

## Inhaltsverzeichnis

Garantieleistungen

Sicherheitsbestimmungen zum Modell Kraftwerk

<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Technische Betrachtung des elektrischen Netzes.....	1
1.2 Energiebedarf.....	1
<b>2 Elektrische Energieerzeugung und Energieverbrauch.....</b>	<b>3</b>
2.1 Prinzipieller Ablauf der Energieumformung in einem Kraftwerk.....	3
2.1.1 Blockschaltbild eines Kraftwerkes.....	3
2.1.2 Blockschaltbild des Modellaufbaus.....	4
2.2 Energiefluß und Funktion eines Synchrongenerator.....	4
2.3 Der Generator im Inselbetrieb.....	5
2.4 Synchronisieren des Generators.....	6
2.5 Der Generator im Verbundbetrieb.....	7
2.6 Kompensation im Netz.....	8
2.7 Der Generator im Phasenschieberbetrieb.....	9
2.8 Der Lastwinkel des Generators.....	9
<b>3 Beschreibung des Kraftwerkmodells.....</b>	<b>10</b>
3.1 Beschreibung der Einzelkomponenten.....	10
3.1.1 Kraftwerkwagen.....	10
3.1.2 Technische Daten der Einzelkomponenten des Kraftwerkwagen.....	11
3.1.2.1 Umrichter, Typ Combivert.....	11
3.1.2.2 Drehstrom-Asynchronmotor, Typ 71L/2.....	11
3.1.2.3 Drehstrom-Synchrongenerator, Typ PA 8040.....	12
3.1.2.4 Stroboskop, Typ SF 215.....	12
3.1.2.5 Multimeßumformer, Typ Sineax M1001.....	12
3.1.2.6 Speicherprogrammierbare Steuerung, Typ S5-95U.....	14
3.1.3 Verbraucherwagen.....	16
3.1.4 Technische Daten der Einzelkomponenten des Verbraucherwagen.....	16
3.1.4.1 Drehstrom-Kurzschlußläufermotor, Typ PA 8041.....	16
3.2 Symboltabelle.....	17
3.3 Steckadapter-Belegung.....	18

3.3.1	Klemmenkennzeichnung für Leuchtanzeigen.....	19
3.4	Funktionsbeschreibung.....	20
3.4.1	Kraftwerkwagen.....	20
3.4.1.1	Übersichtsschaltplan des Kraftwerkmodells.....	20
3.4.1.2	Energiefluß des Kraftwerkmodells.....	21
<b>4</b>	<b>Bedienung des Kraftwerkmodells.....</b>	<b>22</b>
4.1	Inbetriebnahme.....	22
4.1.1	Vorbereitung.....	22
4.1.2	Betreiben der Anlage.....	23
4.2	Unzulässige und kritische Betriebszustände.....	25
4.3	Schutzmechanismen zur Sicherung der Anlage.....	25
4.4	Meßwert-Visualisierung über Pentium-Rechner.....	25
4.4.1	Software.....	25
4.4.2	Hardware.....	27
<b>5</b>	<b>Anleitung zu den Vorführungen.....</b>	<b>28</b>
5.1	Wechselstromleistung.....	28
5.1.1	Wirkleistung.....	28
5.1.2	Scheinleistung.....	28
5.1.3	Blindleistung.....	29
5.1.4	Wirkfaktor.....	29
5.1.5	Kompensation.....	29
5.2	Wirkungsweise und Betriebsverhalten des Synchrongenerators.....	31
5.3	Inselbetrieb.....	33
5.3.1	Kompensation.....	34
5.4	Verbundbetrieb.....	35
5.4.1	Phasenschieberbetrieb.....	37
<b>6</b>	<b>Messungen am Kraftwerk-Demonstrationsmodell.....</b>	<b>39</b>
6.1	Generatorspannung, unbelastet in Abhängigkeit vom Erregerstrom bei $f= 50$ Hz.....	39
6.2	Generatorbetrieb mit konstanter Spannung und Umrichterfrequenz.....	40
6.3	Generator mit konstanter Erregung und Umrichterfrequenz.....	40
6.4	Generatorbetrieb mit konstanter Erregung und Frequenz.....	40
6.5	Generator im Normalbetrieb bei konstanter Spannung und Frequenz.....	41
6.6	Temperaturverhalten von Generator und Lasten.....	41
6.7	Generator am Netz im Phasenschieberbetrieb.....	41
6.8	Generator im Verbund bei Wirkleistungsabgabe und -aufnahme.....	42
6.9	Auslastung des Umrichters.....	43
<b>A</b>	<b>Anhang: Bedienung des Kraftwerk-Demonstrationsmodells.....</b>	<b>44</b>

