

8	ELEKTRISCHE MASCHINEN	3
8.1	Grundbegriffe	3
8.2	Gleichstrommaschinen	3
8.2.1	Ständer	3
8.2.2	Rotor	4
8.2.3	Stromwender	4
8.2.4	Funktionsweise	4
8.2.4.1	Gleichstromgenerator	4
8.2.4.2	Gleichstrommotor	6
8.2.4.3	Ankerrückwirkung	8
8.2.4.4	Stromwendung	8
8.2.4.5	Wendepolwicklung und Kompensationswicklung	10
8.2.5	Schaltungsarten	11
8.2.5.1	Fremderregter Gleichstromgenerator	11
8.2.5.2	Gleichstromnebenschlussgenerator	13
8.2.5.3	Gleichstromreihenschlussgenerator	15
8.2.5.4	Gleichstromdoppelschlussgenerator	16
8.2.5.5	Parallelschaltung von Gleichstromgeneratoren	18
8.2.5.6	Reihenschaltung von Gleichstromgeneratoren	19
8.2.5.7	Fremderregter Gleichstrommotor	19
8.2.5.8	Gleichstromnebenschlussmotor	21
8.2.5.9	Gleichstromreihenschlussmotor	23
8.2.5.10	Gleichstromdoppelschlussmotor	24
8.2.5.11	Drehzahlsteuerung von Gleichstrommotoren	25
8.2.6	Scheibenmotor	26
8.2.7	Schrittmotoren	26
8.3	Drehstrommaschinen	27
8.3.1	Drehfeld für Drehstrommaschinen	27
8.3.2	Drehstromsynchronmaschinen	28
8.3.2.1	Drehstromsynchrongenerator	29
8.3.2.2	Drehstromsynchronmotor	31
8.3.2.3	Synchronmaschine als Phasenschieber	32
8.3.3	Drehstromasynchronmaschine	32
8.3.3.1	Betriebsverhalten	33
8.3.3.2	Drehstromasynchrongenerator	34
8.3.3.3	Drehstromasynchronmotor	35
8.3.4	Drehstromasynchronschleifringläufermotor	40
8.3.4.1	Drehstromasynchronschleifringläufer als Stelltransformator	40
8.3.4.2	Drehstrom-Reluktanzmotor	42
8.3.5	Linearmotor	43
8.3.6	Kennzeichen von üblichen Drehstrommaschinen	43
8.3.7	Drehzahlsteuerung von Drehstrommaschinen	44
8.3.7.1	Schlupfänderung	44
8.3.7.2	Polpaarzahländerung	45
8.3.7.3	Frequenzänderung	46
8.4	Einphasenwechselstrommotoren	47
8.4.1	Einphasenasynchronmotor	48
8.4.2	Spaltpolmotoren	48
8.4.3	Synchron-Kleinstmotor	49
8.4.4	Universalmotoren	50
8.4.5	Stromwendermotoren	51
8.4.6	Umformer	53

8 Elektrische Maschinen

8.1 Grundbegriffe

Elektrische Maschinen werden in Generatoren und Motoren eingeteilt. Je nach umgewandeltem oder benötigtem Strom (Spannung) wird zwischen Wechselstrommaschinen und Gleichstrommaschinen unterschieden.

Die bewegten Teile einer elektrischen Maschine gehören zum Rotor, die fest stehenden Teile gehören zum Stator.

In Abhängigkeit des Hauptmagnetfeldes wird zwischen Innenpol- und Außenpolmaschinen unterschieden.

Bei Innenpolmaschinen wird das Hauptmagnetfeld im Läufer angeordnet. Bei Außenpolmaschinen wird es im Ständer aufgebaut.

Grundsätzlich werden elektrische Maschinen in Gleichstrommaschinen und Wechselstrommaschinen eingeteilt. Eine weitere Einteilung kann nach Motoren und Generatoren vorgenommen werden. Ebenso werden elektrische Maschinen in Innenpol- und Außenpolmaschinen eingeteilt.

Elektrische Maschinen dienen zur Umwandlung von mechanischer Energie in elektrische Energie (Generatoren) oder elektrischer Energie in mechanische Energie (Motoren).

In Zusammenhang mit elektrischen Maschinen wird der Begriff Anker für den Teil der Maschine verwendet, in dem Spannungen induziert werden.

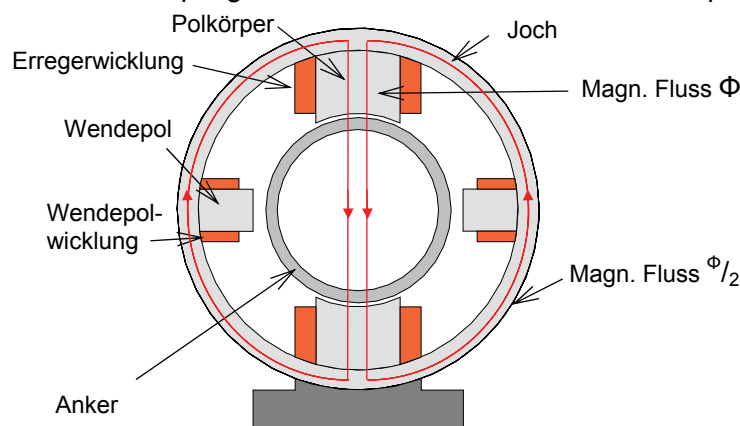
8.2 Gleichstrommaschinen

Gleichstrommaschinen werden mit Gleichstrom (Gleichspannung) betrieben. Eine Gleichstrommaschine besteht aus dem sich drehenden Teil und dem ruhenden Teil.

