1
Wicklungen rotierender elektrischer Maschinen

Die prinzipielle Wirkungsweise einer elektrischen Maschine beruht auf Wechselwirkungen zwischen magnetischen Feldern und Wicklungen. Dabei bestimmen Konfiguration und Art des magnetischen Felds, Anordnung und Schaltung der Wicklungen sowie die an ihren Klemmen wirkenden elektrischen Größen im Wesentlichen das Betriebsverhalten und damit die Maschinenart. Im Hinblick auf die Aufgaben, die die Wicklungen im Wirkungsmechanismus der elektrischen Maschine zu erfüllen haben, unterscheidet man

– Wicklungen, die über die Deckung der Verluste hinausgehend am Energieumsatz beteiligt sind wie z. B.
  - Ankerwicklungen von Gleichstrommaschinen, Einphasen-Reihenschlussmaschinen und Drehstrom-Kommutatormaschinen
  - Ankerwicklungen von Synchronmaschinen
  - Dämpferwicklungen von Synchronmaschinen im asynchronen Betrieb
  - Ständer- und Läuferwicklungen von Induktionsmaschinen
– Wicklungen, die abgesehen von der Deckung der Verluste nicht am Energieumsatz beteiligt sind wie z. B.
  - Erregerwicklungen
  - Wendepolwicklungen
  - Kompensationswicklungen
  - Dämpferwicklungen von Synchronmaschinen im synchronen Betrieb.

Ankerwicklungen sind Wicklungen, in denen die zum Energieumsatz erforderliche Spannung induziert wird. *Erregerwicklungen* erzeugen das zum Energieumsatz notwendige magnetische Feld, wenn dieses nicht, wie bei der Induktionsmaschine, bereits durch eine am Energieumsatz beteiligte Wicklung erregt wird. *Wendepolwicklungen* und *Kompensationswicklungen* sind Wicklungen, die Hilfsfelder zur Beeinflussung der Betriebseigenschaften einer Maschine erzeugen. Eine Sonderstellung nehmen die *Dämpferwicklungen* von Synchronmaschinen ein. Sie bewirken in erster Linie die Dämpfung unerwünschter Erscheinungen wie gegenlaufender Drehfelder und Pendelungen. Im Asynchronbetrieb jedoch wirken sie wie die

Läuferwicklungen von Induktionsmaschinen. Im Hinblick auf die geometrische Anordnung und die innere Schaltung unterteilt man die wichtigsten Wicklungen in:
- Wicklungen mit ausgebildeten Strängen
- Kommutatorwicklungen
- Wicklungen auf ausgeprägten Polen.

Die große Gruppe der sog. Wechselstromwicklungen wird durch Wicklungen gebildet, bei denen die in Nuten verteilten Einzelspulen zu einem oder mehreren Strängen zusammengeschaltet sind. In Nuten verteilte Wicklungen werden aber auch, z. B. bei Vollpol-Synchronmaschinen, als Erregerwicklungen ausgeführt. Bei Kommutatorwicklungen sind die in Nuten verteilten Einzelspulen zu einem oder mehreren in sich geschlossenen Kreisen zusammengeschaltet und mit einem Kommutator verbunden. Sie treten ausschließlich als Ankerwicklungen in Gleichstrommaschinen, in Einphasen-Reihenschlussmaschinen und in Drehstrom-Kommutatormaschinen auf. Wicklungen auf ausgeprägten Polen sind normalerweise konzentriert ausgeführte Erregerwicklungen. Eine Sonderstellung nehmen die sog. Zahnspulenwicklungen ein, deren Spulen jeweils nur einen Zahn umfassen und die deshalb den Polspulen ähneln (s. Bild 1.1.2); da die Spulen jedoch immer zu – i. Allg. mehreren – Strängen zusammengeschaltet sind und mit Wechselstrom gespeist werden, gehören sie ebenfalls zur Gruppe der Wechselstromwicklungen.

Im ersten Kapitel werden die Kennzeichen und Gesetze sowie der Entwurf und die Dimensionierung der genannten Wicklungsarten behandelt. Dabei führen die besonderen Kennzeichen einer Wicklung i. Allg. zu spezielleren Wicklungsbezeichnungen. Unter dem Entwurf einer Wicklung ist die Zuordnung der in den einzelnen Nuten der elektrischen Maschine liegenden Wicklungsteile von Wicklungen mit ausgebildeten Strängen und Kommutatorwicklungen zu den Wicklungssträngen bzw. Wicklungszweigen zu verstehen. Das hat unter Beachtung der geltenden Wicklungsgesetze zu geschehen. Die Dimensionierung einer Wicklung besteht vor allem in der Ermittlung der zum gewünschten Energieumsatz notwendigen Windungszahl sowie der Aufteilung der Wicklung in parallele Zweige und einzelne Spulen, was ebenfalls den geltenden Wicklungsgesetzen Rechnung tragen muss. Im weiteren Sinne gehören zur Dimensionierung auch die Bestimmung der Leiterabmessungen und die Gestaltung der Isolierung.

1.1 Allgemeine Bezeichnungen und Gesetzmäßigkeiten

Wie aus der Einleitung unschwer zu ersehen ist, nehmen im Hinblick auf den Wicklungsentwurf und die Wicklungsdimensionierung die Wicklungen mit ausgebildeten Strängen und die Kommutatorwicklungen eine Sonderstellung ein. Das beruht auf der großen Vielfalt dieser Wicklungen. Unabhängig von der Wicklungsart gibt es eine Anzahl von Bezeichnungen und Gesetzen, die allen über die Verlustdeckung hinausgehend am Energieumsatz beteiligten Wicklungen gemeinsam sind. Sie sollen zunächst behandelt werden.

Die Darstellung der räumlichen Verhältnisse in rotierenden elektrischen Maschinen kann wie im Band *Grundlagen elektrischer Maschinen* mit Hilfe der in Umfangsrichtung konzentrisch auf dem Bohrungsdurchmesser D verlaufenden *Längenkoordinate* x erfolgen. Häufig ist aber die Verwendung von *Polarkoordinaten* vorteilhaft.

Zwischen der Längenkoordinate x in Umfangsrichtung und der *Winkelkoordinate* γ' besteht der Zusammenhang

$$\gamma' = \frac{2x}{D}. \tag{1.1.1}$$

Im Band *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschnitt 1.5.2, wird außerdem die *bezogene Winkelkoordinate*

$$\gamma = p\gamma' = \frac{2px}{D} \tag{1.1.2}$$

eingeführt, die im Folgenden ebenfalls, wo sinnvoll, verwendet wird. Winkelangaben im Koordinatensystem γ' werden z. T. auch als *mechanischer Winkel* und Winkelangaben im Koordinatensystem γ als *elektrischer Winkel* bezeichnet.

1.1.1 Allgemeine Bezeichnungen von am Energieumsatz beteiligten Wicklungen

Die wichtigsten Bezeichnungen für diejenigen Wicklungen, die am Energieumsatz über die Deckung der Verluste hinausgehend beteiligt sind, sind im Band *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschnitt 1.4, angegeben. Dort werden auch die Wicklungsgesetze in der für das Verständnis erforderlichen Tiefe behandelt. Einige Angaben zur technischen Ausführung von Wicklungen sind auch bereits im Band *Grundlagen elektrischer Maschinen*, Abschnitt 2.3.1.2, zu finden. Im Hinblick auf eine eingehendere Behandlung von Wicklungen bedürfen die schon genannten Bezeichnungen natürlich einer inhaltlichen Erweiterung und einer Ergänzung durch neue Bezeichnungen. Dabei werden die schon eingeführten Bezeichnungen der Vollständigkeit halber noch einmal erwähnt.

1.1.1.1 Bezeichnung von Wicklungsteilen

Das natürliche Element einer Wicklung ist die *Spule*. Sie besteht aus mehreren unmittelbar neben- und/oder übereinander angeordneten und miteinander in Reihe geschalteten Windungen. Da innerhalb einer Spule kein Knotenpunkt existiert, werden alle Windungen der Spule von demselben Strom durchflossen.

Jede Spule einer in Nuten verteilten Wicklung belegt zwei Nuten des jeweiligen *Hauptelements*, d. h. des Ständers oder des Läufers, vollständig oder teilweise. Die in den beiden Nuten geradlinig verlaufenden Spulenteile heißen *Spulenseiten* und die Verbindungsteile zwischen den Spulenseiten *Spulenköpfe*, *Wicklungsköpfe* oder *Stirnverbindungen*. Mit *Spulenweite* bezeichnet man den Mittenabstand der beiden Spulenseiten, gemessen in Umfangsrichtung (s. Bild 1.1.1).

Die in der Spulenebene liegende Symmetrieachse einer Spule teilt diese in zwei Halbspulen bzw. jede Spulenwindung in zwei Halbwindungen oder *Leiter*. Besteht die Spule nur aus einer Windung, dann nennt man die Halbwindung *Stab*.

Wenn sich mehrere Spulenseiten in einer Nut befinden, dann sind diese meistens in zwei, seltener auch in mehr als zwei *Schichten* übereinander angeordnet. Innerhalb der einzelnen Schichten können auch mehrere Spulenseiten nebeneinanderliegen. Da sich die Spulenköpfe der einzelnen Spulen kreuzen (s. Bild 1.1.1), müssen sie in mehreren *Ebenen* oder *Etagen* aneinander vorbeigeführt werden (s. Bild 1.1.4).

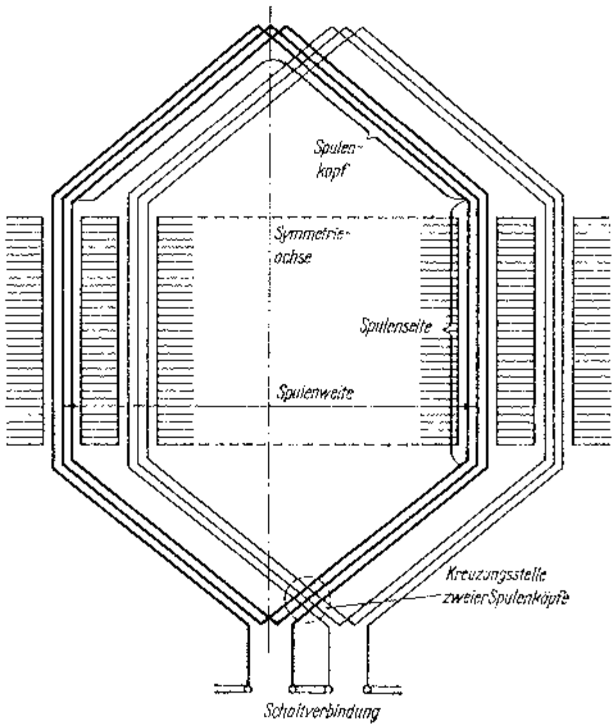


Bild 1.1.1
Bezeichnungen von Wicklungsteilen

Bild 1.1.2 Stirnansicht einer Zahnspulenwicklung
Werkbild Lenze

Eine Ausnahme bilden in dieser Beziehung die sog. *Zahnspulenwicklungen* (s. Bild 1.1.2), bei denen die beiden Seiten einer Spule immer in benachbarten Nuten liegen.

Mittels *Schaltverbindungen* werden die Einzelspulen zur Wicklung zusammengeschaltet. Ein Wicklungsteil, der für die Speisung mit phasengleichen Strömen vorgesehen ist und im Normalfall zwischen zwei Klemmen eines Hauptelements (d. h. des Ständers oder des Läufers einer Maschine) oder zwischen einer Klemme und dem Sternpunkt angeschlossen wird, wird als *Wicklungsstrang* oder kurz *Strang* bezeichnet. In Abgrenzung dazu ist es vielfach üblich, die Zuleitungen eines Mehrphasensystems, die die Stränge mit i. Allg. amplitudengleichen, jedoch zueinander phasenverschobenen elektrischen Größen speisen bzw. von der Maschine (im Fall eines Generators) entsprechend gespeist werden, als *Phasen* zu bezeichnen. Auf die Benutzung dieses in der Literatur oft mehrdeutig verwendeten Begriffs wird im Folgenden bewusst verzichtet.

Die Spulen eines Wicklungsstrangs müssen nicht alle in Reihe geschaltet werden, sondern es ist meist auch möglich, einen Strang mit mehreren parallelgeschalteten *Zweigen* in Reihe geschalteter Spulen auszuführen. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass bereits durch die Wicklungsanordnung eine gleichmäßige und phasengleiche Aufteilung des Stroms auf diese parallelen Zweige gewährleistet ist. Im Sonderfall existieren auch Teilparallelschaltungen (s. [1], Bd. III), bei denen z. B. ein Teil der Spulengruppen zueinander parallel liegen und diesen dann ein anderer Teil der Spulengruppen in Reihe geschaltet wird.

Mit *Spulengruppe* bezeichnet man eine Gruppe unmittelbar nebeneinanderliegender Spulen eines Strangs. Die Spulen einer Spulengruppe sind bei den meist vorliegenden Schleifenwicklungen (s. z. B. Bild 1.1.8) in der Regel direkt in Reihe geschaltet. Den Anteil des Umfangs, den die Spulenseiten eines Strangs im Bereich einer Polteilung einnehmen, nennt man *geometrische Zone* oder *Wicklungszone*.

Die Bezeichnungen der einzelnen Wicklungsteile sind zunächst nur definiert worden. Auf eine ausführliche Erläuterung kann an dieser Stelle verzichtet werden. Sie ergibt sich aus den Ausführungen in den folgenden Abschnitten.

1.1.1.2 Bezeichnung von Wicklungen

Bestimmend für die allgemeine Bezeichnung ganzer Wicklungen sind die Spulenweite, die Spulenwindungszahl, die Zahl der Schichten, die Zahl der Wicklungskopfebenen, die Form und Lage der Wicklungsköpfe, die Führung der Schaltverbindungen und die Herstellungsart der Spulen. Darüber hinaus existieren für die Wicklungen mit ausgebildeten Strängen und für die Kommutatorwicklungen noch

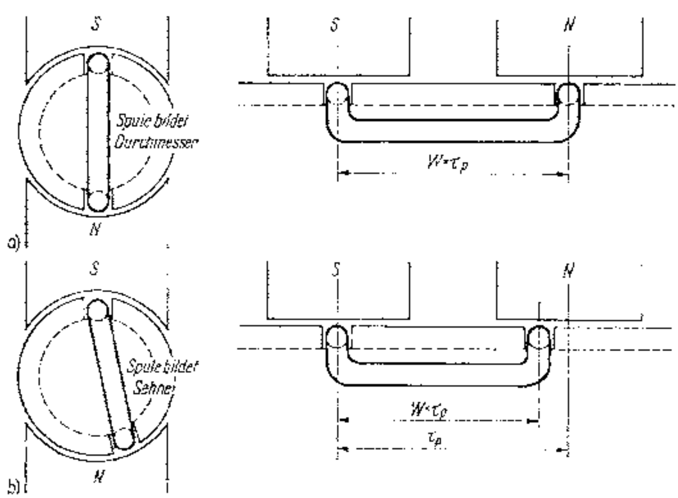


Bild 1.1.3 Bezeichnung einer Wicklung nach der Spulenweite. a) Durchmesserwicklung ($W = \tau_\mathrm{p}$); b) gesehnte Wicklung ($W < \tau_\mathrm{p}$)

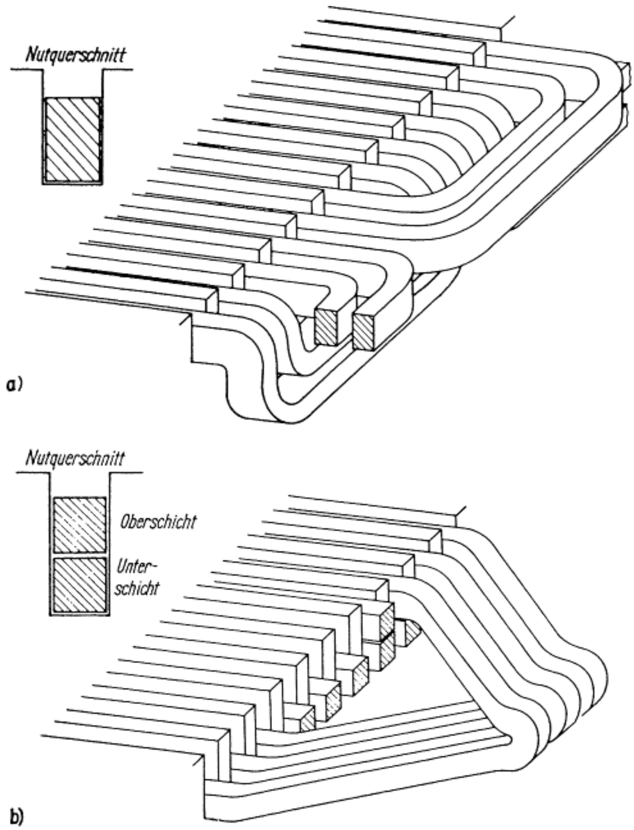


Bild 1.1.4 Bezeichnung einer Wicklung nach der Zahl der Schichten.
a) Einschichtwicklung; b) Zweischichtwicklung

spezielle Wicklungsbezeichnungen, die bei der Behandlung dieser Wicklungsarten eingeführt werden.