# Kraftwerk-Demonstrationsmodell

## **Handbuch**

Version 0.1 – 5.1 NWS Stuttgart AG

## Sicherheitsbestimmungen zum Modell Kraftwerk

1. Das Modell zur Demonstration eines Kraftwerkes wurde nach den geltenden VDE - Bestimmungen erstellt und erfüllt diese in allen Punkten.
2. Das Modell darf nur von eingewiesenem Fachpersonal bedient werden.
3. Die Bedienungsanleitung in Kapitel 4 der Dokumentation ist genau zu beachten.
4. Beim Transport ist Aufgrund der großen Masse der beiden Wagen darauf zu achten, daß die Türen und Schubladen sicher geschlossen sind. Die Aufbauten müssen sicher verstaut, die Rückwände eingerastet und die Feststellbremsen betätigt werden. Es ist ebenso darauf zu achten, daß sich die Schubladen beim Transport nicht öffnen können. Hierzu empfiehlt sich ein Gurt, welcher so um den Korpus geschnallt und festgezogen wird, daß sich diese nicht von alleine öffnen können.
5. Bei Vorführungen müssen die Klarsicht-Schutzhauben angebracht werden, damit spannungsführende und sich drehenden Teile (Generator und Motor) nicht berührt werden können.
6. Die Anlage darf bei anmontierter Schutzhaube auf der Kraftwerksseite nicht im Dauerbetrieb gefahren werden, da sonst die Kühlung nur die erwärmte Luft unter der Plexiglashaube umwälzen kann .
7. Die Schrauben von Generator, Belastungsmotor, Motorschlitten des Antriebsmotors und deren Verbindungsschrauben zu den Metallrahmen der Aufbauten müssen in Zeitabständen von zwei Jahren nachgezogen bzw. auf ihren festen Sitz überprüft werden.
8. Falls die Generatorfrequenz sowie die Generatordrehzahl durch fehlerhafte Anlagenkomponenten die Grenzwerte 65 Hz und  $2000 \frac{1}{\text{min}}$  überschreitet, muß die Anlage unverzüglich, abgeschaltet werden. Im Interesse der Sicherheit der Zuhörer muß die Anlage durch Fachpersonal repariert werden.
9. Für Schäden aller Art, welche durch unsachgemäßen Gebrauch oder Nichteinhaltung der unter 1 - 8 aufgeführten Punkte entstehen, übernimmt der Hersteller keine Haftung.  
Kein Garantieanspruch besteht für Schäden durch thermische Überlastung des Generators, Antriebsmotors und der Motorschutzrelais.

# 1 Einleitung

## 1.1 Technische Betrachtung des elektrischen Netzes

In den Anfängen der elektrischen Energieversorgung vor über 100 Jahren wurden folgende Voraussetzungen für unser heutiges Stromnetz geschaffen:

- *der Wechselstrom*
  - eine sinusförmig verlaufende Spannung
  - eine Frequenz von 50 Hz
- *das Dreiphasensystem*
  - eine Gebrauchsspannung von 230/400V effektiv
  - drei um jeweils 120° phasenverschobene Spannungen

*Vorteile :*

- einfach umsetzbar in andere Spannungsniveaus
- Ferntransport ohne großen Verlust
- für die Übertragung von 6 Spannungen sind nur 3 Leiter nötig
- leichte Realisierung von magnetischen Drehfeldern für Motoren

Für den Transport der elektrischen Energie über lange Strecken wird die Spannung mittels Transformatoren in Hochspannung umgesetzt, um die über die Leitungen fließenden Ströme und damit die Leitungsverluste möglichst klein zu halten.

Das Dreiphasenwechselstromnetz bietet zwei unterschiedliche Spannungen zum Anschluß elektrischer Geräte an. Zwischen einer Phase und dem Nulleiter stehen 230 V zur Verfügung, während zwischen den Außenleitern (Phasen) 400V auftreten. Für Motoren gibt es demzufolge zwei Schaltungen: in Sternschaltung liegen die Spulen des Motors zwischen Phase und Neutralleiter, in Dreieckschaltung, die dreifache Leistung bewirkt, liegen die Spulen zwischen den Außenleitern.

