

Facharbeit

DREIPHASENWECHSELSTROM

Historische Experimente, heutige Anwendung und praktische
Erzeugung

Leistungskurs Physik

Inhaltsverzeichnis

<i>Inhaltsverzeichnis</i>	2
1. Einleitung	1
1.1. Einschränkung des Themas	1
2. Dreiphasenwechselstrom	2
2.1. Was ist Dreiphasenwechselstrom?	2
2.2. Historische Entwicklung des Dreiphasenwechselstroms	5
2.3. Experiment zur Erzeugung	6
2.3.1. Nachweis der Phasenverschiebung	7
2.3.2. Betrachtung der Spannungskurve	8
2.4. Heutige Anwendung	9
2.4.1. Modernes Drehstromnetz	9
2.4.1.1. Sternschaltung	11
2.4.1.2. Dreieckschaltung	12
2.5. Drehstrommotoren	12
2.5.1. Experiment zur Anwendung	13
2.5.2. Der Drehstromasynchronmotor im ICE	14
2.6. Einsatz als Drehstromlichtmaschine	14
3. Fazit	15
4. Literaturverzeichnis	16

1. Einleitung

„Ehe viele Generationen vergehen, werden unsere Maschinen durch eine Kraft angetrieben werden, die an jedem Punkt des Universums verfügbar ist. Diese Idee ist nicht neu, wir finden sie in den herrlichen Mythen des Antheus, der Energie aus der Arbeit ableitet, wir finden sie auch in den feinen Spekulationen eines Ihrer glanzvollsten Mathematiker [...] Überall im Weltraum ist Energie. Ist diese Energie statisch oder kinetisch? Wenn statisch, werden unsere Hoffnungen vergeblich sein. Wenn kinetisch, - und wir wissen, daß es sicherlich so ist - dann ist es nur eine Frage der Zeit, daß die Menschheit ihre Energietechnik erfolgreich an das eigentliche Räderwerk der Natur angeschlossen haben wird.“¹

Diese Vorhersage Nicola Teslas vom 20. Mai 1891 ist noch nicht eingetroffen. Aber die Erfindungen Teslas und anderer Pioniere haben uns einen großen Schritt in diese Richtung ermöglicht.

Heute ist es kann man elektrische Energie verlustarm über lange Strecken zu transportieren. Der Dreiphasenwechselstrom, der dies ermöglicht hat, ist Thema dieser Facharbeit.

Im Folgenden werden zunächst die theoretischen Grundlagen erläutert, um dann die historische Entwicklung darzustellen. Im experimentellen Teil wird das Modell eines Generators vorgestellt und daran die theoretisch bestimmten Eigenschaften des Dreiphasenwechselstroms überprüft. Der nächste Abschnitt beschäftigt sich mit der Anwendung des Dreiphasenwechselstroms in der heutigen Zeit. Dabei wird zunächst auf das moderne Stromnetz eingegangen. Im Anschluss wird einer der wichtigsten dreiphasigen Verbraucher, der Drehstrommotor, erläutert und ein entsprechender Versuchsaufbau präsentiert. Die übrigen beiden Anwendungsbeispiele zeigen die Verwendung von Dreiphasenwechselstrom an unerwarteter Stelle.

1.1. Einschränkung des Themas

Bei der Bearbeitung des Themas wurden einige Einschränkungen gemacht. Dadurch soll gewährleistet sein, dass der Bezug zum Thema erhalten bleibt und der Rahmen einer Facharbeit nicht überschritten wird.

¹ <http://pluslucis.univie.ac.at/> zitiert nach: Nikola Tesla. Erfinder ohne Nobelpreis, Band 2 - Wiesbaden, 1996, S. 18

Daher verzichten die theoretischen Überlegungen auf die Darstellung von Wechselstromgrößen durch komplexe Zahlen. Stattdessen wird mit Diagrammen und geometrischen Zusammenhängen gearbeitet. Die geschichtlichen Informationen sollen die Zusammenhänge der Entwicklung darstellen und verzichten daher weitgehend auf genaue biographische Angaben zu den Personen und reichen nur bis ca. 1900, da die Grundlagen bis dahin entdeckt wurden und danach nur noch Verbesserungen erfolgten. Auch wurde auf eine Vertiefung der Antriebstechnik verzichtet, da dieses sehr umfangreiche Thema nicht Kern dieser Facharbeit ist. Die Betrachtung des Verbundnetzes und des Bahnstromnetzes bleibt auf die grundlegenden technischen Aspekte beschränkt und wurde aus den oben genannten Gründen nicht auf ökonomische oder politische Fragestellungen ausgeweitet.

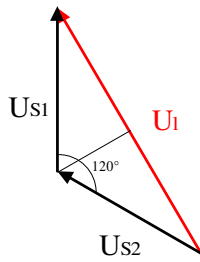
2. Dreiphasenwechselstrom

2.1. Was ist Dreiphasenwechselstrom?

Dreiphasenwechselstrom ist die Verkettung von drei sinusförmigen Wechselströmen, die gegeneinander phasenverschoben sind. Die Phasenverschiebung beträgt 120° bzw. $\frac{2}{3\pi}$. Diese Verschiebung kommt dadurch zustande, dass die Spulen in dem Generator, mit dem der Dreiphasenwechselstrom erzeugt wird, ebenfalls in einem Winkel von 120° zueinander stehen. Da die Spulen um ein rotierendes Magnetfeld herum angeordnet sind, laufen die Induktionsvorgänge zeitversetzt ab. Das Spannungsmaximum in der zweiten Spule tritt deshalb erst eine $\frac{1}{3}$ Umdrehung später als in der ersten Spule auf.

