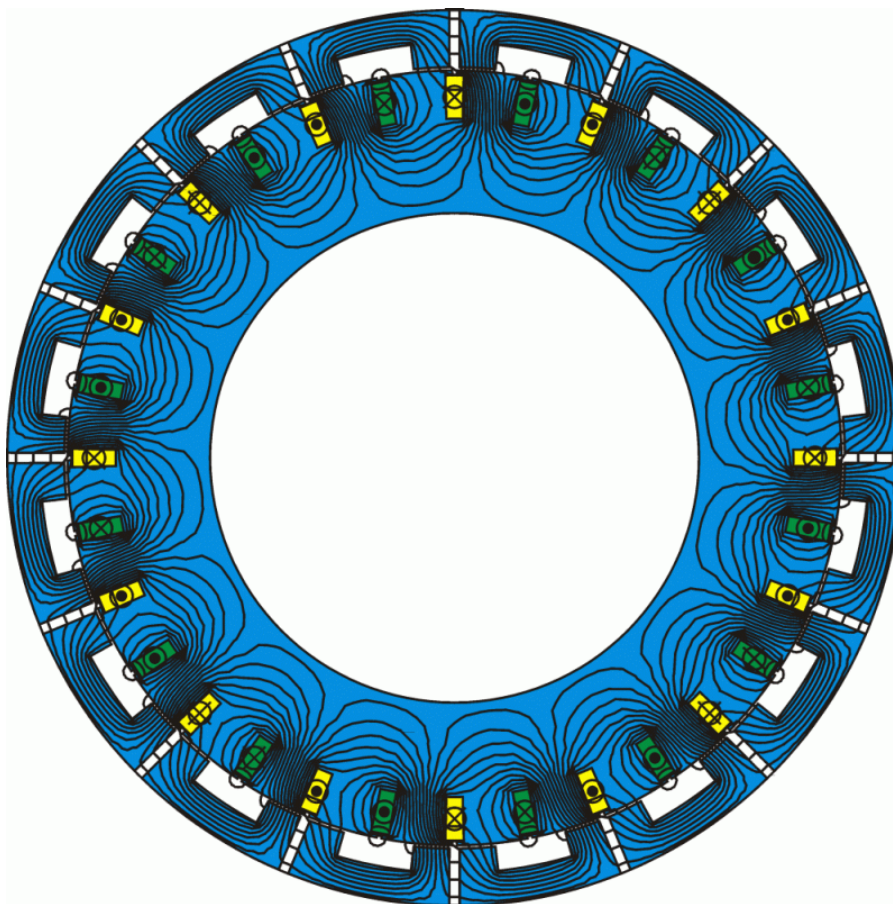


# SIMULATION ZWEISTRÄNGIGER STATORERREGTER SYNCHRONMASCHINEN (SESM)

Falk Laube

Im Zusammenhang mit der Entwicklung von schnelllaufenden Antrieben mit Außenläufer wurde die Statorerregte Synchronmaschine (SESM) untersucht. Von besonderem Interesse war die benötigte Umrichterleistung im Verhältnis zur erreichbaren mechanischen Leistung bzw. der Wechselrichteraufwand. Für die Bestimmung des Wechselrichteraufwands ist die Simulation der Zustandsgrößen der Maschine, insbesondere des Stromverlaufes erforderlich, da dieser in der Realität stark vom angestrebten rechteckförmigen Verlauf abweicht.

