

EINFACHES 2D-MODELL FÜR ASYNCHRONMASCHINEN MIT SEHR GROßEM LUFTSPALT

W.-R. Canders, H. Mosebach

(Kurzfassung des Beitrages zur ELECTROMOTION 2003, Nov. 2003, Marrakesh, Marokko)

1 PROBLEMSTELLUNG

Beim Entwurf konventioneller Asynchronmaschinen wird gewöhnlich ein Luftspalt gewählt, der mit Rücksicht auf den - mit dem Verhältnis Luftspalt zu Polteilung ansteigenden - Blindleistungsbedarf so klein wie irgend möglich ist. Die untere Grenze ergibt sich vor allem aus den realisierbaren mechanischen Toleranzen. Der Luftspalt liegt daher meistens deutlich unter 1 mm. Für eine Reihe von Sonderanwendungen kann der Luftspalt jedoch nicht durch diese mechanische Untergrenze festgelegt werden, sondern wird ganz wesentlich durch die Einbauumgebung bestimmt. Ein relativ großer Luftspalt ergibt sich zum Beispiel bei den sog. Spaltrohrmaschinen, bei denen zwischen Stator und Läufer ein Trennrohr existiert, das zur Abschirmung chemisch aggressiver Medien oder zum Abbau von Druckunterschieden dient. Ein besonders großer Spalt wird auch bei Anwendungen erforderlich, bei denen zwischen Stator und Rotor ein Hochspannungsfeld existiert. Die letztere Situation besteht bei Antrieben für Röntgenröhren. Bei diesen beträgt die Differenzspannung ca. 100 kV und es werden sehr große Luftspalte von 10 ... 20 mm erforderlich. Die hierbei beobachteten geometrischen Verhältnisse sind qualitativ in **Bild 1** dargestellt. Der Läufer setzt sich aus einer Leitschicht (etwa ein Kupferhohlzylinder) und einem Eisenrückschluss zusammen.

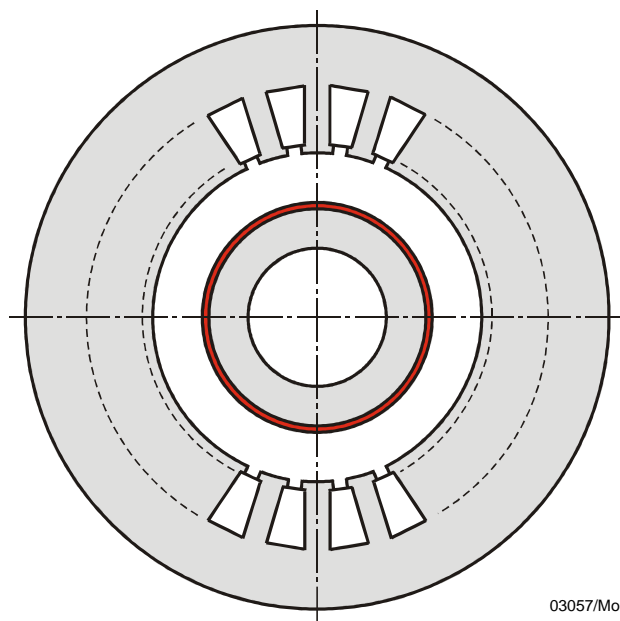


Bild 1: Asynchronmaschine mit sehr großem Luftspalt

2 FELDBERECHNUNG

Die klassischen Entwurfsverfahren gehen wegen des sehr kleinen Luftspalts von einer 1-dimensionalen Feldverteilung und einem "abgewickelten", d.h. cartesischen Modell aus. Feldlinien in Umfangsrichtung werden dadurch von vornherein eliminiert. Aus Gesprächen mit Anwendern ist bekannt, dass auch käufliche Entwurfsprogramme bei großen Luftspalten versagen. Das Ziel der analytischen Feldberechnung ist es daher, die wesentlichen Entwurfszusammenhänge durch relativ einfache Gleichungen zu beschreiben und insbesondere die durch den großen Spalt verursachten Abweichungen gegenüber der klassischen Berechnungsweise aufzuzeigen. Die 2D-Effekte werden hier an Hand des Kippmomentes, des Kippschlupfes (beides bei konstantem Statorstrom) und der Ersatzschaltbild-Größen diskutiert.

