

Schweizerische Armee

65.90/I d

Technische Grundlagen
für
Übermittlungsgerätemechaniker

Band I

Gültig ab 1. Oktober 1974

E. Wechselströme

I. Der einphasige Wechselstrom

1. Einführung

Die Wechselstromtechnik spielt in der Elektronik eine führende Rolle. In allen Geräten der Nachrichtentechnik fallen den Wechselströmen wichtige Aufgaben zu. Es gibt praktisch keine Übermittlungsgeräte, in denen nicht Wechselströme und Wechselspannungen in irgend einer Form erzeugt, verstärkt oder verarbeitet werden. Der folgende Abschnitt wird Ihnen die Grundlagen über Wechselströme und Wechselspannungen vermitteln.

2. Was wissen Sie schon über Wechselströme?

(Lösung Seite 435)

- Was verstehen Sie unter einem Wechselstrom?
- Welche Kurvenform weist der Industriewechselstrom auf?
- Eine Wechselspannung habe eine Frequenz von 50 Hertz; was sagt der Begriff 50 Hz über diese Wechselspannung aus?
- Ein Hochfrequenzwechselstrom hat eine Wellenlänge von 30 m; können Sie sich darunter etwas vorstellen?
- Nennen Sie zwei Anwendungsgebiete von Wechselströmen.
- Welche Art Spannung benötigt ein Lautsprecher zu seinem Betrieb?

3. Der Wechselstrom

a. Der Begriff des Wechselstromes

Der Wechselstrom ändert periodisch seine Richtung und seine Stärke. Sinusförmige Wechselströme verlaufen nach einer Sinusfunktion, sie ändern Richtung und Stärke entsprechend dem Verlauf dieser Funktion. Wechselströme brauchen nicht sinusförmig zu verlaufen. In der Nachrichtentechnik werden wir oft Wechselströme antreffen, die eine ganz andere Form aufweisen.

b. Die Entstehung des sinusförmigen Wechselstromes

Industriewechselströme verlaufen sinusförmig. Sie werden in Generatoren erzeugt. Der Generator funktioniert nach dem Induktionsprinzip. Beim Generator wird eine Leiterschleife in einem gleichmässigen (homogenen) Magnet-

feld mit gleichbleibender Geschwindigkeit gedreht. Der Leiter wird kreisförmig bewegt. Die Anzahl der geschnittenen Kraftlinien hängt von der Stellung der Leiterschleife ab. Die induzierte Spannung ist proportional zu den geschnittenen Kraftlinien. Aus Bild 49 ersehen wir, dass die induzierte Spannung der Sinusfunktion folgen muss, weil bei 90° und 270° am meisten Kraftlinien geschnitten werden, während bei 0° und 180° die Kraftlinien nur noch tangiert werden. Die erzeugte Wechselspannung erreicht bei 90° und 270° ihren Maximalwert, bei 0° und 180° dagegen wird die Spannung Null. Es ist auch ersichtlich, dass die Spannung bei 0° und bei 180° ihre Richtung ändert.

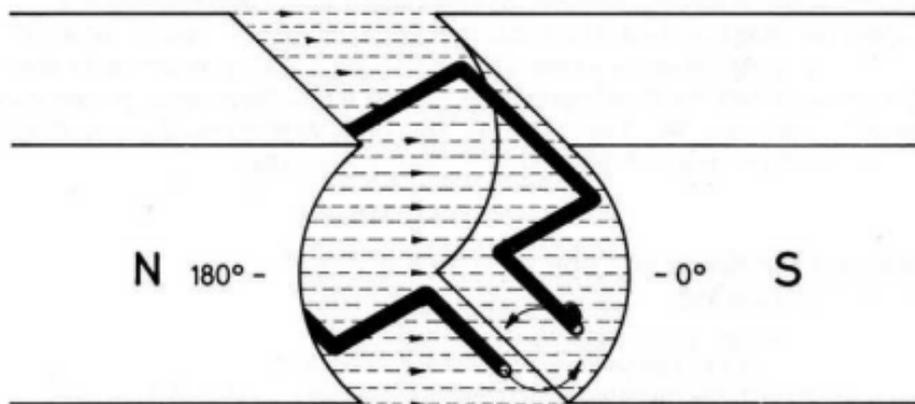


Bild 49

In Bild 50 wird die zeichnerische Ermittlung der induzierten Wechselspannung gezeigt. Diese erscheint in bezug auf Richtung und Grösse als Sinusfunktion des Drehwinkels.

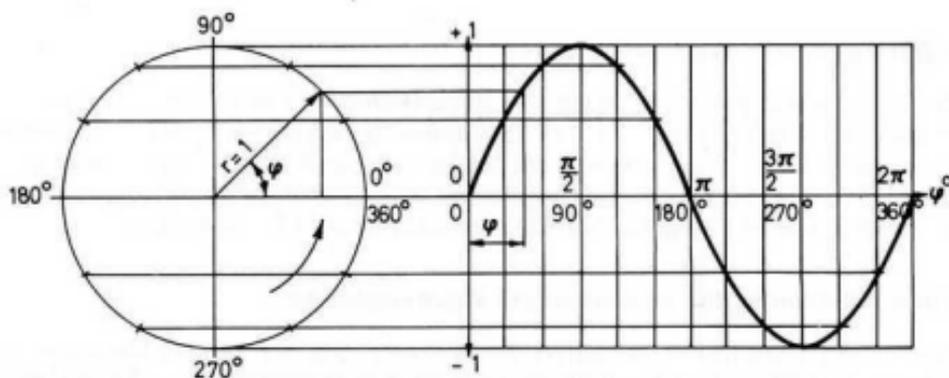


Bild 50

c. Kenndaten für Wechselströme und Wechselspannungen

Bild 51 zeigt einen Wellenzug einer sinusförmigen Wechselspannung mit seinen wichtigsten Kenndaten.

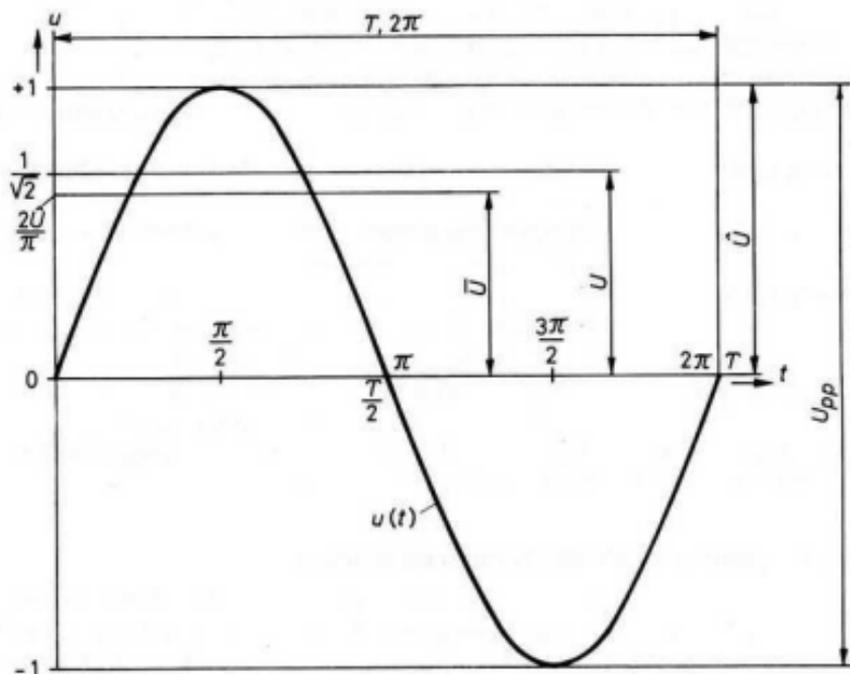


Bild 51

Die Frequenz des Wechselstromes

Die *Frequenz* eines Wechselstromes entspricht der Anzahl Schwingungen pro Sekunde. Die Wechselspannung des Lichtnetzes ändert ihre Grösse und ihre Richtung 100mal in der Sekunde, der Wellenzug nach Bild 51 tritt in der Sekunde 50mal auf, die Spannung hat eine Frequenz von 50 Hertz.

Die Grundeinheit für die Frequenz ist das *Hertz*. $1 \text{ Hz} = 1 \frac{1}{\text{s}} = 1 \text{ s}^{-1}$

In Formeln verwendet man für die Frequenz das Formelzeichen f .

Der in der Praxis verwendete Frequenzbereich ist sehr gross. Zur Bezeichnung von höheren Frequenzen werden deshalb grössere Einheiten verwendet.

1 Kilohertz kHz = 10^3 Hz

1 Megahertz MHz = 10^6 Hz

1 Gigahertz GHz = 10^9 Hz

In der Nachrichtentechnik werden folgende *Frequenzbereiche* belegt:

Tonfrequenz	16 Hz bis 18 kHz	
Ultraschall	18 kHz bis 30 kHz	
Langwellen	30 kHz bis 300 kHz	LW (Wellenlänge 10 km... 1 km)
Mittelwellen	300 kHz bis 3 MHz	MW (Wellenlänge 1 km... 100 m)
Kurzwellen	3 MHz bis 30 MHz	KW (Wellenlänge 100 m... 10 m)
Ultrakurzwellen	30 MHz bis 300 MHz	UKW (Wellenlänge 10 m... 1 m)
Dezimeterwellen	300 MHz bis 3 GHz	UHF (Wellenlänge 1 m... 1 dm)
Centimeterwellen	3 GHz bis 30 GHz	SHE (Wellenlänge 1 dm... 1 cm)

Diese Frequenzbereiche werden hauptsächlich von folgenden Diensten benutzt:

Langwellen (LW)	Verkehr zwischen festen Standorten und Rundfunk
Mittelwellen (MW)	Verkehr zwischen festen Standorten, Rundfunk, Schiffsfunk und Polizeifunk
Kurzwellen (KW)	Rundfunk für grosse Reichweiten, Küstenfunk, Flugfunk, Amateurfunk, Elektromedizin, Industrie-HF-Generatoren, Fernsteuerungen
Ultrakurzwellen (UKW)	Frequenzmodulierter Rundfunk, Küstenfunk, Schiffsfunk, Fernsehen, Flugnavigation
Dezimeterwellen (UHF)	Fernsehen, Flugnavigation, Richtverbindungen
Centimeterwellen (SHF)	Navigationshilfen, Radar

Die Kreisfrequenz oder die Winkelgeschwindigkeit

Das Produkt der Frequenz f mit dem Kreisumfang 2π heisst *Kreisfrequenz*. Die Erzeugung einer Sinusschwingung mit der Frequenz f kann als die Projektion eines mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2\pi f$ umlaufenden Vektors aufgefasst werden.

