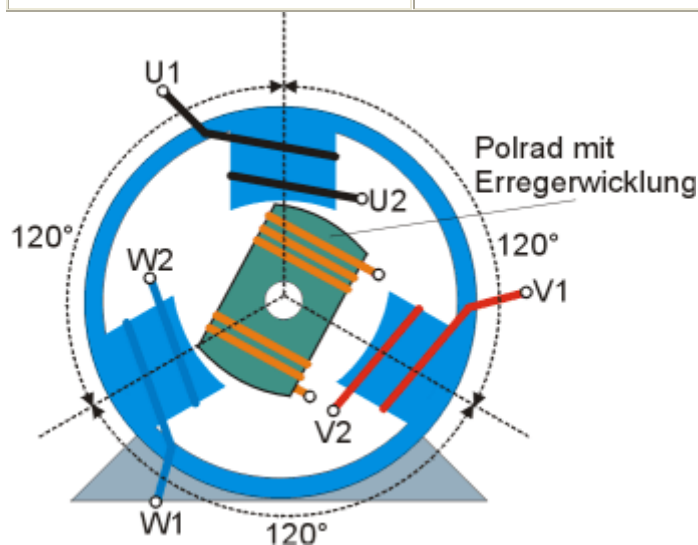


Erzeugung von drei Phasen verschobenen Wechselspannungen

Werden in einem Generator nicht nur eine, sondern drei Spulen im Winkel von 120° versetzt angebracht, so bekommt man in jeder der drei Spulen einen Wechselspannung.

Kennzeichnung der Spulen		
Spule	Anfang	Ende
1.	U1	U2
2.	V1	V2
3.	W1	W2



Erzeugung von drei Phasen verschobenen Wechselspannungen

- Mit Drehstrom kann man Drehfelder auch ohne mechanische Bewegung erzeugen.
- Ein Drehfeld wird erzeugt, wenn ein Magnet gedreht wird oder wenn Drehstrom durch eine kreisförmig angeordnete Drehstromwicklung fließt.

Drei- Phasen- Wechselstrom

Das Schaubild der drei erzeugten Wechselströme lässt erkennen, dass sie nicht in Phase liegen, sondern die Ströme in ihrer Phase genau wie die Spulen um 120° verschoben sind. Das Polrad erzeugt bei 90° in Spule U1 - U2 den Höchstwert von Spannung und Strom. Erst nach $1/3$ Drehung (das entspricht 120°) erreichen Spannung und Strom in Spule V1 - V2 den Höchstwert. Nach weiteren 120° haben Spannung und Strom in Spule W1 - W2 den Höchstwert.

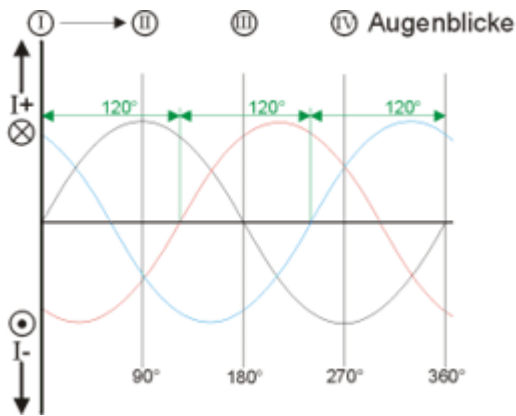
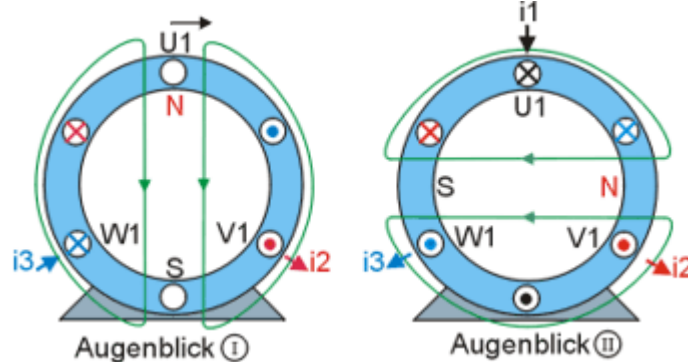


Schaubild der drei erzeugten Wechselströme. Unter der Voraussetzung, dass die drei Induktionsspulen gleiche Windungszahlen und die Verbraucher R_R , R_S , R_T gleiche Wirkwiderstände haben, fließen in den drei Stromkreisen drei Wechselströme gleicher Stärke und gleicher Frequenz. Die Ströme sind mit den Spannungen phasengleich. Solche voneinander unabhängigen Phasensysteme (offene Phasensysteme) werden in der Praxis nicht verwendet, da sie einen hohen Aufwand



von Leitungsmaterial haben.

