

PERMANENTMAGNETERREGTE QUERFLUSS- SYNCHRONMASCHINE (QFSM)

I. Verde

1 EINLEITUNG

Aus der Vielfalt der Bauarten elektrischer Maschinen gewinnen permanentmagneterregte Synchronmaschinen, die über Wechselrichter gespeist werden, an Bedeutung. Durch eine Umgestaltung des magnetischen Kreises derart, dass der Nutzfluss in der Ebene quer zur Bewegungsrichtung verläuft (bekannt als Transversalflussmaschine TFM), lassen sich Wicklungsformen angeben, die bei kleineren Polteilungen kleine Verluste erzeugen. Sie weisen gegenüber elektrisch erregten Maschinen Vorteile wie einfache Bauform und verlustarmer Rotor auf. Weitere Vorteile der TFM liegen in der hohen Kraftdichte und dem niedrigen Gewicht.

Im Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen wurden über Jahre sehr viele Varianten von Transversalflussmaschinen in den zwei Rotorbauformen Flachmagnet- und Sammlermagnetanordnung entwickelt.

Bei der Flachmagnetanordnung stimmt die Ebene der Permanentmagnete mit derjenigen des Luftspalts überein (radiale Magnetisierungsrichtung der Permanentmagneten).

Dagegen ist bei der Sammleranordnung die Ebene der Permanentmagnete um 90° gedreht. Zwischen den Permanentmagneten befinden sich Rotoreisenpole. Die Permanentmagnete werden mit wechselnder Magnetisierung (Magnetisierung senkrecht zum Radius) in der Sammleranordnung eingesetzt. Der Vorteil gegenüber der Flachmagnetanordnung besteht in höheren Flussdichten bzw. Kraftdichten.

Die permanentmagneterregte **Querfluss-Synchronmaschine(QFSM)** ist eine neue Art von Querflussmaschinen mit TFM ähnlichem Funktionsprinzip, jedoch erheblich einfacherem Aufbau.

2 AUFBAU UND FUNKTIONSWEISE

2.1 AUFBAU

Von der herkömmlichen Permanentmagnet- Synchronmaschine unterscheidet sich die QFSM durch die Anordnung des magnetischen Kreises, insbesondere durch die zur Bewegungsrichtung transversale Flussführung in Verbindung mit einer Flach- oder Sammleranordnung der Magneten im Rotor.

Die bisher bekannten Querflussmaschinen in Flach- oder Sammleranordnung sind keine Drehstrommaschinen. Sie werden in der Regel als Maschine mit nur einem bzw. zwei Strängen ($m = 1$ oder $m = 2$) gebaut. Um daraus eine drei- oder mehrsträngige Querflussmaschine zu bilden, wurden mehrere magnetisch nicht gekoppelte Maschinenteile zusammengefasst. Diese Maschinenteile funktionieren als einzelne Module, ohne mit den anderen magnetisch gekoppelt zu sein.

Die neue Art der permanentmagneterregten Querfluss-Synchronmaschine ähnelt vom Prinzip her der Drehstrommaschine. Sie besteht aus drei Maschinenteilen, die magnetisch miteinander gekoppelt sind (**Bild 1**). Als echte 3-strängige Maschine bietet sie den Vorteil des Betriebs an einem handelsüblichen 3-Phasen Wechselrichter.

Die prinzipielle Anordnung der QFSM als lineare Maschine - hier in Sammler-Bauweise - ist beispielhaft in **Bild 1** für die zwei wichtigsten Rotorstellungen maximaler Fluss und maximale Kraft dargestellt.

