

**Zeitschrift:** bulletin.ch / Electrosuisse  
**Herausgeber:** Electrosuisse  
**Band:** 97 (2006)  
**Heft:** 17

**Artikel:** Zahnsplulentwicklungen für permanent erregte AC-Servo- und Linearmotoren  
**Autor:** Huth, Gerhard  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-857715>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### 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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### 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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 25.02.2026

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

# Zahnspulenwicklungen für permanent erregte AC-Servo- und Linearmotoren

**Deutlich kleinere Wickelköpfe und höhere Nutfüllungen erlauben eine höhere Aktivteilausnutzung**

AC-Servoantriebe finden ihren Einsatz als Stell- und Positionierantrieb im Bereich der Werkzeug- und Produktionsmaschinen. In der Mehrzahl werden Linearachsen noch indirekt von permanent erregten AC-Servomotoren angetrieben, eine Gewinderollspindel setzt hierbei die Drehbewegung in eine Linearbewegung um. Permanent erregte AC-Servomotoren sind Drehfeldmaschinen, die an rotorlagegetakteten Pulswechselrichtern betrieben werden: Das sinusförmige Stromsystem wird, abgesehen von einem möglichen Feldschwächbetrieb, in Abhängigkeit von der Rotorlage derart eingeprägt, dass eine maximale Drehmomentausbeute erzielt wird.

Erfolgt der Antrieb der Linearachse direkt, so kommt ein permanent erregter Linearmotor in Kurzstatorausführung zur Anwendung. Er entspricht im Prinzip der Abwicklung eines permanent erregten

AC-Servomotors mit periodischer Fortsetzung des mit Permanentmagneten realisierten Reaktionsteils entlang des Verfahrweges. Wegen dieser direkten Verwandtschaft lassen sich die wesentlichen

Gesichtspunkte unmittelbar vom permanent erregten AC-Servomotor auf die Linearmotorausführung übertragen. Das gilt speziell auch für die Ausführung der

*Gerhard Huth*

Zahnspulenwicklungen, sodass die Beitrachtungen im Weiteren am Beispiel des permanent erregten AC-Servomotors erfolgen werden.

Beim konventionellen Design wird der Ständer mit einem dreisträngigen verteilten Wicklungssystem ausgeführt. Im Detail werden Lochzahl und Sehnung des Wicklungssystems auf die Anforderungen bei permanent erregten AC-Servomotoren abgestimmt [1]. Bezüglich der Wicklungssystematik handelt es sich grundsätzlich um Bruchlochwicklungen, die als Zweischicht- oder Einschichtwicklungen ausgeführt sein können. Prinzipbedingte Nachteile verteilter Wicklungssys-

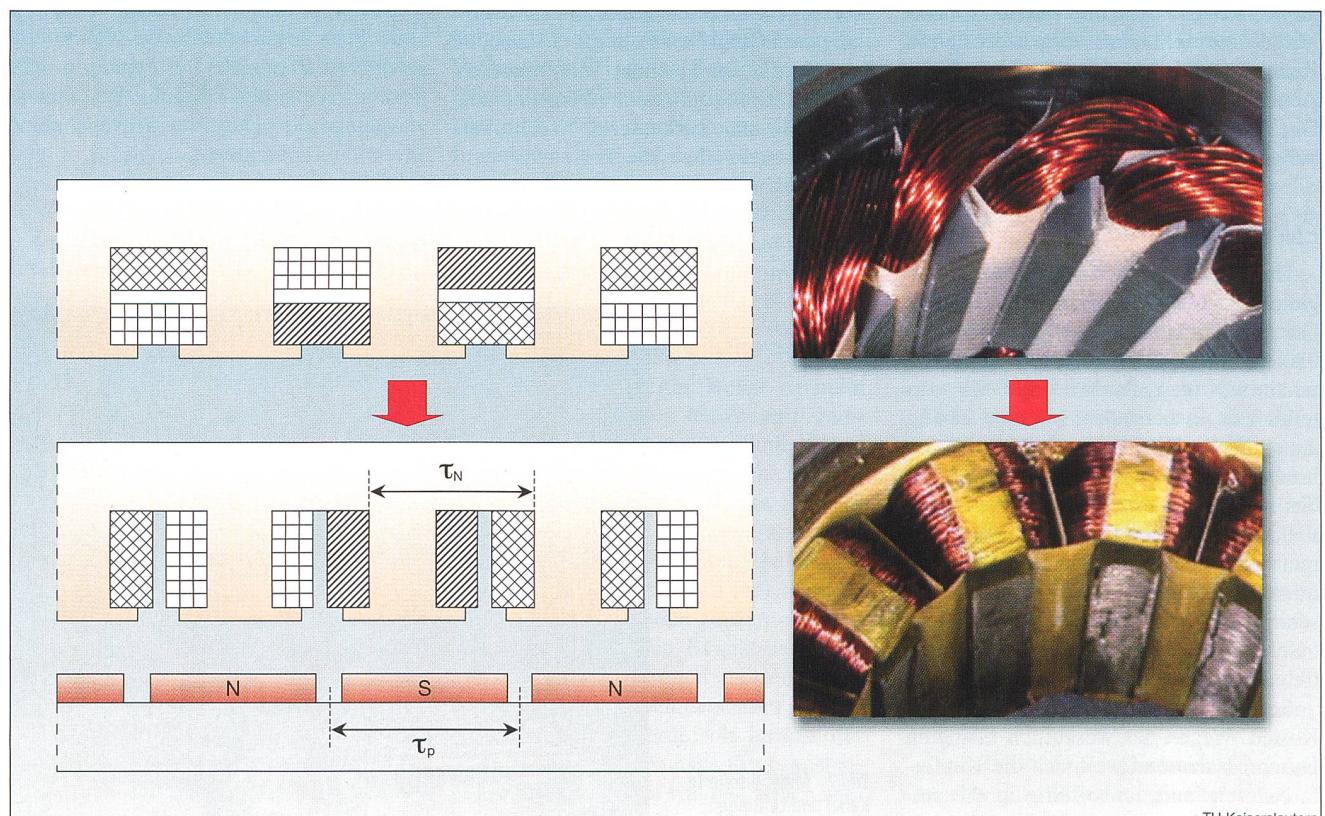
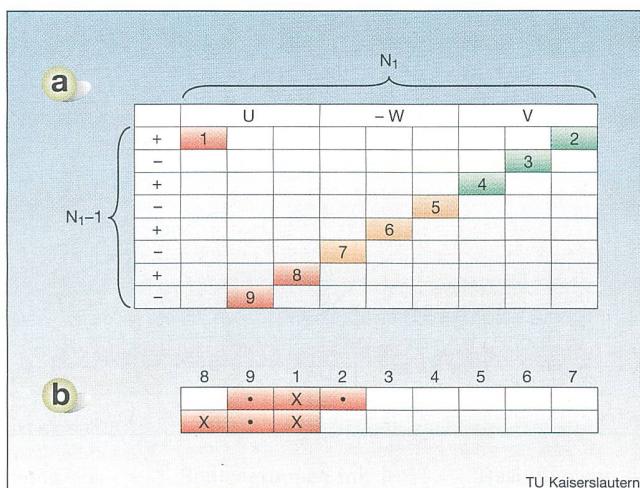


