

# Dreiphasenwechselstrom – Drehstrom

Als Dreiphasenwechselstrom früher auch als Kraftstrom, Bau- und Industriestrom oder Starkstrom oder heute als Drehstrom bezeichnet wird in der Elektrotechnik eine Form des Mehrphasenwechselstrom benannt, welche aus drei einzelnen Wechselströmen bzw. Wechselspannungen gleicher Frequenz besteht die zueinander in ihren Phasenwinkeln fest um  $120^\circ$  verschoben sind.

Anwendung findet das Dreiphasensystem vor allem im Bereich der elektrischen Energietechnik für Transport und Verteilung von elektrischer Energie in Stromnetzen. Beispiele sind die internationalen Drehstrom-Hochspannungs-Übertragungsnetze, Niederspannungsnetze im Bereich der lokalen Stromversorgung für die Haushalte.

Werden in einem Drehstromgenerator drei Spulen im Kreis um jeweils  $120^\circ$  versetzt angeordnet, entstehen bei einem dazu zentrisch rotierenden Drehfeld drei zeitlich ebenso versetzte Wechselspannungen. Im einfachsten Fall geschieht dies durch einen rotierenden Dauermagneten. Die Wechselspannungen erreichen ihre maximale Auslenkung zeitlich um je eine Drittelperiode versetzt nacheinander. Der zeitliche Versatz der Aussenleiterspannungen wird durch den Phasenverschiebungswinkel beschrieben. Die drei Leiter werden als Aussenleiter bezeichnet und üblicherweise mit  $L_1$ ,  $L_2$  und  $L_3$  bezeichnet (Bild 1, 2 und 3).

Eine bedeutsame Schaltung der Drehstromtechnik ist die Sternschaltung mit einem Mittelpunkt, der mit einem Neutralleiter  $N$  verbunden wird. Dieser führt bei gleichmäßiger Belastung der drei Außenleiter keinen Strom, bei ungleichmäßiger Belastung lediglich ein Strom, der sich aus der vektoriellen Addition der Einzelströme ergibt. Eine weitere wichtige Schaltung ist die Dreieckschaltung, in der kein Neutralleiter vorkommt.

In Dreiphasensystemen wird die Spannung zwischen zwei beliebigen Außenleitern als verkettete Spannung bezeichnet, die Spannung zwischen dem Neutralleiter und einem beliebigen Außenleiter als Sternspannung. Die Effektivwerte dieser Spannungen stehen zueinander über ein fixes Verhältnis in Bezug, das als Verkettungsfaktor bezeichnet wird und bei Dreiphasensystemen immer den Wert  $\sqrt{3}$  aufweist. Bei den in Niederspannungsnetzen in Europa üblicherweise verwendeten Spannungen beträgt der Nennwert der Sternspannung 230 V, womit sich zwischen zwei Außenleitern eine verkettete Spannung von

$$230V \cdot \sqrt{3} \approx 400V$$

ergibt. Die Spannungen von Dreiphasensystemen werden nach dem Effektivwert der verketteten Spannung benannt, für die in Europa üblichen Niederspannungsnetze beispielsweise als «400-V-Drehstromnetz» (Bild 4).

Der Dreiphasenwechselstrom bietet eine einfache Möglichkeit, ein gleichmässiges Drehfeld zu erzeugen. Dieses Drehfeld wird im Rahmen von Drehstrommaschinen für Antriebe (Motorbetrieb) oder zur Gewinnung elektrischer Energie (Generatorbetrieb) genutzt.

Drehstrommaschinen unterteilen sich in die

- **Synchronmaschinen**, bei denen der Rotor mit der gleichen Drehzahl wie das Stator-Drehfeld rotiert, und die

- **Asynchronmaschinen**, bei denen der Rotor eine vom Stator-Drehfeld verschiedene Drehzahl aufweist. Die in Prozent angegebene Differenz zwischen den Drehzahlen des Rotors und des Stator-Drehfelds wird als Schlupf bezeichnet (Bild 5 und 6).

Im Bild 5 sind die Zusammenhänge der Frequenz und der Drehzahl sowie der Polzahl dargestellt.

Durch Vertauschen zweier beliebiger Außenleiter kann die Richtung des Drehfeldes im Dreiphasensystem umgekehrt werden, was zur Richtungsumkehr von Drehstrommotoren bei der Wende-Schützschaltung ausgenutzt wird.

