Inhaltsverzeichnis

1.	**Schema PÜVV**	7
2.	**Die Grundprinzipien**	9
2.1	Stromkreise	11
2.2	Elektrische Grössen	11
2.3	Anwendung von Wechselstrom	19
2.4	Eigenschaften von Wechselstromnetzen	24
2.5	Eigenschaften von Verbrauchern	25
3.	**Generatoren**	29
3.1	Definition	31
3.2	Einführung	31
3.3	Synchron-Maschine	37
3.4	Dreiphasige Asynchron Maschine	44
4.	**Anwendung von Generatoren**	55
4.1	Typenschilder	57
4.2	Anschlussklemmen	62
4.3	Netzverbundbetrieb	64
4.4	Inselbetrieb	70
4.5	Sicherheit	77
5.	**Vergleich zwischen Synchron- und Asynchron-Generator**	81
5.1	Qualität der elektrischen Energie	83
5.2	Techn. Vergleichskriterien	83
5.3	Vergleich der Investitionskosten	85
6.	**Informationen zum Generatorpflichtenheft**	87
6.1	Spezifikationen, die der Lieferant kennen muss	89
6.2	Beilagen zum Angebot	90
6.3	Verifikation der Leistung	90
7.	**Schutz und Sicherheit von elektrischen Installationen**	91
7.1	Rechtliche Grundlagen	93
7.2	Gefahren der Elektrizität	96
7.3	Installationsschutz	100
7.4	Schutz von rotierenden Maschinen	102
7.5	Rechtliche Bestimmungen	109
	Bibliographie	113
	Publikationen und Videos des Impulsprogrammes PACER	115

1. Schema PÜVV

Ein Prinzipschema eines Systems zur Produktion-Übertragung-Verteilung-Verbrauch (PÜVV) ist in Abb. 1.1 wiedergegeben.

Komponenten des Systems

- **Produktion**
  Turbine
  Generator (synchron oder asynchron)
  Regelung (Frequenz - Spannung - cosφ)

- **Übertragung**
  Transformator (unnötig für Kleinanlagen)
  Übertragungsleitung
  Transformator (unnötig für Kleinanlagen)

- **Verteilung**
  Unterstation und/oder
  Verteilung zu den Verbrauchern

- **Verbrauch**
  ohmsche Verbraucher (cosφ=1): Glühlampen, Kochherde,Heizungen
  induktive Verbraucher (cosφ<1): el. Motoren, Transformatoren

Auf allen Stufen des PÜVV- Systems müssen der Personen- und Geräteschutz gewährleistet sein

- **Schutzeinrichtung**
  Überspannung
  Kurzschluss
  Erdung

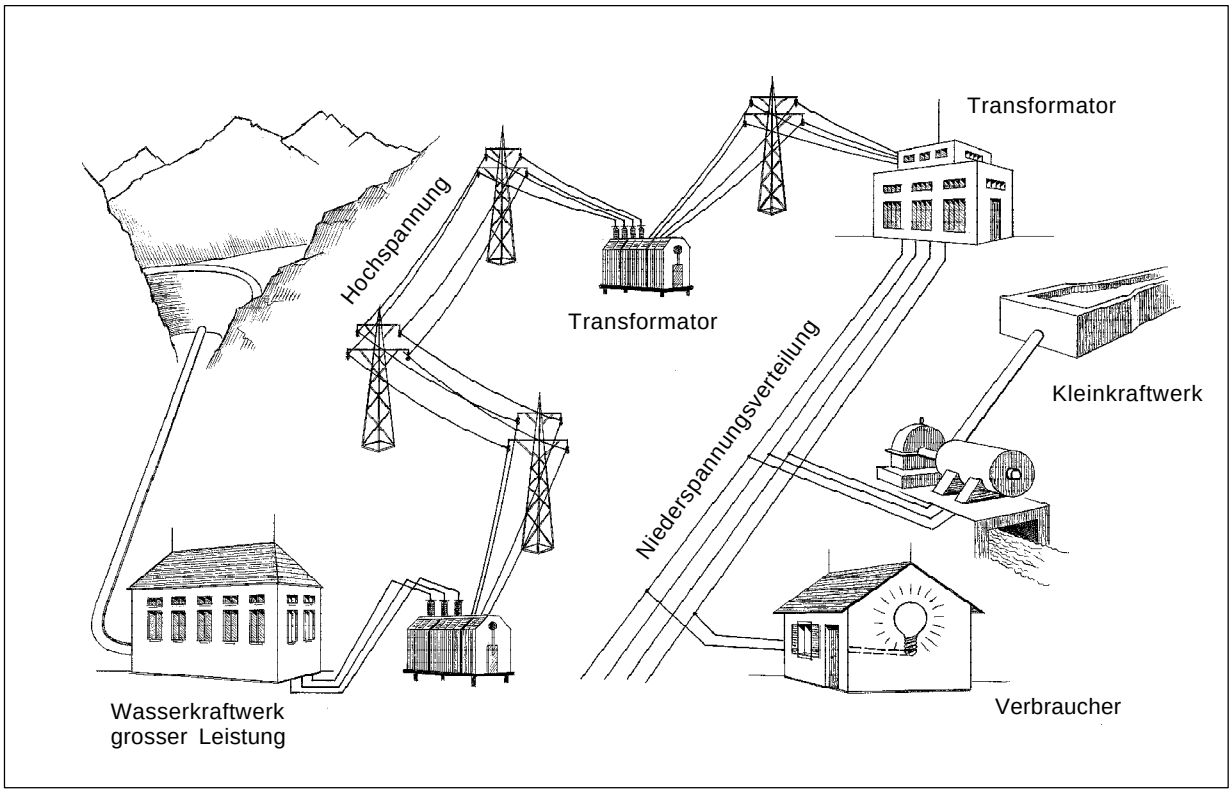


Abbildung 1.1: Prinzip Schema eines PÜVV Systems

2. Die Grundprinzipien

2.1 Stromkreise 11

2.2 Elektrische Grössen 11
2.2.1 Spannung 11
2.2.2 Strom 12
2.2.3 Frequenz 13
2.2.4 Phasenwinkel φ 13
2.2.5 Leistungsfaktor cosφ 14
2.2.6 Wirkleistung 14
2.2.7 Blindleistung 14
2.2.8 Scheinleistung 15
2.2.9 Energie 15
2.2.10 Widerstand 15
2.2.11 Kapazität 17
2.2.12 Induktivität 17

2.3 Anwendung von Wechselstrom 19
2.3.1 Vorteile von Wechselstrom 19
2.3.2 Allgemeines und Vorteile von dreiphasigen Netzen 19
2.3.3 Erzeugung von Drehstrom 19
2.3.4 Anschlussschaltungen 21
2.3.4.1 Sternschaltung 21
2.3.4.2 Dreieckschaltung

2.4 Eigenschaften von Wechselstromnetzen 24

2.5 Eigenschaften von Verbrauchern 25
2.5.1 rein ohm'sche Last 25
2.5.2 rein induktive Last 25
2.5.3 rein kapazitive Last 26
2.5.4 gemischte Last 27
2.5.5 Impedanz 28

2. Die Grundprinzipien

2.1 Stromkreise

Eine Bewegung der Elektronen in einem elektrischen Leiter stellt einen elektrischen Strom dar. Die darin enthaltene Energie kann von Verbrauchern in andere Energieformen umgewandelt werden (Wärme, Bewegung, Information...).

Ein elektrischer Kreis besteht aus drei Teilen: die Quelle, die Leitung und die Last.

Eine einfache Analogie zwischen einem elektrischen und hydraulischen Kreis ist möglich (Abb. 2.1).

2.2 Elektrische Grössen

2.2.1 Spannung

Symbol: **U**
Einheit: **Volt** [Ω]

Die Elektronen in einem Leiter bewegen sich nur unter einer „elektrischen Druckdifferenz".

Diese antreibende Kraft nennt man die Spannung (U, u), welche in Volt [V] gemessen wird. Die Spannung ist also vergleichbar mit der Druckdifferenz Δp in der Hydraulik (Abb. 2.1).

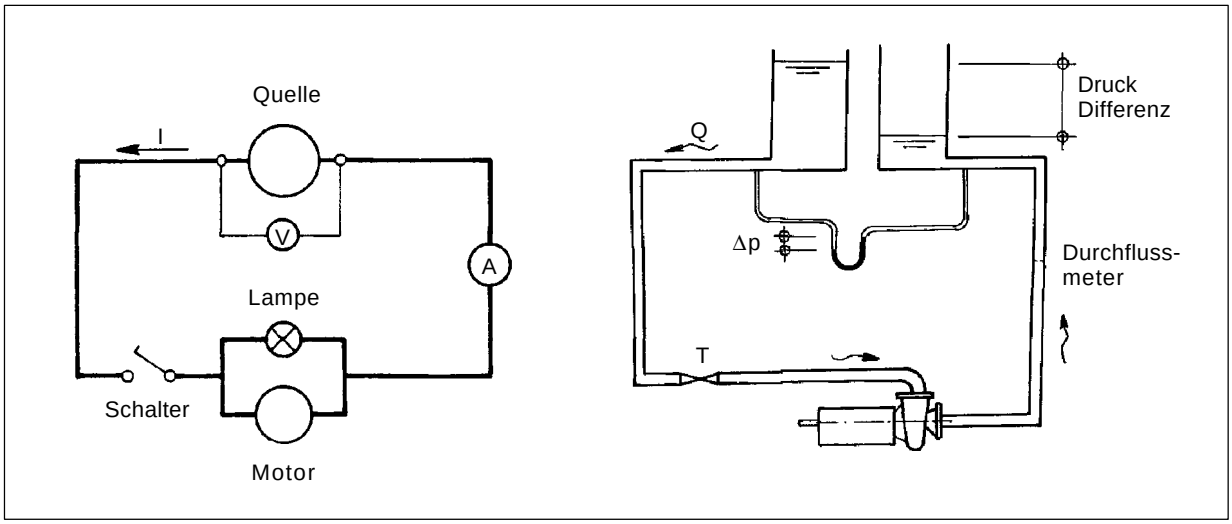


Abbildung 2.1: Analogie zwischen einem elektrischen- und hydraulischen Stromkreis

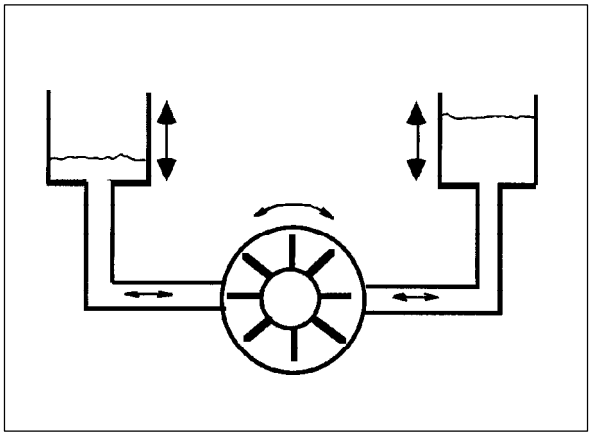


Abbildung 2.2: Schwingender hydraulischer Stromkreis

2.2.2 Strom

Symbol: **I**
Einheit: **Ampère** [**A**]

Ist eine Spannung zwischen zwei Punkten eines el. Kreises vorhanden, beginnen sich elektrische Ladungen, in diesem Falle die beweglichen Elektronen, zu verschieben, um die Spannung auszugleichen.

Diese Ladungsbewegung wird Strom (I, i) genannt und wird in Ampere [A] gemessen. Wieder ist die Analogie zum Wasserfluss tauglich (Abb. 2.1).

Bewegen sich die Ladungen immer in die gleiche Richtung, spricht man von Gleichstrom, desgleichen von einer Gleichspannung.

Ändert sich jedoch die Bewegungsrichtung, spricht man von Wechselstrom bzw. Wechselspannung (Abb. 2.2). In der Energietechnik bedeutet Wechselstrom ein harmonisch wechselnder Strom, dh. der Strom beschreibt eine Sinus Funktion (Abb. 2.3).

Dies hat folgende Konsequenzen:

– Der Strom-, Spannungsmittelwert ist Null
– Der quadratische Mittelwert oder Effektivwert ist proportional zum Spitzen (Scheitel) -wert (Î, Û)

$$U_{eff} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} \text{ und } I_{eff} = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}}$$

Meist lässt man das Subskript $_{eff}$ weg.

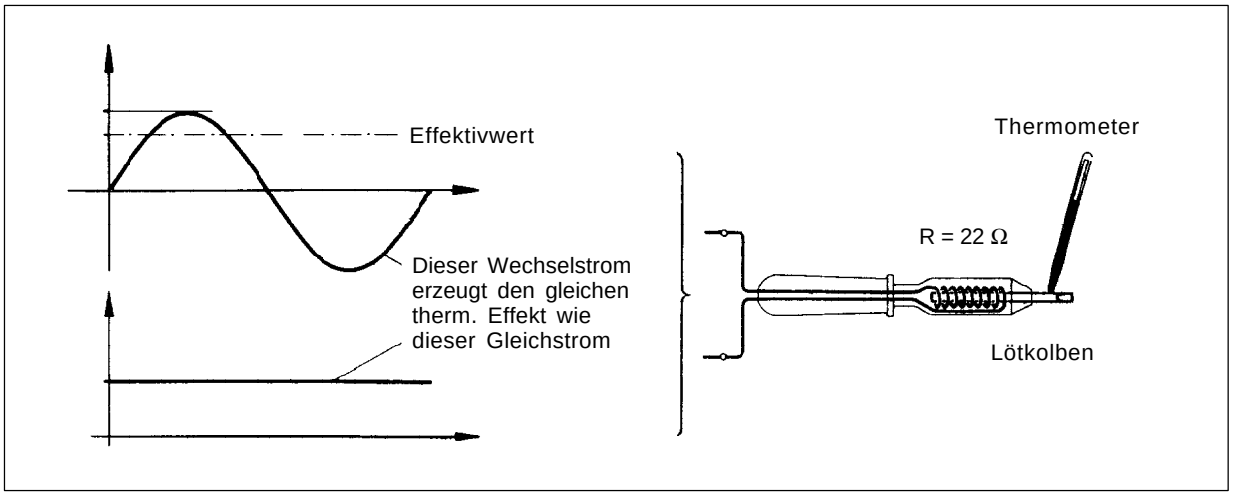


Abbildung 2.3: Vergleich von Gleich- und Wechselsignalen

2.2.3 Frequenz

Symbol: **f**
Einheit: **Hertz** [**Hz**]

Die Anzahl der Perioden pro Sekunde eines alternierenden Stromes nennt man die Frequenz f. Sie wird in Hertz (Hz) gemessen.

Eine Frequenz von 50Hz entspricht 50 Perioden pro Sekunde und einer Periodendauer T von 20ms.

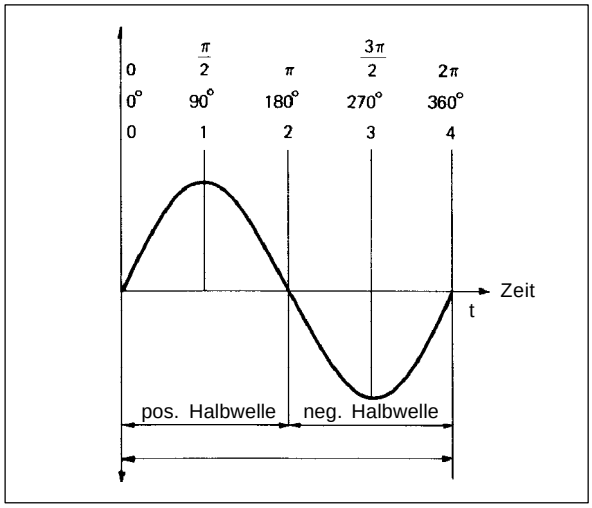


Abbildung 2.4: Wechselsignal

2.2.4 Phasenwinkel φ

Obwohl in einem elektrischen Kreis die Frequenz der Spannung und des Stromes immer dieselbe sein muss, ist es durchaus möglich, dass der Scheitelwert nicht zeitgleich erreicht wird. Dies stellt sich als eine Phasenverschiebung des Stromes und der Spannung dar (Abb. 2.5).

Diese Phasenverschiebung wird von gewissen Verbrauchern erzeugt und ist für ein elektrisches Netz konstant.

Eine elegante Methode, die Phasenverschiebung zu beschreiben, ist die Verwendung des Zeigerdiagrammes (Abb. 2.6). Stellt man sich die Sinus-Kurven als Projektion von rotierenden Zeigern vor (für Netze 50Hz), entspricht die Phasenverschiebung einer Winkeldifferenz zwischen dem Spannungs- und Stromzeiger. Dieser Winkel wird mit φ bezeichnet. Bei konstanter Frequenz ist das Netz vollständig durch die Scheitelwerte und den Phasenwinkel beschrieben.

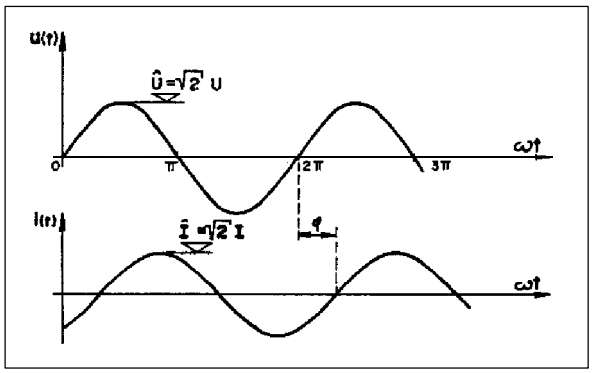


Abbildung 2.5: Phasenverschiebung zwischen U und I

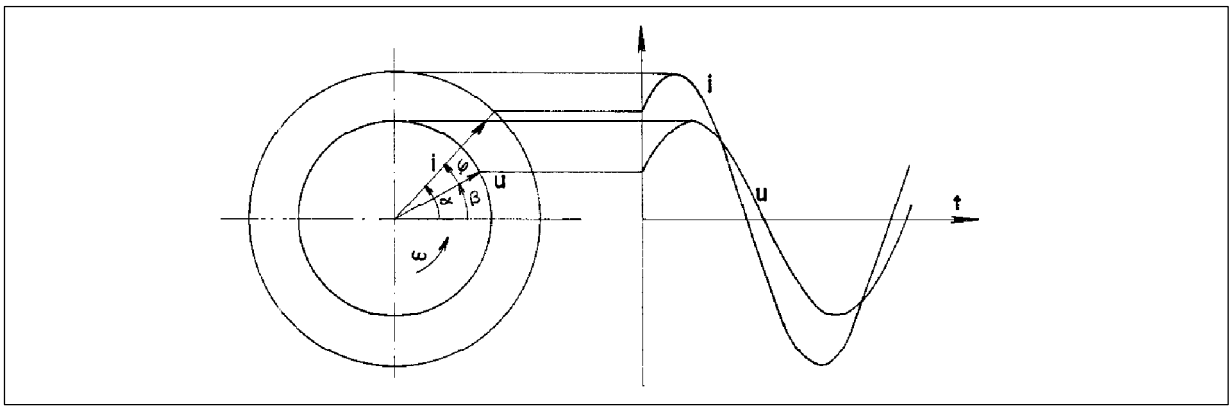


Abbildung 2.6: Drehzeiger

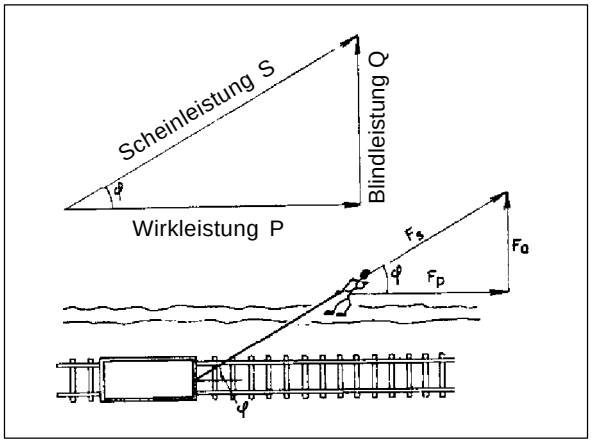


Abbildung 2.7: Mechanische Analogie zum Leistungsdreieck

2.2.5 Leistungsfaktor cosφ

Im einfachsten Fall ist die Leistung in einem elektrischen Netz das Produkt des Stromes und der Spannung. Sobald jedoch im Wechselstromfall eine Phasenverschiebung besteht, sind die Verhältnisse etwas komplizierter. In Analogie einer Zugkraft (Abb. 2.7 Spannung = Gleisrichtung, Strom = Zugrichtung) unterscheidet man

Wirkstrom Strom in Richtung der Spannung
Blindstrom Strom senkrecht zur Spannung
Scheinstrom gesamter Strom

Aus der Geometrie ist ersichtlich, dass die Wirkkomponente gerade cosφ mal Scheinkomponente ist. Da cosφ, auch Leistungsfaktor genannt, eine reine Zahl ist, eignet sie sich besonders als Mass für die Phasenverschiebung.

2.2.6 Wirkleistung

Symbol: **P**
Einheit: **Watt** [**W**]

Die Wirkleistung P ist die, welche Arbeit verrichtet und daher den Verbraucher interessiert. Sie wird umgewandelt in z.B. mechanische, Heiz-, oder chemische Energie. Sie wird in Watt [W] gemessen.

P = U € I € cosφ	(AC)	W
P = U € I	(DC)	W

AC Wechselstrom/Spannung
DC Gleichstrom/Spannung

2.2.7 Blindleistung

Symbol: **Q**
Einheit: **Volt Ampère reaktiv** [**VAr**]

Die Blindleistung Q wird benötigt, um magnetische und elektrische Felder aufzubauen, und belastet das Netz mit Blindstrom. Der Verbraucher hat keinen eigentlichen Nutzen dieser Leistung. Sie wird in Volt Ampere reaktiv [VAr] gemessen.

Q = U € I € sinφ	(AC)	VAr
Q = 0	(DC)	VAr

2.2.8 Scheinleistung

Symbol: **S**
Einheit: **Volt Ampère** [**VA**]

Die Scheinleistung S ist die Vektorsumme der Wirk- und der Blindleistung. Sie ist diejenige, welche das Netz belastet. Sie wird in Volt Ampere [VA] gemessen.

$S = U \cdot I$	(AC)	VA
$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$	(AC)	VA
$S = P = U \cdot I$	(DC)	VA

2.2.9 Energie

Symbol: **E**
Einheit: **J** (Joule)

Die Energie ist die integrierte Leistung über die Zeit oder für eine konstante Leistung einfach das Produkt der Leistung und der Zeit. Für die Wirkenergie E ergibt sich somit

$E = P \cdot t$	J

Nach SI Norm ist die Messeinheit das Joule [J] (1J=1W x 1s)

Für Elektrizität wird jedoch meist die Kilowattstunde [kWh] verwendet.

1kWh =1000W x 3600s
=3’600’000J = 3.6MJ

2.2.10 Widerstand

Symbol: **R**
Einheit: **Ohm** [Ω]

Wie die Reibungsverluste in einem hydraulischen Netz widersetzt sich der Leiter dem Stromdurchfluss. Diese Materialeigenschaft nennt man spezifischen Widerstand ρ und wird in Ohm Meter [Ωm] oder [Ωmm²/m] gemessen.

Oft ist der Spannungsabfall in einem Leiter proportional zum Strom. Diesen Umstand gibt das Ohm’sche Gesetz wieder

$$U = R \cdot I$$

wobei der el. Widerstand R die Proportionalitätskonstante ist und in Ohm [Ω] gemessen wird. Der Widerstand eines Leiters ist:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

L = Leiterlänge
A = Leiterquerschnitt
ρ = (Material) spezifischer Widerstand $\left(\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}\right)$

Die Verlustleistung dieser Reibung wird in Wärme umgewandelt, ist also eine reine Wirkleistung und beträgt:

$$P = U \cdot I \qquad W$$

oder da U = RI

$$P = R \cdot I^2 \text{ oder } P = \frac{U^2}{R} \qquad W$$

ist also quadratisch zum Strom und zur Spannung.

Um diese Verluste, auch Joul'sche Verluste, zu minimieren, verwendet man ausschliesslich sehr gut leitende Materialien, nämlich Kupfer und Aluminium.

In einem weiten Bereich variiert ihr spezifischer Widerstand linear mit der Temperatur (Abb.. 2.8) und kann somit folgendermassen beschrieben werden:

$$\rho_T = \rho_{T_0} \cdot \left(1 + \frac{T - T_0}{235 + T_0}\right) \quad \Omega mm^2/m$$

wobei ρ_{T0} [Ωmm²/m] (T_0 = 20°C)
für Kupfer = 0.0175
für Aluminium = 0.03

Da der Widerstand proportional zum spezifischen Widerstand ist, gilt auch die ähnliche Formel für R:

$$R_T = R_{T_0} \cdot \left(1 + \frac{T - T_0}{235 + T_0}\right) \qquad \Omega$$

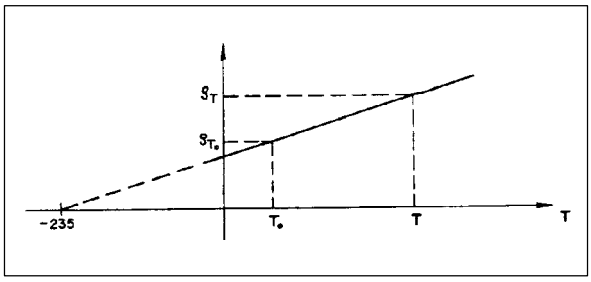


Abbildung 2.8: Temperaturabhängigkeit des spez. Widerstandes

2.2.11 Kapazität

Symbol: **C**
Einheit: **Farad** [**F**]

Schliesst man zwei isolierte leitende Platten an eine Spannungsquelle (Fig. 2.9), lädt sich die eine positiv, die andere negativ auf. Beide Platten akkumulieren elekrische Ladung. Diese Eigenschaft der Ladungsspeicherung nennt man Kapazität C und die beschriebene Anordnung entspricht einem einfachen Kondensator. Die Kapazität wird als Verhältnis der gespeicherten Ladung zur angelegten Spannung ausgedrückt und in Farad [F] gemessen.

$$C = \frac{Q}{U} \qquad F = (As)/V$$

1 Farad entspricht also einer Kapazität, welche mit einem Strom von 1A, während 1s geladen, eine Spannungerhöhung von einem Volt erhält. D.h. auch, dass sich Kapazitäten einer Spannungsänderung widersetzen.

Ein Farad entspricht einer ungeheuer grossen Fläche, und die technisch realisierbaren Kondensatoren haben viel kleinere Werte zwischen Billionstel und Millionstel Farad (picoFarad [pF] und mikroFarad [µF]).

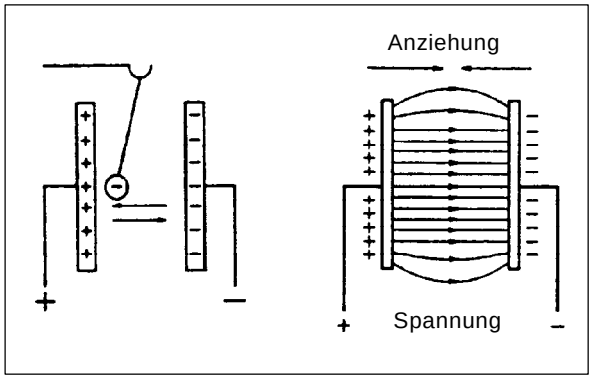


Abbildung 2.9: Plattenkondensator

2.2.12 Induktivität

Symbol: **L**
Einheit: **Henry** [**H**]

Jeder Strom erzeugt ein magnetisches Feld, das durch den magnetischen Fluss Φ beschrieben wird. Die Induktivität L einer Leiteranordnung (z.B. einer Spule) ist das Verhältnis des magnetischen Flusses zum Strom.

$$L = \frac{\Phi}{I} \qquad H = (Vs)/A$$

Die Induktivität wird in Henry [H] gemessen. 1 Henry entspricht also einer Induktivität, welche an einer Spannung von 1V, während 1s geladen, von einer Stromerhöhung von 1A durchflossen wird. D.h. auch, dass sich Induktivitäten einer Änderung des Stromflusses widersetzen.

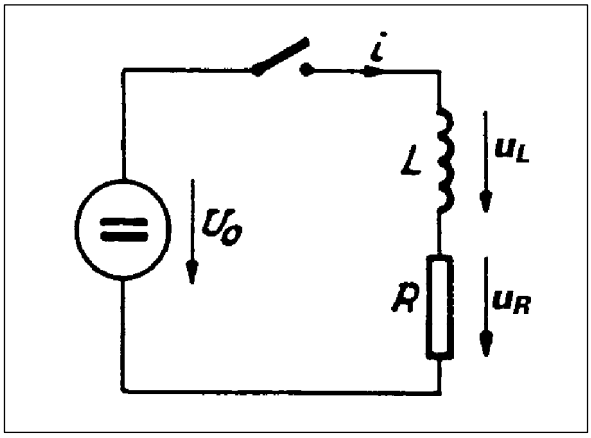


Abbildung 2.10: Schema eines induktiven Schaltkreises

Eine reelle Spule enthält demnach zwei Widerstände: den Widerstand R, der sich dem Strom widersetzt, und die Induktivität, welche sich der *Änderung* des Stromes widersetzt. Diese beiden Eigenschaften kann man sich als in Serie geschaltete Elemente vorstellen (Abb. 2.10), und der gesamte Spannungsabfall ist die Summe der Spannungen über der Induktivität und dem Widerstand.

$$U = R \cdot I + L \cdot \frac{\partial I}{\partial t}$$

Schaltet man eine Spannungsquelle an eine Spule, dauert es eine Weile, bis sich der Strom auf den durch den Widerstand vorgegebenen Wert stabilisiert. Die Induktivität verhindert, dass der Strom „springt". Die Anstiegszeit wird durch die sog. Zeitkonstante τ beschrieben.

$$\tau = \frac{L}{R} \qquad s$$

Diese Zeitkonstante charakterisiert den exponentiellen Spannungs- und Stromverlauf in einer Spule (Abb. 2.11): der Strom sättigt exponentiel, die Spannung über der Induktivität springt auf den Wert der Speisung und nimmt dann exponentiel ab. Genau gegenteilig verhält sich die Spannung über dem Widerstand. Beide Spannungen zusammen sind immer gleich U_0.

Eine ideale Spule ist widerstandslos. Im Falle von Wechselspannung begrenzt sie über die Induktivität den Strom, bei Gleichspannung bildet sie jedoch einen Kurzschluss.

Eine Induktivität speichert magnetische Energie

$$W = \tfrac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \qquad J$$

Diese Energie wird nicht in Wärme umgewandelt.

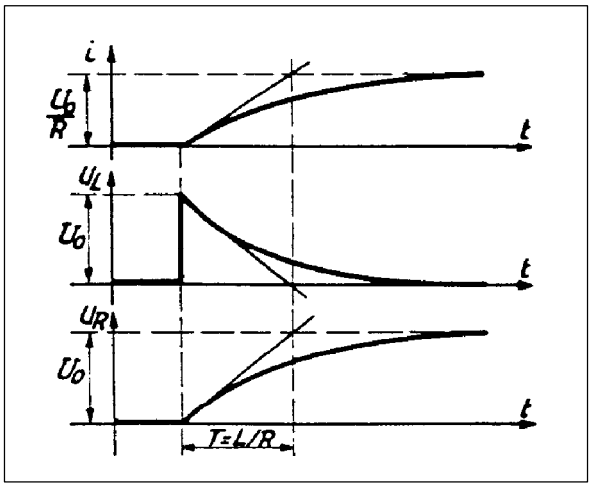


Abbildung 2.11: das Strom- und Spannungsverhalten in einem induktiven Schaltkreis

2.3 Anwendung von Wechselstrom

2.3.1 Vorteile von Wechselstrom

Wechselstrom hat etliche Vorteile gegenüber Gleichstrom

- geringere Übertragungskosten
- einfache Spannungstransformation
- einfachere Konstruktionsweise von Generatoren und Motoren
- einfachere Schalter

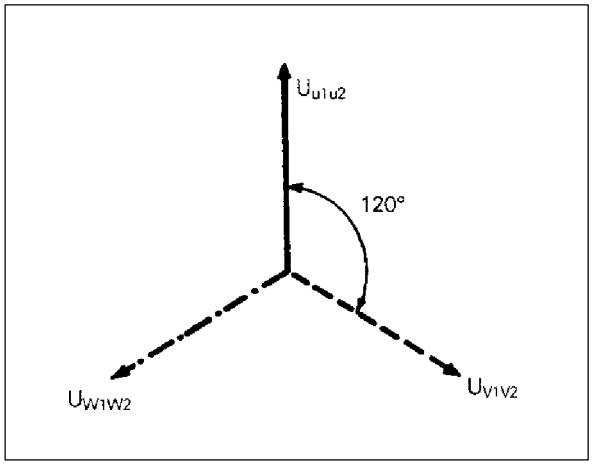


Abbildung 2.12: Phasenverschiebung zwischen den 3 Phasenspannungen

2.3.2 Allgemeines und Vorteile von dreiphasigen Netzen

Die einphasige Erzeugung und Verteilung el. Energie ist nur für kleine Leistungen (<5kW) wirtschaftlich. Darüber sind die Netze dreiphasig. Dies erlaubt kleinere Leiterquerschnitte und Maschinengrössen.

2.3.3 Erzeugung von Drehstrom

Ein dreiphasiges Netz entspricht tatsächlich drei individuellen Strömen, die jeweils eine Phasenverschiebung von

$$120^{o} \text{ oder } \frac{2\pi}{3} \text{ radian}$$

haben (Abb. 2.12). Das gleiche gilt selbstverständlich auch für die Spannungen.

Um ein Dreiphasennetz aufzubauen, genügt somit eine Maschine mit einem rotierenden Magneten und 3 unabhängigen Statorspulen, welche geometrisch jeweils um 120° verschoben sind. Die Abb. 2.13 und 2.14 stellen eine solche Maschine sowie die drei erzeugten sinusförmigen Ströme dar.