Bild 1 Zweischicht-Zahnspulenwicklung als Sonderfall der Zweischicht-Bruchlochwicklung

TU Kaiserslautern



teme sind einerseits der relativ grosse Wickelkopf sowie andererseits die aufwendige Wickel- und Isoliertechnik. Neben dem notwendigen Platzbedarf verursacht der grosse Wickelkopf einen entsprechend hohen Anteil an den Stromwärmeverlusten und führt damit zur Reduzierung der Aktivteilausnutzung. Die infolge der Pulswechselrichter-Speisung erforderliche Phasentrennisolierung stellt einen weiteren Kostenfaktor dar. Es ist daher nahe liegend, ein Wicklungssystem zu wählen, das diese prinzipbedingten Nachteile weniger ausgeprägt aufweist.

Die Zahnpulpenwicklungen [2–5] sind hierfür ein geeigneter Lösungsansatz. Der Wicklungsaufbau von Zahnpulpenwicklungen besteht aus Einzelpulpen, die jeweils genau einen Zahn des Ständerblechpaketes umfassen. Damit weisen Zahnpulpenwicklungen einen besonders kleinen Wickelkopf auf, können kompakt mit hohem Füllfaktor gewickelt werden und benötigen im Wickelkopfbereich keine Phasentrennung. Diese deutlichen Vorteile lassen sich zur Steigerung der Drehmomentdichte sowie zur Senkung der Herstellkosten nutzen.

### Systematik der Zahnpulpenwicklungen

Permanent erregte AC-Servomotoren werden an 3-phasigen Pulswechselrichtern betrieben und tragen im Ständer eine Drehstromwicklung. Hinsichtlich der Wicklungssystematik stellt die symmetrische Zweischicht-Bruchlochwicklung den Grundwicklungstyp dar. Zweischicht-Bruchlochwicklungen entarten zu einer Zahnpulpenstruktur, wenn die Wicklungsschaltung so extrem gewählt wird, dass die Pulpenweite einer Nutteilung  $\tau_N$  ent-

spricht. Wird die bei Zweischichtwicklungen bestehende Nutaufteilung in Ober- und Unterschicht in eine nebeneinander liegende Spulenanordnung geändert, so wird nach Bild 1 der Charakter einer Zahnpulpenwicklung deutlich. Da sich dieser Typ von Zahnpulpenwicklung von der Zweischicht-Bruchlochwicklung ableiten lässt, soll er als Zweischicht-Zahnpulpenwicklung bezeichnet werden.

#### Zweischicht-Zahnpulpenwicklungen

Die betrachtete Ableitung der Zweischicht-Zahnpulpenwicklungen führt nur dann zu technisch sinnvollen Wicklungsauflösungen, wenn der Grundfeld-Wicklungsfaktor ausreichend hoch ist. Für einen hohen Sehnungs-Wicklungsfaktor muss die Pulpenweite  $W$  in der Größenordnung der Polteilung  $\tau_p = \frac{2\pi}{2p}$  liegen. Da die Pulpenweite  $W$  genau einer Nutteilung  $\tau_N = \frac{2\pi}{N_1}$  entspricht, sollten daher Ständernutzahl und Polzahl  $2p$  im Rahmen der Möglichkeiten dicht beieinander liegen ( $N_1 \approx 2p$ ).

