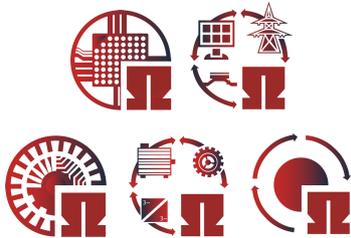


# ELSYS Note



## Power ohne Permanentmagneten

Dieses ELSYS Note stellt den prinzipiellen Aufbau der Synchron-Reluktanzmaschine dar. Hierbei werden mögliche Rotorgeometrien vorgestellt und ihre jeweiligen Vor- und Nachteile aufgezeigt. Des Weiteren wird auf die Problematik der hohen Drehmomentwelligkeit des Maschinentyps eingegangen sowie Möglichkeiten zur Reduzierung der Drehmomentwelligkeit präsentiert.

### Einleitung

Die Synchron-Reluktanzmaschine (SynRM) gehört zu den synchronen Drehfeldmaschinen. Für die Fertigung des elektrischen Antriebes werden keine Seltenen-Erden wie z.B. NdFeB Magnete benötigt. Daher ist die SynRM ein zukunftsorientierter und nachhaltiger Antrieb. Da keine Rotorwicklung verbaut ist, reduzieren sich die Rotorverluste auf die Ummagnetisierungsverluste des verwendeten Elektrobleches. Daher kann im Vergleich zur Asynchronmaschine eine Wirkungsgradsteigerung erreicht werden.

### Maschinenaufbau

Der Rotorblechschnitt der SynRM besteht im Allgemeinen aus magnetisch gut leitenden flussführenden Eisensegmenten und aus magnetisch schlecht leitenden Flussbarrieren. Die Flussbarrieren bestehen üblicherweise aus Luft. Ihre Form und damit die Ausprägung der Eisensegmente ist prinzipiell frei wählbar. Im Falle von Luft gefüllten Flussbarrieren werden zur Stabilität radiale, als auch am Umfang tangentiale Stege benötigt. Ein prinzipielles Beispiel für den Aufbau einer SynRM ist in einem 3D-Ausschnitt dargestellt (siehe Abb. 1). Es handelt sich hierbei

um eine 23 kW SynRM, die ausgehend von einer Asynchronmaschine ausgelegt wurde.



Abb. 1 23 kW SynRM

Bei diesem Design konnte die Leistung von 18 kW auf 23 kW gesteigert werden.

### Rotorschnitt

In Abb. 2 ist ein Rotorschnitt mit drei Flussbarrieren dargestellt. Die Anzahl, die Form als auch die Lage der Flussbarrieren haben einen entscheidenden Einfluss auf das zu generierende Drehmoment sowie auf die Drehmomentwelligkeit [1]. Für eine Grundwellenbetrachtung kann das innere Drehmoment  $M_i$  für eine dreistränge Maschine ( $m = 3$ ) als Funktion in Abhängigkeit der Polpaarzahl  $p$ , der stromabhängigen Induktivitäten der feldbildenden Achse  $L_d(i_d, i_q)$  und der drehmomentbildenden Achse  $L_q(i_d, i_q)$  sowie in Abhängigkeit der betrieb-

spunktabhängigen Ströme der d- und q-Achse ( $i_d, i_q$ ) mit (1) berechnet werden.

$$M_i = \frac{3}{2} p \cdot (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q \quad (1)$$

Ein hohes Drehmoment erfordert eine hohe Differenz zwischen den Induktivitäten der d- und q-Achse, was als Schenkeligkeit ( $\xi$ ) bezeichnet wird:

$$\xi(i_d, i_q) = \frac{L_d(i_d, i_q)}{L_q(i_d, i_q)} \quad (2)$$

Durch die konforme Gestaltung der Flussbarrieren wird die natürliche Ausbreitung des magnetischen Flusses unterstützt, was den magnetischen Widerstand reduziert und die Induktivität in der d-Achse deutlich erhöht. Dies führt zu einer höheren Schenkeligkeit der Maschine.

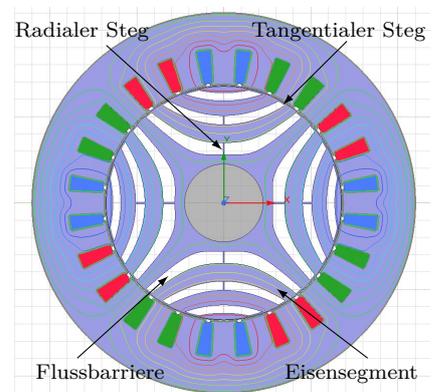


Abb. 2 FEM-Rotorschnitt

## Drehmomentwelligkeit

Ein Nachteil der Synchron-Reluktanzmaschine ist eine hohe Drehmomentwelligkeit. In Abb. 3 ist ein simulierter Drehmomentverlauf einer bereits optimierten Maschine dargestellt.