Ist die Spulenweite W der Spulen einer Wicklung gleich der Polteilung τ_p, das ist der längs des Bohrungsumfangs gemessene Achsenabstand aufeinander folgender Pole, so spricht man von *Durchmesserspulen*, da die Spulenköpfe bei einer zweipoligen Anordnung wie im Bild 1.1.3a einen Durchmesser bilden. Bei *gesehnten Spulen* ist die Spulenweite kleiner (oder auch größer) als die Polteilung, und die Spulenköpfe bilden bei einer zweipoligen Anordnung eine Sehne (s. Bild 1.1.3b). Wenn eine Wicklung ausschließlich aus Spulen gleicher Weite besteht, spricht man in Abhängigkeit von der Ausführung der Spulen von einer *Durchmesserwicklung* bzw. einer *gesehnten Wicklung* oder *Sehnenwicklung*. Wenn die Spulengruppen einer Wicklung aus koaxialen Spulen ungleicher Weite bestehen (s. Bild 1.1.4a), sind die einzelnen Spulen der Gruppe unterschiedlich gesehnt; die Gruppe als Ganzes kann aber wie eine aus Durchmesserspulen wirken.

Eine *Spulenwicklung* hat Spulen mit einer Windungszahl w_{sp}, die größer als 1 ist. Besteht jede Spule einer Wicklung nur aus einer Windung, dann liegt eine *Stabwicklung* (s. Bild 1.1.8) vor. Nach der Zahl der Schichten unterscheidet man vor allem *Einschichtwicklungen* und *Zweischichtwicklungen* (s. Bild 1.1.4). Wicklun-

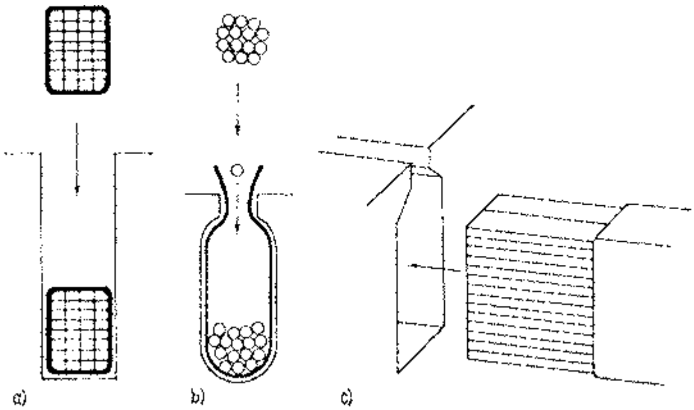


Bild 1.1.5 Bezeichnung einer Wicklung nach der Herstellungsart. a) Formspulen- oder Einlegewicklung; b) Träufelwicklung; c) Halbformspulenwicklung

gen mit mehr als zwei Schichten sind, abgesehen vom Sonderfall der Mehrschicht-Steckwicklungen (s. Unterabschn. 1.2.2.1d), selten.

Entsprechend der prinzipiellen Herstellungsart gibt es *Formspulen-* oder *Einlegewicklungen*, *Träufelwicklungen*, *Einziehwicklungen*, *Halbformspulenwicklungen* und *Mehrschicht-Steckwicklungen*, die eine Sonderform der Halbformspulenwicklungen sind.

Bei der *Formspulenwicklung* werden fertig geformte und vollständig isolierte Spulen oder Stäbe, deren Einzelleiter in der Regel rechteckig sind, in offene Nuten eingelegt (s. Bild 1.1.5a). Die *Träufelwicklung* entsteht dadurch, dass die in der Regel runden Einzelleiter vorgeformter Spulen in halb geschlossene, isolierte Nuten, eingeträufelt‘ werden (s. Bild 1.1.5b). Nach dem Einträufeln werden die Spulen dann fertig geformt und die Nutisolierungen über den Spulenseiten geschlossen. Diese prinzipielle Herstellungsart wird bei größeren Stückzahlen oft maschinell ausgeführt. Das erfolgt entweder dadurch, dass eine oder mehrere Spulen gleichzeitig Windung für Windung maschinell in die betreffenden Nuten hineingewickelt oder dass mehrere mit Hilfe von Schablonen lose vorgefertigte Spulen in einem Arbeitsgang in die Nuten eingezogen werden. Die zuletzt genannte Herstellungsart, die sog. *Einzieh-* oder *Insertertechnik*, ist die produktivste Wickeltechnik für Runddrahtwicklungen.

Bei den selten vorkommenden *Halbformspulenwicklungen* werden halbgeformte Spulen, Halbspulen oder Stäbe mit meist fertig isolierten Spulenseiten axial in meist halb geschlossene Nuten eingeschoben (s. Bild 1.1.5c). Dabei ist nur ein Spulenkopf fertig geformt. Der zweite Spulenkopf wird nach dem Einschieben geformt und Leiter für Leiter zum Wicklungszug verbunden. Eine gewisse Bedeutung haben wegen des geringeren Verbindungsaufwands daher nur Halbformspulen mit nur einer Windung aus Massivleitern, die als Läuferwicklungen von Induktionsmaschinen mit Schleifringläufer eingesetzt werden, bei denen wegen der geringen Frequenz des Läuferstroms im Betrieb Stromverdrängung (s. Kap. 5) keine große Rolle spielt.

Die *Mehrschicht-Steckwicklung* ist eine Sonderform der Halbformspulenwicklung, bei der je Nut vier bis zehn Leiter mit rechteckigem Querschnitt übereinander liegen. Aufgrund der Form der einzelnen Wicklungselemente (s. Bild 1.1.6a) werden sie auch als *Haarnadelwicklungen* oder *Hairpin-Wicklungen* bezeichnet. Die Wick-

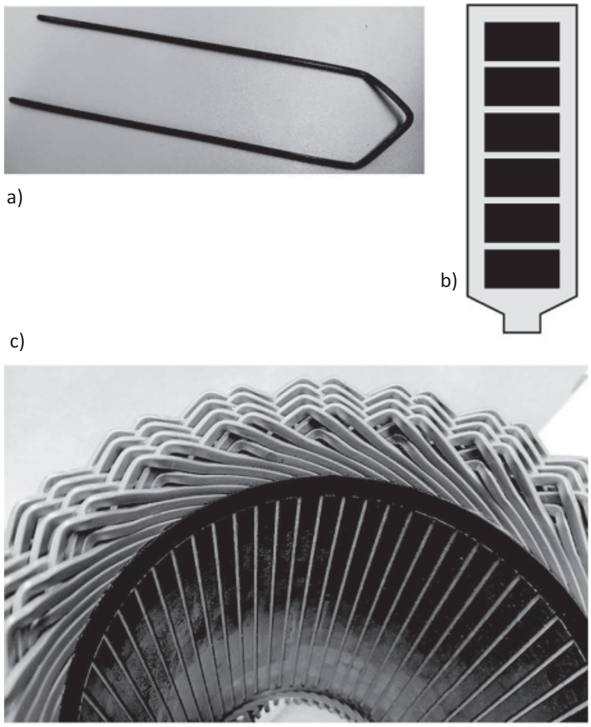


Bild 1.1.6 Mehrschicht-Steckwicklung. a) Einzelnes Wicklungselement; b) Nutquerschnitt einer Sechsschicht-Steckwicklung; c) Wicklungskopf auf der Steckseite einer Achtschicht-Steckwicklung

lungselemente besitzen jeweils nur eine Windung und werden wie Halbformspulen axial in meist halb geschlossene, parallelflankige Nuten eingeschoben, so dass eine Vier- bis Zehnschicht-Stabwicklung entsteht (s. Bild 1.1.6). Da sich derartige Wicklungen voll automatisiert herstellen lassen, sind sie besonders bei in großer Stückzahl hergestellten Fahrzeugantrieben verbreitet.

Nach der Form der Spulen bzw. der Wicklungsköpfe unterscheidet man *Rechteckspulenwicklungen* (s. Bilder 1.1.4a u. 1.2.7b–d, S. 36), *Trapezspulenwicklungen* (s. Bild 1.2.7e) und *Evolventenwicklungen* mit evolventenförmigen Spulenköpfen (s. Bild 1.1.7), die dann entstehen, wenn die Leiter im Wicklungskopf überall im gleichen Abstand gehalten werden. Rechteck- und Trapezspulenwicklungen werden fast nur als Einschichtwicklungen ausgeführt. Bei Trapezspulenwicklungen sind die Spulengruppen, mitunter auch die Einzelspulen, gleich geformt. Im letzteren Fall ergibt sich eine Wicklung mit Spulen gleicher Weite. Zweischichtwicklungen werden normalerweise aus Formspulen entsprechend Bild 1.1.4b hergestellt. Derartige *Formspulen* verwendet man gelegentlich auch für Einschichtwicklungen großer Maschinen. Sie haben gleiche Weite. Da die Wicklungsköpfe dieser Formspulenwicklungen eine Art Korb bilden, nennt man sie auch *Korbwicklung* (s. Bilder 1.1.1, 1.1.4b u. 1.2.12, S. 41).

Wenn man die Schaltverbindungen einer Korbwicklung oder auch einer Evolventenwicklung so anordnet, dass unmittelbar Spulen in Reihe geschaltet werden, die unter demselben Polpaar liegen, so entsteht ein schleifenförmiger Wicklungszug. Eine solche Wicklung nennt man *Schleifenwicklung* (s. Bild 1.1.8a u. b). Werden Spulen unmittelbar in Reihe geschaltet, die unter aufeinander folgenden Polpaaren

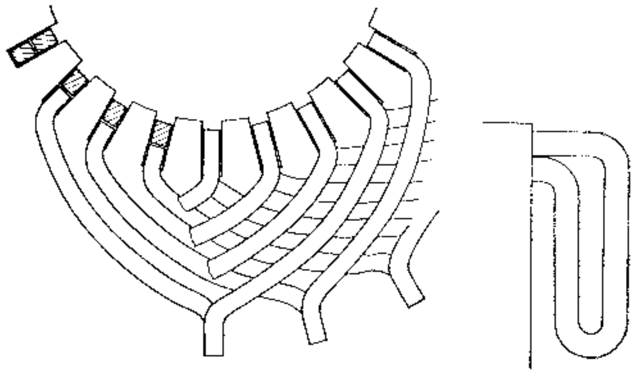


Bild 1.1.7 Bezeichnung einer Wicklung nach der Form der Wicklungsköpfe als Evolventenwicklung

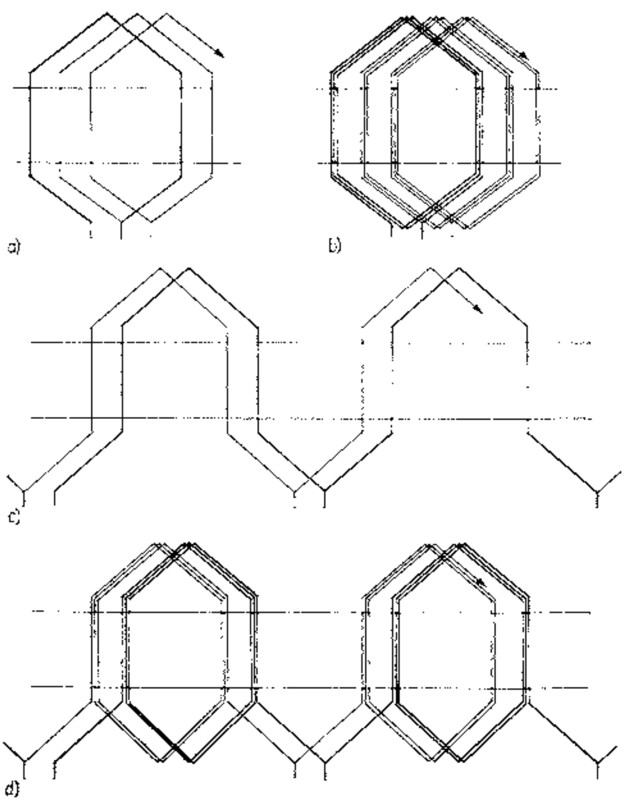


Bild 1.1.8 Bezeichnung einer Wicklung nach der Spulenwindungszahl und der Anordnung der Schaltverbindungen. a) Stab-Schleifenwicklung; b) Spulen-Schleifenwicklung; c) Stab-Wellenwicklung; d) Spulen-Wellenwicklung

liegen, so entsteht eine wellenförmige Wicklung, die *Wellenwicklung* (s. Bild 1.1.8c u. d). Die charakteristische Form dieser Wicklung ist besonders gut bei der Stabwicklung im Bild 1.1.8c zu erkennen.

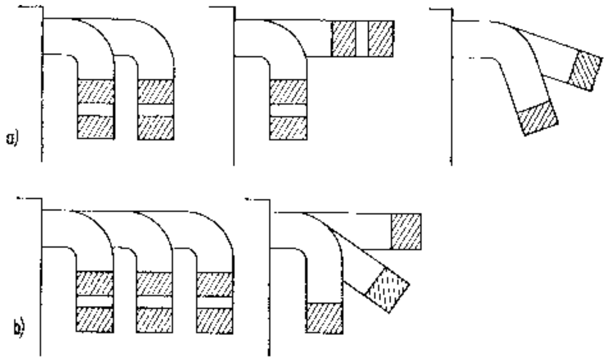


Bild 1.1.9 Bezeichnung einer Wicklung nach der Zahl der Ebenen im Wicklungskopf. a) Zweiebenen- oder Zweietagenwicklung; b) Dreiebenen- oder Dreietagenwicklung

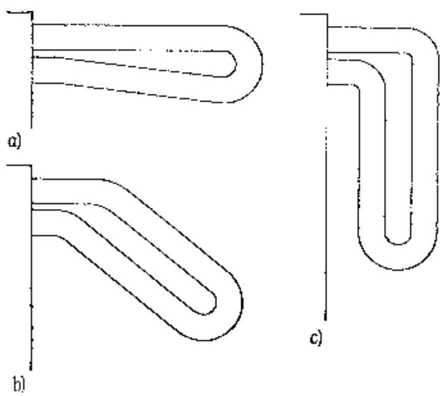


Bild 1.1.10 Bezeichnung einer Wicklung nach der Lage der Wicklungsköpfe. a) Zylindermantel- oder Zylinderwicklung; b) Kegelmantelwicklung; c) Stirnwicklung

Nach der Zahl der Ebenen, die die Spulenköpfe von Rechteckspulenwicklungen bilden, unterscheidet man *Zweiebenen-* oder *Zweietagenwicklungen* und *Dreiebenen-* oder *Dreietagenwicklungen* (s. Bilder 1.1.9 u. 1.1.4a). Bei Trapezspulen- und Evolventenwicklungen liegen die Spulenköpfe in zwei Ebenen. Sind die Spulenköpfe einer Korbwicklung zylinderförmig angeordnet, was bei Ständerwicklungen großer Polpaarzahl und bei Läuferwicklungen der Fall ist, so spricht man von einer *Zylindermantel-* oder *Zylinderwicklung* (s. Bild 1.1.10a). Sind sie kegelförmig angeordnet, dann bezeichnet man die Wicklung als *Kegelmantelwicklung* oder *Evolventenwicklung* (s. Bild 1.1.10b). Die Spulenköpfe einer Evolventenwicklung können auch in einer Ebene parallel zu den Stirnflächen liegen. Man nennt sie dann auch noch *Stirnwicklung* (s. Bilder 1.1.7 u. 1.1.10c). Bei der Darstellung der Seitenansicht von Wicklungsköpfen ist es üblich, die Krümmung der Bohrungsoberfläche zu vernachlässigen.

Tabelle 1.1.1 zeigt in zusammengefasster Form die Wicklungsbezeichnungen von am Energieumsatz beteiligten Wicklungen, ihre Kennzeichen und die kennzeichnenden Größen bzw. Anordnungen.

