

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Radnabenantrieben als Antriebskonzept für Elektrofahrzeuge . . . . .	2
1.1.1. Direktantriebe . . . . .	3
1.1.2. Hochdrehzahlantriebe . . . . .	5
1.2. Grundüberlegungen zu Innen- und Außenläufer . . . . .	7
<b>2. Bemessungsgrundlagen</b>	<b>9</b>
2.1. Wicklungsauslegung – Wahl der Lochzahl . . . . .	9
2.1.1. Wicklungsauslegung $q = 3/8$ . . . . .	10
2.1.2. Wicklungsauslegung $q = 2/5$ . . . . .	12
2.1.3. Wicklungsauslegung $q = 1/2$ . . . . .	15
2.1.4. Wicklungsauslegung $q = 3/2$ . . . . .	16
2.1.5. Wicklungsfaktor . . . . .	18
2.1.6. Oberfelderstreuung . . . . .	20
2.1.7. Drehmomentwelligkeit . . . . .	21
2.2. Rotorauslegung . . . . .	23
2.2.1. Rotorfrequenzen . . . . .	23
2.2.2. Magnetsegmentierung . . . . .	25
2.2.3. Ovalisierung des Rotors . . . . .	27
<b>3. Maschinenauslegung</b>	<b>29</b>
3.1. Verwendete Werkstoffe . . . . .	29
3.2. Frequenzumrichter und Batterie . . . . .	30
3.3. Elektromagnetische Auslegung . . . . .	31
3.3.1. Luftspaltfeldberechnung . . . . .	31
3.3.2. Strangwiderstand der Statorwicklung . . . . .	32
3.3.3. Wicklungsinduktivitäten . . . . .	32
Hauptinduktivität . . . . .	32
Hauptinduktivität der Ober- und Unterfelder . . . . .	32
Nutstreuinduktivität . . . . .	33
Stirnstreuinduktivität . . . . .	34
Zahnkopfstreuung . . . . .	34

Gesamtinduktivität . . . . .	35
3.3.4. Bemessungsstromberechnung . . . . .	35
3.3.5. Kurzschlussstromberechnung . . . . .	36
3.3.6. Entmagnetisierfestigkeit . . . . .	37
3.3.7. Ausnutzungsziffern . . . . .	38
3.4. Verluste . . . . .	39
3.4.1. Gleichstrom-Stromwärmeverluste . . . . .	40
3.4.2. Ummagnetisierungsverluste . . . . .	40
3.4.3. Verluste durch Stromverdrängung . . . . .	40
Stromverdrängung 1. Art - Schlingstromverluste . . . . .	41
Stromverdrängung 2. Art . . . . .	42
3.4.4. Wirbelstromverluste in den Magneten bei generatorischem Leerlauf . . . . .	43
3.4.5. Lagerreibungsverluste . . . . .	44
3.4.6. Luftreibungsverluste . . . . .	45
3.5. Thermische Auslegung . . . . .	46
3.5.1. Thermische Auslegung des Direktantriebs . . . . .	46
3.5.2. Thermische Auslegung des Hochdrehzahltriebs . . . . .	49
3.6. Mechanische Auslegung . . . . .	51
3.6.1. Kraftschlüssige Rotor-Gehäuse-Verbindung . . . . .	51
3.6.2. Formschlüssige Rotor-Gehäuse-Verbindung . . . . .	53
3.7. Maschinenberechnung . . . . .	56
3.7.1. Direktantrieb als Radialflussmaschine . . . . .	56
3.7.2. Direktantrieb als Axialflussmaschine . . . . .	64
3.7.3. Hochdrehzahlantrieb mit permanentmagneterregtem Synchronmotor . . . . .	71
3.7.4. Hochdrehzahlantrieb mit Käfigläufer-Asynchronmotor . . . . .	77
3.8. Konstruktion des Prototyps . . . . .	83
3.8.1. Fertigung des ersten Rotors . . . . .	86
3.8.2. Fertigung des zweiten Rotors . . . . .	88
<b>4. Messungen</b>	<b>91</b>
4.1. Beschreibung des Versuchsstands . . . . .	91
4.1.1. Offene Luftkühlung . . . . .	93
4.1.2. Kanalgeführte Luftkühlung . . . . .	93
4.2. Generatorische Leerlaufmessung . . . . .	96
4.2.1. Reibungsverluste . . . . .	98
4.2.2. Lastunabhängige Ummagnetisierungsverluste . . . . .	98