Durch die Anordnung von drei Spulen, die mit den drei Phasen verschaltet sind, läßt sich einfach ein magnetisches Drehfeld erzeugen. Dies erlaubt den Einsatz einfacher, robuster und damit auch billiger Motoren (Drehstrom-Asynchron-Motor).

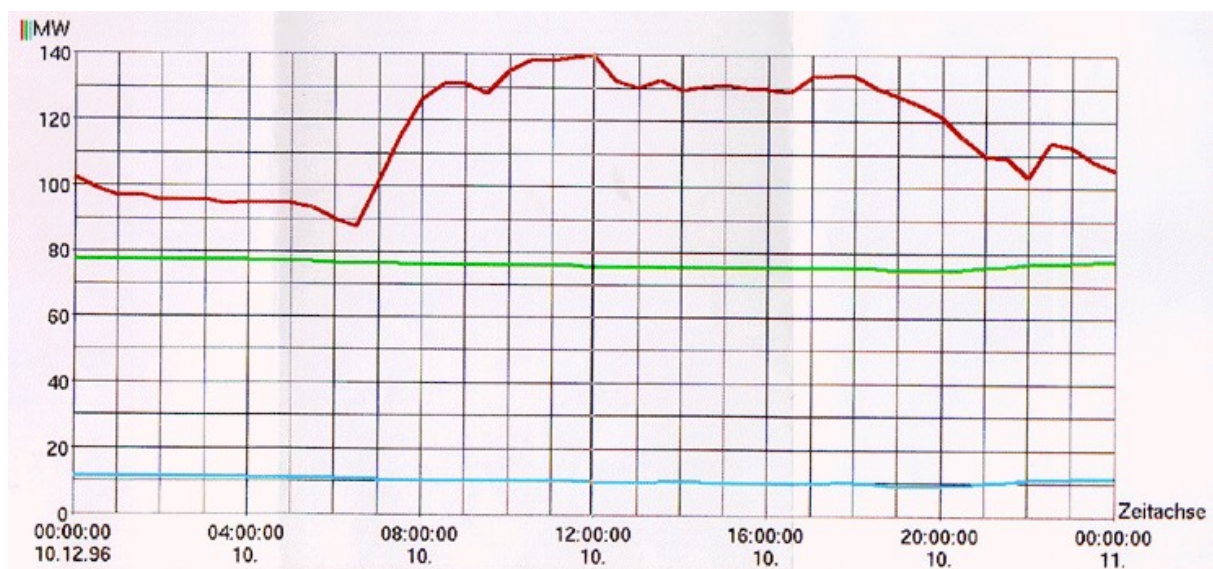
## 1.2 Energiebedarf

Der Energiebedarf der einzelnen Verbraucher, einer Maschine mit elektrischem Antrieb oder eines elektrischen Gerätes, schwankt je nach Einsatzzeit und Auslastung. Summiert man nun den „Verbrauch“ aller Geräte und Maschinen einer Stadt oder einer Versorgungsregion, die aus dem Stromnetz Energie beziehen, zusammen, so ergibt sich über die Stunden des Tages einen typischen Verlauf.

Die Grafik der nächsten Seite zeigt eine Tagesbelastungskurve vom 10.12.1996 der Stadt Heilbronn, die uns freundlicherweise von der Energieversorgung ZEAG in Heilbronn zur Verfügung gestellt wurde. Für die Auswertung maßgebend ist der oberste Kurvenverlauf. Diese Tagesganglinie des Elektrizitätswerk Heilbronn wird uns wie folgt erläutert:

„Als Stromversorger für ein überwiegend städtisch geprägtes Gebiet stehen wir naturgemäß auf dem Wärmemarkt in harter Konkurrenz zum Erdgas und zum Erdöl. Dies spiegelt sich auch in unserer Belastungskurve am Höchstlasttag des Jahres 1996 wieder: Während der Nachtstunden von 22 Uhr bis morgens 6 Uhr liegt der Strombedarf unserer Kunden deutlich unter dem Tageshöchstwert, der in der Regel zwischen 11 Uhr und 12 Uhr auftritt. Sehr schön ist in diesem Diagramm auch die Einschaltspitze kurz nach 22 Uhr zu sehen. Ab diesem Zeitpunkt werden die Nachtspeicheröfen zur Aufladung freigegeben.“