Tabelle 1.1.1 Allgemeine Bezeichnungen von am Energieumsatz beteiligten Wicklungen

Kennzeichnendes	Kennzeichen	Bezeichnung
Spulenweite	$W = \tau_\mathrm{p}$ $W \lesseqgtr \tau_\mathrm{p}$	Durchmesserspule gesehnte Spule
Spulenwindungszahl	$w_\mathrm{sp} > 1$ $w_\mathrm{sp} = 1$	Spulenwicklung Stabwicklung
Zahl der Schichten	1 Schicht 2 Schichten > 2 Schichten	Einschichtwicklung Zweischichtwicklung Mehrschichtwicklung
Art der Herstellung	Formspulen werden eingelegt Einzelleiter werden eingeträufelt Spulen werden eingezogen Halbformspulen werden eingeschoben	Formspulen- oder Einlegewicklung Träufelwicklung Einziehwicklung Halbformspulenwicklung, Steckwicklung
Form der Spulen bzw. Wicklungsköpfe	Rechteckform Trapezform Evolventspulenköpfe Formspulen nach Bild 1.1.4b	Rechteckspulenwicklung Trapezspulenwicklung Evolventenwicklung Korbwicklung, Formspulenwicklung
Führung der Schaltverbindung von einer Spule	zu einer Spule unter Ausgangspolpaar zu einer Spule unter nächstfolgendem Polpaar	Schleifenwicklung Wellenwicklung
Zahl der Wicklungskopfebenen bei Rechteckspulenwicklung	2 Ebenen 3 Ebenen	Zweiebenen- oder Zweietagenwicklung Dreiebenen- oder Dreietagenwicklung
Lage der Wicklungsköpfe bei Korb- oder Evolventenwicklung	längs Zylindermantel längs Kegelmantel längs Blechpaketstirnflächen	Zylindermantel- oder Zylinderwicklung Kegelmantelwicklung } Evolventenwicklung Stirnwicklung } Evolventenwicklung

1.1.2 Allgemeine Gesetzmäßigkeiten von am Energieumsatz beteiligten Wicklungen

1.1.2.1 Ausgangsüberlegungen

Nach Band *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschnitt 1.6.4, kann jede in Nuten eingebettete Spule bezüglich ihrer Verkettung mit dem Luftspaltfeld durch zwei Nutenspulen ersetzt werden, die sich über dem Rücken bzw. Joch schließen. Ist das Luftspaltfeld ein Drehfeld mit der Flussdichteverteilung

$$B_{\tilde{\nu}'} = \hat{B}_{\tilde{\nu}'} \cos\left(\tilde{\nu}'\gamma' - \omega_{\tilde{\nu}'} t - \varphi_{\mathrm{B},\tilde{\nu}'}\right) \tag{1.1.3}$$

mit dem Feldwellenparameter $\tilde{\nu}'$, d. h. der Ordnungszahl der Feldwelle $\nu' = |\tilde{\nu}'|$,[1] so ergibt sich für eine bezüglich der γ'-Koordinate ortsfeste Nutenspule an der

1 Zur Einführung von $\tilde{\nu}'$, ν' und ν siehe Band *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschnitt 1.5.2. Der Betrag des Feldwellenparameters $\tilde{\nu}'$ gibt die Ordnungszahl ν' bezüglich des Gesamtumfangs und

Stelle γ'_ρ auf Basis der im Bild 1.1.14 festgelegten positiven Zählrichtungen die Flussverkettung (s. Bd. *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschn. 1.6.4)

$$\psi_{\mathrm{n}\rho,\tilde{\nu}'} = w_{\mathrm{sp}\rho}\frac{1}{2}\Phi_{\tilde{\nu}'}\cos\left(\omega_{\tilde{\nu}'}t - \tilde{\nu}'\gamma'_\rho + \varphi_{\mathrm{B},\tilde{\nu}'} + \frac{\pi}{2}\right) \tag{1.1.4}$$

mit dem Fluss der Halbwelle eines Drehfelds (s. Bd. *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschn. 1.6.4)

$$\Phi_{\tilde{\nu}'} = \frac{2}{\pi}\tau_{\mathrm{p}}l_{\mathrm{i}}\hat{B}_{\tilde{\nu}'}\frac{p}{\nu'} = \frac{Dl_{\mathrm{i}}}{\nu'}\hat{B}_{\tilde{\nu}'}. \tag{1.1.5}$$

Nach (1.1.3) liegt die Feldachse einer Drehwelle des Luftspaltfelds mit dem Feldwellenparameter $\tilde{\nu}'$, d. h. ihr Maximum, an der Stelle

$$\gamma'_{\mathrm{B}\tilde{\nu}'} = \frac{1}{\tilde{\nu}'}(\omega_{\tilde{\nu}'}t + \varphi_{\mathrm{B},\tilde{\nu}'}),$$

d. h. zur Zeit $t = 0$ an der Stelle $\varphi_{\mathrm{B},\tilde{\nu}'}/\tilde{\nu}'$. Mit (1.1.4) erhält man für die in der Nutenspule ρ induzierte Spannung

$$e_{\mathrm{n}\rho,\tilde{\nu}'} = -\frac{\mathrm{d}\psi_{\mathrm{n}\rho,\tilde{\nu}'}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{2}\omega_{\tilde{\nu}'}w_{\mathrm{sp}\rho}\Phi_{\tilde{\nu}'}\cos(\omega_{\tilde{\nu}'}t + \varphi_{\mathrm{B},\tilde{\nu}'} - \tilde{\nu}'\gamma'_\rho) \tag{1.1.6}$$

oder in der Darstellung der komplexen Wechselstromrechnung als sog. *ruhender Zeiger*

$$\underline{e}_{\mathrm{n}\rho,\tilde{\nu}'} = \frac{1}{2}\omega_{\tilde{\nu}'}w_{\mathrm{sp}\rho}\Phi_{\tilde{\nu}'}e^{\mathrm{j}(\varphi_{\mathrm{B},\tilde{\nu}'} - \tilde{\nu}'\gamma'_\rho)}. \tag{1.1.7}$$

Die in einer Nutenspule induzierte Spannung wird *Nutenspannung* genannt. Sie ist der innerhalb der Nut liegenden Spulenseite als Spulenseitenspannung zugeordnet. Für den Entwurf und die Beurteilung einer Wicklung sind zunächst nur die Verteilung der Spulenseiten auf die einzelnen Stränge und die den Spulenseiten zugeordneten Nutenspannungen von Bedeutung. Die Spulenbildung spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Aus diesem Grund wird die Spulenseite zum Entwurfselement einer in Nuten eingebetteten Wicklung.

1.1.2.2 Allgemeine Gesetze der Zeigerdarstellung der Nutenspannungen

Lässt man über eine Wicklung das Drehfeld nach (1.1.3) laufen, so sind die Nutenspannungen entsprechend (1.1.6) sinusförmige Wechselspannungen. Ihre Zeiger bilden nach (1.1.7) wegen der gleichmäßigen Nutenverteilung einen radialsymmetrischen Zeigerstern, den man kurz als *Nutenspannungsstern* bezeichnet. Die Entwicklung eines solchen Nutenspannungssterns ist im Band *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschnitt 1.6.4, bereits angedeutet worden. Zunächst sollen allgemeine Gesetzmäßigkeiten für den Nutenspannungsstern hergeleitet werden, der von einer positiv umlaufenden Drehwelle des Luftspaltfelds herrührt, deren Ordnungszahl $\nu' = p$ der Polpaarzahl der Maschine entspricht. Diese für den Energieumsatz in einer Maschine maßgebliche Welle wird als *Hauptwelle* bezeichnet. Die Gesetzmäßigkeiten lassen sich auf die den anderen Harmonischen entsprechenden Nutenspannungssterne übertragen, wobei zur Entwicklung eines Nutenspannungssterns grundsätzlich von positiv umlaufenden Drehwellen mit $\tilde{\nu}' > 0$ ausgegangen wird.

---

sein Vorzeichen den Umlaufsinn einer Drehwelle an. $\nu = \nu'/p$ ist die auf die Polpaarzahl p der Maschine und damit der Hauptwelle bezogene Ordnungszahl einer Drehwelle.

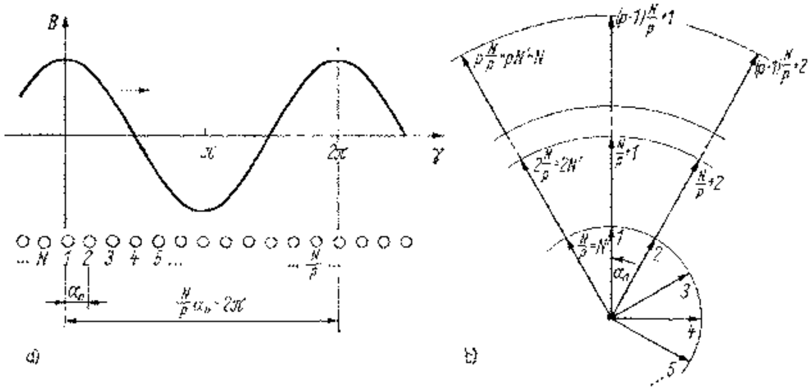


Bild 1.1.11 Entwicklung des Nutenspannungssterns für $N/p \in \mathbb{N}$. a) Hauptwelle des Luftspaltfelds und Nutenverteilung; b) Nutenspannungsstern

a) Die Nutzahl je Polpaar ist ganzzahlig

Bei ganzzahliger Nutzahl je Polpaar ergibt sich unter allen *p Polpaaren* des Drehfelds dieselbe Nutenverteilung und damit auch für alle p Polpaare derselbe Nutenspannungsstern. Es genügt die Ermittlung des Nutenspannungssterns für ein Polpaar. Bei einer gesamten *Nutzahl N* entfallen somit auf ein Polpaar, d. h. auf eine Periode des Drehfelds, N/p Nutteilungen (s. Bild 1.1.11a). Da eine Periode des Drehfelds einem Phasenwinkel der Nutenspannung von 2π bzw. 360° entspricht, erhält man für die Phasenverschiebung zwischen den Nutenspannungen zweier benachbarter Nuten, d. h. für den Winkel zwischen den Nutenspannungszeigern dieser Nuten, den sog. *Nutenwinkel*

$$\boxed{\alpha_\mathrm{n} = \frac{2\pi}{N} p} \,. \tag{1.1.8}$$

Im Nutenspannungsstern nach Bild 1.1.11b folgt, jeweils um α_n verschoben, Zeiger auf Zeiger. Nummeriert man die Nuten bzw. Zeiger, so hat der Zeiger $N/p + 1$ wieder die Phasenlage des ersten Zeigers, und der Nutenspannungsstern wiederholt sich für das zweite Polpaar. Will man diese Wiederholung darstellen, so muss man einen zweiten Zeigerkreis mit N/p Zeigern anordnen. Bei ganzzahligem N/p ergibt sich demnach mit einer Polpaarzahl p ein Nutenspannungsstern mit p Zeigerkreisen. Dabei hat der Nutenspannungsstern $N' = N/p$ Zeigerstrahlen. Jeder Zeigerstrahl besteht aus p gleichphasigen Nutenspannungszeigern.

b) Die Nutzahl je Polpaar ist nicht ganzzahlig

Formal entfallen auf ein Polpaar, d. h. auf eine Periode des Drehfelds, auch bei einer nicht ganzzahligen Nutzahl je Polpaar N/p Nutteilungen, so dass (1.1.8) gültig bleibt. Um eine Periodenlänge des Luftspaltfelds von der Nut 1 entfernt liegt aber keine Nut (s. Bild 1.1.12a). Damit ergibt sich für das zweite Polpaar eine andere Nutenverteilung relativ zum Luftspaltfeld und auch ein anderer Nutenspannungsstern. Im Allgemeinen wiederholt sich die Nutenverteilung wie im Bild 1.1.12a relativ zum Luftspaltfeld erst nach p' Polpaaren, und es müssen $N' = p'N/p$ Nuten mit verschiedenphasigen Nutenspannungszeigern existieren. Ist $N > N'$ bzw. $p > p'$, so haben die Spannungszeiger der Nuten $N' + 1, 2N' + 1, \ldots, (t - 1)N' + 1$ dieselbe

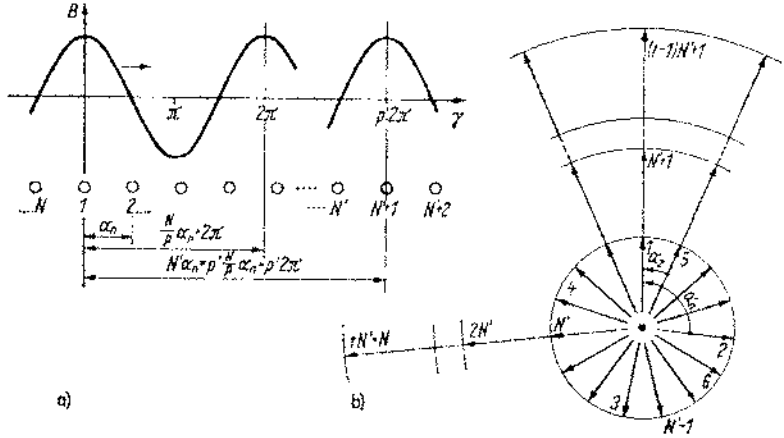


Bild 1.1.12 Entwicklung des Nutenspannungssterns für $N/p \notin \mathbb{N}$. a) Hauptwelle des Luftspaltfelds und Nutenverteilung; b) Nutenspannungsstern

Phasenlage wie der Spannungszeiger der Ausgangsnut 1. Mit diesen Zeigern beginnt jeweils eine Wiederholung des Nutenspannungssterns der N' verschiedenphasigen Spannungszeiger, d. h. ein neuer Zeigerkreis des Nutenspannungssterns. Bei der Übertragung der Nutbezifferung auf die Zeiger des Nutenspannungssterns muss man p'-mal in jedem Zeigerkreis umlaufen. Es entsteht ein Nutenspannungsstern mit t Zeigerkreisen und N' Zeigerstrahlen, die jeweils aus t gleichphasigen Nutenspannungszeigern bestehen (s. Bild 1.1.12b).

Jede elektrische Maschine hat also t elektrisch gleichwertige Nutenverteilungen mit einer Nutzahl $N' = N/t$ und einer Polpaarzahl $p' = p/t$. Eine derartige Nutenverteilung soll als *Urverteilung* bezeichnet werden. Abgesehen von dem seltenen Sonderfall der Einschicht-Bruchlochwicklungen mit Urwicklung zweiter Art (s. Abschn. 1.2.1.6b, S. 32) ist die Urverteilung identisch mit der sog. *Urwicklung*. Das ist eine von mehreren gleichwertigen Spulenverteilungen, aus denen die gesamte Wicklung besteht.

Für die Bestimmung von t muss man bei gegebenen Werten von N und p die kleinstmöglichen ganzen Zahlen für N' und p' suchen (sonst steckt in N' bereits eine Wiederholung der Nutenverteilung). t ist also der größte gemeinsame Teiler von N und p

$$t = \mathrm{ggT}\,\{N, p\}. \tag{1.1.9}$$

Für $N/p \in \mathbb{N}$, wie im Unterabschnitt a vorausgesetzt, ist $t = p$ und damit $N' = N/p$ und $p' = p/p = 1$. Die in Tabelle 1.1.2 zusammengestellten allgemeinen Kennwerte des Nutenspannungssterns haben demnach auch für diesen Fall Gültigkeit.

Wenn der Nutenspannungsstern $N' = N/t$ Zeigerstrahlen aufweist, beträgt der Phasenwinkel zwischen benachbarten Zeigerstrahlen bzw. zwischen benachbarten Zeigern

$$\boxed{\alpha_\mathrm{z} = \frac{2\pi}{N}t}\,. \tag{1.1.10}$$

Tabelle 1.1.2 Allgemeine Kennwerte des Nutenspannungssterns

$t = \text{ggT}\,\{N, p\}$	Zahl der Zeiger eines Zeigerstrahls = Zahl der Zeigerkreise eines Nutenspannungssterns
$N' = N/t$	Zahl der Zeigerstrahlen des Nutenspannungssterns = Zahl der Zeiger eines Zeigerkreises
$p' = p/t$	Zahl der Umläufe der Nutbezifferung eines Zeigerkreises des Nutenspannungssterns
$p/t - 1$	Zahl der bei der Nutbezifferung zu überspringenden Zeiger

Er wird als *Zeigerwinkel* bezeichnet. Ein Vergleich mit (1.1.8) zeigt, dass der Nutenwinkel

$$\alpha_\mathrm{n} = \frac{p}{t}\alpha_\mathrm{z} = p'\alpha_\mathrm{z} \tag{1.1.11}$$

ein Vielfaches des Zeigerwinkels sein kann. Für $t = p$ ist $\alpha_\mathrm{n} = \alpha_\mathrm{z}$, und man erhält eine fortlaufende Nutbezifferung der Zeiger. Für $t < p$ ist $\alpha_\mathrm{n} > \alpha_\mathrm{z}$, und die Nutbezifferung überspringt jeweils $p/t - 1$ Zeiger, d. h. beim Beziffern der Zeiger muss man in jedem Zeigerkreis des Nutenspannungssterns p/t-mal umlaufen.

