

SYNCHRONMASCHINEN MIT NUTZUNG DES RELUKTANZEFFEKTS

H. Wöhl-Bruhn

1 AUSGANGSSITUATION

Die Magnete bei permanentmagneterregten Maschinen können auf dem Rotor platziert (Oberflächenmagnete) oder in das Rotorblech eingebracht (eingebettete Magnete) werden. Beispiele hierfür sind in **Bild 1** gezeigt. Eine kostengünstige Herstellung wird durch das Einschleifen der Magnete in das Rotorblech ermöglicht, allerdings sorgt die Halterung der Magnete aus Blech für einen Verlust an Erregerfeld im Luftspalt, der mit zunehmender Einbettungstiefe sehr groß werden kann. Ein Teil der Magnetfeldlinien tritt dann nicht in den Luftspalt zwischen Stator und Rotor ein und kann somit nicht kraftwirksam werden. Anders bei der Anordnung mit auf den Rotor aufgetragenen Magneten gleichen Volumens: Nahezu alle Feldlinien treten aus dem Magneten in den Luftspalt und können kraftwirksam werden. Eine generelle Beurteilung möglicher Magnetanordnungen und ein Vergleich von Rotoren mit Oberflächenmagneten und eingebetteten Magneten wurden bereits durchgeführt [1], [2].

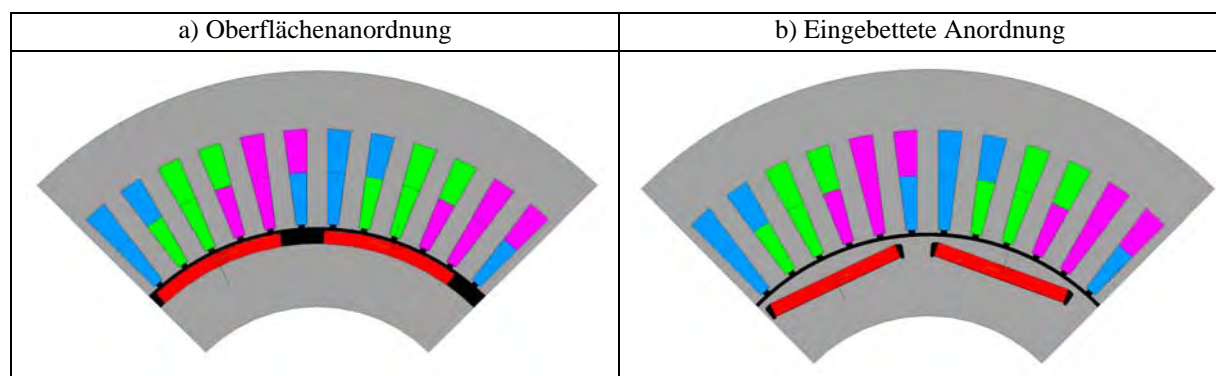


Bild 1: Maschinensegmente von unterschiedlichen Synchronmaschinen

2 LORENTZKRAFT UND RELUKTANZEFFEKT

Der Einsatz von Rotoren mit eingebetteten Magneten in Maschinen mit großem Drehzahlenspektrum ist derzeit unter anderem bei Hybridfahrzeugen mit leistungsverzweigten Getrieben verbreitet. Neben dem Drehmoment aus der Lorentzkraft, das aus Ankerstrombelag und dem Erregerfeld entsteht, wird eine zusätzliche Kraftkomponente aus der magnetischen Anisotropie genutzt. Dieser Gewinn an Drehmoment gleicht einen Teil des oben beschriebenen Kraftverlustes aus, der aus dem magnetischen Teilkurzschluss resultiert und erleichtert den Betrieb bei hohen Drehzahlen mit Feldschwächung [3].

Bei der beschriebenen Anisotropie sind die magnetischen Widerstände in d- und q-Achse unterschiedlich groß.

Aus historischen Gründen hat sich für elektrische Synchronmaschinen, deren Rotor neben der Erregung diese magnetische Anisotropie aufweist, der Begriff Schenkelpolmaschine eingebürgert. Der Entwurf dieser Maschinen kann bei konstanter Permeabilität analytisch durchgeführt werden. Die Berechnung der Maschine mit eingebetteten Magneten unterscheidet sich – bei exakter Berücksichtigung des Reluktanzeffekts – im wesentlichen dadurch, dass eine magnetische Anisotropie berücksichtigt werden muss, die zwar ebenfalls synchron mit dem Dreh- und Rotorfeld umläuft, sich aber zusätzlich noch in Abhängigkeit von Stromamplitude und Schwenkwinkel des Statorstroms ändert und somit ein stark nichtlineares Verhalten hervorruft.