Insgesamt bestehen Zweischicht-Zahnpulpenwicklungen entsprechend der Ständernutzahl aus  $N_1$  Zahnpulpen, die sich auf die  $m_1 = 3$  Stränge aufteilen, sodass alle durch 3 teilbaren Ständernuzahlen ausführbar sind.

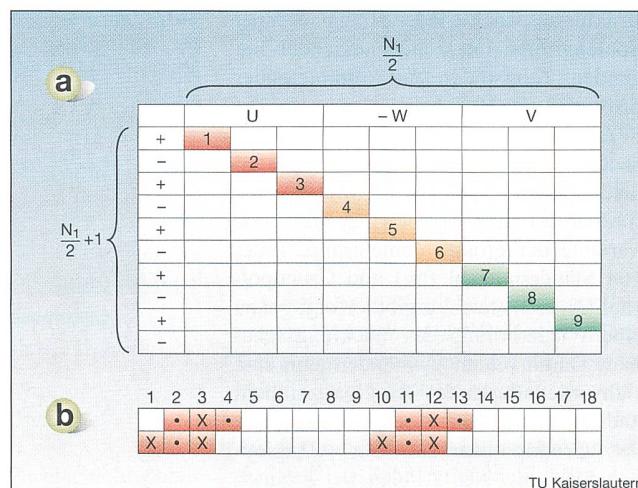
Die Zweischicht-Zahnpulpenwicklungen stellen, vergleichbar mit den Ganzlochwicklungen, eine Untergruppe der Zweischicht-Bruchlochwicklungen dar. Damit unterliegen die Zweischicht-Zahnpulpenwicklungen grundsätzlich den Gesetzmäßigkeiten der Zweischicht-Bruchlochwicklungen, und es gilt die Nutzahlbedingung  $N_1 = 2p \cdot m_1 \cdot q = 2p \cdot 3 \cdot \frac{z}{n}$ .

Da  $N_1 \approx 2p$  gilt, ist die Lochzahl  $q = \frac{z}{n}$  kleiner 1 und stellt mit  $z < n$  einen echten Bruch dar, der im Weiteren stets als ge-

kürzt unterstellt werden soll. Damit die Drehfeldwicklung symmetrisch ausführbar ist, darf der Nenner  $n$  der Lochzahl nicht durch die Strangzahl  $m_1 = 3$  teilbar sein:  $\frac{2p}{n} = \text{ganze Zahl}$  ( $n$  kein Vielfaches von 3).

Das Wicklungsschema von Zweischicht-Zahnpulpenwicklungen wiederholt sich mit dem grössten gemeinsamen Teiler (ggT) von Ständernuzahl und Grundpolzahl  $t = \text{ggT}(N_1, 2p) = \frac{2p}{n}$  nach  $\frac{2p}{t} = n$  Polen bzw. nach  $\frac{N_1}{t} = 3 \cdot z$  Nuten. Für die Bestimmung des Wicklungsplans über das «Tingley-Schema» [6] bilden die  $\frac{2p}{t} = n$  Pole und  $\frac{N_1}{t} = 3 \cdot z$  Nuten einer sich wiederholenden Wicklungseinheit die Dimensionen des «Tingley-Schemas», in dem jedes  $n$ -te Schemateil eine Nutbelegung darstellt. Umfasst die sich wiederholende Wicklungseinheit eine gerade Anzahl Pole ( $n$  gerade), so stellt sie gleichzeitig eine Urwicklung dar. Im anderen Fall ( $n$  ungerade) ergeben erst zwei sich wiederholende Wicklungseinheiten eine Urwicklung. Die Auslegungsbedingung  $N_1 \approx 2p$  wird am besten von  $2p \in \{N_1 \pm 1\}$  (Variante 1), gefolgt von  $2p \in \{N_1 \pm 2\}$  (Variante 2),  $2p \in \{N_1 \pm 3\}$  (Variante 3) usw. erfüllt.

Zweischicht-Zahnpulpenwicklungen nach Variante 1 sind nur für ungerade Ständernuzahlen ( $N_1 \in \{3, 9, 15, \dots\}$ ) ausführbar. Da mit  $t = \text{ggT}(N_1, 2p)$  für diese Variante der grösste gemeinsame Teiler von Ständernuzahl ( $N_1$ ) und Grundpolzahl ( $N_1 \pm 1$ ) stets 1 ergibt, erfolgt keine Wiederholung des Wicklungsschemas. Damit stellen die  $N_1$  Ständernuten insgesamt eine Urwicklung dar, und der Nenner der Lochzahl entspricht der Grundpolzahl  $n = 2p$ . Im «Tingley-Schema» mit  $N_1 \pm 1$  Polen zu  $N_1$  Nuten bildet sich nach Bild 2 eine Diagonal-



# Elektrische Motoren

struktur aus, sodass jeder Strang aus einer Spulengruppe mit  $z$  nebeneinander liegenden Zahnpulpen mit alternierender Stromrichtung besteht.

