

## INHALTSVERZEICHNIS

---

<b>1 Thematische Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	4
1.2 Struktur und Ziel der Arbeit.....	7
<b>2 Randbedingungen der thermischen Modellbildung</b> .....	<b>11</b>
2.1 Entwicklungsprozess der thermischen Modellierung.....	11
2.2 Untersuchte Komponente und Umgebung.....	17
2.2.1 Aufbau Hybridmodul mechanisch und elektromagnetisch.....	18
2.2.2 Mechanische Umgebung:.....	21
2.2.3 Thermische Umgebung.....	23
2.2.4 Elektrische Umgebung:.....	24
2.2.5 Versuchsfahrzeug.....	25
<b>3 Thermische Modellierung</b> .....	<b>27</b>
3.1 Wärmeübertragung durch Konduktion.....	29
3.1.1 Thermische isotrope Feststoffe:.....	30
3.1.2 Thermische anisotrope Feststoffe:.....	32
3.1.3 Ansätze zur Ermittlung der thermischen Leitfähigkeit in Kupferwicklungen.....	35
3.1.4 Thermischer Kontaktwiderstand zwischen Bauteilen.....	54
3.2 Wärmeübertragung durch Konvektion.....	56
3.2.1 Wärmeübergang in Kühlwasser.....	61
3.2.2 Wärmeübergang in Luft an drehenden Bauteilen.....	67
3.3 Analogie thermische / elektrische Systeme.....	71
3.4 Thermische Widerstandsnetzwerke.....	72

---

---

3.4.1	Analytisches Knotenpotentialverfahren – lumped parameter model.....	73
3.4.2	k-shift-Ansatz.....	76
3.4.3	Neuer Ansatz: Automatisierte Vernetzung .....	79
3.5	Einfluss der Diskretisierung des thermischen Netzwerkes.....	87
3.6	3D CFD-/CHT-Berechnung .....	93
<b>4</b>	<b>Wärmeentstehungsmechanismen in elektrischen Maschinen ..97</b>	
4.1	Kupferverluste.....	97
4.2	Eisenverluste .....	101
4.2.1	Hysterese.....	101
4.2.2	Wirbelströme .....	103
4.2.3	Bestimmung der Eisenverlustaufteilung über elektromagnetische Simulation in SPEED .....	104
4.3	Reib- und Ventilationsverluste .....	118
<b>5</b>	<b>Validierung an Prüfstand und Fahrzeug .....</b>	<b>119</b>
5.1	Messtechnische Ausrüstung.....	119
5.2	Wärmebilanz in der Prüfstandumgebung.....	130
5.3	Möglichkeiten zur Bestimmung der Verlustaufteilung durch Prüfstandversuche.....	138
5.3.1	Messung des Gesamtwirkungsgrads und der Stromkennfelder.....	138
5.3.2	Wirkungsgradkorrektur über Temperatur .....	140
5.3.3	Leerlaufversuch am Prüfstand mit inaktiver Maschine.	141
<b>6</b>	<b>Algorithmus zur Modellanpassung.....</b>	<b>145</b>
6.1	Trust-Region-Verfahren .....	148
6.2	Lokale Minima .....	153

---

<b>7</b>	<b>Anwendung für transiente Fahrzyklen in Simulation und Versuch .....</b>	<b>155</b>
7.1	1-D Modell thermisches Netzwerk .....	157
7.2	Niedrigdrehzahlzyklus .....	160
7.3	Dynamischer Kalibrierzyklus für Modelloptimierung .....	164
7.4	Parameteroptimierung im Kalibrierzyklus.....	169
7.5	Kopplung von 1D- Widerstandsnetzwerken mit der 3D CFD- /CHT-Simulation .....	176
7.5.1	Kopplungsroutine .....	176
7.5.2	Modellannahme gekoppelte 3D CFD-/CHT - Simulation .....	179
7.6	Bewertung der Einflussgrößen der 1D-Simulation .....	186
7.7	Simulationsgüte- und Ergebnisvergleich aller Disziplinen.....	191
7.8	Modellanwendung zur schnellen Bewertung von Kühlkonzepten.....	199
<b>8</b>	<b>Abschlussbetrachtung .....</b>	<b>203</b>
8.1	Zusammenfassung .....	203
8.2	Kritische Würdigung.....	206
8.3	Ausblick .....	209

---