Da im Rotor ein Elektroblech verwendet wird, dessen magnetischer Widerstand mit zunehmender Sättigung nichtlinear verändert wird, verändern sich auch die magnetischen Widerstände nach einer nichtlinearen Funktion. Durch die vektorielle Überlagerung des Statorfeldes mit dem Feld der Permanentmagnete ergibt sich eine "magnetische Zahnstruktur", die eine zusätzliche Kraftkomponente erzeugt und somit zum Drehmoment der Maschine beiträgt, wenn der Ständerstrom aus der q-Achse herausgedreht wird. Die Gestalt des resultierenden Magnetfeldes ist in **Bild 2** dargestellt: In den Bereichen unter den Magneten befinden sich Gebiete, die diese Zahnstruktur zeigen. Für die optimale Wechselrichterstrategie müssen Lösungen für die unterschiedlichen Kombinationen per Finite-Elemente-Rechnungen gefunden werden.

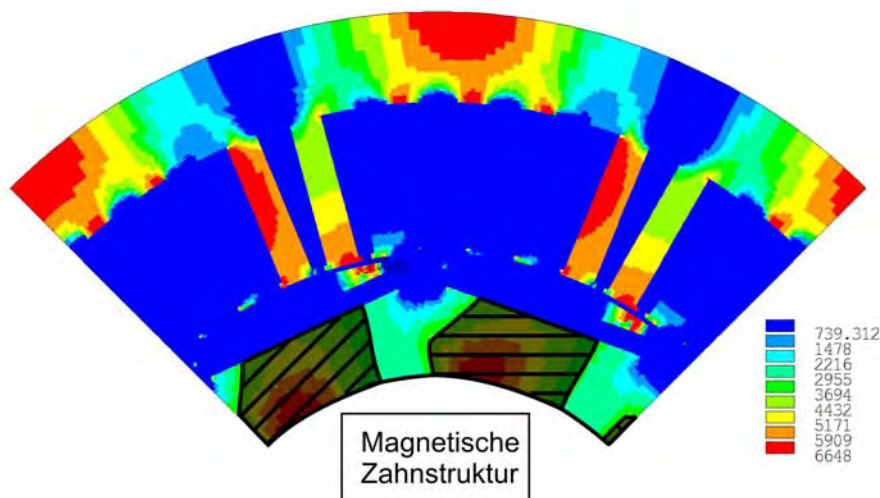


Bild 2: Relative magnetische Permeabilität unter Last

3 BERÜCKSICHTIGUNG MECHANISCHER BELASTUNGEN

Eine Zunahme an Magnetvolumen führt durch die Fliehkraft bei dem rotierenden Läufer zu einer Vergrößerung der mechanischen Belastung der Stege, welche den jeweiligen Magnet und das zugehörige Blechstück zwischen Magnet und Luftspalt halten. Damit gilt es, die Parameter Magnethöhe und -breite (Polbedeckung) zu optimieren. Die Grenze für die max. mittlere mechanische Spannung in den Stegen des Blechs sollte mit Rücksicht auf die Kerbwirkungen nicht zu hoch gewählt werden und die Zahl der zu erwartenden Lastspiele berücksichtigen. Ein Sicherheitsfaktor für die Zunahme der Kerbwirkung bei Variation des

Rotordurchmessers durch Veränderung der Krümmung und der Fliehkraftbeanspruchung (wie es während des Entwurfsganges der Fall sein kann) sollte gegebenenfalls berücksichtigt werden. Analytische Berechnungen der auftretenden Spannungen können durch Finite-Elemente-Rechnungen überprüft werden. Ein Beispiel für die qualitative Verteilung der Belastung in einem Steg ist in **Bild 3** gezeigt. Trotz des großzügig bemessenen Radius sind große Spannungsgradienten zu erkennen.