Zweischicht-Zahnpulpenwicklungen nach Variante 2 sind nur für gerade Ständernutzahlen ( $N_1 \in \{6, 12, 18, \dots\}$ ) ausführbar. Da mit  $t = \text{ggT}(N_1, 2p)$  für diese Variante der grösste gemeinsame Teiler von Ständernutzahl ( $N_1$ ) und Grundpolzahl ( $N_1 \pm 2$ ) stets 2 ergibt, erfolgt genau eine Wiederholung des Wicklungsschemas. Damit bilden  $\frac{N_1}{2}$  Ständernuten eine sich wiederholende Wicklungseinheit, und der Nenner der Lochzahl entspricht der Grundpolpaarzahl. Im «Tingley-Schema» mit  $\frac{N_1}{2} \pm 1$  Polen zu  $\frac{N_1}{2}$  Nuten bildet sich nach Bild 3 ebenfalls eine Diagonalstruktur aus. Ein Strang besteht aus 2 Spulengruppen, die je aus  $z$  nebeneinander liegenden Zahnpulpen mit alternierender Stromrichtung bestehen. Bei geradzahligem Nenner der Lochzahl  $q = \frac{z}{n}$  stellt bereits eine Spulengruppe eine Urwicklung dar, sodass beide Spulengruppen identische Stromrichtungen aufweisen. Ist im anderen Fall der Nenner der Lochzahl ungeradzahlig, so sind beide Spulengruppen Bestandteil der Urwicklung und besitzen umgekehrte Stromrichtungen.

Die an den Varianten 1 und 2 aufgezeigte einfache Struktur von Zweischicht-Zahnpulpenwicklungen lässt sich verallgemeinern, wenn das «Tingley-Schema» der sich wiederholenden Wicklungseinheit mit  $\frac{2p}{t}$  Polen zu  $\frac{N_1}{t}$  Nuten auf eine Diagonalstruktur führt. Diese gewünschte Diagonalstruktur wird stets erreicht, wenn die Bedingung  $\frac{2p}{t} = \frac{N_1}{t} \pm 1$  erfüllt wird, was auf die Variantenbedingung  $2p \in \{N_1 \pm t\}$  führt. Zweischicht-Zahnpulpenwicklungen, die aus dieser Variantenbedingung hervorgehen, unterliegen damit dem folgenden einfachen Bildungsgesetz:

- Jeder Wicklungsstrang besteht aus  $t$  Spulengruppen mit je  $z$  Zahnpulpen.
- Die  $z$  Zahnpulpen einer Spulengruppe belegen benachbarte Nuten mit alternierender Stromrichtung.
- Für  $\frac{2p}{t} = n$  ( $n$  gerade) besitzen alle  $t$  Spulengruppen eine identische Stromrichtung, es bestehen  $t$  Urwicklungen.
- Für  $\frac{2p}{t} = n$  ( $n$  ungerade) gehören je 2 Spulengruppen zu einer Urwicklung und besitzen umgekehrte Stromrichtungen. Insgesamt bestehen  $\frac{t}{2}$  Urwicklungen.

Übersichtlich lassen sich die betrachteten Wicklungsvarianten in Abhängigkeit von Polzahl  $2p$  und Ständernutzahl  $N_1$  in einer Matrix der möglichen Lochzahlen  $q = \frac{z}{n}$  nach Bild 4 darstellen. Permanent er-

Bild 4 Lochzahlenmatrix der Zweischicht-Zahnpulpenwicklungen

2p	$N_1=3$	$N_1=6$	$N_1=9$	$N_1=12$	$N_1=15$	$N_1=18$	$N_1=21$	$N_1=24$
2	$\frac{1}{2}$							
4		$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$					
6			$\frac{1}{2}$					
8			$\frac{1}{4}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{2}$			
10				$\frac{3}{10}$	$\frac{2}{5}$	$\frac{1}{2}$		
12				$\frac{1}{4}$			$\frac{1}{2}$	
14		$2p=N_1 \pm 1$			$\frac{2}{7}$	$\frac{5}{14}$		
16		$2p=N_1 \pm 2$			$\frac{1}{4}$	$\frac{5}{16}$	$\frac{3}{8}$	
18						$\frac{1}{4}$	$\frac{3}{10}$	$\frac{7}{20}$
20							$\frac{7}{22}$	$\frac{2}{5}$
22								$\frac{4}{11}$

TU Kaiserslautern

regte AC-Servomotoren mit klassischen verteilten Wicklungssystemen werden, je nach Achshöhe, 4-, 6- oder 8-polig ausgeführt. Aus Bild 4 wird deutlich, dass permanent erregte AC-Servomotoren in Zahnpulentechnik zu höheren Polzahlen tendieren.

Eine Grenzvariante, auch bezüglich der Grundfeldausnutzung, besteht für  $2p \in \{N_1 \pm \frac{N_1}{3}\}$ . Sie ist für alle Ständernutzahlen mit  $N_1$  als Vielfachem von 3 ausführbar und führt auf die Lochzahlen  $q = \frac{1}{2}$  sowie  $q = \frac{1}{4}$ . In der Praxis sind besonders die Zweischicht-Zahnpulpenwicklungen mit der Lochzahl  $q = \frac{1}{2}$  von Interesse, da sie nach Bild 4 noch relativ niedrige Grundpolzahlen  $2p$  ermöglichen.

