

## Beitrag zur Auslegung höherpoliger geschalteter Reluktanzmaschinen (SRM) niedriger Drehzahl für "High Torque" Anwendungen

### F. Laube

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurden verschiedene Antriebskonzepte verglichen, welche den an einen typischen "High Torque" Antrieb gestellten Anforderungen entsprechen. Ziel war es, Antriebe für einen Leistungsbereich von 10-100kW (typisch 50kW), Drehzahlen  $n_{\text{Nenn}} \leq 300$  1/min, und eine 3 fache Momentenüberlastbarkeit (bei  $n_{\text{ü}} = n_{\text{Nenn}}/3$ ) für 10 Sekunden auszulegen.

Um die genannten Anforderungen zu erfüllen, müssen die Maschinen sehr große Drehmomente (1600Nm im Typenpunkt, 4800Nm im Überlastpunkt) liefern.

Einen ersten Überblick über die für diese Aufgaben geeigneten Antriebe erhält man aus der Betrachtung der Kurzschlußströme. Hier zeigt sich, daß Maschinen mit hohen Kurzschlußströmen einen geringen Wechselrichteraufwand erfordern und deshalb für Anwendungen mit hoher Momentenüberlastbarkeit besonders gut geeignet erscheinen.

Umso interessanter ist daher die Frage, wie sich Maschinen, die nach in den letzten Jahren vieldiskutierten Reluktanzkonzepten gebaut werden, an diese Aufgabenstellung anpassen lassen.

Niederpolige Reluktanzmaschinen mit Polausprägung in Ständer und Läufer (geschaltete Reluktanzmaschine, SRM; typisch Statorzähne/Rotorzähne  $N_s/N_r = 6/4$  oder  $8/6$ ) sind

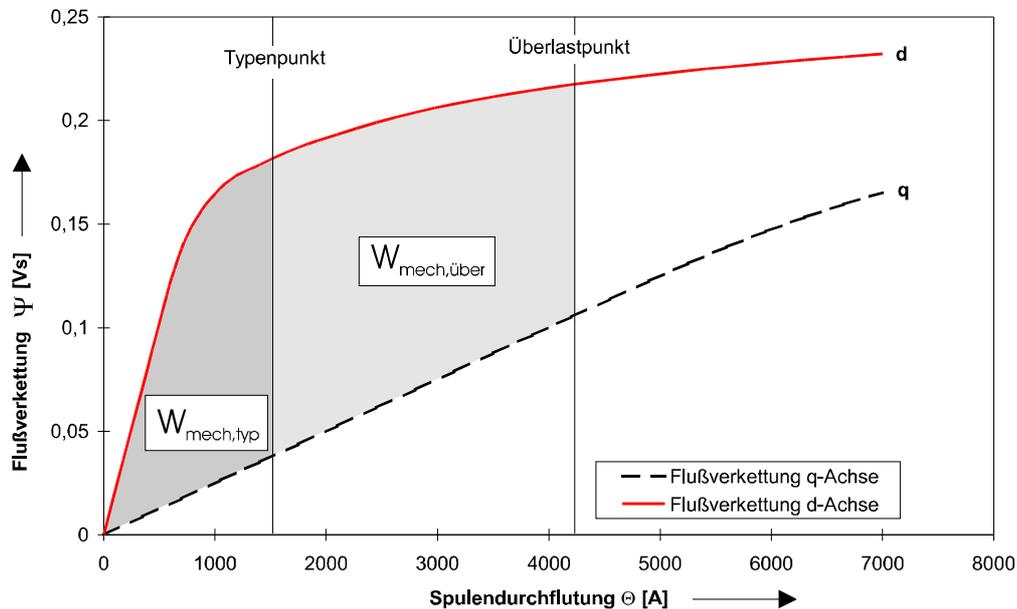
aufgrund ihrer relativ geringen Ansteuerfrequenz ( $f = N_r \cdot n$ ) und den daraus resultierenden niedrigen Eisenverlusten eher für höhere Drehzahlen geeignet. Für die zur Erzeugung hoher Momente erforderlichen großen Flüsse stehen bei niederpoligen Maschinen nur eine geringe Anzahl gleichzeitig aktiver Pole zur Verfügung, was zu sehr großen Spulendurchflutungen führt. Außerdem führen die großen Flußwerte zu einer starken magnetischen Beanspruchung der Joch- und Zahngebiete was sich ungünstig auf die Aktivmasse und das Maschinenvolumen auswirkt. Es ist daher zweckmäßig, die Anzahl der gleichzeitig momentbildenden Zähne durch den Übergang zu höherpoligen Maschinen zu vergrößern. Der erforderliche Maschinenfluß teilt sich nun besser auf, d.h. Joch und Zahngebiete müssen nur noch die Teilflüsse der einzelnen Spulen führen und sind somit weniger stark magnetisch belastet. Eisenmasse, Aktivvolumen und Trägheitsmoment der Maschine werden dadurch erheblich verkleinert. Zusätzlich ergeben sich aufgrund der kleineren Wicklungsflächen der Spulen Vorteile bezüglich der Wärmeabfuhr aus der Wicklung (kleinere Nutwandbelastung, größere Stromdichten möglich) und der Momentengleichförmigkeit. Es ist jedoch zu beachten, daß die Eisenverluste durch die nun höhere Statorfrequenz ansteigen und bei höheren Drehzahlen eventuell verlustärmere Bleche (z.B. Mittelfrequenzblech) eingesetzt werden sollten.