Zur analytischen Berechnung eignet sich ein 2-dimensionales Modell in Polarkoordinaten. Die Ströme im Stator werden als eingepprägter Strombelag, die Rotorströme als in einem dünnen Leitfähigkeitsbelag induzierter Strombelag dargestellt. Durch den Verzicht auf räumlich ausgedehnte Leitschichten sind die Lösungsfunktionen einfache Potenzfunktionen. Besselfunktionen können vermieden werden.

Die Auswertung liefert für die Drehmoment-Schlupf-Kennlinie den wohlvertrauten Zusammenhang

$$T = T_m \frac{2 s / s_m}{1 + (s / s_m)^2} \quad (2.1)$$

Offenbar ist T_m das Kippmoment bei konstantem Strom und s_m der Kippschlupf. Mit

r_1	...	Radius des Rotoreisens
r_2	...	Bohrungsradius des Stators
l_{iron}	...	Blechpaketlänge
\hat{K}_{s1}	...	Grundwellenamplitude des Statorstrombelages
p	...	Polpaarzahl
ω	...	Elektrische Kreisfrequenz $2\pi f$
σ	...	Leitfähigkeit der Rotorleitschicht
d	...	Dicke der Rotorleitschicht

erhält man für diese Größen

$$T_m = 2\pi r_2^2 l_{iron} \mu_0 \hat{K}_{s1}^2 \frac{(r_2 / r_1)^{2p}}{(r_2 / r_1)^{4p} - 1} \quad (2.2)$$

$$s_m = \pm \frac{p}{\mu_0 \omega \sigma d r_1} \frac{(r_2 / r_1)^{2p} - 1}{(r_2 / r_1)^{2p} + 1} \quad (2.3)$$

Mit Hilfe dieser Gleichungen können das für gegebene Abmessungen und Strombeläge erreichbare Maximalmoment und der zu erwartende Kippschlupf bestimmt werden, so dass für bekannte Anforderungen bereits eine Bestimmung der Hauptabmessungen möglich ist. Um die

durch 2D-Effekte entstehenden Einflüsse diskutieren zu können, ist eine Normierung auf die mit 1-dimensionaler Berechnung erhaltenen Größen T_{m1} und s_{m1} zweckmäßig. Man erhält für die derart bezogenen Größen:

$$\frac{T_m}{T_{m1}} = 4p \cdot \frac{(r_2/r_1)^{2p}}{(r_2/r_1)^{4p} - 1} \cdot \frac{r_2/r_1 - 1}{r_2/r_1} \quad (2.4)$$

$$\frac{s_m}{s_{m1}} = \frac{1}{p} \cdot \frac{(r_2/r_1)^{2p} - 1}{(r_2/r_1)^{2p} + 1} \cdot \frac{(r_2/r_1)^2}{r_2/r_1 - 1} \quad (2.5)$$

Bild 2 und **Bild 3** zeigen das relative Kippmoment und den relativen Kippschlupf als Funktion des bezogenen Luftspalts $\delta / r_2 = (r_2 - r_1) / r_2$ für verschiedene Polpaarzahlen p .

