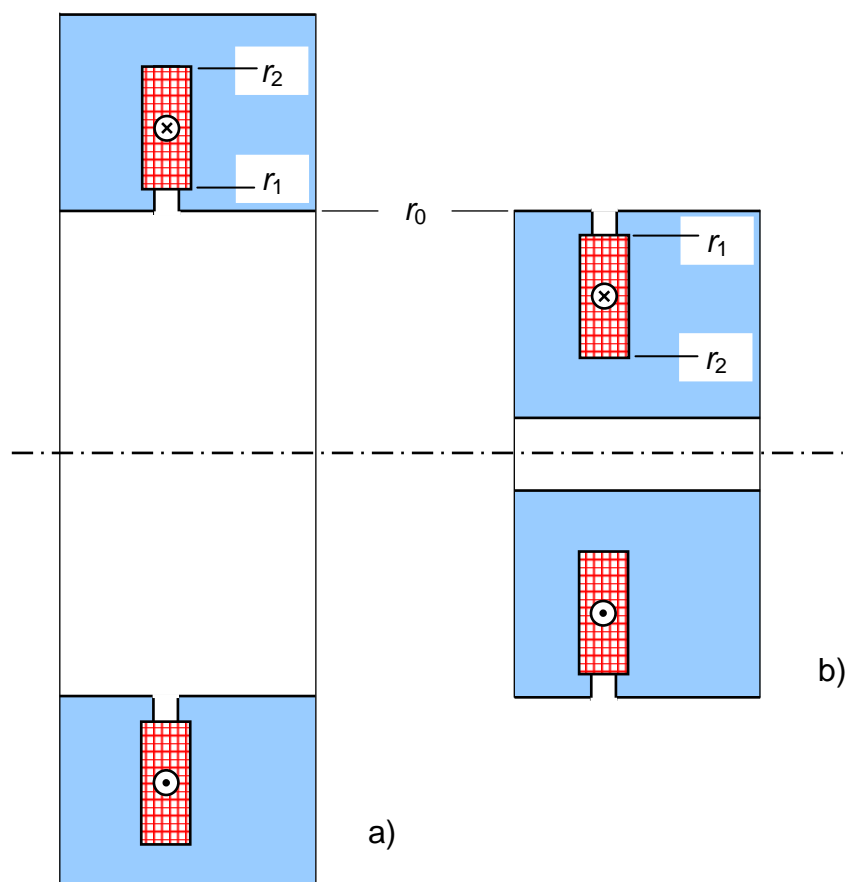


# NUTSTREUUNG BEI TUBULAREN ENERGIEWANDLERN

H. Mosebach

## 1 PROBLEMSTELLUNG

Tubulare Anordnungen werden für eine Reihe von Aufgaben als Kurzhub-LinearMotoren bzw. Aktuatoren diskutiert. Die Wicklung des Stators ist in Ringnuten angeordnet, wobei nach **Bild 1** zwischen Außen- und Innenstatoranordnungen unterschieden werden kann. Die Nutöffnungen sind dem jeweiligen Translator (nicht dargestellt) zugewandt.



**Bild 1:** Statoren von Tubularen Energiewandlern mit einzelner Ringnut  
a) Außenstator b) Innenstator

Die einzelnen Ringspulen können flexibel zu einer Vielzahl von Wicklungsausführungen (Drehstrom, polyphasig, ...) zusammenschaltet werden. Gleichfalls existiert eine Fülle von Wirkprinzipien für den Translator. Ein besonderer Vorteil der Ringspulen besteht darin, dass ein eigentlicher Wickelkopf nicht existiert. Damit entfällt auch die Stirnstreuung. Die Bedeutung der Nutstreuung nimmt jedoch entsprechend zu und sollte für Entwurfsrechnungen korrekt berücksichtigt werden. Dies ist der Hintergrund für die vorliegende Untersuchung. Wie in **Bild 1** gezeigt, wird für Innen- und Außenstator ein gleich großer Aktivradius  $r_0$  angenommen. Die Radien  $r_1$  und  $r_2$  werden sinngemäß gleichartig bezeichnet.