Asynchronmaschinen mit Kurzschlussläufern sind einfach aufgebaut, robust, betriebssicher, wartungsfrei und wirtschaftlich. Sie besitzen keinen Kollektor, der sich abnutzen kann und Funkstörungen hervorruft, und arbeiten so zuverlässiger als einphasige Wechselstrommotoren. Bei elektrischen Maschinen werden die Außenleiter statt mit  $L_1$ ,  $L_2$  und  $L_3$  im deutschsprachigen Raum mit den Buchstaben  $U$ ,  $V$  und  $W$  bezeichnet.

Zum Starten von großen Drehstrommotoren werden Schaltungen wie die Stern-Dreieck-Schaltung, Anlasstransformator, Sanftanlauf-Gerät oder elektronische Wechselrichter verwendet.

Die erstmalige Erwähnung von mehrphasigem Wechselstrom ist mit mehreren Namen verbunden. Der Italiener GALILEO FERRARIS untersuchte 1885 mehrphasige Wechselströme. Aus den Versuchsergebnissen definierte er das Drehfeldprinzip. NIKOLA TESLA befasste sich seit 1882 mit der Thematik von Mehrphasenwechselströmen und konstruierte 1887 einen Zweiphasen-Wechselstrommotor, der das Drehstromnetz in Amerika einführen sollte. Die fast zeitgleichen Entwicklungen von Galileo Ferraris und Nikola Tesla waren durch diverse Patente geschützt, es kam dabei auch zu rechtlichen Auseinandersetzungen. Unabhängig patentierte CHARLES SCHENK BRADLEY in den Jahren 1887 und 1888 Ideen zu verschiedenen Mehrphasensystemen, konnten seine Ideen aber nur unzureichend praktisch umsetzen.

Der erste Dreiphasengenerator wurde 1887 von dem deutschen Erfinder FRIEDRICH AUGUST HASELWANDER gebaut, ein Patentantrag im gleichen Jahr wurde zunächst abgelehnt, dann aber 1889 anerkannt. Jedoch wurde von großen Elektrounternehmen, welche die Bedeutung der Erfindung erkannten, Einspruch gegen die Patenterteilung eingelegt und der Streitwert für einen Rechtsstreit auf 30 Millionen Mark veranschlagt, den Haselwander für sich nicht riskieren konnte. Haselwander war als Oberingenieur bei Wilhelm Lahmeyer & Co in Frankfurt am Main tätig und übertrug der Firma sein Patent. Als 1892 die AEG Lahmeyer übernahm, verlor Haselwander damit seine Patentrechte.

Bei der AEG in Deutschland arbeitete unabhängig von diesen Ereignissen 1888 MICHAEL OSSIPOWITSCH DOLIWO-DOBROWOLSKI mit Dreiphasen-Wechselstrom und führte dafür den Begriff «Drehstrom» ein. Der zugehörige von ihm erfundene Asynchronmotor wurde Anfang 1889 erstmals von AEG ausgeliefert. Die ersten Maschinen leisteten 2 bis 3 PS. Ein zur gleichen Zeit gebauter Motor von Haselwander konnte sich nicht durchsetzen, weil man dessen Patente wieder aberkannte und zudem die Verwendung untersagte, weil eine Störung der Telegraphenleitungen befürchtet wurde.

Ab 1898 wurde an der deutsch-schweizerischen Grenze im Rhein im Alten Wasserkraftwerk von Rheinfeldern weltweit erstmals in großtechnischem Maßstab Dreiphasenwechselstrom mit einer Frequenz von 50 Hz erzeugt. Diese Frequenz ist heute in vielen Ländern die Netzfrequenz. Die Budapester Maschinenfabrik Ganz & Cie. ließ unter dem Chefkonstrukteur

KÁLMÁN KANDÓ 1899 eine 1,5 Kilometer lange Versuchs-Eisenbahnstrecke auf der Altöfener Donauinsel sowie 1900 die Werksbahn der Munitionsfabrik Wöllersdorf bei Wiener Neustadt für den Betrieb mit 3 kV anlegen.

Ab 1899 erforschte die Studiengesellschaft für Elektrische Schnellbahnen (St.E.S.) den elektrischen Bahnbetrieb bei hoher Geschwindigkeit. Dazu wurde die Militäreisenbahn bei Berlin für den Drehstrom-Betrieb mit einer dreipoligen Oberleitung versehen. Auf dem Höhepunkt der Versuche erreichte 1904 ein Drehstrom-Triebwagen der AEG die damalige Rekordgeschwindigkeit von 210 Kilometern pro Stunde.