Bei der Berechnung des mittleren Momentes wird zunächst von einer Maschinendrehzahl ausgegangen, die so gering ist, daß der Maschinenstrom näherungsweise den theoretisch vorausgesetzten rechteckförmigen zeitlichen Verlauf hat.

Die Berechnung des Strangmomentes erfolgt zweckmäßig über die Änderung der magnetischen Energie bei der Bewegung des Rotors von der Querstellung (q-Achse) in die Längsstellung (d-Achse). Die magnetischen Koenergien der q- und der d-Achse erhält man durch numerische Integration der Kennlinien der jeweiligen Flußverkettungen  $\Psi_q(\Theta_{sp})$   $\Psi_d(\Theta_{sp})$ . Die Flußverkettung in der d-Achse läßt sich analytisch mit relativ hoher Genauigkeit berechnen (Magnetkreis mit konstantem Luftspalt). Schwieriger ist die Berechnung der Flußverkettung in der q-Achse, da

hier Streuflüsse einen erheblichen Einfluß haben. Die für niederpolige Maschinen geltenden analytischen Näherungsformeln zur Berechnung von  $\Psi_q$  führen zu sehr ungenauen Ergebnissen, so daß auf numerische Methoden zur Feldberechnung zurückgegriffen werden sollte.

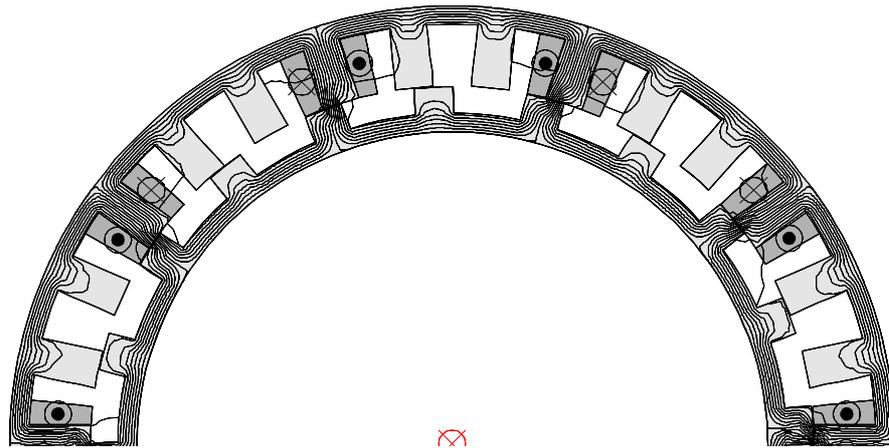
Im **Bild 1** sind die erläuterten Zusammenhänge graphisch dargestellt.