## Einschicht-Zahnpulpenwicklungen

Die bisher betrachteten Zweischicht-Zahnpulpenwicklungen können durch den Übergang auf Einschicht-Zahnpulpenwicklungen weiter vereinfacht werden, denn auch für diese gilt die Auslegungsbedingung  $N_1 \approx 2p$ , wobei nun jedoch die  $N_1$  Ständernuten nach Bild 5 mit nur jedem folgenden einfachen Bildungsgesetz:

weils einer Zahnpulenseite belegt sind. Einschicht-Zahnpulpenwicklungen bestehen somit aus nur  $\frac{N_1}{2}$  Zahnpulpen, die sich auf die  $m_1 = 3$  Stränge aufteilen, sodass alle durch die doppelte Strangzahl  $2 \cdot m_1 = 6$  teilbaren Ständernutzahlen ausführbar sind.

Für die damit ausführbaren Ständernutzahlen behält die Lochzahlenmatrix in Bild 4 weiterhin ihre Gültigkeit, und mit  $N_1 = 2p \cdot 3 \cdot \frac{z}{n}$  folgt die Bedingung, dass  $\frac{p}{n}$  eine ganze Zahl ist, wobei  $n$  kein Vielfaches von 3 sein darf.

Der Übergang von der Zweischicht- auf die Einschicht-Zahnpulpenwicklung erfolgt anschaulich anhand des Wicklungszonensplans, dabei sind die folgenden zwei Fälle zu unterscheiden:

### Fall 1: $z$ ist gerade

Stellt der Zähler  $z$  der Lochzahl  $q = \frac{z}{n}$  eine gerade Zahl dar, so entspricht der Wicklungszonensplan der Einschicht-Zahnpulpenwicklung genau dem Wicklungszonensplan einer Nutschicht der entsprechenden Zweischicht-Zahnpulpenwicklung. Jeder Wicklungsstrang besteht

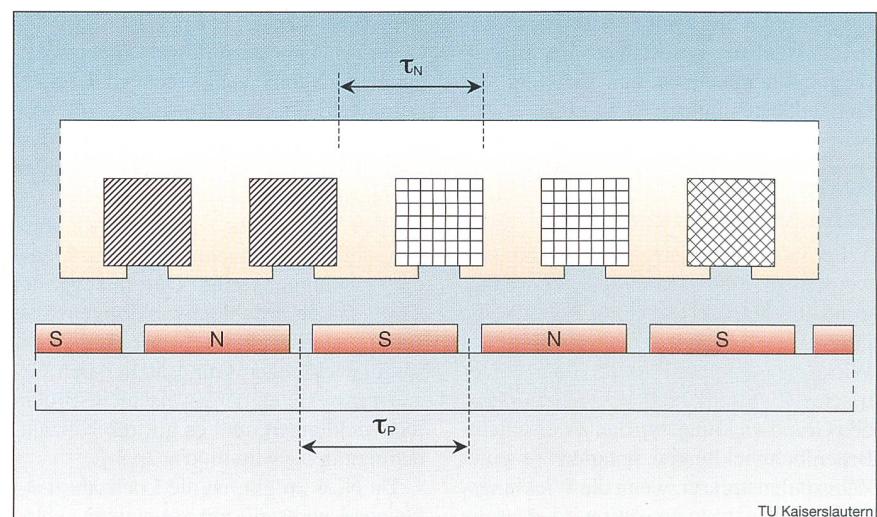


Bild 5 Abwicklung eines Ständers mit Einschicht-Zahnpulpenwicklung

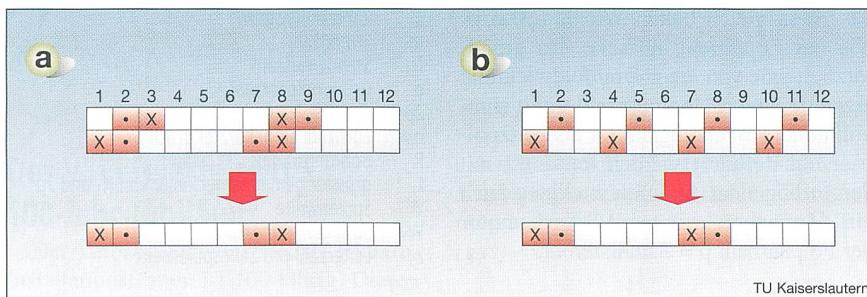


Bild 6 Übergang von der Zweischicht-Zahnspulenwicklung auf die Einschicht-Zahnspulenwicklung  
Darstellung am Zonenplan eines Wicklungsstranges. Bild a:  $N_1 = 12$ ,  $2p = 10$ ,  $q = \frac{2}{5}$ ; Bild b:  $N_1 = 12$ ,  $2p = 8$ ,  $q = \frac{1}{2}$ .

somit aus  $t = \frac{2p}{n}$  Spulengruppen mit je  $\frac{z}{2}$  Zahnpulsen. In Bild 6a ist hierzu ein Beispiel für eine 10-polige Zahnspulenwicklung mit  $N_1 = 12$  Ständernuten dargestellt.