- **Strangspannung**
  die Spannung zwischen den Spulenenden
  U_{U1U2} U_{V1V2} U_{W1W2}

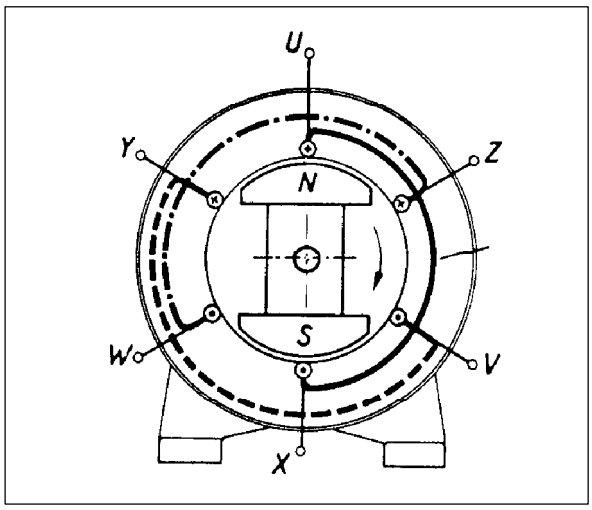


Abbildung 2.13: Dreiphasengenerator

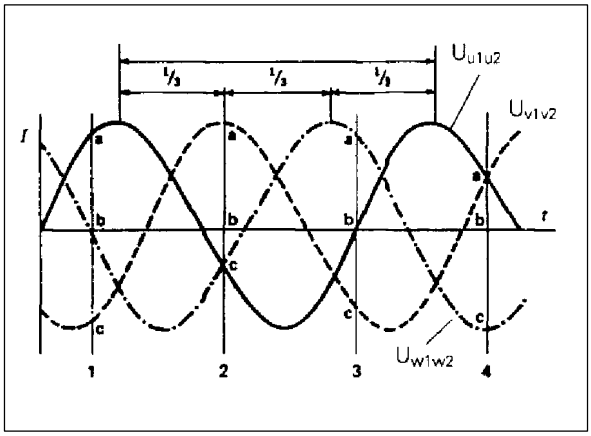


Abbildung 2.14: Die im Generator erzeugten 3 Spannungen

- **Innenleiter Spannung**
  die Spannung zwischen den Spuleneingängen oder einem Phasenleiter und dem Neutralleiter
  U_{U1N} U_{V1N} U_{W1N}
  oder
  U_{L1N} U_{L2N} U_{L3N}

- **Aussenleiter- oder verkettete Spannung**
  die Spannung zwischen zwei Spuleneingängen oder zwei Phasenleitern
  U_{U1V1} U_{V1W1} U_{W1U1}
  oder
  U_{L1L2} U_{L2L3} U_{L3L1}

- **Strangstrom**
  Strom in einem Strang
  I_{U1} I_{V1} I_{W1}

- **Leiterstrom**
  Strom in den Anschlussleitern einer dreiphasigen Last:
  I_{L1} I_{L2} I_{L3}

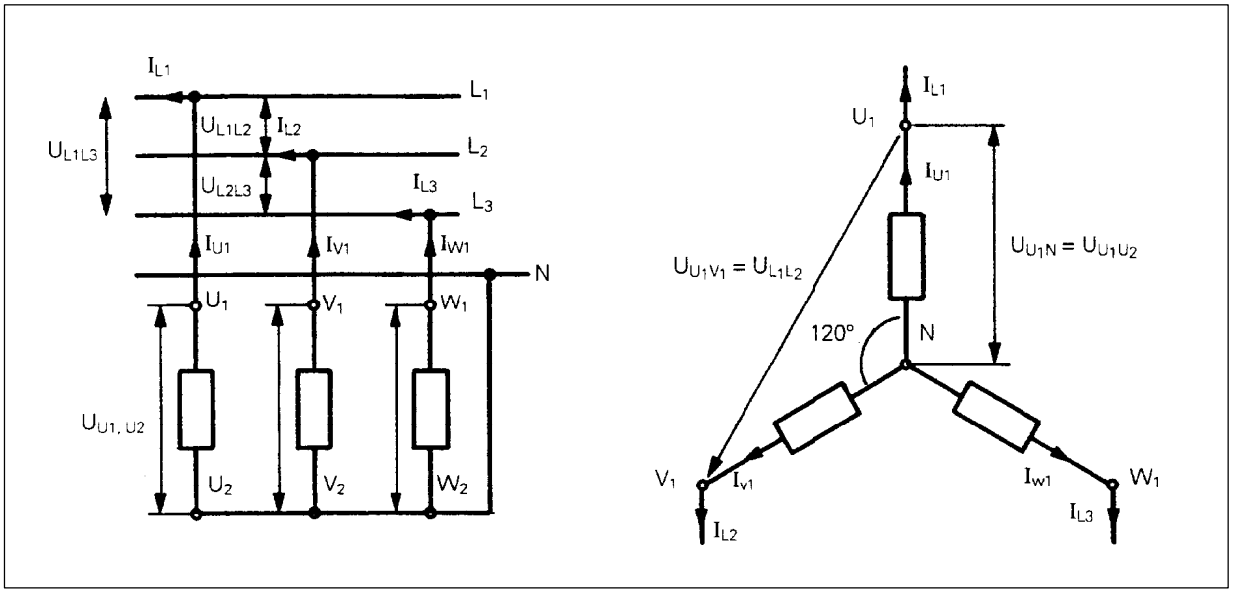


Abbildung 2.15: Sternschaltung

2.3.4 Anschlussschaltungen

In einem Dreiphasensystem sind zwei unterschiedliche Anschlussformen gängig:

- **die Sternschaltung**
- **die Dreiecksschaltung**

Es ist wichtig, für diese unterschiedlichen Anschlüsse

- die Leistungsausdrücke
- die Verhältnisse zwischen einfachen und verketteten Spannungen
- die Verhältnisse zwischen den Leiter- und Phasenströmen

zu kennen.

2.3.4.1 Sternschaltung

Symbol: **Y**

In der Sternschaltung werden die Eingänge (U1-V1-W1) mit den Phasenleitern verbunden, die Abgänge zusammengeschaltet. Dieser Punkt wird Sternpunkt genannt, ist elektrisch zugänglich (Abb. 2.15) und wird mit dem Neutralleiter verbunden.

- **Spannungen**

$$U_{L1L2} = U_{U1V1} = \sqrt{3} \cdot U_{U1U2} \qquad \text{V}$$

äquivalent für U_{L2L3} und U_{L3L1}

- **Ströme**

Die Strang- und Leiterströme sind gleich:

$$I_{L1} = I_{U1} \quad I_{L2} = I_{V1} \quad I_{L3} = I_{W1} \qquad \text{A}$$

- **Leistungen**

Da ein Dreiphasensystem äquivalent zu 3 Einphasensystemen ist, darf man schreiben:

für die Scheinleistung:

$$S = 3 \cdot U_{innen} \cdot I_{Strang} \qquad \text{VA}$$

für die Wirkleistung:

$$P = 3 \cdot U_{innen} \cdot I_{Strang} \cdot \cos\varphi \qquad \text{W}$$

und für die Blindleistung:

$$Q = 3 \cdot U_{innen} \cdot I_{Strang} \cdot \sin\varphi \qquad \text{VAr}$$

Bezieht man sich auf die Spannungsverhältnisse

$$U_{innen} = \frac{U_{aussen}}{\sqrt{3}} \qquad \text{V}$$

und da die Strang- und Leiterströme dieselben sind:

$$I_{Strang} = I_{Leiter} \qquad \text{I}$$

erhält man

für die Scheinleistung:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_{aussen} \cdot I_{Leiter} \qquad \text{VA}$$

für die Wirkleistung:

$$P = \sqrt{3} \cdot U_{aussen} \cdot I_{Leiter} \cdot \cos\varphi \qquad \text{W}$$

und für die Blindleistung:

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_{aussen} \cdot I_{Leiter} \cdot \sin\varphi \qquad \text{VAr}$$

– **Impedanz**
Die Impedanz Z

$$Z_{Phase} = \frac{U_{innen}}{I_{Strang}} \qquad \Omega$$

wird im Falle der Sternschaltung

$$Z_{YPhase} = \frac{U_{aussen}}{\sqrt{3} \cdot I_{Leiter}} \qquad \Omega$$

2.3.4.2 Dreieckschaltung

Symbol: Δ

Die Dreieckschaltung erhält man, indem man alle Phasenabgänge U2-V2-W2 mit den Eingängen der nächstfolgenden Phase V1-W1-U1 verbindet (Abb. 2.16)

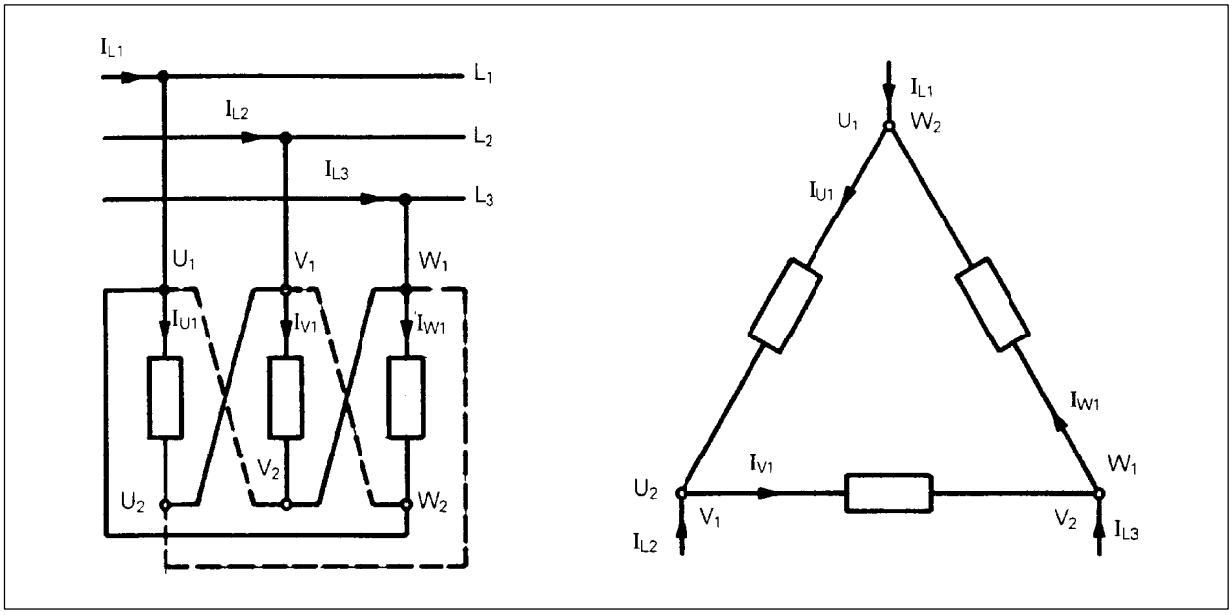


Abbildung 2.16: Dreieckschaltung

– **Spannungen**
  die Phasen- und Leiterspannungen sind gleich

$$U_{U1U2} = U_{U1V1} = U_{L1L2} \qquad V$$

– **Ströme**

$$I_{L1} = \sqrt{3} \cdot I_{U1} \qquad I$$

äquivalent für I_{L2} und I_{L3}

– **Leistungen**
  Ausgehend vom allgemeinen Ausdruck für die Scheinleistung

$$S = 3 \cdot U_{innen} \cdot I_{Strang} \qquad VA$$

und unter Einbezug der Verhältnisse von Spannungen und Strömen in dieser Schaltung findet man:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_{aussen} \cdot I_{Leiter} \qquad VA$$

Dieser Ausdruck ist derselbe wie für die Sternschaltung

– **Impedanz**

Die Impedanz Z wird im Falle der Dreieckschaltung:

$$Z_{\Delta Phase} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{aussen}}{I_{Leiter}} \quad \Omega$$

vergleicht man diese mit derjenigen der Sternschaltung, stellt man fest,dass bei gleichem Strom und gleicher Spannung die Sternimpedanz 3mal grösser als die Dreiecksimpedanz ist

$$Z_{\Delta} = 3 \cdot Z_{Y} \quad \Omega$$

2.4 Eigenschaften von Wechselstromnetzen

Ein elektrisches Netz ist charakterisiert durch

– Anzahl Phasen
– Spannung U (Variation ±10%)
– Frequenz f
– Übertragungsleistung

Beispiel
Dreiphasennetz 3x380/220V - 50Hz - 10kVA

Eine wichtige Grösse für KWK-Anlagen ist der Spannungsabfall in der Übertragungs- (Anschluss) Leitung. Um die Leistung durch die Übertragungsleitung zu bringen, muss die Anlage eine um den Spannungsabfall höhere Spannung erzeugen, was zu einer überhöhten Spannung beim Produzenten führen kann.

2.5 Eigenschaften von Verbrauchern

Verbraucher sind charakterisiert durch
- die Spannung U
- die Frequenz f
- die Wirkleistung P
- den Leistungsfaktor cosφ

2.5.1 Rein Ohm'sche Last

Wird ein Widerstand R durch eine Spannungsquelle U gespiesen, fliesst ein Strom I (Abb. 2.17). Der Strom und die Spannung sind in Phase (Abb. 2.18), d.h. φ=0 cosφ=1 und sinφ=0. Abb. 2.19 stellt die Grössen in einem Zeitdiagramm dar.

Der Strom I ist durch das ohm'sche Gesetz bestimmt

$$I = \frac{U}{R}$$

und die Leistungen ergeben sich nach ihrer Definition

$$P = S = R \cdot I^2 \text{ oder } P = S = \frac{U}{R^2} \qquad W$$

Die Blindleistung ist, da sinφ = 0

$$Q = 0$$

2.5.2 rein induktive Last

Wird eine Induktivität durch eine Spannungsquelle gespiesen, fliesst ein Strom I (Abb. 2.20). Der Strom folgt der Spannung um 90° verzögert (Abb. 2.21), d.h. φ = 90° -> cosφ = 0 und sinφ = +1. Abb. 2.22 stellt die Grössen in einem Zeitdiagramm dar. Man erkennt, dass das Spannungsmaximum eine Viertelperiode vor dem Strommaximum eintritt und das Leistungsmaximum gerade dazwischen liegt.

Induktive Reaktanz

Der Strom ist begrenzt durch die induktive Reaktanz X_L. Sie stellt den Widerstand einer Induktivität gegenüber Wechselstrom dar. Sie wird wie der ohm'sche Widerstand in Ohm gemessen.

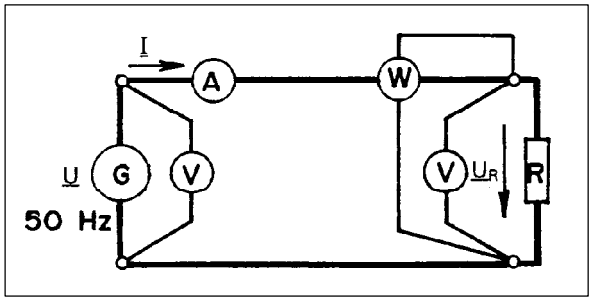


Abbildung 2.17: Versorgung eines Widerstandes

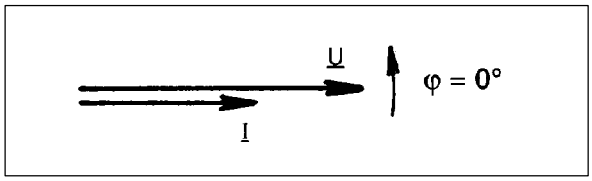


Abbildung 2.18: Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung bei einem ohm'schen Verbraucher

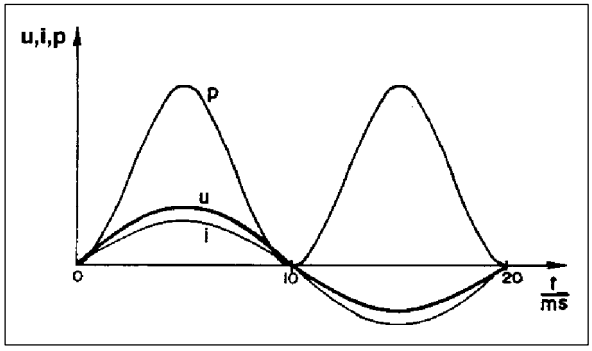


Abbildung 2.19: Leistungsverlauf für einen Widerstand

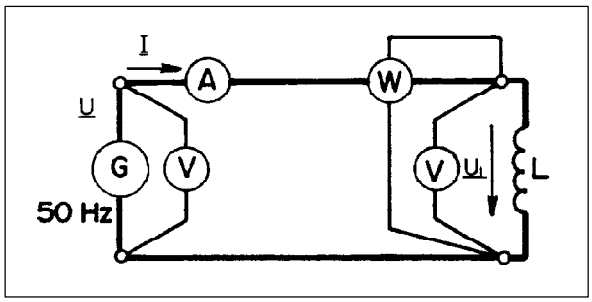


Abbildung 2.20: Versorgung einer Induktivität

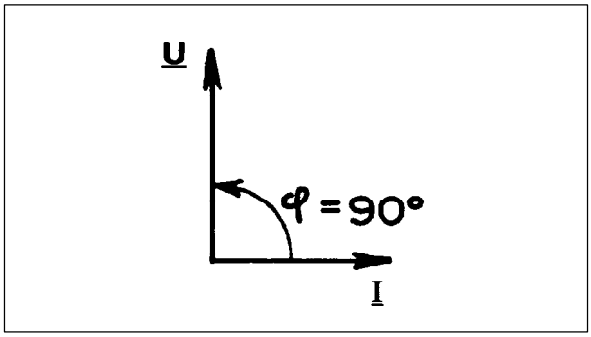


Abbildung 2.21: Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung bei einem induktiven Verbraucher

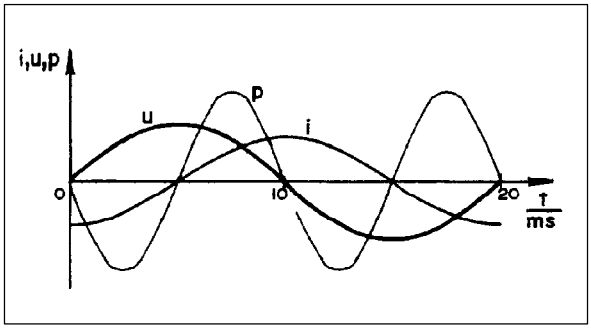


Abbildung 2.22: Leistungsverlauf für eine Induktivität

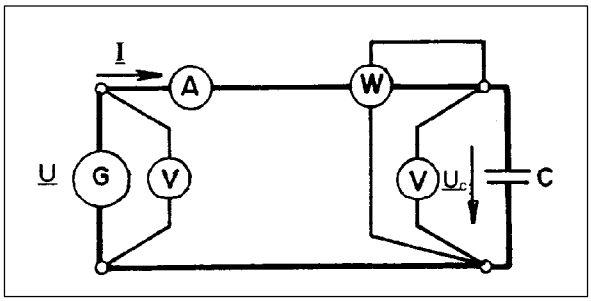


Abbildung 2.23: Versorgung einer Kapazität

Die induktive Reaktanz ist frequenzabhängig, nämlich das Produkt der Kreisfrequenz und der Induktivität.

$$X_L = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \qquad \Omega$$

Analog zum ohm'schen Gesetz darf man schreiben

$$U = X_L \cdot I = \omega \cdot L \cdot I \qquad V$$

Man erkennt für f=0 wird U=0, d.h. für Gleichstrom verhält sich eine Spule wie ein Kurzschluss, und für f=∞ wird I=0, d.h. für Hochfrequenz verhält sich eine Spule wie ein Leerlauf.

Abb. 2.22 (im Gegensatz zu Abb. 2.19) macht einerseits deutlich, dass der Momentanwert der Wirkleistung symetrisch um 0 variiert, somit der Mittelwert 0 ist (keine Wirkleistung!). Andererseits erkennt man auch, dass während einer Viertelperiode Leistung zur Magnetisierung aufgenommen wird, um in der nächsten dem Netz zurückgegeben zu werden.

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi = 0$$

Demgegenüber erhalten wir eine Blindleistung

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi = U \cdot I \qquad VAr$$

$$Q = X_L \cdot I^2 = \frac{U^2}{X_L} \qquad VAr$$

Eine Induktivität absorbiert Blindleistung.

2.5.3 rein kapazitive Last

Wird eine Kapazität durch eine Spannungsquelle gespiesen, fliesst ein Strom I (Abb. 2.20). Der Strom eilt der Spannung um 90° voraus (Abb. 2.21), d.h. φ=-90°, cosφ=0 und sinφ=-1. Abb. 2.22 stellt die Momentanwerte in einem Zeitdiagramm dar. Man erkennt, dass das Spannungsmaximum eine Viertelperiode nach dem Strommaximum eintritt und das Leistungsmaximum gerade dazwischen liegt.

Kapazitive Reaktanz

Der Strom ist begrenzt durch die kapazitive Reaktanz X_C. Sie stellt den Widerstand einer Kapazität gegenüber Wechselstrom dar. Sie wird wie der ohm'sche Widerstand in Ohm gemessen.

Die kapazitive Reaktanz ist frequenzabhängig, nämlich der Kehrwert des Produktes der Kreisfrequenz und der Kapazität.

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \qquad \Omega$$

Analog zum ohm'schen Gesetz darf man schreiben

$$U_C = X_C \cdot I = \frac{1}{\omega \cdot C} \cdot I \qquad V$$

Man erkennt für f=∞ wird U=0, d.h. für Hochfrequenz verhält sich ein Kondensator wie ein Kurzschluss,

und für f=0 wird I=0, d.h. für Gleichstrom verhält sich ein Kondensator wie ein Leerlauf.

Abb. 2.25 (im Gegensatz zu Abb. 2.19) macht einerseits deutlich, dass der Momentanwert der Wirkleistung symetrisch um 0 variert, somit der Mittelwert 0 ist (keine Wirkleistung!). Andererseits erkennt man auch, dass während einer Viertelperiode Leistung zur Ladungsspeicherung aufgenommen wird, um in der nächsten dem Netz zurückgegeben zu werden.

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi = 0$$

Demgegenüber erhalten wir eine Blindleistung.

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi = U \cdot I \qquad VAr$$

$$Q = X_C \cdot I^2 = \frac{U^2}{X_C} \qquad VAr$$

Eine Kapazität liefert Blindleistung.

2.5.4 gemischte Last

Widerstand und Induktivität in Serie

Man geht aus vom Leistungsdreieck, definiert durch:

- Scheinleistung S = U · I
- Wirkleistung P = U · I · cosφ
- Blindleistung Q = U · I · sinφ

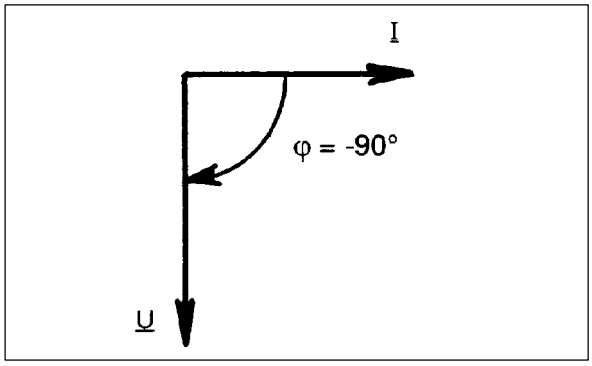


Abbildung 2.24: Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung bei einem kapazitiven Verbraucher

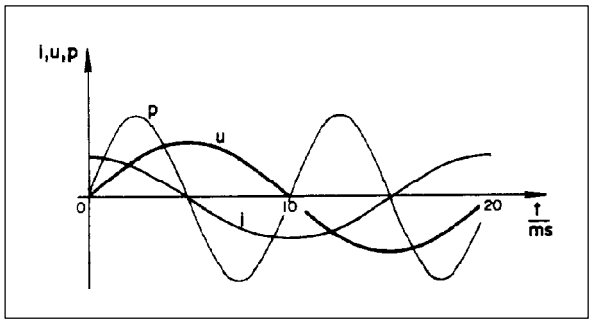


Abbildung 2.25: Leistungsverlauf für eine Kapazität

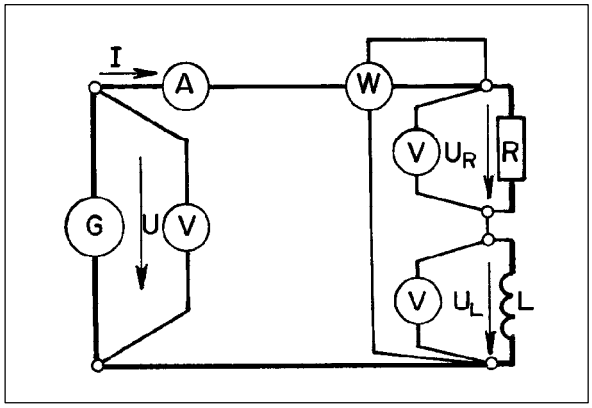


Abbildung 2.26: Serieschaltung eines Widerstandes mit einer Induktivität

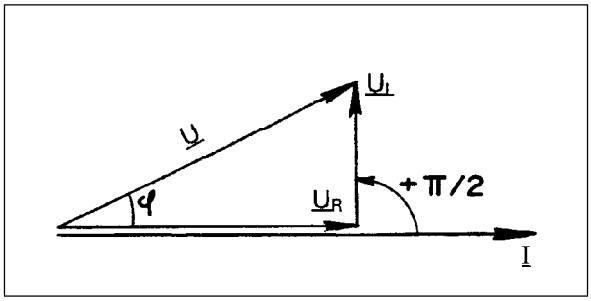


Abbildung 2.27: Spannungsdreieck

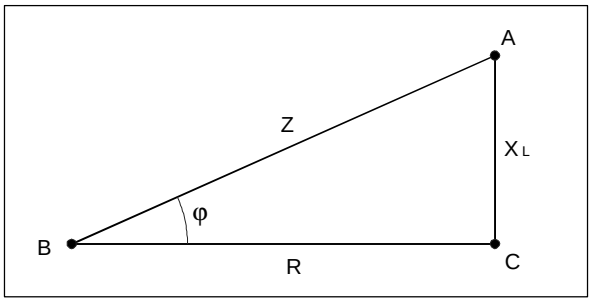


Abbildung 2.28: Impendanzdreieck

mit φ als Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung. Der Strom ist derselbe für beide Elemente. Dividiert man die obigen Gleichungen mit I, erhält man:

$$U_R = U \cdot \cos\varphi$$

$$U_{X_L} = U \cdot \sin\varphi$$

wobei U_R und I in Phase sind und U_{XL} dem Strom um 90° vorauseilt.

Die Vektorsumme der Spannungen ergibt die Gesamtspannung (Abb. 2.27)

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_{XL}^2}$$

Dividiert man die Spannungsvektoren ein weiteres mal mit dem Strom, erhält man das Impedanzdreieck.

$$AB = Z = \frac{U}{I} \quad \text{(vgl Fig. 2.28)} \qquad \Omega$$

$$BC = R = Z \cdot \cos\varphi = \frac{U}{I} \cdot \cos\varphi \qquad \Omega$$

$$AC = X_L = Z \cdot \sin\varphi = \frac{U}{I} \cdot \sin\varphi \qquad \Omega$$

Man erkennt, dass alle Dreiecke (Leistung, Spannung und Impedanz) ähnlich sind.

2.5.5 Impedanz

Verallgemeinert man das Ohm'sche Gesetz für beliebig phasenverschobene Spannungen und Ströme und setzt für den Widerstand R die Impedanz Z ein, gilt weiterhin U=ZI

Der Wert für Z muss jedoch über ein Vektordiagramm errechnet werden. Im Falle der obigen Serieschaltung ist

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \qquad \Omega$$

NB der Kehrwert der Impedanz ist die Admittanz Y und wird in Siemens [S] gemessen wie der Leitwert, der Kehrwert des Widerstandes ist.

3. Generatoren

3.1 Definition 31

3.2 Einführung 31
3.2.1 Magnetfeld 31
3.2.2 Magnetischer Fluss 33
3.2.3 Magnetische Induktion 33
3.2.4 Erzeugen einer elektromagnetischen Kraft 34
3.2.5 Induzierte Spannung 35
3.2.6 Elementarer Generator 36
3.2.7 Lenz'sche Regel und Wirbelströme 36

3.3 Synchron-Maschine 37
3.3.1 Allgemeines 37
3.3.2 Prinzip 38
3.3.3 Drehfelder 39
3.3.4 Leistungsbilanz und Wirkungsgrad 41
3.3.5 Symbole 41
3.3.6 Induzierte Spannung 42
3.3.7 Generatorbetriebsverhalten 42
3.3.8 Übung 43

3.4 Dreiphasige Asynchron Maschine 44
3.4.1 Allgemeines 44
3.4.2 Prinzip 44
3.4.3 Symbol 45
3.4.4 Magnetisches Drehmoment 46
3.4.5 Leistung und Drehmoment 47
3.4.6 Charakteristik 51
3.4.7 Generatorbetrieb 52
3.4.8 Übungen 53

3. Generatoren

3.1 Definition

Ein elektromechanischer Generator transformiert mechanische Energie, die er über eine Achse von der Turbine erhält, in elektrische Energie, welche dem el. Verbraucher abgegeben wird. Es handelt sich um Wirkenergie.

Der Verbraucher kann

- ein Verbundnetz sein, das die Spannung und die Frequenz diktiert.
- ein Inselnetz sein, dem der Erzeuger Qualitätsgarantien in bezug auf Spannung und Frequenz abgeben muss. Beide Grössen dürfen nur in engen Grenzen variieren und müssen stabil sein, um Verbrauchergeräte nicht zu beschädigen.

In Kleinanlagen hat man die Wahl zwischen 2 Typen von Generatoren

- der **Synchron-**Generator
- der **Asynchron-**Generator

In beiden Fällen

- besteht die Maschine aus einem Stator und einem Rotor,
- steht die induzierte Spannung (meist 3phasig) an den Klemmen der Statorwicklung an.

3.2 Einführung

3.2.1 Magnetfeld

Symbol: **H**
Einheit: **Ampere pro Meter** [**A/m**]

Hängt man einen Permanentmagneten nach Abb. 3.1 auf, richtet er sich nach dem Erdmagnetfeld aus.

- Das sich nach Norden ausrichtende Ende nennt man den "**Nordpol**",
- das sich nach Süden ausrichtende Ende nennt man den "**Südpol**".

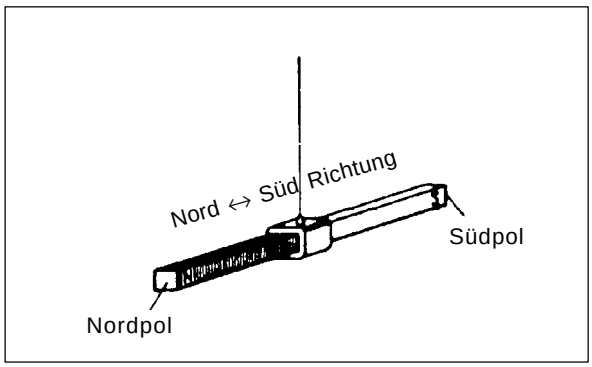


Abbildung 3.1: Freihängender Stabmagnet

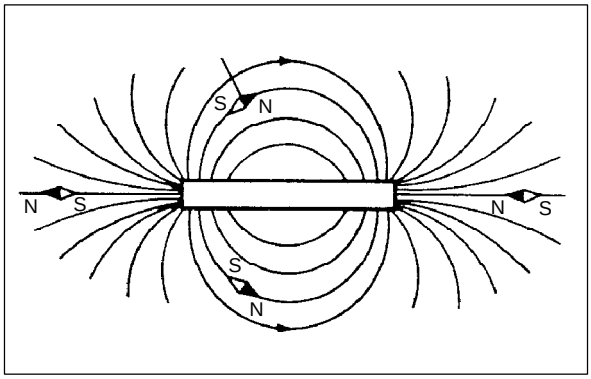


Abbildung 3.2: Feldlinien

Streut man feine Eisenspäne um einen Magneten (Abb. 3.3), werden magnetische Feldlinien sichtbar, die sich um die Pole bündeln. Magnetische Feldlinien sind immer geschlossen, d.h. sie treten beim Permanentmagneten am Nordpol aus und kehren am Südpol zurück.

– Gleiche Pole stossen sich ab,
– verschiedene Pole ziehen sich an, was sich ebenfalls in den Feldlinien widerspiegelt (Abb. 3.4 und 3.5).

- **Eisen im Magnetfeld**
  Ein ferromagnetisches Material (Eisen) verändert das Magnetfeld. Die Feldlinien versuchen dem Eisen zu folgen und werden zudem verstärkt (Abb. 3.6).

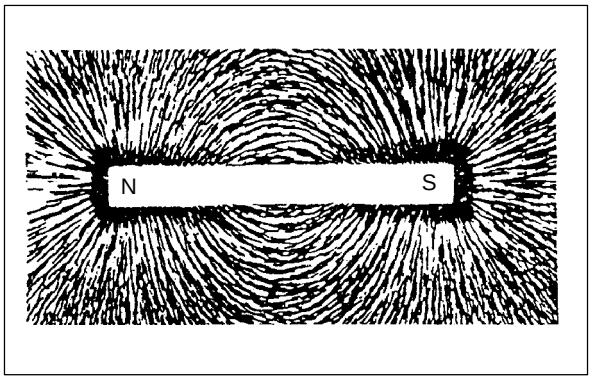


Abbildung 3.3: Sichtbar machen eines durch ein Stabmagnet erzeugtes Feld

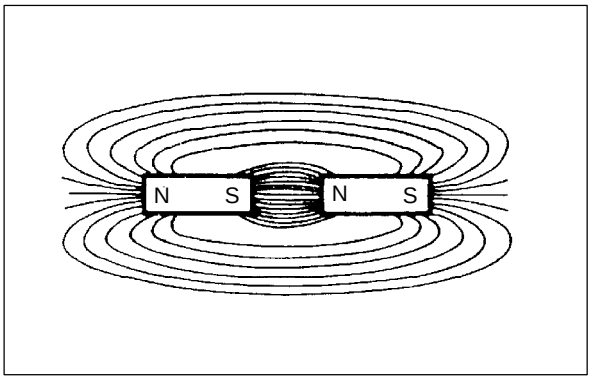


Abbildung 3.5: Anziehung

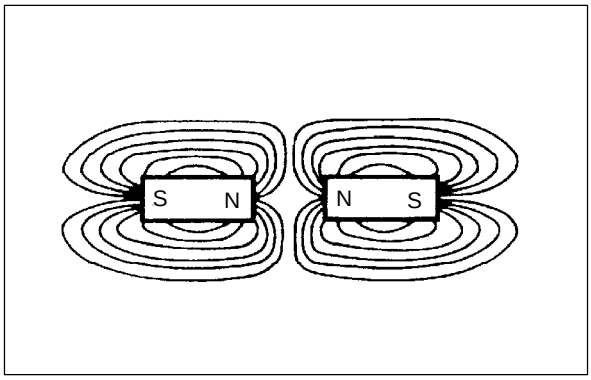


Abbildung 3.4: Abstossung

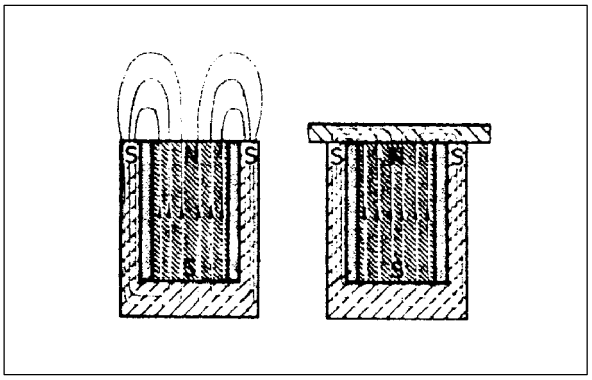


Abbildung 3.6: Feldlinien in einem Eisenstück

- **durch Stromschleifen erzeugte Magnetfelder**
  Jeder stromdurchflossene Leiter wird von einem Magnetfeld umwirbelt (Abb. 3.7), wobei der Wirbelsinn von der Stromrichtung abhängt.

