

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 79 (1988)

Heft: 23

Artikel: Dreiphasen-Reluktanzmotoren mit ausgefrästen Käfigläufern

Autor: Palit, B. B.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-904119>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 02.04.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Dreiphasen-Reluktanzmotoren mit ausgefrästen Käfigläufern

B. B. Palit

In Käfigläufer von 25 Dreiphasen-Asynchronmaschinen gleicher Grösse wurden Reluktanznuten verschiedener Breite und Tiefe eingefräst. Durch umfangreiche Versuche wurde der Einfluss der geometrischen Grössen der Reluktanznuten auf die Reaktanzen, das Drehmoment, den Kippwinkel, den Ständerstrom, die Aufnahmeleistung, den Leistungsfaktor und den Wirkungsgrad systematisch ermittelt. Die Resultate werden vorgestellt.

Dans la cage de 25 machines asynchrones triphasées de même taille on a fraisé des rainures de réluctance de différentes largeurs et profondeurs. Au moyen d'essais systématiques on a déterminé l'influence des grandeurs géométriques de ces rainures sur les réactances, le couple, l'angle de décrochage, le courant statorique, le facteur de puissance et le rendement. Les résultats sont présentés.

Dieser Aufsatz ist Herrn Prof. André Dutoit, dem ehemaligen Vorsteher des Instituts für Elektrische Maschinen der ETH Zürich, zu seinem 75. Geburtstag gewidmet.

Adresse des Autors

Dr. Basanta B. Palit, Ingenieurschule beider Basel, Abteilung Elektrotechnik, Gründenstrasse 40, 4132 Muttenz.

1. Einleitung

Der dreiphasige synchrone Reluktanzmotor ist eine Maschine, die im Ständer gleich wie ein Asynchronmotor aufgebaut ist, deren Läufer jedoch ausgeprägte Pole aufweist und entweder keine Wicklungen oder eine Käfigwicklung zum Anlauf trägt, die jedoch im stationären Betrieb stromlos ist. Aus konstruktiver Sicht sind also synchrone Reluktanzmotoren den Asynchronmotoren ähnlich; sie werden praktisch aus diesen gewonnen, indem man den Ständer beibehält und nur den Läufer auswechselt. Dieser kann

- als Massivläufer durch Herausfräsen von Reluktanznuten aus einem zylindrischen Läufer gewonnen werden oder
- als Blechpaket aufgebaut sein, das zusätzlich einen Käfig zur Dämpfung von Pendelungen bzw. zum asynchronen Anlauf erhält. Ein derartiger Läufer lässt sich herstellen, indem man entweder aus einem vorhandenen Kurzschlussläufer eines Asynchronmotors Teile herausfräst oder ihn aus entsprechend geformten Blechen aufschichtet und anschliessend den erforderlichen Käfig einbaut [1].

Der vorliegende Aufsatz befasst sich zuerst mit der Umgestaltung der bestehenden Dreiphasen-Asynchronmotoren durch das Einfräsen der Reluktanznuten in den Käfigläufern. Anschliessend wird von einer systematischen Untersuchung der Betriebseigenschaften dieser Reluktanzmotoren bei Veränderung der Breite und Tiefe der Reluktanznuten berichtet.

2. Theorie

Die Betriebseigenschaften des mit Mehrphasenwechselstrom gespeisten Reluktanzmotors können analytisch mit der Zweiachsentheorie untersucht

werden, analog zur konventionellen Synchronmaschine. Im Gegensatz zu Maschinen grösserer Leistungen erreicht jedoch der ohmsche Spannungsabfall bei Motoren kleiner Leistungen Werte im Bereich von einigen Prozenten der Klemmenspannung. Der Einfluss des Widerstandes der Statorstränge auf die Kennlinien der Maschine kann deshalb nicht vernachlässigt werden.