Das Maximum in der dritten Spule tritt eine $\frac{1}{3}$ Umdrehung später als in der zweiten Spule auf. Damit die Spannungen den gleichen Betrag (ihres Effektivwertes) haben, müssen die Spulen gleichartig sein.

Die sechs Anschlüsse der Spulen werden in der Regel zu der sogenannten Sternschaltung zusammengeschlossen. Dabei werden drei Anschlüsse in einen Punkt, dem Sternpunkt, zusammengefasst. Die übrigen drei Anschlüsse bezeichnet man als Außenleiter, Stränge oder die Phasen L1, L2 und L3. Im Sternpunkt kann ein zusätzlicher Leiter, der Nullleiter, angeschlossen werden. Die Spannung zwischen Nullleiter und einer Phase heißt Strangspannung; die zwischen zwei Phasen wird als Leiterspannung bezeichnet.



Wenn man versucht, durch Reihenschaltung zwei Phasen des Drehstroms zu addieren, so erhält man nicht wie erwartet die doppelte Spannung. Stellt man die beiden Strangspannungen wie oben als Zeigerdiagramm dar, kann man für die Größe der Leiterspannung mit Hilfe trigonometrischer Funktionen eine Formel herleiten:

$$\sin(60^\circ) = \frac{\frac{U_l}{2}}{U_{sx}}$$

Umgeformt ergibt sich:

$$U_l = 2U_s \cdot \sin(60^\circ).$$

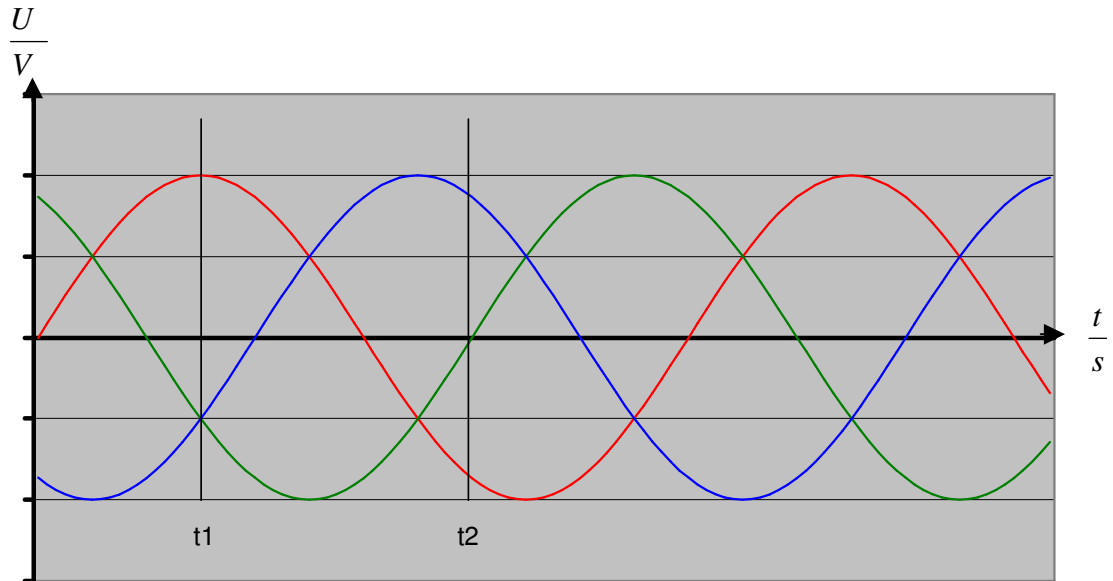
Der Funktionswert von $\sin(60^\circ)$ beträgt $\frac{1}{2}\sqrt{3}$. Setzt man dies in die obige Gleichung

ein, erhält man:

$$U_l = U_s \sqrt{3}.$$

Die Leiterspannung ist um den Faktor $\sqrt{3}$ größer als die Strangspannung.

Das folgende Diagramm zeigt den Spannungsverlauf der drei Phasen über die Zeit:



Betrachtet man den Zeitpunkt t_1 , stellt man fest, dass die grüne und die blaue Kurve an dieser Stelle den selben Betrag und beide ein negatives Vorzeichen besitzen. Der Betrag der roten Kurve an dieser Stelle ist doppelt so groß, daher addieren sich die Spannungen zu dem Wert null. Bei der Betrachtung des Zeitpunkts t_2 kann man erkennen, dass die grüne Kurve hier die x-Achse schneidet; die rote und die grüne Kurve besitzen den gleichen Betrag, aber mit umgekehrtem Vorzeichen. Die Summe der drei Spannung ist null. Auch bei der Betrachtung beliebiger anderer Zeitpunkte stellt man fest, dass die Summe null ist.

Die Gesamtspannung der drei Phasen beträgt null.

Dreiphasenwechselstrom wird auch Drehstrom genannt, da er an drei verschiedene Spulen gelegt ein sich drehendes Magnetfeld erzeugt. Diese Bezeichnung wird häufig in der Technik verwendet. Der Unterschied zum einphasigen Wechselstrom wird anhand dieses Wortes allerdings nicht deutlich.

Die Vorteile von Dreiphasenwechselstrom liegen in der beliebigen Umspannbarkeit und in der einfachen Konstruktion eines Drehstrommotors oder –generators, der dadurch preiswert und robust ist. Darüber hinaus stellt das Stromnetz dem Benutzer zwei verschiedene Spannungen zur Verfügung.

Es sind auch Wechselströme denkbar, die mehr als drei Phasen besitzen; sie spielen in der Technik aber praktisch keine Rolle.

2.2. Historische Entwicklung des Dreiphasenwechselstroms

Die Existenz von Drehstrom ist keinem einzelnen Erfinder zu verdanken, sondern einer ganzen Reihe von Erfindern, Ingenieuren und Geschäftsleuten.

