

SYSTEMATIK DREISTRÄNGIGER SYMMETRISCHER PM-ERREGTER PPSM

H. Mosebach

1 BASISKLASSIFIKATION

Das Prinzip der Polyphasigen Permanentmagneterregten Synchronmaschine (PPSM) wird in der industriellen Antriebspraxis z. B. für Torque-Motoren und lineare Stellantriebe genutzt. Besonders geschätzt wird der kompakte Aufbau. Er resultiert aus dem sehr kleinen Wickelkopf als Folge der - überdies preiswert herstellbaren - konzentrierten Einzelspulen. Charakteristisch für die PPSM ist, dass kein ganzzahliges Verhältnis zwischen Pol- und Nutteilung besteht ("fractional slot number").

Es ist eine große Vielzahl von denkbaren Kombinationen für PPSM bekannt geworden [1,2,3,4,5,6]. Sie können nach der Anzahl der Spulen und Pole, nach der Zahl der Stränge (3-strängig \leftrightarrow vielsträngig) und nach der Anordnung der Nuten am Umfang (äquidistant \leftrightarrow irregulär [2]) unterschieden werden. Ein weiteres Merkmal ist die Zahl der Spulenseiten pro Nut, wobei die Klassifikation nach "Single-layer" und "Double-layer" Anordnungen zwar nach deutscher Fachsprache recht unglücklich, aber international üblich ist [2,3], **Bild 1**.

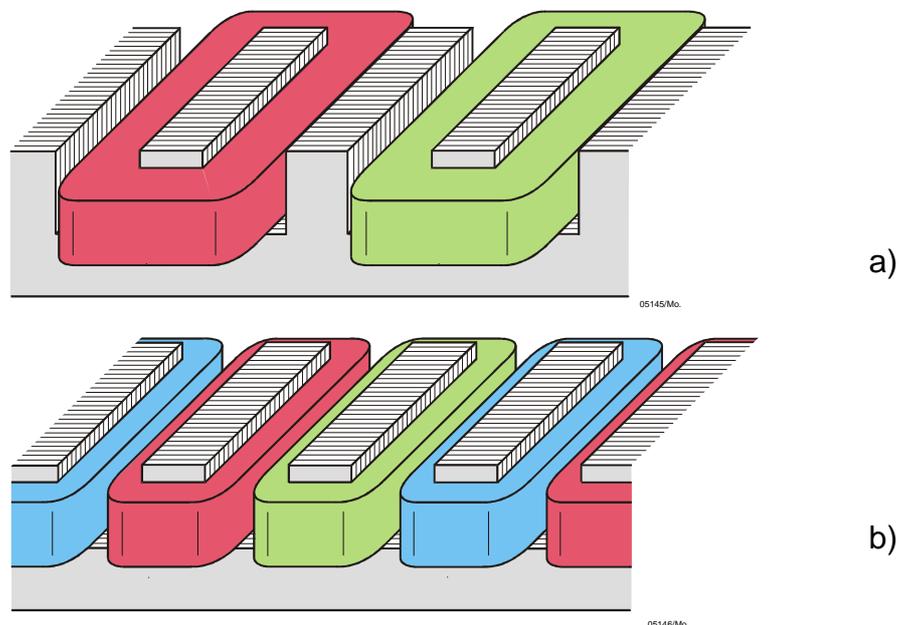


Bild 1: Statorelemente einer linearen PPSM mit offenen Nuten
a) Single-layer Maschine b) Double-layer Maschine

Neben den Grundanordnungen gibt es noch Misch- und Sonderformen, zu denen auch die Segmentstatormaschinen [7,8] gezählt werden können. Die größte Bedeutung haben jedoch zweifellos *symmetrische dreisträngige PPSM*, für die das gesamte klassische Instrumentarium

hinsichtlich Stanztechnik, Leistungselektronik und Regelungselementen zur Verfügung steht. Bei ihnen besteht weiterhin eine gleichförmige magnetische Belastung des Eisenkreises, so dass ein Einsatz auch für große und hoch ausgenutzte Antriebe in Frage kommen dürfte.

Verschiedentlich wurden allgemeine Bildungsgesetze für PPSM angegeben [2,6,9]. Ihre Anwendung ist allerdings nicht immer narrensicher. Ebenfalls dort angegebene Tabellen mit erlaubten Kombinationen enthalten z. T. nachweislich Fehler und sind außerdem mit den Vielfachen der Basisanordnungen ("Elementarmaschinen") unnötig aufgebläht [2,3]. Der vorliegende Beitrag soll daher an Stelle eines Bildungsgesetzes eine Übersicht über die zweckmäßigsten Kombinationen mit konkretem Zonenplan und Wicklungssinn geben.