Dieses Magnetfeld lässt sich verstärken, wenn man den Leiter zu einer Spule aufwickelt. Dadurch entsteht ein Elektromagnet (Abb. 3.8).

Die Stärke des Magnetfeldes H hängt ab von
– der Stromstärke I
– der Windungszahl N
– der mittleren Länge der Feldlinien L

$$H = \frac{N \cdot I}{L} \qquad A/m$$

Das Produkt NxI nennt man den Strombelag θ.

3.2.2 Magnetischer Fluss

Symbol: Φ
Einheit: **Weber** [**Wb**]

Die Summe aller Feldlinien im Innern der Spule in Abb. 3.8 wird der magnetische Fluss Φ genannt.

3.2.3 Magnetische Induktion

Symbol: **B**
Einheit: **Tesla** [**T=Wb/m²**]

Die magnetische Induktion B ist der magnetische Fluss pro Flächeneinheit.

$$B = \frac{\Phi}{A} \qquad T$$

A = Fläche

aus der Abb. 3.9:	A=25 cm²=0.0025 m²
falls	Φ=0.0025Wb
dann	B=1T

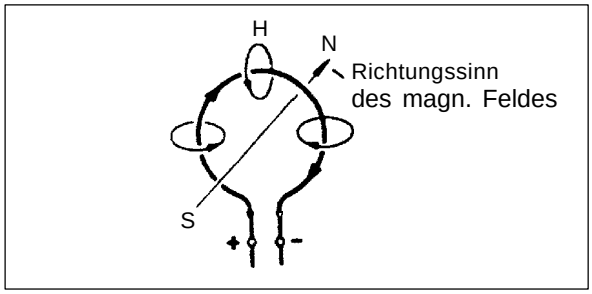


Abbildung 3.7: Durch einen Strom erzeugtes Magnetfeld

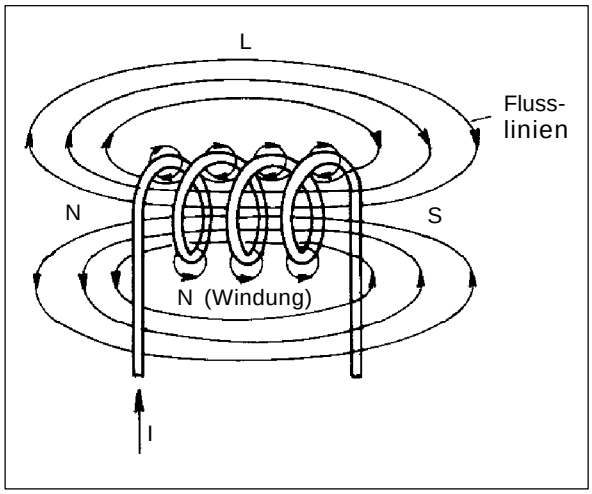


Abbildung 3.8: Durch eine Spule erzeugtes Magnetfeld

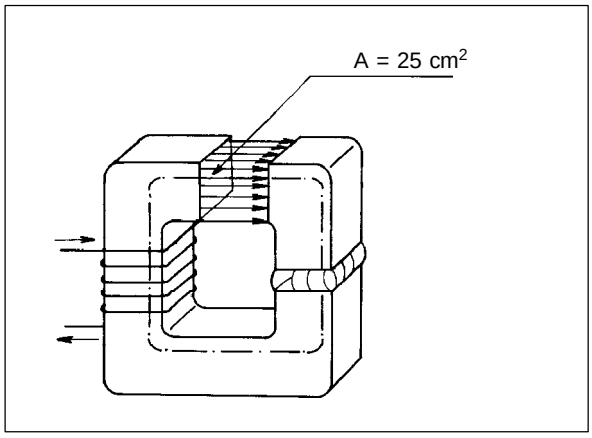


Abbildung 3.9: Beispiel

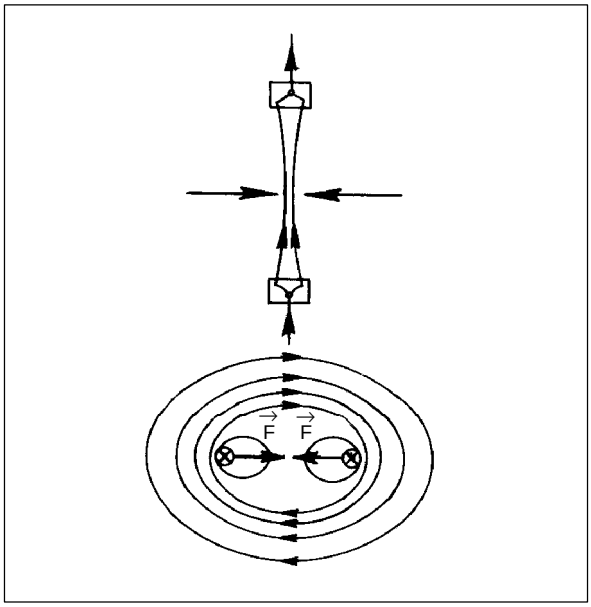


Abbildung 3.10: Anziehungskräfte durch Strom

3.2.4 Erzeugen einer elektromagnetischen Kraft

- **Beeinflussung zweier Ströme:**

– gleichsinnige Ströme in parallelen Leitern ziehen sich an (Abb. 3.10),

– gegensinnige Ströme in parallelen Leitern stossen sich ab (Abb. 3.11).

- **Beeinflussung eines Stromes und eines Magnetfeldes:**

  Wird ein stromdurchflossener Leiter in ein Magnetfeld gegeben, so dass das magn. Feld senkrecht zur Stromrichtung steht (Abb. 3.12), erfährt der Leiter eine Kraft F, die proportional zu

– der magn. Induktion B,

– dem Leiterstrom I

– und der magnetfelddurchdrungenen Länge L des Leiters ist.

Die Auslenkkraft F ist dann

$$F = B \cdot I \cdot L \qquad N$$

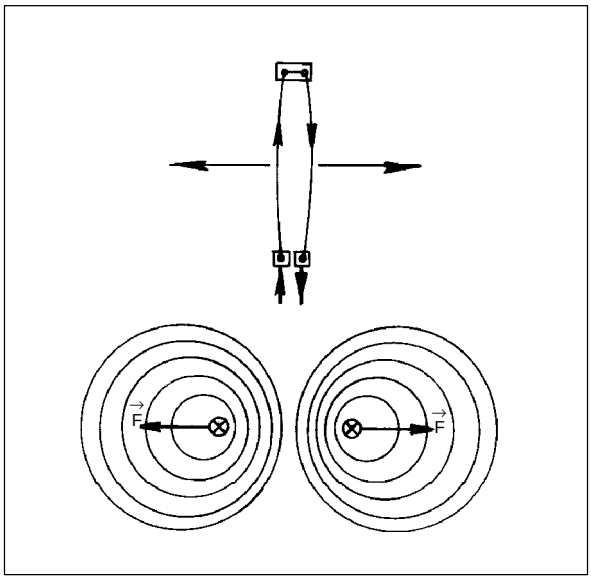


Abbildung 3.11: Abstossungskräfte durch Strom

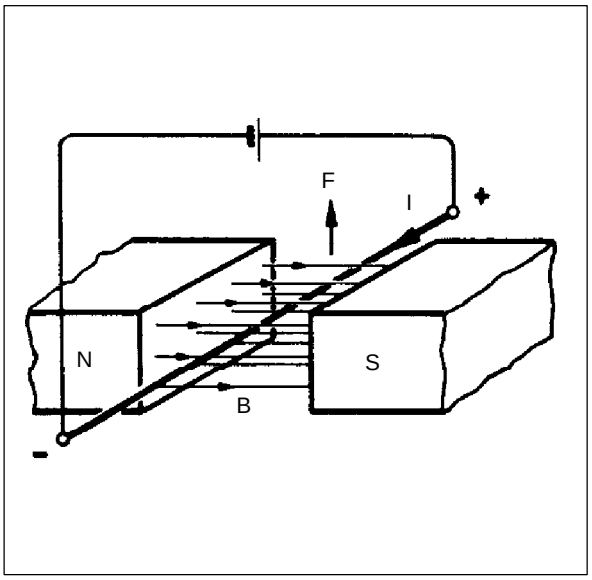


Abbildung 3.12: Kräfte durch das Zusammenspiel von Strom und Magnetfeld

Die Kraftrichtung kann man über die sog. „linke Hand“ Regel ableiten und hängt von der Strom- und Feldrichtung ab (Abb. 3.13).

3.2.5 Induzierte Spannung

Nimmt man dieselbe Anordnung wie in Abb. 3.12, belässt aber den Leiter stromlos und schliesst ein Spannungsmessgerät an seine Enden, lässt sich folgendes beobachten. Sobald der Leiter im Magnetfeld bewegt wird, entsteht eine Spannung, die sog. induzierte Spannung (Abb. 3.14).

Die induzierte Spannung ist proportional zu

- der magn. Induktion B,
- der Geschwindigkeit v
- und der magnetfelddurchdrungenen Länge L des Leiters.

$$U_i = B \cdot v \cdot L \qquad V$$

Die Richtung des induzierten Stromes, der beim Schliessen des el. Kreises fliesst, kann man über die sog. „rechte Hand“ Regel ableiten (Abb. 3.15).

Eine induzierte Spannung entsteht an den Enden eines Leiters oder einer Spule, wenn

- der Leiter (oder eine Spule) sich im Magnetfeld bewegen,
- sich der magnetische Fluss durch den Leiter (oder die Spule) ändert.

Für eine Spule mit N Windungen ist

$$U_i = +N \frac{\partial \phi}{\partial t} \qquad V$$

Die Gesamtspannung einer Wicklung mit dem Innenwiderstand R ist demnach die induzierte Spannung minus der Spannungsabfall am Innenwiderstand

$$U_{tot} = -R \cdot I + N \frac{\partial \phi}{\partial t} \qquad V$$

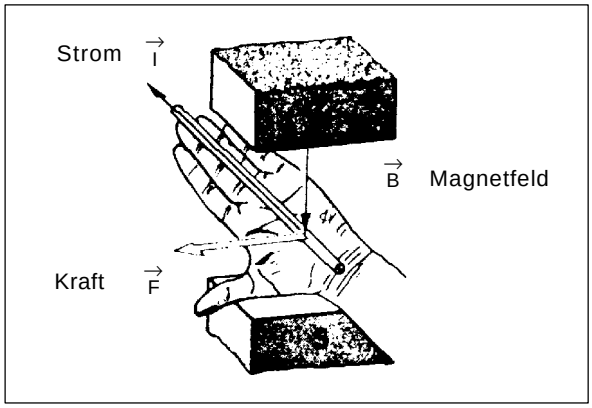


Abbildung 3.13: Kraftrichtung

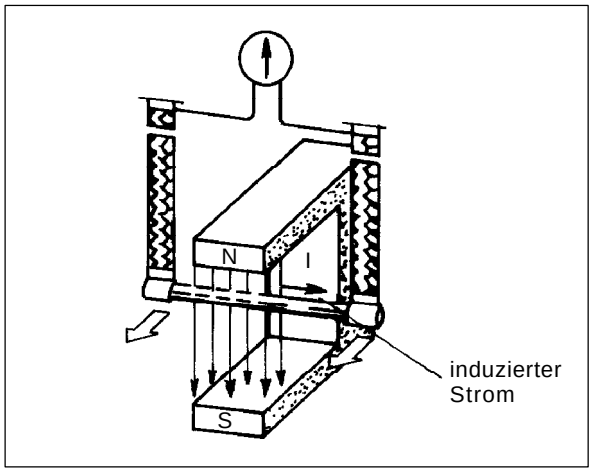


Abbildung 3.14: Induzierte Spannung

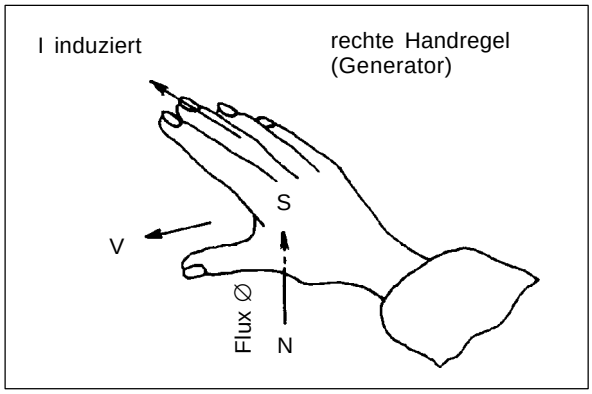


Abbildung 3.15: Stromrichtung (rechte Hand Regel)

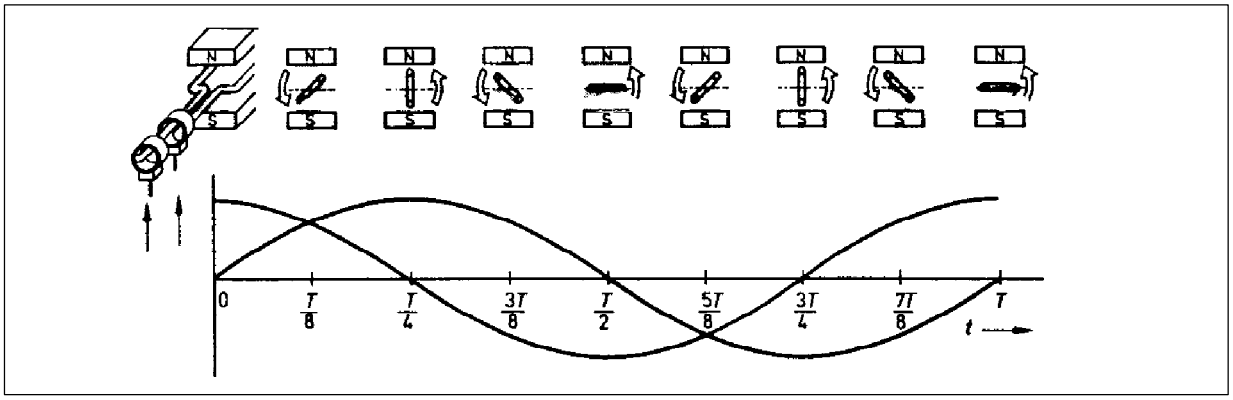


Abbildung 3.16: Elementarer Generator

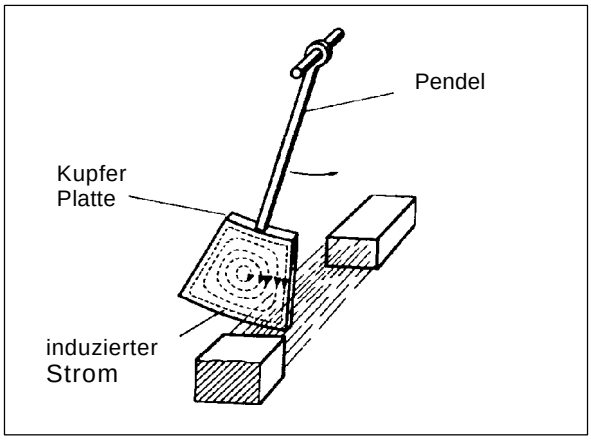


Abbildung 3.17: Wirbelströme im Pendel

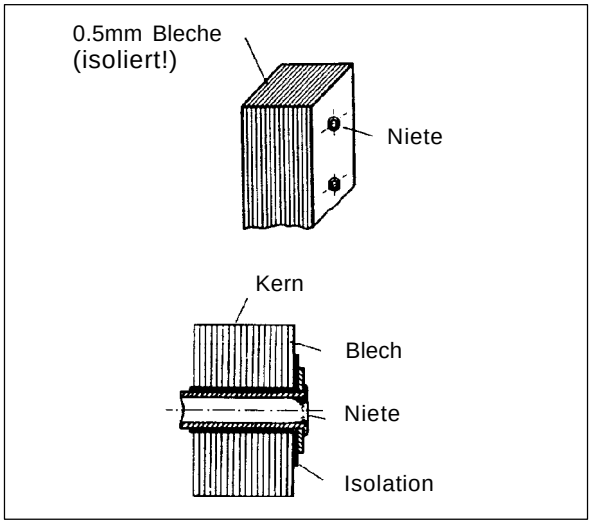


Abbildung 3.18: Geblechte Kerne

3.2.6 Elementarer Generator Induzierte Spannung auf Grund einer Bewegung oder Drehung

Die Flussänderung durch eine Leiterschleife (oder Spule) kann erzeugt werden, indem sich diese Schleife in einem Magnetfeld (Permanent- oder Elektromagnet) dreht (Abb. 3.16). Es ist leicht ersichtlich, dass der Fluss durch die Schleife maximal ist, wenn sie senkrecht zum Feld steht, und Null wird, wenn sie parallel dazu steht.

3.2.7 Lenz'sche Regel und Wirbelströme

Induzierte Spannungen und Ströme richten sich immer so aus, dass sie ihrer Ursache entgegenwirken (Lenz'sche Regel). Ein Beispiel ist in Abb. 3.17 wiedergegeben: Ein massives, leitendes Pendel wird abrupt abgebremst, wenn es in ein Magnetfeld schwingt. Der Grund sind durch das eindringende Magnetfeld induzierte Wirbelströme im Metall, die ihrerseits Magnetfelder erzeugen, die das äussere Feld abstossen.

Wirbelströme erzeugen beträchtliche Verluste in magnetischen Kreisen. Um sie zu verringern, müssen magn. Kerne geblecht werden (Abb. 3.18).

3.3 Synchron-Maschine

3.3.1 Allgemeines

Im Motorbetrieb ist die Drehzahl der Maschine fest durch die Netzfrequenz vorgegeben. Ebenso ist im Generatorbetrieb die Frequenz der abgegebenen Leistung fest durch die Rotordrehzahl vorgegeben. Diese Eigenschaft gab der Maschine den Namen „Synchron-Maschine“.

Die el. Frequenz eines Synchrongenerators ist proportional zur Drehzahl und hängt nur von der Polzahl ab.

$$f = p \cdot n \quad \text{Hz}$$

p = Polpaarzahl
n = Umdrehungen pro Minute [rpm]

Für eine Frequenz von 50Hz ergeben sich folgende Verhältnisse:

Polpaare P	Pole p	Drehzahl n rpm
1	2	3000
2	4	1500
3	6	1000
4	8	750
5	10	600
6	12	500

Table 3.1: Zusammenhang zwischen Polzahl und Drehzahl bei 50 Hz.

3.3.2 Prinzip

In einer Synchron-Maschine (Abb. 3.19) unterscheidet man:

– den Erreger (Rotor), der entweder ein von Gleichstrom durchflossener Elektromagnet oder ein Permanentmagnet ist,
– den (Stator), der die induzierte Leistung (meist dreiphasig) abgibt.

Der dreiphasige **Stator** besteht aus drei unabhängigen, identischen Wicklungsgruppen, die jeweils um einen elektrischen Winkel von 120° verschoben sind. Sie erzeugen **dreiphasige Wechselströme**, die ein **Dreiphasen-Netz** bilden.

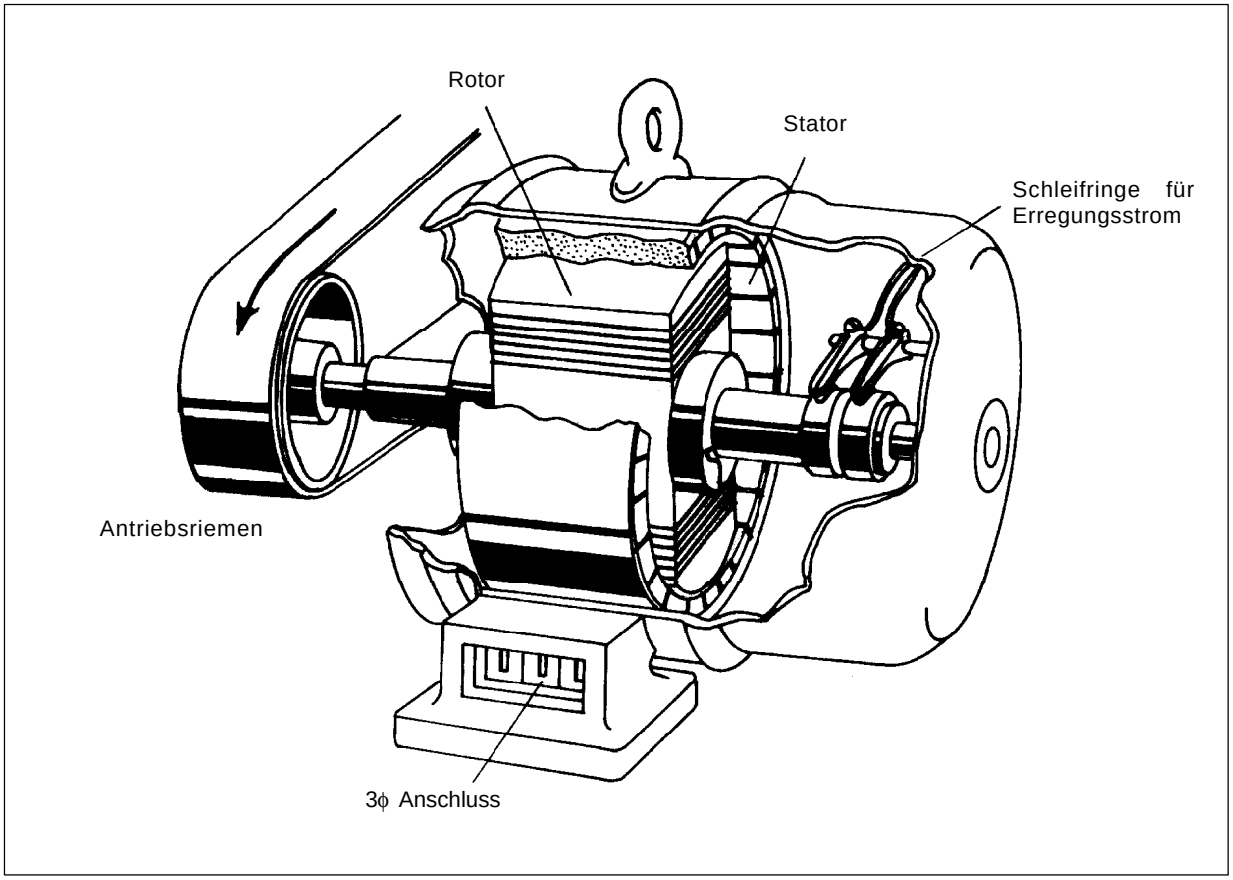


Abbildung 3.19: Schematische Darstellung einer Synchron-Maschine

Der Stator wird im Prinzip wie in Abb. 3.20 und Abb. 3.21 konstruiert. Die Wicklungen werden in den Nuten eingelassen und entsprechend der Pol- und Phasenzahl verbunden.

Ein vereinfachtes Wicklungsschema einer 4poligen Maschine ist in Abb. 3.22 abgebildet. Die Indices entsprechen den Phasen, die Buchstaben der Zusammenschaltung der Pole (a-b & c-d).

3.3.3 Drehfelder

Werden die so angeordneten Wicklungen durch ein Dreiphasen-Netz gespeist, erzeugen sie ein magn. Drehfeld, dessen Drehzahl Ω_S von der Netzfrequenz und der durch die Statorwicklung bestimmten Polzahl abhängt.

$$\Omega_S = \frac{\omega}{p} = 2 \cdot \pi \cdot n_S \qquad \text{rad/s}$$

Ω_S Winkelgeschwindigkeit Statorfeld
n_S Drehzahl rpm

Die Rolle des Rotors ist ebenfalls die Erzeugung eines rotierenden Magnetfeldes, das in den Statorwicklungen die Netzspannung induziert.

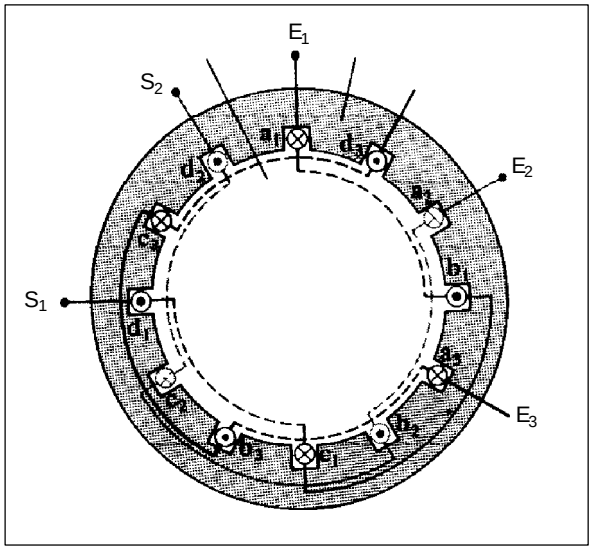


Abbildung 3.21: Dreiphasiger Stator 4polig

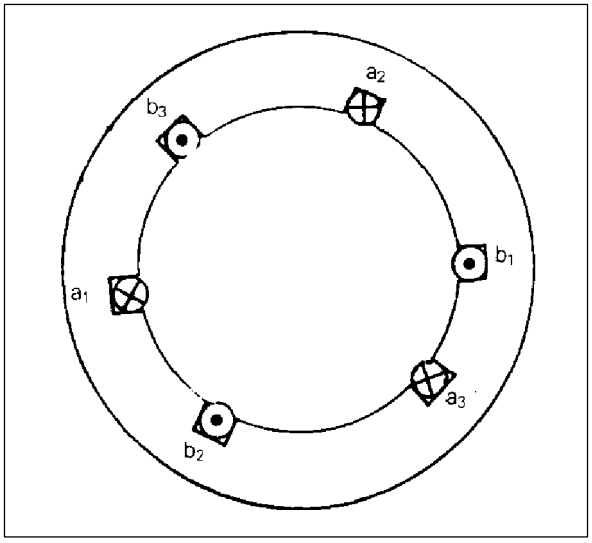


Abbildung 3.20: Dreiphasiger Stator 2polig

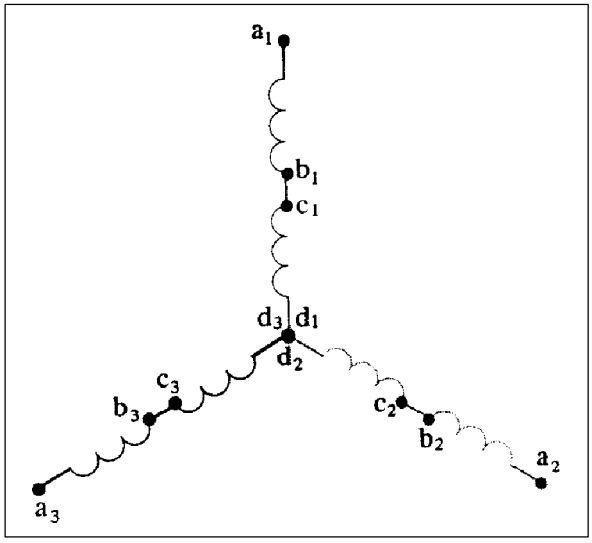


Abbildung 3.22: Vereinfachte Darstellung einer 4poligen Wicklung

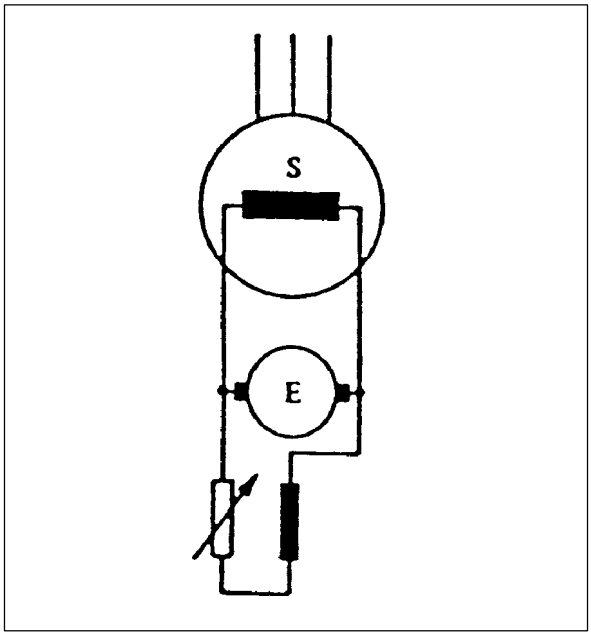


Abbildung 3.23: Externe Erregungsmaschine

Der Rotor ist also eigentlich nichts anderes als ein rotierender Magnet und ist entweder:

– ein Permanentmagnet, dessen Fluss konstant ist und dementsprechend die induzierte Spannung nur von der Drehzahl abhängt,
– ein Elektromagnet mit einer Erregerwicklung, dessen Fluss durch den Erregerstrom erzeugt wird, wodurch die induzierte Spannung durch den Erregerstrom gesteuert werden kann

Konstruktiv sind 2 Typen möglich:

– eingelassene Pole (Spalt ist konstant)
– ausgeprägte Pole

Für Maschinen kleiner Leistung sind aus wirtschaftlichen Gründen ausgeprägte Pole selten. Die Maschinenbauer verwenden meist Rotorblechpakete aus Asynchron-Maschinen. Die Wicklungen werden wie beim Stator in den Nuten verlegt.

Die verschiedenen Möglichkeiten, den Erregerstrom einzuspeisen, sind in den Abb. 3.23 bis 3.25 gezeigt.

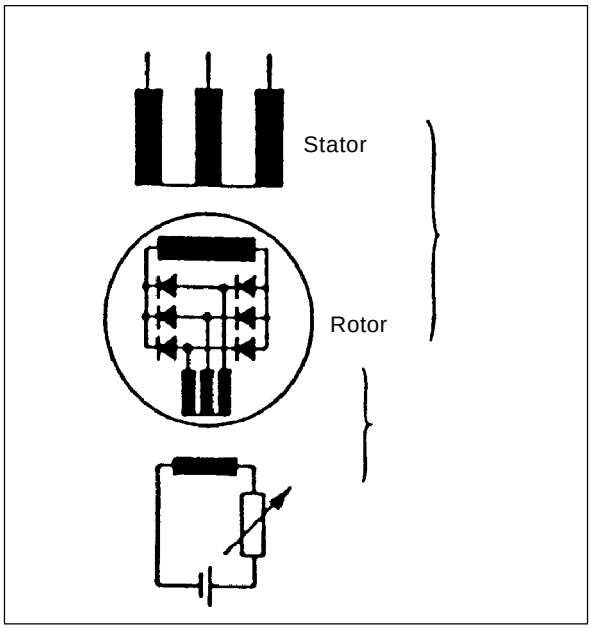


Abbildung 3.24: Erregung mittels “rotierender Dioden”

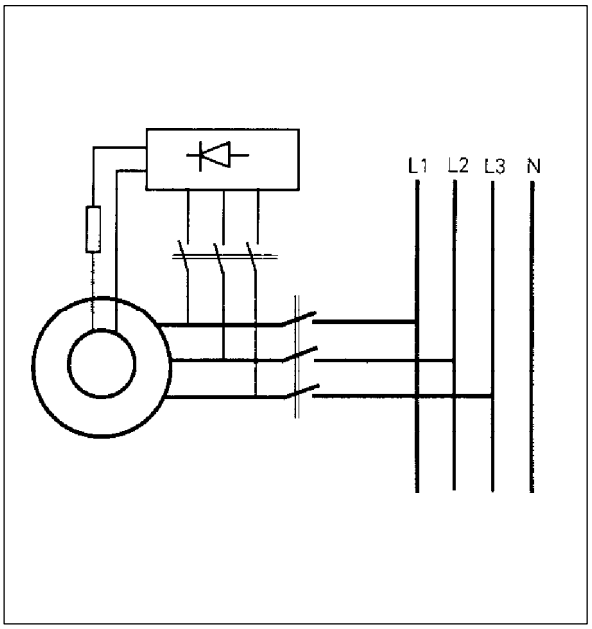


Abbildung 3.25: Erregung mittels Stromrückführung

3.3.4 Leistungsbilanz und Wirkungsgrad

(siehe Abb. 3.26)

Die vom Synchrongenerator absorbierte mechanische Leistung P_{abs} ist gleich der auf der Welle verfügbaren mechanischen Leistung P_{mec} ($P_{abs} = P_{mec}$).

Die ans Netz oder den Verbraucher abgegebene Wirkleistung P_{wirk} ergibt sich aus der Klemmenspannung (Strang) einer Phase (z.B. 230V) und dem jeweiligen Strangstrom. Sind die Phasen symmetrisch, ergibt sich:

$$P_{wirk} = 3 \cdot U_{Strang} \cdot I_{Strang} \cdot \cos\varphi$$

Mit der entsprechenden Phasenspannung (z.B. 400V) und dem Phasenstrom ergibt sich

$$P_{wirk} = \sqrt{3} \cdot U_{aussen} \cdot I_{Leiter} \cdot \cos\varphi$$

Die Differenz zwischen der vom Generator aufgenommenen und abgegebenen Leistung entspricht den Gesamtverlusten im Generator:

$$P_{abs} - P_{wirk} = \Sigma \text{ Verluste}$$

Die verschiedenen Verluste sind:
- Reibungs- und Ventilationsverluste
- Widerstandsverluste in den Stator und Rotorwicklungen (Kupferverluste)
- Verluste im magn. Kreis oder Eisenverluste

Der Wirkungsgrad ist das Verhältnis der abgegebenen zur aufgenommenen Leistung:

$$\eta = \frac{P_{wirk}}{P_{abs}} = \frac{P_{wirk}}{P_{wirk} + \sum \text{Verluste}}$$

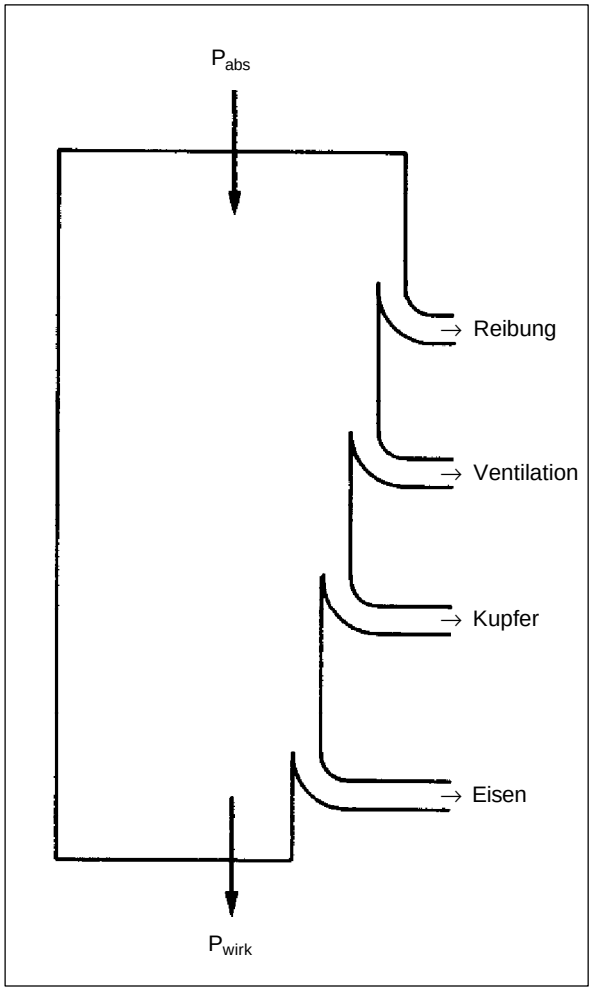


Abbildung 3.26: Leistungsbilanz

3.3.5 Symbole

Das Normsymbol einer Synchronmaschine ist in Abb. 3.27 wiedergegeben.