8.2.1 Ständer

Der Ständer einer Gleichstrommaschine besteht aus den Polkörpern, der **Erregerwicklung**, der **Wendepolwicklung**, der **Kompensationswicklung**, dem Bürstenhalter, den Kohlenbürsten, den Lagerschilden, den Lagern und dem Anschlussbrett.

Ständer einer zweipoligen Gleichstrommaschine ohne Kompensationswicklung



Thema: Elektrische Maschinen

8.2.2 Rotor

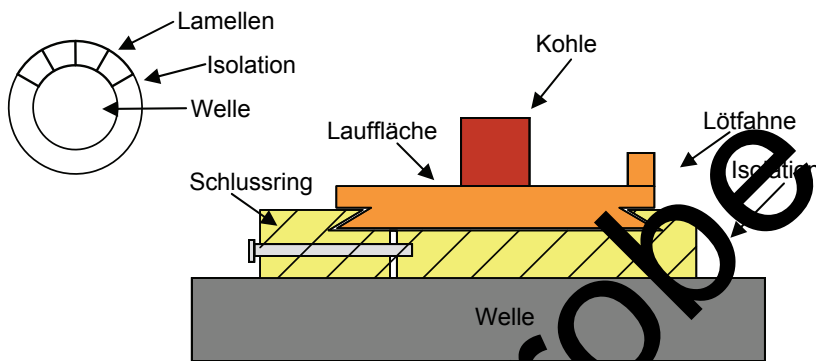
Bei Gleichstrommaschinen besteht der Rotor aus Rotorkörper, Rotorwicklung, Stromwender und gegebenenfalls Lüfter.

Bei Gleichstromgeneratoren wird in der Regel der Rotor als Anker bezeichnet, weil in ihm Spannungen induziert werden.

8.2.3 Stromwender

Der Stromwender, auch mit Kollektor oder Kommutator bezeichnet, besteht aus einzelnen in Umfangsrichtung voneinander und gegen die Welle isolierten Hartkupferlamellen.