2 GRUNDSÄTZLICHER AUFBAU UND DEFINITIONEN

Der Stator sämtlicher polyphasiger Maschinen besteht aus einer Abfolge von Einzelzähnen, die im Allgemeinen jeweils eine konzentrierte Zahnspule tragen. Der Zusammenhang zwischen Spule, Wicklungsachse und Zählsinn des Stromes ist durch **Bild 2** beschrieben. Es zeigt auch die symbolhafte Verkürzung für die folgenden Darstellungen.

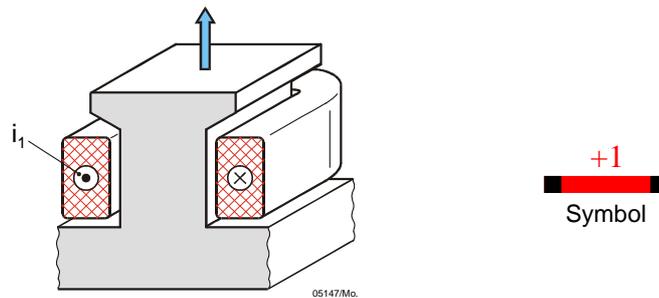


Bild 2: Einzelspule mit Wicklungsachse, Zählsinn und abstrahierter Vereinfachung

Die nebeneinander liegenden Einzelspulen können dem gleichen Strang oder einem anderen Strang angehören. Wegen der geforderten Symmetrie und der Dreisträngigkeit muss die Zahl der Zähne und der Spulen ohne Rest durch 3 teilbar sein. Weiterhin muss offenbar Gleichverteilung der Stränge vorliegen.

Die Frequenz der Statorgrößen wird ausschließlich durch die Drehzahl und die Anzahl z_{pm} der Permanentmagnete des rotierenden Teils bestimmt. Um einen geschlossenen magnetischen Kreis ohne Unipolarfluss zu erreichen, muss z_{pm} eine gerade Zahl sein. Allgemein sollte die Spulenweite in der Nähe der durch die Permanentmagnete vorgegebenen Polteilung liegen, um einen günstigen Wicklungsfaktor ξ_s zu erreichen.

Jede kleinste - die genannten Teilbarkeitsbedingungen erfüllende - und funktionsfähige Anordnung wird als "Elementarmaschine" bezeichnet. An ihrem Umfang (bzw. abgewickelt ihrer Länge) wechseln sich die Stränge in einem charakteristischen Muster ab. Für die Beschreibung ist es zweckmäßig, die in **Bild 3** beispielhaft erläuterten Begriffe "Zone", "Spulengruppe" und "Repetitionsfaktoren" zu definieren.

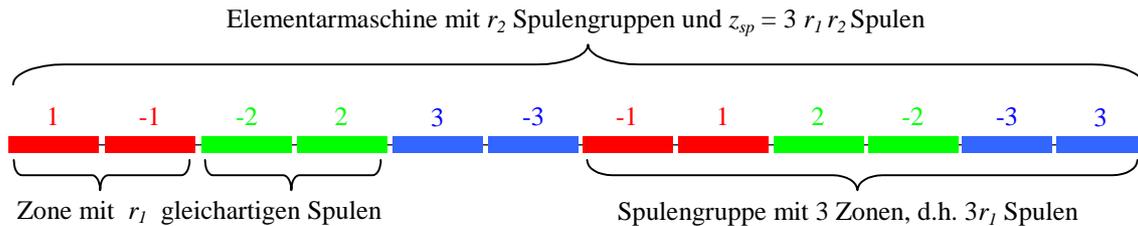


Bild 3: Zur Definition der Spulenzahl und der Repetitionsfaktoren (hier: $z_{sp}=12$, $r_1=2$, $r_2=2$)