Entsprechend Band *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschnitt 1.6.4, ist der Nutenwinkel der von einem positiv umlaufenden Drehfeld der Ordnungszahl ν' induzierten Nutenspannungen

$$\alpha_{\mathrm{n},\nu'} = \frac{\nu'}{p}\alpha_\mathrm{n} = \nu\alpha_\mathrm{n}.$$

Ebenso gilt für den Zeigerwinkel

$$\alpha_{\mathrm{z},\nu'} = \frac{\nu'}{p}\alpha_\mathrm{z} = \nu\alpha_\mathrm{z}.$$

Der Nutenspannungsstern für die ν. Harmonische unterscheidet sich demnach vom Nutenspannungsstern der Hauptwelle nur dadurch, dass die ν-fachen Winkel auftreten und er entsprechend ν-mal so oft umlaufen wird.

c) Beispiele

Durch je ein Beispiel für $N/p \in \mathbb{N}$ und $N/p \notin \mathbb{N}$ sollen die behandelten Zusammenhänge veranschaulicht werden. Mit Rücksicht auf eine gute Übersichtlichkeit wird dabei eine kleinere Nutzahl gewählt, als bei elektrischen Maschinen üblich ist. Das Charakteristische der Arten von Nutenspannungssternen ist trotzdem zu erkennen.

1. Beispiel: $N = 27, \quad p = 3, \quad N/p = 9 \in \mathbb{N}, \quad t = p = 3,$
$N' = 9, \quad p' = 1, \quad \alpha_\mathrm{n} = \alpha_\mathrm{z} = 40^\circ.$

Der Nutenspannungsstern hat 9 Zeigerstrahlen zu je 3 Zeigern. Da $\alpha_\mathrm{n} = \alpha_\mathrm{z}$ ist, ergibt sich eine fortlaufende Zeigerbezifferung (s. Bild 1.1.13a).

2. Beispiel: $N = 30, \quad p = 4, \quad N/p = 7{,}5 \notin \mathbb{N}, \quad t = 2 \neq p,$
$N' = 15, \quad p' = 2, \quad \alpha_\mathrm{n} = 24^\circ, \quad \alpha_\mathrm{z} = 2 \cdot 24^\circ = 48^\circ, \quad p/t - 1 = 1.$

Der Nutenspannungsstern hat 15 Zeigerstrahlen zu je 2 Zeigern. Wegen $\alpha_\mathrm{n} = 2\alpha_\mathrm{z}$ wird bei der Übertragung der Nutziffern auf die Zeiger jeweils ein Zeiger über-

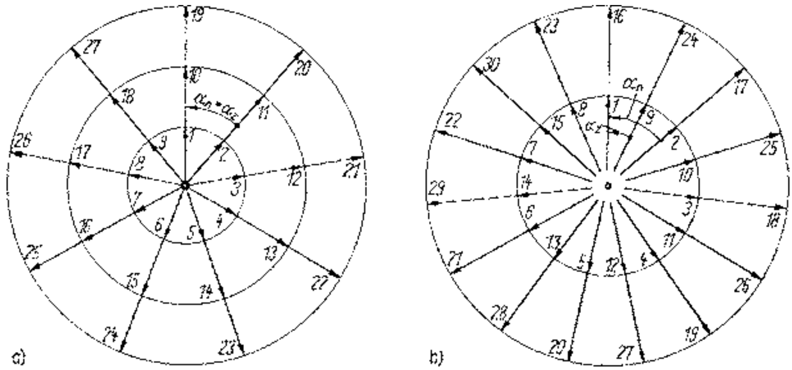


Bild 1.1.13 Beispiele für Nutenspannungssterne. a) $N = 27$, $p = 3$, $t = 3$, $N' = 9$, $p' = 1$, $\alpha_n = \alpha_z = 40°$; b) $N = 30$, $p = 4$, $t = 2$, $N' = 15$, $p' = 2$, $\alpha_n = 2\alpha_z = 48°$

sprungen $(p/t - 1 = 1)$. Erst nach zweimaligem Durchlaufen jedes Zeigerkreises $(p/t = p' = 2)$ sind alle Zeiger dieses Zeigerkreises beziffert (s. Bild 1.1.13b).

d) Anwendung des Nutenspannungssterns

Wie schon im Abschnitt 1.1.2.1 angedeutet worden ist und wie in den Abschnitten 1.2 und 1.3 noch gezeigt werden wird, ist die Spulenseite das Entwurfselement einer Wicklung. Beim Entwurf einer Wicklung mit ausgebildeten Strängen besteht der erste Schritt in der Aufteilung der Spulenseiten auf die einzelnen Stränge. Da die Spulenseitenspannungen durch die Nutenspannungszeiger dargestellt werden, kann diese Aufteilung in vielen Fällen durch die Zuordnung der Nutenspannungszeiger zu den einzelnen Strängen erfolgen. Damit wird der Nutenspannungsstern zum Hilfsmittel für den Wicklungsentwurf.

Die von einem Drehfeld in einer Spule, einer Spulengruppe oder einem Strang induzierte Spannung lässt sich durch vorzeichengerechte Addition der entsprechenden Nutenspannungszeiger ermitteln. Infolgedessen eignet sich der Nutenspannungsstern zur Entwicklung eines Zeigerbilds der Spulenspannungen, des sog. Spulenspannungssterns, zur Ermittlung der Strang-, Zweig- oder Spulengruppenspannungen, zur Bestimmung des sog. Wicklungsfaktors, zur Beurteilung der Symmetrie einer mehrsträngigen Wicklung und zur Untersuchung der Möglichkeit, Wicklungsteile parallelzuschalten. Der Wicklungsfaktor ist ein Faktor, der den Einfluss der Wicklungsanordnung auf das erregte magnetische Feld bzw. auf die induzierte Spannung ausdrückt (s. Abschn. 1.2.3, S. 74).

Kommutatorwicklungen sind ein- oder mehrfach in sich geschlossene Wicklungen. Bei der Addition der Nutenspannungszeiger entstehen demzufolge ein oder mehrere geschlossene Vielecke, die einen oder mehrere Umläufe haben können. Diese Vielecke nennt man Spannungsvielecke. Sie dienen zur Beurteilung der Symmetrie von Kommutatorwicklungen. Das geschieht also wiederum mit Hilfe eines gedachten Drehfelds (s. Abschn. 1.3.2, S. 134).

1.1.2.3 Allgemeine Wicklungsgesetze der am Energieumsatz beteiligten Spulen

Wie im Abschnitt 1.1.2.1 entwickelt wurde, induziert eine Drehwelle des Luftspaltfelds entsprechend (1.1.7) und (1.1.5) in einer ortsfesten Spule eine harmonische

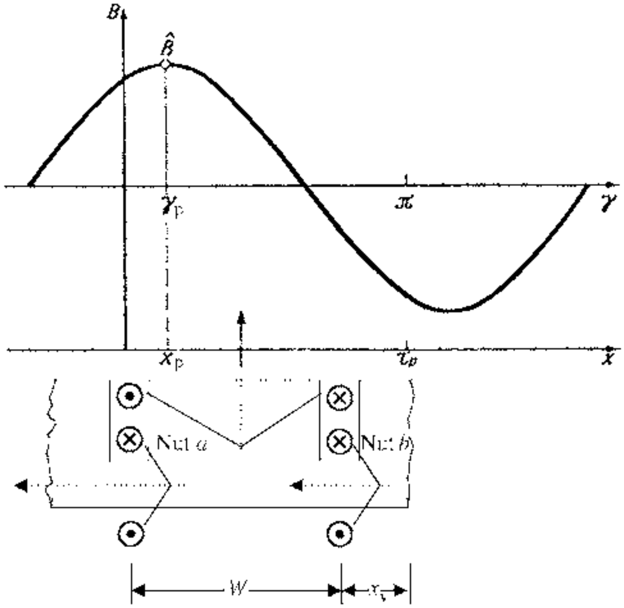


Bild 1.1.14 Zur Festlegung der positiven Zählrichtung für eine Spule

Nutenspannung $\underline{e}_\mathrm{n}$, deren Amplitude proportional zur Flussdichteamplitude $\hat{B}$ der Feldwelle ist. Für die am Energieumsatz über die Deckung der Verluste hinausgehend beteiligten Spulen besteht unter Bezugnahme auf die Festlegung der positiven Zählrichtungen entsprechend Bild 1.1.14 zwischen der von der Hauptwelle des Luftspaltfelds in einer Spule induzierten Spannung $\underline{e}_\mathrm{sp} = \underline{e}_\mathrm{ab}$ und den Nutenspannungen $\underline{e}_\mathrm{na}$ bzw. $\underline{e}_\mathrm{nb}$ der Zusammenhang

$$\underline{e}_\mathrm{sp} = \underline{e}_\mathrm{ab} = -\underline{e}_\mathrm{na} + \underline{e}_\mathrm{nb}. \tag{1.1.12}$$

Die größte durch die Hauptwelle in einer Spule induzierte Spannung (im Folgenden auch als Hauptwellenspannung bezeichnet) entsteht bei Gegenphasigkeit der Zeiger $\underline{e}_\mathrm{na}$ und $\underline{e}_\mathrm{nb}$. Wie Bild 1.1.14 zu entnehmen ist, ergibt sich Gegenphasigkeit zweier Nutenspannungszeiger mit $\gamma = \pi$ bei einem Spulenseitenabstand $x = \tau_\mathrm{p}$, d. h. bei einer Spulenweite $W = \tau_\mathrm{p}$. Die größte Hauptwellenspannung liefert eine Durchmesserspule.

Entsprechend (1.1.2) und im Vorgriff auf (1.1.16) gilt für den Zusammenhang zwischen der *bezogenen Winkelkoordinate* γ, der *Winkelkoordinate* γ' und der *Längenkoordinate* in Umfangsrichtung x

$$\gamma = p\gamma' = \frac{\pi}{\tau_\mathrm{p}} x. \tag{1.1.13}$$

Daraus ergibt sich die Darstellung der Hauptwelle des Luftspaltfelds in den verschiedenen eingeführten Koordinaten als

$$B = \hat{B}\cos(\gamma - \gamma_\mathrm{p}) = \hat{B}\cos(p\gamma' - p\gamma'_\mathrm{p}) = \hat{B}\cos\frac{\pi}{\tau_\mathrm{p}}(x - x_\mathrm{p}).$$

Die Ausführung von Durchmesserspulen ist aufgrund der geltenden Wicklungsgesetze nicht immer möglich und im Hinblick auf das Erzeugen von Feldoberwellen sowie das Reagieren auf Feldoberwellen i. Allg. auch nicht erwünscht. Man führt deshalb meistens gesehnte Spulen mit $W \lesseqgtr \tau_p$ aus. Für das elektromagnetische Verhalten der Spule ist es gleichgültig, ob man W größer oder kleiner als τ_p wählt. Um jedoch kleine Wicklungsköpfe, d. h. einen geringen Aufwand an Leitermaterial, zu erhalten, wählt man praktisch stets $W < \tau_p$. Bezieht man die Spulenweite auf die *Nutteilung*

$$\boxed{\tau_n = \frac{D\pi}{N}}, \tag{1.1.14}$$

d. h. wählt man die Nutteilung als Maßeinheit für die Spulenweite, so erhält man den sog. *Wicklungs-* oder *Nutenschritt*

$$\boxed{y = \frac{W}{\tau_n} = \frac{\tau_p - x_v}{\tau_n} = \frac{N}{2p} - y_v = y_\varnothing - y_v \approx \frac{N}{2p}}. \tag{1.1.15}$$

In (1.1.15) bedeuten x_v die Spulenverkürzung (s. Bild 1.1.14), y_v die *Schrittverkürzung* und $y_\varnothing = N/2p$ den *Durchmesserschritt*, der genau eine Polteilung umfasst. Die *Polteilung* ist dabei

$$\boxed{\tau_p = \frac{D\pi}{2p}}. \tag{1.1.16}$$

Der Wicklungsschritt ist also gleich der Zahl der auf dem Weg von der linken zur rechten Spulenseite einer Spule überschrittenen Nutteilungen.

Nach (1.1.13) erhält man für die Spulenweite in bezogenen Winkelkoordinaten unter Berücksichtigung von (1.1.8), (1.1.14), (1.1.15) und (1.1.16)

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{W}{\tau_p}\pi = y\frac{\tau_n}{\tau_p}\pi = y\frac{2p}{N}\pi = y\alpha_n \\ &= (y_\varnothing - y_v)\alpha_n = \pi - \eta_v \end{aligned} \tag{1.1.17}$$

mit dem *Sehnungswinkel* $\eta_v = y_v\alpha_n$.

Ist z_a die *gesamte Leiterzahl*, w_a die *gesamte Windungszahl* und k die *gesamte Spulenzahl* der Wicklung (d. h. bei einer Strangwicklung aller Stränge der Wicklung), so ergibt sich für die *Spulenwindungszahl*

$$w_{sp} = \frac{w_a}{k} = \frac{z_a}{2k}. \tag{1.1.18}$$

Von allgemeiner Bedeutung ist noch die Zahl u der auf eine Nut entfallenden Spulen. Da die Zahl der Spulen halb so groß wie die Zahl der Spulenseiten ist, ist u auch die halbe Zahl der auf eine Nut entfallenden Spulenseiten oder die *Zahl der Spulenseiten einer Nut je Schicht einer Zweischichtwicklung*

$$\boxed{u = \frac{k}{N}}. \tag{1.1.19}$$

Mit der letzten Definition wird diese Größe etwas anschaulicher. Bei Wicklungen mit ausgebildeten Strängen liegt in jeder Nut und Schicht nur eine Spulenseite. Bei Einschichtwicklungen ist demnach $u = \frac{1}{2}$ und bei Zweischichtwicklungen $u = 1$. Die Spulenzahl von Zweischichtwicklungen ist doppelt so groß wie die Spulenzahl von Einschichtwicklungen gleicher Nutzahl. Kommutatorwicklungen werden normalerweise als Zweischichtwicklungen ausgeführt, wobei in jeder Nut und Schicht oft mehr als eine Spulenseite liegen. Kommutatorwicklungen mit mehr als zwei Schichten kommen nur in Sonderfällen vor. Für Kommutatorwicklungen hat die Zahl u mithin größere Bedeutung. u bezeichnet dann die Zahl der in jeder Schicht einer Nut nebeneinanderliegenden Spulenseiten. Daher muss man bei Kommutatorwicklungen zwischen dem *Nutenschritt* $y_n = y$ nach (1.1.15) – der Zahl der Nutteilungen zwischen linker und rechter Spulenseite – und dem *Spulenschritt* oder *ersten Teilschritt* $y_1 = uy_n$ unterscheiden, der angibt, wieviele Spulenseiten man weiterschreiten muss, um von der linken zur rechten Spulenseite einer Spule zu gelangen.

1.2 Wicklungen mit ausgebildeten Strängen

Wie schon in der Einleitung zum Abschnitt 1.1 angedeutet worden ist, sind Wicklungen mit ausgebildeten Strängen, im Folgenden kurz *Strangwicklungen* genannt, vorwiegend Wicklungen von Einphasen- oder Dreiphasen-Wechselstrommaschinen. Sie werden deshalb auch als *Wechselstromwicklungen* bezeichnet. Zu den Strangwicklungen kann man aber auch die in Nuten verteilt angeordneten, mit Gleichstrom gespeisten Erregerwicklungen von Vollpol-Synchronmaschinen rechnen.

Entsprechend der Bezeichnung *Wicklung mit ausgebildeten Strängen* werden die einzelnen Spulen dieser Wicklung unter Bildung von Spulengruppen zu Wicklungssträngen geschaltet. Vorherrschend ist die Reihenschaltung der Spulen innerhalb sowohl der Spulengruppe als auch des Strangs. Besonders bei sehr großen Synchron- und Induktionsmaschinen, aber auch bei kleineren Maschinen mit niedriger Bemessungsspannung ist jedoch die Bildung paralleler Wicklungszweige notwendig (s. Abschn. 1.2.6, S. 105).

Hinsichtlich der Anzahl der Stränge haben die dreisträngigen Maschinen die größte Bedeutung. Sie sind dem Dreiphasensystem der Energieversorgung angepasst. Ihre mit dem Dreiphasensystem verbundenen Wicklungen werden vielfach als *Drehstromwicklungen* bezeichnet. Mit einsträngigen Wicklungen werden vor allem Einphasengeneratoren zur Speisung von Bahnnetzen ausgeführt. Da es Zweiphasennetze praktisch nicht mehr gibt, kommen zweisträngige Wicklungen nur in kleinen Schleifringläufern und in Einphasen-Induktionsmotoren mit Hilfsstrang vor. Wicklungen mit mehr als drei Strängen sind, abgesehen von fünf- oder sechssträngigen Wicklungen bei Generatoren in Straßenfahrzeugen mit Verbrennungsmotor (umgangssprachlich oft als Lichtmaschinen bezeichnet) oder sechssträngigen Wicklungen bei großen, aus Stromzwischenkreisumrichtern gespeisten Synchronmotoren, sehr selten.