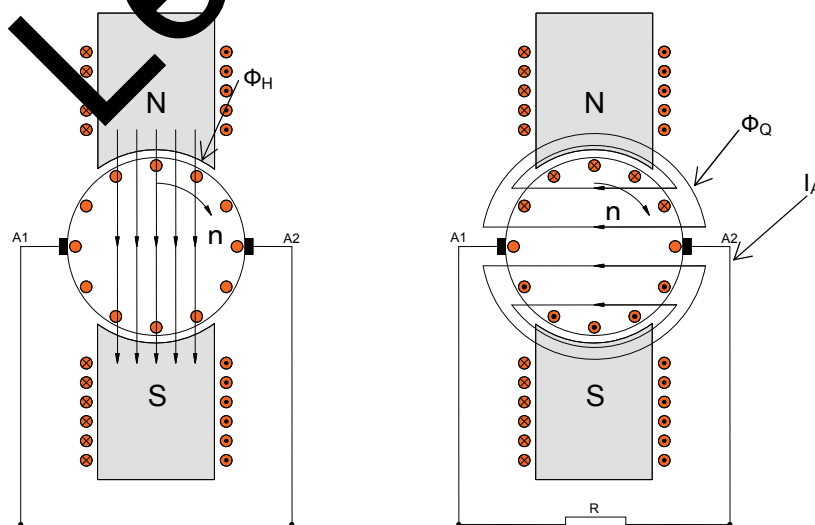
Stromwender im Schnitt



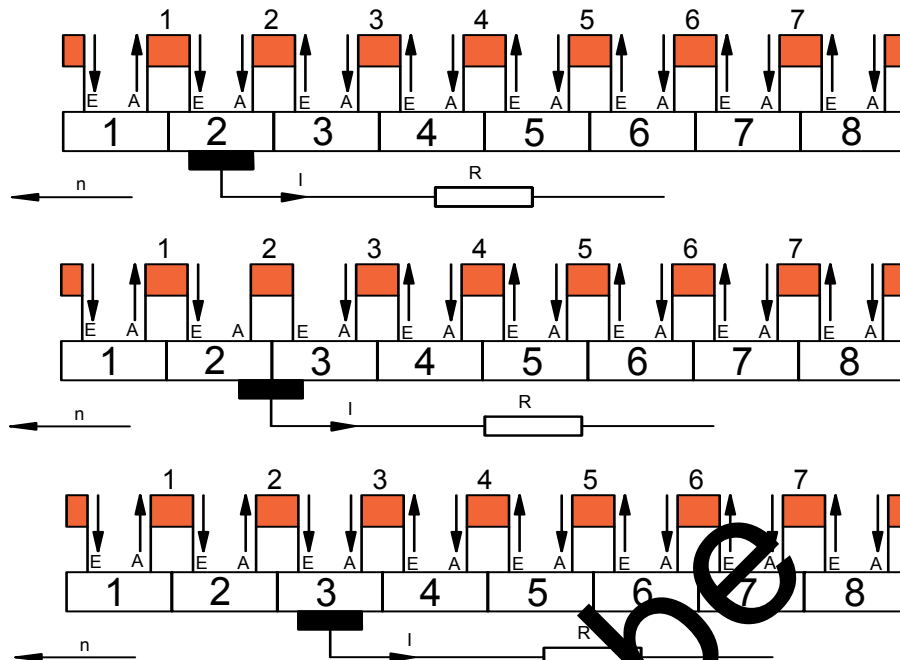
Der Stromwender wandelt beim Generator die induzierte Wechselspannung in eine Gleichspannung um. Beim Motor dient er zur Umwandlung der angelegten Gleichspannung in eine Wechselspannung.

8.2.4 Funktionsweise

8.2.4.1 Gleichstromgenerator



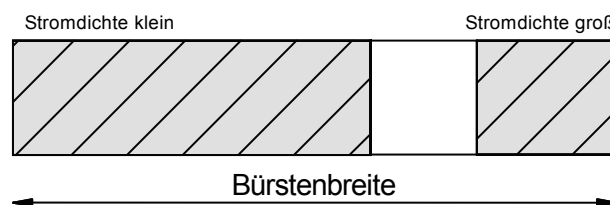
Schema einer Stromwendung



Nach dem Induktionsgesetz hat jedoch jede Stromänderung in einer Spule eine Spannungsinduktion zur Folge. Die Spannung versucht jedoch den Zustand vor der Änderung beizubehalten (Lenz'sche Regel). Durch die Flussumkehr (die Läuferwicklung hat sich durch die Drehzahlbewegung inzwischen weiter bewegt) wird auch der Strom in der Lamelle und der Bürste zu Umkehr gezwungen.

Die Gegeninduktionsspannung in der Läuferwicklung, die gerade eine Stromrichtungsumkehr erwartet, versucht den vorherigen Strom weiter zu treiben. Die Bürste verlässt aber durch die Drehbewegung die Lamelle, an der die Wicklung mit der Gegeninduktionsspannung liegt. Daraus folgt, dass ein relativ großer Strom durch einen kleiner werdenden Querschnitt fließen muss. Ein großer Strom durch einen kleinen Querschnitt führt zu einer hohen Stromdichte. Die Bürste und die Lamelle werden an dieser Stelle stark erwärmt.

Schematische Darstellung einer Bürste über zwei Lamellen



Die ungleichmäßige Erwärmung der Bürsten und der Lamellen führt zu einem erhöhten Verschleiß.

8.2.4.5 Wendepolwicklung und Kompensationswicklung

Bei belasteter Maschine werden der Kollektor und die Bürste durch die unterschiedliche Strombelastung und durch Spannungsinduktion im Bereich der Bürstenbrücke stark belastet.

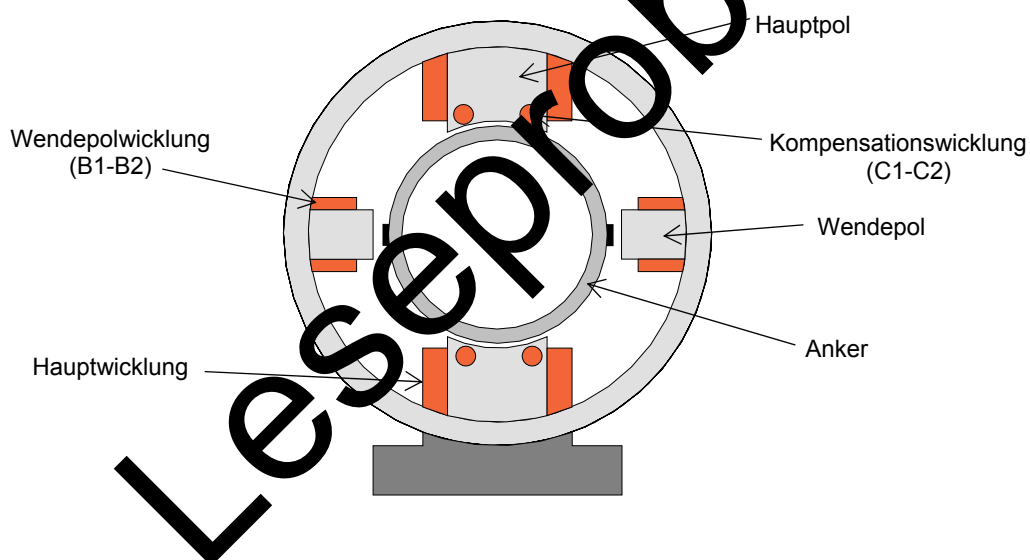
Grundsätzlich bestehen zwei Möglichkeiten, die Stromwendung bei einer Gleichstrommaschine zu bewerkstelligen. Entsprechend der Stromwendung ergeben sich verschiedene Möglichkeiten, die ungewünschten Erscheinungen an der Bürstenbrücke zu vermeiden.

