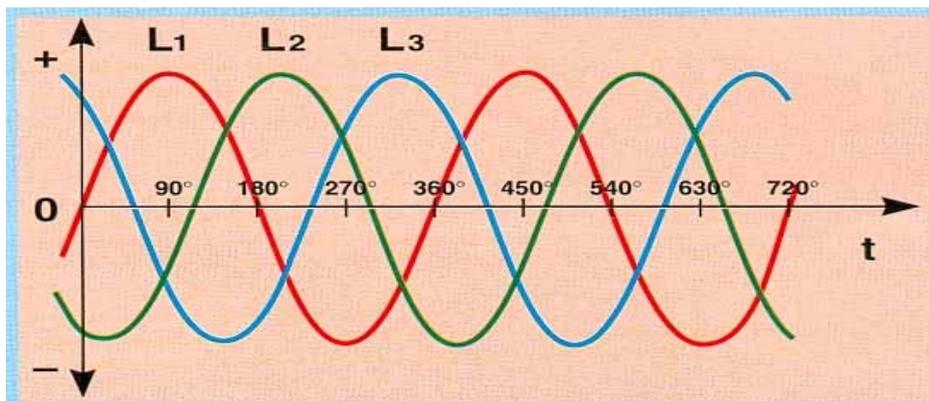


DREHSTROM

Die Kraftwerksgeneratoren der öffentlichen Stromversorgung sind so gebaut, dass sie nicht nur einen einzigen Wechselstrom erzeugen, sondern drei Wechselströme zugleich: Dieser "dreiphasige" Wechselstrom wird auch als Drehstrom bezeichnet.

Genauer besteht Drehstrom im Idealfall aus drei Wechselströmen, deren Sinuskurven um jeweils 120 Grad gegeneinander versetzt sind. Dadurch ergänzen sich Spannungen und Stromstärken der drei Ströme in jedem Augenblick zur Gesamtsumme null. Man braucht deshalb für die drei Drehströme in diesem Fall keinen besonderen Rückleiter, wenn Verbraucher in "Stern-" oder "Dreieckschaltung" angeschlossen sind.



Die drei Wechselströme (Phasen) des Drehstromsystems werden mit L1, L2, L3 bzw. R, S, T bezeichnet; die Anschlusspunkte an Betriebsmitteln mit U, V, W.

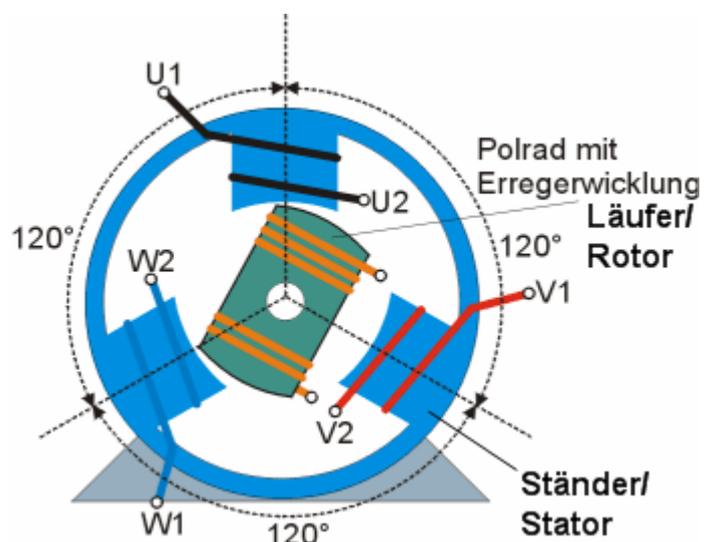
Mit Drehstrom kann man Drehfelder auch ohne mechanische Bewegung erzeugen.
-> Drehstrommotoren!