Zunächst wurde die zweisträngige Maschinenausführung nach **Abb. 1** näher betrachtet. Die Kraftwirkung (Lorentz) entsteht durch das Zusammenwirken des Ankerstromes unter dem Pol (Strang 1) und dem vom Strom in der

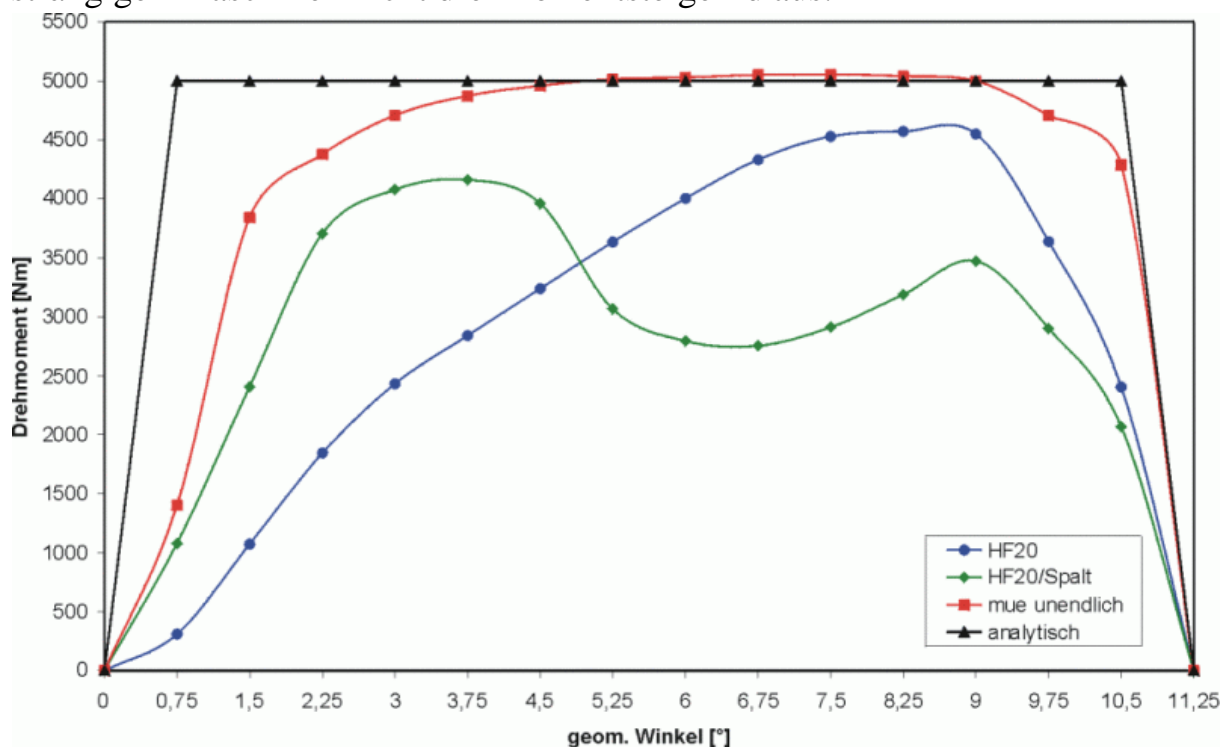


**Abb. 1:** Zweisträngige SESM (Geometrie und Feldbild)

Pollücke (Strang 2) hervorgerufenen Luftspaltfeld unter dem Pol. Durch zyklisches Schalten der Strangströme wird eine Kraftwirkung in eine Richtung und damit eine synchrone Drehbewegung erreicht.

Die zweisträngige Maschinenausführung wurde einerseits auf Grund ihrer Einfachheit gewählt, andererseits sind die magnetischen Kopplungen zwischen den Maschinensträngen gegenüber Maschinen mit größerer Strangzahl geringer ausgeprägt. Abhängig von der Rotorstellung ist jedoch auch schon bei der zweisträngigen Variante eine starke magnetische Kopplung zwischen den beiden Strängen vorhanden.