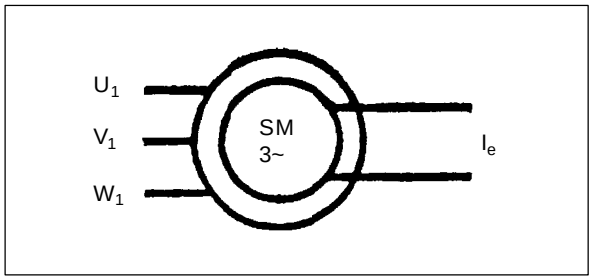


Abbildung 3.27: Normsymbol der Synchron- Maschine

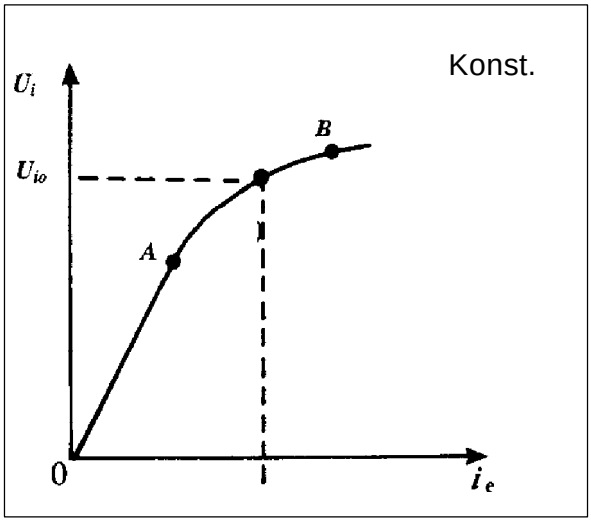


Abbildung 3.28: Leerlaufcharakteristik; der Betriebspunkt befindet sich normalerweise im Bereich zwischen den Punkten A und B

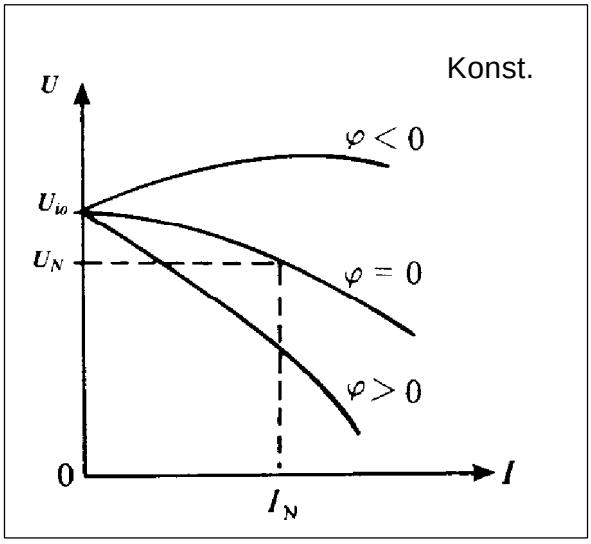


Abbildung 3.29: Belastungscharakteristik; die Kennlinien sind für 3 verschiedene φ Werte aufgetragen.

3.3.6 Induzierte Spannung

Die induzierte Spannung U_i an den Klemmen einer Phase sind proportional

- zur Frequenz f, d.h. zur Drehzahl
- zum magn. Fluss ϕ des Erregerfeldes, das durch den Erregerstrom erzeugt wird
- zur Windungszahl N der seriegeschalteten Windungen einer Phase

$$U_i = K \cdot N \cdot f \cdot \phi \quad \text{V}$$

Diese Formel beschreibt den Effektivwert einer einfachen Leiterspannung in Sternschaltung (L-N).

Ist die Drehzahl konstant, ist die induzierte Spannung proportional zum Erregerstrom

$$U_i = K' \cdot I_{er} \quad \text{V}$$

Die tatsächliche Abhängigkeit der induzierten Spannung vom Erregerstrom ist in Abb. 3.28 wiedergegeben und wird Leerlaufcharakteristik genannt.

3.3.7 Generatorbetriebsverhalten

Speist der Generator bei konstanter Drehzahl ein Inselnetz, hängt die induzierte Spannung stark vom Laststrom und dem Leistungsfaktor ab (Abb. 3.29).

Deshalb muss, um die **Spannung konstant** zu halten, der Erregerstrom geregelt werden. Bei kleineren Maschinen ist dieser Regler bereits in den Generator eingebaut.

Um die **Frequenz zu halten**, muss der Durchfluss durch die Turbine geregelt werden.

Näheres dazu in Kapitel 4 & 5.

3.3.8 Übung

1. Ein dreiphasiger sterngeschalteter Generator speist eine 3phasige Last mit folgenden Werten: 3x380V 6.0A $\cos\varphi = 0.85$
   - Wie gross sind Wirk-, Blind- und Scheinleistung der Last?
   - Wie gross ist die mechanische Antriebsleistung bei einem bekannten Generatorwirkungsgrad von 89.5%?
   - Wie gross ist die Generatorverlustleistung?

2. Ein 4poliger Generator (50Hz, 3x380V, Y) speist einen 3phasigen Asynchron- Motor, der eine Leistung von 3.0kW absorbiert. Der Leistungsfaktor des Motors ist 0.9; auch er ist sterngeschaltet. Der Generator absorbiert eine Leistung von 3.4kW
   - Berechnen Sie den Leitungsstrom
   - Welches ist der Wirkungsgrad des Generators unter dieser Betriebsbedingung?

3. Ein permanent erregter Generator liefert eine Leerlaufspannung von 220V bei einer Drehzahl von 1500rpm
   - Welches ist die Spannung, wenn sich die Drehzahl auf 2000rpm erhöht?

Antworten:

1. 3357W, 2080VAr, 3949VA, 3751W, 394W
2. 5A, 88.24%
3. 293.3V

3.4 Dreiphasige Asynchron Maschine

3.4.1 Allgemeines

Die asynchron Maschine, auch Induktionsmaschine genannt, kann, wie alle elektrischen Maschinen als Motor oder als Generator betrieben werden. Sie ist der weitaus verbreitetste Elektromotor, weil sie einfach, rubust und billig ist. Dies hat seine Ursache vor allem darin, dass der Rotor keine Wicklungen und externe Anschlüsse aufweist (ausser gewickelte Konstruktionen).

Den Namen erhält die Maschine dadurch, dass das Rotorfeld durch das Statorfeld induziert wird und zwischen diesen Feldern ein Drehzahlunterschied, der sogenannte Schlupf, besteht. Die Rotordrehzahl und die Netzfrequenz sind demnach nicht synchron -> asynchron.

3.4.2 Prinzip

Auch die asynchron Maschine besteht aus einem Stator und dem beweglichen Rotor. Beide Elemente werden geblecht hergestellt (Blechdicken zwischen 0.2 bis 0.5mm) um die Wirbelstromverluste zu minimieren.

- Der **Stator** ist konstruktionsgleich einer synchron Maschine (vgl Kapitel 3.3.2)
- Der **Rotor** trägt entweder kurzgeschlossene Wicklungen oder massive verbundene Leiter (Käfiganker). In beiden Fällen wird das Erregerfeld über Induktionsströme erzeugt.
- Der **Käfiganker** ist die am häufigsten verwendete Rotorform. In den Rotornuten werden Aluminiumleiter eingepresst, die an den Rotorenden mit Kurzschlussringen verbunden werden. Da die Spannungen über den Leitern klein sind und Aluminium ein wesentlich besserer Leiter ist als das geblechte Rotoreisen, kann man auf eine Isolation der Leiter verzichten.
- **Gewickelte Rotoren** tragen in den Nuten Wicklungen wie der Stator, die im Normalbetrieb kurzgeschlossen sind. Für einen verbesserten Anlauf können jedoch Anlaufwiderstände eingeschaltet werden.

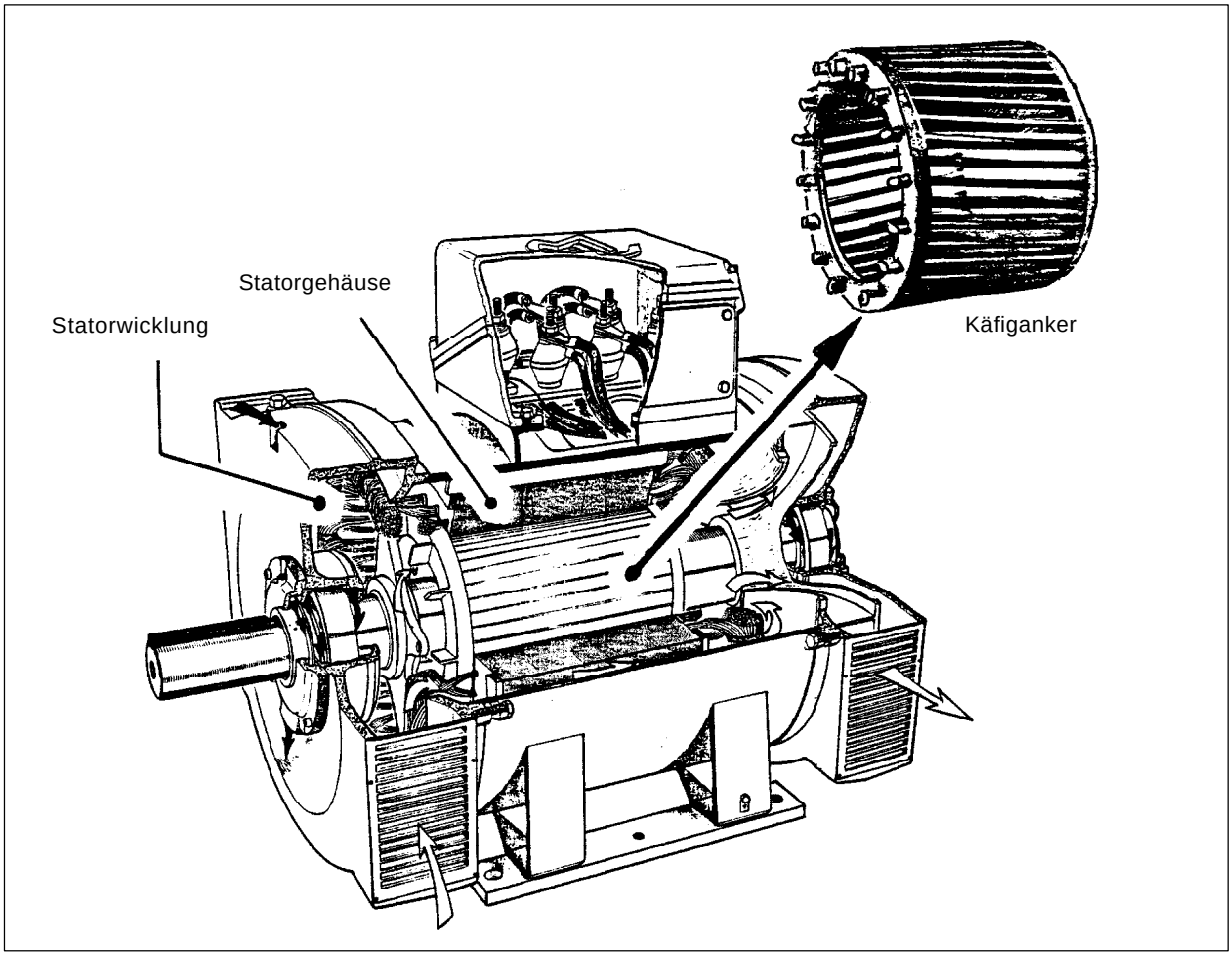


Abbildung 3.30: Prinzipieller Aufbau einer asynchron Maschine

3.4.3 Symbol

Das Normsymbol einer Asynchronmaschine ist in Abb. 3.31 wiedergegeben.

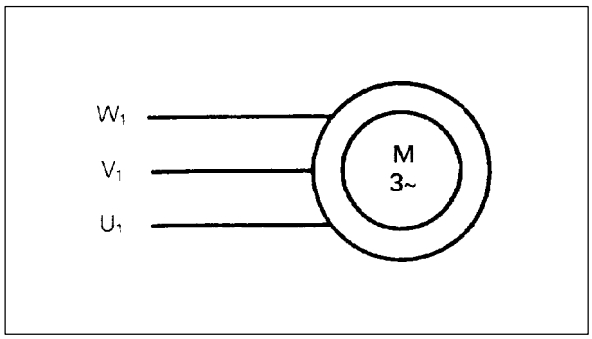


Abbildung 3.31: Normsymbol einer Asynchron-Maschine

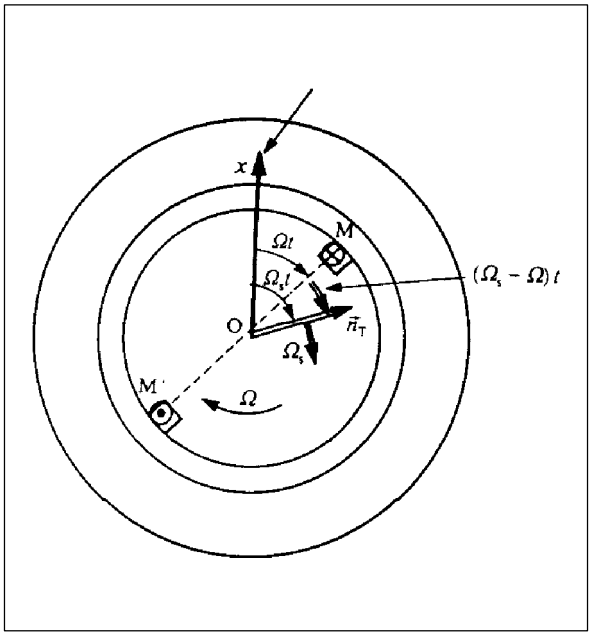


Abbildung 3.32: Feld im Spalt
Das resultierende Feld im Luftspalt ist sinusförmig. Es ist hier in Richtung des Einheitsvektors n_T eingezeichnet. Dieses Feld rotiert mit der Winkelgeschwindigkeit Ω_S. Es entsteht aus der Überlagerung des Statorfeldes (Winkelgeschwindigkeit Ω_S) und des Rotorfeldes (Winkelgeschwindigkeit $\Omega+(\Omega_S-\Omega)=\Omega_S$).

3.4.4 Magnetisches Drehmoment

Durch das Statordrehfeld werden Spannungen in den Leitern des Rotors induziert. Da diese kurzgeschlossen sind, fliessen Induktionsströme, die wiederum Magnetfelder erzeugen. Nach der Lenz'schen Regel verhält sich dieses induzierte Rotorfeld so, dass es versucht, das ursächliche Statorfeld aufzuheben, d.h. es rotiert mit. Diese magn. Koppelung ergibt ein Drehmoment und bewirkt, dass sich der Rotor zu drehen beginnt, um im belastungsfreien Fall gerade die Drehzahl des Statorfeldes zu erreichen. Dabei verringert sich jedoch die Induktionswirkung und damit verschwindet das Rotorfeld, womit auch das mech. Drehmoment verschwindet. Um mech. Leistung aufzunehmen (Generator) oder abzugeben (Motor), benötigt diese Maschine Schlupf, d.h. einen Drehzahlunterschied zwischen Rotor und Drehfeld.

Ω_S Winkelgeschwindigkeit des Statorfeldes

Ω Winkelgeschwindigkeit des Rotors

$\Omega_S-\Omega$ rel. Winkelgeschwindigkeit des Rotorfeldes

Hat die Maschine P Polpaare, ist die Frequenz der induzierten Rotorströme

$$\omega_r = P \cdot (\Omega_S - \Omega) = P \cdot s \cdot \Omega_S = s \cdot \omega_S$$

Dabei ist s der Schlupf, eine relative Grösse in %, die den Unterschied der Feld- und Rotordrehzahl wiedergibt.

$$s = \frac{(\Omega_S - \Omega)}{\Omega_S} = \frac{(n_S - n)}{n_S}$$

3.4.5 Leistung und Drehmoment

Die Wirkleistung P, die von einem Motor aufgenommen oder einem Generator abgegeben wird, lässt sich ausdrücken als

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \qquad W$$

U = Aussenleiterspannung
I = Leiterstrom
φ = Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung

Die mechanische Leistung P_{mec} an der Motorenwelle ist eine Funktion des Drehmoments und der Drehzahl,

$$P_{mec} = M_{mec} \cdot \Omega = M_{mec} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f$$

wobei Ω die Winkelgeschwindigkeit des Rotors ist.

Das Verhältnis der aufgenommenen und abgegebenen Leistung entspricht dem Wirkungsgrad der Maschine.

$$\eta = \frac{P_{aus}}{P_{ein}} = \frac{P_{aus}}{P_{aus} + \Sigma\ \text{Verluste}}$$

Die Differenz dieser beiden Leistungen entspricht den Gesamtverlusten der Maschine.

$$P_{ein} - P_{aus} = \Sigma\ \text{Verluste}$$

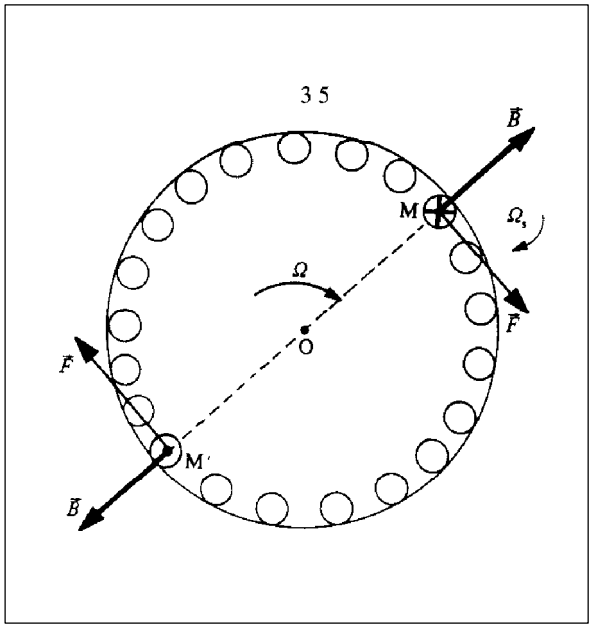


Abbildung 3.33: Lorenzkräfte
Die Stäbe eines Käfigankers sind von einem Drehfeld durchdrungen. Da dieses mit der Winkelgeschwindigkeit Ωs rotiert und gleichzeitig einen Strom in den Stäben induziert, rotiert synchron ein "Strombelag" und damit verbunden ein "Kraftbelag" über den um den Schlupf langsameren Rotor.

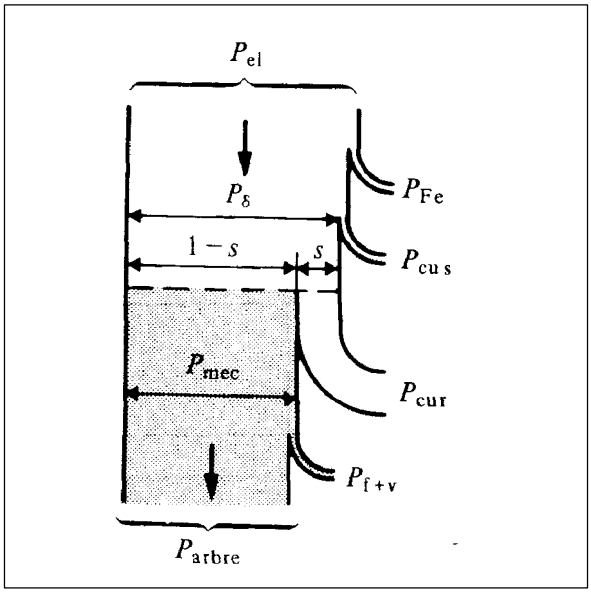


Abbildung 3.34: Leistungsbilanz als Motor

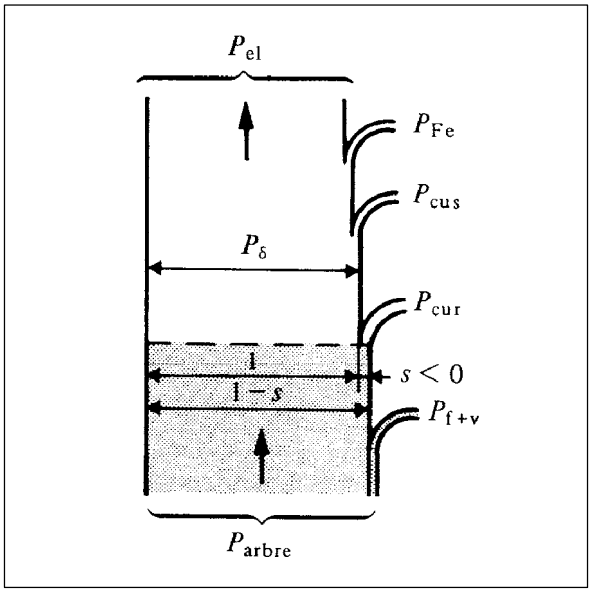


Abbildung 3.35: Leistungsbilanz als Generator
P_{Fe} = Eisenverluste des Stators
P_{Cus} = Kupferverluste des Stators
P_{Cur} = Kupferverluste des Rotors
P_{R+L} = mech. Verluste

Im wesentlichen unterscheidet man 4 Verluste:

- mechanische Verluste: P_{R+V}
  Lagerreibung und Ventilation

- Eisen-Verluste: P_{Fe}
  Ummagnetisierungs- (Hysterese) und Wirbelstromverluste, beides Verluste die nur bei Wechselfelder entstehen. Für den Rotor ist die Frequenz dieser Felder sehr klein und hier können diese Verluste vernachlässigt werden.

- Kupfer-Verluste: P_{cu}
  Im Stator:

  $$P_{CUs} = 3 \cdot R_S \cdot I_S^2$$

  wobei R_S der Widerstand einer Statorwicklung ist und Is der Statorstrom.
  Im Rotor:

  $$P_{CUr} = Z_r \cdot R_r \cdot I_r^2$$

  wobei R_r der Widerstand eines Leiterstabes ist und Z_r die Anzahl der Stäbe und I_r der Rotorstrom.

- Zusatzverluste: P_{Zus}
  Sie sind die Folge von höheren Harmonischen des Magnetfeldes und der Nuten; sie betragen schätzungsweise 0.5% der abgegebenen Leistung.

Die Energiebilanz oder Leistungsflüsse erlaubt die detaillierte Analyse der Energieumwandlung eines Motors oder eines Generators (Abb. 3.34 und 3.35).

Die im **Motorbetrieb** an den Rotor abgegebene Leistung (P_δ oder P_{em}) entspricht der aufgenommenen el. Leistung abzüglich der Eisen-, Kupfer- und Zusatzverluste des Stators.

$$P_{em} = P_{el} - P_{Fe} - P_{CUs} - P_{Zus}$$

P_{em} wird elektromagnetische oder auch Spalt-Leistung genannt. Sie wird dem Rotor mittels dem magn. Moment aufgrund des Drehfeldes übertragen,

$$P_{em} = M_{em} \cdot \Omega_S = M_{em} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_S$$

wobei Ω_S die Winkelgeschwindigkeit des Statordrehfeldes ist.

Das elektromagnetische Moment ist für den Stator und den Rotor dasselbe. Jedoch ist die Rotordrehzahl um den Schlupf kleiner als das Drehfeld.

$$\Omega = (1 - s) \cdot \Omega_S$$

Damit ist auch die mechanische Leistung kleiner als die elektromagnetische:

$$P_{mec} = M_{em} \cdot \Omega$$

Die Differenz entspricht den Verlusten im Rotor

$$P_{CUr} = P_{em} - P_{mec} = M_{em} \cdot (\Omega_S - \Omega) = M_{em} \cdot \Omega_S \cdot s$$

$$P_{CUr} = s \cdot P_{em} = Z_r \cdot R_r \cdot I_r^2$$

Daraus erhält man

$$P_{mec} = (1 - s) \cdot P_{me}$$

und

$$P_{em} = \frac{Z_r \cdot R_r \cdot I_r^2}{s}$$

Die abgegebene Leistung erhält man, indem noch die mech. Verluste abgezogen werden:

$$P_{aus} = P_{mec} - P_{R+V}$$

oder als Moment ausgedrückt

$$M_{aus} = \frac{P_{aus}}{\Omega} = M_{em} - M_{R+V}$$

mit

$$M_{R+V} = \frac{P_{R+V}}{\Omega}$$

Bemerkung:

Das elektromagnetische Moment ist proportional zur Verlustleistung im Rotor.

$$M_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_S} = \frac{Z_r \cdot R_r \cdot I_r^2}{s \cdot \Omega_S}$$

Im Anlauf, wenn die mech. Verluste 0 sind und der Schlupf 1 ist, erhält man:

$$M_{ausStart} = \frac{Z_r \cdot R_r \cdot I_r^2}{\Omega_S}$$

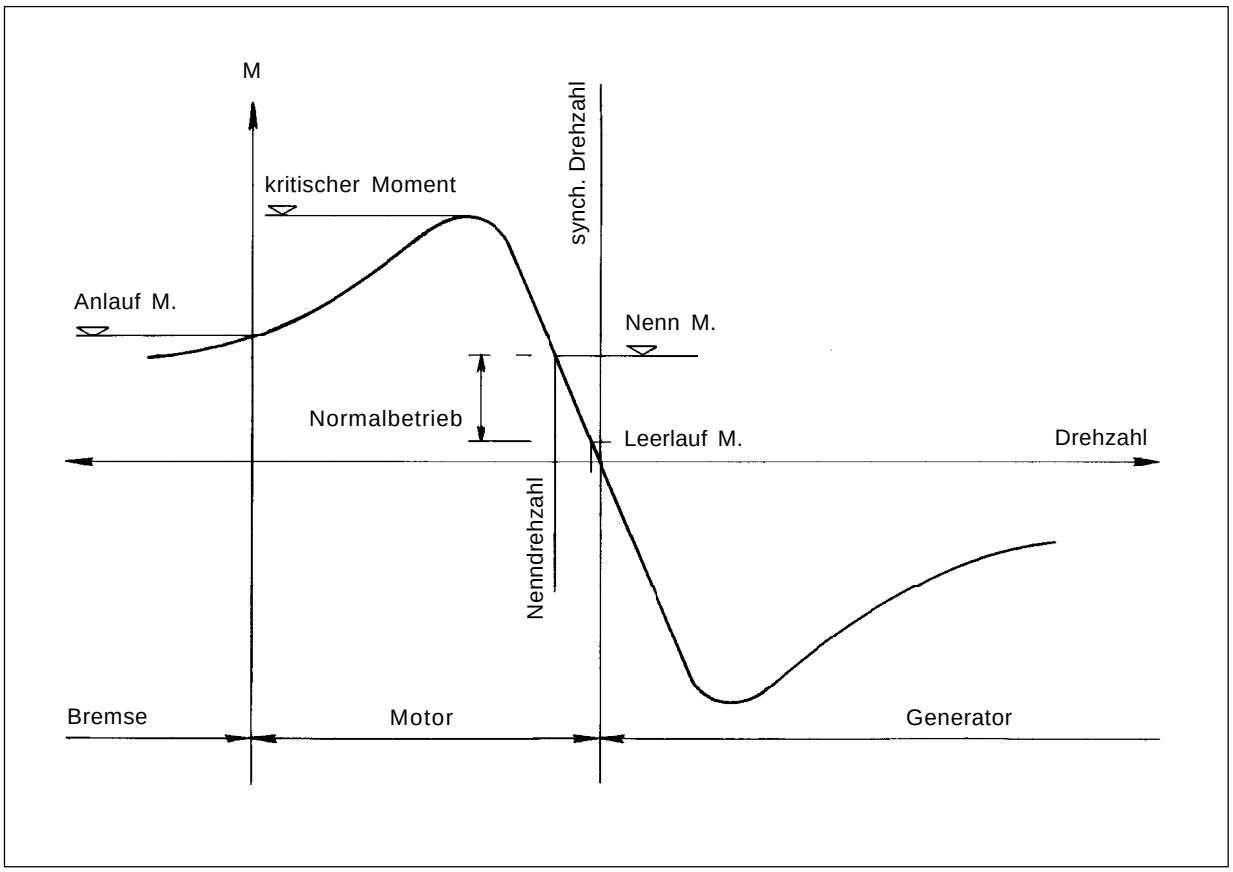


Abbildung 3.36: Momentenkurve in Funktion der Geschwindigkeit oder des Schlupfes.
Im Normalbetrieb arbeitet der Motor im linearen Bereich der Kurve zwischen 0% bis 10% Schlupf.

3.4.6 Charakteristik

Die Asynchron-Maschine ist durch eine Momentenkurve nach Abb. 3.36 charakterisiert. Ebenfalls interessieren verschiedene Motorenwerte in Abhängigkeit der mech. Leistung:

- Wirkungsgrad
- Leistungsfaktor
- Strom
- Drehmoment
- Schlupf

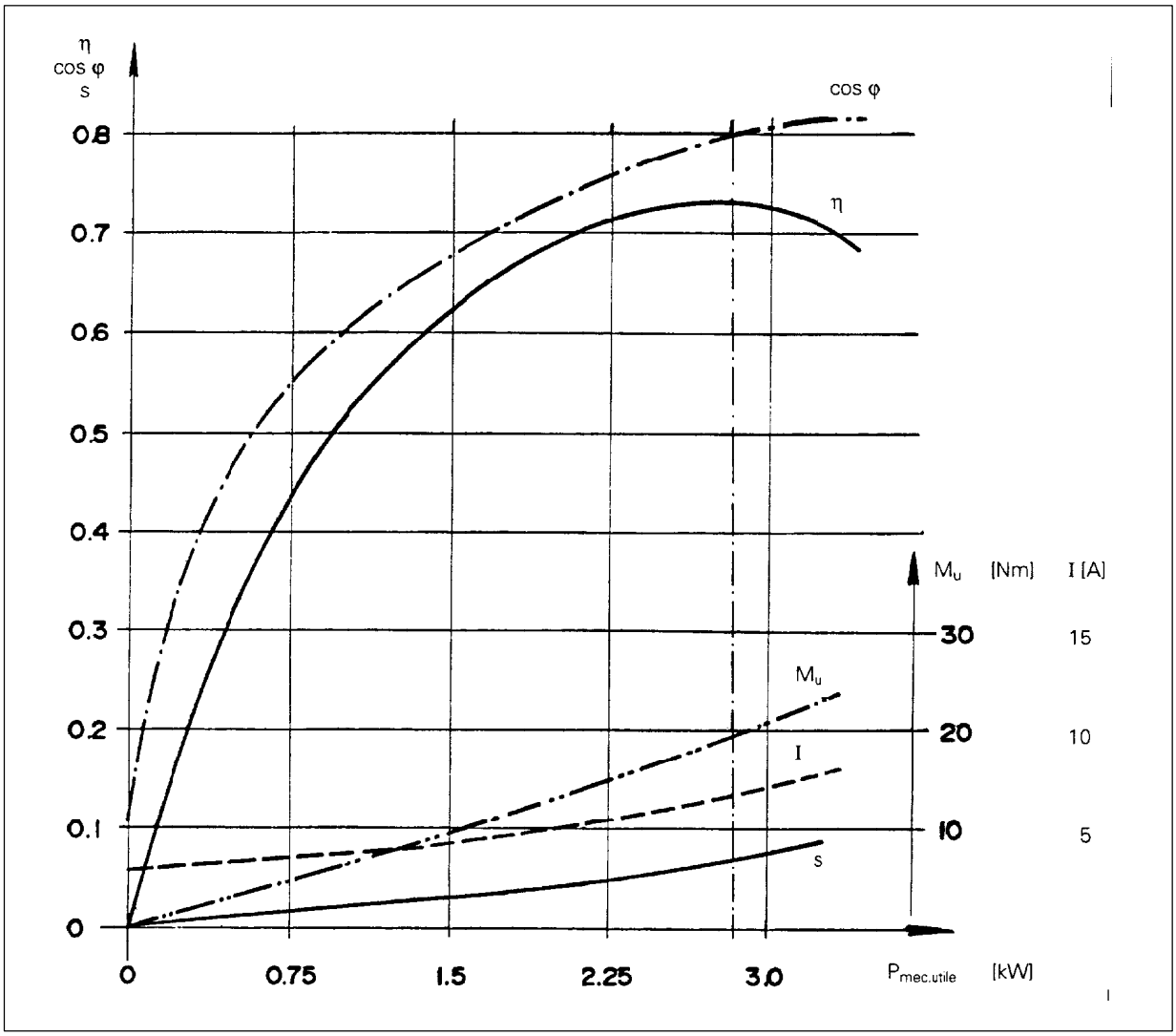


Abbildung 3.37: Charakteristik eines asynchron Motors

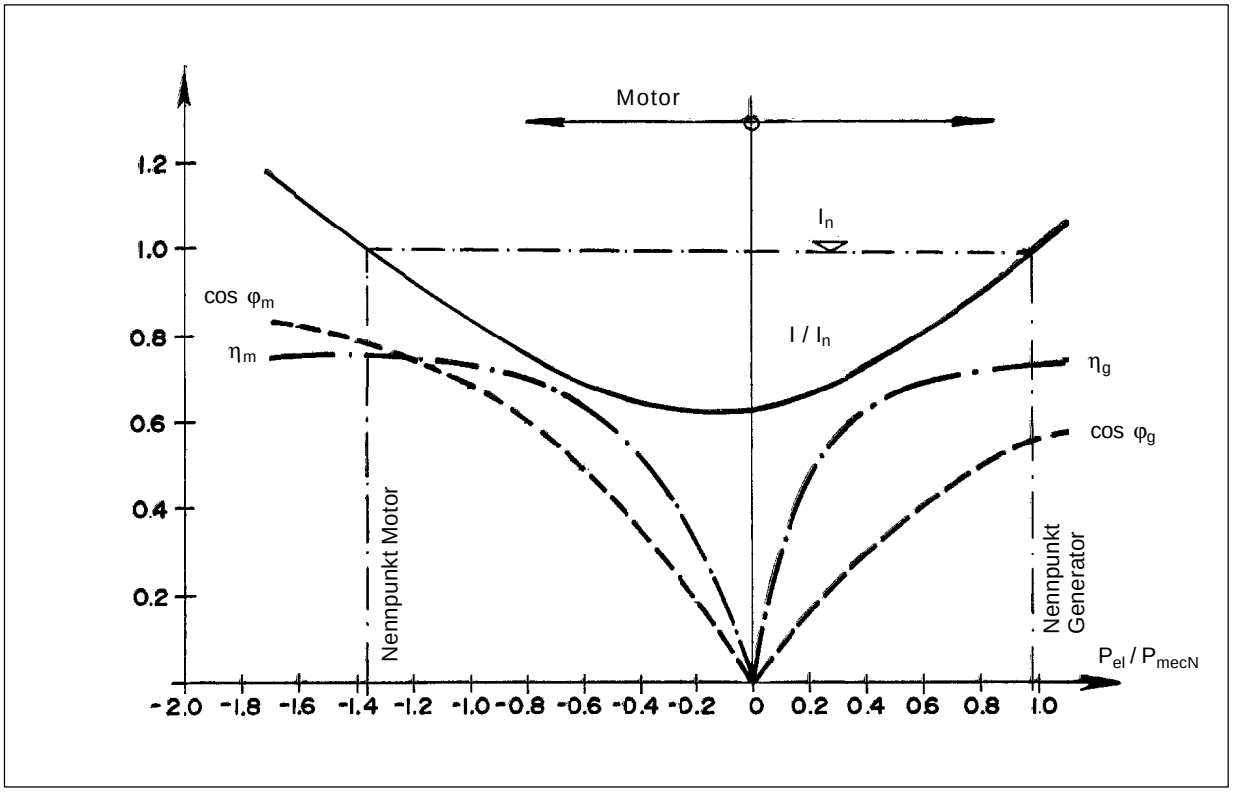


Abbildung 3.38:Charakteristik einer Asynchron-Maschine als Motor und als Generator

3.4.7 Generatorbetrieb

Wie vorgängig gezeigt, kann eine Asynchron-Maschine als Generator betrieben werden, wenn:

- sie mit *über*synchroner Drehzahl angetrieben wird (Turbine). Dadurch wird der Schlupf negativ. Im Generator Nennbetrieb entspricht die abgegebene Leistung der als Motor aufgenommenen bei gleichem positiven Schlupf. Somit können die Betriebsdaten aus dem Typenschild abgelesen werden (Kap. 4.1).
- Die Asynchron-Maschine benötigt immer Blindleistung, um das Erregerfeld zu induzieren. Diese muss entweder vom Netz oder von Kondensatorbatterien geliefert werden (Kap. 4.2 und 4.3).
- Eine Asynchron-Maschine ist nur mit speziellen Reglern im Inselbetrieb einsetzbar.