Ohne Berücksichtigung der Ständerisenverluste und Läuferreibungsverluste lautet die Gleichung des Ständerstromes I_1 :

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 = & \frac{U_1}{R_1^2 + X_d X_q} \\ & \left[\left\{ R_1 - \frac{1}{2} (X_d - X_q) \sin 2\vartheta \right\} \right. \\ & \left. - j \left\{ X_q + (X_d - X_q) \sin^2 \vartheta \right\} \right] \quad (1) \end{aligned}$$

und die Gleichung des Drehmomentes M :

$$M = \frac{3p U_1^2 (X_d - X_q)}{2 \omega_1 (R_1^2 + X_d X_q)^2} \quad (2)$$

$$\left[(R_1^2 - X_d X_q) \sin 2\vartheta + (X_d + X_q) \cdot R_1 \cos 2\vartheta - (X_d - X_q) R_1 \right]$$

- U_1 Ständerstrangspannung
- R_1 Ohmscher Widerstand eines Ständerstranges
- X_d Synchrone Längsreaktanz eines Ständerstranges
- X_q Synchrone Querreaktanz eines Ständerstranges
- ϑ Lastwinkel
- ω_1 Netzfrequenz
- p Polpaarzahl

Aus dieser Gleichung folgt für den Kippwinkel, d.h. für den zum Drehmoment gehörenden Lastwinkel:

$$\mathcal{G}_K = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{R_1^2 - X_d X_q}{R_1 (X_d + X_q)} \right] \quad (3)$$

Da $R_1 \ll X_d$ ist, kann der Widerstand in Gleichung (2) vernachlässigt werden, um den Einfluss von X_d und X_q auf Drehmoment und Leistungsfaktor überschaubar zu machen. Man erhält:

$$M = -\frac{3p U_1^2}{2 \omega_1} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \sin 2 \vartheta \quad (4)$$

Für einen konstanten Lastwinkel ϑ ist also

$$M = K_1 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \quad (5)$$

mit der Suszeptanz $(1/X_q - 1/X_d)$.

Durch Verbreiterung und Vertiefung der Reluktanznuten nehmen X_q und X_d ab. Nimmt dabei die Suszeptanz zu, so steigt das Drehmoment, auch dann, wenn dabei sowohl X_d als auch X_q selbst abnehmen.

Das Gesagte gilt auch für den Leistungsfaktor $\cos \varphi_1$ bei wachsender Suszeptanz. Die aufgenommene Wirkleistung unter Berücksichtigung der Gleichung (1) lautet bei $R_1 = 0$:

$$P_1 = -\frac{3 U_1^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2 \vartheta = 3 U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (6)$$

Für konstanten Strom I_1 ist also

$$\cos \varphi_1 = K_2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \quad (7)$$

3. Versuchsvorbereitung

Für die Untersuchung standen 26 gleiche Käfigläufer-Asynchronmaschinen zur Verfügung (Fig. 1 und 2), mit folgenden Nenndaten gemäss Herstellerschild:

380 V, Stern, 1,3 A, 1380 U/min, 50 Hz.

Ferner wurden folgende Konstruktionsdaten festgestellt:

Bohrungsdurchmesser	80 mm
Rotordurchmesser	79,3 mm
Geometrischer Luftspalt	0,35 mm
Anzahl Rotorstäbe	30

Für die Versuche mit den Reluktanzmotoren wurden bei jedem ur-

sprünglich runden Läufer entsprechend der Polzahl vier schräge Reluktanznuten parallel zu den Läuferstäben eingefräst. Die 25 ausgefrästen Läufer wurden in 5 Serien (A, B, C, D, E) mit dem Polbedeckungsfaktor $b_p/\tau_p = 0,75, 0,65, 0,55, 0,45$ und $0,35$ eingeteilt, wobei die Polbreite $b_p = (\tau_p - b_N)$, Polteilung minus Breite der Reluktanznuten ist (Fig. 3). Bei jeder Serie wurden wiederum fünf verschiedene Tiefen der Reluktanznuten so gewählt, dass sich Luftspaltverhältnisse $\delta_{max}/\delta_{min} = 6, 8, 10, 12$ und 14 ergaben. Dabei bedeuten:

δ_{min} = minimaler Luftspalt (im Polbereich) = geometrischer Luftspalt δ_g

δ_{max} = maximaler Luftspalt (im Pollückenbereich) = $\delta_g + h_N$ (Tiefe der Reluktanznuten).

In Tabelle I sind die geometrischen Daten der einzelnen Prüflinge übersichtlich zusammengestellt.