Die Kreisfrequenz hat die gleiche Grundeinheit wie die Frequenz, da der Ausdruck 2π eine dimensionslose Konstante darstellt.

Das Formelzeichen für die Kreisfrequenz lautet ω (kleiner griechischer Buchstabe «Omega»).

Die Kreisfrequenz ist eine sehr wichtige Grösse für die Berechnung von Wechselstromkreisen.

Die Schwingungsdauer

Die *Schwingungsdauer* ist die Zeitspanne, nach deren Ablauf sich die Schwingungsform einer periodischen Schwingung wiederholt. Für die sinusförmige Schwingung bedeutet das die Dauer einer Schwingung.

Die Grundeinheit für die Schwingungsdauer ist die Sekunde s .

In Formeln wird das Formelzeichen T für die Schwingungsdauer verwendet.

Die Schwingungsdauer entspricht dem Reziprokwert der Frequenz.

$$T = \frac{1}{f} \text{ [s]}$$

Die Amplitude

Die höchste Auslenkung der Sinuskurve heisst *Amplitude*.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit

Die elektrischen Schwingungen breiten sich im Raum mit *Lichtgeschwindigkeit* aus. Die *Fortpflanzungsgeschwindigkeit* beträgt demzufolge 300 000 km/s.

In elektrischen Leitern und abgeschirmten Kabeln ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit für elektrische Schwingungen immer kleiner als die Lichtgeschwindigkeit.

Die Masseinheit für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist m/s

Das Formelzeichen für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit oder Ausbreitungsgeschwindigkeit lautet *c*.

Für die Lichtgeschwindigkeit wird c_0 als Formelzeichen verwendet.

Die Wellenlänge

Die Wellenlänge ergibt sich aus dem Quotienten von Fortpflanzungsgeschwindigkeit und Frequenz. Für Hochfrequenzschwingungen im Raum errechnet sich demzufolge die Wellenlänge zu:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [\lambda] = \frac{\text{m} \cdot \text{s}}{\text{s}} = \text{m}$$

Die Grundeinheit für die Wellenlänge ist Meter (m).

In Formeln wird für die Wellenlänge das Formelzeichen λ (Lambda) verwendet.

Das Formelzeichen für den Momentanwert lautet *i* oder *u*.

Der Maximalwert

Der *Maximalwert* einer Spannung oder eines Stromes entspricht der Amplitude. Er wird oft auch *Spitzenwert* oder *Scheitelwert* genannt.

Das Formelzeichen für Spitzenwerte lautet \hat{U} oder \hat{I} .

Der Effektivwert

Der *Effektivwert* eines Wechselstromes entspricht wertmässig dem Gleichstrom, der die gleiche Leistung hervorbringen würde. Um den Effektivwert einer sinusförmigen Wechselspannung zu erhalten, ist der Maximalwert der Spannung durch die Wurzel aus Zwei zu dividieren.

$$U = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$$

Als Formelzeichen verwendet man *U* oder *I*.

Diese Formel gilt nur für sinusförmige Spannungen und Ströme, Wechselgrößen mit anderer Kurvenform können damit nicht berechnet werden. Der Umrechnungsfaktor für die Effektivwerte lässt sich mit Hilfe der Leistungskurve erklären. Um die Betrachtungen zu vereinfachen, untersuchen wir die Verhältnisse in einem Wechselstromkreis, dessen ohmscher Verbraucher einen Widerstandswert von einem Ohm aufweist. Mit Hilfe des ohmschen Gesetzes können wir nun sagen, dass die verbrauchte Leistung gleich dem Quadrat aus Strom oder Spannung ist. Zur weiteren Vereinfachung legen wir an diesen Widerstand eine sinusförmige Wechselspannung mit dem Maximalwert von einem Volt. Bild 52 zeigt die Messschaltung.

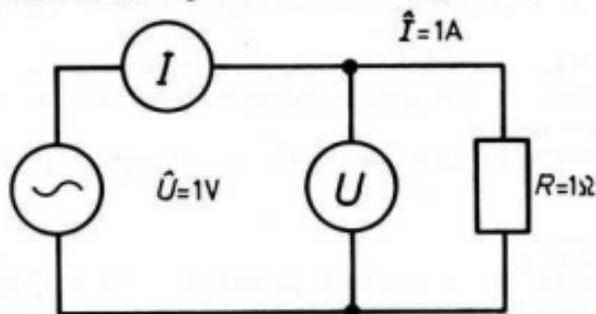


Bild 52

Im Messkreis fließt demzufolge ein Strom mit dem Maximalwert von 1 Ampère. Um die verbrauchte Leistung für irgend einen Zeitpunkt zu bestimmen, haben wir den Spannungswert in diesem Moment festzuhalten und zu quadrieren, da für die Leistung folgende Formel gilt:

$$p = i^2 \cdot R \text{ oder } p = \frac{u^2}{R}$$

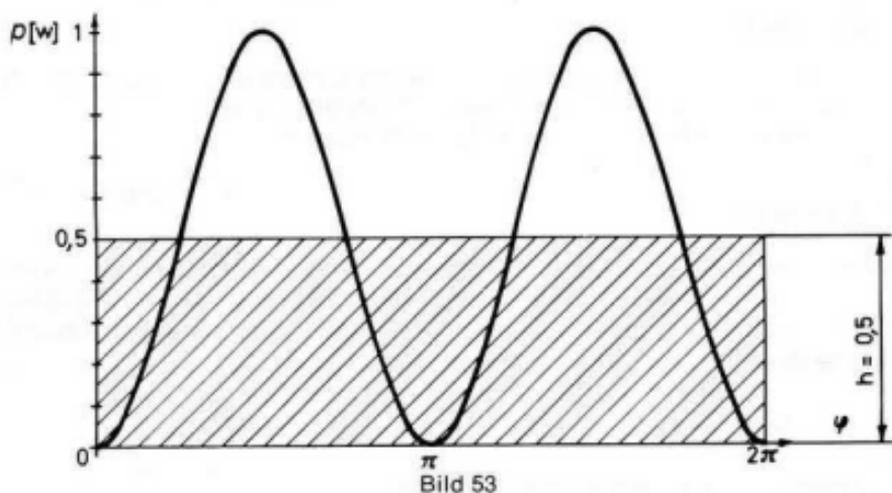


Bild 53

Da wir für den Widerstand den Wert Eins gewählt haben vereinfacht sich die Formel:

$$p = i^2 \text{ oder } p = u^2$$

Wir brauchen also nur die Strom- oder Spannungswerte in einem bestimmten Moment zu quadrieren, um so die Leistung, die in diesem Moment in Wärme umgesetzt wird zu ermitteln. Die Resultate einer solchen Leistungskurve sind in Bild 53 für eine Periode festgehalten. Die Leistungskurve weist nur positive Werte auf, da das Quadrat einer Zahl unabhängig vom Vorzeichen immer positiv ist.

Ableitung : $p = \frac{u^2}{R}$; Vereinfachung: $R = 1$, daher $p = u^2$

Weil die Kurve für $u^2 = \hat{U}^2 \sin^2\varphi$ auch eine symmetrische Kurve darstellt, wird $P = \frac{\hat{P}}{2}$; Daraus $U = \sqrt{P} = \sqrt{\frac{\hat{P}}{2}}$. Da $\sqrt{\hat{P}}$ (mit $R = 1$) = \hat{U} ist, folgt $U = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$

Das schraffierte Rechteck ist inhaltsgleich mit der Fläche, welche von der Leistungskurve eingeschlossen wird. Die Höhe des Rechteckes entspricht der mittleren Leistung. Mit Hilfe der höheren Mathematik kann man beweisen, dass die Höhe des flächengleichen Rechteckes genau halb so gross ist, wie der Spitzenwert der Leistungskurve. Zur Berechnung der Spannung haben wir aus der Leistung die Wurzel zu ziehen, das bedeutet für unser Beispiel, dass die Effektivspannung um den $\sqrt{2}$ -fachen Wert kleiner ist als die Spitzenspannung. Die Entwicklung der Formel zeigt Bild 53. Einzig die Tatsache, dass das schraffierte Rechteck halb so hoch ist, wie der Spitzenwert der Leistungskurve wird nicht bewiesen, da der Beweis nur mittels der Integralrechnung erbracht werden kann. Angenähert kann man die Behauptung aber auch

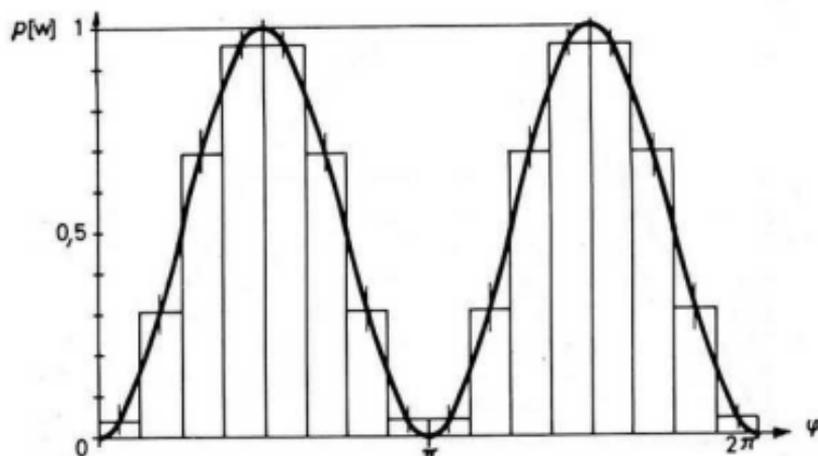


Bild 54

graphisch beweisen, indem man die von der Leistungskurve eingeschlossene Fläche in sehr schmale Rechtecke aufteilt, den Flächeninhalt dieser Rechtecke zusammenzählt und so die Gesamtfläche bildet.

