

Über das von Induktionsmaschinen nach der Drehfeldtheorie erzeugte Drehmoment

Autor(en): **Riccus, E. / Seiler, W.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins :
gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen
Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes
Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **60 (1969)**

Heft 8

PDF erstellt am: **05.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-916138>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Über das von Induktionsmaschinen nach der Drehfeldtheorie erzeugte Drehmoment

Von E. Riccius, München und W. Seiler, Volmarstein
2585 - 2595

621.313.333:621.016.1

Nach der Drehfeldtheorie entsteht die Umfangskraft bei Induktionsmaschinen durch Zusammenwirken von Strombelags- und Induktionswellen gleicher Wellenlänge. Es wird daher zunächst eine Übersicht über die von Primär- und Sekundärwicklung unmittelbar erzeugten Drehwellen gegeben (Drehzahlen graphisch) und der Einfluss von Nutung und Sättigung diskutiert. Ein Blockschema veranschaulicht das Zusammenwirken der Drehwellen aller Ordnungen und die Entstehung asynchroner und synchroner Drehmomente. Das bei Gleichlauf langwelliger magnetischer Leitwertwellen mit Induktionswellen niedriger Ordnungszahl auftretende Drehmoment wird erläutert.

D'après la théorie des champs tournants, la force périphérique est produite par les machines à induction par l'action combinée des ondes de densité linéaire de courant et des ondes induites de même longueur d'onde. L'exposé présente de ce fait en premier lieu un aperçu des courants tournants (avec représentation graphique des vitesses) directement produites par l'enroulement primaire et secondaire, puis discute en outre l'influence des encoches et de la saturation. Un schéma-bloc illustre le concours des ondes tournantes de tous les ordres et la réalisation de couples asynchrones et synchrones. Le couple produit en marche synchrone des ondes magnétiques à grande longueur d'onde par des ondes induites d'un nombre ordinal restreint est expliqué.

1. Einführung

Neben der Drehfeldtheorie zur Berechnung der Betriebskennlinien von Induktionsmaschinen wurden in den letzten Jahren Verfahren entwickelt, die unmittelbar die Wechselfelder der Ankerspulen erfassen, z. B. [1; 2; 3]¹⁾. Diese Verfahren sind sehr leistungsfähig, sie berücksichtigen u. a. die innere Schaltung der Wicklungen (parallele Zweige und Dreieckschaltung!) unmittelbar, erfordern aber zur Durchführung der Berechnung einen Digitalrechner. Nur scheinbar in Konkurrenz hierzu werden die Verfahren der Drehfeldtheorie entsprechend den zunehmenden Möglichkeiten beim Messen und beim Vorausberechnen verfeinert, siehe z. B. [4...9]. Dabei ergeben sich auch Verfahren, die eine Zwischenstellung einnehmen (siehe z. B. [10]).

Der Vorteil der Drehfeldtheorie und ihre Berechtigung auch auf lange Sicht ist: sie ist anschaulich und in den weniger perfekten Formen ohne Rechenanlage auswertbar; die einfachen Betrachtungsweisen können ohne weiteres vervollkommen werden, sie sind dann eventuell nicht mehr ohne Datenverarbeitungsanlage lösbar, aber durchaus noch anschaulich und für grundsätzliche Überlegungen geeignet.

2. Verwendete Buchstabensymbole und ihre Bedeutung

Zeichen	Bedeutung
A	Strombelag
\hat{A}	Scheitelwert der Strombelagswelle
B	Induktion
\hat{B}	Scheitelwert der Induktionswelle
D_1	Ständerinnendurchmesser
f	Frequenz

H	magnetische Feldstärke
k	ganze Zahl k_1 Stator, k_2 Schleifringrotor, k_3 Käfigrotor
l_i	ideelle Ankerlänge
M_i	inneres Drehmoment
m	Strangzahl
N	Nutenzahl, Stabzahl
n	Rotordrehzahl
n_s	synchrone Drehzahl
$n_{1(v)}$	Drehzahl der Statorrehwelle
$n_{2(\mu, v)}$	Drehzahl der Rotordrehwelle
	$n'_{2(\mu, v)}$, $n''_{2(\mu, v)}$ spezielle Werte, siehe Gl. (4)
p	Polpaarzahl
X	Wellenlänge
Δx	Verschiebung
β	Verschiebungswinkel
δ''	Ersatzluftspalt
μ	Ordnungszahl für Rotordrehwellen
ν	Ordnungszahl für Statorrehwellen
ν_μ	Ordnungszahl für sekundäre Systeme
ξ	Wicklungsfaktor
τ_p	Polteilung

Indizes

1	primär, Stator
2	sekundär, Rotor
as	asynchron
g	gemeinsam erzeugt
N	Nutung
sy	synchron (elektrodynamisch)
syR	synchron (Reluktanz)
(μ), (ν)	Ordnung (bei Harmonischen)

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

3. Resultierende Drehfelder im Luftspalt

3.1 Ordnungszahlen und Drehzahlen

der von den Wicklungen unmittelbar erzeugten Drehwellen

Unter «unmittelbar von der Wicklung erzeugt» sind die räumlichen Feldharmonischen zu verstehen, die unter der Annahme ungenuteter, glatter Anker und eines konstanten Ersatzluftspaltes δ'' auftreten. Die Drehwelle der Ordnung 1, Wellenlänge $X_{(1)} = 2 \tau_p$, wird Grundwelle genannt.

Die Primärwicklung befindet sich im Stator, sie führe sinusförmigen Strom der Frequenz f_1 . Beschränkt man sich auf qualitative Aussagen mit Hilfe der Drehfeldtheorie, so sind die von der Statorwicklung mit m_1 Strängen erzeugten Drehwellen hinreichend beschrieben durch:

$$\begin{aligned} \text{Ordnungszahlen} \quad & \nu = m_1 k_1 + 1 \\ \text{mit} \quad & k_1 = 0, \pm 2, \pm 4 \dots \\ \text{Wellenlänge} \quad & X_{(\nu)} = \left| \frac{1}{\nu} \right| 2 \tau_p \\ \text{Drehzahl} \quad & n_{1(\nu)} = \frac{1}{\nu} n_s \\ \text{mit} \quad & n_s = \frac{f_1}{p} \end{aligned} \quad (1)$$

Die Anweisung, für k_1 nur gerade Zahlen einzusetzen, bezieht sich auf Ganzlochwicklungen, bei Halblochwicklungen sind für k_1 auch alle ungeraden Zahlen einzusetzen. Ein Teil dieser Ordnungen kann durch Sehnen (Spulenweite \neq Polteilung) unterdrückt werden, der Wicklungsfaktor der anderen, nämlich der durch $\nu = \frac{N_1}{p} k_N + 1, k_N = \pm 1, \pm 2 \dots$ gekennzeichneten Nutharmonischen, ist nicht beeinflussbar.