Augenblickswerte im Generator

Phasenverkettung

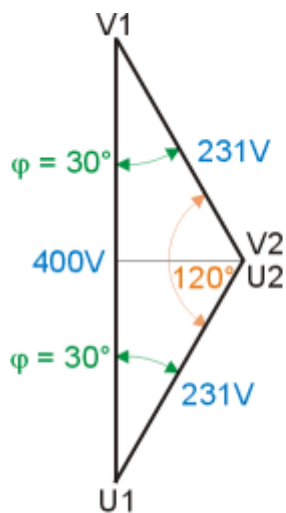
Im Dreiphasensystem besteht aber die Möglichkeit, durch Zusammenschließen der Induktionsspulen des Stromerzeugers die Leiterzahl zu verringern. Aus dem vorherigen Liniendiagramm ist zu entnehmen, dass in jedem beliebigen Zeitpunkt die Summe der Augenblickswerte der Spannungen in den drei Stromkreisen den Wert Null hat. So erreicht z.B. bei einem Drehwinkel von 90° die Spannung in Spule 1 ihren positiven Scheitelwert. Im gleichen Zeitpunkt sind die Spannungen in den Spulen 2 und 3 negativ und gleich der Hälfte des Scheitelwertes. Weil die Summe der Spannungen in jedem Augenblick Null ist, kann man die drei Induktionsspulen zusammenschließen, ohne dass ein Kurzschluss entsteht. Es bestehen zwei Schaltungsmöglichkeiten, die man als Stern- oder Dreieckschaltung bezeichnet.

Verkettung

Die Leiterspannungen setzen sich zusammen aus den Strangspannungen, die in zwei hintereinander geschalteten Wicklungssträngen des Generators induziert werden. Dabei ist zu beachten, dass die beiden Strangspannungen eine Phasenverschiebung

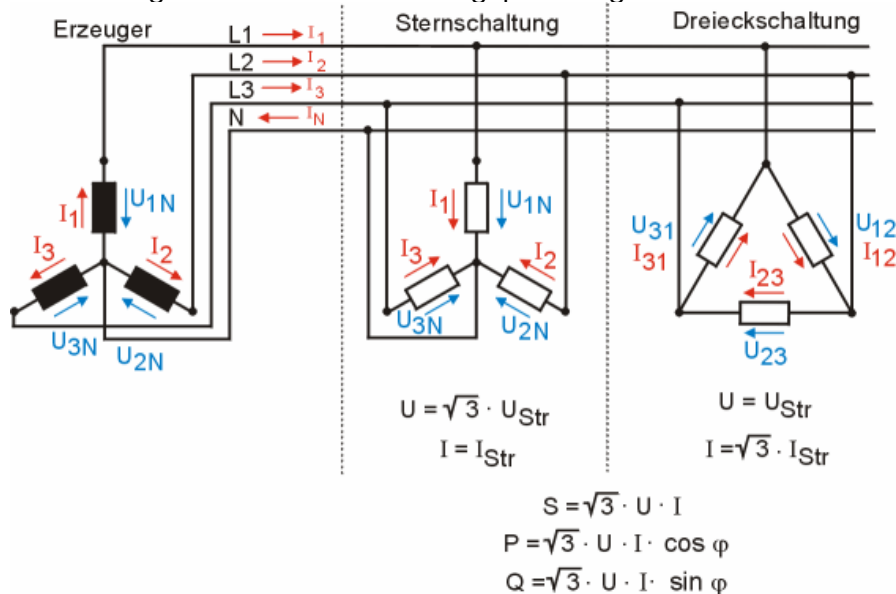
von 120° aufweisen und somit wie gerichtete Größen geometrisch addiert werden müssen. Die Größe der Leiterspannung ergibt sich aus dem Spannungsdreieck den Phasenwinkel von 120° und damit aus der Verhältniszahl 1,732 der Strangspannungen.