Bild 54 zeigt die graphische Methode zur Ermittlung der Fläche der Leistungskurven.

Der Mittelwert

Der Mittelwert eines Wechselstromes entspricht wertmässig dem Gleichstrom, der pro Zeiteinheit die gleiche Anzahl Elektronen durch einen Leiterquerschnitt transportiert. Bei symmetrischem Wechselstrom ist der Mittelwert stets Null, da sich die positive und die negative Halbwelle aufheben. Erst nach einer Gleichrichtung entsteht ein Mittelwert. Er spielt deshalb in der Galvanotechnik und in der Messtechnik eine Rolle. Ein Drehspulinstrument, dessen Zeigerausschlag proportional dem Stromfluss ist, zeigt den Mittelwert des vorher gleichgerichteten Stromes an. Da aber normalerweise Effektivwerte gemessen werden sollen, ist die Skala in Effektivwerten geeicht, verliert dadurch jedoch ihre Linearität, welche sie bei Gleichstrom besitzt. Um den Mittelwert eines sinusförmigen Wechselstromes oder einer sinusförmigen Wechselspannung zu ermitteln, ist der Maximalwert mit dem Faktor Zwei zu multiplizieren und das Resultat durch π zu dividieren.

$$\bar{U} = \frac{2 \cdot \hat{U}}{\pi} = 0,636 \cdot \hat{U}$$

Als Formelzeichen werden \bar{U} oder \bar{I} verwendet.

Diese Formel gilt nur für sinusförmige Spannungen und Ströme. Wechselgrößen mit anderen Kurvenformen können nicht damit berechnet werden.

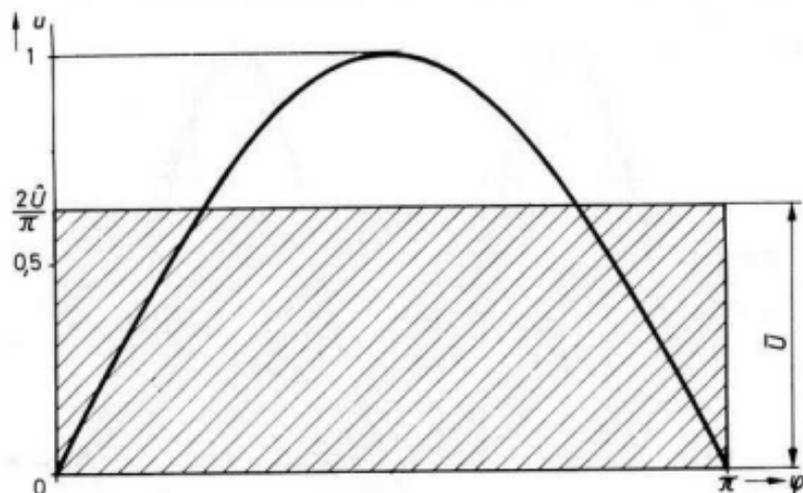


Bild 55

Der Umrechnungsfaktor für Mittelwerte lässt sich unter Zuhilfenahme der Sinuskurve erklären. Da der Mittelwert wertmässig einem äquivalenten (gleichwertigen) Gleichstrom entspricht, und die von der Sinuskurve umschlossene Fläche gleich der geflossenen Ladung ist, (wir erinnern uns, Ladung gleich Strom mal Zeit), so muss die Höhe des flächengleichen Rechteckes gleich dem Mittelwert des Stromes sein. Bild 55 zeigt die Verhältnisse. Die Integralrechnung liefert für die Sinusfunktion eine entsprechende Rechteckshöhe von $2/\pi$ mal Maximalwert. Diese Aussage kann leicht mit der graphischen Methode nachgeprüft werden.

Der Momentanwert

Der Momentanwert einer Spannung oder eines Stromes ist derjenige Wert, der irgend einem Zeitpunkt zugeordnet ist. Für sinusförmige Wechselspannungen und Wechselströme lässt sich der Momentanwert leicht errechnen.

$$u = \hat{U} \cdot \sin \alpha$$

Gibt man den Winkel α im Bogenmass an, so lässt sich die Formel wie folgt erweitern:

$$u = \hat{U} \sin (\omega t)$$

Diese Schreibweise ist viel geläufiger, da der Momentanwert zu irgend einem Zeitpunkt errechnet werden kann, wenn die Zeit und die Kreisfrequenz bekannt sind.

Als Formelzeichen werden u oder i verwendet.

Der Spitze-zu-Spitze-Wert

Der *Spitze-zu-Spitze-Wert* entspricht dem doppelten Maximalwert.

$$U_{pp} = 2 \hat{U}$$

Als Formelzeichen werden U_{pp} und I_{pp} verwendet.

Der Spitze-zu-Spitze-Wert spielt in der Verstärkertechnik eine Rolle, da dort die Extremwerte einer Spannung oder eines Stromes interessieren.

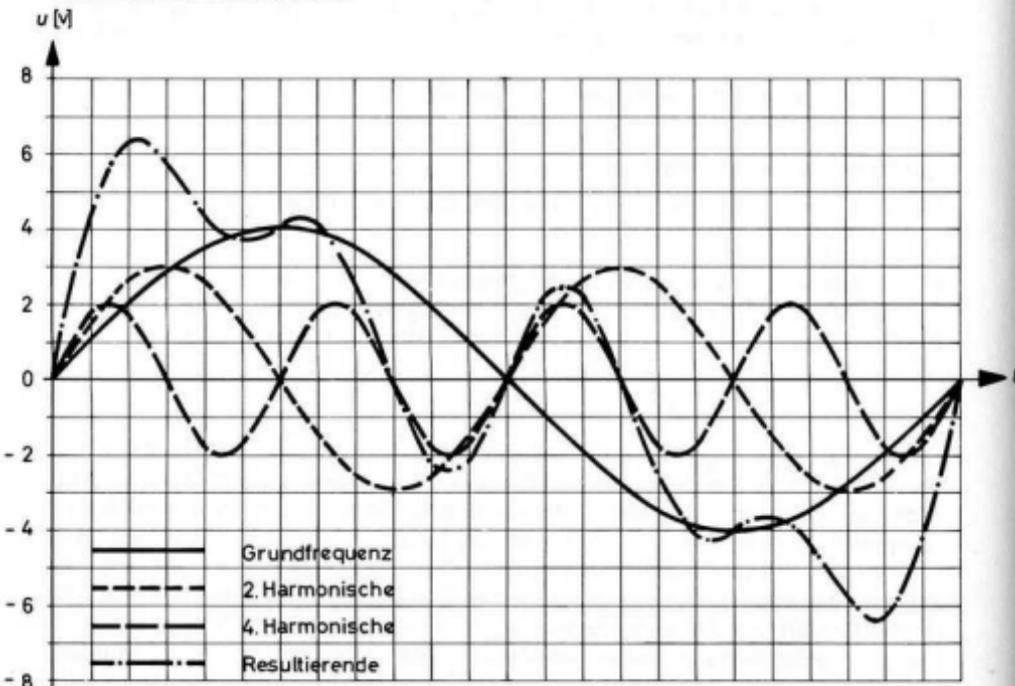
Oberwellen

Oberwellen sind ganzzahlige Vielfache einer Grundwelle. Oberwellen sind immer dann vorhanden, wenn Wechselspannungen oder Wechselströme nicht sinusförmig verlaufen. Oft wird dafür der Ausdruck *Harmonische* verwendet. Diese unterscheiden sich lediglich in der Zählungsart von den Oberwellen. Ist beispielsweise die Grundfrequenz 500 Hz, so entsprechen 1500 Hz der zweiten Oberwelle, jedoch der dritten Harmonischen, da man die Grundfrequenz als die erste Harmonische bezeichnet.

Die höhere Mathematik liefert den Beweis, dass jede periodisch verlaufende, nicht sinusförmige Wechselspannung mit der Frequenz f aus sinusförmigen Teilspannungen mit den Frequenzen $2f$, $3f$, $4f$ usw. besteht. In Bild 56 sehen

wir die Entstehung einer nichtsinusförmigen periodischen Schwingung, die sich aus einer Grundfrequenz mit der Amplitude von 4 V, einer zweiten Harmonischen mit der Amplitude von 3 V und der vierten Harmonischen mit der Amplitude 2 V zusammensetzt. Die graphische Darstellung erlaubt die Konstruktion jeder beliebigen resultierenden Schwingung, wenn die Harmonischen, deren Amplituden und Phasenlage gegeben sind. Man hat dabei lediglich die Momentanwerte aller Harmonischen zu addieren.