- die freie Stromwendung
- die erzwungene Stromwendung

Bei der freien Stromwendung muss die Bürstenbrücke entsprechend der Belastung der Maschine um den Winkel α verstellt werden.

Die erzwungene Stromwendung wird durch den Einsatz von Kompensationswicklungen und Wendepolwicklungen erreicht.

Stator einer Gleichstrommaschine mit Kompensations- und Wendepolwicklung



Für die erzwungene Stromwendung mit Hilfe von Kompensations- und Wendepolwicklung ergeben sich drei Möglichkeiten der Auslegung:

- die verzögerte Stromwendung
- die geradlinige Stromwendung
- die beschleunigte Stromwendung

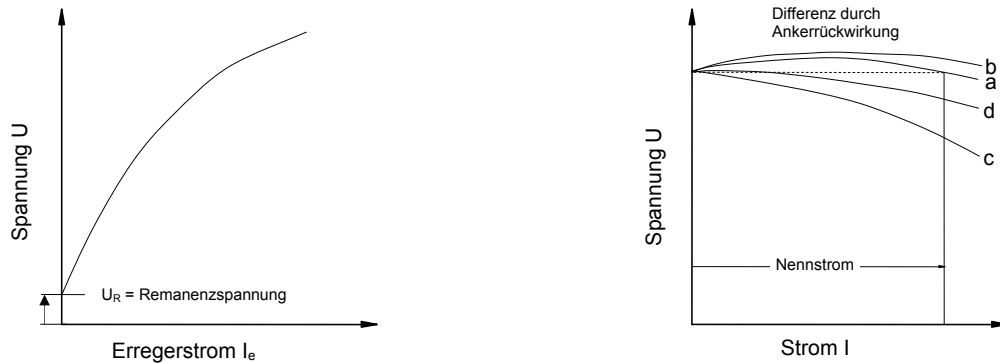
Verzögerte Stromwendung

Bei der verzögerten Stromwendung (auch Unterkommutierung genannt) ist die Stromwendespannung größer als die Wendefeldspannung.

Die Stromwendespannung ist die Spannung, die in der Wicklung durch die Stromumkehr induziert wird. Die Wendefeldspannung ist die Spannung, die den Strom für das

Der Doppelschlussgenerator wird auch als Compound- oder Verbundgenerator bezeichnet.

Belastungskennlinie Doppelschlussgenerator



Die Nebenschlusswicklung liegt parallel zur Ankerrückwirkung und kann durch den Restmagnetismus der Hauptpole den Generator auf volle Leerlaufspannung erregen. Daher ist die Leerlaufkennlinie eines Doppelschlussgenerators mit der eines Nebenschlussgenerators identisch.

Durch die Reihenschlusswicklung fließt im Leerlauf kein nennenswerter Strom, daher ist diese Wicklung für die Betrachtung im Leerlauf ohne Bedeutung. Wird der Generator jedoch belastet, so fließt durch die Reihenschlusswicklung der Belastungsstrom und trägt zu einer Erregerfeldverstärkung bei.

Je nach Verhältnis der Reihenschlusswicklung und der Nebenschlusswicklung ergeben sich unterschiedliche Belastungskennlinien für den Generator.

Je nach Auslegung der Reihen- bzw. Nebenschlusswicklung unterscheidet man beim Doppelschlussgenerator die Normalkompoudierung, die Überkompoudierung und die Gegenkompoudierung.

Normalkompoudierung

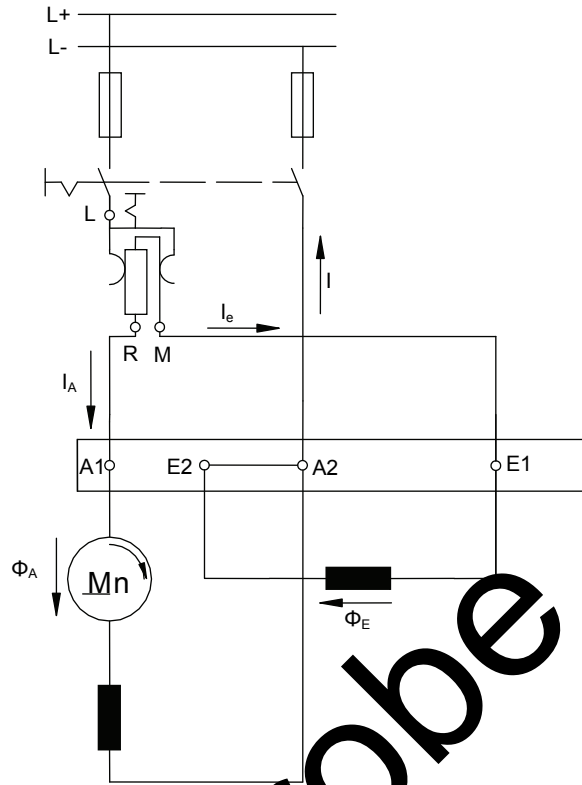
Bei der Normalkompoudierung unterstützen sich die Magnetfelder der Reihenschluss- bzw. Nebenschlusswicklung. Der Spannungsfall in dem Generator wird durch die Vergrößerung des Gesamtfeldes infolge der Erhöhung der induzierten Spannung ausgeglichen. Die Klemmspannung bleibt konstant und übertrifft in der Spannungsstabilität die des Nebenschlussgenerators (Belastungskennlinie a).

