

VERGLEICH VON QUERKRÄFTEN BEI 2D- UND 3D- FE-MODELLIERUNG EINES MAGNETSYSTEMS

Z. Shi

Für viele vom IMAB entwickelte Antriebssysteme werden zweckmäßig lineare permanentmagneterregte Synchronmaschinen eingesetzt. Normalerweise interessiert man sich nur für die Antriebskraft - in **Bild 1** die Kraft in z-Richtung (Längsrichtung). Bei solchen elektromechanischen Systemen mit ferromagnetischen Materialien und Permanentmagneten am Luftspalt entstehen jedoch auch im stromlosen Zustand Kräfte, die bestrebt sind, entweder den Luftspalt zu verkleinern (Normalkräfte in y-Richtung, instabile Kennlinie) oder eine größtmögliche Symmetrie (Querkräfte, stabile Kennlinie in einem begrenzten Bereich) zu erzeugen. Die seitlich wirkende Kraft - in **Bild 1** die Kraftkomponente in x-Richtung - kann im Einzelfall störend sein, aber auch in anderen Fällen zur Spurstabilisierung genutzt werden. Um die in dem elektromechanischen System nach **Bild 1** auftretenden Querkräfte zu berechnen, kommt eine analytische Lösung wegen der unregelmäßigen Geometrie und des großen Luftspalts nicht in Frage. Um die Geometrie möglichst genau zu modellieren, und auch Eisensättigung einzuschließen, wird das numerische Verfahren FEM verwendet.

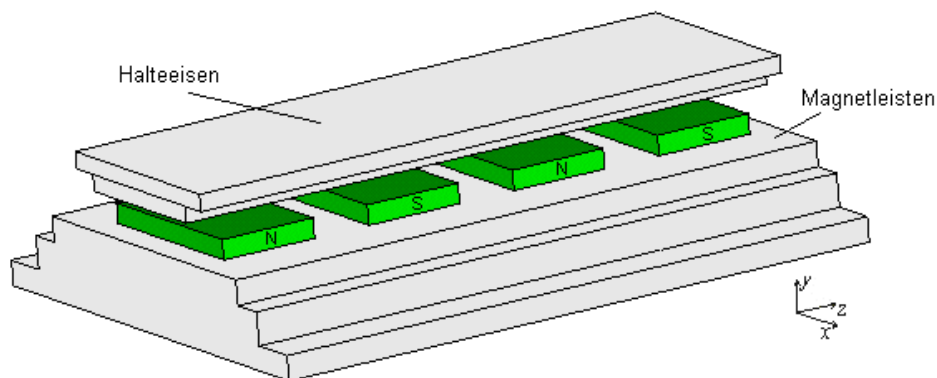
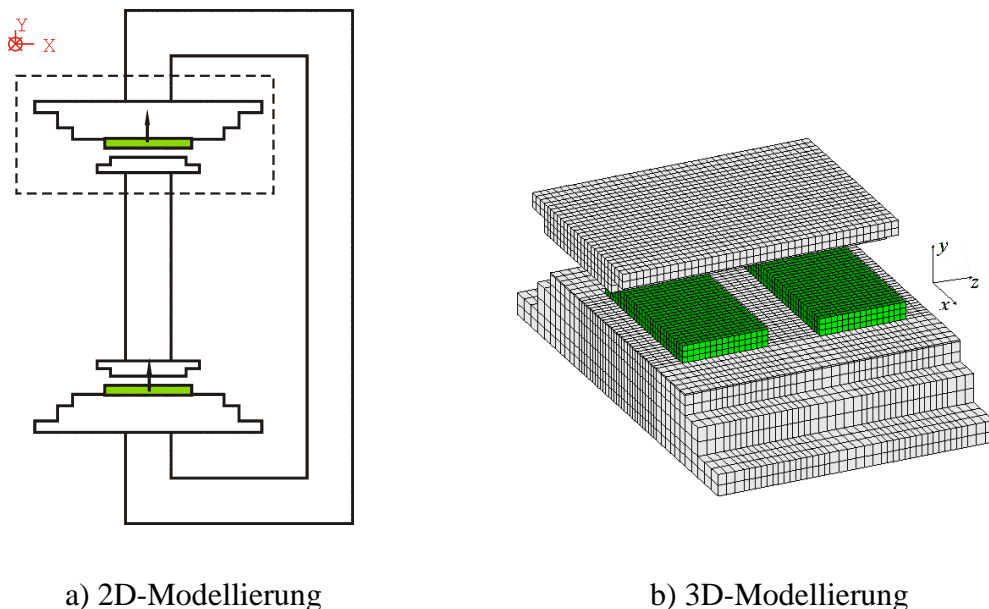