4. Versuchsdurchführung und -auswertung

Ersatzkreiselemente: Durch Gleichstrommessung sowie Leerlauf- und Kurzschlussversuche wurden die Ersatzkreiselemente der Käfigläufer-Asynchronmaschine ermittelt. Es sind:

$$R_1 = 8,9 \Omega, \quad R_2' = 12,56 \Omega$$

$$X_{\sigma 1} = 13,58 \Omega, \quad X_{\sigma 2}' = 13,58 \Omega$$

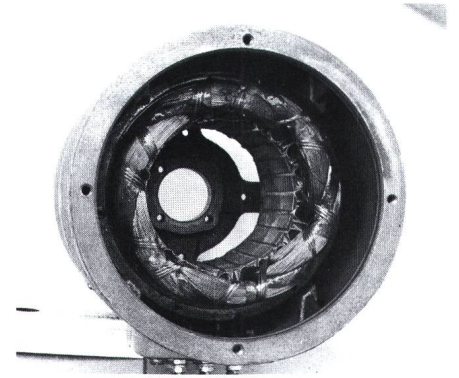
$$X_h = 231 \Omega, \quad R_{Fe} = 2391 \Omega$$

R_1	Statorstrangwiderstand
R_2'	Rotorstrangwiderstand (auf Stator bezogen)
$X_{\sigma 1}$	Streuereaktanz eines Statorstranges
$X_{\sigma 2}'$	Streuereaktanz eines Rotorstranges (auf Stator bezogen)
X_h	Hauptreaktanz
R_{Fe}	Eisenverlustwiderstand

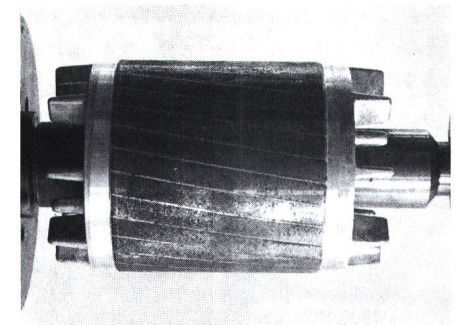
Messungen an den Reluktanzmotoren: Die Belastungsversuche an den Reluktanzmotoren wurden einheitlich bei Strangspannung 150 V durchgeführt, damit der Ständestrom bei zunehmender Breite und Tiefe der Reluktanznuten nicht unzulässig hoch werden konnte. Ferner wurde bei sämtlichen Messungen der gleiche Ständer verwendet und für jede neue Messreihe der Läufer ausgewechselt.

4.1. Reaktanzen X_d und X_q

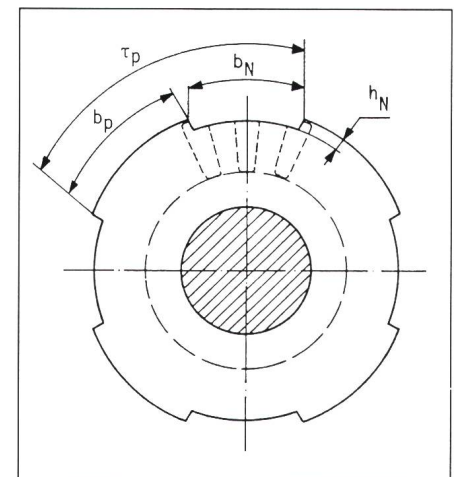
Die Reaktanzen X_d und X_q der 25 Reluktanzmotoren wurden aus der je-



Figur 1 Ständer der Asynchron- und Reluktanzmaschine



Figur 2 Läufer der Asynchronmaschine vor dem Einfräsen der Reluktanznuten



Figur 3 Blechschnitt eines ausgefrästen Läufers

weiligen Stromortskurve nach der Beziehung

$$X_d = U_1 / I_{min} \text{ und } X_q = U_1 / I_{max} \text{ ermittelt}$$

Die für das Drehmoment und für den Leistungsfaktor ausschlaggebende Suszeptanz ist in Figur 4 in Abhängigkeit der Polbedeckung sowie des Ver-

b _N (mm) Breite der Reluktanznuten	Serie	h _N (mm) Tiefe der Reluktanznuten					b _p /τ _p Polbedeckung
		2,1	2,8	3,5	4,2	4,9	
15,6	A	A1	A2	A3	A4	A5	0,75
21,8	B	B1	B2	B3	B4	B5	0,65
28,0	C	C1	C2	C3	C4	C5	0,55
34,3	D	D1	D2	D3	D4	D5	0,45
40,5	E	E1	E2	E3	E4	E5	0,35
δ _{min} = 0,35 mm		δ _{max} / δ _{min}					τ _p = 62,3 mm
		6	8	10	12	14	