Schleifringläufer erzeugen ebenfalls die durch Gl. (1) beschriebenen Drehwellen. Für die Ordnungszahlen μ gilt immer dieselbe Gleichung, unabhängig von der Ordnungszahl ν_μ des den Strom induzierenden primären Drehfeldes. ν_μ ist die Ordnungszahl des von diesem Strom erzeugten sekundären Drehwellensystems. Die Ordnungszahl ν_μ und die Läuferdrehzahl n bestimmen die Frequenz des induzierten Läuferstromes, also die Drehzahlen der sekundären Drehwellen gegen den Läufer. Bei Drehzahlen ist daher doppelte Kennzeichnung – Ordnungszahl der betrachteten Drehwelle und der sie erzeugenden primären – notwendig. Die Drehzahl der sekundären Drehwellen im Raum erhält man durch Addition der Rotordrehzahl zur Drehzahl gegen den Rotor. n ist positiv zu zählen, wenn sich der Rotor in Grundfeld-Drehrichtung dreht. Daraus ergeben sich folgende Angaben für die von einem Schleifringrotor als Sekundärwicklung erzeugten Drehwellen:

$$\begin{aligned} \text{Ordnungszahlen} \quad & \mu = m_2 k_2 + 1 \\ \text{mit} \quad & k_2 = 0, \pm 2, \pm 4 \dots \\ \text{Wellenlänge} \quad & X_{(\mu)} = \left| \frac{1}{\mu} \right| 2 \tau_p \\ \text{Drehzahl} \quad & n_{2(\mu, \nu)} = \frac{1}{\mu} (n_s - \nu_\mu n) + n \\ \text{mit} \quad & n_s = \frac{f_1}{p} \\ \text{ausser bei} \quad & n = \frac{1}{\nu_\mu} n_s \end{aligned} \quad (2)$$

Die Einschränkung «ausser bei» schliesst Synchronismus mit der jeweiligen Ordnung ν_μ aus, da hierbei diese Induktions-

welle nicht im Rotor induziert. Bezüglich Sehnung gilt dasselbe wie bei der Primärwicklung.

Käfigläufer normaler Bauart sind im Prinzip für jede Polpaarzahl als Sekundärteil geeignet, für die die Stabzahl je Polpaar nicht zu klein ist. Bezogen auf die Grundfeld-Wellenlänge $X_{(1)} = 2 \tau_p$ ist der Wicklungsfaktor für alle nicht zu hohen Ordnungen gleich Eins. Ausser einer Drehwelle derselben Wellenlänge wie die induzierende erzeugt eine Käfigwicklung nur Nutharmonische. Damit gilt für die Drehwellen eines Käfigankers mit N_2 untereinander gleichwertigen Nuten:

$$\begin{aligned} \text{Ordnungszahlen} \quad & \mu = \frac{N_2}{p} k_3 + \nu_\mu \\ \text{mit} \quad & k_3 = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \\ \text{Wellenlänge} \quad & X_{(\mu)} = \left| \frac{1}{\mu} \right| 2 \tau_p \\ \text{Drehzahl} \quad & n_{2(\mu, \nu)} = \frac{1}{\mu} (n_s - \nu_\mu n) + n \\ \text{mit} \quad & n_s = \frac{f_1}{p} \\ \text{ausser bei} \quad & n = \frac{1}{\nu_\mu} n_s \end{aligned} \quad (3)$$

Hier hat jede primäre Ordnung ν_μ eine andere Reihe μ von sekundären Ordnungen zur Folge. Synchronismus ist wieder auszuschliessen. Sonderstellungen nehmen die Drehwellen höherer Ordnung $|\nu_\mu|$ ein, deren Wellenlänge oder halbe Wellenlänge ein Vielfaches der Läufernutteilung ist: sie erzeugen kein Drehfeld bzw. zwei zueinander gegenläufige.

Zur weiteren Information über die von Mehrphasenwicklungen unmittelbar erzeugten Drehwellen sei auf das spezielle Schrifttum, z. B. [11...12] und auf die Lehrbücher, z. B. [13...15] verwiesen.

3.2 Graphische Darstellung der Drehzahlen der von den Wicklungen erzeugten Drehfelder

Die Drehzahlen der von den stromführenden Wicklungen erzeugten Drehfelder können sehr übersichtlich graphisch dargestellt werden.

Das Statordrehfeld einer beliebigen Ordnung ν läuft, unabhängig von der Rotordrehzahl, immer mit der Drehzahl

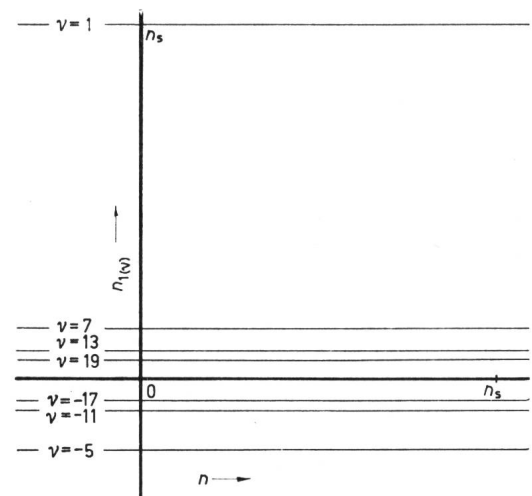


Fig. 1

Drehzahlen $n_{1(\nu)} = f(n)$ der von einem dreiphasigen Stator erzeugten Drehwellen nach Gl. (1)

$$\begin{aligned} \nu &= m_1 k_1 + 1, \quad k_1 = 0; \pm 2; \pm 4; \pm 6 \dots \\ \nu &= 1; \nu = -5; \nu = 7; \nu = -11; \nu = 13; \nu = -17; \nu = 19 \dots \\ n & \text{ Rotordrehzahl; } n_s \text{ synchrone Drehzahl} \end{aligned}$$