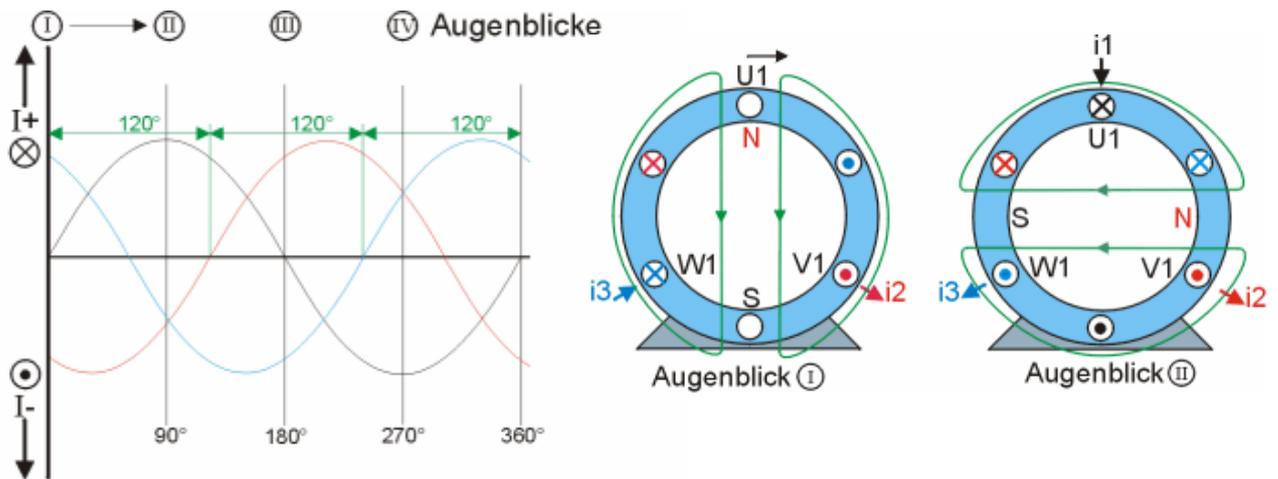
Drehstromerzeugung

Bei Drehstrom handelt es sich um drei Wechselströme, die im selben Generator erzeugt werden. In einem solchen Wechselstromgenerator wird nicht nur eine, sondern werden drei Spulen im Winkel von 120° versetzt angebracht. So bekommt man in jeder der drei Spulen einen Wechselstrom.

Die drei Anfänge und Enden der Spulen sind wie folgt gekennzeichnet:

Spule 1:	U1, U2
Spule 2:	V1, V2
Spule 3:	W1, W2





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.

Es kommen im Wesentlichen zwei Generatortypen und ihre Abwandlungen zur Anwendung - der Synchron- und der Asynchrongenerator.

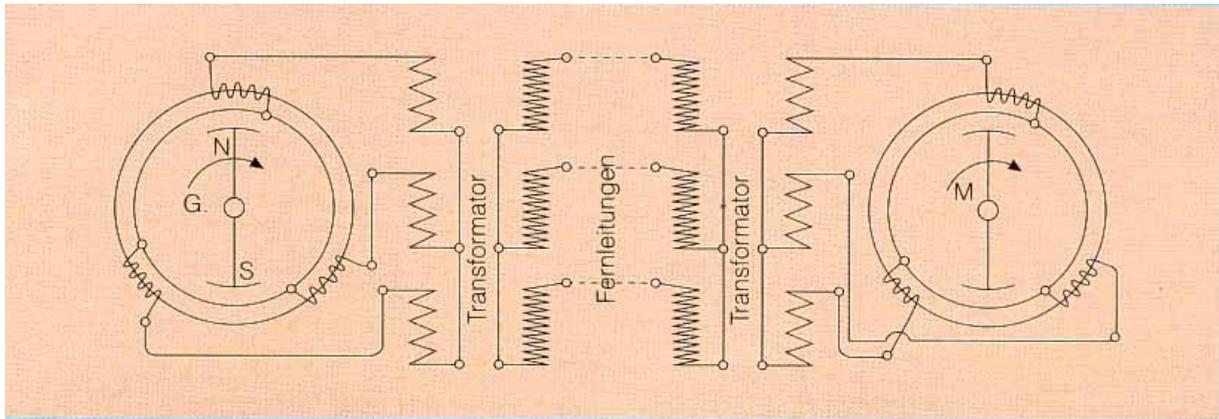
Werden die Wicklungen des Läufers mit Gleichstrom versorgt, so wird er zum Elektromagneten. Es entsteht ein Synchrongenerator. Bei diesem folgt der erzeugte Wechselstrom genau der Drehbewegung des Läufers. Heute werden in Kraftwerken v. a. Synchrongeneratoren verwendet. Der rotierende Elektromagnet empfängt dabei den Gleichstrom für den Aufbau des Magnetfeldes aus einer speziellen Erregereinrichtung.