Der wesentliche Begründer des Drehstroms war Nicola Tesla (1856-1943). Tesla entdeckte 1887 unabhängig von dem Italiener Galileo Ferraris und dem Deutschen Friedrich August Haselwander das Drehfeldprinzip. Es besagt, dass sich ein Magnet in einem Magnetfeld dreht, das von mehreren verschobenen Wechselströmen in je einer Spule erzeugt wird. Damit war es möglich, praxistaugliche Elektromotoren für Wechselstrom zu konstruieren. 1889 entstanden zwei Drehstrommotoren. Einer wurde von Michael von Dolivo-Dobrowolsky konstruiert, der andere von Friedrich August Haselwander. Der letztgenannte konnte sich aber nicht durchsetzen, weil man die Patente Haselwander wieder aberkannte und die Verwendung untersagte, weil eine Störung der Telegraphenleitungen befürchtet wurde. Elektromotoren für Gleichstrom waren dagegen bereits im Einsatz, wenn auch wegen technischer Probleme nur vereinzelt. Thomas Alva Edison hat 1878 damit begonnen, ein Gleichstromnetz zu entwickeln, damit nicht mehr wie bisher jeder Konsument eine eigene Stromquelle benötigte. 1882 eröffnete er das erste zentrale Kraftwerk zur Stromproduktion. Dieses Gleichstromsystem hatte aber mit erheblichen Problemen zu kämpfen. Eine Spannung von 110V war üblich, da Edisons Glühlampen auf diese Spannung ausgelegt waren und auch die Kollektoren der Gleichstrommotoren diese Spannung noch sicher umpolen konnten. Aber so konnte man Strom wegen der hohen Verluste durch den Ohmschen Widerstand der Leitungen nur über einige hundert Meter übertragen. Um die Spannung des Gleichstroms zu erhöhen, musste man auf Verfahren mit geringem Wirkungsgrad – etwa die Kopplung eines Motors mit einem Generator – zurückgreifen.

Wechselstrom war theoretisch recht einfach zu transformieren, aber die technische Umsetzung war zunächst ein Problem. In der Urform war der Transformator bereits 1831 von Faraday erfunden worden, aber es bedurfte erst der Verbesserungen durch Ruhmkorff (1851) sowie Gaulard und Gibbs (1880) um den ersten brauchbaren Starkstromtransformator zu ermöglichen. Er wurde 1886 von William Stanley in einem Labor

George Westinghouses konstruiert. Dieser amerikanische Industrielle deutscher Abstammung konnte mit dieser Entwicklung und den Wechselstrompatenten Teslas das erste funktionierende Wechselstromnetz aufbauen. Die erste Drehstromübertragung über lange Strecken gelang Oskar von Miller (1855-1934). Im Jahr 1891 konnte er Drehstrom über eine Strecke von 175km von Lauffen bis nach Frankfurt am Main transportieren. Am Neckar bei Lauffen stellte er eine Turbine auf, die 220kW Leistung liefern konnte. Die Spannung von 50V, die der Generator erzeugte, wurde auf mehrere Kilovolt hochtransformiert und über eine Freileitung bis nach Frankfurt transportiert. Der Verlust betrug 24%, dies war im Vergleich zu einem früheren Versuch Millers mit Gleichstrom sehr gering, bei dem der Verlust 75% betrug.

Ein Kampf der Stromsysteme, der „war of currents“², entbrannte. Anhänger des Gleichstromsystems wie Edison – der fast alle Gleichstrompatente besaß – wiesen immer wieder darauf hin, dass die Hochspannungsleitungen lebensgefährlich seien. Dies wurde demonstriert, indem man öffentlich einen Hund durch Wechselstrom tötete. Beim Vollzug der Todesstrafe wurde die Verwendung dieser Stromart durchgesetzt. So wollte Edison Spannungsobergrenzen durchsetzen, die die Übertragung von Wechselstrom unwirtschaftlich gemacht hätten.

Schließlich konnte sich Westinghouse mit seinem Wechselstromsystem trotzdem durchsetzen. Er erhielt die Aufgabe, die Weltausstellung 1893 in Chicago zu beleuchten, obwohl Edisons Angebot ebenfalls sehr günstig war. Später gelang es ihm, ein Kraftwerk an den Niagarafällen zu bauen, eine Aufgabe, an der die Gleichstromanhänger gescheitert waren, weil sie keine Lösung gefunden hatten um den erzeugten Strom wirtschaftlich 36 km zur nächsten größeren Stadt Buffalo transportieren zu können.

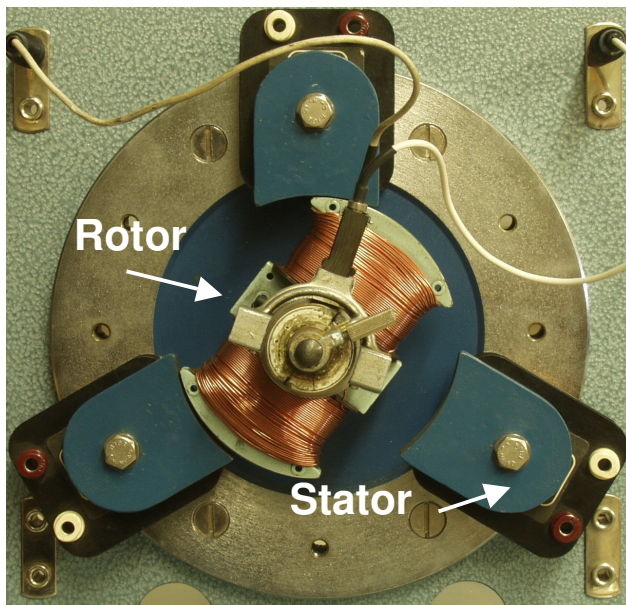
2.3. Experiment zur Erzeugung

Ein Dreiphasenwechselstrom kann erzeugt werden, indem sich drei um 120° versetzte Leiterschleifen in einem feststehenden Magnetfeld drehen. Zwischen den beiden Enden jeweils einer Leiterschleife ist eine Spannung zu messen. Diesen Typ nennt man Außenpolgenerator.

