

ANALYSE DER ERWÄRMUNG EINER ELEKTRISCHEN MASCHINE (TRANSIENT UND STATIONÄR)

M. R. Rezaei

1 EINLEITUNG

Die in einer elektrischen Maschine entstehenden ohmschen Verluste, Eisen- und Reibungsverluste werden in Wärme umgesetzt und in der Maschine gespeichert bzw. durch ein Kühlmittel an die Umgebung abgeführt.

Da das Kühlmittel nur bei sehr großen Maschinen unmittelbar durch die Verlustquelle geführt wird, entsteht insbesondere bei oberflächengekühlten Maschinen eine erhebliche Temperaturdifferenz zwischen Kühlmittel und stromführendem Leiter. Mit Rücksicht auf die Lebensdauer der Isolation darf die Wicklungstemperatur einen zulässigen Höchstwert nicht überschreiten (z.B. bei Wärmeklasse F 155°C, VDE 0530). Selbst eine relativ kurzfristige Überschreitung kann zu einer erheblichen Verkürzung der Lebensdauer führen. Aus diesem Grund hat die Analyse der transienten Erwärmung beim Anfahren der Maschine oder bei Überlast eine große Bedeutung. Neben den bekannten analytischen Verfahren mit Hilfe von Wärmequellennetzen bietet die Verwendung der FE-Methode, z.B. mit dem Programm „ANSYS“, eine sehr genaue Berechnungsmöglichkeit für die thermische Analyse elektrischer Maschinen.

2 VERLUSTE

Der Wirkungsgrad elektrischer Maschinen lässt sich aus der Summe der Verluste ermitteln. Im motorischen Betrieb gilt:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{P_{ab}}{P_{ab} + \sum P_v} = 1 - \frac{\sum P_v}{P_{ab} + \sum P_v} \quad (1)$$

Dabei ist P_{ab} die mechanische Leistung, P_{zu} die zugeführte elektrische Leistung und $\sum P_v$ die Summe aller Verluste. Leider sind die Verluste nicht gleichmäßig verteilt und die Wärmeleitfähigkeiten können um Größenordnungen differieren. Die einzelnen Verlustmechanismen sind:

2.1 Ohmsche Verluste

2.1.1 Stromwärmeverluste in den Wicklungen

Bei Wechselstrommaschinen muss für die Berechnung der Verluste die Stromverdrängung berücksichtigt werden. Die Berechnung der Zusatzverluste durch Stromverdrängung ist nur

bei einfachen Nutgeometrien noch analytisch möglich. Hier werden heute geeignete FE – Programme eingesetzt, deren Anwendung auf Wirbelstromprobleme jedoch erhebliche Sorgfalt und Erfahrung erfordert.

Die Stromverdrängung führt zu einer Vergrößerung der Stromverluste, die man durch eine Widerstandsvergrößerung um den Faktor k_r ausdrücken kann. Somit gilt:

$$P = k_r \cdot R_0 \cdot I_{eff}^2 \quad (2)$$

Mit der Stromverdrängung ist auch eine Feldverdrängung verknüpft [3].

2.1.2 Bürstenübergangsverluste

Diese Verluste treten bei Gleichstrommaschinen auf. Wegen der komplizierten Physik des Stromüberganges von der Bürste zum Kommutator werden die Bürstenübergangsverluste vorteilhaft aus der Übergangsspannung berechnet. Bezeichnet man mit U_k die Übergangsspannung an einer Bürste und mit I_a den gesamten Ankerstrom, d. h. den Gesamtstrom aller parallelgeschalteten Bürsten, so gilt für die Übergangsverluste:

$$P_{vii} = 2 U_k I_a \quad (3)$$

2.2 **Verluste im magnetischen Kreis**

Befinden sich die ferromagnetischen Werkstoffe des magnetischen Kreises einer elektrischen Maschine in einem sich zeitlich ändernden magnetischen Feld, so werden sowohl durch Hysterese als auch durch Wirbelströme Verluste verursacht. Diese Verluste können in zwei verschiedene Verlustarten eingeteilt werden: Ummagnetisierungsverluste durch die Grundwelle und Zusatzverluste durch Oberwellen des Luftspaltfeldes.