Bild 1: Untersuchtes elektromechanisches System mit PM

Bei der in **Bild 1** gezeigten Situation handelt es sich wegen der in Längsrichtung alternierenden Polarität der Permanentmagnete um ein dreidimensionales (3D-) Feldproblem. Die numerische 3D-Behandlung dieses Problems ist zwar noch relativ einfach, da hier statt eines Stators mit Nuten und Spulen nur ein massiver Eisenrückschluss vorhanden ist. Dennoch ist die Rechnung wegen der großen Zahl erforderlicher Elemente immer noch sehr aufwändig. Deshalb wird zunächst versucht, das Problem mit einer 2D-Modellierung zu lösen. Dies gelingt zumindest näherungsweise, wenn lediglich der Querschnitt eines in Längsrichtung unbegrenzten Modells modelliert wird und die in der Realität weitgehend sinusförmige Feldverteilung in ihrer Kraftwirkung durch einen pauschalen Faktor $1/2$ (Mittelwert über $\sin^2 x$) berücksichtigt wird. Bei diesem Vorgehen besteht lediglich die Schwierigkeit, für den Rückschluss der im Original eigentlich in Längsrichtung verlaufenden Feldlinien zu sorgen.

Dies gelingt durch das in **Bild 2a** dargestellte Rechenmodell, bei dem der interessierende Part doppelseitig ausgeführt ist und die Feldlinien über ein Joch mit unendlich hoher relativer Permeabilität außen herum geschlossen werden können. Der eigentlich interessierende Aktivteil ist in **Bild 2a** eingerahmt. Er stellt folglich nur die Hälfte des Rechengebiets dar.

Mit der beschriebenen 2D-Modellierung kann man die Größenordnung der Querkräfte recht zuverlässig bestimmen. Für eine genaue quantitative Bestimmung im Sinne einer Verifizierung ist die wesentlich kompliziertere 3D-Modellierung nach **Bild 2b** jedoch unumgänglich. Die aktiven Gebiete sind dabei wie erkennbar fein in Quader-Elemente aufgelöst. Dies reduziert die Zahl der erforderlichen Elemente im Vergleich zu einer Tetraeder-Auflösung und führt zu besseren Ergebnissen. Trotzdem beträgt die Zahl der Elemente insgesamt ca. 110000 (vom Programm maximal erlaubt: 128000). Für jede Position beträgt die Rechenzeit ca. 4h (Pentium III 700 MHz). Das Berechnen ganzer Kennlinien wird daher zweckmäßig automatisiert mit Parameterveränderung durchgeführt (Auslenkung zum Beispiel - 40 % bis + 40 %) und sinnvollerweise auf ein Wochenende verlagert.



a) 2D-Modellierung

b) 3D-Modellierung

Bild 2: Modellierung des Feldproblems

Zur Illustration der Querkrafterzeugung zeigen **Bild 3** (2D) und **Bild 4** (3D) die Feldverteilungen für die kraftneutrale symmetrische Mittellage und für eine Auslenkung um etwa eine halbe Magnetbreite.

Aus den Feldbildern für die 2D-Modellierung (**Bild 3**) wird deutlich, dass die Kraftwirkung vor allem auf einer mit der Auslenkung zunehmenden Reduktion des Feldquerschnitts beruht. Die magnetische Energie W_m wird damit offenbar über einem relativ großen Weg abgebaut, so dass die Querkräfte generell kleiner als die Normalkräfte in y-Richtung sind.