Technisch bedeutender ist der Innenpolgenerator, da hierbei die erzeugte Spannung nicht über Schleifkontakte abgenommen werden muss und somit Probleme am Kollekt-

² Zischka, Anton: Pioniere der Elektrizität – Gütersloh, 1958; S. 276

tor wie Abreißlichtbögen und Übergangswiderstände nicht auftreten können. Ein Magnetfeld rotiert in drei um 120° versetzten Spulen und induziert in ihnen eine Spannung. Die Spannung kann also an festen Kontakten abgenommen werden. Dabei unterscheidet man zwischen selbst- und fremderregten Generatoren. Selbsterregte Generatoren bauen die Spannung, die zum Aufbauen des Magnetfelds im Rotor nötig ist, selber auf. Sie nutzen dabei die Remanenz des Eisenkerns aus, indem sie diesen Magnetismus dazu benutzen, eine Spannung zu erzeugen, die das Magnetfeld des Rotors weiter verstärkt. Im Folgenden werde ich aber einen fremderregten Generator beschreiben; er erzeugt das Magnetfeld des Rotors durch eine von außen zugeführte Gleichspannung.



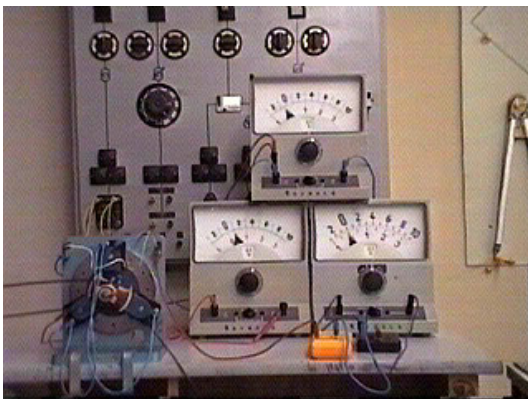
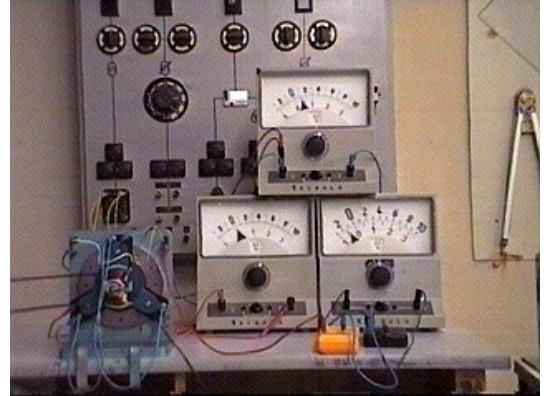
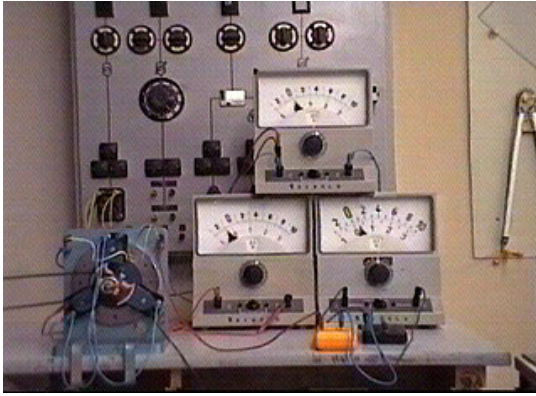
Hier ist der Versuchsaufbau zu erkennen: ein Elektromagnet, der über die beiden weißen Kabel mit Strom versorgt wird, dreht sich zwischen drei Spulen. An den Anschlüssen einer Spule kann jeweils eine Phase des Drehstroms abgenommen werden. Der feststehende Teil heißt Stator und der bewegliche Rotor.

Durch die Relativbewegung der Elektronen in den Spulendrähten zum Magnetfeld wirkt die Lorentz-Kraft auf sie. Diese bewirkt eine Verschiebung der Elektronen und erzeugt so eine Spannung.

2.3.1. Nachweis der Phasenverschiebung

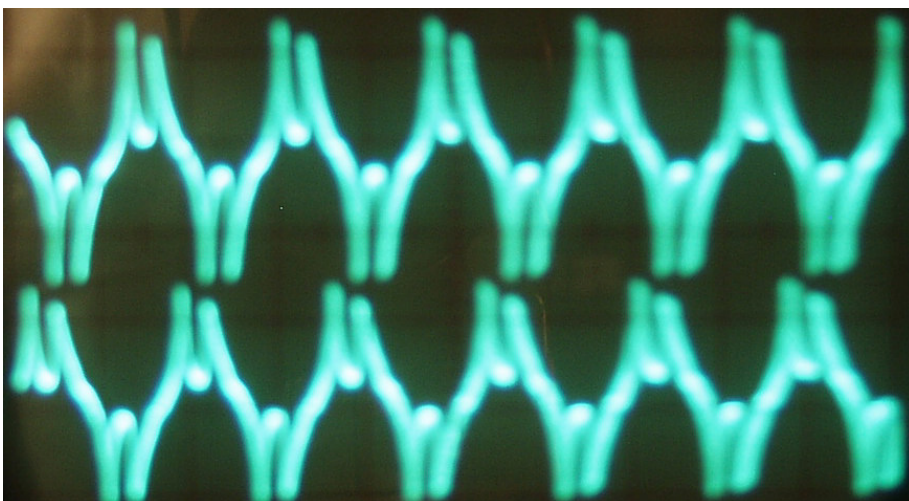
Im Folgenden soll untersucht werden, ob die erzeugten Wechselspannungen tatsächlich phasenverschoben sind.