2.2.1 Ummagnetisierungsverluste

Die spezifischen -auf die Masse bezogenen- Ummagnetisierungsverluste p_U enthalten einen Anteil p_h , der durch Hysterese verursacht wird und einen Anteil p_{wb} , der durch Wirbelströme verursacht wird. Es gilt also:

$$p_u = p_h + p_{wb} \quad (4)$$

2.2.2 Verluste durch Oberwellen im Luftspalt

Oberwellen in der Feldkurve entstehen durch die Nutung (Leitfähigkeitsoberwellen) und durch die Wicklungsverteilung. Die Leitfähigkeitsoberwellen infolge Nutung haben die gleichen Ordnungszahlen wie die durch die Wicklungsverteilung unter anderem erzeugten sog. Nutharmonischen. Die Größe der Verluste hängt von der Wellenlänge der Oberwellen ab. Ist die Teilung der Begrenzungsflächen wesentlich größer als die Wellenlänge der Oberwellen, so schließt sich das Oberwellenfeld dicht unterhalb dieser glatten Oberflächen und führt bei Relativbewegung zu Oberflächenverlusten. Ist die Teilung kleiner als die Wellenlänge, schließt sich das Oberwellenfeld über die Zähne und Teile der Rückengebiete. Bei Relativbewegung zwischen Zähnen und Oberwellen entstehen in diesem Fall durch wechselnde Magnetisierung in den Zähnen Pulsationsverluste [2].

Sind Teilung und Wellenlänge von gleicher Größenordnung, so treten neben Pulsationsverlusten auch noch Oberflächenverluste in den Zahnköpfen auf.

2.3 Mechanische Verluste

Mechanische Verluste sind Verluste, die durch Gas-, Lager- und Bürstenreibung entstehen. Relativ genau berechenbar sind die Bürstenreibungsverluste und die Lagerverluste. Die Abhängigkeiten der Gasreibung lassen sich angeben und damit die Gasreibungsverluste mittels experimentell ermittelter Erfahrungswerte abschätzen. Für die zumindest bei wälzgelagerten Maschinen sehr kleinen Lagerreibungsverluste werden häufig Erfahrungswerte angesetzt.

2.4 Zusätzliche Verluste

Neben den behandelten Verlusten treten in rotierenden elektrischen Maschinen weitere Verluste auf, die nicht lokalisierbar sind und deren quantitative Ermittlung weder rechnerisch noch messtechnisch möglich ist. Diese Verluste werden Zusatzverluste genannt. Sie entstehen vor allem bei Belastung der Maschine und sind dann zum Quadrat des Belastungsstroms proportional.

3 BERECHNUNG DER ERWÄRMUNG IN ELEKTRISCHEN MASCHINEN

In den Bestimmungen „Elektrische Maschinen VDE 0530, Teil 1, Abschnitt 4“ sind unter anderem als Betriebsarten für die thermische Analyse einer elektrischen Maschine aufgeführt: Dauerbetrieb, Kurzzeitbetrieb und Aussetzbetrieb.

3.1 Die Erwärmung eines homogenen Körpers

Für eine erste Abschätzung wird die Maschine häufig als homogener Körper mit der Wärmekapazität C betrachtet. Die entstehenden Verluste P_v in einer elektrischen Maschine werden in der Wärmekapazität C gespeichert

$$P_{auf} = C \cdot \frac{d\vartheta(t)}{dt} \quad (5)$$

oder über die Oberfläche A an die Umgebung abgegeben:

$$P_{ab} = \alpha \cdot A \cdot \Delta\vartheta(t) \quad (6)$$

In dieser Gleichung ist α der Wärmeübergangskoeffizient und $\Delta\vartheta$ die Differenz der Temperaturen von Körperoberfläche und Kühlmittel.

Aus der Wärmebilanz folgt:

$$P_v = C \cdot \frac{d\vartheta(t)}{dt} + \alpha \cdot A \cdot \Delta\vartheta(t) \quad (7)$$

Löst man diese Differentialgleichung nach $\Delta\vartheta$, so ergibt sich:

$$\Delta\vartheta(t) = \Delta\vartheta(0) e^{-\frac{t}{T_e}} + \Delta\vartheta(\infty) (1 - e^{-\frac{t}{T_e}}), \quad (8)$$

wobei:

$$T_e = \frac{C}{\alpha A} \quad (9)$$

als thermische Zeitkonstante bezeichnet wird. Für $t \rightarrow \infty$ wird der stationäre Wert

$$\Delta\vartheta(\infty) = \frac{P_v}{\alpha A} \quad (10)$$

erreicht. In einer elektrischen Maschine sind verschiedene Wärmequellen vorhanden, von denen die Verluste über unterschiedliche Wärmewiderstände an die Oberfläche geleitet werden, so dass der Temperaturanstieg nicht exakt nach einer reinen e-Funktion erfolgt. Weiter können sich die Kühlverhältnisse je nach Betriebszustand ändern, so dass man für die thermische Zeitkonstante eine Erwärmungs- und eine Abkühlzeitkonstante erhält [1].