Dieser Sachverhalt zeigt uns den Nutzen, Kraftwerke miteinander zu vernetzen, also im Verbund zu betreiben. Die unterschiedlichen Kraftwerkstypen können nach ihren speziellen Eigenschaften zur Deckung der verschiedenen Lasten einsetzen, zum Beispiel Laufwasserkraftwerke liefern die Grundlast, Pumpspeicherkraftwerke die Spitzenlast, da sie relativ schnell reagieren können. Ein weiteres Beispiel sind moderne Heizkraftwerke wie der Block 2 in Esslingen, die neben der Dampfturbine für Grundlasten noch eine Gasturbine für kurzzeitige Spitzen zur Verfügung haben.



**Bild 1:** Tagesganglinie (roter Kurvenverlauf) vom 10.12.1996 (ZEAG, Heilbronn)

## 2 Elektrische Energieerzeugung und Energieverbrauch

Das Modell zeigt prinzipiell, wie die elektrische Energieversorgung von Verbrauchern im **Insel-** und **Verbundbetrieb** technisch realisiert wird. Auf anschauliche Weise werden der Zuhörerschaft die komplizierten Sachverhalte der **Energieumwandlung** verdeutlicht.

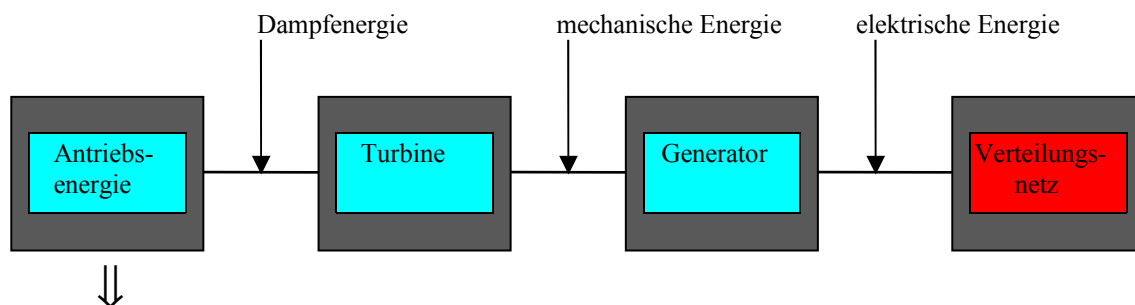
Die folgenden Punkte erläutern die Abläufe in einem Kraftwerk sowie das Verhalten des Kraftwerks am Netz- und unter Belastung durch die unterschiedlichen Verbraucher:

1. *prinzipieller Ablauf der Energieumformung in einem Kraftwerk*
2. *Energiefluß und Funktion eines Generators*
3. *Schwierigkeiten und Nachteile des Inselbetriebs*
4. *Darstellung der Generatorsynchronisation*
5. *Vorteile des Verbundbetriebs*
6. *Kompensationsmöglichkeiten*
7. *Phasenschieberbetrieb*
8. *Lastwinkel des Generators*

### 2.1 Prinzipieller Ablauf der Energieumformung in einem Kraftwerk

#### 2.1.1 Blockschaltbild eines Kraftwerkes

Ein Kraftwerk wandelt Primärenergie ( z.B. Kohle) in elektrische Energie (Sekundärenergie) um. Fälschlicherweise ist es üblich, von Stromerzeugern und Stromverbrauchern zu reden.