Obwohl die E-Werke eine gleichmäßige Belastung der drei Stromkreise anstreben, ist diese Forderung in der Praxis nur näherungsweise erfüllt. deshalb wird im normalen Dreiphasennetz der Neutralleiter mitgeführt, der meist geerdet ist. Bei ungleichmäßiger Belastung der drei Stromkreise fließt im Neutralleiter nur ein Ausgleichstrom, der wesentlich niedriger ist als die Ströme der Außenleiter. Er wird deshalb bei Außenleiterquerschnitten über 16% mit kleinerem Querschnitt als die Außenleiter verlegt.



$$\varphi = 30^\circ \cdot 2 \Rightarrow \cos \varphi = 0,866 \cdot 2 \Rightarrow \sqrt{3} = 1,732$$

Verkettung der Leiter- und Strangspannung



Drehstromsystem mit Formeln Bei Drehstrom nennt man den Faktor Wurzel 3 Verkettungsfaktor.

Das Drehfeld

Wird das Ständerdrehfeld durch drei um 120° versetzte Ständerspulen erzeugt, so ist die Drehfelddrehzahl gleich der Netzfrequenz. Das Drehfeld hat einen Nord- und einen Südpol und somit ein Polpaar. Werden im Ständer sechs um 60° versetzte Stränge untergebracht, so verdoppelt sich die Polzahl des Drehfeldes und die Drehfelddrehzahl halbiert sich, da der Weg von einem Strang zum anderen nur halb so lang ist. Magnetische Pole treten immer paarweise auf, daher berechnet man die Drehfelddrehzahl mit der Polpaarzahl. Maschinen, in denen ein magnetisches Drehfeld wirksam ist, bezeichnet man als Drehfeldmaschinen. Bei Drehstrommotoren wird das Ständerdrehfeld genutzt. Hat der Läufer die gleiche Drehzahl wie das Ständerdrehfeld, spricht man von einer Synchronmaschine. Ist die Läuferdrehzahl kleiner oder größer als die Drehfelddrehzahl, so bezeichnet man die Maschine Asynchronmaschine. Die Drehfelddrehzahl wird bestimmt durch die Netzfrequenz und die Polzahl der Drehstromwicklung.

Berechnung der synchronen Drehzahl

Die Drehzahl des Drehfeldes wird als synchrone Drehzahl bezeichnet. Sie ist abhängig von der Polpaarzahl und der Frequenz.

Formel:	$n_s = \frac{f \cdot 60}{p}$
	[1] min
	synchrone Drehzahl = $\frac{\text{Frequenz} \cdot 60}{\text{Polpaarzahl}}$
Erklärung:	n_s = Drehfelddrehzahl (synchrone Drehzahl) f = Netzfrequenz p = Polpaarzahl

Werte bei einer Frequenz von 50 Hz:						
Polpaarzahl	1	2	3	4	5	6
Pole	2	4	6	8	10	12
synchrone Drehzahl	3000	1500	1000	750	600	500

Sternschaltung Y

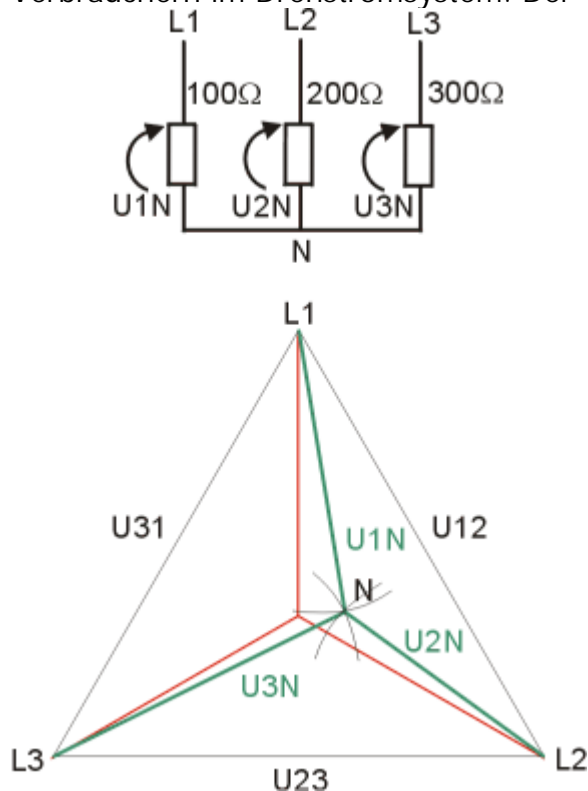
Verbindet man die Enden der Stränge (U2, V2, W2) zusammen zu einen Punkt, entsteht eine Sternschaltung. Der Neutralleiter wird an dem Sternpunkt angeschlossen (Sternpunktleiter). Die drei Stromkreise sind dann nicht mehr voneinander unabhängig sondern sie sind verkettet.