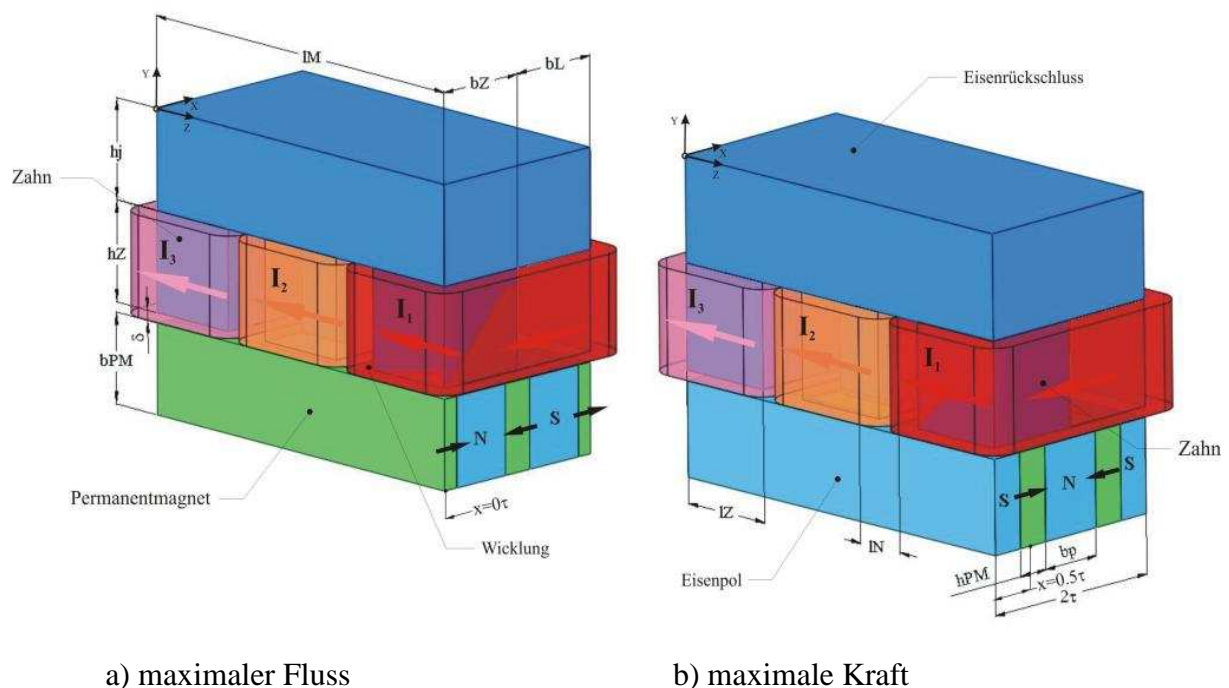


Bild 1: Abbildung der QFSM mit Drehstromwicklung für zwei Rotorstellungen

Die Drehstrom-Querflusssynchronmaschine besteht aus zwei magnetischen Kreisen:

- Der Erregerkreis:** Die Erregung wird über Permanentmagnete, in **Bild 1** grün gefärbt, in Sammleranordnung erzeugt, die zwischen den Rotorelementen, in **Bild 1** hellblau gefärbt, platziert sind. Die Magnetisierung zweier aufeinander folgender Permanentmagnete weist ein unterschiedliches Vorzeichen auf, so dass die als Sammler ausgeführten Rotorelemente einen aus- bzw. eintretenden Fluss aufweisen.

Bei der **maximalen Flussstellung (Bild 2a)** befinden sich die Sammler mittig unter den Zähnen (Statorelement). Dies stellt somit die Position für den maximalen Erregerfluss dar und wird als elektrischer Winkel 0° bzw. $x = 0$ definiert.

Die **maximale Kraftstellung (Bild 2b)** wird erreicht, wenn jeweils die Permanentmagneten unter einem Zahn platziert sind. Diese Position ist die Stellung maximaler elektromagnetischer Kraftbildung und wird für einen elektrischen Winkel von 90° bzw. $x = 0,5\tau$ erreicht.

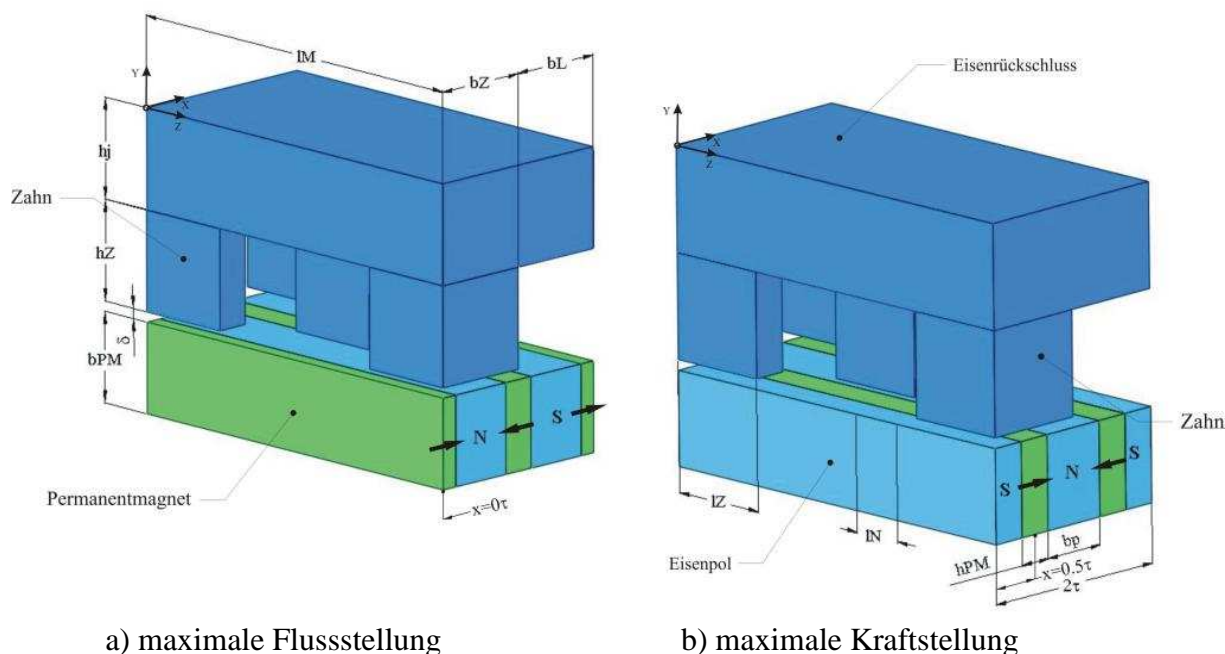


Bild 2: Abbildung zweier Polteilungen der QFSM (ohne Wicklungen) in Sammlerbauweise

- Der Ankerkreis** besteht aus drei Wicklungen, die um die Statorelemente, in **Bild 2** dunkelblau gefärbt, gewickelt sind. Sie werden aus einem sinusförmigen Drehstromsystem gespeist. Wegen der Phasenverschiebung zwischen den Strömen eines Drehstromsystems um einen elektrischen Winkel von 120° müssen auch die Statorelemente, wie in **Bild 2** dargestellt, geometrisch entsprechend um den gleichen Winkel gegeneinander verdreht oder verschoben sein.

