

## 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 gegenläufiger 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. Zahnpulsenwicklungen 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*  $\gamma'$  besteht der Zusammenhang

$$\gamma' = \frac{2x}{D}. \quad (1.1.1)$$

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

$$\gamma = p\gamma' = \frac{2px}{D} \quad (1.1.2)$$

eingeführt, die im Folgenden ebenfalls, wo sinnvoll, verwendet wird. Winkelangaben im Koordinatensystem  $\gamma'$  werden z. T. auch als *mechanischer Winkel* und Winkelangaben im Koordinatensystem  $\gamma$  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).

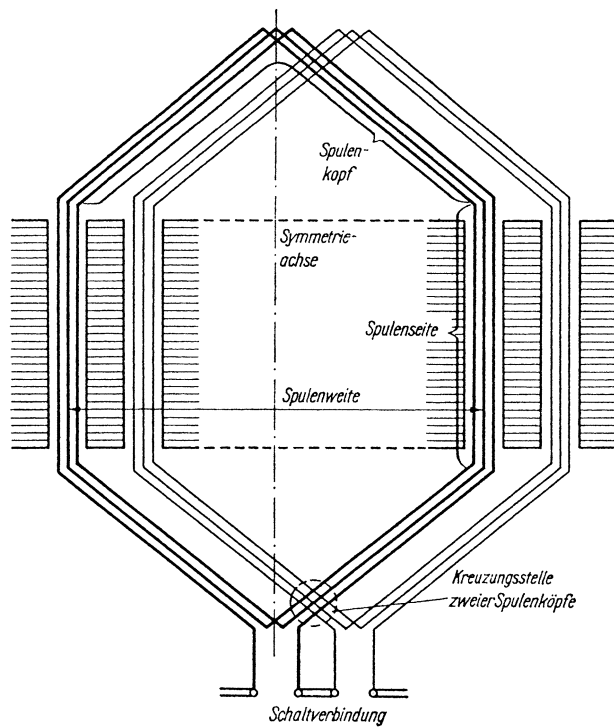


**Bild 1.1.1**  
Bezeichnungen von  
Wicklungsteilen



**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 Mehr-

phasensystems, 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

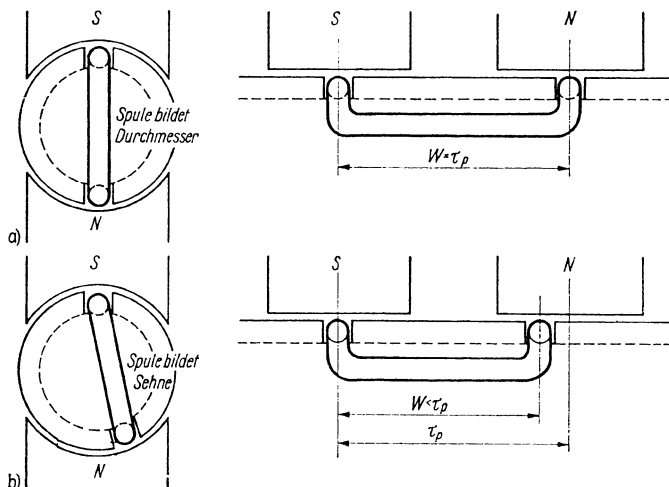


**Bild 1.1.3** Bezeichnung einer Wicklung nach der Spulenweite. a) Durchmesserwicklung ( $W = \tau_p$ ); b) gesehnte Wicklung ( $W < \tau_p$ )

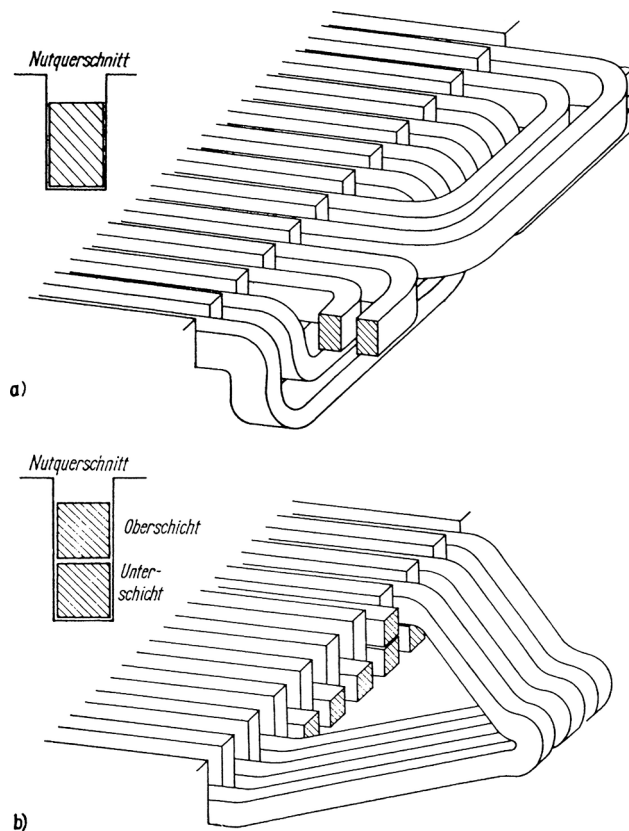


**Bild 1.1.4** Bezeichnung einer Wicklung nach der Zahl der Schichten.  
a) Einschichtwicklung; b) Zweischichtwicklung

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

Ist die Spulenweite  $W$  der Spulen einer Wicklung gleich der Polteilung  $\tau_p$ , 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 *gesehten 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 *gesehenen Wicklung* oder *Sehnenwicklung*. Wenn die Spulengruppen einer Wicklung aus coaxialen Spulen ungleicher Weite bestehen (s. Bild 1.1.4a), sind die einzelnen Spulen der Gruppe unterschiedlich gesehen; 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-

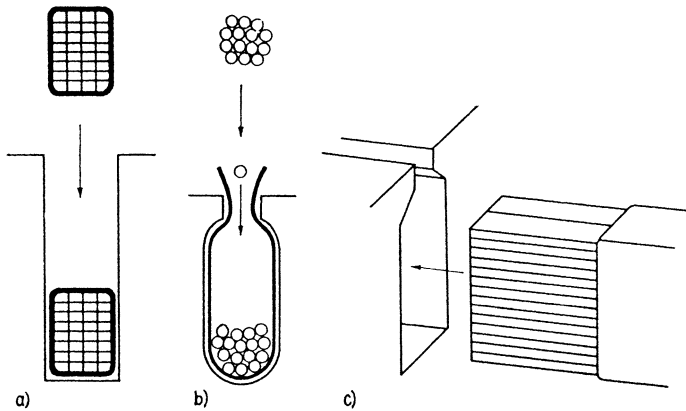


**Bild 1.1.5** Bezeichnung einer Wicklung nach der Herstellungsart. a) Formspulen- oder Einlegewicklung; b) Träufelwicklung; c) Halbformspulenwicklung

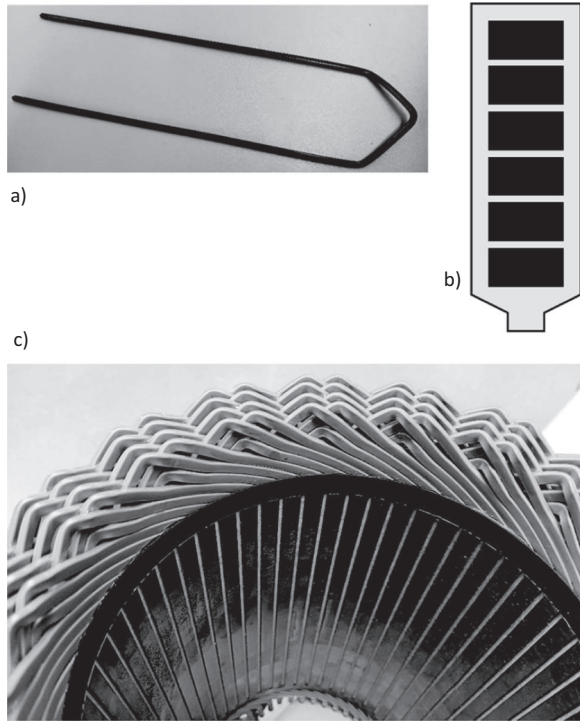
gen mit mehr als zwei Schichten sind, abgesehen vom Sonderfall der Mehrschicht-Steckwicklungen (s. Unterabschn. 1.2.2.1d), selten.

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 Nutisulierungen 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, parallelfankige 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

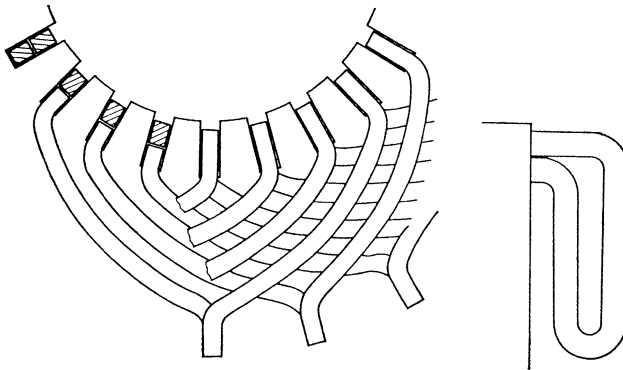


**Bild 1.1.7** Bezeichnung einer Wicklung nach der Form der Wicklungsköpfe als Evolventenwicklung

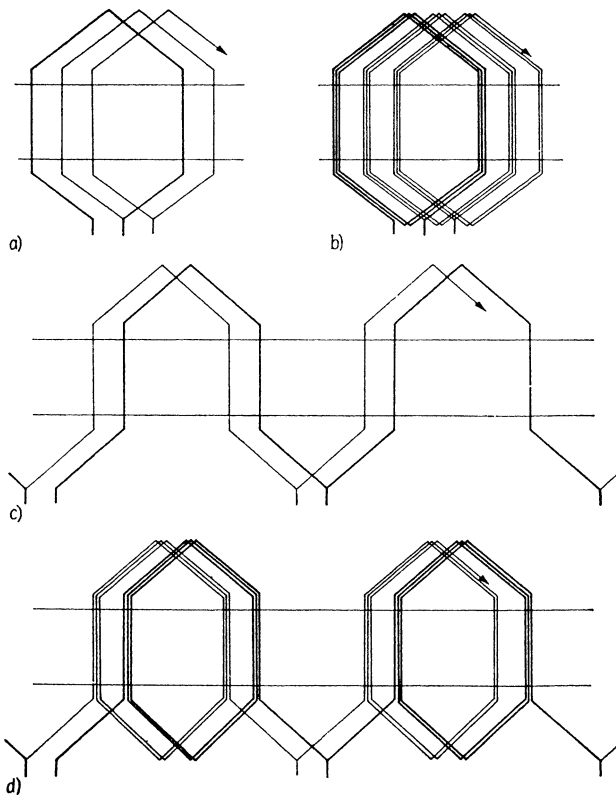


**Bild 1.1.8** Bezeichnung einer Wicklung nach der Spulenwindungszahl und der Anordnung der Schaltverbindungen. a) Stab-Schleifenwicklung; b) Spulen-Schleifenwicklung; c) Stab-Wellenwicklung; d) Spulen-Wellenwicklung

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.

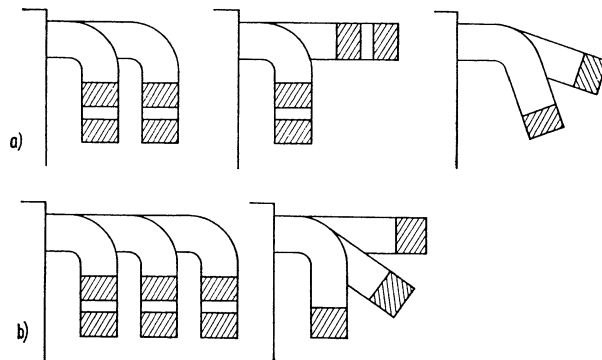


**Bild 1.1.9** Bezeichnung einer Wicklung nach der Zahl der Ebenen im Wicklungskopf.  
a) Zweiebenen- oder Zweietagenwicklung; b) Dreiebenen- oder Dreietagenwicklung

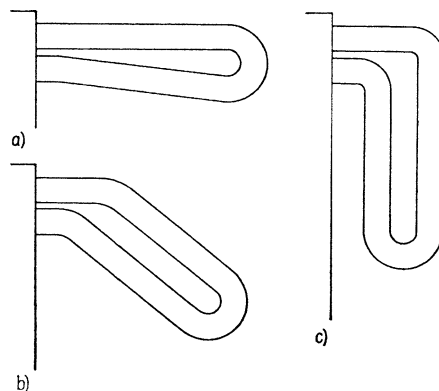


**Bild 1.1.10** Bezeichnung einer Wicklung nach der Lage der Wicklungsköpfe. a) Zylindermantel- oder Zylinderwicklung; b) Kegelmantelwicklung; c) Stirnwicklung

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

## 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

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

mit dem Feldwellenparameter  $\tilde{\nu}'$ , d. h. der Ordnungszahl der Feldwelle  $\nu' = |\tilde{\nu}'|$ ,<sup>1</sup> so ergibt sich für eine bezüglich der  $\gamma'$ -Koordinate ortsfeste Nutenspule an der

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

Stelle  $\gamma'_\rho$  auf Basis der im Bild 1.1.14 festgelegten positiven Zählrichtungen die Flussverketzung (s. Bd. *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschn. 1.6.4)

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

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

$$\Phi_{\tilde{\nu}'} = \frac{2}{\pi} \tau_p l_i \hat{B}_{\tilde{\nu}'} \frac{p}{\nu'} = \frac{D l_i}{\nu'} \hat{B}_{\tilde{\nu}'} \quad (1.1.5)$$

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

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

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

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

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

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

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 Entwurfs-element 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 Nutenspannungsstern 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.

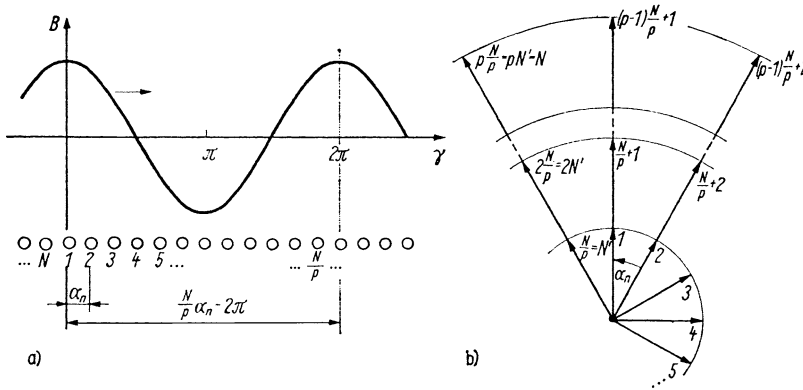


**Bild 1.1.11** Entwicklung des Nutenspannungssterns für  $N/p \in \mathbb{N}$ . a) Hauptwelle des Luftspaltfelds und Nutenverteilung; b) Nutenspannungsstern

**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  $2\pi$  bzw.  $360^\circ$  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*

$$\alpha_n = \frac{2\pi}{N} p. \quad (1.1.8)$$

Im Nutenspannungsstern nach Bild 1.1.11b folgt, jeweils um  $\alpha_n$  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  $N' + 1, 2N' + 1, \dots, (t-1)N' + 1$  dieselbe

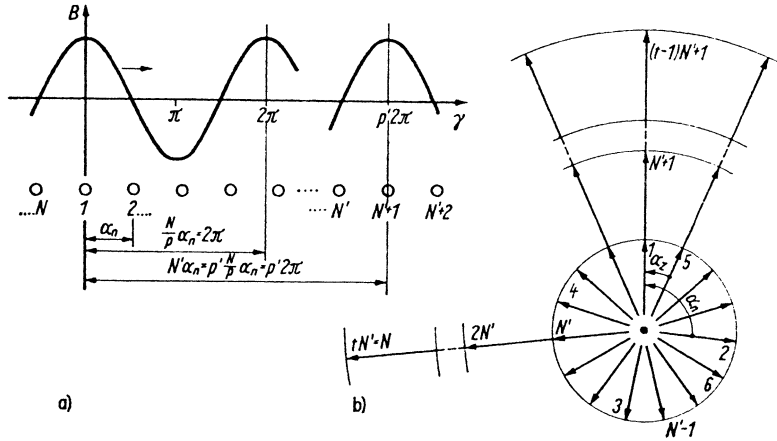


**Bild 1.1.12** Entwicklung des Nutenspannungssterns für  $N/p \notin \mathbb{N}$ . a) Hauptwelle des Luftspaltfelds und Nutenverteilung; b) Nutenspannungsstern

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  $p$

$$t = \text{ggT}\{N, p\}. \quad (1.1.9)$$

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

$$\alpha_z = \frac{2\pi}{N} t. \quad (1.1.10)$$

**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

$$\alpha_n = \frac{p}{t} \alpha_z = p' \alpha_z \quad (1.1.11)$$

ein Vielfaches des Zeigerwinkels sein kann. Für  $t = p$  ist  $\alpha_n = \alpha_z$ , und man erhält eine fortlaufende Nutbezifferung der Zeiger. Für  $t < p$  ist  $\alpha_n > \alpha_z$ , 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  $\nu'$  induzierten Nutenspannungen

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

Ebenso gilt für den Zeigerwinkel

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

Der Nutenspannungsstern für die  $\nu$ . Harmonische unterscheidet sich demnach vom Nutenspannungsstern der Hauptwelle nur dadurch, dass die  $\nu$ -fachen Winkel auftreten und er entsprechend  $\nu$ -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:  $N = 27, \quad p = 3, \quad N/p = 9 \in \mathbb{N}, \quad t = p = 3,$   
 $N' = 9, \quad p' = 1, \quad \alpha_n = \alpha_z = 40^\circ.$

Der Nutenspannungsstern hat 9 Zeigerstrahlen zu je 3 Zeigern. Da  $\alpha_n = \alpha_z$  ist, ergibt sich eine fortlaufende Zeigerbezifferung (s. Bild 1.1.13a).

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

Der Nutenspannungsstern hat 15 Zeigerstrahlen zu je 2 Zeigern. Wegen  $\alpha_n = 2\alpha_z$  wird bei der Übertragung der Nutziffern auf die Zeiger jeweils ein Zeiger über-

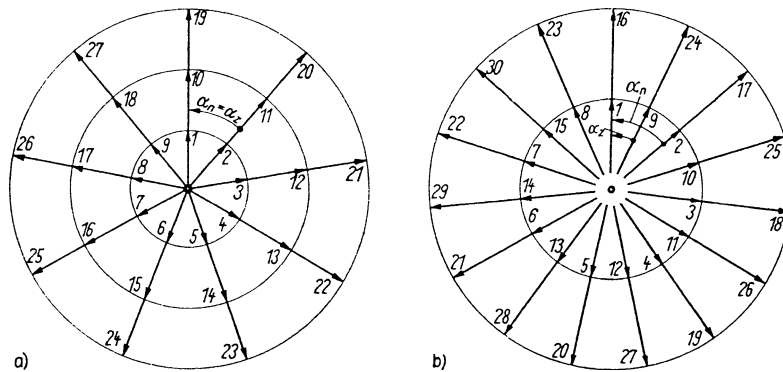


**Bild 1.1.13** Beispiele für Nutenspannungssterne. a)  $N = 27, p = 3, t = 3, N' = 9, p' = 1, \alpha_n = \alpha_z = 40^\circ$ ; b)  $N = 30, p = 4, t = 2, N' = 15, p' = 2, \alpha_n = 2\alpha_z = 48^\circ$

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

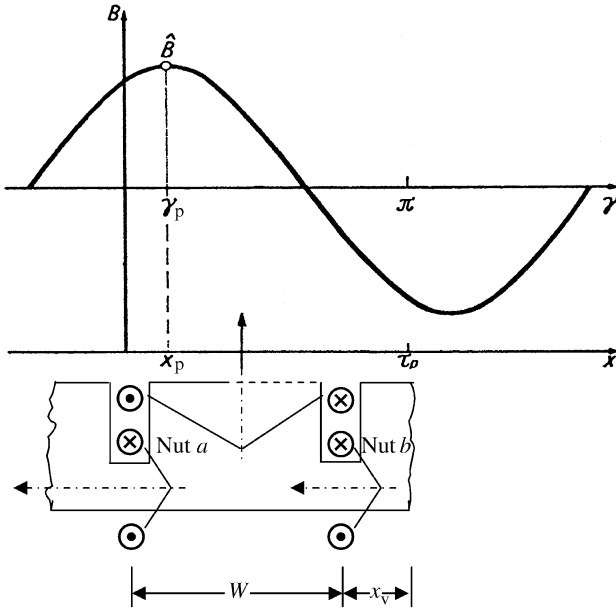


**Bild 1.1.14** Zur Festlegung der positiven Zählrichtung für eine Spule

Nutenspannung  $e_n$ , 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  $e_{sp} = e_{ab}$  und den Nutenspannungen  $e_{na}$  bzw.  $e_{nb}$  der Zusammenhang

$$e_{sp} = e_{ab} = -e_{na} + e_{nb}. \quad (1.1.12)$$

Die größte durch die Hauptwelle in einer Spule induzierte Spannung (im Folgenden auch als Hauptwellenspannung bezeichnet) entsteht bei Gegenphasigkeit der Zeiger  $e_{na}$  und  $e_{nb}$ . Wie Bild 1.1.14 zu entnehmen ist, ergibt sich Gegenphasigkeit zweier Nutenspannungszeiger mit  $\gamma = \pi$  bei einem Spulenseitenabstand  $x = \tau_p$ , d. h. bei einer Spulenweite  $W = \tau_p$ . 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*  $\gamma$ , der *Winkelkoordinate*  $\gamma'$  und der *Längenkoordinate* in Umfangsrichtung  $x$

$$\gamma = p\gamma' = \frac{\pi}{\tau_p} x. \quad (1.1.13)$$

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

$$B = \hat{B} \cos(\gamma - \gamma_p) = \hat{B} \cos(p\gamma' - p\gamma'_p) = \hat{B} \cos \frac{\pi}{\tau_p} (x - x_p).$$

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  $W \leq \tau_p$  aus. Für das elektromagnetische Verhalten der Spule ist es gleichgültig, ob man  $W$  größer oder kleiner als  $\tau_p$  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*

$$\tau_n = \frac{D\pi}{N}, \quad (1.1.14)$$

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

$$y = \frac{W}{\tau_n} = \frac{\tau_p - x_v}{\tau_n} = \frac{N}{2p} - y_v = y_\emptyset - y_v \approx \frac{N}{2p}. \quad (1.1.15)$$

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

$$\tau_p = \frac{D\pi}{2p}. \quad (1.1.16)$$

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)

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

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*

$$w_{sp} = \frac{w_a}{k} = \frac{z_a}{2k}. \quad (1.1.18)$$

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*

$$u = \frac{k}{N}. \quad (1.1.19)$$

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

$$b_{zg} = Q\tau_n \quad \text{bzw.} \quad \alpha_{zg} = Q\alpha_n. \quad (1.2.1)$$

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

$$q = \frac{N}{2pm} \quad (1.2.2)$$

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  $Q_m = q$  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  $Q/2 = Q_m/2 = q/2$ .
- 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  $Q_m = 2q$  wird.

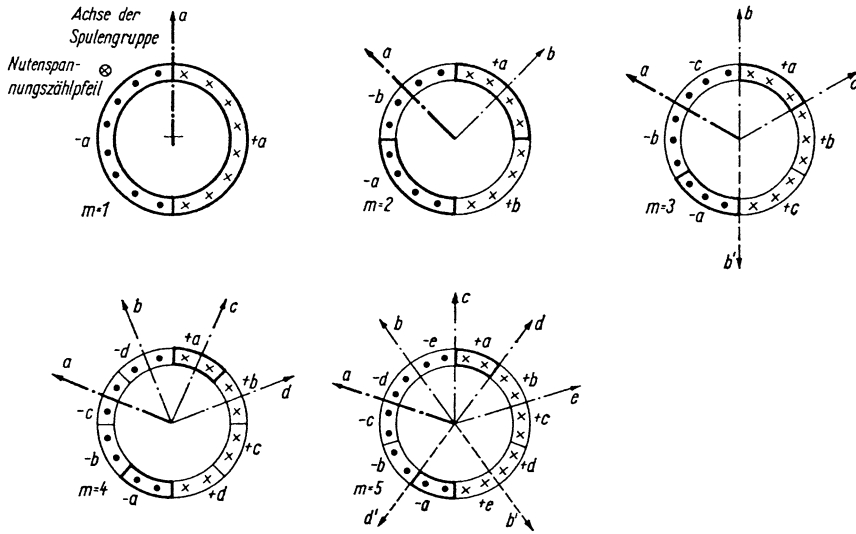


**Bild 1.2.1** Systematik der Zonenbildung zweipoliger Einschichtwicklungen. Der Nutenspannungszählfeile entspricht dem im Bild 1.1.14 eingeführten Umlaufzähl Sinn der Nutenspannung in der Nut; die Zonenbezeichnung ist noch nicht in jedem Fall identisch mit der allgemein üblichen Bezeichnung der Stränge

– Bei Wicklungen mit Zonenänderung ist  $Q$  abwechselnd  $Q_a = q + q_\Delta$  und  $Q_b = q - q_\Delta$ .

– Für Wicklungen mit freien (unbewickelten) Nuten ist  $Q_m < q$ .

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  $\gamma'$  um  $180^\circ/p$ ) verteilt.

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

$$B_p(\gamma', t) = \hat{B}_p \cos(p\gamma' - 2\pi ft - \varphi_0)$$

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  $\gamma'_m = \gamma_m = \pi/m$  am

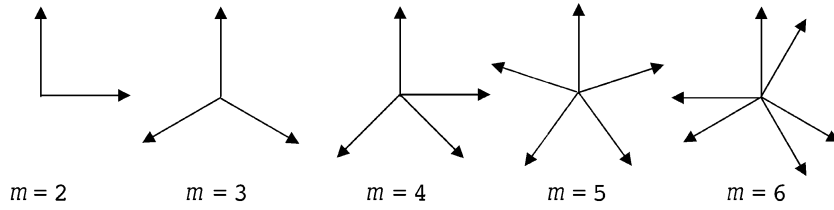


**Bild 1.2.2** Mehrphasensysteme zur symmetrischen Speisung mehrsträngiger Wicklungen  
Umfang versetzt. Bei  $2p$ -poligen Anordnungen ist dieser Versatz entsprechend

$$\gamma'_m = \frac{1}{p} \gamma_m = \frac{\pi}{mp}. \quad (1.2.3a)$$

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

$$\begin{aligned} B_{wp}(\gamma', t) &= \hat{B}_{wp} \cos p(\gamma' - \gamma'_{mk}) \cos(2\pi ft + \varphi_{mk}) \\ &= \frac{1}{2} \hat{B}_{wp} \{ \cos [p(\gamma' - \gamma'_{mk}) - 2\pi ft - \varphi_{mk}] \\ &\quad + \cos [p(\gamma' - \gamma'_{mk}) + 2\pi ft + \varphi_{mk}] \}, \end{aligned}$$

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

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

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 ( $\gamma$ -Koordinaten)

$$\varphi_m = p\gamma'_m = \gamma_m = \frac{\pi}{m} \quad (1.2.3b)$$

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

$$\varphi_m - p\gamma'_m = -2p\gamma'_m = -\frac{2\pi}{m}$$

phasenverschobenen Kosinusfunktionen ist Null.

Die Forderung (1.2.3b) führt auf Mehrphasensysteme, deren Zeiger ebenso wie die Strangachsen zweipoliger Anordnungen gleichmäßig über  $180^\circ$  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 geradzahigen 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

$$\varphi_m = \frac{2\pi}{m} \quad (1.2.4a)$$

aufweisen und deren Strangachsen im Winkelkoordinatensystem um den Winkel

$$\gamma'_m = \frac{2\pi}{mp} \quad (1.2.4b)$$

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 ungeradzahigen Teiler  $m_u$  enthält. Dann lassen sich, wie im Bild 1.2.2 für  $m = 6$  mit  $m_u = 3$  gezeigt, durch Umpolung einzelner Stränge zumindest  $m/m_u$  Gruppen von  $m_u$  Strängen bilden, deren Stranggrößen untereinander eine Phasenverschiebung von

$$\varphi_{mg} = \frac{2\pi}{m_u} \quad (1.2.4c)$$

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

$$\varphi_m = \frac{\pi}{m} \quad (1.2.4d)$$

und einen räumlichen Versatzwinkel von

$$\gamma'_m = \frac{\pi}{mp} \quad (1.2.4e)$$

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 ungeradzahigen 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

$$\gamma'_m = \frac{\pi}{2p} \quad (1.2.4f)$$

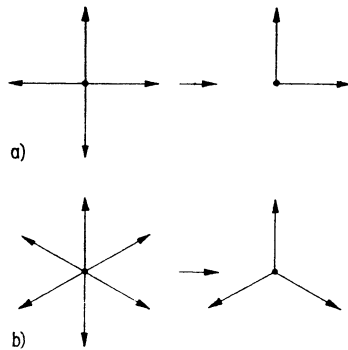


**Bild 1.2.3** Reduktion von Mehrphasensystemen. a) Reduktion in ein reduziertes System; b) Reduktion in ein normales System

zueinander haben und deren Ströme bzw. Spannungen im Idealfall um

$$\varphi_m = \frac{\pi}{2} \quad (1.2.4g)$$

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  $180^\circ$  verschobenen, jeweils ein vollständig symmetrischer Zeigerstern aus  $2m$  Zeigern mit einer Verschiebung von jeweils  $\pi/m$  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  $180^\circ$  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 Stromhalbwellen 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,

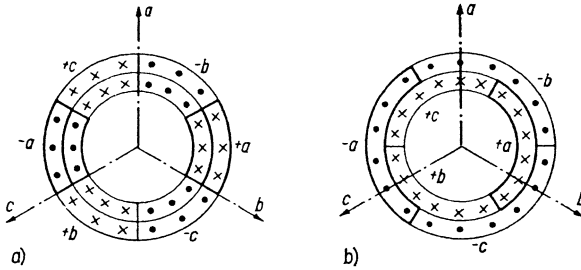


**Bild 1.2.4** Zonenbildung von Zweischichtwicklungen. a) Normale Zonenbildung; b) Bildung von Zonen mit doppelter Zonenbreite

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 gesehten 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

$$\text{Einschichtwicklung} \quad k = Nu = N/2, \quad (1.2.5a)$$

$$\text{Zweischichtwicklung} \quad k = Nu = N. \quad (1.2.5b)$$

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  $Q_m = q$  bei einfacher bzw.  $Q_m = 2q$  bei doppelter Zonenbreite erhält man entsprechend (1.2.1) für die mittlere Zonenbreite  $b_{zm} = Q_m \tau_n$  und den mittleren Zonenwinkel  $\alpha_{zm} = Q_m \alpha_n$  über (1.1.8),

**Tabelle 1.2.1** Kennwerte der Strangwicklungen

| Wicklung                                         | Spulen-<br>zahl $k$ | Spulen-<br>gruppen-<br>zahl | Mittlere<br>Spulen-<br>zahl je<br>Gruppe<br>$Q_m$ | Mittlere<br>Zonen-<br>breite<br>$b_{zm}$ | Mittlerer<br>Zonen-<br>winkel<br>$\alpha_{zm}$ |
|--------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Einschichtwicklung                               | $N/2$               | $pm$                        | $q$                                               | $\tau_p/m$                               | $\pi/m$                                        |
| Zweischichtwicklung mit<br>normaler Zonenbreite  | $N$                 | $2pm$                       | $q$                                               | $\tau_p/m$                               | $\pi/m$                                        |
| Zweischichtwicklung mit<br>doppelter Zonenbreite | $N$                 | $pm$                        | $2q$                                              | $2\tau_p/m$                              | $2\pi/m$                                       |

**Tabelle 1.2.2** Mehrphasensysteme elektrischer Maschinen

| Strangzahl<br>$m$ | Mehrphasensysteme elektrischer Maschinen<br>normale Systeme                         | reduzierte Systeme                                                                  | Zugehörige unreduzierte<br>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

$$\alpha_{\text{str}} = \frac{2\pi}{m} \quad (1.2.6a)$$

und für reduzierte Mehrphasensysteme

$$\alpha_{\text{str}} = \frac{\pi}{m}. \quad (1.2.6b)$$

### 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

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

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

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  $\alpha_{\text{str}}$  nach (1.2.6a,b) ein ganzzahliges Vielfaches des Zeigerwinkels  $\alpha_z$  nach (1.1.10), Seite 14, sein muss. Demnach gilt für normale Mehrphasensysteme

$$\frac{\alpha_{\text{str}}}{\alpha_z} = \frac{2\pi N}{m2\pi t} = \frac{N}{mt} \in \mathbb{N} \quad (1.2.8a)$$

und für reduzierte Mehrphasensysteme

$$\frac{\alpha_{\text{str}}}{\alpha_z} = \frac{\pi N}{m2\pi t} = \frac{N}{2mt} \in \mathbb{N}. \quad (1.2.8b)$$

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.

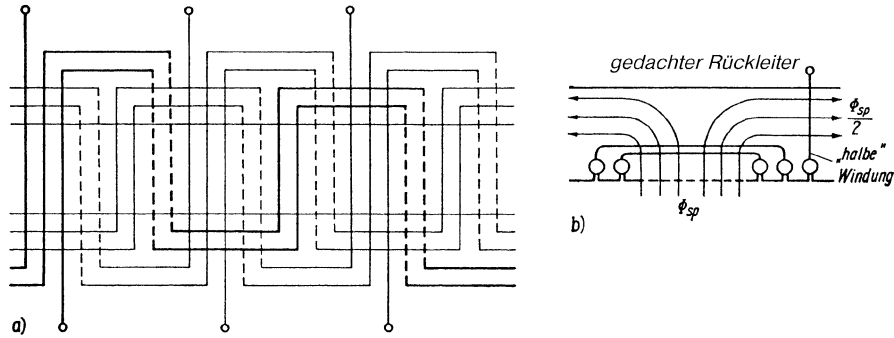


**Bild 1.2.5** Einschichtstabwicklung mit 'halben' Windungen. a) Wicklungsschema; b) Verkettung mit dem Spulenfluss  $\Phi_{sp}$

#### 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)  $\alpha_n = a_z$ . 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

$$q = \frac{z}{n}. \quad (1.2.9)$$

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

$$\frac{p}{n} \in \mathbb{N}, \quad (1.2.10a)$$

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

$$\frac{2p}{n} \in \mathbb{N}. \quad (1.2.10b)$$

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 Urteilungen  $t$  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

$$t = c \frac{p}{n}. \quad (1.2.11)$$

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

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

**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                         | $\frac{2p}{n} \in \mathbb{N}$ |
| Einschichtstabwicklung                      |                               |
| alle                                        | $\text{ggT}\{n, m\} = 1$      |

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)

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

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

$$\text{ggT}\{n, m\} = 1. \quad (1.2.14)$$

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 ( $p = 3, 9, 27 \dots$ ), 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  $120^\circ$  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

$$\frac{N - N_0}{6} \in \mathbb{N}. \quad (1.2.15)$$

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

$$\frac{N}{3t} \in \mathbb{N}. \quad (1.2.16)$$

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

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

Der Grund, weshalb unter Nutzung freier Nuten auch für  $p = 1, 3, 9, 27 \dots$  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)

$$\frac{N_0}{3} \in \mathbb{U}. \quad (1.2.17)$$

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)

$$Q_m = \frac{k}{pm} = \frac{N - N_0}{2pm} = \frac{N}{2pm} - \frac{N_0}{2pm} = q - \frac{N_0}{2pm}. \quad (1.2.18)$$

### 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

$$\frac{N'}{m} = \frac{N}{mt} \in \mathbb{G}. \quad (1.2.19)$$

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,

$$\alpha_n = \frac{p}{t} \alpha_z = n \alpha_z.$$

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)

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

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 Durchlaufsinne. Diese zwei Hälften können bei Bedarf einander parallelgeschaltet werden, so dass sich maximal  $a_{\max} = 2t$  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

$$\frac{N'}{m} = \frac{N}{mt} \in \mathbb{U}. \quad (1.2.21)$$

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<br>Wicklungszweige $a_{\max}$ | $2t = 2\frac{p}{n}$                           | $t = 2\frac{p}{n}$            |                             |
| Nutenwinkel $\alpha_n$                               | $n\alpha_z$                                   | $\frac{n}{2}\alpha_z$         |                             |
| Wicklungsart                                         | Einschichtwicklungen<br>Zweischichtwicklungen | Einschicht-<br>wicklungen     | Zweischicht-<br>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<br>je Urwicklung $t^*$       | 1                                             | 2                             | 1                           |

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

und nach (1.1.11)

$$\alpha_n = \frac{p}{t}\alpha_z = \frac{n}{2}\alpha_z.$$

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

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

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

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

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

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

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

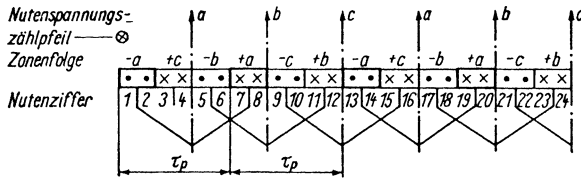


**Bild 1.2.6** Zonenplan einer Einschicht-Ganzlochwicklung für  $p = 2$ ,  $m = 3$ ,  $N = 24$ ,  $q = 2$

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 zugehörigen 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  $-a, +c, -b, +a, -c, +b, -a, +c, -b, \dots$  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)

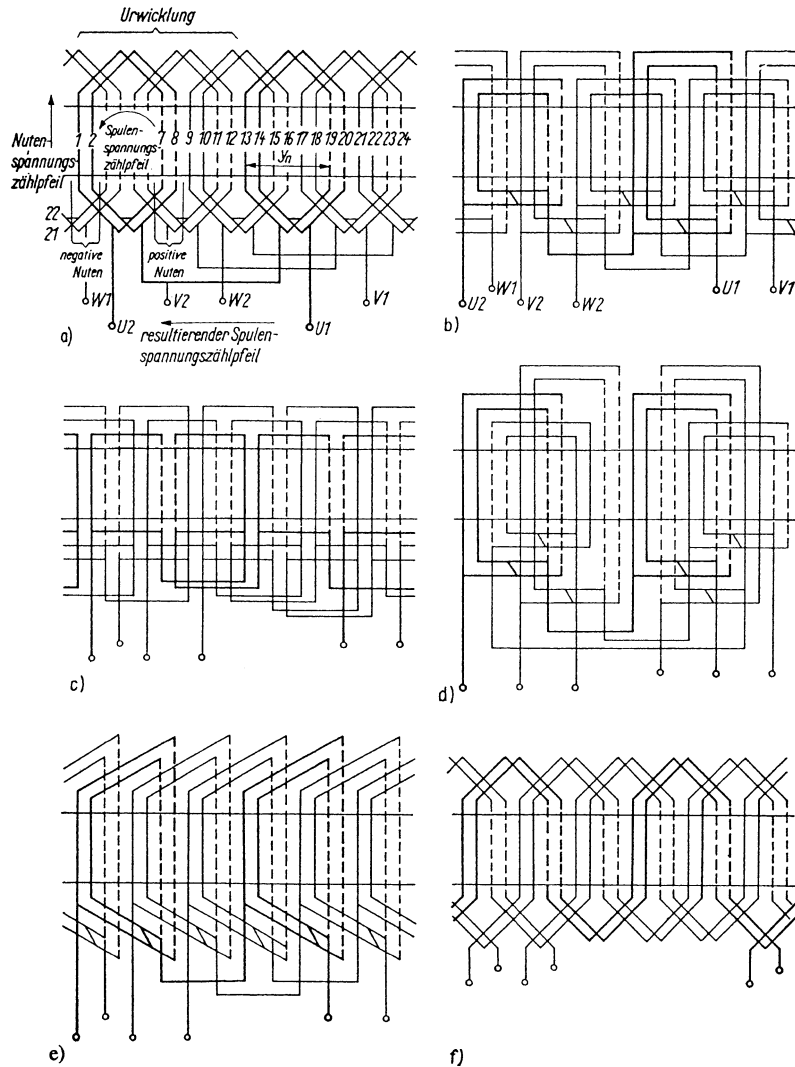


**Bild 1.2.7** Beispiele von Wicklungsschemata der Einschichtwicklung für  $p = 2, m = 3, N = 24, q = 2$  in unterschiedlicher Ausführung. a) Zylinder- oder Evolventenwicklung als Schleifenwicklung mit Spulen gleicher Weite; b) Zweiebenen-Schleifenwicklung mit Rechteckspulen; c) Dreiebenen-Schleifenwicklung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

$$y = mq = \frac{N}{2p} = y_{\emptyset}. \quad (1.2.25)$$

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 coaxialen Spulen bestehen. Der Begriff Durchmesserwicklung kennzeichnet das elektrische Verhalten der Wicklung, und das liegt mit der Verteilung der

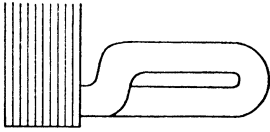


**Bild 1.2.8** Wicklungskopf einer Einschicht-Zylinderwicklung mit Spulen gleicher Weite

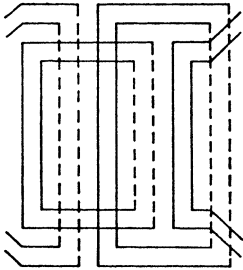


**Bild 1.2.9** Zweiebenenwicklung mit gekröpfter Spulengruppe für  $p = 1, m = 3, N = 12, q = 2$

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

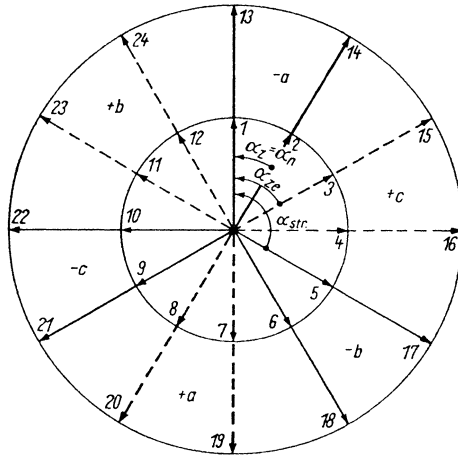


**Bild 1.2.10** Nutenspannungsstern der Einschichtwicklung für  $p = 2, m = 3, N = 24, q = 2, t = 2, N' = 12, \alpha_n = \alpha_z = 30^\circ$

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)  $\alpha_n = \alpha_z = 360^\circ \cdot 2/24 = 30^\circ$ , und die Nutbezeichnung ist fortlaufend ( $p/t - 1 = 0$ ). Die Zugehörigkeit der einzelnen Nutenspannungszeiger zu den Zonen bzw. Strängen kann man entsprechend der Nutbezeichnung 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  $180^\circ$  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  $\alpha_{ze}$  (s. Abschn. 1.2.1.1), die aus geschlossenen Bündeln zu je  $q$  Zeigern besteht. Es ist

$$\alpha_{ze} = q\alpha_n = \alpha_{zm} = \frac{\pi}{m}. \quad (1.2.26)$$

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

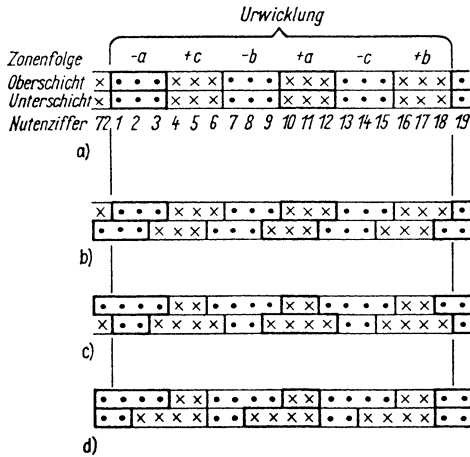


**Bild 1.2.11** Zonenpläne der Zweischichtwicklung mit  $p = 4$ ,  $m = 3$ ,  $N = 72$ ,  $q = 3$  für eine Urwicklung.

- a) Durchmesserwicklung;  
b) gesehnte Wicklung;  
c) Wicklung mit Zonenänderung;  
d) doppelt gesehnte Wicklung

Der Winkel zwischen den Zeigerbündeln gleichen Vorzeichens aufeinander folgender Stränge ist der Strangwinkel  $\alpha_{\text{str}}$ . Zwischen diesen beiden Zeigerbündeln liegt bei normalen Mehrphasensystemen, d. h. bei ungerader Strangzahl, immer ein Zeigerbündel mit entgegengesetztem Vorzeichen. Folglich wird

$$\alpha_{\text{str}} = 2\alpha_{\text{ze}} = 2q\alpha_{\text{n}} = \frac{2\pi}{m}.$$

Das ist derselbe Ausdruck, der sich nach (1.2.6a) ergibt. Mit  $m = 3$  wird  $\alpha_{\text{str}} = 120^\circ$ .

Eine Ganzlochwicklung kann auch über den Nutenspannungsstern entworfen werden. Man teilt den Nutenspannungsstern in  $2m$  Zonen auf. Gegenüberliegende Zonen bilden die negative und positive Zone eines Strangs. Die Zonen gleichen Vorzeichens aufeinander folgender Stränge sind um den Strangwinkel  $\alpha_{\text{str}}$  nach (1.2.6a,b) gegeneinander verschoben.

### b) Zweischichtwicklungen

Wie schon im Abschnitt 1.2.1.2 angedeutet worden ist, muss beim Übergang zu einer Zweischichtwicklung jede Zone in eine Oberschicht- und eine Unterschichtzone aufgeteilt werden. Bei Durchmesserwicklungen liegen diese beiden Zonen im Zonenplan jeweils genau übereinander (s. Bild 1.2.11a). In Bezug auf das elektrische Verhalten besteht dann kein Unterschied zur Einschichtwicklung.

Wenn man die Wicklung gesehnt ausführt, ist die Spulenweite bzw. der Wicklungsschritt, d. h. der Abstand zwischen den linken (Oberschicht) und den rechten Spulenseiten (Unterschicht), kleiner als bei der Durchmesserwicklung. Die Verkleinerung des Wicklungsschritts um die Schrittverkürzung  $y_v$  (vgl. (1.2.25) u. (1.1.15), S. 18) auf

$$y = y_{\emptyset} - y_v = mq - y_v \quad (1.2.27)$$

bedeutet eine gleichmäßige Verschiebung aller Unterschichtzonen nach links (s. Bild 1.2.11b).

Da es bezüglich der Wechselbeziehungen mit dem Luftspaltfeld gleichgültig ist, in welcher Schicht die Zonen angeordnet sind, erreicht man den gleichen Effekt durch eine Zonenänderung der Durchmesserwicklung (s. Bild 1.2.11c), indem man

Spulengruppen mit wechselnder Spulenzahl ( $Q_a \neq Q_b$ ) vorsieht, die entsprechend

$$Q_m = \frac{Q_a + Q_b}{2} = q \quad (1.2.28)$$

gewählt werden müssen. Sehnt man die Wicklung außerdem noch, so erhält man eine sog. *doppelt gesehnte Wicklung* (s. Bild 1.2.11d). Doppelt gesehnte Wicklungen werden praktisch nur noch als gesehnte Bruchlochwicklungen mit natürlicher Zonenänderung ausgeführt (s. Abschn. 1.2.2.2).

Wie man sich leicht überzeugen kann, sind bei der Zweischicht-Ganzloch-Urwicklung sogar die beiden Spulengruppen je Strang elektrisch völlig gleichwertig. Sie stellen somit die kleinsten Wicklungseinheiten dar, die sich bei der Strangbildung (unter Beachtung der positiven Zählrichtung der Spulen) parallelschalten lassen. Im Fall einer Zonenänderung kann man Parallelschaltungen nur vornehmen, wenn sich parallele Zweige bilden lassen, in denen die Spulengruppen der beiden Spulenzahlen  $Q_a$  und  $Q_b$  mit gleichem Anteil vertreten sind.

Die Zonenpläne im Bild 1.2.11 gelten für die Urwicklung einer Zweischicht-Ganzlochwicklung mit  $N = 72$ ,  $p = 4$ ,  $m = 3$ ,  $q = 72/(2 \cdot 4 \cdot 3) = 3$ . Nach Abschnitt 1.2.1.6 sind Ganzlochurwicklungen stets erster Art. Die Kennwerte der vorliegenden Urwicklung sind nach (1.2.24)

$$N^* = \frac{N}{p} = \frac{72}{4} = 18, \quad p^* = 1, \quad t^* = 1.$$

Die gesamte Wicklung setzt sich aus vier derartigen Urwicklungen zusammen. Urwicklungen können – wie bereits gesagt – stets parallelgeschaltet werden. Der Entwurf der Urwicklung genügt.

Zweischichtwicklungen werden im Fall von Formspulenwicklungen vorzugsweise als Evolventenwicklungen ausgeführt. Im Läufer erscheinen diese stets als Zylinderwicklungen. Bild 1.2.12 zeigt die aus den Zonenplänen im Bild 1.2.11 gewonnenen Wicklungsschemata der Urwicklung. Zur besseren Übersicht zeichnet man die übereinanderliegenden Spulenseiten der beiden Schichten nebeneinander. Es wird vereinbart, die Unterschichtspulenseite links von der jeweiligen Oberschichtspulenseite anzuordnen. Der Wicklungsschritt der im Bild 1.2.12a als Durchmesserwicklung ausgeführten Wicklung beträgt nach (1.2.27) mit  $y_v = 0$

$$y = y_\emptyset = mq = 3 \cdot 3 = 9.$$

Für die gesehnte Ausführung (s. Bild 1.2.11b) ist im Bild 1.2.12b  $y_v = 1$  gewählt worden. Damit wird

$$y = mq - y_v = 3 \cdot 3 - 1 = 8.$$

Die Zonenänderung im Bild 1.2.12c ist so vorgenommen worden, dass sie ohne Berücksichtigung der Schichten die gleiche Spulenseitenverteilung wie die Sehnung ergibt (s. Bild 1.2.11b u. c). Damit erhält man die beiden Spulenzahlen je Spulengruppe zu  $Q_a = 4$  und  $Q_b = 2$ , und (1.2.28) ist erfüllt mit  $Q_m = (4 + 2)/2 = 3 = q$ . Für die zweite Sehnung im Bild 1.2.12d ist ebenfalls  $y_v = 1$  gewählt worden.

Bildet man nach erfolgter Zonenaufteilung die Spulen der Zweischichtwicklung, so stellt man fest, dass dabei Spulen entstehen, deren linke Spulenseiten positive Spulenseiten und deren rechte Spulenseiten negative Spulenseiten sind. Durchläuft man

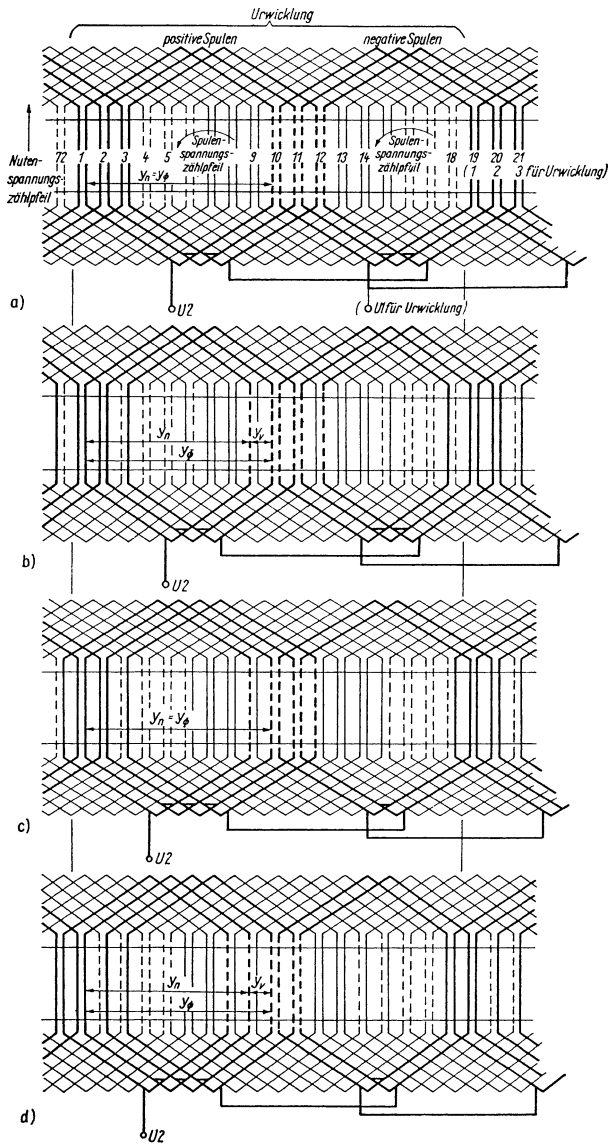


**Bild 1.2.12**  
Wicklungsschemata  
der  
Zweischichtwicklung  
für  $p = 4$ ,  $m = 3$ ,  
 $N = 72$ ,  $q = 3$ .  
a) Durchmesserwicklung  
mit  $y = y_0 = 9$ ;  
b) gesehnte Wicklung  
mit  $y = y_0 - y_v = 8$ ,  
 $y_v = 1$ ;  
c) Wicklung mit  
Zonenänderung mit  
 $Q_a = 4$ ,  $Q_b = 2$ ;  
d) doppelt gesehnte  
Wicklung mit  $Q_a = 4$ ,  
 $Q_b = 2$  und  
 $y = y_0 - y_v = 8$

diese Spulen wie üblich von der positiven (gestrichelten) Spulenseite zur negativen (ausgezogenen) Spulenseite, so bewegt man sich gegen die im Bild 1.1.14, Seite 17, definierte positive Zählrichtung der Spulen, die für alle Spulen in der Rechtsschraubenzuordnung zu ihren radial gleich gerichteten Achsen verläuft. Im Gegensatz zu den bisher gebildeten Spulen, bei denen der genannte Durchlauf im Sinn der positiven Zählrichtung verläuft und die man deshalb auch *positive Spulen* nennt, treten demnach in der Zweischichtwicklung auch sog. *negative Spulen* auf. Bei der Strangbildung müssen diese Spulen natürlich so in den Strang eingefügt werden, dass im Zug des Strangs die positiven und negativen Spulenseiten der negativen Spulen in gleichem Sinn durchlaufen werden wie die der positiven Spulen (s. Bild 1.2.12).

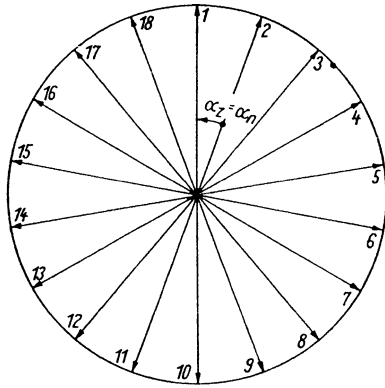


**Bild 1.2.13** Nutenspannungsstern für  $p^* = 1$ ,  $N^* = 18$ ,  $\alpha_n = \alpha_z = 20^\circ$

Selbstverständlich können alle Zweischicht-Ganzlochwicklungen (besonders Stabwicklungen) auch als Wellenwicklungen geschaltet werden. Dabei bilden alle positiven Spulen jedes Strangs Wellenzüge, die in der einen Richtung umlaufen, und alle negativen Spulen jedes Strangs Wellenzüge, die in der entgegengesetzten Richtung umlaufen. Der Übergang von der einen Richtung in die andere erfolgt durch eine sog. *Umkehrverbindung* (s. Bild 1.2.22, S. 53).

Der Nutenspannungsstern der Zweischichturwicklung (s. Bild 1.2.13) führt auf zwei Spulenseiten-Spannungssterne, einen für die Oberschicht und einen für die Unterschicht (s. Bild 1.2.14). Die elektrischen Zonen der Spulenseiten-Spannungssterne zeigen die gleiche Aufeinanderfolge der Spulenseiten bzw. der Spulenseitenspannungen wie die geometrischen Zonen der Wicklung (s. Bilder 1.2.11 u. 1.2.12), so dass man die Spulenseitenverteilung und damit auch den Wicklungsentwurf von Zweischicht-Ganzlochwicklungen ebenfalls über diese Spulenseiten-Spannungssterne vornehmen kann.