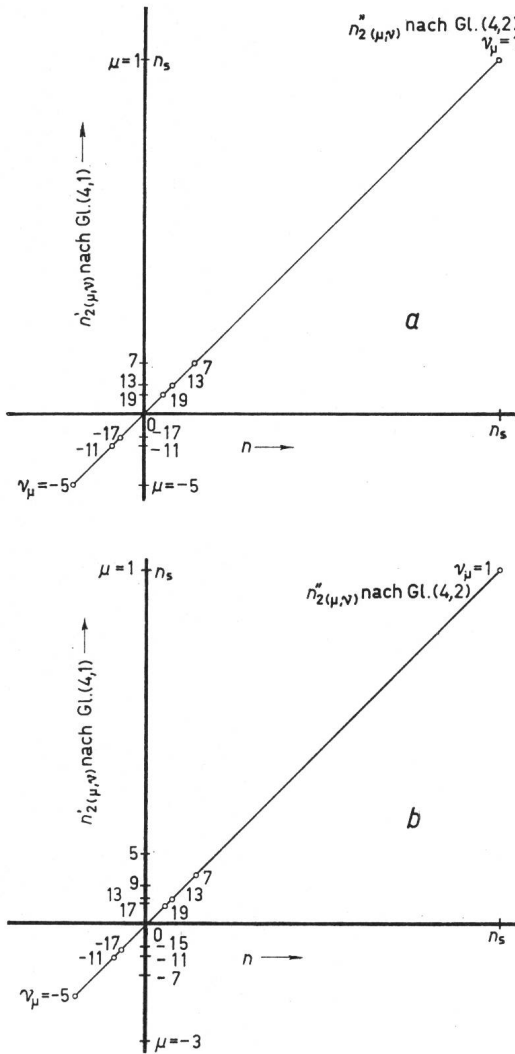
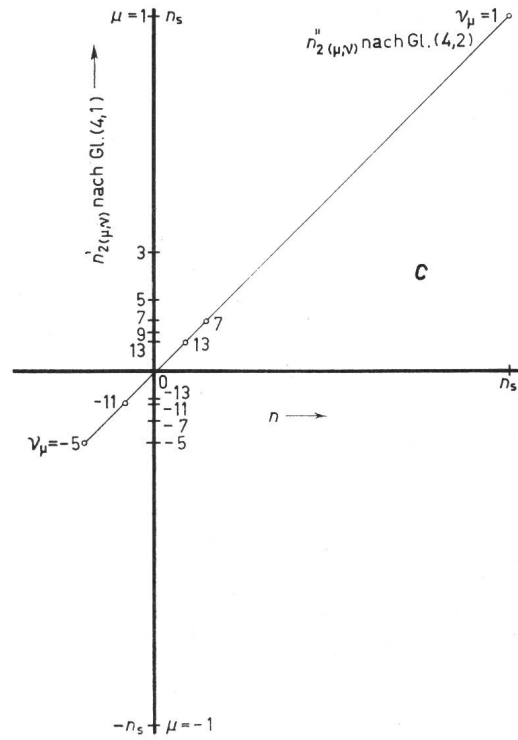


Fig. 2

Drehzahlen $n'_{2(\mu, \nu)}$ und $n''_{2(\mu, \nu)}$ nach Gl. (4) für die bei einem dreiphasigen Stator entstehenden sekundären Drehwellen
 $n'_{2(\mu, \nu)}$, $n''_{2(\mu, \nu)}$ spezielle Drehzahlen der Rotordrehwellen, siehe Gl. (4)



a Schleifringrotor mit $m_2 = 3$ Strängen

$$\mu = m_2 k_2 + 1, \quad k_2 = 0; \pm 2; \pm 4; \pm 6 \dots$$

$$\mu = 1; \mu = -5; \mu = 7; \mu = -11; \mu = 13; \mu = -17; \mu = 19 \dots$$

b Schleifringrotor mit $m_2 = 2$ Strängen

$$\mu = m_2 k_2 + 1, \quad k_2 = 0; \pm 2; \pm 4; \pm 6; \pm 8 \dots$$

$$\mu = 1; \mu = -3; \mu = 5; \mu = -7; \mu = 9; \mu = -11; \mu = 13; \mu = -15; \mu = 17 \dots$$

c Käfigläufer mit $\frac{N_2}{p} = 14$ Stäben je Polpaar

$$\mu = \frac{N_2}{p} k_3 + \nu_\mu, \quad k_3 = 0; \pm 1 \dots$$

$\nu_\mu =$	1	-5	7	-11	13	...
$\mu =$	1	-5	7	-11	13	$(k_3 = 0)$
	15*	9; -13*	21*; -7	3; -25*	27*; -1	$(k_3 = 1; -1)$
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

* nicht eingezeichnet

$n_{1(\nu)} = \frac{1}{\nu} n_s$ um [siehe Gl. (1)]. In der Darstellung $n_{1(\nu)} = f(n)$ ist das eine in der Höhe $\frac{1}{\nu} n_s$ verlaufende Parallele zur Abszisse (siehe die für $m_1 = 3$ gezeichnete Fig. 1).

Für die Drehzahlen der von einem Schleifring- oder Käfigläufer erzeugten sekundären Drehfelder gilt nach Gl. (2) bzw. (3):

$$n_{2(\mu, \nu)} = \frac{1}{\mu} (n_s - \nu_\mu n) + n = \frac{1}{\mu} n_s + \left(1 - \frac{\nu_\mu}{\mu}\right) n$$

Dies sind Gerade, die für alle erzeugenden primären Ordnungen ν und für alle sekundären Ordnungen μ durch zwei Gruppen von Punkten gekennzeichnet sind:

unabhängig von ν_μ ist bei

$$n = 0: \quad n'_{2(\mu, \nu)} = \frac{1}{\mu} n_s \quad (4.1)$$

unabhängig von μ gilt für die von allen Ordnungen ν erzeugten Drehwellen bei

$$n = \frac{1}{\nu_\mu} n_s: \quad n''_{2(\mu, \nu)} = \frac{1}{\nu_\mu} n_s \quad (4.2)$$

Fig. 2 zeigt die beiden Gruppen von Punkten nach Gl. (4) bei einem Stator mit $m_1 = 3$ Strängen für verschiedene gebräuchliche Ausführungen des Rotors. Die Bilder sind als Schema zu verstehen: für jede erzeugende Ordnung ν gibt es für die Drehzahlen $n_{2(\mu, \nu)} = f(n)$ ein Strahlenbüschel. Der Pol liegt – abhängig von der Ordnungszahl ν_μ der primären Drehwelle – in dem durch Gl. (4.2) bestimmten Punkt. Die Ordinate wird – abhängig von den Ordnungszahlen μ der möglichen sekundären Drehwellen – an den durch Gl. (4.1) bestimmten Punkten geschnitten.