Der Rotor eines Asynchrongenerators besteht aus einem so genannten Käfig- oder Kurzschlussläufer, das heißt, die Läuferwicklung ist in sich kurzgeschlossen und hat keine Stromzuführung. Treibt eine Turbine den Läufer schneller, als sich das Magnetfeld in der Statorwicklung dreht, wird in dem Kurzschlussläufer ein Strom induziert. Dieser Strom erzeugt das Magnetfeld des Läufers.

Drehstromanwendung

Das folgende Bild zeigt das Prinzip der Drehstromübertragung: Links der Generator, rechts der Motor; dazwischen die beiden Trafos, die den Strom für den Transport über die Fernleitungen (gestrichelte Linien in der Mitte) erst hoch- und dann wieder heruntertransformieren.





Neben der Möglichkeit des „leistungskonstanten“ Ferntransports von elektrischer Energie bietet Drehstrom noch weitere Vorteile. Der Drehstrom verdankt seinen Namen der Anwendung für den Betrieb von Elektromotoren. Ein elektrischer Motor ist im Prinzip genauso aufgebaut wie ein Generator. In vielen Anwendungsfällen wird sogar dieselbe Maschine mal als Generator, mal als Motor verwendet. Der Unterschied liegt in der Richtung der Energieumwandlung: Beim Generator wird der Rotor mechanisch angetrieben und erzeugt dadurch in den Wicklungen des Ständers elektrische Energie. Beim Motor wird dieselbe Maschine mit elektrischer Energie beschickt und erzeugt dadurch mechanische Energie.

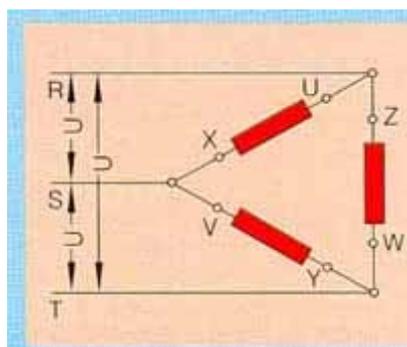
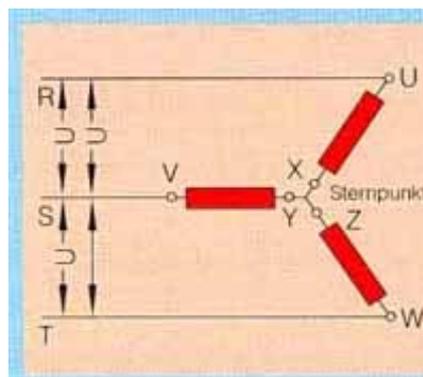
Die Umkehrbarkeit des Prinzips macht man sich beispielsweise in Pumpspeicherkraftwerken zunutze, wo die Turbinensätze wahlweise im Generatorbetrieb (zur Stromerzeugung) und im Motorbetrieb (zum Hochpumpen des Wassers) eingesetzt werden. Bei netzgekoppelten Windkraftanlagen kann der Generator im Motorbetrieb als Anlaufhilfe verwendet werden. Bei Elektroautos und elektrischen Zügen (z.B. ICE) werden die Fahrmotoren auf Generatorbetrieb umgestellt, um Bremsvorgänge mit Energiegewinnung zu verbinden: Die Fahrmotoren treiben dann nicht mehr an, sondern werden ihrerseits von der Bewegungsenergie des Fahrzeugs angetrieben. Die Folge ist eine Bremswirkung. Der beim Bremsen erzeugte Strom wird in die Batterie bzw. Fahrleitung zurückgespeist.

Phasenverkettung

Für einphasigen Wechselstrom sind zwei Leitungen erforderlich. Demnach bräuchte man für drei Phasen eigentlich sechs Leitungen. Im Dreiphasensystem besteht die Möglichkeit, durch Zusammenschließen der Induktionsspulen des Stromerzeugers die Leiterzahl zu verringern. Dem obigen Schaubild der drei Phasenströme 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. Drehstrom benötigt also im „symmetrischen Betrieb“, dem Idealbetrieb, nur drei Leitungen.