Bei Zweischichtwicklungen haben alle Spulen meist und vor allem bei Hochspannungsmaschinen mit Formspulenwicklungen dieselbe Weite bzw. denselben Wicklungsschritt. Mit der Aufteilung der Oberschichtspulenseiten liegt damit auch die Aufteilung der Unterschichtspulenseiten fest. Die Verteilung der Spulenseiten der Unterschicht ist die gleiche wie die der Oberschicht. Sie ist lediglich um  $y$  Nutteilungen gegenüber der Verteilung der Oberschichtspulenseiten verschoben (s. Bilder 1.2.11 u. 1.2.12). Demzufolge hat auch der Spulenseiten-Spannungsstern der Unterschicht die gleiche Zeigerverteilung wie der der Oberschicht. Beide Zeigerverteilungen sind in Bezug auf zueinander gehörende Spulenseiten um den *Schrittwinkel*

$$\eta = y\alpha_n = \pi - \eta_v \quad (1.2.29)$$

gegeneinander verschoben, der gleich der Spulenweite in bezogenen Winkelkoordinaten nach (1.1.17), Seite 18, ist. Aus Bild 1.2.14 geht die Bedeutung des Sehnungswinkels  $\eta_v$  anschaulich hervor. Um diesen Winkel sind bei gesehten Wicklungen die elektrischen Zonen der Unterschicht gegenüber den Zonen der Oberschicht mit gleichem Vorzeichen und gleicher Strangzugehörigkeit verschoben. Wegen der Gleichheit der Zeigerverteilung genügt die Zeichnung und Aufteilung des Spulenseiten-Spannungssterns der Oberschicht. Man nennt ihn kurz Nutenspannungsstern der Zweischichtwicklung.

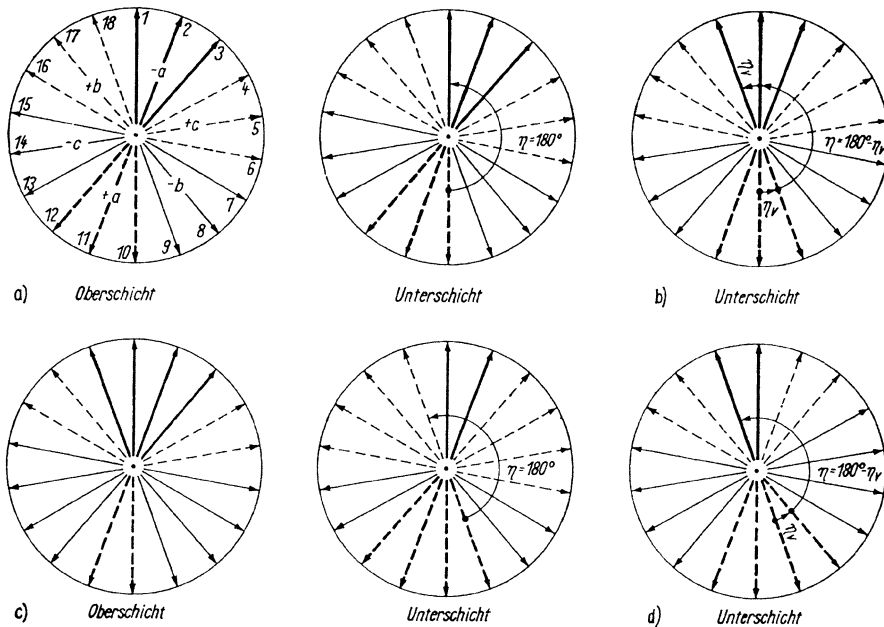


**Bild 1.2.14** Spulenseiten-Spannungssterne der Zweischichturwicklung für  $p^* = 1$ ,  $m = 3$ ,  $N' = N^* = 18$ ,  $t^* = 1$ ,  $q = 3$ ,  $\alpha_n = \alpha_z = 20^\circ$ . a) Durchmesserwicklung mit  $\eta = 180^\circ$ ; b) gesehnte Wicklung mit  $\eta = 180^\circ - \eta_v = 160^\circ$ , Spulenseiten-Spannungsstern der Oberschicht wie a); c) Wicklung mit Zonenänderung; d) doppelt gesehnte Wicklung mit  $\eta = 180^\circ - \eta_v = 160^\circ$ , Spulenseiten-Spannungsstern der Oberschicht wie c)

Der Nutenspannungsstern der Urwicklung der behandelten Zweischicht-Ganzlochwicklung hat die Kennwerte:

$$\text{Zahl der Zeigerkreise} \quad t^* = p^* = 1,$$

$$\text{Zahl der Zeigerstrahlen} \quad N' = N^*/t^* = N^* = 18.$$

Wegen  $t = p$  ist  $\alpha_n = \alpha_z = 360^\circ \cdot 1/18 = 20^\circ$ , und die Nutbezifferung ist fortlaufend (s. Bilder 1.2.13 u. 1.2.14).

### c) Einziehwicklungen

Wie bereits im Abschnitt 1.1.1.2, Seite 5, angedeutet worden ist, werden bei der Inserter- oder Einziehtechnik mehrere vorgewickelte Spulengruppen in einem Arbeitsgang in die Nuten der Maschine eingezogen. Das erfordert eine bestimmte Flexibilität der Spulen, so dass sich nur Wicklungen aus Runddraht dafür eignen. Außerdem lassen sich nur kreuzungsfreie Spulen einziehen. Deshalb sind nur Rechteckspulen möglich, und es können nur aneinander grenzende Spulengruppen gleichzeitig eingezogen werden. Bild 1.2.15a zeigt eine dreisträngige Einschicht-Einziehwicklung für gerade Polpaarzahlen.

Man erkennt, dass mit dem ersten Einzug bereits die halbe Wicklung eingezogen ist. Um  $2q = N/pm$  Nuten versetzt erfolgt der zweite Einzug. Es entsteht eine Zweiebenenwicklung. Zieht man über dieser Einschichtwicklung eine zweite, gegenüber der ersten um  $y_v$  Nuten verschobene Einschichtwicklung ein, so entsteht eine zweischichtige Wicklung mit vier Ebenen, die einer gesehnten Zweischicht-

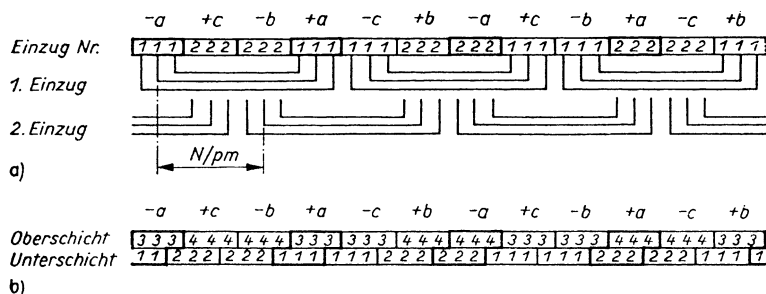


**Bild 1.2.15** Zonenpläne der Einziehwicklung für  $p \in \mathbb{G}$ ,  $m = 3$ ,  $N/p = 18$ ,  $q = 3$ .

a) Einschichtwicklung; b) gesehnte Zweischichtwicklung, aus zwei Einschichtwicklungen hergestellt

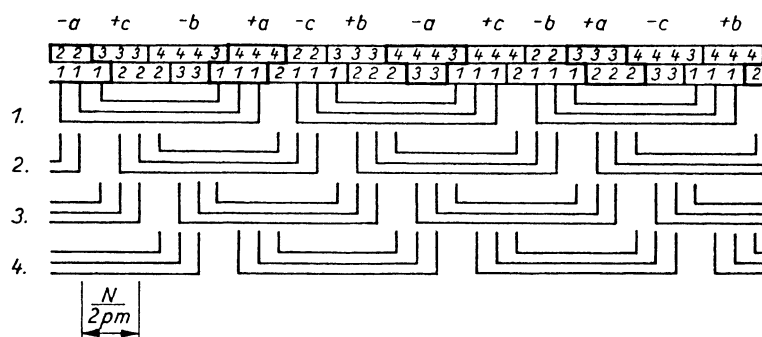


**Bild 1.2.16** Zonenplan der gesehnten Zweischicht-Einziehwicklung für  $p \in \mathbb{G}$ ,  $m = 3$ ,  $N/p = 18$ ,  $q = 3$

wicklung entspricht (s. Bild 1.2.15b). Eine gesehnte Zweischichtwicklung mit echten gesehnten Spulen ( $y < y_{\emptyset}$ ) ist im Bild 1.2.16 dargestellt, wobei allerdings der zweite und dritte Einzug sowohl in die Unter- als auch in die Oberschicht erfolgen, so dass in den Wicklungsköpfen eine gewisse ‚Unordnung‘ entsteht. Der Versatz der einzelnen Einzüge beträgt  $q = N/2pm$  Nuten.

Voraussetzung für das Einziehen der Wicklungsanordnungen nach den Bildern 1.2.15 und 1.2.16 ist eine gerade Zahl von Spulengruppen, d. h. für ungerade Strangzahl eine gerade Polpaarzahl. Sind  $m$  und  $p$  ungerade, oder sollen geteilte Spulengruppen eingezogen werden, so kann die Wicklung nur strangweise mit einer Verschiebung von  $q = N/2pm$  Nuten eingezogen werden (s. Bild 1.2.17). Das erfordert bei einer dreisträngigen Einschichtwicklung drei Einzüge und bei einer Zweischichtwicklung sechs Einzüge. Dabei entstehen drei bzw. sechs Wicklungskopfebenen.

Prinzipiell ist auch das Einziehen von Bruchlochwicklungen möglich.

#### d) Mehrschicht-Steckwicklungen

Mehrschicht-Steckwicklungen sind, wie bereits im Abschnitt 1.1.1.2 angedeutet worden ist, eine vergleichsweise neue Wicklungstechnologie, die auch für in Großserie gefertigte mittelgroße Maschinen, wie sie als Antriebe von Elektrofahrzeugen benötigt werden, einen vollautomatischen Wickelprozess ermöglicht. Sie werden oft auch als *Haarnadelwicklungen* oder *Hairpin-Wicklungen* bezeichnet. Die in

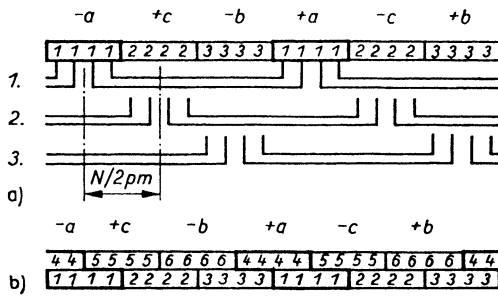


**Bild 1.2.17** Zonenpläne der Einziewicklung für  $p \in \mathbb{U}$ ,  $m = 3$ ,  $N/p = 18$ ,  $q = 3$ .

a) Einsichtwicklung; b) gesehnte Zweischichtwicklung, aus zwei Einsichtwicklungen hergestellt

halb geschlossenen, meist parallelfankigen Nuten angeordneten Rechteckleiter (s. Bild 1.1.6b) ermöglichen einen hohen Nutfüllfaktor und besitzen damit neben einem geringen Gleichstromwiderstand auch eine gute Abfuhr der Verlustwärme zum Blechpaket hin. Die einzelnen Wicklungselemente (s. Bild 1.1.6a), die auch als Haarnadeln oder U-Pins bezeichnet werden, werden axial in die Nuten eingeschoben. Dabei ist ein Spulenkopf bereits fertig geformt. Die Seite, aus der die Wicklungselemente eingeschoben werden, wird als Steckseite bezeichnet (s. Bild 1.1.6c). Der Wicklungskopf auf der gegenüberliegenden Seite, der sog. Schweißseite, wird nach dem Einschieben aller Wicklungselemente maschinell geformt, und die Wicklungselemente werden durch Laserschweißen oder andere Verbindungstechniken zu den parallelen Zweigen verbunden.

Da die Leiterhöhe zur Begrenzung der Stromverdrängung (s. Kap. 5) das Eindringmaß nach (6.5.8) bei der maximalen Speisefrequenz nicht wesentlich überschreiten sollte, ist es erforderlich, pro Nut mehr als zwei Leiter übereinander anzuordnen, so dass die Zahl der Wicklungsschichten in der Regel im Bereich von vier bis zehn liegt. Damit bestehen grundsätzlich deutlich mehr Möglichkeiten zur Zonenbildung und zur Sehnung als bei Zweischichtwicklungen. Um die Zahl der Schaltverbindungen möglichst gering zu halten, ist eine Ausführung als Wellenwicklung von Vorteil, so dass lediglich ein oder zwei Umkehrverbinder je parallelem Zweig erforderlich sind.

Ein Paar übereinanderliegender Schichten wird als Korb bezeichnet. Die einzelnen Körbe sind in der Regel ungesehnt. Eine Sehnung der gesamten Wicklung lässt sich dann auf einfache Weise dadurch erreichen, dass die Körbe gegeneinander um eine oder zwei Nutteilungen verschoben werden. Die Wechselbeziehungen mit dem Luftspaltfeld gleichen damit denen einer gesehnten oder auch ungesehnten Zweischichtwicklung. Auch kompliziertere Formen der Sehnung sind grundsätzlich möglich, wie z. B. eine sog. Z-Sehnung, bei der bereits die einzelnen Körbe gesehnt sind, oder eine mehrstufige Sehnung, mit der sich noch feiner abgestufte Durchflutungsverteilungen erreichen lassen als mit einer Zweischichtwicklung; diese Formen werden aber nur selten ausgeführt.

Wenn mehrere parallele Zweige je Strang ausgeführt werden sollen, so muss zur Vermeidung von Kreisströmen zwischen den parallelen Zweigen darauf geachtet werden, dass die Zweige sowohl in Bezug auf die Wechselwirkungen mit dem Luftspaltfeld als auch in Bezug auf ihre Streuinduktivität und die Stromverdrängung (s. Kap. 5) symmetrisch sind. Alle Zweige müssen somit sowohl den

|         |     |      |      |          |      |      |          |      |      |          |      |      |          |
|---------|-----|------|------|----------|------|------|----------|------|------|----------|------|------|----------|
| Schicht | Nut | 1    | 2    | ...      | 7    | 8    | ...      | 13   | 14   | ...      | 19   | 20   | ...      |
|         | 1   | 1    | 1    | ...      | 24   | 24   | ...      | 3    | 3    | ...      | 22   | 22   | ...      |
|         | 2   | 21   | 21   | ...      | 2    | 2    | ...      | 23   | 23   | ...      | 4    | 4    | ...      |
|         | 3   | 5    | 5    | ...      | 20   | 20   | ...      | 7    | 7    | ...      | 18   | 18   | ...      |
|         | 4   | 17   | 17   | ...      | 6    | 6    | ...      | 19   | 19   | ...      | 8    | 8    | ...      |
|         | 5   | 9    | 9    | ...      | 16   | 16   | ...      | 11   | 11   | ...      | 14   | 14   | ...      |
|         | 6   | 13   | 13   | ...      | 10   | 10   | ...      | 15   | 15   | ...      | 12   | 12   | ...      |
|         |     | $-a$ | $-a$ | $+c, -b$ | $+a$ | $+a$ | $-c, +b$ | $-a$ | $-a$ | $+c, -b$ | $+a$ | $+a$ | $-c, +b$ |

**Bild 1.2.18** Ausschnitt aus einem Nutzenbelegungsplan einer Sechschicht-Steckwicklung mit  $m = 3$ ,  $N = 24$ ,  $p = 2$ ,  $q = 2$  und  $a = 2$  (hellgrau: Zweig 1 des Strangs  $a$ ; dunkelgrau: Zweig 2 des Strangs  $a$ )

gleichen Nutenspannungsstern besitzen als auch die gleiche Zahl von Leitern pro Wicklungsschicht. Der Entwurf von Mehrschicht-Steckwicklungen erfolgt daher auf Basis sog. Nutzenbelegungspläne (s. Bild 1.2.18), in denen zunächst alle Möglichkeiten zur Aufteilung der Einzelleiter auf die Stränge und die parallelen Zweige sowie zur Reihenfolge der Hintereinanderschaltung innerhalb der Zweige ermittelt werden. Dabei wird für jeden Leiter festgelegt, der wievielte Leiter in der Hintereinanderschaltung welches parallelen Zweigs von welchem Strang er ist. Aus diesen Möglichkeiten werden dann diejenigen ausgewählt, die die oben genannten Anforderungen an die Symmetrie bezüglich des Luftspaltfelds, der Streuinduktivität und der Stromverdrängung erfüllen und die die geringste Zahl an Schaltverbindungen und die geringste Zahl verschieden geformter Wicklungselemente erfordern [2, 3]. Zudem sollten die Anfangs- und die Endpunkte der parallelzuschaltenden Zweige möglichst nah beieinander liegen, und zur Vermeidung von Schwierigkeiten beim Formen des schweißseitigen Wicklungskopfs und beim Schweißprozess sollten möglichst alle Wicklungsschritte auf der Schweißseite gleich sein.

In der Regel lassen sich mehrere dutzend oder sogar einige hundert Nutzenbelegungspläne finden, die alle genannten Anforderungen erfüllen und die im interessierenden Bereich der Speisefrequenzen praktisch dieselben Eigenschaften besitzen. Zwischen diesen vordergründig gleichen Wicklungsvarianten können jedoch gravierende Unterschiede in Bezug auf die transiente Potentialverteilung bestehen, die sich aufgrund der hohen Spannungsgradienten der speisenden Wechselrichter innerhalb der Wicklung ergibt (s. Bd. *Theorie elektrischer Maschinen*), und damit in Bezug auf die elektrische Beanspruchung der Windungsisolierung und der Hauptisolierung. Einzelheiten zu dieser komplexen Thematik können z. B. [4] entnommen werden.

Aufgrund der variablen Formgebung der einzelnen Wicklungselemente lassen sich bei Mehrschicht-Steckwicklungen auch ungerade Schichtzahlen ausführen, bei denen dann der radial außen liegende Korb eine Einschichtwicklung ist. Teils werden anstelle der U-Pins auch gerade Einzelleiter (sog. I-Pins) als Wicklungselemente genutzt, so dass nach dem Einschieben der Leiter beide Wicklungsköpfe geformt und verschweißt werden müssen, oder es werden sog. kontinuierliche Haarnadelwicklungen ausgeführt, bei denen zur Verringerung des Verbindungsaufwands ein wellenförmiger Zug aus mehreren Windungen vorgefertigt und dann eingelegt wird. Streng genommen ist dies aber keine Steckwicklung, und die

einzelnen Wicklungselemente sind keine U-Pins oder Haarnadeln. Der geringere Verbindungsaufwand wird dann durch einen höheren Aufwand beim Biegen der wellenförmigen Leiterzüge und beim Einlegen der Wicklung erkauft.

#### e) Harmonische von Ganzlochwicklungen

Wie im Abschnitt 1.2.3.4, Seite 82, gezeigt wird, bildet ein Strang einer Ganzlochwicklung nur ungeradzahlige Harmonische  $\nu = \nu'/p \in \mathbb{U}$  der Durchflutungsverteilung aus. Bei symmetrisch gespeisten mehrsträngigen Wicklungen fehlen außerdem diejenigen Harmonischen, deren Ordnungszahl ein Vielfaches der Strangzahl ist, da sie infolge der räumlichen Verschiebung der Stränge um den Winkel  $2\pi/m$  von allen Strängen räumlich gleichphasig erregt werden und sich daher ebenso wie die Strangströme zu Null überlagern. Bei symmetrisch gespeister Wicklung entstehen so nur Durchflutungswellen, deren Feldwellenparameter der Beziehung

$$\tilde{\nu}' = p(1 + 2mg) \quad \text{mit } g \in \mathbb{Z} \quad (1.2.30a)$$

genügen. Eine Ausnahme hiervon bilden Wicklungen mit Zonenänderung (einschließlich deren Grenzfall der Wicklungen mit doppelter Zonenbreite), die, wie im Unterabschnitt 1.2.3.4c, Seite 83, gezeigt wird, je nach Sehnung auch geradzahlige Harmonische ausbilden können ( $\nu = \nu'/p \in \mathbb{N}$ ) und deren Feldwellenparameter bei symmetrischer Speisung der Bedingung

$$\tilde{\nu}' = p(1 + mg) \quad \text{mit } g \in \mathbb{Z} \quad (1.2.30b)$$

genügen.

#### 1.2.2.2 Bruchlochwicklungen

Im Prinzip erfolgt die Aufteilung der Spulenseiten der Bruchlochwicklungen ebenfalls entweder über den Zonenplan oder über den Nutenspannungstern. Im Abschnitt 1.2.1.1, Seite 20, ist bereits angedeutet worden, dass bei Bruchlochwicklungen die Zahl  $Q$  der Spulen in den einzelnen Spulengruppen wegen  $q \notin \mathbb{N}$  unterschiedliche Werte annehmen muss. Damit entstehen zwangsweise unterschiedliche Zonenbreiten bzw. ergibt sich eine natürliche Zonenänderung. Es gilt

$$Q \neq Q_m = q \notin \mathbb{N}.$$

Der notwendige Wert von  $q$  kann nur als Mittelwert  $Q_m$  der verschiedenen Anzahlen von  $Q$  Spulen je Spulengruppe realisiert werden. Dabei ergibt jede Abweichung des Werts  $Q$  von  $q$  eine Störung des vollkommen symmetrischen Wicklungsaufbaus, wie er bei Ganzlochwicklungen ohne Zonenänderung vorliegt. Es wird später gezeigt werden, dass diese Störung eine Reihe nachteiliger Folgen hat. Man lässt deshalb die Anzahl  $Q$  von Spulen der einzelnen Spulengruppen nur um eine Spule variieren. Setzt man entsprechend (1.2.9)

$$q = \frac{z}{n} = g + \frac{z'}{n}, \quad (1.2.31)$$

wobei  $g$  eine natürliche Zahl darstellt,  $z'$  und  $n$  teilerfremd sind und  $z' < n$  ist, so erhält man  $Q_m = q$ , wenn man von jeweils  $n$  Spulengruppen  $z'$  Spulengruppen mit

$Q_a = g+1$  Spulen und  $n-z'$  Spulengruppen mit  $Q_b = g$  Spulen vorsieht entsprechend

$$Q_m = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Q_k = \frac{z'(g+1) + (n-z')g}{n} = g + \frac{z'}{n} = q. \quad (1.2.32)$$

Wie leicht einzusehen ist, erhält man einen möglichst symmetrischen Wicklungsaufbau dann, wenn sich die Aufeinanderfolge der Spulengruppen mit  $Q_a$  und mit  $Q_b$  entlang des Umfangs so oft wie möglich wiederholt, d. h. wenn die Spulengruppen mit  $Q_a$  Spulen bzw. die mit  $Q_b$  Spulen möglichst gleichmäßig über den Umfang verteilt werden. Die günstigsten Verhältnisse liegen bei  $n = 2$  vor, da man dann  $Q$  von Spulengruppe zu Spulengruppe wechseln lassen kann (s. Bild 1.2.50a, S. 98).

Zur Erfüllung von (1.2.32) sind  $n$  Spulengruppen je Strang nötig, denn  $Q_m = q$  muss für jeden Strang realisiert werden. Damit beträgt die erforderliche Spulenzahl einer Urwicklung unter Beachtung von (1.2.2), (1.2.20) und (1.2.22) bei einer Einschichtwicklung

$$Q_m n m = q p^* m = \frac{N^*}{2} \quad (1.2.33)$$

und bei einer Zweischichtwicklung

$$2Q_m n m = 2q p^* m = N^*. \quad (1.2.34)$$

Da Einschicht-Bruchlochwicklungen heute im Wesentlichen in der Sonderausführung als Zahnspulenwicklung mit Zwischenzahn (s. Abschn. 1.2.2.3g, S. 69) von Bedeutung sind, beschränken sich die folgenden Betrachtungen auf Zweischicht-Bruchlochwicklungen. Andere Einschicht-Bruchlochwicklungen können grundsätzlich auf einfache Weise aus Zweischicht-Bruchlochwicklungen abgeleitet werden, indem die Spulenseiten der Ober- und der Unterschicht jeweils in zwei getrennten, nebeneinanderliegenden Nuten angeordnet werden. Es sind aber auch Varianten ausführbar, die komplizierteren Bildungsgesetzen unterliegen (s. z. B. [5], Abschn. 4.1).

Jede Spule einer Zweischichtwicklung besitzt eine Spulenseite in der Oberschicht und eine in der Unterschicht. Sie sind stets so ausführbar, dass alle Spulen die gleiche Weite haben. Bei der Aufteilung der linken Spulenseiten braucht dann auf die rechten Spulenseiten keine Rücksicht genommen zu werden, da diese im Gegensatz zur Einschichtwicklung stets den der Spulenweite entsprechenden Platz in der anderen Schicht finden. Es wird angenommen, dass die linken Spulenseiten in der Oberschicht liegen. Für diese Oberschichtspulenseiten gilt vereinbarungsgemäß der Nutenspannungsstern der Zweischichtwicklung (s. Abschn. 1.2.2.1b). Da ferner der Nutenspannungsstern der Zweischicht-Bruchlochurwicklung stets nur einen Zeigerkreis hat und damit auch nicht das Problem eventuell unterschiedlicher Zeigeraufteilungen zweier Zeigerkreise auftritt, bereitet es keine Schwierigkeiten, die Aufteilung der Spulenseiten der Zweischicht-Bruchlochwicklung völlig symmetrisch mit Hilfe des Nutenspannungssterns der Urwicklung vorzunehmen. Man bildet dazu für die einzelnen Stränge symmetrisch verteilte, geschlossene Zeigerbündel, da eine solche Aufteilung die geringste Abweichung der Zonen- und Durchflutungsverteilung vom Fall der Ganzlochwicklung ergibt.

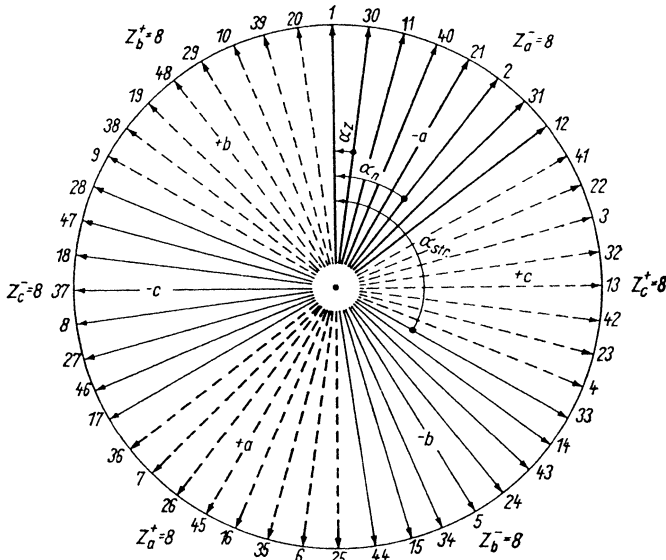


**Bild 1.2.19** Nutenspannungsstern der Zweischichturwicklung erster Art für  $p^* = 5$ ,  $m = 3$ ,  $N' = N^* = 48$ ,  $q = 1\frac{3}{5}$ ,  $t^* = 1$ ,  $a_n = 5a_z = 37\frac{1}{2}^\circ$

**a) Zweischicht-Bruchlochurwicklungen erster Art**

Kennzeichen einer Zweischicht-Bruchlochurwicklung erster Art ist nach (1.2.19)

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

Daher ist eine Aufteilung der Zeiger des Nutenspannungssterns in Form gleich großer Zeigerbündel bzw. gleich großer elektrischer Zonen möglich. Als Beispiel soll eine Wicklung mit den Kennwerten  $N = 192$ ,  $p = 20$ ,  $m = 3$ ,  $q = 1\frac{3}{5}$ ,  $n = 5 \in \mathbb{U}$  und damit entsprechend  $N^* = 48$ ,  $p^* = 5$ ,  $t^* = 1$  entworfen werden. Der zugeordnete Nutenspannungsstern der Urwicklung im Bild 1.2.19 hat die Kennwerte

|                         |                                                                      |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Zahl der Zeigerkreise   | $t^* = 1$                                                            |
| Zahl der Zeigerstrahlen | $N' = N^* / t^* = 48$                                                |
| Nutenwinkel             | $\alpha_n = 360^\circ p^* / N^* = 37\frac{1}{2}^\circ$               |
| Zeigerwinkel            | $\alpha_z = 360^\circ t / N^* = 360^\circ / 48 = 7\frac{1}{2}^\circ$ |
| Bezifferungssprung      | $p^* / t^* - 1 = 4.$                                                 |

Wegen  $t^* = 1$  ist die Zahl der Zeigerstrahlen  $N'$  gleich der Zahl der Zeiger  $N^*$ , und auf jeden Strang entfallen  $N^* / m = 48 / 3 = 16$  Zeiger, die in  $Z^-$  negative Zeiger (negative Spulenseiten bzw. Spulenseiten der negativen Zone) und  $Z^+$  positive Zeiger (positive Spulenseiten bzw. Spulenseiten der positiven Zone) aufgeteilt werden müssen. Bei Urwicklungen erster Art ist die Zahl der Zeiger je Strang  $N^* / m$  nach (1.2.19) gerade. Für den Normalfall, dass keine Zonenänderung vorgesehen ist, kann man also stets  $Z^+ = Z^-$  wählen, d. h. es lassen sich völlig gleiche elektrische Zonen bilden. Für die vorliegende Wicklung ist  $Z^+ = Z^- = 8$ . Entsprechend der normalen Zonenfolge  $-a, +c, -b, +a, -c, +b$  (s. Abschn. 1.2.2.1, S. 35) bildet man

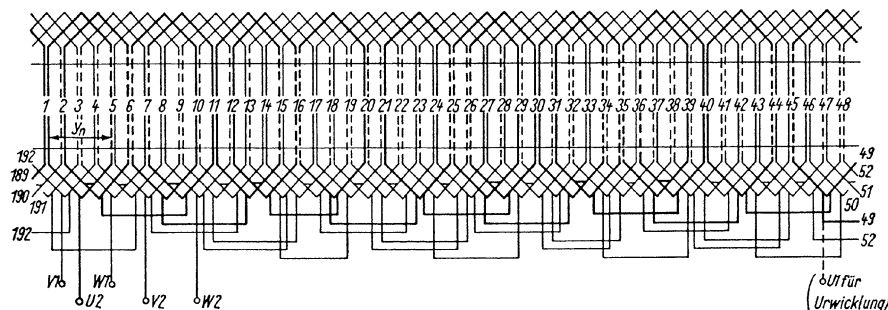


**Bild 1.2.20** Wicklungsschema einer Urwicklung der Zweischicht-Bruchlochwicklung für  $p = 20$ ,  $m = 3$ ,  $N = 192$ ,  $q = 1 \frac{3}{5}$

im Nutenspannungsstern Zonen aus jeweils acht Zeigern. Zunächst zählt man dazu  $Z^- = 8$  Zeiger für die Zone  $-a$  ab, danach  $Z^+ = 8$  Zeiger für die Zone  $+c$ , dann  $Z^- = 8$  Zeiger für die Zone  $-b$  usw. (s. Bild 1.2.19).

Mit der Aufteilung des Nutenspannungssterns liegt die Aufteilung der Oberschichtspulenseiten im Wicklungsschema fest. Die Lage der Unterschichtspulenseiten ergibt sich nach dem gewählten Wicklungsschritt. Für Bruchlochwicklungen ist der Durchmesserschritt nach (1.2.25) wegen  $q \notin \mathbb{N}$  nicht ausführbar. Für das betrachtete Beispiel wird

$$y_0 = mq = 3 \cdot 1 \frac{3}{5} = 4 \frac{4}{5} \notin \mathbb{N}.$$

Wählt man z. B. eine Schrittverkürzung  $y_v = 4/5$ , so erhält man einen ganzzahligen, d. h. ausführbaren Wicklungsschritt von

$$y = mq - y_v = 4 \frac{4}{5} - \frac{4}{5} = 4.$$

Zweischicht-Bruchlochwicklungen sind also stets gesehnte Wicklungen.

Im Wicklungsschema (s. Bild 1.2.20) liegt entsprechend dem Wicklungsschritt  $y = 4$  die Unterschichtspulenseite (rechte Spulenseite) jeder Spule vier Nutteilungen von der Oberschichtspulenseite (linke Spulenseite) entfernt. Es entstehen in jedem Strang sechs Spulengruppen mit je zwei Spulen und vier Spulengruppen mit je einer Spule, und der Mittelwert wird wie erforderlich

$$Q_m = \frac{1}{10}(6 \cdot 2 + 4 \cdot 1) = \frac{16}{10} = 1 \frac{3}{5} = q.$$

Bei der Strangbildung müssen die negativen Spulen wieder im umgekehrten Sinn in die Schaltung eingefügt werden (s. Abschn. 1.2.2.1b). Dabei ist es gleichgültig, ob man zunächst alle Spulengruppen gleichen Vorzeichens hintereinanderschaltet oder ob man von vornherein alle Spulengruppen alternierend zum Strang verbindet. Die einzelnen Urwicklungen können in Reihe, aber auch parallelgeschaltet werden. Wegen  $Z^+ = Z^-$  lassen sich sogar die positiven Spulengruppen einer Urwicklung mit den negativen parallelschalten.

Wie im Abschnitt 1.2.3.4, Seite 82, gezeigt wird, erzeugt eine Ganzlochwicklung ohne Zonenänderung nur Harmonische mit  $\nu = \nu'/p \in \mathbb{U}$ . Für ihre Durchflutungsverteilung gilt daher

$$\Theta(x + \tau_p) = -\Theta(x),$$

und die Periodenlänge ihrer Grundharmonischen ist  $2\tau_p$ .

Die Periode der Durchflutungsverteilung von Bruchlochwicklungen erstreckt sich über eine der  $t$  Urverteilungen mit  $p' = p/t = n$  Polpaaren. Es gilt also

$$\Theta(x + 2p'\tau_p) = \Theta(x)$$

mit einer Periodenlänge der Grundharmonischen von  $2p'\tau_p = 2n\tau_p$ . Darüber hinaus ergibt die Durchflutungsverteilung der Bruchlochwicklung erster Art höhere Harmonische aller Ordnungszahlen

$$\nu' = gt = g \frac{p}{n}, \quad g \in \mathbb{U}. \quad (1.2.35)$$

Besonders stark ausgeprägt ist natürlich die Hauptwelle mit der Ordnungszahl  $\nu' = p$  und der Periodenlänge  $2\tau_p$ . Es existieren aber i. Allg. auch Harmonische mit  $\nu' < p$ , sog. *Subharmonische*, und ebenso Harmonische mit Ordnungszahlen oberhalb derjenigen der Hauptwelle, die gebrochene oder ganzzahlige Vielfache von  $p$  sind. Natürlich gibt es entsprechend (1.2.35) bezüglich der Winkelkoordinate  $\gamma'$  in jedem Fall nur Harmonische mit ganzzahligen Ordnungszahlen  $\nu'$ .

Aus den vorstehenden Betrachtungen geht hervor, dass Bruchlochwicklungen mehr Harmonische ausbilden als Ganzlochwicklungen. Das Spektrum der Durchflutungswellen ist  $n$ -mal so dicht besetzt wie bei einer Ganzlochwicklung. Die hinzukommenden Harmonischen führen wie alle Harmonischen der Durchflutungsverteilung zu zusätzlichen Verlusten (s. Abschn. 6.5, S. 407), unerwünschten Radialzugspannungswellen (s. Kap. 7) und unerwünschten Drehmomenten (s. Bd. *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschn. 1.7.5). Ihr Einfluss wird umso größer, je stärker die Zonenverteilung bzw. Durchflutungsverteilung der Bruchlochwicklung von der einer ähnlichen Ganzlochwicklung abweicht.

Bei symmetrisch gespeisten mehrsträngigen Wicklungen treten nicht alle ganzzahligen Harmonischen der Durchflutungsverteilung in Erscheinung. So fehlen im Spektrum Vielfache der Strangzahl, da sie infolge der räumlichen Verschiebung der Stränge um den Winkel  $2\pi/m$  von allen Strängen räumlich gleichphasig erregt werden und sich daher ebenso wie die Strangströme zu Null überlagern. Bei symmetrischer Speisung entstehen dann nach [6] nur Durchflutungswellen, deren Feldwellenparameter der Bedingung

$$\tilde{\nu}' = p \left( 1 + \frac{2mg}{n} \right) \quad \text{mit} \quad g \in \mathbb{Z} \quad (1.2.36)$$

genügen.

Die Zweischicht-Bruchlochwicklung mit Urwicklung erster Art hat genauso viele Urwicklungen wie Urverteilungen ( $t^* = 1$ , s. Tab. 1.2.4, S. 33) und lässt sich in maximal  $a_{\max} = 2t$  parallelen Wicklungszweigen schalten.

#### **b) Zweischicht-Bruchlochurwicklungen zweiter Art**

Kennzeichen einer Zweischicht-Bruchlochurwicklung zweiter Art ist nach (1.2.21)

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

Daher ist eine Aufteilung in  $Z^+ = Z^-$  nicht möglich. Im Nutenspannungsstern sind daher nicht alle Zonen gleich. Trotzdem lässt sich die Wicklung ausgehend vom Nutenspannungsstern ohne Verschachtelung der Zonen bzw. Stränge entwerfen.

Als Beispiel wird eine Zweischichtwicklung mit  $N = 42$ ,  $p = 2$ ,  $m = 3$  betrachtet. Ihre Lochzahl ist also gegeben zu

$$q = \frac{42}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 3\frac{1}{2}.$$

Wegen  $n = 2 \in \mathbb{G}$  liegt eine Zweischicht-Bruchlochurwicklung zweiter Art vor (s. Tab. 1.2.4). Ihre Kennwerte sind mit  $t = 2p/n = 2$ :

$$N^* = N/t = 42/2 = 21$$

$$p^* = n/2 = 2/2 = 1$$

$$t^* = 1.$$

Diese Urwicklung ist gleichzeitig ein Beispiel dafür, dass sich bei  $p^* = 1$  eine Zweischicht-Bruchlochwicklung ausführen lässt (s. Abschn. 1.2.1.5a, S. 29). Der Nutenspannungsstern der Urwicklung nach Bild 1.2.21 hat die Kennwerte:

$$\text{Zahl der Zeigerkreise} \quad t^* = 1 = p^*$$

$$\text{Zahl der Zeigerstrahlen} \quad N' = N^*/t^* = 21$$

$$\text{Nutenwinkel, Zeigerwinkel} \quad \alpha_n = \alpha_z = 360^\circ/N^* = 360^\circ/21 = 17\frac{1}{7}^\circ$$

$$\text{Bezifferungssprung} \quad p^*/t^* - 1 = 0.$$

Auf jeden Strang entfallen  $N'/m = N^*/m = 21/3 = 7$  Zeiger, die sich also nicht in eine gleiche Zahl negativer und positiver Zeiger aufteilen lassen. Will man nur die natürliche Zonenänderung zulassen, so muss man  $Z^+ = Z^- + 1$  oder  $Z^+ = Z^- - 1$  wählen. Im zweiten Fall ergibt sich  $Z^- = 4$ ,  $Z^+ = 3$ . In der bekannten Zonenfolge entstehen dann im Nutenspannungsstern elektrische Zonen mit wechselnden Zeigerzahlen (s. Bild 1.2.21).

Wenn eine Schrittverkürzung von  $y_v = 1/2$  gewählt wird, erhält man den ganzzahligen und damit ausführbaren Wicklungsschritt

$$y = mq - y_v = 10\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 10.$$

Im Wicklungsschema nach Bild 1.2.22 erkennt man, dass alle positiven Spulengruppen vier Spulen und alle negativen Spulengruppen drei Spulen besitzen und einander daher nicht direkt parallelgeschaltet werden dürfen. Es können also nur  $a_{\max} = t$  parallele Wicklungszweige ausgeführt werden. Man erhält den Mittelwert  $Q_m = 3\frac{1}{2} = q$ . Da alle negativen Spulengruppen ebenso wie alle positiven Spulengruppen untereinander dieselbe Spulenzahl aufweisen, kann man auch eine Wellenwicklung ausführen (s. Abschn. 1.2.2.1b). Es entsteht dann in jedem Strang ein Wellenzug der positiven Spulengruppen, der viermal in der einen Richtung durchlaufen wird, und ein Wellenzug der negativen Spulengruppen, der dreimal in der anderen Richtung durchlaufen wird. Beide Wellenzüge werden durch die sog. *Umkehrverbindung* in Reihe geschaltet. Zum besseren Erkennen der Wellenwicklung ist im Bild 1.2.22 das Wicklungsschema der vollständigen Wicklung angegeben.

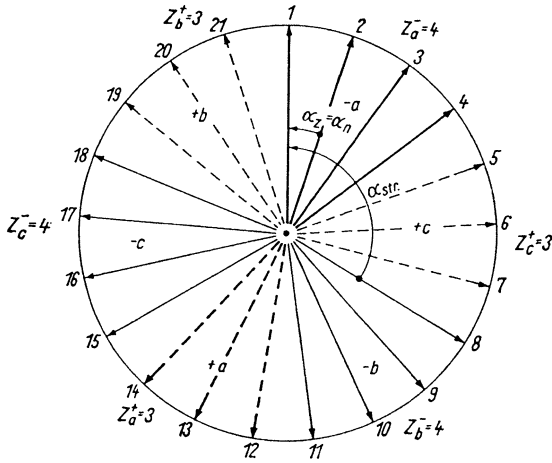


**Bild 1.2.21**  
Nutenspannungsstern der  
Zweischichturwicklung  
zweiter Art für  $p^* = 1$ ,  
 $m = 3$ ,  $N' = N'' = 21$ ,  $q = 3\frac{1}{2}$ ,  
 $t^* = 1$ ,  $a_n = a_z = 17\frac{1}{7}^\circ$

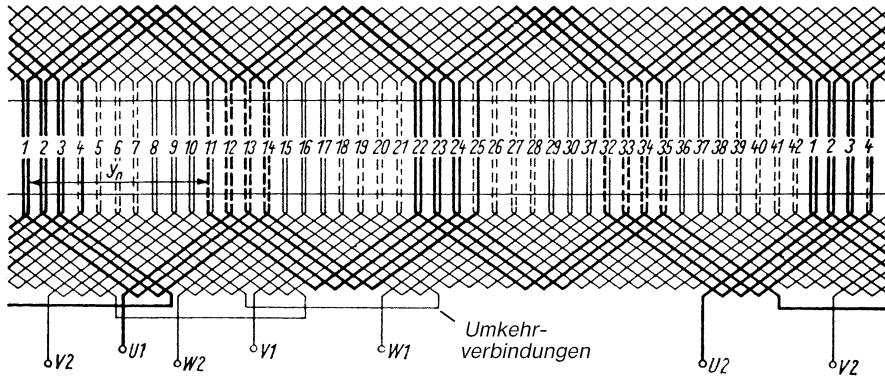


**Bild 1.2.22** Vollständiges Wicklungsschema der Zweischicht-Wellenwicklung für  $p = 2$ ,  
 $m = 3$ ,  $N = 42$ ,  $q = 3\frac{1}{2}$

Neben den Ganzlochwicklungen kann man also auch Zweischicht-Bruchlochwicklungen mit  $q = g + \frac{1}{2}$  als Wellenwicklung schalten. Dabei wird der eine Wellenzug  $(g + 1)$ -mal und der andere Wellenzug  $g$ -mal durchlaufen. Nach jedem Durchlauf eines Teilzugs muss der Wicklungsschritt der Schaltverbindung um 1 vergrößert werden, damit man den nächsten Teilzug erfasst. Außer den drei Umkehrverbindungen treten keine weiteren Schaltverbindungen auf. Bei allen übrigen Wicklungen wächst die Zahl der Schaltverbindungen mit der Zahl der Polpaare (s. z. B. Bild 1.2.20).

Urwicklungen zweiter Art erzeugen als Harmonische niedrigster Ordnungszahl ebenfalls solche mit  $\nu' = t$ . Ihre Durchflutungsverteilung ergibt aber neben ungeradzahligem auch geradzahligem Vielfache davon, so dass (1.2.35) übergeht in

$$\nu' = gt = g \frac{2p}{n}, \quad g \in \mathbb{N}$$

$$\text{bzw. } \nu' = g \frac{p}{n}, \quad g \in \mathbb{G}. \quad (1.2.37)$$

Die Beziehung (1.2.36) zur Bestimmung der Feldwellenparameter gilt unverändert.

Die Zweischicht-Bruchlochwicklung mit Urwicklung zweiter Art hat genauso viele Urwicklungen wie Urverteilungen und lässt sich in maximal  $a_{\max} = t$  parallelen Wicklungszweigen schalten (s. Tab. 1.2.4, S. 33). Da die Zahl  $t$  der Urverteilungen bei einer Urwicklung zweiter Art doppelt so groß ist wie bei einer Urwicklung erster Art und andererseits aber auch geradzahlige Vielfache von  $\nu' = t$  erzeugt werden, bildet die Urwicklung zweiter Art nach (1.2.37) bei etwa gleich großem  $p$  und  $n$  auch ungefähr genauso viele Harmonische aus wie die Urwicklung erster Art nach (1.2.35).

### 1.2.2.3 Sonderwicklungen

Die in den Abschnitten 1.2.2.1 und 1.2.2.2 behandelten Wicklungen mit ungerader Strangzahl (insbesondere mit  $m = 3$ ) sind die weitaus am häufigsten vorkommenden Strangwicklungen. Zu den Strangwicklungen, die außerdem noch angewendet werden, gehören Wicklungen mit gerader Strangzahl (insbesondere mit  $m = 2$  und  $m = 6$ ), einsträngige Wicklungen, gesehnte Einschichtwicklungen, Wicklungen für Polumschaltung, Wicklungen mit erweiterter Parallelschaltung und Teilparallelschaltung, Wicklungen mit gemischter Stern-Dreieck-Schaltung sowie – mit heute geringer Bedeutung – angezapfte und aufgeschnittene Kommutatorwicklungen, die von den Anzapfungen bzw. Schnittstellen her wie Wicklungen mit ausgebildeten Strängen wirken. Als Sonderbauart dreisträngiger Wicklungen haben in den letzten Jahren sog. Zahnspulenwicklungen vor allem bei hochpoligen permanenterregten Synchronmaschinen weite Verbreitung gefunden. Eine weitere Kategorie von Sonderwicklungen stellen die Luftspaltwicklungen dar. Die genannten Wicklungen sind Gegenstand dieses Abschnitts.

#### a) Wicklungen mit besonderen Formen der Parallelschaltung

Bei Wicklungen mit erweiterter Parallelschaltung werden, sofern möglich, zwecks Vergrößerung der Zahl paralleler Zweige Wicklungsteile parallelgeschaltet, die kleiner sind als die Spulengruppen. So lassen sich z. B. bei Einschicht-Ganzlochwicklungen mit  $Q = q \in \mathbb{G}$  die beiden Teile geteilter Spulengruppen (s. Bild 1.2.7c, S. 36) parallel schalten. Eine ähnliche Aufteilung der Spulengruppen ist auch bei Zweischichtwicklungen möglich [1, 7]. Man erreicht auf diese Weise für  $p = 1$  z. B. bei großen Turbogeneratoren bereits vier parallele Zweige.

Wicklungen mit Teilparallelschaltung sind Strangwicklungen, bei denen nur ein Teil jedes Strangs aus parallelgeschalteten Wicklungsteilen besteht. Die parallelgeschalteten Wicklungsteile haben dann einen entsprechend kleineren Leiterquerschnitt [1, 7].

#### b) Wicklungen mit geradzahliger Strangzahl

Wicklungen mit gerader Strangzahl haben heute vor allem mit  $m = 2$  oder  $m = 6$  Strängen Bedeutung. Der Entwurf von Wicklungen mit gerader Strangzahl verläuft prinzipiell genauso wie der von dreisträngigen Wicklungen. Man hat lediglich zu beachten, dass in der Zonenfolge das Vorzeichen nicht alterniert (s. Bild 1.2.1, S. 21, für  $m = 2$ ).

##### b1) Zweisträngige Wicklungen

Da es zweiphasige Netze kaum noch gibt, kommen zweisträngige Wicklungen nunmehr praktisch ausschließlich als Ständerwicklungen von Einphasen-Induktionsmaschinen mit Haupt- und Hilfsstrang (s. Bd. *Grundlagen elektrischer Maschinen*,

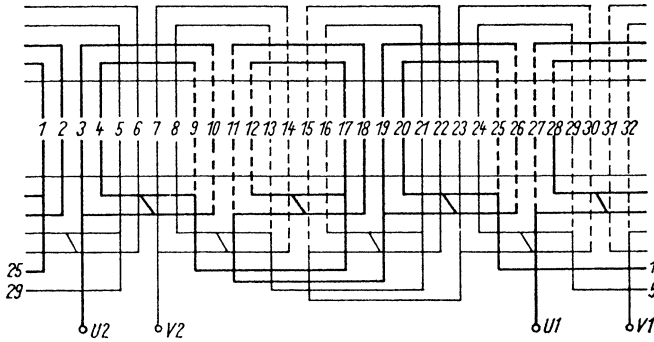


**Bild 1.2.23** Wicklungsschema einer zweisträngigen Einschichtwicklung für  $p = 2$ ,  $N = 32$ ,  $q = 4$

Abschn. 7.2) und z. T. von Einphasen-Synchronmaschinen vor sowie als zweisträngige Schleifringläuferwicklungen in Induktionsmaschinen geringer Leistung.

Beim Entwurf zweisträngiger Wicklungen gilt die Zonenfolge  $-a, -b, +a, +b$ . Bei zweisträngigen Einphasen-Induktionsmaschinen unterscheidet man zwischen symmetrischen, quasisymmetrischen und unsymmetrischen Ständerwicklungen. Bei symmetrischen Ständerwicklungen besitzen Haupt- und Hilfsstrang gleiche Nutzahlen, Windungszahlen und Leiterquerschnitte. Bei quasisymmetrischen Wicklungen sind zwar noch die Nutzahlen identisch; Windungszahl und Leiterquerschnitt von Haupt- und Hilfsstrang unterscheiden sich aber voneinander, wobei das Produkt aus Windungszahl und Leiterquerschnitt für beide gleich ist. Damit lässt sich die Wicklung besser auf einen mit dem Hilfsstrang in Reihe geschalteten Kondensator abstimmen [8]. Bei unsymmetrischen Wicklungen besitzt der Hilfsstrang meist nur halb so viele Nuten und damit Spulen wie der Hauptstrang.

Bild 1.2.23 zeigt eine zweisträngige Ganzlochwicklung mit  $N = 32$ ,  $p = 2$ ,  $q = 4$ . Zweisträngige Wicklungen bilden im Wicklungskopf stets nur zwei Ebenen. Man führt sie vorzugsweise mit geteilten Spulengruppen aus.

#### b2) Sechsstängige Wicklungen

Sechsstängige Wicklungen bilden nach (1.2.30a) ein weniger dicht besetztes Spektrum von Harmonischen als dreisträngige Wicklungen. Bei symmetrisch gespeister Wicklung entstehen nur Durchflutungswellen mit den Feldwellenparametern

$$\tilde{\nu}' = p; -11p; 13p; -23p; 25p; \dots$$

Sie besitzen damit auch eine geringere Oberwellenstreuung (s. Abschn. 3.7.3, S. 296) und im Vorgriff auf (1.2.68) wegen des geringeren Verhältnisses  $q/y_\varnothing$  einen größeren Hauptwellen-Wicklungsfaktor als dreisträngige Wicklungen. Umgekehrt erregen bei symmetrischer, aber Oberschwingungsbehafteter Speisung bestimmte Zeitharmonische – konkret die Harmonischen  $\left| \tilde{\lambda} \right| f$  mit

$$\tilde{\lambda} = 7 + 12g \quad \text{mit} \quad g \in \mathbb{Z}, \quad (1.2.38)$$

wobei ein negatives Vorzeichen des vorzeichenbehafteten Oberschwingungsparameters  $\tilde{\lambda}$  auf eine gegenüber der Grundschwingung umgekehrte Phasenfolge hinweist, – keine Hauptwelle des Luftspaltfelds, sondern nur Oberwellen mit den

Feldwellenparametern  $-5p, 7p, -17p, 19p, \dots$ . Für die Zeitharmonischen  $|\tilde{\lambda}|f$  mit  $\tilde{\lambda} = -5, 7, -17, 19, \dots$  besitzen sechssträngige Wicklungen folglich nur eine sehr geringe Induktivität.

Beim Entwurf sechssträngiger Wicklungen gilt die Zonenfolge  $-a, -b, +e, +f, -c, -d, +a, +b, -e, -f, +c, +d$ . Sechssträngige Wicklungen werden häufig aus zwei voneinander unabhängigen, symmetrischen Dreiphasensystemen gespeist, die gegeneinander um  $30^\circ$  phasenverschoben sind. Die Zonenfolge kann im Hinblick darauf auch als  $-a', -a'', +c', +c'', -b', -b'', +a', +a'', -c', -c'', +b', +b''$  geschrieben werden. Für die beiden dreisträngigen Teilwicklungen  $a', b', c'$  und  $a'', b'', c''$  werden vorzugsweise getrennte Sternpunkte ausgeführt, da sich dann gemäß Unterabschnitt 1.2.2.1e keine Oberschwingungsströme mit Frequenzen ausbilden können, die ein Vielfaches der dreifachen Grundfrequenz sind. Da nach Band *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschnitt 1.5.7, die Sättigungsharmonische der Durchflutungshauptwelle mit  $\nu' = 3p$  die dreifache Grundfrequenz besitzt, würden die von dieser in den Strängen induzierten Spannungen bei einem gemeinsamen Sternpunkt aller sechs Stränge Ströme dreifacher Grundfrequenz antreiben. Bei Synchronmaschinen hätten die Polradoberfelder mit  $\nu' = 3p$  dieselbe Wirkung. Die Ausführung getrennter Sternpunkte vermeidet dies.

Aufgrund der geringen für die Oberschwingungen nach (1.2.38) wirksamen Induktivität werden sechssträngige Wicklungen vor allem bei aus stromeinprägenden Umrichtern gespeisten Synchron- und z. T. Induktionsmaschinen eingesetzt. Eingeprägte Stromüberschwingungen der Frequenzen  $|\tilde{\lambda}|f$  mit  $\tilde{\lambda} = -5, 7, -17, 19, \dots$  haben dann nur geringe Spannungsüberschwingungen zur Folge. Umgekehrt würden aus diesem Grund bei spannungseinprägenden Umrichtern aus Spannungsüberschwingungen der genannten Frequenzen große Stromüberschwingungen entstehen, was schon aufgrund der damit verbundenen Verluste unerwünscht ist (s. Abschn. 6.5.2, S. 417).

### c) Einsträngige Wicklungen

Einsträngige Wicklungen haben vor allem als Ständerwicklungen von Einphasengeneratoren zur Speisung von Bahnnetzen Bedeutung. Zu den einsträngigen Wicklungen kann man auch die in Nuten verteilt angeordneten Erregerwicklungen von Vollpol-Synchronmaschinen rechnen. Da einsträngige Wicklungen nur zwei Zonen je Polpaar ausbilden, ist der Entwurf besonders von Ganzlochwicklungen sehr einfach.

Grundsätzliches Bestreben jedes Entwurfs einer Strangwicklung (und das gilt auch für die verteilten Erregerwicklungen von Vollpol-Synchronmaschinen) ist die Erzielung einer Durchflutungsverteilung, die möglichst wenig von der sinusförmigen Hauptwelle abweicht. Wie auch aus Band *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschnitt 1.5.5, hervorgeht und wie noch im Abschnitt 1.2.3, Seite 74, gezeigt werden wird, dienen diesem Ziel

- die Verteilung der Wicklung auf mehrere Nuten,
- die Anwendung von Bruchlochwicklungen,
- die Wicklungssehnung,
- die Zonenänderung.

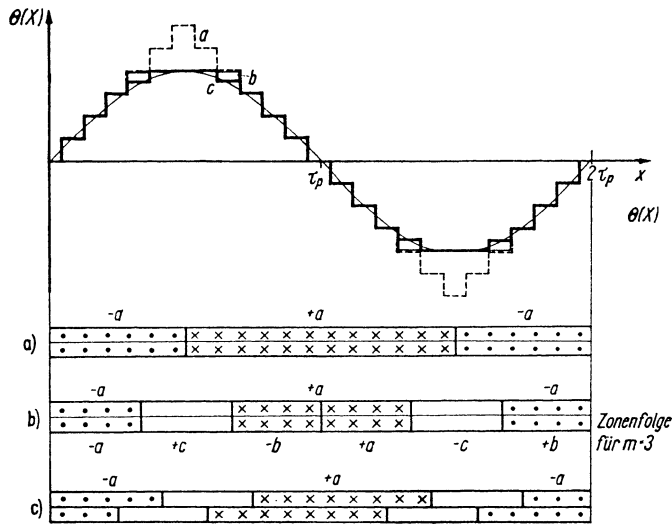


**Bild 1.2.24** Zonenpläne und Durchflutungsverteilungen einsträngiger Wicklungen für  $p = 1$ ,  $N = 24$ ,  $q = 12$ . a) vollständige Bewicklung; b)  $2/3$ -Bewicklung; c)  $2/3$ -bewickelte, gesehnte Zweischichtwicklung

Bei der Speisung mehrsträngiger Wicklungen mit einem symmetrischen Mehrphasensystem der Ströme können sich einzelne Harmonische der Durchflutungsverteilungen der Stränge gegeneinander aufheben. Das betrifft z. B. die dritten Harmonischen bei der Speisung einer dreisträngigen Wicklung mit einem symmetrischen Dreiphasensystem der Ströme mit positiver oder negativer Phasenfolge. Die dritten Harmonischen der Stränge sind räumlich gleichphasig und überlagern sich ebenso wie die drei Strangströme zu Null. Wenn man eine dreisträngige Wicklung über zwei Klemmen einphasig einspeist, rufen die beiden stromführenden Stränge räumlich gleichphasige dritte Harmonische der Durchflutungsverteilung hervor, die aber von zeitlich gegenphasigen Strömen hervorgerufen werden, so dass sie sich ebenfalls gegeneinander auslöschen.

