

PERMANENTMAGNETERREGTE FELDSCHWÄCHBARE SYNCHRONMASCHINEN

M. R. Rezaei

1 EINLEITUNG

Permanentmagneterregte Synchronmaschinen werden in den letzten Jahren immer häufiger für vielfältige Antriebsaufgaben verwendet. Da sich durch den Verzicht auf Erregerwicklungen die Stromwärmeverluste im Erregerteil der Maschine und die verschleißbehafteten Stromzuführungselemente vermeiden lassen, zeichnen sich die permanentmagneterregten Synchronmaschinen durch eine optimale Ausnutzung und guten Wirkungsgrad aus. Bei den permanentmagneterregten Synchronmaschinen ist die Erregung konstant und damit ein „Feldschwächbetrieb“ im eigentlichen Sinne grundsätzlich nicht möglich. Dies führt zu einer Proportionalität zwischen induzierter Spannung und Drehzahl, aber es ist noch möglich, durch eine Stromkomponente in der Längsachse das Polradfeld teilweise zu kompensieren und damit den Drehmoment-Drehzahlbereich zu erweitern. Dies kann als Phasenschwenkung des Strombelags gegenüber der Feldwelle um einen Schwenkwinkel dargestellt werden [1]. Im Vergleich zu den herkömmlichen Synchronmaschinen, bei denen ein Betrieb mit konstanter Leistung bei variabler Drehzahl über einen bestimmten Drehzahlbereich erreicht wird, ist Feldschwächbetrieb bei permanentmagneterregten Synchronmaschinen begrenzt. Um einen breiten Feldschwächbereich bei permanentmagneterregten Synchronmaschinen zu erreichen, sollten bereits bei der Auslegung des magnetischen Kreises bestimmte Maßnahmen getroffen werden (Festlegung des Maschinentyps). So ist für die Auslegung des magnetischen Kreises der Typenpunkt mit dem Maximalmoment maßgeblich.

2 MASCHINENKONZEPT

Bei der Konstruktion der PM-erregten Synchronmaschinen bieten sich zwei unterschiedliche Bauformen an: die Flachmagnet- und die Sammleranordnung (**Bild 1**).

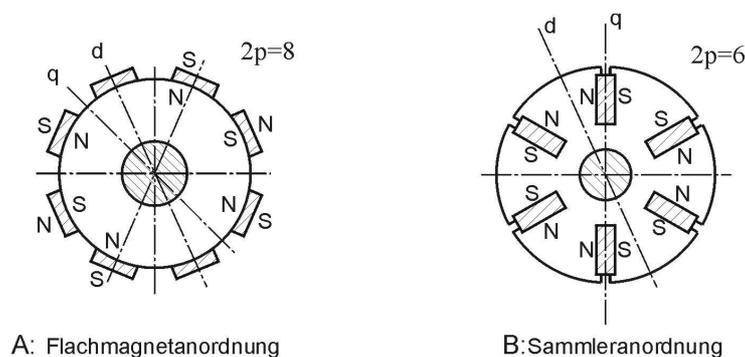


Bild 1: Maschinenkonzept

Die Flachmagnetmaschinen (**Bild 1A**) können auf relativ einfache Weise realisiert werden, da die Magneten auf ein konventionell geschichtetes Rotorblechpaket geklebt werden, das nicht unterteilt ist und daher eine große Eigenfestigkeit besitzt. Nachteilig kann sich die Tatsache auswirken, dass man bei der Dimensionierung des magnetischen Kreises recht schnell an die Grenzen der Flachmagnetanordnung stößt. Wie die Gl.(1)

$$\frac{B_{\delta}}{B_R} = \frac{h_M}{\mu_p \left(\frac{\delta''}{\mu_0} + \frac{h_M}{\mu_p S} \right)} = \frac{1}{1 + \frac{\delta''}{h_M^*}} \quad (1)$$

beschreibt, bleibt die Flussdichte im Luftspalt in jedem Fall unterhalb der Remanenzflussdichte der Magneten, wogegen die Sammleranordnung (**Bild 1B**) durch den Sammelfaktor eine Luftspaltflussdichte erreichen kann, die die Remanenz der Magneten sogar übertrifft:

$$\frac{B_{\delta}}{B_R} = \frac{h_M}{\mu_p \left(\frac{\delta''}{\mu_0} + \frac{h_M}{\mu_p S} \right)} = \frac{S}{1 + \frac{\delta''}{h_M^*} S} \quad (2)$$