## 2 STREUFELD UND BERECHNUNGSGANG

Zur Berechnung der Nutstreuinduktivität wird gewöhnlich wie in **Bild 1** von einer einzelnen Nut mit einem gleichmäßig verteilten Strom im Hauptteil (Nutdurchflutung  $\Theta_n$ ) ausgegangen ([1]-[5]). Die Nutdurchflutung ist Ursache für das Nutzenstrefeld. Es steht auf den seitlichen Nutwänden senkrecht und kann daher - vor allem bei schmalen Nuten - als eindimensional angenommen werden (Nuttenquerfeld). Die Beziehung zur Induktivität wird über die magnetische Energie hergestellt,

$$W_m = L_\sigma \frac{\Theta_n^2}{2} \quad . \quad (1)$$

Die Streuflussdichte steigt bei Rechtecknuten bekanntlich linear von  $B_\sigma(r_2)=0$  (am Nutgrund) auf  $B_\sigma(r_1)=\mu_0\Theta_n/b_n$  (am luftspaltseitigen Ende des stromführenden Hauptteils der Nut). Dort springt sie auf den im Nutschlitz konstanten und höheren Wert  $B_{\sigma_s}=\mu_0\Theta_n/b_s$  ( $b_n$  ... Nutbreite,  $b_s$  ... Schlitzbreite).

Aus der nunmehr bekannten Verteilung der Streuflussdichte ist der Beitrag eines Radiumselements  $dr$  zur magnetischen Energie zu berechnen. Allgemein gilt für tubulare Anordnungen:

$$dW_m(r) = \frac{B_\sigma^2(r)}{2\mu_0} \cdot b_{nut}(r) \cdot 2\pi r \cdot dr \quad (2)$$

Die Nutbreite  $b_{nut}(r)$  kann hier nur die beiden Werte  $b_n$  bzw.  $b_s$  annehmen. Die Bewertung mit dem Radius  $r$  in (2) berücksichtigt die Aufweitung des Feldraums nach außen hin. Dieser Effekt ist bei zylindrischen Maschinen und Linearmotoren nicht vorhanden. Die Streuinduktivität folgt schließlich aus der Integration

$$L_\sigma = \frac{2}{\Theta_n^2} \int dW_m(r) \quad . \quad (3)$$

Sie kann analytisch ohne Schwierigkeiten vollzogen werden, so dass geschlossene Ausdrücke für die Streuinduktivität erhalten werden.

## 3 ERGEBNISSE

Die Integration der magnetischen Energiedichte (3) liefert für die tubulare Anordnung mit *außenliegendem* Stator (**Bild 1a**) die Streuinduktivität:

$$L_{\sigma,sub,a} = 2\pi r_0 \mu_0 \left( \frac{r_2}{r_0} \cdot \frac{h_n}{3b_n} - \frac{h_n^2}{4b_n r_0} + \frac{h_s}{b_s} + \frac{h_s^2}{2b_s r_0} \right) \quad (4)$$

Für den *innenliegenden* Stator (**Bild 1b**) lautet das Ergebnis:

$$L_{\sigma,sub,i} = 2\pi r_0 \mu_0 \left( \frac{r_2}{r_0} \cdot \frac{h_n}{3b_n} + \frac{h_n^2}{4b_n r_0} + \frac{h_s}{b_s} - \frac{h_s^2}{2b_s r_0} \right) \quad (5)$$

Die Gleichungen gelten für genau eine Nut. Dem Wesen der Streuung entsprechend, kann die Gesamtstreuinduktivität eines Wicklungsstranges einfach multiplikativ mit der Zahl der vom gleichen Strom durchflossenen Nuten ermittelt werden.

Bei klassischen Entwurfsrechnungen wird stillschweigend eine kartesische Behandlung des Feldproblems zugrunde gelegt. Es ergibt sich der Ausdruck

$$L_{\sigma,kart} = 2\pi r_0 \mu_0 \left( \frac{h_n}{3b_n} + \frac{h_s}{b_s} \right) , \quad (6)$$

wenn in den üblichen Formeln ([1]-[5]) an Stelle der Blechpaketbreite  $l_{Fe}$  der Umfang  $2\pi r_0$  des tubularen Stators am aktiven Radius eingesetzt wird. Der Klammerausdruck wird gewöhnlich als Streuleitwert  $\lambda_n$  bezeichnet. Die in (6) vorkommenden Terme sind auch in den tubularen Fällen (4) und (5) - zum Teil mit dem Radienverhältnis  $r_2/r_0$  bewertet - zu identifizieren. Die Streuleitwerte enthalten offenbar jetzt aber noch je 2 weitere quadratische (Korrektur-)Glieder.