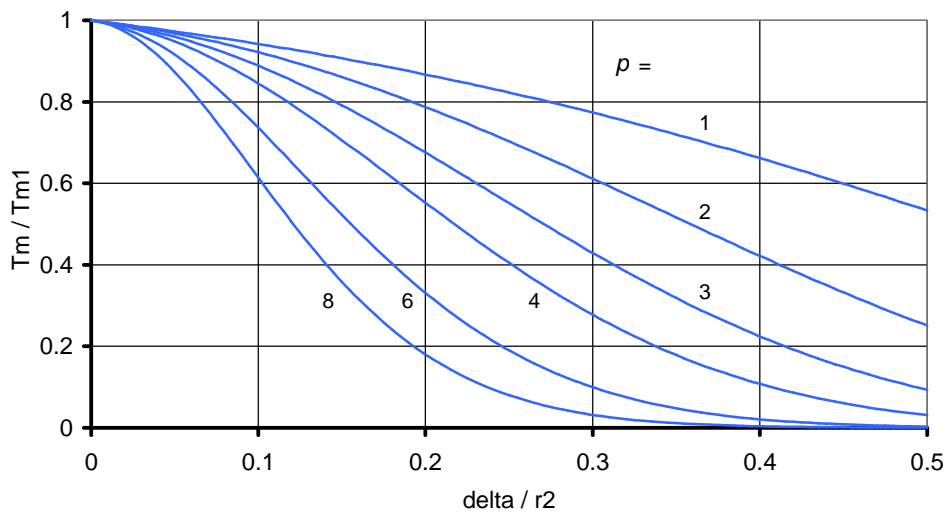


Bild 2: Reduktion des Kippmomentes durch 2D-Effekte

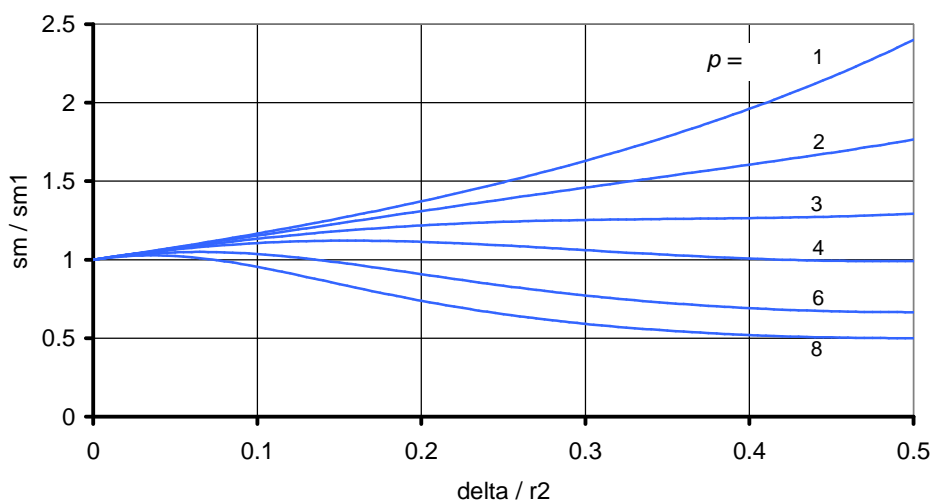


Bild 3: Änderung des Kippschlupfes durch 2D-Effekte

Es zeigt sich, dass der große Luftspalt für das Betriebsverhalten - wie erwartet - sehr schädlich ist. Dies gilt vor allem bei großen Polpaarzahlen, bei denen ein besonders ungünstiges Verhältnis von Luftspalt zu Polteilung vorliegt und sich ein erheblicher Teil des aus dem Stator austretenden Flusses bereits im Luftspalt schließt, ohne den Rotor zu erreichen. Es ist zu beachten, dass **Bild 2** nur die Änderung 2D gegenüber 1D beschreibt, der Bezugswert T_{m1} aber bereits seinerseits unter einem großen Spalt leidet.

Die Änderung des Kippschlupfes durch 2D-Effekte ist weniger ausgeprägt als beim Kippmoment. Es werden sowohl kleinere als auch größere Werte als im 1D-Fall gefunden.

3 ERSATZSCHALTBILDGRÖßEN

Trotz des 2-dimensionalen Feldverlaufs mit einem schlupfabhängigen Anteil der sich bereits im Luftspalt schließenden Feldlinien gelingt es wie bei der konventionellen Asynchronmaschine, das Verhalten durch ein Zweimaschennetzwerk zu beschreiben. Die Modifikationen zur Berücksichtigung der 2D-Effekte betreffen die in **Bild 4** farbig hervorgehobenen Elemente der Rotormasche.

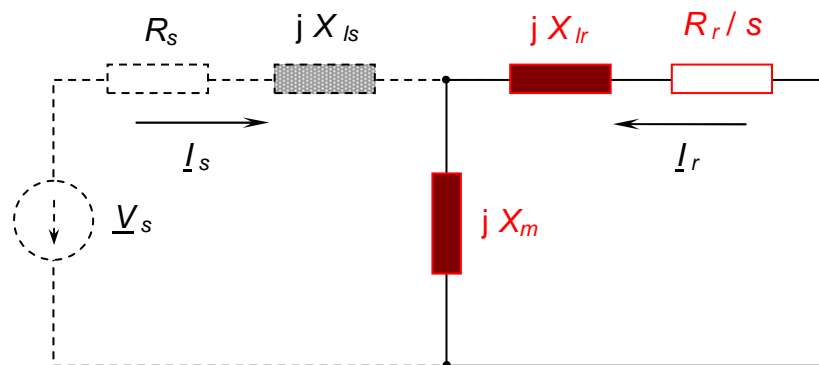


Bild 4: Ersatzschaltbild mit modifizierten Elementen für 2D-Effekte

Statorwiderstand und Statorstreureaktanz werden nicht weiter betrachtet, da diese Größen von den Vorgängen im Luftspalt entkoppelt sind. Sie sind daher nur gestrichelt angedeutet.