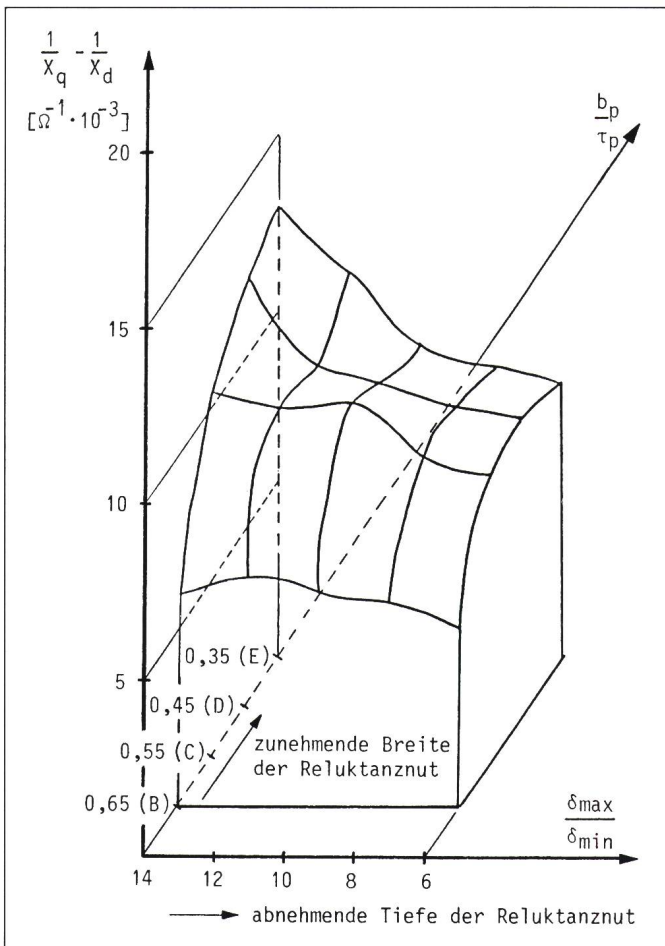
Tabelle I Serienbezeichnungen und geometrische Grössen der Reluktanznuten von 25 Läufern

hältnisses δ_{max}/δ_{min} in dreidimensionaler Darstellung für die Serien B, C, D und E zu sehen. Sie wächst sowohl mit zunehmender Tiefe als auch mit zunehmender Breite der Reluktanznuten und erreicht ihr Maximum bei der hier untersuchten breitesten und tiefsten Reluktanznut.

4.2. Drehmoment

Die Reluktanzmotoren wurden mechanisch mit einer Wirbelstrombremse

belastet. Das Wellenmoment M_w und der Lastwinkel ϑ konnten abgelesen werden. Es wurde festgestellt, dass innerhalb einer Serie, d.h. bei konstanter Polbreite (bzw. Breite der Reluktanznut), das Wellenmoment mit zunehmender Tiefe der Reluktanznut schwach ansteigt (Fig. 5). Umgekehrt, d.h. durch Verändern der Breite bei konstanter Tiefe der Reluktanznuten, ergeben sich jedoch stärkere Sprünge in Drehmomentwerten. Figur 6 zeigt



Figur 4 Suszeptanz 1/X_q-1/X_d in Abhängigkeit der Polbedeckung und des Luftspaltverhältnisses

genauer, dass die Reluktanzmotoren bei kleiner werdender Polbreite ein höheres Drehmoment entwickeln. Die Kurven sind jeweils nur so weit aufgetragen, als sie gemessen werden konnten. Das Kippen trat immer bei einem Lastwinkel auf, der kleiner als der theoretische Kippwinkel war.