Von dieser Betrachtung ausgehend, gewinnt man eine Entwurfsmöglichkeit für einsträngige Wicklungen, indem man Zonen bildet, die etwa  $2/3$  einer Polteilung umfassen und die wie die Zonen eines Strangs einer dreisträngigen Wicklung innerhalb des Wicklungsschemas verteilt sind (s. Bild 1.2.24b u. c). Die Wirksamkeit dieser Maßnahme wird im Abschnitt 1.2.6.2, Seite 107, nachgewiesen.

Aus den vorstehenden Erörterungen folgt bereits eine Entwurfsmöglichkeit der einsträngigen Wicklung. Man entwirft eine dreisträngige Wicklung, lässt einen der Stränge weg und schaltet die beiden anderen gegensinnig in Reihe. Auf diese Weise entsteht eine Wicklung, bei der genau  $2/3$  aller Nuten, bewickelt sind, und man spricht von einer *Zwei-Drittel-Bewicklung*.

Der direkte Entwurf einer einsträngigen Wicklung ist auch deshalb so einfach, weil die zweite Symmetriebedingung entfällt (s. Abschn. 1.2.1.5b, S. 29) und die erste Symmetriebedingung für Einschichtwicklungen nach (1.2.7a) lediglich eine gerade Nutzahl fordert. Da man jedoch sowieso freie Nuten vorsieht, entfällt auch

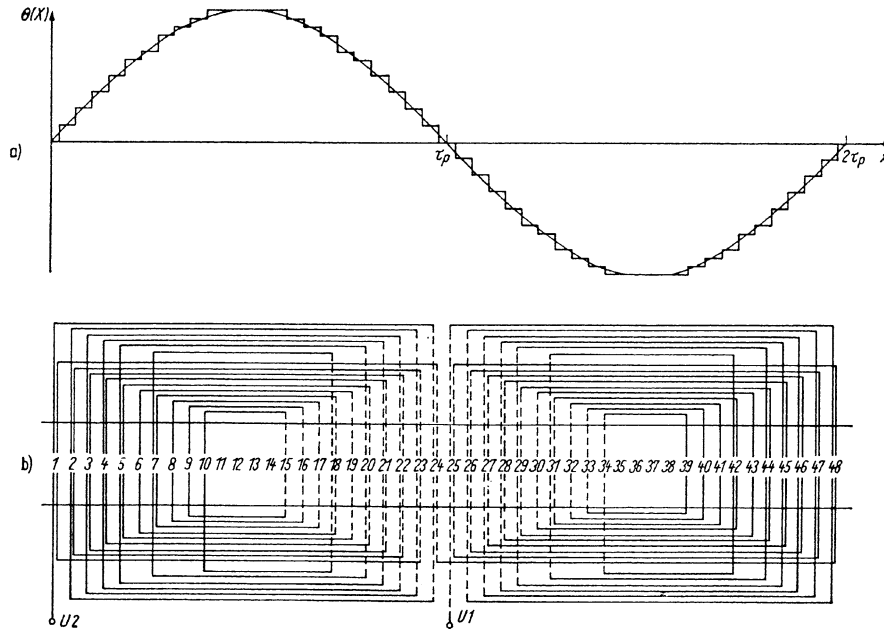


**Bild 1.2.25** Einsträngige Wicklung mit angepasster Spulenseitenverteilung für  $p = 1$ ,  $N = 48$ ,  $q = 24$ . a) Durchflutungsverteilung; b) Wicklungsschema

noch diese Bedingung (s. Abschn. 1.2.1.5c, S. 30). Bei kleinen Polpaarzahlen ist die Zahl der Nuten je Pol so groß, dass man bereits mit einfach gesehten Zweischicht-Ganzlochwicklungen Durchflutungsverteilungen erreicht, die einer sinusförmigen Hauptwelle schon recht nahe kommen (s. Bild 1.2.24c). Dabei entstehen Nuten, die nur mit einer Spulenseite belegt sind. Der Rest des Nutraums muss dann mit inaktivem Material gefüllt werden. Man wählt als Spulenzahl je Spulengruppe

$$Q \approx \frac{2}{3}q = \frac{N}{3p} \quad (1.2.39)$$

und eine zweckmäßige Schrittverkürzung (s. Abschn. 1.2.3, S. 74). Den Zonenplänen im Bild 1.2.24 liegen mit  $y_v = 2$  die Kennwerte

$$\begin{aligned} N &= 24, \quad p = 1, \quad m = 1, \\ q &= \frac{N}{2p} = \frac{24}{2} = 12, \quad Q = \frac{2}{3}q = \frac{2}{3}12 = 8, \\ y &= qm - y_v = 12 - 2 = 10 \end{aligned}$$

zugrunde. Bei sehr großer Nutzahl je Pol erhält man die günstigste Wicklungsverteilung, wenn man sich die von der Durchflutungsverteilung anzustrebende Hauptwelle vorgibt und dann eine Spulenseitenverteilung wählt, deren Durchflutungsverteilung dieser Hauptwelle optimal angepasst ist (s. Bild 1.2.25). Dabei ist die Amplitude der Hauptwelle ungefähr gleich der Gesamtdurchflutung je Pol (im Beispiel mit  $N = 48$ ,  $p = 1$ ,  $Q = 2q/3 = 16$  ergibt sich also das Sechzehnfache der Durchflutung einer Spule). Noch besser ließe sich die gewünschte räumlich sinusförmige Verteilung erreichen, wenn der Abstand der einzelnen Nuten voneinander und die Windungszahlen der einzelnen Spulen entsprechend angepasst würden,

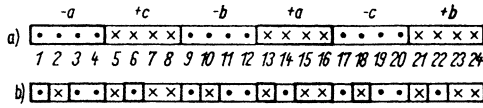


**Bild 1.2.26** Zonenplan der Einschichtwicklung für  $p = 1$ ,  $m = 3$ ,  $N = 24$ ,  $q = 4$ .

a) Ungesehnte Wicklung; b) um  $y_v = 2$  gesehnte Wicklung

was jedoch i. Allg. – mit Ausnahme der Erregerwicklung von Synchronmaschinen mit massivem Vollpolläufer, bei denen die Nuten nicht gestanzt, sondern gefräst werden – unwirtschaftlich ist.

#### d) Gesehnte Einschichtwicklungen

Jede Einschichtwicklung, die der Bedingung  $N/2m \in \mathbb{G}$  genügt, lässt sich gesehnt ausführen. Man kann jede zweite Spulenseite (gerade Nutzziffern) als ‚zweite‘ Schicht auffassen, die man gegenüber der ‚ersten‘ Schicht (ungerade Nutzziffern) verschiebt. Das ist der gleiche Vorgang, nach dem eine unesehnte Zweischichtwicklung in eine gesehnte übergeführt wird. Folglich ist auf diese Weise eine gesehnte Einschichtwicklung entstanden. Bei der Verschiebung der ‚zweiten‘ Schicht kann man natürlich nur in dieser Schicht, d. h. im Bereich der geraden Nutzziffern, bleiben. Das bedeutet, dass die Schrittverkürzung  $y_v$  nur geradzahlig sein kann. Damit ergibt sich als kleinste mögliche relative Schrittverkürzung von dreisträngigen Wicklungen

$$\left( \frac{y_v}{y_\emptyset} \right)_{\min} = \frac{2}{mq} = \frac{2}{3q}.$$

Der größte sinnvolle Wert der relativen Schrittverkürzung von dreisträngigen Wicklungen beträgt, wie im Abschnitt 1.2.6.2, Seite 107, gezeigt wird, etwa 0,2 (Unterdrückung der fünften Harmonischen). Wird der Ausdruck  $2/(3q)$  größer als dieser Wert, so wird die Sehnung einer dreisträngigen Einschichtwicklung sinnlos. Für sinnvolle Sehnung gilt also die Bedingung

$$\frac{2}{3q} \leq 0,2 \text{ bzw. } q \geq \frac{10}{3}.$$

Als Beispiel soll eine gesehnte Einschichtwicklung mit  $N = N^* = 24$ ,  $p = 1$  und  $m = 3$  entworfen werden. Da der Wert von  $q$  mit  $q = 4$  an der Grenze der obigen Bedingung liegt, kann nur die kleinste Schrittverkürzung  $y_v = 2$  gewählt werden.

Beim Wicklungsentwurf geht man vom Zonenplan der normalen, unesehnten Wicklung aus (s. Bild 1.2.26a). Wie man sich leicht überzeugen kann, bewirkt die übliche Linksverschiebung der ‚zweiten‘ Schicht (geradzahlige Nutzziffern) bei geradzahligem Wert von  $q$  und  $y_v = 2$  lediglich eine Verschiebung der gesamten Zonen. Man muss in diesem Fall eine Verschiebung nach rechts vornehmen. Im vorliegenden Beispiel erfolgt also eine Rechtsverschiebung der Spulenseiten mit geradzahligem Nutzziffer um  $y_v = 2$  (s. Bild 1.2.26b).

Aus dem erhaltenen Zonenplan der gesehnten Wicklung ersieht man, dass die geometrischen Zonen der Wicklung verschachtelt sind. Bei geradzahligem Wert von  $q$  ist jede Zone auf beiden Seiten mit den Nachbarzonen verschachtelt (s. Bild 1.2.26), bei ungeradzahligem Wert von  $q$  ist die Verschachtelung nur einseitig. Nach dem Zonenplan lässt sich das Wicklungsschema zeichnen.

**e) Strangverschachtelte Wicklungen**

Wicklungen nach Bild 1.2.26b werden auch als strangverschachtelte Wicklungen bezeichnet. Für geradzahlige Werte von  $q$  gibt es zwischen einer strangverschachtelten Einschichtwicklung und einer gesehten Einschichtwicklung entsprechend Unterabschnitt 1.2.2.3d keinen Unterschied. Bei ungeradzahligem  $q$  ergibt sich ein Unterschied daraus, dass eine strangverschachtelte Wicklung immer mit beiden Nachbarzonen verschachtelt ist. Daher kann sie aus Spulen gleicher Weite aufgebaut werden, was bei einer gesehten Einschichtwicklung mit ungeradzahligem  $q$  nicht möglich ist. Strangverschachtelte Wicklungen können auch als Zweischichtwicklung ausgeführt werden.

**f) Wicklungen für Polumschaltung**

Will man Induktions- oder Synchronmaschinen, die an einem Netz fester Spannung und Frequenz arbeiten, mit mehreren Drehzahlen wirtschaftlich betreiben, so muss man sie mit Wicklungen ausrüsten, die eine Änderung der Polpaarzahl gestatten. Dafür gibt es zwei prinzipielle Möglichkeiten:

- Man führt die Maschine mit mehreren getrennten Wicklungen aus.
- Man setzt eine polumschaltbare Wicklung ein.

Gelegentlich kommt auch die Kombination beider Möglichkeiten zur Anwendung.

**f1) Getrennte Wicklungen**

Verwendet man zwei getrennte Wicklungen mit der kleineren Polpaarzahl  $p_1$  (größere Drehzahl) und der größeren Polpaarzahl  $p_2$  (kleinere Drehzahl), so ergibt (1.2.2), Seite 20, wegen der gleichen Nut- und Strangzahl die Bedingung

$$p_2 q_2 = p_1 q_1. \quad (1.2.40)$$

Abgesehen von dieser Einschränkung kann das Verhältnis der Polpaarzahlen sowie auch die Aufteilung des Nutraums auf die beiden Wicklungen und damit das Verhältnis der Bemessungsleistungen in beiden Drehzahlstufen frei gewählt werden. Es bleibt allerdings jeweils jener Teil des Nutraums ungenutzt, den die gerade nicht angeschlossene Wicklung einnimmt. Dadurch muss die Leistung für beide Wicklungen gegenüber einer normalen Maschine gleicher Größe und Polpaarzahl aus Erwärmungsgründen herabgesetzt werden. Außerdem besitzt die Maschine bei Betrieb mit der am Nutgrund liegenden Wicklung eine große Streuung, so dass sie im Fall einer Induktionsmaschine ein kleines Kippmoment entwickelt (s. Bd. *Grundlagen elektrischer Maschinen*, Abschn. 5.5.3). Deshalb legt man die Wicklung mit der kleinen Polpaarzahl in den unteren und die mit der großen Polpaarzahl in den oberen Teil der Nuten, da mit zunehmender Polpaarzahl ohnehin ein Anwachsen der Streuung verbunden ist.

Zur Vermeidung unerwünschter Verkettungen beider Wicklungen werden möglichst Ganzlochwicklungen, allenfalls noch Bruchlochwicklungen mit  $q = g + \frac{1}{2}$ , verwendet. Diese Wicklungen zeichnen sich dadurch aus, dass der räumliche Versatzwinkel zwischen den Achsen der einzelnen Spulengruppen eines Strangs bei Einschichtwicklungen und bei Zweischichtwicklungen mit doppelter Zonenbreite  $2\pi/p$  beträgt, was auf einen Phasenwinkel von  $\alpha_{gr} = 2\pi$  führt (s. Bild 1.2.27). Bei Zweischichtwicklungen mit normaler Zonenbreite ist der räumliche Versatzwinkel

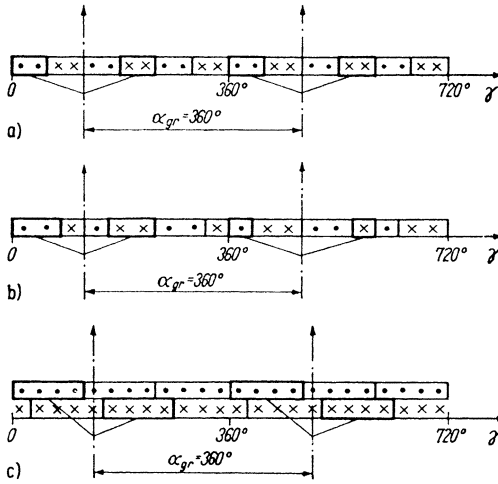


**Bild 1.2.27** Wicklungen mit einem Phasenwinkel von  $2\pi$  zwischen den Spulengruppen eines Strangs.  
a) Einschicht-Ganzlochwicklung;  
b) Einschicht-Bruchlochwicklung mit  $q = g + \frac{1}{2}$ ;  
c) Zweischichtwicklung mit doppelter Zonenbreite (geseht)

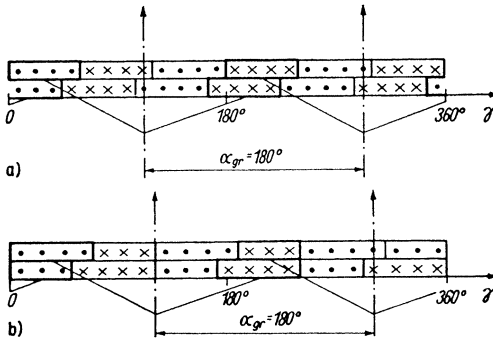


**Bild 1.2.28** Wicklungen mit einem Phasenwinkel von  $\pi$  zwischen den Spulengruppen eines Strangs. a) Zweischicht-Ganzlochwicklung (geseht);  
b) Zweischicht-Bruchlochwicklung mit  $q = g + \frac{1}{2}$

$\pi/p$  und damit der Phasenwinkel  $\alpha_{gr} = \pi$  (s. Bild 1.2.28). Nur bei den Wicklungen mit  $\alpha_{gr} = 2\pi$  lassen sich Parallelschaltungen oder Dreieckschaltungen von Teilen der Wicklungsstränge (i. Allg. von einzelnen Spulengruppen) vornehmen, ohne dass Ausgleichsströme fließen, wenn die Wicklung außer Betrieb ist.

Die in Betrieb befindliche, symmetrisch gespeiste Wicklung erregt ein Spektrum von Drehwellen der Durchflutung (erregende Wicklung, Index e) mit den Feldwellenparametern entsprechend (1.2.30a)

$$\tilde{v}' = p_e (1 + 2mg) \quad \text{mit} \quad g \in \mathbb{Z}.$$

Spulengruppen der außer Betrieb befindlichen Wicklung (induzierte Wicklung, Index i) dürfen nur dann parallelgeschaltet werden, wenn die in ihnen vom erregenden System – insbesondere von dessen Hauptwelle – induzierten Spannungen entweder verschwinden oder gleichphasig und gleich groß sind.

Nach Abschnitt 1.2.3.2, Seite 77, induzieren in einer Spulengruppe grundsätzlich alle Feldwellen bis auf diejenigen, für die der Spulen- bzw. Sehnungsfaktor

$$\xi_{sp,v'} = \sin \frac{\nu'}{p} \frac{y}{y_\varnothing} \frac{\pi}{2}$$

Null wird. Bei ungesehnten Wicklungen ist dies insbesondere für alle  $\nu'/p_i \in \mathbb{G}$  der Fall. Das bedeutet, dass bei  $p_e/p_i \in \mathbb{G}$  die Spulenspannung bzw. Spulengruppenspannung ebenfalls verschwindet.

Gleichphasig und gleich groß sind Spulengruppenspannungen, wenn bei gleichem  $Q$  der Phasenwinkel

$$\alpha_{\text{gr},\nu'} = \frac{\nu'}{p_i} 2\pi \quad (1.2.41)$$

ein ganzzahliges Vielfaches von  $2\pi$  wird. Die Werte von  $p_e/p_i$ , bei denen das der Fall ist, sind in Tabelle 1.2.5 zusammengestellt. Dabei ist zu beachten, dass bei Zweischichtwicklungen mit dem Vorzeichen der Spulengruppe auch das Vorzeichen der induzierten Spannung wechselt. Außer den in Tabelle 1.2.5 angegebenen Fällen uneingeschränkter Parallelschaltbarkeit von Spulengruppen gibt es noch viele Fälle, bei denen bestimmte Spulengruppen oder auch Wicklungsteile aus mehreren Spulengruppen parallelgeschaltet werden können. Diese Fälle kann man durch Zeichnen des Zeigerdiagramms der Spulengruppenspannung ermitteln.

Eine Polygonschaltung darf nur bei ungerader Strangzahl und nur dann vorgenommen werden, wenn die in den einzelnen Strängen induzierten Spannungen entweder verschwinden oder ein normales Mehrphasensystem bilden. Die Strangspannungen verschwinden, wenn die Spulengruppenspannungen ein radialsymmetrisches Mehrphasensystem bilden, denn dann ist ihre Summe Null. Die Strangspannungen bilden ein normales Mehrphasensystem, wenn

$$\tilde{\nu}' = \pm p_i (1 + 2mg) \quad \text{mit } g \in \mathbb{Z}$$

**Tabelle 1.2.5** Induzierte Spannungen in der abgeschalteten Wicklung polumschaltbarer Maschinen

| $\frac{p_e}{p_i}$        | Wicklungsart             | Spulengruppen-<br>spannung             | Parallelschaltung<br>von Spulengrup-<br>pen | Strang-<br>spannung  | Dreieck-<br>schaltung                                      |
|--------------------------|--------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------|
| $\in \mathbb{G}$         | Durchmesser-<br>wicklung | $= 0$                                  | uneingeschränkt<br>möglich                  | $= 0$                | möglich                                                    |
| $\in \mathbb{N}$         | Einschicht-<br>wicklung  | gleichphasig                           | möglich                                     | $\neq 0$             | nur bei<br>$\frac{p_e}{3p_i} \notin \mathbb{N}$<br>möglich |
| $\in \mathbb{U}$         | Zweischicht-<br>wicklung |                                        |                                             |                      |                                                            |
| $\in \mathbb{G}$         | Zweischicht-<br>wicklung | paarweise<br>gegenphasig               | nur zum Teil<br>möglich                     | bei Ganzlochwicklung | möglich                                                    |
| $\in \mathbb{U}/2$       | Einschicht-<br>wicklung  |                                        |                                             | $= 0$                |                                                            |
| Alle<br>übrigen<br>Werte | beliebig                 | symmetrisches<br>Mehrphasen-<br>system | nur zum Teil<br>möglich                     | $= 0$                | möglich                                                    |

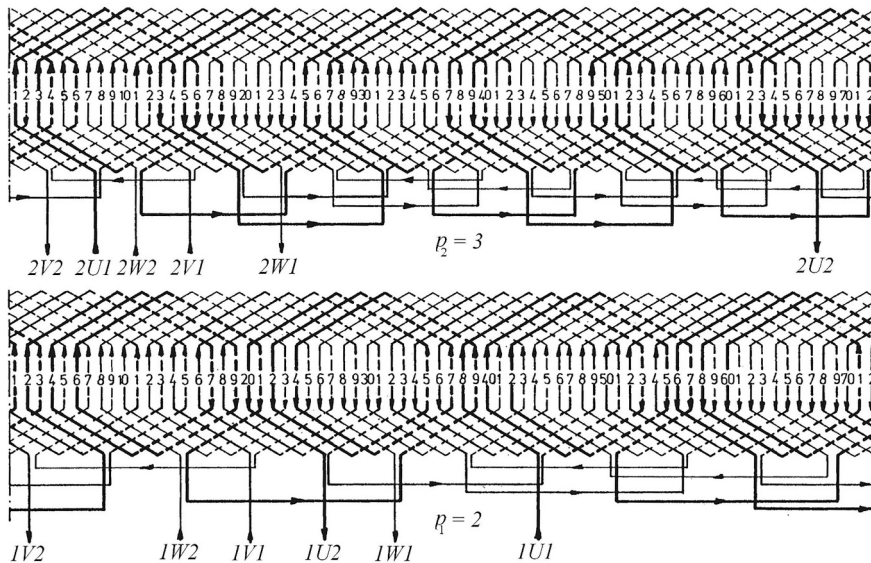


**Bild 1.2.29** Polumschaltbare Wicklung aus zwei galvanisch getrennten Zweischichtwicklungen mit Spulen gleicher Weite für  $N = 72$ ,  $p_1 = 2$ ,  $p_2 = 3$

erfüllt wird. Für ungerade Strangzahlen ist das der Fall, wenn  $v'/p_i$  und insbesondere  $p_e/p_i$  nicht durch  $m$  teilbar ist. Andernfalls werden in den Strängen gleichphasige Spannungen induziert, die innerhalb des Polygons Kreisströme antreiben (s. Tab. 1.2.5).

### f2) Pungawicklung

Polumschaltbare Maschinen mit zwei galvanisch getrennten Zweischichtwicklungen besitzen vier Spulenseiten je Nut, die in radialer Richtung übereinanderliegen. Bei Hochspannungsmotoren führt diese Ausführung wegen des großen Anteils der Isolierung am Nutvolumen und wegen der notwendigen Abstände vom Blechpaket und metallischen Konstruktionsteilen im Stirnraum zu relativ großen und damit unwirtschaftlichen Maschinen. Bei bestimmten Kombinationen von Polpaarzahlen kann man jedoch eine Wicklungsart verwenden, welche aus Zweischichtspulen gleicher Weite besteht und bei der die Gesamtzahl der Spulen am Umfang mit der Nutzahl übereinstimmt. Für die Polpaarzahlen  $p_1 = 2$  und  $p_2 = 3$  ist das Wicklungsschema mit  $N = 72$  Nuten im Bild 1.2.29 dargestellt, der Übersichtlichkeit wegen getrennt für die beiden Polpaarzahlen. Man erkennt, dass jede der beiden Wicklungen nur mit einer Spulenseite in jeder Nut vertreten ist. In Nuten, in denen die Oberschicht durch die sechspolige Wicklung belegt ist, füllt die vierpolige Wicklung die Unterschicht. Die Spulen beider Wicklungen besitzen den gleichen Wicklungsschritt von  $y = 15$ . Da jede der beiden Wicklungen in Oberschicht und Unterschicht jeweils nur die übernächste Nut belegt, verhält sich die Wicklung in jeder Polpaarzahl elektromagnetisch wie eine strangverschachtelte Einschichtwicklung. Die sog. *Übersehung* bei  $p_2 = 3$ , d. h. die Ausführung von  $y > y_\emptyset$ , entspricht elektromagnetisch einem Wicklungsschritt von  $y = 9$ , erfordert jedoch eine größere Länge des Wicklungskopfs.

Der einzige wesentliche Nachteil dieser bei polumschaltbaren Hochspannungsmaschinen relativ häufig eingesetzten Wicklungsart besteht darin, dass die Freiheitsgrade der Dimensionierung bei Beschränkung auf Ganzlochwicklungen sehr eingeschränkt sind. Eine genaue Untersuchung zeigt bei überhaupt realisierbaren Nutzzahlen die folgenden Möglichkeiten auf:

- $N = 72$ :  $p_1 = 2, p_2 = 3$ ,
- $N = 144$ :  $p_1 = 2, p_2 = 3$  oder  $p_1 = 3, p_2 = 4$  oder  $p_1 = 4, p_2 = 6$ ,
- $N = 180$ :  $p_1 = 3, p_2 = 5$ ,
- $N = 240$ :  $p_1 = 4, p_2 = 5$ .

Pungawicklungen sind also relativ großen Maschinen vorbehalten. Da die Spulenzahlen und die Spulenabmessungen der beiden Wicklungen gleich sind und damit auch ihr Strombelag, lässt sich in beiden Polpaarzahlen dasselbe Drehmoment realisieren.

### f3) Polumschaltbare Wicklungen

Von den polumschaltbaren Wicklungen ist die nach *Dahlander* (s. Bild 1.2.30) mit einem Polpaarzahlverhältnis  $p_1 : p_2 = 1 : 2$  die wichtigste. Die Wicklung wird als Zweischichtwicklung ausgeführt. In Bezug auf die niedrige Polpaarzahl  $p_1$  hat die Wicklung die normale Zonenbreite

$$b_{zm} = \frac{\tau_{p1}}{m} = 2 \frac{\tau_{p2}}{m}.$$

In Bezug auf die hohe Polpaarzahl  $p_2$  liegt also wegen  $\tau_{p2} = \tau_{p1}/2$  eine Wicklung mit doppelter Zonenbreite vor (vgl. Tab. 1.2.1, S. 26).

Nach Unterabschnitt 1.2.2.1e, Seite 47, können Wicklungen mit doppelter Zonenbreite auch geradzahlige Harmonische  $\nu'/p \in \mathbb{G}$  ausbilden, was aufgrund der damit verbundenen parasitären Effekte bei Induktionsmaschinen grundsätzlich unerwünscht ist. Um dies zu vermeiden, muss die Wicklung in der hohen Polpaarzahl ungesehnt ausgeführt werden, da dann der Sehnungs- bzw. Spulenfaktor für alle geradzahligen Harmonischen Null wird. Für die niedrige Polpaarzahl  $p_1$  ist die Spulenweite dann gleich der halben Polteilung, so dass eine starke Sehnung vorliegt.

Die im Bild 1.2.30 dargestellte Wicklungsanordnung, die ein Polpaar bezüglich der niedrigen Polpaarzahl umfasst, stellt das Grundelement einer Dahlanderwicklung dar. Es besteht aus zwei Spulengruppen je Strang. Diese müssen so zusammengeschaltet werden, dass sie bei der hohen Polpaarzahl gleichsinnig und bei der niedrigen Polpaarzahl ungleichsinnig durchlaufen werden. Die Zusammenschaltung der Spulengruppen kann sowohl durch Reihenschaltung als auch durch Parallelschaltung erfolgen. Die Gruppenpaare der Stränge können ihrerseits in Stern oder in Vieleck, d. h. für  $m = 3$  in Dreieck, geschaltet werden. Damit ergeben sich die im Bild 1.2.31 dargestellten vier Schaltungsmöglichkeiten Stern, Doppelstern, Dreieck und Doppeldreieck. Wenn die  $p_1$  positiven und die  $p_1$  negativen Spulengruppen einander jeweils parallelgeschaltet werden, erhält man die im Bild 1.2.31 angegebenen Werte der Spulengruppenspannung  $U_{gr}$  in Abhängigkeit vom Außenleiter-Wert der Klemmenspannung  $U_N$ . Die Spulengruppenspannung steigt von der Sternschaltung zur Doppeldreieckschaltung stetig an. In der gleichen Richtung erhöht sich dann auch der Fluss bzw. die Amplitude der Hauptwelle des Luftspaltfelds. Unter dem Gesichtspunkt gleicher Stromwärmeverluste kann in

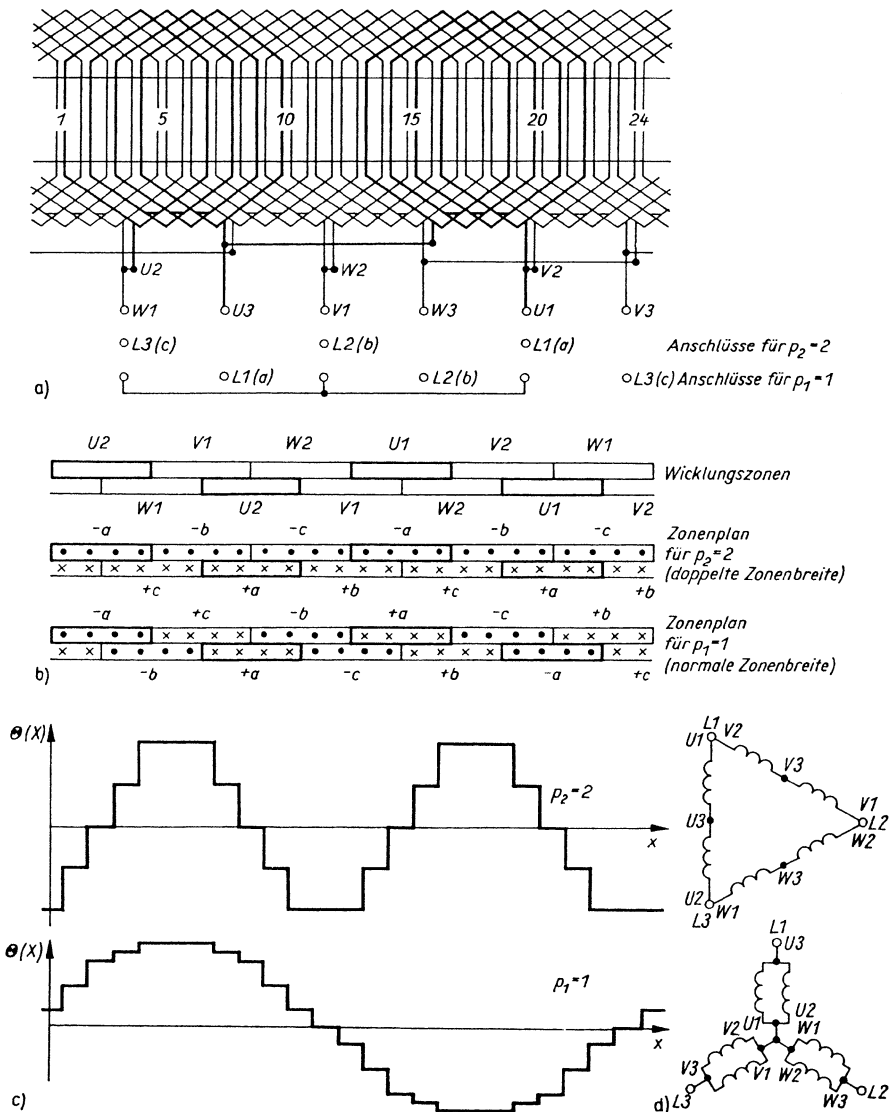


**Bild 1.2.30** Polumschaltbare Wicklung nach Dahlander für  $p_1 = 1$ ,  $p_2 = 2$ ,  $m = 3$ ,  $N = 24$ . a) Wicklungsschema; b) Zonenpläne; c) Durchflutungsverteilungen für gleiche Gesamtdurchflutung und  $i_a = -2i_b = -2i_c$ ; d) Schaltschemata

allen vier Schaltungen der gleiche Strom  $I_{gr}$  pro Spulengruppe zugelassen werden. Damit ergeben sich die im Bild 1.2.31 angegebenen Werte der Scheinleistung, die bei Betrieb an der gleichen Spannung erreicht werden können.

Welche der Schaltungen für die hohe und welche für die niedrige Polpaarzahl verwendet wird, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Es ist naheliegend, die Schaltungen so zu wählen, dass ein Teil der Schaltverbindungen erhalten bleibt.

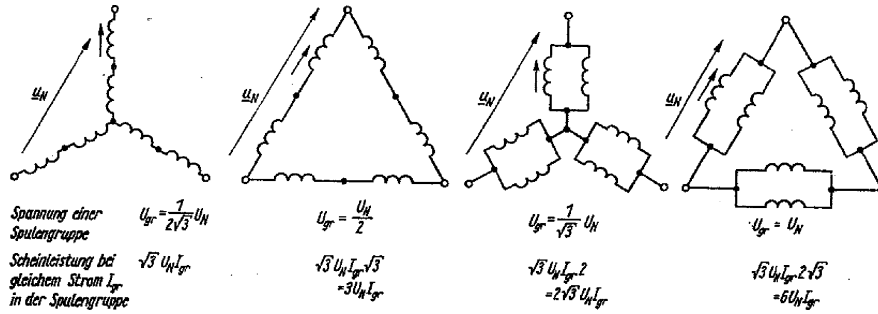


**Bild 1.2.31** Möglichkeiten der Zusammenschaltung der sechs Gruppen je Polpaar der niedrigen Polpaarzahl einer dreisträngigen Dahlanderwicklung

Ein zweiter Gesichtspunkt ist das zu fordernde Verhältnis der mechanischen Leistungen  $P_{mech2}/P_{mech1}$  bzw. der Drehmomente  $M_2/M_1$ . Diese Verhältnisse werden durch die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie der gekoppelten Arbeitsmaschine bestimmt. Man erhält das Leistungsverhältnis, bei dem in der Maschine die gleiche Wicklungserwärmung auftritt, mit Hilfe des Verhältnisses der Scheinleistungen zu

$$\frac{P_{mech2}}{P_{mech1}} = \frac{P_{s2}}{P_{s1}} \frac{\eta_2 \cos \varphi_2}{\eta_1 \cos \varphi_1} k. \quad (1.2.42)$$

Dabei berücksichtigt der Faktor  $k$  die aufgrund der niedrigeren Drehzahl schlechtere Kühlung bei der hohen Polpaarzahl; es ist also  $k < 1$ . Außerdem sind der Wirkungsgrad und der Leistungsfaktor für die hohe Polpaarzahl stets kleiner als für die niedrige. Es kann deshalb mit

$$\frac{P_{mech2}}{P_{mech1}} \approx (0,7 \dots 0,8) \frac{P_{s2}}{P_{s1}} \quad (1.2.43)$$

gerechnet werden. Damit erhält man für das Verhältnis der Drehmomente

$$\frac{M_2}{M_1} \approx \frac{p_2}{p_1} \frac{P_{mech2}}{P_{mech1}} \approx (1,4 \dots 1,6) \frac{P_{s2}}{P_{s1}}. \quad (1.2.44)$$

Bei der Dimensionierung der Maschine ist zu beachten, dass der Luftspaltfluss durch die Spannung über den unverändert bleibenden Spulengruppen diktiert wird. Dabei muss lediglich berücksichtigt werden, dass der Wicklungsfaktor einer Spulengruppe gegenüber dem Feld mit der niedrigen Polpaarzahl vor allem aufgrund der starken Sehnung geringer ist als gegenüber dem Feld mit der hohen Polpaarzahl. Bei großen Lochzahlen  $q$  ist das Verhältnis der Wicklungsfaktoren im Vorgriff auf (1.2.68), Seite 83, und (1.2.75), Seite 84,

$$\frac{\xi_{p2}}{\xi_{p1}} = \frac{\sin \frac{\pi}{2} \sin \frac{\pi/3}{\pi/3}}{\sin \frac{1}{2} \frac{\pi}{2} \sin \frac{\pi/6}{\pi/6}} = \frac{3\sqrt{3}}{\frac{2\pi}{1} \frac{3}{\sqrt{2} \pi}} = \sqrt{\frac{3}{2}}. \quad (1.2.45)$$

Damit erhält man für das Verhältnis der Luftspaltflüsse unter Verwendung der im Bild 1.2.31 angegebenen Spulengruppenspannungen

$$\frac{\Phi_{h2}}{\Phi_{h1}} = \frac{U_{gr2} \xi_{p1}}{U_{gr1} \xi_{p2}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U_{gr2}}{U_{gr1}}. \quad (1.2.46)$$

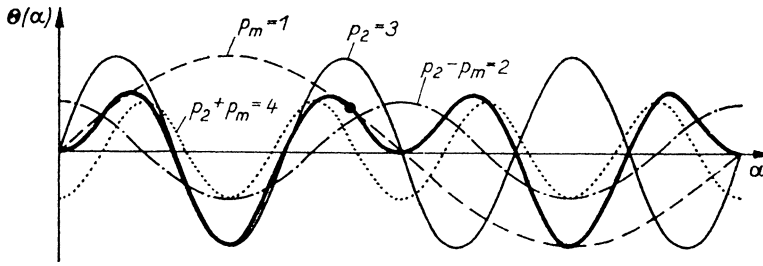


Bild 1.2.32 Pol-Amplituden-Modulation

Der Luftspaltfluss bestimmt die Hauptwellenamplitude des Luftspaltfelds entsprechend

$$\Phi_h = \frac{2}{\pi} \tau_p l_i \hat{B}_p.$$

Dabei ist die Polteilung für die hohe Polpaarzahl nur halb so groß wie für die niedrige, was auf

$$\frac{\hat{B}_{p2}}{\hat{B}_{p1}} = \frac{\Phi_{h2} p_2}{\Phi_{h1} p_1} = 2 \frac{\Phi_{h2}}{\Phi_{h1}} = 2 \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U_{gr2}}{U_{gr1}} \quad (1.2.47)$$

führt.

Die gebräuchlichste Form der Dahlanderschaltung arbeitet mit der Dreieckschaltung für die hohe und der Doppelsternschaltung für die niedrige Polpaarzahl. Sie ist in der ersten Zeile von Tabelle 1.2.6 einschließlich der für die beiden Polpaarzahlen an der Klemmenplatte herzustellenden Anschlüsse dargestellt. Die Art der Umschaltung sichert, dass sich beim Übergang von der hohen Polpaarzahl zur niedrigen der Durchlaufsinus jeweils einer der beiden Gruppen eines Strangs ändert, wie es entsprechend Bild 1.2.30 erforderlich ist. Beim Entwurf der Schaltung ist außerdem darauf zu achten, dass bei beiden Polpaarzahlen der gleiche Umlaufsinn des Drehfelds entsteht. Daher muss beim Umschalten außerdem die Phasenfolge der Stränge umgekehrt werden.

Außer der Schaltungskombination Dreieck-Doppelstern werden auch die Schaltungskombinationen Doppelstern-Dreieck und Stern-Doppelstern verwendet, die ebenfalls in Tabelle 1.2.6 aufgeführt sind. Die Tabelle enthält für die betrachteten Schaltungskombinationen ferner die Verhältnisse der mechanischen Leistungen, der Drehmomente und der Flussdichteamplituden der jeweiligen Hauptwellen des Luftspaltfelds, die sich ausgehend von den realisierbaren Scheinleistungen ergeben.

Andere Polpaarverhältnisse als 1:2 erreicht man durch eine sog. *Pol-Amplituden-Modulation* (PAM) [9]. Hierbei wird eine Strangwicklung mit der Polpaarzahl  $p_2$  entsprechend einer Modulierungspaarzahl  $p_m$  abschnittsweise umgeschaltet. Auf diese Weise entstehen nach der Beziehung

Tabelle 1.2.6 Wichtigste Schaltungskombinationen bei der Dahlanderschaltung und ihre Eigenschaften

| Schaltungsart<br>$p_2$ $p_1$ | Schaltung | Anschlüsse<br>an der Klemmenplatte<br>$p_2$ $p_1$ | $\frac{P_{\text{mech } 2}}{P_{\text{mech } 1}}$ | $\frac{M_2}{M_1}$ | $\frac{\hat{B}_2}{\hat{B}_1}$ | Kennzeichen der Lage<br>der beiden Bemessungspunkte<br>in der $n$ - $M$ -Ebene    |
|------------------------------|-----------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| $\Delta$ $\text{AA}$         |           |                                                   | 0,6...0,7                                       | 1,2...1,4         | 1,4                           | etwa gleiches Drehmoment<br>bei beiden Drehzahlen                                 |
| $\Delta$ $\Delta$            |           |                                                   | 0,8...0,9                                       | 1,6...1,8         | 1,9                           | etwa gleiche Leistung,<br>d.h. mit zunehmender Drehzahl<br>abnehmendes Drehmoment |
| $\text{A}$ $\text{AA}$       |           |                                                   | 0,35...0,40                                     | 0,70...0,80       | 0,8                           | mit zunehmender Drehzahl<br>zunehmendes Drehmoment                                |

$$\sin p_2 \alpha \sin p_m \alpha = \frac{1}{2} [\cos(p_2 - p_m) \alpha - \cos(p_2 + p_m) \alpha]$$

zwei Harmonische in der Durchflutungsverteilung mit den Polpaarzahlen  $p_2 - p_m$  und  $p_2 + p_m$ . Im Bild 1.2.32 ist als Beispiel der Fall  $p_2 = 3$ ,  $p_m = 1$ ,  $p_2 - p_m = 2$  und  $p_2 + p_m = 4$  dargestellt. Durch gezielten Wicklungsentwurf (Schaltung, Verteilung) muss eine der Harmonischen so unterdrückt werden, dass im Wesentlichen nur noch die andere zur Auswirkung kommt. So einfach das Prinzip ist, so kompliziert ist die praktische Ausführung, wenn man akzeptable Durchflutungsverteilungen erreichen will. Die Unterdrückungsmaßnahmen bestehen in erster Linie in stark unterschiedlichen Zonenänderungen bis zur doppelten Zonenbreite einzelner Zonen und in erheblichen Strangverschachtelungen. Das Ergebnis sind recht komplizierte Wicklungsverteilungen, die aufgrund ausgeprägter parasitärer Effekte bis auf wenige Ausnahmen von den Motorenherstellern nicht verwendet werden. Die Dahlanderwicklung kann als Sonderfall einer PAM-Wicklung mit  $p_m = p_2/2$  und  $p_1 = p_2 - p_m = p_2/2$  aufgefasst werden.

Bild 1.2.33 zeigt ein Beispiel einer PAM-Wicklung mit  $p_2 = 3$ ,  $p_m = 1$  und  $p_1 = p_2 - p_m = 2$ . Die für die kleinere Polpaarzahl umzuschaltenden Wicklungsteile sind im Plan der Wicklungszonen schraffiert angegeben. Im Bild 1.2.34 sind die entsprechenden Nutenspannungssterne dargestellt. Man erkennt einerseits die ausgeprägte Strangverschachtelung, andererseits aber auch den hinsichtlich der elektrischen Wirksamkeit völlig symmetrisch aufgeteilten Nutenspannungsstern.

In der Praxis hat sich gezeigt, dass die nach der Pol-Amplituden-Modulation umschaltbaren Wicklungen gegenüber der Anordnung mit zwei getrennten Wicklungen nur dann Vorteile aufzuweisen haben, wenn das Polpaarverhältnis nicht mehr von 1 abweicht, als es bei 2 : 3 der Fall ist. Polumschaltbare Wicklungen haben i. Allg. wegen der ungünstigeren Wicklungsverteilung eine größere Oberwellenstreuung (s. Abschn. 3.7.3, S. 296) und einen kleineren Wicklungsfaktor als Normalwicklungen. Ersteres äußert sich vor allem in kleinerem Anzugs- und Kippmoment. Davon abgesehen, führen sie aber in vielen Fällen zu besseren Betriebsparametern als zwei getrennte Wicklungen. Polamplitudenmodulierte Wicklungen können auch für mehr als zwei Polpaarzahlen umschaltbar ausgeführt werden.

Durch gleichsinnige Erregung benachbarter Pole und Anwendungen polumschaltbarer Ankerwicklungen können auch elektrisch erregte Synchronmaschinen polumschaltbar ausgeführt werden, was jedoch nur in sehr seltenen Fällen wirtschaftlich ist.

### **g) Zahnspulenwicklungen**

Unter einer Zahnspulenwicklung versteht man eine mehrsträngige Wicklung, deren Spulen den Schritt  $y = 1$  haben. Dies führt, wie bereits Bild 1.1.2, Seite 4, zeigt, auf komplett entflochtene und besonders kurze Wicklungsköpfe. Aufgrund ihrer rein äußerlichen Ähnlichkeit mit den Erregerwicklungen von Gleichstrommaschinen oder Schenkelpol-Synchronmaschinen werden Zahnspulenwicklungen in der Literatur z. T. auch als Polwicklungen und die einzelnen Zähne als Pole bezeichnet. Dies verstellt jedoch den Blick auf ihre Wirkungsweise und erschwert damit ihre analytische Durchdringung.

Zahnspulenwicklungen sind symmetrische, i. Allg. dreisträngige Bruchlochwicklungen, deren Lochzahl  $q < 1$  ist. Wegweisend für ihr Verständnis sind vor allem die Arbeiten von Huth [10]. Zu unterscheiden ist zwischen Zweischicht-

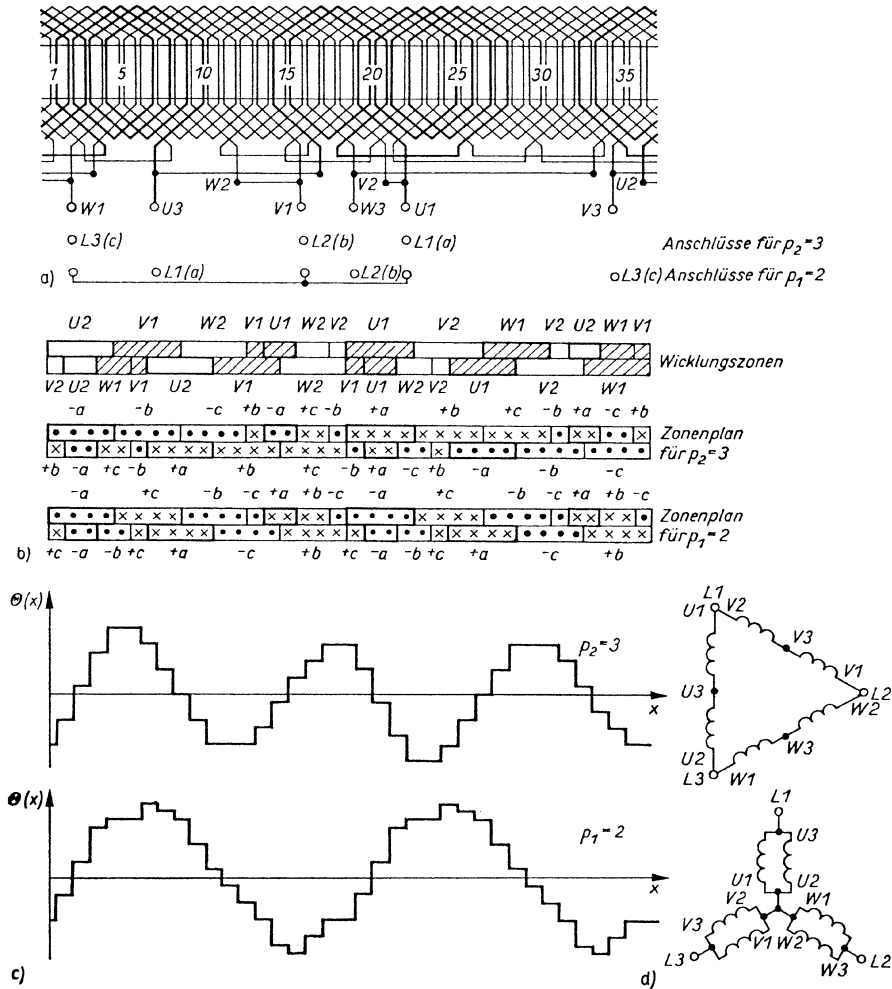


**Bild 1.2.33** Polumschaltbare Wicklung nach der Pol-Amplituden-Modulation für  $p_1 = 2$ ,  $p_2 = 3$ ,  $m = 3$ ,  $N = 36$ . a) Wicklungsschema; b) Zonenpläne; c) Durchflutungsverteilungen für  $i_a = -2i_b = -2i_c$ ; d) Schaltpläne

Zahnspulenwicklungen, bei denen in jeder Nut zwei Spulenseiten nebeneinanderliegen (s. Bild 1.2.35a), die sich über benachbarte Zähne schließen, und Einsicht-Zahnspulenwicklungen, bei denen jede Nut nur eine Spulenseite enthält (s. Bild 1.2.35b), so dass jeweils zwischen zwei bewickelten Zähnen ein unbewickelter erscheint.

Da die Spulenweite mit einer Nutteilung festliegt, ergibt sich mit Rücksicht auf den Wicklungsfaktor der Hauptwelle (s. Abschn. 1.2.3) die Forderung

$$\frac{2}{3} \leq \frac{y}{y_\varnothing} = \frac{1}{y_\varnothing} \leq \frac{4}{3}.$$

Damit erhält man mit  $y_\varnothing = N/(2p)$  als Bedingung für die Wahl der Nutzahl

$$3p \geq N \geq \frac{3}{2}p. \quad (1.2.48)$$

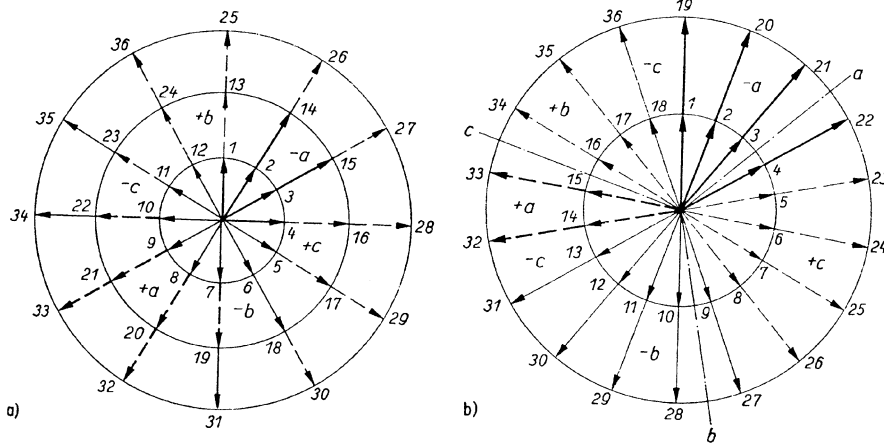


**Bild 1.2.34** Nutenspannungssterne der polumschaltbaren PAM-Wicklung für  $p_1 = 2$ ,  $p_2 = 3$ ,  $m = 3$ ,  $N = 36$ . a)  $p = p_2 = 3$ ; b)  $p = p_1 = 2$

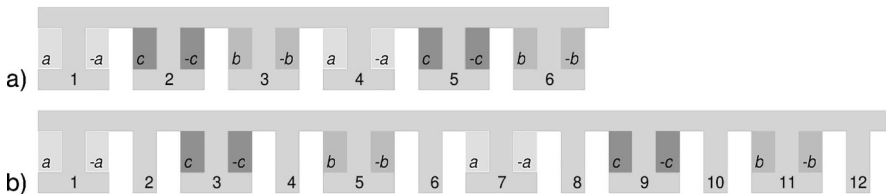


**Bild 1.2.35** Arten von Zahnspulenwicklungen. a) Zweischicht-Zahnspulenwicklung mit  $m = 3$ ,  $p = 4$ ,  $N = 6$ ; b) Einschicht-Zahnspulenwicklung mit  $m = 3$ ,  $p = 4$ ,  $N = 12$

Andererseits muss die Nutzahl natürlich bei Zweischicht-Zahnspulenwicklungen entsprechend  $N/m \in \mathbb{N}$  ganzzahlig durch die Strangzahl teilbar sein. Bei Einschicht-Zahnspulenwicklungen muss entsprechend Bild 1.2.35b sogar die schärfere Forderung  $N/(2m) \in \mathbb{N}$  erfüllt werden. Diese Bedingungen führen dazu, dass für jede Polpaarzahl nur eine bis maximal drei sinnvoll ausführbare Zahnspulenwicklungen existieren.

Wie die Beispiele in den Unterabschnitten 1.2.5g und h, Seite 100, zeigen werden, besitzen Zahnspulenwicklungen grundsätzlich eine deutlich größere Oberwellenstreuung als verteilte Wicklungen. Aufgrund der damit verbundenen parasitären Effekte ist ihr Einsatz bei Induktionsmaschinen i. Allg. nicht sinnvoll. Für permanenterregte Synchronmaschinen, und insbesondere für solche mit hoher Polpaarzahl, sind Zahnspulenwicklungen jedoch oft vorteilhaft und finden breite Anwendung. Wie Bild 1.2.35b zeigt, kann es bei Einschicht-Zahnspulenwicklungen vorkommen, dass am Umfang abwechselnd breitere und schmalere Zähne auftreten. Die Folge, dass hierdurch die Nutschlitze nicht mehr äquidistant am Umfang verteilt sind, muss auch bei der Ermittlung des Wicklungsfaktors berücksichtigt werden, den man dann über (1.2.55) erhält.

#### **h) Wicklungen mit gemischter Stern-Dreieck-Schaltung**

Wicklungen mit gemischter Stern-Dreieck-Schaltung erlauben es theoretisch, die Vorteile sechssträngiger Wicklungen (s. Unterabschn. b2) – namentlich den höheren

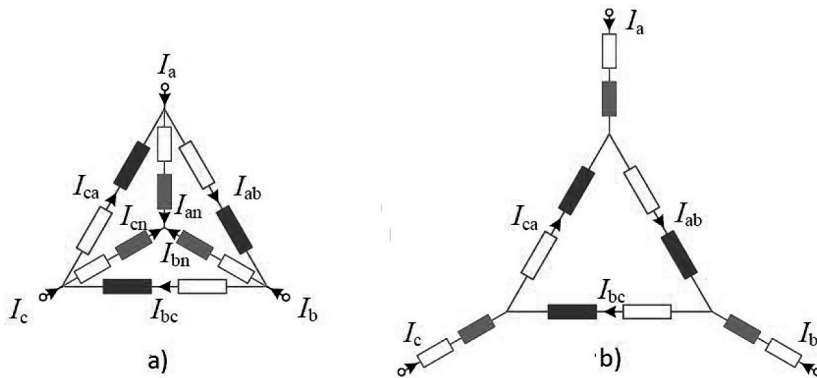


**Bild 1.2.36** Wicklungen mit gemischter Stern-Dreieck-Schaltung nach [5].  
a) Parallelschaltung; b) Reihenschaltung

Hauptwellen-Wicklungsfaktor und den Wegfall der Harmonischen der Durchflutungsverteilung mit den Feldwellenparametern  $\tilde{\nu}' = -5p, 7p, -17p, 19p, \dots$  – auch bei Betrieb an einem Dreiphasennetz zu nutzen. Dazu wird eine der beiden im Unterabschnitt b2 beschriebenen dreisträngigen Teilwicklungen in Stern und die andere in Dreieck geschaltet (s. Bild 1.2.36).

Um die Durchflutungsverteilung einer idealen sechssträngigen Wicklung zu erhalten, müsste die in Dreieck geschaltete Teilwicklung die  $\sqrt{3}$ -fache Strangwindungszahl besitzen wie die in Stern geschaltete Teilwicklung. Da sich diese Forderung aufgrund der notwendigerweise ganzzahligen Windungszahlen nie ganz erreichen lässt, können auch die eingangs genannten Vorteile nie ganz erreicht werden. Die Durchflutungsverteilung enthält somit immer auch Harmonische mit  $\tilde{\nu}' = -5p, 7p, -17p, 19p, \dots$ , allerdings mit deutlich geringerer Amplitude als bei einer dreisträngigen Wicklung. Entsprechend sind auch die mit diesen Harmonischen verbundenen unerwünschten Wirkungen wie zusätzliche Verluste (s. Abschn. 6.5.1, S. 407) oder magnetische Geräusche (s. Abschn. 7.3.3, S. 447) kleiner.