Eine PPSM kann eine einzige Elementarmaschine umfassen oder multiplikativ aus mehreren zusammengesetzt sein [2,3]. Für die Wickeltechnik ist es gegebenenfalls vorteilhaft, Lösungen mit $r_1 > 1$ zu realisieren [10]. Eine Begrenzung von r_1 nach oben ergibt sich dabei aus der Tatsache, dass der Phasenfehler in den Randbereichen der Zone wegen der unterschiedlichen Teilungen progressiv zunimmt, so dass dort die Kraftbildung beeinträchtigt ist. Die verschiedenen Varianten werden im Folgenden durch ein Zahlenquadrupel in der Bedeutung $z_{sp} - r_1 - r_2 - z_{pm}$ charakterisiert, das die bisher häufige Bezeichnungsart (wie "2/3", "4/3", "10/12") erweitert und auch ersetzen sollte. Weiterhin wird ein symmetrisches Drehstromsystem

$$\begin{aligned} i_1(t) &= \hat{I} \cos \omega t \\ i_2(t) &= \hat{I} \cos (\omega t - 2\pi/3) \\ i_3(t) &= \hat{I} \cos (\omega t - 4\pi/3) \end{aligned} \quad (1)$$

angenommen. Die in Kap. 3 aufgeführten schematischen Wicklungspläne sind unter der Voraussetzung erstellt, dass in den abgewickelten Darstellungen und mit den Strömen entsprechend (1) eine Bewegung der Magnete nach rechts erfolgt.

3 ÜBERSICHT "ERLAUBTER" ELEMENTARMASCHINEN

Zur Ermittlung der "erlaubten" Konfigurationen wurde nach Art von **Bild 3** von verschiedenen Spulenverteilungen und Polzahlen ausgegangen und die Funktionsfähigkeit mit dem Programm PPSMSYST (Kap. 4) geprüft. Als Kriterium dienten:

- *Phasenlage* (an den Grenzen der Zonen muss die 120° - bzw. 240° - Bedingung erfüllt sein, eventuell durch Umpolung der Spule ($60^\circ \rightarrow 240^\circ$, $300^\circ \rightarrow 120^\circ$))
- *Konstante Kraft / Moment über 360° el.* (bei Annahme eines nur aus der Grundwelle bestehenden sinusförmigen Erregerfeldes mit der PM-Polteilung)

3.1 Single-layer Elementarmaschinen

Bei den Single-layer Maschinen (**Bild 1a**) ist nur jeder 2. Zahn bewickelt, so dass die Zahl der Spulen der halben Zähnezahle entspricht. Der frei liegende Zahn kann montage-technische Vorteile bieten.

Es ist im Einzelfall zu prüfen, inwieweit der erhöhte Blindleistungsbedarf - infolge der hier rund doppelt so großen Spulendurchflutung im Vergleich zu einer vergleichbaren Double-layer Variante - noch tolerabel ist (maßgeblich ist jeweils das Produkt $L_{Str} \cdot I_{Str}^2$).

Die "erlaubten" Elementarmaschinen in der Single-layer Ausführung sind in **Tabelle 3.1** bis zu einer Nutenzahl von 36 je Elementarmaschine zusammengestellt. Es wurden nur Lösungen mit $\xi_s > 0,8$ und mit einem Teilungsverhältnis von τ_n / τ_{pm} im Bereich $2/3 \dots 4/3$ aufgenommen. Die Wicklungspläne für die ersten 6 Lösungen zeigt **Bild 4**.

Tabelle 3.1: Single-layer Elementarmaschinen mit bis zu 36 Nuten

Nuten	Spulen	Rep.faktor r_1	Rep.faktor r_2	P-Magnete	Wicklungsfaktor
6	3	1	1	4	0,8660
6	3	1	1	8	0,8660
12	6	1	2	10	0,9659
12	6	1	2	14	0,9659
12	6	2	1	10	0,8365
12	6	2	1	14	0,8365
18	9	3	1	16	0,8312
18	9	3	1	20	0,8312
24	12	2	2	22	0,9577
24	12	2	2	26	0,9577
24	12	4	1	22	0,8294
24	12	4	1	26	0,8294
30	15	5	1	28	0,8285
30	15	5	1	32	0,8285
36	18	3	2	34	0,9561
36	18	3	2	38	0,9561
36	18	6	1	34	0,8280
36	18	6	1	38	0,8280

$z_{sp} - r_1 - r_2 - z_{pm}$:



6-2-1-14:

**Bild 4:** Single-layer Elementarmaschinen mit bis zu 12 Nuten

3.2 Double-layer Elementarmaschinen

Bei den Double-layer Maschinen (**Bild 1b**) ist jeder Zahn bewickelt, so dass die Zahl der Zähne und der Spulen identisch ist. Im Vergleich zu den Single-layer Maschinen ergibt sich offenbar ein besonders kleiner Wickelkopfüberstand. Die zu kommutierende Spulendurchflutung ist reduziert, andererseits existiert durch die beiden in einer gemeinsamen Nut liegenden Spulenseiten stets eine (induktivitätssteigernde) Gegenkopplung.