Figur 7 stellt den Einfluss der Polbreite auf den nach Gleichung (3) berechneten Kippwinkel ϑ_k für eine bestimmte Tiefe der Reluktanznuten dar. Der grösste Unterschied im Kippwinkel zwischen der Serie A und E beschränkt sich auf etwa 5°. Der Kippwinkel nimmt bei wachsender Polbreite zu. Die Läufervariante E5, welche das grösste Drehmoment erreicht (Fig. 5), ist deutlich jene mit der breitesten und tiefsten Reluktanznut. Bei dieser Variante mit b_p/τ_p = 0,35 und δ_{max}/δ_{min} = 14 erreicht das maximale Wellenmoment 2,15 Nm. Zum Vergleich beträgt das Nennwellenmoment des Asynchronmotors bei U₁ = 150 V nur 1,85 Nm. Das hier erreichte maximale Drehmoment ist somit grösser als das Nennmoment des Asynchronmotors.

Das kleinste Moment liefert die Läufervariante A1 mit kleinster Breite und Tiefe der Reluktanznut. Bei dieser Variante mit b_p/τ_p = 0,75 und δ_{max}/δ_{min} = 6 erhielt man ein grösstes Wellenmoment von 0,25 Nm. Das Verhältnis der beiden maximalen Reluktanzmomente beträgt also 8,6.

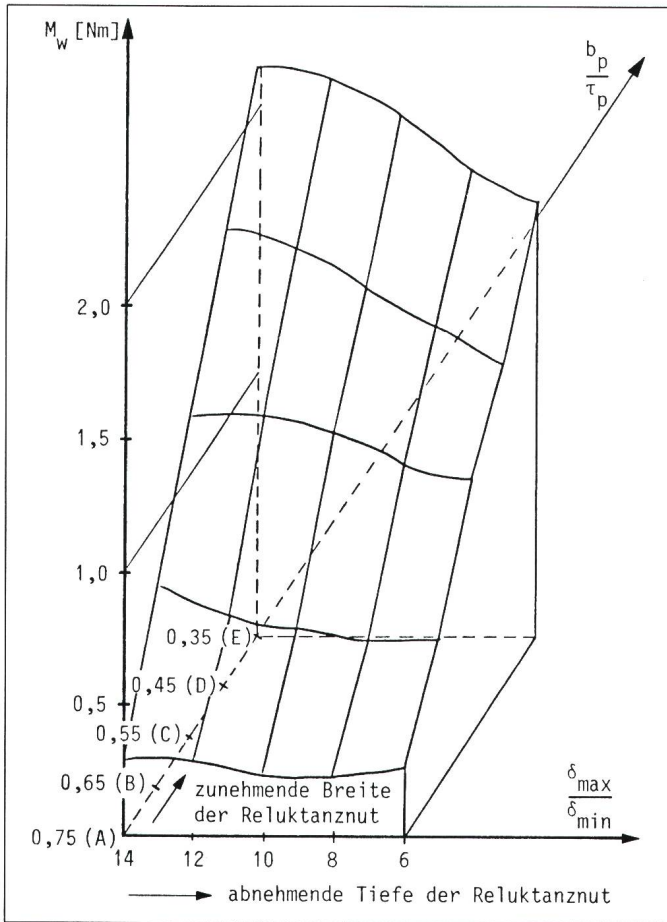
4.3 Ständerstrom

Der Ständerstrom in Abhängigkeit des Lastwinkels beim Luftspaltverhältnis δ_{max}/δ_{min} = 10 geht aus Figur 8 hervor. Man sieht, dass selbst im Leerlauf erhebliche Differenzen zwischen den Stromwerten der fünf Serien auftreten. Je grösser die Breite der Reluktanznut, desto grösser ist der Leerlaufstrom. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Stranginduktivität des Reluktanzmotors kleiner wird, wenn weniger Eisen im Rotor vorhanden ist.

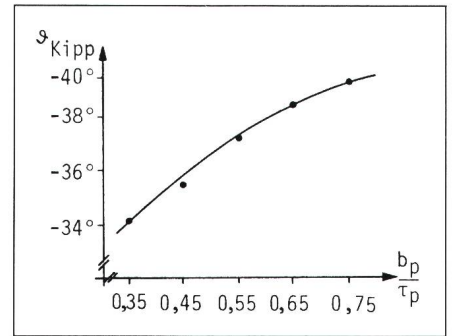
Bei der Variante E3 beträgt der grösste gemessene Ständerstrom 1,95 A (Fig. 8). Zum Vergleich fliesst ein Ständerstrom von 1,1 A im Asynchronmotor bei Nennschlupf und U₁ = 150 V.