**Bild 1: Flußverkettung und mechanische Energie SRM (2p=10)**

Anhand dieses Bildes lassen sich qualitative Aussagen über die Ausnutzung von SRM bezüglich Drehmoment und Wechselrichteraufwand sowie Grenzen bei der Auslegung der Maschine ableiten. Die von den Flußverkettungen der d- und der q-Achse aufgespannte Fläche entspricht der mechanischen Energie der Anordnung und ist proportional dem Drehmoment. Sie sollte im Sinne einer guten Drehmomentausnutzung so groß wie möglich sein, d.h. die maßgeblichen Kennlinien der Flußverkettungen sollten möglichst weit auseinander liegen (gutes Reluktanzverhältnis). Dazu sind die kraftbestimmenden Parameter der Zahnungsgeometrie der Maschine (Luftspalt, Polteilung, Zahnbreite, Nutbreite und Zahnhöhe) zu optimieren. Aus dem Abstand der Kennlinien für  $\Psi_d$  und  $\Psi_q$  lassen sich auch qualitative Aussagen bezüglich des zu erwartenden Wechselrichteraufwandes treffen. Grundsätzlich gilt: je größer der Abstand der Kennlinien ist, desto geringer ist der zu erwartende Wechselrichteraufwand, d.h. bei größeren Durchflutungswerten kann durch Erhöhung der Nutdurchflutung eine Drehmomentsteigerung erreicht werden, gleichzeitig steigen der Wechselrichteraufwand und die Stromwärmeverluste jedoch überproportional an. Bei der Maschinenauslegung sollte man sich daher auf den Bereich großer Energieflächen ( $W_{\text{mech}}$ ) beschränken.

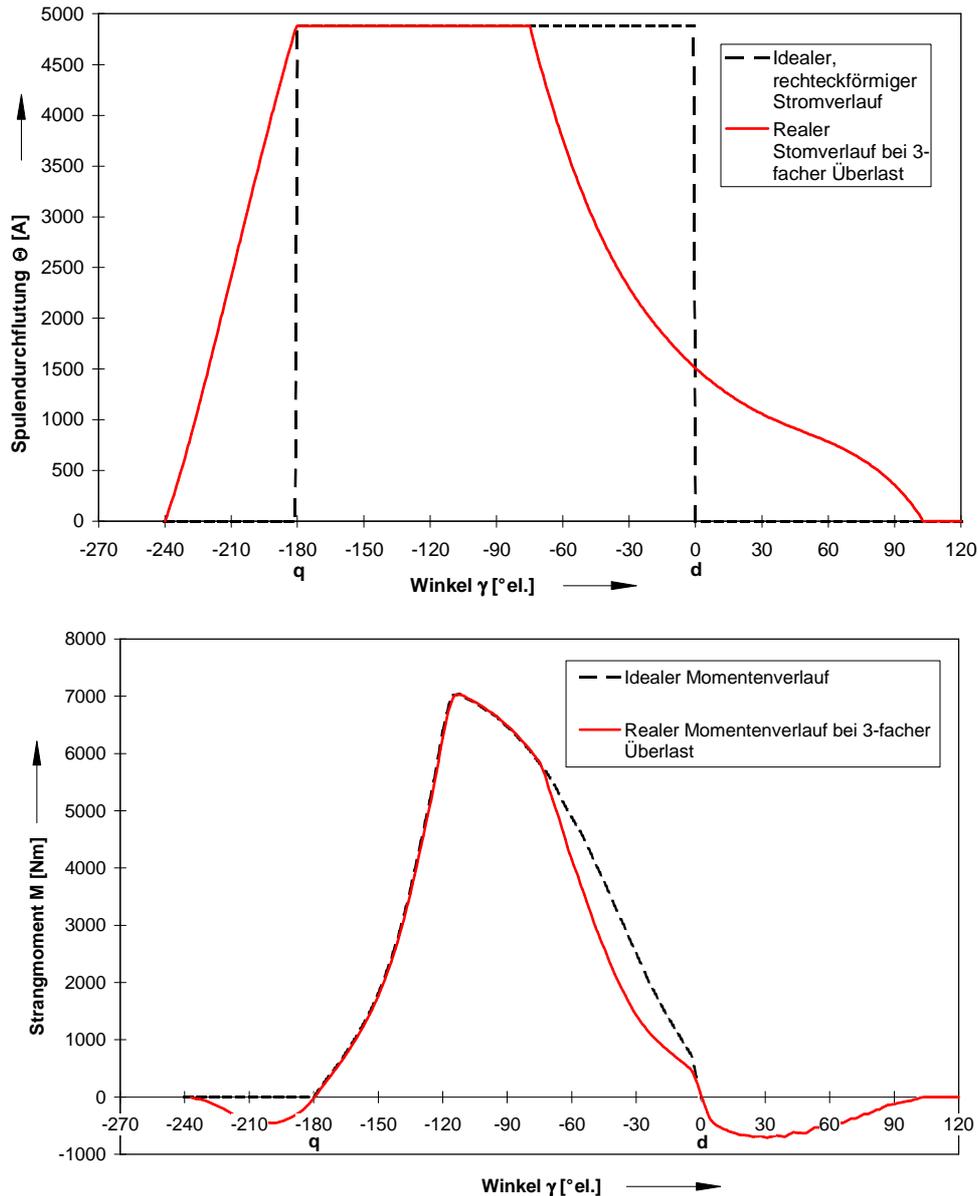
Als Ergebnis der Maschinenauslegung entstand eine 10polige Maschine deren Geometrie und Feldverteilung aus **Bild 2** hervorgeht.