Für die praktische Anwendung ist es wichtig, dass die zu modifizierenden Elemente des ESB's bei gegebenem Luftspalt und bekannter Polpaarzahl konstant sind und - wie im Aufsatz gezeigt - durch einfache Gleichungen beschrieben werden können. Im Rahmen dieser Kurzfassung sollen die resultierenden Abhängigkeiten lediglich graphisch dargestellt werden.

Die verschiedenen Größen sind wieder auf die für den 1-dimensionalen Fall maßgeblichen Bezugswerte normiert. Das führt dazu, dass die relative Hauptreaktanz X_m/X_{m1} und der relative Rotorwiderstand R_r/R_{r1} für kleine Luftspalte unabhängig von der Polpaarzahl gegen 1 gehen. Als Folge des Leitschichtmodells verschwindet weiterhin in diesem Fall die Läuferstreuung X_{lr}/X_{m1} , da sie nur bei einem Käfigläufer entstehen kann.

Die Abhängigkeit der modifizierten Hauptreaktanz von Luftspalt und Polpaarzahl zeigt **Bild 4**.

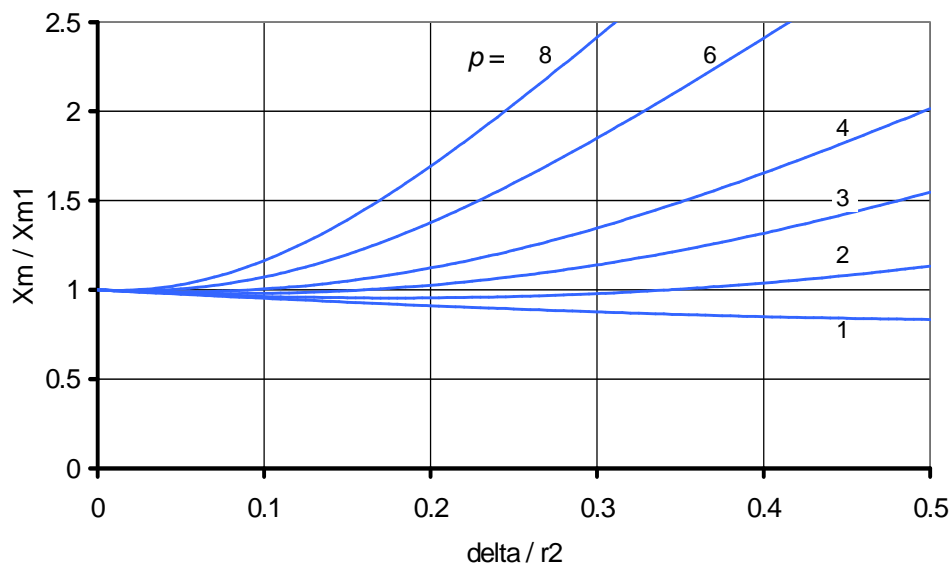


Bild 4: Relative Hauptreaktanz

Bei großen Spalten und Polpaarzahlen ist eine starke Vergrößerung der Reaktanz festzustellen, da der zunehmende Anteil der im Luftspalt verlaufenden Feldlinien zur Induktivität beiträgt. Zusätzlich existiert ein gegenläufiger Effekt durch die Einschnürung des Feldes nach innen hin. Dieser vermindert die Reaktanz (Werte < 1 bei $p = 1$ und $p = 2$).

Rotorwiderstand (**Bild 5**) und Rotorstreureaktanz (**Bild 6**) zeigen ebenfalls eine starke Abhängigkeit von Luftspalt und Polpaarzahl.