Die Bewegung des Rotors um eine Polteilung τ entspricht damit einer Änderung des elektrischen Winkels um 180° . Geometrisch wurden die drei Zahnreihen gegeneinander um $\Delta x = \frac{2\tau}{3}$ verschoben. Die Rückführung des magnetischen Flusses erfolgt über den Eisenrückschluss.

2.2 FUNKTIONSWEISE

Um die Funktionalität dieses Motors besser zu verstehen, werden die beiden Kreise für die zwei betrachteten Rotorstellungen getrennt voneinander betrachtet.

Das **Erregerfeld** B_f wird durch die Permanentmagnete in Sammler-Bauweise erzeugt. Der Erregerfeldverlauf folgt aus **Bild 3**. Die Permanentmagneten wurden so dimensioniert, dass im Luftspalt ein magnetisches Erregerfeld von ca. $B_f = 1$ T erzeugt wird.

Maximale Flussstellung: Der Haupterregerfluss (Φ_{h1} in **Bild 3a**) verläuft vom Nordpol über den 1. Zahn, dann weiter über den Eisenrückschluss bis zu Oberseite des 2. Zahns. Dort wird der Fluss Φ_{h1} zum Fluss Φ_{h2} des zweiten Zahns addiert und dann weiter als Φ_{h3} durch den 3. Zahn (von oben nach unten) zum Südpol zurückgeführt.

Maximale Kraftstellung: In der in **Bild 3b** dargestellten Position von 1. Zahn und Erregeranordnung schließt sich das Erregerfeld $\Phi_{\sigma 1}$ (dies ist ein Streufeld, also kein Anteil des Haupterregerfeldes) nicht über den Eisenrückschluss, sondern verläuft in Bewegungsrichtung vom Nordpol durch den Zahn zum Südpol.

Das Haupterregerfeld verläuft in dieser Position vom Nordpol als Φ_{h2} durch den 2. Zahn, dann weiter durch den Rückschluss als Φ_{h3} zum 3. Zahn und zurück zum Südpol.

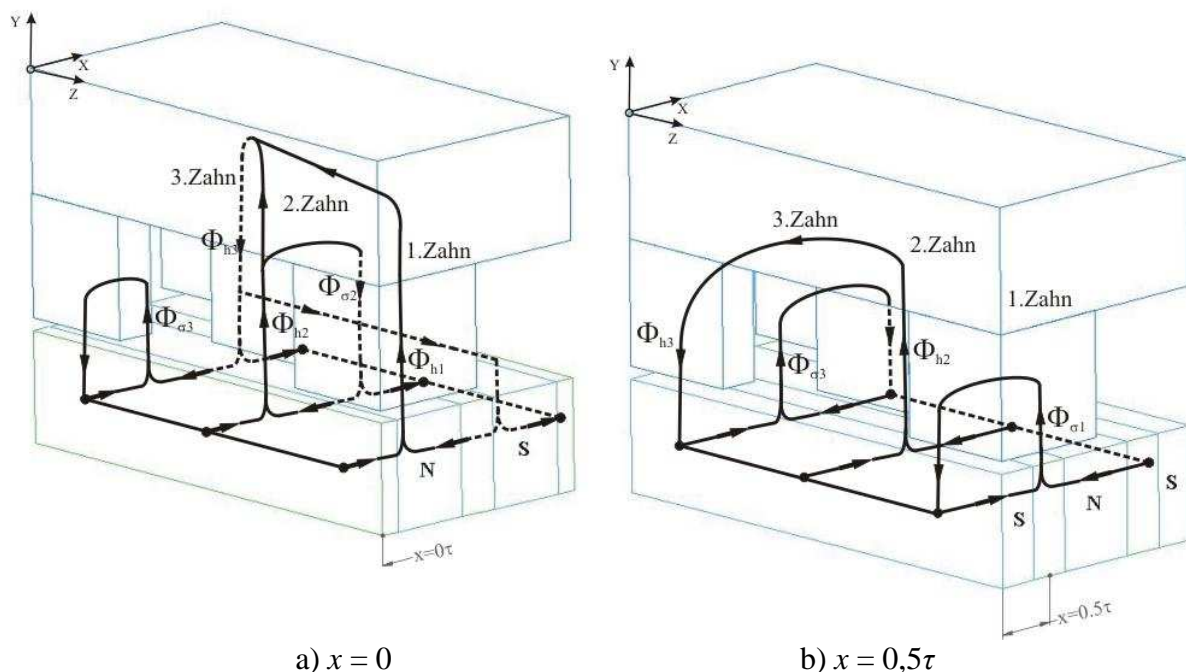


Bild 3: Erregerfeldverlauf der QFSM (Leerlauf) bei $x = 0$ bzw. $x = 0,5\tau$

Ankerfeld B_a : In **Bild 4** ist ausschließlich der Ankerfeldverlauf bei stromdurchflossener Ankerwicklung dargestellt. Die Permanentmagnete sind hier als unmagnetisiert zu betrachten. Die drei Spulen sind gleichsinnig gewickelt und werden mit Drehstrom versorgt.