3 AUSLEGUNG DER MASCHINEN IN SAMMLERBAUWEISE

Bei Maschinen mit Sammleranordnung kann durch eine Verlagerung der Permanentmagnete vom Luftspalt weg und in den Rotor hinein eine hohe Konzentration des magnetischen Feldes erzielt werden. Bei Maschinen mit Flachmagnetanordnung wird die Ankerrückwirkung - vor allem bei größerer Magnethöhe und kleiner Polteilung - als relativ klein eingestuft, da das Permanentmagnetmaterial eine Permeabilität von ungefähr 1,05 aufweist und sich daher magnetisch ähnlich wie Luft verhält. Die Sammleranordnung erlaubt eine Entkopplung von magnetischem Luftspalt und Magnethöhe durch ein variables Flächenverhältnis (**Bild 2**). Wie **Bild 2** zeigt, besitzen diese Maschinen aufgrund der hohen Leitfähigkeit in der Querachse eine große q-Komponente des Ankerfeldes, die wiederum eine deutliche Ankerrückwirkung zur Folge hat.

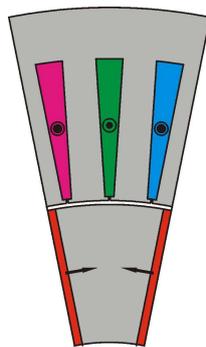


Bild 2: Maschine mit Sammleranordnung

3.1 Reduktion der Ankerrückwirkung

Der Entwurf von Permanentmagneterregten Synchronmaschinen in Sammlerbauweise erfordert konkrete Maßnahmen gegen die Auswirkungen des Ankerfeldes, da andernfalls eine starke Feldverzerrung speziell im Wicklungsbereich zu übermäßiger Zahnsättigung und damit zu einer Kraftdichteverminderung führt (abgesehen von zusätzlichen Eisenverlusten im Stator, die der höhere Oberwellengehalt der Flussdichte erzeugt). Die Ursache für das ausgeprägte Ankerfeld ist der bei Sammlermaschinen erheblich geringere magnetische Widerstand in der Querachse, auf den die Ankerdurchflutungen wirken. Die Bekämpfung der Ankerrückwirkung ist nicht nur wichtig für die Erzielung einer großen Kraftdichte, sondern auch für die Auslegung des Wechselrichters. Eine wirksame Maßnahme zur Unterdrückung des Ankerquerfeldes ist der Einbau eines Luftspaltes zwischen zwei benachbarten Polen (in **Bild 3** als dreieckige Aussparung erkennbar) und zusätzlich die Lamellierung der Pole entsprechend **Bild 3**. Die Permanentmagnete stehen wie bei der einfachen Anordnung mit Flusskonzentration senkrecht zum Luftspalt. Die lamellierten Halbpole bestehen aus magnetisch weichem Eisenmaterial. Die Barrieren zwischen den Eisenlamellen enthalten nichtmagnetisches Material, z.B. Kunststoff oder unmagnetische Metalle oder nur Luft [2], [3].