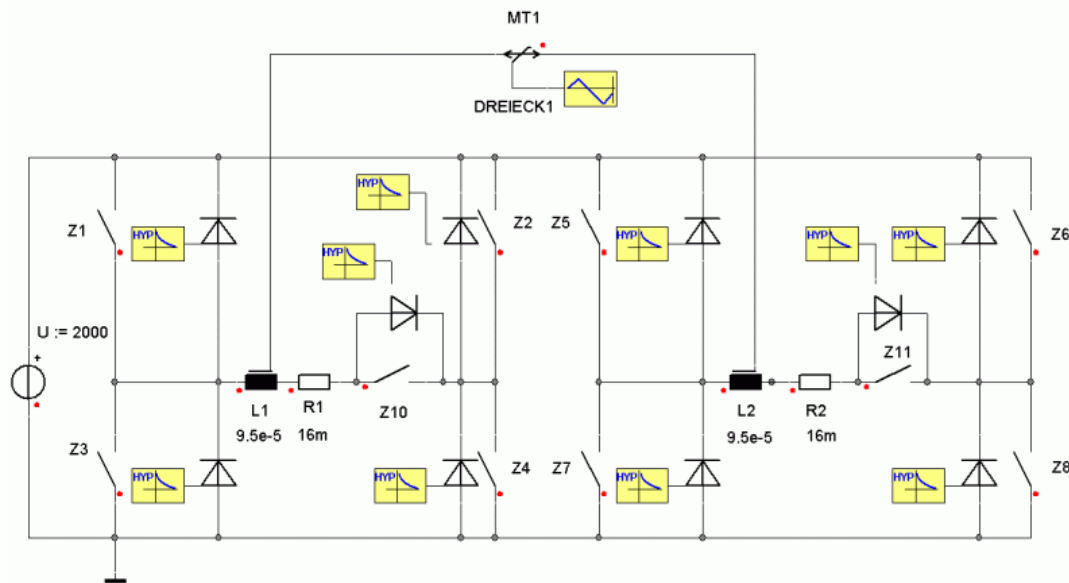
Nach der analytischen Maschinenauslegung wurden zunächst die Drehmomentverläufe bei der Rotordrehung entsprechend der Polbreite (Polkante zu Polkante) bei konstantem Strom mit Hilfe eines FE-Modells bestimmt. In **Abb. 2** sind die Ergebnisse der Berechnung dargestellt. Neben der analytischen Lösung („analytisch“), der FE-Lösung bei Vernachlässigung der Eisensättigung („ $\mu$  unendlich“) und der Lösung bei Berücksichtigung der Sättigung („HF20“) wurde auch der Einfluss eines Spaltes zwischen den Polsegmenten (siehe **Abb. 1**) untersucht („HF20/Spalt“). Der Spalt dient der Begrenzung der Ankerrückwirkung, wirkt sich jedoch, wie in **Abb. 2** erkennbar, bei zweisträngigen Maschinen nicht drehmomentsteigernd aus.