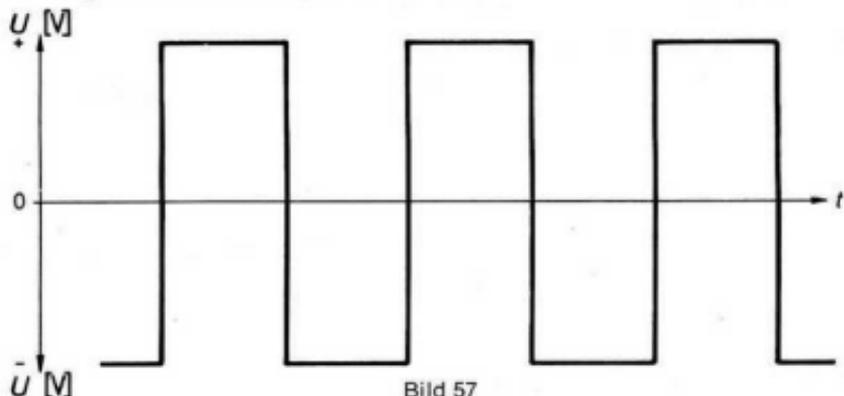
Umgekehrt ist es sehr schwierig aus einer gegebenen nichtsinusförmigen Schwingung die Harmonischen zu ermitteln. Der Elektroniker kommt jedoch oft in die Lage, eine auf einem Oszillographen dargestellte, nichtsinusförmige Schwingung zu beurteilen. Es braucht jedoch sehr viel Übung, um bei der Betrachtung einer solchen Schwingung angeben zu können, aus welchen Harmonischen diese besteht. Die höhere Mathematik gibt uns in Form der Fourieranalyse ein Mittel in die Hand, das uns erlaubt eine Schwingung zu analysieren und in ihre Harmonischen zu zerlegen. Der Praktiker muss diese Methode nicht beherrschen, er soll jedoch wissen, dass diese Möglichkeit einer Analyse besteht. Es existieren auch spezielle Messinstrumente, welche mit Hilfe von sehr selektiven Filtern eine «verzerrte» Schwingungsform in ihre Grundkomponenten zerlegen; allerdings werden dabei Phasendifferenzen der Einzelkurven nicht erfasst.



Die Rechteckspannung

Die *Rechteckspannung* ist ein Sonderfall einer periodischen, nicht sinusförmigen Wechselspannung. Rechteckspannungen sind in der Impulstechnik oft anzutreffen. Eine ideale Rechteckspannung enthält eine unendlich grosse Anzahl ungeradzahligter Harmonischer.

Bild 57 zeigt eine Rechteckspannung.



Bei der idealen Rechteckspannung würde der Sprung von der einen Stromrichtung zur anderen ohne Zeitverzug erfolgen. Diese Tatsache spricht dafür, dass in der Rechteckspannung unendlich hohe Frequenzen enthalten sind. In der Praxis erfolgt dieser Sprung nicht zeitlos, es wird dazu etwas Zeit benötigt. Rechteckspannungen werden in der Messtechnik zur Prüfung von Übermittlungsgeräten verwendet.

4. Beispiele

a. Bestimmung der Frequenz einer Wechselspannung

Eine Wechselspannung hat eine Schwingungsdauer von $2 \mu\text{s}$. Bestimmen Sie die Frequenz, die Wellenlänge und die Kreisfrequenz.

Vorgehen:

– Formel für die Schwingungsdauer anschreiben:

$$T = \frac{1}{f}$$

– Formel nach f auflösen:

$$f = \frac{1}{T}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen: $f = \frac{1}{2 \cdot 10^{-6}} \quad [f] = \frac{1}{\text{s}} = \text{s}^{-1} = \text{Hz}$

$$f = 500 \text{ kHz}$$

– Formel für die Wellenlänge anschreiben

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{5 \cdot 10^5} \quad [\lambda] = \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \text{s}$$

$$\lambda = \mathbf{600 \text{ m}}$$

– Formel für die Kreisfrequenz anschreiben

$$\omega = 2\pi f$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen:

$$\omega = 2\pi \cdot 0,5 \cdot 10^6$$

$$\omega = \mathbf{3,14 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}}$$

b. Bestimmung von Mittelwert und Effektivwert

Die Amplitude einer Wechselspannung beträgt 2,7 V. Bestimmen Sie den Mittelwert und den Effektivwert der Spannung.

Vorgehen:

– Formel für den Mittelwert anschreiben:

$$\bar{U} = \frac{U \cdot 2}{\pi}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen:

$$\bar{U} = \frac{2 \cdot 2,7}{3,14} \text{ V}$$

$$\bar{U} = \mathbf{1,72 \text{ V}}$$

– Formel für den Effektivwert anschreiben:

$$U = \frac{\bar{U}}{\sqrt{2}}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen:

$$U = \frac{2,7}{1,414} \text{ V}$$

$$U = \mathbf{1,91 \text{ V}}$$

c. Wie gross ist der Spitze-zu-Spitze-Wert der Spannung aus b?

Vorgehen:

– Formel für den Spitze-zu-Spitze-Wert anschreiben:

$$U_{pp} = 2 \cdot \bar{U}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen:

$$U_{pp} = 2 \cdot 2,7 \text{ V}$$

$$U_{pp} = \mathbf{5,4 \text{ V}}$$

d. Bestimmung des Momentanwertes

Eine Wechselspannung mit einer Frequenz von 2 MHz hat bei $t = 0$ einen Nulldurchgang von der negativen zur positiven Polarität. Die Amplitude misst 6 V. Wie gross ist der Momentanwert nach $t = 1/3 \mu\text{s}$?

Vorgehen:

- Formel für den Momentanwert anschreiben: $u = \hat{U} \cdot \sin(\omega \cdot t)$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen: $u = 6 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^6}\right) \text{ V} \cdot \frac{\text{s}}{\text{s}}$
 $u = 6 \sin\left(\frac{4}{3} \cdot \pi\right)$
 $u = 6 \sin 240^\circ$
 $u = 6 \cdot (-0,867)$
 $u = -5,2 \text{ V}$

5. Das Wesentliche

Wechselströme und Wechselspannungen verlaufen meistens sinusförmig. Periodische nicht sinusförmige Schwingungen lassen sich in sinus- oder kosinusförmige Harmonische zerlegen.

Die Frequenz eines Wechselstromes entspricht der Anzahl Schwingungen pro Sekunde.

Die Kreisfrequenz ist das Produkt aus dem Faktor « 2π » und der Frequenz. Sie ist eine wichtige Grösse für die Berechnung von Wechselstromkreisen.

Die Schwingungsdauer ist die Dauer einer Periode.

Die Amplitude einer Schwingung entspricht deren höchsten Auslenkung.

Wellenlänge, Ausbreitungsgeschwindigkeit und Frequenz stehen zueinander in einer festen Beziehung. Die Wellenlänge ist der Quotient aus Ausbreitungsgeschwindigkeit und Frequenz.

Der Maximalwert oder Spitzenwert eines Stromes entspricht der Amplitude.

Der Effektivwert entspricht wertmässig dem Gleichstrom oder der Gleichspannung, die die gleiche Leistung in einem ohmschen Widerstand erzeugen würden. Für einen sinusförmigen Kurvenverlauf entspricht der Effektivwert dem Quotienten aus Spitzenwert und dem Faktor $\sqrt{2} = 1,414$.

Der Mittelwert eines Stromes entspricht wertmässig dem Gleichstrom, der pro Zeiteinheit die gleiche Anzahl Elektronen durch einen Leiter transportiert. Für sinusförmige Ströme errechnet sich der Mittelwert durch Multiplizieren des Spitzenwertes mit dem Faktor 0,636.

Der Momentanwert einer Spannung oder eines Stromes entspricht demjenigen Wert, der irgend einem Zeitpunkt zugeordnet ist. Er lässt sich mit Hilfe der Sinusfunktion errechnen.

Der Spitze-zu-Spitze-Wert entspricht dem doppelten Maximalwert.

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 436)

- Was verstehen Sie unter dem Begriff «Kreisfrequenz»?
- Wie gross ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit elektrischer Wellen im freien Raum?

- c) Die Wellenlänge einer Hochfrequenzschwingung misst 41 m.
Welchen Wert hat die Frequenz der Schwingung?
- d) Zeichnen Sie eine ganze Schwingung (Periode) einer Wechselspannung mit der Frequenz 2 kHz. Die Amplitude misst 4,7 V. Wählen Sie für die Achsen folgende Masseinheiten: X-Achse (ms und rad), Y-Achse (V). Zeichnen Sie folgende Werte ein:
- Schwingungsdauer
 - Maximalwert der Spannung
 - Effektivwert der Spannung
 - Arithmetischer Mittelwert der Spannung
 - Momentanwert der Spannung bei einem Winkel von $\pi/3$ ($= 60^\circ$)
 - Spitze-zu-Spitze-Wert-Spannung
- e) An einem ohmschen Widerstand liegt eine Wechselspannung. Der Widerstand misst 0,5 Ohm. Die Amplitude der Wechselspannung beträgt 2 V. Zeichnen Sie die Strom- und Spannungskurve und ermitteln Sie daraus die Leistungskurve. Berechnen Sie die mittlere Leistung (Effektivwert) und zeichnen Sie den gefundenen Wert im Kurvenblatt ein.
- f) Die neunte Harmonische einer Frequenz beträgt 2,7 MHz. Welche Frequenz hat die 1. Harmonische?
- g) Die 12. Oberwelle einer Frequenz beträgt 39 MHz. Welche Wellenlänge hat die Grundwelle?
- h) Die Frequenz einer Wechselspannung beträgt 20 kHz. Der Spitzenwert der Spannung misst 4 V. Zum Zeitpunkt $t = 0$ geht der Spannungswert durch den Nullpunkt, um in positiver Richtung anzusteigen. Wie gross ist der Momentanwert nach 23 ms?