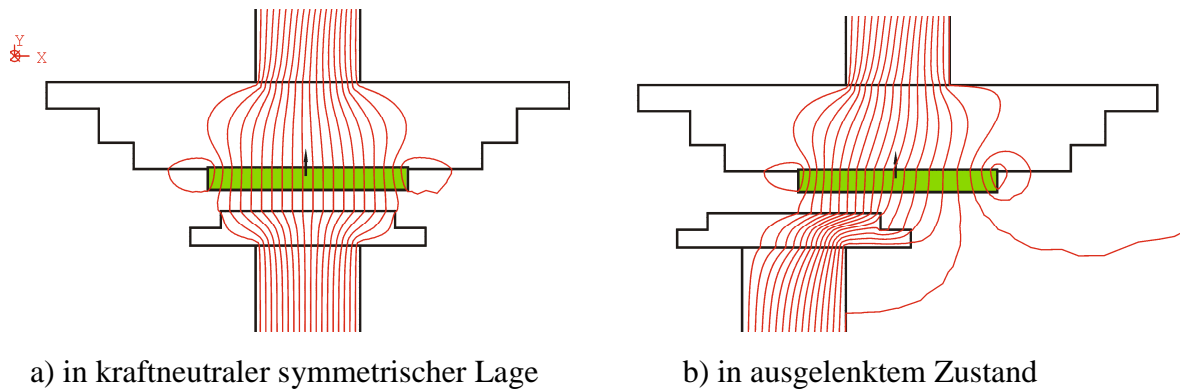


Bild 3: Feldbild der 2D-Modellierung

Dreidimensionale Felder können nicht mehr durch Feldlinien in einer Ebene dargestellt werden. Die Veranschaulichung gelingt jedoch nach **Bild 4** mit einem 3D-Profil des magnetischen Feldes.

Für den nicht ausgelenkten Fall (**Bild 4a**) zeigt sich, dass die Annahme einer in Längsrichtung sinusförmigen Feldverteilung zumindest für die Mitte der Anordnung gut erfüllt ist.

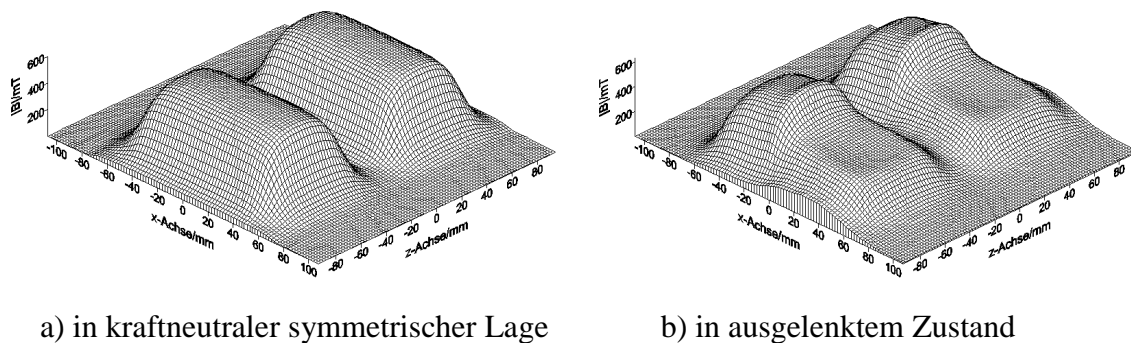


Bild 4: Flussdichteverteilung in der mittleren Luftspaltebene der 3D-Modellierung

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Modellierungen auf die erhaltenen Querkräfte sollen abschließend durch den Vergleich der entsprechenden Kennlinien (**Bild 5**) diskutiert werden. Die Kräfte sind dabei auf einen Referenzwert normiert.

Im Vergleich zum zweidimensionalen Modell liefert die Berücksichtigung der dritten Dimension mit 3D-Modellierung wie erwartet etwas kleinere Kräfte, doch ist die 2D-Näherung in Anbetracht der Problematik als sehr gut zu bezeichnen. Die Lage des Maximums wird sehr gut wiedergegeben, während die Absolutwerte etwa um 10 – 15 % abweichen.