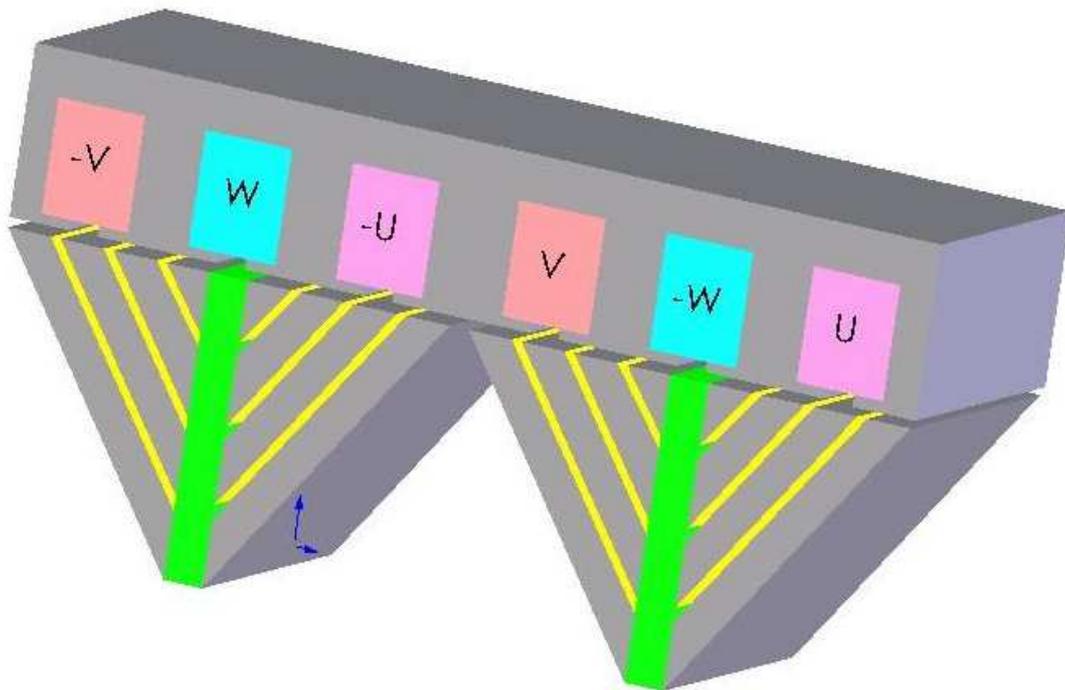


Bild 3: Maßnahme gegen Ankerrückwirkung

3.2 Auslegungsbeispiel

Um das Verhalten der Maschinen mit Sammleranordnung festzustellen, wurde exemplarisch eine Maschine ausgelegt und diskutiert. Die Maschine sollte ein Drehmoment von 96 Nm bei einer Drehzahl von 3000 min^{-1} aufweisen (Nennpunkt). Zusätzlich wird gefordert, dass die Maschine in einem Drehzahlbereich von 3000 min^{-1} bis 6000 min^{-1} betrieben wird. Durch

diese Auslegung sollte das Feldschwächverhalten der Maschine untersucht werden. Insbesondere ist es wichtig, den Einfluss des Sammelfaktors sowie der Windungszahl festzustellen. **Tabelle 1** fasst die Entwurfsvorgaben zusammen.

Tabelle 1: Entwurfsvorgaben

Größe / Leistungsmerkmale	Beschreibung / Zahlenwert
Bemessungsdrehmoment	96 Nm
Erwartete Kraftdichte	$\approx 30 \text{ kN/m}^2$
Bemessungsdrehzahl	3000 min^{-1}
Leistung	30 kW
Remanenz der Magneten	1,1 T
Blechqualität	M 400-50A

Die Abmessungen und die weiteren benötigten Kriterien der Maschine wurden durch den Entwurf mit einem Optimierungsprogramm festgelegt (**Tabelle 2**). Mit Hilfe dieses FE-Programms ist es möglich, verschiedene Größen der Maschine (Drehmoment, Induktivitäten, ...) nach Vorgabe von Kriterien wie beispielsweise geom. Abmessungen, Stromdichte, ... zu berechnen.

Tabelle 2: Abmessungen und ausgewählte weitere Daten

Größe	Beschreibung / Zahlenwert
Magnethöhe	4 mm
Magnetlänge	35 mm
Luftspalt	1 mm
Nuthöhe	35 mm
Zahnbreite	8,5 mm
Polzahl	8
Stromdichte	$4,5 \text{ A/mm}^2$

Die Maschine wurde zweidimensional gerechnet. **Bild 4** stellt die Geometrie und Feldlinien sowie die Intensität des B-Feldes der Maschine im Bereich einer Polteilung dar.

