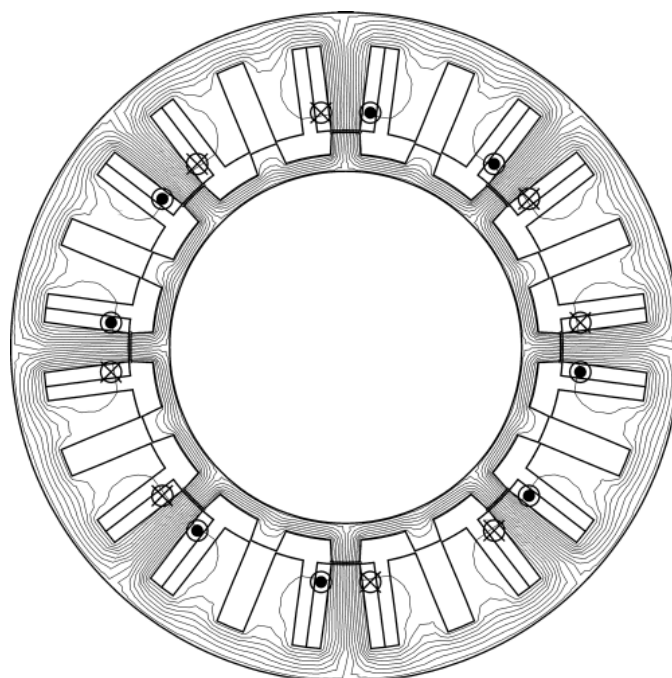


# SIMULATION GESCHALTETER RELUKTANZMASCHINEN (SRM) MIT SIMPLORER

## F. Laube

Geschaltete Reluktanzmaschinen (SRM) zeichnen sich durch eine einfache, robuste und kostengünstige Motorkonstruktion aus. Sie besitzen keine Magnete oder Wicklungen im Läufer und die Statorwicklung ist als einfache Polwicklung (*race track coil*) mit relativ kurzen Wickelköpfen (geringe Baulänge) ausgeführt. Niederpolige Reluktanzmaschinen sind aufgrund der genannten Vorteile und der relativ geringen Eisenverluste für hohe Drehzahlbereiche geeignet. Zur Erzielung hoher Kraftdichten ist jedoch der Übergang auf höhere Polpaarzahlen erforderlich (größere Anzahl gleichzeitig kraftbildender Pole, geringere Massen). In **Bild 1** ist als Beispiel eine 8polige Maschine dargestellt. Den genannten Vorteilen von SRM's stehen jedoch auch einige Nachteile gegenüber. So ist der erforderliche Wechselrichteraufwand relativ groß, da die Magnetisierungsblindleistung wie bei der Asynchronmaschine über den Luftspalt auf den Rotor übertragen werden muß. Daraus ergibt sich auch die Forderung nach möglichst kleinen Luftspalten. Ein weiterer Nachteil sind die insbesondere bei dreisträngigen Ausführungen auftretenden starken Drehmomentschwankungen, die sich negativ auf das dynamische Verhalten der Maschine auswirken und zu einer erheblichen Geräuscentwicklung führen können [1].



**Bild 1:** Dreisträngige SRM mit  $N_S/N_R=24/16$  (Geometrie und Feldbild)

Um genaue Angaben über die tatsächlichen Leistungsdaten der Maschine, die erforderliche Windungszahl und die Wechselrichteranforderungen machen zu können, ist nach der Erstellung der Maschinengeometrie mit Hilfe analytischer Verfahren (Grobauslegung) und numerischer Berechnungen (Optimierung der Geometrie mit FE-Methode) die Simulation der zeitlichen Verläufe von Strom, Spannung und Drehmoment bei verschiedenen Drehzahlen erforderlich [2], [3]. Mit Hilfe der Design- und Analysesoftware SIMPLORER® [4] können Reluktanzmaschinen am Wechselrichter mit den Elementen des elektrischen Netzes (**Bild 2**) und des Zustandsgraphen (**Bild 3**) übersichtlich strukturiert und modelliert werden. Auch die Datenauswertung kann direkt auf dem Sheet mit aktiven Elementen vorgenommen werden (**Bild 4, Bild 5**).