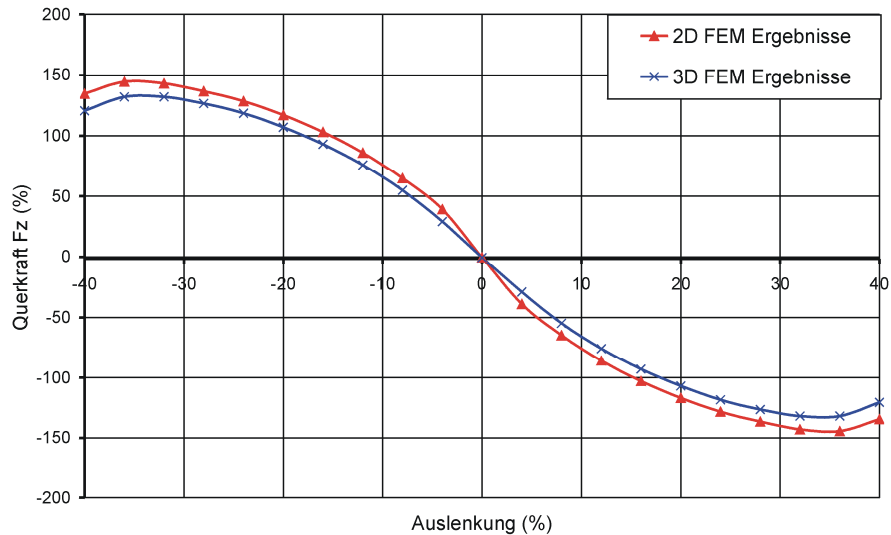


Bild 5: Kennlinien der Querkräft

Bei der Interpretation der Ergebnisse wird die 3D-Rechnung als "richtig" definiert. Diese Annahme ist jedoch nicht automatisch zutreffend und muss im Einzelfall nachgeprüft werden. Bei verschiedenen Rechnungen hat sich bei der 3D-Modellierung eine erhebliche Sensibilität gegenüber der Art und Feinheit der Vernetzung erwiesen. Sie beruht zum Teil auf verfahrensbedingten Fehlern durch die Beschränkung der maximalen Elementzahl des verfügbaren Programms.

Generell ist davon auszugehen, dass 2D- und 3D-Modellierung einander ergänzen und keine Methode die andere vollständig ersetzen kann.

FELDORIENTIERTE REGELUNG EINER VOLLPOL- SYNCHRONMASCHINE MIT MATLAB -SIMULINK

I. Verde

1 EINLEITUNG

Vollpol-Synchronmotoren haben einen gleichmäßigen Luftspalt zwischen Stator und Rotor, so dass aufgrund der Symmetrie dieses Motors die Induktivitäten in Längsrichtung (d-Achse) und Querrichtung (q-Achse) auch identisch sind. Diese Art von Motoren weisen bei geeigneter Ansteuerung, z. B. rotororientierter Regelung, einen glatten Momentenverlauf auf und sind für präzise Positionieraufgaben sehr geeignet.

Mit Hilfe der Simulationssoftware Matlab[®]-Simulink[®] wurde das mathematische Maschinenmodell definiert und bei niedriger Drehzahl simuliert. Die Zuordnung der entsprechenden Werte für die Strangströme bzw. Strangspannungen erfolgt mit Hilfe der internen Simulink[®] Elemente.

Folgende Eigenschaften wurden bei der Modellbildung angenommen:

- Die Stränge im Stator sind symmetrisch
- Der Motor hat eine sinusförmige induzierte Spannung
- Die Permeabilität des Eisens ist unendlich
- Sättigungseffekte und Eisenverluste sind vernachlässigbar

2 MODELL EINES PERMANENTERREGTEN VOLLPOL- SYNCHRONMOTORS

Das Maschinenmodell wird basierend auf folgenden elektromagnetischen Maschinen-
gleichungen erstellt:

$$\underline{u}_s(t) = R_s \dot{i}_s(t) + \frac{d\Psi_s(t)}{dt}, \text{ mit} \quad (2.1)$$

$$\dot{i}_s(t) = \dot{i}_{s1}(t) + \dot{i}_{s2}(t) e^{j\gamma} + \dot{i}_{s3}(t) e^{j2\gamma} \quad (2.2)$$

$$\underline{u}_s(t) = u_{s1}(t) + u_{s2}(t) e^{j\gamma} + u_{s3}(t) e^{j2\gamma} \quad (2.3)$$

$$\Psi_s(t) = L_s \dot{i}_s(t) + \frac{3}{2} \Psi_f e^{-j\varepsilon} \quad (2.4)$$

i_{s1} , i_{s2} , i_{s3} und u_{s1} , u_{s2} , u_{s3} sind die Strangströme bzw. die Strangspannungen, L_s die Induktivität des Motors, $\gamma = 2\pi/3$ ist der elektrische Winkel zwischen den einzelnen Phasen und $\Psi_f = L_s \cdot I_f$ die Flussverkettung der Permanentmagneten.