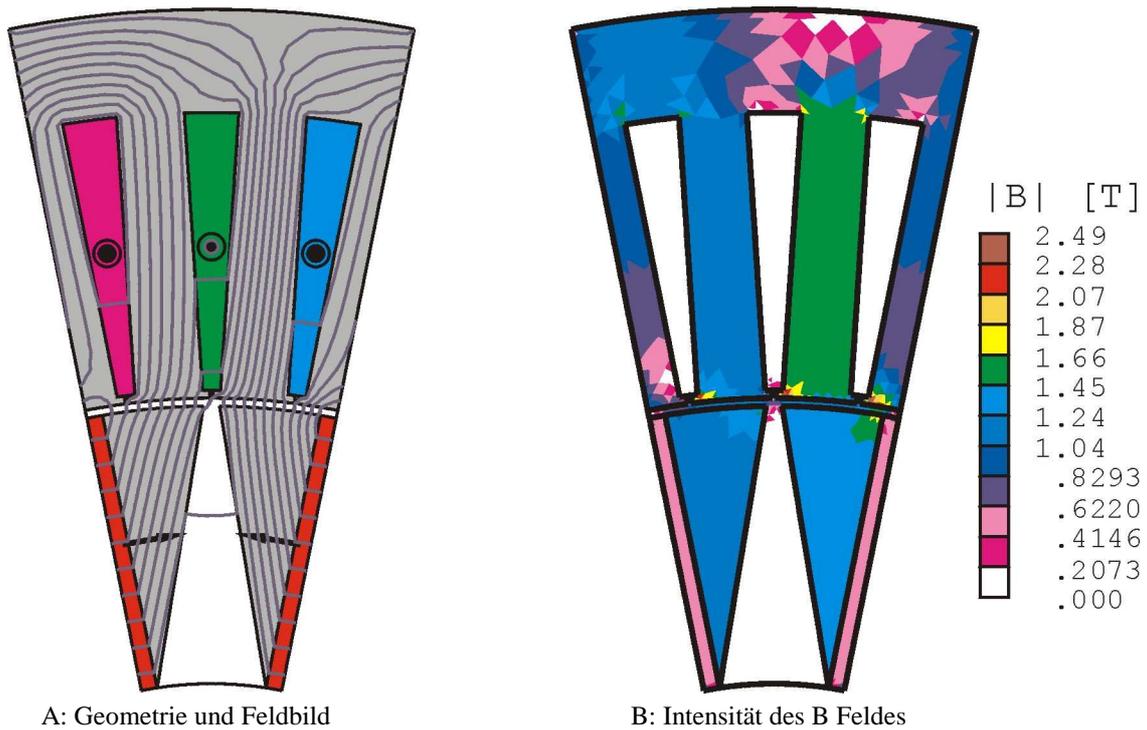


Bild 4: Feldlinien und Intensität des B-Feldes der Maschine

Bild 5 zeigt die Intensität des B-Feldes der Maschine im Leerlauf einmal mit dem Luftschlitz in Polmitte und einmal ohne.