#### i) Luftspaltwicklungen

Eine Luftspaltwicklung ist nicht innerhalb von dem Luftspalt zugewandten Nuten des Ständers oder Läufers untergebracht und damit nicht von ferromagnetischem Material umgeben, sondern sie ist entweder direkt an der Oberfläche eines Hauptelements befestigt, oder sie bildet als freitragender Zwischenständer oder Zwischenläufer selbst ein dann eisenloses Hauptelement. Die Vorteile einer derartigen Ausführung liegen darin, dass die Oberfläche des ferromagnetischen Teils zum Luftspalt hin rein zylindrisch ausgeführt werden kann, so dass sich keinerlei magnetische Vorzugsstellungen und damit auch keine damit verbundenen sog. Rastmomente ergeben.

Im Gegensatz zu in Nuten untergebrachten Wicklungen sind Luftspaltwicklungen dem Luftspaltfeld ausgesetzt, so dass der Energieumsatz nicht über maxwellische Grenzflächenkräfte, sondern direkt über die Lorentzkraft auf die stromdurchflossenen Leiter erfolgt. Das muss bei der mechanischen Dimensionierung der Wicklung berücksichtigt werden.

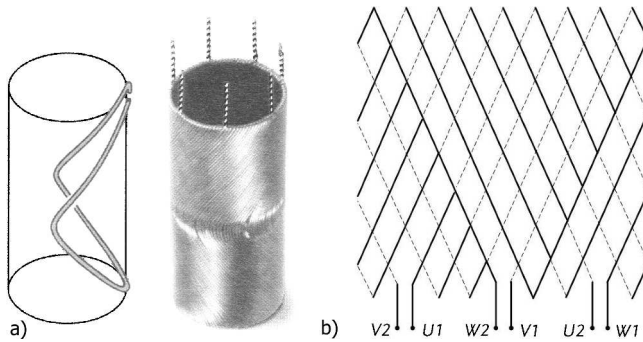


**Bild 1.2.37** Luftspaltwicklungen. a) Ansicht einer Schleifenwicklung nach Maxon; b) Wicklungsschema einer dreisträngigen Wellenwicklung nach Faulhaber

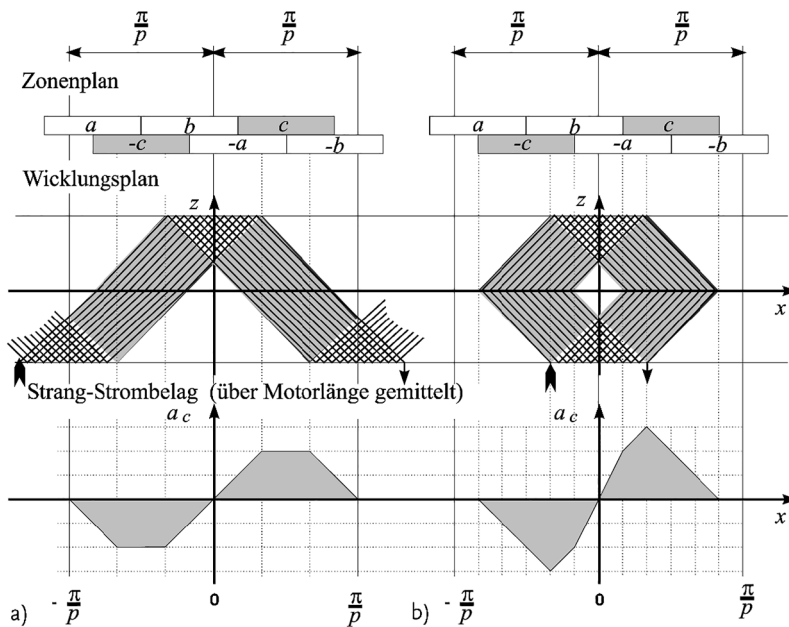


**Bild 1.2.38** Zonenplan, Wicklungsplan und über die Länge gemittelter Strombelag von Luftspaltwicklungen nach [11]. a) Wellenwicklung nach Faulhaber; b) rhombenförmige Schleifenwicklung nach Maxon.

Im Bereich kleiner Leistungen werden Luftspaltwicklungen meist als Zweischichtwicklungen ausgeführt, wobei jede Schicht in der Höhe nur aus einem Leiter besteht. Am Umfang benachbarte Windungen berühren sich, so dass die gesamte Wicklung schließlich zu einem selbsttragenden Zylinder verklebt oder verbacken werden kann. Bei Gleichstrommaschinen rotiert dieser Zylinder als Glockenläufer zwischen dem erregenden Permanentmagneten innen und einem ebenfalls feststehenden magnetischen Rückschluss außen, während bei kleinen permanentenerregten Synchronmaschinen oder Elektromotoren (auch als EC-Motoren, BLDC-Motoren oder bürstenlose Gleichstrommotoren bezeichnet) umgekehrt der Wicklungszylinder alleine den Ständer bildet, innerhalb dessen der erregende Permanentmagnet und außerhalb dessen ein magnetischer Rückschluss rotieren.

Es ist möglich und vorteilhaft, diese Luftspaltwicklungen ohne oder mit verkürztem Wicklungskopf auszuführen, indem ihre Leiter selbst schräg verlaufen. Das kann sowohl in einer Ausführung als Wellenwicklung geschehen (s. Bilder 1.2.37b u. 1.2.38a) als auch in einer Ausführung als rhombenförmige Schleifenwicklung (s. Bilder 1.2.37a u. 1.2.38b).

Im Bereich großer Leistungen werden Luftspaltwicklungen z. T. als Ständerwicklung von Synchronmaschinen mit supraleitender Erregerwicklung eingesetzt, bei denen aufgrund der hohen Luftspaltflussdichte die Zähne des Ständerblechpakets so stark gesättigt würden, dass es zur Vermeidung unnötiger Verluste vorteilhaft ist, sie wegzulassen und nur ein Joch als magnetischen Rückschluss auszuführen.

Die Wicklungszylinder kommen der Modellvorstellung einer über die gesamte Nutteilung gleichmäßig verteilten Nutdurchflutung (s. Abschn. 1.2.3.3, S. 80) recht nahe. Die Wicklungen werden i. Allg. mit doppelter Zonenbreite ausgeführt. Bild 1.2.38 zeigt zum einen, wie die nicht unerhebliche Schrägung durch Mittelwertbildung über die Aktivteillänge berücksichtigt werden kann. Zum anderen wird deutlich, dass die Ausführungen als rhombenförmige Schleifenwicklung und als Wellenwicklung einander in Bezug auf ihre elektromagnetische Wirkung relativ ähnlich sind. Wie sich leicht nachvollziehen lässt, führt die Schrägung auch im Fall der Wellenwicklung auf keine resultierende Axialkraft, da die unter ungleichnamigen Polen entstehenden axialen Kraftkomponenten gleich groß und einander entgegengerichtet sind.

### 1.2.3 Bestimmung des Wicklungsfaktors

Der *Wicklungsfaktor* ist eine für praktisch alle zur Anwendung kommenden Wicklungen einführbare vorzeichenbehaftete Größe, die den Einfluss der Verteilung der Leiter eines Wicklungsstrangs einerseits auf eine vom Strangstrom aufgebaute Durchflutungswelle einer bestimmten Ordnungszahl  $\nu'$  und andererseits auf die Flussverketzung des Wicklungsstrangs mit einer Flussdichtewelle einer bestimmten Ordnungszahl  $\nu'$  wiedergibt. Auf die allgemeinen Zusammenhänge wird im Band *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschnitt 1.6.4, näher eingegangen. Wie dort gezeigt wird, kann man den Wicklungsfaktor eines Wicklungsstrangs entweder durch die Entwicklung der Durchflutungsverteilung in eine Fourierreihe gewinnen oder aber dadurch, dass man gedanklich ein positiv umlaufendes Drehfeld der Ordnungszahl  $\nu'$  auf die Wicklung wirken lässt und die im Strang induzierte Spannung ermittelt. Die zuletzt genannte Vorgehensweise ist gegenüber der Bestimmung des Wicklungsfaktors aus der Durchflutungsverteilung oft vorteilhaft.

Die induzierte Spannung lässt sich aus der Summe der Spulenseitenspannungen bzw. der Nutenspannungen gewinnen. Andererseits tritt in der allgemeinen Beziehung für die im Strang induzierte Spannung der Wicklungsfaktor  $\xi_{\nu'}$  auf, der den Einfluss der Spulenseitenverteilung auf die Amplitude und das Vorzeichen der einzelnen Harmonischen der Strangspannung berücksichtigt. Da die Summe der Nutenspannungen durch eine Summation der betreffenden Nutenspannungszeiger des Nutenspannungssterns gewonnen werden kann, kann auch der Wicklungsfaktor aus dem Nutenspannungsstern bestimmt werden.

Alle folgenden Betrachtungen gelten ausschließlich für sog. *symmetrische Wicklungen*, d. h. für solche Wicklungen, bei denen die den Strom führenden Leiter jedes

Strangs symmetrisch zu einer oder mehreren Achsen am Umfang verteilt sind. Außerdem wird vorausgesetzt, dass alle Spulen dieselbe Windungszahl  $w_{sp}$  haben. Diese Voraussetzungen sind für alle in diesem Band behandelten Ganzloch- und Bruchlochwicklungen erfüllt.

### 1.2.3.1 Prinzipielle Bestimmung

Die von einer Drehwelle des Luftspaltfelds, die die Ordnungszahl  $\nu'$  besitzt, in einer Spule induzierte Spannung kann durch die Nutenspannungszeiger der an den Stellen  $\gamma'_a$  und  $\gamma'_b$  liegenden Spulenseiten ausgedrückt werden. Ihr Zeiger bestimmt sich nach (1.1.7), Seite 12, und (1.1.12) mit der vereinfachten Schreibweise  $\varphi_{\nu'}$  des Phasenwinkels  $\varphi_{B,\nu'}$  zu

$$\begin{aligned} \underline{e}_{sp,\nu'} &= -\underline{e}_{na,\nu'} + \underline{e}_{nb,\nu'} = -\hat{e}_{n,\nu'} e^{j(\varphi_{\nu'} - \nu' \gamma'_a)} + \hat{e}_{n,\nu'} e^{j(\varphi_{\nu'} - \nu' \gamma'_b)} \\ &= \hat{e}_{n,\nu'} e^{j(\varphi_{\nu'} - \nu' \gamma'_a - \pi)} + \hat{e}_{n,\nu'} e^{j(\varphi_{\nu'} - \nu' \gamma'_b)} = \underline{e}'_{na,\nu'} + \underline{e}_{nb,\nu'}. \end{aligned} \quad (1.2.49)$$

Die Amplitude der Nutenspannung beträgt dabei entsprechend (1.1.7)

$$\hat{e}_{n,\nu'} = \frac{1}{2} \omega_{\nu'} w_{sp} \Phi_{\nu'}. \quad (1.2.50)$$

Die Einführung des Zeigers  $\underline{e}'_{na,\nu'} = -\underline{e}_{na,\nu'}$  bedeutet ein Umklappen eines negativen Nutenspannungszeigers in eine positive elektrische Zone des betreffenden Strangs, d. h. in einen Bereich des Nutenspannungssterns, in dem positive Nutenspannungszeiger liegen. Für den Strangspannungszeiger gilt unter Verwendung des im Band *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschnitt 1.6.4, abgeleiteten Zusammenhangs  $\hat{e}_{\nu'} = \omega_{\nu'} (w \xi_{\nu'}) \Phi_{\nu'}$

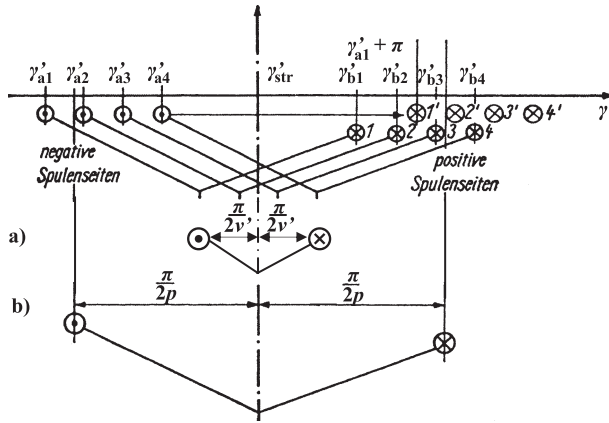
$$\begin{aligned} \underline{e}_{str,\nu'} &= \sum_{\rho} \underline{e}_{n\rho,\nu'} = \sum_{\rho} \hat{e}_{n,\nu'} e^{j(\varphi_{\nu'} - \nu' \gamma'_{\rho})} = \omega_{\nu'} (w \xi_{\nu'}) \Phi_{\nu'} e^{j(\varphi_{\nu'} - \nu' \gamma'_{str} - \pi/2)} \\ &= \xi_{\nu'} \frac{2w}{w_{sp}} \hat{e}_{n,\nu'} e^{j(\varphi_{\nu'} - \nu' \gamma'_{str} - \pi/2)}. \end{aligned} \quad (1.2.51)$$

Es brauchen also nur  $Z = 2w/w_{sp}$  positive Nutenspannungszeiger addiert zu werden.  $\gamma'_{str} = \gamma_{str}/p$  bezeichnet die Lage der *Strangachse*, d. h. der Symmetrieachse der Durchflutungsverteilung einer Urwicklung, bei der die Hauptwelle mit der Ordnungszahl  $p$  ihren positiven Maximalwert besitzt. Sofern ebenso viele positive wie negative Spulenseiten am Umfang existieren, gibt es immer mindestens eine derartige Strangachse.

Zur einfachen Ermittlung der Phasenwinkel der Nutenspannungszeiger wird für jede Ordnungszahl  $\nu'$  eine *Bezugswicklung* definiert. Diese Bezugswicklung ist eine Strangwicklung mit derselben Windungszahl  $w = w_{sp}Z/2$  wie der betrachtete Wicklungsstrang. Sie besteht aus  $\nu'$  konzentrierten, gleichmäßig am Umfang verteilten Spulen mit je  $w_{sp,e} = w/\nu'$  Windungen. Die Achse der Bezugswicklung liegt an derselben Stelle  $\gamma'_{str}$  wie die des zu untersuchenden Wicklungsstrangs (s. Bild 1.2.39); der (positive) Bezugsleiter liegt an der Stelle

$$\gamma'_{bez} = \gamma'_{str} + \frac{\pi}{2\nu'}.$$

Man bezeichnet eine solche Wicklung mit einer konzentrierten Spule je Polpaar auch als *Einlochwicklung* der Polpaarzahl  $\nu'$ . Sie hat die Eigenschaft, dass alle Nutenspannungen gleichphasig sind. Sie addieren sich somit algebraisch und liefern einen Spannungszeiger entsprechend

**Bild 1.2.39**

Einführung einer Bezugswicklung.  
a) Allgemeine Bezugswicklung;  
b) Bezugswicklung für  $v' = p$

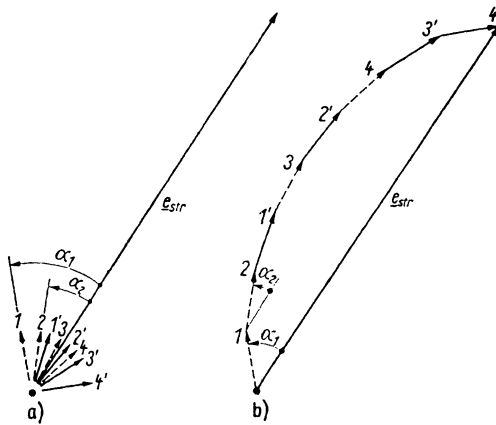


**Bild 1.2.40** Addition der Nutenspannungszeiger zur Ermittlung des Wicklungsfaktors.  
a) Zeigerbüschel der Nutenspannungen des betrachteten Strangs; b) Addition der Nutenspannungszeiger zum Strangspannungszeiger.  
Die Spannungszeiger der positiven Nuten sind gestrichelt; die Spannungszeiger der negativen Nuten sind umgeklappt dargestellt

$$\begin{aligned}
 \underline{e}_{\text{bez},v'} &= 2v' \frac{w_{\text{sp},e}}{w_{\text{sp}}} \hat{e}_{n,v'} e^{j(\varphi_{v'} - v' \gamma'_{\text{str}} - \pi/2)} \\
 &= \frac{2w}{w_{\text{sp}}} \hat{e}_{n,v'} e^{j(\varphi_{v'} - v' \gamma'_{\text{str}} - \pi/2)}.
 \end{aligned} \quad (1.2.52)$$

Der Wicklungsfaktor  $\xi_{v'}$  beschreibt die Relation zwischen der in der realen Wicklung von einem positiven Drehfeld der Ordnungszahl  $v'$  induzierten Spannung und der nach (1.2.52). Sein Vorzeichen gibt an, ob die Durchflutungswelle dieser Ordnungszahl bei Einspeisung des betrachteten Strangs in der Strangachse, in der die Hauptwelle der Ordnungszahl  $p$  definitionsgemäß ein Maximum hat, ebenfalls ein Maximum oder aber ein Minimum hat. Andere Fälle kommen bei symmetrischen Wicklungen nicht vor.

Die Beziehungen (1.2.51) und (1.2.52) liefern für die Bestimmung des Wicklungsfaktors den Zusammenhang

$$\xi_{\nu'} = \frac{\underline{e}_{\text{str},\nu'}}{\underline{e}_{\text{bez},\nu'}} = \frac{\hat{e}_{\text{str},\nu'}}{\hat{e}_{\text{bez},\nu'}}. \quad (1.2.53)$$

Setzt man (1.2.51) und (1.2.52) in (1.2.53) ein, so ergibt sich für den Wicklungsfaktor die einfache Bestimmungsgleichung

$$\begin{aligned} \xi_{\nu'} &= \frac{\sum_{\rho} \hat{e}_{n,\nu'} e^{j(\varphi_{\nu'} - \nu' \gamma'_{\rho})}}{\frac{2w}{w_{\text{sp}}} \hat{e}_{n,\nu'} e^{j(\varphi_{\nu'} - \nu' \gamma'_{\text{str}} - \pi/2)}} \\ &= \frac{w_{\text{sp}}}{2w} \sum_{\rho} e^{j[\nu'(\gamma'_{\text{str}} - \gamma'_{\rho}) + \pi/2]} = \frac{w_{\text{sp}}}{2w} \sum_{\rho} j e^{j\nu'(\gamma'_{\text{str}} - \gamma'_{\rho})}. \end{aligned} \quad (1.2.54)$$

Die Summe in (1.2.54) bedeutet die Addition der Einheitszeiger der Nutenspannungen. Dabei ist  $\nu'(\gamma'_{\text{str}} - \gamma'_{\rho}) + \pi/2$  das  $\nu'$ -fache des aus Bild 1.2.39 zu ersiehenden Differenzwinkels zwischen der positiven Spulenseite der Bezugswicklung und den positiven (bzw. um  $\pi$  verschobenen negativen) Spulenseiten der zu untersuchenden Strangwicklung. Das ist aber auch der Differenzwinkel zwischen dem Zeiger der resultierenden Strangspannung und den einzelnen Nutenspannungszeigern des Strangs (negative Spannungszeiger umgeklappt). Bei symmetrischen Wicklungen bildet der Strangspannungszeiger die Symmetrieachse des zu addierenden Zeigerbündels. Seine Lage ist deshalb leicht zu finden.  $2w/w_{\text{sp}}$  stellt die Zahl der zu berücksichtigenden Spulenseiten dar, d. h. die Zahl der zu addierenden Zeiger.

Der Wicklungsfaktor  $\xi_{\nu'}$  ist nach z. B. (1.2.53) eine reelle Größe. Folglich muss auch die Zeigersumme in (1.2.54) reell sein. Bildet man die Realteile der

$$Z = \frac{2w}{w_{\text{sp}}}$$

Glieder in (1.2.54), so erhält man die Beziehung

$$\xi_{\nu'} = \frac{1}{Z} \sum_{\rho=1}^Z \sin \nu' (\gamma'_{\rho} - \gamma'_{\text{str}}), \quad (1.2.55)$$

die eine bequeme analytische Ermittlung des Wicklungsfaktors einer beliebigen symmetrischen Wicklung gestattet, sofern alle Spulen – wie vorausgesetzt wurde – dieselbe Windungszahl haben.

### 1.2.3.2 Spulen und Spulengruppen

#### a) Einzelspule

Zur Ermittlung des Wicklungsfaktors einer einzelnen Spule, die den Wicklungsschritt  $y$  besitzt und deren Spulenseiten an den Stellen

$$\begin{aligned} \gamma'_a &= \gamma'_{\text{str}} - \frac{y}{y_{\emptyset}} \frac{\pi}{2p} \\ \gamma'_b &= \gamma'_{\text{str}} + \frac{y}{y_{\emptyset}} \frac{\pi}{2p} \end{aligned}$$

liegen, müssen nur ihre beiden Nutenspannungszeiger zum Spulenspannungszeiger addiert werden.  $y_{\emptyset}$  ist dabei der bereits im Abschnitt 1.1.2.3, Seite 16, eingeführte

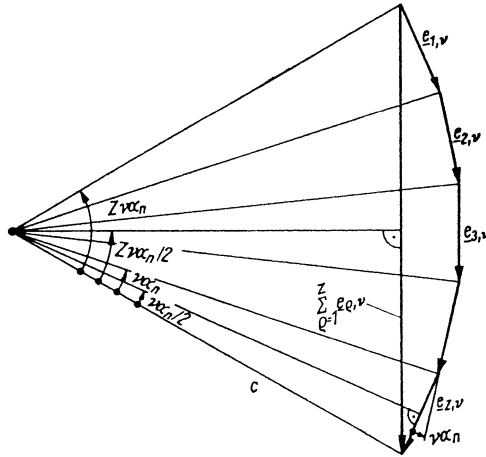


**Bild 1.2.41** Ermittlung des Gruppenfaktors für  $q = 5$ ,  $v' = p$

Durchmesserschritt, der genau eine Polteilung umfasst. (1.2.55) vereinfacht sich damit zu

$$\xi_{\text{sp}, v'} = \frac{1}{2} \left[ \sin \left( v' \frac{y}{y_{\varnothing}} \frac{\pi}{2p} \right) + \sin \left( -v' \frac{y}{y_{\varnothing}} \frac{\pi}{2p} + \pi \right) \right]$$

$$\boxed{\xi_{\text{sp}, v'} = \sin \frac{v'}{p} \frac{y}{y_{\varnothing}} \frac{\pi}{2}} \quad (1.2.56)$$

Im Fall einer einzelnen Spule gilt diese Beziehung für alle  $v' \in \mathbb{N}$ .

Sind  $p$  derartige Spulen gleichmäßig, d. h. jeweils um den Winkel  $2\pi/p$  gegeneinander versetzt, am Umfang verteilt, so sind ihre Spulenspannungszeiger um jeweils

$$\alpha_{v'} = v' \frac{2\pi}{p}$$

gegeneinander phasenverschoben. Die Addition aller Spulenspannungszeiger führt damit für alle  $v'/p \notin \mathbb{N}$  auf den Wert Null; für  $v'/p \in \mathbb{N}$  addieren sie sich dagegen phasengleich. Der Wicklungsfaktor von  $p$  gleichmäßig am Umfang verteilten Spulen berechnet sich daher nur für  $v = v'/p \in \mathbb{N}$  nach (1.2.56) und ist für alle anderen Werte von  $v'$  Null. Bei Einspeisung der Spulenfolge treten also in der Durchflutungsverteilung nur Harmonische auf, die bezüglich der Polpaarteilung ganzzahlige Ordnungszahlen besitzen, und umgekehrt wird die Spulenfolge nur von Flussdichtewellen mit bezüglich der Polpaarteilung ganzzahligen Ordnungszahlen induziert.

Der Ausdruck (1.2.56) ist der im Band *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschnitt 1.5.5, hergeleitete *Spulenfaktor*, der in der Literatur oft auch als *Sehnungsfaktor* bezeichnet wird.

### b) Spulengruppe

Wenn  $q$  Einzelspulen eine einzelne Spulengruppe nebeneinanderliegender Spulen gleicher Weite bilden, dann unterscheiden sich ihre Spulenspannungszeiger jeweils um den Winkel

$$\frac{\nu'}{p} \alpha_n = \frac{2\pi\nu'}{N}. \quad (1.2.57)$$

Die Zeigersumme in (1.2.54) stellt demnach einen Teil eines regelmäßigen Vielecks dar (s. Bild 1.2.41), dessen Seiten die  $q$  Spulenspannungszeiger bilden. Wird die Seitenlänge zu Eins gewählt, so beträgt der Abstand der Polygonpunkte vom Mittelpunkt des regelmäßigen Vielecks

$$c = \frac{1}{2 \sin \frac{\nu' \alpha_n}{p \cdot 2}}.$$

Der Summenzeiger hat dann die Länge

$$2c \sin q \frac{\nu' \alpha_n}{p \cdot 2} = \frac{\sin q \frac{\nu' \alpha_n}{p \cdot 2}}{\sin \frac{\nu' \alpha_n}{p \cdot 2}}.$$

Gegenüber der arithmetischen Summe der  $q$  Spulenspannungszeiger vermindert sich die Summenspannung damit um den Faktor

$$\xi_{gr,\nu'} = \frac{\sin q \frac{\nu' \alpha_n}{p \cdot 2}}{q \sin \frac{\nu' \alpha_n}{p \cdot 2}} = \frac{\sin \nu' q \frac{\pi}{N}}{q \sin \nu' \frac{\pi}{N}}. \quad (1.2.58)$$

Der resultierende Wicklungsfaktor einer einzelnen Spulengruppe ist damit gegenüber dem einer Einzelspule um diesen Faktor reduziert und beträgt somit

$$\xi_{\nu'} = \xi_{sp,\nu'} \xi_{gr,\nu'} = \sin \frac{\nu'}{p} \frac{y}{y_\emptyset} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \nu' q \frac{\pi}{N}}{q \sin \nu' \frac{\pi}{N}} \quad (1.2.59)$$

für alle  $\nu' \in \mathbb{N}$ .

Analog zu den Ausführungen im Unterabschnitt 1.2.3.2a ist der Wicklungsfaktor für  $p$  gleichmäßig am Umfang verteilte identische Spulengruppen für alle  $\nu = \nu'/p \notin \mathbb{N}$  Null. Für alle  $\nu = \nu'/p \in \mathbb{N}$  berechnet er sich nach (1.2.59). Der Faktor nach (1.2.58) ist der im Band *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschnitt 1.5.5, hergeleitete *Gruppenfaktor*, der auch als *Zonenfaktor* bezeichnet wird.

### c) Einfach strangverschachtelte Spulengruppe

Bei einer einfach strangverschachtelten Wicklung (s. Abschn. 1.2.2.3e, S. 60) sind die beiden äußeren Spulenspannungszeiger jeder Spulengruppe gegenüber den jeweils benachbarten um das Doppelte des Winkels  $\nu' \alpha_n / p$  nach (1.2.57) verschoben. Die mittleren  $q - 2$  Spulenspannungszeiger einer Spulengruppe bilden weiterhin den Teil eines regelmäßigen Vielecks (s. Bild 1.2.42), zu dem die beiden äußeren Zeiger hinzuaddiert werden müssen. Analog zum Vorgehen im Unterabschnitt 1.2.3.2b lässt sich der Gruppenfaktor einer einfach strangverschachtelten Spulengruppe bestimmen, indem der Summenzeiger gebildet und ins Verhältnis zur arithmetischen Summe der  $q$  Einzelzeiger gesetzt wird. Die Länge des normierten Summenzeigers kann Bild 1.2.42 als

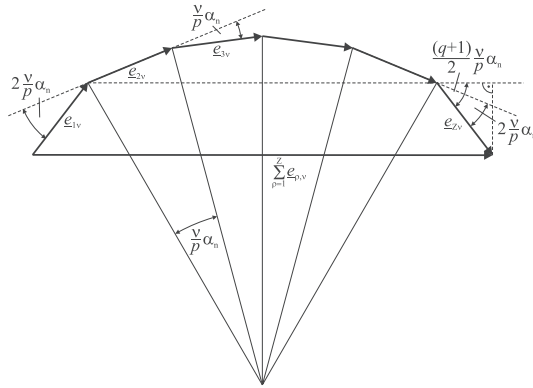


**Bild 1.2.42** Ermittlung des Wicklungsfaktors bei Strangverschachtelung

$$2c \sin(q-2) \frac{\nu'}{p} \frac{\alpha_n}{2} + 2 \cos \frac{q+1}{2} \nu' \frac{2\pi}{N} = \frac{\sin \frac{\nu'}{p} (q-2) \frac{\alpha_n}{2}}{\sin \frac{\nu'}{p} \frac{\alpha_n}{2}} + 2 \cos \nu' (q+1) \frac{\pi}{N}$$

entnommen werden. Der Gruppenfaktor ergibt sich unter Verwendung von (1.2.57) zu

$$\begin{aligned} \xi_{gr,\nu'} &= \frac{\sin \nu' (q-2) \frac{\pi}{N} + 2 \sin \nu' \frac{\pi}{N} \cos \nu' (q+1) \frac{\pi}{N}}{q \sin \nu' \frac{\pi}{N}} \\ &= \frac{\sin \nu' (q-2) \frac{\pi}{N} + \sin \nu' (q+2) \frac{\pi}{N} + \sin \nu' (-q) \frac{\pi}{N}}{q \sin \nu' \frac{\pi}{N}} \\ &= \frac{\sin \nu' q \frac{\pi}{N}}{q \sin \nu' \frac{\pi}{N}} \left( 2 \cos \nu' 2 \frac{\pi}{N} - 1 \right) \end{aligned} \quad (1.2.60)$$

$$= \frac{\sin \nu' q \frac{\pi}{N}}{\frac{q}{2} \sin \nu' 2 \frac{\pi}{N}} \cos \nu' 3 \frac{\pi}{N}. \quad (1.2.61)$$

Damit beträgt der resultierende Wicklungsfaktor einer einzelnen einfach strangverschachtelten Spulengruppe

$$\xi_{\nu'} = \xi_{sp,\nu'} \xi_{gr,\nu'} = \sin \frac{\nu'}{p} \frac{y}{y_\varnothing} \frac{\pi}{2} \frac{q}{2} \frac{\sin \nu' q \frac{\pi}{N}}{\sin \nu' 2 \frac{\pi}{N}} \cos \nu' 3 \frac{\pi}{N} \quad (1.2.62)$$

für alle  $\nu' \in \mathbb{N}$ .

Analog zu den Ausführungen in 1.2.3.2a ist der Wicklungsfaktor für  $p$  gleichmäßig am Umfang verteilte identische Spulengruppen für alle  $\nu = \nu'/p \notin \mathbb{N}$  Null. Für alle  $\nu = \nu'/p \in \mathbb{N}$  berechnet er sich nach (1.2.62).

### 1.2.3.3 Einfluss der Breite des Nutschlitzes

Bisher wurde stillschweigend vorausgesetzt, dass die Spulenseiten jeweils in der tangentialen Mitte der Nuten konzentriert sind. Einen glatten Luftspalt vorausgesetzt,

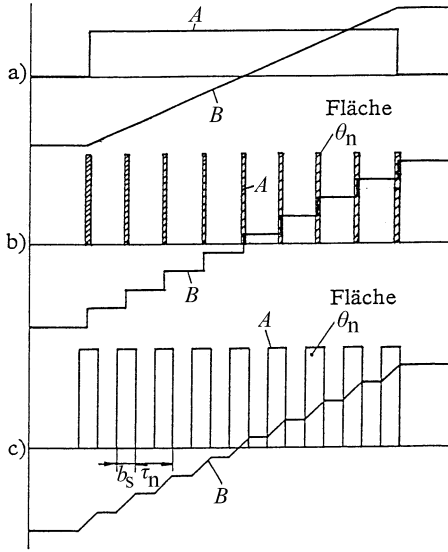


**Bild 1.2.43** Einfluss der Breite des Nutschlitzes auf die Flussdichteverteilung bei glattem Luftspalt;  
a) Durchflutung über die gesamte Nutteilung fein verteilt;  
b) Durchflutung in Nutmitte konzentriert;  
c) Durchflutung über die Nutöffnung verteilt.  
A: Strombelagskurve  
B: Flussdichtekurve  
 $\Theta_n$ : Nutdurchflutung

und unter der Annahme eines abschnittsweise quasihomogenen Felds entsteht bei Stromfluss in den Spulenseiten eine treppenförmige Flussdichteverteilung wie im Bild 1.2.43b.

Tatsächlich sind die Nuten zum Luftspalt hin geöffnet. Wird berücksichtigt, dass die Spulenseiten und damit auch der Strombelag der Spulen über die Breite des Nutschlitzes  $b_s$  gleichmäßig verteilt sind, so entsteht unter den gleichen Voraussetzungen eine Flussdichteverteilung nach Bild 1.2.43c. Die Änderung im Vergleich zum Fall konzentrierter Nutdurchflutung kann mit Hilfe des *Nutschlitz-* oder *Breitenfaktors* nach [12]

$$\xi_{n,v'} = \frac{\sin v' \frac{b_s}{\tau_n} \frac{\pi}{N}}{v' \frac{b_s}{\tau_n} \frac{\pi}{N}} = \frac{\sin v' \frac{b_s}{D}}{v' \frac{b_s}{D}} \quad (1.2.63)$$

angegeben werden.

Im Grenzfall  $b_s = 0$  folgt  $\xi_{n,v'} = 1$ , und im anderen Grenzfall  $b_s = \tau_n$ , bei dem wie im Bild 1.2.43a die Spulenseiten jeweils über die gesamte Nutteilung fein verteilt angenommen werden, folgt

$$\xi_{n,v'} = \frac{\sin v' \frac{\pi}{N}}{v' \frac{\pi}{N}}. \quad (1.2.64)$$

Das Produkt aus dem Gruppenfaktor nach (1.2.58) und dem Nutschlitzfaktor nach (1.2.64) geht dann mit  $N = 2pmq$  über in den sog. Gruppen- bzw. Zonenfaktor für fein verteilten Strombelag

$$\xi_{gr\infty,v'} = \frac{\sin v' q \frac{\pi}{N}}{q \sin v' \frac{\pi}{N}} \frac{\sin v' \frac{\pi}{N}}{v' \frac{\pi}{N}} = \frac{\sin \frac{v'}{p} \frac{1}{m} \frac{\pi}{2}}{\frac{v'}{p} \frac{1}{m} \frac{\pi}{2}}. \quad (1.2.65)$$

### 1.2.3.4 Ganzlochwicklungen

Die Zeigerverteilung der Nutenspannungen einer Strangwicklung liegt mit dem Nutenspannungsstern der Urwicklung fest. Für die nach Abschnitt 1.2.3.1 mögliche Ermittlung deswicklungsfaktors genügt demnach die Untersuchung des Nutenspannungssterns der Urwicklung. Der Nutenspannungsstern von Ganzlochwicklungen besteht für jede Zone aus einem zusammenhängenden Zeigerbündel (s. Bilder 1.2.10, S. 38, u. 1.2.14, S. 43).

#### a) Einschichtwicklungen

Einschicht-Ganzlochwicklungen bestehen in jedem Strang aus  $p$  gleichmäßig am Umfang verteilten Spulengruppen von jeweils  $q$  Spulen. Eine von einem Wicklungsstrang aufgebaute Durchflutungswelle der Ordnungszahl  $\nu'$  bzw. die Flussverkettung des Wicklungsstrangs mit einer Flusssichtewelle der Ordnungszahl  $\nu'$  hängt nur von der Verteilung der Leiter am Umfang ab, nicht aber von der Verbindung der Leiter im Wicklungskopf. Unabhängig von der tatsächlichen Ausführung der Wicklung darf daher davon ausgegangen werden, dass alle Spulen Durchmesser- oder Weite  $y = y_\emptyset$  sind. Einschichtwicklungen ohne Strangverschachtelung entsprechen damit dem im Unterabschnitt 1.2.3.2b zuletzt betrachteten Fall. Mit  $N = 2pmq = 2py_\emptyset$  wird der Gruppenfaktor nach (1.2.58) zu

$$\xi_{gr,\nu'} = \frac{\sin \frac{\nu'}{p} \frac{1}{m} \frac{\pi}{2}}{q \sin \frac{\nu'}{p} \frac{1}{mq} \frac{\pi}{2}} = \frac{\sin \frac{\nu'}{p} \frac{q}{y_\emptyset} \frac{\pi}{2}}{q \sin \frac{\nu'}{p} \frac{1}{y_\emptyset} \frac{\pi}{2}}, \quad (1.2.66)$$

und für den resultierenden Wicklungsfaktor ergibt sich gemäß (1.2.59) mit  $y = y_\emptyset$

$$\xi_{\nu'} = \xi_{sp,\nu'} \xi_{gr,\nu'} \xi_{n,\nu'} = \sin \frac{\nu'}{p} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \frac{\nu'}{p} \frac{q}{y_\emptyset} \frac{\pi}{2}}{q \sin \frac{\nu'}{p} \frac{1}{y_\emptyset} \frac{\pi}{2}} \xi_{n,\nu'}. \quad (1.2.67)$$

Der Spulenfaktor  $\xi_{sp,\nu'}$  ist für alle  $\nu = \nu'/p \in \mathbb{G}$  Null und hat für alle  $\nu = \nu'/p \in \mathbb{U}$  den Betrag Eins.  $\xi_{\nu'}$  ist also nur für  $\nu'/p \in \mathbb{U}$  von Null verschieden.

#### b) Zweischichtwicklungen ohne Zonenänderung

Zweischicht-Ganzlochwicklungen besitzen  $2p$  Spulengruppen je Strang, für die – wie auch bereits im Unterabschnitt 1.2.3.4a geschehen – angenommen werden kann, dass sie aus Spulen gleicher Weite  $y$  bestehen. Sie lassen sich aus zwei um den Winkel  $\pi/p$  am Umfang versetzten, entgegengesetzt durchlaufenen Teilwicklungen zusammensetzen, die ihrerseits aus  $p$  gleichmäßig am Umfang verteilten Spulengruppen mit jeweils  $q$  Spulen der Weite  $y$  bestehen. Die beiden Teilspannungen sind um den Winkel  $\nu'\pi/p + \pi$  gegeneinander phasenverschoben und addieren sich daher für alle  $\nu = \nu'/p \in \mathbb{G}$  zu Null und für alle  $\nu = \nu'/p \in \mathbb{U}$  algebraisch. Der resultierende Wicklungsfaktor von Zweischicht-Ganzlochwicklungen ohne Zonenänderung und ohne Strangverschachtelung beträgt daher entsprechend (1.2.59) und mit  $N = 2py_\emptyset$  für alle  $\nu = \nu'/p \in \mathbb{U}$

$$\xi_{\nu'} = \xi_{\text{sp},\nu'} \xi_{\text{gr},\nu'} \xi_{\text{n},\nu'} = \sin \frac{\nu'}{p} \frac{y}{y_{\emptyset}} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \frac{\nu'}{p} \frac{q}{y_{\emptyset}} \frac{\pi}{2}}{q \sin \frac{\nu'}{p} \frac{1}{y_{\emptyset}} \frac{\pi}{2}} \xi_{\text{n},\nu'} \quad (1.2.68)$$

### c) Zweischichtwicklungen mit Zonenänderung

Bei Zweischicht-Ganzlochwicklungen mit Zonenänderung (s. Abschn. 1.2.2.1b, S. 39) setzt sich jeder Strang je zur Hälfte aus Zonen mit  $q + q_{\Delta}$  Spulenseiten und aus Zonen mit  $q - q_{\Delta}$  Spulenseiten zusammen. Die Wicklung kann als aus zwei Teilwicklungen mit je  $p$  gleichmäßig am Umfang verteilten Spulengruppen bestehend aufgefasst werden, von denen die eine die Lochzahl  $q + q_{\Delta}$  und die andere die Lochzahl  $q - q_{\Delta}$  besitzt. Wie Bild 1.2.11c, Seite 39, zeigt, haben beide Teilwicklungen dieselbe Achse, die damit auch Strangachse ist, und denselben Wicklungsschritt  $y$ . Die Wicklungsfaktoren der beiden Teilwicklungen können entsprechend (1.2.58) und (1.2.59) für alle  $\nu = \nu'/p \in \mathbb{N}$  über

$$\xi_{\nu'} = \sin \frac{\nu'}{p} \frac{y}{y_{\emptyset}} \frac{\pi}{2} \frac{\sin(q \pm q_{\Delta}) \nu' \frac{\pi}{N}}{(q \pm q_{\Delta}) \sin \nu' \frac{\pi}{N}} \xi_{\text{n},\nu'} \quad (1.2.69)$$

berechnet werden. Da beide Teilwicklungen dieselbe Achse haben, addieren sich die Teilwicklungsspannungen phasengleich zur Summenspannung. Der Wicklungsfaktor des gesamten Strangs ist daher die mit den Lochzahlen der Teilwicklungen gewichtete Summe der Wicklungsfaktoren der Teilwicklungen.

Ist die Wicklung mit Zonenänderung keine Durchmesserwicklung, sondern besitzt sie wie im Bild 1.2.11d einen Wicklungsschritt  $y \neq y_{\emptyset}$ , entstehen neben den ungeradzahligem auch geradzahligem Harmonische, für die sich die Teilwicklungsspannungen nicht mehr gleichphasig, sondern gegenphasig addieren. Damit ergibt sich für die Wicklungsfaktoren der Zusammenhang

$$\begin{aligned} \xi_{\nu'} &= \frac{1}{2q} \left[ (q + q_{\Delta}) \sin \frac{\nu'}{p} \frac{y}{y_{\emptyset}} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \nu' (q + q_{\Delta}) \frac{\pi}{N}}{(q + q_{\Delta}) \sin \nu' \frac{\pi}{N}} \right. \\ &\quad \left. \pm (q - q_{\Delta}) \sin \frac{\nu'}{p} \frac{y}{y_{\emptyset}} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \nu' (q - q_{\Delta}) \frac{\pi}{N}}{(q - q_{\Delta}) \sin \nu' \frac{\pi}{N}} \right] \xi_{\text{n},\nu'} \\ &= \sin \frac{\nu'}{p} \frac{y}{y_{\emptyset}} \frac{\pi}{2} \frac{\sin(q + q_{\Delta}) \nu' \frac{\pi}{N} \pm \sin(q - q_{\Delta}) \nu' \frac{\pi}{N}}{2q \sin \nu' \frac{\pi}{N}} \xi_{\text{n},\nu'}. \end{aligned} \quad (1.2.70)$$

Dabei gilt das obere Vorzeichen für ungeradzahlige Werte  $\nu = \nu'/p \in \mathbb{U}$  und das untere Vorzeichen für geradzahlige Werte  $\nu = \nu'/p \in \mathbb{G}$ . Dies lässt sich auch formulieren als

$$\xi_{\nu'} = \sin \frac{\nu'}{p} \frac{y}{y_{\emptyset}} \frac{\pi}{2} \frac{\sin(q + q_{\Delta}) \nu' \frac{\pi}{N} - \cos\left(\frac{\nu'}{p} \pi\right) \sin(q - q_{\Delta}) \nu' \frac{\pi}{N}}{2q \sin \nu' \frac{\pi}{N}} \xi_{\text{n},\nu'} \quad (1.2.71)$$

oder mit Hilfe der Additionstheoreme als

$$\xi_{\nu'} = \sin \frac{\nu'}{p} \frac{y}{y_{\emptyset}} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \nu' q \frac{\pi}{N}}{q \sin \nu' \frac{\pi}{N}} \cos \nu' q_{\Delta} \frac{\pi}{N} \xi_{\text{n},\nu'} \quad \text{für } \frac{\nu'}{p} \in \mathbb{U} \quad (1.2.72a)$$

$$\xi_{\nu'} = \sin \frac{\nu'}{p} \frac{y}{y_\emptyset} \frac{\pi}{2} \frac{\cos \frac{\nu' q}{N} \frac{\pi}{2}}{q \sin \frac{\nu'}{p} \frac{\pi}{2}} \sin \nu' q_\Delta \frac{\pi}{N} \xi_{n,\nu'} \quad \text{für } \frac{\nu'}{p} \in \mathbb{G}. \quad (1.2.72b)$$

Mit  $N = 2py_\emptyset$  wird daraus

$$\xi_{\nu'} = \sin \frac{\nu'}{p} \frac{y}{y_\emptyset} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \frac{\nu' q}{p y_\emptyset} \frac{\pi}{2}}{q \sin \frac{\nu'}{p} \frac{1}{y_\emptyset} \frac{\pi}{2}} \cos \frac{\nu' q_\Delta}{p y_\emptyset} \frac{\pi}{2} \xi_{n,\nu'} \quad \text{für } \frac{\nu'}{p} \in \mathbb{U} \quad (1.2.73a)$$

$$\xi_{\nu'} = \sin \frac{\nu'}{p} \frac{y}{y_\emptyset} \frac{\pi}{2} \frac{\cos \frac{\nu' q}{p y_\emptyset} \frac{\pi}{2}}{q \sin \frac{\nu'}{p} \frac{1}{y_\emptyset} \frac{\pi}{2}} \sin \frac{\nu' q_\Delta}{p y_\emptyset} \frac{\pi}{2} \xi_{n,\nu'} \quad \text{für } \frac{\nu'}{p} \in \mathbb{G}. \quad (1.2.73b)$$

Die Wahl von  $q_\Delta$  stellt einen weiteren Freiheitsgrad im Wicklungsentwurf dar, der zusätzlich zur Sehnung die gezielte Unterdrückung bestimmter Harmonischer erlaubt, weshalb gesehnte Zweischicht-Ganzlochwicklungen mit Zonenänderung auch als *doppelt gesehnte Wicklungen* bezeichnet werden. Da sie aber, wie bereits erläutert, nicht nur ungeradzahlige, sondern im Gegensatz zu gesehnten Zweischicht-Ganzlochwicklungen ohne Zonenänderung zusätzlich auch geradzahlige Harmonische erzeugen, ist ihre praktische Bedeutung gering.

Ungesehnte Zweischicht-Ganzlochwicklungen mit Zonenänderung besitzen dagegen dieselben Wicklungsfaktoren wie gesehnte Zweischicht-Ganzlochwicklungen ohne Zonenänderung, da bei  $y = y_\emptyset$  der Spulenfaktor  $\xi_{sp,\nu'}$  für alle  $\nu = \nu'/p \in \mathbb{G}$  zu Null wird. Die Umformung

$$\begin{aligned} \sin \frac{\nu'}{p} \frac{y}{y_\emptyset} \frac{\pi}{2} &= \sin \frac{\nu'}{p} \left( 1 - \frac{y_v}{y_\emptyset} \right) \frac{\pi}{2} \\ &= \sin \frac{\nu'}{p} \frac{\pi}{2} \cos \frac{\nu' y_v}{p y_\emptyset} \frac{\pi}{2} - \underbrace{\cos \frac{\nu'}{p} \frac{\pi}{2}}_{=0 \text{ für } \frac{\nu'}{p} \in \mathbb{U}} \sin \frac{\nu' y_v}{p y_\emptyset} \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (1.2.74)$$

zeigt bei Vergleich mit (1.2.73a), dass eine Zonenänderung für alle  $\nu = \nu'/p \in \mathbb{U}$  dieselbe Wirkung hat wie eine Schrittverkürzung um  $y_v = q_\Delta$ .

Treibt man die Zonenänderung so weit, dass  $q_\Delta = q$  ist und damit die eine der Zonen  $2q$  Nuten und die andere gar keine Nuten mehr aufweist, so liegt eine *Wicklung mit doppelter Zonenbreite* vor, wie sie z. B. bei Dahlanderwicklungen in der hohen Polzahl auftritt. (1.2.72a,b) und (1.2.73a,b) werden für diesen Fall für alle  $\nu = \nu'/p \in \mathbb{N}$  zu

$$\xi_{\nu'} = \sin \frac{\nu'}{p} \frac{y}{y_\emptyset} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \nu' 2q \frac{\pi}{N}}{2q \sin \nu' \frac{\pi}{N}} \xi_{n,\nu'} = \sin \frac{\nu'}{p} \frac{y}{y_\emptyset} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \frac{\nu' 2q}{p y_\emptyset} \frac{\pi}{2}}{2q \sin \frac{\nu'}{p} \frac{1}{y_\emptyset} \frac{\pi}{2}} \xi_{n,\nu'}. \quad (1.2.75)$$

#### d) Strangverschachtelte Einschichtwicklungen

Eine einfach strangverschachtelte Einschicht-Ganzlochwicklung besteht aus  $p$  der im Unterabschnitt 1.2.3.2c behandelten Spulengruppen, die gleichmäßig am Umfang verteilt sind. Es darf davon ausgegangen werden, dass sie aus Durchmesser-spulen mit  $y = y_\emptyset$  aufgebaut sind. Nach (1.2.62) und mit  $N = 2py_\emptyset$  beträgt ihr resultierender Wicklungsfaktor für alle  $\nu = \nu'/p \in \mathbb{N}$

$$\xi_{\nu'} = \xi_{\text{sp},\nu'} \xi_{\text{gr},\nu'} \xi_{\text{n},\nu'} = \sin \frac{\nu'}{p} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \frac{\nu'}{p} \frac{q}{y_{\varnothing}} \frac{\pi}{2}}{\frac{q}{2} \sin \frac{\nu'}{p} \frac{2}{y_{\varnothing}} \frac{\pi}{2}} \cos \left( \frac{\nu'}{p} \frac{3}{y_{\varnothing}} \frac{\pi}{2} \right) \xi_{\text{n},\nu'} . \quad (1.2.76)$$

Da der Spulenfaktor  $\xi_{\text{sp},\nu'}$  für alle  $\nu = \nu'/p \in \mathbb{G}$  Null ist, entstehen nur ungeradzählige Harmonische. Der Vergleich mit (1.2.74) zeigt, dass eine einfach strangverschachtelte Einschicht-Ganzlochwicklung für alle Harmonischen denselben Wicklungsfaktor hat wie eine um  $y_v = 3$  gesehnte Zweischicht-Ganzlochwicklung mit halber Nutzahl, d. h. halbem Durchmesserschritt und halber Lochzahl. Aufgrund dieser relativ großen äquivalenten Schrittverkürzung ist die Ausführung einer Strangverschachtelung i. Allg. nur für  $q \geq 5$  sinnvoll.

#### e) Strangverschachtelte Zweischichtwicklungen

Einfach strangverschachtelte Zweischicht-Ganzlochwicklungen besitzen  $2p$  Spulengruppen, für die – wie auch bereits im Unterabschnitt a geschehen – angenommen werden kann, dass sie aus Spulen der gleichen Weite  $y$  bestehen. Analog zu Unterabschnitt 1.2.3.4b lassen sie sich aus zwei um den Winkel  $\pi/p$  am Umfang versetzten, entgegengesetzt durchlaufenen Teilwicklungen zusammensetzen, deren Teilspannungen um den Winkel  $\nu'\pi/p + \pi$  gegeneinander phasenverschoben sind und die sich daher für alle  $\nu = \nu'/p \in \mathbb{G}$  zu Null und für alle  $\nu = \nu'/p \in \mathbb{U}$  phasengleich addieren. Der resultierende Wicklungsfaktor einfach strangverschachtelter Zweischicht-Ganzlochwicklungen ohne Zonenänderung beträgt daher entsprechend (1.2.62) und mit  $N = 2py_{\varnothing}$  für alle  $\nu = \nu'/p \in \mathbb{U}$

$$\xi_{\nu'} = \xi_{\text{sp},\nu'} \xi_{\text{gr},\nu'} \xi_{\text{n},\nu'} = \sin \frac{\nu'}{p} \frac{y}{y_{\varnothing}} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \frac{\nu'}{p} \frac{q}{y_{\varnothing}} \frac{\pi}{2}}{\frac{q}{2} \sin \frac{\nu'}{p} \frac{2}{y_{\varnothing}} \frac{\pi}{2}} \cos \left( \frac{\nu'}{p} \frac{3}{y_{\varnothing}} \frac{\pi}{2} \right) \xi_{\text{n},\nu'} . \quad (1.2.77)$$

Da die Strangverschachtelung, wie im Unterabschnitt 1.2.3.4d dargelegt, wie eine Sehnung um  $y_v = 3$  wirkt, werden strangverschachtelte und zusätzlich gesehnte Zweischichtwicklungen (ebenso wie gesehnte Zweischichtwicklungen mit Zonenänderung) als *doppelt gesehnte Wicklungen* bezeichnet.

#### f) Mehrschicht-Steckwicklungen

Bei den meisten praktisch ausgeführten Mehrschicht-Steckwicklungen führt der Zonenplan auf eine Durchflutungsverteilung am Umfang, die der einer gesehnten oder ungesehnten Zweischichtwicklung ohne Zonenänderung entspricht, so dass für den resultierenden Wicklungsfaktor (1.2.68) gilt. Sofern jedoch die grundsätzlich möglichen, zahlreichen Freiheitsgrade bei der Gestaltung des Wicklungsplans, z. B. durch Ausführung einer mehrstufigen Sehnung (s. Unterabschn. 1.2.2.1d, S. 44), ausgeschöpft werden, ist es kaum möglich, eine einfache Beziehung für den resultierenden Wicklungsfaktor anzugeben, die alle denkbaren Varianten einschließt. Daher muss in diesen Fällen die aus dem Nutenspannungsstern als (1.2.55) abgeleitete Beziehung

$$\xi_{\nu'} = \xi_{n,\nu'} \frac{1}{Z} \sum_{\rho=1}^Z \sin \nu' (\gamma'_{\rho} - \gamma'_{\text{str}}) \quad (1.2.78)$$

angewendet werden.

### 1.2.3.5 Zweischicht-Bruchlochwicklungen

Bruchlochwicklungen haben Spulengruppen unterschiedlicher Spulenzahl und damit auch keinen gleichen Gruppenfaktor der einzelnen Spulengruppen. Zudem variiert der Abstand zwischen den einzelnen Spulengruppen. Die Ableitung eines resultierenden Gruppenfaktors ist daher relativ aufwendig. Sie geht auf *Klima* zurück und kann z. B. [13] entnommen werden. Hier soll lediglich das Ergebnis als

$$\xi_{\text{gr},\nu'} = \frac{\sin \frac{\nu'}{\nu^*} q_a \frac{1+g^* N^*}{p^*} \frac{\pi}{N^*} - \cos \frac{\nu'}{\nu^*} \frac{1+g^* N^*}{p^*} \pi \sin \frac{\nu'}{\nu^*} q_b \frac{1+g^* N^*}{p^*} \frac{\pi}{N^*}}{\frac{N^*}{m} \sin \frac{\nu'}{\nu^*} \frac{1+g^* N^*}{p^*} \frac{\pi}{N^*}} \quad (1.2.79)$$

wiedergegeben werden, welches für Zweischicht-Bruchlochwicklungen sowohl erster als auch zweiter Art mit ungerader Strangzahl  $m$  gilt. Hierin sind

- $N^* = N/t$  die Nutzahl und  $p^* = p/t$  die Polpaarzahl der Urwicklung nach (1.2.20) bzw. (1.2.23), Seite 33,
- $g^*$  die kleinste natürliche Zahl, für die der Ausdruck

$$\tilde{g} = \frac{1+g^* N^*}{p^*}$$

ganzzahlig ist,

- $q_a$  und  $q_b$  diejenigen ganzen Zahlen, die dem Wert  $N^*/(2m)$  benachbart liegen,
- $\nu^* = t$  die kleinste Ordnungszahl der von einem Strang erzeugten bzw. in ihm induzierenden Harmonischen.

Der resultierende Wicklungsfaktor kann damit in der Form

$$\xi_{\nu'} = \sin \frac{\nu'}{p} \frac{y}{y_{\emptyset}} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \frac{\nu'}{\nu^*} q_a \tilde{g} \frac{\pi}{N^*} - \cos \frac{\nu'}{\nu^*} \tilde{g} \pi \sin \frac{\nu'}{\nu^*} q_b \tilde{g} \frac{\pi}{N^*}}{\frac{N^*}{m} \sin \frac{\nu'}{\nu^*} \tilde{g} \frac{\pi}{N^*}} \xi_{n,\nu'} \quad (1.2.80)$$

angegeben werden. Bei Urwicklungen erster Art gilt dies nach (1.2.35), Seite 51, für alle  $\nu'/t \in \mathbb{U}$  und damit für alle  $\nu'/n/p \in \mathbb{U}$ . Bei Urwicklungen zweiter Art gilt dies nach (1.2.37) für alle  $\nu'/t \in \mathbb{N}$  und damit für alle  $\nu'/n/p \in \mathbb{G}$ .