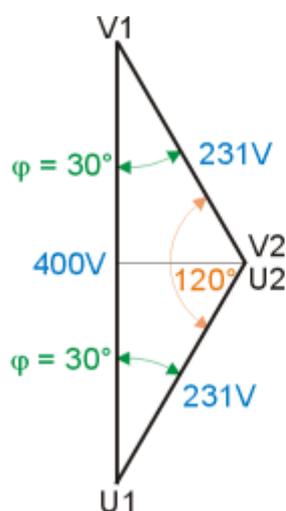
Für den Anschluss an die drei Phasen eines Drehstromsystems gibt es zwei Möglichkeiten: die Stern- und die Dreieckschaltung!

Bei der Sternschaltung werden die Eingänge der drei Teilverbraucher des Drehstrombetriebsmittels mit den Leitern R, S, T und die Ausgänge sternförmig miteinander verbunden. Im Niederspannungsnetz erhält dadurch jeder der drei Teilverbraucher die "Strangspannung" von 230 Volt, die zwischen jedem der drei Leiter und dem gemeinsamen Sternpunkt besteht. Optional kann man an den Sternpunkt noch einen vierten Leiter, den so genannten Sternpunktleiter bzw. Nulleiter anschließen.



Bei der Dreieckschaltung werden die Ein- und Ausgänge der drei Teilverbraucher in Form eines Dreiecks miteinander verbunden. Zugleich wird jede "Spitze" des Dreiecks an eine der drei Phasen gelegt. Im Niederspannungsnetz erhält so jeder der Teilverbraucher die "Außenleiterspannung" von 400 Volt, die jeweils zwischen zwei der drei Phasen-Leiter besteht.

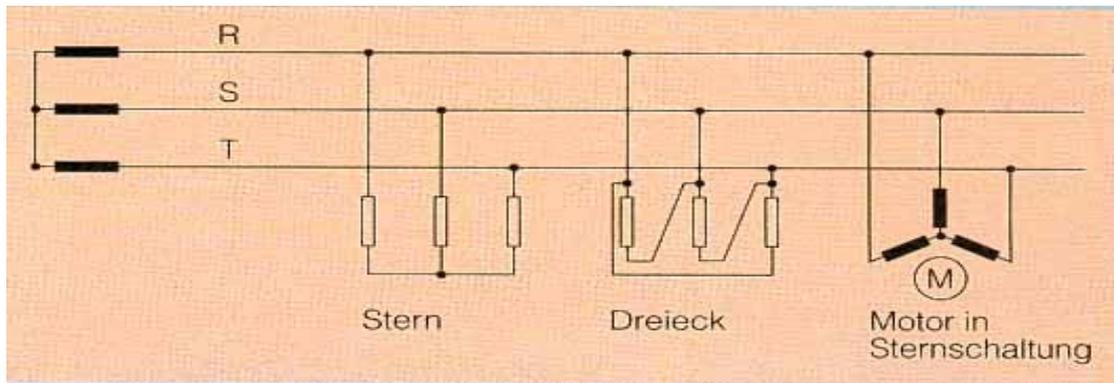
Die Leiterspannungen setzen sich zusammen aus den Strangspannungen die in zwei hintereinander geschalteten Wicklungssträngen des Generators induziert werden. Dabei ist zu beachten, dass die beiden Strangspannungen eine Phasenverschiebung von 120° aufweisen und somit wie gerichtete Größen geometrisch 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.