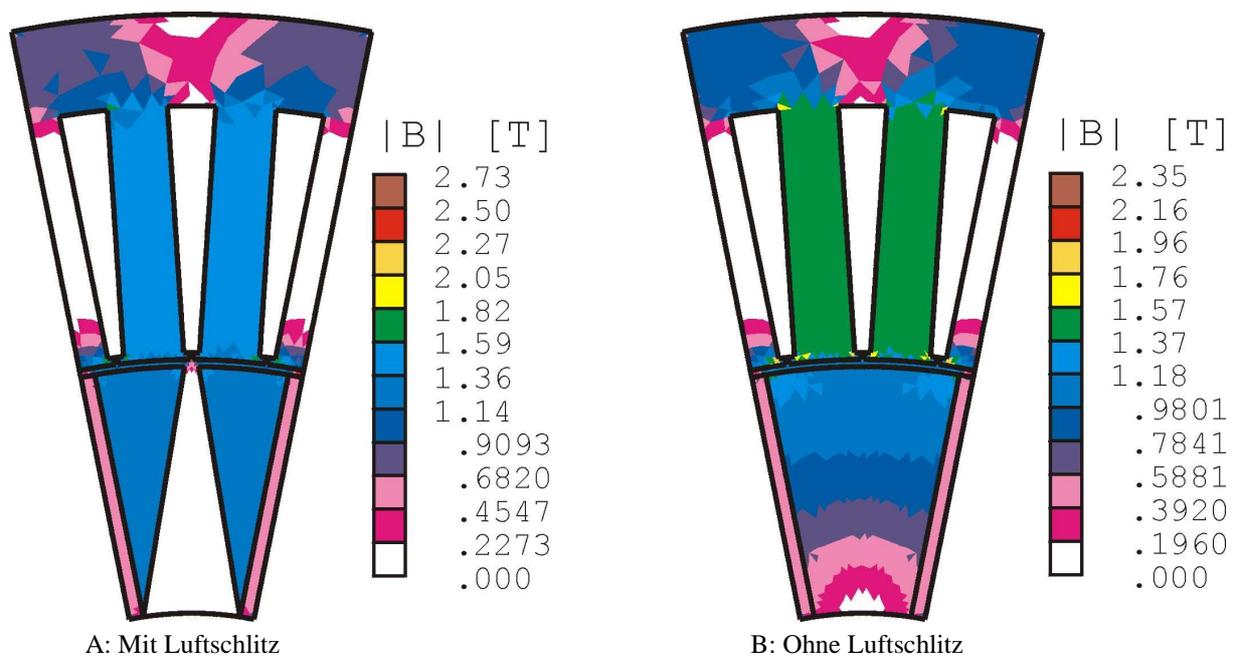


Bild 5: Intensität des B-Feldes im Leerlauf

Die **Bilder 6 und 7** zeigen das Luftspaltankerfeld der Maschine in Luftspaltmitte, einmal mit Luftschlitz und einmal ohne, über zwei Polteilungen.