Fall 2:  $z$  ist ungerade

Stellt der Zähler  $z$  der Lochzahl  $q = \frac{z}{n}$  hingegen eine ungerade Zahl dar, so besteht die aus der Zweischicht-Zahnspulenwicklung abgeleitete Einschicht-Zahnspulenwicklung, bezogen auf einen Strang, aus sich abwechselnden Spulengruppen mit  $\frac{(z+1)}{2}$  sowie  $\frac{(z-1)}{2}$  Zahnpulsen. In Bild 6b ist hierzu ein Beispiel für eine 8-polige Zahnspulenwicklung mit  $N_1 = 12$  Ständernuten dargestellt.

Einschicht-Zahnspulenwicklungen sind aufgrund ihrer kleineren Anzahl von Zahnpulsen zunächst einfacher aufgebaut, sie bestehen jedoch im Vergleich zu den Zweischicht-Zahnspulenwicklungen aus Zahnpulsen mit doppelter Windungszahl, sodass die Wickelköpfe damit größer ausfallen. Ein weiterer fertigungstechnischer Nachteil ist der Umstand, dass Einschicht-Zahnspulenwicklungen nicht mit einem Nadelwickler gefertigt werden können. Hinzu kommt, dass mit Einschicht-Zahnspulenwicklungen ein deutlich ungünstiges Luftspaltfeldspektrum verbunden ist, was zu höheren Drehmomentwelligkeiten führen kann [3]. Aus diesen Gründen haben bei permanent erregten AC-Servomotoren allein die Zweischicht-Zahnspulenwicklungen eine praktische Bedeutung erlangt.

### Analyse der Zweischicht-Zahnspulenwicklungen

Neben der grundsätzlichen Möglichkeit, die Zweischicht-Zahnspulenwicklungen als Untermenge der allgemeinen Zweischicht-Bruchlochwicklungen zu betrachten, bietet sich aufgrund der einfachen Wicklungsstruktur, analog zu den Ganzlochwicklungen, eine direkte Analyse an.

Basiselement der Zweischicht-Zahnspulenwicklungen ist die in Bild 7 dargestellte Zahnpule. Als Modell für die analytische Beschreibung des Strombelags wird ein über die Nutschlitzbreite verteilter Strombelag unterstellt. Für die Fourieranalyse des Zahnpulsen-Strombelags folgt:

$$a_s = -\sum_{v=1,2,3,\dots} \frac{2 \cdot z_s \cdot i_s}{\pi \cdot R} \xi_{sv} \xi_{nv} \sin(v \cdot x)$$

Dabei beschreibt  $\xi_{sv} \xi_{nv}$  das Produkt aus Sehnungs- und Nutschlitzfaktor.

$$\xi_{sv} \cdot \xi_{nv} = \sin\left(\frac{v \cdot \pi}{N_1}\right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{v \cdot b_s}{2 \cdot R}\right)}{v \cdot b_s} \quad (1)$$

Die Überlagerung der drei Wicklungsstränge, die je aus  $t$  Spulengruppen mit je  $z$  benachbarten Zahnpulsen alternierender Stromrichtung bestehen, führt mit dem Zonungsfaktor  $\xi_{zv}$

$$\xi_{zv} = \frac{\sin\left(\left[\frac{\pi}{2} - \frac{v \cdot \pi}{N_1}\right] \cdot z\right)}{z \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{v \cdot \pi}{N_1}\right)}$$

auf den resultierenden Drehstrombelag.

$$a(x_1, t) = -\sum_v \sqrt{2} \cdot \xi_{sv} \xi_{nv} \xi_{zv} \cdot \frac{6 \cdot W_1 \cdot I_1}{2 \cdot \pi \cdot R} \cos\left(v \cdot x_1 - \omega t - \phi + \frac{\pi}{2} \cdot (z-1)\right)$$

Die möglichen Drehfeld-Polpaarzahlen sind hierbei:

$$v = p + \frac{6 \cdot p}{n} \cdot g; \quad g = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (2)$$

Nach dieser Gleichung existiert ein breites Spektrum von Wicklungsfeldern. Um Parasitätswirkungen hieraus klein zu halten, ist ein grosser magnetisch wirksamer Luftspalt von Vorteil, wie das bei AC-Servomotoren mit Luftspaltmagneten der Fall ist. Zahnspulenwicklungen eignen sich daher besonders für Motorkonzepte dieser Art.

Wird der Nutschlitz vernachlässigt und damit eine konzentrierte Nutdurchflutung vereinfachend unterstellt, so berechnet sich der resultierende Wicklungsfaktor zu

$$\tilde{\xi}_{sv} = \xi_{sv} \cdot \xi_{zv} = \sin\left(\frac{v \cdot \pi}{N_1}\right) \cdot \frac{\sin\left(\left[\frac{\pi}{2} - \frac{v \cdot \pi}{N_1}\right] \cdot z\right)}{z \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{v \cdot \pi}{N_1}\right)}$$

In dieser vereinfachten Form ist der Betrag des Wicklungsfaktors periodisch in der Ständernutzzahl  $N_1$ , sodass betragsmäßig genau dem Zähler der Lochzahl entsprechend  $z$  verschiedene Wicklungsfaktoren auftreten können. Für die in der Lochzahlenmatrix nach Bild 4 dargestellten Zweischicht-Zahnspulenwicklungen sind die zugehörigen Grundfeld-Wicklungsfaktoren in Bild 8 zusammengestellt. Es wird anhand der Darstellung deutlich, dass mit Zweischicht-Zahnspulenwicklungen vergleichbar gute Grundfeldausnutzungen erreicht werden können wie mit klassischen verteilten Wicklungssystemen.