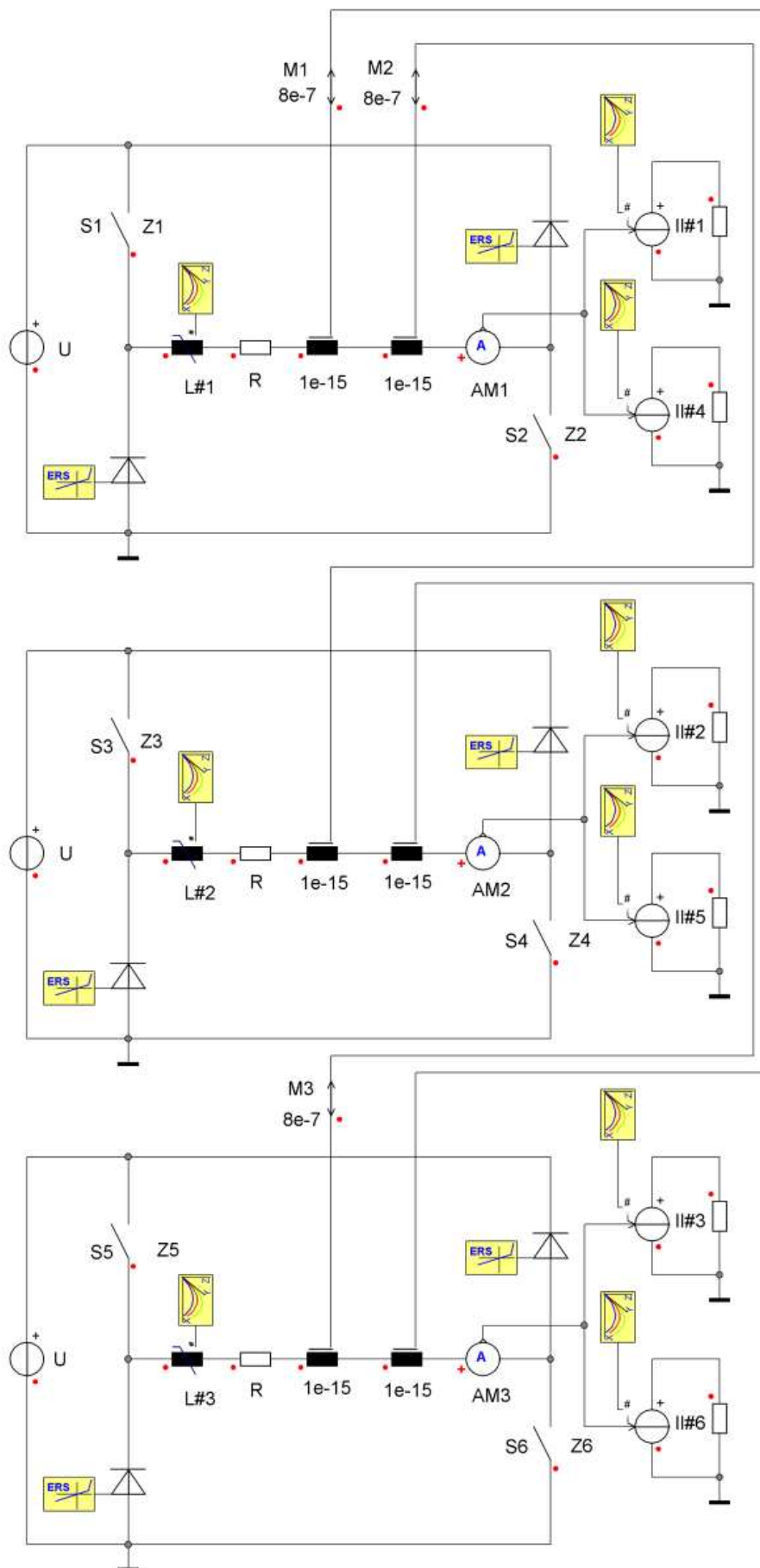
Da für den Vierquadrantenbetrieb Geschalteter Reluktanzmaschinen nur eine Stromrichtung erforderlich ist, wird je Strang ein 2Q Steller gemäß **Bild 2** verwendet. Im Simulationsmodell werden die IGBT's zunächst als ideale Schalter betrachtet (*S1-S6*) Das elektrische Verhalten jedes Maschinenstranges wird durch