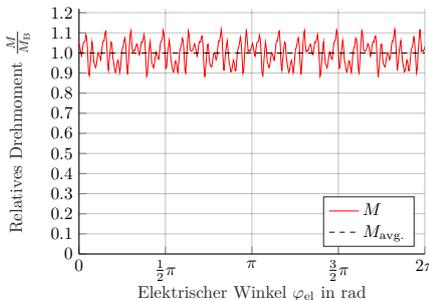


Abb. 3 Simulierter Drehmomentverlauf

Trotz der Optimierung ist eine Drehmomentwelligkeit von 22 % vorhanden. Um diese weiter zu reduzieren, wird das Rotorblechpaket gestaffelt. Alternativen zur Staffelung können hier Optimierungen der Flussbarrierenformen sein.

## Weitere Rotordesigns

Der Romeo und Julia Schnitt ist eine alternative Form der Flussbarrieren. Er besteht aus zwei verschiedenen Rotorblechschnitten, die jeweils als Blechpaket abwechselnd axial auf der Rotorwelle montiert werden. Die jeweiligen Rotorblechpakete besitzen unterschiedliche Öffnungswinkel  $\vartheta_{1,2} \neq 45^\circ$ . Der Nach-

teil dieses Design ist, dass zwei verschiedene Rotorbleche gefertigt werden müssen. Eine Weiterentwicklung hierzu ist der Machaon-Schnitt, welche in Abb. 4 abgebildet ist [2]. Bei dem Machaon-Schnitt folgt abwechselnd, auf einem einzigen Blechschnitt, ein kleiner und ein großer Öffnungswinkel  $\vartheta$ .

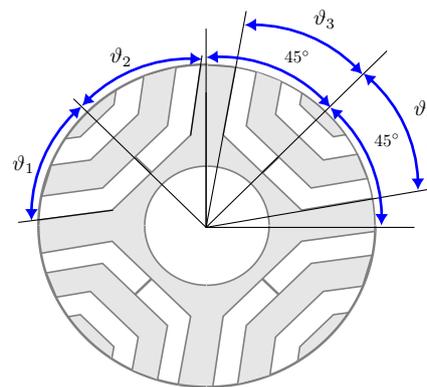


Abb. 4 Machaon-Schnitt

Eine weitere Möglichkeit neben dem Machaon-Schnitt ist eine asymmetrische Flussbarrierenform [3]. Ein prinzipielles Beispiel hierfür ist in Abb. 5 zu sehen. Die Flussbarrieren sind nicht mehr symmetrisch angeordnet. Dieser Schnitt stellt einen aktuellen Forschungsschwerpunkt zur SynRM dar. Der Winkel hat Einfluss auf den am Umfang entstehenden magnetischen Leitwertverlauf. Dieser Verlauf beeinflusst die Drehmomentwelligkeit der Maschine. In weiteren For-

schungsvorhaben wird an der Abhängigkeit zwischen dem Flussbarrierenwinkel und der Reduzierung gezielter Ordnungen der Drehmomentwelligkeit gearbeitet.

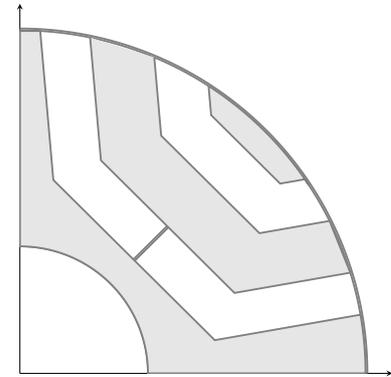


Abb. 5 Asymmetrischer Schnitt

## Zusammenfassung

Das ELSYS Note stellt den prinzipiellen Aufbau der Synchron-Reluktanzmaschine dar. Es wird auf das Designziel einer hohen Schenkigkeit  $\xi(i_d, i_q)$  eingegangen. Die SynRM besitzt eine hohe Drehmomentwelligkeit. Diese muss während der Auslegung minimiert werden. Neben der Staffelung des Rotorblechpaketes werden drei weitere Geometrievarianten kurz vorgestellt. Im Rahmen der aktuellen Forschungsarbeit wird weiter an der Reduzierung der Drehmomentwelligkeit durch asymmetrische Flussbarrierenformen gearbeitet.

## Literatur

- [1] Giacomo Bacco und Nicola Bianchi. „Choice of flux-barriers position in synchronous reluctance machines“. *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. Cincinnati, OH: IEEE, Okt. 2017, S. 1872–1879. ISBN: 978-1-5090-2998-3. DOI: 10.1109/ECCE.2017.8096023.
- [2] Nicola Bianchi, Silverio Bolognani, Diego Bon und Michele Dai Pre. „Rotor flux-barrier design for torque ripple reduction in synchronous reluctance motors“. *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*. Tampa, FL: IEEE, Okt. 2006, S. 1193–1200. ISBN: 978-1-4244-0364-6. DOI: 10.1109/IAS.2006.256683.
- [3] Tobias Lange, Burin Kerdsup, Claude Weiss und Rik W. De Doncker. „Torque Ripple Reduction in Reluctance Synchronous Machines using an Asymmetric Rotor Structure“. *7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014)*. Manchester, UK: Institution of Engineering and Technology, 2014, S. 6.2.01–6.2.01. ISBN: 978-1-84919-815-8. DOI: 10.1049/cp.2014.0426.