Die drei Spulen des Generators wurden dazu mit je einem Voltmeter verbunden. Die Voltmeter sind aus Gründen der Übersichtlichkeit wie die Spulen des Generators angeordnet. Dieser Aufbau wurde mit einer Videokamera gefilmt und auf einen Computer überspielt. Dort lassen sich Einzelbilder betrachten:



Auf den Bildern ist zu erkennen, dass jeweils eine Spannung einen Nulldurchgang ausführt und die beiden anderen Spannungen ungefähr denselben Betrag, aber ein unterschiedliches Vorzeichen besitzen. Sie erreichen also nicht gleichzeitig ihren Scheitelpunkt, sondern sind phasenverschoben.

2.3.2. Betrachtung der Spannungskurve



Dieses Bild zeigt den Verlauf zweier Phasenspannungen auf dem Schirm eines Oszilloskops. Hier lässt sich noch einmal die Phasenverschiebung zwischen der oberen und unteren Spannung feststellen. Es ist aber auch zu erkennen, dass die Spannungen keinen sinusförmigen Verlauf aufweisen. An der Stelle, an der man ein Maximum erwarten würde, steigt die Spannung sehr stark an und sinkt dann ebenso schnell wieder ab. Dies liegt daran, dass man den sinusförmigen Verlauf nur erreichen kann, wenn man eine einzelne Leiterschleife in einem homogenen Magnetfeld dreht. Bei dem vorliegenden Aufbau dreht sich das Magnetfeld zwischen den drei Spulen. Der Elektromagnet kann aufgrund seiner geringen Größe kein homogenes Magnetfeld erzeugen und die Spulen werden stets von mehr als einer Feldlinie geschnitten. Darüber hinaus wurden die Spannungen unbelastet gemessen. Dadurch können große Spannungsspitzen durch Selbstinduktion entstehen, da die Stromänderung innerhalb der Spule sehr groß ist, wenn das Magnetfeld kurzzeitig eine konstante Stärke besitzt.

2.4. Heutige Anwendung

2.4.1. Modernes Drehstromnetz

Heute wird elektrische Energie fast ausschließlich als Drehstrom mit 50 Hz (in manchen Staaten, z.B. den USA auch 60 Hz) übertragen. Die Energie wird über ein europaweites Verbundsystem transportiert. So können Belastungsschwankungen vermieden werden, da Belastungsspitzen in den einzelnen Ländern nicht zeitgleich auftreten.

Die Energie wird über 3 Leiter oder ganzzahlige Vielfache davon transportiert. Da der Nullleiter geerdet ist, wird auf einen separaten Leiter verzichtet und statt dessen die Erde als Leiter benutzt.

Um die Verluste in den Leitungen gering zu halten, muss die Spannung möglichst hoch sein, denn die Verlustleistung ist:

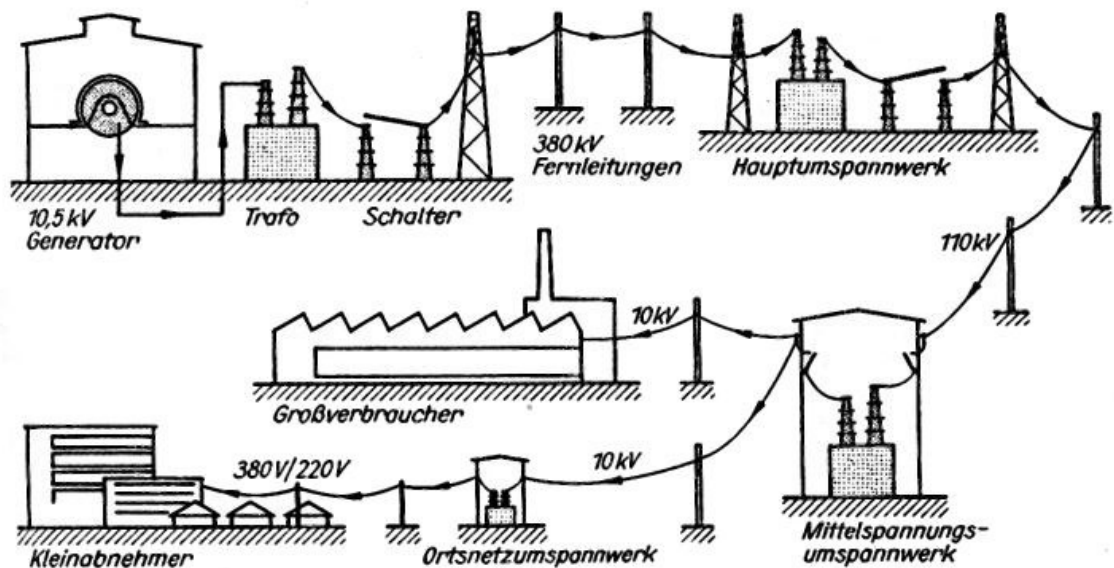
$$P_V = U \cdot I.$$

Hat die Leitung vom Kraftwerk zum Verbraucher den Widerstand R , ergibt sich durch Einsetzen von $U = R \cdot I$:

$$P_V = I^2 \cdot R.$$

Um eine Verlustleistung P_V zu verringern, muss also die Stromstärke möglichst gering gewählt werden, da sie mit der Stromstärke quadratisch ansteigt. Fernleitungen des Verbundnetzes führen daher eine Spannung von 220 kV, 380 kV oder mehr.