$$u(t) = R \cdot i(t) + \frac{d\Psi(t)}{dt} \quad (1)$$

beschrieben. Im Modell können die Maschinenstränge also jeweils durch ihren *Widerstand* ( $R$ ) und die *Nichtlineare Induktivität* ( $L\#$ ) nachgebildet werden. Die nichtlinearen Induktivitäten ( $\Psi(i, \vartheta)$ ) liegen als 3D-Kennlinienschar (*Look-up Tables*) aus einer FE-Rechnung (FEMAG) vor. Theoretisch könnte das Drehmoment jeder Phase aus den bekannten Abhängigkeiten der Flußverkettung vom Strom und dem relativen Drehwinkel nach

$$M = \frac{\partial \int_0^i \Psi(i', \vartheta) \partial i'}{\partial \vartheta} \quad (2)$$

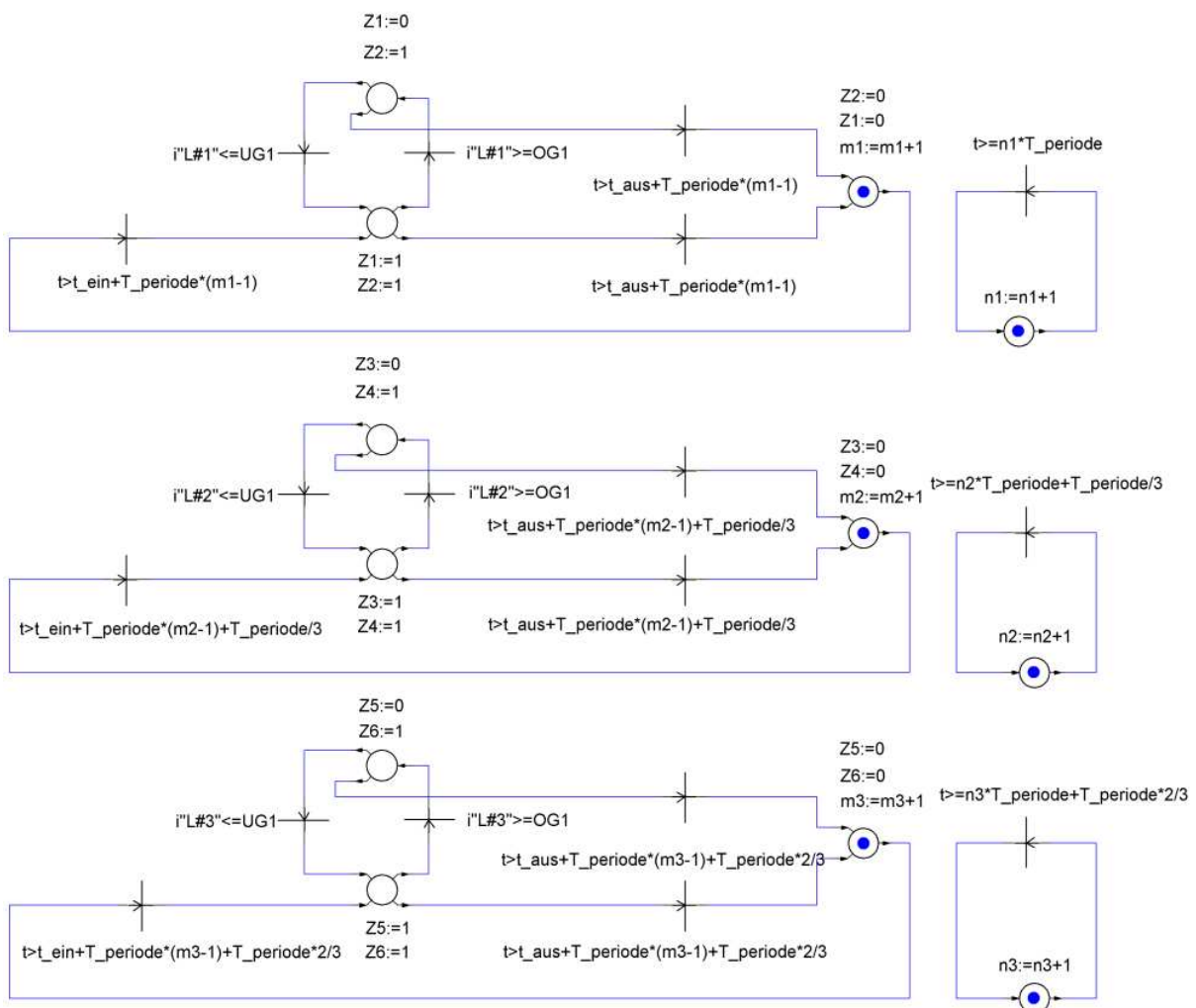
berechnet werden. Aufgrund der Aufsummierung numerischer Ungenauigkeiten ist die Drehmomentberechnung mit Gl. (2) jedoch ungeeignet [5]. Die Feldberechnung liefert neben den Werten für die Flußverkettung auch die stellungs- und stromabhängigen Drehmomentbeiträge der einzelnen Phasen ( $M(i, \vartheta)$ ), so dass auch diese jeweils als 3D-Kennlinienschar vorliegen. Die Zuordnung der entsprechenden Werte für die Strangmomente erfolgt mit Hilfe des Internen SIMPLORER Elementes *Nichtlineare stromgesteuerte Stromquelle* ( $II\#$ ). Neben dem Drehmoment wurde bei dem hier betrachteten Maschinenmodell die Exzentrizitätskraft bei einer definierten Rotorexzentrizität von 20% berechnet ( $II\#4, II\#5, II\#6$ ) [6], [7].