II. Drehstrom

1. Einführung

Die Versorgung der Industrie und der Haushaltungen mit elektrischer Energie erfolgt mittels Mehrphasensystemen, wobei das Dreiphasensystem heute überall verwendet wird. Die benzinelektrischen Gruppen zur Stromversorgung von grösseren Übermittlungsanlagen der Armee erzeugen ebenfalls dreiphasigen Drehstrom. Der Drehstrom bietet viele Vorteile, insbesondere für den Generatoren- und Motorenbau, auch betriebsmässig ist er dem einfachen Wechselstrom überlegen. Die einfache Schaltungstechnik des Drehstromes muss dem Praktiker geläufig sein, insbesondere dann, wenn er in die Lage kommt Geräte an das Dreiphasennetz anzuschliessen.

2. Was wissen Sie schon über den Drehstrom?

(Lösung Seite 439)

- Haushaltapparate und die elektrische Beleuchtung arbeiten in unseren Landesteilen mit einer Spannung von 220 V. Motoren dagegen oft mit 380 V. Kennen Sie den Zusammenhang zwischen diesen beiden Spannungswerten?
- Haben Sie schon einmal etwas über Stern- und Dreieckschaltung gehört?
- Was ist ein Nulleiter?
- Wieviele Phasen weist der gebräuchliche Drehstrom auf?
- Kennen Sie Vorteile des Drehstromes?

3. Der Drehstrom

a. Die Entstehung des Drehstromes

Der *Drehstrom* wird in *Drehstromgeneratoren* erzeugt. Im Dreiphasendrehstromgenerator sind drei Statorwicklungen so angebracht, dass sie 120° gegeneinander verschoben sind. Ein rotierender Permanentmagnet induziert in diesen drei Spulen drei Wechselspannungen, die gegeneinander um 120° phasenverschoben sind. Bild 58 zeigt das Prinzip dieses Generators mit dem Vektorbild der Spannungen. Die drei Statorwicklungen weisen die gleichen Windungszahlen auf, so dass die drei Spannungen gleich gross sind. Die Bezeichnung dieser Spannungen, der sogenannten Phasenspannungen, erfolgt analog der Bezeichnung der Drehstromleiter als U_R , U_S und U_T . Die Spulenanfänge tragen die Bezeichnungen U, V und W, während die Spulendenen mit X, Y und Z bezeichnet sind. Die Leitungsbezeichnungen sind ebenfalls genormt und tragen die Buchstaben R, S und T.

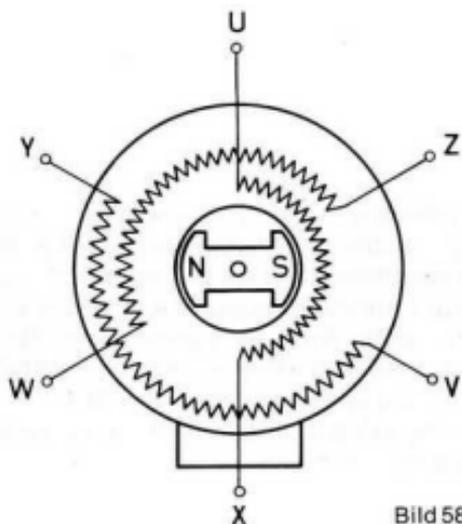


Bild 58

In Bild 59 sehen wir die Benennung der Spulen und Leitungen. Der Generator weist 6 Anschlüsse auf. Wollte man jedes Einphasensystem für sich belasten, so müsste man 6 Leitungen verlegen. Diese Art der Leitungsführung wäre jedoch sehr aufwendig.

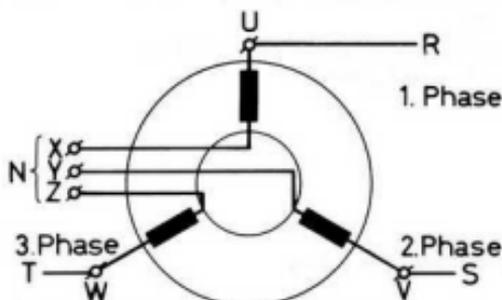


Bild 59

b. Die Sternschaltung

Ein Generator, bei welchem die Anschlüsse X, Y und Z verbunden sind, ist in *Sternschaltung* betrieben. Die Sternschaltung kommt mit einem Vierleitersystem aus. Die Leiter R, S und T werden Polleiter genannt, während der Mittelpunktsleiter als Nulleiter bezeichnet wird. \star stellt das Symbol der Sternschaltung dar. Werden alle drei Phasen gleich belastet, so fließt im Nulleiter kein Strom. In Bild 60 sehen wir das Liniendiagramm für die drei Spannungen und Ströme einer Sternschaltung bei gleicher Belastung aller drei Phasen.

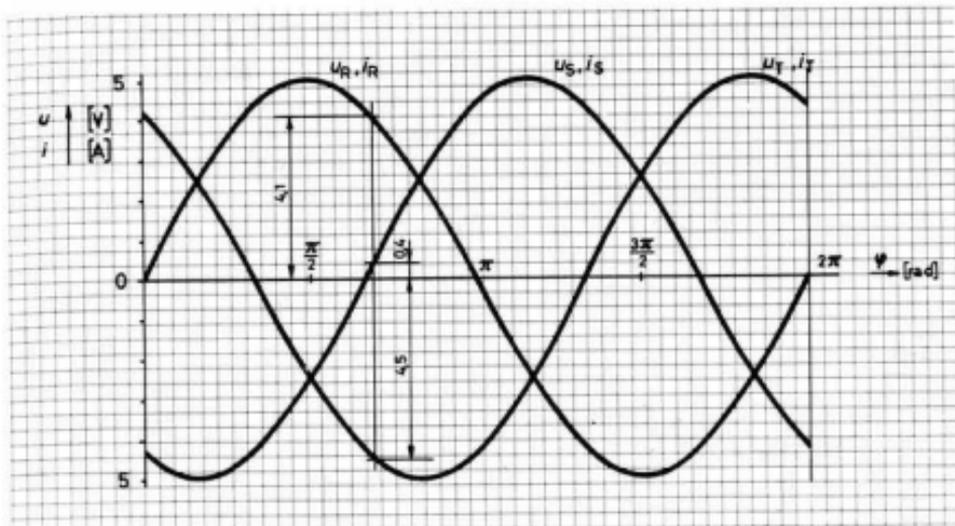


Bild 60

Wir können zu jedem beliebigen Zeitpunkt die Addition der drei Phasenspannungen oder der drei Ströme ausführen, die Summe wird immer Null sein. Der Nulleiter wäre demzufolge überflüssig, da in ihm doch kein Strom fließt. Dies gilt jedoch nur bei gleichmässiger Belastung aller drei Phasen. Sobald die Phasen unterschiedlich belastet werden, fließt über den Nulleiter ein Strom. Dies ist auch der Grund, weshalb der Nulleiter bei Dreiphasensystemen meistens verlegt wird.

c. Die Dreieckschaltung

Bild 61 zeigt einen Verbraucher, für welchen die *Dreieckschaltung* gewählt wurde. Bei dieser Schaltung ist das Ende einer Phase mit dem Anfang der nächsten verbunden. Das Symbol der Dreieckschaltung ist Δ .

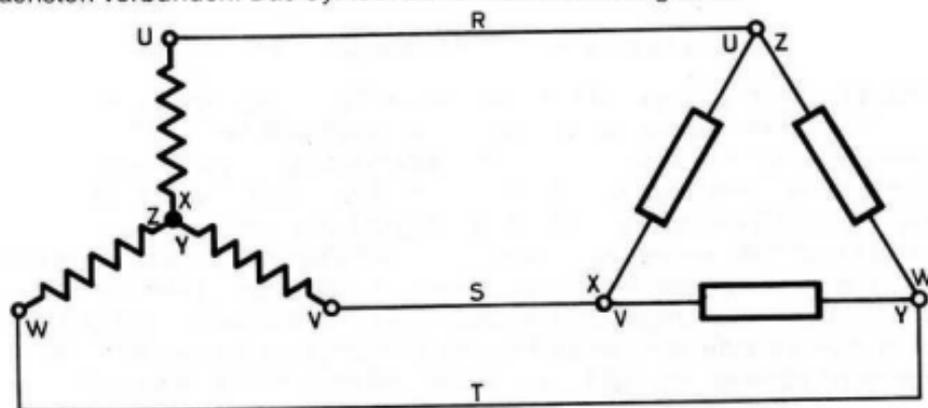


Bild 61

d. Die verkettete Spannung

Der Dreiphasenwechselstrom zur Versorgung der Haushaltungen hat in der Regel eine Phasenspannung von 220 V. Wird der Generator in Sternschaltung betrieben, so bedeutet dies, dass zwischen den drei Polleitern R, S und T und dem Nulleiter je eine Spannung von 220 V gemessen wird. In Bild 62 erkennen wir einen in Sternschaltung betriebenen Generator.