Überkompoudierung

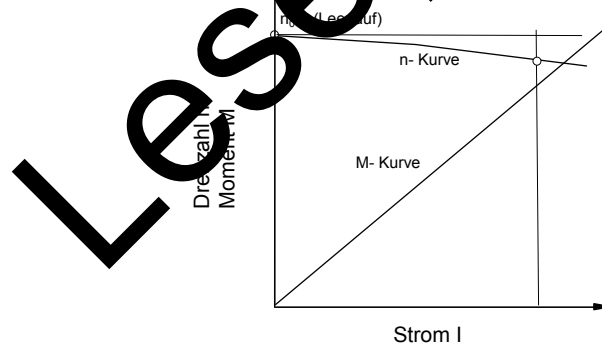
Soll der zusätzlich zum inneren Spannungsfall des Generators der Spannungsfall in der Zuleitung zum Verbraucher ausgeglichen werden, kann der Generator überkompoudiert werden. Die Reihenschlusswicklung erhält dann Zusatzwindungen. Schaltungstechnisch verhält sich diese Anordnung wie die Normalkompoudierung (Belastungskennlinie b).

Gegenkompoudierung

Für Sonderzwecke kann die Reihenschlusswicklung der Nebenschlusswicklung entgegen geschaltet werden. Das Magnetfeld der Reihenschlusswicklung wirkt dann entgegen dem Magnetfeld der Nebenschlusswicklung. Die Klemmspannung nimmt dann bei steigender Belastung ab (Belastungskennlinie d und c).



Belastungskennlinie Nebenschlussmotor



Durch die volle Erregung im Einschaltmoment erreicht der Nebenschlussmotor schon im Anlauf mit konstanten Magnetfluss sein höchstes Drehmoment.

$$M \propto I_A$$

Der Nebenschlussmotor ändert seine Drehzahl bei Belastung kaum, er kann deshalb als Drehzahlstabil angesehen werden.

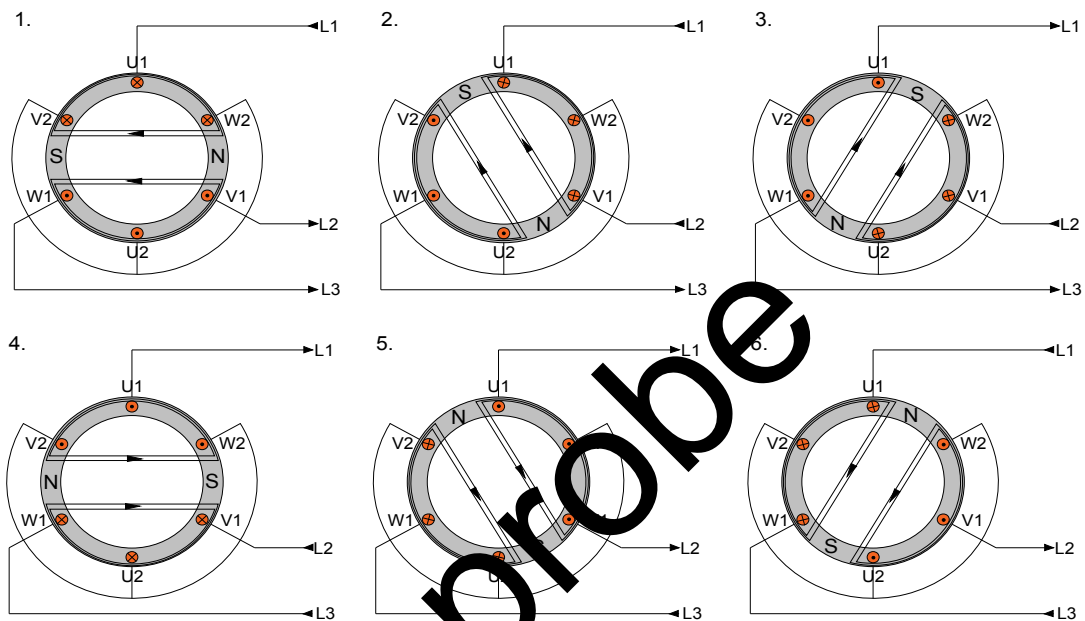
Der Nebenschlussmotor wird dort eingesetzt wo eine gleichmäßige Drehzahl erforderlich ist z. B. bei Werkzeugmaschinen oder Personenaufzügen.

ges: n_0

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{1} = \frac{60 \cdot 50 \text{s}^{-1}}{1} = 3000 \text{min}^{-1}$$

Wie bei Transformatoren wird auch bei Drehstrommaschinen das Magnetfeld durch den Magnetisierungsstrom hervorgerufen.