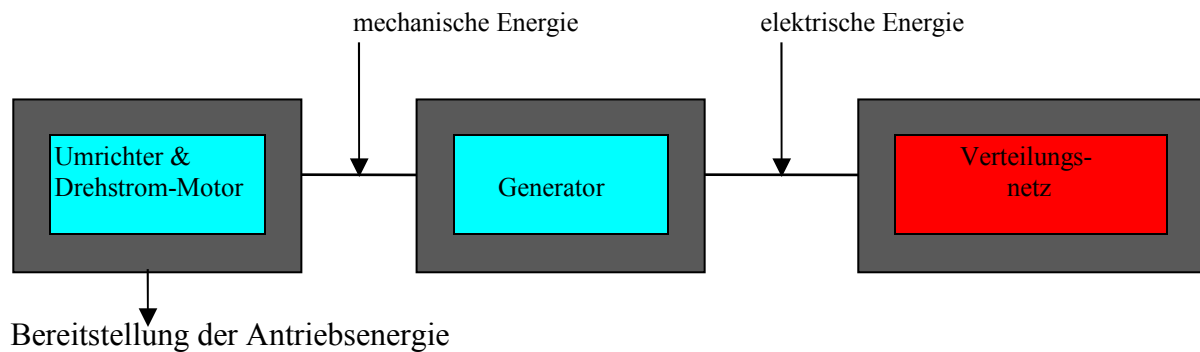
Die *Primärenergie* (Antriebsenergie) tritt bei den unterschiedlichen Kraftwerkstypen in verschiedenen Formen auf:

- Verbrennen von Kohle, dabei erhitzt sich Wasser bis zur Dampfform → **Heizkraftwerk**
- fließendes Wasser (Bewegungs- bzw. kinetische Energie) → **Wasserkraftwerk**
- geregelter Ablauf der Kernspaltung setzt Wärmeenergie frei → **Kernkraftwerk**

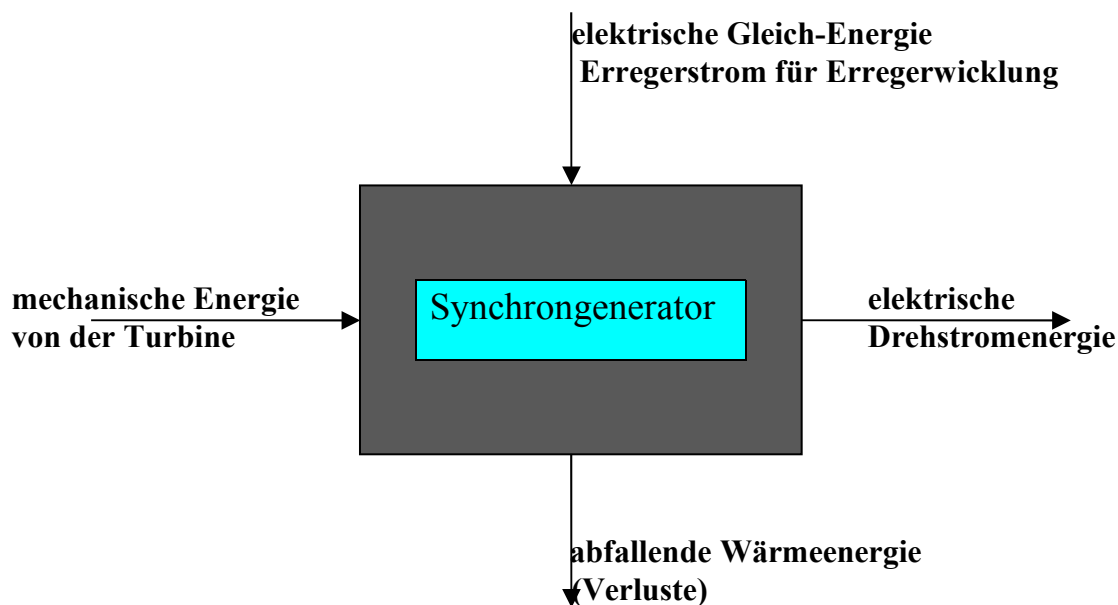
Auf geeigneten Standorten können auch regenerative Energien genutzt werden:

- Windenergie läßt einen Rotor drehen → **Windkraftwerk**
- die Strahlung der Sonne wird in Kollektoren umgewandelt oder erhitzt ein Medium → **Solkraftwerk**