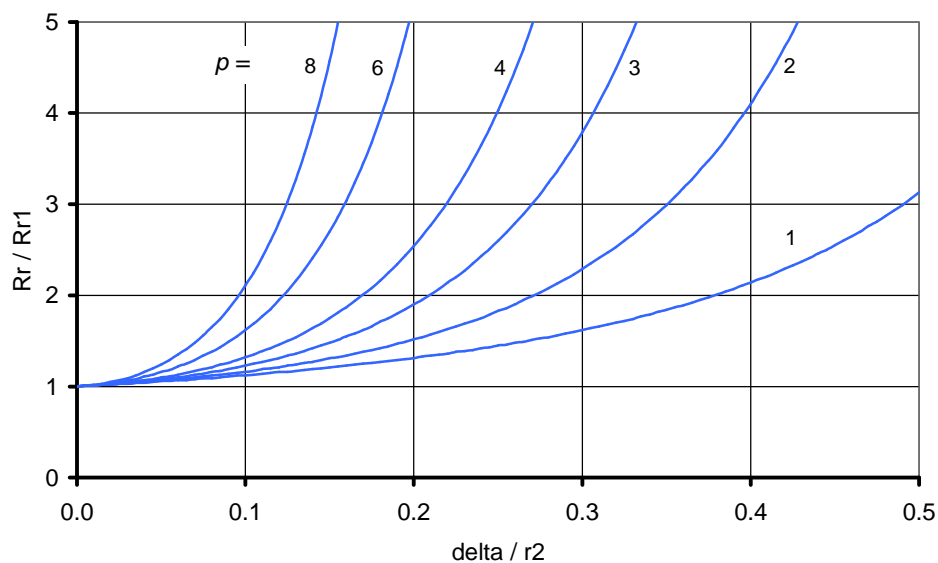


Bild 5: Relativer Rotorwiderstand

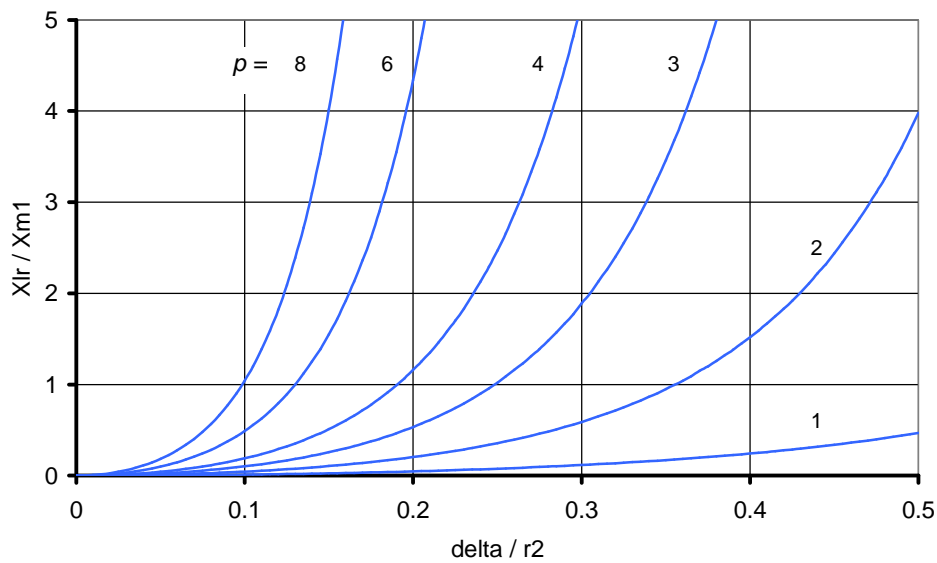


Bild 6: Relative Rotorstreureaktanz

Die Abweichungen von dem bei kleinen Spalten üblicherweise zugrunde gelegten 1-dimensionalen Fall sind insgesamt offenbar sehr groß. Es kann gefolgert werden, dass eine 2D-Behandlung für die vorliegende Situation unumgänglich ist.

Die im Aufsatz am Beispiel der Innenläufer-Asynchronmaschine vorgestellte Methode kann ohne Schwierigkeiten auf Maschinen mit einem innen liegenden Stator und Außenläufer übertragen werden und liefert ähnlich einfache Formeln. Geschlossene Ausdrücke für Drehmoment und Kippschlupf sind ferner noch möglich, wenn ein elektrisch leitfähiges und auf dem Stator aufliegendes Spaltrohr eingefügt wird.