4.3. Kurzschlussmessungen und resultierende stromabhängige Zusatzverluste	99
4.4. Lastabhängiges Sättigungsverhalten: Drehmoment-Strom-Messungen	102
4.5. Lastabhängiges Sättigungsverhalten: Drehmoment-Bestromungswinkel-Diagramm	103
4.6. Belastungsmessungen	104
4.7. Wirkungsgradmessung	107
4.8. Thermische Messungen	108
4.8.1. Generatorischer Leerlauf	108
4.8.2. Motorischer Leerlauf	110
4.8.3. Lastpunkte	112
Erwärmung im Betriebspunkt BP2 - offene Luftkühlung	112
Erwärmung im Betriebspunkt BP2 - kanalgeführte Luftkühlung	115
Erwärmung im Betriebspunkt BP3 - offene Luftkühlung	116
Erwärmung im Betriebspunkt BP1	116
4.8.4. NEFZ-Fahrzyklus	118
4.9. Mögliche Ursachen für reduzierte Polradspannung	121
4.9.1. 2D- vs. 3D-Simulation	121
4.9.2. Magnetisierungsbedarf des Elektroblechs mit Fertigungseinfluss	122
4.9.3. Magnetisierung der Magnete	122
4.9.4. Asymmetrischer Läufer	123
4.9.5. Fazit	125
4.10. Zusammenfassung der Messungen mit erstem Rotor	126
4.11. Messungen mit zweitem Rotor	127
4.11.1. Generatorische Leerlaufmessung	127
4.11.2. Asymmetrischer Läufer	128
4.11.3. Kurzschlussmessung	128
4.11.4. Belastungsmessungen	130
4.11.5. Wirkungsgradmessung	133
4.11.6. Thermische Messungen	134
4.11.7. Zusammenfassung der Messungen mit zweitem Rotor	138
<b>5. Systemvergleich</b>	<b>141</b>
5.1. Vergleich von Radnabenmotor und Zentralantrieb	141
5.1.1. Vergleich der Stoffkosten	141
5.1.2. Vergleich des Wirkungsgrads	143
5.2. Stoffkostenvergleich von Direktantrieb und Hochdrehzahlantrieb	143
5.3. Energieverbrauch im Fahrzyklus NEFZ	145
5.3.1. Direktantrieb mit erstem Rotor	146

5.3.2. Direktantrieb mit zweitem Rotor . . . . .	149
5.3.3. Getriebe für Hochdrehzahlantriebe . . . . .	151
5.3.4. Hochdrehzahlantrieb mit PSM . . . . .	151
5.3.5. Hochdrehzahlantrieb mit ASM . . . . .	152
5.3.6. Zusammenfassung . . . . .	154
5.4. Energieverbrauch im Fahrzyklus ARTEMIS Highway 130 . . . . .	155
<b>6. Zusammenfassung</b>	<b>159</b>
<b>7. Ausblick</b>	<b>163</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>165</b>
A.1. Zusammenfassung der Motorparameter des Prototyps . . . . .	165
A.2. Zusammenfassung Zentralantrieb . . . . .	167
A.3. Verwendete Datenblätter . . . . .	169
A.3.1. Elektroblech M330-35 . . . . .	169
A.3.2. Vacodym 872AP . . . . .	170
A.4. Verwendete Messgeräte . . . . .	170
A.4.1. Fluke: Norma 5000 Leistungsanalysator . . . . .	170
A.4.2. Drehmomentmesswelle . . . . .	171
A.5. Verwendete Lastmaschine . . . . .	171
A.6. Konstruktionszeichnungen . . . . .	172
A.7. Formelverzeichnis . . . . .	185
A.8. Betreute studentische Arbeiten . . . . .	192
A.9. Eigene Publikationen . . . . .	193
<b>Literatur</b>	<b>194</b>