Die Energie des Verbundnetzes wird an Knotenpunkten zum Transport über kürzere Strecken zu den Verbrauchszentren auf 110 kV heruntertransformiert. Kleinere Umspannwerke reduzieren die Spannung auf 10 kV. Großverbraucher werden mit dieser Spannung direkt beliefert, für das normale Ortsnetz wird die Spannung auf 230 V Strangspannung bzw. 400 V Leiterspannung reduziert. In größeren Städten werden darüber hinaus noch 5 kV-Drehstromleitungen unterirdisch verlegt.



3

Die obige Skizze zeigt schematisch ein Stromnetz vom Generator zum Verbraucher. Die Spannung von 380V/220 V, die im Niederspannungsnetz zum Kleinverbraucher eingezeichnet ist, wurde auf 400V/230 V erhöht, um eine einheitliche Spannung in den europäischen Ländern zu verwenden. Auch die anderen eingezeichneten Spannungen sollten nur als Richtwerte betrachtet werden, da es durchaus Netzabschnitte oder Generatoren gibt, die andere Spannungen verwenden. Querverbindungen innerhalb des Netzes wurden in der Skizze nicht berücksichtigt.

Wie oben gezeigt, ist die Gesamtspannung des Drehstromnetzes immer null:

³ Jentsch, Joachin (Hrsg.): Kleine Enzyklopädie Technik – Frankfurt/Main, 1985

$$U_{L1} + U_{L2} + U_{L3} = 0.$$

Wenn der Stromkreis nun jeweils mit dem gleichen Widerstand belastet wird, folgt:

$$I_{ges} = I_{L1} + I_{L2} + I_{L3} = 0.$$

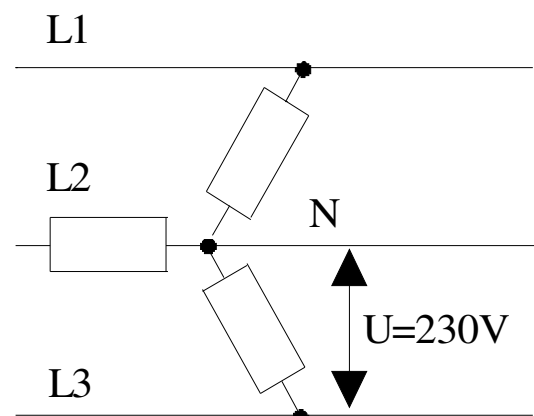
Der Nullleiter, der diesen Strom zum Kraftwerk zurückführt, könnte entfallen, da der Strom einer Phase über die zwei anderen Phasen zum Kraftwerk zurückgeführt würde. In der Praxis ist aber eine gleichmäßige Belastung der Phasen nur annähernd zu erreichen, so dass die Stromstärke im Nullleiter nicht null wird. Der Nullleiter kann aber sehr dünn gehalten werden.

Verbraucher, die einphasigen Wechselstrom benötigen, werden zwischen einer Phase und dem Nullleiter angeschlossen. Um den Strom im Nulleiter möglichst gering zu halten, muss eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Last auf die drei Phasen angestrebt werden. Da jedoch nicht alle Verbraucher ständig eingeschaltet sind, kann dies nur annähernd geschehen.

Größere Verbraucher wie Elektroherde, leistungsstarke Elektromotoren oder Durchlauf-erhitzer werden dreiphasig angeschlossen. Diese Elektrogeräte sind so aufgebaut, dass sie drei getrennte Teilverbraucher besitzen, z.B. drei Spulen beim Elektromotor oder drei Heizspiralen. Diese drei Teilverbraucher können auf zwei verschiedene Arten mit dem Drehstromnetz verbunden werden.

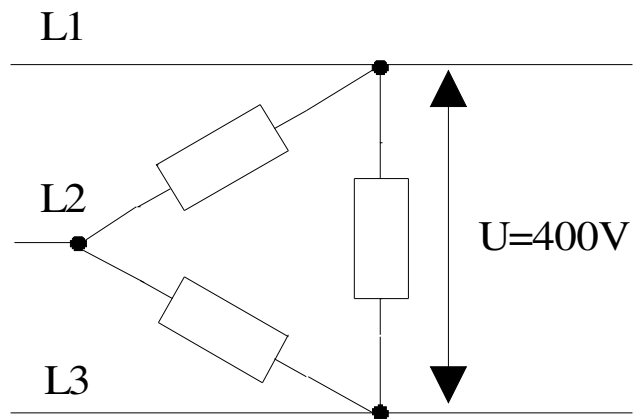
2.4.1.1. Sternschaltung

Bei der Sternschaltung wird jeder Verbraucher zwischen eine Phase und den Nullleiter geschaltet. Der Punkt, in dem sich die Anschlüsse der Verbraucher und der Nulleiter berühren, heißt Sternpunkt. Hierbei liegen je 230V an einem Teilverbraucher.



2.4.1.2. Dreieckschaltung

Verschaltet man die Verbraucher nach der Dreieck-Schaltung, liegen sie zwischen zwei verschiedenen Phasen. Daher liegt an jedem Verbraucher die höhere Leiterspannung von 400V an. Die meisten Geräte sind in der Dreieck-Schaltung verschaltet, da sie so von der größten Leistung durch die höhere Spannung profitieren können.



Größere Drehstromasynchronmotoren werden in der Sternschaltung angelassen und nach dem Hochlauf in Dreieck-Schaltung umgeschaltet. Durch die geringere Spannung in der Sternschaltung ist auch der fließende Strom geringer, so dass hohe Anlassströme vermieden werden können.