4.4 Aufgenommene Wirkleistung

Die vom Netz aufgenommene Wirkleistung wurde nach der Dreiwattmetermethode gemessen. Durch den grösseren Ständerstrom im Reluktanzmotor werden grössere Kupferverluste verursacht. Figur 9 zeigt die Leistungs-

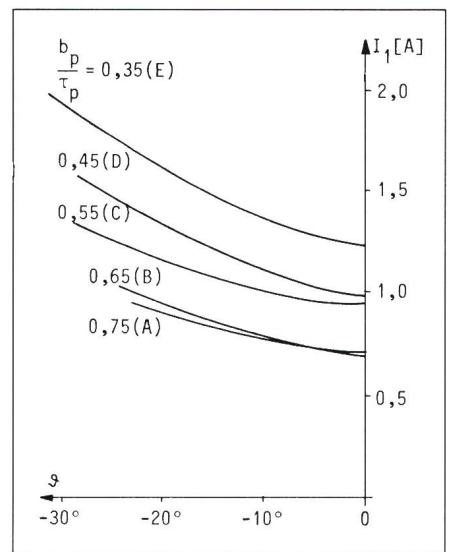


Figur 5
Maximal gemessenes Wellenmoment in Abhängigkeit der Polbedeckung und des Luftspaltverhältnisses



Figur 7 Kippwinkel in Abhängigkeit der Polbedeckung

$\delta_{max}/\delta_{min} = 12; h_N = 4,2 \text{ mm}$



Figur 8 Ständerstromkennlinien

$\delta_{max}/\delta_{min} = 10; h_N = 3,5 \text{ mm}$

kennlinie der fünf Serien für $\delta_{max}/\delta_{min} = 10$. Es ist ersichtlich, dass jene Motoren, welche höheren Ständerstrom vom Netz beziehen, ebenfalls grössere Wirkleistung aufnehmen.

Die Leistungskurven verlaufen ansonsten ähnlich wie die Drehmoment-

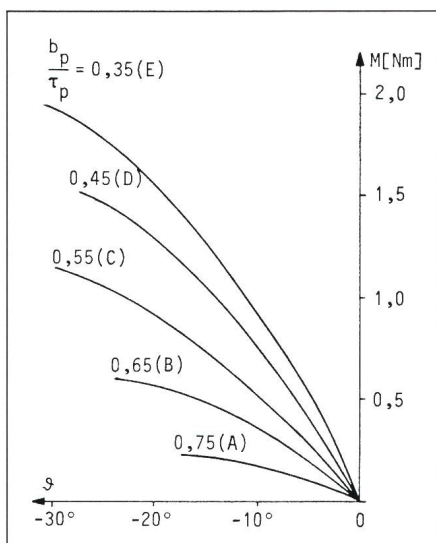
kurven (Fig. 6), denn die vom Netz aufgenommene Wirkleistung P_1 abzüglich aller Verluste ist dem Wellenmoment proportional, da die Drehzahl konstant gleich der synchronen Drehzahl bleibt. Es gilt:

$$M_w = \frac{P_w}{\Omega_1} = \frac{P_1 - P_v}{2 \pi n_1} \quad (8)$$

- P_w Wellenleistung
- P_v Verlustleistung
- Ω_1 Mechanische Winkelgeschwindigkeit
- n_1 Synchrondrehzahl