Im Generatorbetrieb ist der Wirkungsgrad definiert als

$$\eta = \frac{P_{el}}{P_{mec}}$$

Bei Nennstrom sind die Rotorverluste hier jedoch deutlich höher als im motorischen Betrieb. Die Rotorströme sind hier höher, wodurch sich auch der Wirkungsgrad gegenüber dem Motorbetrieb verringert.

3.4.8 Übungen

1. Ein Käfigankermotor (220/380V, 50Hz) ist an Drehstrom 380V, 50Hz angeschlossen. Welche Schaltung muss verwendet werden?

2. Ein Asynchron-Motor hat folgende Werte: 5kW, 220/380V, 50Hz, 732rpm
   Wie viele Pole hat diese Maschine?

3. Ein sterngeschalteter Asynchron-Motor wird von einem Drehstromnetz gespiesen (3x400V, 50Hz). Jede Phase des Stators hat einen Widerstand von Rs=0.40 bei 75C. Der Leitungsstrom beträgt 11.2A. Welches sind die Kupferverluste des Stators?

4. Ein dreiphasiger Asynchron-Motor nimmt eine elektrische Leistung von P=9.0kW auf.
   Die Eisen- und Kupferverluste des Stators betragen 500W. Der Schlupf beträgt 2.5%.
   Bestimmen Sie die Wärmeverluste im Rotor.

5. Die Belastungsversuche eines dreiphasigen Asynchron-Motors (6 polig), dessen Stator dreieckgeschaltet ist, haben folgende Resultate ergeben:

   U=400V

   I=24A

   Pa=14.8kW

   n=970rpm

   Leerlaufversuch:

   U=400V

   I0=11A

   Pa=360W

   Widerstandsmessung des Stators
   Rs=0.50 bei 20C

Bestimmen sie nun folgendes:

– den Schlupf s
– den Leistungsfaktor
– die Summe der Statoreisenverluste und mechanischen Verluste
– die Statorkupferverluste bei Nennlast
– die Rotorkupferverluste bei Nennlast
– die abgegebene mechanische Leistung und den Wirkungsgrad
– das Wellendrehmoment

6. Eine Asynchron-Maschine wird im Netzverbund als Generator betrieben. Die Betriebsdaten sind die folgenden:
   U = 380V
   I = 5A
   $\cos\varphi = 0.65$
   $\eta = 80\%$

   Bestimmen Sie
   – die ans Netz abgegebene Wirkleistung
   – die bezogene Blindleistung
   – die mechanische Antriebsleistung

   Für die gleichen Bedingungen möchte man durch Zuschalten von Kondensatoren den Leistungsfaktor auf 1 bringen.

   Bestimmen Sie hierfür
   – den Leitungsstrom
   – den Strom im Generator

Antworten:

1. Stern
2. 8 Pole
3. 50W
4. 213W
5. 3.0%, 0.89, 300W, 288W, 426W, 13.8kW, 93.5%, 135.7Nm
6. 2145W, 2356var, 2681W, 3.25A, 5A

4. Anwendung von Generatoren

4.1 Typenschilder 57

4.2 Anschlussklemmen 62

4.3 Netzverbundbetrieb 64
4.3.1 Charakteristik bei konstanter Spannung und Frequenz 64
4.3.2 Regelung der Wirkleistung 64
4.3.3 Blindleistungs-/ Leistungsfaktorregelung 66
4.3.4 Anfahren 68

4.4 Inselbetrieb 70
4.4.1 Charakteristik 70
4.4.2 Frequenzregelung 70
4.4.3 Spannungsregelung 72
4.4.4 Konstanter Durchfluss - Ballast 72
4.4.5 Verwendung eines 3ϕ Asynchron- Motors als 1ϕ Asynchron-Generator 74
4.4.6 Anfahren 75

4.5 Sicherheit 78

4. Anwendung von Generatoren

4.1 Typenschilder

Die wichtigsten Angaben die man auf dem Typenschild findet, sind die folgenden (siehe Abb. 4.1 und 4.2 Beispiele eines Asynchron-Motors resp. eines Synchron- Generators):

1. Hersteller

2. Typ

3. Seriennummer

4. Referenznorm

Meistens bezieht man sich auf die Empfehlungen der IEC 34-x (International Electrotechnical Committee), das drehende Maschinen normiert.

In anderen Fällen bezieht man sich auf Landesnormen. Für die Schweiz ist dies der SEV (Schweizerischer Elektrotechnischer Verein), der sich seinerseits oft auf die IEC Normen bezieht.

5. Ausführung und Montage

(siehe Tabelle 4.3)

6. Schutzart: Ipxy

Es handelt sich um Schutz vor eindringenden Teilen (x) und Wasser (y) (siehe Tabelle 4.4).

7. Isolationsklasse

Definiert die max. Betriebstemperatur (siehe Tabelle 4.5).

In den meisten Fällen sind Maschinen kleiner Leistung als B oder F klassiert.

8. Nennleistung/ Maximalleistung

a) Synchron-Maschinen

Dies ist die Scheinleistung [VA]

$$S = \sqrt{3} \cdot U_{aussen} \cdot I_{Leiter} \quad \text{(VA)}$$

wobei U und I den Nennwerten für Spannung und Strom entsprechen (vergleiche 11 & 14).

Die maximale Wirkleistung. die diese Maschine liefern kann, ist:

$$P = S \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot U_{aussen} \cdot I_{Leiter} \cdot \cos\varphi$$

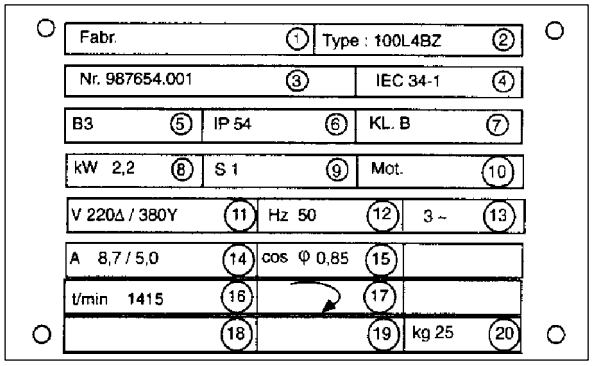


Abbildung 4.1: Typenschild eines Asychronmotors

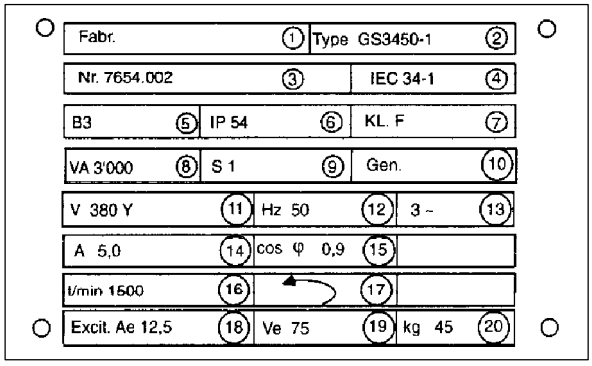


Abbildung 4.2: Typenschild eines Sychrongenerators

b) Asynchron-Maschine

Hier handelt es sich um die Nennleistung P_{mec} an der Welle im Motorbetrieb. Die entsprechende elektrische Wirkleistung ist

$$P_{el} = \frac{P_{mech.}}{\eta} = \sqrt{3} \cdot U_{aussen} \cdot I_{Leiter} \cdot \cos\varphi$$

wobei U und I den Nennwerten f ür Spannung und Strom entsprechen (vergleiche 11 & 14).

Die maximale Leistung, die im Generatorbetrieb abgegeben werden kann, ist

$$P_{elmax.} = \sqrt{3} \cdot U_{aussen} \cdot I_{Leiter}$$

mit $\cos\varphi = 1$

Für Maschinen kleiner Leistung kann folgendes angenommen werden:

$$P_{elmax.} = P_{mech.\,nom.}$$

9. Betriebsart

Hier handelt es sich um die vorgesehene Betriebsart der Maschine, ohne ihre erlaubte Betriebstemperatur zu überschreiten. S1 z.B. bedeutet Dauerbetrieb (siehe Tabelle 4.6).

10. Vom Hersteller vorgesehener Betrieb

Mot= Motor

Gen= Generator

11. Nennspannung/ Anschluss

Es handelt sich um die verkettete Spannung (zwischen 2 Phasen), zulässiger Bereich ±5%

Δ Dreieck

Y Stern

Für Synchron-Maschinen wird der Stator immer in Sternschaltung angeschlossen, um die 3. Harmonische zu unterdrücken.

Anschlussschema-Ref. Kap 4.2.

12. Nennfrequenz

Frequenz für welche die Maschine ausgelegt wurde.

13. Anzahl Phasen

14. Nennstrom

Es handelt sich hier um den Leiterstrom. Er entspricht demjenigen Wert, für den die max. Erwärmung garantiert ist. Die Dauer einer möglichen Überschreitung muss begrenzt werden, um die Wicklungsisolation nicht zu gefährden.

15. Leistungsfaktor

a) Synchron-Maschine

Wert, für welchen die Erregungsschaltung ausgelegt wurde.

b) Asynchron-Maschine

Wert unter Nennleistung als Motor

16. Drehzahl

a) Synchron-Maschine

Synchrondrehzahl

b) Asynchron-Maschine

Drehzahl n_m bei Nennleistung als Motor

Im Generatorbetrieb kann die Drehzahl u_g folgendermassen abgeschätzt werden

$$n_g = 2 \cdot n_s - n_m$$

n_s ist die synchrone Felddrehzahl

17. Drehrichtung

Von der Kupplung aus gesehen. Manchmal fehlt diese Angabe, ist dann jedoch auf dem Gehäuse angebracht.

18/19. Rotor-Strom/Spannung

a) Synchron-Maschine mit Erregerwicklung auf dem Rotor.

Der Erregerstrom A_e entsprechend den Nennwerten für Spannung, Strom und Leistungsfaktor. Er entspricht demjenigen Wert, für den die max. Erwärmung garantiert ist.

Die Erregungsspannung V_e entspricht dem Strom A_e nach der Beziehung:

$$V_e = R_e \cdot A_e$$

wobei R_e dem Erregerwicklungswiderstand bei 75°C entspricht.

b) Asynchron-Maschine (gewickelt)

Die Spannung entspricht der induzierten Spannung bei offener Klemme und bei Stillstand.

Der Strom entspricht dem Kurzschlussstrom bei Nennlast.

20. Weitere Angaben

wie Gewicht, Trägheit, Kühlmedium etc.

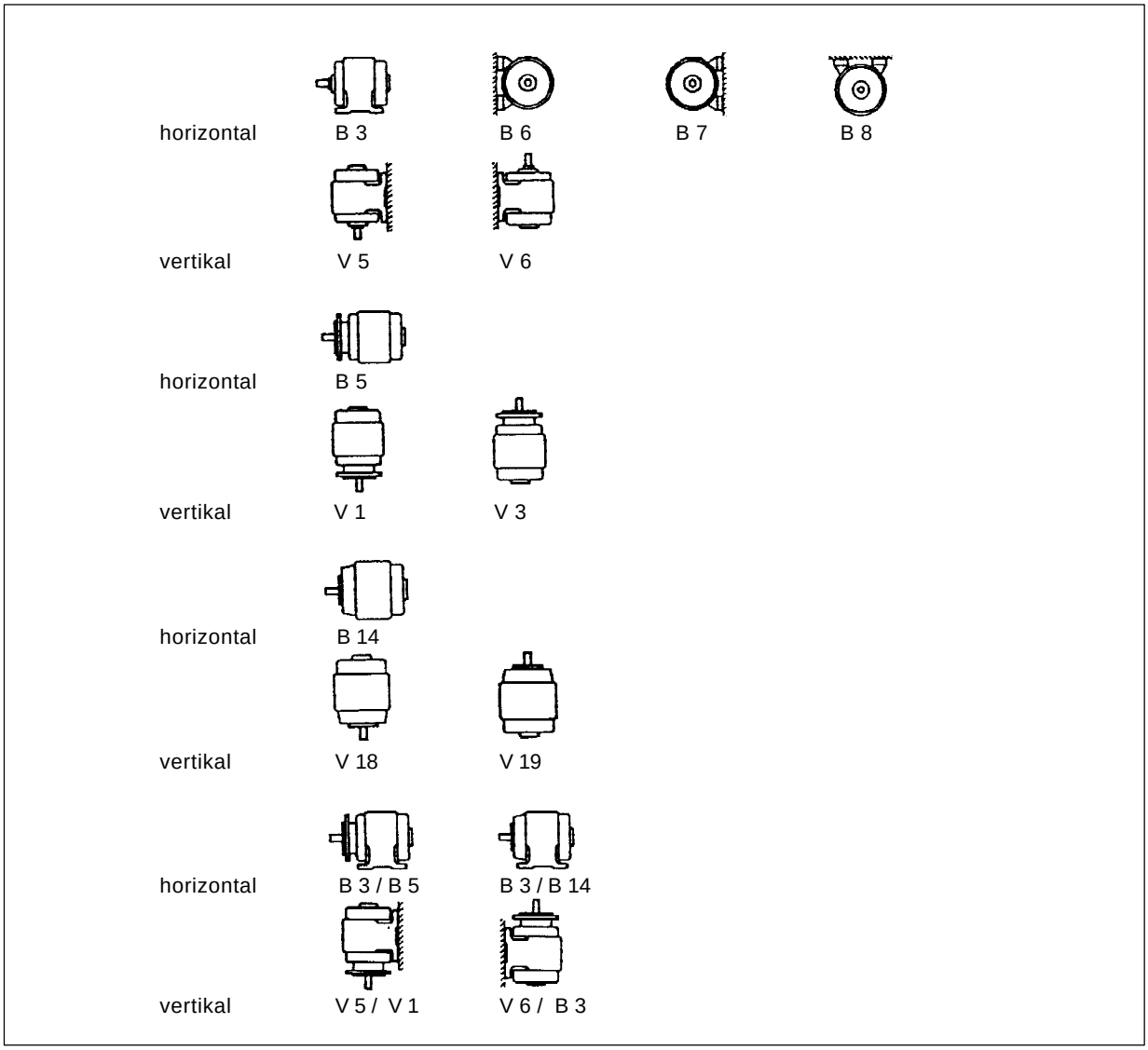


Tabelle 4.3: Ausführungsformen und Montage (CEI 34-7)

IP Kennziffern	Schutzarten für el. Betriebsmittel
1ste Ziffer 0 bis 6	Berührungs- und Fremdkörperschutz
2te Ziffer 0 bis 8	Wasserschutz

1ste Ziffer	Bennenung	2te Ziffer	Bennenung
0	kein Schutz	0	kein Schutz
1	Schutz gegen Fremdkörper >50mm	1	Schutz gegen senkrecht fallendes Tropfwasser
2	Schutz gegen Fremdkörper >12mm	2	Schutz gegen schrägfallendes Tropfwasser
3	Schutz gegen Fremdkörper >2.5mm	3	Schutz gegen Sprühwasser
4	Schutz gegen Fremdkörper >1mm	4	Schutz gegen Spritzwasser
5	Schutz gegen Staubablagerung	5	Schutz gegen Strahlwasser
6	Schutz gegen Staubeintritt	6	Schutz bei Überflutung
		7	Schutz beim Eintauchen
		8	Schutz beim Untertauchen

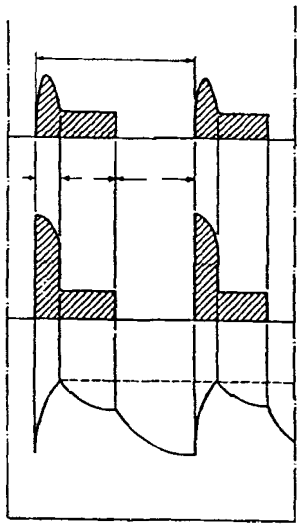
Tabelle 4.4: Schutzklasse (CEI 34-5 + DIN 40'050)

Isolationsklasse	Max. Erwärmung	Max. Temperatur
A	60°C	105°C
E	75°C	120°C
B	80°C	130°C
F	105°C	155°C
H	125°C	180°C

Tabelle 4.5: Isolationsklasse und Höchst- Erwärmung/-Temperatur für Maschinenleistungen unter 200kW (CEI 34-1)

Kennzeichen Betriebsart	Betrieb
S1	Dauerbetrieb
S2	zeitweiser Betrieb
S3	aussetzender periodischer Betrieb
S4	aussetzender Betrieb mit Anlauf
S5	aussetzender Betrieb mit Anlauf und el. Bremsung
S6	unterbrochener Betrieb mit Wechsellast
S7	unterbrochener Betrieb mit Anlauf und Bremsung
S8	unterbrochener Betrieb mit Geschwindigkeitsänderung

Tabelle 4.6: Arbeitszyklen (CEI 34-1)



A=Anfahren

N=Nennbetrieb

P=Pause

Tmax=während des Zyklus erreichte maximal Temperatur

Betriebsfaktor= $\frac{A+N}{A+N+P} \cdot 100\%$

Beispiel: Arbeitszyklus Typ S4- periodisch unterbrochen mit anfahren

4.2 Anschlussklemmen

Die Anschlussklemmen einer dreiphasigen elektrischen Maschine bestehen aus:

a) Für den Stator: 3 oder 6 Klemmen

Gibt es nur drei Klemmen, ist die Schaltung bereits maschinenintern gemacht (Stern oder Dreieck). Die einzige Möglichkeit, dies zu erkennen, ist das Typenschild.

Gibt es 6 Anschlüsse, wird die Schaltung nach Abb. 4.7 und 4.8 vorgenommen.

Um den Drehsinn zu ändern, werden die äusseren Phasenleiter vertauscht.

b) Für den Rotor

Im Falle von Synchron-Maschinen:
2 Anschlussklemmen für Gleichstrom.

Im Falle von Asynchron-Maschinen:
3 oder 4 Anschlussklemmen.

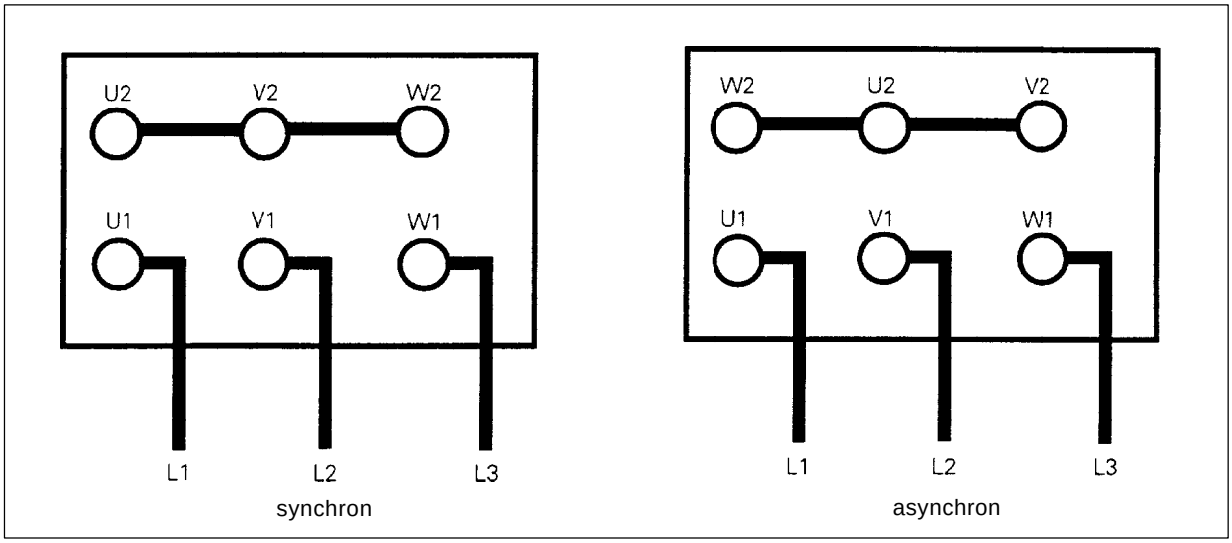


Abbildung 4.7: Sternschaltung

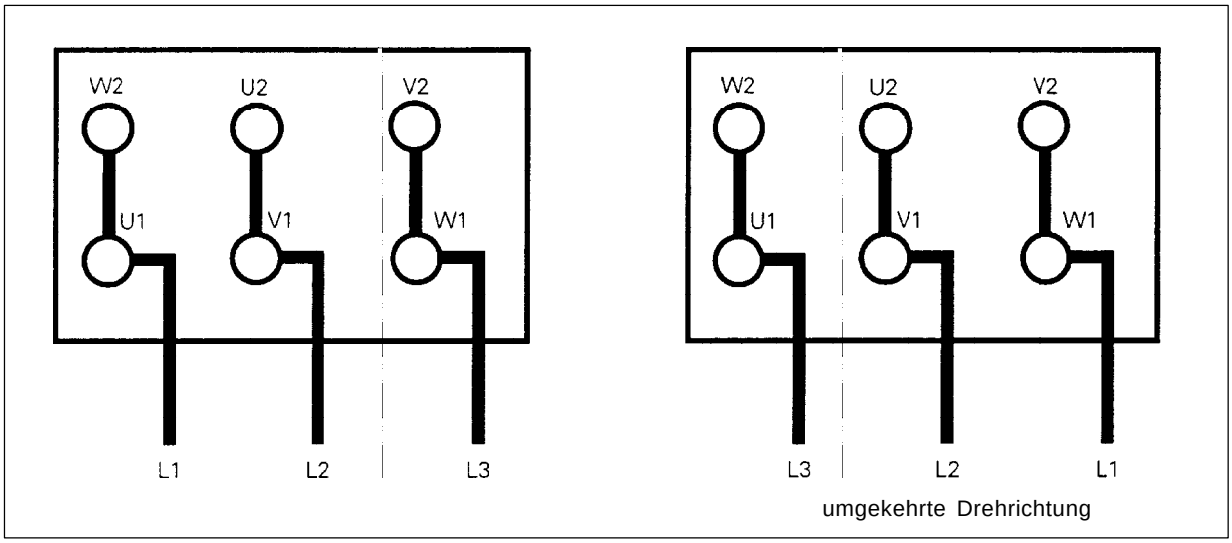


Abbildung 4.8: Dreicksschaltung einer Asynchronmaschine

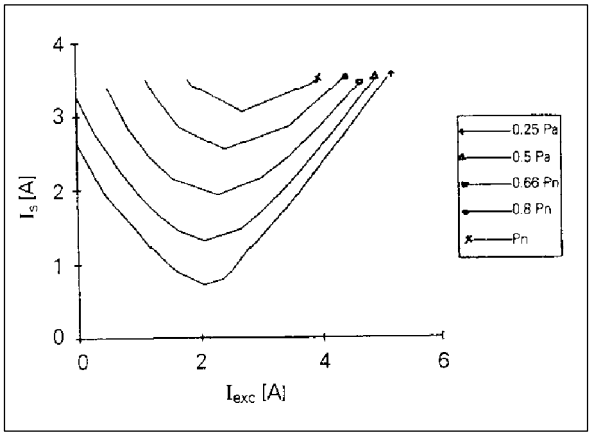


Abbildung 4.9: "V" Kurven einer Synchronmaschine (2300VA 3x380V 50Hz)
(U = konstant, f = konstant)

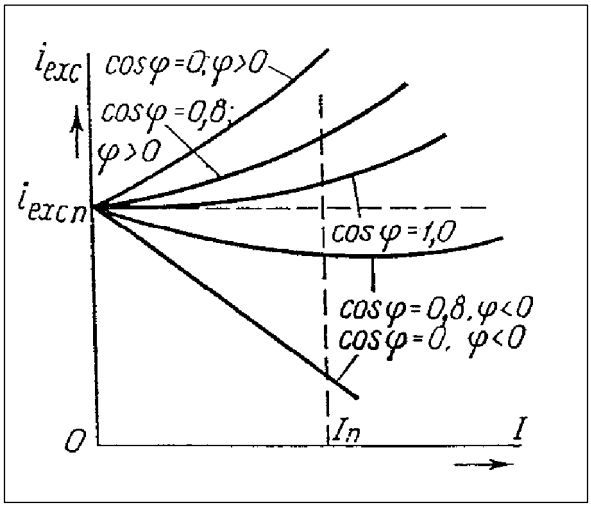


Abbildung 4.10: Regelcharakteristik
(U = constant, f = constant)

4.3 Netzverbundbetrieb

Das Verbundnetz ist starr, d.h. weder seine Frequenz noch seine Spannung ändert sich durch das Einspeisen.

Die beiden Maschinentypen, synchron und asynchron, werden unter folgenden Gesichtspunkten analysiert:

- ihre Charakteristiken
- die Regelung der Wirk- und Blindleistung
- ihr Anlauf und ihre Zuschaltung ans Netz

4.3.1 Charakteristik bei konstanter Spannung und Frequenz

a) Synchron-Maschine

Die wichtigsten Eigenschaften sind die folgenden beiden:

- die „V" Kurven des Statorstromes als Funktion des Erregerstromes für verschiedene Antriebsleistungen (Turbinenöffnungen). Es ist ersichtlich, dass es für einen bestimmten Erregerstrom einen minimalen Leiterstrom gibt, der einem reinem Wirkstrom entspricht (Abb. 4.9).
- Die Regelungscharakteristik des Erregerstromes als Funktion des Leiterstromes für bestimmte Leistungsfaktoren (Abb. 4.10).

b) Asynchron-Maschine

- Die Änderung der Drehzahl als Funktion des mech. Drehmomentes (Abb. 3.34).
- Die Änderung des Stromes, des Leistungsfaktors und des Wirkungsgrades als Funktion der Antriebsleistung (Abb. 3.36).

4.3.2 Regelung der Wirkleistung

Für beide Maschinentypen muss die Wirkleistung über die Durchflussmenge geregelt werden. Es sind demnach Regler vorzusehen, die den Durchfluss beeinflussen können (motorisierte Klappen, Nadeln etc.). Falls die Nennleistung der Turbine die des Generators übersteigt, muss der Durchfluss der Turbine limitiert werden, damit der Nennstrom des Generators nicht überschritten wird.

Synchron- und Asynchron-Generatoren können bei geringer Antriebsleistung (kleiner Turbinendurchfluss) zu Motoren werden und Leistung aus dem Netz beziehen.

Kann der Turbinendurchfluss nicht geregelt werden, ändert sich die Einspeiseleistung gemäss der Antriebsleistung, und diese richtet sich nach dem natürlichen Wasserangebot und der Fallhöhe.

In diesem Fall muss die Generatornennleistung mit der maximalen Turbinenleistung übereinstimmen.

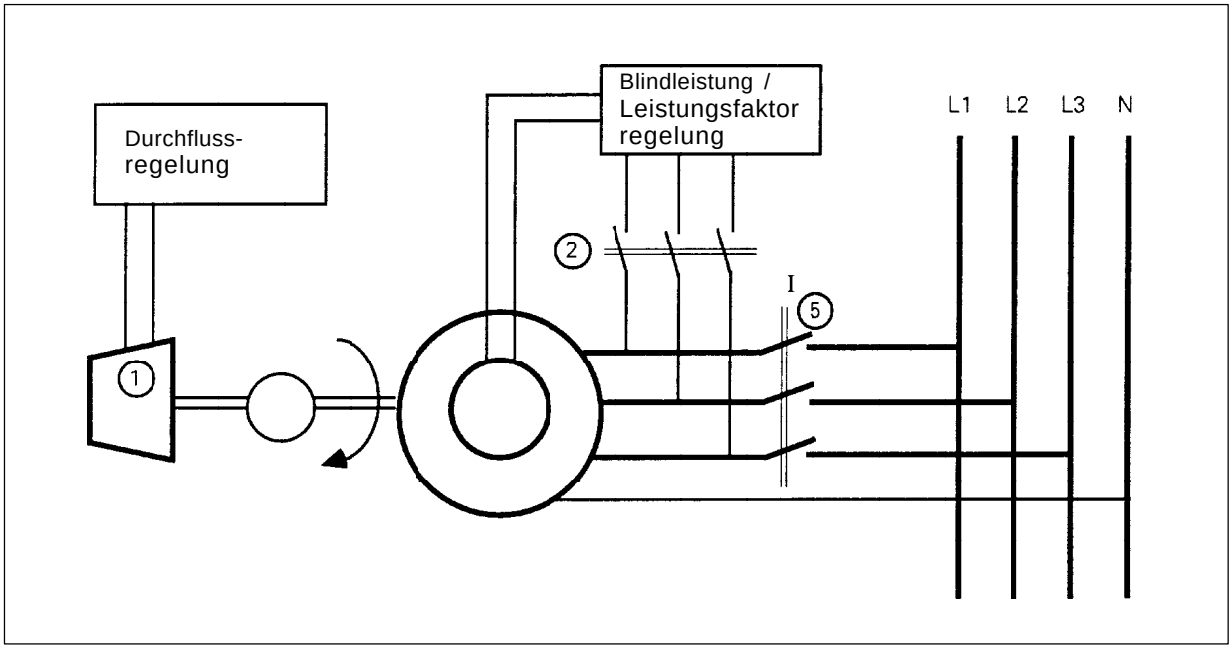


Abbildung 4.11: Übersichtsanschlussschema (Synchronmaschine) mit Durchflussregelung und geregelter Erregung

1=Turbine
2=Schütze für Erregungsspeisung
5=Netzschalter

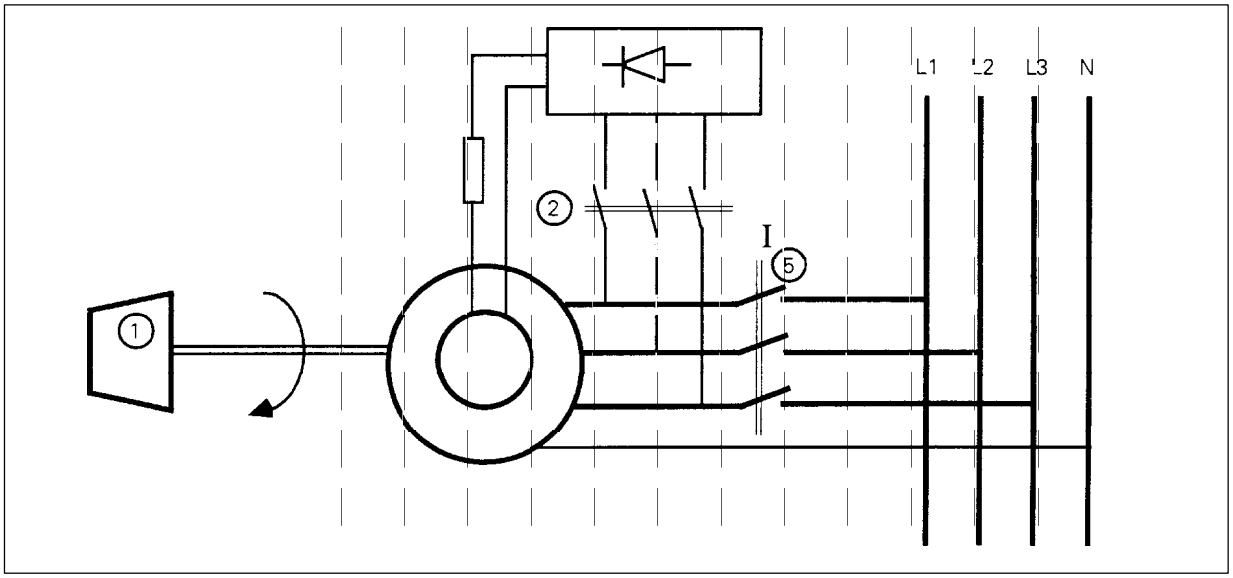


Abbildung 4.12: Übersichtsanschlussschema (Synchronmaschine) ohne Durchflussregelung, mit konstanter Erregung

1=Turbine
2=Schütze für Erregungsspeisung
5=Netzschalter

4.3.3 Blindleistungs-/ Leistungsfaktor-regelung

Um einen optimalen Betrieb mit hohem Wirkungsgrad zu halten, sollte der Leistungsfaktor möglichst nahe bei 1 liegen (meist leicht induktiv 0.9 bis 0.95). Beide Maschinentypen ändern ihren Leistungsfaktor bei ändernder Antriebsleistung (Turbinendurchfluss). Eine Regelung ist daher vorzusehen.

a) Synchron-Maschine

Die Blindleistung (und damit der Leistungsfaktor) wird über den Erregerstrom eingestellt. Erhöht man den Erregerstrom, liefert die Maschine Blindleistung ans Netz, verringert man ihn, bezieht sie Blindleistung. In allen Fällen darf der Nennstrom nicht überschritten werden.