Vereinfachte Darstellung des symmetrischen Drehfeldes



In Abhängigkeit der Drehzahl des Läufers im Verhältnis des symmetrischen Drehfeldes wird zwischen Drehstromsynchronmaschinen und Drehstromasynchronmaschinen unterschieden.

Bei Drehstromsynchronmaschinen ist die Läuferdrehzahl gleich der Drehzahl des umlaufenden symmetrischen Drehfeldes.

Bei Drehstromasynchronmaschinen ist die Läuferdrehzahl ungleich der Drehzahl des umlaufenden symmetrischen Drehfeldes.

Drehstrommaschinen werden in Synchronmaschinen und in Asynchronmaschinen eingeteilt. Bei Synchronmaschinen ist die Läuferdrehzahl gleich der Drehfeldzahl, bei Asynchronmaschinen sind die Drehzahlen unterschiedlich.

8.3.2 Drehstromsynchronmaschinen

Bei Synchronmaschinen stimmen Läuferdrehzahl und Drehfeldzahl überein, es besteht zwischen diesen Drehzahlen kein Schlupf ($s = 0\%$). Eine übereinstimmende Drehzahl wird durch Verwendung eines konstanten Erregerfeldes erreicht.

Synchronmaschinen können als Innenpol- und Außenpolmaschinen hergestellt werden. In der Regel sind große Synchronmaschinen Innenpolmaschinen, weil die Versorgung des Läufers über zwei Schleifringe mit einem Gleichstrom einfacher ist als die Versorgung des Läufers mit Drehstrom. Zudem ist der Gleichstrom zur Erregung der Maschine kleiner als der Drehstrom für das Drehfeld.

Beim Läufer der Asynchronmaschine werden Kurzschlussläufer und Schleifringläufer verwendet.

Der Kurzschlussläufer besteht nur aus Aluminiumstäben, die am äußeren Radius des Läufers axial verlaufen und an den Enden des Läufers kurzgeschlossen sind.

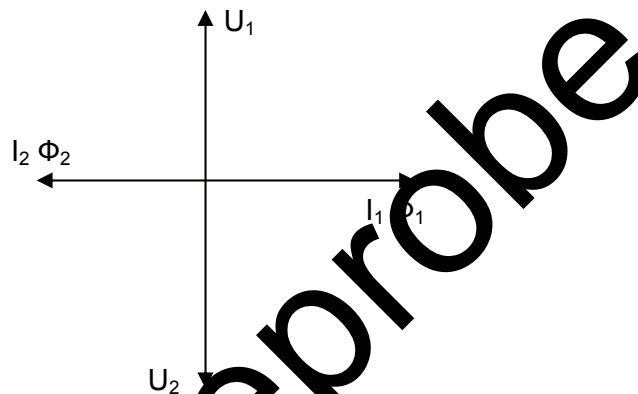
Der Schleifringläufer hat Wicklungen, deren Enden über Schleifringe herausgeführt sind. In der Regel sind hierfür drei Schleifringe erforderlich.

8.3.3.1 Betriebsverhalten

Der Drehstrom am Ständer (Motor), bewirkt ein sich im Ständer drehendes Magnetfeld. Im Moment des Einschaltens entspricht die Läuferfrequenz der Ständerfrequenz ($f_1=f_2$). Der induktive Läuferwiderstand hat somit seinen höchsten Wert. Die im Läufer induzierte Spannung entspricht den Windungsverhältnissen, der Schlupf ist 100%.

Die im Läufer induzierte Spannung U_{02} treibt einen Strom durch die Kurzschlussstäbe des Läufers, dieser Strom führt zu einem Magnetfeld. Das durch den Läuferstrom hervorgerufene Magnetfeld ist um 180° dem Ständerdrehfeld entgegengesetzt.

Zeigerbild für Primäranker und Sekundäranker einer Asynchronmaschine



Das Diagramm zeigt, dass sich in diesem Falle die beiden Magnetfelder aufheben würden. Aufgrund des ohmschen Anteils der Kurzschlussstäbe kommt es jedoch zu einer Phasenverschiebung zwischen Φ_1 und Φ_2 und damit zu einem Drehmoment.

Je größer der ohmsche Anteil im Läufer, desto besser das Anzugsmoment. Der Läufer nimmt bei angelegter Ständerspannung sofort Drehzahl auf, mit steigender Drehzahl nimmt die Läuferfrequenz, die Läufer Spannung und der Schlupf ab.