Die "erlaubten" Elementarmaschinen in der Double-layer Ausführung sind in **Tabelle 3.2** bis zu einer Nutenzahl von 24 je Elementarmaschine zusammengestellt. Es wurden auch hier nur Lösungen mit $\xi_s > 0,8$ und mit einem Teilungsverhältnis von τ_n / τ_{pm} im Bereich $2/3 \dots 4/3$ aufgenommen. Die Wicklungspläne für die ersten 8 Lösungen zeigt **Bild 5**.

Tabelle 3.2: Double-layer Elementarmaschinen mit bis zu 24 Nuten

Nuten	Spulen	Rep.faktor r_1	Rep.faktor r_2	P-Magnete	Wicklungsfaktor
3	3	1	1	2 ^{*)}	0,8660
3	3	1	1	4 ^{**)}	0,8660
9	9	3	1	8 ^{***)}	0,9452
9	9	3	1	10	0,9452
12	12	2	2	10	0,9330
12	12	2	2	14	0,9330
12	12	4	1	10	0,8080
12	12	4	1	14	0,8080
15	15	5	1	14	0,9514
15	15	5	1	16	0,9514
18	18	6	1	16	0,8186
18	18	6	1	20	0,8186
21	21	7	1	20	0,9531
21	21	7	1	22	0,9531
24	24	4	2	22	0,9495
24	24	4	2	26	0,9495
24	24	8	1	22	0,8223
24	24	8	1	26	0,8223

*)

Linearmotorprüfstand am IMAB, 1 Statormodul = 4 Elementarmaschinen

**)

High Torque Maschine nach [5], Innen- und Außenstator je 6 Elementarmaschinen

***)

Stellmotor nach [10], 1 Elementarmaschine

$z_{sp} - r_1 - r_2 - z_{pm}$:

3-1-1-2:



3-1-1-4:



9-3-1-8:



9-3-1-10:



12-2-2-10:



12-2-2-14:



12-4-1-10:



12-4-1-14:



Bild 5: Double-layer Elementarmaschinen mit bis zu 12 Nuten

Anmerkung:

Der Wicklungsfaktor ξ_s kann als der kraftbildende Anteil der Statorströme interpretiert werden. Ausgehend von der klassischen Definition des Strombelags als Summe der Ströme

dividiert durch die Länge, $\hat{A}_s = \frac{2 z_{sp} \hat{I}_{sp}}{z_{pm} \tau_{pm}}$, erhält man die Kraftdichte zu $f_a = \xi_s \cdot \frac{\hat{A}_s \hat{B}_0}{2}$.

4 BEISPIELE UND PROGRAMM PPSMSYST

Zur Ermittlung der "erlaubten" PPSM-Anordnungen, insbesondere der Reihenfolge und des korrekten Wicklungssinns der einzelnen Zahnspulen, wurde das Programm PPSMSYST.PAS erstellt. Nach der Prüfung des Phasenkriteriums wird mit ihm die örtliche Verteilung der Spulen und Nuten, und die zeitliche Verteilung des Leerlaufeldes, der Ströme und der an den Spulenseiten auftretenden Teilkräfte (als Lorentz-Kraft berechnet) für Zeitschritte von z. B. 10° el visualisiert. Für die Kraftberechnung werden sehr schmale Nutöffnungen angenommen. Aus der Summe der Teilkräfte und Vergleich mit der ohne den PPSM-typischen Versatz möglichen Kraft wird der Wicklungsfaktor ξ_s bestimmt.

Bild 6 zeigt beispielhaft die Verhältnisse einer Single-layer PPSM mit der Kennung 9-3-1-20 zur Zeit $\omega t = 0$ (Situation "+1, -0,5, -0,5"). Der Wicklungsfaktor beträgt $\xi_s = 0,8312$.