- Bei der Sternschaltung sind die Leiterströme so groß wie die Strangströme.

- Die Leiterspannung ist Wurzel 3 mal so groß wie die Strangspannung.
- Bei symmetrischer Belastung fließt im Neutralleiter kein Strom.

Sternschaltung unsymmetrisch ohne Neutralleiter

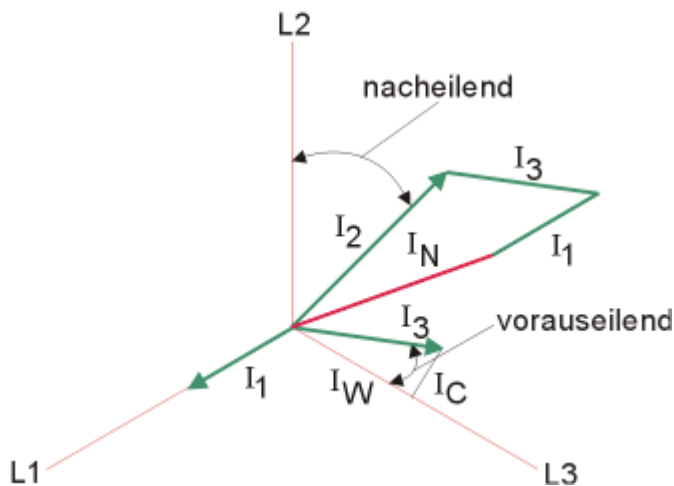
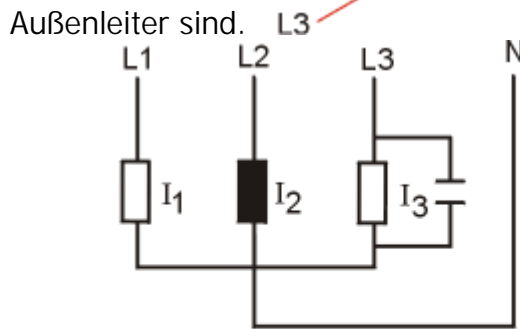
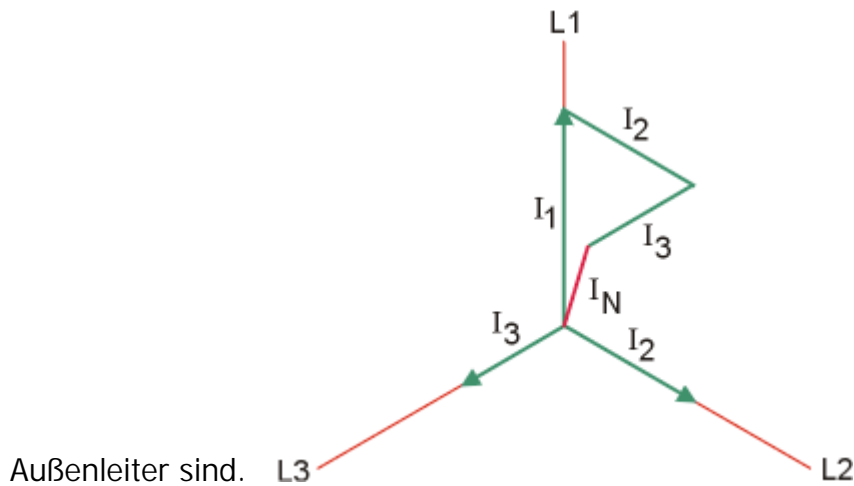
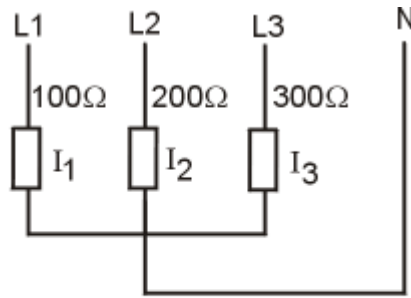
Im Zeigerbild ist zu erkennen, dass sich der Sternpunkt N aus der Mitte verschoben hat. Da kein Neutralleiter angeschlossen ist, muss im Sternpunkt die geometrische Summe der Leiterströme null sein. Damit sich diese Bedingung erfüllt, verändern die Strangspannungen sowohl ihren Betrag als auch ihre Richtung. Es kommt zu einer Sternpunktverschiebung und damit zu Über- oder Unterspannung an den Verbrauchern im Drehstromsystem. Der Verkettungsfaktor Wurzel 3 gilt nicht mehr.