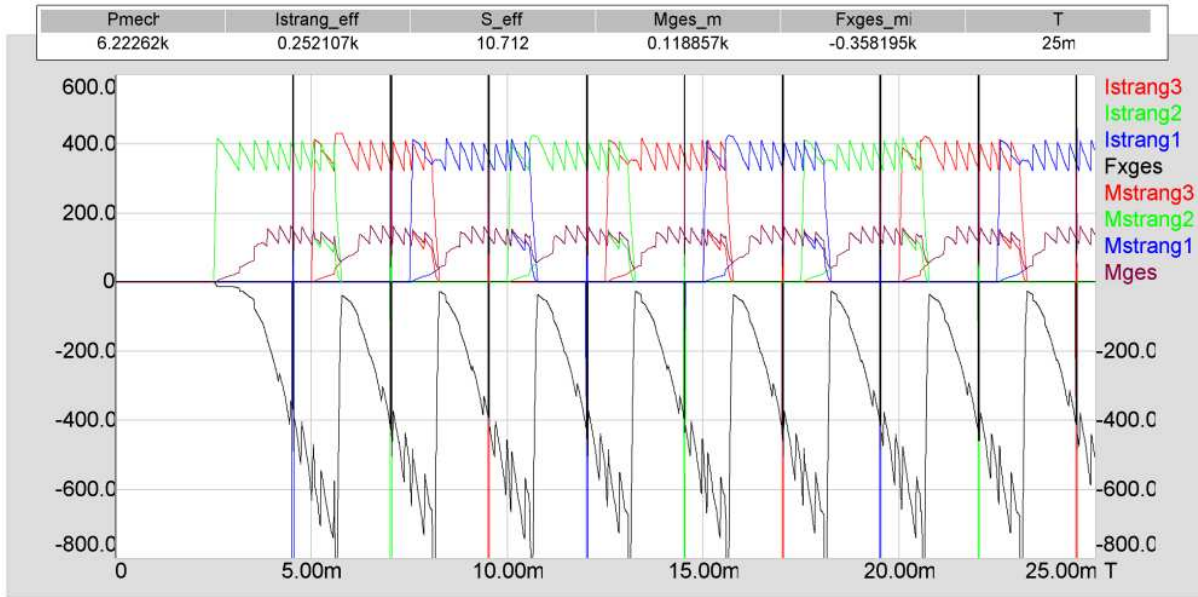
**Bild 2:** Simulations-Sheet des Maschinenmodells (elektrische Schaltung)