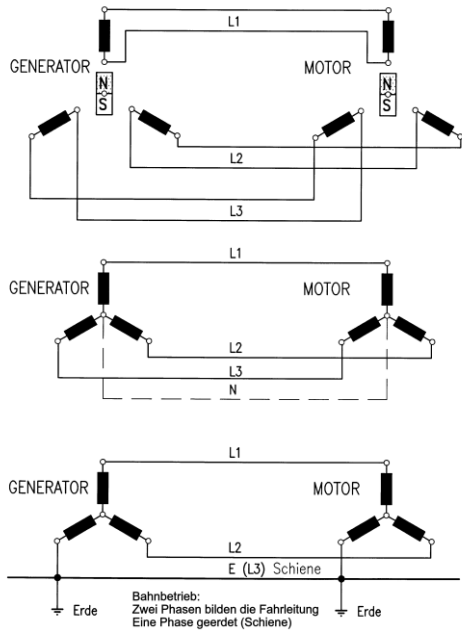
Die Eisenbahngesellschaft Rete Adriatica (RA) eröffnete 1902 die Veltlinbahn, als erste mit Hochspannung elektrifizierte Hauptbahnlinie der Welt. Dafür lieferte ebenfalls Ganz & Cie. die Versorgung mit 3 kV und 15,6 Hz sowie die zugehörigen Lokomotiven. Dieses «Trifase» System wurde später auf ganz Norditalien ausgeweitet und bestand unter der Ferrovie dello Stato bis 1976. Der Drehstromantrieb konnte sich bei Bahnen in den Folgejahrzehnten erst dann durchsetzen als die Leistungselektronik in Form von Frequenzumrichtern es ermöglichte, im Fahrzeug Drehstrom variabler Frequenz aus dem einphasigen Bahnstrom zu erzeugen.

Das Prinzip bei der Anwendung des Drehstromsystems bei den Bahnen wird im Bild 7 anhand eines Prinzipschemas der Gornergratbahn aufgezeigt. Die Speisung erfolgt aus dem Ortsnetz 50 Hz mit 20 kV. Der Transformator primärseitig in Sternschaltung und sekundär in Dreieckschaltung transformiert die Spannung auf 725 V Phasenspannung herunter. Der Phasenleiter L1 ist dabei an Erde, d.h. mit der Schiene verbunden. So ergeben sich die verketteten Phasenspannungen von 725 V zwischen L2 und L3 und L2 bzw. L3 gegen die an Erde gelegte Fahrschiene. Der auf dem Triebfahrzeug befindliche Asynchronmotor ist einerseits mit einer Phase an Erde (Fahrschiene via Laufwerk) und andererseits an die Fahrleitung L2 und L3 angeschlossen.

Hans Bodmer, CH-8625 Gossau ZH (Schweiz)

im April 2015

## « » **Kasten: Dreiphasenwechselstrom – Drehstrom** **Bilderverzeichnis mit Legenden**



Das Zusammenspiel zwischen Generator und Motor im Drehstromsystem

Bild 1:

Erzeugung von Dreiphasenwechselstrom und das Zusammenspiel zwischen Erzeuger (Generator) und Verbraucher (Asynchronmotor). Bei der Anwendung der Drehstrombahnen ist jeweils eine Phase an Erde (Fahrschiene) gelegt.

Zeichnung: Hans Bodmer, CH-8625 Gossau ZH (Schweiz)

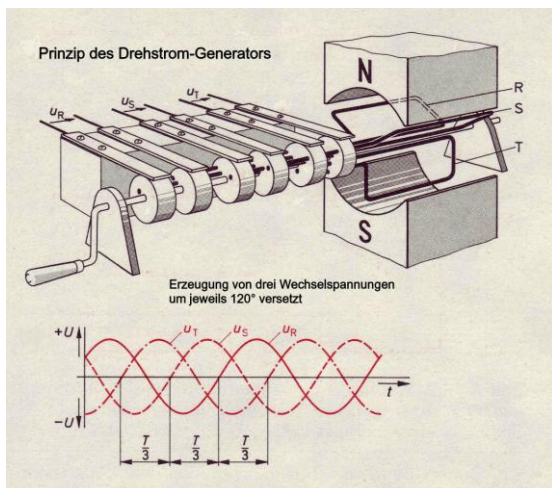


Bild 2:

Das Prinzip des Drehstrom-Generators. Die jeweiligen Wicklungsschleifen, welche das Magnetfeld N-S durchleiten sind um  $120^\circ$  versetzt. Dadurch wird in den Schleifen ein Strom induziert, der an den Schleifringen als  $u_R$ ,  $u_S$  und  $u_T$  abgenommen werden kann.