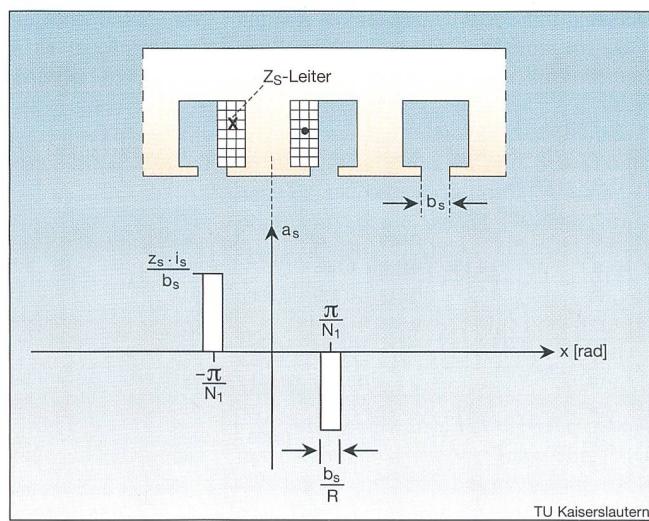


Bild 7 Strombelag einer Zahnpule mit Windungszahl  $z_s$  und Spulenstrom  $i_s$  unter Berücksichtigung der Nutschlitzbreite  $b_s$

# Elektrische Motoren

## Wicklungsbeispiel

Die abgeleiteten Eigenschaften der Zweischicht-Zahnspulenwicklungen sollen am Beispiel der in Bild 6a dargestellten Zweischicht-Zahnspulenwicklung mit  $N_1 = 12$  Ständernuten und der Lochzahl  $q = \frac{2}{5}$  diskutiert werden. Wird in erster Näherung die Nutschlitzbreite  $b_s$  vernachlässigt, so existieren betragsmäßig genau zwei unterschiedliche Wicklungsfaktoren, die sich den Drehfeld-Polpaarzahlen nach Gleichung (2) zugeordnet, periodisch wiederholen. Nachfolgend sind die zwei möglichen Wicklungsfaktoren exemplarisch der Grundpolpaarzahl  $p$  und den Oberfeldpolpaarzahlen  $7p$  bzw.  $-5p$  zugeordnet:  $|\xi_p| \rightarrow 0,933$  und  $|\xi_{-5p}| \rightarrow 0,067$ .

In Abhängigkeit der gewählten Fertigungstechnologie muss der Nutschlitz oftmals grösser ausgeführt werden, so zum Beispiel bei Einbringung von vorgefertigten Zahnspulen in Verbindung mit einteiligen Ständerblechschnitten. Die Nutschlitzbreite  $b_s$  darf in diesen Fällen nicht mehr vernachlässigt werden. Der Nutschlitzfaktor nach Gleichung (1) hat nun die positive Eigenschaft, dass er die Oberfeld-Wicklungsfaktoren reduziert.

Nach der Lochzahlenmatrix (Bild 4) sind der Ständernutzzahl  $N_1 = 12$  die zwei Wicklungsausführungen mit den Polpaarzahlen  $p = \{\frac{N_1}{2} + 1, \frac{N_1}{2} - 1\} = \{5, 7\}$  paarweise zugeordnet. Beide Wicklungsausführungen sind bis auf ihre Phasenfolge identisch, sodass mit einer Ständerausführung grundsätzlich beide Polpaarzahlen möglich sind, wenn der permanent erregte Läufer entsprechend der gewählten Polpaarzahl ausgeführt wird. Dieser Zusammenhang wird auch klar, wenn die Drehfeld-Polpaarzahlen der Zahnspulenwicklung mit gewählter Grundpolpaarzahl  $p = 5$  betrachtet werden:  $v = \{\dots -13, -7, -1, +5, +11, +17, +23, \dots\}$ .

Neben dem gewählten Grundfeld der Polpaarzahl  $p = 5$  tritt ein gegendrehendes Oberfeld mit der Polpaarzahl  $v = -7$  auf,

das einen gleich hohen Wicklungsfaktor wie das Grundfeld aufweist. Da grundsätzlich jede von einer Drehfeldwicklung erzeugte Drehfeldpolpaarzahl  $v$  mit sinnvoll hohem Wicklungsfaktor als Nutzpolpaarzahl definiert werden kann, ist mit der vorliegenden Drehfeldwicklung auch ein permanent erregter AC-Servomotor der Polpaarzahl  $\tilde{p} = 7$  realisierbar.