Für Zweischicht-Bruchlochwicklungen mit Urwicklung erster Art, d. h. für  $N^* \in \mathbb{G}$ , gilt

$$q_a = q_b = \frac{N^*}{2m},$$

und (1.2.80) vereinfacht sich zu

$$\begin{aligned}
\xi_{\nu'} &= \sin \frac{\nu'}{p} \frac{y}{y_\emptyset} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \frac{\nu'}{\nu^*} \tilde{g} \frac{\pi}{2m} \left(1 - \cos \frac{\nu'}{\nu^*} \tilde{g} \pi\right)}{\frac{N^*}{m} \sin \frac{\nu'}{\nu^*} \tilde{g} \frac{\pi}{N^*}} \xi_{n,\nu'} \\
&= \sin \frac{\nu'}{p} \frac{y}{y_\emptyset} \frac{\pi}{2} \frac{2 \sin \frac{\nu'}{\nu^*} \tilde{g} \frac{\pi}{2m} \sin^2 \frac{\nu'}{\nu^*} \tilde{g} \frac{\pi}{2}}{\frac{N^*}{m} \sin \frac{\nu'}{\nu^*} \tilde{g} \frac{\pi}{N^*}} \xi_{n,\nu'}.
\end{aligned} \tag{1.2.81}$$

Die manuelle Auswertung von (1.2.80) bzw. (1.2.81) ist recht mühsam. Zudem interessieren bei hochpoligen Synchrongeneratoren, einem der verbreitetsten Anwendungsgebiete von Bruchlochwicklungen, mit Rücksicht auf die Ermittlung der vom Erregersystem hervorgerufenen Harmonischen in der induzierten Spannung vor allem die Wicklungsfaktoren der Ankerwicklung für die vom Erregersystem erzeugten Harmonischen  $\nu'/p \in \mathbb{U}$ . Für diesen Fall ist der nachfolgend beschriebene Weg zur Bestimmung des Gruppenfaktors vorteilhaft.

Im Abschnitt 1.2.2.2, Seite 47, ist festgestellt worden, dass der Nutenspannungstern einer normal entworfenen Zweischicht-Bruchlochwicklung ebenso wie der Nutenspannungstern einer Ganzlochwicklung geschlossene Zeigerbündel je Zone aufweist, wobei an der Bildung jeder dieser Zonen alle Spulengruppen des betreffenden Strangs beteiligt sind (s. Bilder 1.2.19, S. 49, u. 1.2.21, S. 53). Diese Tatsache gestattet die Anwendung von (1.2.58), die für geschlossene Zeigerbündel gilt.

**a) Zweischicht-Bruchlochurwicklungen erster Art für  $\nu'/p \in \mathbb{U}$**

Für diese Wicklungen beträgt die Zeigerzahl je Strang (s. Tab. 1.2.4, S. 33)

$$\frac{N^*}{m} = \frac{N}{tm} \in \mathbb{G},$$

und es kann  $Z^+ = Z^-$  gesetzt werden (s. Abschn. 1.2.2.2a). Dabei entstehen wie bei der Ganzlochwicklung gleich große Zonen (s. Bild 1.2.19), und die negativen Zeiger fallen nach dem Umklappen auf die positiven. Die für (1.2.58) maßgebende Zeigerzahl ist  $Z^+$  und der Winkel zwischen den Zeigern  $\alpha_z$ . Außerdem gilt für die Urwicklung erster Art  $p^* = n$  und  $\alpha_z = \alpha_n/n$ . Damit wird

$$Z^+ = \frac{N^*}{2m} = p^* q = nq = \frac{n\pi}{m\alpha_n},$$

und für den aus den elektrischen Zonen des Nutenspannungsterns abgeleiteten sog. *Zonenfaktor der äquivalenten Ganzlochwicklung* ergibt sich

$$\xi_{gr,\nu'} = \frac{\sin nq \frac{\nu'}{p} \frac{\alpha_z}{2}}{nq \sin \frac{\nu'}{p} \frac{\alpha_z}{2}} = \frac{\sin q \frac{\nu'}{p} \frac{\alpha_n}{2}}{nq \sin \frac{\nu'}{p} \frac{\alpha_n}{2n}}. \tag{1.2.82}$$

Für den resultierenden Wicklungsfaktor erhält man dann

$$\boxed{\xi_{\nu'} = \xi_{sp,\nu'} \xi_{gr,\nu'} \xi_{n,\nu'} = \sin \frac{\nu'}{p} \frac{y}{y_\emptyset} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \frac{\nu'}{p} \frac{q}{y_\emptyset} \frac{\pi}{2}}{nq \sin \frac{\nu'}{p} \frac{1}{ny_\emptyset} \frac{\pi}{2}} \xi_{n,\nu'} \quad \text{für alle } \frac{\nu'}{p} \in \mathbb{U}.} \tag{1.2.83}$$

Dabei wird  $nq$  auch als *Lochzahl der äquivalenten Ganzlochwicklung* bezeichnet. Die Berücksichtigung der Sehnung erfolgt wie im Unterabschnitt 1.2.3.4a durch den Spulenfaktor nach (1.2.56). Eine Zonenänderung wird normalerweise nicht vorgenommen. Es muss noch einmal betont werden, dass (1.2.83) ausschließlich für ungeradzahlige Harmonische  $\nu = \nu'/p$  angewendet werden darf; für alle anderen Ordnungszahlen muss (1.2.81) ausgewertet werden.

**b) Zweischicht-Bruchlochurwicklungen zweiter Art für  $\nu'/p \in \mathbb{U}$**

Für Urwicklungen zweiter Art beträgt die Zeigerzahl je Strang

$$\frac{N^*}{m} = \frac{N}{tm} \in \mathbb{U},$$

und damit ist  $Z^+ \neq Z^-$ . Bei ungerader Strangzahl  $m$  ist dann auch die Zahl der Zeiger des Nutenspannungsterns  $N^* \in \mathbb{U}$  (s. Bild 1.2.21), und die umgeklappten negativen Zeiger fallen zwischen die positiven. Im Normalfall wählt man  $|Z^- - Z^+| = 1$ , so dass die umgeklappten negativen Zeiger mit den positiven wieder ein geschlossenes Bündel bilden. Da für die Urwicklung zweiter Art  $p^* = n/2$  gilt, besteht dieses Bündel aus

$$Z = Z^+ + Z^- = \frac{N^*}{m} = 2p^* q = nq$$

Zeigern mit einem Winkel von

$$\frac{\alpha_z}{2} = \frac{\alpha_n}{n}$$

zwischen den Zeigern (s. Tab. 1.2.4). Nach (1.2.58) ergibt sich damit für den Gruppenfaktor

$$\xi_{\text{gr}, \nu'} = \frac{\sin nq \frac{\nu'}{p} \frac{\alpha_z}{4}}{nq \sin \frac{\nu'}{p} \frac{\alpha_z}{4}} = \frac{\sin q \frac{\nu'}{p} \frac{\alpha_n}{2}}{nq \sin \frac{\nu'}{p} \frac{\alpha_n}{2n}}. \quad (1.2.84)$$

Der letzte Ausdruck in (1.2.84) ist der gleiche wie in (1.2.82) für Zweischicht-Bruchlochwicklungen erster Art, so dass der resultierende Wicklungsfaktor ebenfalls durch (1.2.83) gegeben ist.

In Tabelle 1.2.7 sind sämtliche Bestimmungsgleichungen für den Wicklungsfaktor zusammengestellt. In Tabelle 1.2.8 sind die Zonen- bzw. Gruppenfaktoren und im Bild 1.2.44 die Sehnungs- bzw. Spulenfaktoren von dreisträngigen Wicklungen angegeben.

## 1.2.4 Aussagen des Görges-Diagramms

Das Durchflutungspolygon nach Görges ist unter der Voraussetzung gleichmäßiger Nutung ein elegantes Hilfsmittel zur grafischen Beurteilung des von einer Wicklung erzeugten Oberwellengehalts der Felderregerkurve und zur geschlossenen Ermittlung der Oberwellenstreuung. Görges hat bereits im Jahr 1907 gezeigt, dass sich die Durchflutungsverteilung einer mehrsträngigen Maschine direkt aus dem Zeigerdiagramm der Nutdurchflutungen ableiten lässt. Dies soll im Folgenden für den Fall

Tabelle 1.2.7 Beziehungen zur Ermittlung des Wicklungsfaktors

| Wicklungsart bzw. Wicklungsfaktor                      | Feldwellenparameter bei symmetrischer Speicherung ( $g \in \mathbb{Z}$ ) | Bestimmungsgleichung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Geltungsbereich der Bestimmungsgleichung                           |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Nutschlitzfaktor                                       |                                                                          | $\xi_{n,v'} = \frac{\sin v' \frac{b_s \pi}{\tau_n N}}{v' \frac{b_s \pi}{\tau_n N}} = \frac{\sin v' \frac{b_s}{D}}{v' \frac{b_s}{D}}$                                                                                                                                                                                                                                                                             | $v' \in \mathbb{N}$                                                |
| einzelne Spule                                         | $\tilde{v}' \in \mathbb{Z}$                                              | $\xi_{v'} = \xi_{sp,v'} \xi_{n,v'} = \sin \frac{v' y \pi}{p y \varnothing 2} \xi_{n,v'}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | $v' \in \mathbb{N}$                                                |
| einzelne Spulengruppe ohne Strangverschachtelung       | $\tilde{v}' \in \mathbb{Z}$                                              | $\xi_{v'} = \xi_{sp,v'} \xi_{gr,v'} = \sin \frac{v' y \pi}{p y \varnothing 2} \sin v' q \frac{\pi}{N} \xi_{n,v'}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                | $v' \in \mathbb{N}$                                                |
| Einschicht-Ganzlochwicklung ohne Strangverschachtelung | $\tilde{v}' = p(1 + 2mg)$                                                | $\xi_{v'} = \sin \frac{v' \pi}{p 2} \frac{\sin \frac{v' q \pi}{p y \varnothing 2}}{q \sin \frac{v' \pi}{p y \varnothing 2}} \xi_{n,v'}$                                                                                                                                                                                                                                                                          | $\frac{v'}{p} \in \mathbb{U}$                                      |
| Zweischicht-Ganzlochwicklung normaler Zonenbreite      | $\tilde{v}' = p(1 + 2mg)$                                                | $\xi_{v'} = \sin \frac{v' y \pi}{p y \varnothing 2} \frac{\sin \frac{v' q \pi}{p y \varnothing 2}}{q \sin \frac{v' \pi}{p y \varnothing 2}} \xi_{n,v'}$                                                                                                                                                                                                                                                          | $\frac{v'}{p} \in \mathbb{U}$                                      |
| Zweischicht-Ganzlochwicklung doppelter Zonenbreite     | $\tilde{v}' = p(1 + mg)$                                                 | $\xi_{v'} = \sin \frac{v' y \pi}{p y \varnothing 2} \frac{\sin \frac{v' 2q \pi}{p y \varnothing 2}}{2q \sin \frac{v' \pi}{p y \varnothing 2}} \xi_{n,v'}$                                                                                                                                                                                                                                                        | $\frac{v'}{p} \in \mathbb{N}$                                      |
| Zweischicht-Ganzlochwicklung mit Zonenänderung         | $\tilde{v}' = p(1 + mg)$                                                 | $\xi_{v'} = \sin \frac{v' y \pi}{p y \varnothing 2} \frac{\sin \frac{v' q \pi}{p y \varnothing 2}}{q \sin \frac{v' \pi}{p y \varnothing 2}} \cos \frac{v' q \Delta \pi}{p y \varnothing 2} \xi_{n,v'}$<br>$\xi_{v'} = \sin \frac{v' y \pi}{p y \varnothing 2} \frac{\cos \frac{v' q \pi}{p y \varnothing 2}}{q \sin \frac{v' \pi}{p y \varnothing 2}} \sin \frac{v' q \Delta \pi}{p y \varnothing 2} \xi_{n,v'}$ | $\frac{v'}{p} \in \mathbb{U}$<br><br>$\frac{v'}{p} \in \mathbb{G}$ |

Fortsetzung

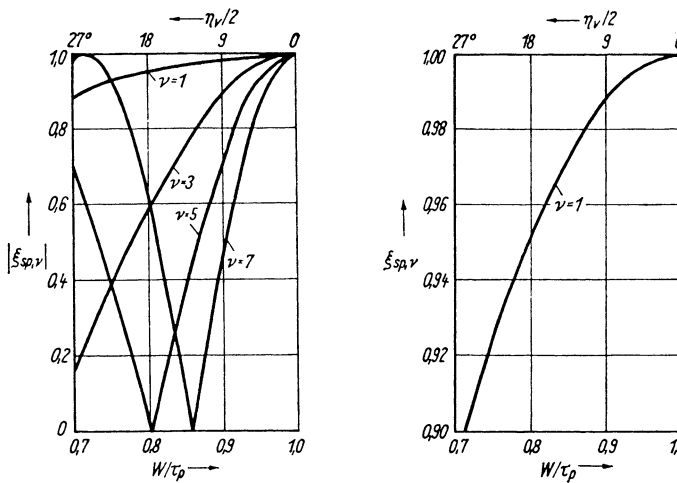
Tabelle 1.2.7 Fortsetzung

| Wicklungsart bzw. Wicklungsfaktor                                                                                     | Feldwellenparameter bei symmetrischer Speisung ( $g \in \mathbb{Z}$ ) | Bestimmungsgleichung                                                                                                                                                     | Geltungsbereich der Bestimmungsgleichung                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Einfach strangverschachtelte Einschicht-Ganzlochwicklung                                                              | $\tilde{v}' = p(1 + 2mg)$                                             | $\xi_{\nu'} = \sin \frac{\nu' \pi}{p2} \sin \frac{\nu' q\pi}{py\varnothing 2} \cos \frac{\nu' 3\pi}{py\varnothing 2} \xi_{n,\nu'}$                                       | $\frac{\nu'}{p} \in \mathbb{U}$                                      |
| Einfach strangverschachtelte Zweischicht-Ganzlochwicklung                                                             | $\tilde{v}' = p(1 + 2mg)$                                             | $\xi_{\nu'} = \sin \frac{\nu' y\pi}{py\varnothing 2} \sin \frac{\nu' q\pi}{py\varnothing 2} \cos \frac{\nu' 3\pi}{py\varnothing 2} \xi_{n,\nu'}$                         | $\frac{\nu'}{p} \in \mathbb{U}$                                      |
| Zweischicht-Bruchlochwicklung mit natürlicher Zonenänderung                                                           | $\tilde{v}' = p \left( 1 + \frac{2mg}{n} \right)$                     | $\xi_{\nu'} = \sin \frac{\nu' y\pi}{py\varnothing 2} \sin \frac{\nu' q_1 g\pi}{v' N} - \cos \frac{\nu' g\pi}{v' N} \sin \frac{\nu' q_2 g\pi}{v' N} \xi_{n,\nu'}$         | 1. Art: $n\nu'/p \in \mathbb{U}$<br>2. Art: $n\nu'/p \in \mathbb{G}$ |
| Bestimmung des Wicklungsfaktors für beliebige Wicklungen mit gleicher Spulenwindungszahl aus dem Nuten-spannungsstern |                                                                       | $\xi_{\nu'} = \sin \frac{\nu' y\pi}{py\varnothing 2} \sin \frac{\nu' q\pi}{py\varnothing 2} \sin \frac{\nu' \pi}{nq \sin \frac{\nu' \pi}{py\varnothing 2}} \xi_{n,\nu'}$ | $\frac{\nu'}{p} \in \mathbb{U}$                                      |
|                                                                                                                       |                                                                       | $\xi_{\nu'} = \xi_{n,\nu'} \frac{1}{Z} \sum_{\rho=1}^Z \sin \nu' (\gamma'_{\rho} - \gamma'_{\text{sr}})$                                                                 | $\nu' \in \mathbb{N}$                                                |

**Tabelle 1.2.8** Gruppen- bzw. Zonenfaktoren dreisträngiger Wicklungen für  $\nu = \nu'/p \in \mathbb{U}$ 

$$q = \frac{z}{n}; \quad z \text{ und } n \text{ teilerfremd}$$

| nq       | $\xi_{gr,p}$ | $\xi_{gr,3p}$ | $\xi_{gr,5p}$ | $\xi_{gr,7p}$ | $\xi_{gr,9p}$ | $\xi_{gr,11p}$ |
|----------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| 1        | 1,000        | 1,000         | 1,000         | 1,000         | 1,000         | 1,000          |
| 2        | 0,966        | 0,707         | 0,259         | -0,259        | -0,707        | -0,966         |
| 3        | 0,960        | 0,667         | 0,218         | -0,177        | -0,333        | -0,177         |
| 4        | 0,958        | 0,653         | 0,205         | -0,158        | -0,271        | -0,126         |
| 5        | 0,957        | 0,647         | 0,200         | -0,150        | -0,247        | -0,109         |
| 6        | 0,956        | 0,644         | 0,197         | -0,145        | -0,236        | -0,102         |
| 7        | 0,956        | 0,642         | 0,196         | -0,143        | -0,229        | -0,098         |
| 8        | 0,956        | 0,641         | 0,195         | -0,141        | -0,225        | -0,095         |
| 9        | 0,956        | 0,640         | 0,194         | -0,140        | -0,222        | -0,093         |
| 10       | 0,955        | 0,639         | 0,193         | -0,139        | -0,220        | -0,092         |
| 20       | 0,955        | 0,637         | 0,192         | -0,137        | -0,214        | -0,088         |
| $\infty$ | 0,955        | 0,637         | 0,191         | -0,136        | -0,212        | -0,087         |

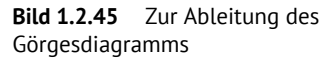
**Bild 1.2.44** Spulen- bzw. Sehnungsfaktor für  $\nu = \nu'/p \in \mathbb{U}$ 

symmetrischer dreisträngiger Wicklungen gezeigt werden, die aus einem symmetrischen Dreiphasensystem positiver Phasenfolge der Ströme gespeist werden.

Das Görgesdiagramm stellt die Zeiger der Durchflutungen für alle Integrationswege dar, die entsprechend Bild 1.2.45 von einem Hauptelement ausgehend in der Mitte eines Zahns  $z_i$  über den Luftspalt treten und sich über den benachbarten Zahn  $z(i+1)$  wieder schließen, wobei sie die rechts vom Zahn  $z_i$  liegende Nut  $n_i$  umfassen. Für die in der Rechtsschraubenzuordnung zum Umlaufsinn des Integrationswegs positiv gezählte Nutdurchflutung  $\Theta_{ni}$  macht das Durchflutungsgesetz in der Darstellung der komplexen Wechselstromrechnung die Aussage

$$\underline{V}_{\delta z(i+1)} - \underline{V}_{\delta z_i} = \underline{\Theta}_{ni}. \quad (1.2.85)$$

Dabei ist  $V_{\delta z_i}$  der magnetische Spannungsabfall über dem Luftspalt im Bereich des Zahns  $z_i$ . Er bestimmt unter Einführung eines ideellen Luftspalts, der den



Bile

(1.2.86)

Da

$$\sum_{i=1}^{N^*} \underline{\Theta}_{ni} = 0$$

ist,

rein periodisch sein. Das erfordert offensichtlich, dass der gemeinsame Ursprung der Zeiger der Spannungsabfälle  $V_{\delta zi}$  im Mittelpunkt des geschlossenen Polygonzugs der Nutdurchflutungen liegen muss.

Wird z. B. eine dreisträngige Wicklung mit einem symmetrischen Drehstromsystem gespeist, so sind die Durchflutungen der Nuten bezogen auf die Rechtsschraubenanzuordnung zum Integrationsweg gegeneinander bei Einschichtwicklungen um Vielfache von  $60^\circ$  und bei gesehten Zweischichtwicklungen um Vielfache von  $30^\circ$  phasenverschoben. Als Beispiel zeigt Bild 1.2.46a den Zonenplan und Bild 1.2.46b das Görjesdiagramm einer Einschicht-Ganzlochwicklung mit  $m = 3$  Strängen und  $q = 2$  Nuten je Pol und Strang. Der Polygonzug schließt sich nach einer doppelten Polteilung, was bei Ganzlochwicklungen einer Urwicklung entspricht.

Da also das Görjesdiagramm alle Informationen über die räumliche und zeitliche Verteilung des Luftspaltfelds enthält, gibt es auch Auskunft über den Oberwellengehalt der von einer Wicklung erregten Durchflutungsverteilung. Im fiktiven Fall einer räumlich sinusförmig verteilten Wicklung wäre das Görjesdiagramm ein Kreis, und es würde nur eine Hauptwelle der Ordnungszahl  $p$  erzeugt werden. In umgekehrter Richtung argumentiert heißt das: Damit sich als Felderregerkurve bzw. Durchflutungsverteilung eine rein sinusförmige Hauptwelle ergibt, müssen alle Zeiger der magnetischen Spannungen dieselbe Länge haben und sehr eng nebeneinanderliegen, so dass die Kurve entlang ihrer Spitzen einen Kreis beschreibt. Die Abweichung des Görjesdiagramms von der Kreisform und der Abstand der Knotenpunkte des Görjesdiagramms vom Kreis, der der Hauptwelle entspricht, sind also ein Maß für den Oberwellengehalt der Durchflutungsverteilung und damit des Luftspaltfelds.

Das Görjesdiagramm wird so oft durchlaufen, wie sich die Zuordnung der Nutdurchflutungen innerhalb einer Urwicklung entlang des Umfangs der Maschine wiederholt. Die Zahl der Durchläufe ist gleich der Zahl der Urwicklungen. *Klima* hat nachgewiesen, dass bei einem zum Schwerpunkt zentrisch symmetrischen Görjesdiagramm, d. h. bei einem Görjesdiagramm mit zwei senkrecht aufeinander stehenden Symmetrieachsen, in der Durchflutungsverteilung nur Harmonische auftreten, deren Ordnungszahl  $\nu'$  ein ungeradzahliges Vielfaches von  $t$  ist, d. h. dass  $\nu'/t \in \mathbb{U}$  gilt. Bei einem zentrisch unsymmetrischen Polygon entstehen sowohl ungeradzahlige als auch geradzahlige Vielfache.

Das Görjesdiagramm gestattet – allerdings beschränkt auf den Fall gleichmäßiger Nutung, konzentrierter Nutdurchflutungen und eines konstanten Luftspalts – einfach und elegant die Bestimmung der Oberwellenstreuung. Bei  $N$  gleichmäßig über den Umfang verteilten Nuten hat die aus dem Görjesdiagramm ableitbare Durchflutungsverteilung  $N$  Abschnitte mit jeweils konstanter magnetischer Spannung. Durch Summation der gespeicherten magnetischen Energien im Bereich aller Zähne erhält man direkt die gesamte gespeicherte magnetische Energie

$$W_m = \sum_{\nu'} W_{m,\nu'} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \mu_0 \left( \frac{V_{zi}}{\delta_i''} \right)^2 \delta_i'' l \frac{\pi D}{N}. \quad (1.2.87)$$

Damit lässt sich die im Abschnitt 3.7.3, Seite 296, angegebene Schreibweise des Koeffizienten der Oberwellenstreuung auf die Form

$$\sigma_o = \frac{\sum_{v' \neq p} B_{v'}^2}{B_p^2} = \frac{\sum_{v'} W_{m,v'}}{W_{m,p}} - 1 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^2}{V_p^2} - 1 \quad (1.2.88)$$

bringen. Hierbei ist  $\sum_{i=1}^N V_i^2$  das polare Trägheitsmoment der den Zähnen entsprechenden Knotenpunkte des Polygonzugs in Bezug auf eine Achse senkrecht zur Zeichenebene, und  $V_p$  ist das polare Trägheitsmoment des der Hauptwelle entsprechenden Kreises. Der sog. Trägheitsradius des Görgesdiagramms beträgt

$$R_g = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^2}. \quad (1.2.89)$$

Es ist ausreichend, diese Beziehung für eine Uwicklung auszuwerten, d. h. für einen Umlauf um das Görgesdiagramm.

Den Trägheitsradius der Hauptwelle erhält man aus dem Durchflutungsgesetz im Vorgriff auf (2.6.4) und mit  $2mwI = N\Theta_n$  zu

$$\begin{aligned} R_p = V_p = \Theta_p &= \frac{mw\xi_p I}{\pi p} \\ &= \frac{\xi_p}{2\pi p} N\Theta_n, \end{aligned} \quad (1.2.90)$$

und der Koeffizient der Oberwellenstreuung wird damit zu

$$\sigma_o = \frac{R_g^2}{R_p^2} - 1. \quad (1.2.91)$$

Die Ausdrücke für  $R_p$  und  $R_g$  sind einfach auszuwerten und erfordern im Gegensatz zu der in (3.7.35), Seite 297, angegebenen Beziehung keine Summenbildung über eine unendliche Zahl von Summanden.

### 1.2.5 Bewertung der Entwürfe

Der Wicklungsfaktor der Hauptwelle (s. Abschn. 1.2.3) und die Oberwellenstreuung (s. Abschn. 1.2.4) sind die wichtigsten Kriterien zur Bewertung der elektromagnetischen Eigenschaften einer Wicklung. Das soll im Folgenden anhand einiger Beispiele veranschaulicht werden. Um die Unterschiede der verschiedenen Wicklungsvarianten zu verdeutlichen, wird in allen Beispielen von konzentrierten Nutdurchflutungen ausgegangen, d. h. von  $b_s = 0$  und damit  $\xi_{n,v'} = 1$ .

#### a) Einsicht-Ganzlochwicklung

Bild 1.2.46a zeigt den Zonenplan und Bild 1.2.46b das Görgesdiagramm einer Einsicht-Ganzlochwicklung mit  $m = 3$ ,  $q = 2$  und damit  $y_\varnothing = mq = 6$ . Ihr Hauptwellenwicklungsfaktor beträgt nach (1.2.67)

$$\xi_p = \sin \frac{p}{p} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \frac{p}{p} \frac{q}{y_\varnothing} \frac{\pi}{2}}{q \sin \frac{p}{p} \frac{1}{y_\varnothing} \frac{\pi}{2}} = \frac{\sin \frac{2}{6} \frac{\pi}{2}}{2 \sin \frac{1}{6} \frac{\pi}{2}} = 0,9659,$$

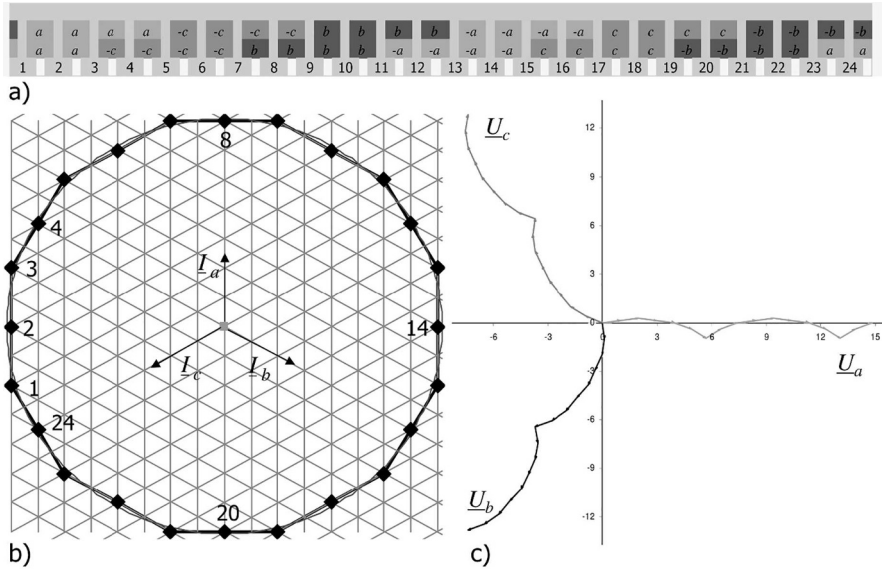


**Bild 1.2.47** Unverschachtelte Zweischicht-Ganzlochwicklung mit  $m = 3$ ,  $q = 4$  und  $y/y_\varnothing = 10/12$ . a) Zonenplan für  $p = 1$ ; b) Görjesdiagramm; c) Strangspannungsstern für eine Urwicklung

und damit gilt

$$R_p = \xi_p \frac{N}{2\pi p} \Theta_n = \xi_p \frac{y_\varnothing}{\pi} \Theta_n = 1,8447 \cdot \Theta_n.$$

Aus Bild 1.2.46b geht hervor, dass 6 Knotenpunkte des Polygonzugs den Abstand  $2\Theta_n$  vom Mittelpunkt des Polygons besitzen und die übrigen 6 Polygonpunkte den Abstand  $\sqrt{2^2 - 1^2}\Theta_n$  aufweisen. Der Trägheitsradius des Görjesdiagramms wird damit zu

$$R_g = \sqrt{\frac{1}{12} [6 \cdot 2^2 + 6 \cdot (2^2 - 1^2)]} \Theta_n^2 = 1,8708 \cdot \Theta_n,$$

und für den Koeffizienten der Oberwellenstreuung ergibt sich

$$\sigma_o = \frac{R_g^2}{R_p^2} - 1 = 2,85\%.$$

Das Görjesdiagramm ist zentrisch symmetrisch, was zeigt, dass nur ungeradzahlige Durchflutungsharmonische erzeugt werden.

Eine zusätzliche grafische Information bietet der Spannungsstern im Bild 1.2.46c, der die Addition der Nutenseitenspannungszeiger der Hauptwelle des Luftspaltfelds zu den resultierenden Strangspannungszeigern der  $m = 3$  Stränge darstellt. Je weniger der Linienzug von einer Geraden abweicht, desto höher ist der Hauptwellenwicklungsfaktor  $\xi_p$ .

#### b) Unverschachtelte Zweischicht-Ganzlochwicklung ohne Zonenänderung

Bild 1.2.47a zeigt den Zonenplan und Bild 1.2.47b das Görjesdiagramm einer um  $10/12$  gesehten Zweischicht-Ganzlochwicklung mit  $m = 3$ ,  $q = 4$  und damit  $y_\varnothing = mq = 12$ . Ihr Hauptwellenwicklungsfaktor ist nach (1.2.68)

$$\xi_p = \sin \frac{p}{p} \frac{y}{y_\varnothing} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \frac{p}{p} \frac{q}{y_\varnothing} \frac{\pi}{2}}{q \sin \frac{p}{p} \frac{1}{y_\varnothing} \frac{\pi}{2}} = \sin \frac{10}{12} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \frac{4}{12} \frac{\pi}{2}}{4 \sin \frac{1}{12} \frac{\pi}{2}} = 0,9250$$

und damit spürbar geringer als jener der im Unterabschnitt a betrachteten Einschichtwicklung. Das Görgesdiagramm zeigt andererseits aber eine wesentlich bessere Annäherung an den Hauptwellenkreis. Als Trägheitsradius der Hauptwelle ergibt sich

$$R_p = \xi_p \frac{N}{2\pi p} \Theta_n = \xi_p \frac{y_\varnothing}{\pi} \Theta_n = 3,5334 \cdot \Theta_n,$$

wobei mit  $\Theta_n = 2\Theta_{sp}$  aufgrund der zwei Spulenseiten je Nut bei Zweischichtwicklungen das Doppelte der Durchflutung einer Spulenseite bezeichnet wird. Der Trägheitsradius des Görgesdiagramms lässt sich mit Hilfe des Kosinus-Satzes zu

$$R_g = \sqrt{\frac{1}{24} [6 \cdot 3,5^2 + 6 \cdot (4^2 - 2^2) + 12 \cdot (3^2 + 1^2 - 2 \cdot 3 \cdot 1 \cdot \cos 120^\circ)]} \Theta_n^2$$

$$= 3,5444 \cdot \Theta_n$$

bestimmen, und damit folgt für den Koeffizienten der Oberwellenstreuung

$$\sigma_o = \frac{R_g^2}{R_p^2} - 1 = 0,62 \, \%.$$

Das Görgesdiagramm ist zentrisch symmetrisch, was zeigt, dass nur ungeradzahlige Durchflutungsharmonische erzeugt werden.

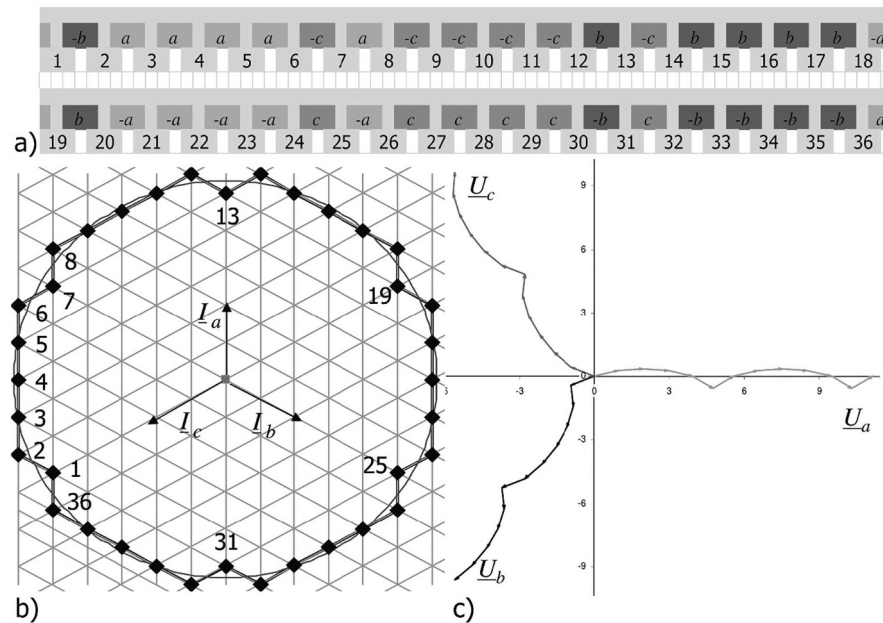


**Bild 1.2.48** Strangverschachtelte Einschicht-Ganzlochwicklung mit  $m = 3$  und  $q = 6$ . a) Zonenplan für  $p = 1$ ; b) Görgesdiagramm; c) Strangspannungsstern für eine Urwicklung

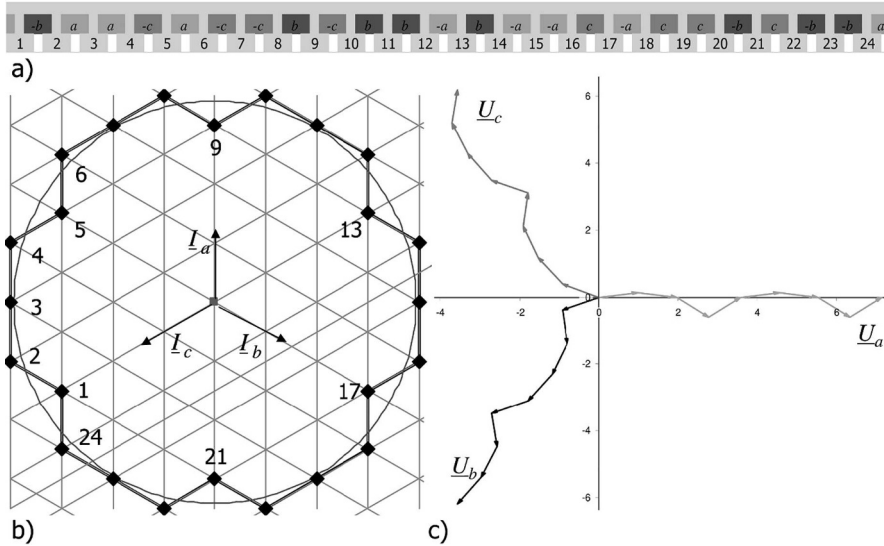


**Bild 1.2.49** Strangverschachtelte Einschicht-Ganzlochwicklung mit  $m = 3$  und  $q = 4$ .  
a) Zonenplan für  $p = 1$ ; b) Görgesdiagramm; c) Strangspannungsstern für eine Urwicklung

Die deutliche Verkleinerung des Koeffizienten der Oberwellenstreuung dieser Wicklung auf weniger als ein Viertel des Werts der im Unterabschnitt a betrachteten Einschichtwicklung ist auf die Wirkung der Sehnung und der vergrößerten Lochzahl zurückzuführen. Gerade die hier gewählte optimale  $5/6$ -Sehnung verringert die Oberwellenstreuung spürbar, da in diesem Fall die Oberwellen mit den Feldwellenparametern  $\tilde{\nu}' = -5p$  und  $\tilde{\nu}' = 7p$  gleichermaßen reduziert werden. Der Preis dafür ist allerdings immer eine Reduktion des Hauptwellenwicklungsfaktors, wie auch Bild 1.2.47c zeigt.

#### c) Strangverschachtelte Einschicht-Ganzlochwicklung mit $q = 6$

Bild 1.2.48a zeigt den Zonenplan und Bild 1.2.48b das Görgesdiagramm einer einfach strangverschachtelten Einschicht-Ganzlochwicklung mit  $m = 3$ ,  $q = 6$  und damit  $y_\emptyset = mq = 18$ . Ihr Hauptwellenwicklungsfaktor beträgt nach (1.2.76)

$$\xi_p = \sin \frac{p \pi}{p \frac{2}{2} q \frac{2}{2} \sin \frac{p \frac{q}{2} \pi}{p y_\emptyset \frac{2}{2}}} \cos \frac{p \frac{3}{2} \pi}{p y_\emptyset \frac{2}{2}} = \frac{\sin \frac{6 \pi}{18 \frac{2}{2}}}{\frac{6}{2} \sin \frac{2 \pi}{18 \frac{2}{2}}} \cos \frac{3 \pi}{18 \frac{2}{2}} = 0,9271.$$

Das Görgesdiagramm zeigt, dass durch die Strangverschachtelung die äußeren Punkte des Grund-Sechsecks – wie es z. B. im Bild 1.2.46 auftritt – nach innen eingezogen sind und damit näher am Hauptwellenkreis liegen, als dies ohne Strangverschachtelung der Fall wäre. Die Auswertung des Görgesdiagramms führt auf einen Koeffizienten der Oberwellenstreuung von  $\sigma_o = 0,42 \%$ , der – bei praktisch gleichem Hauptwellenwicklungsfaktor – noch geringer ist als bei der im Unterabschnitt b betrachteten gesehten Zweischicht-Ganzlochwicklung.



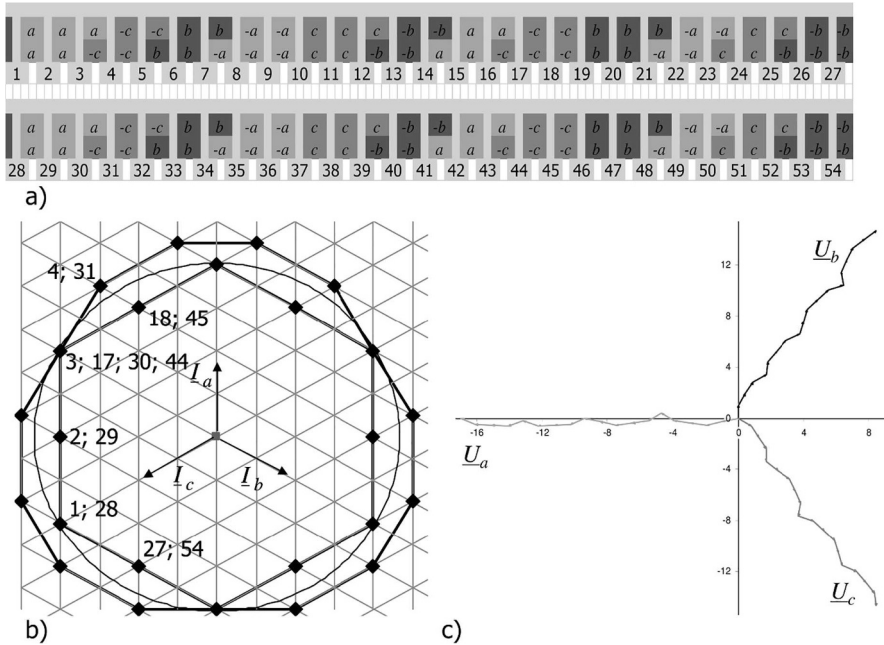


**Bild 1.2.51** Zweischiicht-Bruchlochwicklung mit  $m = 3$ ,  $p = 4$ ,  $N = 54$ ,  $q = 2^{1/4}$  und  $y/y_\varnothing = 6/6,75$ . a) Zonenplan; b) Görgesdiagramm; c) Strangspannungsstern

$$\xi_p = \sin \frac{p}{p} \frac{y}{y_\varnothing} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \frac{p}{p} \frac{q}{y_\varnothing} \frac{\pi}{2}}{nq \sin \frac{p}{p} \frac{1}{ny_\varnothing} \frac{\pi}{2}} = \sin \frac{6}{7,5} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \frac{2,5}{7,5} \frac{\pi}{2}}{2 \cdot 2,5 \sin \frac{1}{2 \cdot 7,5} \frac{\pi}{2}} = 0,910.$$

Die Auswertung des Görgesdiagramms führt auf einen Koeffizienten der Oberwellenstreuung von  $\sigma_o = 1,73\%$ . Das Diagramm ist zentrisch unsymmetrisch – ein Kennzeichen dafür, dass das bei symmetrischer Speisung erzeugte Oberwellenspektrum mit den Feldwellenparametern nach (1.2.36)

$$\tilde{v}' = p \left( 1 + \frac{2m}{n} g \right) = p, -2p, 4p, -5p, 7p, -8p, 10p, -11p, 13p, \dots$$

doppelt so dicht besetzt ist wie bei einer Ganzlochwicklung, weil es auch geradzahlige Harmonische enthält. Entsprechend  $t = 2p/n = 2$  besteht die Wicklung aus 2 Urwicklungen, von denen jede  $p^* = p/t = 1$  Polpaar umfasst, so dass sich das Görgesdiagramm bereits nach einem Umlauf schließt und insgesamt zweimal durchlaufen wird.

#### f) Zweischiicht-Bruchlochwicklung (Viertellochwicklung mit $q = 2^{1/4}$ )

Bild 1.2.51a zeigt den Zonenplan und Bild 1.2.51b das Görgesdiagramm einer Zweischiicht-Bruchlochwicklung zweiter Art mit den Kenndaten  $m = 3$ ,  $p = 4$ ,  $N = 54$ ,  $q = 2^{1/4}$  und  $y/y_\varnothing = 6/6,75$ . Ihr Hauptwellenwicklungsfaktor beträgt nach (1.2.80) oder (1.2.83)

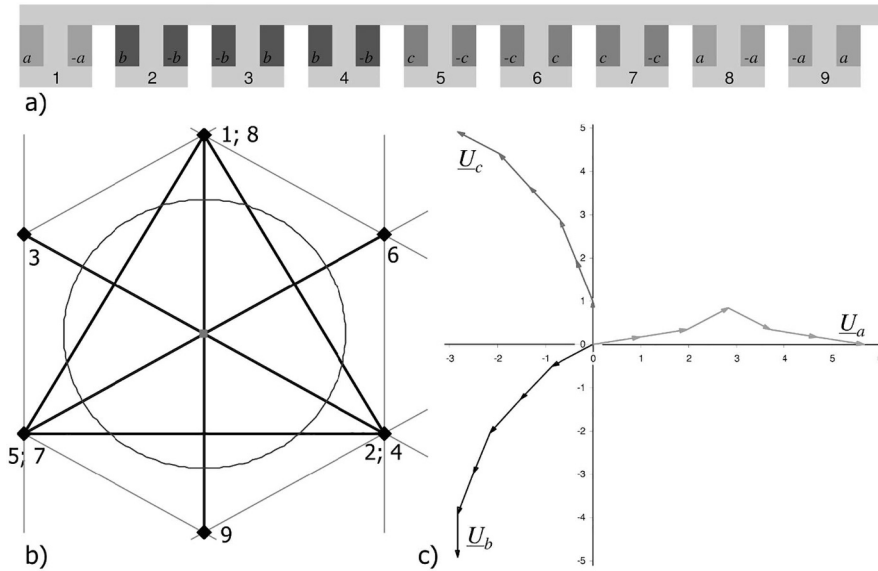


**Bild 1.2.52** Zweischicht-Zahnspulenwicklung mit  $m = 3$ ,  $p = 4$ ,  $N = 9$  und  $q = 3/8$ .  
a) Zonenplan; b) Görgesdiagramm; c) Strangspannungsstern

$$\xi_p = \sin \frac{p}{p} \frac{y}{y_\varnothing} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \frac{p}{p} \frac{q}{y_\varnothing} \frac{\pi}{2}}{nq \sin \frac{p}{p} \frac{1}{ny_\varnothing} \frac{\pi}{2}} = \sin \frac{6}{6,75} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \frac{2,25}{6,75} \frac{\pi}{2}}{4 \cdot 2,25 \sin \frac{1}{4 \cdot 6,75} \frac{\pi}{2}} = 0,941.$$

Die Auswertung des Görgesdiagramms führt auf einen Koeffizienten der Oberwellenstreuung von  $\sigma_o = 3,30\%$ . Das Diagramm ist zentrisch unsymmetrisch. Entsprechend  $t = 2p/n = 2$  besteht die Wicklung aus 2 Urwicklungen, von denen jede  $p^* = p/t = 2$  Polpaare umfasst. Damit sich das Görgesdiagramm schließt, sind also zwei Umläufe nötig. Das gesamte Görgesdiagramm wird entsprechend der Zahl der Urwicklungen zweimal durchlaufen. Das von der Wicklung bei symmetrischer Speisung erzeugte Oberwellenspektrum enthält Durchflutungswellen mit den Feldwellenparametern nach (1.2.36)

$$\tilde{\nu}' = p \left( 1 + \frac{2m}{n} g \right) = p, -\frac{1}{2}p, \frac{5}{2}p, -2p, 4p, -\frac{7}{2}p, \frac{11}{2}p, -5p, 7p, \dots$$

und ist damit entsprechend  $n = 4$  viermal so dicht besetzt wie bei einer Ganzlochwicklung.

**g) Zweischicht-Zahnspulenwicklung mit  $q = 3/8$**

Bild 1.2.52a zeigt den Zonenplan und Bild 1.2.52b das Görgesdiagramm einer Zweischicht-Zahnspulenwicklung mit den Kenndaten  $m = 3$ ,  $p = 4$  und  $N = 9$ . Die Wicklung entspricht damit einer symmetrischen Zweischicht-Bruchlochwicklung zweiter Art mit  $q = 3/8$  und  $y/y_\varnothing = 1/1,125$ . Ihr Hauptwellenwicklungsfaktor beträgt nach (1.2.80) oder (1.2.83)

$$\xi_p = \sin \frac{p}{p} \frac{y}{y_\varnothing} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \frac{p}{p} \frac{q}{y_\varnothing} \frac{\pi}{2}}{nq \sin \frac{p}{p} \frac{1}{ny_\varnothing} \frac{\pi}{2}} = \sin \frac{1}{1,125} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \frac{0,375}{1,125} \frac{\pi}{2}}{8 \cdot 0,375 \sin \frac{1}{8 \cdot 1,125} \frac{\pi}{2}} = 0,9452.$$

Im Görgesdiagramm ist keinerlei Kreisform mehr zu erkennen. Es ist andererseits relativ einfach auszuwerten. Als Trägheitsradius der Hauptwelle ergibt sich

$$R_p = \xi_p \frac{N}{2\pi p} \Theta_n = \xi_p \frac{y_\varnothing}{\pi} \Theta_n = 0,33848 \cdot \Theta_n,$$

wobei  $\Theta_n = 2\Theta_{sp}$  aufgrund der zwei in einer Nut nebeneinanderliegenden Spulenseiten auch das Doppelte der Durchflutung einer Spulenseite ist. Der Trägheitsradius des Görgesdiagramms ist

$$R_g = 0,5 \cdot \Theta_n,$$

da alle den Zähnen entsprechenden Punkte des Görgesdiagramms diesen Abstand vom Mittelpunkt haben. Für den Koeffizienten der Oberwellenstreuung ergibt sich damit

$$\sigma_o = \frac{R_g^2}{R_p^2} - 1 = 118,21 \, \%.$$

Die Wicklung besitzt trotz der geringen Nutzahl zwar einen hohen Hauptwellenwicklungsfaktor, jedoch eine extrem hohe Oberwellenstreuung.

Entsprechend  $t = 2p/n = 1$  besteht die Wicklung aus nur einer Urwicklung. Damit sich das Görgesdiagramm schließt, sind also  $p^* = p/t = 4$  Umläufe nötig, von denen allerdings drei zu Linien entartet sind (z. B. vom Knotenpunkt des Zahns 2 zum Knotenpunkt des Zahns 3 und zurück zum Knotenpunkt des Zahns 4, der an derselben Stelle liegt wie der Knotenpunkt des Zahns 2). Das von der Wicklung bei symmetrischer Speisung erzeugte Oberwellenspektrum besitzt die Feldwellenparameter

$$\tilde{\nu}' = p \left( 1 + \frac{2m}{n} g \right) = 4 + 3g = 4, 1, 7, -2, 10, -5, 13, -8, 16, \dots$$

und damit alle nicht durch  $m = 3$  teilbaren Werte. Es ist entsprechend  $n = 8$  achtmal so dicht besetzt wie das einer Ganzlochwicklung.

#### **h) Zweischicht-Zahnspulenwicklung mit $q = 1/2$**

Bild 1.2.53a zeigt den Zonenplan und Bild 1.2.53b das Görgesdiagramm einer Zweischicht-Zahnspulenwicklung mit den Kenndaten  $m = 3$ ,  $p = 4$  und  $N = 12$ . Die Wicklung entspricht damit einer symmetrischen Zweischicht-Bruchlochwicklung zweiter Art mit  $q = 1/2$  und  $y/y_\varnothing = 1/1,5$ . Ihr Hauptwellenwicklungsfaktor beträgt nach (1.2.80) oder (1.2.83)

$$\xi_p = \sin \frac{p}{p} \frac{y}{y_\varnothing} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \frac{p}{p} \frac{q}{y_\varnothing} \frac{\pi}{2}}{nq \sin \frac{p}{p} \frac{1}{ny_\varnothing} \frac{\pi}{2}} = \sin \frac{1}{1,5} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \frac{0,5}{1,5} \frac{\pi}{2}}{2 \cdot 0,5 \sin \frac{1}{2 \cdot 1,5} \frac{\pi}{2}} = 0,8660.$$

Das Görgesdiagramm ist ein gleichseitiges Dreieck, welches  $t = 2p/n = 4$  mal durchlaufen wird und sich schon nach  $p^* = p/t = 1$  Umlauf schließt. Der Trägheitsradius der Hauptwelle ist

$$R_p = \xi_p \frac{N}{2\pi p} \Theta_n = \xi_p \frac{y_\varnothing}{\pi} \Theta_n = 0,4135 \cdot \Theta_n,$$

wobei  $\Theta_n = 2\Theta_{sp}$  wiederum das Doppelte der Durchflutung einer Spulenseite ist. Als Trägheitsradius des Görgesdiagramms liest man wie im letzten Beispiel nach

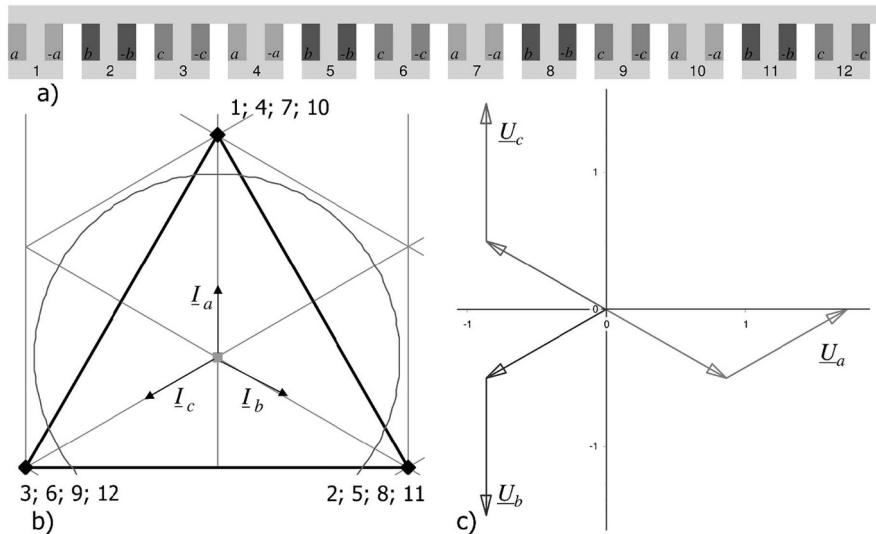


**Bild 1.2.53** Zweisicht-Zahnspulenwicklung mit  $m = 3$ ,  $p = 4$ ,  $N = 12$  und  $q = 1/2$ .  
a) Zonenplan; b) Görgesdiagramm; c) Strangspannungsstern für eine Urwicklung

Unterabschnitt g

$$R_g = 0,5 \cdot \Theta_n$$

ab. Der Koeffizient der Oberwellenstreuung errechnet sich damit zu

$$\sigma_o = \frac{R_g^2}{R_p^2} - 1 = 46,22 \%$$

Die Oberwellenstreuung ist also im Vergleich zur Zahnspulenwicklung im Beispiel nach Unterabschnitt g weniger als halb so groß, aber natürlich immer noch ein Vielfaches der Oberwellenstreuung von Ganzlochwicklungen, was jedoch durch einen spürbar kleineren Hauptwellenwicklungsfaktor erkauft wird. Das von der Wicklung bei symmetrischer Speisung erzeugte Oberwellenspektrum enthält wie bei jeder Halblochwicklung Feldwellen mit den Parametern

$$\tilde{\nu}' = p \left( 1 + \frac{2m}{n} g \right) = p, -2p, 4p, -5p, 7p, -8p, 10p, -11p, 13p, \dots$$

und ist damit weniger dicht besetzt als im Beispiel nach Unterabschnitt g. Wie sich leicht überprüfen lässt, haben jedoch alle Harmonischen denselben Wicklungsfaktor  $\xi_{\nu'} = 0,8660$  wie die Hauptwelle.