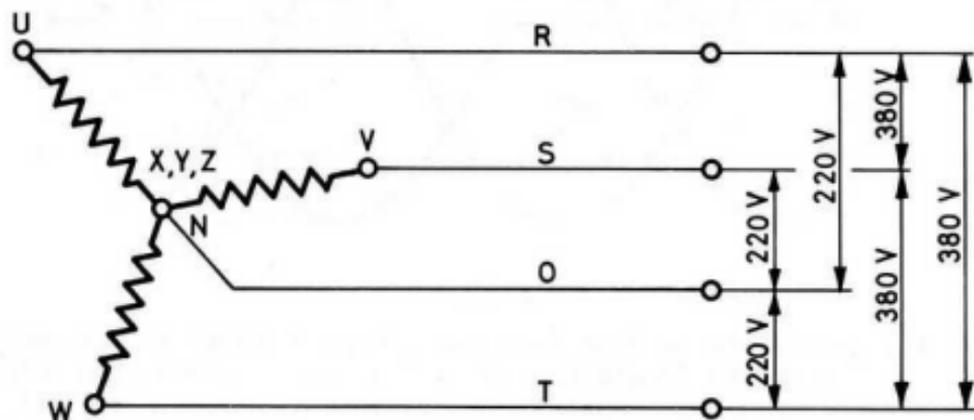


Bild 62

Wenn wir zwischen zwei Polleitern die Spannung messen, dann stellen wir fest, dass diese Spannung 380 V beträgt, man nennt sie *verkettete Spannung*. Diese Spannung hat ihren Namen dem Umstand zu verdanken, dass sie durch Verkettung von zwei Phasenspannungen entstanden ist. Wir haben durch Messungen festgestellt, dass die verkettete Spannung um einen gewissen Faktor höher ist als die Phasenspannung. Wenn wir diesen Faktor näher untersuchen, so stellen wir fest, dass er den Wert $\sqrt{3}$ aufweist.

$$\text{Verkettete Spannung} = \sqrt{3} \cdot \text{Phasenspannung}$$

Wir wollen die Entstehung dieser verketteten Spannung näher untersuchen. In Bild 62 wählen wir hierzu die Spannung zwischen R und S. Die verkettete Spannung setzt sich aus den Phasenspannungen U_R und U_S zusammen. Sie entspricht der Serieschaltung dieser beiden Phasenspannungen. Wir haben lediglich die Momentanwerte der Phasenspannungen zu addieren, um den Momentanwert der verketteten Spannung zu erhalten. Wir müssen jedoch beachten, dass die beiden Phasenspannungen gegeneinander geschaltet sind, da die beiden Wicklungsenden X und Y miteinander verbunden sind. Wir haben deshalb eine der beiden Phasenspannungen mit umgekehrtem Vorzeichen zu addieren. In Bild 63 wurde diese Addition im Liniendiagramm vorgenommen.

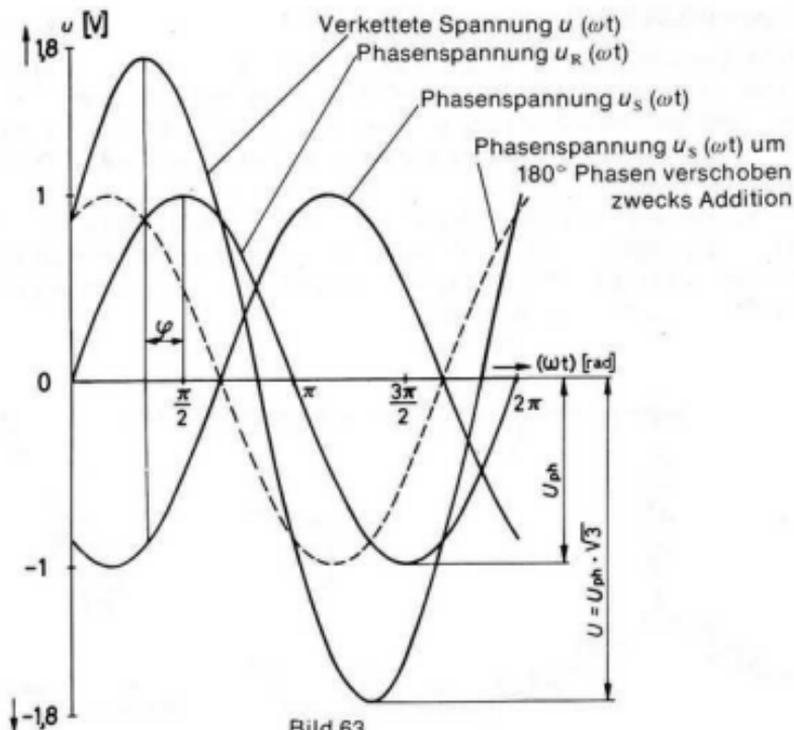


Bild 63

Darstellung von Phasenspannung und verketteter Spannung im Liniendiagramm

Bild 64 zeigt die gleiche Operation jedoch mit Hilfe der Vektordarstellung.

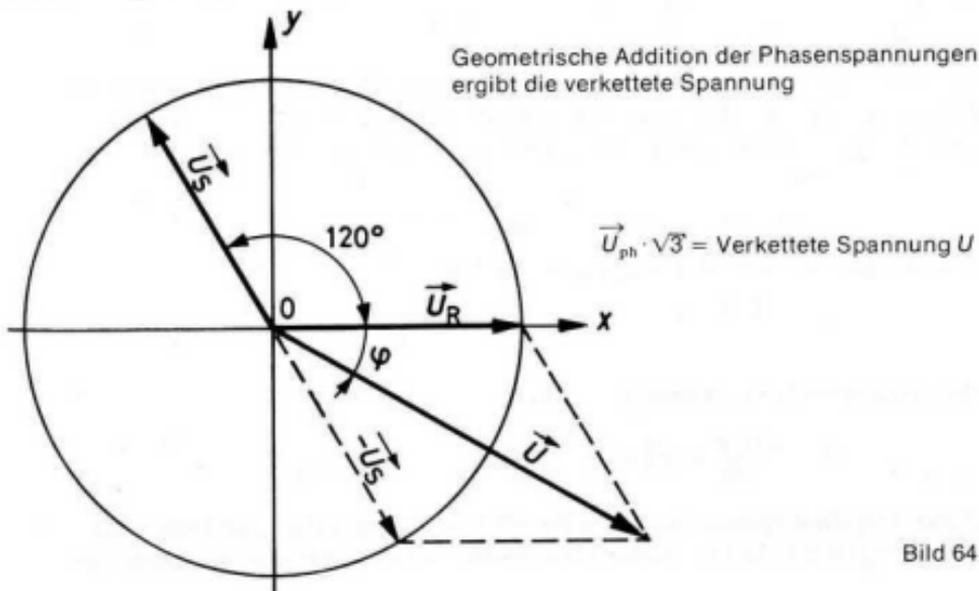


Bild 64

e. Leistungsberechnungen bei Drehstrom

Wenn die drei Phasen ungleichmässig belastet werden, so ist die aufgenommene Leistung für jede Phase getrennt zu berechnen. Dieser Fall trifft oft für Kleinverbraucher zu, wo beispielsweise Beleuchtungen, Haushaltgeräte und Kleinmotoren zwischen dem Nulleiter und den verschiedenen Phasen angeschlossen werden.

In Bild 65 sehen wir ein Beispiel mit gleichmässiger Belastung der drei Phasen. Die aufgenommene Leistung kann dabei direkt ermittelt werden. Wir messen zu diesem Zweck die Spannung U zwischen zwei Aussenleitern und den Strom I in einer Zuleitung.

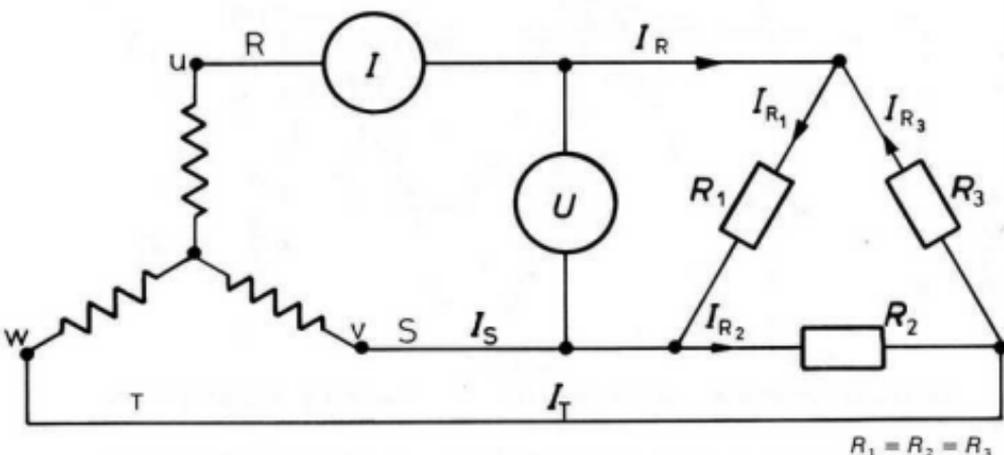


Bild 65

Für die Dreieckschaltung müssen die Ströme vektoriell addiert werden, wie dies für die Spannungen der Sternschaltung geschehen ist. Der Strom im Aussenleiter wird demnach um den Faktor 1,73 grösser als der Strom im einzelnen Verbraucher.

$$\text{Verketteter Strom} = \sqrt{3} \cdot \text{Phasenstrom}$$

Die Leistung pro Phase beträgt demzufolge:

$$P_{\text{ph}} = \frac{U \cdot I}{\sqrt{3}}$$

Die Gesamtleistung ist dreimal grösser:

$$P = 3 \frac{U \cdot I}{\sqrt{3}} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

Diese Angaben gelten nur für eine rein ohmsche Last. Das heisst, dass der Belastungswiderstand ein ohmscher Widerstand sein muss. In einem späteren

Abschnitt werden wir sehen, warum diese Einschränkung gemacht werden muss.

f. Die Stern-Dreieck-Umschaltung

Motoren und Umformergruppen, welche mit Drehstrom gespeist werden, sind oft mit einem Stern-Dreieck-Schalter versehen. Werden die Wicklungen des Drehstrommotors in Sternschaltung betrieben, so liegt an der einzelnen Wicklung nur eine Spannung von 220 V, während die gleiche Wicklung in der Dreieckschaltung an 380 V liegt. In der Sternschaltung nimmt der Motor weniger Strom vom Netz auf als in der Dreieckschaltung, er läuft langsam an und wird nach Erreichen einer bestimmten Tourenzahl durch Umschaltung auf Dreieck an die volle Netzspannung gelegt. Dadurch wird verhindert, dass im Einschaltmoment zu hohe Ströme fließen.

g. Die vektorielle Darstellung von Wechselstromgrössen

Wir haben gesehen, dass sich Wechselstromgrössen auf zwei Arten darstellen lassen, im *Liniendiagramm* oder als *Vektoren*. Das Liniendiagramm ist schwierig zu zeichnen und wirkt unübersichtlich. Die Vektordarstellung ist eine elegante Art, um Wechselstromgrössen einfach und übersichtlich darzustellen. Wir wollen uns mit den Grundregeln der Vektorrechnung vertraut machen, da uns diese Darstellungsart während des ganzen Lehrganges begleiten wird.