Fig. 3 zeigt als Beispiel die für Drehfelder grösserer Wellenlänge vervollständigten Fig. 2a und 2c der Drehzahlen $n_{2(\mu, \nu)} = f(n)$ und $n_{1(\nu)} = f(n)$. Synchronismus der Drehwellen gleicher Wellenlänge bei allen Drehzahlen tritt nur für $\mu = \nu_\mu$ auf, nur diese Gerade $n_{2(\mu, \nu)} = f(n)$ ist eine Parallele zur Abszisse. Beim Aufzeichnen sind die Regeln für die Ordnungszahlen μ zu beachten: Die Ordnungszahlen μ der von Schleifringwicklungen erzeugten Drehwellen sind für alle primären Ordnungen ν gleich, von jedem Pol nach Gl. (4.2) gehen Strahlen durch alle Punkte nach Gl. (4.1) auf der Ordinate. Ist die Statorwicklung geseht, so existieren die den unter-

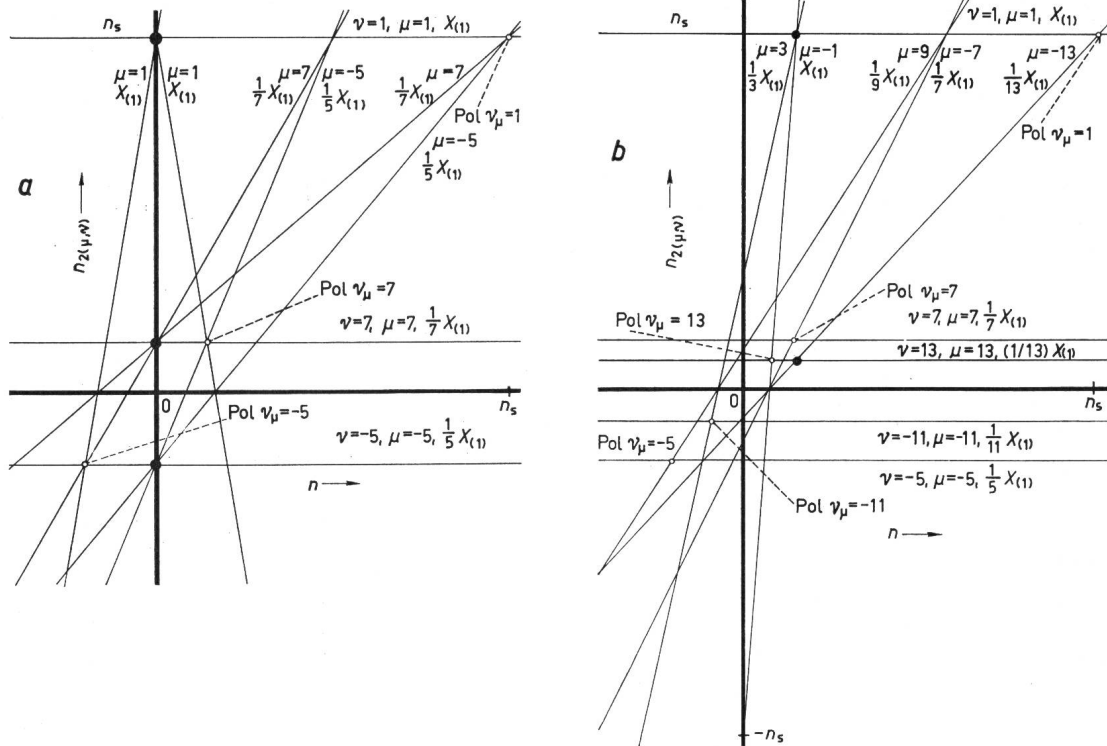


Fig. 3
Drehzahlen $n_{1(\nu)} = f(n)$ und $n_{2(\mu, \nu)} = f(n)$ der Drehfelder
größerer Wellenlänge

a Schleifringrotor, $m_1 = 3, m_2 = 3$; (vgl. Fig. 2a); b Käfigrotor, $m_1 = 3, \frac{N_2}{p} = 14$; (vgl. Fig. 2c)

- Pol nach Gl. (4.2)
- Schnittpunkt nach Gl. (5)

drückten Ordnungen ν entsprechenden Pole nicht, ist die Rotorwicklung gesehen, so entfallen die den unterdrückten Ordnungen μ entsprechenden Punkte auf der Ordinate. Die Ordnungszahlen μ der von Käfigwicklungen erzeugten Drehwellen hängen von der Ordnungszahl ν_μ der betrachteten primären Drehwelle ab, von einem bestimmten Pol gehen nur Strahlen durch die nach Gl. (3) zugehörigen Punkte auf der Ordinate.

3.3 Addition der von den Wicklungen erzeugten Drehfelder

Erzeugen Statorwicklung und Rotorwicklung Drehwellen gleicher Wellenlänge, die mit gleicher Drehzahl umlaufen, so sind die beiden fiktiven Drehfelder dieser Wellenlänge zum gemeinsam erzeugten zu überlagern. Die Bedingungen, welche Drehfelder zu einem von beiden Wicklungen gemeinsam erzeugten Drehfeld zusammenzufassen sind, lauten also:

$$\begin{aligned} \text{gleiche Wellenlänge, d. h.} \quad & |\mu| = |\nu| \\ \text{gleiche Drehzahl, d. h.} \quad & n_{2(\mu, \nu)} = n_{1(\nu)} \end{aligned} \quad (5)$$

Darin ist μ eine bestimmte Ordnungszahl nach Gl. (2) oder (3) und ν die ihr dem Betrag nach gleiche Ordnungszahl aller nach Gl. (1) vorhandenen Ordnungen.