#### i) Dahlanderwicklung

Bild 1.2.54a zeigt den Zonenplan für die niedrige Polpaarzahl der Dahlanderwicklung mit den Kenndaten  $m = 3$ ,  $p_1 = 2$ ,  $p_2 = 4$ ,  $N = 48$  und  $y = 6$ . Die Bilder 1.2.54b und c zeigen die Görgesdiagramme der Wicklung für die beiden Polpaarzahlen. Wie bei Dahlanderwicklungen üblich, liegt in der niedrigen Polpaarzahl  $p_1 = 2$  eine normale, jedoch mit  $y/y_{\emptyset 1} = 6/12$  stark gesehnte Zweisicht-Ganzlochwicklung

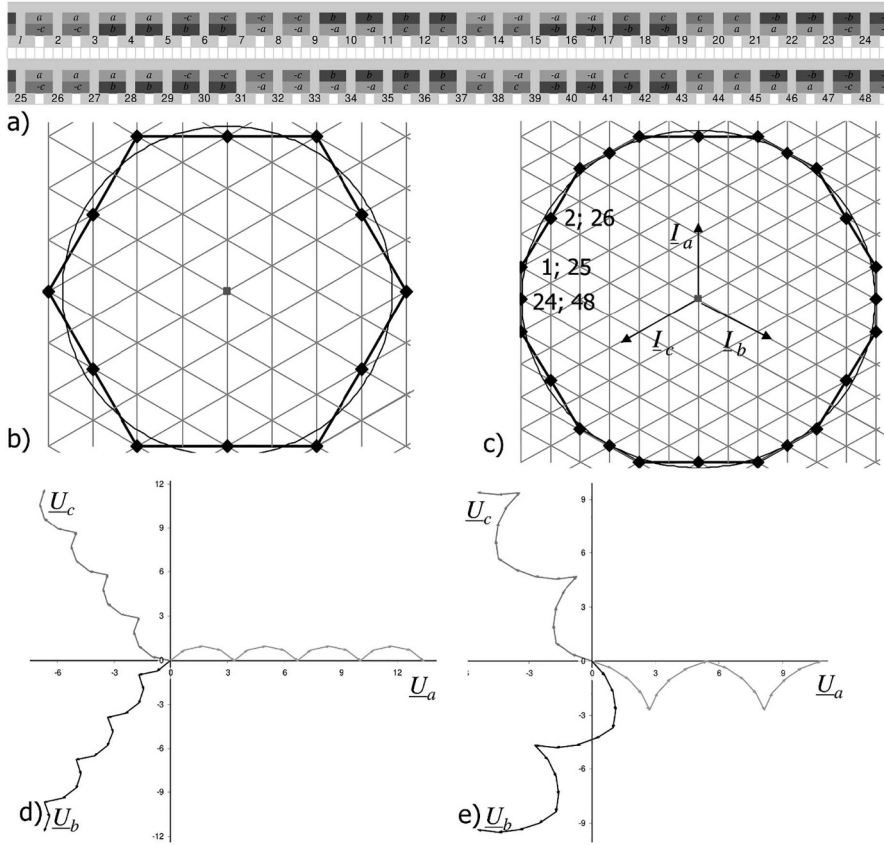


**Bild 1.2.54** Dahlanderwicklung mit  $m = 3$ ,  $p_1 = 2$ ,  $p_2 = 4$ ,  $N = 48$  und  $y = 6$ . a) Zonenplan für  $p_1 = 2$ ; b) Gorgesdiagramm für  $p_2 = 4$ ; c) Gorgesdiagramm für  $p_1 = 2$ ; d) Strangspannungsstern für  $p_2 = 4$ ; e) Strangspannungsstern für  $p_1 = 2$

mit  $q = 4$  vor und in der hohen Polpaarzahl  $p_1 = 4$  eine ungesehnte Zweischicht-Ganzlochwicklung mit doppelter Zonenbreite mit  $q = 2$  und  $y/y_{\varnothing 2} = 6/6$ . Ihr Hauptwellenwicklungsfaktor beträgt in der niedrigen Polpaarzahl nach (1.2.68)

$$\xi_{p1} = \sin \frac{p}{p} \frac{y}{y_{\varnothing}} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \frac{p}{p} \frac{q}{y_{\varnothing}} \frac{\pi}{2}}{q \sin \frac{p}{p} \frac{1}{y_{\varnothing}} \frac{\pi}{2}} = \sin \frac{6}{12} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \frac{4}{12} \frac{\pi}{2}}{4 \sin \frac{1}{12} \frac{\pi}{2}} = 0,6772$$

und in der hohen Polzahl nach (1.2.75)

$$\xi_{p2} = \sin \frac{p}{p} \frac{y}{y_{\varnothing}} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \frac{p}{p} \frac{2q}{y_{\varnothing}} \frac{\pi}{2}}{2q \sin \frac{p}{p} \frac{1}{y_{\varnothing}} \frac{\pi}{2}} = \sin \frac{6}{6} \frac{\pi}{2} \frac{\sin \frac{2 \cdot 2}{6} \frac{\pi}{2}}{2 \cdot 2 \sin \frac{1}{6} \frac{\pi}{2}} = 0,8365.$$

Der schlechte Hauptwellenwicklungsfaktor insbesondere in der niedrigen Polpaarzahl ist auch an dem sehr bauchigen Zeigerzug im Bild 1.2.54e erkennbar.

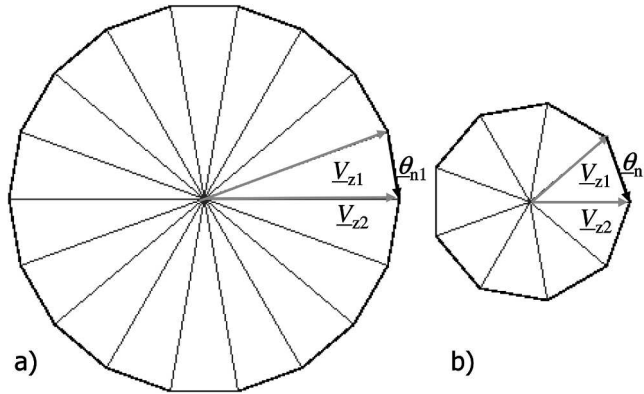


**Bild 1.2.55** Käfigwicklung mit  $N = 18$ . a) Görge-Diagramm für Erregung mit  $p = 1$ ; b) Görge-Diagramm für Erregung mit  $p = 2$

Beide Görge-Diagramme sind zentralsymmetrisch, was zeigt, dass in den Durchflutungsverteilungen nur Drehwellen entstehen, deren Ordnungszahl ein ungeradzahliges Vielfaches der jeweiligen Polpaarzahl ist. Die Auswertung der Görge-Diagramme führt für die niedrige Polpaarzahl auf den geringen Streukoeffizienten  $\sigma_o = 0,89\%$  und für die hohe Polpaarzahl auf  $\sigma_o = 2,84\%$ . Insbesondere das Beispiel der niedrigen Polpaarzahl zeigt, dass nicht nur – wie im Unterabschnitt h – Wicklungen mit gutem Hauptwellenwicklungsfaktor, aber hoher Oberwellenstreuung möglich sind, sondern umgekehrt auch Wicklungen mit einer geringen Oberwellenstreuung, aber einem niedrigen Hauptwellenwicklungsfaktor. Diese beiden Beurteilungskriterien sind durch den Wicklungsentwurf praktisch unabhängig voneinander einstellbar.

#### j) Käfigwicklung

Bild 1.2.55a zeigt das Görge-Diagramm einer Käfigwicklung mit  $N = 18$  Stäben, die von einem zweipoligen Feld erregt wird und in der sich damit nach (1.4.13), Seite 149, ein symmetrisches,  $N/p = 18$ phasiges Stromsystem ausbildet. Das Görge-Diagramm ist daher ein regelmäßiges Achtzehneck. Ein regelmäßiges  $N/p$ -Eck ist die bestmögliche Annäherung an den Hauptwellenkreis, die sich mit  $N$  Nuten erreichen lässt. Käfigwicklungen sind daher bei gegebener Nutzahl die Wicklungen mit der geringstmöglichen Oberwellenstreuung. Da alle Knotenpunkte des Polygonzugs denselben Abstand vom Mittelpunkt haben, beträgt der Trägheitsradius des Görge-Diagramms

$$R_g = \frac{1}{2 \sin \frac{\pi p}{N}} \Theta_n,$$

und der Koeffizient der Oberwellenstreuung ergibt sich mit  $\xi_p = 1$  nach (1.4.14) und dem Trägheitsradius der Hauptwelle entsprechend

$$R_p = \xi_p \frac{N}{2\pi p} \Theta_n = \frac{N}{2\pi p} \Theta_n$$

zu

$$\sigma_o = \frac{R_g^2}{R_p^2} - 1 = \frac{\left(\frac{\pi p}{N}\right)^2}{\sin^2 \frac{\pi p}{N}} - 1. \quad (1.2.92)$$

Für das Beispiel  $N = 18$ ,  $p = 1$  folgt aus (1.2.92)  $\sigma_o = 1,02\%$ . Wenn dieselbe Käfigwicklung von einem vierpoligen Feld erregt wird, erhält man das Görgesdiagramm nach Bild 1.2.44b, das entsprechend  $N/p = 9$  ein Neuneck darstellt, und der Koeffizient der Oberwellenstreuung vervierfacht sich auf  $\sigma_o = 4,16\%$ . Das verdeutlicht, dass eine geringe Oberwellenstreuung bei Käfigwicklungen – aber auch bei allen anderen Wicklungen – vor allem eine ausreichend große Nutzahl je Pol erfordert.

### 1.2.6 Wicklungsdimensionierung

Ziel der Wicklungsdimensionierung ist die Ermittlung einer geeigneten Wicklung, mit deren Kennwerten die zur Energiewandlung bei gegebener Spannung und Frequenz notwendige Windungszahl realisierbar ist und die bestimmte von der Maschinenart abhängige Randbedingungen erfüllt.

#### 1.2.6.1 Dimensionierungsbeziehungen

Maßgebend für die Dimensionierung einer Strangwicklung ist die von der Hauptwelle des Luftspaltfelds in der Wicklung zu induzierende Spannung. Sie wird durch den Fluss einer Halbwelle der Hauptwelle des Luftspaltfelds bestimmt, der gleichzeitig die Amplitude  $\hat{\Phi}_h$  des die Spulen der Stränge durchsetzenden Wechselflusses darstellt. Entsprechend der Aussage des Induktionsgesetzes gilt (s. z. B. Bd. *Grundlagen elektrischer Maschinen*, Abschn. 4.1.3), mit  $E_h = |e_{hstr}|/\sqrt{2}$

$$E_h = \frac{\omega}{\sqrt{2}} (w\xi_p) \hat{\Phi}_h. \quad (1.2.93)$$

Dabei ist  $\omega$  die Kreisfrequenz des die Wicklung durchsetzenden Wechselflusses. Wenn die Wicklung gegenüber dem induzierenden Luftspaltfeld geschrägt ist, muss die rechte Seite von (1.2.93) noch mit dem Schrägungsfaktor der Hauptwelle  $\xi_{schr p}$  nach (1.2.103) multipliziert werden. Die mit dem Hauptwellenwicklungsfaktor  $\xi_p$  multiplizierte Strangwindungszahl  $w$ , d. h. der Ausdruck  $(w\xi_p)$ , wird als *wirksame* oder *effektive Windungszahl* bezeichnet. Sie ist für die Verkettung eines Strangs mit der Hauptwelle des Luftspaltfelds bzw. für den Aufbau seiner Durchflutungshauptwelle maßgebend.

Die induzierte Spannung  $E_h$  wird durch die Klemmenspannung  $U_N$  im Bemessungsbetrieb und die vorgesehene Arbeitsweise der elektrischen Maschine (Motorbetrieb, Generatorbetrieb usw.) bestimmt. Die Kreisfrequenz  $\omega$  liegt mit der Frequenz  $f$  des angeschlossenen Netzes entsprechend  $\omega = 2\pi f$  fest. Der Wicklungsfaktor  $\xi_p$  variiert nur in engen Grenzen, und der Hauptfluss  $\hat{\Phi}_h$  für den Bemessungsbetrieb folgt beim Entwurf der Maschine aus der zugrunde liegenden Geometrie und der gewählten Flussdichteamplitude der Hauptwelle des Luftspaltfelds. Die Beziehung (1.2.93) ist demnach eine Bestimmungsgleichung für die Zahl der im Strang in Reihe geschalteten Windungen, die *Strangwindungszahl* oder sog. *spannungshaltende Windungszahl*  $w$ , bzw. für die Zahl  $z$  der in Reihe geschalteten Leiter des Strangs. Die spannungshaltende Windungszahl kann über

$$w = \frac{z}{2} = \frac{w_a}{am} = \frac{z_a}{2am} = \frac{Nz_n}{2am} \quad (1.2.94)$$

ausgedrückt werden durch die Zahl der Stränge  $m$ , die Zahl der parallelen Zweige je Strang  $a$  und die gesamte Windungszahl aller Stränge der Wicklung  $w_a$  bzw. die gesamte Leiterzahl aller Stränge der Wicklung  $z_a$  nach (1.1.18), Seite 18, sowie die Leiterzahl  $z_n$  je Nut. Wie in den vorangegangenen Abschnitten schon erwähnt worden ist, entstehen parallele Zweige durch Parallelschaltung von Wicklungsteilen. Werden dagegen Leiter großen Querschnitts zwecks günstigerer Herstellungstechnologie oder zur Beeinflussung der Stromverdrängung in jeweils  $a_t$  einzelne Teilleiter unterteilt, so liegen in einer Nut

$$z_t = a_t z_n \quad (1.2.95)$$

Teilleiter.

Setzt man (1.2.2), Seite 20, in (1.2.94) ein, so erhält man als sog. *Entwurfsgleichung* für Strangwicklungen

$$w = \frac{Nz_n}{2am} = pq \frac{z_n}{a}. \quad (1.2.96)$$

Die nach (1.2.93) annähernd bestimmte Strangwindungszahl muss entsprechend (1.2.96) durch geeignete Wahl der Wicklungskennwerte  $q$ ,  $z_n$  und  $a$  bzw.  $N$ ,  $z_n$  und  $a$  realisiert werden. Dabei liegt die Polpaarzahl  $p$  mit den Bemessungsdaten der Maschine entsprechend  $p = f/n_0$  fest.

Die Wahl der Nutzahl  $N$  wird einerseits durch Erfahrungswerte für die Größe der Nutteilung  $\tau_n$  (s. Abschn. 9.1.2.2, S. 544) und andererseits durch Bedingungen für die Festlegung der Lochzahl  $q$  (s. Abschn. 1.2.6.2 u. 1.2.6.3) bestimmt. Um eine Zweischichtwicklung ausführen zu können, muss die Leiterzahl  $z_n$  je Nut geradzahlig sein. Bei Einschichtwicklungen ist auch eine ungerade Leiterzahl je Nut ausführbar. Die Bildung paralleler Zweige ist notwendig, wenn bei relativ großer Nutzahl eine relativ kleine Windungszahl  $w$  realisiert werden muss. Das ist vor allem bei Niederspannungsmaschinen (aufgrund einer kleinen Spannung  $E_h$ ), bei Großmaschinen (aufgrund eines großen Flusses  $\Phi_h$ ) oder bei schnelldrehenden, niederpoligen Maschinen mit hoher Betriebsfrequenz  $f$  und damit Kreisfrequenz  $\omega$  häufig der Fall. Eine Bildung paralleler Zweige darf nur erfolgen, wenn die in ihnen vom Hauptfluss induzierten Spannungen gleich sind. Andernfalls treten unerwünschte Ausgleichsströme auf. Die Spannungsgleichheit von Wicklungsteilen kann man mit Hilfe des Nutenspannungssterns überprüfen. Danach sind Urwicklungen, eine gleiche Streureaktanz aller Urwicklungen vorausgesetzt, ohne Einschränkung parallelschaltbar, da sie den gleichen Nutenspannungsstern besitzen. Urwicklungen von Einschicht-Ganzlochwicklungen umfassen nur eine Spulengruppe je Strang. Man kann also bereits Spulengruppen parallelschalten. Das gilt nicht bei Zonenänderung, da sich dann die Nutzahl der Urwicklung verdoppelt. Wie aus den Nutenspannungssternen der Bilder 1.2.14, Seite 43, und 1.2.19, Seite 49, zu ersehen ist, entsteht in den negativen Spulengruppen einer normalen Zweischichturwicklung erster Art die gleiche Spannung wie in den positiven Spulengruppen, nur mit umgekehrtem Vorzeichen. Damit ergibt sich in diesem Fall die Möglichkeit der Bildung zweier paralleler Zweige sogar innerhalb der Urwicklung. Für die Ganzlochwicklung bedeutet das ebenfalls, dass man bereits Spulengruppen parallelschalten kann.

Natürlich muss die entsprechende Anzahl parallelschaltbarer Zweige vorhanden sein. Jede Ganzlochwicklung besteht z. B. aus  $p$  parallelschaltbaren Urwicklungen. Eine Bildung von  $a$  parallelen Zweigen ist in diesem Fall nur bei  $p/a \in \mathbb{N}$  möglich. Im Fall von Zweischicht-Ganzlochwicklungen lassen sich zudem die beiden Spulengruppen jeder Urwicklung antiparallelschalten, so dass maximal  $a = 2p$  parallele Wicklungszweige geschaltet werden können. Wie bereits im Abschnitt 1.2.2.2, Seite 47, erwähnt, lassen sich Bruchlochwicklungen erster Art mit maximal  $a = 2t$  und Bruchlochwicklungen zweiter Art mit maximal  $a = t$  parallelen Zweigen ausführen. Die Bedingungen der Parallelschaltung von polumschaltbaren Wicklungen sind im Unterabschnitt 1.2.2.3f, Seite 60, behandelt worden. Für Mehrschicht-Steckwicklungen gelten bei ggf. nicht identischen Nutstreuinduktivitäten der einzelnen Zweige weitere Einschränkungen (s. Unterabschn. 1.2.2.1d, S. 44, u. [14]),

### 1.2.6.2 Synchronmaschinen

Für Synchrongeneratoren besteht die Forderung nach einer praktisch sinusförmigen induzierten Spannung im Leerlauf (s. DIN EN IEC 60034-1). Dieser Forderung muss man bereits bei der Wahl der Wicklung Rechnung tragen. Nach Abschnitt 1.2.3.5, Seite 86, lassen sich höhere Harmonische der induzierten Spannung dadurch unterdrücken, dass man Wicklungen wählt, die für diese Harmonischen kleine Wicklungsfaktoren aufweisen, da eine Wicklung nur in dem Maße auf die Harmonischen im Luftspaltfeld reagiert, wie der Wicklungsfaktor angibt.

Nach Band *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschnitt 1.5.5, zeigen die Amplituden der Durchflutungswellen des Ankers mit zunehmender Ordnungszahl abnehmende Tendenz, da ihre Amplituden proportional zu  $\xi_{\nu'}/\nu'$  sind. Dabei treten relative Maxima auf, die durch die stark in Erscheinung tretenden, von der Wicklungsverteilung herrührenden Nutharmonischen verursacht werden, denen sich noch die von der Nutung herrührenden Nutungsharmonischen (s. Bd. *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschn. 1.5.7) überlagern. Die von der Wicklungsverteilung herrührenden Maxima haben ihre Ursache darin, dass sowohl der Spulen- bzw. Sehnungsfaktor als auch der Zonen- bzw. Gruppenfaktor periodische Funktionen sind. Die Ordnungszahlen der Nutharmonischen sind gegeben als

$$\nu'_{\text{NH}} = gN \pm p, \quad (1.2.97)$$

wobei für Ganzlochwicklungen wegen  $q \in \mathbb{N}$

$$\frac{\nu'_{\text{NH}}}{p} = g2mq \pm 1 \in \mathbb{U} \quad (1.2.98)$$

ist. Alle Ordnungszahlen von Nutharmonischen sind auch im Oberwellenspektrum des Polsystems enthalten. Sie machen sich in der induzierten Spannung aufgrund ihres großen Wicklungsfaktors besonders stark bemerkbar. Für Bruchlochwicklungen gilt wegen  $nq = z \in \mathbb{N}$  und folglich

$$\frac{\nu'_{\text{NH}}}{p} = g2m \frac{z}{n} \pm 1 \quad (1.2.99)$$

nur für jede  $n$ . Nutharmonische  $\nu'_{\text{NH}}/p \in \mathbb{U}$ . Daher macht sich nur jede  $n$ . Nutharmonische in der von den Oberwellen des Polsystems induzierten Spannung

bemerkbar. Die anderen haben folglich keinen negativen Einfluss auf die Kurvenform der Spannung.

Der Gruppenfaktor nimmt für die auf  $\nu' = p$  folgenden Ordnungszahlen zunächst stark ab. Diese Abnahme ist nach Tabelle 1.2.8, Seite 91, umso ausgeprägter, je größer der Ausdruck  $nq$  ist. Bei Ganzlochwicklungen ( $n = 1$ ) wird man deshalb bestrebt sein, eine große Lochzahl  $q$  zu wählen. Ist das nicht möglich, so muss man Bruchlochwicklungen ( $n > 1$ ) anwenden. Nach (1.2.68) bzw. den entsprechenden Beziehungen für andere Wicklungsarten können einzelne Harmonische durch geeignete Sehnung der Wicklung ganz zum Verschwinden gebracht werden, indem man den Wicklungsschritt  $y$  so wählt, dass der Spulenfaktor nach

$$\xi_{\text{sp}, \nu'} = \sin \frac{\nu'}{p} \frac{y}{y_{\emptyset}} \frac{\pi}{2}$$

und damit auch der Wicklungsfaktor  $\xi_{\nu'}$  verschwinden. Das ist offenbar für

$$\frac{y}{y_{\emptyset}} = 2g \frac{p}{\nu'} \quad \text{mit} \quad g \in \mathbb{N} \quad (1.2.100)$$

der Fall.

Das Polsystem von Synchrongeneratoren erzeugt nur ungeradzahlige Harmonische  $\nu'/p \in \mathbb{U}$ . Die Harmonischen mit  $\nu'/p = mg$  induzieren wegen

$$\frac{\nu'}{p} \alpha_{\text{str}} = mg \frac{2\pi}{m} = g2\pi$$

in den Strängen der Ankerwicklung gleichphasige Spannungen der Frequenz  $f\nu'/p$ . Bei Sternschaltung der Ankerwicklung treten sie folglich in der verketteten Spannung nicht in Erscheinung. Im Fall einer Dreieck- bzw. Vieleckschaltung treiben diese Harmonischen Kreisströme an. Die durch die Kreisströme hervorgerufenen inneren Spannungsabfälle sind dann in Summe gleich der treibenden induzierten Spannung, so dass in der verketteten Spannung wiederum keine Harmonischen mit  $f\nu'/p = mgf$  in Erscheinung treten. Zur Vermeidung der Kreisströme und der mit ihnen verbundenen Verluste wird die Ankerwicklung von Synchronmaschinen grundsätzlich in Stern geschaltet, sofern nicht auf andere Weise sichergestellt wird, dass ihr Polsystem keine Harmonischen mit  $\nu'/p = mg$  erzeugt.

Im Fall dreisträngiger Vollpol-Synchronmaschinen führt die Forderung, keine Harmonischen mit  $\nu' = 3pg$  zu erzeugen, unter Nutzung von (1.2.59) auf die Bedingung

$$\xi_{3pg} = \sin \frac{3pg}{p} \frac{\pi}{2} \frac{\sin 3pgq \frac{\pi}{N}}{q \sin 3pg \frac{\pi}{N}} = 0.$$

$N$  ist dabei die fiktive Nutzahl, die der Läufer bei gleichmäßiger Nutung hätte. Die Bedingung ist für  $3pgq/N \in \mathbb{Z}$  und damit für

$$q = \frac{2}{3} \frac{N}{2p} \quad (1.2.101)$$

erfüllt. Eine Zone der Erregerwicklung muss also gerade  $\frac{2}{3}$  einer Polteilung umfassen. So werden praktisch alle Vollpol-Synchronmaschinen mit Ausnahme von Massivläufern mit gefrästen Nuten ausgeführt.<sup>2</sup>

Um eine möglichst überschwingungsfreie Kurvenform der Spannung zu erreichen, muss vor allem die Induktionswirkung von Oberwellenfeldern des Polsystems mit niedriger Ordnungszahl und von solchen mit der Ordnungszahl der Nutharmonischen unterdrückt werden. Die Oberwellenfelder des Polsystems mit niedriger Ordnungszahl lassen sich am besten durch Sehnung beeinflussen. Für die völlige Unterdrückung der fünften bzw. siebten Harmonischen müsste nach (1.2.100)

$$\frac{y}{y_{\emptyset}} = \frac{2g}{5} = \frac{4}{5} \quad \text{bzw.} \quad \frac{y}{y_{\emptyset}} = \frac{2g}{7} = \frac{6}{7}$$

gewählt werden (s. Bild 1.2.44, S. 91). Für den Fall der einfachen Sehnung, d. h. wenn keine zusätzliche Zonenänderung oder Strangverschachtelung erfolgt, wählt man vorzugsweise den Zwischenwert

$$\frac{y}{y_{\emptyset}} \approx \frac{5}{6},$$

mit dem man zwar keine der beiden betrachteten Harmonischen gänzlich unterdrücken kann, der aber eine starke Reduktion beider Harmonischen zur Folge hat (s. Bild 1.2.44). Man spricht dann von einer *optimalen Sehnung*. Mit doppelter Sehnung, d. h. mit zusätzlicher Zonenänderung oder Strangverschachtelung, könnte man beide Harmonischen entsprechend (1.2.73a) bzw. (1.2.77) gänzlich unterdrücken.

Eine besondere Schwierigkeit bei der Wahl der Wicklungssehnung liegt darin begründet, dass, wie *Klima* in [13] nachgewiesen hat, die Quadratsumme der Wicklungsfaktoren über eine Periode für Zweischicht-Ganzlochwicklungen ohne Zonenänderung und für Zweischicht-Bruchlochwicklungen im interessierenden Bereich  $\frac{2}{3} < y/y_{\emptyset} < 1$

$$\sum_{\nu' = p-N}^{p+N} \left( \xi_{\text{sp}, \nu'} \xi_{\text{gr}, \nu'} \right)^2 = \frac{1}{4} + \frac{3}{4} \frac{y}{y_{\emptyset}} \quad (1.2.102)$$

ist. Wie sich leicht nachprüfen lässt, ist die Änderung der Quadratsumme mit der Sehnung praktisch vollständig auf den sich ändernden Wicklungsfaktor des Hauptfelds zurückzuführen. Die Quadratsumme der Wicklungsfaktoren aller übrigen Wicklungsharmonischen ist somit praktisch unabhängig vom gewählten Wicklungsschritt  $y$ . Wenn eine Wicklungsharmonische durch eine entsprechende Sehnung unterdrückt wird, treten folglich andere Harmonische umso stärker hervor. Die besondere Bedeutung der Bruchlochwicklungen für Synchrongeneratoren liegt deshalb zum einen darin begründet, dass bei ihnen das Spektrum der Wicklungsharmonischen auch geradzahlige Oberwellen und Subharmonische umfasst, die im Spektrum der vom Polsystem erzeugten Drehwellen nicht auftreten. Wenn die Wicklungsfaktoren der ungeradzahigen Harmonischen zu Lasten

<sup>2</sup> Wie bereits im Unterabschnitt 1.2.2.3c, Seite 56, erwähnt, wird aus demselben Grund des für  $\nu' = 3pg$  verschwindenden Wicklungsfaktors die Ankerwicklung von Einphasen-Synchronmaschinen meist mit einer Zonenbreite ausgeführt, die  $\frac{2}{3}$  einer Polteilung umfasst.

der geradzahligen Harmonischen und der Subharmonischen abgesenkt werden, sinkt der Oberschwingungsgehalt der Leerlaufspannung. Zum anderen wirken Bruchlochwicklungen nach (1.2.83) in Bezug auf ungeradzahlige Harmonische wie Ganzlochwicklungen mit der wesentlich höheren Lochzahl  $nq$ . Wie Tabelle 1.2.8, Seite 91, zeigt, führt dies zu einer deutlichen Absenkung des Gruppen- bzw. Zonenfaktors für  $\nu' \geq 11p$ .

Die im Spektrum der Durchflutungsharmonischen von Bruchlochwicklungen gegenüber Ganzlochwicklungen hinzutretenden geradzahligen Harmonischen und Subharmonischen können bei Synchronmaschinen im Gegensatz zu Induktionsmaschinen toleriert werden, da ihre Amplitude und damit die durch sie verursachten parasitären Effekte aufgrund des i. Allg. größeren Luftspalts von Synchronmaschinen in akzeptablen Grenzen bleiben. In besonderem Maße gilt diese Aussage für permanenterregte Synchronmaschinen mit Oberflächenmagneten, da die Magnete wegen  $\mu_r \approx 1$  für die Wicklungsharmonischen der Ankerwicklung wie ein stark vergrößerter Luftspalt wirken. Dies ist einer der Gründe, warum bei diesen Maschinen Zahnspulenwicklungen mit  $q < 1$  eingesetzt werden können, die ein besonders dicht besetztes Spektrum von Wicklungsharmonischen aufweisen.

Der Wicklungsfaktor der Nutharmonischen ist gleich dem der Hauptwelle (s. Bd. *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschn. 1.5.5). Die Nutharmonischen lassen sich deshalb weder in der Durchflutungsverteilung noch in der induzierten Spannung einer Wicklung unterdrücken. Durch Wahl eines großen Werts von  $N/t$  kann man lediglich erreichen, dass die Ordnungszahlen der Nutharmonischen nach (1.2.99)

$$\frac{\nu'_{\text{NH}}}{p} = g \frac{N}{p} \pm 1 = g 2m \frac{z}{n} \pm 1$$

erst für möglichst große Werte und somit mit hinreichend kleinen Amplituden ungeradzahlig werden und damit im Spektrum des Polsystem auftreten. Große Werte von  $N/t$  erhält man mit großen Werten von  $N/p$  und durch Anwendung von Bruchlochwicklungen, da für diese – mit Ausnahme von  $n = 2$  bei Urwicklungen zweiter Art –  $p > t$  gilt. Lediglich hinsichtlich der Wirkung des Polsystems auf den Anker kann man die Nutharmonischen durch Schrägung der Ständer- oder der Läufernten bzw. der Pole unterdrücken. Der Schrägungsfaktor genügt entsprechend Band *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschnitt 1.6.6, der Beziehung

$$\xi_{\text{schr}, \nu'} = \frac{\sin \frac{\nu' \varepsilon'}{2}}{\frac{\nu' \varepsilon'}{2}}, \quad (1.2.103)$$

wobei  $\varepsilon'$  den Nutschrägungswinkel bezeichnet. Der Schrägungsfaktor kann mit

$$\nu' \varepsilon' = 2g\pi \quad (1.2.104)$$

zu Null gemacht werden. Schrägt man um eine Ankernutteilung, so gilt

$$\begin{aligned} \varepsilon' &= \frac{\tau_n \pi}{\tau_p p} = \frac{2\pi}{N} \\ \nu' \varepsilon' &= 2 \frac{\nu'}{N} \pi. \end{aligned}$$

Damit ist (1.2.104) für die Nutharmonischen  $\nu'_{\text{NH}} = gN \pm p$  annähernd erfüllt.

Wegen der günstigen Sehnungsmöglichkeit werden für Synchronmaschinen vorwiegend Zweischichtwicklungen verwendet, die gegenüber Einschichtwicklungen noch den Vorteil der größeren Entwurfsvielfalt und des günstigeren Aufbaus aus Formspulen aufzuweisen haben. Da die Ankerwicklungen von großen Schenkelpol-Synchronmaschinen nicht selten weit über hundert Spulen haben, tritt der zuletzt genannte Vorteil stark in Erscheinung. Zum Einbringen der Formspulen sind offene Nuten notwendig. Da Synchronmaschinen relativ große Luftspalte aufweisen, bleiben die nachteiligen Folgen dieser Maßnahme wie zusätzliche Verluste in erträglichen Grenzen. Für Schenkelpol-Synchronmaschinen ergibt (1.2.2), Seite 20, wegen der oft sehr großen Polpaarzahlen kleine Werte von  $q$ . Um genügend kleine Werte für die Gruppen- bzw. Zonenfaktoren der höheren Harmonischen zu erhalten, muss man dann, wie bereits erwähnt, Bruchlochwicklungen vorsehen.

Für Turbogeneratoren ist häufig  $q > 6$ . In diesem Fall sind die Gruppen- bzw. Zonenfaktoren der höheren Harmonischen bereits bei Ganzlochwicklungen genügend klein, so dass es ausreichend ist, sie durch Sehnung beeinflussen zu können. Die Wicklungsköpfe werden meist so gestaltet, dass Korbwicklungen (s. Bild 1.1.4b, S. 6) entstehen, die sich gegen Beanspruchung durch Kurzschlusskräfte gut abstützen lassen. Bei hochpoligen Maschinen wählt man häufiger die Zylindermantelform (s. Bild 1.1.10a, S. 10) mit ihrer einfacheren Spulenform, bei niederpoligen die Kegelmantelform der Wicklungsköpfe (s. Bild 1.1.10b) wegen der günstigeren Abstützungsmöglichkeit der relativ weiten Spulen. Stabwicklungen werden bei hochpoligen Maschinen vorzugsweise als Wellenwicklungen ausgeführt, da sie weniger Schaltverbindungen aufweisen, bei zwei- und vierpoligen Maschinen jedoch auch als Schleifenwicklungen. Die Wicklungen von Turbogeneratoren werden manchmal auch als Stirnwicklungen (s. Bild 1.1.10c) gestaltet. Die Wicklungsköpfe dieser Wicklungen lassen sich gut abstützen. Ihr Streufeld ist allerdings größer als das der Korbwicklungen.

Mehrschicht-Steckwicklungen wendet man hauptsächlich bei in großer Stückzahl automatisiert hergestellten Antriebsmotoren für Straßenfahrzeuge an, da sich durch die Rechteck-Profileiter im Vergleich zu Runddrahtwicklungen ein höherer Nutfüllfaktor und eine bessere Wärmeabfuhr realisieren lassen. In der Regel werden sie als Ganzloch-Wellenwicklungen mit  $2 \leq q \leq 4$  und geradzahlgiger Anzahl von Wicklungsschichten ausgeführt. Da eine Nutschrägung des Ankers meist nicht möglich ist, wird bei Bedarf der Rotor gestaffelt (bei permanenterregten Synchronmaschinen) oder geschrägt (bei elektrisch erregten Synchronmaschinen oder Induktionsmaschinen).

Einschichtwicklungen wendet man hauptsächlich bei kleineren Maschinen und bei Einphasenmaschinen an. Bei größeren Maschinen werden auch die Einschichtspulen als Formspulen ausgebildet und zu Rechteckspulen- (s. Bild 1.1.4a) oder auch Evolventenwicklungen (s. Bild 1.1.7, S. 9) gefügt.

Sechssträngige Wicklungen werden praktisch ausschließlich bei großen Synchronmaschinen eingesetzt, die aus Umrichtern mit Stromzwischenkreis gespeist werden, welche i. Allg. aus zwei dreiphasigen Teilstromrichtern mit um  $30^\circ$  phasenverschobenen Ausgangsgrößen bestehen. Die Wicklungen bezeichnet man daher auch als  $2 \times 3$ -strängige Wicklungen. Sie werden praktisch immer als  $\frac{5}{6}$ -gesehnte Zweischichtwicklungen ausgeführt, da dann in jeder Nut jeweils eine Spulenseite

jeder der beiden dreisträngigen Teilwicklungen liegt. Das ist vorteilhaft, weil es eine Verringerung der durch die Ankerstreuung bedingten Kommutierungsreaktanz bewirkt.

### 1.2.6.3 Induktionsmaschinen

Aufgrund des vergleichsweise kleinen Luftspalts verursachen die von Ständerwicklung und Läuferwicklung erzeugten Durchflutungsoberwellen von Induktionsmaschinen eine Reihe unerwünschter Erscheinungen. Zu diesen Erscheinungen zählen vor allem

- zusätzliche Verluste (s. Abschn. 6.5, S. 407),
- Oberwellenmomente, d. h. Drehmomentpendelungen oder Einsattelungen der Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie (s. Bd. *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschn. 2.5.2 u. 2.5.3),
- Radialkraftwellen und als deren Folge Geräusche (s. Abschn. 7.3, S. 442).

Mit einer großen Oberwellenstreuung ergibt sich ferner eine große Gesamtstreuung und damit ein geringes Kippmoment (s. Bd. *Grundlagen elektrischer Maschinen*, Abschn. 5.5.3), d. h. eine geringe Überlastbarkeit. Erste Bedingung für den Wicklungsentwurf ist es deshalb, einen möglichst geringen Oberwellenanteil im Luftspaltfeld zu gewährleisten (s. Abschn. 1.2.5, S. 94, u. 1.2.6.2).

Die dritte Harmonische der Ständerwicklung wird wie bei Synchronmaschinen im Fall der einsträngigen Wicklung durch  $2/3$ -Bewicklung vermieden. Bei dreisträngigen Maschinen führt eine Flussdichteoberwelle der Ordnungszahl  $\nu' = 3p$ , wie sie z. B. durch die Wirkung der Zahnsättigung entsteht, im Fall einer Dreieckschaltung der Ständerwicklung zu Kreisströmen.

Ab etwa 10 kW wendet man gesehnte Zweischichtwicklungen mit – soweit möglich –  $5/6$ -Spulenweite an, d. h. mit einer optimalen Sehnung, so dass Oberwellen mit  $\nu' = 5p$  und  $\nu' = 7p$  genügend unterdrückt werden. Zur Erzielung eines geringen Oberwellenanteils im Luftspaltfeld wird die Lochzahl  $q_1$  des Ständers möglichst größer als 2 und zur Vermeidung geradzahlig und gebrochenzahlig Harmonischer praktisch immer ganzzahlig gewählt. Bruchlochwicklungen mit  $q_1 = g + 1/2$  werden nur gewählt, wenn  $q_1$  sehr klein ist ( $q_1 < 2$ ), wenn man im Fall von Schleifringläufer-Induktionsmaschinen die Kopplung zwischen den beiden Dreiphasenwicklungen über die Wicklungsoberwellen reduzieren will, in dem eine von ihnen als Halblochwicklung ausgeführt wird, oder wenn man den gleichen Blechschnitt für mehrere Drehzahlen verwenden bzw. eine Maschine mit mehreren Drehzahlen betreiben will (Polumschaltung). So ergeben sich z. B. für einen Blechschnitt mit  $N = 36$  Nuten für  $p$  und  $q_1$  die Wertepaare (1 und 6), (2 und 3), (3 und 2) und (4 und 1,5).

Wegen der kleinen Luftspalte vermeidet man bei Niederspannungsmaschinen offene Nuten, da sonst unerwünscht große zusätzliche Verluste die Folge wären (s. Abschn. 6.5, S. 407). Kleine Maschinen führt man deshalb vorwiegend mit Träufel- bzw. Einziehwicklungen in halb geschlossenen Nuten aus. Dabei werden meistens Zweietagenwicklungen gewählt. Für  $p = 2$  und bei großen Polteilungen

ergeben Dreietagenwicklungen mit geteilten Spulengruppen kleinere Wicklungsköpfe mit besseren Abkühlungsverhältnissen.

Wenn bei Träufelwicklungen größerer Drahtdurchmesser als 2,5 mm erforderlich sind, unterteilt man die Leiter in mehrere parallele Teileiter. Bei Einziehwicklungen unterteilt man bereits ab 1 bis 2 mm Drahtdurchmesser. Die Ständerwicklungen von Mittelspannungsmaschinen und z. T. auch von größeren Niederspannungsmaschinen führt man praktisch nur noch als Zweischichtwicklungen aus Formspulen mit einer Sehnung nahe an der optimalen  $5/6$ -Sehnung<sup>3</sup> aus. Die dabei notwendigen offenen Nuten können zu erheblichen zusätzlichen Verlusten und anderen parasitären Effekten führen, falls man nicht magnetische Nutverschlusskeile mit  $\mu_r \approx 5$  anwendet. Durch diese wird außerdem der Cartersche Faktor (s. Abschn. 2.3.2, S. 174) und damit der Magnetisierungsstrom der Maschine verringert.

Zur optimalen Anpassung der Leiterzahl je Nut an die erforderliche Strangwindungszahl nach (1.2.94) sind viele Möglichkeiten von Schaltkombinationen der Wicklungsteile erwünscht. Auch aus diesem Grund ist die Anwendung von Ganzlochwicklungen günstig. Führt man die Grundbemessung der Wicklung in Dreieckschaltung aus, so ist ein Anlassen in Stern-Dreieck-Schaltung (s. Bd. *Grundlagen elektrischer Maschinen*, Abschn. 5.7.1.5) möglich.

Die *Läuferwicklungen* kleiner Induktionsmaschinen mit Schleifringläufer sind meistens Zweietagen- oder auch Zweischicht-Ganzlochwicklungen in halb geschlossenen Nuten. Bei größeren Maschinen ab etwa 100 kW wählt man vorzugsweise Zweischicht-Ganzloch-Stabwicklungen, ebenfalls in halb geschlossenen Nuten. Die Wicklungen von Kurzschlussläufern werden als Einfach-, Doppel- oder Mehrfachkäfig mit verschiedenen Stabformen ausgebildet.

Die Wahl der Läufernutzahl ist entscheidend für die Ordnungszahlen der entstehenden Oberwellen. Günstige Verhältnisse ergeben sich, wenn bei Schleifringläufern die Lochzahl der dreisträngigen Läuferwicklung entsprechend

$$q_2 = \frac{N_2}{6p} = q_1 \pm 1 \quad (1.2.105)$$

um 1 von der der Ständerwicklung abweicht. Auch eine Abweichung um 2 ist noch möglich. Für den Kurzschlussläufer erhält man mit

$$N_2 = 2pmq_1 \pm 4p = N_1 \pm 4p \quad (1.2.106)$$

i. Allg. günstige Werte. Generell sollte  $N_2$  geradzahlig sein, da andernfalls Rüttelkräfte entstehen können, die die Laufruhe der Maschine beeinträchtigen können.

Zur Unterdrückung unerwünschter Folgen von Oberwellen sind im Einzelnen die nachstehenden Nebenbedingungen einzuhalten, die in den Abschnitten 8.1.3 (S. 496), 8.1.4 (S. 503), 7.3.2 (S. 445) und Tabelle 7.3.2 (S. 449) detaillierter dargestellt und im Band *Theorie elektrischer Maschinen* entwickelt werden:

– *Unterdrückung asynchroner Oberwellenmomente*

Ständerwicklung als gesehnte Zweischicht-Ganzlochwicklung ( $y \approx 5/6y_\emptyset$ ) mit  $q_1 \geq 3$ .

<sup>3</sup> Bei zweipoligen Maschinen mit Ganzformspulen kann der Wicklungsschritt aus fertigungstechnischen Gründen oft nur mit  $y < 0,75y_\emptyset$  ausgeführt werden.

Käfigwicklung mit Nutschränkung um eine Ständernutteilung und

$$N_2 \leq 1,25 N_1.$$

– *Unterdrückung synchroner Oberwellenmomente*

Es gelten vor allem die Nebenbedingungen

$$N_2 \neq N_1 \quad \text{und} \quad N_2 \neq N_1 \pm 2p,$$

die durch (1.2.105) und (1.2.106) bereits erfüllt werden.

– *Unterdrückung von Geräuschen bzw. Rüttelkräften*

Die Geräuschbildung ist von Resonanzfrequenzen der Maschine gegenüber der Verformung durch Radialkraftwellen abhängig. Deshalb lassen sich keine allgemein gültigen Regeln für die Festlegung der Nutzahlen angeben. Es ist durchaus möglich, dass auch bei Nichterfüllung der folgenden Nebenbedingungen keine Geräusche auftreten. Die aus einfachen Überlegungen folgenden Bedingungen lauten

$$N_2 \neq N_1, \quad N_2 \neq N_1 \pm 1, \quad N_2 \neq N_1 \pm (2p \pm 1).$$

Diese und weitere in der Literatur angegebene Nebenbedingungen werden ebenfalls durch (1.2.105) und (1.2.106) erfüllt.

– *Vermeidung zusätzlicher Verluste*

Bei nicht isolierten, geschrägten Stäben der Käfigwicklung können beträchtliche, quantitativ jedoch nur schwer vorausberechenbare Verluste vor allem durch sog. *Eisenquerströme* entstehen, welche sich zwischen benachbarten Stäben durch das Läuferblechpaket ausbilden. Zur Vermeidung von Eisenquerströmen wäre die Wahl von  $N_1 = N_2$  besonders vorteilhaft, was sich aber mit Rücksicht auf die Entstehung synchroner Oberwellenmomente (sog. Nutenstellungen) und magnetischer Geräusche verbietet. Die zusätzlichen Verluste steigen für  $N_2 > N_1$  deutlich stärker an als für  $N_2 < N_1$ , so dass  $N_2 < N_1$  gewählt werden sollte.

Isolierte Stäbe verhindern die Ausbildung von Eisenquerströmen und gestatten Ausführungen mit  $N_2 > N_1$ . Sie sind jedoch fertigungstechnisch problematisch und mit zusätzlichen Kosten verbunden. Zudem verschlechtert die Isolierung die Wärmeabfuhr aus dem Käfig und führt insbesondere zu einer größeren Anlauferwärmung. Wenn die Ausführung von  $N_2 > N_1$  aus anderen Gründen vorteilhaft ist, z. B. weil sich so eine geringere Oberwellenstreuung der Läuferwicklung und damit ein höheres Kippmoment erreichen lässt, so sollte auf die Nutschränkung verzichtet werden.

Offensichtlich lässt sich keine einfache Regel zur Bestimmung der optimalen Läufernutzahl eines Käfigläufers finden.

Einphasen-Induktionsmaschinen besitzen neben dem Hauptstrang praktisch stets einen Hilfsstrang, der zum Anlassen und, wenn er im Betrieb eingeschaltet bleibt, zur Verbesserung des Betriebsverhaltens dient (s. Bd. *Grundlagen elektrischer Maschinen*, Abschn. 7.2, u. Bd. *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschn. 5.1). Die Achse des Hilfsstrangs ist gegenüber der Achse des Hauptstrangs um  $\tau_p/2$  verschoben.

Dient der Hilfsstrang nur zum Anlassen, so besteht der Hauptstrang oft aus einer  $2/3$ -bewickelten einsträngigen Wicklung. Der Hilfsstrang liegt dann in den freibleibenden Nuten. Er stellt demnach eine  $1/3$ -bewickelte einsträngige Wicklung dar. Das wird als *unsymmetrische Wicklung* bezeichnet.

Dient der Hilfsstrang zur Verbesserung des Betriebsverhaltens, so sind Haupt- und Hilfsstrang als zweisträngige Wicklung mit gleicher Lochzahl in beiden Strängen ausgebildet. Um eine bessere Anpassung an die dem Hilfsstrang vorzuschaltende Impedanz zu erreichen, ist es oft vorteilhaft, eine sog. *quasisymmetrische Wicklung* auszuführen, bei der sich die Windungszahlen von Haupt- und Hilfsstrang voneinander unterscheiden.

Die Läuferwicklung von Einphasen-Induktionsmaschinen ist i. Allg. als stromverdrängungsarme Kurzschlusswicklung ausgeführt. In einem Stromverdrängungsläufer würden wegen der vom gegenlaufenden Drehfeld, das im Einphasenbetrieb entsteht, verursachten Stromkomponente mit nahezu doppelter Betriebsfrequenz erhebliche Verluste entstehen.

### 1.3 Kommutatorwicklungen

Kommutatorwicklungen sind Wicklungen, die über die Verlustdeckung hinaus am Energieumsatz einer Maschine beteiligt sind und bei denen die in Reihe geschalteten Einzelspulen einen oder auch mehrere in sich geschlossene Wicklungszüge bilden. Jeder Verbindungspunkt zweier Spulen ist mit einem Kommutatorsteg verbunden. Die Kommutatorstegzahl ist demnach gleich der Spulenzahl  $k$ . Die Kommutatorwicklung ist stets im Läufer der Maschine untergebracht. Die Verbindung mit der äußeren Schaltung erfolgt über Bürsten, die auf der Kommutatoroberfläche gleiten. Die Kommutatorwicklung bewegt sich demnach relativ zu den Bürsten. Unabhängig von der augenblicklichen Lage der einzelnen Wicklungselemente müssen zwischen den als äußere Zuleitungen dienenden Bürsten funktionsfähige und möglichst symmetrisch angeordnete Wicklungszweige existieren. Das ist der Grund, weshalb Kommutatorwicklungen in sich geschlossen sein müssen.

Im Bild 1.3.1 ist eine einfache Kommutatorwicklung schematisch dargestellt, die nur einen in sich geschlossenen Kreis bildet und mit zwei Bürsten versehen ist. Dabei sind in der Darstellung a) noch die Einzelspulen zu erkennen, die in schematischen Darstellungen vereinbarungsgemäß an den Stellen angeordnet sind, an denen sie in den Spulenseiten bzw. Nuten durch den Wechsel des Wicklungszweigs elektrisch wirksam werden. In der einfachsten, allgemein üblichen schematischen Darstellung b) ist der Wicklungszug nur noch als geschlossener Kreis angegeben.

Kommutatorwicklungen werden meist als Zweischichtwicklungen ausgeführt. Mehr als zwei Schichten kommen selten vor. Einschichtwicklungen gibt es praktisch nicht. Bei Kommutatorwicklungen für Gleichstrommaschinen und für Einphasen-Reihenschlussmaschinen entfallen normalerweise auf jedes Polpaar zwei Bürsten,

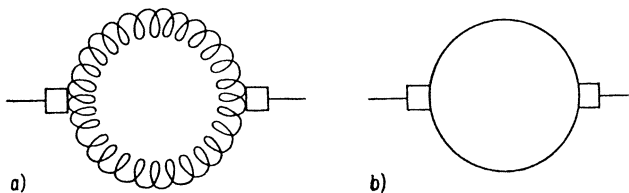


**Bild 1.3.1** Schematische Darstellung von Kommutatorwicklungen. a) Darstellung in Einzelspulen; b) einfache Darstellung des Wicklungskreises

eine Eintritts- und eine Austrittsbürste (s. Bd. *Grundlagen elektrischer Maschinen*, Abschn. 3.2.3). Kommutatorwicklungen für Drehstrom-Kommutatormaschinen benötigen je Polpaar drei oder sechs Bürsten. Der prinzipielle Aufbau von Kommutatorwicklungen ist unabhängig von der Maschinenart, in der sie eingesetzt werden. Bei größeren Maschinen ist die Kommutatorwicklung grundsätzlich aus Formspulen aufgebaut. Bei Kleinmaschinen werden in Nuten eingebettete Runddrahtwicklungen, teilweise auch in der Sonderform der Zahnspulenwicklung, oder z. T. auch Luftspaltwicklungen eingesetzt.

### 1.3.1 Wicklungsgesetze und Wicklungsbezeichnungen

Beim Entwurf von Kommutatorwicklungen entfällt die Aufgabe, die einzelnen Spulen auf Stränge bzw. Zonen aufzuteilen. In dieser Hinsicht ist der Entwurf von Kommutatorwicklungen einfacher als der Entwurf mehrsträngiger Wicklungen. Dafür gibt es aber mehrere Möglichkeiten, die Einzelspulen in Reihe zu schalten. Die Forderung nach Wicklungssymmetrie gilt genauso wie bei den Strangwicklungen, wenn auch andere Bedingungen hierfür maßgebend sind. In den folgenden Abschnitten werden die Gesetze der Schaltung und der Symmetrie von Kommutatorwicklungen behandelt. Je nach dem Einfluss dieser Gesetze auf den Wicklungsaufbau treten dabei neue, nur für Kommutatorwicklungen geltende Bezeichnungen in Erscheinung. Sie werden im Folgenden eingeführt.

#### 1.3.1.1 Prinzipielle Anordnung der Spulen

Jede Kommutatorwicklung bildet bezüglich der äußeren Zuleitungen über die Bürsten mehrere parallele Zweige. Die *Zahl der parallelen Zweige* ist stets geradzahlig. Sie wird deshalb mit  $2a$  bezeichnet.<sup>4</sup> Die im Bild 1.3.1 schematisch dargestellte einfachste Kommutatorwicklung wird durch die beiden Bürsten in zwei parallele Zweige geschaltet ( $2a = 2$ ). Im Vorgriff auf das annähernd kreisförmige,  $a$ -mal durchlaufene Spannungspolygon von Kommutatorwicklungen, welches auch in dem im Bild 1.3.1 dargestellten Wicklungskreis zum Ausdruck kommt, wird  $a$  z. T. auch als *Zahl der parallelen Kreise* bezeichnet. Wegen der endlichen Zahl  $k$  aller Ankerspulen schwankt die Zahl der Spulen je Zweig im Betrieb der Maschine um eine Spule, da es unwahrscheinlich ist, dass genau in dem Augenblick, in dem eine Spule einen Zweig verlässt, eine andere Spule in den Zweig eingeschaltet wird. Außerdem ändert sich die relative Lage aller Spulen innerhalb der Maschine periodisch mit der Drehung des Ankers. Im Zeitverlauf der über die Bürsten fließenden Ströme bzw. der zwischen den Bürsten herrschenden Spannungen entstehen dadurch unerwünschte Harmonische, deren Ordnungszahl von der Drehzahl  $n$  und der Gesamtzahl der Ankerspulen abhängt und die als *Stegoberschwingungen* bezeichnet werden. Abgesehen von kleinen Maschinen, deren Dimensionierung oft durch das Erfordernis minimaler Herstellkosten dominiert wird, wählt man die Zahl der Ankerspulen deshalb möglichst groß, was meistens dazu führt, dass bei Kommutatorwicklungen je Nut und Schicht mehr als eine Spulenseite nebeneinander

<sup>4</sup> Dies ist ein historisch gewachsener Unterschied zu Strangwicklungen, bei denen die Zahl paralleler Wicklungszweige je Strang mit  $a$  bezeichnet wird.

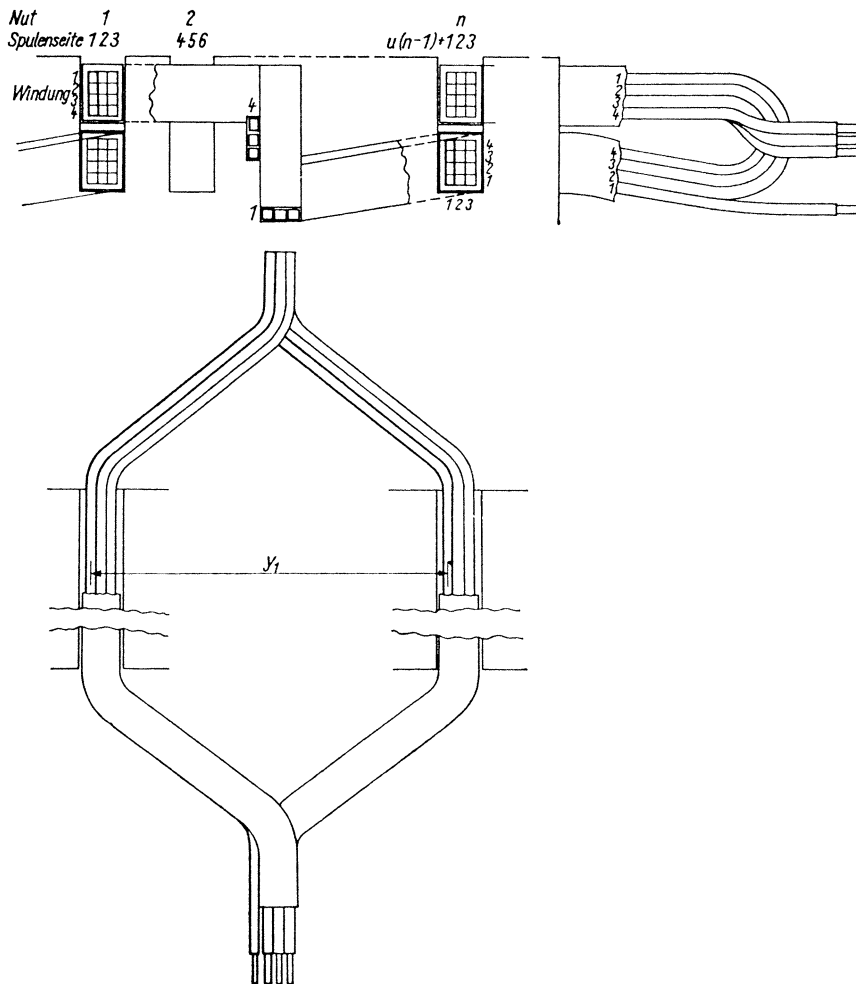


**Bild 1.3.2** Normale Anordnung von Zweischichtformspulen einer ungetreppten Kommutatorwicklung für  $u = 3$  und  $w_{sp} = 4$

angeordnet werden ( $u > 1$ , s. Abschn. 1.1.2.3, S. 16).<sup>5</sup> Das Bestreben, die Spulenzahl  $k$  möglichst groß zu wählen, hat noch weitere Gründe, die später zu behandeln sind.

Bild 1.3.2 zeigt die normale Spulenanordnung der Zweischichtformspulen für Kommutatorwicklungen. Nach Möglichkeit fasst man die  $u$  Spulen, deren Spulenseiten in einer Nut nebeneinanderliegen, zu einer gemeinsam hergestellten und mit gemeinsamer Hauptisolierung versehenen Wicklungseinheit zusammen, die äußerlich wie eine Spule aussieht.

Nach der üblichen Wicklungstechnologie ist dabei die Reihenfolge der Spulenseiten innerhalb der Nuten für beide Spulenseiten identisch, während sich die Reihenfolge der übereinanderliegenden Windungen in radialer Richtung in der zweiten Schicht umkehrt. Prinzipiell kann jede Spulenseite innerhalb einer Schicht

<sup>5</sup> In seltenen Fällen werden die  $u$  Spulenseiten übereinander angeordnet, so dass Wicklungen mit  $2u$  Schichten entstehen.

**Tabelle 1.3.1** Spezielle Bezeichnungen von Kommutatorwicklungen

| Kennzeichnendes                                               | Kennzeichen                           | Bezeichnung                           |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Gangzahl                                                      | $m = 1$                               | eingängige Wicklung                   |
|                                                               | $m > 1$                               | mehrgängige Wicklung                  |
|                                                               | $m = 2$                               | zweigängige Wicklung                  |
| Nutenschritt                                                  | $y_n \in \mathbb{N}$                  | ungetrepte Wicklung                   |
|                                                               | $y_n \notin \mathbb{N}$               | getrepte Wicklung,<br>Treppenwicklung |
| Resultierender Schritt und Vorzeichen in der Schrittgleichung | $y_r = +m$ bzw. $y_r = \frac{k-m}{p}$ | ungekreuzte Wicklung                  |
|                                                               | $y_r = -m$ bzw. $y_r = \frac{k+m}{p}$ | gekreuzte Wicklung                    |
| Zahl der Schlüsse                                             | $t_s = 1$                             | einfach geschlossene Wicklung         |
|                                                               | $t_s > 1$                             | mehrfach geschlossene Wicklung        |
|                                                               | $t_s = 2$                             | zweifach geschlossene Wicklung        |

im Bereich einer Nut  $u$  verschiedene Lagen einnehmen. Damit kennzeichnet der Nutenschritt  $y_n$  nach der Definition im Abschnitt 1.1.2.3 die Spulenweite  $W$  nicht mehr eindeutig. Eine eindeutige Festlegung der Spulenweite durch Schritte erhält man, wenn man statt der Nuten die nebeneinanderliegenden Spulenseiten als Zählelement der Schritte definiert.