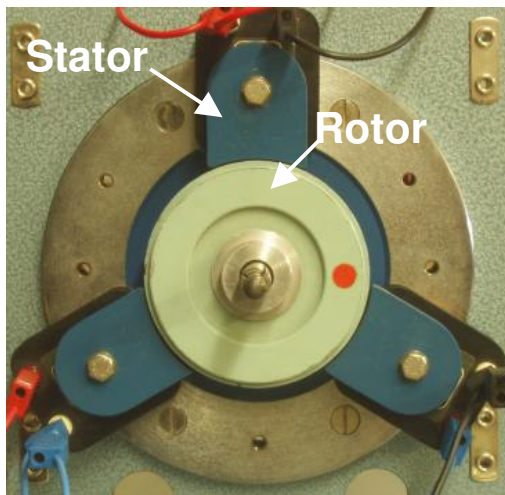
2.5. Drehstrommotoren

Es gibt zwei verschiedene Typen von Drehstrommotoren: Drehstromsynchronmotoren und Drehstromasynchronmotoren. Ihren Namen haben sie von den unterschiedlichen Drehgeschwindigkeiten. Die Rotoren der Drehstromsynchronmotoren rotieren mit der Geschwindigkeit des Drehfelds, also *synchron* zum Drehfeld. Sie müssen aber vor dem Anlassen bereits auf die Drehfeldgeschwindigkeit gebracht werden; besonders oft werden sie zum Antrieb von Kohleverdichtern benutzt.

Der Drehstromasynchronmotor dagegen kann selbsttätig anlaufen. Sein Einsatzgebiet ist so groß, dass man kaum spezielle Bereiche angeben kann. Die Geschwindigkeit der Rotoren von Drehstromasynchronmotoren erreicht aufgrund des Funktionsprinzips, das im Folgenden erläutert wird, nicht die Drehfeldgeschwindigkeit, ist also *asynchron*.

Eine Drehzahlregelung ist bei beiden Motortypen nur durch eine Änderung der Netzfrequenz möglich, da die Drehzahl von der Netzfrequenz abhängig ist. Von zwei Sonderfällen wird hier abgesehen: der sogenannten Dahlanderschaltung, die die Polzahl der Ständerwicklungen umschalten kann, oder dem Zuschalten von Widerständen in den Läuferkreis einer besonderen Bauform des Drehstromasynchronmotors (Schleifringläufer).

2.5.1. Experiment zur Anwendung



Das Foto zeigt den Versuchsaufbau. Die Statoren bestehen aus je einer Spule mit einem passendem Eisenkern. Der Rotor ist aus Leichtmetall gefertigt.

Wird nun Drehstrom an die Anschlüsse der Spulen gelegt, beginnt sich der Rotor langsam zu drehen und erreicht nach einiger Zeit eine konstante Drehzahl.

Eine Statorspule baut ein Magnetfeld auf, während eine benachbarte Spule ein anderes Feld erzeugt; diese Magnetfelder überlagern sich. Die Feldrichtung dreht sich ständig, da die Einzelfelder durch die drei Wechselspannungen ständig stärker und schwächer werden und dabei auch ihre Richtung ändern. Dieses Drehfeld induziert eine sich drehende Spannung im Rotor. Sie ist nach der Lenzschen Regel der Ursache entgegengerichtet, so dass das Magnetfeld, das der im Rotor fließende Strom hervorruft, dem Magnetfeld des Stators entgegengerichtet ist. Dadurch entsteht ein Drehmoment, das den Rotor eine Drehbewegung ausführen lässt. Da sich diese Vorgänge wiederholen, endet die Drehbewegung des Rotors nicht. Der Rotor kann jedoch nicht die Geschwindigkeit des Drehfeldes erreichen, da ihn in diesem Fall keine Feldlinien mehr schneiden würden, und auch keine Spannung mehr induziert werden würde.

Es sind keine Zuleitungen zu dem Rotor des Drehstromasynchronmotors notwendig, womit einige Probleme wie Funkenbildung, Verschleiß der Kohlen und Übergangswiderstände entfallen. Dieser Motor ist also besonders wartungsarm und einfach aufgebaut und dadurch preisgünstig.

2.5.2. Der Drehstromasynchronmotor im ICE

Das Bahnstromnetz in Deutschland verwendet nicht wie das übrige öffentliche Netz eine Frequenz von 50 Hz, sondern ein Drittel dieser Frequenz, also $16\frac{2}{3}$ Hz. Die verwendete Spannung beträgt 15 kV. Dieses Netz ist kein Drehstromsystem, sondern ein Einphasenwechselstromsystem. Der ICE wird jedoch von einem Drehstromasynchronmotor angetrieben. Der einphasige Wechselstrom wird von elektronischen Stromrichtern zu Drehstrom veränderlicher Frequenz umgeformt.

Es gibt auch eine Mehrstromvariante des ICE 3, deren Stromrichter aus fast allen europäischen Bahnstromnetzen gespeist werden können, obwohl die verschiedenen Länder Bahnstromnetze besitzen, die mit Gleich- oder Wechselspannung unterschiedlicher Frequenz und Höhe betrieben werden. Dadurch wird auch der internationale Einsatz des ICE möglich.

Drehstromasynchronmotoren erhalten in modernen elektrischen Lokomotiven wie dem ICE den Vorzug vor anderen Motorentypen, weil auch hier ihre einfache und robuste Bauart, die einen wartungsarmen und preisgünstigen Antrieb ermöglicht, ausschlaggebend ist. Der zusätzliche Aufwand für die benötigten Stromrichter wird durch die genannten Vorteile der Drehstromasynchronmotoren mehr als wettgemacht.