Eine elektrische Maschine besteht aus unterschiedlichen Werkstoffen und Wärmekapazitäten, in denen die Wärmequellen nicht gleichmäßig verteilt sind. Für die genauere Berechnung wird deshalb das Wärmequellennetz oder die FE-Methode verwendet. Dadurch kann die Maschine sehr genau thermisch nachgebildet und analysiert werden. Heute sind zahlreiche gut bedienbare FE-Programme verfügbar, deren numerische Verfahren auch für die thermische Analyse dreidimensionaler Probleme gut geeignet sind.

Für die hier dargestellten Beispielrechnungen wurde das Programm ANSYS verwendet. Untersucht wurde die transiente Erwärmung eines permanentmagneterregten Synchronmotors ($p = 12$) für Dauerlast und unter kurzzeitiger Überlast. Aufgrund der Motorgeometrie und der Kühlung durch einen Wassermantel war hier ein zweidimensionales Rechenmodell völlig ausreichend. Die Erwärmungsberechnung wurde mit den ohmschen Verlusten und Eisenverlusten durchgeführt. Zur Berechnung wurden die Verluste gleichmäßig verteilt.

3.2 Dauerbetrieb

Dauerbetrieb liegt vor, wenn im Betrieb bei konstanter Belastung der thermische Beharrungszustand erreicht wird. Aus der angegebenen bzw. berechneten Erwärmungszeitkonstante ist zu entnehmen, dass in jedem Fall ein mehrstündiger Betrieb erforderlich ist. Der Temperaturverlauf ergibt sich mit $\Delta\vartheta = 0$ zu :

$$\vartheta(t) = \vartheta_k + \Delta\vartheta(\infty) (1 - e^{-\frac{t}{T_e}}) \quad (11)$$

Die erreichte Endtemperatur ist in diesem Fall maximal gleich der zulässigen Höchsttemperatur (**Bild 1**).

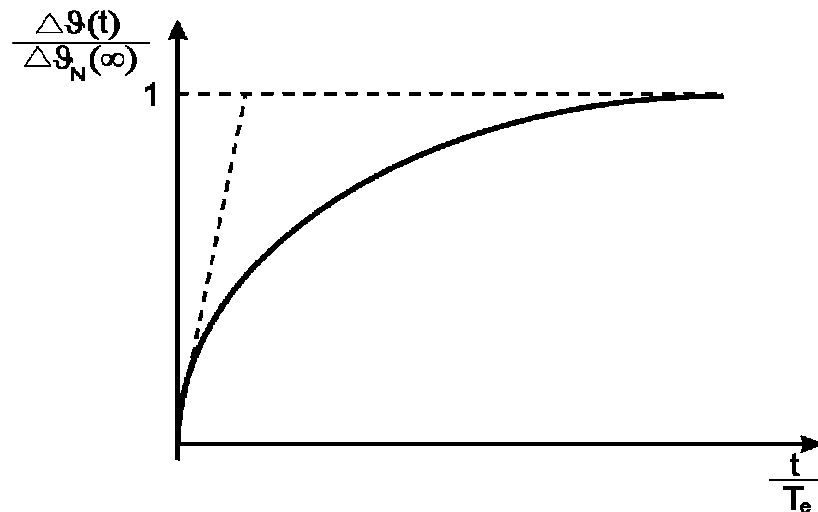


Bild 1: Temperaturverlauf (Dauerbetrieb)

Für die ausgewählte Beispielmachine genügt aufgrund der Symmetrie die Betrachtung einer Nutteilung, wegen der besseren Anschauung wird dennoch über drei Nutteilungen gerechnet. Weiter wird davon ausgegangen, dass kein Wärmeaustausch mit dem Rotor der Maschine über die Luft erfolgt. Voraussetzung für diese Berechnung ist die Verfügbarkeit einer sicheren Datenbasis für die Verluste, die Wärmeleitwerte und die Wärmeübergangskoeffizienten. Gewisse Unsicherheiten entstehen bei der Ermittlung der resultierenden Wärmeleitfähigkeit der Wicklung und der Wärmeübergangszahlen zum Wasser. Hier wurde auf Erfahrungswerte zurückgegriffen. **Bild 2** zeigt die stationäre Temperaturverteilung in der Maschine für den Dauerbetrieb mit Nennlast.