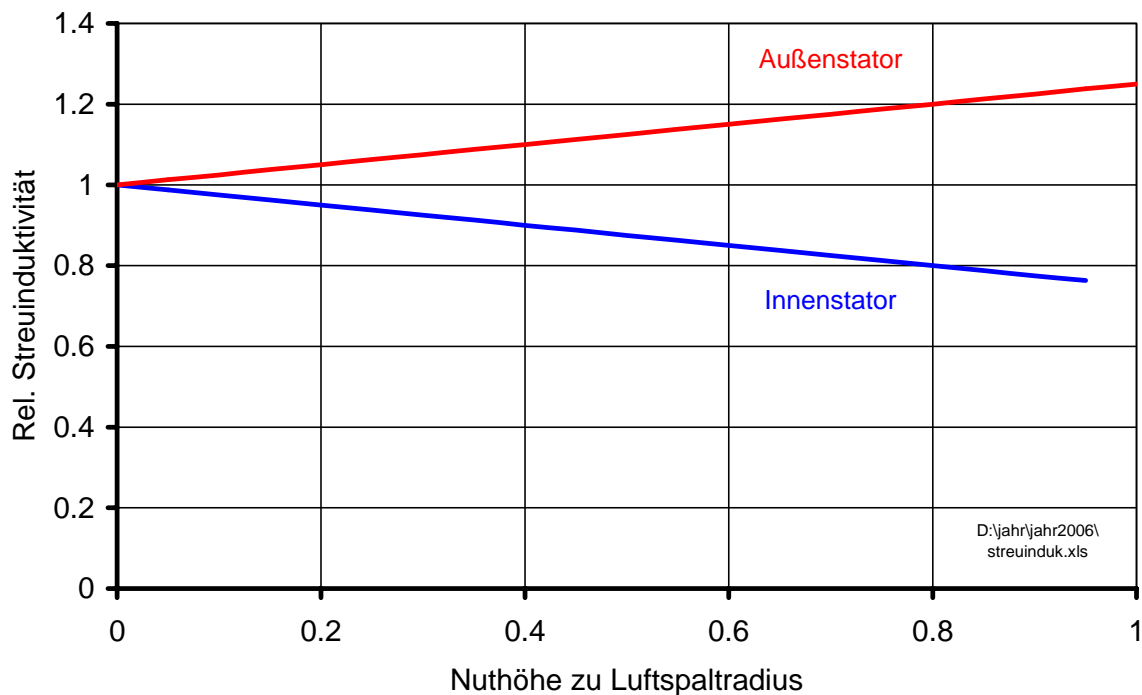
Zur Darstellung der wesentlichen Abhängigkeiten soll jetzt der Nutschlitz rechnerisch herausgenommen werden ( $h_s \rightarrow 0$ , d. h.  $r_1 = r_0$ ). Die Gleichungen (4) und (5) vereinfachen sich nach einer Normierung auf die klassische Streuinduktivität damit zu

$$\frac{L_{\sigma,tub,a}}{L_{\sigma,kart}} = 1 + \frac{1}{4} \frac{h_n}{r_0} \quad (7)$$

$$\text{bzw.} \quad \frac{L_{\sigma,tub,i}}{L_{\sigma,kart}} = 1 - \frac{1}{4} \frac{h_n}{r_0} . \quad (8)$$

Wie **Bild 2** zeigt, sind die Unterschiede zwischen tubular und kartesisch berechnet nicht besonders groß. Das liegt hauptsächlich daran, dass die größte Streuflussdichte und damit die größte magnetische Energiedichte in der Nähe des Luftspalts am Radius  $r_0$  vorliegt und die weiter entfernt Richtung Nutgrund liegenden Bereiche entsprechend weniger beitragen. Das jeweilige Feldvolumen unterscheidet sich natürlich, so dass tendenziell der Außenstator bei gleicher Nutgeometrie eine größere Streuinduktivität als der Innenstator aufweist.

Trotz der geringen Differenzen sollte der Unterschied in Entwurfsrechnungen beachtet werden, vor allem, wenn von einer bereits bekannten Innenstatorlösung auf eine Außenstatorlösung übergegangen wird und zum Ausgleich der erhöhten Verluste dort eine größere Nuthöhe gewählt werden muss.



**Bild 2:** Vergleich der tubularen Streuinduktivitäten mit der kartesisch berechneten (Rechtecknut ohne Nutschlitz)

## LITERATUR

- [1] Th. Bödefeld, H. Sequenz: *Elektrische Maschinen*, Springer-Verlag, Wien 1962
- [2] H. Weh: *Elektrische Netzwerke und Maschinen in Matrizendarstellung*, Bibliographisches Institut Mannheim, 1968
- [3] G. Gerber, R. Hanitsch: *Elektrische Maschinen*, Berliner Union Kohlhammer, 1980
- [4] K. Voigt: *Berechnung elektrischer Maschinen*, VCH Verlag, Weinheim 1996
- [5] W.-R. Canders: *Vorlesungsskript zur Vorlesung "Elektromechanische Energieumformung I"* im SS 2005, als Download im Internet unter [www.imab.de](http://www.imab.de) verfügbar