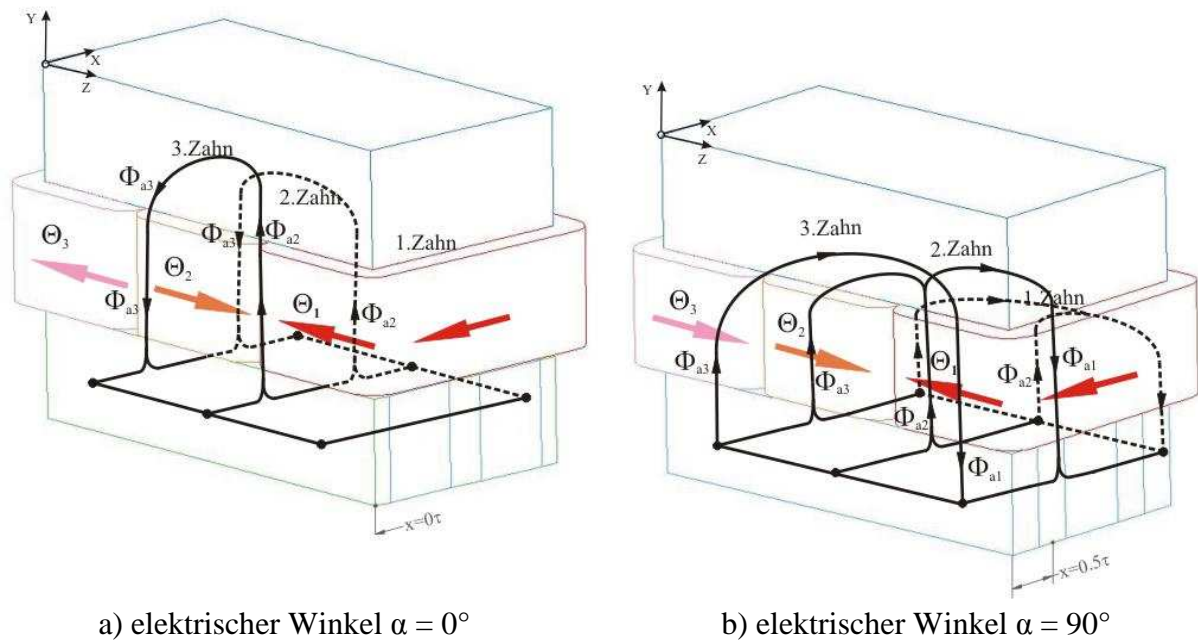


Bild 4: Ankerfeldverlauf der QFSM bei $x = 0$ bzw. $x = 0,5\tau$

Das Gesamtfeld der QFSM folgt aus der Summe von Erregerfeld und Ankerfeld und darf, um Sättigung zu vermeiden, nicht größer als 2 T sein. Aus diesem Grund sollte das Ankerfeld einen Wert unterhalb von 1 T haben.

Die benötigte Durchflutung Θ_{\max} lässt sich nach der folgenden Formel ermitteln:

$$\Theta_{\max} = w \cdot k_{CU} \cdot S_{\max} \cdot A_N$$

mit

w : Windungszahl (in der Simulation $w=1$)

k_{CU} : Kupferfüllfaktor ($k_{CU}=0,6$)

S_{\max} : maximale Stromdichte ($S_{\max} = 5 \text{ A/mm}^2$)

$A_N = l_N \cdot h_Z$: Nutfläche ($A_N = 15,5 \text{ mm} \cdot 30 \text{ mm}$)

Die Durchflutung hat einen sinusförmigen Verlauf mit dem Scheitelwert $\Theta_{\max} = 1395 \text{ A}$. Dieser Wert wurde auch für die Simulation benutzt.

Der Position maximaler Flussbildung (**Bild 4a**) entspricht ein elektrischer Winkel von $\alpha = 0^\circ$. D. h. die Durchflutung in der 1. Spule besitzt den Wert $\Theta_1 = 0$ und Θ_2 bzw. Θ_3 in den anderen beiden Spulen sind gleich groß mit entgegengesetztem Vorzeichen. Der Ankerfluss wird von diesen beiden Spulen erzeugt und ist die Summe der Flüsse Φ_{a2} und Φ_{a3} . Dieser Ankerfluss verläuft vom 2. Zahn über den Rückschluss in den 3. Zahn und zurück über den Eisenpol.

Bei einem elektrischen Winkel von $\alpha = 90^\circ$ (**Bild 4b**: Position $x = 0,5\tau$) wird die Durchflutung Θ_1 ihren maximalen Wert $\Theta_1 = \Theta_{max}$ annehmen und die beiden anderen entsprechend $\Theta_2 = \Theta_3 = -\Theta_{max}/2$. Das Gesamtfeld wird hier von den drei einzelnen Feldanteilen gebildet und verläuft vom Eisenpol nach oben in den 2. und 3. Zahn (Flusskomponenten Φ_{a2} und Φ_{a3}), dann weiter über den Rückschluss durch den 1. Zahn und zurück.

Gesamtfeld B_δ aus Erreger- und Ankerfeld: Das resultierende Gesamtfeld aus der Überlagerung beider Feldanteile ist in **Bild 5** dargestellt.