Strangwicklungen können als Einschicht- oder Zweischichtwicklungen oder als Mehrschicht-Steckwicklungen ausgeführt werden. Vor allem bei größeren Maschinen werden Zweischichtwicklungen wegen der einfacheren Möglichkeit der Sehnung, wegen der größeren Zahl der Freiheitsgrade beim Entwurf und wegen der technologisch vorteilhafteren Formspulenwicklung bevorzugt. Bei kleineren Induktionsmaschinen ist jedoch die Einschichtwicklung, ausgeführt als Rechteckspulen- oder Trapezspulenwicklung, weit verbreitet. Solche Wicklungen werden vielfach, ebenso wie die Mehrschicht-Steckwicklungen bei in großen Stückzahlen gefertigten Fahrzeugmotoren, maschinell hergestellt.

1.2.1 Wicklungsgesetze

Wenn jede Spulengruppe einer mehrsträngigen Wicklung dieselbe Spulenzahl besitzt, d. h. wenn die Wicklung nur gleich große Wicklungszonen bildet, sind ihr Entwurf und ihre Schaltung einfach und durchsichtig. Die Spulenanordnung und Zusammenschaltung wiederholt sich innerhalb jedes Polpaars. Haben die Spulengruppen jedoch unterschiedliche Spulenzahlen, so wiederholt sich die Wicklung nicht innerhalb jedes Polpaars, und ihre Symmetrie ist nicht ohne Weiteres erkennbar. Das wesentliche Ziel des folgenden Abschnitts ist die Ermittlung des Wiederholungszyklus und die Ableitung von Symmetriebedingungen für mehrsträngige Wicklungen.

1.2.1.1 Systematik der mehrsträngigen Wicklungen

Nach Abschnitt 1.1.1.1 werden die geometrischen Zonen einer Wicklung durch nebeneinanderliegende Spulenseiten eines Strangs gebildet, d. h. durch die Spulenseiten der Spulengruppen. Da bei Strangwicklungen in jeder Nut und Schicht nur eine Spulenseite liegt, ist die Zahl Q der Spulen einer Spulengruppe gleich der Zahl der Nuten bzw. Nutteilungen je Wicklungszone. Damit ergibt sich für die Breite der geometrischen Wicklungszone einer Spulengruppe im Längenmaß bzw. in der bezogenen Winkelkoordinate

$$b_{\mathrm{zg}} = Q\tau_{\mathrm{n}} \quad \text{bzw.} \quad \alpha_{\mathrm{zg}} = Q\alpha_{\mathrm{n}}. \tag{1.2.1}$$

Von Ausnahmefällen abgesehen, ist Q stets eine ganze Zahl. Ob Q bzw. b_{zg} oder α_{zg} für die einzelnen Spulengruppen der gesamten Strangwicklung von gleicher oder unterschiedlicher Größe sind, wird durch die *Nutzahl je Pol und Strang*

$$\boxed{q = \frac{N}{2pm}} \tag{1.2.2}$$

bestimmt. Im Sprachgebrauch ist für q auch die Bezeichnung *Lochzahl* üblich. Die Nutzahl je Pol und Strang ist das wichtigste Kennzeichen einer Strangwicklung.

Für *Ganzlochwicklungen* ist q eine ganze Zahl. Die Nutzahl je Pol und Strang ist dann – von den im Folgenden genannten Ausnahmen abgesehen – gleich der Zahl Q der Spulen je Spulengruppe, denn die Spulenseiten einer Spulengruppe belegen innerhalb einer Polteilung die auf einen Strang entfallenden Nuten (s. Bild 1.2.1). Für *Bruchlochwicklungen* ist q keine ganze Zahl. Wie im Abschnitt 1.2.2, Seite 34, gezeigt werden wird, kann ein nicht ganzzahliger Wert von q nur durch unterschiedliche Werte von Q, d. h. der Zahl der Spulen der einzelnen Spulengruppen, realisiert werden. Die Werte von Q müssen dabei so gewählt werden, dass ihr Mittelwert $Q_{\mathrm{m}} = q$ ist.

Die wichtigsten Ausnahmen von dem für Ganzlochwicklungen gültigen Normalfall mit $Q = q$ sind die Folgenden:

- Wicklungen mit geteilten Spulengruppen (s. Bild 1.2.7c, S. 36), die meist mit geradzahligem q ausgeführt werden, bilden in diesem Fall im Wicklungskopfbereich Teilgruppen mit einer Spulenzahl $Q/2 = Q_{\mathrm{m}}/2 = q/2$.
- Bei Wicklungen mit doppelter Zonenbreite (s. Bild 1.2.4b) fasst man, was nur bei Zweischichtwicklungen möglich ist, jeweils zwei normale Spulengruppen zusammen, so dass $Q_{\mathrm{m}} = 2q$ wird.

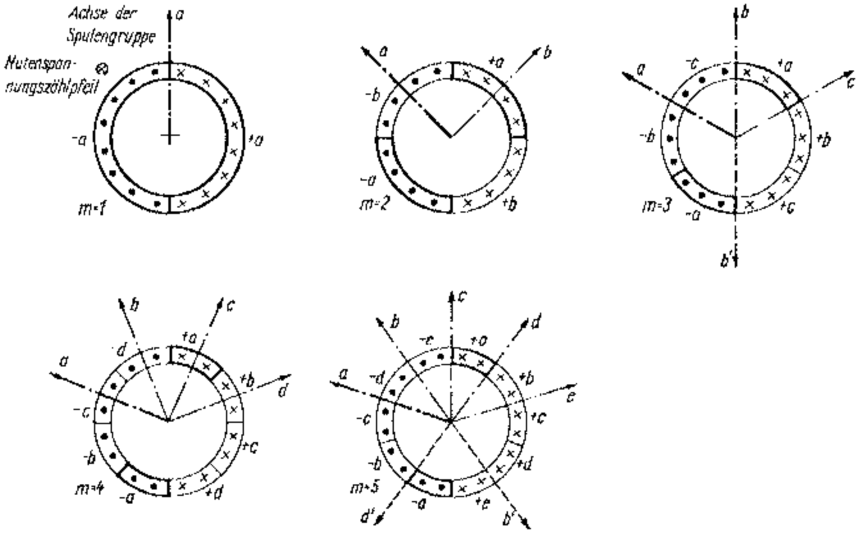


Bild 1.2.1 Systematik der Zonenbildung zweipoliger Einschichtwicklungen. Der Nutenspannungszählpfeil entspricht dem im Bild 1.1.14 eingeführten Umlaufzählsinn der Nutenspannung in der Nut; die Zonenbezeichnung ist noch nicht in jedem Fall identisch mit der allgemein üblichen Bezeichnung der Stränge

- Bei Wicklungen mit Zonenänderung ist Q abwechselnd $Q_\mathrm{a} = q + q_\Delta$ und $Q_\mathrm{b} = q - q_\Delta$.
- Für Wicklungen mit freien (unbewickelten) Nuten ist $Q_\mathrm{m} < q$.

Ganzlochwicklungen bilden – von den genannten Ausnahmen abgesehen – nach dem hier Gesagten in allen Polteilungen gleich große Wicklungszonen. Die einsträngige, zweipolige Einschichtwicklung besitzt nur zwei Zonen (s. Bild 1.2.1, $m = 1$), die sog. *positive Zone* $+a$, in der der Durchlaufsinn der Spulenseiten bzw. die positiven Zählrichtungen der Spulenspannung und der Nutenspannung gleich sind, und die *negative Zone* $-a$, in der die positiven Zählrichtungen von Spulenspannung und Nutenspannung entgegengesetzt gerichtet sind. Bei symmetrischen mehrsträngigen Wicklungen muss jeder Strang denselben Teil des Umfangs einnehmen. Die Zonenaufteilung soll zunächst so erfolgen, dass sowohl die negativen als auch die positiven Zonen aller m Stränge unmittelbar nebeneinanderliegen, wie im Bild 1.2.1 am Beispiel zweipoliger Einschichtwicklungen für $m = 1 \dots 5$ dargestellt ist. Dabei sind die m Strangachsen bzw. Spulengruppenachsen gleichmäßig über eine Polteilung (d. h. in der Winkelkoordinate γ' um $180°/p$) verteilt.

Eine wesentliche Aufgabe mehrsträngiger Wicklungen besteht i. Allg. darin, möglichst eine reine Hauptwelle des Luftspaltfelds

$$B_\mathrm{p}(\gamma', t) = \hat{B}_\mathrm{p} \cos\left(p\gamma' - 2\pi f t - \varphi_0\right)$$

aufzubauen. Dazu muss die Wicklung so gespeist werden, dass diese Hauptwelle von allen Strängen gleichphasig erregt wird. Bei den zweipoligen Anordnungen nach Bild 1.2.1 sind die Achsen der Stränge um den Winkel $\gamma'_\mathrm{m} = \gamma_\mathrm{m} = \pi/m$ am

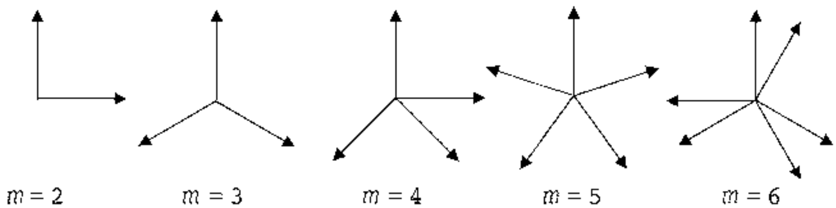


Bild 1.2.2 Mehrphasensysteme zur symmetrischen Speisung mehrsträngiger Wicklungen

Umfang versetzt. Bei $2p$-poligen Anordnungen ist dieser Versatz entsprechend

$$\gamma'_{\mathrm{m}} = \frac{1}{p}\gamma_{\mathrm{m}} = \frac{\pi}{mp}. \tag{1.2.3a}$$

Ein durch einen Wechselstrom $i_k = \hat{i}\cos(2\pi ft + \varphi_{\mathrm{m}k})$ gespeister Strang einer $2p$-poligen Anordnung, dessen Strangachse an der Stelle $\gamma'_{\mathrm{m}k} = k\gamma'_{\mathrm{m}}$ liegt, erregt u. a. ein $2p$-poliges Wechselfeld

$$\begin{aligned} B_{\mathrm{wp}}(\gamma', t) &= \hat{B}_{\mathrm{wp}} \cos p(\gamma' - \gamma'_{\mathrm{m}k}) \cos(2\pi ft + \varphi_{\mathrm{m}k}) \\ &= \frac{1}{2}\hat{B}_{\mathrm{wp}} \left\{\cos\left[p(\gamma' - \gamma'_{\mathrm{m}k}) - 2\pi ft - \varphi_{\mathrm{m}k}\right]\right. \\ &\qquad \left. + \cos\left[p(\gamma' - \gamma'_{\mathrm{m}k}) + 2\pi ft + \varphi_{\mathrm{m}k}\right]\right\}, \end{aligned}$$

das sich in zwei gegenläufige Drehwellen zerlegen lässt. Damit die positiv umlaufenden Teildrehwellen aller Stränge gerade gleichphasig sind und sich damit verstärken, muss

$$\varphi_{\mathrm{m}k} = -p\gamma'_{\mathrm{m}k} = -kp\gamma'_{\mathrm{m}} = -k\frac{\pi}{m}$$

sein. Daraus folgt, dass als Bedingung für die gleichphasige Erregung der Hauptwelle die Phasenverschiebung der Strangströme gerade dem räumlichen Versatz der Stränge in bezogenen Koordinaten (γ-Koordinaten)

$$\varphi_{\mathrm{m}} = p\gamma'_{\mathrm{m}} = \gamma_{\mathrm{m}} = \frac{\pi}{m} \tag{1.2.3b}$$

entsprechen muss. Die negativ umlaufenden Teildrehwellen aller Stränge löschen sich dann gerade aus, denn die Summe von m gegeneinander um

$$\varphi_{\mathrm{m}} - p\gamma'_{\mathrm{m}} = -2p\gamma'_{\mathrm{m}} = -\frac{2\pi}{m}$$

phasenverschobenen Kosinusfunktionen ist Null.

Die Forderung (1.2.3b) führt auf Mehrphasensysteme, deren Zeiger ebenso wie die Strangachsen zweipoliger Anordnungen gleichmäßig über 180° verteilt sind, d. h. sie sind axialsymmetrisch angeordnet und entsprechen damit den Strangachsen im Bild 1.2.1. Derartige Mehrphasensysteme zeigen jedoch bei der Zusammenschaltung der einzelnen Stränge erhebliche Nachteile. Eine Polygonschaltung der Stränge ist mit ihnen überhaupt nicht möglich. Außerdem ist bei einer Sternschaltung der Sternpunkt belastet, und zwar i. Allg. stärker als die Stränge selbst. Um diese Nachteile zu vermeiden, ist man bestrebt, Zonenbildungen vorzunehmen, die radialsymmetrische Mehrphasensysteme ermöglichen.

Bei mehrsträngigen Wicklungen mit ungerader Strangzahl erreicht man das ohne Schwierigkeiten durch Umpolung der geradzahligen Stränge, wie im Bild 1.2.1 durch gestrichelt eingetragene Spulengruppenachsen angedeutet ist. Es ergeben sich Mehrphasensysteme, wie im Bild 1.2.2 für $m = 3$ und $m = 5$ dargestellt, deren elektrische Größen von Strang zu Strang eine Phasenverschiebung von

$$\varphi_\mathrm{m} = \frac{2\pi}{m} \tag{1.2.4a}$$

aufweisen und deren Strangachsen im Winkelkoordinatensystem um den Winkel

$$\gamma'_\mathrm{m} = \frac{2\pi}{mp} \tag{1.2.4b}$$

am Umfang versetzt sind. Die Summe aller Ströme bzw. Spannungen ist in diesem Fall Null, und der Sternpunkt bei einer Sternschaltung wäre nicht belastet. Polygonschaltungen sind uneingeschränkt möglich. Praktische Bedeutung haben hier vor allem die Dreiphasensysteme.

Bei gerader Strangzahl ist eine Entlastung des Sternpunkts nur dann möglich, wenn die Strangzahl zumindest einen ungeradzahligen Teiler m_u enthält. Dann lassen sich, wie im Bild 1.2.2 für $m = 6$ mit $m_\mathrm{u} = 3$ gezeigt, durch Umpolung einzelner Stränge zumindest m/m_u Gruppen von m_u Strängen bilden, deren Stranggrößen untereinander eine Phasenverschiebung von

$$\varphi_\mathrm{mg} = \frac{2\pi}{m_\mathrm{u}} \tag{1.2.4c}$$

haben, wobei einander zugeordnete Stränge dieser m/m_u Gruppen eine Phasenverschiebung der Stranggrößen von

$$\varphi_\mathrm{m} = \frac{\pi}{m} \tag{1.2.4d}$$

und einen räumlichen Versatzwinkel von

$$\gamma'_\mathrm{m} = \frac{\pi}{mp} \tag{1.2.4e}$$

zueinander aufweisen. Praktische Bedeutung haben hier vor allem sechssträngige Wicklungen. Obgleich die Summe aller Ströme bzw. Spannungen Null ist, sind Polygonschaltungen nur in solchen Teilen möglich, innerhalb derer alle in Polygon geschalteten Stränge denselben Versatzwinkel zueinander haben. Sechssträngige Wicklungen lassen sich also z. B. in zwei getrennte Dreiecke schalten.

Besitzt die Strangzahl keinen ungeradzahligen Teiler, d. h. ist sie eine Potenz von 2, so ist die Summe aller Ströme bzw. Spannungen immer von Null verschieden, wie im Bild 1.2.2 für $m = 2$ und $m = 4$ erkennbar ist. Eine Entlastung des Sternpunkts bei Sternschaltung ist also nicht möglich. Wie das Beispiel $m = 4$ zeigt, lässt sich die Höhe der Sternpunktbelastung durch Umpolen einzelner Stränge aber zumindest reduzieren. Praktische Bedeutung besitzen vor allem zweisträngige Wicklungen, die bei Einphasenmaschinen mit Haupt- und Hilfsstrang eingesetzt werden, welche einen räumlichen Versatzwinkel von

$$\gamma'_\mathrm{m} = \frac{\pi}{2p} \tag{1.2.4f}$$

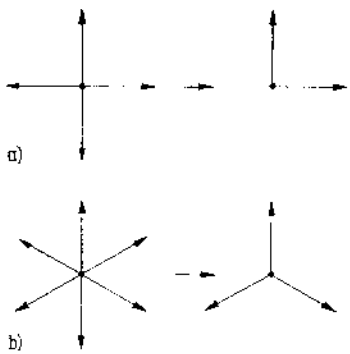


Bild 1.2.3 Reduktion von Mehrphasensystemen. a) Reduktion in ein reduziertes System; b) Reduktion in ein normales System

zueinander haben und deren Ströme bzw. Spannungen im Idealfall um

$$\varphi_{\mathrm{m}} = \frac{\pi}{2} \tag{1.2.4g}$$

phasenverschoben sind.