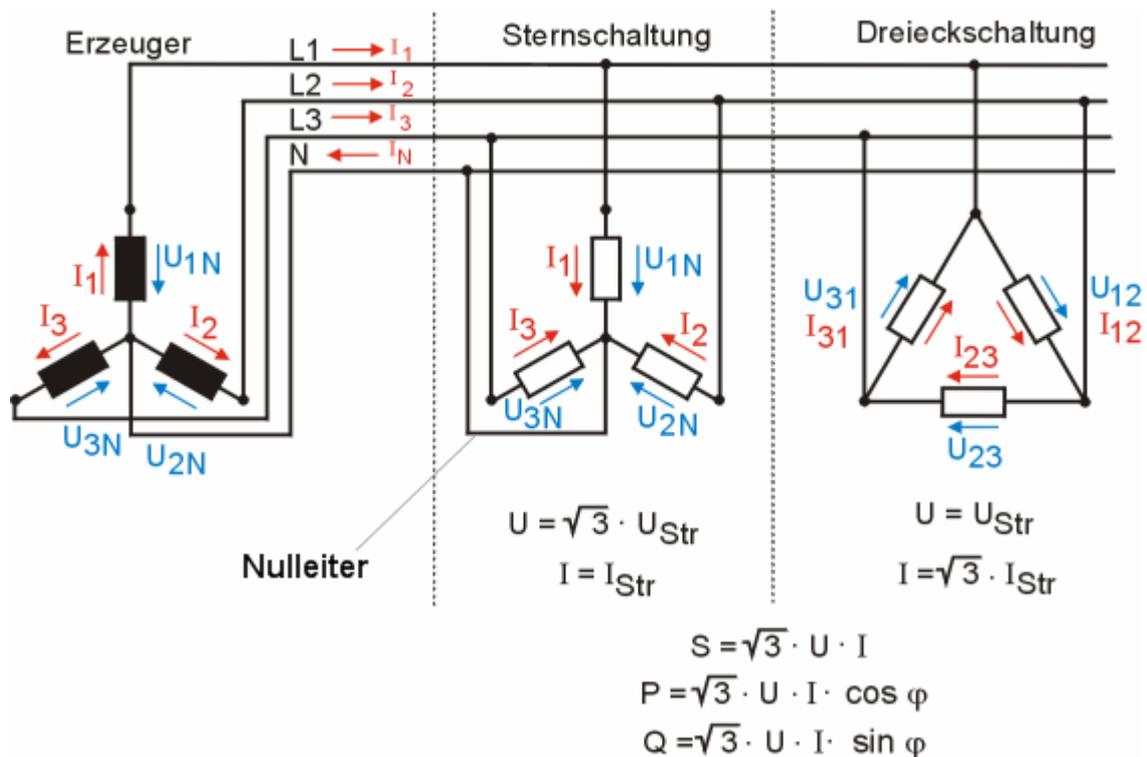
$$\varphi = 30^\circ \cdot 2 \Rightarrow \cos \varphi = 0,866 \cdot 2 \Rightarrow \sqrt{3} = 1,732$$

Je nach Art der Schaltung verketteten sich die Stromstärken der drei Phasen oder deren Spannungen. So lässt sich zum Beispiel aus demselben Drehstrom durch Sternpunkt-Schaltung eine Spannung von 230 Volt oder durch Dreieckschaltung eine Spannung von 400 Volt gewinnen.

Die Transformatoren, die der Strom auf seinem Weg vom Kraftwerk zur Steckdose passieren muss, sind entweder im Stern oder Dreieck geschaltet. Zum Beispiel verwendet man beim Übergang von der Mittel- auf die Niederspannung üblicherweise die Dreiecksschaltung für die Oberspannungsseite des Transformators (30 kV oder 10 kV) und die Sternschaltung für die Niederspannungs-Seite (400/230 Volt).



Jedes Betriebsmittel weist mehrere „Stränge“ auf. Dabei handelt es sich um die Zweige, die *bei der Dreieckschaltung* zwischen den Außenleitern oder *bei der Sternschaltung* zwischen einem Außenleiter und dem Sternpunkt, also dem Knotenpunkt *N* liegen.