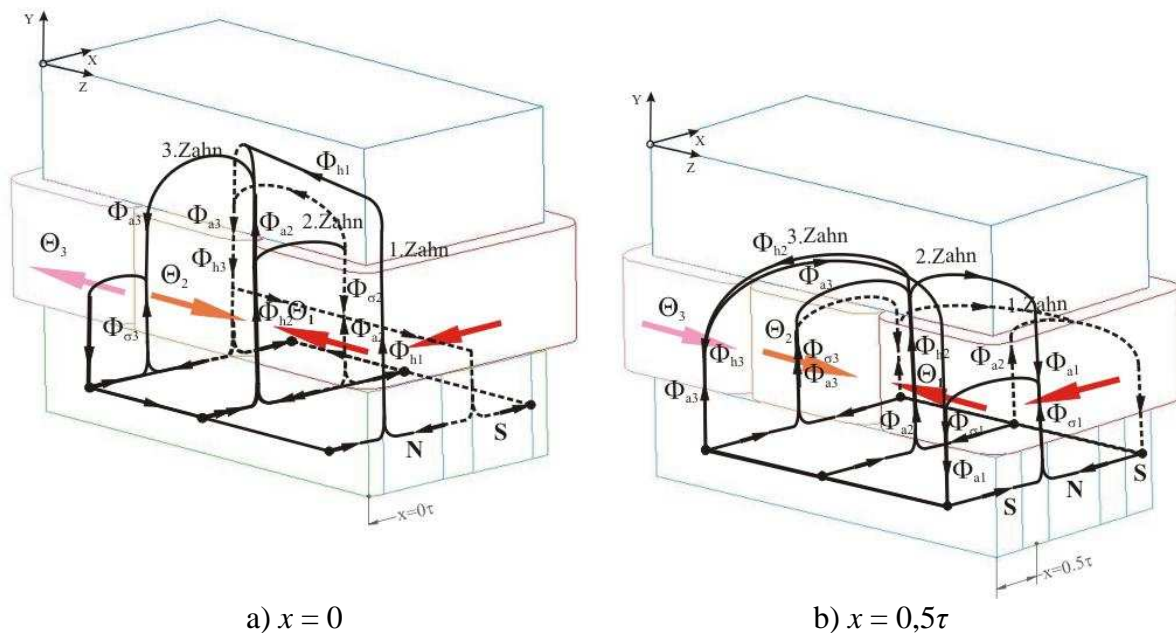


Bild 5: Gesamtfeldverlauf der QFSM für zwei Rotorstellungen

Bedingt durch die unterschiedlichen Vorzeichen des Erregerfeldes in einem Polbereich und aufgrund des gleichsinnigen Ankerfeldes erfolgt eine Feldschwächung im linken Bereich des 3. Zahns und eine Feldverstärkung im rechten Bereich des 2. und 3. Zahns bei $x = 0$.

Bei der Rotorstellung $x = 0,5\tau$ tritt durch die Überlagerung der beiden Felder eine Feldschwächung im 3. Zahn und eine Verstärkung im 1. und 2. Zahn auf.

3 NUMERISCHE FELDBERECHNUNG

3.1 Implementierung im FE- Programm

Aufgrund der komplizierten 3D-Geometrie der QFSM stößt man mit der analytischen Rechnung an die Grenzen. Es ist schwierig bis aussichtslos, das Modell dieser Maschine analytisch korrekt zu behandeln, da nicht alle physikalischen Größen wie z. B. Feldverteilung im Luftspalt unter Sättigungseinfluss, magnetische Kräfte, magnetische Energie sowie die Haupt- und Gegeninduktivitäten bekannt sind. Um eine genaue Untersuchung des magnetischen Kreises durchführen zu können, wurde ein Simulationsmodell mit Hilfe der numerischen Berechnung analysiert.

Die Bereiche der Maschinengeometrie mit starken Änderungen des Feldes (Luftspalt) wurden sehr fein vernetzt, um eine hohe Genauigkeit der Lösung zu erreichen (**Bild 6**).

Die Geometrie der Maschine weist nach zwei Polteilungen 2τ eine Periodizität auf. Diese Eigenschaft wird beim Aufbau im FE-Programm ausgenutzt, um die Implementierung zu vereinfachen bzw. die Rechenzeit zu verkürzen.