Im Nennbetriebspunkt beträgt der Schlupf etwa 3-6%. Es werden nur relativ kleine Spannungen in dem Läufer induziert. Demzufolge ist der Strom im Läufer gering und das Magnetfeld ebenfalls. Das Magnetfeld ist gerade so groß, dass die Drehzahl der Maschine aufrechterhalten werden kann. Wird die Maschine mehr belastet, so fällt die Drehzahl, die Läufer Spannung und damit der Läuferstrom. Das Läufermagnetfeld steigt an, und die Maschine erreicht einen neuen Gleichgewichtszustand.

Das Formelzeichen für den Schlupf einer Maschine ist s und wird mit folgender Formel berechnet:

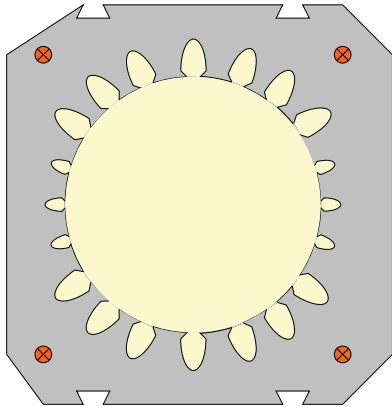
$$s = \frac{(n_s - n) \cdot 100}{n_s}$$

Wird eine Asynchronmaschine als Generator verwendet, so wird der Restmagnetismus des Läufers ausgenutzt, um im Ständer eine Spannung zu induzieren. Die Frequenz der induzierten Spannung ist belastungsabhängig. Der Generator wird mit einem negativen Schlupf betrieben, also über Nenn Drehzahl.

8.4.1 Einphasenasynchronmotor

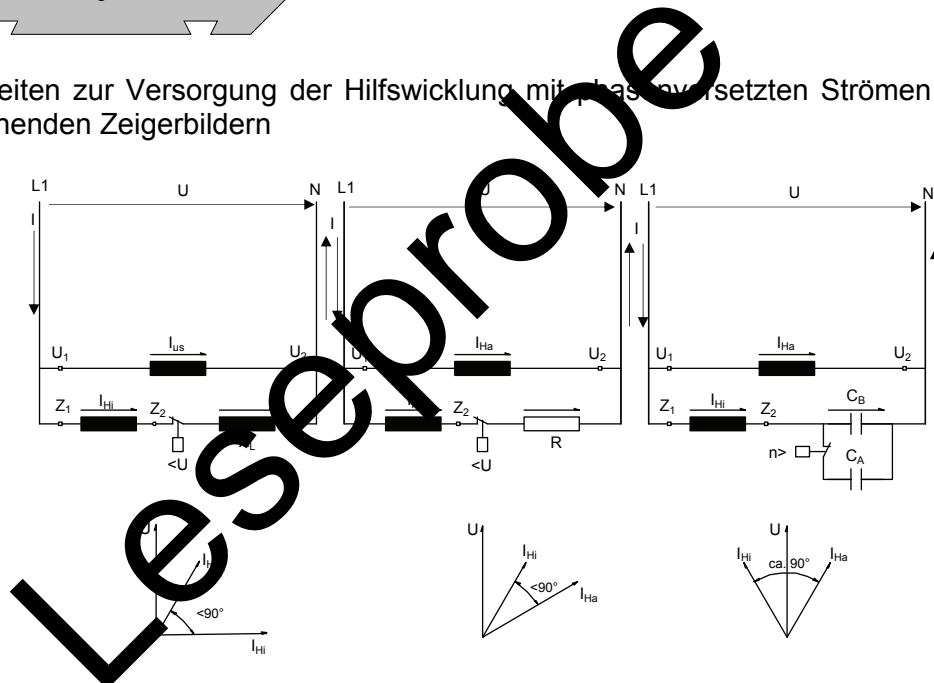
Ein Einphasenasynchronmotor arbeitet vom Prinzip her genau wie ein Drehstromasynchronmotor. Sein Ständerblechpaket wurde nur den Anforderungen entsprechend gestaltet.

Querschnitt eines Einphasenasynchronmotors



Der Ständerquerschnitt zeigt die Aufteilung für nur zwei Wicklungen. Einmal die Hauptwicklung und einmal die Hilfswicklung. Die Hilfswicklung wird an einen phasenversetzten Strom gelegt. Die Phasenverschiebung kann durch einen ohmschen Widerstand, einen Kondensator oder eine Spule erfolgen.