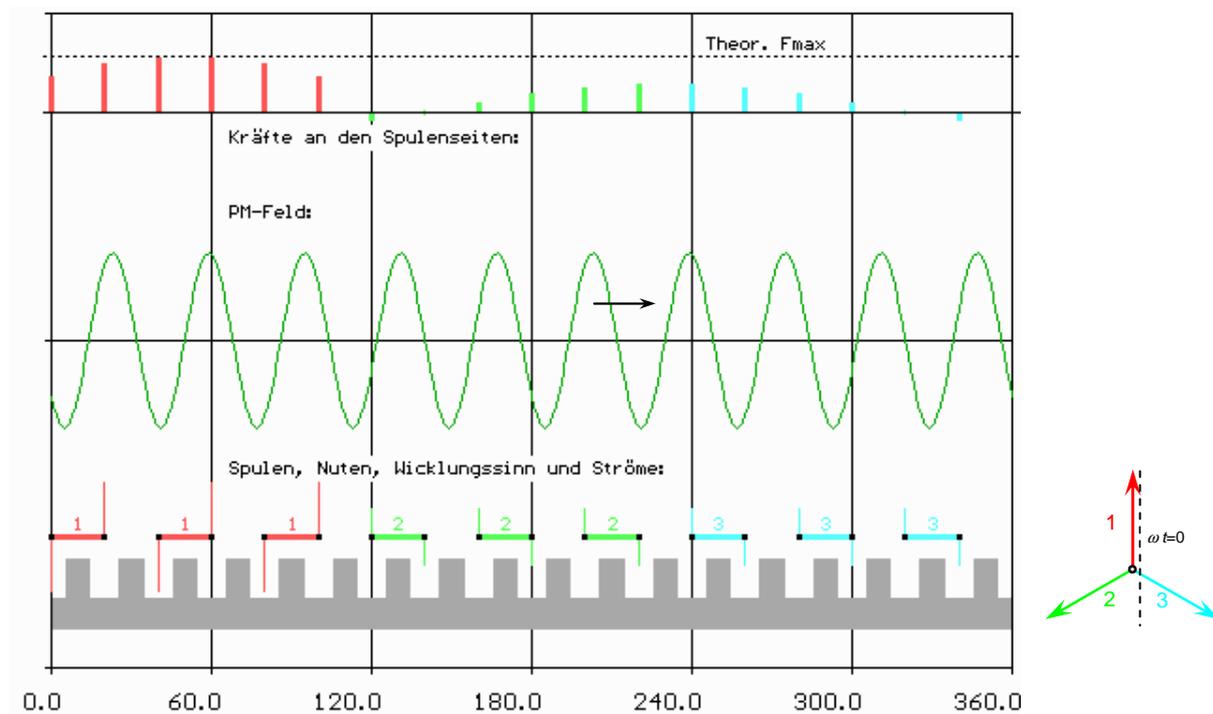


Bild 6: Single-layer PPSM mit $z_{sp}=9$, $r_1=3$, $r_2=1$, $z_{pm}=20$, $\omega t = 0$

Wie erwartet, zeigt sich für Strang 1 mit $r_1=3$ wegen des zunehmenden Phasenfehlers trotz Maximalstrom eine reduzierte Kraftwirkung an den Zonenrändern. Dies ist die Hauptursache für den eher mäßigen Wicklungsfaktor.

Als weiteres Beispiel sei noch eine Double-layer PPSM mit der Kennung 12-2-2-14 für 2 verschiedene Zeitpunkte aufgeführt. **Bild 7** bezieht sich wieder auf die klassische Drehstromsituation "+1, -0,5, -0,5" ($\omega t = 0$), bei **Bild 8** ist die Zeit um eine Viertel Periode fortgeschritten ($\omega t = 90^\circ$, Situation "0, +0,866, -0,866"). Da es sich um eine "erlaubte" Maschine handelt, ist der Wicklungsfaktor für alle Zeitpunkte konstant. Er beträgt hier $\xi_s = 0,9330$ und ist deshalb deutlich günstiger, weil Strom- und Feldmaximum, wie **Bild 7** zeigt, beinahe ideal aufeinander treffen.