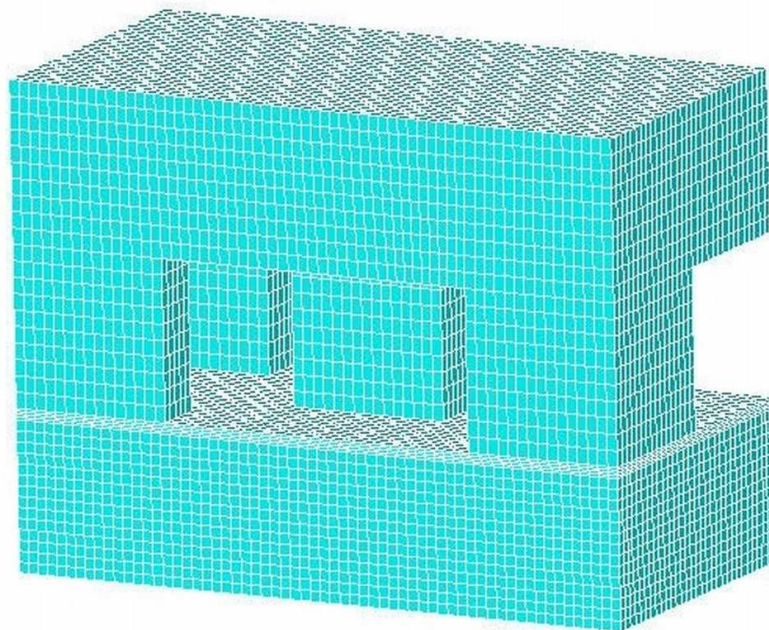


Bild 6: Vernetztes Volumen des Simulationsmodells

Nach der Vernetzung muss für die Geometrie ein elektromagnetisches Feldproblem durch Festlegung von Materialparametern, Einprägen von Strömen und Setzen von Randbedingungen definiert werden. Mit der nun vorliegenden Diskretisierung und den zugewiesenen Eigenschaften wird ein Gleichungssystem zur Berechnung der Feldverteilung aufgestellt. Es umfasst hier mehr als 100000 Gleichungen.

In der Simulation wurde für die Statorelemente, den Rückschluss sowie die Eisenpole eine B - H -Kurve für massives Eisen definiert. Die Permanentmagnete sind Seltene-Erden-Magnete mit einer Remanenzflussdichte von $B_r = 1,175$ T und einer Koerzitivfeldstärke von $H_c = 900$ kA/m.

3.2 Simulationsergebnisse

Nach der Feldberechnung ist die Verteilung des Magnetfeldes im gesamten Lösungsraum bekannt. Die Gesamtfeldverteilung im Luftspalt aus der Überlagerung von Anker- und Erregerfeld ist in **Bild 7** dargestellt.

Es ist gut erkennbar, dass das Gesamtfeld (**Bild 7c**), wie in Kapitel 2.2 erläutert, bei $x = 0$ im rechten Bereich des 2. und 3. Zahns durch die Wirkung beider Felder verstärkt wird. Die erreichten Werte liegen bei +1,9 T bzw. -1,9 T.

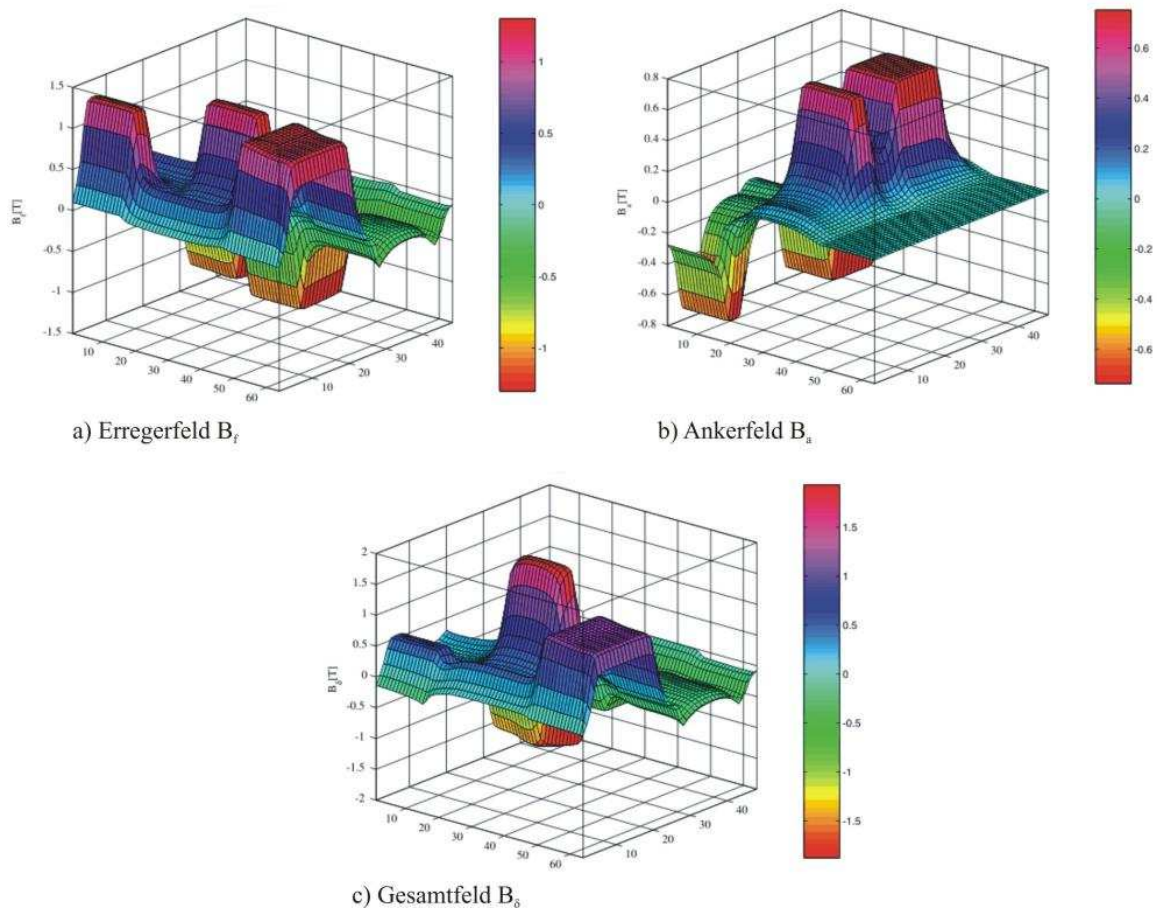


Bild 7: Feldverteilung im Luftspalt bei $x = 0$

In der maximalen Kraftstellung ($x = 0,5\tau$) ist das Luftspaltfeld anders verteilt (**Bild 8c**). Die höchsten Werte des Gesamtfeldes B_g werden im Bereich des 1. und 3. Zahns erreicht, allerdings mit geringerer Amplitude als im ersten Beispiel für $x = 0$.

