

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichenverzeichnis

VIII

1	Einleitung	1
1.1	Stand der Technik	2
1.2	Ziel und Aufbau der Arbeit	3
2	Grundlagen	5
2.1	Ferromagnetismus	5
2.1.1	Grundzusammenhänge	5
2.1.2	Bereichstheorie und Magnetisierungsprozess	7
2.1.3	Magnetisierungsarten und Flussdichteortskurven	8
2.2	Elektroblech	10
2.2.1	Verlusteigenschaften von Elektroblechen	10
2.2.2	Statische Verluste	10
2.2.3	Dynamische Verluste	11
2.2.4	Messung der Ummagnetisierungsverluste	14
2.2.5	Mechanische Spannungen	16
2.3	Schwarz-Christoffel-Transformation	18
2.3.1	Grundprinzip	18
2.3.2	Abbilden der Original- auf die Zwischenebene	20
2.3.3	Abbilden der Zwischen- auf die Bildebene	21
2.3.4	Typischer Ablauf	22
2.4	Skalares magnetostatisches Potential	23
2.5	Versuchsmaschine	25
2.5.1	Flussmessspulen	26
2.5.2	Kalorimetrische Verlustmessung	27
3	Berechnung der Feldverteilung im Ständerblechpaket	29
3.1	Unterteilung der Statorgeometrie	29
3.2	Feldberechnung im Zahnkopf	31
3.2.1	Numerische Voruntersuchung	31
3.2.2	Berechnungsmethode	32
3.2.3	Vergleich der Methode mit einer FE-Rechnung	36
3.3	Feldberechnung im Mittelteil des Zahns	37
3.3.1	Numerische Voruntersuchung	37
3.3.2	Berechnungsmethode	38

3.3.3	Vergleich der Methode mit einer FE-Rechnung	39
3.4	Feldberechnung im Joch	39
3.4.1	Numerische Voruntersuchung	40
3.4.2	Berechnungsmethode	40
3.4.3	Erweiterte Berechnungsmethode	43
3.4.4	Vergleich der Methoden mit einer FE-Rechnung	46
3.5	Validierung der Feldberechnung im Leerlauf	48
3.5.1	Vereinfachtes FE-Modell	49
3.5.2	Vollständiges FE-Modell	50
3.6	Einfluss von Belastung auf die Flussverteilung	52
3.6.1	Veränderung der Flussverteilung im Lastbetrieb	53
3.6.2	Veränderung der Flussverteilung im stationären Kurzschluss	55
3.7	Auswirkung des Bearbeitungsprozesses auf die Feldverteilung	59
3.8	Bewertung der Berechnungsdauer	59
4	Modellierung der Ummagnetisierungsverluste	61
4.1	Verlustmodell für isotropes Material	62
4.1.1	Berechnung der Elliptizität	62
4.1.2	Hystereseverluste	65
4.1.3	Klassische Wirbelstromverluste	70
4.1.4	Anomale Wirbelstromverluste	71
4.1.5	Validierung mit Messungen	75
4.1.6	Zusammenfassung	77
4.2	Modellierung anisotroper Materialeigenschaften	77
4.3	Einfluss des Bearbeitungsprozesses auf die Ummagnetisierungsverluste	82
4.4	Temperaturkompensation der Ummagnetisierungsverluste	88
4.5	Verlustberechnung im belasteten Zustand der Maschine	89
4.6	Parameteranpassung bei veränderten Materialeigenschaften	90
4.7	Überblick über das Verlustmodell	91
5	Einfluss radialer Kühlkanäle im Ständer auf die Ummagnetisierungsverluste	93
5.1	Berechnung der zusätzlichen Verluste durch radiale Kühlkanäle	94
5.2	Geometrische Einflussfaktoren	97
5.2.1	Luftspaltweite und Kühlkanallänge	98
5.2.2	Teilpaketlänge	100
5.2.3	Zahnbreite	100
5.2.4	Nutbreite	101
5.3	Verlustformel zur Berechnung der Kühlkanalverluste	102
5.3.1	Trennung der klassischen Wirbelstromverluste und der Wirbelstromverluste durch axiale Feldkomponenten	102
5.3.2	Aufstellen und Parametrisieren einer Formel zur Berechnung der Kühlkanalverluste	104
5.3.3	Berücksichtigung des Einflusses von Polradoberwellen	107
5.4	Messtechnische Validierung	108
5.5	Einfluss der Kühlkanallänge an einem Beispiel	110

Inhaltsverzeichnis	IX
6 Zusammenfassung und Ausblick	112
A Anhang	115
A.1 Untersuchte Maschinen	115
Literaturverzeichnis	116