U : Nennspannung

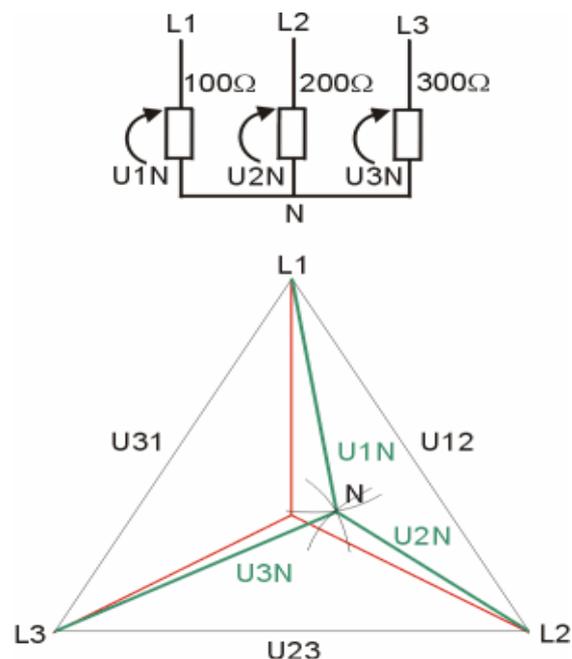
I : Nennstrom

Obwohl die Stromerzeuger eine gleichmäßige Belastung der drei Stromkreise anstreben, ist diese Forderung in der Praxis nur näherungsweise erfüllt. Es kommt zum „unsymmetrischen Betrieb“, bei dem sich die drei Leiterströme nicht mehr zu Null ergänzen. Deshalb wird im normalen Dreiphasennetz der Nulleiter mitgeführt, der meist geerdet ist. Bei ungleichmäßiger Belastung der drei Stromkreise fließt im fehlerfreien Betrieb im Nulleiter nur ein Ausgleichstrom, der wesentlich niedriger ist als die Ströme der Außenleiter.