Die vorstehend beschriebenen Systeme mit geradzahliger Strangzahl bezeichnet man auch als *reduzierte Mehrphasensysteme*, da sich bei einer Verdoppelung der Phasenzahl, d. h. bei Ergänzung jedes Zeigers durch einen um 180° verschobenen, jeweils ein vollständig symmetrischer Zeigerstern aus $2m$ Zeigern mit einer Verschiebung von jeweils π/m ergibt. Ein Mehrphasensystem mit solch einem vollständig symmetrischen Zeigerstern wird als *radialsymmetrisches Mehrphasensystem* bezeichnet.

Vollständig radialsymmetrische Mehrphasensysteme mit beliebiger Phasenzahl können in drei Gruppen eingeteilt werden. Mehrphasensysteme mit ungerader Phasenzahl werden als *normale Systeme* bezeichnet. Radialsymmetrische Mehrphasensysteme, deren Phasenzahl 2 als einzigen geradzahligen Teiler hat, lassen sich durch Zusammenfassen der jeweils um 180° verschobenen Zeiger zu einem normalen System reduzieren (s. Bild 1.2.3b). Alle übrigen Mehrphasensysteme lassen sich auf gleiche Weise in ein reduziertes System überführen (s. Bild 1.2.3a).

Elektronisch gespeiste Kleinmaschinen wie Schrittmotoren oder EC-Motoren (s. Bd. *Grundlagen elektrischer Maschinen*, Abschn. 9.1 bzw. 9.2) werden z. T. mit Paaren von genau in derselben Achse magnetisierenden Wicklungsteilen ausgeführt, die allerdings jeweils nur eine Stromhalbwelle führen (sog. unipolare Speisung, s. Bd. *Grundlagen elektrischer Maschinen*, Abschn. 9.1.1). In manchen Veröffentlichungen werden Maschinen mit zwei um $\pi/2p$ am Umfang versetzt angeordneten Paaren von Wicklungsteilen als viersträngige Maschinen bezeichnet. Im Sinne der hier eingeführten Systematik, bei der verschiedene Stränge immer in voneinander verschiedenen Achsen magnetisieren, sind dies eindeutig zweisträngige Maschinen, die mit einem reduzierten Zweiphasensystem – wenngleich in unipolarer Variante – gespeist werden.

1.2.1.2 Gesetze der Zonenbildung

Im Abschnitt 1.1.1.1 wurde die Zonenbildung zunächst im Wesentlichen bei Einschichtwicklungen betrachtet. Zweischichtwicklungen bilden in jeder Schicht Zonen aus, die *Oberschichtzonen* und die *Unterschichtzonen* (s. Bilder 1.2.4 u. 1.2.11a,

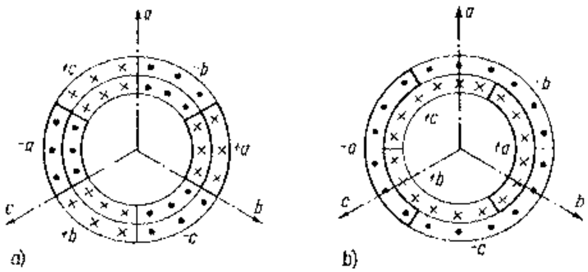


Bild 1.2.4 Zonenbildung von Zweischichtwicklungen. a) Normale Zonenbildung; b) Bildung von Zonen mit doppelter Zonenbreite

S. 39). Diese doppelte Zonenzahl deutet schon auf die doppelte Spulengruppenzahl bzw. Spulenzahl der Zweischichtwicklung gegenüber der Einschichtwicklung hin. Es wird vereinbart, die Spulen der Zweischichtwicklung so anzuordnen, dass deren linke Spulenseiten die Oberschichtzonen und deren rechte Spulenseiten die Unterschichtzonen bilden. Bei gesehnten Zweischichtwicklungen sind die Unterschichtzonen gegenüber den Oberschichtzonen verschoben (s. Bild 1.2.11b). Übereinanderliegende Zonen können auch unterschiedliche Breiten haben. Man spricht dann von einer *Zonenänderung* (s. Bild 1.2.11c). Ferner besteht bei der Zweischichtwicklung die bereits im Abschnitt 1.2.1.1 angedeutete Möglichkeit der Ausführung von Wicklungen mit doppelter Zonenbreite, was praktisch nur bei polumschaltbaren Wicklungen angewendet wird (s. Abschn. 1.2.2.3f, S. 60). Wie ebenfalls schon erwähnt worden ist, ergeben sich bei Bruchlochwicklungen zwangsläufig unterschiedliche Werte der Spulenzahl je Spulengruppe. Damit werden auch die Zonen (wie schon bei Wicklungen mit Zonenänderung) unterschiedlich breit. Diese Veränderung der Zonenbreite nennt man *natürliche Zonenänderung*. Schließlich soll noch erwähnt werden, dass Teile von Zonen eines Strangs in Zonen eines benachbarten anderen Strangs liegen können. Man spricht dann von einer *Zonenverschachtelung* bzw. *Strangverschachtelung*.

Bei Einschichtwicklungen benötigt jede Spule zwei Nuten. Auf jede Nut entfällt also eine halbe Spule ($u = \frac{1}{2}$). Bei Zweischichtwicklungen liegen in jeder Nut zwei Spulenseiten übereinander. Nach (1.1.19) ist damit die Gesamtspulenzahl der Wicklung für eine

Einschichtwicklung $k = Nu = N/2,$ (1.2.5a)

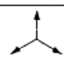
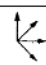
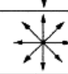
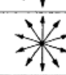
Zweischichtwicklung $k = Nu = N.$ (1.2.5b)

Einschichtwicklungen (s. Bild 1.2.1) und Zweischichtwicklungen mit doppelter Zonenbreite (s. Bild 1.2.4b) bilden eine Spulengruppe je Strang und Polpaar. Zweischichtwicklungen mit normaler Zonenbreite (s. Bild 1.2.4a) bilden zwei Spulengruppen je Strang und Polpaar. Für die elektrische Maschine mit p Polpaaren ergibt sich demnach als Gesamtzahl der Spulengruppen bei Einschichtwicklungen und bei Zweischichtwicklungen mit doppelter Zonenbreite pm und bei Zweischichtwicklungen mit einfacher Zonenbreite $2pm$. Mit $Q_\mathrm{m} = q$ bei einfacher bzw. $Q_\mathrm{m} = 2q$ bei doppelter Zonenbreite erhält man entsprechend (1.2.1) für die mittlere Zonenbreite $b_\mathrm{zm} = Q_\mathrm{m}\tau_\mathrm{n}$ und den mittleren Zonenwinkel $\alpha_\mathrm{zm} = Q_\mathrm{m}\alpha_\mathrm{n}$ über (1.1.8),

Tabelle 1.2.1 Kennwerte der Strangwicklungen

Wicklung	**Spulenzahl k**	**Spulengruppenzahl**	**Mittlere Spulenzahl je Gruppe Q_m**	**Mittlere Zonenbreite b_{zm}**	**Mittlerer Zonenwinkel α_{zm}**
Einschichtwicklung	$N/2$	pm	q	τ_p/m	π/m
Zweischichtwicklung mit normaler Zonenbreite	N	$2pm$	q	τ_p/m	π/m
Zweischichtwicklung mit doppelter Zonenbreite	N	pm	$2q$	$2\tau_p/m$	$2\pi/m$

Tabelle 1.2.2 Mehrphasensysteme elektrischer Maschinen

Strangzahl m	Mehrphasensysteme elektrischer Maschinen normale Systeme	reduzierte Systeme	Zugehörige unreduzierte Systeme
1			
2			
3			
4			
5			
6			

(1.1.14) und (1.1.16) die in Tabelle 1.2.1 angegebenen Ausdrücke. Sie gelten für Wicklungen ohne freie Nuten.

In Tabelle 1.2.2 sind einige Kennwerte von Strangwicklungen zusammengestellt. Daraus ist unschwer der für eine symmetrische Speisung einer mehrsträngigen Wicklung erforderliche Phasenverschiebungswinkel zu ermitteln. Dieser sog. *Strangwinkel* beträgt für normale Mehrphasensysteme

$$\alpha_{\mathrm{str}} = \frac{2\pi}{m} \tag{1.2.6a}$$

und für reduzierte Mehrphasensysteme

$$\alpha_{\mathrm{str}} = \frac{\pi}{m}. \tag{1.2.6b}$$

1.2.1.3 Symmetriebedingung

Eine Strangwicklung ist symmetrisch, wenn sie bei Speisung durch ein symmetrisches, ggf. reduziertes Mehrphasensystem eine Hauptwelle des Luftspaltfelds zu entwickeln vermag bzw. wenn die unter der Einwirkung der Hauptwelle in der

Wicklung induzierten Spannungen ein symmetrisches, ggf. reduziertes Mehrphasensystem bilden. Letzteres ist dann der Fall, wenn die in den Strängen induzierten Spannungen gleiche Amplitude und eine gegenseitige Phasenverschiebung nach (1.2.6a,b) haben. Hierzu ist, gleiche Windungszahlen aller Spulen vorausgesetzt, die Einhaltung von zwei Symmetriebedingungen notwendig:

Erste Symmetriebedingung: Die Spulenzahl der einzelnen Stränge muss gleich und normalerweise auch ganzzahlig sein.

Zweite Symmetriebedingung: Zu jedem Zeiger im Nutenspannungsstern der Wicklung, den man dem ersten der m Wicklungsstränge zuordnet, müssen $m-1$ weitere Zeiger mit einer Phasenverschiebung nach (1.2.6a,b) existieren.

Wie ohne Weiteres einzusehen ist, genügt im Hinblick auf die Symmetrie das Einhalten der zweiten Symmetriebedingung, da diese eine symmetrische Aufteilung aller Nuten auf die einzelnen Stränge gewährleistet. Dabei kann sich jedoch eine ungerade Nutzahl je Strang ergeben, die im Fall der Einschichtwicklung keine ganzzahlige Spulenzahl je Strang zur Folge hätte.

Konsequenzen aus der ersten Symmetriebedingung:
Nach (1.2.5a,b) ist die Spulenzahl der Einschichtwicklung $N/2$ und die der Zweischichtwicklung N. Damit erhält man unter Berücksichtigung von (1.2.2) für die erste Symmetriebedingung

bei der Einschichtwicklung $$\frac{N}{2m} = pq \in \mathbb{N}, \qquad (1.2.7a)$$

bei der Zweischichtwicklung $$\frac{N}{m} = 2pq \in \mathbb{N}. \qquad (1.2.7b)$$

Die erste Symmetriebedingung der Zweischichtwicklung ist leichter zu erfüllen. Das ist ein Grund für die größere Zahl der Freiheitsgrade beim Entwurf solcher Wicklungen.

Einen Sonderfall stellt dabei die Einschichtstabwicklung dar. Mit ihr kann man ‚halbe' Windungen ausführen (s. Bild 1.2.5), die nur mit dem halben Fluss verkettet sind. Eine solche Wicklung entsteht bei ungerader Nutzahl je Strang, und es gilt als erste Symmetriebedingung (1.2.7b).

Konsequenzen aus der zweiten Symmetriebedingung:
Die zweite Symmetriebedingung erfordert, dass der Strangwinkel α_{str} nach (1.2.6a,b) ein ganzzahliges Vielfaches des Zeigerwinkels α_{z} nach (1.1.10), Seite 14, sein muss. Demnach gilt für normale Mehrphasensysteme

$$\frac{\alpha_{\mathrm{str}}}{\alpha_{\mathrm{z}}} = \frac{2\pi N}{m 2\pi t} = \frac{N}{mt} \in \mathbb{N} \qquad (1.2.8a)$$

und für reduzierte Mehrphasensysteme

$$\frac{\alpha_{\mathrm{str}}}{\alpha_{\mathrm{z}}} = \frac{\pi N}{m 2\pi t} = \frac{N}{2mt} \in \mathbb{N}. \qquad (1.2.8b)$$

Bei Zweischichtwicklungen ist die erste Symmetriebedingung in der zweiten Symmetriebedingung enthalten. Bei Einschichtwicklungen ist die erste Symmetriebedingung in der zweiten Symmetriebedingung für reduzierte Mehrphasensysteme enthalten.

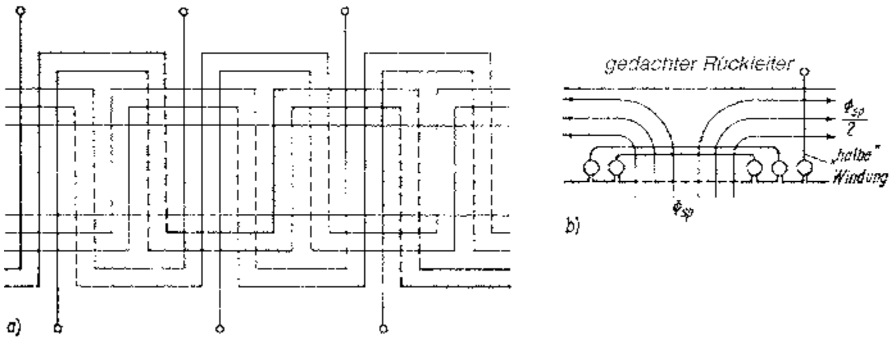


Bild 1.2.5 Einschichtstabwicklung mit ‚halben‘ Windungen. a) Wicklungsschema; b) Verkettung mit dem Spulenfluss Φ_{sp}

1.2.1.4 Ganzlochwicklungen

Als erstes Anwendungsbeispiel soll die *Symmetrie von Ganzlochwicklungen* untersucht werden. Die erste Symmetriebedingung

$$\frac{N}{2m} = pq \in \mathbb{N} \quad \text{bzw.} \quad \frac{N}{m} = 2pq \in \mathbb{N}$$

ist immer erfüllt, da p und q ganzzahlig sind. Für Ganzlochwicklungen ist die Nutzahl $N = 2pqm$ nach (1.2.2) ein Produkt ganzzahliger Faktoren. Dann ist der größte gemeinsame Teiler t von N und p die Polpaarzahl p selbst. Eine Ganzlochwicklung wiederholt sich also nach jedem Polpaar. Wird $t = p$ in die zweite Symmetriebedingung eingesetzt, so ergibt sich mit (1.2.2)

$$\frac{N}{mt} = \frac{N}{mp} = 2q \in \mathbb{N} \quad \text{bzw.} \quad \frac{N}{2mt} = \frac{N}{2mp} = q \in \mathbb{N}.$$

Die zweite Symmetriebedingung wird also von Ganzlochwicklungen auch stets erfüllt.

Ganzlochwicklungen sind stets symmetrisch.

Wegen $t = p$ ist nach (1.1.11) $\alpha_\mathrm{n} = \alpha_\mathrm{z}$. Der Nutenspannungsstern der Ganzlochwicklung hat eine fortlaufende Bezifferung (s. Abschn. 1.1.2.2c, Bsp. 1, u. Bild 1.1.13a, S. 16).

1.2.1.5 Symmetrische Bruchlochwicklungen

Bruchlochwicklungen sind nicht von vornherein symmetrisch. Eine günstigere Formulierung der Symmetriebedingungen, die im Folgenden hergeleitet wird, gestattet eine Berücksichtigung der Symmetriebedingungen bereits beim ersten Schritt des Entwurfs einer Wicklung. Der erste Entwurfsschritt ist die Wahl der Nutzahl je Pol und Strang, d. h. der Lochzahl q, die nach einer überschlägigen Schätzung der Nutzahl erfolgt. Ausgangspunkt der genannten Herleitung ist die Zerlegung der Nutzahl je Pol und Strang in einen teilerfremden gemeinen Bruch entsprechend

$$q = \frac{z}{n}. \tag{1.2.9}$$

Dabei ist der Nenner n eine den Charakter und den Entwurfsgang einer Bruchlochwicklung bestimmende Größe.

a) Einhaltung der ersten Symmetriebedingung

Mit (1.2.9) geht die erste Symmetriebedingung für Einschichtwicklungen entsprechend (1.2.7a)

$$\frac{N}{2m} = pq = p\frac{z}{n} \in \mathbb{N}$$

über in die Bedingung

$$\frac{p}{n} \in \mathbb{N}, \tag{1.2.10a}$$

denn da z und n teilerfremd sind, kann n nur in p ganzzahlig enthalten sein. Man erkennt, dass die normalerweise als Ausgangsgröße des Entwurfs vorliegende Polpaarzahl p sofort die für n möglichen Werte festlegt.

n muss ein ganzzahliger Bruchteil der Polpaarzahl p sein.

Für Zweischichtwicklungen und Einschichtstabwicklungen gilt mit (1.2.7b)

$$\frac{N}{m} = 2pq = 2p\frac{z}{n} \in \mathbb{N},$$

und damit erhält man die Bedingung

$$\frac{2p}{n} \in \mathbb{N}. \tag{1.2.10b}$$

Die Beziehung (1.2.10b) zeigt wieder die größere Freiheit beim Entwurf der Zweischichtwicklung, da sie mehr mögliche Werte für n zulässt als (1.2.10a).

n muss ein ganzzahliger Bruchteil der Polzahl $2p$ sein.