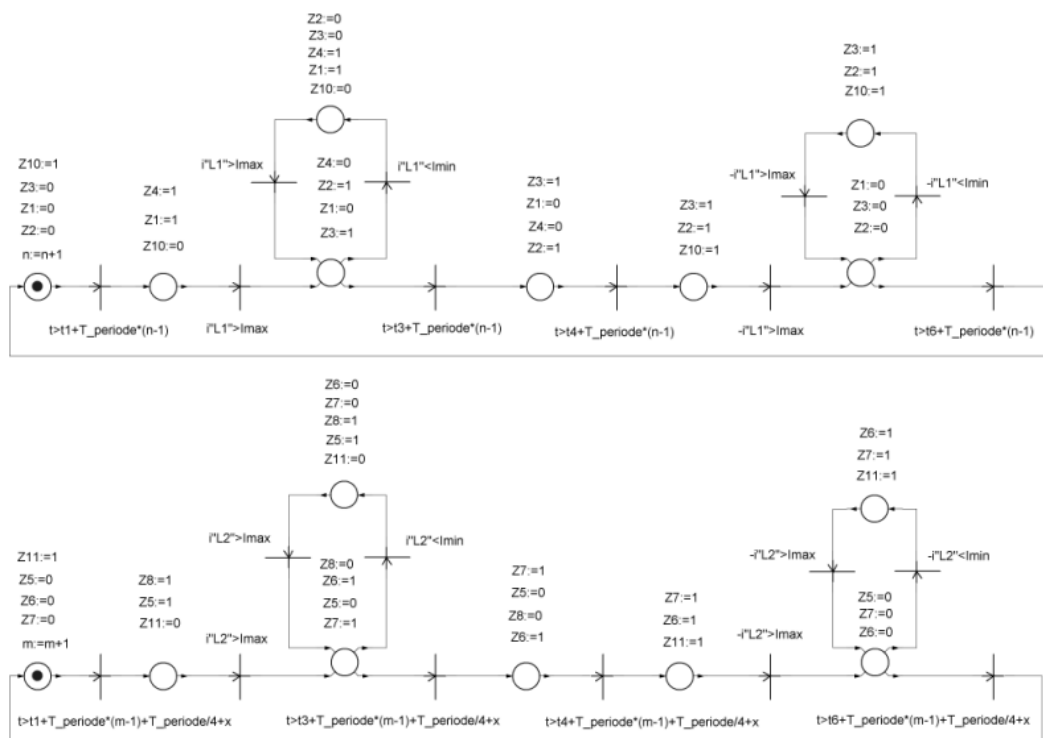
**Abb. 2:** Drehmomente bei rechteckförmigem Stromverlauf

Neben dem Drehmoment wurden zusätzlich die Selbst- und Gegeninduktivitäten der Stränge für das Simulationsmodell bestimmt.

Zur Berechnung der realen Stromverläufe diente das mit Hilfe des Simulationssystems SIMPLORER<sup>®</sup> erstellte Maschinenmodell am Wechselrichter (**Abb. 3**). Ausgegangen wird von linearen Verhältnissen ( $\mu_{Fe} \rightarrow \infty$ ). Die Maschine wird durch die näherungsweise als konstant angenommenen Induktivitäten der beiden Stränge ( $L1; L2$ ), mit den jeweiligen Wicklungswiderständen ( $R1; R2$ ) und der Koppelinduktivität ( $MT1$ ) repräsentiert. Bei dem Wechselrichter handelt es sich um einen 4Q-Steller. In **Abb. 4** ist die entsprechende Regelung (Hysteresebandregelung) dargestellt.