Bemerkung:

Im Falle eines Netzunterbruches (vgl. Kapitel 7.4.3) muss das Erregersystem ebenfalls getrennt werden.

b) Asynchron-Maschine

Wie bereits erwähnt, bezieht die Asynchron-Maschine immer Blindleistung. Die Menge variiert mit der abgegebenen Leistung. Damit diese Blindleistung nicht gegen Bezahlung vom Netz bezogen werden muss, kann sie beim Generator mit Kondensatoren erzeugt werden. Um den Leistungsfaktor von $\cos\varphi_1$ auf $\cos\varphi_2$ zu erhöhen, werden je Phase Kondensatoren mit folgendem Wert benötigt:

$$C_{Phase} = \frac{P \cdot (tg\varphi_1 - tg\varphi_2)}{3 \cdot \omega \cdot U_{Phase}^2}$$

mit $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

Die optimale Kompensation ist bei $\cos\varphi_2=1$ ($\varphi_2=0$); praktisch wird jedoch nur auf $\cos\varphi_2=0.9$ kompensiert.

Für konstanten Abfluss und kleine Maschinen kann der Leistungsfaktor $\cos\varphi_1$ bei Nennleistung in etwa bestimmt werden zu

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_{mech.\,nom.}}{\sqrt{3} \cdot U_{aussen\,nom.} \cdot I_{Leiter\,nom.}}$$

Bemerkung:

Im Falle eines Netzunterbruches (vgl. Kapitel 7.4.3) müssen die Kondensatoren ebenfalls getrennt werden.

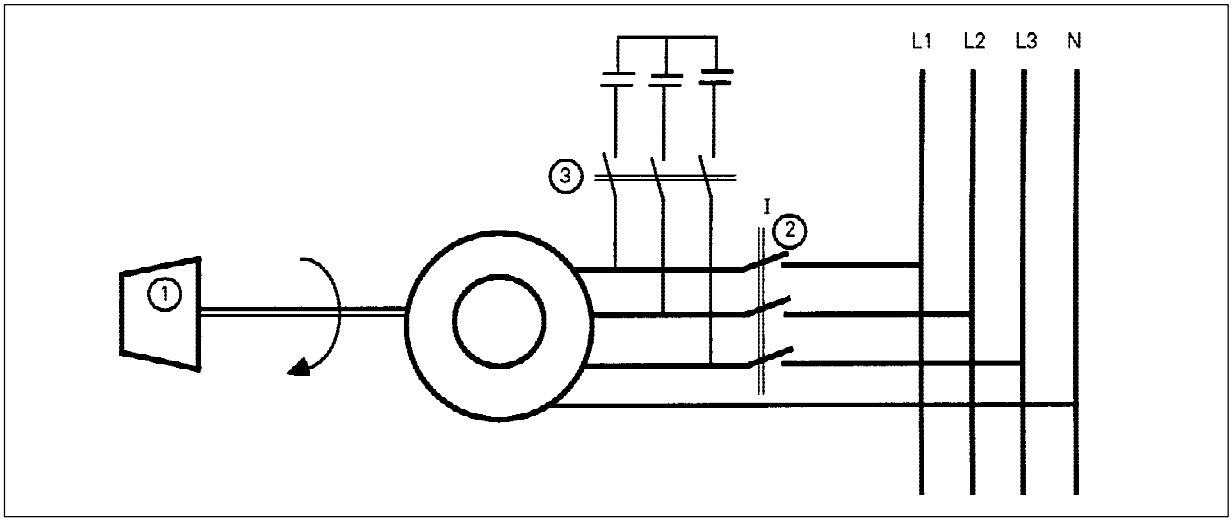


Abbildung 4.13: Übersichtsanschlussschema (Asynchronmaschine) ohne Durchflussregelung, mit Kompensation 1=Turbine; 2=Netzschalter; 3=Schütze für Kompensationskondensatoren

Beispiel

Typenschild eines Motors

2200W, 3x380V, Y, 5A, 50Hz, cosφ=0.85

Eine Leerlaufmessung (motorisch) ergibt

220W, 3x380V, Y, 50Hz, cosφ=0.11

Nennbetrieb (generatorisch)

2200W, 3x380V, Y, 50Hz, cosφ=0.67

Berechnen Sie die optimale Kompensationskapazität unter Nennlast

$$C_{Phase} = \frac{2200 \cdot 111}{3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50) \cdot 220^2} = 53{,}5 \cdot 10^{-6} F = 53{,}5\ \mu F$$

Die gesamte von der Kondensatorbatterie gelieferte Blindleistung beträgt

$$Q_{Ctot} = 3 \cdot \omega \cdot C \cdot U_{ph}{}^2 = 2440 \text{ var}$$

Im Leerlauf beträgt der Blindleistungsbedarf nur

$$Q_0 = P_{el0} \cdot tg\varphi_0 = 220 \cdot 9{,}04 = 1988 \text{ var}$$

Behält man die Kapazität unverändert, werden demnach im Leerlauf 2440-1988=452VAr Blindleistung ans Netz abgegeben.

4.3.4 Anfahren

a) Synchron-Maschine

Die 4 Bedingungen, die erfüllt sein müssen, bevor man diese Maschine an ein Netz parallel schliessen kann, sind (Abb. 4.11 und 4.12):

– gleicher Drehsinn

– gleiche Frequenz

– gleiche Spannung

– gleiche Phase

Die Abläufe für die Erfüllung dieser Bedingungen sind:

1. Anfahren der Gruppe mit der Turbine um synchrone Drehzahl zu erhalten.

2. Die Erregung des Generators einschalten und den Drehsinn mittels eines geeigneten Gerätes verifizieren.

3. Angleichen der Frequenz und der Spannung ans Netz.

4. Sobald Phasengleichheit erreicht ist, kann zugeschaltet werden.

5. Turbine möglichst weit öffnen.

6. Den Leistungsfaktor über den Erregerstrom optimieren.

b) Asynchron-Maschine

Die 2 Bedingungen, die erfüllt sein müssen, bevor man diese Maschine an ein Netz parallel schliessen kann, sind:

– gleicher Drehsinn

– gleiche Frequenz

Die Abläufe zur Erfüllung dieser Bedingungen sind (Abb. 4.13):

1. Anfahren der Gruppe mit der Turbine, um synchrone Drehzahl zu erhalten.

2. Den Drehsinn verifizieren mittels eines geeigneten Gerätes.

3. Zuschalten ans Netz, dabei können grosse Einschaltströme (5facher Nennstrom) fliessen, die die Maschine jedoch kurzzeitig erträgt. Die Schutzeinrichtungen müssen aber dafür ausgelegt werden.

4. Zuschalten der Kondensatorbank (falls vorhanden).

5. Turbine möglichst weit öffnen.

6. Den Leistungsfaktor über Anzahl der Kondensatoren optimieren.

NB: Der Austausch von Blindleistung mit dem Netz hängt von der Kapazität der Kondensatorbank ab (Beispiel unter 4.3.3b).

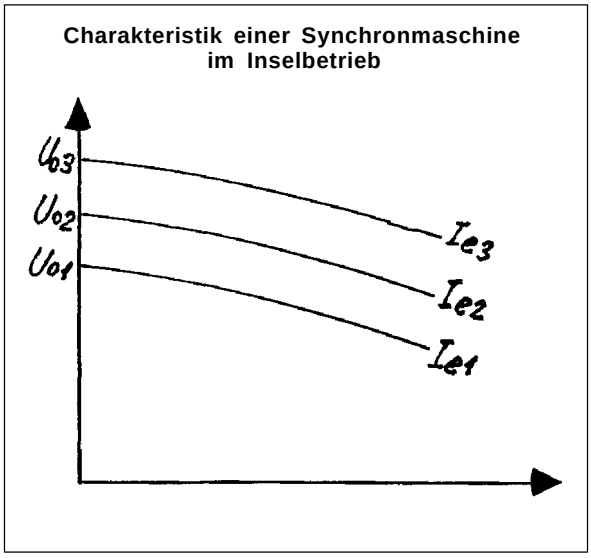


Abbildung 4.14: Lastabhängigkeit der Spannung U(Is) bei konstanter Frequenz f und cosφ=1 für verschiedene Erregungen

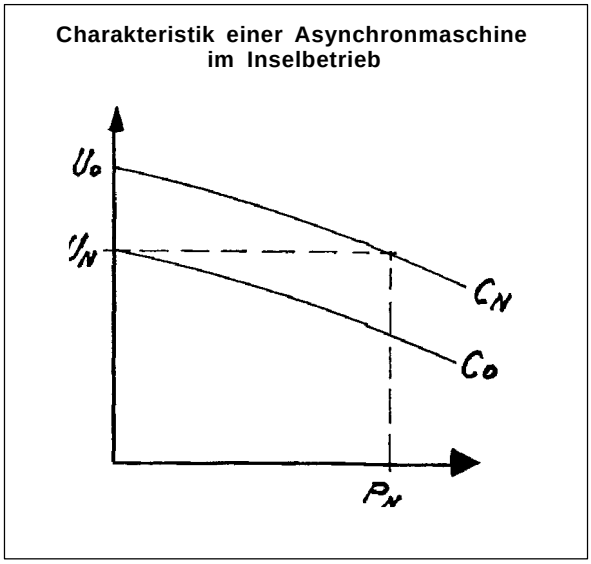


Abbildung 4.15: Lastabhängigkeit der Spannung U(P) für 2 verschiedene Kompensationskondensatoren

4.4 Inselbetrieb

Ein Inselnetz ist nicht starr, d.h. die Frequenz und die Spannung werden von der Erzeugergruppe und der Last bestimmt oder, falls weitere Einspeiser bereits vorhanden sind, ändern sich Frequenz und Spannung durch das Einspeisen.

D.h. man betrachtet folgenden Fall:

Ein oder mehrere ähnliche Kraftwerke versorgen einen oder mehrere Verbraucher mit elektrischer Energie.

Im Falle eines Inselnetzes ist also weder die Frequenz noch die Spannung konstant.

4.4.1 Charakteristik

a) Synchron Maschine

– Spannung ist lastabhängig (Leiterströme) (vergleiche Abb. 3.29 und 4.14).

– Die Drehzahl ist lastabhängig (abhängig von der Turbinencharakteristik).

b) Asynchron-Maschine

Spannung in Abhängigkeit der Last (oder Statorstrom) für eine konstante Frequenz und verschiedene Kapazitätswerte (Abb. 4.15).

Anhand eines Beispiels:

– Abb. 4.16 zeigt die U(P) Charakteristik bei konstanter Frequenz für eine 3kW Maschine

– Abb. 4.17 zeigt die U(P) Charakteristik bei konstantem Durchfluss bei der angegebenen Turbinencharakteristik.

4.4.2 Frequenzregelung

Der Frequenzwert entspricht der Nennfrequenz. Sie kann bestimmt werden:

– aus der Generatorspannung

– durch einen Tachogenerator

Bei beiden Maschinentypen wird die Frequenz, d.h. die Drehzahl über eine Durchflussregelung kontrolliert.

a) Synchron-Maschine

Halten der Synchrondrehzahl.

b) Asynchron-Maschine

Ändern der Drehzahl nach der Schlupfcharakteristik, d.h. der n(P) Charakteristik. Praktisch kann die Frequenz ungefähr konstant gehalten werden (±5%), indem die Spannung konstant gehalten wird.

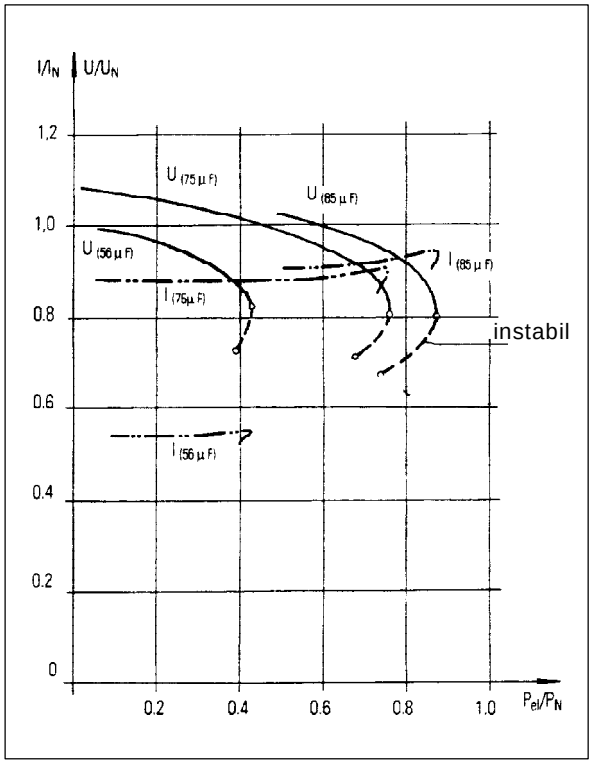


Abbildung 4.16: Lastabhängigkeit der Spannung U(P) und des Stromes I(P) Beispiel einer Asynchronmaschine Pn=3kW

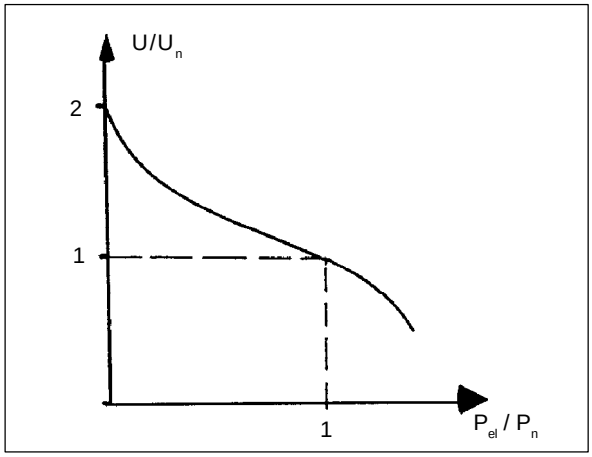


Abbildung 4.17: Lastabhängigkeit der Spannung U(P) für eine Turbinencharakteristik, bei der bei Durchbrenndrehzahl (2fache Nenndrehzahl) die Leistung P=0 ist.

4.4.3 Spannungsregelung

Die Spannung die gemessen werden muss, um die Nennspannung zu halten, ist die Klemmenspannung beim Verbraucher.

a) Synchron-Maschine

Die Spannung wird über das Nachstellen des Erregerstromes geregelt.

b) Asynchron-Maschine

Die Spannung müsste über das Nachstellen der Erregerkapazitäten erfolgen. Da dies jedoch sehr aufwendig ist, wird ein mittlerer fester Wert gewählt, so dass die Spannung nicht mehr als ±10% variiert.

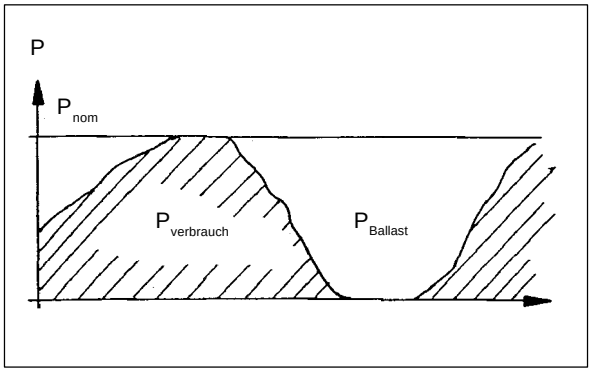


Abbildung 4.18: Funktionsprinzip einer Ballast

4.4.4 Konstanter Durchfluss - Ballast

Bei konstanter Wassermenge (Durchfluss) kann die Frequenzregelung über die Steuerung eines variablen Ballasts vorgesehen werden, dessen max. Heizleistung der Nennleistung des Generators entsprechen muss. Dieser Ballast liegt parallel zu den Verbrauchern und hält die Gesamtleistung konstant.

$$P_{el\,nom} = P_{Ballast} + P_{Verbraucher}$$

Bei konstanter Wassermenge muss daher ein Ballast vorgesehen werden, dessen Heizleistung der Nennleistung des Generators entsprechen muss (siehe Kapitel 4.4.4).

Diese Gesamtleistung muss kleiner als die Generatorleistung bleiben.

Die Steuerung des Ballastes erfolgt über die Spannung oder Frequenz. Sinken diese, muss der Ballast verkleinert werden. Der Regler überwacht also die Spannung oder Frequenz beim Verbraucher und steuert je nach Bedarf den Ballast.

Unter der Voraussetzung eines gleichbleibenden Leistungsfaktors erlaubt dieses System ein einfacheres Regelsystem, das verzichtet auf:

– eine Durchflussregelung
– eine Spannungsregelung der Synchron-Maschine
– eine Kapazitätsregelung der Asynchron-Maschine

Beispiel einer Ballastberechnung

Fall der Maschine aus Beispiel 4.2.4

Die Nennwirkleistung ist:
2'200W, 50Hz, 220V

Der Heizwiderstand (Ballast) berechnet sich zu:

$$R_{BPhase} = \frac{U_{ph}^2}{\frac{P_{el \cdot n}}{3}} = \frac{3 \cdot 220^2}{2200} = 66\Omega / \text{Phase}$$

Der Strom durch den Ballast ist:

$$I_{RB} = \frac{U_{ph}}{R_B} = \frac{220}{66} = 3{,}33\ \text{A}$$

4.4.5 Verwendung eines 3ϕ Asynchron-Motors als 1ϕ Asynchron-Generator

Unter bestimmten Bedingungen kann ein normaler 3ϕ Asynchron-Motor (billiges Massenprodukt) als einphasiger Generator verwendet werden. Um eine unerlaubte Asymmetrie in der Belastung der 3 Phasen zu verhindern, verwendet man eine sog. C-2C Schaltung, und die Kapazitäten müssen wie folgt berechnet werden:

$$C_1 = \frac{\sqrt{3}}{3 \cdot \omega_s \cdot R_B}$$

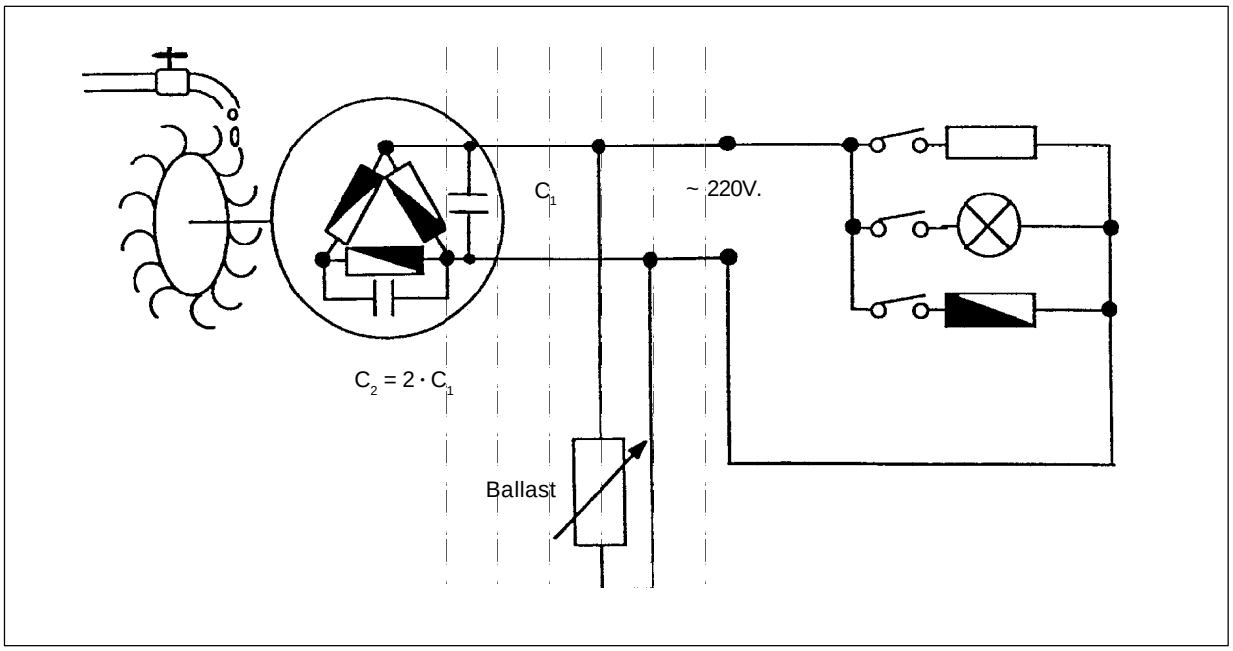


Abbildung 4.19: 3phasige Asynchronmaschine die 1phasig betrieben wird (mit Ballast)

4.4.6 Anfahren

a) Synchron-Maschine

(Abb. 4.20)

1. Anfahren der Gruppe mit der Turbine, um Nenndrehzahl zu erhalten.
2. Die Erregung des Generators einschalten und regeln, um Nennspannung zu erhalten.
3. Verbraucher zuschalten.
4. Nun Drehzahl und Spannung nach Bedarf nachregeln.

Im Falle konstanter Wassermenge und einer Regelung über einen Ballast vereinfacht sich dies zu:

1. Anfahren der Gruppe mit der Turbine.
2. Bei Nenndrehzahl Maschine erregen und Ballast zuschalten. Über den Regler wird nun die Drehzahl konstant gehalten.
3. Turbine weiter öffnen, um Nennleistung zu erhalten, die vorläufig im Ballast verheizt wird.
4. Verbraucher zuschalten.

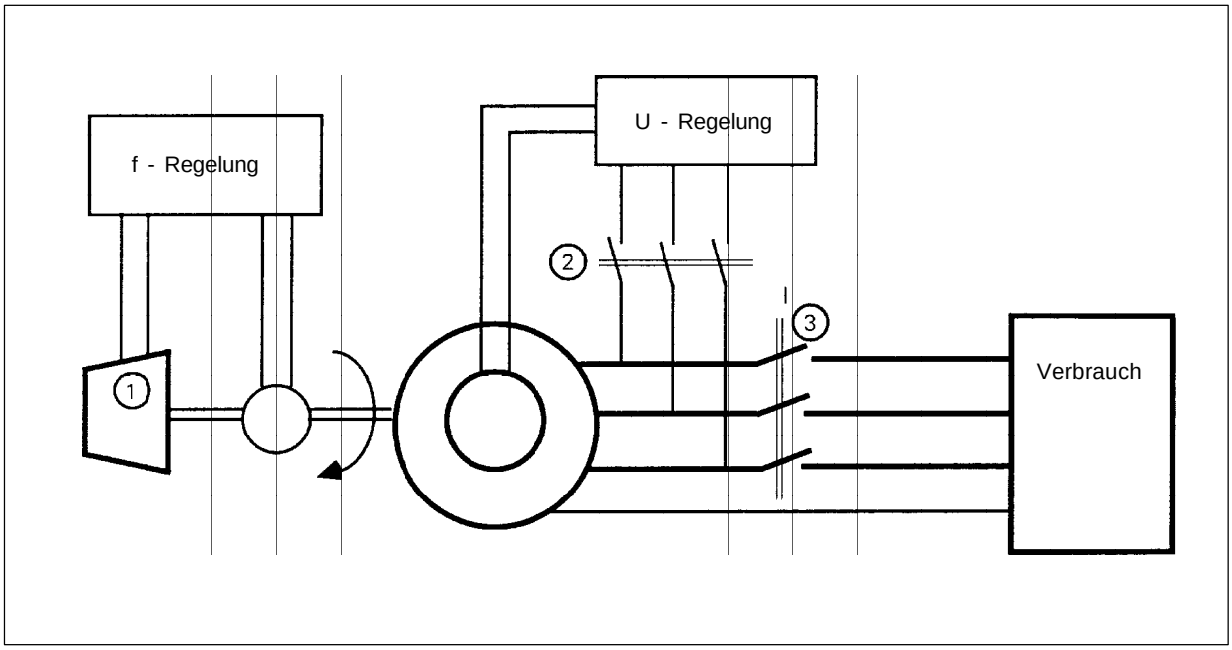


Abbildung 4.20: Anfahren einer Synchronmaschine im Inselbetrieb

b) Asynchron- Maschine

Hier kommt nur eine Ballastregelung in Frage:

1. Gruppe mit der Turbine anfahren.
2. Zuschalten der Erregerkondensatoren. Es baut sich nun eine Spannung aufgrund der Remanenz (Abb. 4.22) auf.
3. Bei Nennspannung Ballast zuschalten. Über den Regler wird nun die Spannung (Drehzahl) konstant gehalten.
4. Turbine weiter öffnen, um Nennleistung zu erhalten, die vorläufig im Ballast verheizt wird.
5. Verbraucher zuschalten.

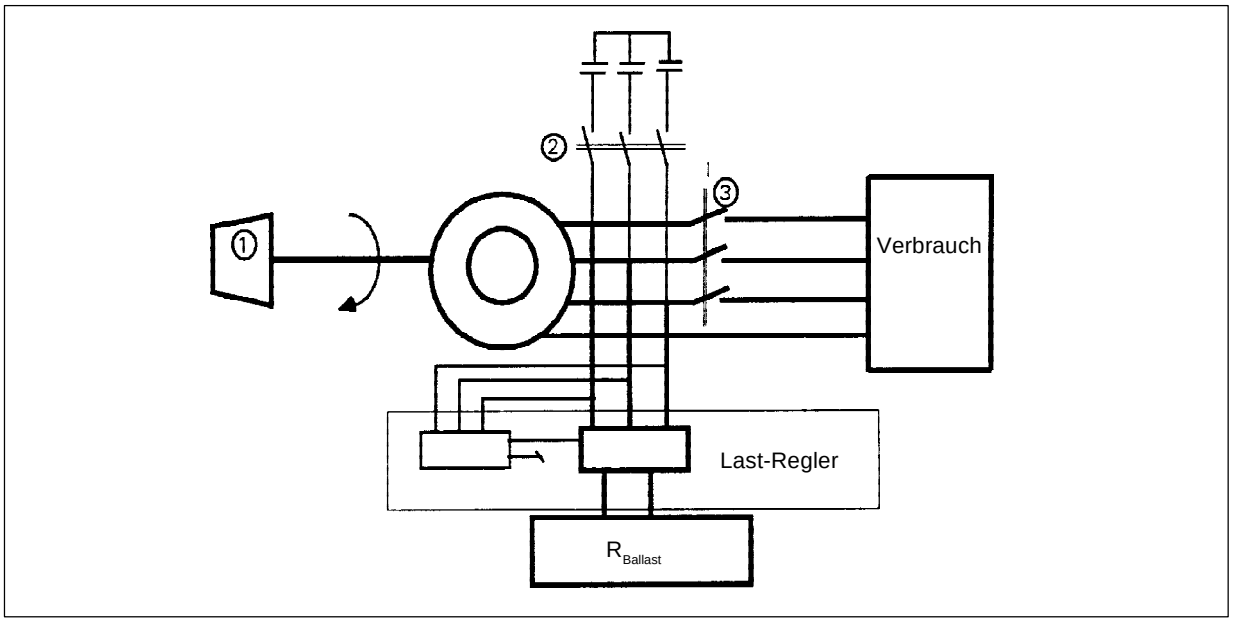


Abbildung 4.21: Anfahren einer Asynchronmaschine im Inselbetrieb (mit Ballast)

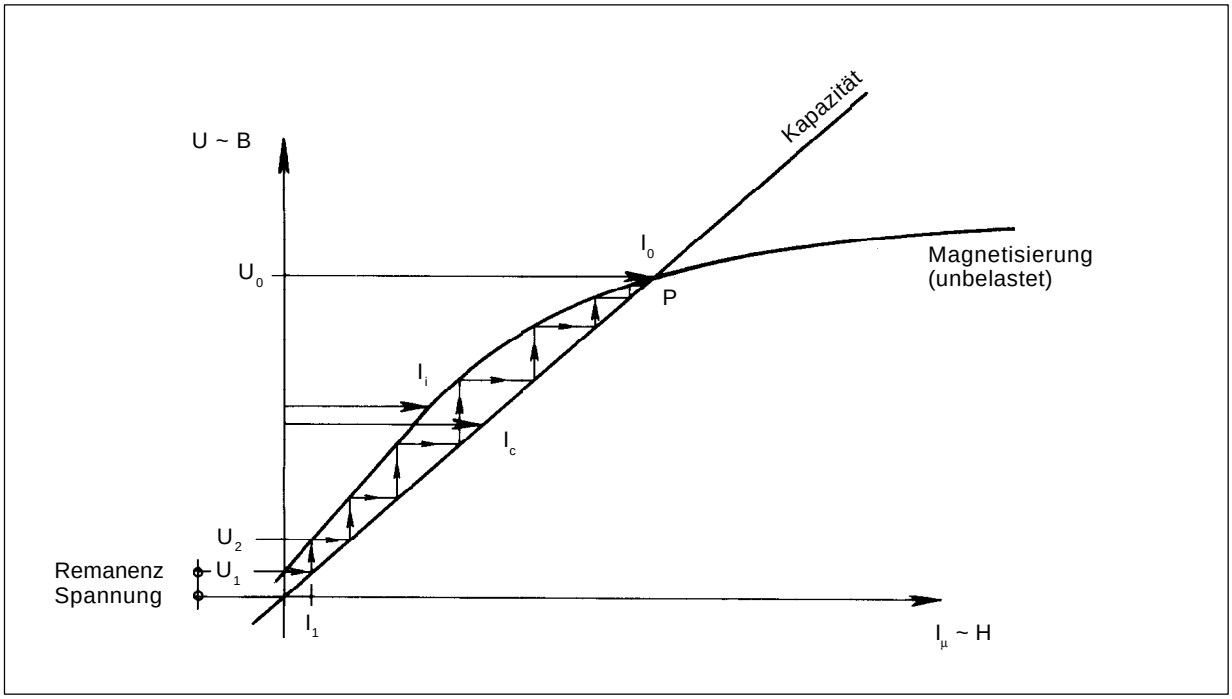


Abbildung 4.22: Selbsterregung einer Asynchronmaschine. Sättigungskurve der Asynchron-Maschine und die Gerade der Kapazität.

Der Schnittpunkt der beiden Kurven ergibt den Leerlaufbetriebspunkt. Um eine Selbsterregung beim Anlauf zu erhalten, muss die Remanenzspannung wenigstens 2 bis 3V betragen.

4.5 Sicherheit

Die häufigsten Notsituationen für einen Generator sind die folgenden:

- Überdrehzahl, -frequenz,
  - Turbinenleistung gegenüber der Verbraucherleistung ist zu hoch,
  - plötzlicher Lastabwurf,

- Unterdrehzahl, -frequenz,
  - Verbraucherleistung gegenüber der Turbinenleistung ist zu hoch,

- Überstrom,
  - Verbraucherleistung gegenüber der Generatornennleistung ist zu hoch,
  - ungenügender Leistungsfaktor,
  - Kurzschluss an den Klemmen oder Kabel,

- Überspannung,
  - zu starke Erregung,
  - plötzlicher Lastabwurf,

- Unterspannung,
  - zu kleine Erregung,
  - plötzlicher Lastabwurf,

- Rückspeisung,
- Wassermangel,

Ausser den Sicherheitsmassnahmen (Kapitel 7) sind auch diverse Messgeräte und Anzeigen vorzusehen (Abb. 4.23):

- Drehzahlmessung
- Frequenzmessung
- Statorstrommessung am Generator (alle 3 Phasen)
- Abgangsstrom (alle 3 Phasenabgänge zum Netz oder Verbraucher)
- Erregerstrommessung
- Wirkleistung (Bezug und Lieferung)
  Energie (Bezug und Lieferung)

Regelung und Schutz der Turbine

1. Durchflussregelung (Nadel, Verteiler)
2. Notschluss (Ablenker, Bypass)
3. Niveaumessung
4. Tachometer
5. Überdrehzahl
6. Lagertemperatur

Generatorschutz

7. Überlast/ Kurzschluss
8. Überspannung
9. Spannungsasymmetrie
10. Statortemperatur
11. Rückleistung
12. Blitzschutz

Anlagenüberwachung

13. Spannungsanzeige
14. Stromanzeige
15. Frequenzanzeige
16. Leistungsanzeige
17. Produktionsanzeige (Energie)

Netzschutz

18. Über/ Unterspannungsrelais
19. Über/ Unterfrequenzrelais

Abbildung 4.23: Übersichtsschema für die Regelung, Steuerung und Schutz einer Anlage

5. Vergleich zwischen Synchron- und Asynchron-Generator

5.1	**Qualität der elektrischen Energie**	83
5.2	**Techn. Vergleichskriterien**	83
5.2.1	Konstruktion (vgl. Kapitel 3)	83
5.2.2	Wartung und Ersatzteile	83
5.2.3	Synchronisierung	83
5.2.4	Erregung im Netzverbund	84
5.2.5	Erregung im Inselbetrieb (Kapitel 4)	84
5.2.6	Regelung von U und f im Inselbetrieb	84
5.2.7	Wirkungsgrad	84
5.2.8	Schleuderdrehzahl	85
5.2.9	Trägheit	85
5.3	**Vergleich der Investitionskosten**	85

5. Vergleich zwischen Synchron- und Asynchron-Generator

Um eine Anschaffungsentscheidung zwischen einem Asynchron- oder Synchron-Generator zu treffen, müssen zuerst einmal die Qualitätsanforderungen an die eingespeiste Energie geklärt werden.

Die Wahl hängt also nicht nur vom Preis, sondern auch von technischen Grössen, besonders bezüglich der Regelungsmöglichkeiten der Spannung und der Frequenz ab, die wiederum von der Durchflussregelung der Turbine beeinflusst werden.

5.1 Qualität der elektrischen Energie

Die Nennspannung und -frequenz verschiedener Verbraucher sind für möglichst konstante Werte ausgelegt. Elektrische Geräte tolerieren jedoch meist Spannungsschwankungen von ±10%.

Die Folge für Widerstände (Glühbirnen, Heizkörper etc.) von Spannungsschwankungen sind jedoch eine Verkürzung der Lebensdauer.

Motoren und Transformatoren sind ebenfalls empfindlich auf Spannungs- und Frequenzschwankungen. Das Drehmoment einer Asynchronmaschine z.B. ändert sich mit dem Quadrat der Speisespannung (Kapitel 3), und die Reaktanz von Induktivitäten und Kapazitäten ändert sich proportional (bzw. umgekehrt proportional) mit der Frequenz (Kapitel 2), was bei Wicklungen (Trafos) eine Stromerhöhung bei einer Frequenzabnahme zur Folge hat.