Fig. 4 zeigt schematisch die Entstehung und das Zusammenwirken der von den Wicklungen erzeugten Drehwellen. Die Bedingungen, unter denen ein bestimmter Zweig oder Block gilt, sind eingetragen. Die demnach im Luftspalt vorhandenen Induktionswellen sind hervorgehoben. Gemeinsam erzeugte Induktionswellen sind mit der Ordnungszahl ν der beteiligten primären Drehwelle gekennzeichnet. Die Figur kann durch die unter 3.4 behandelten Drehfelder anderer Herkunft und in bezug auf Oberschwingungen des Primärstromes ergänzt wer-

den. Bei der Programmierung nach diesem Strukturbild wird man zweckmässig auch die Statorstromharmonischen berechnen, die von den nicht mit primären Drehfeldern überlagerten Rotordrehfeldern induziert werden, sie aber in der weiteren Rechnung nur berücksichtigen, wenn sie eine festgelegte untere Grenze überschreiten.

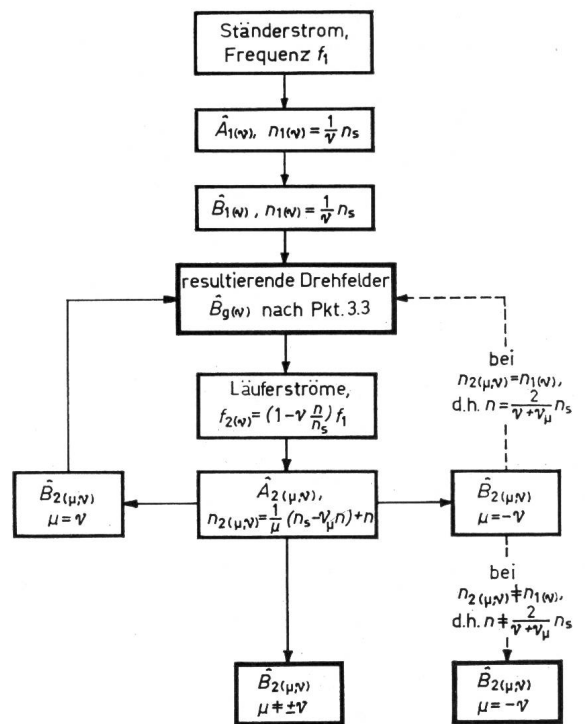


Fig. 4
Entstehen und Überlagerung der von den Wicklungen erzeugten Drehwellen

3.4 Drehfelder anderer Herkunft

Die bisherigen Ableitungen erfolgten unter etwas vereinfachenden Annahmen, deren Auswirkungen zu diskutieren sind bzw. Ergänzungen oder Korrekturen erfordern.

a) Die Nutdurchflutung ist entsprechend der räumlichen Ausdehnung der Ankerleiter nicht ein unendlich schmaler und hoher Impuls. In guter Näherung an die wirklichen Verhältnisse kann die Nutdurchflutung als über die Nutöffnung gleichmässig verteilter Strombelag angenommen werden. Statt der Sprünge in der am Luftspalt anliegenden magnetischen Spannung ergeben sich dann steile Anstiege. Die harmonische Analyse ergibt, dass sich der Wicklungsfaktor für die niedrigeren Ordnungen praktisch nicht ändert, für die Nutharmonischen etwas, siehe z. B. [13]. Die Formeln für die erzeugten Ordnungszahlen gelten unverändert.

b) Praktisch sind die Nuten immer offen, entweder tatsächlich oder magnetisch, da der schliessende Steg durch die von der Nutdurchflutung erzeugte Querinduktion stark gesättigt ist. Das radial verlaufende Luftspaltfeld hat deswegen über jeder Nut eine starke Einsattelung, deren mittlere Auswirkung auf das Grundfeld durch den Carterschen Faktor berücksichtigt wird. Bei Einsatz eines Digitalrechners ist die Berechnung der radialen Induktionsverteilung im Luftspalt aufgrund der magnetischen Spannung zwischen den Stator- und Rotorzähnen und eines schematisierten Verlaufes der Induktionslinien von Zahn zu Zahn möglich, siehe z. B. [10]. Ein anderer Weg zur Berechnung der so erzeugten Induktionswellen ist: Annahmen über den Verlauf des örtlichen radialen magnetischen Leitwertes machen und so die Rechnung für jedes resultierende Drehfeld durchführen. In [16] wird ein Verfahren zur Bestimmung und phasenrichtigen Addition dieser Felder beschrieben. Auch die Arbeiten [6...8] behandeln diese Frage.

c) Aufgrund des nichtlinearen Zusammenhangs $B = f(H)$ für die im Eisen verlaufenden Abschnitte des magnetischen Schliessungskreises werden die Drehwellen nach 3.3 verzerrt. Die so zusätzlich entstehenden Drehwellen laufen mit der sie erzeugenden synchron um. Näherungsverfahren zur Bestimmung der auf diese Weise vom Grundwellen-Hauptfeld erzeugten Drehfelder der Ordnungen 3 und 5 sind einfach und werden bei der Vorausberechnung von Asynchronmaschinen angewandt, siehe z. B. [15].

d) Insbesondere bei kleineren und mittleren Maschinen werden die Rotornuten im allgemeinen achsial geschrägt, um Drehmomentsättel im Hochlaufbereich zu verringern. In erster Näherung ist dann mit verkleinerter Hauptfeldreaktanz und etwas grösserer Streufeldreaktanz zu rechnen [15]. Bei unisolierten Käfigläufern tritt bei Nutenschrägung Querstrom von Stab zu Stab im Eisen auf, der einen merklichen Einfluss auf die Drehmomentkurve und die Verluste im Rotor haben kann. In [9] wird zur Erfassung der Nutschrägung und ihrer Folgen ein komplexer Schrägungsfaktor eingeführt und gleichmässig verteilte elektrische Leitfähigkeit von Stab zu Stab angenommen. Das etwas vereinfachte und dadurch wesentlich übersichtlichere Verfahren [17] nimmt zur Erfassung der Querströme zusätzliche Kurzschlussringe an.