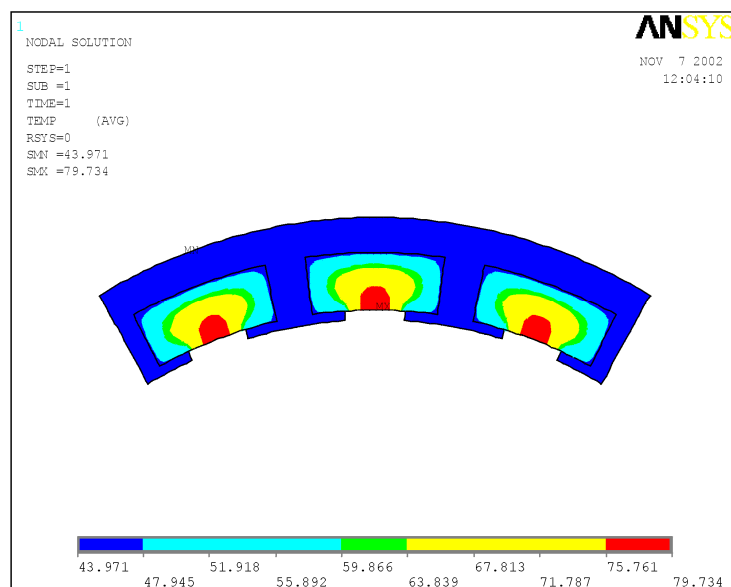


Bild 2: Temperaturverlauf bei Nennleistung im Dauerbetrieb für wassergekühlte PPSM

$$\alpha = 3000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}, \text{ Wassertemperatur} = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Es ist einleuchtend, dass bei dieser Art der Kühlung der heißeste Punkt immer in der Nutmitte der Wicklung liegen muss. Die Höchsttemperatur erreicht den Wert von 79.7 °C, wobei die analytische Methode (Wärmequellenetz) als Maximaltemperatur den Wert von 75 °C ergeben

hat. Die Abweichung entsteht vor allem aufgrund des grundsätzlichen Unterschieds dieser beiden Berechnungsmethoden sowie der Anwendung unterschiedlicher Erfahrungswerte.

Zur Auswahl der Wärmeklasse dieser Maschine reicht diese Berechnung nicht aus, da bei der Auslegung vorgesehen worden ist, dass sie bei Kurzbetrieb mehrfach überlastet werden kann, d. h. um eine Aussage über die Wärmeklasse zu treffen, muss auch das Ergebnis der transienten Analyse (Kurzzeitbetrieb) berücksichtigt werden.

3.3 Kurzzeitbetrieb

Kurzzeitbetrieb bedeutet „ein Betrieb mit konstantem Belastungszustand, der aber nicht so lange dauert, dass der thermische Beharrungszustand erreicht wird und einer nachfolgenden Pause, die so lange besteht, bis die Maschinentemperatur nicht mehr als 2 K von der Temperatur des Kühlmittels abweicht (VDE 0530)“. Eine für Dauerbetrieb ausgelegte Maschine erreicht in diesem Lastfall bei Nennleistung nicht den Beharrungszustand (**Bild 3a**).