Verbundnetze haben eine sehr konstante Frequenz von 50Hz bzw 60Hz. Die Spannung beträgt 415/230V mit einer im Jahr 2006 angestrebten Toleranz von ±10%, obwohl die heute erlaubte Toleranz -10% bis +6% beträgt.

Speist ein Generator ein Inselnetz, muss den Spannungs- und Frequenzschwankungen gebührend Beachtung geschenkt werden. Die Schwankungsgrenzen müssen im selben Bereich der öffentlichen Netze liegen.

5.2 Technische Vergleichskriterien

Der Vergleich beruht auf Erwägungen der Konstruktion, des Unterhalts, des Erregungssystems und des Regelungssystems. Jeder dieser Punkte muss in bezug auf die zutreffenden Prioritäten bewertet werden, damit eine optimale Wahl getroffen werden kann.

5.2.1 Konstruktion
(vgl. Kapitel 3)

- Asynchron-Maschine:
  Die Käfigankerkonstruktion ist einfach und robust und somit zuverlässig. Diese Maschinen werden für kleine und mittlere Leistungen in grossen Stückzahlen gefertigt.

- Synchron-Maschinen:
  Ausser bei Permanenterregung benötigt sie DC-gespiesene Ankerwicklungen. Dies geschieht entweder aus einer externen Quelle über Schleifringe und Kohlebürsten oder über einen „rotierenden Gleichrichter“ und einer integrierten Erregermaschine.

5.2.2 Wartung und Ersatzteile

- Asynchron-Maschine:
  Die Wartung ist minimal. Ersatzteile sind durch die weite Verbreitung dieser Maschine meist immer erhältlich.

- Synchron-Maschinen:
  Wartungsarbeiten sind wahrscheinlicher, v.a. für Kohlebürsten, Dioden und Erregerwicklungen. Ersatzteile können schwer erhältlich sein aufgrund der geringen Verbreitung, z.B. in Entwicklungsländern.

5.2.3 Synchronisierung

- Asynchron-Maschine:
  Nicht nötig. Beim Zuschalten entsteht jedoch eine Stromspitze, deren Dauer vom Schlupf beim Schalten abhängt.

- Synchron-Maschinen:
  Für das Parallelschalten ist eine Synchronisiervorrichtung (Synchronoskop) notwendig (vgl. Kapitel 4).
  Für sehr kleine Maschinen (<1kW) kann man darauf verzichten.

5.2.4 Erregung im Netzverbund

Spannung und Frequenz sind durch das öffentliche Netz starr vorgegeben.

- Asynchron-Maschine:
  Die Erregungsblindleistung wird vom Netz bezogen. Grundsätzlich ist daher keine Kompensation erforderlich. Da jedoch Blindleistung ebenfalls bezahlt werden muss, ist es kostengünstiger, die Maschine auf einen Leistungsfaktor von ca. 0.9 bei Nennleistung mit Kapazitäten zu kompensieren (vgl. Kapitel 3 & 4).

- Synchron-Maschinen:
  Der Leistungsfaktor kann einfach über den Erregerstrom nachgestellt werden. Dieser Strom wird entweder vom Netz bezogen oder mit der eingebauten Erregermaschine erzeugt. Die Erregung kann auch fest eingestellt werden, womit sich aber ein schlechterer Wirkungsgrad und Blindleistungsbezug bei Teillast ergibt. Auch hier erweist sich eine Regelung (Leistungsfaktorkompensation) meistens als kostengünstiger.

5.2.5 Erregung im Inselbetrieb (Kapitel 4)

- Asynchron-Maschine:
  Über Erregerkapazitäten
  Der Leistungsfaktor der Lasten muss konstant und minimal bleiben! Gibt es überkompensierte induktive Lasten, führt dies zu gefährlichen Überspannungen im Netz.

- synchron Maschinen:
  Der Erreger wird über den Spannungsregler vom Stator gespeist (eventuell über eingebaute Erregermaschine).

5.2.6 Regelung von U und f im Inselbetrieb

- **mit Durchflussregelung**

  In diesem Fall wird die **Frequenz** über die Drehzahl geregelt, also über den Durchfluss.

  Für die **Spannungsregelung** (=Erregungsänderung):

  – Asynchron-Maschine:

    Die Erregungsänderung geschieht hier über Zu- und Wegschalten von Kondensatoren. Oft genügen zwei Werte, um die Spannung im 10%- Toleranzband zu halten. Die Schaltung erfolgt über Spannungsrelais.

  – Synchron-Maschinen:

    Über den Erregerstrom und einen Spannungsregler.

- **ohne Durchflussregelung**

  Die **Frequenz- und Spannungsregelung** geschieht mittels Ballaststeuerung (vgl. Kapitel 4):

  a) wenn der Lastfaktor konstant ist

    – Asynchron-Maschine:

      ein Kapazitätswert genügt.

    – Synchron-Maschinen:

      Spannungsregler ist nicht erforderlich.

  b) wenn der Lastfaktor sich ändert

    – Asynchron-Maschine:

      Wie oben vorgeschlagen, sind zwei Kapazitätswerte vorzusehen, die so bemessen sind, dass die Spannung im Toleranzband bleibt. Die Schaltung erfolgt über Spannungsrelais.

    – Synchron-Maschinen:

      Über den Erregerstrom und einen Spannungsregler.

5.2.7 Wirkungsgrad

- Asynchron-Maschine:
  Sowohl der Wirkungsgrad als auch der Leistungsfaktor fallen bei Teillast stark ab. Der Wirkungsgrad ist durchweg tiefer als bei der Synchron-Maschine.

- Synchron-Maschinen:
  Guter Teillastwirkungsgrad.

5.2.8 Schleuderdrehzahl

- Asynchron-Maschine:
  übliche Werte sind
  – 4polige Maschine:$n_{max} \approx 2n_N$
  – 2polige Maschine:$n_{max} \approx 1.2n_N$

- Synchron-Maschine:
  Muss je nach Turbinentyp spezifiziert werden. Hohe Schleuderdrehzahlen verteuern die Maschine.

5.2.9 Trägheit

- Asynchron-Maschine:
  Klein. Ein Schwungrad kann nötig sein, um Drehzahlschwingungen aus Lastsprüngen zu dämpfen oder die Drehzahlbeschleunigung und damit Druckstösse zu verkleinern.

- Synchron-Maschine:
  Gross.

5.3 Vergleich der Investitionskosten

Um einen Investitionsentscheid zu fällen, dürfen nicht nur die Kaufpreise von Generatoren verglichen werden, sondern das Gesamtsystem (Investition in Spannungs- & Frequenzregler, Erregung etc.), Wartungskosten sowie die Produktionsunterschiede müssen berücksichtigt werden.

Netzverbundbetrieb

Bis 50kVA...100kVA sind Asynchron-Maschinen kostengünstiger.

Darüber (>100kVA) werden die Preise zwischen den beiden Typen vergleichbar, zudem sind asynchron Maschinen dieser Grösse schwer erhältlich.

Inselbetrieb

Stellt man an die Spannung und Frequenz keine grossen Ansprüche, ist die Asynchron-Maschine die kostengünstigste Wahl bis 25kVA (vgl Kapitel 4 und 5.2.6), obwohl in dieser Anwendung kleine Synchron-Maschinen weiter verbreitet sind.

Im Zusammenspiel mit speziellen Reglern (Ballastregler) ist eine Asynchron-Maschine eine interessante Option, doch sind solche Regelsysteme in ansprechender Qualität auf dem Markt kaum erhältlich.

6. Informationen zum Generatorpflichtenheft

6.1	**Spezifikationen, die der Lieferant kennen muss**	89
6.1.1	Allgemeine Informationen	89
6.1.2	Generatorspezifikationen	89
6.1.3	Spezielles Zubehör	89
6.2	**Beilagen zum Angebot**	90
6.3	**Verifikation der Leistung**	90

6. Informationen zum Generatorpflichtenheft

Üblicherweise wird der Generator vom Turbinenhersteller mitgeliefert, was den Vorteil einer klaren Verantwortungsabgrenzung hat. Der Turbinenhersteller trägt damit die Gesamtverantwortung für Wirkungsgradgarantien und die Mechanik der Erzeugungsgruppe.

Dies enthebt den Kunden jedoch nicht davon, selbst Qualitäts-/Preisvergleiche verschiedener Generatorhersteller anzustellen und, falls nötig, den Generator seiner Wahl vom Turbinenlieferanten zu verlangen. Ein Direktkauf des Generators ist auch möglich, vor allem wenn die Turbine vom Generator getrennt ist (z.B. wenn ein Riemenantrieb vorgesehen ist).

6.1 Spezifikationen, die der Lieferant kennen muss

6.1.1 Allgemeine Informationen

Geländeangaben

– Topologie
– Höhenlage

Betriebsart

– Netzverbund- oder Inselbetrieb

Betriebsbedingung

– Dauer- oder zeitweiser Betrieb
– max. Umgebungstemperatur im Krafthaus
– Klima (Feuchtigkeit, Kondensation, Staub...)

Bemerkung:
Über 1000m Höhe oder 40°C muss die Nennleistung reduziert werden, um der geringeren Kühlung Rechnung zu tragen.

Turbine

– Typ (Pelton, Francis, Durchström, Kaplan ...)
– Ausrichtung der Erzeugergruppe
– horizontale oder vertikale Achse
– Kompakteinheit, Direktkopplung, mech. Übersetzung

6.1.2 Generatorspezifikationen

Typ

– synchron oder asynchron

Angaben zur Turbine

– mech. Leistung an der Welle
– Drehzahl
– Schleuderdrehzahl und Dauer

Angaben zur Netzverbindung

– Nennspannung und Spannungstoleranzen
– Anzahl Phasen
– Frequenz
– Stern- oder Dreieckschaltung

Angaben zur Umgebung

– Isolationsklasse
– IP Schutzklasse

Angaben zur Montage

– Wellenende normal oder verlängert (zur Aufnahme des Turbinenrades)
– Zweites Wellenende (z.B. zur Aufnahme des Schwungrades, wobei Gewicht und Durchmesser angegeben werden müssen)
– Lagertyp: Gleit- oder Kugellager
– Schmierung: Fett oder Öl
– Lebensdauer der Lager
– verstärkte Lager abhängig durch Zusatzbelastungen von z.B. Zugspannung bei Riemenabtrieb, Gewicht eines Turbinenrades/ Schwungrads; diese Lasten sind anzugeben!).

6.1.3 Spezielles Zubehör

- Geschwindigkeitssensor (zur Drehzahlmessung, z.B. für die Erkennung der Überdrehzahl oder Zuschaltdrehzahl bei Asynchron-Generatoren).
- Temperatursensor in den Wicklungen (Schutz vor Übertemperatur)
- Temperatursensor in den Lagern (Schutz vor Lagerschäden)
- Vibrationssensor in den Lagern (Schutz vor Lagerschäden)

- Leistungsfaktorregler im Netzverbund (Synchron-Maschine)
- Spannungsregler im Inselbetrieb (Synchron-Maschine)

6.2 Beilagen zum Angebot

- Hersteller, Typ und Kennzeichen der Maschine
- Spezifikationen und techn. Beschreibung (nach 6.2)
- Gehäuse Masse/Auslegung und Gewicht
- Trägheitsmoment des Rotors
- Garantierter Wirkungsgrad über den gesamten Leistungsbereich
- Garantierter Leistungsfaktor über den gesamten Leistungsbereich
- Weitere wichtige Daten wie Leerlauf- und Kurzschlussstrom.

6.3 Verifikation der Leistung

Manche Hersteller verfügen über einen Versuchsstand, der Tests im Beisein des Kunden erlauben. Von dieser Möglichkeit ist Gebrauch zu machen, da genaue Generatorwirkungsgradmessungen Auseinandersetzungen mit dem Turbinenhersteller bei der Anlagenabnahme vermeiden helfen. Die Abnahmetests erlauben nur eine Messung des Gesamtwirkungsgrades (Turbine, Getriebe und Generator). Die genaue Kenntnis des Generatorwirkungsgrades erlaubt die exakte Bestimmung des Turbinenwirkungsgrades.

7. Schutz und Sicherheit von elektrischen Installationen

7.1	**Rechtliche Grundlagen**	93
7.2	**Gefahren der Elektrizität**	96
7.2.1	Auswirkungen von elektrischem Strom im menschlichen Körper	96
7.2.2	Personenschutz	97
7.2.3	Sicherheit von Gegenständen	98
7.2.4	Zusätzliche Schutzmassnahmen	98
7.3	**Installationsschutz**	100
7.3.1	Allgemeines	100
7.3.2	Selektivität von Überstromsicherungen	100
7.4	**Schutz von rotierenden Maschinen**	102
7.4.1	Überlast	102
7.4.2	Überstrom	103
7.4.3	Verbundbetrieb	103
7.4.4	Behandlung des Sternpunktes	103
7.4.5	Schutz vor Isolationsfehlern	103
7.4.6	Spannungsregelung	105
7.4.7	Potentialausgleich	105
7.4.8	Blitzschutz	105
7.4.9	Liste von Steuerung, Schutz- und Messgeräten	106
7.4.10	Liste von Not-Aus-Bedingungen	108
7.5	**Rechtliche Bestimmungen**	109
7.5.1	Vorlagepflicht	109
7.5.2	Definitionen	111
7.5.3	Kriterien der Risikoerhöhung durch eine Produktionsanlage	112
7.5.4	Autorisiertes Installationspersonal	112
7.5.5	Autorisierte Kontrolleure	112
7.5.6	Periodische Kontrollen	112

7. Schutz und Sicherheit von elektrischen Installationen

7.1 Rechtliche Grundlagen

Für die Ausführung, Änderung, den Unterhalt und die Überwachung kleiner Energieerzeugungsanlagen gelten die entsprechenden Verordnungen, und die geltenden technischen Regeln müssen beachtet werden.

Oft kennen Betreiber oder Besitzer kleiner Anlagen als Laien weder die Gefahren noch die Vorschriften. Deshalb sind Installateure verpflichtet, ihre Kunden über Gefahren und die aus den rechtlichen Vorgaben abgeleiteten geltenden Vorschriften zu unterrichten.

angewandt auf elektrische Energieerzeugungsanlagen		
Bundesgesetz betreffend elektr. Schwach- und Starkstromanlagen	SN 734.0	
Verordnung über elektr. Starkstromanlagen	SN 734.2	
Niederspannungsinstallation Verordnung	SN 734.27	
Verordnung über elektr. Niederspannungserzeugnisse	SN 734.26	
Verordnung über das Plangenehmigungsverfahren für Starkstromanlagen	SN 734.25	
Verordnung über das Eidg. Starkstrominspektoriat	SN 734.24	
Mitteilungen des eidg. Starkstrominspektorates		
Parallelschaltung von Niederspannungs-Energieerzeugungsanlagen mit Stromversorgungsnetzen	STI 219.1081	
Niederspannungs-Energieerzeugungsanlagen	STI 229.0987	
Sicherheit und Vorlagepflicht kleiner Energieerzeugungsanlagen	STI 232.1289	
Technische Normen des SEV		
Niederspannungsinstallationsnorm (NIN)	SN SEV 1000-1, 2 & 3	

Zusätzlich gelten die Normen für Elektrizität und Sicherheit aus dem Gesetz für Unfallversicherungen. Artikel 82 (RS 832.20) verpflichtet den Arbeitgeber, alle Betriebs-unfälle und -krankheiten zu verhindern, indem er alle Vorkehrungen trifft, die sich erfahrungs-gemäss als nötig erwiesen haben, die technisch machbar und die der Situation angepasst sind.

Der Anlagenbauer minimiert manchmal nur die Kosten, was die Betriebssicherheit beschneidet und die Risiken für das Betriebspersonal erhöht.

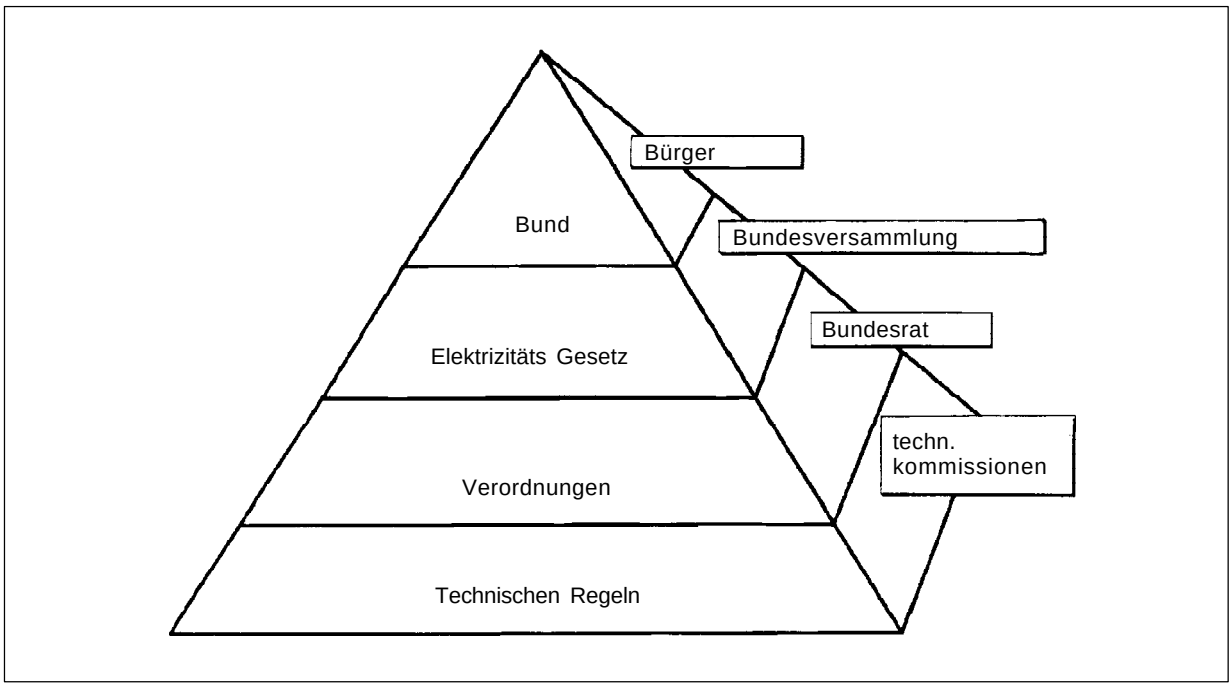


Abbildung 7.1: Normen der Elektrizität

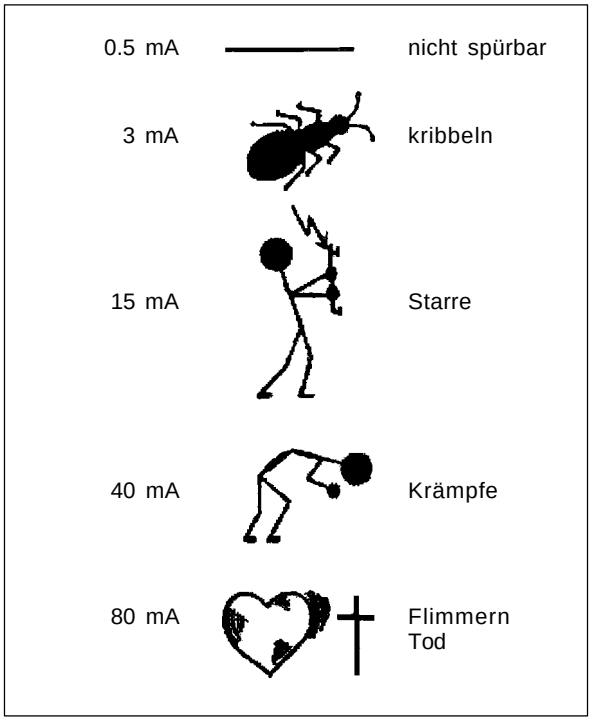


Abbildung 7.2: Physiologische Effekte von Strom bei 50Hz

7.2 Gefahren der Elektrizität

7.2.1 Auswirkungen von elektrischem Strom im menschlichen Körper

Wenn elektrischer Strom durch die Muskeln fliesst, ziehen sie sich zusammen. Meistens ist die Verkrampfung so stark, dass es unmöglich ist, einen unter Spannung stehenden Gegenstand wieder loszulassen. Da die Muskeln der Atmungsorgane ebenfalls betroffen sind, verliert das Opfer bald das Bewusstsein. Aus diesem Grund ist es nicht erstaunlich, dass die Techniker, die sich um die Sicherheit kümmern, die brührbaren Teile von elektrischen Installationen mit einer zusätzlichen Isolation versehen.

Der durch den Körper fliessende Strom beeinflusst nicht nur die Muskulatur des Skeletts, sondern auch die Herzmuskulatur (Myokard). Es ist bekannt, dass die Herzfunktion auf einem elektrischen bzw. einem elektrochemischen Ablauf beruht. Schwache, vom kardioregulierenden Zentrum ausgehen Stromimpulse veranlassen den Myokard, sich in regelmässigen Abständen zusammenzuziehen. Ein von aussen kommender Stromstoss, der den Myokard durchfliesst, stört den Herzrhythmus. Er verursacht Herzkammerflimmern, d.h. unregelmässige krampfartige Zuckungen einiger Myokardfasern. Da in diesem Fall praktisch ein Unterbruch des Blutkreislaufs eintritt, befindet sich das Opfer in Lebensgefahr.

Der durch den Körper fliessende Strom hat auch thermische Auswirkungen. Wenn der Strom durch eine kleine Fläche in den Körper eindringt, steigt die Temperatur an diesem Ort beträchtlich, so dass eine kleine Brandwunde entsteht. Sehr oft sind solche Wunde schwerwiegender, als zuerst angenommen wird, weil die Verbrennungen tief in die Hautschicht eindringen, so dass durch das zerstörte Haut- und Muskelgewebe Infektionen entstehen.

Der Widerstand des menschlichen Körpers in bezug auf den elektrischen Strom beträgt zwischen 750 und 1'000 Ohm. Wenn eine Person einen Phasenleiter in Niederspannungsverteilungsanlagen von 400/230 Volts anfasst, ist sie einer Spannung von 230 Volt ausgesetzt. Der Strom, der durch eine unter 230 Volt stehende Person hindurchfliesst, beträgt zwischen 230 mA und 300 mA.

Nur ein Fehlerstromschutzschalter (FI Schalter) erkennt solche lebensgefährliche Situationen (Figur 7.3). Besteht ein Isolationdefekt, fliesst ein Fehlerstrom im Schutzleiter (PE). Dies bedeutet, dass sich der Phasen- und Neutralleiterstrom nicht mehr aufheben. Diese Stromdifferenz veranlasst den Fehlerstromschutzschalter die Zuleitung zu unterbrechen.

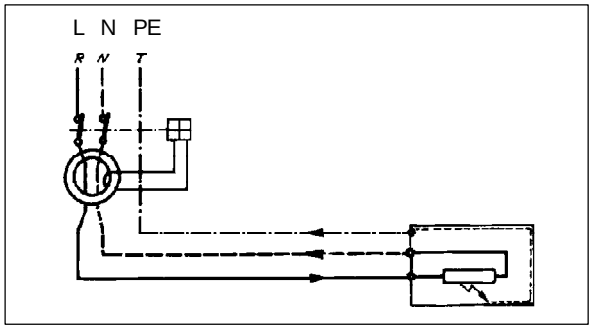


Abbildung 7.3: Schutz mit FI Schalter

7.2.2 Personenschutz

Elektrische Starkstrominstallationen und die angeschlossenen Apparate müssen entsprechend den Verordnungen und den geltenden technischen Richtlinien ausgeführt, abgeändert, unterhalten und überwacht werden. Sie dürfen weder bei ordnungsgemässem Betrieb bzw. Verwendung noch bei vorhersehbaren Störungen Personen oder Dinge gefährden. Falls die Weisungen nichts vorschreiben, hat man sich an gängige technische Regeln zu halten.

Es gelten die internationalen technischen Normen (IEC) oder, falls fehlend, die technischen Normen des SEV oder die technischen Vorschriften der PTT.

Fehlen entsprechende technische Normen, sind vorhandene Normen sinngemäs anzuwenden. Im Zweifelsfall entscheidet die zuständige Kontrollstelle. Sie konsultiert vorgängig andere betroffene Kontrollstellen.

Prinzipien des Personenschutzes

Alle Installationen müssen so ausgelegt und ausgeführt werden, dass keine gefährlichen Ströme beim Berühren fliessen können. Für Bedienungselemente gilt dies sogar bei Isolationsfehlern.

Dieses Prinzip gilt als erfüllt, wenn die Betriebsspannungen 50V nicht überschreiten. Für Installationen über 50V gilt es als erfüllt, wenn alle unbeabsichtigten Berührungen mit spannungsführenden Elementen ausgeschlossen und folgende Bedingungen erfüllt sind:

– Kontaktstrom bei 50Hz übersteigt nicht 0.5mA
– Fehlerspannung übersteigt nicht 50V
– Fehlerspannungen über 50V stehen nicht länger als 5s an.

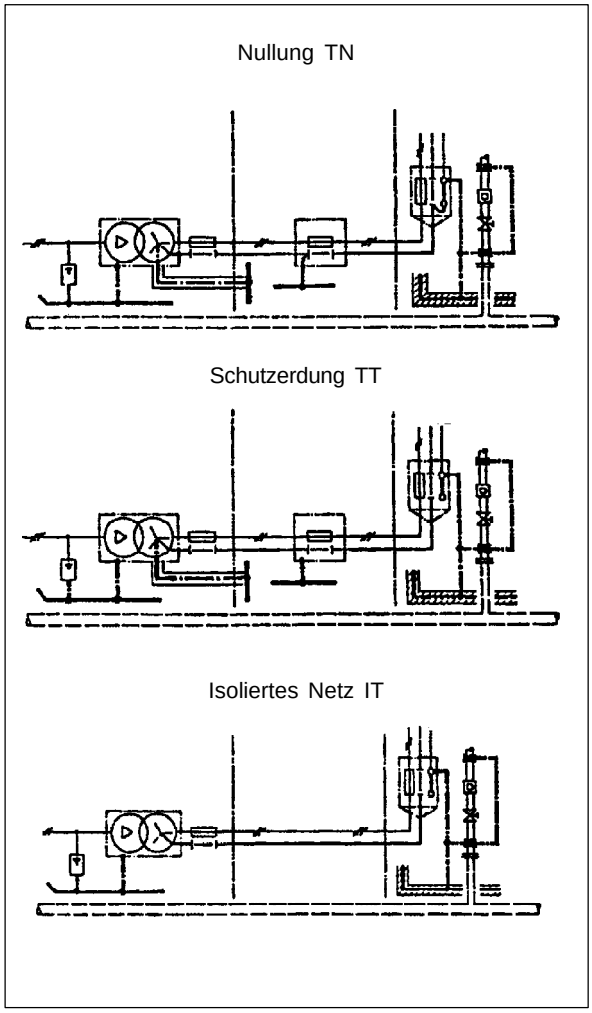


Abbildung 7.4: Schutzarten

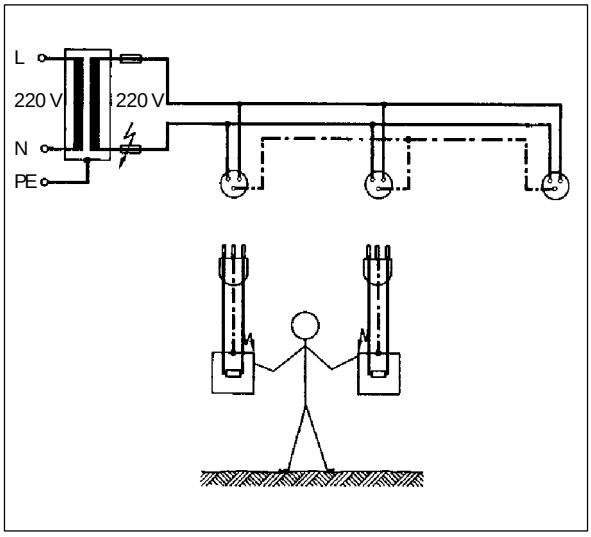


Abbildung 7.5: Schutztrennung

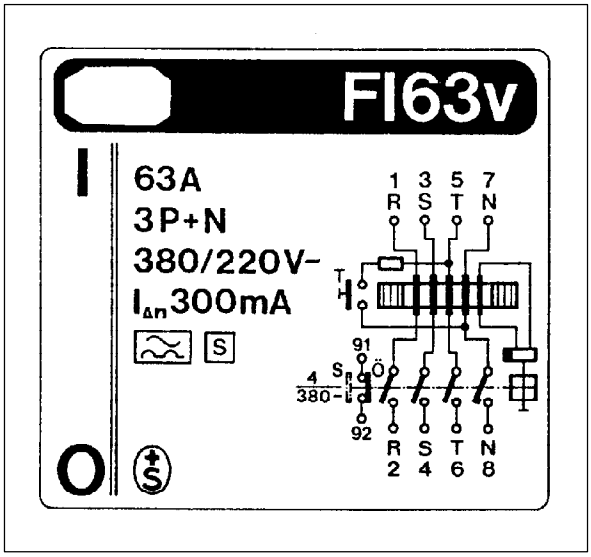


Abbildung 7.6: Anschluss eines FI Schalters

Schutzmassnahmen

Um die Anforderungen des Personenschutzes zu erfüllen, sind die folgenden Schutzmassnahmen zu berücksichtigen:

– Genügende Isolation, um den Kontaktstrom auf einen ausreichend kleinen Wert zu begrenzen.
– Die Nullung/ Erdung, um die Fehlerspannungen zu minimieren, hat einen genügend kleinen Widerstand (Figur 7.4).
– Die Nullung/ Erdung oder die entsprechende Schutzeinrichtung minimiert die Dauer unzulässiger Fehlerspannungen oder -ströme (Figur 7.6 und 7.7).
– Potentialtrennung gefährlicher Stellen (Figur 7.5).

7.2.3 Sicherheit von Gegenständen

Installationen müssen ausgelegt, ausgeführt und verwendet werden, ohne dass vorhersehbare Erwärmung, Flammen und Lichtbogen die Umgebung entzünden können. Dies muss selbst im vorhersehbaren Fall eines Materialdefektes, einer Fehlbedienung oder einer Vernachlässigung gewährleistet sein.

Es bedarf nur 0.5A Strom, um weiches, feuchtes Holz zu entzünden!

7.2.4 Zusätzliche Schutzmassnahmen

Grundsätzlich ist der Schutz vor gefährlichen Spannungen durch die Schutzerdung und die Verbindung aller leitenden Gehäuse mit dem Potentialausgleich und dem Fundament gewährleistet. Die Nullung ist anwendbar, wenn der Schutzleiter (PEN) am Eingang mit dem Erder verbunden wird. Dies zwingt das Gebäudepotential auf das Erdpotential (Figur 7.4).

Im Falle eines Isolationsfehlers in einem Gerät oder einer Installation reicht manchmal der Fehlerstrom nicht aus, um die Leitungssicherungen auszulösen. Solche Fehler können über Schutzschalter erkannt werden:

– Fehlerstrom FI (Abb. 7.6)
– Fehlerspannung FU (Abb. 7.7)
– Isolationsüberwachung

Schutz durch Potentialtrennung wird für begrenzte Anlagenteile angewandt und wird durch einen Trenntransformator erreicht. Um einen vollständigen Schutz zu erhalten, darf jeweils nur ein Gerät an einen Transformator angeschlossen werden. Sind mehrere Geräte an denselben Transformator angeschlossen, kann der Personenschutz nur gewährleistet werden, wenn alle berührbaren leitenden Teile der Geräte leitend verbunden werden (Abb. 7.5).

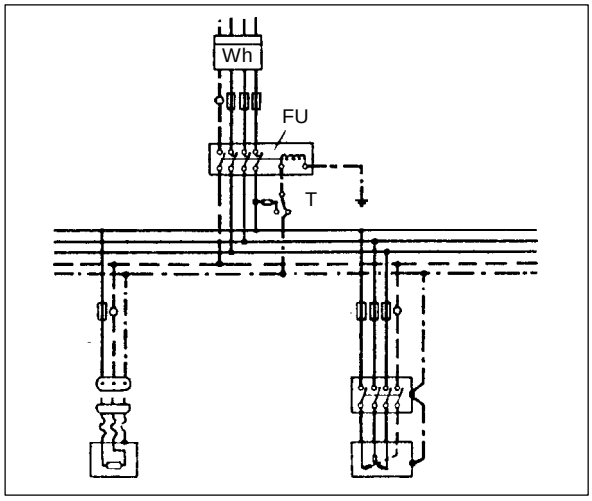
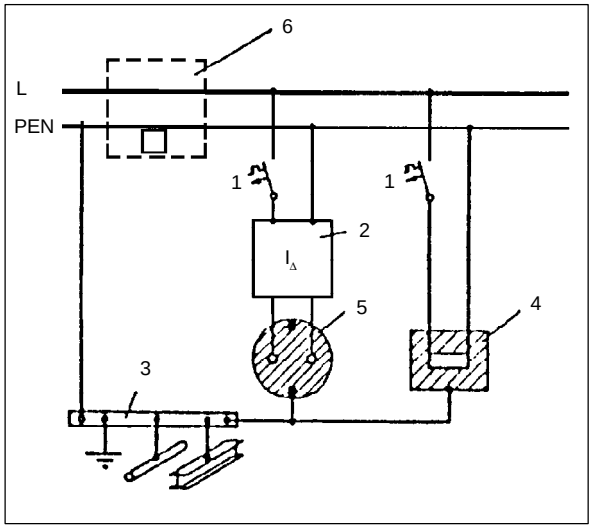


Abbildung 7.7: Anschluss eines FU Schalters



Figur 7.8: Prinzip der Dreifach-Sicherheit durch Nullung und zusätzlichen Schutzschalter

1. *Vorrichtung zum Schutz vor Überstrom, d.h. um die Bedingungen der Schutzerdung zu erfüllen.*
2. *Fehlerstromschutzschalter als zusätzlicher Schutz für einen Fehlerstrom I<30mA*
3. *Potentialausgleich*
4. *Geerdetes Gerät, fest mit PE verbunden*
5. *Geerdete Steckdose mit Zusatzschutz*
6. *Fehlerstromschutzschalter als Brandschutz I<300mA*

7.3 Installationsschutz

7.3.1 Allgemeines

Alle Teile einer Starkstrominstallation müssen den thermischen und mechanischen Beanspruchungen im Normalbetrieb sowie im Erdschlussfall widerstehen.

Elektrische Installationen müssen dafür ausgelegt werden, dass Störungen und Beschädigungen durch Lichtbogen minimal sind und nichts entzündet werden kann.

Da Lichtbogen Personen unmittelbar gefährden, sind besondere Schutzmassnahmen vorzusehen (Abdeckungen..).

Auslösung

In Starkstrominstallationen sind Schutzvorrichtungen, Auslöser, vorzusehen die Beschädigungen durch Über-, Kurzschluss- und Erdschlussströme minimieren.