Da man beim Weiterschreiten um eine Nut jeweils  $u$  nebeneinanderliegende Spulenseiten zählt, ergibt sich entsprechend (1.1.15), Seite 18, mit  $k = Nu$  für die Spulenweite der *Spulenschritt* oder *erste Teilschritt* zu

$$y_1 = uy_n = \frac{uN}{2p} - uy_v = \frac{k}{2p} - \beta_v \approx \frac{k}{2p} \quad (1.3.1)$$

mit der Schrittverkürzung  $\beta_v$ . Für den Wicklungsentwurf einer Kommutatorwicklung hat demnach die Zahl der insgesamt nebeneinanderliegenden Spulenseiten eine größere Bedeutung als die Zahl der Nuten.

Da  $y_1$  eine beliebige ganze Zahl ist, braucht  $y_n$  nach (1.3.1) im Gegensatz zu den Verhältnissen bei Strangwicklungen nicht ganzzahlig zu sein. Wie man sich leicht überzeugt, ist  $y_1$  im Bild 1.3.2 durch  $u = 3$  teilbar, d. h.  $y_n = y_1/u$  ist eine ganze Zahl. Eine derartige Wicklung nennt man eine *ungetrepte Wicklung*. Ist  $y_n$  dagegen keine ganze Zahl, so entsteht eine *getrepte Wicklung* oder *Treppenwicklung*. Bei ihr liegen die Unterschichtspulenseiten der Spulen, deren Oberschichtspulenseiten in derselben Nut liegen, in zwei verschiedenen Nuten. Es gilt also (s. auch Tab. 1.3.1)

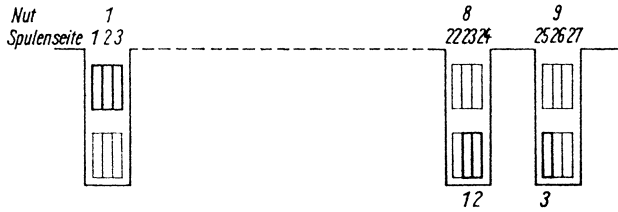


**Bild 1.3.3** Anordnung der Spulenseiten einer getrepten Wicklung für  $y_1 = 22$ ,  $u = 3$  und  $y_n = 7\frac{1}{3}$

$$\left. \begin{array}{ll} \text{für ungetrepte Wicklungen} & y_n = \frac{y_1}{u} \in \mathbb{N} \\ \text{für getrepte Wicklungen} & y_n = \frac{y_1}{u} \notin \mathbb{N} \end{array} \right\} \quad (1.3.2)$$

Im Bild 1.3.3 ist eine getrepte Wicklung mit  $y_1 = 23 - 1 = 22$ ,  $u = 3$ ,  $y_n = 22/3 = 7\frac{1}{3}$  dargestellt. Den nicht ganzzahligen Nutenschritt kann man auch folgendermaßen interpretieren: Als erstes schreitet man sieben ganze Nuten weiter. Für die Spule 1 im Bild 1.3.3 gelangt man damit von der linken Spulenseite der Nut 1 zunächst zur linken Spulenseite der Nut 8. Dann schreitet man  $\frac{1}{3}$  Nut weiter und kommt so zur mittleren Spulenseite der Nut 8, d. h. zur rechten Spulenseite der betrachteten Spule 1. Will man die Lage der Spulenseiten innerhalb der Nut nicht besonders kennzeichnen, denn diese Lage hat keinen Einfluss auf die Verkettung mit dem Luftspaltfeld, so ist  $y_n \notin \mathbb{N}$  der Mittelwert der tatsächlichen Nutenschritte. Im Beispiel von Bild 1.3.3 haben zwei Spulen den Nutenschritt 7 und eine Spule den Nutenschritt 8. Das ergibt einen Mittelwert  $y_n = 7\frac{1}{3}$ . Getrepte Wicklungen haben den Nachteil, dass man die  $u$  Spulen nicht mit einer gemeinsamen Hauptisolierung versehen kann, da sich das Spulenbündel in der einen Schicht (im Bild 1.3.3 in der Unterschicht) aufspaltet. Trotzdem werden sie wegen ihres günstigen Kommutierungsverhaltens (s. Kap. 4) bei großen Maschinen oft angewendet.

### 1.3.1.2 Prinzipielle Schaltungen

Wie schon in der Einleitung des Abschnitts 1.3.1 angedeutet worden ist, bestehen mehrere Möglichkeiten, die Einzelspulen zur in sich geschlossenen Kommutatorwicklung zu verbinden. Dabei sind zwei Bedingungen einzuhalten: Die Zusammenschaltung der Wicklung muss so erfolgen, dass erstens ein vollkommen gleichmäßiger Wicklungsaufbau entsteht und zweitens der Prozess der Energieumformung mit hohem Wirkungsgrad verläuft.

Die erste Bedingung resultiert aus der für Kommutatorwicklungen notwendigen Wicklungssymmetrie. Sie führt auf die Forderungen:

- Alle Spulen müssen die gleiche Weite besitzen.
- Alle in einem Wicklungszug aufeinander folgenden Spulen müssen den gleichen Abstand voneinander aufweisen.

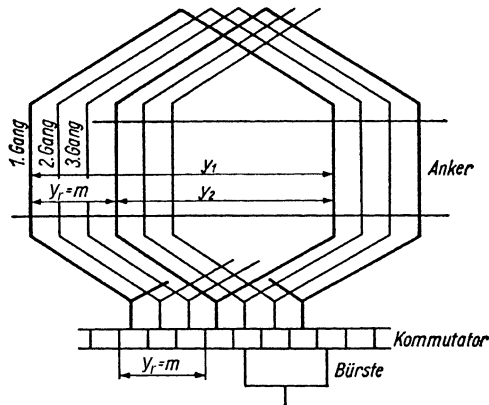


**Bild 1.3.4** Zur Herleitung der Wicklungsgesetze mehrgängiger Kommutator-Schleifenwicklungen

Die zweite Bedingung ist prinzipieller Art. Sie führt auf die Forderungen:

- Die Spulenweite muss ungefähr gleich der Polteilung sein.
- Im Wicklungszug aufeinander folgende Spulen müssen etwa die gleiche relative Lage innerhalb der jeweiligen Polteilung haben. Dabei ist es für das elektrische Verhalten der Wicklung völlig gleichgültig, unter welchen Polpaaren die aufeinander folgenden Spulen liegen, d. h. ob eine Wellenwicklung oder eine Schleifenwicklung vorliegt.

#### a) Schleifenwicklung

Wenn aufeinander folgende Spulen unter demselben Polpaar liegen, entsteht eine *Schleifenwicklung* (s. Bild 1.3.4). Werden dabei Spulen übersprungen, so wird die Schleifenwicklung mehrgängig. Der *Schaltschritt* oder *zweite Teilschritt*, d. h. der Schritt von der zweiten (rechten) Spulenseite der Ausgangsspule zur ersten (linken) Spulenseite der folgenden Spule, muss auf alle Fälle in die Nähe der ersten (linken) Spulenseite der Ausgangsspule zurückführen (s. Bild 1.3.4). Wie für den ersten muss also auch für den zweiten Teilschritt gelten

$$y_2 \approx \frac{k}{2p}. \quad (1.3.3)$$

Verfolgt man den Wicklungszug einer Schleifenwicklung in einem bestimmten Zeitpunkt und beobachtet dabei das Vorzeichen der in den einzelnen Spulen induzierten Spannungen, so stellt man fest, dass dieses von Pol zu Pol wechselt (vgl. Bd. *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschn. 1.4.2). Wenn der Prozess der Energieumformung mit hohem Wirkungsgrad verlaufen soll, müssen bei Gleich- und Wechselstrommaschinen an den Stellen dieses Vorzeichenwechsels die Bürsten angeordnet werden. Nur dann herrscht in den durch die aufliegenden Bürsten gebildeten Wicklungszweigen ein einheitliches Vorzeichen der induzierten Spannung. Die Zahl der Bürsten ist deshalb gleich der Polzahl  $2p$ . Da die Polarität aufeinander folgender Bürsten wechselt und die Bürsten derselben Polarität über die äußeren Zuleitungen miteinander verbunden sind, wird die Wicklung durch die  $2p$  Bürsten in  $2p$  parallele Zweige geschaltet. Außerdem liegen die  $m$  Gänge einer mehrgängigen Wicklung zueinander parallel (s. Bild 1.3.4). Für die Schleifenwicklung gelten demnach für den *resultierenden Schritt* und die Zahl der parallelen Zweige die Gesetze (s. Bild 1.3.4)

$$y_r = y_1 - y_2 = \pm m \quad (1.3.4)$$

$$2a = 2mp. \quad (1.3.5)$$

Dabei ist zu beachten, dass Schleifenwicklungen mit  $m > 2$  nicht symmetrisch ausführbar sind (s. Abschn. 1.3.1.4). In (1.3.4) gilt das positive Vorzeichen für die sog. *ungekreuzte* und das negative Vorzeichen für die *gekreuzte* Schleifenwicklung. Im zweiten Fall kreuzen sich Anfang und Ende einer Spule im Wicklungskopf vor dem Kommutator, im ersten Fall nicht (s. auch Bd. *Grundlagen elektrischer Maschinen*, Abschn. 3.2.3).

Aus Bild 1.3.4 ist zu erkennen, dass zu jeder ersten (linken) Seite einer Spule ein bestimmter Kommutatorsteg gehört. Folglich tritt der resultierende Schritt auch am Kommutator zwischen den Spulenanfängen zweier aufeinander folgender Spulen auf. Wie aus Bild 1.3.4 weiter hervorgeht, werden die  $m$  Gänge einer Kommutatorwicklung durch die Bürsten parallelgeschaltet. Die Bürsten müssen demnach so breit sein, dass sie wenigstens  $m$  Stege überdecken.

#### b) Wellenwicklung

Wenn im Wicklungszug aufeinander folgende Spulen unter aufeinander folgenden Polpaaren liegen, entsteht eine *Wellenwicklung*. Prinzipiell können dabei auch Polpaare übersprungen werden (s. [1], Bd. II) Solche Wellenwicklungen haben allerdings wegen der langen Schaltverbindungen keine praktische Bedeutung. Für den resultierenden Schritt der Wellenwicklung gilt (s. Bild 1.3.5)

$$y_r = y_1 + y_2. \quad (1.3.6)$$

Endet der erste Wellenzug links bzw. rechts neben dem Ausgangssteg 1, so entsteht eine ungekreuzte bzw. eine gekreuzte eingängige Wellenwicklung; endet er nicht unmittelbar neben dem Ausgangssteg, so entsteht eine mehrgängige Wellenwicklung (s. Bd. *Grundlagen elektrischer Maschinen*, Abschn. 3.2.3). Nach Bild 1.3.5 überschreitet man beim Durchlaufen eines Wellenzugs, d. h. nach etwa einem Umlauf um den Ankerumfang,

$$py_r = k \mp m \quad (1.3.7)$$

Kommutatorstege. Das negative Vorzeichen gilt dabei für die ungekreuzte und das positive Vorzeichen für die gekreuzte Wellenwicklung. Mithin erhält man als resultierenden Schritt der Wellenwicklung

$$y_r = \frac{k \mp m}{p}, \quad (1.3.8)$$

wobei das negative Vorzeichen jetzt für die wegen der kürzeren Schaltverbindungen häufiger angewendete ungekreuzte Wellenwicklung gilt.

Bild 1.3.5 lässt erkennen, dass alle in der äußeren Schaltung miteinander verbundenen Bürsten gleicher Polarität auch durch einen Wellenzug der Wicklung unmittelbar miteinander verbunden sind. Prinzipiell ist also je Polarität nur eine Bürste notwendig. Die Wicklung besitzt je Gang zwei parallele Zweige. Durch die Bürsten können also keine zusätzlichen parallelen Zweige gebildet werden. Die Wellenwicklung hat demnach immer nur doppelt so viele parallele Zweige wie Gänge, und es gilt

$$2a = 2m. \quad (1.3.9)$$

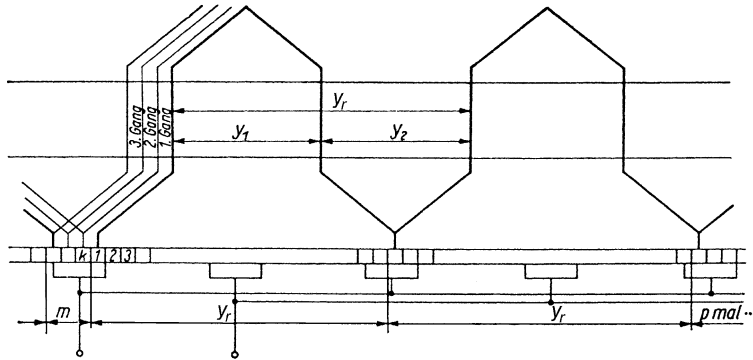


**Bild 1.3.5** Zur Herleitung der Wicklungsgesetze mehrgängiger ungekreuzter Kommutator-Wellenwicklungen

Obleich damit Wellenwicklungen unabhängig von ihrer Polzahl nur zwei Bürsten benötigen, werden sie aus anderen Gründen trotzdem meist mit  $2p$  Bürsten ausgeführt. Bezüglich der Symmetrie (s. Abschn. 1.3.1.4) gibt es für die Gangzahl der Wellenwicklung im Gegensatz zur Schleifenwicklung keine prinzipielle Grenze. Da aber auch hier die Bürsten  $m$  Stege überdecken müssen, werden Wellenwicklungen auch bei großen Maschinen praktisch nur mit bis zu  $m = 4$  Gängen ausgeführt.

### 1.3.1.3 Schließungsbedingungen

In der Einleitung zum Abschnitt 1.3 ist bereits erwähnt worden, dass Kommutatorwicklungen in sich geschlossen sind. Dieser Schluss kann einfach oder auch mehrfach erfolgen (s. Tab. 1.3.1, S. 118). Wie ohne Weiteres einzusehen ist, kann sich eine eingängige Schleifenwicklung nur einfach schließen, da schon ein einziger Durchlauf des Ankerumfangs alle Spulen erfasst. Eine  $m$ -gängige Wicklung kann sich dagegen mehrfach, aber höchstens  $m$ -fach schließen, da jeder Gang nur einen Schluss haben kann. Im Folgenden soll die Zahl  $t_s$  der Schlüsse einer Kommutatorwicklung allgemein ermittelt werden.

#### a) Schleifenwicklungen

Schleifenwicklungen mit  $m > 2$  sind nicht symmetrisch ausführbar (s. Abschn. 1.3.1.4) und werden deshalb nur in Sonderfällen angewendet. Es braucht also nur der Fall  $m = 2$  untersucht zu werden.

Beginnt der erste Gang am Steg 1, so durchläuft er zunächst alle ungeradzahlig Stege. Wenn die Zahl  $k$  der Kommutatorstege gerade ist, endet der erste Gang am Steg 1 und schließt sich somit. Die Wicklung ist zweifach geschlossen ( $t_s = 2$ ). Ist  $k$  ungeradzahlig, so endet der erste Gang am Steg  $k$  bzw. 2. Er geht damit in den zweiten Gang über, der am Steg 1 endet und die Wicklung schließt. Demnach ist die Wicklung einfach geschlossen ( $t_s = 1$ ). Allgemein gilt also

$$t_s = \text{ggT}\{k, m\}. \quad (1.3.10)$$

In Drehstrom-Kommutatormaschinen kommen auch Schleifenwicklungen mit  $m = 3$  vor. Wie leicht einzusehen ist, ergibt sich ein dreifacher Schluss, wenn  $k$  durch 3 teilbar ist. In jedem anderen Fall ist die Wicklung einfach geschlossen.

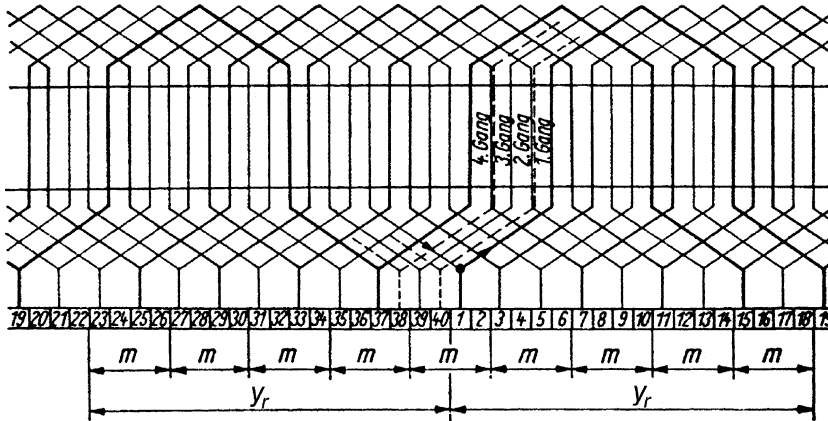


**Bild 1.3.6** Zur Herleitung der Schließungsbedingungen für mehrgängige Wellenwicklungen

#### b) Wellenwicklungen

Auch die Wellenwicklungen können höchstens so viele Schlüsse wie Gänge haben. Im Bild 1.3.6 sind zwei Gänge einer viergängigen, ungekreuzten Wellenwicklung dargestellt. Der erste Gang beginnt am Steg 1. Sein erster Wellenzug endet am Steg 37. Jeder folgende Wellenzug liegt jeweils um  $m = 4$  Stege nach links verschoben. Wie man sieht, trifft der erste Gang nicht wieder auf den Steg 1. Er trifft auf den Steg 3 und geht deshalb, ohne sich zu schließen, am Steg 39 in den dritten Gang über. Die Ursache dafür ist, dass  $m$  in  $y_r$  nicht ganzzahlig enthalten ist ( $y_r/m = 18/4 = 4,5$ ). Erst muss ein weiterer Gang, d. h. ein zweites Mal die Strecke  $y_r$  in Schritten von  $m$  Stegen durchlaufen werden, bevor die Wicklung auf den Steg 23 trifft, der über eine weitere Welle mit Steg 1 verbunden ist. Damit schließt sich der Wicklungszug. Ebenso schließt sich im Bild 1.3.6 der nur teilweise gestrichelt angedeutete zweite Gang über den vierten.

Werden, allgemein gesehen, vom Steg 1 beginnend bis zum Schluss der Wicklung  $n$  Gänge durchlaufen, so muss man  $n$ -mal die Strecke  $y_r$  in Schritten von  $m$  Kommutatorstegen durchschreiten. Die Strecke  $ny_r$  ist demnach die kleinste Strecke, in der  $m$  ganzzahlig enthalten ist (im Beispiel ist  $ny_r/m = 2 \cdot 18/4 = 9$ ). Das führt auf die Beziehung

$$ny_r = mg.$$

Ist  $m$  bereits in  $y_r$  ganzzahlig enthalten ( $n = 1$ ), so trifft schon das Ende des ersten Gangs auf den Steg 1, wie man sich nach Bild 1.3.6 leicht vorstellen kann. Dann ist  $t_s = m$ , da sich jeder Gang schließt. Wenn jeweils  $n$  Gänge einen Schluss bilden, so ist die Zahl der Schlüsse

$$t_s = \frac{m}{n}.$$

Aus beiden Beziehungen ergeben sich für  $y_r$  und  $m$  die Bedingungen

$$y_r = \frac{m}{n}g = t_sg$$

$$m = t_sn.$$

Wie diese beiden Bedingungen zeigen, ist  $t_s$  ein gemeinsamer Teiler von  $y_r$  und  $m$ . Für die Zahl aller Schlüsse ist natürlich der größte gemeinsame Teiler maßgebend. Für die Zahl der Schlüsse der Wellenwicklung gilt demnach

$$t_s = \text{ggT}\{y_r, m\}.$$

Wellenwicklungen werden praktisch bis zu  $m = 4$  ausgeführt. Ist z. B. für  $m = 2$  der resultierende Schritt  $y_r$  nicht durch 2 teilbar, so ergibt sich stets  $t_s = 1$ . Wenn  $y_r$  dagegen durch 2 teilbar ist, ergibt sich bei  $m = 2$  auch  $t_s = 2$ . Ist  $y_r$  durch  $m$  teilbar, so ist  $t_s = m$ .

#### 1.3.1.4 Symmetriebedingungen

Eine Kommutatorwicklung ist vollkommen symmetrisch, wenn bei jeder relativen Lage des Ankers zum Polsystem in allen parallelen Zweigen der Wicklung vom Luftspaltfeld die gleiche Spannung induziert wird. Dabei ist vorausgesetzt, dass unter allen Polpaaren die gleiche Flussdichteverteilung herrscht. Die wichtigste Symmetriebedingung ist bereits im Abschnitt 1.3.1.2 formuliert worden. Die geometrische Anordnung der Wicklung muss vollkommen gleichmäßig sein, d. h. die Wicklung muss aus gleichen Spulen bestehen, die durch gleiche Schaltverbindungen verbunden sind. Aus der Bedingung, dass sämtliche Spulenschritte  $y_r, y_1, y_2$  ganzzahlig und für alle Spulen gleich sein müssen, folgen Symmetriebedingungen für  $k, N, u$  und andere Entwurfsgrößen. Als Kriterium für die Gleichheit der induzierten Spannungen verwendet man die Gleichheit der von einer gedachten Drehwelle des Luftspaltfelds mit  $\nu' = p$  in der stillstehenden Wicklung induzierten Spannungen. Das bedeutet, dass man auch die Symmetrie einer Kommutatorwicklung über den Nutenspannungsstern kontrolliert. Der Zusammenhang zwischen Nuten- und Spulenspannungen ist wiederum durch

$$e_{sp} = e_{ab} = -e_{na} + e_{nb}$$

entsprechend (1.1.12) und Bild 1.1.14, Seite 17, gegeben. Der Nutenspannungsstern entspricht dem Spannungsstern der Spulenseitenspannungen einer Wicklungsschicht.

#### a) Schaltungssymmetrie

Wie bereits erwähnt, müssen sämtliche Spulenschritte  $y_r, y_1, y_2$  ganzzahlig und für alle Spulen gleich sein. Die Bedingung  $y_1 \in \mathbb{N}$  wird von allen Zweischichtwicklungen erfüllt. Wenn  $y_r \in \mathbb{N}$  gilt, so ist nach (1.3.4) bzw. (1.3.6) auch  $y_2 \in \mathbb{N}$ . Die folgenden Überlegungen könnten sich demnach auf die Untersuchung des Ausdrucks  $y_r \in \mathbb{N}$  beschränken.

Für Schleifenwicklungen ist mit (1.3.4)  $y_r \in \mathbb{N}$  immer erfüllt. Für Wellenwicklungen ergibt sich mit (1.3.1) und (1.3.7) bzw. (1.3.8) im Fall einer Durchmesserwicklung die Bedingung

$$y_1 = \frac{k}{2p} = \frac{1}{2} \left( y_r \pm \frac{m}{p} \right) \in \mathbb{N}. \quad (1.3.11)$$

Da für echte Wellenwicklungen  $p \geq 2$  sein muss, sind Durchmesserwicklungen nur mit  $m \geq 2$  möglich. Aus (1.3.7) erhält man die Beziehung

$$k = uN = y_r p \pm m, \quad (1.3.12)$$

aus der entsprechend  $y_r \in \mathbb{N}$  einige Bedingungen für die Wicklungskennwerte  $k$ ,  $N$  und  $u$  resultieren. Die Beziehung (1.3.12) schränkt die Freizügigkeit in der Wahl dieser Werte erheblich ein. Das Hauptanwendungsgebiet eingängiger Wellenwicklungen umfasst Maschinen mit  $p = 2$ . Hierfür fordert (1.3.12) gemäß

$$k = uN = 2y_r \pm 1$$

ungeradzahlige Werte für  $k$ ,  $N$  und  $u$ . Da die Werte für  $k$  und  $N$  relativ groß sind, ist diese Forderung leicht zu erfüllen. Dagegen können die wenigen möglichen Werte für  $u$  von 1, 3, 5 usw. zu großen Schwierigkeiten beim Entwurf der Wicklung führen.

#### **b) Elektrische Symmetrie**

Wie schon angedeutet worden ist, wird die elektrische Symmetrie mit Hilfe der von einer gedachten Drehwelle des Luftspaltfelds mit  $\tilde{v}' = p$  in den Spulenseiten der stillstehenden Wicklung induzierten Nutenspannungen kontrolliert. Dabei wird angenommen, dass die Zahl der Spulen  $k$  gleich der Nutzahl  $N$  ist. Die Zeiger der Nutenspannungen bilden den sog. Nutenspannungsstern (s. Abschn. 1.1.2.2, S. 12). Innerhalb der Kommutatorwicklung sind alle Spulen bzw. Spulenseiten eines in sich geschlossenen Wicklungsteils in Reihe geschaltet. Zur Ermittlung der resultierenden Spannung werden deshalb die entsprechenden Nutenspannungszeiger aneinander gefügt, wobei die Nutenspannungszeiger negativer Spulenseiten entsprechend der vorzeichenbehafteten Addition umzuklappen sind. Um innere Ausgleichsströme als Folge von elektrischen Unsymmetrien zu vermeiden, müssen erstens die entstehenden Zeigerzüge von in sich geschlossenen Wicklungsteilen geschlossene Vielecke bilden, die jeweils zwei parallelen Zweigen entsprechen, und zweitens müssen die Zeigerzüge dieser parallelen Zweigpaare einer Wicklung deckungsgleich sein. Damit müssen die Zeigerzüge sämtlicher  $a$  Vielecke geschlossen und deckungsgleich sein. Ein solches Vieleck nennt man *Spannungsvieleck* oder *Spannungspolygon*. Wie schon erwähnt, entsprechen diese Vielecke den  $a$  parallelen Kreisen der Wicklung. Im Bild 1.3.10 sind z. B. die deckungsgleichen Spannungsvielecke einer eingängigen symmetrischen Schleifenwicklung dargestellt. Für  $p = 2$  ergeben sich nach (1.3.5) vier parallele Zweige, d. h. zwei parallele Kreise und damit auch zwei Spannungsvielecke.

Wie leicht einzusehen ist, sind zur Bildung von  $a$  deckungsgleichen Spannungsvielecken  $a$  gleiche Teile und damit  $a$  Zeigerkreise des Nutenspannungssterns erforderlich. Nach Unterabschnitt 1.1.2.2b ist das dann der Fall, wenn die Symmetriebedingungen

$$\frac{N}{a} \in \mathbb{N} \quad (1.3.13a)$$

$$\frac{p}{a} \in \mathbb{N} \quad (1.3.13b)$$

erfüllt sind (s. z. B. Bild 1.3.10b, S. 136). Jeder Spannungszeiger einer Spule besteht aus zwei Teilzeigern – den Nuten- bzw. Spulenseitenspannungszeigern – der Spannungsvielecke. Zwischen zwei jeweils der Verbindungsstelle zweier solcher Spulenspannungszeiger entsprechenden Eckpunkten des Spannungsvielecks wird die Spannung beobachtet, deren Augenblickswert zwischen zwei Bürsten erscheint, die in diesem Augenblick auf den zugeordneten Kommutatorstegen aufliegen.

Sollen die Bürsten – die zunächst unendlich schmal angenommen werden – eine maximale Spannung abgreifen, was bei normalen Gleichstrommaschinen, Einphasen-Reihenschlussmaschinen und Drehstrom-Kommutatormaschinen der Fall ist, so müssen sie auf Kommutatorstegen gleiten, die zu diametral liegenden Punkten der Spannungsvielecke gehören. Bei Deckungsgleichheit der Spannungsvielecke sind die Spannungen sämtlicher zwischen zwei Bürsten unterschiedlicher Polarität liegenden Zweige tatsächlich gleich.

Bei Wellenwicklungen ist die Zahl der parallelen Zweige nach (1.3.9) mit  $2a = 2m$  relativ klein und damit die Bedingung (1.3.13a) leicht zu erfüllen. Die Erfüllung der Bedingung (1.3.13b) führt dagegen bereits zu Schwierigkeiten. Ist z. B.  $m = a = 2$ , so kann diese Bedingung für ungeradzahlige Werte von  $p$  nicht erfüllt werden.

Bei Schleifenwicklungen mit  $2a = 2mp$  entsprechend (1.3.5) ist die Zahl der parallelen Zweige bedeutend größer, so dass bereits die Erfüllung der Bedingung (1.3.13a) Schwierigkeiten bereitet. Die Bedingung (1.3.13b) geht mit (1.3.5) für Schleifenwicklungen über in

$$\frac{p}{a} = \frac{1}{m} \in \mathbb{N}$$

und ist offensichtlich mit mehrgängigen Wicklungen ( $m > 1$ ) überhaupt nicht erfüllbar. Trotzdem besteht die Möglichkeit, auch in diesen Fällen symmetrische Wicklungen auszuführen, wie die folgenden Betrachtungen zeigen werden.

Die Symmetriebedingungen (1.3.13a,b) sind aus dem Nutenspannungstern hergeleitet worden. Für Zweischichtwicklungen ist das aber nur der Nutenspannungstern der Oberschichtspulenseiten. Hinzu kommt noch der Nutenspannungstern der Unterschichtspulenseiten. Dadurch verdoppelt sich die Zahl der deckungsgleichen Teilsterne, und es ist auch die doppelte Zahl symmetrischer paralleler Kreise möglich. Das berührt allerdings nicht die Symmetriebedingung (1.3.13a), da die Zahl der Zeigerstrahlen des Nutenspannungsterns und damit auch  $N/a$  nach wie vor ganzzahlig sein muss. Dagegen vereinfacht sich die zweite Symmetriebedingung (1.3.13b) zu

$$\frac{2p}{a} \in \mathbb{N}. \quad (1.3.14)$$

Mit dieser Bedingung werden gemäß  $2p/a = 2/m \in \mathbb{N}$  zweigängige, symmetrische Schleifenwicklungen, d. h. Wicklungen mit  $2p/a = 1$ , und gemäß  $2p/a = 2p/m \in \mathbb{N}$  zweigängige symmetrische Wellenwicklungen auch mit ungerader Polpaarzahl möglich, wobei  $2p/a = p$  ist. Allerdings muss die Unterschicht der Wicklung gleichwertig in den Wicklungsentwurf einbezogen werden. Die Verdopplung der Zahl der parallelen Kreise bzw. Gänge ist nur dann möglich, wenn zu jeder Oberschichtspulenseite des einen Gangs eine Unterschichtspulenseite des anderen Gangs mit gleicher Spannung in Bezug auf den Wicklungszug existiert. Da diese beiden Spulenseiten entgegengesetztes Vorzeichen haben, müssen die in ihnen induzierten Spannungen gleiche Amplitude und  $180^\circ$  Phasenverschiebung besitzen. Für Gleichheit der Amplitude sorgen die gleiche Windungszahl und das für alle Polteilungen, abgesehen vom wechselnden Vorzeichen der Flussdichte, gleiche Luftspaltfeld. Die  $180^\circ$ -Phasenverschiebung wird für zweigängige Schleifenwicklungen unter der mit Bedingung (1.3.13a) erfüllten Voraussetzung  $N/2p = N/a \in \mathbb{N}$  durch einen Nutenschritt zwischen den beiden Spulenseiten von  $y_\varnothing = N/2p$  erreicht.

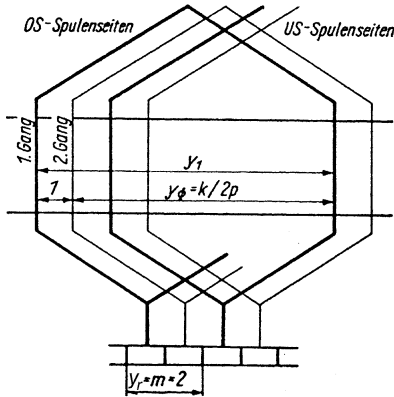


**Bild 1.3.7** Zur Herleitung der Nebenbedingung für die zweigängige, symmetrische Schleifenwicklung mit  $2p/a = 1$

Zunächst soll die zweigängige Schleifenwicklung untersucht werden. Dabei wird der Fall  $u = 1$  bzw.  $k = N$  betrachtet. Das ist der Fall, bei dem die Nutenschnitte nach (1.3.2) gleich den Spulenschritten sind ( $y_n = y_1$ ). Für die ungekreuzten, zweigängigen ( $m = 2$ ) Schleifenwicklungen ergeben sich mit  $y_\varnothing = N/2p = k/2p$  nach Bild 1.3.7 und mit (1.3.4) die Beziehungen

$$y_1 = \frac{k}{2p} + 1 \quad (1.3.15a)$$

$$y_2 = y_1 - m = \frac{k}{2p} - 1. \quad (1.3.15b)$$

Daraus folgt schließlich als Nebenbedingung

$$y_1 + y_2 = \frac{k}{p} \in \mathbb{G}. \quad (1.3.15c)$$

Mit  $p$  nach (1.3.5) und (1.3.13a) ist (1.3.15c) entsprechend

$$\frac{k}{p} = \frac{uN}{a/m} = 2\frac{N}{a} \in \mathbb{G}$$

tatsächlich erfüllbar. Das zeigt auch das Wicklungsbeispiel im Bild 1.3.11, Seite 138. Wegen  $y_1 \neq k/2p$  ist allerdings keine Durchmesserwicklung möglich. Mit (1.3.15c) gilt auch  $k \in \mathbb{G}$ , d. h. die zweigängigen, symmetrischen Schleifenwicklungen sind nach Unterabschnitt 1.3.1.3a stets zweifach geschlossen ( $t_s = 2$ ).

Für zweigängige Wellenwicklungen, bei denen  $m = a = 2$  ist, existiert mit  $N/a \in \mathbb{N}$  und  $2p/a = p \in \mathbb{U}$  im Nutenspannungsstern zu jedem Zeiger stets ein und nur ein um  $180^\circ$  verschobener Zeiger – stets, weil  $N \in \mathbb{G}$  ist, und nur, weil  $N \in \mathbb{G}$  und  $p \in \mathbb{U}$  keinen gemeinsamen Teiler  $a = 2$  haben und demzufolge der Nutenspannungsstern nur einen Zeigerkreis besitzt. Aus Gründen der Symmetrie muss die zu dem um  $180^\circ$  verschobenen Zeiger gehörende Nut in der Maschine diametral zur Nut des Ausgangszeigers liegen. Zur Erzielung einer  $180^\circ$ -Phasenverschiebung kann der Schritt zwischen einer Oberschichtspulenseite des einen und der entsprechenden Unterschichtspulenseite des anderen Gangs demnach nur  $k/2$  betragen. Nach (1.3.7) gilt für die ungekreuzte, zweigängige Wellenwicklung

$$\frac{k}{2} = 1 + y_r \frac{p}{2} = 1 + y_r \frac{p-1}{2} + \frac{y_r}{2} = 1 + y_r \frac{p-1}{2} + y_1.$$

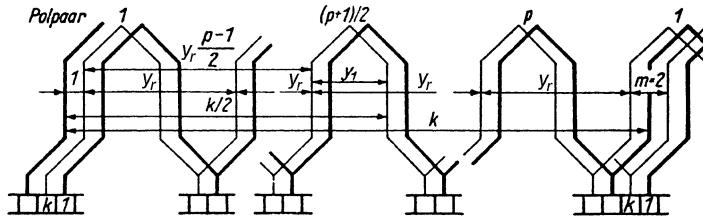


**Bild 1.3.8** Zur Herleitung der Nebenbedingung für die zweigängige, symmetrische Wellenwicklung mit  $p/2 \notin \mathbb{N}$

Die Umformung in dieser Beziehung ist deshalb erfolgt, weil der Schritt  $y_r p/2$  mit  $p/2 \notin \mathbb{N}$  in eine Reihe möglicher Teilschritte zerlegt werden muss. In diesem Sinne sind zur Erzielung des Schritts  $k/2$  die folgenden Teilschritte notwendig (s. Bild 1.3.8): Teilschritt 1 ergibt den Schritt in den anderen Gang; dann erfolgen  $(p-1)/2 \in \mathbb{N}$  resultierende Schritte  $y_r$  und zum Schluss der Spulenschritt  $y_1 = y_r/2$ . Damit ergibt sich als Nebenbedingung für die ungekreuzte, zweigängige, symmetrische Wellenwicklung mit  $2p/a = p \in \mathbb{U}$

$$y_1 = y_2 = \frac{y_r}{2} = \frac{k-2}{2p} \in \mathbb{N}. \quad (1.3.16)$$

Nach (1.3.16) ist auch in diesem Fall keine Durchmesserwicklung möglich. Wegen  $y_r \in \mathbb{G}$  und  $m = 2$  sind solche Wellenwicklungen stets zweifach geschlossen ( $t_s = 2$ , s. Abschn. 1.3.1.3b).

Die Nebenbedingungen für zweigängige, symmetrische Wicklungen mit  $p/a \notin \mathbb{N}$  garantieren für beide Gänge gleiche Spannungsvielecke. Daran ändert auch der Übergang zu  $u > 1$  nichts, sofern diese Werte aus anderen Gründen möglich sind und die Bedingungen nach (1.3.15a,b) und (1.3.15c) bzw. (1.3.16) eingehalten werden. Lediglich die Zahl der Einzelzeiger vervielfacht sich (s. Bild 1.3.11c,d,e). Die Beziehung (1.3.15a,b) erzwingt für  $u > 1$  getreppte Wicklungen. Für  $u \in \mathbb{G}$  mögliche ungetreppte Wicklungen degenerieren zu eingängigen Wicklungen (s. [1], Bd. II), da in diesem Fall beide Gänge sämtliche Nuten gemeinsam durchlaufen und sich damit wie ein Gang verhalten. Gilt für zweigängige Wellenwicklungen  $y_1 = y_2 = y_r/2 \in \mathbb{G}$ , so ermöglichen die Forderungen (1.1.19), Seite 18, und (1.3.8) im interessierenden Bereich nur  $u = 2$ , so dass die Wicklungen zu eingängigen, ungetreppten Wicklungen mit  $y_n = y_1/u \in \mathbb{N}$  degenerieren. Lediglich  $y_1 = y_2 = y_r/2 \in \mathbb{U}$  liefern mit den möglichen Werten  $u = 2$  und  $u = 4$  echte zweigängige, getreppte Wicklungen.

Das Spannungsvieleck im Bild 1.3.11 verdeutlicht den Sinn der Nebenbedingungen für die zweigängigen, symmetrischen Wicklungen mit  $p/a \notin \mathbb{N}$ . Bei diesen Wicklungen gibt es nämlich keine phasengleichen Spulenspannungen. Das erkennt man an den Spulenspannungszeigern, die unter Andeutung der beiden Zeiger der Spulenseitenspannungen als ‚geknickte‘ Zeiger dargestellt sind. Zu den hergeleiteten Nebenbedingungen führt die Tatsache, dass die genannten Wicklungen nur dann symmetrisch sind, wenn die Spannungen aller im Wicklungszug aufeinander folgenden Spulenseiten unabhängig von ihrer Spulenzugehörigkeit gleiche Phasenverschiebung besitzen. Dann existieren wenigstens phasengleiche Spulenseitenspannungen.

Bei vollkommen symmetrischen Wicklungen bilden alle Wicklungszweige deckungsgleiche Spannungsvielecke.

### c) Teilsymmetrie von Schleifenwicklungen

Der vorangehende Unterabschnitt hat gezeigt, dass mehrgängige Schleifenwicklungen nur mit  $m = 2$  vollkommen symmetrisch ausführbar sind. Diese Bedingungen führen nicht nur zu einer bedeutenden Einschränkung des Anwendungsbereichs mehrgängiger Schleifenwicklungen, sondern auch zu unerwünschten Eigenschaften der Wicklungen. Mit  $m = 2$  und (1.3.5) sowie (1.3.13a) wird der Ausdruck

$$\frac{N}{p} = m \frac{N}{a} \in \mathbb{G}$$

geradzahlig. Das führt zu ungünstigen Eigenschaften in Bezug auf entstehende Oberschwingungen der Spannungen und Ströme. Bedenkt man jedoch, dass eine vollkommene Symmetrie in der Praxis ohnehin nie existiert, so kann man kleine Abweichungen von der idealen Symmetrie durchaus zulassen, wobei sich die Möglichkeit anbietet, den Anwendungsbereich zweigängiger Schleifenwicklungen erheblich zu erweitern.

In der Praxis begnügt man sich deshalb bei der Bemessung von Schleifenwicklungen in vielen Fällen mit der Einhaltung von Teilsymmetrien. Eine solche Teilsymmetrie ist die Symmetrie innerhalb eines Gangs. Der Gang umfasst  $2a/m = 2p$  parallele Zweige, d. h.  $a/m = p$  parallele Kreise bzw. Spannungsvielecke, die deckungsgleich sein müssen. Außerdem ist wenigstens die gleiche Spulenzahl je parallelem Kreis erforderlich. Das führt zu den Bedingungen

$$\frac{N}{p} \in \mathbb{U} \quad (1.3.17a)$$

$$\frac{k}{a} \in \mathbb{N}, \quad (1.3.17b)$$

wobei wie gewünscht  $N/p$  ungeradzahlig und die nach diesen Bedingungen bemessene Wicklung eine getrepte Wicklung sein muss. Für geradzahliges  $N/p$  ergäbe sich mit  $m = 2$  wegen  $N/a \in \mathbb{N}$  eine symmetrische Wicklung. Nach  $k/a = uN/2p$  kann sich nur mit geradzahligem Wert von  $u$  ein ganzzahliger Ausdruck ergeben. Ein geradzahliger Wert von  $u$  führt aber nur dann nicht dazu, dass die Wicklung zu einer eingängigen Wicklung degeneriert, wenn die Wicklung als getrepte Wicklung entworfen wird. Das bedeutet  $y_1 \in \mathbb{U}$ . Mit  $k/a = k/2p \in \mathbb{N}$  wird  $k \in \mathbb{G}$  und  $t_s = 2$ .

Will man mit  $u \in \mathbb{U}$  teilsymmetrische Wicklungen ausführen, so wird bei  $N/p \in \mathbb{U}$  lediglich  $k/p = uN/p \in \mathbb{U}$ , d. h.  $k/a = k/2p \notin \mathbb{N}$ . Damit ergeben sich die Bedingungen

$$\frac{N}{p} \in \mathbb{U} \quad (1.3.18a)$$

$$\frac{k}{p} \in \mathbb{U} \quad (1.3.18b)$$

für zweigängige Schleifenwicklungen mit oft ausreichender Teilsymmetrie. Aufgrund der Bedingung  $N/p \in \mathbb{U}$  ergeben sich auch hier  $p$  deckungsgleiche Spannungsvielecke. Da aber die Zahl der Spulen je parallelem Kreis  $k/a$  ein Bruch mit dem Nenner 2 ist, bilden jeweils zwei parallele Kreise ein verschlungenes Vieleck. Mit  $k/p \in \mathbb{U}$  wird für  $p \in \mathbb{G}$  der Wert  $t_s = 2$  und für  $p \in \mathbb{U}$  der Wert  $t_s = 1$ . Bei teilsymmetrischen Wicklungen bestehen zwischen den parallelen Kreisen bzw. Gängen noch mehrere Punkte, zwischen denen keine Spannungsdifferenz besteht.

Diese Punkte sind im Spannungsvieleck erkennbar. Gilt schließlich die Bedingung

$$\frac{N}{p} \notin \mathbb{N}, \quad (1.3.19)$$

existieren nur so viele deckungsgleiche Spannungsvielecke, wie der größte gemeinsame Teiler von  $N$  und  $p$  angibt. Sind  $N$  und  $p$  teilerfremd, gibt es im Nutenspannungsstern keine phasengleichen Zeiger und zwischen den parallelen Kreisen bzw. Gängen keine Punkte ohne Spannungsdifferenz mehr. Die Wicklung ist trotz Schaltungssymmetrie dadurch völlig unsymmetrisch.

Die Wicklungsgesetze symmetrischer (auch teilweise symmetrischer) Kommutatorwicklungen sind in Tabelle 1.3.2 zusammengefasst dargestellt.

### 1.3.1.5 Ausgleichsverbindungen

Die im vorhergehenden Abschnitt durchgeführte Herleitung von Symmetriebedingungen ist unter der Voraussetzung erfolgt, dass unter allen Polpaaren die gleiche Flussdichteverteilung herrscht. Diese vollkommene Symmetrie des magnetischen Felds existiert in der Praxis ebensowenig wie eine vollkommene elektrische Symmetrie der Wicklungen. Magnetische Unsymmetrien führen zu ungleichen Zweigspannungen und damit zu inneren Ausgleichsströmen, die sich über gleichpolige Bürsten schließen. Dadurch werden die durch den Stromwendevorgang und den Stromübergang bereits stark beanspruchten Bürstenkontakte noch mehr belastet. Derartige Ausgleichsströme sind deshalb unerwünscht.

Bild 1.3.9 soll das Entstehen von Ausgleichsströmen verdeutlichen. Ursache für die Feldunsymmetrie ist dabei ein exzentrisch gelagerter Anker. Aufgrund der magnetischen Widerstandsverhältnisse führt der Pol 1 den stärksten und der Pol 3 den schwächsten Fluss. Nimmt man gleichen Fluss für die Pole 2 und 4 an, so sind, wie aus dem Wicklungsschema im Bild 1.3.9 hervorgeht, die beiden Zweigspannungen  $u_{12}$  und  $u_{41}$  und die beiden Zweigspannungen  $u_{23}$  und  $u_{34}$  gleich groß, da die Leiter der Zweige, in denen jeweils die gleichen Spannungen auftreten, einesteils in gleicher Zahl entweder unter dem Pol 2 oder dem Pol 4 und andernteils unter einem Pol gemeinsam liegen. Für die Spannungen  $u_{12}$  und  $u_{41}$  ist der gemeinsame Pol der Pol 1 und für die Spannungen  $u_{23}$  und  $u_{34}$  der Pol 3. Deshalb sind die beiden Spannungen  $u_{12}$  und  $u_{41}$  größer als die beiden Spannungen  $u_{23}$  und  $u_{34}$ . Im Bild 1.3.9 sind mögliche Richtungen für die Ströme angegeben, die die Spannungen anzutreiben versuchen. Es ist klar zu erkennen, dass die beiden größeren Spannungen gegen die beiden kleineren Spannungen einen Ausgleichsstrom  $i_{ag}$  antreiben, der über die beiden Bürsten gleicher Polarität 1 und 3 fließt. In dem über die Bürsten 2 und 4 führenden Kreis kompensieren sich je zwei gleich große und entgegengesetzte Zweigspannungen. In diesem Kreis fließt kein Ausgleichsstrom.

#### a) Ausgleichsverbindungen erster Art

Ordnet man die im Bild 1.3.9 als Ausgleichsverbindung erster Art angegebene Kurzschlussverbindung an, so fließt der Ausgleichsstrom  $i_{ag}$  vorwiegend über diese Verbindung. Da sich die Wicklung relativ zu den Bürsten bewegt, müssen solche Verbindungen an mehreren Stellen der Wicklung vorgesehen werden, damit sich immer eine Verbindung in der Nähe der Bürsten 1 und 3 befindet, um den Ausgleichsstrom übernehmen zu können. Diese sog. Ausgleichsverbindungen erster



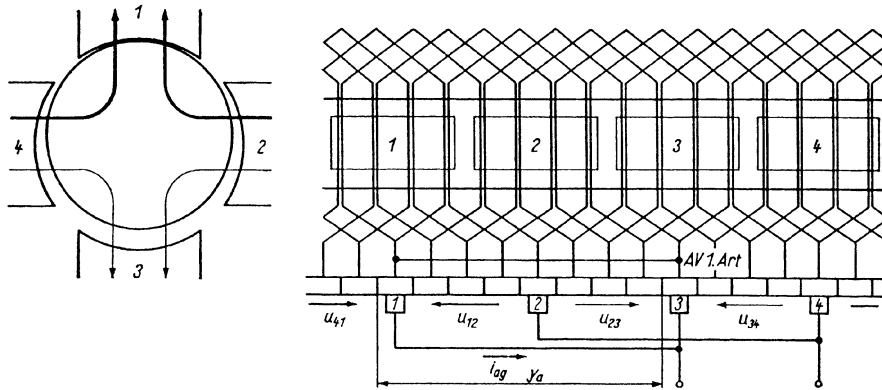


**Bild 1.3.9** Zur Entstehung von Ausgleichsströmen durch Feldunsymmetrien

Art, die praktisch alle mehr oder weniger an der Leitung des Ausgleichstroms beteiligt sind, entlasten also die Bürsten von den durch magnetische Unsymmetrien innerhalb der einzelnen Gänge verursachten Ausgleichsströmen. Sie dürfen natürlich die normale Funktion der Wicklung nicht stören und deshalb nur solche Punkte der Wicklung bzw. des Kommutators verbinden, zwischen denen theoretisch keine Spannungsdifferenz besteht. Solche Punkte ohne Spannungsdifferenz können innerhalb eines Ganges nur dann auftreten, wenn der Gang mehrere parallele Kreise besitzt. Das ist nur bei Schleifenwicklungen der Fall. Deshalb sind Ausgleichsverbindungen erster Art nur für Schleifenwicklungen möglich und auch notwendig. Außerdem existieren nur innerhalb vollkommen oder teilweise symmetrischer Wicklungen Punkte, zwischen denen keine Spannungsdifferenz besteht (vgl. Spannungsvielecke in den Bildern 1.3.10 u. 1.3.11).

Punkte, zwischen denen keine Spannungsdifferenz besteht, befinden sich am Kommutator genau um so viele Stege entfernt, wie auf ein Polpaar entfallen. Zu diesen Punkten zählen auch gleichpolige Bürsten. Demnach beträgt der Schritt der Ausgleichsverbindungen erster Art

$$y_{a1} = \frac{k}{p}. \quad (1.3.20)$$

Sollen dabei tatsächlich nur Stege desselben Ganges verbunden werden, so muss  $y_{a1}$  durch die Gangzahl  $m$  entsprechend

$$\frac{y_{a1}}{m} = \frac{k}{mp} \in \mathbb{N} \quad (1.3.21)$$

ganzzahlig teilbar sein. Für Wellenwicklungen ist die Anordnung von Ausgleichsverbindungen innerhalb eines Ganges wegen des Fehlens paralleler Kreise nicht möglich und auch nicht notwendig, da jeder Wicklungszweig alle Polpaare durchläuft, wodurch die Auswirkungen ungleicher Polflüsse bereits innerhalb des Zweigs ausgeglichen werden (s. Bild 1.3.12).

Die Ausgleichsverbindungen erster Art haben entweder die Form normaler Zweischichtwicklungsköpfe wie im Bild 1.3.10 oder die Form von Ringverbindungen wie im Bild 1.3.11. Sie werden normalerweise unter den Wicklungsköpfen der Kommutatorwicklung angeordnet. Die Bilder 1.3.10 und 1.3.11 zeigen, dass bei allen

vollkommen symmetrischen und auch bei teilweise symmetrischen, zweigängigen Schleifenwicklungen Ausgleichsverbindungen erster Art möglich sind. Aus den Spannungsvielecken ist zu erkennen, wie durch die Ausgleichsverbindungen erster Art Punkte innerhalb der einzelnen Gänge, zwischen denen keine Spannungsdifferenz besteht, miteinander verbunden werden.

#### **b) Ausgleichsverbindungen zweiter Art**

Die Parallelschaltung der einzelnen Gänge einer mehrgängigen Wicklung erfolgt über die Bürsten. Auch hierbei fließen durch Unsymmetrien verursachte Ausgleichsströme über die Bürsten. Um die Bürsten von diesen Ausgleichsströmen zu entlasten, verbindet man deshalb Punkte der verschiedenen Gänge, zwischen denen theoretisch keine Spannungsdifferenz besteht, durch Ausgleichsverbindungen zweiter Art miteinander. Bei mehrfach geschlossenen Wicklungen werden die einzelnen in sich geschlossenen Wicklungsteile durch die Ausgleichsverbindungen zweiter Art unmittelbar galvanisch miteinander verbunden. Diese Ausgleichsverbindungen legen damit die Spannungsverteilung der sonst getrennten Wicklungsteile zueinander fest.

Für Schleifenwicklungen, die die Bedingung (1.3.21) erfüllen, liegen die Punkte, zwischen denen keine Spannungsdifferenz besteht, auf derselben Ankerseite (z. B. der Kommutatorseite) innerhalb desselben Gangs. Punkte verschiedener Gänge ohne Spannungsdifferenz müssen demnach auf verschiedenen Seiten des Ankers liegen, und die Ausgleichsverbindungen zweiter Art müssen unter dem Blechpaket des Ankers hindurchgeführt werden. Solche Ausgleichsverbindungen nennt man auch *Pungaverbindungen*. Das Hindurchführen unter dem Blechpaket des Ankers ist notwendig, damit das Luftspaltfeld in den Ausgleichsverbindungen keine Spannung induziert. Da nach Abschnitt 1.3.1.4 von den mehrgängigen Schleifenwicklungen nur zweigängige symmetrisch sind, braucht nur dieser Fall untersucht zu werden. Für  $m = 2$  resultiert aus (1.1.19), Seite 18, (1.3.5) und (1.3.21) die Bedingung

$$\frac{y_{a1}}{2} = \frac{k}{2p} = \frac{k}{a} = \frac{uN}{2p} = u \frac{N}{a} \in \mathbb{N}. \quad (1.3.22)$$

Pungaverbindungen lassen sich demzufolge für vollkommen symmetrische Schleifenwicklungen ( $N/a \in \mathbb{N}$ , s. Bild 1.3.11) und für teilsymmetrische Wicklungen mit  $k/a \in \mathbb{U}$  ausführen. In diesen Fällen ist der Schritt der Ausgleichsverbindungen zweiter Art, wie er sich aus den Spannungsvielecken ergibt,  $y_{a2} = 0$ . Bei teilsymmetrischen Wicklungen mit  $k/a \in \mathbb{N}$  ist die Bedingung (1.3.22) nicht erfüllt. Die Ausgleichsverbindungen zweiter Art liegen dann auf einer Seite des Ankers und können mit den Ausgleichsverbindungen erster Art kombiniert werden.

Für Wellenwicklungen ergibt sich aus (1.3.8), dass  $k/p = y_r \pm m/p$  nur im Sonderfall  $m/p \in \mathbb{N}$  ganzzahlig ist, d. h. dass i. Allg. – von einem Ausgangssteg gerechnet – an der um  $k/p$  entfernten Stelle, zu der keine Spannungsdifferenz besteht, kein Steg liegt. Man muss dann  $g$ -mal  $k/p$  Schritte gehen, um auf einen Steg zu treffen, zu dem der Ausgangssteg keine Spannungsdifferenz hat. Soll bei einer ungekreuzten Wellenwicklung dieser Steg zum nächsten Gang gehören, dann muss man vom Ausgangssteg im ersten Gang  $g$ -mal den resultierenden Schritt  $y_r \approx k/p$  entsprechend (1.3.8) gehen und noch einen Steg weiter, um zum genannten Steg des nächsten Gangs zu kommen. Damit ist der zurückgelegte Weg der Schritt der

Ausgleichsverbindung zweiter Art einer symmetrischen Wellenwicklung

$$y_{a2} = g \frac{k}{p} = y_r g + 1 = g \frac{k}{p} - g \frac{m}{p} + 1.$$

Hieraus ergibt sich  $g = p/m \in \mathbb{N}$ , und der Schritt der Ausgleichsverbindung wird

$$y_{a2} = \frac{k}{m}. \quad (1.3.23)$$

Für die zweigängige Wellenwicklung gilt  $y_{a2} = k/2$ . Die Voraussetzung  $p/m = p/2 \in \mathbb{N}$  wird nur von geraden Polpaarzahlen erfüllt. Die Ausgleichsverbindungen liegen auf einer Ankerseite.