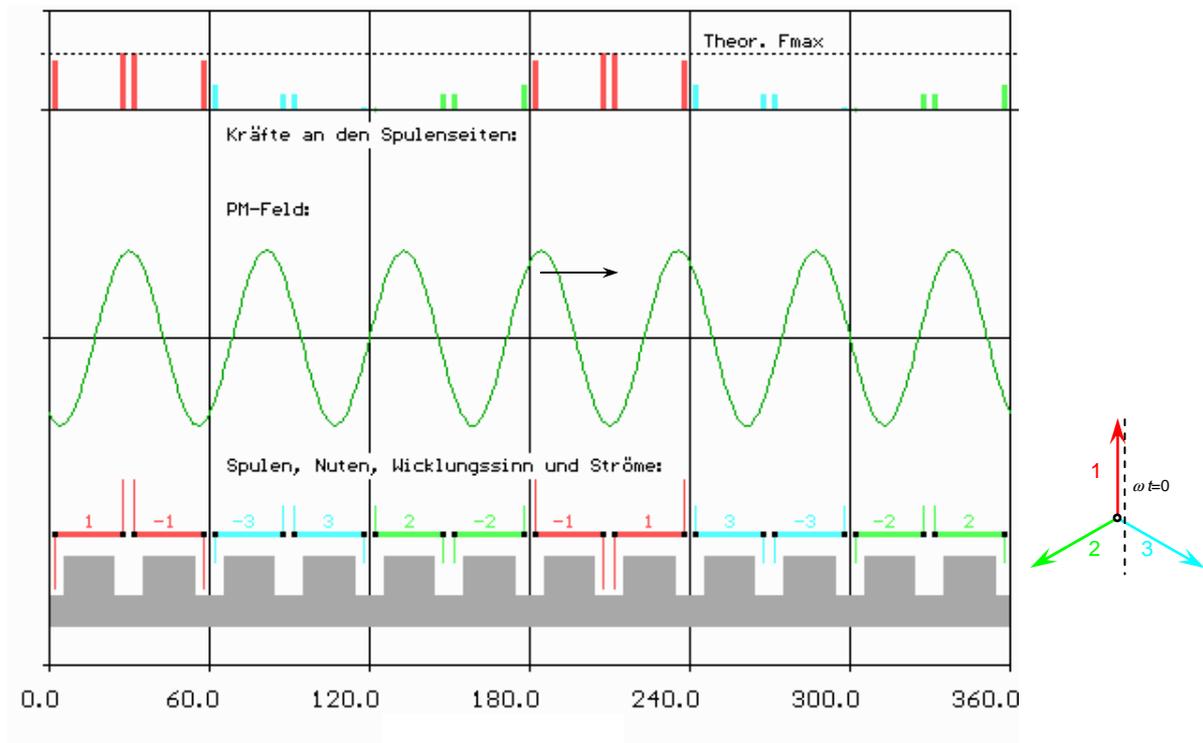


Bild 7: Double-layer PPSM mit $z_{sp}=12$, $r_1=2$, $r_2=2$, $z_{pm}=14$, $\omega t = 0$

