsmaßnahmen	114
Tabelle 5.6:	Auswirkungen der Optimierungsmaßnahmen auf den Gesamtfahrzeugenergiebedarf im Nardò-Zyklus ..	116