So ist es z. B. unmöglich, für $p = 1$ eine Einschicht-Bruchlochwicklung auszuführen, da dann $n = 1$ sein muss, während eine Zweischicht-Bruchlochwicklung mit $n = 2$ möglich ist.

b) Einhaltung der zweiten Symmetriebedingung

Die Anwendung der zweiten Symmetriebedingung (1.2.8a,b) erfordert die Bestimmung der Zahl der Urverteilungen t als größten gemeinsamen Teiler von N und p. Dieser Teiler lässt sich aus den Beziehungen

$$N = 2pqm = 2mz\frac{p}{n} \quad \text{und} \quad p = n\frac{p}{n}$$

ermitteln. Bei $p/n \in \mathbb{N}$ nach (1.2.10a) ist p/n folglich ein Teiler von N und p. Da z und n teilerfremd sind, können weitere Teiler von N und p nur in $2m$ und n enthalten sein. Diese Teiler sollen allgemein mit c bezeichnet werden, und es gilt

$$t = c\frac{p}{n}. \tag{1.2.11}$$

Damit wird aus der zweiten Symmetriebedingung für normale Mehrphasensysteme nach (1.2.8a)

$$\frac{N}{mt} = \frac{2mz\frac{p}{n}}{mc\frac{p}{n}} = \frac{2z}{c} \in \mathbb{N}. \tag{1.2.12}$$

Tabelle 1.2.3 Symmetriebedingungen für Bruchlochwicklungen

$q = \frac{z}{n}$; **z und n teilerfremd**	
Wicklungsart	**Symmetriebedingung**
Einschichtwicklung	$\frac{p}{n} \in \mathbb{N}$
Zweischichtwicklung Einschichtstabwicklung	$\frac{2p}{n} \in \mathbb{N}$
alle	$\mathrm{ggT}\,\{n, m\} = 1$

Als Teiler von n kann c kein Teiler von z sein. Mithin sind für c nur die beiden Werte $c = 1$ und $c = 2$ möglich. Für reduzierte Mehrphasensysteme gilt mit (1.2.8b)

$$\frac{N}{2mt} = \frac{2mz\frac{p}{n}}{2mc\frac{p}{n}} = \frac{z}{c} \in \mathbb{N}. \tag{1.2.13}$$

Diese Beziehung lässt nur den Wert $c = 1$ zu.

Für normale Mehrphasensysteme gilt nach Abschnitt 1.2.1.1 bzw. Tabelle 1.2.2 $m \in \mathbb{U}$. Der Teiler $c = 2$ von $2m$ und n steckt also nicht in m. Für reduzierte Mehrphasensysteme gilt zwar $m \in \mathbb{G}$, aber dafür kann c nur den Wert 1 haben. Die zweite Symmetriebedingung lässt sich demnach ganz allgemein formulieren als

$$\mathrm{ggT}\,\{n, m\} = 1. \tag{1.2.14}$$

Für $m = 3$ darf n also nicht durch 3 teilbar sein. Aus den Bedingungen (1.2.10a) und (1.2.14) folgt: Wenn in p nur der Faktor 3 enthalten ist ($p = 3, 9, 27 \ldots$), lässt sich keine Einschicht-Bruchlochwicklung ausführen, da die nach Bedingung (1.2.10a) notwendige Teilbarkeit von n durch 3 der Bedingung (1.2.14) widerspricht.

Für $m = 2$ darf n nicht durch 2 teilbar sein. Gilt $p = 2^x$, so lässt sich für $m = 2$ keine symmetrische Bruchlochwicklung ausführen, da nach Gl. (1.2.10a,b) n durch 2 teilbar sein müsste. Die zweite Symmetriebedingung resultiert aus den notwendigen Phasenbeziehungen zwischen den Strängen. Existiert nur *ein* Strang, so entfällt die Anwendung der zweiten Symmetriebedingung.

Für $m = 1$ lautet die zweite Symmetriebedingung entsprechend (1.2.8a) $N/mt = N/t \in \mathbb{N}$. Da t ein Teiler von N ist, ist diese Bedingung stets erfüllt. In Tabelle 1.2.3 sind die Symmetriebedingungen für Bruchlochwicklungen zusammengestellt.

c) Wicklungen mit freien Nuten

Nach Unterabschnitt b sind für bestimmte Polpaarzahlen normalerweise keine symmetrischen Einschicht-Bruchlochwicklungen ausführbar. Lässt man jedoch in diesem Fall einige Nuten unbewickelt (freie Nuten), so wird die Ausführung möglich. Von den Wicklungen, die aus Symmetriegründen freie Nuten haben, sind nur solche für $m = 3$ von Bedeutung. Im Folgenden sollen daher nur dreisträngige Einschicht-Bruchlochwicklungen behandelt werden.

Natürlich müssen die N_0 freien Nuten so auf die drei Stränge verteilt werden, dass sich für jeden Strang die gleiche Leiterverteilung ergibt. Die Zahl der freien Nuten muss also durch 3 teilbar sein, und der Nutenwinkel zwischen den einander entsprechenden freien Nuten der drei Stränge muss 120° betragen. Die erste Symmetriebedingung (1.2.7a) betrifft die Notwendigkeit einer gleichen Anzahl von Spulen pro Strang. Sie gilt demnach für die Zahl der bewickelten Nuten, d. h. sie lautet jetzt

$$\frac{N - N_0}{6} \in \mathbb{N}. \tag{1.2.15}$$

Die zweite Symmetriebedingung (1.2.8a) resultiert aus dem relativen Abstand zwischen zwei Nuten, d. h. der Nutteilung, und der Polpaarteilung. Sie ist daher auf die gesamte Nutzahl anzuwenden entsprechend

$$\frac{N}{3t} \in \mathbb{N}. \tag{1.2.16}$$

Demzufolge gilt auch die zweite Form (1.2.14) der zweiten Symmetriebedingung

$$\mathrm{ggT}\,\{n, 3\} = 1.$$

Der Grund, weshalb unter Nutzung freier Nuten auch für $p = 1, 3, 9, 27\ldots$ eine Einschicht-Bruchlochwicklung ausführbar ist, liegt darin, dass (1.2.15) eine ungerade Nutzahl je Strang bei einer geraden Zahl bewickelter Nuten je Strang zulässt. Damit gelten die Beziehungen (1.2.7b) und (1.2.10b), was mindestens $n = 2$ ermöglicht. Auch für die übrigen Polpaarzahlen verdoppelt sich die Zahl möglicher Entwürfe.

Mit $N/3 \in \mathbb{U}$ fordert (1.2.15)

$$\frac{N_0}{3} \in \mathbb{U}. \tag{1.2.17}$$

Meistens wählt man $N_0 = 3$, da größere Zahlen freier Nuten keinen weiteren Vorteil, wohl aber den Nachteil geringer Ausnutzung der vorhandenen Nuten mit sich bringen. Für Wicklungen mit freien Nuten und normaler Zonenbreite beträgt die mittlere Spulenzahl je Spulengruppe entsprechend (1.2.6a)

$$Q_\mathrm{m} = \frac{k}{pm} = \frac{N - N_0}{2pm} = \frac{N}{2pm} - \frac{N_0}{2pm} = q - \frac{N_0}{2pm}. \tag{1.2.18}$$

1.2.1.6 Urwicklungen

Im Unterabschnitt 1.1.2.2b, Seite 13, ist festgestellt worden, dass sich die Nutenverteilung einer Wicklung nach $p' = p/t$ Polpaaren wiederholt. Es gibt dann t elektrisch völlig gleichwertige Nutenverteilungen, von denen jede einen Zeigerkreis des Nutenspannungssterns, d. h. alle möglichen Phasenwinkel der Nutenspannungen, umfasst. Es liegt der Gedanke nahe zu klären, ob sich die Spulenseiten dieser t gleichwertigen Urverteilungen zu t gleichwertigen selbstständigen symmetrischen Wicklungsteilen schalten lassen. Das ist offensichtlich dann der Fall, wenn die N' Nuten jeder der t Urverteilungen die erste Symmetriebedingung erfüllen. Die zweite Symmetriebedingung braucht nicht überprüft zu werden. Sie bezieht sich ja auf die Zeigerverteilung im Nutenspannungsstern, und diese ist für jeden der t Zeigerkreise des Nutenspannungssterns, d. h. für jede der t Urverteilungen, dieselbe.

Wenn N'/m geradzahlig ist, dann lässt sich nach (1.2.7a,b) mit den N' Nuten sowohl eine Einschicht- als auch eine Zweischichtwicklung ausführen. Ist N'/m ungeradzahlig, so kann nur eine Zweischichtwicklung realisiert werden. Zur Ausführung einer Einschichtwicklung ist eine gerade Nutzahl je Strang erforderlich. Für den kleinsten selbstständigen symmetrischen Wicklungsteil einer Einschichtwicklung benötigt man dann also zwei der t Urverteilungen mit insgesamt $2N'$ Nuten.

Den kleinsten selbstständigen symmetrischen Wicklungsteil einer Strangwicklung nennt man *Urwicklung*. Die gesamte Strangwicklung ist, wenn sie nicht allein aus der Urwicklung besteht, eine Kombination (in Reihen- oder/und Parallelschaltung) solcher Urwicklungen. Daraus folgt, dass man beim Entwurf einer Strangwicklung nur die Urwicklung zu entwerfen braucht. Je nachdem, ob N'/m geradzahlig oder ungeradzahlig ist, unterscheidet man Urwicklungen erster Art und zweiter Art.

a) Urwicklung erster Art

Für die Urwicklung erster Art gilt

$$\frac{N'}{m} = \frac{N}{mt} \in \mathbb{G}. \tag{1.2.19}$$

Da c nach Unterabschnitt 1.2.1.5b kein Teiler von z ist, ergibt im Fall des normalen Mehrphasensystems nach (1.2.12) nur $c = 1$ eine gerade Zahl für N/mt. Abgesehen von den nach Unterabschnitt 1.2.1.5b nicht möglichen Werten von n entsprechend z. B. (1.2.14) erfordert $c = 1$ stets ungeradzahlige Werte für n. Mit

$$t = c\frac{p}{n} = \frac{p}{n}$$

entsprechend (1.2.11) wird nach (1.1.11), Seite 15,

$$\alpha_\mathrm{n} = \frac{p}{t}\alpha_\mathrm{z} = n\alpha_\mathrm{z}.$$

Reduzierte Mehrphasensysteme bilden stets Urwicklungen erster Art, da (1.2.13) nur geradzahlige Werte für N/mt zulässt. Außerdem gilt ebenfalls $c = 1$ und $n \in \mathbb{U}$.

Wie schon erwähnt, umfasst die Urwicklung erster Art genau $t^* = 1$ Urverteilung der Spulenseiten. Die Nutzahl N^* der Urwicklung erster Art ist daher gleich der Nutzahl $N' = N/t$, und die Polpaarzahl p^* der Urwicklung erster Art ist gleich der Polpaarzahl $p' = p/t$. Die gesamte Wicklung umfasst also t Urwicklungen erster Art. Damit hat die Urwicklung erster Art die Kennwerte (vgl. Tabelle 1.2.4)

$$N^* = N' = \frac{N}{t}, \quad p^* = p' = \frac{p}{t} = n, \quad t^* = 1. \tag{1.2.20}$$

Da $N^* \in \mathbb{G}$ und $p^* \in \mathbb{U}$ ist, wiederholt sich die Abfolge der Zahl von Spulen je Spulengruppe Q innerhalb der Urwicklung zweimal, jedoch mit jeweils entgegengesetztem Durchlaufsinn. Diese zwei Hälften können bei Bedarf einander parallelgeschaltet werden, so dass sich maximal $a_\mathrm{max} = 2t$ parallele Wicklungszweige ausführen lassen.

Mit ihren Kennwerten erfüllt die Urwicklung erster Art beide Symmetriebedingungen nach (1.2.7a,b) und (1.2.8a,b), denn es ergibt sich nach (1.2.19) ein ganzzahliger Wert für N/mt bzw. $N/2mt$.

b) Urwicklung zweiter Art

Das Kennzeichen der Urwicklung zweiter Art ist

$$\frac{N'}{m} = \frac{N}{mt} \in \mathbb{U}. \tag{1.2.21}$$

Nach (1.2.12) und (1.2.13) kann (1.2.21) nur von normalen Mehrphasensystemen und nur von $c = 2$, d. h. nur bei geradzahligem n, erfüllt werden. Damit ergibt sich nach (1.2.11)

Tabelle 1.2.4 Kennwerte von Urwicklungen

Kennzeichen	$\frac{N}{tm} \in \mathbb{G}$	$\frac{N}{tm} \in \mathbb{U}$	
Bezeichnung	Urwicklung 1. Art	Urwicklung 2. Art	
Nenner n	$\in \mathbb{U}$	$\in \mathbb{G}$	
Zahl der Urverteilungen t	$\frac{p}{n}$	$2\frac{p}{n}$	
Maximalzahl paralleler Wicklungszweige $a_{\max}$	$2t = 2\frac{p}{n}$	$t = 2\frac{p}{n}$	
Nutenwinkel α_{n}	$n\alpha_{\mathrm{z}}$	$\frac{n}{2}\alpha_{\mathrm{z}}$	
Wicklungsart	Einschichtwicklungen Zweischichtwicklungen	Einschicht-wicklungen	Zweischicht-wicklungen
Nutzahl der Urwicklung N^*	$\frac{N}{t}$	$2\frac{N}{t}$	$\frac{N}{t}$
Polpaarzahl der Urwicklung p^*	$\frac{p}{t} = n$	$2\frac{p}{t} = n$	$\frac{p}{t} = \frac{n}{2}$
Zahl der Urverteilungen je Urwicklung t^*	1	2	1

$$t = c\frac{p}{n} = 2\frac{p}{n}$$

und nach (1.1.11)

$$\alpha_{\mathrm{n}} = \frac{p}{t}\alpha_{\mathrm{z}} = \frac{n}{2}\alpha_{\mathrm{z}}.$$

Die normale Einschichturwicklung zweiter Art erfüllt die erste Symmetriebedingung nach (1.2.7a) nur, wenn man $t^* = 2$ und $N^* = 2N'$ wählt. Nur dann ist

$$\frac{N^*}{2m} = \frac{N'}{m} = \frac{N}{mt} \in \mathbb{N}.$$

Die Einschichturwicklung zweiter Art umfasst also zwei aufeinander folgende der t Urverteilungen. Ihre Kennwerte sind demzufolge

$$N^* = 2\frac{N}{t}, \quad p^* = 2\frac{p}{t} = n, \quad t^* = 2. \tag{1.2.22}$$

Mit diesen Werten wird auch die zweite Symmetriebedingung nach (1.2.8a) erfüllt; es ist

$$\frac{N^*}{mt^*} = \frac{2N'}{2m} = \frac{N}{mt} \in \mathbb{N}.$$

Die Zweischichturwicklung zweiter Art erfüllt die erste Symmetriebedingung nach (1.2.7b) bereits mit der Nutzahl $N^* = N'$; es ist

$$\frac{N^*}{m} = \frac{N'}{m} = \frac{N}{mt} \in \mathbb{N}.$$

Ihre Kennwerte sind demnach

$$N^* = \frac{N}{t}, \quad p^* = \frac{p}{t} = \frac{n}{2}, \quad t^* = 1. \tag{1.2.23}$$

Die zweite Symmetriebedingung (1.2.8a) wird ebenfalls erfüllt; es ist

$$\frac{N^*}{m} = \frac{N'}{m} = \frac{N}{mt} \in \mathbb{N}.$$

Wegen $N^* \in \mathbb{U}$ lassen sich maximal $a_{\max} = t$ parallele Wicklungszweige schalten.
In Tabelle 1.2.4 sind die Kennwerte von Urwicklungen zusammengestellt.

c) Ganzlochurwicklungen

Nach Abschnitt 1.2.1.4 gilt $t = p$. Die Urwicklung einer Ganzlochwicklung umfasst also stets ein Polpaar. Für normale Mehrphasensysteme ergibt damit die zweite Symmetriebedingung nach (1.2.8b)

$$\frac{N}{mt} = \frac{N}{mp} = 2q \in \mathbb{G},$$

was nach (1.2.19) das Kennzeichen einer Urwicklung erster Art ist. Entsprechend (1.2.20) gilt daher

$$N^* = \frac{N}{p}, \quad p^* = \frac{p}{p} = 1, \quad t^* = 1. \tag{1.2.24}$$

Da auch Ganzlochwicklungen für reduzierte Mehrphasensysteme nach Unterabschnitt a Urwicklungen erster Art bilden, gilt:
- Ganzlochurwicklungen sind stets erster Art;
- Ganzlochurwicklungen umfassen nur ein Polpaar.