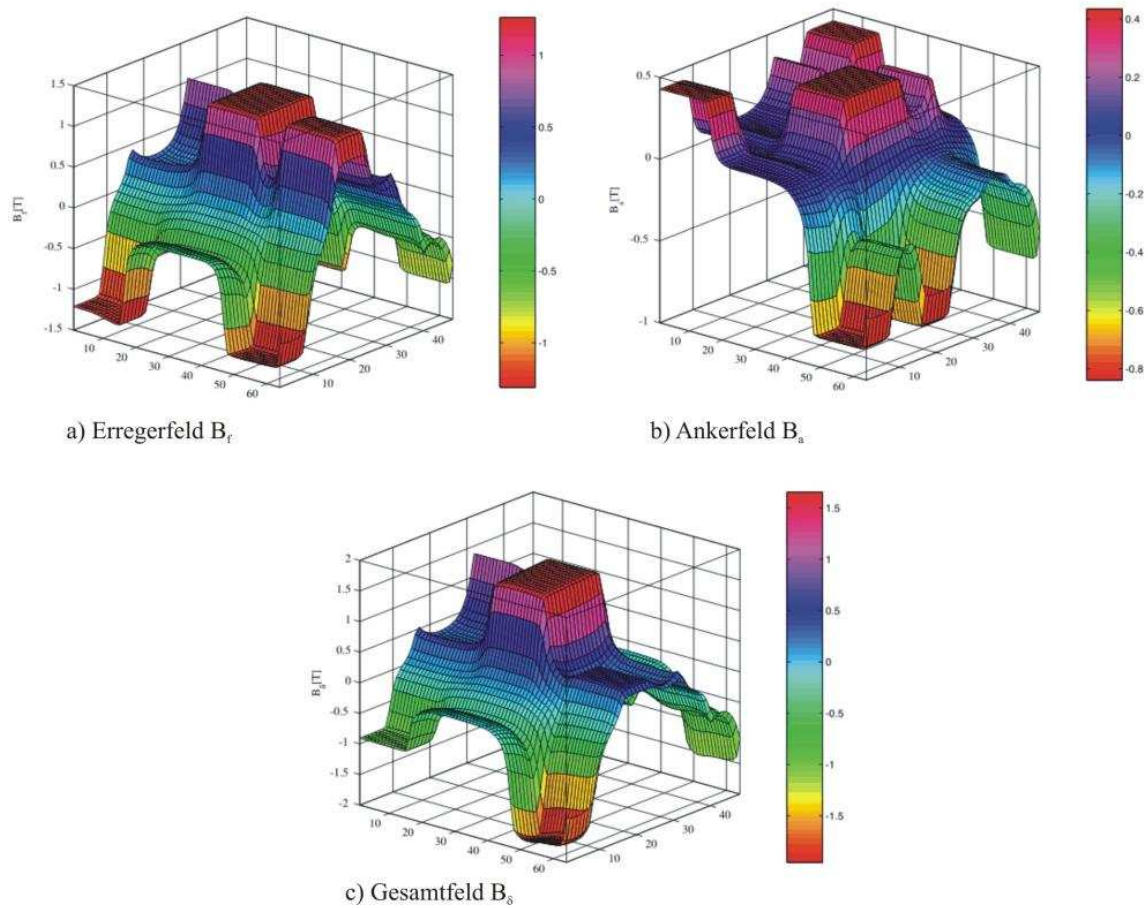


Bild 8: Feldverteilung im Luftspalt bei $x = 0,5\tau$

Unter Vernachlässigung der Randfelder wird die erzeugte Kraft in Bewegungsrichtung aus der im Luftspalt vorhandenen Energie ermittelt.

Die vorhandene magnetische Energie im Luftspalt ergibt sich aus der folgenden Gleichung:

$$W_{m\delta} = \frac{1}{2} B_\delta \cdot H_\delta \cdot V_\delta$$

mit

B_δ : Flussdichte im Luftspalt

H_δ : magn. Feldstärke

V_δ : Luftspaltvolumen

Für den Luftspalt gilt: $B_\delta = \mu_0 \cdot H_\delta$

Damit folgt für die magnetische Energie im Luftspalt: $W_{m\delta} = \frac{B_\delta^2}{2\mu_0} \cdot \delta \cdot l_M \cdot x$

Aus der Ableitung der magnetischen Energie nach der x-Komponente resultiert die Kraft in Bewegungsrichtung:

$$F_{x\delta} = \frac{\partial W_{m\delta}}{\partial x} = \frac{B_{\delta}^2}{2\mu_0} \cdot \delta \cdot l_M$$

Der Verlauf der Kraft $F_{x\delta}$ und die mittlere Kraft bei Verschiebung des Rotors um zwei Polteilungen sind in **Bild 9** dargestellt. Die Kraftwelligkeit liegt bei ca. $\pm 5,5\%$.