Bei den hier betrachteten dreisträngigen Maschinenausführungen ist die magnetische Kopplung zwischen den Strängen relativ gering. Die Koppelinduktivitäten sind etwa um eine Größenordnung kleiner als die Hauptinduktivitäten. Trotzdem sollten sie im Simulationsmodell berücksichtigt werden, da sie gerade im Bereich hoher Drehzahlen (spannungsgesteuerter Betrieb ohne Zwischen-takten, **Bild 5**) den Stromverlauf beeinflussen. Im Simulationsmodell wurde von einer konstanten mittleren Koppelinduktivität ( $M$ ) ausgegangen. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass auch die Koppelinduktivitäten bei SRM's winkelabhängig sind und dass diese Winkelabhängigkeit bei Ausführungen mit Strangzahlen  $m_s > 3$ , bei denen der Einfluss der Koppelinduktivitäten steigt, gegebenenfalls durch die Verwendung des Elementes *Extern gesteuerte Gegeninduktivität (MT)* zu berücksichtigen ist.

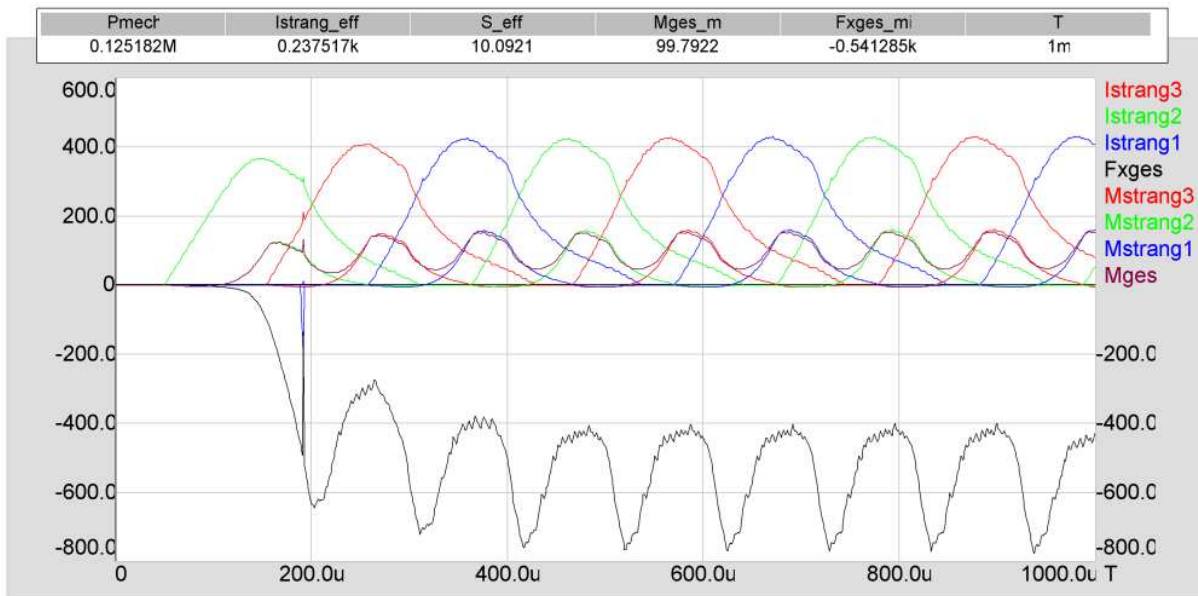
In **Bild 3** ist die Steuerung der Maschine für den Motorbetrieb mit Zustands-grafen dargestellt. Auf ähnliche Weise läßt sich auch der Generatorbetrieb modellieren.



**Bild 3:** Zweipunktregelung mit Zustands-grafen



**Bild 4:** Simulationsergebnisse ( $n=500 \text{ min}^{-1}$ ; Zwischentakten)



**Bild 5:** Simulationsergebnisse ( $n=12000 \text{ min}^{-1}$ ; ohne Zwischentakten)

**Tabelle 1:** Zündwinkel und Schaltschwellen

Drehzahl	$n=500 \text{ min}^{-1}$	$n=12000 \text{ min}^{-1}$
Vorzündwinkel Einschalten	$\vartheta_{\text{ein,vor}} = 0^\circ \text{ geom.}$	$\vartheta_{\text{ein,vor}} = 4^\circ \text{ geom.}$
Vorzündwinkel Ausschalten	$\vartheta_{\text{aus,vor}} = 2^\circ \text{ geom.}$	$\vartheta_{\text{aus,vor}} = 5^\circ \text{ geom.}$
Stromobergrenze	$I_{\text{max}} = 400 \text{ A}$	$I_{\text{max}} = 600 \text{ A}$
Stromuntergrenze	$I_{\text{min}} = 325 \text{ A}$	$I_{\text{min}} = 450 \text{ A}$