**Bild 2: Maschinenentwurf SRM (2p=10; eine Maschinenhälfte)**

Bei der Berechnung des erforderlichen Wechselrichteraufwandes muß beachtet werden, daß der reale Stromverlauf bei höheren Drehzahlen sehr stark vom idealen rechteckförmigen Stromverlauf abweicht. Ein vollständiger Entwurf des SRM setzt daher die Möglichkeit einer Analyse des Strom- und Drehmomentenverlaufs in Abhängigkeit vom Drehwinkel voraus. Hierzu ist die Integration der Spannungsgleichung erforderlich. Sie wird zweckmäßig numerisch durchgeführt, da das Problem bei der Berechnung des Stroms darin besteht, das zwischen Flußverkettung  $\Psi$ , Strom  $i$  und Läuferstellungswinkel  $\gamma$  ein nichtlinearer Zusammenhang besteht. Mit Hilfe von FE-Berechnungen und geeigneten Interpolationsverfahren werden zunächst Kennlinienfelder für die Flußverkettung  $\Psi(\gamma, i)$  und das Drehmoment  $M(\gamma, i)$  erstellt, mit deren Hilfe sich dann durch numerische Integration der Spannungsgleichung die Strom und Momentenverläufe in Abhängigkeit von der Drehzahl berechnen lassen. Durch geschickte Wahl der Ein- und Ausschaltwinkel können Strom und Momentenverlauf optimal an den Verlauf der Induktivität angepaßt werden.

Für die Auslegung des Wechselrichters müssen die Zwischenkreisspannung  $U_{ZK}$  und die Stromgrenze  $I_{max}$  ermittelt werden. Der für die Bestimmung der Zwischenkreisspannung maßgebliche Betriebspunkt ist der Betrieb mit Maximaldrehzahl. Die Zwischenkreisspannung sollte so gewählt werden, daß das bei maximaler Drehzahl geforderte Strangmoment im spannungsgesteuerten Betrieb (Stromgrenze wird nicht erreicht) nach Anpassung der Schaltwinkel gerade noch erreicht wird. Für die Festlegung der Stromgrenze  $I_{max}$  ist der Überlastpunkt maßgebend. Die Stromgrenze muß so gewählt werden, daß nach Anpassung der Schaltwinkel mit der berechneten Zwischenkreisspannung das geforderte Moment im Überlastpunkt erreicht wird. Die Verhältnisse bei Überlast sind im **Bild 3** dargestellt.



**Bild 3: Ströme und Momente bei 3-facher Überlast**

(Einschaltwinkel  $\gamma_{\text{ein}} = -240^\circ$  el.; Ausschaltwinkel  $\gamma_{\text{aus}} = -75^\circ$  el.;  $r_{va} = 8,3$ )