Möglichkeiten zur Versorgung der Hilfswicklung mit phasenversetzten Strömen und den entsprechenden Zeigerbildern



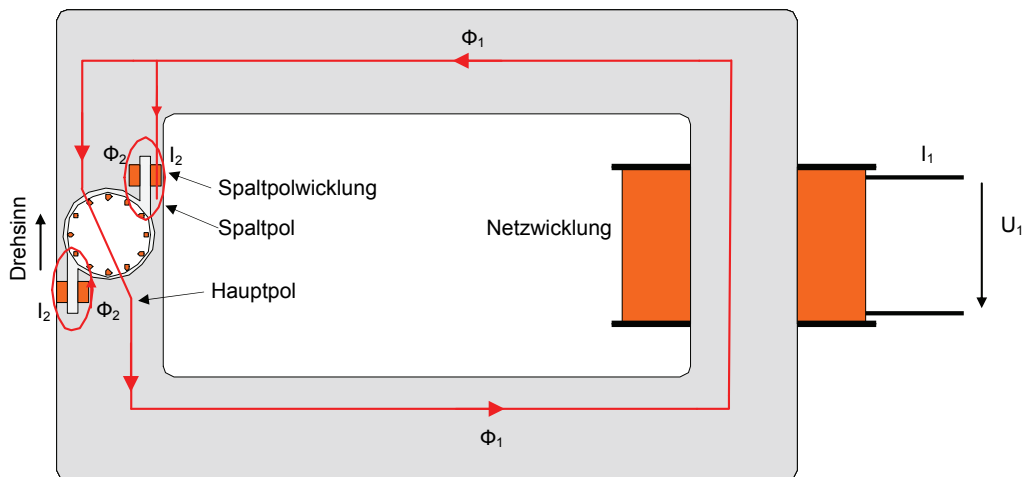
Der Anlaufkondensator kann mit 4kvar und der Betriebskondensator mit 1.3kvar je kW Motorleistung bemessen werden.

Einphasenasynchronmotoren sind robust und einfach vom Aufbau, preiswert, wartungsarm und funktionsfrei. Sie finden Verwendung bei Waschmaschinen, Wäscheschleudern, Kühlschränken, Küchenmaschinen und Ölbrennern.

8.4.2 Spaltpolmotoren

Beim Spaltpolmotor ist jeder Pol durch eine Nut in Hauptpol und Spaltpol unterteilt. Um die Spaltpole liegt ein Kurzschlussring, der wie eine Hilfswicklung wirkt. Der Läufer ist meist als Kurzschlussläufer ausgeführt.

Prinzipdarstellung eines Spaltpolmotors



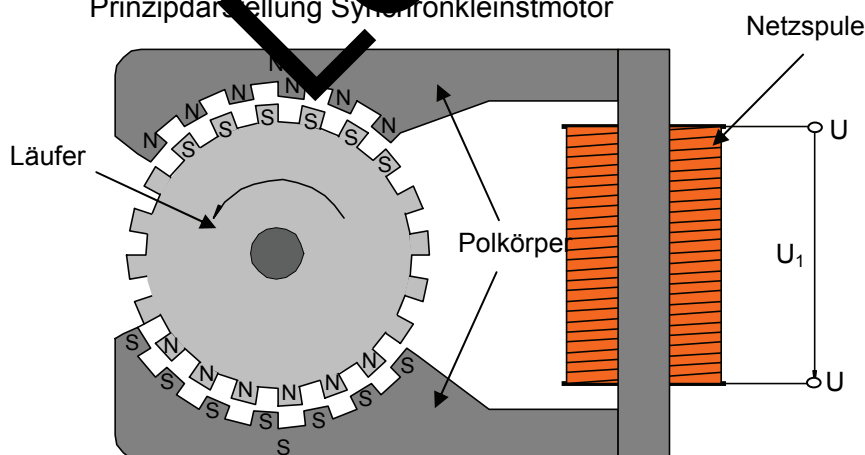
Der durch die angelegte Spannung getriebene Strom bewirkt ein Magnetfeld. Das Magnetfeld durchsetzt Haupt- und Spaltpole. Nach dem Induktionsgesetz wird in dem Kurzschlussring des Spaltpols eine Spannung induziert, die einen zweiten Strom durch den Kurzschlussring treibt. Dieser Strom bewirkt ein Magnetfeld, welches im Hauptpol eine Feldlinienverdichtung und im Spaltpol eine Feldlinienschwächung verursacht. Es entsteht ein elliptisches Drehfeld, welches den Läufer mit seinem Drehfeld nachlaufen lässt.

Eine Drehrichtungsumkehr kann durch zwei paar Spaltpole, die wechselseitig kurzgeschlossen werden, erfolgen.

Spaltpolmotoren sind einfach im Aufbau, haben einen kleinen Anzugsstrom, einen günstigen Preis und sind gegen elektrische wie mechanische Überlastung unempfindlich. Ihr Wirkungsgrad ist relativ schlecht und ihr Anzugsmoment ist aufgrund des geringen Anlaufstromes gering. Langsamlaufende Spaltpolmotoren finden Anwendung bei Uhren, Programmsteuerungen, Betriebsstundenzählern und schreibenden Messgeräten. Schnelllaufende Spaltpolmotoren werden für Heizlüfter, Laugepumpen, Plattenspieler und Tonbänder verwendet.

8.4.3 Synchron-Kleinstmotor

Prinzipdarstellung Synchronkleinstmotor



In den Polhörnern die an den Innenseiten mit 8-10 Zähnen ausgestattet sind, bilden sich entsprechend dem angelegten Wechselstrom die Pole aus. Der Läufer besteht aus einem Magnetwerkstoff und wird entsprechend magnetisiert und bildet ebenfalls Pole aus.