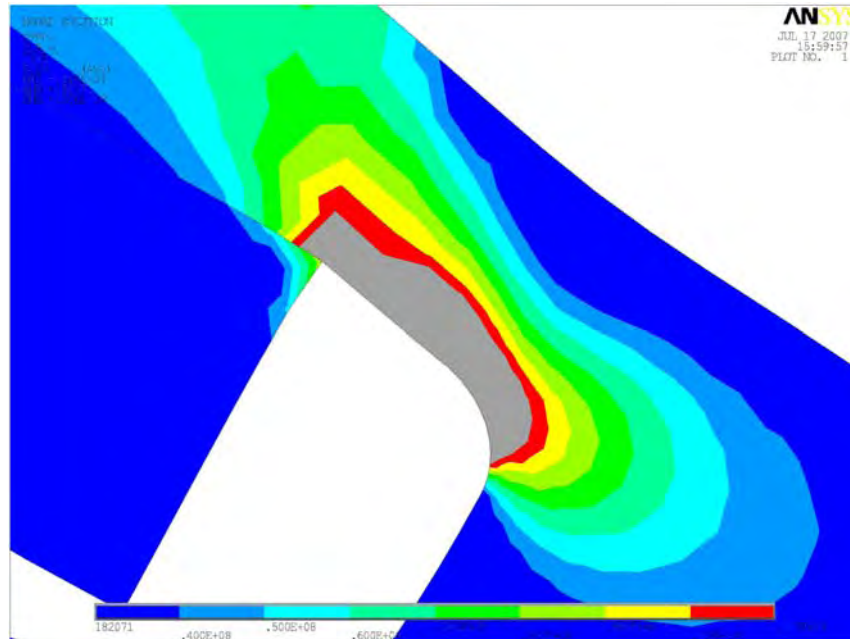


Bild 3: Beispiel für die mechanische Belastung in einem Steg

4 GRUNDSÄTZLICHES BERCHNUNGSVERFAHREN

Das Drehmoment eines Maschinensegments für einen Arbeitspunkt, wie er in **Bild 2** dargestellt wird, kann zuverlässig nur direkt über Finite-Elemente-Rechnungen für eine gegebene Nutdurchflutung (Summe der Ströme in einer Nut) ermittelt werden. Dies erfolgt über die Berechnung des Maxwell'schen Spannungstensors (Flächenkraftdichte) oder über die Anwendung des Energieerhaltungssatzes (Prinzip der virtuellen Verschiebung, Änderung der magnetischen Energie). Der Zusammenhang zwischen Klemmenstrom und –spannung ist unter Umständen nicht direkt zu ermitteln. Die Kenntnis dieser Größen ist allerdings bei gegebener Windungszahl zur Beschreibung der notwendigen Zwischenkreisspannung, des maximalen Wechselrichterstromes und im Feldschwächbereich des Maschinenwirkungsgrades notwendig. Als Grundlage kann die Berechnung der allgemeinen Spannungsgleichung dienen, wie sie in Gleichung (1) mit der Berücksichtigung der Kopplungen aller Stränge einer n-strängigen Maschine gegeben ist.

$$u_v = R_v \cdot i_v + \sum_{\mu=1}^n \left(M_{v\mu} \frac{di_{\mu}}{dt} + \frac{\partial M_{v\mu}}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \cdot i_{\mu} + \frac{1}{C_{\mu}} \int i_{\mu} dt + i_{\mu} \cdot \sum_{\xi=1}^n \frac{\partial M_{v\mu}}{\partial i_{\xi}} \frac{di_{\xi}}{dt} \right) \quad (1)$$

mit $M_{v\mu} = L_v$ für $\mu = v$

Zum Lösen dieser Gleichung kann die magnetische Erregung in Form der Remanenzflussdichte des Magneten im Arbeitspunkt nicht direkt eingegeben werden. Für die Berechnung der Eigeninduktivität des Magneten und dessen Gegeninduktivitäten mit Strängen der Wicklung sowie deren Ableitungen ist die Berechnung von Modelldaten notwendig: Es wird ein fiktiver (Kanten-)Strom statt eines Magneten angenommen, der in gleicher Weise mit dem Statorfeld in Wechselwirkung tritt wie das Erregerfeld des Magneten. Das Modell basiert auf einer widerstandsfreien Spule mit einer Windung, die um den Magneten gelegt wird und in der ein Gleichstrom i_{PM} fließt, der der Summe aller Elektronenspins entspricht. Dieser kann nach (2) berechnet werden, wobei h_{PM} der Höhe des Magneten und H_c der Koerzitivfeldstärke im Arbeitspunkt entspricht.

$$i_{PM} = h_{PM} \cdot H_c \quad (2)$$

Die Kraft kann anschließend mit Hilfe der Finiten-Elemente-Rechnung über den Maxwell-schen Spannungstensor oder der Lorentzkraft berechnet werden [4].

Am Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen wurden Verfahren zur Lösung der obigen Gleichung entwickelt, die auf Basis konventioneller Tools arbeiten. Diese Berechnungsmethoden ermöglichen den gezielten Entwurf von Maschinen, die neben einer Erregung auch eine (betriebspunktabhängige) Reluktanz nutzen.

LITERATUR

- [1] H. Wöhl-Bruhn, W.-R. Canders, R. Kube: *Trägheitsarme Elektromaschinen für Hybridfahrzeuganwendungen*,
3. Braunschweiger Symposium Hybridfahrzeuge und Energiemanagement, 2006
- [2] H. Wöhl-Bruhn: *Vergleich von Rotoren mit Oberflächenmagneten und eingebetteten Magneten*,
IMAB Jahresbericht 2005
- [3] W.-R. Canders, R. Kube et al.: *Elektrisch leistungsverzweigte Stufenlosgetriebe für Hybridfahrzeuge*,
VDI-Berichte Nr. 1975, 2006
- [4] H. Weh, H. May, M. Shalaby: *Highly effective magnetic circuits for permanent magnet excited synchronous machines*,
ICEM 1990, Cambridge