Da SRM und andere geschaltete Maschinen nicht sinusförmig gespeist werden, ist der Vergleich der Umrichteranforderungen mit Hilfe des Leistungsfaktors  $\cos\varphi$  nicht zulässig. Zur Klassifizierung des Umrichteraufwands wird daher von einer Umrichterschaltleistung ausgegangen, die sich unabhängig von der Art der Maschinenspeisung aus Zwischenkreisspannung und maximalem Strangstrom berechnet. Für die Umrichterschaltleistung von SRM gilt somit:

$$S_{WR} = m_s \cdot U_{ZK} \cdot I_{max}$$

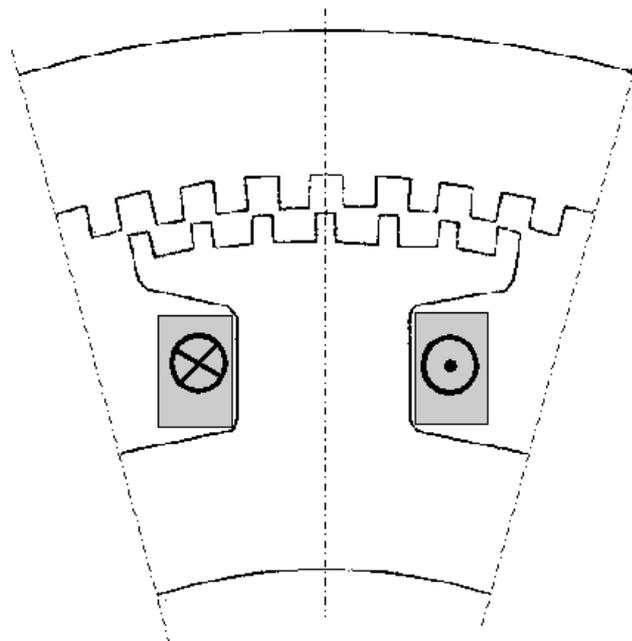
mit der Strangzahl  $m_s$ .

Wird die mechanische Leistung  $P_{\text{mech}}$  als Bezugswert eingeführt, können die Wechselrichteranforderungen als das Verhältnis von Wechselrichterscheinleistung und Maschinenleistung als bezogene Schaltleistung ausgedrückt werden:

$$r_{VA} = \frac{S_{WR}}{P_{mech}}$$

Die Wechselrichteranforderungen sind bei SRM relativ hoch. Wird die Maschine nur für einen Betriebspunkt ausgelegt, ergeben sich  $r_{VA}$  Werte, die etwa denen von wechselrichtergespeisten Asynchronmaschinen entsprechen ( $r_{VA} \approx 5$ ). Da der Wechselrichter jedoch auch den Überlastpunkt beherrschen muß, verschlechtert sich der  $r_{VA}$ -Wert erheblich. Für die berechnete Maschine ergibt sich ein Wert von etwa 8,5.

Will man die Kraftdichte durch eine weitere Erhöhung der Zähnezahl noch steigern, gelangt man zu Konfigurationen wie sie im Bild 4 dargestellt sind. Der Vorteil solcher Anordnungen besteht darin, daß die Wicklungsflächen in den Pollücken untergebracht werden können und damit große Durchflutungen bei moderaten Stromdichten möglich sind. Allerdings ist das Verhältnis der kraftbestimmenden Parameter und damit das Reluktanzverhältnis aufgrund der feinen Zahnstruktur sehr ungünstig, d.h. die Energieflächen (vgl. **Bild 1**) sind klein. Mit derartigen Maschinenkonzepten sind zwar hohe Kraftdichten erreichbar, die Wechselrichteranforderungen sind allerdings insbesondere bei Momentenüberlast sehr hoch ( $r_{VA} \gg 10$ ). Außerdem können durch die hohen Schaltfrequenzen (500Hz bei 300 1/min bei Ausführung nach **Bild 4**) erhebliche Eisenverluste auftreten.



**Bild 4: Schematische Darstellung einer SRM (Außenläufer)**  
 ( $N_s/N_r=84/100$ )

Insgesamt ergaben die Untersuchungen, daß eine Optimierung der SRM auf große Kraftdichten zu sehr hohen Wechselrichteranforderungen ( $r_{VA} > 10$ ) und eine Optimierung auf kleine Wechselrichterschaltleistungen zu einer Überdimensionierung des magnetischen Kreises der Maschinen und damit zu einer schlechten Maschinenausnutzung führt. Um den Wechselrichteraufwand bei Momentenüberlast zu begrenzen, muß die Überlastdrehzahl gegenüber der Nenndrehzahl erheblich abgesenkt werden.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen eines FVA Forschungsvorhabens/ Arbeitsgruppe "High Torque" Antriebe durchgeführt.