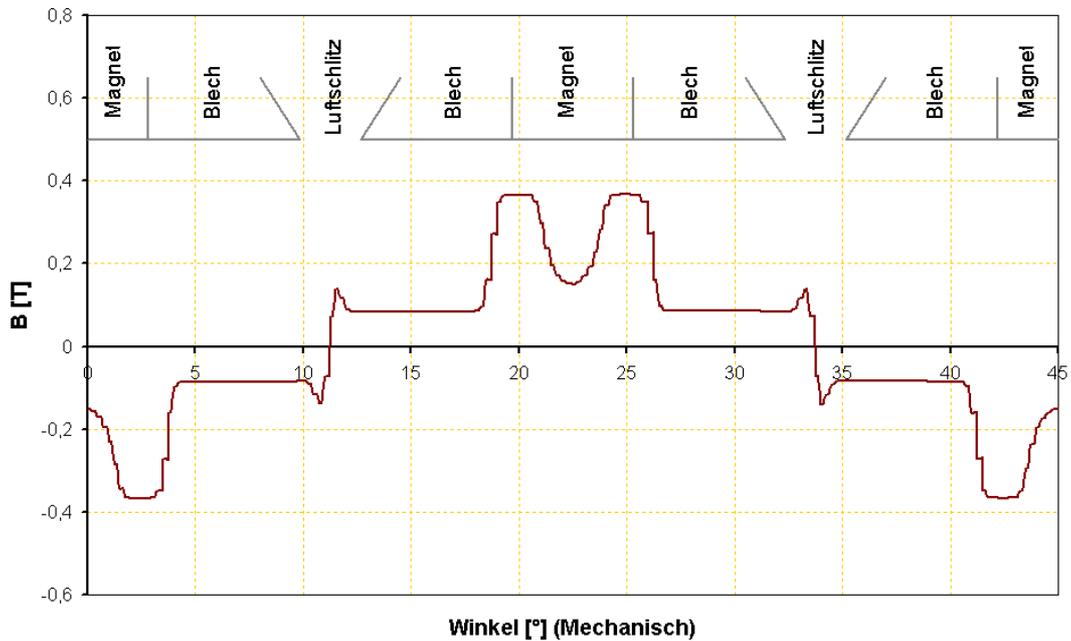


Bild 6: Luftspaltankerfeld im Fall mit Luftschlitz

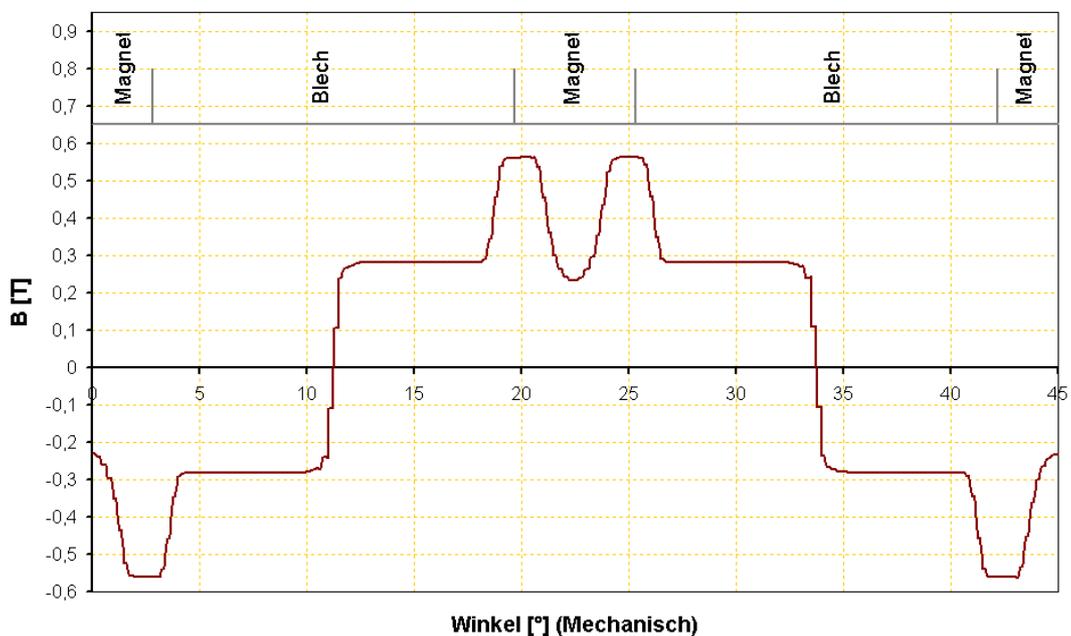


Bild 7: Luftspaltankerfeld im Fall ohne Luftschlitz

Wie erwartet, ist das Ankerquerfeld im Fall ohne Luftschlitz in Polmitte deutlich größer als in dem Fall mit Luftschlitz. Eine wichtige Einflussgröße für die Festlegung des Feldschwächcharakters ist die Windungszahl. Die Windungszahl sollte derart gewählt werden, dass der Strom bei Maximaldrehzahl nicht größer als der Strom im Grundbereich wird. Eine Abweichung hiervon hätte einen höheren Scheinleistungsbedarf des Wechselrichters zur Folge [1].

Bild 8 zeigt die erhaltenen Kennlinien für die Maschine mit einer Windungszahl von 7.