4. Im Luftspalt erzeugtes Drehmoment

Die am Luftspalt elektromagnetisch erzeugte Umfangskraft erhält man durch Integration der örtlichen Umfangskraft.

Diese ist proportional dem Produkt aus der Radialkomponente der Luftspaltinduktion und der Achsialkomponente des Strombelages.

Führt man die Integration formell durch und lässt die Umfangskraft als Kräftepaar am Hebelarm $D_i/2$ angreifen, so lautet das Ergebnis für das auf den Stator wirkende innere Drehmoment:

$$M_{i(v)} = \frac{D_i}{2} 2p \tau_p l_1 \frac{1}{2} \hat{B}_{g(v)} \hat{A}_{1(v)} \cos \beta_v \quad (6)$$

Darin bedeutet β_v die in rad. el. ausgedrückte Verschiebung Δx_v der Strombelagswelle des Ständers gegen die von beiden Wicklungen gemeinsam erzeugte Induktionswelle gleicher Wellenlänge ($\Delta x_v = \frac{\tau_p}{v} \triangleq \beta_v = \pi$). Auch Induktionswellen $\hat{B}_{2(\mu, v)}$, die nach Fig. 4 nicht mit Stator Drehwellen $\hat{B}_{1(v)}$ überlagert werden, sind in diesem Sinne gemeinsam erzeugte Drehfelder und erzeugen mit einem Statorstrombelag gleicher Wellenlänge Umfangskraft und Drehmoment. Induktionswellen $\hat{B}_{2(\mu, v)}$, deren Wellenlänge $\frac{1}{\mu} X_{(1)}$ nur mit der sie erzeugenden Strombelagswelle des Rotors übereinstimmt, erzeugen kein Drehmoment, da Strombelags- und Induktionswelle um $1/4$ Wellenlänge gegeneinander verschoben sind.

Die Wirkungsrichtung positiven Drehmomentes hängt von der für die Amplituden \hat{B} und \hat{A} eingeführten Zählweise ab. Das auf den Rotor ausgeübte Drehmoment ist negativ gleich dem auf den Stator wirkenden. Bei zeitlich konstanten Drehwellen (stationärer Lastfall) hängt $M_{i(v)}$ lediglich vom Verschiebungswinkel β_v ab. Ist β_v konstant, so ist das innere Drehmoment konstant, ändert sich β_v gleichmässig, so schwingt das von diesen Drehwellen erzeugte Drehmoment, der zeitliche Mittelwert ist dann Null. Induktions- und Strombelagswellen verschiedener Ordnungszahl, d. h. verschiedener Wellenlänge, erzeugen nur örtliche Umfangskraft, deren Integral über die Fläche eines Polpaares Null ist. Das gesamte innere Drehmoment erhält man durch Summation über alle Ordnungen v .

4.1 Asynchrone Drehmomente

Sind die Ordnungszahlen μ und ν nach Betrag und Vorzeichen gleich, so laufen diese Drehwellen gleicher Wellenlänge bei jeder Drehzahl mit einem konstanten, drehzahl-abhängigen Abstand mit $\frac{n_s}{\nu} = \frac{n_s}{\mu}$ um. Dementsprechend erzeugen diese Drehwellen bei allen Drehzahlen ein zeitlich konstantes Drehmoment, dessen Betrag und Richtung von der Drehzahl n der Maschine abhängen. Bei der Drehzahl

$$n_{s(v)as} = \frac{1}{\nu} n_s \quad (7)$$

(asynchron, $\mu = \nu$)

laufen das induzierende Feld der Ordnung ν und der Rotor synchron, bei dieser Drehzahl entsteht kein asynchrones Drehmoment dieser Ordnung. In der graphischen Darstellung der Drehzahlen $n_{1(v)} = f(n)$ und $n_{2(\mu, v)} = f(n)$ (Fig. 3) erscheint $n_{s(v)as}$ als Höhe der nach ν und μ gekennzeichneten Parallelen zur Abszisse.

Fig. 5 zeigt schematisch die Kennlinien

$$M_{i(v)as} = f(n)$$

und

$$M_{ias} = \Sigma M_{i(v)as} = f(n)$$

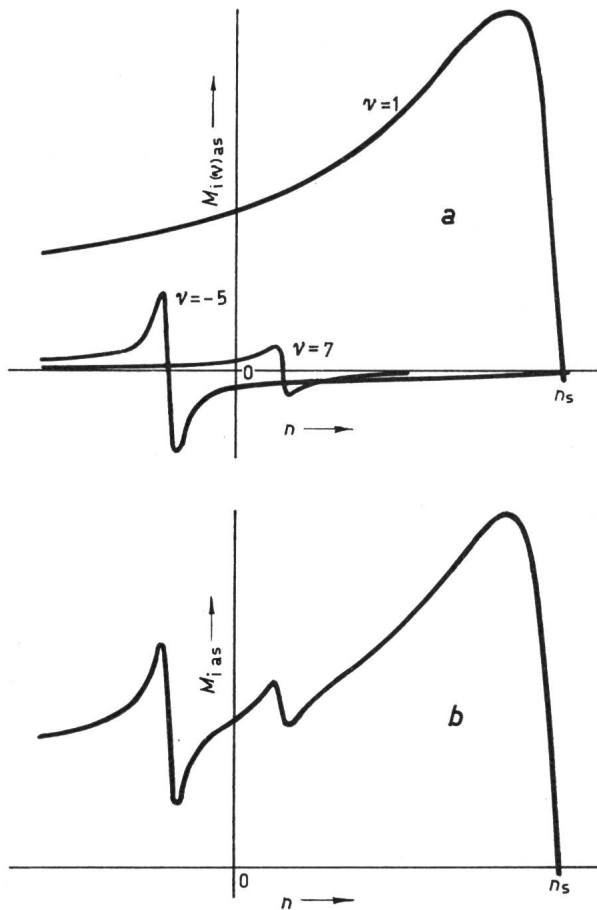


Fig. 5

Asynchrones Drehmoment als Funktion der Drehzahl
 (Schleifringrotor, $m_1 = m_2 = 3$; schematisch)
 a Teildrehmomente $M_{i(v)as} = f(n)$
 b asynchrones Drehmoment $M_{ias} = f(n)$
 n Rotordrehzahl; n_s synchrone Drehzahl

für die bei einer dreiphasigen Maschine mit ungesehnten Wicklungen auftretenden Ordnungen $\nu = 1; -5; 7$.