## 2.1.2 Blockschaltbild des Modellaufbaus



## 2.2 Energiefluß und Funktion eines Synchrongenerator



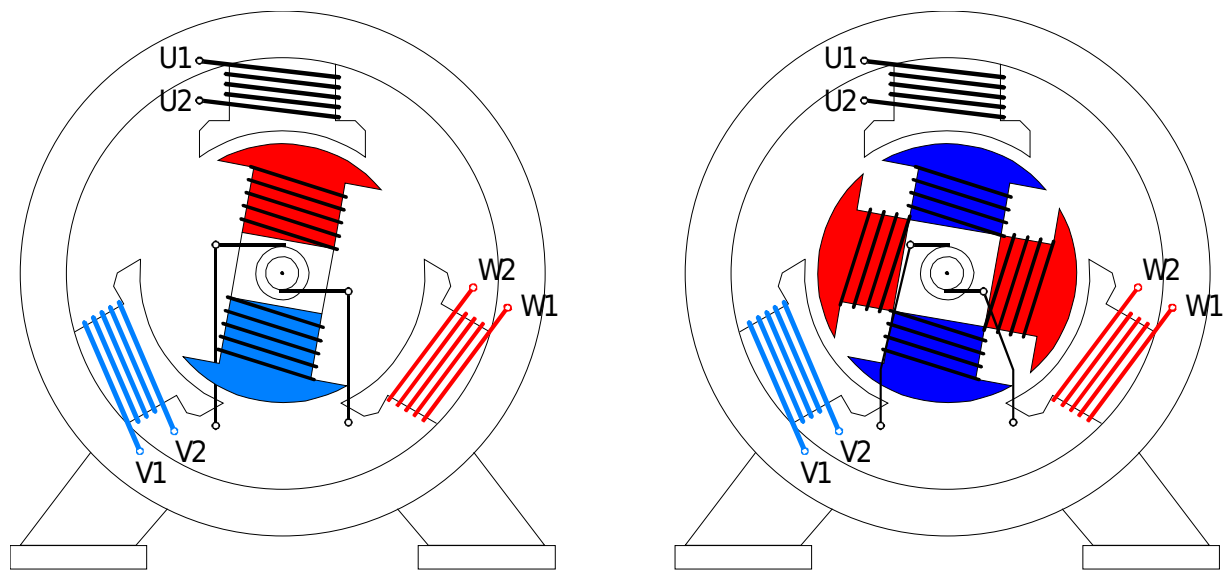
Bei dieser Demonstrationsanlage wird die Turbine, die bei den meisten Kraftwerkstypen die mechanische Energie liefert, durch einen Antriebsmotor dargestellt.

Der Synchrongenerator übernimmt die Umformung von mechanischer Energie in elektrische Energie. Die Erzeugung einer elektrischen Spannung wird in der Physik als Induktion bezeichnet. Eine Spannung tritt an den Enden einer Spule auf, wenn durch sie ein Stabmagnet bewegt wird. Beim Synchrongenerator läßt man ein konstantes Magnetfeld im feststehenden Gehäuse des Generators rotieren.

Der Ständer (feststehend) verfügt über drei gleiche, um 120 Grad versetzte Spulen. Im Inneren des Generatorgehäuses ist eine drehbar gelagerte Spule auf einer Achse angeordnet. Dieser Läufer erzeugt durch einen konstanten Gleichstrom in der Spulenwicklung ein gleichbleibendes Erreger-Magnetfeld. Bei Drehung des Polrades (Läufer) wird in jeder Spule eine Wechselspannung erzeugt. Die entstehenden Spannungen sind gleich groß, jedoch um 120 Grad phasenverschoben. Um Leitungen zu sparen, schließt man nun die Leiterenden auf der einen Seite der drei Ständerspulen zusammen. Die freien und zusammengeschlossenen Spulenden, also die drei Phasen und der Neutraleiter werden herausgeführt. Die dadurch



entstehenden, um je 120 Grad phasenverschobene Wechselströme nennt man Dreiphasenwechselstrom oder Drehstrom.



*Bild 2: Drehstromsynchrongenerator mit zwei- und vierpoligem Läufer. Im Gegensatz zur zweipoligen Ausführung muß der vierpolige Läufer nur mit einer Drehzahl von 1500 1/min rotieren, um eine Dreiphasenwechselspannung mit der Frequenz 50 Hz zu erzeugen.*

Beim Betrieb eines Generators fällt auch unerwünschte Energie an, die nicht in elektrische Energie umgewandelt wird. Diese Verluste treten als Wärmeenergie in den Lagern (Reibung), in den Spulen (Leitungs- oder Wicklungsverluste) und im Magnetfeld (Eisenverluste) auf .