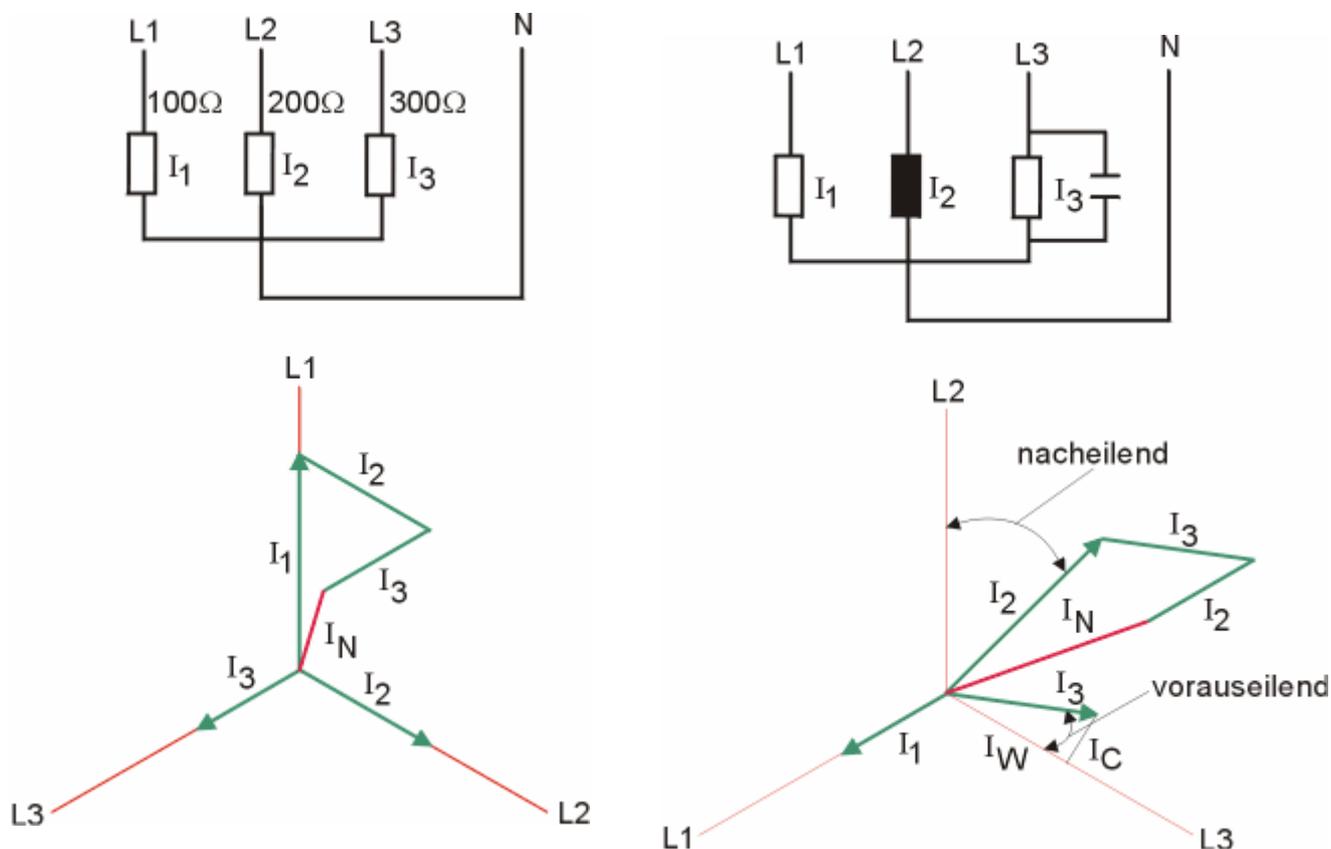
Unsymmetrien

Sternschaltung ohne Nulleiter unsymmetrisch belastet

Im Zeigerbild ist zu erkennen, dass sich der Sternpunkt N aus der Mitte verschoben hat. Da kein Nulleiter 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 $\sqrt{3}$ gilt nicht mehr. Wenn somit an den Wechselstromverbrauchern in einem Drehstromsystem unterschiedliche Spannungen auftreten, so ist der Nulleiter unterbrochen oder nicht angeschlossen.



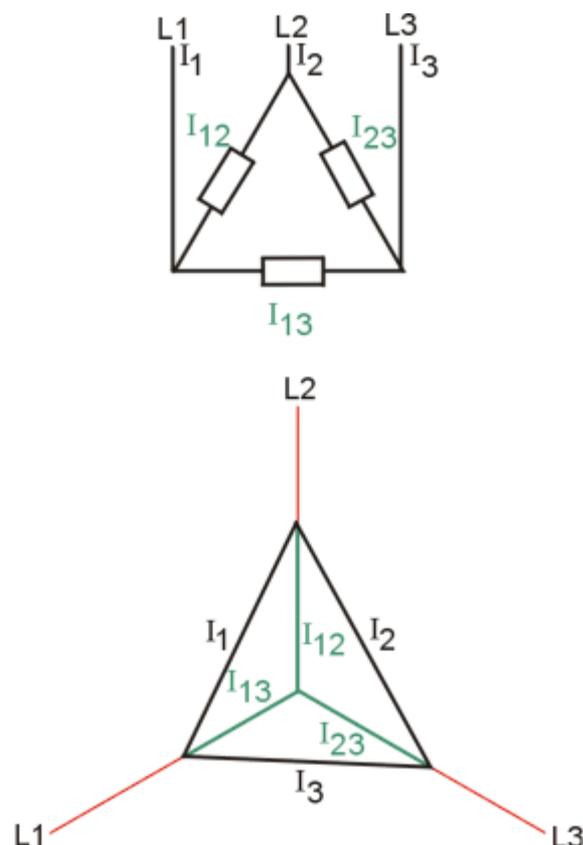
Sternschaltung mit Nulleiter unsymmetrisch belastet



Werden im Drehstromnetz einzelne Lampen- oder Steckdosenstromkreise unterschiedlicher Leistung an den Außenleiter und am Nulleiter 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 Nulleiter. Der Strom im Nulleiter wird um so größer, je unterschiedlicher die Ströme in den Außenleiter. Bei der Aufteilung der Wechselstromkreise auf die einzelnen Außenleiter des Drehstromsystems ist deshalb auf etwa gleiche – am besten symmetrische – Belastung zu achten.

Dreieckschaltung unsymmetrisch belastet

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 .