In **Bild 4** und **Bild 5** sind die Verläufe der Strangströme, der Strangmomente, des resultierenden Gesamtmomentes und der Radialkraftverlauf beispielhaft für

500 min<sup>-1</sup> und 12000 min<sup>-1</sup> dargestellt. Die **Tabelle 1** enthält die zugehörigen Zündwinkel und Schaltschwellen. Grundsätzlich wird zwischen zwei Ansteuerungsverfahren unterschieden, dem Betrieb mit Zwischentakten (stromgesteuerter Betrieb) und dem Betrieb ohne Zwischentakten (spannungsgesteuerter Betrieb). Der stromgesteuerte Betrieb wird bei niedrigen Drehzahlen (z.B. 500 min<sup>-1</sup>, **Bild 4**) angewendet. Der Strom wird durch Zwischentakten auf einen bestimmten Wert geregelt, womit der resultierende Stromverlauf näherungsweise der idealen Rechteckform entspricht. Der Drehmoment- und Exzentrizitätskraftverlauf kann durch die Wahl geeigneter Stromgrenzen und Schaltwinkel beeinflusst bzw. optimiert werden (**Tabelle 1**). Die hohen Schaltfrequenzen können gerade bei großen Leistungen zu erheblichen Schaltverlusten in den IGBT's führen. Bei hohen Drehzahlen ist es daher günstiger, durch geeignete Wicklungsauslegung (Windungszahl) in den spannungsgesteuerten Betrieb überzugehen (z.B. 12000 min<sup>-1</sup>, **Bild 6**). Der Strangstrom wird durch die Gegenspannung des Motors begrenzt, so dass die Stromgrenze nicht mehr erreicht wird. Die Verläufe der Maschinengrößen können nur durch Wahl der Schaltwinkel beeinflusst werden (**Tabelle 1**). Der Übergang in den spannungsgesteuerten Betrieb bei hohen Drehzahlen wirkt sich neben der Reduzierung der Schaltfrequenz auch positiv auf den erforderlichen Wechselrichteraufwand aus, da zum Erreichen gleicher mechanischer Leistung eine niedrigere Spannung als für den stromgesteuerten Betrieb erforderlich ist.

- [1] H.-J. Wehner: Betriebseigenschaften, Ausnutzung und Schwingungsverhalten bei geschalteten Reluktanzmotoren, Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg 1997
- [2] F. Laube: Beitrag zur Auslegung höherpoliger geschalteter Reluktanzmaschinen (SRM) niedriger Drehzahl für „High Torque“ Anwendungen, Jahresbericht 1998 IMAB TU Braunschweig
- [3] A. Lange, W.-R. Canders, F. Laube, H. Mosebach: Comparison of different drive systems for a 75kW electrical vehicle drive, ICEM 2000, Espoo (Finland), 28.-30. August 2000
- [4] Benutzerhandbuch SIMPLORER Version 4.2, SIMEC GmbH, Chemnitz 1999
- [5] L. Löwenstein, G. Henneberger: Modellierung von Reluktanzmaschinen mit SIMPLORER, SIMPLORER Workshop 2001, Chemnitz 2001
- [6] F. Laube: Simulation der durch Rotorextrizität hervorgerufenen Radialkräfte bei Geschalteten Reluktanzmaschinen mit Hilfe der Koppelschnittstelle zwischen SIMPLORER und FE-Feldberechnungsprogrammen, SIMPLORER Workshop 2001, Chemnitz 2001

- [7] F. Laube, W.-R. Canders: Compensation of unbalanced magnetic pull in Switched Reluctance Machines using parallel pole windings, eingereicht für ICEM 2002, Bruges (Belgium) 25.-28. August 2002