Zweigängige Wellenwicklungen mit ungerader Polpaarzahl sind nach Unterabschnitt 1.3.1.4b nur symmetrisch, wenn entsprechend (1.3.16)  $y_1 = y_2 = y_r/2$  ist. Für diesen Sonderfall folgt aus der gleichen Betrachtung, die gerade für zweigängige Wellenwicklungen mit gerader Polpaarzahl angestellt wurde, dass entsprechend

$$y_{a2} = g \frac{k}{p} = y_1 2g + 1 = g \frac{k}{p} - 2g \frac{1}{p} + 1$$

$2g = p \in \mathbb{U}$  wird. Mit  $y_{a2} = k/2$  gilt ebenfalls (1.3.23). Für  $g$  ergibt sich ein Bruch mit dem Nenner 2. Die Ausgleichsverbindung zweiter Art führt also nicht zum Anfang, sondern in die Mitte der übernächsten Spule der Wellenwicklung und damit auf die andere Seite des Ankers. Es liegt also eine Pungaverbindung vor. Zählt man  $y_a = k/2$  Stege auf der Kommutatorseite ab, so kommt man in ein Gebiet entgegengesetzter Polarität.

Außer den Ausgleichsverbindungen erster und zweiter Art gibt es noch *Ausgleichsverbindungen dritter Art*. Sie haben die Aufgabe, die Induktivität kommutierender Wicklungsteile zu verkleinern. Das wird durch eine Spulenteilung erreicht, indem man eine Ausgleichsverbindung von der Spulenmitte zu einem Steg führt, der zwischen den beiden zu den Spulenseiten gehörenden Stegen liegt. Solche Ausgleichsverbindungen kommen nur bei Schleifenwicklungen vor. Als Pungaverbinder ausgeführte Ausgleichsverbindungen zweiter Art wirken gleichzeitig als Ausgleichsverbindungen dritter Art (s. Bild 1.3.11). Bei teilsymmetrischen Schleifenwicklungen mit  $k/p \in \mathbb{U}$  sind keine Ausgleichsverbindungen dritter Art möglich.

### 1.3.2 Wicklungsentwurf

Wegen der vollkommenen Schaltungssymmetrie normaler Kommutatorwicklungen, die auch nicht durch die Notwendigkeit einer Strangaufteilung gestört wird, stellt der Entwurf solcher Wicklungen nach gegebenen Kennwerten ( $N, k, m, p, w_{sp}$ ) kein Problem dar. Natürlich müssen diese Kennwerte entsprechend den geltenden Wicklungsgesetzen ausführbar sein.

Der Entwurf symmetrischer Kommutatorwicklungen besteht lediglich darin, nach den gegebenen Kennwerten entsprechend (1.3.1), (1.3.3), (1.3.4), (1.3.6) und (1.3.8) die Spulenschritte zu berechnen bzw. zu wählen. Eine Kontrolle der Symmetriebedingungen (s. Abschn. 1.3.1.4) entscheidet, ob dabei Nebenbedingungen entsprechend (1.3.15a,b) und (1.3.16) zu beachten sind. Im Folgenden wird dies anhand von zwei Beispielen näher ausgeführt. Beispiele für mehrgängige, selbstausgleichende, teilsymmetrische oder unsymmetrische Wicklungen sowie

Kommutatorwicklungen für Mehrphasenbetrieb sind in dieser Auflage aufgrund der gesunkenen Bedeutung von großen Kommutatormaschinen nicht mehr enthalten. Sie können bei Bedarf Auflage 6 entnommen werden.

**a) Ungekreuzte, eingängige, getreppte Schleifenwicklung mit  $N/a \in \mathbb{G}$**

Im Bild 1.3.10 ist das Wicklungsbeispiel mit

$$N = 12, p = 2, u = 3, k = 36, m = 1$$

dargestellt. Aus diesen Kennwerten ergibt sich unmittelbar

$$a = mp = 2, y_r = m = 1, y_{a1} = \frac{k}{p} = 18, t_s = 1.$$

Die Kontrolle der Symmetrie zeigt, dass entsprechend

$$\frac{N}{a} = 6 \in \mathbb{N}, \frac{p}{a} = 1$$

eine vollkommen symmetrische Wicklung vorliegt. Es müssen also keine Nebenbedingungen für die Teilschritte beachtet werden. Da eine getreppte Wicklung entstehen soll, wird der erste Teilschritt bei möglichst geringer Abweichung von  $k/2p$  zu  $y_1 = 10$  entsprechend  $y_n = 3^{1/3}$  gewählt. Für den zweiten Teilschritt ergibt sich damit  $y_2 = y_1 - y_r = 9$ .

Zum Entwurf der Wicklung fasst man für die Ober- und die Unterschicht jeder der  $N = 12$  Nuten die je  $u = 3$  in ihr nebeneinanderliegenden Spulenseiten zusammen. Mit Hilfe der Teilschritte  $y_1 = 10$  und  $y_2 = 9$ , die man an den nebeneinanderliegenden Spulenseiten abzählt, kann man nun die Einzelspulen des Wicklungsschemas einzeichnen und zur Wicklung aneinander fügen. An den Verbindungspunkten der Spulen sind die  $k = 36$  Kommutatorstege anzuordnen. Die Bezifferung der Stege erfolgt nach der zugehörigen Oberschichtspulenseite (linke Spulenseite). Eingängige Schleifenwicklungen benötigen Ausgleichsverbindungen erster Art, deren Schritt entsprechend (1.3.20)  $y_{a1} = 18$  beträgt. Im Beispiel sind die Ausgleichsverbindungen in Form der üblichen Zweischichtwicklungsköpfe angeordnet. Je Nut ist eine Ausgleichsverbindung vorgesehen.

Es ist üblich, die Wicklungsschemata als Stabwicklung darzustellen, d. h. nur mit einer Windung je Spule. So ist auch in den bisherigen Beispielen verfahren worden. Natürlich gelten diese Schemata auch für Spulenwicklungen mit  $w_{sp} > 1$ . Die besondere Kennzeichnung der Nuten durch Zusammenfassung der Spulenseiten (s. Bild 1.3.10a) erfolgt meistens nicht. Üblicherweise werden die Spulenseiten dabei gleichmäßig nebeneinander angeordnet.

Wegen  $N/p \in \mathbb{N}$  hat der Nutenspannungsstern im Bild 1.3.10b  $p = 2$  Zeigerkreise mit  $N/p = 6$  Zeigerstrahlen. Die der Wicklungsschaltung entsprechende Aneinanderreihung der Nutenspannungszeiger ergibt ein zentralsymmetrisches Spannungsvieleck, da  $N/a \in \mathbb{G}$  ist (s. Bild 1.3.10c). Jeder Zeiger im Spannungsvieleck ist ein Spulenspannungszeiger, der sich aus den beiden gleich großen Spulenseitenanteilen zusammensetzt, wobei negative Teilzeiger (linke Spulenseiten) umgeklappt sind. Für Durchmesserspulen mit ( $y_n = N/2p = 3$ ) ist dieser Zeiger gestreckt, für alle übrigen Spulen (z. B. Spule 3) geknickt. Die Teilvielecke der beiden parallelen Kreise sind deckungsgleich und gehen ineinander über ( $t_s = 1$ ). Es ist gut zu erkennen, dass die Ausgleichsverbindungen erster Art Punkte beider Spannungsvielecke miteinander

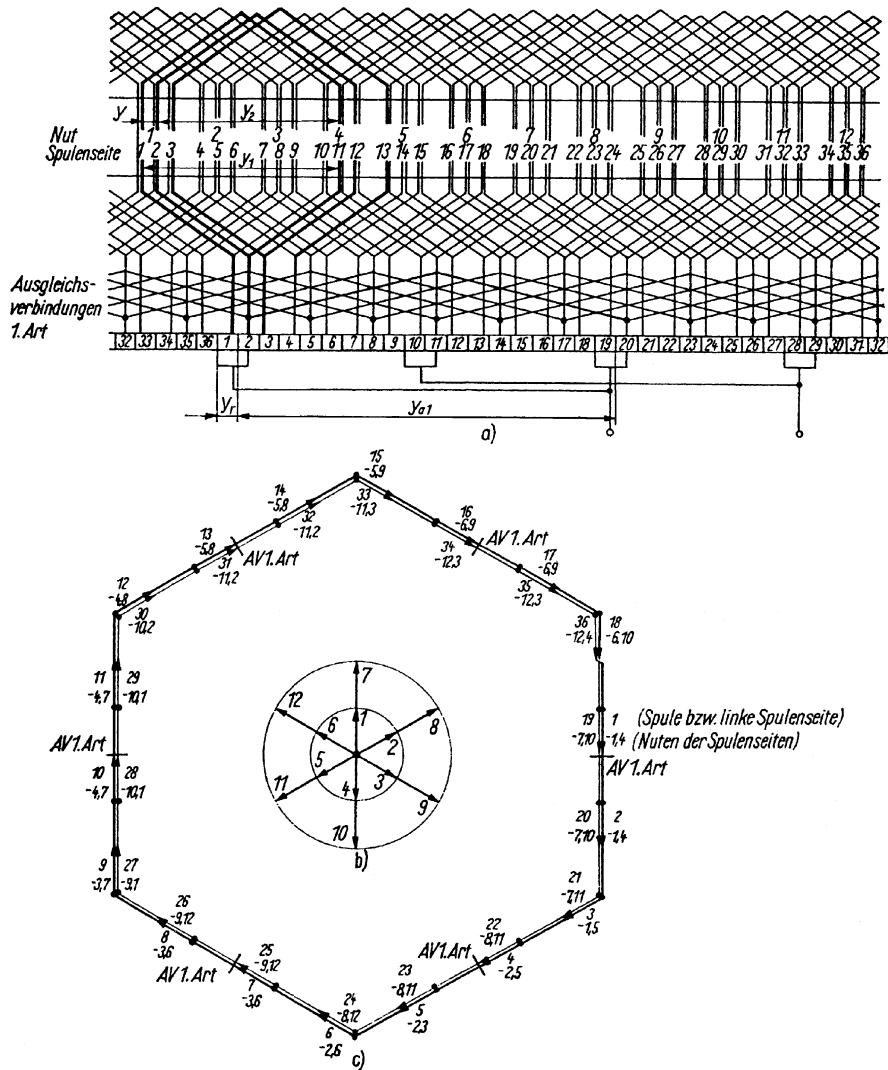


**Bild 1.3.10** Ungekreuzte, eingängige, getreppte Schleifenwicklung für  $p = 2$ ,  $N = 12$ ,  $u = 3$ ,  $k = 36$ ,  $m = 1$ ,  $a = 2$ ,  $y_r = 1$ ,  $y_1 = 10$ ,  $y_n = 3^{1/3}$ ,  $y_2 = 9$ ,  $y_{a1} = 18$ . a) Wicklungsschema; b) Nutenspannungsstern; c) Spannungsvieleck

verbinden, zwischen denen keine Spannungsdifferenz besteht, z. B. die Kommutatorstege 2 und 20 und damit den Beginn der Spulenspannungszeiger 2 und 20.

### b) Ungekreuzte, zweigängige Schleifenwicklung mit Nebenbedingungen

Im Bild 1.3.11 ist das Wicklungsbeispiel mit

$$N = k = 24, p = 2, u = 1, m = 2$$

dargestellt. Aus diesen Kennwerten ergibt sich unmittelbar

$$a = mp = 4, y_r = m = 2, y_{a1} = \frac{k}{p} = 12, t_s = 2.$$

Die Kontrolle der Symmetrie

$$\frac{N}{a} = 6 \in \mathbb{N}, \quad \frac{2p}{a} = 1$$

zeigt, dass die Wahl der Schritte an die Nebenbedingungen (1.3.15a,b) bzw. (1.3.15c)

$$y_1 = \frac{k}{2p} + 1 = 7, \quad y_2 = \frac{k}{2p} - 1 = 5$$

geknüpft ist. Da nach (1.3.22)

$$\frac{y_{a1}}{m} = \frac{k}{mp} = \frac{k}{2p} = 6 \in \mathbb{N}$$

ist, müssen die Ausgleichsbedingungen zweiter Art als Pungaverbindungen ( $y_{a2} = 0$ ) ausgeführt werden (s. Bild 1.3.11a). Sie wirken damit gleichzeitig als Ausgleichsverbindungen dritter Art. Die Ausgleichsverbindungen erster Art sind als Ringverbindungen ausgeführt. Wegen  $N/p = 12 \in \mathbb{N}$  hat der Nutenspannungsstern im Bild 1.3.11b  $p = 2$  Zeigerkreise und  $N/p = 12$  Zeigerstrahlen. Da  $t_s = 2$  ist, bildet jeder Gang ein eigenes Spannungsvieleck, das zweimal durchlaufen wird (s. Bild 1.3.11c). Man erkennt, dass die Ausgleichsverbindungen zweiter bzw. dritter Art als Pungaverbinder Spulenanfänge des einen Gangs mit den Spulennitten des anderen Gangs verbinden, zu denen keine Spannungsdifferenz besteht, z. B. den Anfang der Spule 6 mit der Mitte der Spule 5.

Bild 1.3.11d zeigt das Spannungsvieleck eines Polpaars ( $N = 12$ ) der behandelten Wicklung für  $u = 2$  mit  $y_1 = k/2p + 1 = 24/2 + 1 = 13$  und Bild 1.3.11e für  $u = 3$  mit  $y_1 = 36/2 + 1 = 19$ .

### c) Ungekreuzte, eingängige Wellenwicklung

Es wird das Wicklungsbeispiel mit

$$N = k = 19, p = 2, u = 1, m = 1$$

betrachtet. Nach (1.3.8) müssen für  $p = 2$  und  $m = 1$  sowohl  $N$  als auch  $k$  und  $u$  ungeradzahlig sein. Das wird durch die gegebenen Werte erfüllt. Außerdem ergibt sich  $a = m = 1$  und  $y_r = (k - 1)/p = 9$ . Entsprechend  $k/2p = 19/4$  wird  $y_1 = 5$  und  $y_2 = 4$  gewählt (s. Bild 1.3.12). Eingängige Wellenwicklungen haben nur einen parallelen Kreis ( $a = m = 1$ ). Schaltungssymmetrische, eingängige Wellenwicklungen sind deshalb auch elektrisch symmetrisch. Eine Symmetriekontrolle sowie die Aufzeichnung des Spannungsvielecks sind nicht nötig.

## 1.3.3 Wicklungsdimensionierung

Ziel der Dimensionierung einer Kommutatorwicklung ist die Ermittlung der Wicklungskennwerte, mit denen sich die zur Energieumwandlung bei gegebener Spannung notwendige Windungszahl realisieren lässt. Damit verbunden ist die Wahl der Art bzw. der Schaltung der Wicklung. Streng genommen gehört zur Wicklungsdimensionierung auch noch die Ermittlung der Leiterabmessungen. Das erfolgt nach dem zulässigen Wert der Stromdichte und den vorliegenden Nutabmessungen.

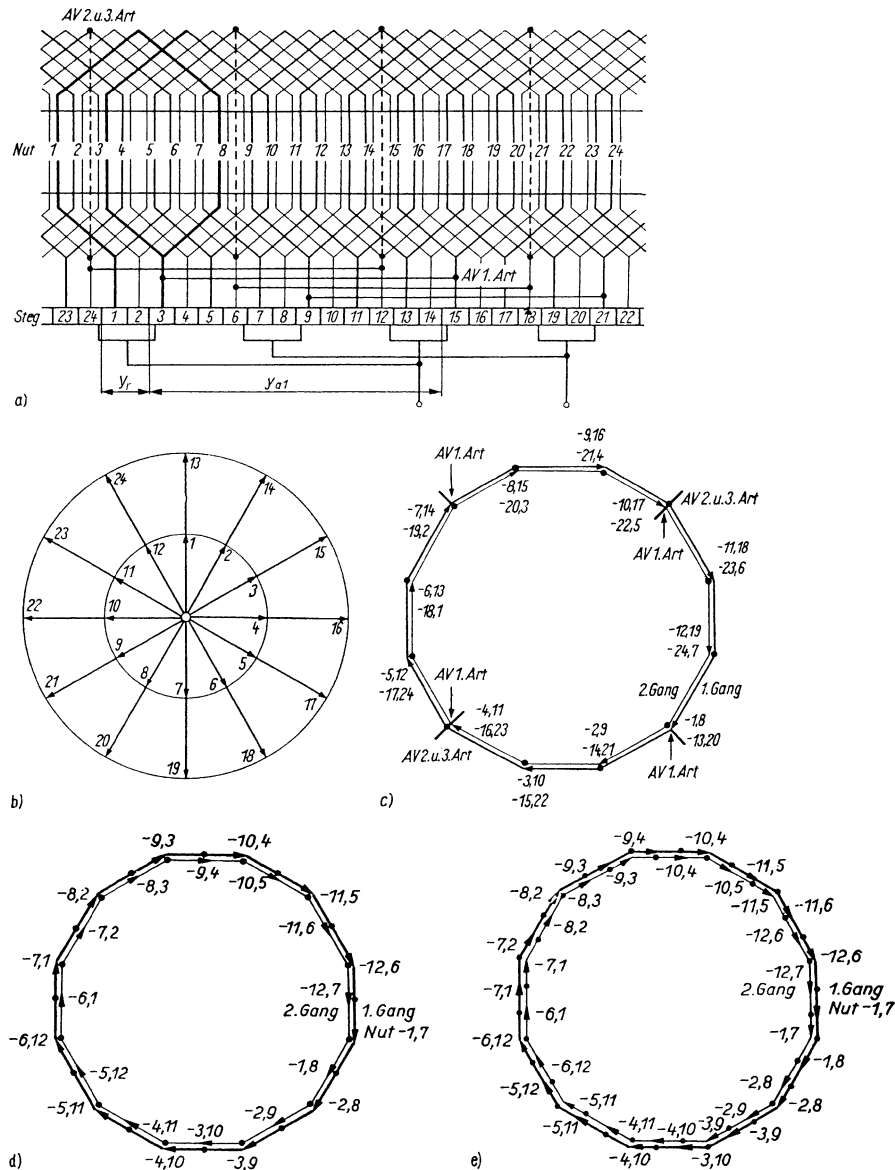


**Bild 1.3.11** Ungekreuzte, zweigängige Schleifenwicklung für  $p = 2, N = k = 24, u = 1, m = 2, a = 4, y_r = 2, t_s = 2, y_1 = y_n = 7, y_2 = 5, y_{a1} = 12, y_{a2} = 0$ . a) Wicklungsschema; b) Nutenspannungsstern; c) Spannungsvieleck; d) Spannungsvieleck für  $p = 1, k = 24, u = 2, y_1 = 13$ ; e) Spannungsvieleck für  $p = 1, k = 36, u = 3, y_1 = 19$

### 1.3.3.1 Dimensionierungsbeziehungen

Die Dimensionierung einer Kommutatorwicklung wird ebenso wie die der Strangwicklungen durch die in der Wicklung zu induzierende Spannung bestimmt. Die hierfür maßgebenden Beziehungen sind im Band *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschnitt 1.6.5, hergeleitet worden. Für Gleichstrommaschinen, deren Bürsten

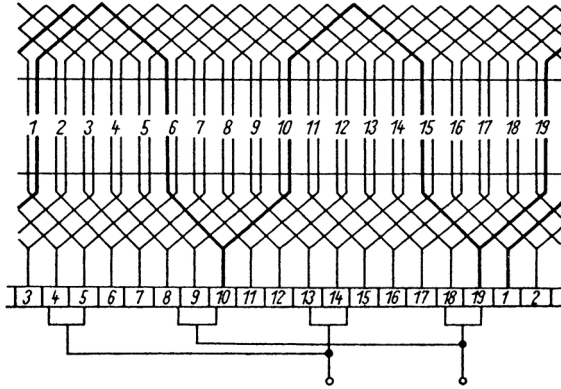


**Bild 1.3.12** Ungekreuzte, eingängige Wellenwicklung für  $p = 2$ ,  $N = k = 19$ ,  $u = 1$ ,  $m = 1$ ,  $a = 1$ ,  $y_r = 9$ ,  $y_1 = y_n = 5$ ,  $y_2 = 4$

sich in Durchmesserstellung befinden, ist der im Band *Theorie elektrischer Maschinen* definierte Fluss  $\Phi_B$  durch die Bürstenebene gleich dem Luftspaltfluss  $\Phi_\delta$  (s. Abschn. 2.3.1, S. 169). Damit geht die Beziehung für die über den Bürsten beobachtete Spannung (s. Bd. *Grundlagen elektrischer Maschinen*, Abschn. 3.3.2) über in

$$E = -4wnp\Phi_\delta. \quad (1.3.24)$$

Bei einer Einphasen-Reihenschlussmaschine (s. Bd. *Grundlagen elektrischer Maschinen*, Abschn. 7.4.2) induziert das Längsfeld, das vom Strom der Erregerwicklung auf den ausgeprägten Polen des Ständers aufgebaut wird und die Amplitude  $\hat{\Phi}_d$  besitzt, mit der Frequenz des erregenden Ständerstroms eine Rotationsspannung. Für deren Effektivwert gilt

$$E_r = \frac{4}{\sqrt{2}}wnp\hat{\Phi}_d. \quad (1.3.25)$$

Aus den Bemessungsdaten der Maschinen ergeben sich die Werte für die induzierten Spannungen  $E$  bzw.  $E_r$  und für die Drehzahl  $n$ . Die Festlegung der Polpaarzahl  $p$  und des Flusses  $\Phi$  geschieht beim Entwurf der Maschine. Damit ist auch die Windungszahl  $w$  eines Zweigs der Kommutatorwicklung bestimmt. Andererseits errechnet sich die Zweigwindungszahl durch Division der gesamten Ankerwindungszahl  $w_a$  durch die Zahl  $2a$  der parallelen Zweige. Mit (1.1.18), Seite 18, ergibt sich damit die Entwurfsgleichung für Kommutatorwicklungen

$$w = \frac{w_a}{2a} = \frac{z_a}{4a} = \frac{kw_{sp}}{2a}. \quad (1.3.26)$$

Durch entsprechende Wahl der Wicklungskennwerte  $k$ ,  $w_{sp}$  und  $a$  muss entsprechend (1.3.26) die nach (1.3.24) oder (1.3.25) geforderte Windungszahl  $w$  realisiert werden. Das Verhältnis der gewählten Zahl der parallelen Zweige  $2a$  zur bereits beim Maschinenentwurf bestimmten Polpaarzahl legt dabei auch die Schaltung der Wicklung als Schleifenwicklung oder Wellenwicklung fest.

### 1.3.3.2 Wahl der Wicklung

#### a) Gleichstrommaschinen

Die Wahl der Spulen- bzw. Stegzahl  $k$  unterliegt bestimmten Grenzbedingungen. Die obere Grenze ist durch die kleinstmögliche Kommutatorstegteilung  $\tau_{k,\min}$ , die untere durch die höchste zulässige Stegspannung  $u_{\text{st,zul}}$  bzw. einen unteren Erfahrungswert gegeben, der einen erträglichen Gehalt an Stegoberschwingungen (s. Abschn. 1.3.1.1, S. 116) ergibt. Dieser Erfahrungswert beträgt bei größeren Maschinen 20 bis 30 Stege je Pol. Er tritt besonders bei kleinen Bemessungsspannungen in Erscheinung. Mit der Beziehung für die mittlere Stegspannung, die man dadurch erhält, dass die Klemmenspannung  $U$  über  $k/2p$  Stegen liegt, d. h. mit

$$u_{\text{st}} = \frac{U}{k/2p} \quad (1.3.27)$$

sowie der Beziehung für die Kommutatorstegteilung

$$\tau_k = \frac{D_k \pi}{k} \quad (1.3.28)$$

ergibt sich als Bestimmungsgleichung für die Stegzahl

$$\left. \begin{array}{l} \frac{2pU}{u_{\text{st,zul}}} \\ \text{bzw. } (20 \dots 30)2p \end{array} \right\} \leq k \leq \frac{D_k \pi}{\tau_{k,\min}}. \quad (1.3.29)$$

Für den Kommutatordurchmesser  $D_k$  finden sich Angaben im Abschnitt 9.2.2.3, Seite 553, entsprechend (9.2.1a,b). Zulässige Werte der Stegspannung sind

$u_{\text{st,zul}} = 20$  bis  $25$  V für kleinere und mittlere Maschinen,

$u_{\text{st,zul}} = 16$  V für große unkomensierte Maschinen,

$u_{\text{st,zul}} = 20$  V für große komensierte Maschinen.

Wie noch gezeigt werden wird, sind höhere Werte der Stegspannung mit unzulässigen Bedingungen für die Stromwendung verknüpft. Kommutatoren mit  $D_k \approx 200$  bis  $400$  mm haben eine kleinstmögliche Stegteilung von  $\tau_{k,\min} \approx 4$  mm. Für kleinere Kommutatoren sind noch kleinere Werte möglich ( $\tau_{k,\min} \approx 3$  mm). Bei großen Kommutatoren treten Werte bis  $\tau_{k,\min} \approx 6$  mm auf.

Die gewählte Stegzahl  $k$  muss die Beziehungen (1.1.19), Seite 18, (1.3.8) und (1.3.17b) bzw. (1.3.18b) erfüllen. Das bedeutet, dass sie nicht nur den geltenden Wicklungsgesetzen, sondern über einen möglichen Wert von  $u$  auch einer ausführbaren Nutzahl entsprechen muss. Diese wird nach oben durch die technologisch kleinstmögliche Nutteilung  $\tau_{n,\min}$  (bei größeren Maschinen etwa  $12$  mm) und nach unten durch das Bestreben, keine Nutungsharmonischen kleiner Ordnungszahl zu erhalten, begrenzt. Der Erfahrung nach genügen 8 bis 12 Nuten je Pol. Damit erhält man

$$(8 \dots 12)2p \leq N = \frac{k}{u} \leq \frac{D\pi}{\tau_{n,\min}}. \quad (1.3.30)$$

Um günstige Bedingungen für die Kommutierung zu erhalten, wählt man nach Möglichkeit  $u > 1$  und führt eine getrepte Wicklung aus.

**Tabelle 1.3.3** Zur Wahl von Kommutatorwicklungen

| Vergleich $w$ und $k$            | $w_{sp}$   | $a$          | Wicklungsart                                                            |
|----------------------------------|------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------|
| $w > \frac{k}{2}$                | $> 1$      | 1<br>$p$     | eingängige Spulen-Wellenwicklung<br>eingängige Spulen-Schleifenwicklung |
| $w \approx \frac{k}{2}$          | 1<br>$> 1$ | 1<br>$p$     | eingängige Stab-Wellenwicklung<br>eingängige Spulen-Schleifenwicklung   |
| $\frac{k}{2p} < w < \frac{k}{2}$ | 1<br>$> 1$ | $> 1$<br>$p$ | mehrgängige Stab-Wellenwicklung<br>eingängige Spulen-Schleifenwicklung  |
| $w \approx \frac{k}{2p}$         | 1          | $p$          | eingängige Stab-Schleifenwicklung<br>mehrgängige Stab-Wellenwicklung    |
| $w < \frac{k}{2p}$               | 1          | $> p$        | mehrgängige Stab-Schleifenwicklung                                      |

Tabelle 1.3.3 zeigt für alle möglichen Relationen zwischen der nach (1.3.24) geforderten Zweigwindungszahl  $w$  und der nach (1.3.29) möglichen Spulen- bzw. Stegzahl die zur Erfüllung der Entwurfsgleichung (1.3.26) notwendigen Kombinationen von  $w_{sp}$  und  $a$  sowie die daraus resultierenden Wicklungsarten. Dabei ist festzustellen, dass das Verhältnis  $w/k$  von oben nach unten abnimmt. Das beruht vor allem auf einer Abnahme der Zweigwindungszahl  $w$ . Diese Abnahme ist nach (1.3.24) mit wachsender Leistung ( $p\Phi_\delta$  wird größer), wachsender Drehzahl  $n$  und sinkender Spannung zu erwarten. Tabelle 1.3.3 lässt für fast jede Relation von  $w$  und  $k$  noch eine Wahl zwischen Wellen- und Schleifenwicklung zu. Im Folgenden sollen ein Vergleich zwischen beiden Wicklungsarten durchgeführt sowie weitere Auswahlgesichtspunkte erarbeitet werden, um die günstigere Wicklungsart zu ermitteln.

Bei gleichen Werten von  $w$  und  $k$  muss nach (1.3.26) unter Beachtung von (1.3.5) für die Schleifenwicklung (s) und (1.3.9) für die Wellenwicklung (w)

$$\left(\frac{w_{sp}}{a}\right)_s = \left(\frac{w_{sp}}{mp}\right)_s = \left(\frac{w_{sp}}{a}\right)_w = \left(\frac{w_{sp}}{m}\right)_w$$

gelten. Für gleiche Gangzahl  $m$  gilt dann

$$(w_{sp})_w = \frac{1}{p}(w_{sp})_s < (w_{sp})_s.$$

Der Zweigstrom  $i_{zw}$  einer Wicklung ergibt sich aus dem gesamten Ankerstrom  $i$  zu

$$i_{zw} = \frac{i}{2a}. \quad (1.3.31)$$

Der Vergleich zwischen Schleifenwicklung und Wellenwicklung liefert bei gleichem Ankerstrom und gleicher Gangzahl

$$i = (2ai_{zw})_s = (2mpi_{zw})_s = (2ai_{zw})_w = (2mi_{zw})_w$$

und damit

$$(i_{zw})_w = p(i_{zw})_s > (i_{zw})_s.$$

Die Wellenwicklung besitzt die kleinere Spulenwindungszahl und den größeren Zweigstrom, d. h. den größeren Leiterquerschnitt. Damit hat sie das bessere Verhältnis von Leiterquerschnitt zu Isolierungsquerschnitt innerhalb der Nut, d. h. den besseren Nutfüllfaktor. Da sie außerdem keine Ausgleichsverbindungen erster Art benötigt, ist sie bei gleicher Gangzahl stets der Schleifenwicklung vorzuziehen (s. Tab. 1.3.3, Fall  $w > k/2$  u.  $w \approx k/2$ ). Dabei können allerdings Schwierigkeiten in der Einhaltung der Schaltungssymmetrie auftreten (s. Abschn. 1.3.1.4a, S. 124).

Eine Stabwicklung ( $w_{sp} = 1$ ) ist einer Spulenwicklung ( $w_{sp} > 1$ ) wegen des besseren Nutfüllfaktors vorzuziehen (s. Tab. 1.3.3, Fall  $k/2p < w < k/2$ ). Eine mehrgängige Stab-Wellenwicklung hat hinsichtlich der Nutfüllung und der notwendigen Ausgleichsverbindungen gegenüber der eingängigen Stab-Schleifenwicklung keine Vorteile mehr. Aufgrund der günstigeren Schaltungssymmetrie wird dann die Schleifenwicklung vorgezogen. Das gilt auch dann noch, wenn die Stab-Schleifenwicklung mehrgängig wird (s. Tab. 1.3.3, Fall  $w \approx k/2p$  u.  $w < k/2p$ ). In Tabelle 1.3.3 ist für jede Zuordnung von  $w$  und  $k$  die günstigere Wicklungsart zuerst angegeben. Beachtet man die Abhängigkeit der Relation von  $w$  und  $k$  von der Leistung der Maschine, so kommt man zu folgenden allgemeinen Aussagen:

- Der Anwendungsbereich der Wellenwicklung umfasst vorzugsweise Maschinen kleiner und mittlerer Leistung.
- Der Anwendungsbereich der Schleifenwicklung umfasst Maschinen großer Leistung.
- Eine Ausnahme hiervon bilden kleine zweipolige Maschinen, bei denen prinzipiell keine Wellenwicklungen möglich sind.

Nur bei Maschinen sehr großer Leistung und solchen, die unter schwierigen Bedingungen – wie z. B. bei Walzenzugmotoren durch die ausgeprägten Belastungsstöße – betrieben werden, ist die Anordnung aller möglichen Ausgleichsverbindungen notwendig. Im Fall  $u > 1$  verbindet man normalerweise höchstens  $N$  Kommutatorstege durch Ausgleichsverbindungen erster Art miteinander (s. Bild 1.3.10, S. 136). Kleinere Maschinen versieht man meistens nur mit einigen Ausgleichsverbindungen erster Art, so dass etwa jeder sechste bis zwölfte Steg angeschlossen ist. Für Ausgleichsverbindungen zweiter Art gilt prinzipiell das gleiche. Sollen diese jedoch als Ausgleichsverbindungen dritter Art wirksam werden, so muss jede mögliche Ausgleichsverbindung ausgeführt werden.

#### **b) Einphasen-Reihenschlussmaschinen und Drehstrom-Kommutatormaschinen**

Im Prinzip gelten die gleichen Kriterien für die Wicklungswahl. Die Windungszahl  $w$  ergibt sich nach (1.3.25). Die Spulen- bzw. Stegzahl  $k$  wird nach oben wiederum durch die kleinstmögliche Stegteilung begrenzt, wobei ähnliche Werte wie für Gleichstrommaschinen ausgeführt werden. Die untere Grenze zieht auch hier eine zulässige Stegspannung.

Die Kommutierung von Einphasen-Reihenschlussmaschinen und Drehstrom-Kommutatormaschinen wird zusätzlich durch die vom Hauptfluss auf transformatorischem Weg in den während der Kommutierung kurzgeschlossenen Spulen induzierte Spannung beeinflusst. Man nennt sie deshalb *Transformationsspannung*

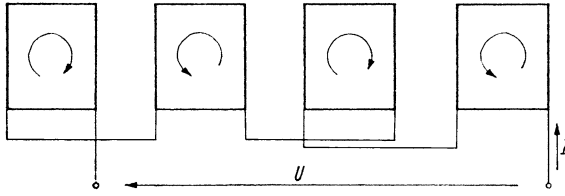


**Bild 1.4.1**  
Reihenschaltung von  
 $2p = 4$  Polspulen

$e_{tr}$ . Der Effektivwert dieser Spannung beträgt

$$E_{tr} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_{sp} \hat{\Phi}_d. \quad (1.3.32)$$

Dividiert man (1.3.25) durch (1.3.32) und führt dabei (1.3.26) ein, so erhält man für die Kommutatorstegzahl die Beziehung

$$k = \frac{a\pi f}{pn} \frac{E_r}{E_{tr}}, \quad (1.3.33)$$

aus der man erkennt, dass die untere Grenze für  $k$  durch die zulässige Transformationsspannung (Werte s. Abschn. 4.4.2, S. 338) bestimmt wird.

## 1.4 Weitere Wicklungsarten

Die bisher behandelten Wicklungen, also Wicklungen mit ausgebildeten Strängen und Kommutatorwicklungen, sind ihrer Aufgabe nach normalerweise Wicklungen, die über die Verlustdeckung hinaus am Energieumsatz einer Maschine beteiligt sind. Eine Ausnahme bildet – wie bereits gesagt – die Erregerwicklung von Vollpol-Synchronmaschinen, die wie eine Strangwicklung aufgebaut ist. Alle noch nicht behandelten Wicklungsarten sind – abgesehen von den Käfigwicklungen von Induktionsmaschinen – im Polsystem der elektrischen Maschinen angeordnet, wobei es gleichgültig ist, ob dieses ausgeprägte Pole besitzt oder nicht.

### 1.4.1 Wicklungen auf ausgeprägten Polen

Die Aufgabe von Wicklungen auf ausgeprägten Polen, die auch als *Polwicklungen* bezeichnet werden, ist die Erregung des Luftspaltfelds der elektrischen Maschinen. Sie sind nicht am Energieumsatz der Maschine beteiligt. Ihr wesentliches Kennzeichen besteht darin, dass normalerweise je Pol eine konzentriert angeordnete Spule vorgesehen ist (s. Bd. *Grundlagen elektrischer Maschinen*, Abschn. 3.2.1). Einzige Symmetriebedingung ist die gleiche Durchflutung aller Polspulen. Das wird durch gleiche Windungszahl der  $2p$  Einzelspulen erreicht, wobei auch halbe Windungen möglich sind.

#### 1.4.1.1 Nebenschlusswicklungen

Nebenschlusswicklungen auf ausgeprägten Polen sind Erregerwicklungen, die mit vorgegebener Spannung betrieben werden. Ist  $A_L$  der Leiterquerschnitt,  $w_p$  die Windungszahl und  $l_m$  die mittlere Windungslänge einer Polspule, so beträgt deren Widerstand

$$R = \frac{w_p l_m}{\kappa A_L}. \quad (1.4.1)$$

Wenn über den  $2p$  in Reihe geschalteten Polspulen die Gleichspannung  $U$  liegt, wobei der Umlaufsinn entsprechend der von Pol zu Pol wechselnden Polarität des Felds von Spule zu Spule wechseln muss (s. Bild 1.4.1), so fließt der Strom

$$I = \frac{U}{2pR} = \frac{U\kappa A_L}{2pw_p l_m}. \quad (1.4.2)$$

Für  $\kappa$  muss dabei natürlich die Leitfähigkeit der betriebswarmen Wicklung eingesetzt werden. Löst man (1.4.2) nach der Leiterquerschnittsfläche  $A_L$  auf, so erhält man

$$A_L = \frac{2pIw_p l_m}{\kappa U} = \frac{2p\Theta l_m}{\kappa U} \quad (1.4.3)$$

und erkennt, dass durch die von einer Polwicklung geforderte Durchflutung  $\Theta = Iw_p$  der Leiterquerschnitt  $A_L$  festgelegt ist. Dabei muss man zunächst die mittlere Windungslänge  $l_m$  schätzen. Danach berechnet man mit der durch die zulässige Stromdichte  $S = I/A_L$  bestimmten Windungszahl

$$w_p = \frac{\Theta}{I} = \frac{\Theta}{A_L S} \quad (1.4.4)$$

den notwendigen Wickelraum, d. h. die Querschnittsfläche  $A_{sp}$  einer Polspule. Für Runddrahtwicklungen mit einem Durchmesser  $d_{iso}$  des isolierten Drahts gilt

$$A_{sp} = \frac{w_p d_{iso}^2}{\varphi_w}. \quad (1.4.5)$$

Hierin ist der *technologische Füllfaktor* von Runddrahtwicklungen  $\varphi_w$  ein Erfahrungswert, der die entsprechend dem Herstellungsverfahren mögliche Wickelgüte berücksichtigt. Es ist

$\varphi_w = 0,75 \dots 0,85$  bei Herstellung durch Wickelmaschinen,

$\varphi_w = 0,9 \dots 0,95$  bei Handwicklungen mit kleinem Drahtquerschnitt,

$\varphi_w = 1,05 \dots 1,1$  bei Handwicklungen mit großem Drahtquerschnitt.

Der große Füllfaktor bei Handwicklungen größeren Drahtquerschnitts beruht darauf, dass es hierbei möglich ist, die Windungen einer Lage sauber nebeneinander und die Windungen der folgenden Lagen zwischen die Windungen der vorhergehenden zu legen (s. Bild 1.4.2). Dadurch ist der Platzbedarf einer Windung kleiner als  $d_{iso}^2$ . Zwischen dem technologischen Füllfaktor und dem *Kupferfüllfaktor*  $\varphi_{cu}$ , d. h. dem Verhältnis des Leiterquerschnitts ohne Isolierung zum benötigten Wickelraum, besteht unter Berücksichtigung der Dicke der Drahtisolierung  $b_{iso}$  der Zusammenhang

$$\varphi_{cu} = \varphi_w \frac{\pi (d_{iso} - b_{iso})^2}{4d_{iso}^2} = \varphi_w \frac{\pi}{4} \left(1 - \frac{b_{iso}}{d_{iso}}\right)^2 \approx 0,75\varphi_w. \quad (1.4.6)$$

Den genauen Spulenquerschnitt einer Profildrahtwicklung ermittelt man durch eine *Wickelraumbilanz*, indem man sich eine Skizze der Leiteranordnung anfertigt. Aus der tatsächlichen Leiteranordnung ergibt sich die tatsächliche mittlere Windungslänge (s. Abschn. 6.3.2, S. 386) und der tatsächliche Wicklungswiderstand. Weicht dieser stark von dem zunächst nach (1.4.1) ermittelten Wert ab, so muss besonders dann, wenn die Abweichung positiv ist, nach (1.4.3) eine Korrektur

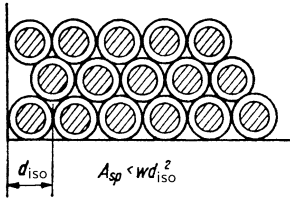


**Bild 1.4.2** Spulenquerschnitt bei Runddraht mit größerem Durchmesser

des Leiterquerschnitts vorgenommen werden, da die Wicklung sonst nicht die geforderte Durchflutung aufbringt.

#### 1.4.1.2 Reihenschlusswicklungen

Zu den Reihenschlusswicklungen auf ausgeprägten Polen gehören Reihenschluss-Erregerwicklungen und Wendepolwicklungen (s. Bd. *Grundlagen elektrischer Maschinen*, Abschn. 3.2.3). Sie werden mit vorgegebener Stromstärke betrieben. Ihre Berechnung ist deshalb sehr einfach. Aus der geforderten Durchflutung  $\hat{\Theta}$  eines Pols und der gegebenen Stromstärke  $I$  bestimmt man die Windungszahl der Polspule zu

$$w_p = \frac{\hat{\Theta}}{I}. \quad (1.4.7)$$

Bei Einphasen-Reihenschlussmaschinen ist dementsprechend  $w_p = \hat{\Theta}/I\sqrt{2}$ . Der Leiterquerschnitt  $A_L$  ergibt sich aus der zulässigen Stromdichte  $S$ .

### 1.4.2 In Nuten verteilt angeordnete Wicklungen

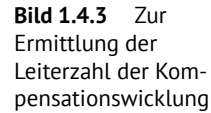
Auch Erregerwicklungen können in Nuten verteilt angeordnet sein. Das ist – wie bereits gesagt – bei Vollpol-Synchronmaschinen der Fall (s. Bd. *Grundlagen elektrischer Maschinen*, Abschn. 6.14.1.2). Ihre Berechnung erfolgt wie im Abschnitt 1.4.1.1 aus der Gesamtdurchflutung je Pol, wobei die mittlere Windungslänge für Spulen unterschiedlicher Weite zu bilden ist (s. Abschn. 6.3.2, S. 388). Sie können aber auch wie im Unterabschnitt 1.2.2.3c, Seite 56, als Sonderfall einsträngiger Wicklungen betrachtet werden. Eine nochmalige Behandlung erübrigt sich demnach.

Weitere in Nuten verteilt angeordnete Wicklungen sind – abgesehen von den im Abschnitt 1.2 behandelten Strangwicklungen – Kompensationswicklungen, Dämpferwicklungen von Synchronmaschinen und Käfigwicklungen von Induktionsmaschinen.

#### 1.4.2.1 Kompensationswicklungen

Kompensationswicklungen haben die Aufgabe, unerwünschte Luftspaltfelder von Ankerströmen zu kompensieren. Diese Felder sind deshalb vielfach unerwünscht, weil sie Verzerrungen des Luftspaltfelds und damit eine lokale Sättigung der Eisenwege verursachen (s. Bd. *Grundlagen elektrischer Maschinen*, Abschn. 3.3.1). Berechnungsgrundlage für eine Kompensationswicklung ist, dass sie innerhalb eines bestimmten Bereichs die Durchflutung der Ankerwicklung aufzuheben hat. Ihre Leiter müssen deshalb in der Nähe der Ankerleiter liegen und in entgegengesetzter Richtung wie diese vom gleichen Strom durchflossen werden.

Im Fall der Gleichstrommaschine ist die Kompensationswicklung in den Polschuhen untergebracht. Die Kompensation des Ankerfelds soll im Bereich des ideellen Polbogens  $\alpha_1 \tau_p$  (s. Bild 1.4.3 u. Abschn. 2.3.1, S. 169) erfolgen. Wenn  $z_a$  die gesamte


$$A = \frac{z_a I_{ZW}}{D\pi} = \frac{z_a I}{2aD\pi} \quad (1.4.8)$$
$$\Theta_a \left( \frac{\alpha_i \tau_p}{2} \right) = z_a I_{zw} \frac{\alpha_i \tau_p}{2D\pi} = \frac{\alpha_i \tau_p A}{2} \quad (1.4.9)$$
$$\Theta_k = \frac{-z_k I}{2}. \quad (1.4.10)$$
$$\Theta_{\text{ges}} = \Theta_{\text{k}} + \Theta_{\text{a}} \left( \frac{\alpha_{\text{i}} \tau_{\text{p}}}{2} \right) = -\frac{z_{\text{k}} I}{2} + \frac{\alpha_{\text{i}} \tau_{\text{p}} A}{2}$$
$$z_k = \frac{\alpha_i \tau_p A}{I} = \frac{\alpha_i \tau_p z_a}{2aD\pi}. \quad (1.4.11)$$

#### 1.4.2.2 Dämpferwicklungen von Synchronmaschinen

Dämpferwicklungen von Synchronmaschinen sind Kurzschlusswicklungen, deren Leiter bei Vollpol-Synchronmaschinen in den Nuten der Erregerwicklung oder in gesonderten Dämpfernuten zwischen den Erregernuten und bei Schenkelpol-Synchronmaschinen in gesonderten Nuten der Polschuhe untergebracht sind. Ihr Aufbau ist im Prinzip der gleiche wie der einer Käfigwicklung einer Induktionsmaschine. Bei Schenkelpol-Synchronmaschinen fehlen natürlich die Stäbe in der Polücke.

Dämpferwicklungen dienen zur Verbesserung des stationären und nicht stationären Betriebsverhaltens (s. Bd. *Grundlagen elektrischer Maschinen*, Abschn. 6.2 u. 7.3). Wie die Käfigwicklungen von Induktionsmaschinen ermöglichen sie den asynchronen Selbstanlauf und ggf. den stationären Asynchronbetrieb der Synchronmaschine. Sie haben ferner die Aufgabe, das im unsymmetrischen Betrieb, d. h. bei sog. Schiefelast, und im Extremfall des Einphasenbetriebs auftretende inverse Drehfeld mit  $\tilde{v}' = -p$  abzudämpfen, das sonst große Verluste hervorrufen würde. Eine der wichtigsten Aufgaben der Dämpferwicklung ist die Dämpfung von Pendelungen, zu denen die Synchronmaschine bei asynchronem Betrieb, bei Laststößen und bei angekuppelten Aggregaten mit periodischem Drehmomentverlauf (z. B. Kolbenkompressoren oder Dieselmotoren) leicht angeregt wird (s. Bd. *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschn. 3.2 u. 3.4).

Aufgrund des nicht einfach zu erfassenden Wirkungsmechanismus erfolgt die Bemessung einer Dämpferwicklung i. Allg. nach Erfahrungswerten. Wenn nötig, kann anschließend eine Nachrechnung der bemessenen Wicklung vorgenommen werden. Dazu interessieren die Induktivitäten bzw. Reaktanzen und die Zeitkonstanten, die von der Dimensionierung der Dämpferwicklung beeinflusst werden (s. Kap. 8). Wie bereits gesagt, ordnet man die Stäbe der Dämpferwicklung bei Schenkelpol-Synchronmaschinen in Nuten der Polschuhe an. Zur Vermeidung unerwünscht großer Flusspulsationen und Geräusche wählt man bei ungeschrägten Nuten meist eine Nutteilung, die 10 bis 15 % von der Ankernutteilung abweicht, obgleich die Ausführung identischer Nutteilungen den Vorteil minimaler zusätzlicher Verluste hätte, da dann keine Verkettung der Maschen des Dämpferkäfigs mit den Nut- und Nutungsharmonischen des Ankers existiert. Schrägt man jedoch die Dämpfernuten gegenüber den Ankernuten (meistens um eine Ankernutteilung), so entfällt diese Bedingung, und man kann auch gleiche Nutteilungen ausführen. Die Dämpferwicklung kommt nur dann voll zur Wirkung, wenn sämtliche Dämpferstäbe durch Kurzschlussringe miteinander verbunden sind, die also auch über die von Käfigstäben freien Pollücken reichen.

Als Dämpferwicklung wirken auch massive Polschuhe von Schenkelpol-Synchronmaschinen und der massive Läuferballen von Vollpol-Synchronmaschinen. Dabei können die massiven Polschuhe von Schenkelpol-Synchronmaschinen wie bei der Ausführung mit einem ausgeprägten Käfig durch stirnseitige Kurzschlussringe miteinander verbunden werden. Dies ist elektromagnetisch vorteilhaft, aber in der konstruktiven Ausführung wegen des Stromübergangs vom Polschuh zum Kurzschlussring problematisch, der auch bei möglichen Relativbewegungen aufgrund unterschiedlicher thermischer Längenänderungen bei starker Erwärmung gewährleistet sein muss, wie sie während des asynchronen Anlaufs auftreten können. Obwohl ihr massiver Läuferballen bereits als Dämpferkäfig wirkt, werden Synchronmaschinen mit massivem Vollpolläufer, welche i. Allg. Turbogeneratoren sind, meist mit einer besonderen Dämpferwicklung ausgeführt. In manchen Fällen besteht diese aus Kupfer-Dämpferstäben, die unterhalb der Verschlusskeile untergebracht sind und die durch separate Kupferringe unterhalb der Kappenringe kurzgeschlossen werden. Meistens verwendet man jedoch die Nutverschlusskeile selbst als Dämpferstäbe, die dann aus Festigkeitsgründen aus einer festen Bronzelegierung anstatt aus Kupfer bestehen.

Der zur Beherrschung der Fliehkräfte auf die Wicklungsköpfe der Erregerwicklung erforderliche sog. Kappenring dient dann gleichzeitig als Kurzschlussring für die Keile. Vollpol-Synchronmaschinen mit geblechtem Läufer besitzen meist einen vollständig ausgebildeten Dämpferkäfig mit Kupferendplatten.

In Synchrongeneratoren hat die Dämpferwicklung vorwiegend die Aufgabe, inverse Felder abzdämpfen. Damit diese Aufgabe mit geringen Verlusten verbunden ist, strebt man einen möglichst kleinen Widerstand der Dämpferwicklung an. Man wählt als gesamten Querschnitt der Dämpferstäbe etwa 20 bis 30 % des Gesamtquerschnitts der Ankerwicklung und als Material – mit Ausnahme der bereits erwähnten Verschlusskeile bei Maschinen mit massivem Vollpolläufer – Kupfer. Bei Einphasengeneratoren kommen Werte über 30 % des Querschnitts der Ankerwicklung vor. Die Frequenz der von inversen Feldern in den Dämpferstäben verursachten Ströme ist doppelt so groß wie die Betriebsfrequenz. Demzufolge muss überprüft werden, ob Maßnahmen zur Unterdrückung der Stromverdrängung notwendig sind (s. Kap. 5). Für die Kurzschlussringe wählt man etwa 30 bis 50 % des Gesamtstabquerschnitts je Pol.

In Synchronmotoren hat die Dämpferwicklung vorwiegend die Aufgabe, Pendelungen abzdämpfen sowie den asynchronen Hochlauf zu ermöglichen. Eine Vergrößerung des Hochlaufmoments erhält man bei vergrößertem Widerstand der Dämpferwicklung (s. Bd. *Grundlagen elektrischer Maschinen*, Abschn. 5.5.3). Man wählt deshalb entweder schlechter leitendes Material (z. B. Bronze) oder einen kleineren Querschnitt (z. B. nur 10 % des Querschnitts der Ankerwicklung), sofern letzteres unter Berücksichtigung der Anlaufwärme (s. Bd. *Grundlagen elektrischer Maschinen*, Abschn. 5.7.1.9) zulässig ist. Bei über Frequenzumrichter gespeisten Synchronmotoren entsteht während des Anlaufs keine besondere Anlaufwärme. Jedoch ist bei der Dimensionierung der Dämpferwicklung zu beachten, dass die durch Stromharmonische verursachten zusätzlichen Feldwellen des Ankers, insbesondere solche, deren Ordnungszahl der Polpaarzahl  $p$  entspricht, im Käfig auch bei sonst symmetrischer Speisung dämpfende Ströme antreiben.

#### 1.4.2.3 Käfigwicklungen von Induktionsmaschinen

Obleich Käfigwicklungen von Induktionsmaschinen in ihrer Ausführung den Dämpferwicklungen von Synchronmaschinen ähnlich sind, geschieht ihre Dimensionierung nach anderen Kriterien. Dies ist darin begründet, dass Käfigwicklungen von Induktionsmaschinen im Gegensatz zu Dämpferwicklungen auch über die Deckung der Verluste hinausgehend am Energieumsatz beteiligt sind. Sie können daher wie symmetrische, mehrsträngige Wicklungen behandelt werden.

Bei der Wahl der Läufernutzahl sind eine Reihe von Kriterien zu beachten, die im Abschnitt 1.2.6.3, Seite 112, erläutert werden. Der Stab- und der Ringquerschnitt ergeben sich als Quotient aus dem Stab- bzw. Ringstrom im Bemessungsbetrieb und der unter thermischen Gesichtspunkten oder im Hinblick auf den Wirkungsgrad zulässigen Stromdichte zu

$$A_s = \frac{I_s}{S_s} \quad \text{bzw.} \quad A_r = \frac{I_r}{S_r}. \quad (1.4.12)$$

Teilweise spielt auch die zur Beherrschung der beim asynchronen Anlauf in der Läuferwicklung entstehenden Verlustwärme erforderliche Wärmekapazität eine Rolle.

Um den Stabstrom  $I_s$  zu ermitteln, muss der Zusammenhang zwischen diesem und dem auf den Ständer bezogenen sog. transformierten Läuferstrom  $I'_2 \approx I_1$  bekannt sein. Dieser Zusammenhang wird im Band *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschnitt 1.8.2, ausführlich entwickelt. Auf dasselbe Ergebnis führt unter der Annahme, dass die Nutzahl des Käfigs je Polpaar ganzzahlig ist, auch die folgende Überlegung:

Für den Fall  $N_2/p \in \mathbb{N}$  bildet sich im Käfig bei Erregung durch das Hauptfeld ein symmetrisches  $N_2/p$ -phasiges Stromsystem aus (vgl. Abschn. 1.2.5j, S. 104). Wenn  $N_2/p$  gerade ist, kann die Käfigwicklung damit als symmetrische mehrsträngige Wicklung mit

$$m_2 = \frac{N_2}{2p} \quad (1.4.13)$$

Strängen aufgefasst werden, wobei jeder der Stränge aus je einem Stab je Pol und damit insgesamt  $2p$  Stäben besteht, die jeweils gleich- bzw. gegenphasige Ströme führen. Fasst man die Stäbe, die um eine Polteilung voneinander entfernt sind, jeweils gedanklich zu einer Windung zusammen, so existiert je Polpaar und Strang genau eine Windung. Dies entspricht einer Durchmesserwicklung. Für den Wicklungsfaktor gilt daher

$$\xi_{2,\nu'} = 1 \quad \text{für alle } \nu' \in \mathbb{N}. \quad (1.4.14)$$

Den  $p$  Polpaaren entsprechend besitzt jeder Strang  $p$  Windungen, die denselben Strom  $I_s$  führen und daher als  $a = p$  parallele Zweige je Strang aufgefasst werden können. Die Strangwindungszahl ist daher

$$w_2 = 1, \quad (1.4.15)$$

und der Zusammenhang zwischen Strangstrom und Stabstrom ist durch

$$I_2 = pI_s \quad (1.4.16)$$

gegeben. Aus der Gleichsetzung der Durchflutungen folgt schließlich unter Verwendung von (1.4.14), (1.4.15) und (1.4.16) der Zusammenhang zwischen dem transformierten Läuferstrom und dem Stabstrom zu

$$m_1(w_{\xi_p}^{\xi})_1 I'_2 = m_2(w_{\xi_p}^{\xi})_2 I_2 = m_2(w_{\xi_p}^{\xi})_2 p I_s$$

und damit

$$I_s = \frac{m_1(w_{\xi_p}^{\xi})_1}{m_2(w_{\xi_p}^{\xi})_2 p} I'_2 = \frac{2m_1(w_{\xi_p}^{\xi})_1}{N_2} I'_2. \quad (1.4.17)$$

Mit dieser Modellvorstellung kann die Dimensionierung der Käfigwicklung von Induktionsmaschinen analog zu der von Strangwicklungen erfolgen. Entsprechend Band *Grundlagen elektrischer Maschinen*, Abschnitt 5.4.2.1, ist der Zusammenhang zwischen Stabstrom und Ringstrom mit

$$I_r = \frac{I_s}{2 \sin \frac{\pi p}{N_2}} \quad (1.4.18)$$

gegeben. Damit kann auch der Querschnitt des Kurzschlussrings bestimmt werden.

Im Gegensatz zu Synchronmotoren, bei denen die Käfigwicklung allein nach Gesichtspunkten des Anlaufs und die Erregerwicklung allein nach Gesichtspunkten des stationären Betriebs dimensioniert werden kann, stellt die Festlegung der Nutform, der Nut- und Ringabmessungen und des Leitermaterials der Käfigwicklung von Induktionsmaschinen immer einen Kompromiss zwischen den Erfordernissen des asynchronen Anlaufs und des stationären Betriebs dar.