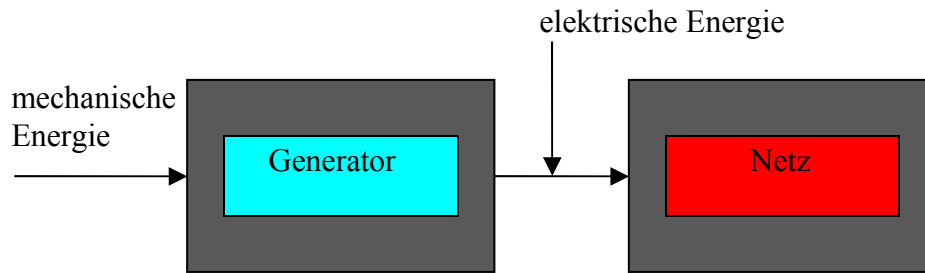
### **2.3 Der Generator im Inselbetrieb**

Der Inselbetrieb liegt vor, wenn ein einziger Generator in ein elektrisches Netz einspeist.

#### **Vorgehensweise:**

Das „Kraftwerk“ (Demonstrationsanlage) wird im Leerlauf hochgefahren und auf den Nennbetrieb, das heißt auf eine Spannung von 230V und eine Frequenz von 50Hz zwischen den Außenleitern und dem Neutraleiter gebracht. Danach wird der Generator bzw. das Kraftwerk durch die ohmschen Lasten belastet. Die Folge ist ein Rückgang der Generatorspannung sowie ein Drehzahlabfall und demzufolge eine Verringerung der Frequenz. Die eingestellte Antriebsenergie für den Generator reicht nicht aus um den benötigten Energiebedarf unter Nennbedingungen (230V / 50Hz) zu decken. An die „Turbine“ muß nun mehr Energie gelangen, damit auch der Generator die fehlende Energie liefern kann. In der Realität geschieht dies zum Beispiel durch höheren Dampfdruck oder durch mehr Wasservolumen pro Sekunde. Bei der Demonstrationsanlage wird am Umrichter die fehlende Motorantriebsenergie nachgestellt und somit die Spannung wie auch die Frequenz wieder auf 230V / 50Hz normiert. Im Inselbetrieb kann ein Kraftwerk überlastet werden. Bei extremer Überlast, das heißt beim Betrieb mit allen drei Lasten und einer Zeitdauer länger als  $\approx 3$  min sorgt der Überlastschutzschalter für die Abschaltung der Anlage.

## Der Inselbetrieb des Modells:



### Nenndaten des Generators:

Drehzahl	n	=	1500	1/min
Spannung	U	=	230/400	V
Stromstärke	I	=	0,32	A
Scheinleistung	P	=	180	VA
Erregerstrom	$I_{\text{Err}}$	=	3,4	A

### Netz bestehend aus:

- Ohmsche Last: zweimal 3 x 25W in Sternschaltung mit N-Leiter
- Induktive Last: ein Drehstrom- Asynchronmotor (mit Kurzschlußläufer) und den Nennwerten:  
 $P / P_{\text{Leer}} = 0,15 / 0,04$  kW  
N = 1480 1/min  
U = 230 V  
I = 0,15 A  
 $\cos \varphi_{\text{Leer}} < 0,2$

**Das Kraftwerk reagiert mit Änderung der Netzspannung und Netzfrequenz bis hin zur Überlastabschaltung auf die Schwankungen des Energiebedarfs der Verbraucher. Diese Nachteile sprechen eindeutig für den Verbundbetrieb.**

## 2.4 Synchronisieren des Generators

Der Generator kann erst zu den am Netz laufenden Generatoren zugeschaltet werden, wenn er synchron zum Netz läuft. Diesen Vorgang bezeichnet man als „Schalten in den Verbund“ und wird im Folgenden erklärt. Die Einhaltung dieser Bedingungen gewährleistet, daß (große) Generatoren durch das Schalten ans Netz nicht mechanisch zerstört werden.