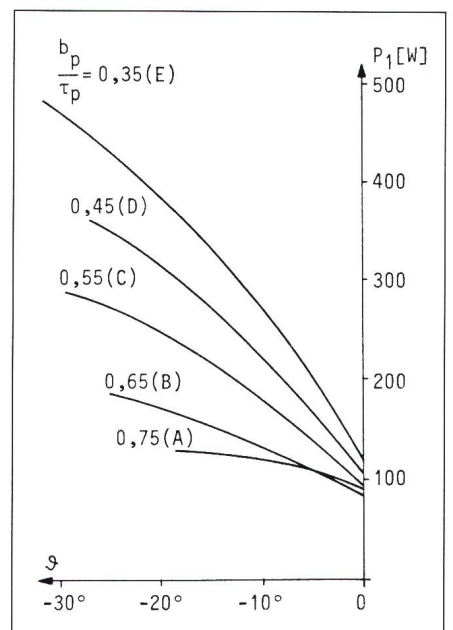
4.5 Leistungsfaktor

Der Leistungsfaktor wurde aus der vom Netz aufgenommenen Wirkleistung und dem gemessenen Ständerstrom ermittelt. Die Reluktanzmotoren mit breiteren Reluktanznuten weisen wohl einen grösseren Blindstromanteil im Leerlauf auf, erreichen aber bei Belastung durch ihre höhere Abgabeleistung an der Welle einen besseren $\cos \varphi_1$ als jene mit schmäleren Reluktanznuten (Fig. 10). Gemäss Gleichung (7) soll ja auch $\cos \varphi_1$ mit wach-



Figur 6 Drehmomentkennlinien

Tiefe der Reluktanznut
 $\delta_{max}/\delta_{min} = 10; h_N = 3,5 \text{ mm}$



Figur 9 Leistungskennlinien

$\delta_{max}/\delta_{min} = 10; h_N = 3,5 \text{ mm}$

sender Grösse der Suszeptanz zunehmen. Figur 10 bestätigt damit die Kurvenverläufe der Figur 4. Der Unterschied im Leistungsfaktor zwischen den Kurven für die Serien D und E ist auffallend gering.

4.6 Vergleich mit dem ursprünglichen Asynchronmotor

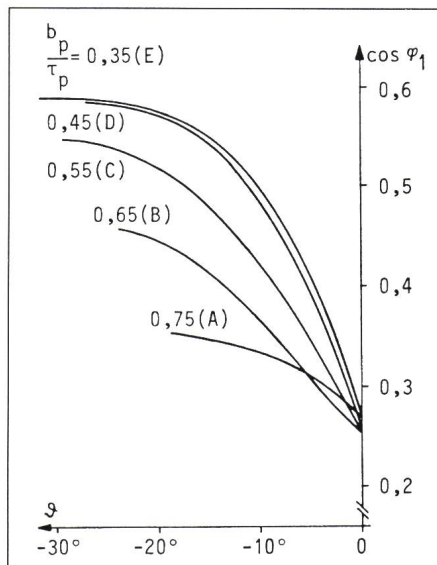
Das Wellenmoment des diesbezüglich besten Motors E5 erreicht ein Maximum von 2,15 Nm, während das berechnete Kippmoment des Asynchronmotors bei gleicher Strangspannung 5,35 Nm beträgt. Ein Vergleich des Drehmoments bei Nennstrom (vgl. Abschnitt 4.2) ist nicht sehr sinnvoll, weil der Reluktanzmotor E5 durch seinen hohen Blindstromanteil bereits im Leerlauf bei $U_1 = 150$ V nahezu den Nennstrom 1,3 A des Asynchronmotors bei Nennspannung 220 V bezieht.

Ein sinnvoller Vergleich kann jedoch bei einer Überlast, z.B. bei $I_1 = 1,6$ A, vorgenommen werden. Bei diesem Strom und $U_1 = 150$ V weist der Asynchronmotor mit 3,1 Nm knapp das doppelte Drehmoment des Reluktanzmotors E5 auf, denn dieser Reluktanzmotor erzeugt entsprechend nur ein Wellenmoment von 1,52 Nm.