Bild 9: Kraftverlauf bei einer Verschiebung des Rotors um zwei Polteilungen

Auf die Fläche von 2τ bezogen ergibt sich folgende Kraftdichte:

$$\frac{F_{x\delta}}{2\tau} = F'_x = \frac{B_{\delta}^2}{2\mu_0 \cdot 2\tau} \cdot \delta \cdot l_M$$

Für die betrachtete Maschinengeometrie resultiert ein Wert von ca. 30 kN/m^2 . Für kleinere Polteilungen und kleine Luftspalte sind auch Werte bis zu 100 kN/m^2 erreichbar.

Neben der betrachteten linearen Anordnung kann die QFSM auch als rotierende Maschine gebaut werden (**Bild 10**). Die Spulen müssten bei solch einer Anordnung durch Ringspulen ersetzt werden.

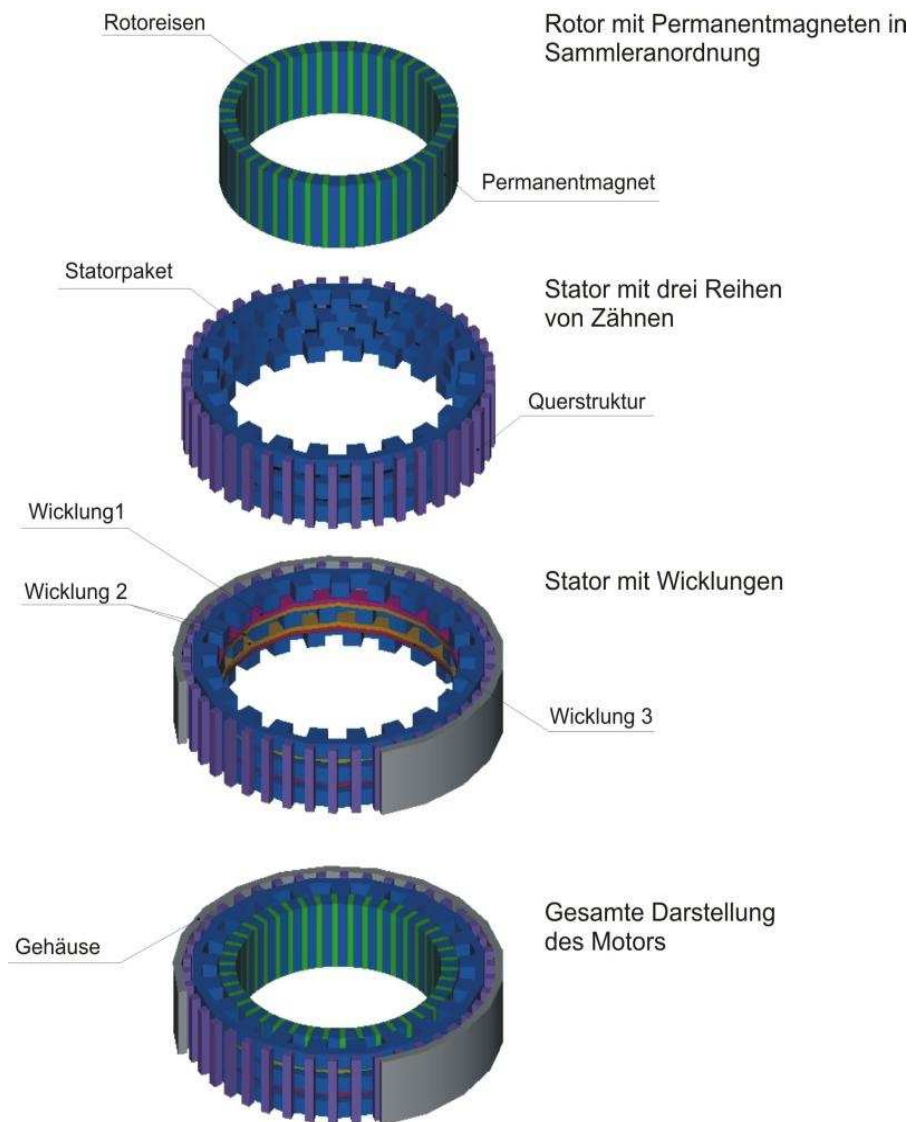


Bild 10: Rotierende Anordnung der QFSM

4 ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde eine neuartige Ausführungsform einer Synchronmaschine mit transversaler Flussführung dargestellt.

Die beschriebene Querfluss-Synchronmaschine besitzt günstige Voraussetzungen, um höhere Kraftdichten für kleine Polteilungen bei geringem Bauvolumen zu erreichen. Durch den Einsatz weiter verbesserter Hochenergie-Permanentmagnete ist noch zusätzliches Entwicklungspotenzial gegeben.

Besondere Anwendungsfelder dieser neuen Maschine könnten Direktantriebe höchster Kraftdichte, Fahrzeugantriebe mit geringem Gewicht sowie Linearantriebe sein.