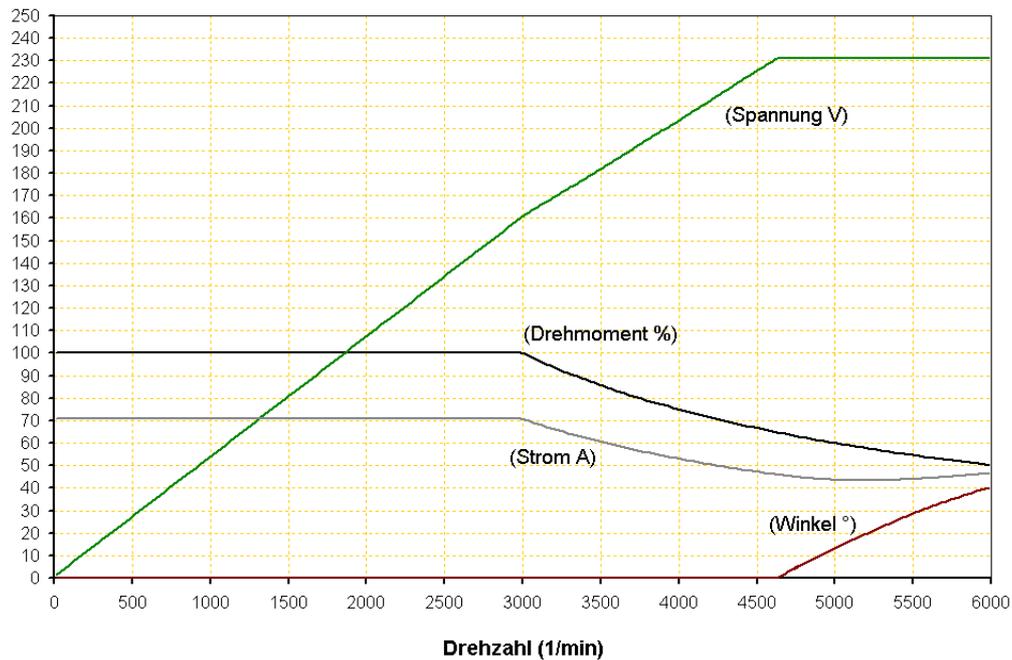


Bild 8: Kennlinien der Maschine

Wie **Bild 8** beschreibt, beginnt die Phasenschwenkung des Stroms erst bei einer Drehzahl von 4625 min^{-1} , bis dahin wird kein Strom in der d-Achse benötigt. Ab Auslegungseckpunkt wird das Drehmoment durch Reduzierung des Stroms bei steigender Spannung abgesenkt. **Bild 9** zeigt das Verhalten der Maschine bei unterschiedlichen Belastungen.