1.2.2 Wicklungsentwurf

Beim Entwurf einer Wicklung mit ausgebildeten Strängen handelt es sich um die Aufgabe, die in den N Nuten liegenden Spulenseiten für gegebene Werte der Polpaarzahl p und der Strangzahl m unter Beachtung der geltenden Wicklungsgesetze und unter Einhaltung zusätzlicher Nebenbedingungen zur vollständigen Wicklung zusammenzuschalten. Diese Aufgabe umfasst die Schritte
- Aufteilung der Spulenseiten auf die Stränge,
- Schaltung der Spulenseiten zu Spulen,
- Schaltung der Spulen zu Spulengruppen,
- Schaltung der Spulengruppen zu Strängen.

Eine wesentliche Randbedingung beim Wicklungsentwurf ist die Einhaltung der im Abschnitt 1.2.1.3 formulierten Symmetriebedingungen.

Der für das elektrische Verhalten einer Wicklung entscheidende Schritt ist die Aufteilung der Spulenseiten auf die Stränge. Dieser Schritt stellt zugleich den schwierigsten Teil des Wicklungsentwurfs dar. Um ihn zu erleichtern, sind viele Entwurfsschemata entwickelt worden, die den raschen Entwurf aller komplizierten Wicklungen gestatten. Der Nachteil solcher Schemata ist jedoch, dass man zu ihrer Anwendung eine Reihe schematischer, mehr oder weniger anschaulicher Regeln kennen muss, wobei zumeist der Zusammenhang mit der tatsächlichen Wicklung verloren geht. Der Aufgabe eines Lehrbuchs entsprechend sollen in diesem Abschnitt Entwurfsverfahren behandelt werden, die den tatsächlichen Wicklungsaufbau klar erkennen lassen. Für komplizierte Wicklungen bedeuten die darzustellenden Verfahren zwar einen größeren Zeitaufwand, aber dieser wird durch die größere Anschaulichkeit gerechtfertigt. Das Gesagte gilt auch für den in der Praxis stehenden Berechner. Die gängigen Wicklungen vermag jeder Berechner ohne besondere Schemata zu entwerfen, und für die wenigen übrig bleibenden komplizierteren Fälle lohnt sich nicht der Aufwand des Erlernens eines Entwurfsschemas.

Der übersichtlicheren Darstellung wegen beschränken sich die folgenden Unterabschnitte auf Wicklungen mit ungerader Strangzahl m. Die entwickelten

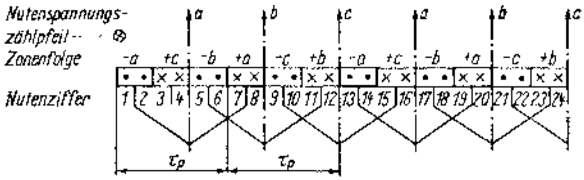


Bild 1.2.6 Zonenplan einer Einschicht-Ganzlochwicklung für $p = 2$, $m = 3$, $N = 24$, $q = 2$

Zusammenhänge sind jedoch mit geringen Anpassungen auf gerade Strangzahlen übertragbar.

1.2.2.1 Ganzlochwicklungen

Der Aufbau einer Ganzlochwicklung ist so einfach, dass die Aufteilung der Spulenseiten nach der im Abschnitt 1.2.1.2 behandelten Bildung der Zonen ohne Weiteres erfolgen kann. Jede Zone umfasst – abgesehen vom im Unterabschnitt b beschriebenen Sonderfall einer Ganzlochwicklung mit Zonenänderung – $Q = q$ Spulenseiten und gehört einem bestimmten Strang an. Entsprechend der Festlegung der positiven Zählrichtungen wird jeder Zone ein bestimmtes Vorzeichen zugeordnet, das sich auf die der Zone zugehörenden Spulenseiten überträgt. Die Darstellung der beschriebenen Zonenanordnung nennt man *Zonenplan* (s. Bilder 1.2.1 u. 1.2.4).

a) Einschichtwicklungen

Bild 1.2.6 zeigt den Zonenplan einer Einschicht-Ganzlochwicklung mit den Kennwerten $N = 24$, $p = 2$, $m = 3$. Die Zahl der Spulenseiten (bzw. der Nuten) je Zone ist nach (1.2.2)

$$Q = q = \frac{N}{2pm} = \frac{24}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 2.$$

Entsprechend der gewählten Festlegung der positiven Zählrichtungen (s. Bild 1.1.14, S. 17) besteht die erste Zone aus $Q = q = 2$ *negativen Spulenseiten* bzw. *Nuten* des Strangs a. Es folgen zwei *positive Spulenseiten* bzw. *Nuten* des Strangs c usw. Für einen anderen Wert von $Q = q$ ändert sich die Zahl der Spulenseiten bzw. Nuten je Zone. Die Strangreihenfolge $-a, +c, -b, +a, -c, +b, -a, +c, -b, \ldots$ bleibt erhalten.

Nachdem sich aus dem Zonenplan die Verteilung der Spulenseiten ergeben hat, kann die Schaltung der Spulenseiten zu Spulen erfolgen. Das geschieht im *Wicklungsschema* (s. Bild 1.2.7), wobei man zunächst die 24 Nuten durch die entsprechenden Spulenseiten und Ziffern markiert. Dabei kann man der Übersichtlichkeit halber die negativen (linken) Spulenseiten durch ausgezogene, die positiven (rechten) Spulenseiten durch gestrichelte Linien darstellen. Je eine negative (linke) Spulenseite ist nunmehr mit je einer positiven (rechten) Spulenseite, die nach Abschnitt 1.1.2.3, Seite 16, etwa eine Polteilung entfernt ist, zu einer Spule zu verbinden. Bildet man Spulen gleicher Weite wie im Bild 1.2.7a, so muss man dabei m Zonen mit je $Q = q$ Nutteilungen überschreiten. Der Wicklungsschritt beträgt demnach unter Beachtung von (1.1.15), Seite 18, und (1.2.2)

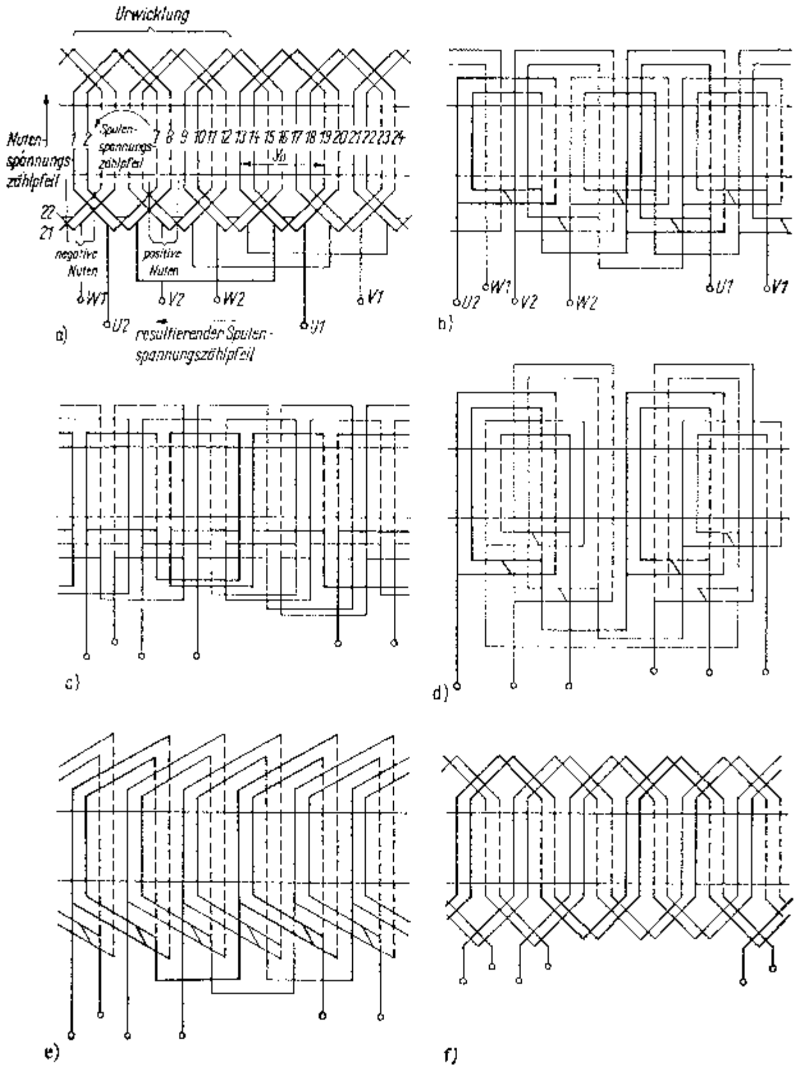


Bild 1.2.7 Beispiele von Wicklungsschemata der Einschichtwicklung für $p = 2, m = 3, N = 24, q = 2$ in unterschiedlicher Ausführung. a) Zylinder- oder Evolventenwicklung als Schleifenwicklung mit Spulen gleicher Weite; b) Zweiebenen-Schleifenwicklung mit Rechteckspulen; c) Dreiebenen-Schleifenwicklung mit geteilten Spulengruppen; d) Dreiebenen-Schleifenwicklung mit ungeteilten Spulengruppen; e) Trapezspulen-Schleifenwicklung mit gleich geformten Spulengruppen; f) Stab-Wellenwicklung

$$y = mq = \frac{N}{2p} = y_{\varnothing}. \tag{1.2.25}$$

Die Einschicht-Ganzlochwicklung ist stets eine Durchmesserwicklung. Daran ändert sich auch nichts, wenn man die Spulenseiten wie im Bild 1.2.7b zu einer Zweiebenenwicklung mit Rechteckspulen schaltet, so dass die Spulengruppen aus koaxialen Spulen bestehen. Der Begriff Durchmesserwicklung kennzeichnet das elektrische Verhalten der Wicklung, und das liegt mit der Verteilung der

Bild 1.2.8 Wicklungskopf einer Einschicht-Zylinderwicklung mit Spulen gleicher Weite

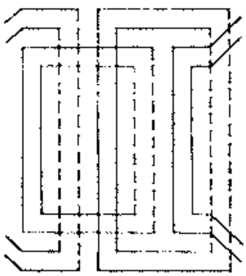


Bild 1.2.9 Zweiebenenwicklung mit gekröpfter Spulengruppe für $p = 1, m = 3, N = 12, q = 2$

Spulenseiten, die ja den Nutenspannungsstern bestimmt, fest. Bei der Rechteckspulenwicklung gibt es – abgesehen vom Trivialfall $Q = q = 1$ – immer Spulen, deren Wicklungsschritt vom Durchmesserschritt $y_\varnothing$ abweicht; im Mittel wirkt aber stets der Durchmesserschritt.

In den meisten Fällen schaltet man die Spulen einer Gruppe zur Bildung der Spulengruppe unmittelbar in Reihe. Nach Abschnitt 1.2.1.6 bildet jedes Polpaar der Ganzlochwicklung eine Urwicklung. Folglich sind alle Spulengruppen eines Strangs elektrisch gleichwertig. Sie können zur Strangbildung unter Berücksichtigung der positiven Zählrichtungen der Spulenspannungen parallel oder/und in Reihe geschaltet werden.

Bild 1.2.7 zeigt das Wicklungsschema der behandelten Einschicht-Ganzlochwicklung in sechs verschiedenen Schaltungsvarianten (s. auch Abschn. 1.1.1 u. Bild 1.1.8, S. 9). Diese sind bezüglich ihrer Wechselwirkung mit dem Luftspaltfeld identisch, da hierauf, wie bereits erwähnt, nur die Verteilung der Spulenseiten am Umfang Einfluss nimmt. Die Bezeichnung der Eingangsklemmen *U1*, *V1*, *W1* und der Ausgangsklemmen *U2*, *V2*, *W2* der drei Stränge *a*, *b* und *c* sind dabei dem Richtungssinn des resultierenden Zählpfeils der Spulenspannungen zugeordnet worden. Die Einschicht-Korbwicklung (s. Bild 1.2.7a u. f) hat den Nachteil, dass infolge der ungünstigen Kreuzungsverhältnisse im Wicklungskopf sofort nach dem Nutaustritt die zweite Ebene gebildet werden muss (s. Bild 1.2.8). Sie wird nur bei größeren Maschinen verwendet. Kleinere Maschinen werden vorwiegend mit einer Zweiebenenwicklung nach Bild 1.2.7b ausgeführt. Bei ungeraden Polpaarzahlen muss dabei eine Spulengruppe die Ebene wechseln. Sie wird als *gekröpfte Spulengruppe* ausgeführt (s. Bild 1.2.9). Der Vorteil der Trapezspulenwicklung nach Bild 1.2.7e beruht auf der günstigen Herstellung gleichgeformter Spulengruppen. Ihre Kreuzungsverhältnisse im Wicklungskopf sind günstiger als bei der Korbwicklung. Sie wird ebenfalls vorwiegend bei kleineren Maschinen angewendet. Wicklungen mit geteilten Spulengruppen nach Bild 1.2.7c und d bilden drei Ebenen. Sie haben kürzere Wicklungsköpfe, jedoch mehr Schaltverbindungen. Das bedeutet im Fall einer Spulenwicklung und besonders bei relativ großen Wicklungskopflängen wie im Fall zweipoliger Maschinen Einsparung an Wicklungsmaterial. Die Dreiebenenwicklung mit ungeteilten Spulengruppen hat den Vorteil, dass sie mechanisch

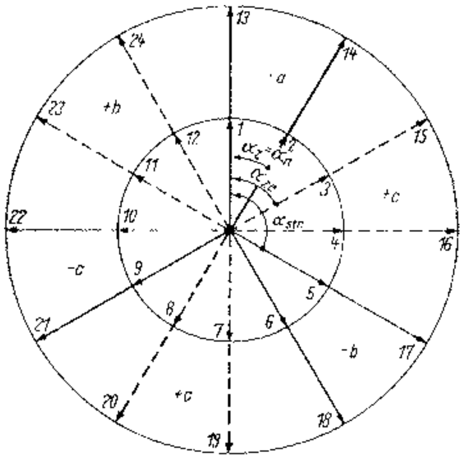


Bild 1.2.10 Nutenspannungsstern der Einschichtwicklung für $p = 2, m = 3, N = 24, q = 2, t = 2$, $N' = 12$, $\alpha_n = \alpha_z = 30°$

geteilt werden kann. Sie wird gern für große Langsamläufer vorgesehen, bei denen man aus Transportgründen Ständer und/oder Läufer zerlegbar herstellen muss. Wellenwicklungen mit ausgebildeten Strängen wendet man nur bei Stabwicklungen oder bei Mehrschicht-Steckwicklungen an. Sie haben den Vorteil der geringen Zahl von Schaltverbindungen, der besonders bei vielpoligen Maschinen zur Geltung kommt. Das beruht darauf, dass der zweite Wicklungskopf als Schaltverbindung wirkt. Im Fall der Spulenwicklungen ist das nicht möglich. Bei Wellenwicklungen sind die Spulen einer Spulengruppe nicht unmittelbar in Reihe geschaltet.

Bild 1.2.10 zeigt den Nutenspannungsstern der entworfenen Einschicht-Ganzlochwicklung. Seine Kennwerte (s. Tab. 1.1.2, S. 15) sind

Zahl der Zeigerkreise $t = p = 2$,

Zahl der Zeigerstrahlen $N' = N/t = N/p = 24/2 = 12$.

Wegen $t{=}p$ ist entsprechend (1.1.11) $\alpha_\mathrm{n} = \alpha_\mathrm{z}{=}360°{\cdot}2/24{=}30°$, und die Nutbezifferung ist fortlaufend ($p/t - 1 = 0$). Die Zugehörigkeit der einzelnen Nutenspannungszeiger zu den Zonen bzw. Strängen kann man entsprechend der Nutbezifferung aus dem Wicklungsschema übernehmen. Der Nutenspannungsstern der Einschicht-Ganzlochwicklung lässt Folgendes erkennen: Die gesamte Wicklung baut sich (wegen $p = 2$) aus zwei elektrisch völlig gleichwertigen Urwicklungen auf (s. Bild 1.2.7). Beide Urwicklungen können also strangweise parallelgeschaltet werden (Parallelschaltung der Spulengruppen).

Jedem Zeiger eines Strangs folgt um 180° verschoben ein Zeiger desselben Strangs, der zur Strangzone entgegengesetzten Vorzeichens gehört. Das ist das Kennzeichen einer Durchmesserwicklung.

Jeder der gleich breiten geometrischen Zonen im Wicklungsschema entspricht im Nutenspannungsstern eine *elektrische Zone* gleichen Zonenwinkels α_ze (s. Abschn. 1.2.1.1), die aus geschlossenen Bündeln zu je q Zeigern besteht. Es ist

$$\alpha_\mathrm{ze} = q\alpha_\mathrm{n} = \alpha_\mathrm{zm} = \frac{\pi}{m}. \tag{1.2.26}$$

Für die entworfene Wicklung mit $m = 3$ gilt also $\alpha_\mathrm{ze} = 60°$.