2.6. Einsatz als Drehstromlichtmaschine

Lichtmaschinen in Kraftfahrzeugen sollen Energie erzeugen um alle Verbraucher zu versorgen und darüber hinaus die Batterie wieder aufzuladen. Für diese Aufgabe wird eine Gleichspannung benötigt. Die Lichtmaschine erzeugt aber nicht, wie es zu vermuten wäre, direkt Gleichstrom sondern Drehstrom. Da die verwendeten Generatoren Innenpoltypen sind, entfallen auch hier die Probleme von Kollektormaschinen. Durch den robusteren Aufbau sind niedrigere Nenndrehzahlen und größere Höchstdrehzahlen möglich. Dadurch kann die Übersetzung vom Motor so gewählt werden, dass im Leerlauf bereits die Nenndrehzahl des Generators erreicht wird, ohne die Höchstdrehzahl bei Vollgas zu überschreiten. So ist gewährleistet, dass bei einem kurzen Halt mit laufendem Motor kein Strom aus der Batterie entnommen werden muss und diese bereits bei geringer Fahrgeschwindigkeit geladen werden kann. Richtet man Dreiphasenwechselstrom gleich, erhält man durch die drei verschobenen Phasen eine glattere Gleichspan-

nung als das bei einphasigem Wechselstrom der Fall wäre. Die notwendigen Halbleiterdioden werden in das Gehäuse der Lichtmaschine integriert.

3. Fazit

Die geschichtlichen Informationen zeigen die seltsam anmutende Patentlage zu dieser Zeit. Die Erfinder konnten selten aus ihren sehr leistungsfähigen Erfindungen wirtschaftlichen Nutzen ziehen. Die umfangreichen Wechselstrompatente Teslas konnte George Westinghouse sehr günstig erwerben und spätere Lizenzgebühren fielen sehr niedrig aus. Obwohl Tesla alle seine Erfindungen problemlos patentieren lassen konnte, entsprach der wirtschaftliche Erfolg nicht dem praktischen Nutzen. Auch das Beispiel Friedrich August Haselwanders zeigt, dass mit einer außergewöhnlichen Erfindung allein noch kein Geld zu verdienen ist.

Es bleibt also die Frage, ob die damaligen und heutigen Erfinder ausreichend durch das Patentrecht geschützt sind.

Die Pioniere der Drehstromtechnik haben ein System zur effizienten Nutzung von Energie erschaffen. Nun ist es unsere Aufgabe, sinnvoll mit diesen Möglichkeiten umzugehen. Auch Tesla erkannte schon „The Problem of Increasing Human Energy“ und die Notwendigkeit, nach erneuerbaren Energien zu forschen⁴.

⁴ <http://pluslucis.univie.ac.at/> zitiert nach: *Cheney, Margaret: Nikola Tesla. Erfinder, Magier, Prophet. Über ein außergewöhnliches Genie und seine revolutionären Entdeckungen*, 2. Aufl. - Düsseldorf 1995, S.191

4. Literaturverzeichnis

- Bath, Fritz (Mitarbeiter) et al.:* Lexikon der Technik (Band 1) – Lexikographisches Institut, München, 1986
- Boysen, Gerd et al.:* Physik für Gymnasien, Gesamtband Länderausgabe A – Cornelsen Verlag, Berlin, 1991
- Düssel, Erich:* Wechselstrom, Praxis Schriftenreihe Physik (Band 38) – Aulis Verlag Deubner & Co KG, Köln, 1981
- Fuest, Klaus/ Döring, Peter:* Elektrische Maschinen und Antriebe – Braunschweig/Wiesbaden, Vieweg und Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 4. Auflage, 1999
- Grehn, Joachim/ Krause, Joachim (Hrsg.):* Metzler Physik – Hannover, Schroedel Verlag GmbH, 1998
- Jentsch, Joachim (Hrsg.):* Kleine Enzyklopädie Technik – Thun, Frankfurt/Main, Lizenzausgabe für Verlag Harry Deutsch, 1985
- Jupe, Klaus/ Ludwig, Magret (Hrsg.):* Kursthemen Physik Elektrodynamik – Frankfurt/Main, Verlag Moritz Diesterweg GmbH & Co, 1996
- Kiersdorf, Bruno:* Die Drehstrom-Lichtmaschine – Zug, Verlag A. Bucheli, 1975
- Spanneberg, Franz, Preißler:* Elektrotechnik für Berufsschulen – Hamburg, Verlag Handwerk und Technik GmbH, 1995
- Strackenbrock, Birgit (redaktionelle Leitung):* Wie funktioniert das? Technik heute – Mannheim, Leipzig, Zürich; Meyers Lexikonverlag, 1998
- Zischka, Anton:* Pioniere der Elektrizität – Gütersloh, C. Bertelsmann Verlag, 1958

Internetquellen (Auszüge im Anhang vorhanden):

<http://www.deutsches-museum.de/bildung/veroeff/img/teslamot.pdf>

Abele, Johannes/Mener, Gerhard: Der Tesla-Motor – München, Deutsches Museum, 2. Auflage, 1997

<http://pluslucis.univie.ac.at/FBA/FBA99/Moessler/1.pdf>

Moessler, Martin: Nicola Tesla – Leben und Werk eines verkannten Genies, 1999

Weitere Quellen:

Brockhaus, Die Enzyklopädie in 24 Bänden, F.A. Brockhaus GmbH, Mannheim, 20.
überarbeitete und aktualisierte Auflage, 1997

Leybold, Versuchsanleitung Nr. 56337, Versuche mit Elektro-Lehrmaschinen

Leybold, Versuchsanleitung Nr. 57516, Versuche mit dem Kathodenstrahl-
Oszillographen