Die aufgenommene Wirkleistung beträgt dabei

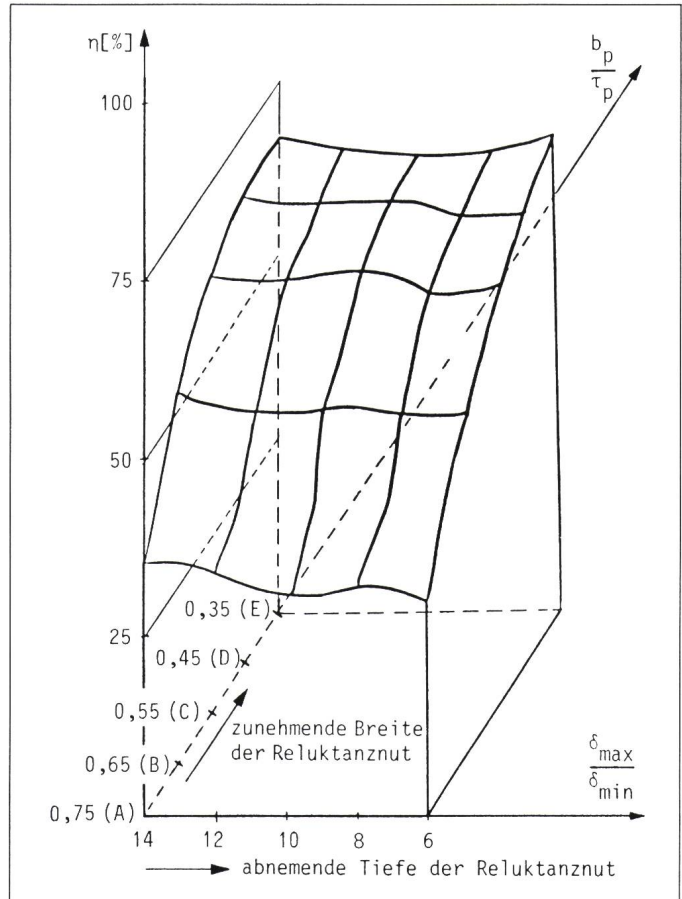
für den Asynchronmotor 650 W
für den Reluktanzmotor E5 380 W

Der Leistungsfaktor $\cos \varphi_1$ bei $I_1 = 1,6$ A ist mit 0,57 beim Reluktanzmo-



Figur 10 Leistungsfaktor in Abhängigkeit des Lastwinkels
 $\delta_{\max}/\delta_{\min} = 10; h_N = 3,5$ mm

Figur 11 Wirkung der Reluktanzmotoren bei verschieden grossen Reluktanznuten



tor E5 bedeutend schlechter als jener von 0,85 des Asynchronmotors.

Der Wirkungsgrad ist beim maximal gemessenen Wellendrehmoment in beiden Fällen fast gleich. Er beträgt beim Reluktanzmotor E5 66,7% (Fig. 11) und beim Asynchronmotor bei gleicher Spannung 69%.

5. Schlussfolgerungen

Die Versuche und Ergebnisse erlauben die klare Feststellung, dass der Motor mit den breitesten und tiefsten Reluktanznuten im Läufer die besten Resultate liefert. Dies gilt sowohl für das Drehmoment wie auch für den Leistungsfaktor und den Wirkungsgrad. Allgemein kann gesagt werden, dass durch das Vertiefen der Reluktanznuten eine stetige Verbesserung dieser Grössen in kleinem Mass erzielt werden konnte, während ein Verbreitern der Reluktanznuten grössere und ebenfalls stetige Verbesserungen bewirkt.

Es darf nun nicht angenommen werden, dass weitere Vergrösserungen der Reluktanznuten laufende Verbesse-

rungen ergeben würden. Vielmehr ist anzunehmen, dass sich sowohl bei der Tiefe als auch bei der Breite der Reluktanznuten ein Optimum einstellen wird.

Andererseits ist auch zu bemerken, dass nicht nur der Belastungsstrom durch das grössere Drehmoment, sondern auch der Leerlaufstrom mit wachsender Pollücke zunimmt. Dies würde bei Motoren mit noch grösserer Breite der Reluktanznuten selbst bei der reduzierten Strangspannung von 150 V zu strommässiger Überlastung der Statorwicklung führen.

Aus dieser Sicht gesehen, besitzt der Motor E5 bereits recht brauchbare Eigenschaften und könnte auch praktisch eingesetzt werden. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass dieser Motor durch seinen netzsynchronen Lauf drehmomentmässig nur noch zur Hälfte ausgenutzt werden kann.

Literatur

[1] D.F. Lăzăroiu und S. Slaiher: Elektrische Maschinen kleiner Leistung. Berlin, VEB Verlag Technik, 1976.