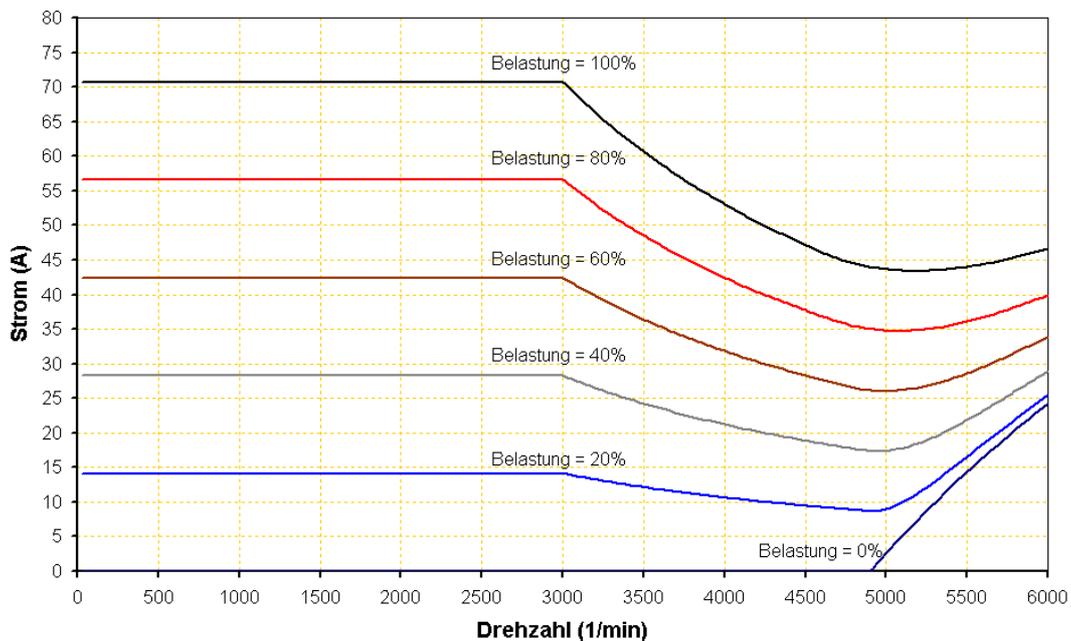


Bild 9: Strombedarf bei unterschiedlichen Belastungen

Es ist bei Maschinen mit Sammleranordnung zu beachten, dass aufgrund der Form des Rotors (Rotor mit Pollücken) im Gegensatz zu Maschinen mit Flachmagnetanordnung die Induk-

tivitäten in der d- und q-Achse unterschiedlich sind. Das Auslegungsbeispiel wurde mit dem mittleren Wert der Induktivitäten gerechnet. Die Maschine wurde nur bezüglich des Feldschwächbereiches optimiert. Die konventionellen Drehstrommaschinen weisen in der Regel eine nahezu sinusförmige Verteilung von Erregerfeld und Ankerstrombelag auf. Die erzielbare mittlere Kraftdichte ist demnach höchstens halb so groß wie der sich aus dem Produkt der Amplituden ergebende Maximalwert. Bei gleicher Amplitude von Strom und Feld kann jedoch die mittlere Kraftdichte um nahezu den Faktor 2 vergrößert werden, wenn es gelingt, beide Größen einem Rechteckverlauf anzunähern. Dabei muss aber beachtet werden, dass mit zunehmenden Effektivwerten auch die Verluste ansteigen. Diese Zusammenhänge sind in [4] beschrieben.

4 ZUSAMMENFASSUNG

Der vorliegende Bericht diskutiert das Verhalten der feldschwächbaren permanentmagnet-erregten Synchronmaschinen. Da die Erregung dieser Maschinen konstant ist, kann nur durch die Phasenschwenkung des Stroms eine Feldstellung erzeugt werden. Es wurde die Feldschwächung dieser Maschinen ausreichend diskutiert und verschiedene Kriterien bezüglich der Bauweise sowie der Möglichkeit zur Feldschwächung erläutert. Weiterhin wurde ein Auslegungsbeispiel für eine Maschine in Sammlerbauweise mit Drehstromspeisung gerechnet und die Methode zur Bekämpfung der Ankerrückwirkung präsentiert. Da die Maschinen mit Sammlerbauweise eine hohe Luftspaltflussdichte, große Kraftdichte und einen breiten Feldschwächbereich aufweisen, können sie für Anwendungen mit hohen Drehzahlen sehr gut geeignet sein.

5 LITERATUR

- [1] W.-R. Canders, H. Mosebach, F. Laube:
„Systemvergleich elektrische Antriebe – zukünftige Antriebskonzepte“
Studie des IMAB, September 1998
- [2] H. Hupe, W. Niemann:
„PM-Synchronmaschine mit Feldschwächung“
Arbeitsbericht zum DFG-Vorhaben 274/87-2, November 1986
- [3] H. Weh, H. Mosebach, H. May:
„Design Concepts and Force Generation in Inverter-Fed Synchronous Machines with Permanent Magnet Excitation“, IEEE, Transaction on Magnetics, Vol. Mag.-20,
No. 5, September 1984, S. 1756-1761
- [4] H. Mosebach, W.-R. Canders:
„Average Thrust of Permanent Magnet Excited Linear Synchronous Motors for Different Stator Current Waveforms“
Proc. ICEM 1998, Int. Conference on Electrical Machines,
2.-4. Sep. 1998, Istanbul, Turkey, Vol. 2, S. 851-856