**Abb. 3:** Maschinenmodell am Wechselrichter



**Abb. 4:** Regelung

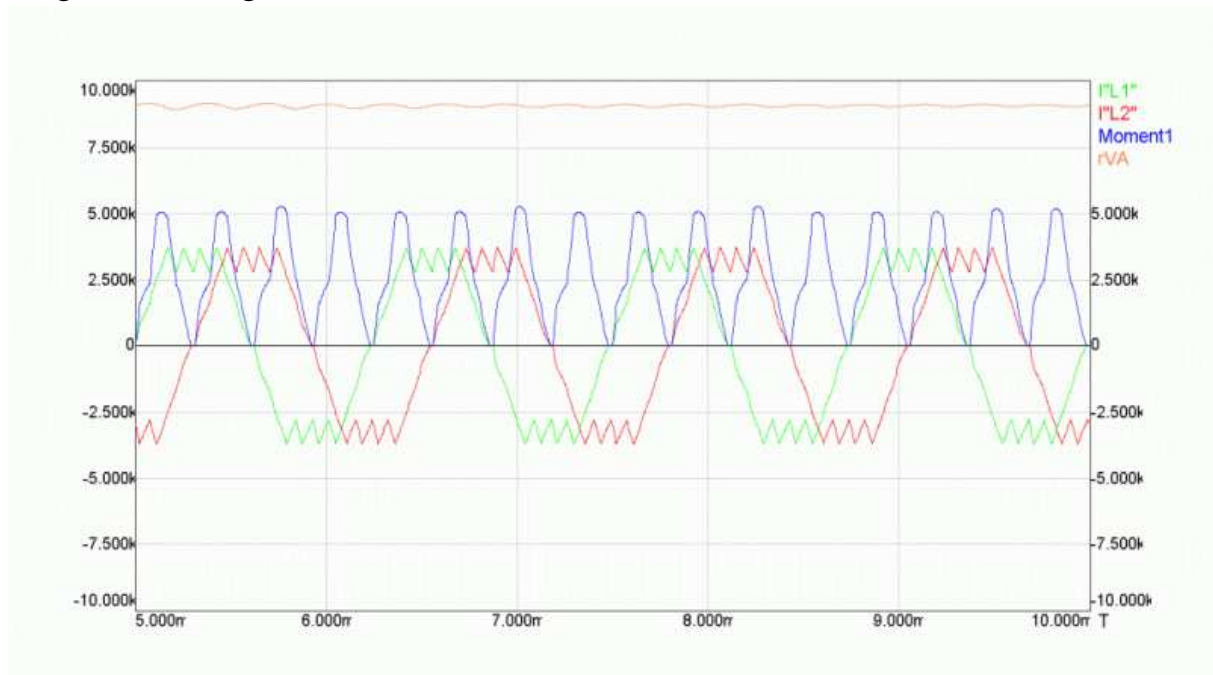
Die **Abb. 5** zeigt die Simulationsergebnisse. Dargestellt sind die Verläufe der beiden Strangströme bei einer Zwischenkreisspannung von 2000V. Das Drehmoment weicht ebenfalls stark von der Rechteckform ab und pulsiert mit der doppelten Grundfrequenz. Als Maß für die bezogene Schaltleistung ist der  $r_{VA}$ -Wert dargestellt. Er berechnet sich aus der Umrichterschaltleistung

$$S_{WR} = m_s \cdot U_{ZK} \cdot I_{\max}$$

( $m_s$  – Strangzahl;  $U_{ZK}$  – Zwischenkreisspannung;  $I_{\max}$  – maximaler Strangstrom) und der mechanischen Leistung als Bezugswert zu

$$r_{VA} = \frac{S_{WR}}{P_{mech}}$$

Für die mechanische Leistung ist der Mittelwert des Momentes maßgebend. Dieser ist gegenüber der Rechteckspeisung stark reduziert. Für die dargestellte Maschine ergibt sich ein  $r_{VA}$ - Wert von 9. Dieser ist etwas größer als bei vergleichbaren geschalteten Reluktanzmaschinen.



**Abb. 5:** Verlauf der Strangströme, Drehmoment,  $r_{VA}$ -Wert

Wird die Maschine zur Erzielung großer Kraftdichten mit hohen Strömen betrieben, muß die Sättigung im Simulationsmodell berücksichtigt werden. Die Selbstinduktivitäten der Stränge können nicht mehr als konstant betrachtet werden, und auch die Koppelinduktivität ist stromabhängig.

Die Ergebnisse von Untersuchungen höhersträngiger SESM's zeigten, daß sich die erreichbare Kraftdichte zwar steigern läßt, der erforderliche Aufwand bezüglich des Stromrichters aufgrund der Koppelinduktivitäten zwischen den Strängen jedoch sehr hoch ist, so daß diese Maschinen für hohe Drehzahlbereiche nicht geeignet sind.

Da bei der Auslegung eines Antriebes stets das Gesamtsystem aus Umrichter und Maschine zu einem Optimum geführt werden muß, ist die Züchtung der Maschine auf eine hohe Kraftdichte nur in den seltensten Fällen sinnvoll. Vielmehr sollte darauf geachtet werden, die Kosten für den Umrichter, welche durch den  $r_{VA}$ -Wert repräsentiert werden, nicht unverhältnismäßig anwachsen zu lassen.