Anlagenänderungen

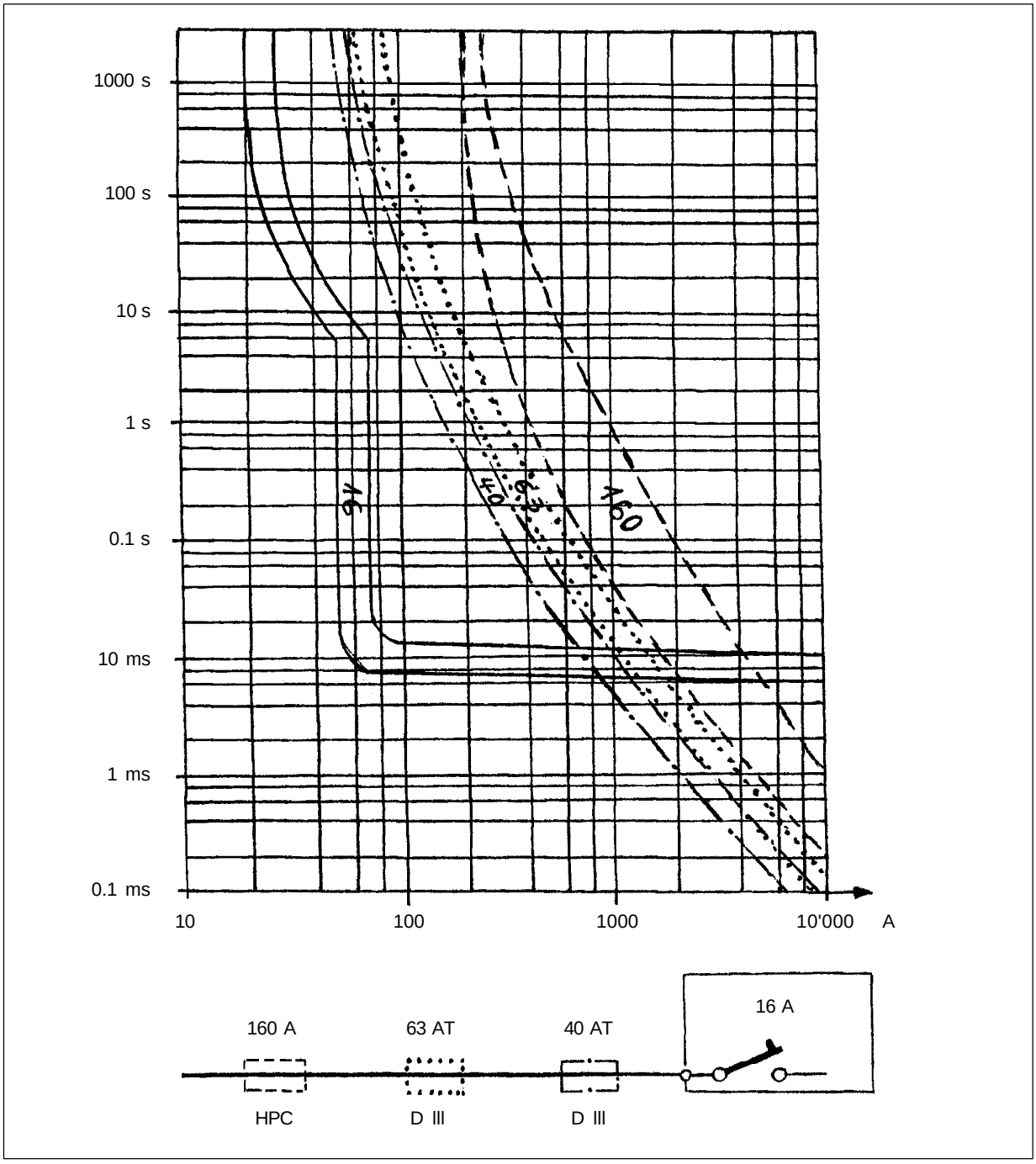
Falls sich aufgrund einer Erweiterung, Umrüstung, Wiederinbetriebssetzung oder anderer Arbeiten die Installation verändert, müssen die Überstromschutzeinrichtungen unverzüglich nach Bedarf nachgerüstet werden.

7.3.2 Selektivität von Überstromsicherungen

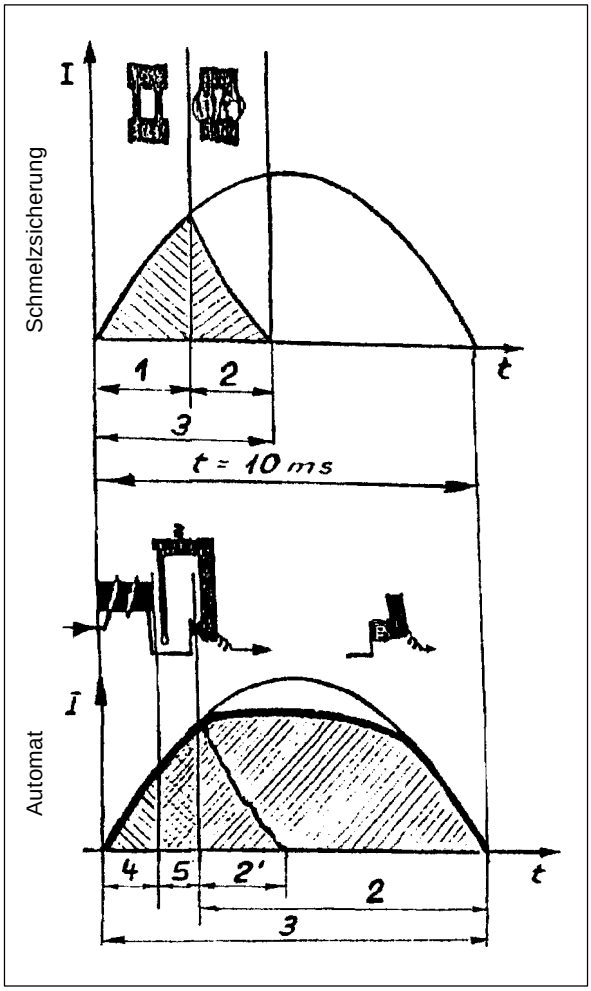
Folgende Überstromsicherungen kommen zur Anwendung

- Schmelzsicherungen
- Sicherungsautomaten für Leitungen
- Sicherungsautomaten für Motoren

Die Nennspannung der Überstromsicherung muss wenigstens gleich der Nennspannung des zu schützenden Netzes sein.



Figur 7.9: Die Sicherungen 40 und 63A sind im Bereich 0.1ms bis 0.1s nicht selektiv, da sich ihr Streubereich überschneidet.



Figur 7.10: Unterbrechungszeit für Lichtbogen
1. Schmelzzeit
2. Lebensdauer Lichtbogen
3. Lebensdauer Lichtbogen HPC
4. Gesamte Trennzeit
5. Magnetisierungszeit
6. mech. Verzögerung

In der Regel müssen der Nennüberstrom und die Ansprechverzögerung wie folgt gewählt werden:

– Keine Auslösung weder im Anlauf noch im Normalbetrieb.
– Im Überstromfall wird soweit möglich nur der defekte Teil getrennt.
– Der Auslösestrom stimmt mit der Stromtragfähigkeit der zu schützenden Leitung überein.

7.4 Schutz von rotierenden Maschinen

Eine als Generator betriebene Maschine muss andere Schutzanforderungen erfüllen denn als Motor. Sie muss die Energieversorgung sicherstellen und darf sich nur abtrennen, falls die Schutzvorrichtungen bis hin zum Verbraucher während der Regelzeit nicht angesprochen haben. Der Überstrom darf jedoch keine gefährlichen Übertemperaturen erzeugen, die die Isolation gefährden könnten.

Die empfohlene Schutzgrenzwert sind die Scheingrössen U, I, wie auf den Instrumenten angezeigt.

7.4.1 Überlast

Ein Generatorüberlastschutz ist nur mit Thermorelais möglich. Die Auslösecharakteristik muss den Anforderungen des Generatorherstellers genügen.

Der thermische Schutz mittels Schmelzsicherungen ist nicht möglich, da man die Selektivität gegenüber den Sicherungsautomaten des Verbrauchers verliert. Wählt man den Auslösestrom gleich dem Generatornennstrom, brennt die Sicherung bei verbraucher-seitigen Einschaltströmen durch. Bei gleichem Strom lösen Schmelzsicherungen rascher aus als Automaten.

(Bsp Abb. 7.11 Icc 6 x In -> Schmelzsicherung ca 0.4s, Automat ca 5s)

7.4.2 Überstrom

Überstromschutz kann mit Schmelzsicherungen oder Schützen mit einstellbarer Stromschwelle und Verzögerungszeit erreicht werden. Die zweite Variante erlaubt, die Selektivität gegenüber den Verbrauchersicherungen einzustellen.

Für einen Verbundbetrieb muss der Generatorschutz für einen Fehler zwischen dem Generator und der Schutzeinrichtung funktionieren. In diesem Falle fliesst der Kurzschlussstrom aus dem Netz!

7.4.3 Verbundbetrieb

Im Netzparallelbetrieb muss sich die Anlage sicher und augenblicklich vom Netz trennen, sobald die Netzspannung ausfällt, und erst wieder zuschalten, wenn die Netzspannung zurückkehrt. Dies muss auch erfüllt werden, wenn der spannungsfreie Netzteil gespiesen werden könnte (Schwebelast).

7.4.4 Behandlung des Sternpunktes

Der Sternpunkt eines Asynchron-Generators muss wie beim Motor isoliert bleiben.

Bei Synchron-Generatoren wird empfohlen, den Sternpunkt im Parallelbetrieb zu trennen. Damit werden störende Harmonische (3.) unterdrückt. Im Inselbetrieb muss der Sternpunkt jedoch zugeschaltet werden. Das Öffnen des Netzschalters ist zu verriegeln, bis der Sternpunktschalter geschlossen ist. Eine 33% Asymmetrie der Phasenleistung kann 10% Überspannungen erzeugen, solange der Sternpunkt noch offen ist.

7.4.5 Schutz vor Isolationsfehlern

Für grössere Generatoren wird eine Differenzmessung zwischen dem Strom im Sternpunkt des Generators und den Phasenströmen an der Übergabestelle gewählt. Wahlkriterium ist der Wert des Generators und die Zusatzkosten für diese Einrichtung.

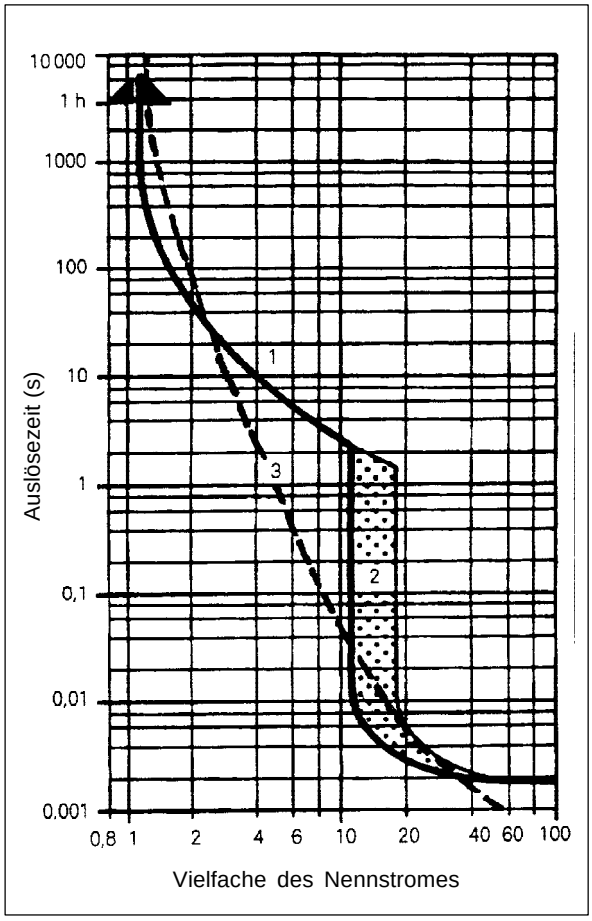


Abbildung 7.11: Zeit/ Strom Charakteristik
1. *Auslösezeit aufgrund des thermischen Auslösers bei I/Ieff*
2. *Auslösezeit aufgrund des magnetischen Auslösers bei I/Ieff*
3. *Auslösezeit einer Schmelzsicherung bei I/In*

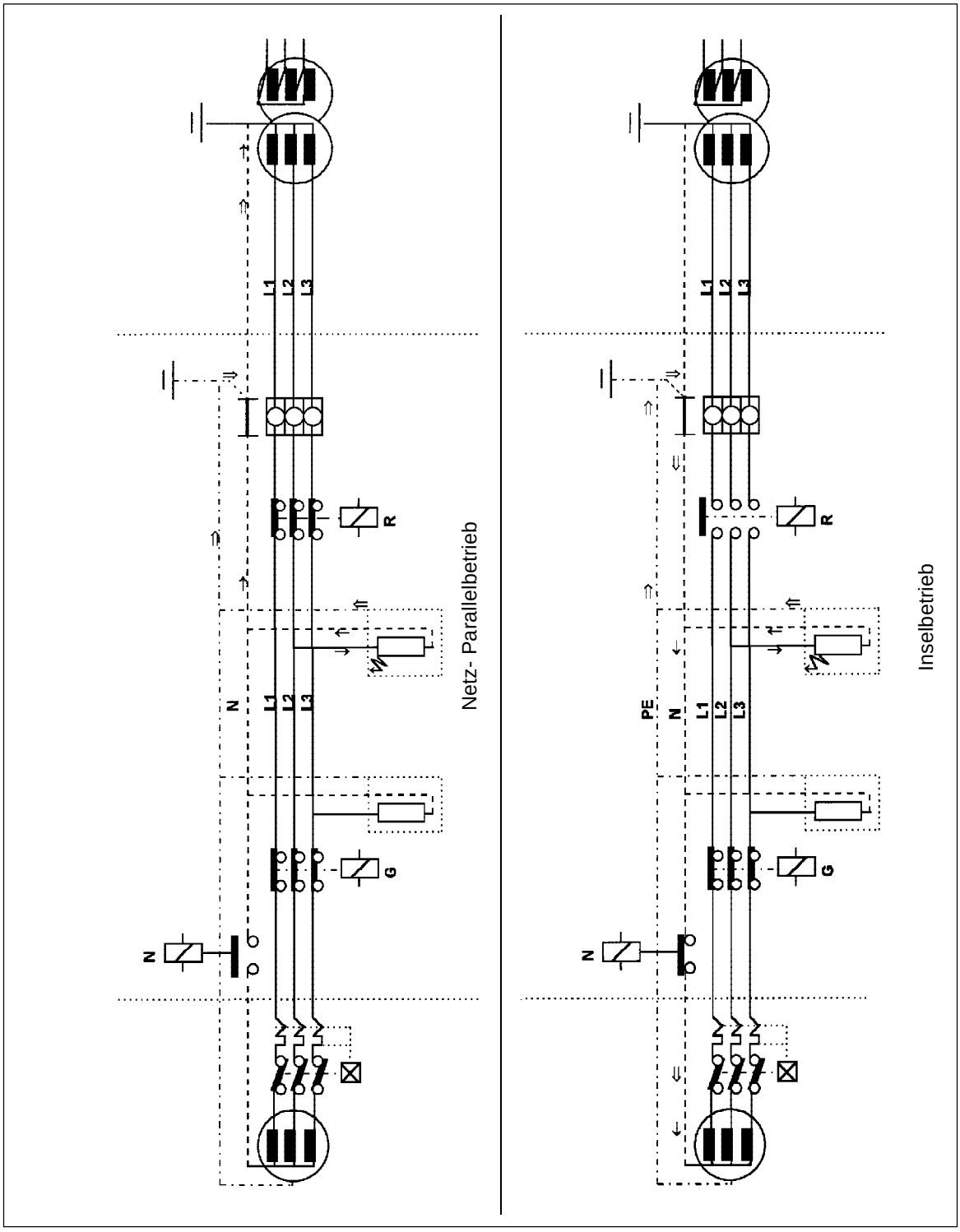


Abbildung 7.12: Behandlung des Sternpunktes

Für kleine Asynchron-Generatoren bis zu einem Nennstrom von 63A kann die Isolationsüberwachung mittels eines Fehlerstromschutzschalters mit einem Nennauslösestrom von 300mA gemacht werden. Bei einem Isolationsfehler fliesst der Fehlerstrom über die Erde zum Sternpunkt des Transformators, womit die 3 Phasen im Fehlerstromschutzschalter ungleich werden und eine Auslösung erfolgt.

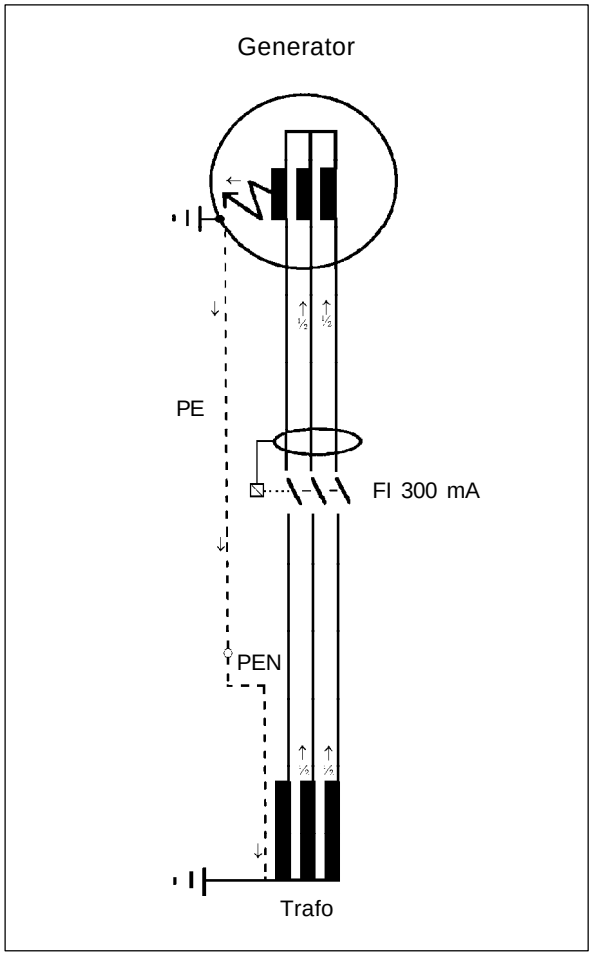


Abbildung 7.13: Schutz bei Isolationsfehlern

7.4.6 Spannungsregelung

Asynchron-Maschine

Die Steuerung einer Asynchron-Maschine ist einfach, und man kann auf Spannungs- und Drehzahlregelung verzichten. Die zur Aufschaltung erforderliche Nenndrehzahl kann gehalten werden, indem die Turbine anfangs eine begrenzte Öffnung anfährt. Nach der Netzaufschaltung fährt die Öffnung der verfügbaren Wassermenge nach. Im Falle eines Netzunterbruchs bricht die Generatorspannung, falls nicht überkompensiert wird, zusammen, und die Maschine geht auf Überdrehzahl, was zu einer Abschaltung führen muss.

Synchron-Maschine

Die Steuerung und Überwachung eines Synchron-Generators umfasst einen Drehzahl- und Spannungsregler sowie eine Synchronisiervorrichtung. Ändert sich die Netzspannung, ändert sich der Leistungsfaktor der Maschine, was zu Überströmen in der Maschine führen kann. Deshalb muss auch der Leistungsfaktor geregelt werden.

7.4.7 Potentialausgleich

Alle leitenden Teile müssen mit dem Potentialausgleich des Gebäudes verbunden werden. Um Beschädigungen der Lager durch Lichtbogen zu verhindern, sind jeweils das Druckrohr vor dem Schliessorgan, die Turbine und der Generator zu verbinden. Diese Verbindungen müssen auch während Revisionsarbeiten erhalten bleiben, um den Personenschutz zu gewährleisten!

7.4.8 Blitzschutz

Abstand, Isolation und Art der Blitzschutzeinrichtungen müssen so geplant und installiert werden, dass Überspannungen weder Risiken noch Schäden verursachen

7.4.9 Liste von Steuerung, Schutz- und Messgeräten

	Generator		
Typ	**asynchron**	**synchron**	
Leistungsbereich	1 bis 500kVA	1 bis 500kVA	> 500kVA
Regelung			
Drehzahl	nein	ja	ja
Spannung	nein	ja	ja
cosφ regelung	ja	ja	ja
Phase (Synchronisierung)	nein	ja	ja
Schutzrelais			
Überlast (Ith)	ja	ja	ja
Überstrom	ja	ja	ja
Über-/Unterspannung	ja	ja	ja
Über-/Unterfrequenz	ja	ja	ja
Rückleistung	ja	ja	ja
Differential	nein	wahlweise	ja
Erdstrom	nein	wahlweise	ja
min. Impedanz	ja	ja	ja
min. Erregung	nein	wahlweise	ja
mech. Überdrehzahl	wahlweise	wahlweise	ja
Instrumente			
Generatorstrom	ja	ja	ja
Generatorspannung	ja	ja	ja
Netzspannung	nein	ja	ja
Wirkleistung (kW)	wahlweise	wahlweise	ja
Blindleistung (kVAr)	wahlweise	wahlweise	ja
Frequenz	nein	ja	ja
Leistungsfaktor	wahlweise	ja	ja
Wirkenergie (kWh)	ja	ja	ja
Blindenergie (kVArh)	wahlweise	wahlweise	ja
Phase (Synchronoskop)	nein	ja	ja
Differenzspannung	nein	ja	ja
Differenzfrequenz	nein	ja	ja
Erregungsstrom	nein	wahlweise	ja
Erregungsspannung	nein	wahlweise	ja
Öffnungsbegrenzung	nein	nein	ja

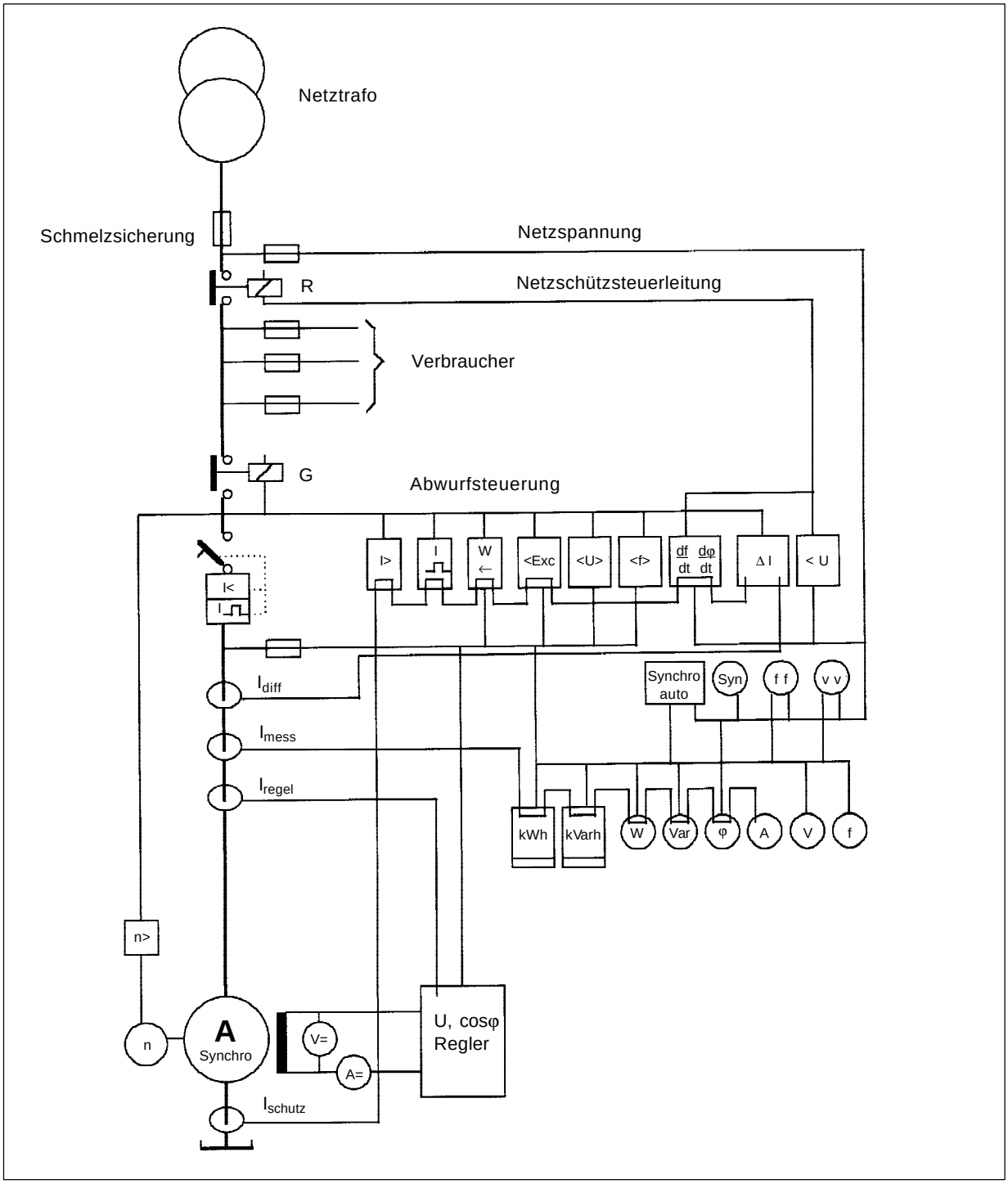


Abbildung 7.14: Generatorschutz

7.4.10 Liste von Not-Aus-Bedingungen

	Generator		
Typ	**asynchron**	**synchron**	
Leistungsbereich	1 bis 500kVA	1 bis 500kVA	> 500kVA
Notstop			
* Handauslösung	ja	ja	ja
Überdrehzahl	ja	ja	ja
kein Wasser	ja	ja	ja
Abschlussorgan zu	nein	nein	ja
Öltemperaturen	-	-	ja
Öldruck	-	-	ja
Ölstand	-	-	ja
* Fehlerstrom	-	wahlweise	ja
* Überlast / -temperatur (Ith)	ja	ja	ja
* Überstrom Icc	ja	ja	ja
* Über-/Unterspannung	ja	ja	ja
* min. Impedanz	ja	ja	ja
* Rückleistung	ja	ja	ja
* Erdstrom	nein	wahlweise	ja
Ausfall Erregung	nein	ja	ja
Erregerüberstrom	nein	wahlweise	ja
Übertemperatur Statorwicklung	wahlweise	wahlweise	ja
Übertemperatur Kühlmittel	wahlweise	wahlweise	ja
Übertemperatur Lager	wahlweise	wahlweise	ja
Hochwasserstand Zentrale	wahlweise	wahlweise	ja
CO_2 Handauslösung	wahlweise	wahlweise	ja
Ausfall Steuerspannungen	ja	ja	ja

* Notstop mit Netztrennung

Jeder Notstop bedingt ein Schliessen des Abschliessorgans. Notschlüsse lassen sich in zwei Kategorien einteilen:
1. Trennen vom Netz und Einschwenken des Strahlablenkers.
2. Schliessen der Düse, Trennen vom Netz, sobald die Düse die Leerlaufstellung erreicht hat, um eine Überdrehzahl zu vermeiden.

7.5 Rechtliche Bestimmungen

7.5.1 VorlagePflicht

Man unterscheidet zwischen:

Melde- und Kontrollpflicht

↓

Selbst wenn die Produktion bei Niederspannung (230/400V) erfolgt und die Einspeisung hausintern mit der hierfür zulässigen Spannung geschieht, unterliegen die Schutzeinrichtungen für die Energie-erzeugungsanlagen nicht alle denselben Bestimmungen. Je nach dem Gefährdungspotential werden verschiedene Kriterien für die Ausführung, Abänderung, Unterhalt und Überwachung angewandt.

und

periodische Kontrollen

↓

siehe Abschnitt 7.5.6 “periodische Kontrollen”

Netzparallelbetrieb 3phasig < 10kVA 1phasig < 3.3kVA	– gleichgestellt den Hausinstallationen – sind nicht vorlagepflichtig, falls sie auf dem Grundbesitz des Betreibers stehen – sind zulassungspflichtig nach der Verordnung über elektrische Niederspannungserzeugnisse (NEV) – benötigen die Anschlussbewilligung des Netzbetreibers – der Anlagenbetreiber ist für die Kontrolle nach NIV verantwortlich
Netzparallelbetrieb 3phasig > 10kVA 1phasig > 3.3kVA	– ungleichgestellt den Hausinstallationen – sind vorlagepflichtig (Abgaben hängen vom Installationswert ab) – sind zulassungspflichtig nach der Verordnung über elektrische Niederspannungserzeugnisse (NEV) – benötigen die Anschlussbewilligung des Netzbetreibers – der Anlagenbetreiber ist für die Kontrolle nach NIV verantwortlich
alle Anlagen für Verbundbetrieb	Produktionsanlagen für elektrische Energie, die in ein Netz einspeisen müssen ausgelegt werden damit sie sich bei Netzausfall automatisch, rasch und sicher vom Netz trennen und erst wieder nach der Spannungsrückkehr aufschalten. Besondere Aufmerksamkeit ist der Maschinenwahl zu schenken, um Nezstörungen zu minimieren. Schutzmassnahmen und Sternpunktbehandlung sind den Vorgaben anzupassen. Der Anschluss ans Verteilnetz braucht die Erlaubnis des Netzbetreibers. Die Anschluss- und Betriebsbedingungen, sowie periodische Kontrollen entsprechen den Vorschriften des Netzbetreibers. Eine Vertragsvorlage ist beim Schweizerischen Bundesamt für Energie, 3003 Bern erhältlich.
Anlagen für Inselbetrieb ohne Netzverbund	– müssen beim schweizerischen Starkstrominspektorat angemeldet werden (nicht Abgabepflichtig) – sind nicht vorlagepflichtig – sind nachweispflichtig nach der NEV – der Anlagenbetreiber ist für die Kontrolle nach NIV verantwortlich

7.5.2 Definitionen

Vorlagepflicht	Dem ESTI sind alle für Beurteilung notwendigen Dokumente im doppel zu unterbreiten. U. a.: – Formular für Energieerzeugungsanlagen (erhältlich beim ESTI); – Sowohl Ort der neuen Installation als auch Anschluss an die existierenden Installationen; – Alle Schutzmassnahmen für den Netzverbundbetrieb – mögliche Beinflussung von existierenden Installationen; – Schriftliche Bewilligung des EWs **Installationsarbeiten dürfen erst nach Erhalt der Genehmigung des ESTI beginnen.**
Kontrollpflicht	Die gesamte Installation einschliesslich Eigenverbraucher sind kontrollpflichtig. Für Installationen im Inselbetrieb ist der Betreiber für die Sicherheitskontrollen verantwortlich. Er muss sich ESTI gegenüber rechtfertigen können. Die Abnahme kann dem ESTI vergeben werden (gegen Verrechnung)
Nachweispflicht	Für Energieerzeugungsanlagen muss der Nachweis erbracht werden, dass diese den anerkannten technischen Normen genügen. Dies kann durch eine Zertifizierung einer anerkannten Prüfungsanstalt geschehen.
Zulassungspflicht Schweizeriches Sicherheitsgütezeichen	Gewisse Komponenten sind zulassungspflichtig. Sie müssen das Sicherheitsgütezeichen tragen.

7.5.3 Kriterien der Risikoerhöhung durch eine Produktionsanlage

– Erhöhung der Kurzschlussströme im Einspeisepunkt der Unterverteilung.

– Verstärkung von dynamischen Kurzschlusseffekten in der Unterverteilung.

– Spannungsanstieg im Einspeisepunkt und der Unterverteilung entsprechend der vermiedenen Zuleitungsverluste.

– Je nach Behandlung des Sternpunktes können starke Ströme der 3. Harmonischen im Neutralleiter fliessen und diesen sowie den Generator unerwünscht erwärmen.

– Überspannungen bei Lastasymmetrie und offenem Sternpunkt auf den einzelnen Phasen.

7.5.4 Autorisiertes Installationspersonal

Berechtigt für die Installation von Anlagen mit Netzverbund sind nur fachkundige Personen im Sinne der Niederspannungsinstallationsverordnung (NIV), die überdies im Besitze einer Installationsbewilligung des energieliefernden Werkes sein müssen.

Berechtigt für die Installation von Anlagen nur für Inselbetrieb sind nur fachkundige Personen im Sinne der Niederspannungsinstallationsverordnung (NIV). Die Anlage ist nachher beim ESTI anzumelden.

7.5.5 Autorisierte Kontrolleure

Berechtigt für die Kontrolle solcher Anlagen sind nur fachkundige Personen oder Elektrokontrolleure im Sinne der NIV.

7.5.6 Periodische Kontrollen

Elektrische Installationen müssen periodisch kontrolliert werden (NIV). Die Kontrolle umfasst alle Niederspannungsinstallationen (Produktion und Verbraucher). Die Inspektionsintervalle hängen von der Installationsart ab und wiederholen sich alle 1, 5, 10 oder 20 Jahre.

Bibliographie

Elektrische Maschinen, Eine Einführung in die Grundlagen (8. Auflage)
Bödefeld, Th.; Sequenz, H.
Springer, Wien, 1971
ISBN 3-211-80971-6

Asynchronmaschinen, Funktion, Theorie, Technisches
Jordan, H.; Klima, V.; Kovacs, K.P.
Vieweg, Braunschweig, 1975
ISBN 3-528-04600-7

Kraftwerks-Generatoren
Verschiedene
ETG Fachberichte Band III
VDE-Verlag, Berlin, 1979
ISBN 3-8007-1139-7

Elektrische Kleinmotoren, Einführung
Stölting, H-D.;Beissse, A.
Teubner, Stuttgart, 1987
ISBN 3-519-0631-2

Berechnung elektrischer Maschinen
Schuisky, W.
Springer, Wien, 1960

Elektromotoren - Electric Motors (Buch für Praktiker)
Rentsch, H.
ABB Drives, Turgi, 1992
ISBN 3-590-80853-5

Manual on Induction Motors used as Generators
MHPG Series- Harnessing Water Power on a Small Scale- Vol10
J.-M. Chapallaz, J. Dos Ghali, P. Eichenberger
GATE 1992
ISBN 3-528-02068-7

Village Electrification
MHPG Series- Harnessing Water Power on a Small Scale- Vol5
R. Widmer, A. Arter
SKAT 1992
ISBN 3-908001-15-3

Gesetzliche Auflagen für kleine elektrische Energieerzeugungsanlagen für Niederspannung
SEV/ASE info 1010, Juli 1990

CEI34
(Commission Electrotechnique Internationale): Machines électriques tournantes

34-1: caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement

34-5: classification des degrés de protection procurés par les enveloppes

34-7: Symboles pour les formes de construction et les dispositions de montage

34-8: marqués d'extrémités et sens de rotation des machines tournantes