Zeichnung: Slg. Hans Bodmer, CH-8625 Gossau ZH (Schweiz)

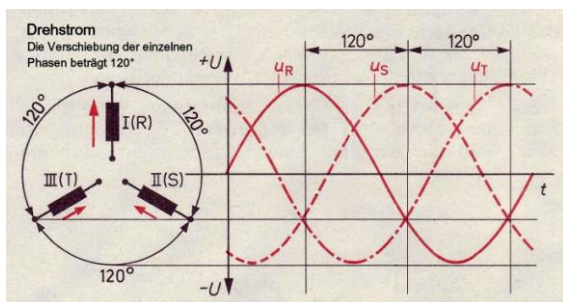


Bild 3:

Die Verschiebung der einzelnen Phasen,  $u_R$ ,  $u_S$  und  $u_T$  beträgt  $120^\circ$ .

Zeichnung: Slg. Hans Bodmer, CH-8625 Gossau ZH (Schweiz)

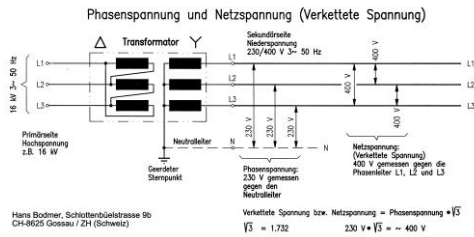


Bild 4:

Zusammenhänge zwischen Phasenspannung und der verketteten Spannung anhand eines Beispiels der öffentlichen Energieversorgung. Drehstromnetz 230/400 V.

Zeichnung: Hans Bodmer, CH-8625 Gossau ZH (Schweiz)

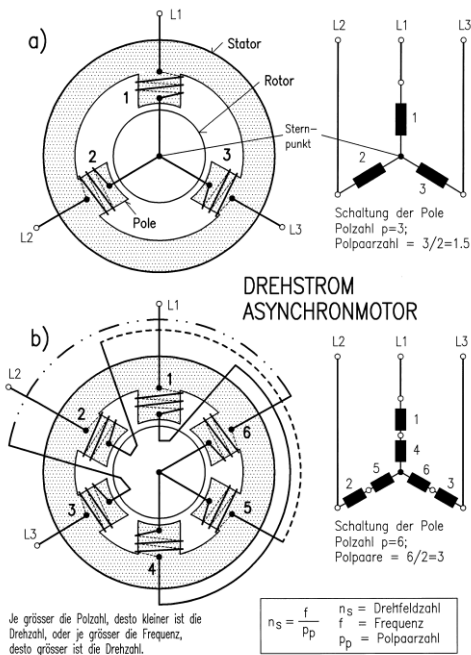


Bild 5:

Prinzip des Drehstrom Asynchronmotors mit den entsprechenden Schaltungen und den Zusammenhängen zwischen Drehfeld, Anzahl Pole (Polpaarzahl) und Frequenz.

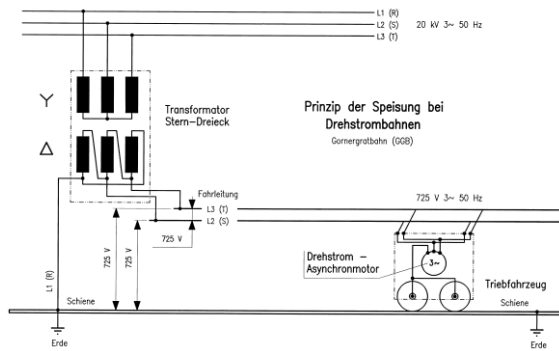
Zeichnung: Hans Bodmer, CH-8625 Gossau ZH (Schweiz)



Bild 6:

Schnittmodell eines Drehstrom-Asynchronmotors. Die Drehmomentübertragung zwischen Stator und Rotor (Anker) erfolgt induktivmässig. Diese Motoren sind sehr wartungsarm – ein Kollektor entfällt.

Bild: Slg. Hans Bodmer, CH-8625 Gossau ZH (Schweiz)



**Bild 7:**

Prinzip der Stromversorgung bei Drehstrombahnen anhand eines Beispiels der Gornergratbahn (GGB) Zermatt – Gornergrat. Eine Phase ist jeweils an Erde (Fahrschiene) gelegt. Die verkettete Spannung zwischen Schiene und den beiden Fahrdrähten und zwischen den beiden Fahrdrähten untereinander beträgt 725 V.

Zeichnung: Hans Bodmer, CH-8625 Gossau ZH (Schweiz)

Hans Bodmer, CH-8625 Gossau ZH (Schweiz)

28.04.2015