4.2 Synchrone Drehmomente

Sind die Ordnungszahlen μ und ν eines Drehfeldes im Luftspalt und einer Strombelagswelle negativ gleich, so erzeugen sie bei einer bestimmten Drehzahl ein zeitlich konstantes Drehmoment. Der Betrag und die Richtung dieses inneren synchronen Drehmomentes hängen von der Grösse und der örtlichen Verschiebung der Drehwellen ab, also von der Lage des Rotors. Für die Drehzahl, bei der diese «Synchronmaschine» wirksam wird, ist nach Gl. (1) und Gl. (2) oder (3) $n_{1(\nu)} = n_{2(\mu)}$ zu setzen. Das ergibt:

$$n_{s(\nu)sy} = \frac{2}{\nu + \nu_\mu} n_s \quad (8)$$

(synchron, $\mu = -\nu$)

Darin ist ν die Ordnungszahl der beteiligten primären Drehwelle, ν_μ die bei Gl. (2) eingeführte Ordnungszahl des sekundären Systems, dem die beteiligte sekundäre Drehwelle zugehört.

In der Kennlinie $M_i = f(n)$ ist ein so erzeugtes Drehmoment nur als $M_{i(\nu)sy}$ -Strecke bei $n = n_{s(\nu)sy}$ darstellbar (Fig. 6). Weicht die Rotordrehzahl n von der Drehzahl $n_{s(\nu)sy}$ ab, so ändert sich die räumliche Lage der die Umfangskraft erzeugenden Drehwellen ständig, und dieses innere Drehmoment

wirkt als Pendelmoment, das den Rotor zu Drehschwingungen anregt. Infolge der mechanischen Pufferung durch das Schwungmoment des Läufers kann diese Pendelung nur bei $n \approx n_{s(\nu)sy}$ beobachtet werden. In der graphischen Darstellung der Drehzahlen der Drehfelder erscheint Synchronismus bei nur einer Drehzahl als Schnittpunkt zweier Linien $n_{1(\nu)} = f(n)$ und $n_{2(\mu, \nu)} = f(n)$ von Drehwellen gleicher Wellenlänge (Fig. 3).

Ausserdem erzeugen Asynchronmaschinen bei der Drehzahl, bei der eine langwellige tangential-radiale magnetische Leitfähigkeitswelle am Luftspalt synchron mit dem Grundwellendrehfeld umläuft, synchrones Drehmoment. Für diese Drehzahl gilt:

$$n_{syr} = \frac{N_2 - N_1}{N_2} n_s \quad (9)$$

Ein unbewickelter Läufer entspricht bei dieser Drehzahl in seiner magnetischen Wirkung etwa dem unerregten Polrad einer Schenkelpolmaschine. Beim bewickelten Läufer wird der radiale Effekt verstärkt durch die tangentialen Streuflüsse am Luftspalt. Die Grösse des Kippmomentes kann durch Schrägung bzw. Staffellung des Läufers beeinflusst werden. Daneben hängt sie von der magnetisch wirksamen Breite der Nutöffnungen und der Differenz der Nutenzahlen je Polteilung ab.

5. Zusammenfassung

Fig. 7 zeigt als Blockscheema die Entstehung und Berechnung der elektrodynamischen Drehmomente $M_{i(\nu)as}$ und $M_{i(\nu)sy}$, die bei Gleichlauf von Induktions- und Strombelagswellen gleicher Wellenlänge zeitlich konstant auf den Stator wirken. Das auf den Rotor wirkende Drehmoment ist negativ gleich dem auf den Stator ausgeübten. Bei der Durchführung der Berechnung der Drehwellen nach Fig. 4 bzw. ihrer Berücksichtigung bei der Berechnung nach Fig. 7 sind sinnvolle untere Grenzen einzuhalten. Die erste Beurteilung, welche Drehwellen für das Betriebsverhalten der Maschine massgebend sind, ist nach folgendem Schema durchzuführen: Betrag der Ordnungszahl und der in die Gleichung für die Ordnungszahl einzusetzenden Zahl k (klein \rightarrow ja), Nutharmonische (ja \rightarrow ja), Betrag des Wicklungsfaktors (gross \rightarrow ja).

Für die praktische, rein überlegungsmässige Anwendung sind noch die drei üblichen Ausführungsformen einfach ge-

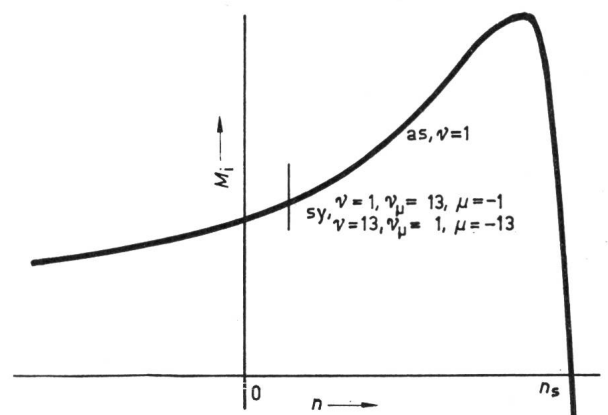


Fig. 6

Asynchrones Grundwellen-Drehmoment (as) und bei $n_{sy} = \frac{1}{7} n_s$ auftretende synchrone Drehmomente (sy)

(Käfigrotor, $m_1 = 3$, $\frac{N_2}{p} = 14$; schematisch)