Wenn wir eine Wechselspannung darstellen wollen, so müssen wir zwei Grössen berücksichtigen, den Wert der Spannung und die Richtung oder Phasenlage derselben. Im Vektor haben wir ein ausgezeichnetes Mittel für die Darstellung von Spannungen und Strömen. Die Länge des Vektors gibt die Grösse der Spannung an und seine *Richtung* die Phasenlage.

Zur Darstellung von Wechselstromgrössen genügen die Vektoren der Ebene, die Physik bedient sich jedoch oft der Vektoren im Raum; unsere Probleme lassen sich aber alle zweidimensional darstellen.

Für die Bezeichnung der Vektoren werden oft die deutschen Buchstaben verwendet. Da diese Buchstaben aber nicht mehr so geläufig sind, verwendet man meistens die folgende Bezeichnung:

$$\vec{BC}$$

Der Strich mit der Pfeilspitze deutet an, dass es sich um eine gerichtete Grösse handelt.

In Fällen, wo nur der Betrag eine Rolle spielt, wendet man folgende Bezeichnung an:

$$|a| = \text{Länge des Vektors } \vec{a}$$

Vektoren, deren Anfangspunkt mit dem Ursprung eines Koordinatensystems zusammenfallen, nennt man Ortsvektoren.

In der Wechselstromtechnik werden oft Vektoren mit der Länge Eins gebraucht, diese Vektoren heissen Einheitsvektor.

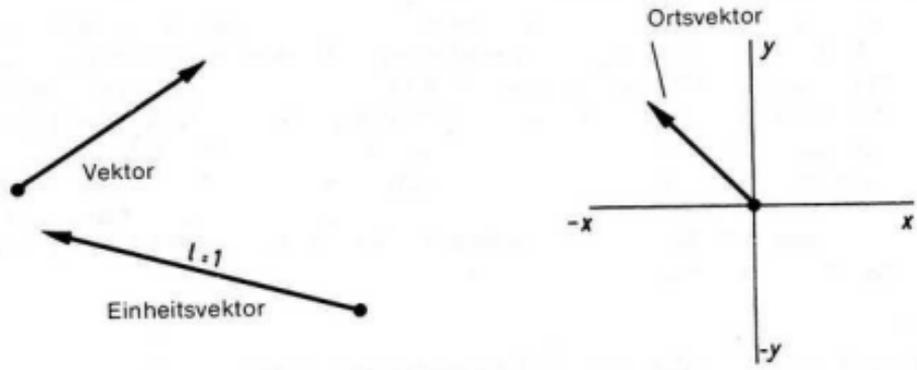


Bild 66

Jeder Vektor der Ebene lässt sich in zwei Komponenten zerlegen. Wir wollen dies an Hand eines Ortsvektors untersuchen.

In Bild 67 sehen wir den Vektor \vec{U} in seine Komponenten \vec{U}_x und \vec{U}_y zerlegt. Zu jedem Vektor existiert eine unendlich grosse Anzahl Komponenten, in welche dieser Vektor zerlegt werden kann.

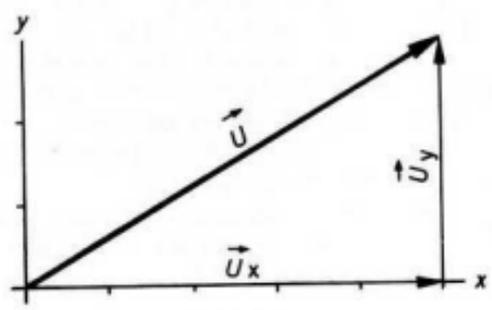


Bild 67

In der Wechselstromtechnik interessiert hauptsächlich die Zerlegung eines Ortsvektors in die Komponenten, die mit der X-Achse oder der Y-Achse zusammenfallen.

Ein für die Wechselstromtechnik wichtiger Sonderfall ist der rotierende Einheitsvektor. In Bild 68 sehen wir einen Einheitsvektor, welcher sich mit kon-

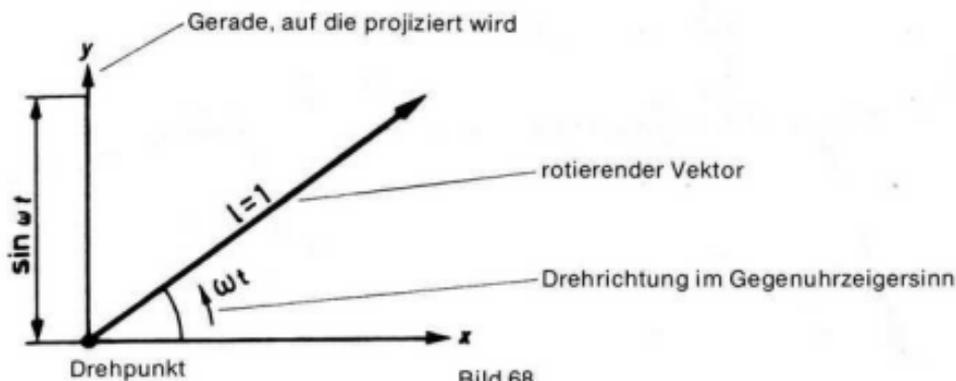


Bild 68

stanter Geschwindigkeit im Gegenuhrzeigersinn um den Drehpunkt dreht. Die Projektion auf der Y-Achse entspricht der Sinusfunktion.

Die Darstellung von Vorgängen in Wechselstromkreisen erfordert oft eine Addition oder Subtraktion verschiedener Vektoren. Überall dort, wo zwei Wechselstromgrößen überlagert werden, ergibt sich als dritte Größe die Addition von zwei Vektoren. Bild 69 zeigt, wie einfach diese Addition vorgenommen wird. Die Vektoren werden parallel verschoben und aneinander gereiht. Der Gesamtvektor ergibt sich aus der Verbindungslinie zwischen dem Anfangspunkt des ersten Vektors und der Spitze des letzten Vektors.

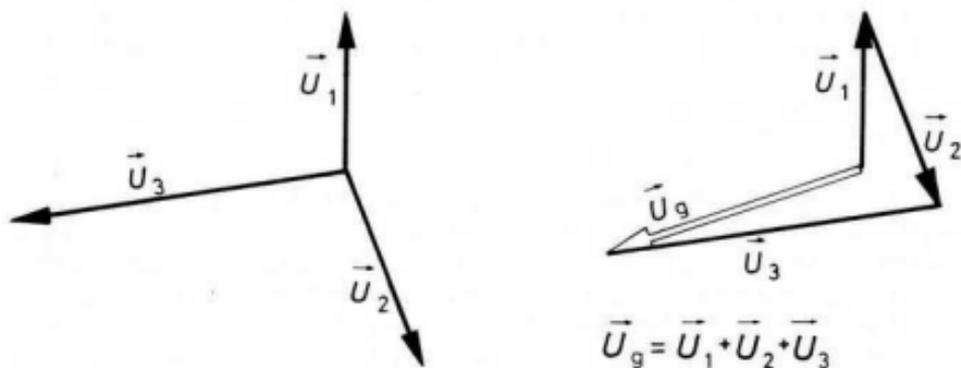


Bild 69

$$\vec{U}_g = \vec{U}_1 + \vec{U}_2 + \vec{U}_3$$

Werden Vektoren voneinander subtrahiert, so wird die Richtung des zu subtrahierenden Vektors um 180° gedreht und der so umgepolte Vektor addiert. Bild 70 zeigt das Beispiel einer Subtraktion.

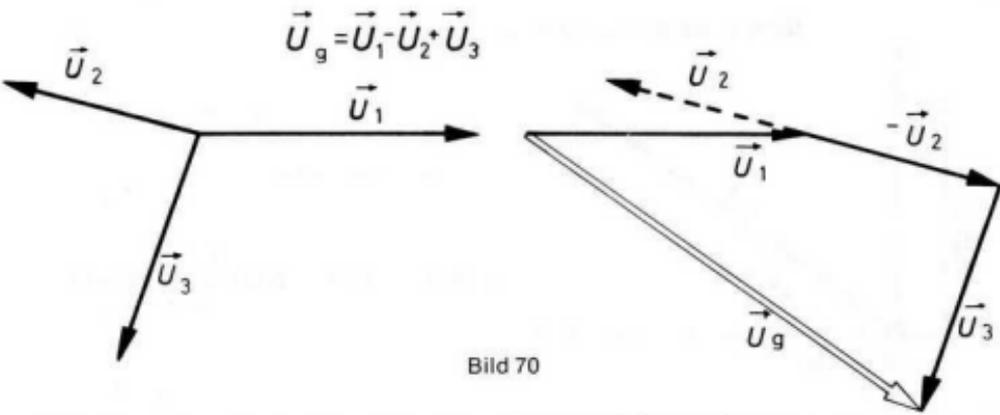


Bild 70

Mehr brauchen Sie im Moment über Vektoren nicht zu wissen. Mit den erworbenen Kenntnissen können Sie die folgenden Probleme leicht lösen.