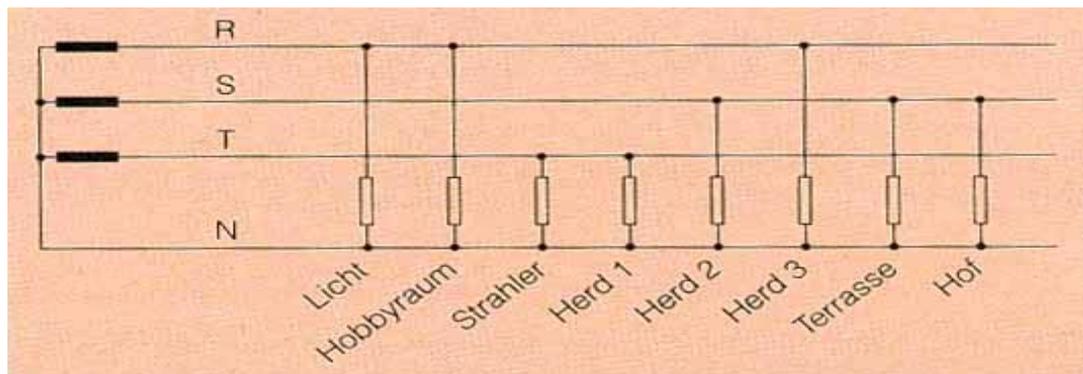


Drehstrom im Alltag

Der private Endverbraucher verfügt normalerweise über keinen Drehstrom. Der dreiphasige Wechselstrom endet vielmehr beim Hausanschluss. Innerhalb des Hauses wird nur jeweils eine der drei Phasen für die einzelnen Stromkreise verwendet. Entsprechend weist die übliche Steckdose im Haushalt zwei Kontakte auf: Der eine ist die "Phase", genauer gesagt eine der insgesamt drei Phasen des Drehstromsystems; der andere ist der geerdete Nulleiter (Neutralleiter), der zugleich als Mittelpunktleiter fungiert und mit dem Sternpunkt des Niederspannungs-Transformators verbunden ist.

An jedem der einzelnen Stromkreise eines Haushalts kann eine andere Phase liegen. Zum Beispiel kann der Stromkreis "Küche und Bad" mit Phase 1, "Wohnzimmer und Schlafzimmer" mit Phase 2, "Hobbykeller/Garage" mit Phase 3

und "Gästezimmer" wiederum mit Phase 2 versorgt sein. Man könnte auch sämtliche Stromkreise eines Haushaltes oder mehrerer Häuser mit ein- und derselben Phase versorgen. Dies würde allerdings zu verstärkten Unsymmetrien bei der Belastung der drei Phasen im Niederspannungsnetz führen. Die Elektroinstallateure sind deshalb gehalten, die drei Phasen möglichst gleichmäßig auf die Stromkreise zu verteilen. Da jeder Stromkreis nur eine Phase des Drehstroms führt, ist bei der Installation der Stromkreise auf eine möglichst gleichmäßige Belastung der drei Phasen zu achten. Eine völlig gleichmäßige Belastung der drei Phasen wird aber bei dieser Schaltungsweise – im Niederspannungsbereich - nie möglich sein. Es fließt deshalb über den Neutraleiter ein entsprechender Ausgleichsstrom.



Das Bild zeigt eine schematische Darstellung der einphasigen Stromversorgung im Haushalt: Jeder Stromkreis - mit Ausnahme des Herds, der als starker Verbraucher dreiphasig angeschlossen ist - liegt mit seinem Eingang an einer der drei Phasen und erhält somit die "Strangspannung" von 230 Volt. Da die einzelnen Stromkreise je nach Anzahl und Leistung der gerade angeschalteten Geräte unterschiedlich belastet werden, entstehen Unsymmetrien zwischen den drei Phasen, die über den "Neutraleiter" N ausgeglichen werden.

Da der Neutraleiter geerdet ist, besteht die Spannung von 230 Volt auch gegenüber "Erde" (besonders ausgeprägt z.B. gegenüber Wasserleitung oder Zentralheizung). Sie besteht ebenso, wenn eine Person mit dem Phase-Leiter in Berührung kommt und zugleich eine mehr oder weniger leitende Verbindung gegenüber "Erde" hat. Dabei fließt über den menschlichen Körper ein Strom zur Erde, der je nach Güte der leitenden Verbindung einer Stärke von 0,025 Ampère überschreiten und damit lebensgefährlich werden kann.

In Haushalten sind Drehstrom-Steckdosen auf Ausnahmefälle beschränkt, etwa auf einen besonderen "Kraft"-Anschluss für Waschmaschinen oder leistungsstarke Heizgeräte. Ansonsten findet man Drehstrom-Steckdosen und drehstromtaugliche Geräte normalerweise nur in Landwirtschafts-, Gewerbe- und Industriebetrieben. Der Endverbraucher kann dort seine elektrischen Geräte wahlweise in Sternschaltung (mit 230 Volt) oder in Dreiecksschaltung (mit 400 Volt) betreiben. Die (roten) Drehstrom-Steckdosen erkennt man an den drei Kontakten für die drei Phasen-Leiter (außerdem verfügen sie über den üblichen Schutzkontakt). Eine besondere „Führungsnase“ gewährleistet, dass die Phasen beim Einstöpseln des Steckers übereinstimmen. Beim Vertauschen der Phasen laufen Drehstrommotoren nämlich rückwärts, was unliebsame Folgen haben kann.