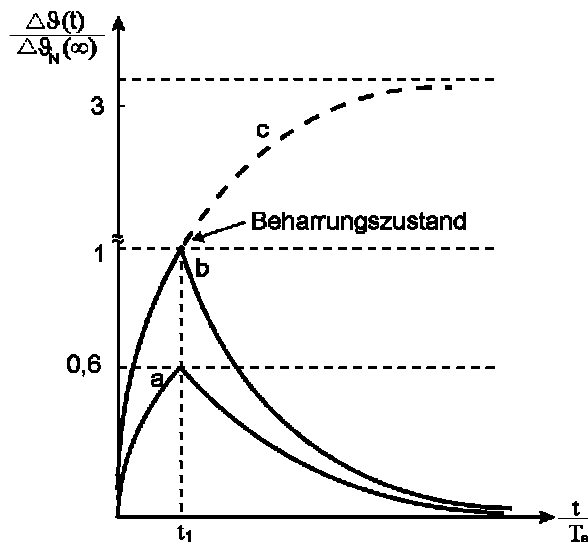


Bild 3: Temperaturverlauf bei: a) Nennlast, Kurzzeitbetrieb
b) Überlast, Kurzzeitbetrieb
c) Überlast, Dauerbetrieb

Im Kurzzeitbetrieb ist somit eine Überlastung möglich. In diesem Fall kann in kurzer Zeit die Grenztemperatur des Isoliersystems erreicht werden. Eine Abschätzung der thermischen Überlastbarkeit ist mit den Gleichungen 8 und 10 möglich.

Wegen der größeren Verluste P_{vii} bei Überlast ist im Kurzzeitbetrieb die theoretische, aber nicht erreichte Beharrungstemperatur bezogen auf die Verluste größer als bei Nennbelastung (**Bilder 3b und 3c**) [1]:

$$\Delta\vartheta = \frac{P_{vii}}{P_{vN}} \cdot \Delta\vartheta_N(\infty) \quad (12)$$

Bild 4 zeigt zwei Temperaturberechnungen für die Beispielmaschine zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten bei Nennbelastung. **Bild 5** zeigt den Temperaturverlauf für fünffache

Belastung nach 50 und 125 Sekunden. Diese beide Bilder verdeutlichen vor allem den schnellen Temperaturanstieg im Vergleich zur Nennbelastung.