4. Beispiele

a) Mit Hilfe der Vektordarstellung ist zu beweisen, dass bei einem Verbraucher in Dreieckschaltung der verkettete Strom $\sqrt{3}$ mal grösser ist als der Phasenstrom.

Vorgehen:

- Verbraucherschaltung aufzeichnen
- In der Schaltung Polleiterströme einzeichnen I_R, I_S und I_T
- Phasenströme I_{RS1}, I_{ST2} und I_{TR3} einzeichnen
- Vektordiagramm der Polleiterströme und der Phasenströme zeichnen. Dabei ist zu beachten, dass zwischen den Phasenströmen eine Phasenverschiebung von 120° herrscht. Wir zeichnen den Hinfluss der drei Phasenströme auf und vermerken hinter der Bezeichnung, in welchem Polleiter der Strom zufließt. Um 180° gedreht zeichnen wir jetzt den Rückfluss ein und vermerken wiederum, in welchem Polleiter dieser erfolgt. Damit erhalten wir für jeden Polleiter einen hinfließenden und einen rückfließenden Strom. Die vektorielle Addition der Ströme pro Polleiter ergibt den Gesamtstrom für jeden Polleiter. Durch einfaches Ausmessen der Beträge der Vektoren stellen wir fest, dass die Vektoren für die Polleiterströme 1,73 mal länger sind als die Vektoren der Phasenströme. Rechnerischer Beweis: Die Vektorspitzen der Phasenströme liegen auf den Ecken eines regulären Sechsecks, dessen Seitenlänge gleich dem Kreisradius ist, in unserem Fall gleich der Vektorlänge der Phasenströme. Durch den Polvektor wird die Sechseckseite halbiert, diese wiederum halbiert den Polvektor. Nach dem Satz von Pythagoras ist die Länge des halben Polvektors.

$$\frac{I}{2} = \frac{I_{ph}}{2} \sqrt{3}, \text{ die des ganzen Polvektors } I = I_{ph} \cdot \sqrt{3}$$

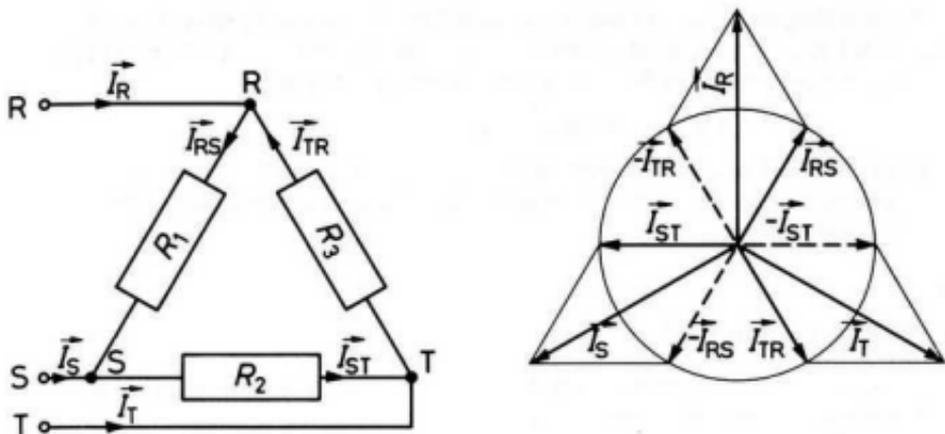


Bild 71

b) Ein Dreiphasennetz mit Nulleiter wird zur Speisung verschiedener ohmscher Verbraucher benutzt. Die einzelnen Phasen werden unterschiedlich belastet. Die Polleiterströme und der Nulleiterstrom sind graphisch zu ermitteln. Bild 72 zeigt die Schaltung.

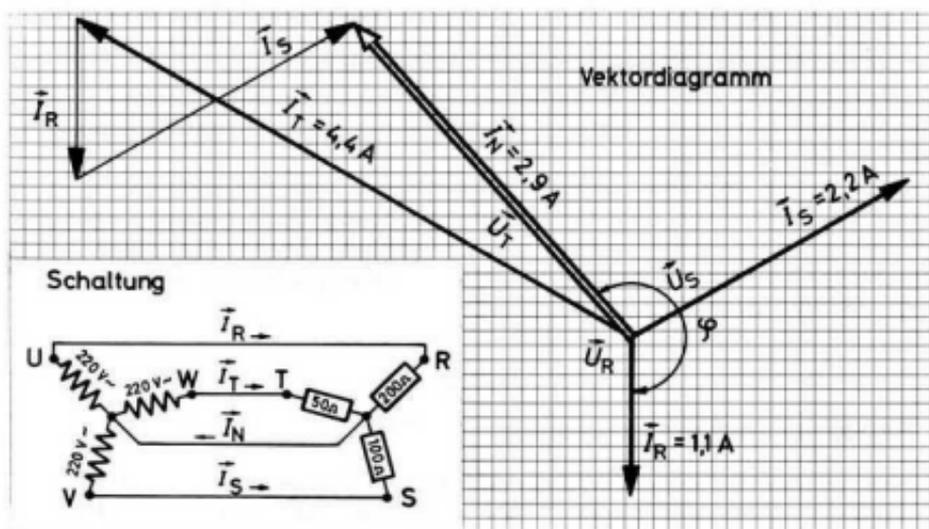


Bild 72

Vorgehen:

- Die Spannungen zwischen Phasen und Nulleiter sind im Vektordiagramm mit einer gegenseitigen Phasenverschiebung von 120° einzutragen.

- Für die Ströme ist ein Massstab zu wählen (im Beispiel pro A zwei cm).
- Die Ströme in jedem Aussenleiter sind zu berechnen und im Diagramm phasengleich mit den Phasenspannungen einzutragen:

$$\vec{I}_R = 1,1 \text{ A}, \vec{I}_S = 2,2 \text{ A}, \vec{I}_T = 4,4 \text{ A}$$

- Der Gesamtstrom \vec{I}_N wird aus dem Diagramm zu 2,9 A herausgelesen, dieser Strom fliesst im Nulleiter. Er weist zum Polleiterstrom \vec{I}_R eine Phasenverschiebung von 221° auf.

5. Das Wesentliche

Beim Dreiphasendrehstrom herrscht zwischen den einzelnen Phasenspannungen eine Phasenverschiebung von 120°

Bei der Sternschaltung sind die Generatorwicklungen oder die Verbraucherlasten sternförmig geschaltet. Ein Netz in Sternschaltung weist ausser den drei Aussenleitern noch einen Nulleiter auf. Die Spannung zwischen dem Nulleiter und einem Aussenleiter heisst Phasenspannung. Die Spannung zwischen zwei Aussenleitern nennt man verkettete Spannung, sie ist um den Faktor 1,73 mal grösser als die Phasenspannung.

Bei der Dreieckschaltung sind die Generatorwicklungen oder die Verbraucherlasten dreieckförmig geschaltet. Für Dreieckschaltungen gibt es keinen Nulleiter. Ein Verbraucher, der in Dreieckschaltung betrieben wird, und der alle drei Phasen gleichmässig belastet, bezieht über die Polleiter einen Strom, der um den Faktor 1,73 mal grösser ist als der Phasenstrom.

Ein Verbraucher, der ein Dreiphasensystem gleichmässig belastet, bezieht aus diesem System eine Leistung, die dem Produkt von Strom, Spannung und dem Faktor 1,73 entspricht.

Wechselströme und Wechselspannungen lassen sich mit Hilfe von Vektoren darstellen. Ein Vektor zeigt Grösse und Richtung eines Stromes oder einer Spannung an. Vektoren werden einfach addiert, indem man diese parallel verschiebt und aneinanderreihet. Vektoren werden subtrahiert, indem man den einen um 180° dreht und dann addiert.

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 440)

- Was verstehen Sie unter dem Ausdruck «verkettete Spannung»?
- Zeichnen Sie das Vektordiagramm für eine verkettete Spannung.
- Wann fliesst im Nulleiter kein Strom?
- Warum ist bei einem Verbraucher, der in Dreieckschaltung betrieben wird, der Polleiterstrom grösser als der Phasenstrom.
- Ein in Dreieckschaltung betriebener Verbraucher belastet die drei Phasen eines 500 V Drehstromnetzes mit je 200 Ohm. Zeichnen Sie das Vektordiagramm für die Phasen- und Polleiterströme.

- f) Ein Generator ist in Sternschaltung geschaltet, die Phasenspannung beträgt 220 V. Er wird durch einen Verbraucher belastet, der Dreieckschaltung aufweist. Eine Phase wird mit 100 Ohm, die zweite mit 80 Ohm und die dritte mit 50 Ohm belastet. Zeichnen Sie das Vektordiagramm für die Polleiterströme und geben Sie deren Beträge an.
- g) In einem Nulleiter fließen drei Ströme. Der erste Strom misst 5 A, der zweite Strom misst 7 A und ist gegenüber dem ersten um 50° voreilend, der dritte misst 10 A und ist gegenüber dem zweiten um 170° voreilend. Zeichnen Sie das Vektordiagramm und ermitteln Sie den Gesamtstrom. Welche Phasenlage weist dieser Gesamtstrom gegenüber demjenigen von 5 A auf?
- h) Was ist ein Vektor?