$i_s$	Zahnspulenstrom
$m_1$	Strangzahl
$N_1$	Ständernutzzahl
$p$	Grundpolpaarzahl
$2p$	Grundpolzahl
$q = \frac{n}{N_1}$	Lochzahl als gekürzter Bruch
$R$	Böhrungsradius
$t$	grösster gemeinsamer Teiler von $N_1$ und $2p$
$W$	Spulenweite
$W_1$	Strangwindungszahl
$z_s$	Leiterzahl pro Zahnspulenseite

## Zusammenfassung

Zahnspulenwicklungen bieten die Basis für eine innovative Weiterentwicklung der permanent erregten AC-Servo- und Linearmotoren. Sie ermöglichen im Vergleich zu den klassischen verteilten Wicklungssystemen neben einer einfacheren Fertigungstechnologie deutlich kleinere Wickelköpfe, ein einfacheres Isoliersystem, höhere Nutfüllungen und resultierend hieraus eine höhere Aktivitätsausnutzung. Die Zweischicht-Zahnspulenwicklungen stellen einen Sonderfall der Zweischicht-Bruchlochwicklungen für den Fall dar, dass die Spulenweite genau zu einer Nutteilung gewählt wird. Eine weitere Vereinfachung des Wicklungssystems ist durch den Übergang auf die Einschicht-Zahnspulenwicklungen möglich. Die Wicklungsanalyse mittels Drehfeldtheorie führt auf die Beschreibung der resultierenden Wicklungsfaktoren.

## Glossar

$\xi_v$	Wicklungsfaktor
$\xi_{Nv}$	Nutschlitzfaktor
$\xi_{Sv}$	Sehnungsfaktor
$\xi_{Zv}$	Zonungsfaktor
$v$	Drehfeld-Polpaarzahl
$\omega$	Kreisfrequenz
$\varphi$	Phasenverschiebung
$\tau_N$	Nutteilung
$\tau_p$	Polteilung
$a$	Drehstrombelag
$a_s$	Zahnspulenstrombelag
$b_s$	Nutschlitzbreite
$I_1$	Effektivwert des eingeprägten sinusförmigen Stromsystems

2p	$N_1=3$	$N_1=6$	$N_1=9$	$N_1=12$	$N_1=15$	$N_1=18$	$N_1=21$	$N_1=24$
2	0,866							
4	0,866	0,866						
6			0,866					
8		0,866	0,945	0,866				
10			0,945	0,933	0,866			
12			0,866			0,866		
14				0,933	0,951		0,866	
16				0,866	0,951	0,945		0,866
18								
20					0,866	0,945	0,953	0,933
22							0,953	0,950

TU Kaiserslautern

Bild 8 Grundfeld-Wicklungsfaktoren der Zweischicht-Zahnspulenwicklungen nach der Lochzahlenmatrix in Bild 4 ohne Berücksichtigung des Nutschlitzfaktors

## Referenzen

- [1] G. Huth: Optimierung des Wicklungssystems bei permanentmagnetenerregten AC-Servomotoren. Electrical Engineering 81 (1999), S. 375–383.
- [2] K. Greubel, G. Huth: Weiterentwicklung permanentmagnetenerregter Linarmotoren. SPS/IPC/DRIVES 1999, S. 745–754.
- [3] G. Huth, K. Qian: Permanentmagnetenerregte AC-Servomotoren mit vereinfachten Wicklungssystemen. Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik. ETG-Fachbericht 96 (2004), S. 15–21.
- [4] J. Cros, P. Viarouge: Synthesis of High Performance PM Motors with Concentrated Windings. IEEE Transactions on Energy Conversion, June 2002.
- [5] G. Huth: Permanent-Magnet-Excited AC Servo Motors in Tooth-Coil Technology. IEEE Transactions on Energy Conversion, June 2005.
- [6] H. Jordan, M. Weis: Synchronmaschinen II. untext, Vieweg-Verlag 1971.
- [7] H. O. Seinsch: Oberfelderscheinungen in Drehfeldmaschinen. Teubner Verlag 1992.

## Angaben zum Autor

Prof. Dr. Ing. **Gerhard Huth** hat seit 2001 den Lehrstuhl für Mechatronik und elektrische Antriebsysteme an der Technischen Universität Kaiserslautern.

TU Kaiserslautern, D-67663 Kaiserslautern,  
Erwin-Schrödinger-Strasse 11, huth@eit.uni-kl.de

## Résumé

### Enroulements à bobines dentées pour moteurs d'asservissement et linéaires CA à champ d'excitation permanent

Des têtes de bobine nettement plus petites et un meilleur remplissage des encoches permettent une meilleure exploitation de la partie active. Les asservissements à courant alternatif sont utilisés comme actuateurs et entraînements de positionnement dans les machines-outils et de production. La plupart du temps, les axes linéaires sont encore entraînés indirectement par des moteurs d'asservissement CA à excitation permanente, une broche filetée transformant le mouvement rotatif en mouvement linéaire. Les moteurs d'asservissement CA à excitation permanente sont des machines à champ tournant alimentées par des onduleurs pulsés pilotés par la position du rotor: le système sinusoïdal est piloté, sauf en cas de shuntage éventuel, par la position du rotor de manière à obtenir un rendement maximum de couple.