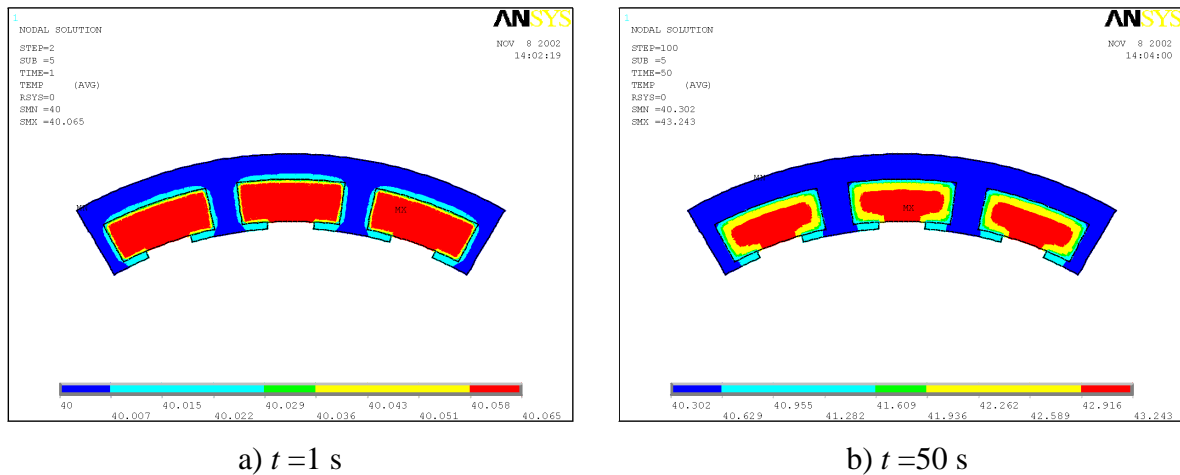


Bild 4: Temperaturverteilung für PPSM nach $t = 1$ s und $t = 50$ s

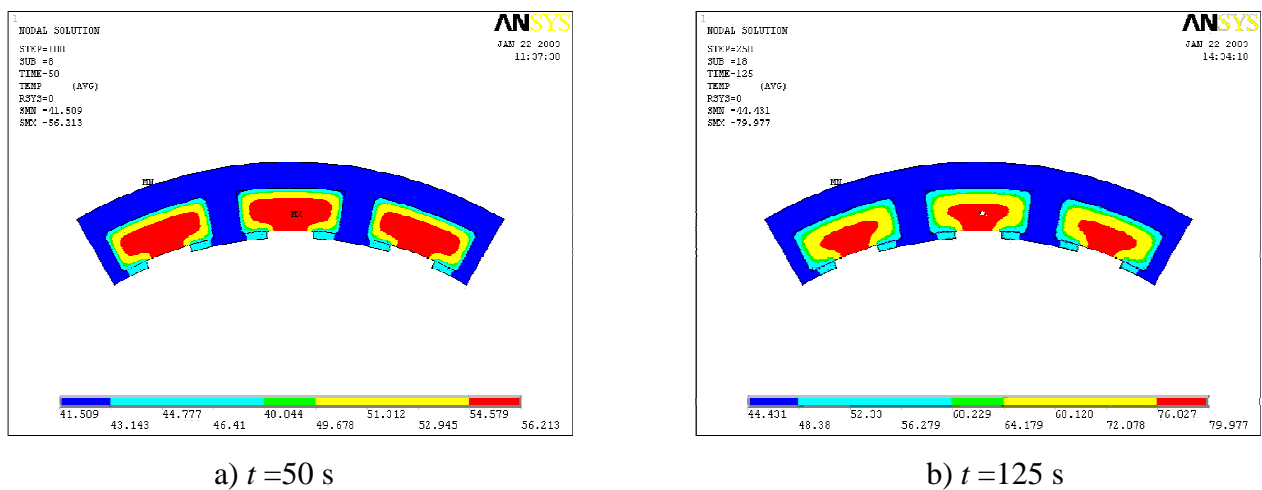


Bild 5: Temperaturverteilung bei Überlast

Besonderes bei der fünffachen Belastung erreicht die Maschine in kurzer Zeit ($t_l = 125$ s), genau wie es erwartet wird, die Höchsttemperatur bei Nennlast im Dauerbetrieb. Dies bestätigt die Lösung der Differentialgleichungen für den Kurzzeitbetrieb (Gleichung 12). Für diese Maschine wird die Temperatur bei Überlast in kurzer Zeit (innerhalb des Kurzzeitbetriebs) viel größer als die Beharrungstemperatur. Aufgrund der hohen auftretenden Temperatur ist die richtige Auswahl der Wärmeklasse in diesem Fall abhängig von der Analyse der Erwärmung im Kurzzeitbetrieb.

Bild 6 zeigt die FE-Rechnung für die PPSM im Kurzzeitbetrieb bei der fünffachen Belastung nach 500 Sekunden. Die Temperatur erreicht den Grenzwert für die Wärmeklasse F von 155 °C. Der Vergleich zwischen diesem Ergebnis und der Berechnung für den Dauerbetriebszustand zeigt, dass diese Maschine bereits mit der Wärmeklasse F über erhebliche thermische Reserven verfügt.

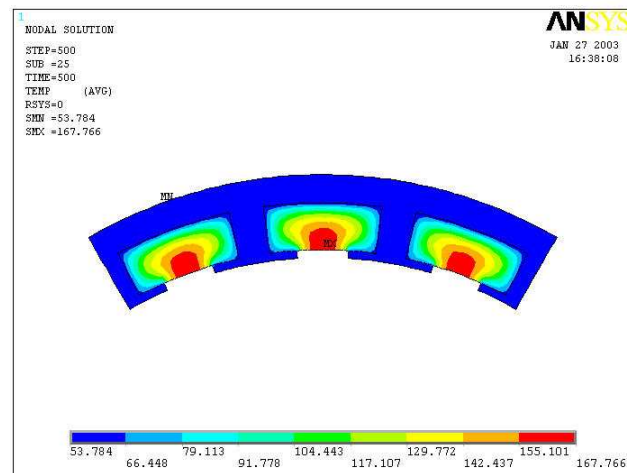


Bild 6: Temperaturverlauf bei Überlast nach 500 Sekunden

4 LITERATUR

- [1] H. Eckhardt: *Grundzüge der elektrischen Maschinen*. B. G. Teubner, Stuttgart 1982
- [2] K. Vogt: *Berechnung elektrischer Maschinen*. VCH: Weinheim; New York; Basel; Cambridge; Tokyo 1996
- [3] A. Lange: *Analytische Methoden zur Berechnung elektromagnetischer und thermischer Probleme in elektrischen Maschinen*. Dissertation TU Braunschweig 2000