M_i inneres Drehmoment; n Rotordrehzahl; n_s synchrone Drehzahl

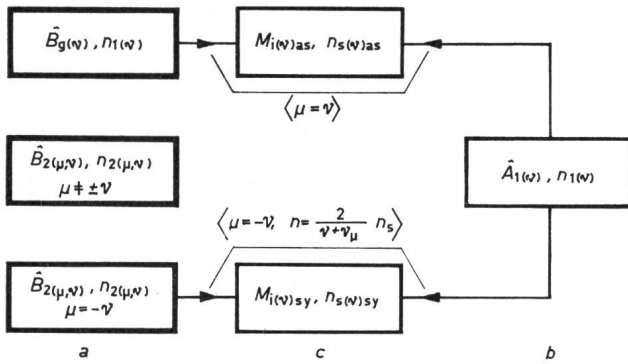


Fig. 7

Schema der zeitlich konstanten, auf den Stator wirkenden elektrodynamischen Drehmomente

a Induktionswellen im Luftspalt nach Fig. 4; b Strombelagwellen des Stators; c Drehmoment und $\langle \text{Bedingung} \rangle$

speister Induktionsmaschinen mit symmetrischem Stator und Rotor nach Fig. 2 und 3 zu diskutieren. Es sind dies:

a) Schleifringrotor mit Rotorstrangzahl $m_2 = m_1$. Für die Ordnungszahlen ν und μ gilt dieselbe Gleichung. Bei $n \neq 0$ werden nur asynchrone Drehmomente nach 4.1 erzeugt, die durch (unterschiedliche) Sehnung der Stator- und der Rotorwicklung fast vollständig unterdrückt werden können. Bei Stillstand laufen alle Drehwellen gleicher Wellenlänge synchron und erzeugen synchrone Drehmomente nach 4.2.

b) Schleifringrotor mit Rotorstrangzahl $m_2 \neq m_1$. Da für die Ordnungszahlen ν und μ verschiedene Gleichungen gelten und die Drehwellen gleicher Wellenlänge teils mit gleicher, teils mit negativ gleicher Ordnungszahl auftreten, werden asynchrone und bei verschiedenen Drehzahlen wirksame synchrone Drehmomente erzeugt. Sie können weitgehend durch (unterschiedliche) Sehnung der Stator- und der Rotorwicklung unterdrückt werden.

c) Käfigläufer mit N_2/p Stäben pro Polpaar. Ausser den vom Stator erzeugten Ordnungen, die unmittelbar asynchrone Drehmomente hervorrufen, da für sie der Wicklungsfaktor $\xi_{2(\nu)} = 1$ ist, entstehen mittelbar über die Nutharmonischen der Rotorwicklung auch synchrone Drehmomente bei verschiedenen Drehzahlen. Sie können durch Sehnung der Stator-

wicklung und durch Staffeln oder Schrägen der Rotorstäbe verringert oder unterdrückt werden. Bei Nutenschränkung treten jedoch parasitäre Querströme (tangential) im Blechpaket auf, die die Drehmomentkennlinie beeinflussen.

Ausser diesen elektrodynamisch nach der Drehfeldtheorie erzeugten Komponenten des gesamten inneren Drehmomentes entsteht insbesondere bei der Drehzahl n_{sy} nach Gl. (9) synchrone Drehmoment.

Literatur

- [1] K. Oberretl: Neue Erkenntnisse über parasitäre Drehmomente in Käfigläufermotoren. Bull. Oerlikon -(1962)348, S. 130...155.
- [2] K. Oberretl: Die Oberfeldtheorie des Käfigmotors unter Berücksichtigung der durch die Ankerrückwirkung verursachten Statoroberströme und der parallelen Wicklungszweige. Arch. Elektrotechn. 49(1965), S. 343...364.
- [3] H. Weh und J. Meyer: Die direkte Berechnung von Strom und Drehmoment bei Asynchronmaschinen. ETZ-A 87(1966), S. 504...514.
- [4] F. Taegen: Über die Oberfeldmomente von Drehstrom-Asynchronmotoren mit Käfigläufern. Diss. Technische Hochschule Hannover, 1961.
- [5] R. Wepler: Die Berechnung der Spaltstreuung bei Kurzschlussläufermotoren mit Berücksichtigung der Eisensättigung. Diss. Technische Hochschule Hannover, 1962.
- [6] B. Heller: Das Luftspaltfeld der magnetomotorischen Kräfte bei Berücksichtigung der Nutung im Asynchronmotor. Acta Technica ČSAV 9(1964), S. 414...431.
- [7] B. Heller: Der Einfluss der Nutung auf den Drehmomentverlauf des Käfigläufermotors. Acta Technica ČSAV 9(1964), S. 517...541.
- [8] F. Taegen: Die Bedeutung der Läufernutenschlitze für die Theorie der Asynchronmaschine mit Käfigläufer. Arch. Elektrotechn. 48(1964), S. 373...386.
- [9] R. Wepler: Ein Beitrag zur Berechnung von Asynchronmotoren mit nichtisoliertem Läuferkäfig. Arch. Elektrotechn. 50(1966), S. 238...252.
- [10] E. Beier: Die Vorausberechnung der Betriebskennlinien der Asynchronmaschine unter Berücksichtigung der Eisensättigung. Diss. Technische Hochschule München, 1964.
- [11] E. Tüxen: Das Oberwellenverhalten mehrphasiger Wechselstromwicklungen. Jahrbuch der AEG-Forschung 8(1941), S. 78...105.
- [12] H. Jordan und E. Tüxen: Die Analyse unsymmetrischer Drehstromwicklungen. Jahrbuch der AEG-Forschung 8(1941), S. 106...119.
- [13] H. Sequenz: Die Wicklungen elektrischer Maschinen. 1. Band: Wechselstrom-Ankerwicklungen. Wien, Springer, 1950.
- [14] R. Richter: Lehrbuch der Wicklungen elektrischer Maschinen. Karlsruhe, Braun, 1952.
- [15] R. Richter: Elektrische Maschinen. 4. Band: Die Induktionsmaschinen. 2. Auflage, Basel/Stuttgart, Birkhäuser, 1954.
- [16] H. W. Boller und H. Jordan: Über die phasenrichtige Addition der nutharmonischen Wicklungsoberfelder und der Nutungsoberfelder bei phasenreinen Mehrphasenwicklungen. ETZ-A 84(1963)7, S. 235...238.
- [17] H. Jordan und M. Weis: Nutenschränkung und ihre Wirkungen. ETZ-A 88(1967), S. 528...533.

Adresse der Autoren:

Dr.-Ing. E. Riccius, Nordendstrasse 28, D-8 München 13, und Dipl.-Ing. W. Seiler, Haydnstrasse 12, D-5803 Volmarstein.