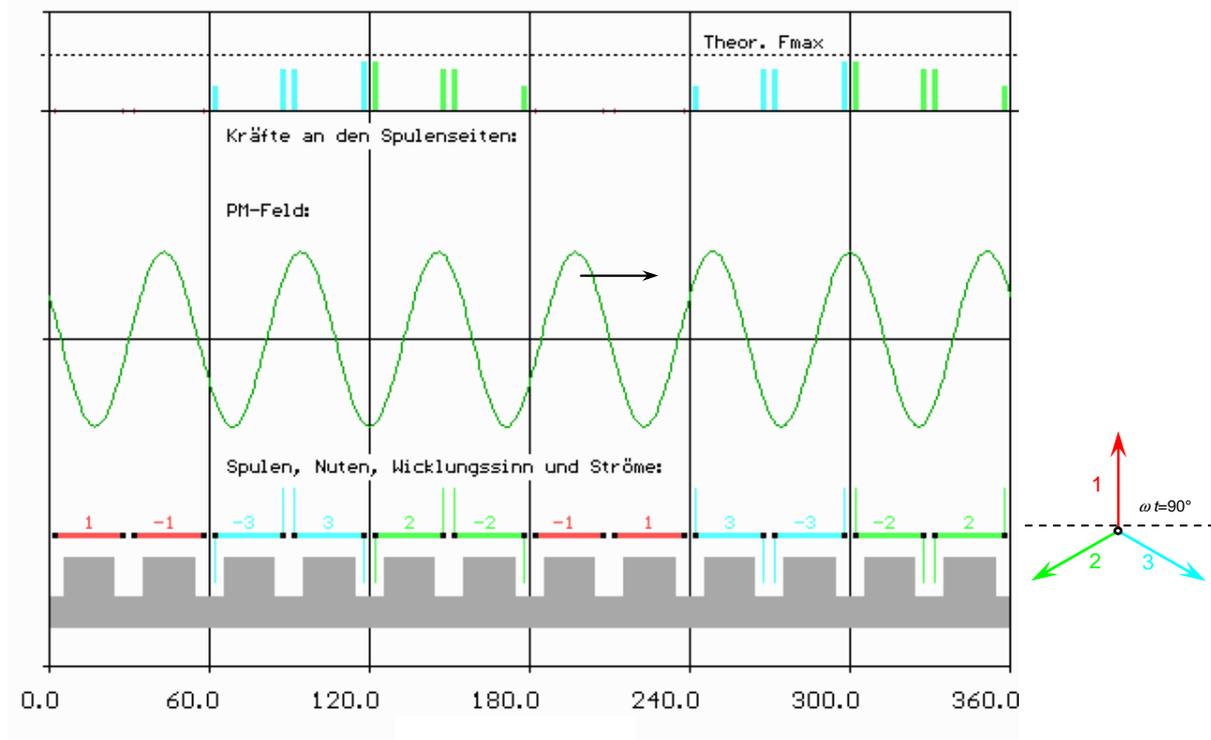


Bild 8: Double-layer PPSM mit $z_{sp}=12$, $r_1=2$, $r_2=2$, $z_{pm}=14$, $\omega t = 90^\circ$

Neben den beschriebenen Aussagen bietet das Programm die Möglichkeit, aus den Grundwellen der magnetischen Leitfähigkeit und der Leerlaufflussdichte die Normalkräfte zu berechnen (Methode $B \sim A \cdot V$) und damit z. B. - im Fall rotierender Maschinen - die Existenz umlaufender Radialkräfte zu entdecken. Es zeigt sich, dass solche u. U. geräuschanregenden Kräfte bei allen Elementarmaschinen mit ungerader Nutenzahl auftreten. Die Single-layer-Maschinen sind demzufolge in dieser Hinsicht stets unkritisch. Bei den Double-layer-Ausführungen sollte dagegen - sofern kritische Drehzahlbereiche zu erwarten sind - auf diese Problematik geachtet werden. Gegebenenfalls ist ein geradzahliges Vielfaches einer Elementarmaschine zu realisieren, um die gewünschte Symmetrie wiederherzustellen.

LITERATUR

- [1] J. F. Gieras, M. Wing: *Permanent Magnet Motor Technology*, Marcel Dekker 2002
- [2] J. Cros, Ph. Viarouge: *Synthesis of High Performance PM Motors With Concentrated Windings*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 17, No.2, June 2002, S. 248-253
- [3] F. Magnusson, Ch. Sadarangani: *Winding Factors and Joule Losses of Permanent Magnet Machines with Concentrated Windings*, Proc. IEMDC '03, Vol. 1, June 2003, S. 333-339
- [4] J. R. Hendershot, T. J. E. Miller: *Design of Brushless Permanent Magnet Motor*, Magna Physics Publishing, 1994
- [5] M. R. Rezaei: *Auslegung und Optimierung von polyphasigen permanentmagnet-erregten Synchronmaschinen*, Dissertation TU Braunschweig 2005
- [6] G. Huth: *Permanent-Magnet-Excited AC Servo Motors in Tooth-Coil Technology*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No. 2, Juni 2005, S. 300-307
- [7] W.-R. Canders, F. Laube, H. Mosebach: *PM Excited Polyphase Synchronous Machines with Single-Phase Segments Featuring Simple Tooth Coils*, Proc. ICEM 2002, August 25-28, 2002, Brugge, Belgien
- [8] W.-R. Canders, H. Mosebach, Z. Shi: *Investigation of slotless permanent magnet excited linear synchronous machines with concentrated stator windings*, Proc. ICEM 2004, paper # 542, Sept. 5-8, 2004, Krakau, Polen
- [9] H. May: *Topologien und Leistungspotentiale von "Permanenterregten Synchronmaschinen" mit kompakter Zahn- bzw. Trommelwicklung*, Forschungsbericht des IMAB, Juli 2001
- [10] F. Boermann, H. Nestler: *Hochdynamische Synchron-Servomotoren in innovativer Zahnwickeltechnologie*, Tagungsband der VDE/VDI-Tagung "Elektrisch-mechanische Antriebssysteme, Innovationen – Trends – Mechatronik", 6./7.10. 2004, Fulda