Schalt- und Zeigerbild Treten an den Wechselstromverbrauchern in einem Drehstromsystem unterschiedliche Spannungen auf, so ist der Neutralleiter unterbrochen oder nicht angeschlossen.

Sternschaltung unsymmetrisch mit Neutralleiter

Werden im Drehstromnetz einzelne Lampen- oder Steckdosenstromkreise unterschiedlicher Leistung an den Außenleiter und am Neutralleiter angeschlossen, entsteht eine unsymmetrische Belastung. In den Außenleitern fließen unterschiedliche Ströme. Im Zeigerbild sind die Stromzeiger unterschiedlich lang. Addiert man die Ströme geometrisch, ergibt sich der Strom im Neutralleiter. Der Strom im Neutralleiter wird um so größer, je unterschiedlicher die Ströme in den



Schalt- und Zeigerbilder Bei der Aufteilung der Wechselstromkreise auf die einzelnen Außenleiter des Drehstromsystems soll man auf etwa gleiche Belastung achten.

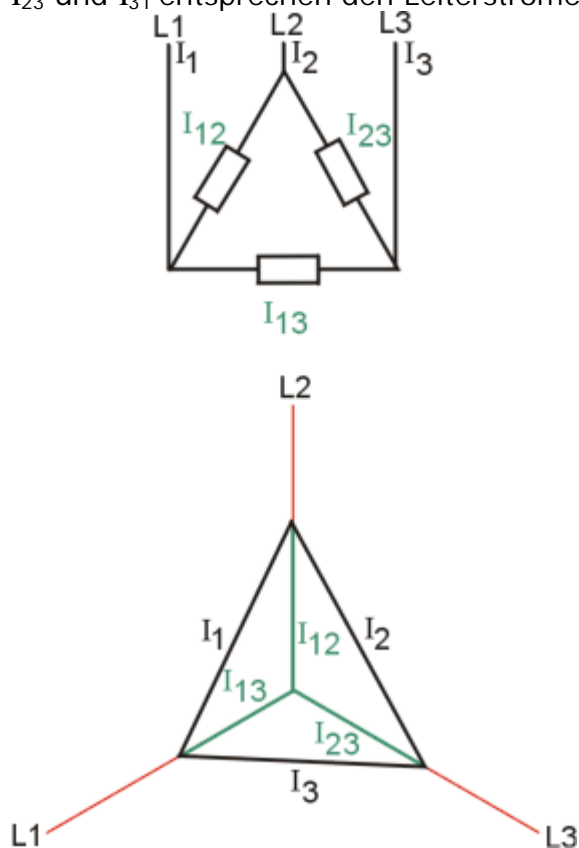
Dreieckschaltung Δ

Verbindet man das Ende eines Stranges mit dem Anfang des nächsten, z.B. U2 mit V1, V2 mit W1 und W2 mit U1, so entsteht eine Dreiecksschaltung. Die drei Leiter L1, L2 und L3, die vom Erzeuger zu den Stranganfängen U1, V1 und W1 führen, nennt man Außenleiter.

- Bei der Dreieckschaltung ist die Strangspannung gleich der Leiterspannung.
- Der Leiterstrom ist Wurzel 3 mal so groß wie der Strangstrom.

Dreieckschaltung unsymmetrisch

Die Strangspannungen bewirken, dass in den unterschiedlichen Widerständen verschieden große Ströme fließen. Sind die Widerstände Wirkwiderstände, haben die Strangströme I_{12} , I_{23} und I_{31} die gleiche Phasenlage wie die zugehörigen Strangspannungen U_{12} , U_{23} und U_{31} . Zur Ermittlung der Leiterströme werden die Zeiger der Strangströme parallel verschoben. Es ergibt sich für die Strangströme ein unsymmetrisches Zeigerbild. Die Verbindungslinien zwischen den Strangströmen I_{12} , I_{23} und I_{31} entsprechen den Leiterströmen I_1 , I_2 und I_3 .



Schalt- und Zeigerbild