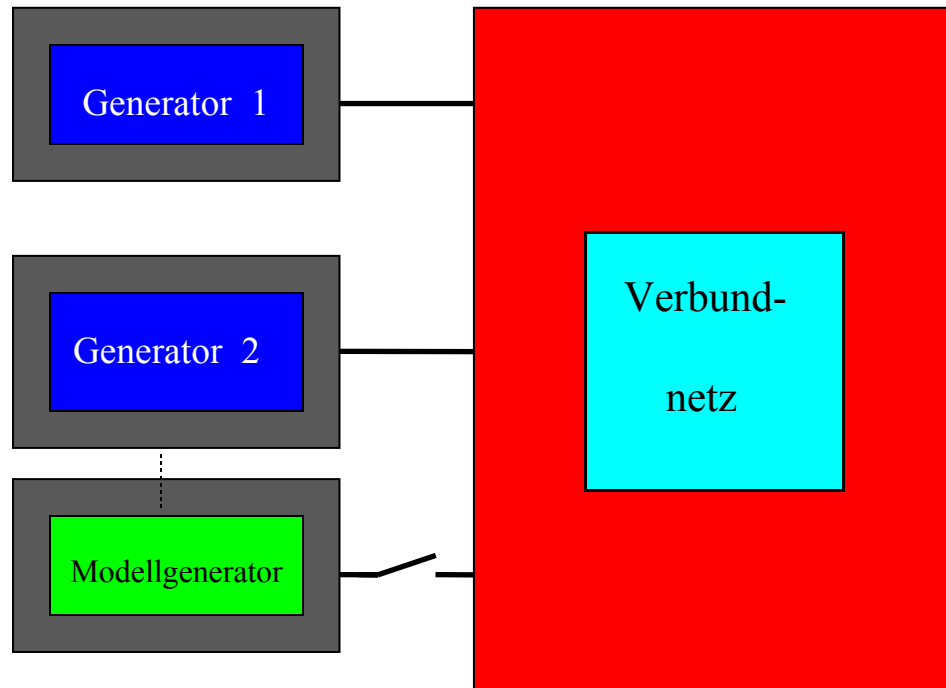
### **Vorgehensweise:**

1. Anlage einschalten und Generator im Inselbetrieb hochfahren
  - Überprüfung der Drehrichtung (Phasenfolge)
  - Generator auf Normspannung einstellen
  - Einstellen der Frequenz auf die Netzfrequenz
  - mit dem Oszilloskop wird die Phasenlage überprüft
2. Bei gleicher Phasenlage kann die Zuschaltung an das Verbundnetz erfolgen (die Erfüllung der Zuschaltbedingungen heißt Synchronisation.)

Der Modellgenerator speist nun ins Netz ein, er läuft im Verbund mit den großen Kraftwerken.

## 2.5 Der Generator im Verbundbetrieb

Der Verbundbetrieb liegt vor, wenn mehrere Generatoren in ein gemeinsames Netz einspeisen.



### **Vorgehensweise:**

1. Anlage einschalten und Generator im Inselbetrieb hochfahren
2. Generator synchronisieren und ans Verbundnetz schalten
3. Lasten zu und abschalten

Der Modellgenerator speist nun ins Netz ein, er läuft im Verbund mit den großen Kraftwerken. Im Vergleich zum Inselbetrieb ist ein Zu- und Abschalten verschiedener Glühlampenlasten ohne Auswirkung auf den Modellgenerator, weil das Verbundnetz die Versorgung durch verschiedene Regeleinrichtungen sicherstellt. Die fehlende Energie wird von anderen Kraftwerken aus dem Verbund bereitgestellt.

**Im Verbund diktieren die vielen Kraftwerke dem einzelnen Kraftwerk (unserem Modell) Spannung und Frequenz auf. Von beiden Größen wird besonders die Frequenz durch Regeleinrichtungen exakt konstant gehalten. Durch die Ausregelung ist Verbrauch und Erzeugung im Verbundnetz stets ausgewogen.**

**Der Stromverbund garantiert zudem eine größere Versorgungssicherheit. Als Voraussetzung hierfür müssen Kraftwerke über eine Produktionsreserve verfügen. Technische Störfälle in Kraftwerken werden daher vom Verbraucher nicht bemerkt, da die zusätzliche Energie von den anderen Kraftwerken geliefert wird.**

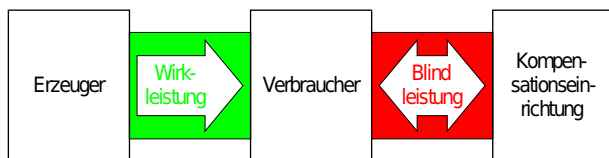
## 2.6 Kompensation im Netz

Die meisten ans Netz angeschlossenen Verbraucher nutzen magnetische Felder zur Umsetzung der Energie. Durch diese Magnetfelder treten die von der Spannung erzeugten Ströme nicht gleichzeitig, sondern phasenverschoben auf. Die Ströme eilen der Spannung nach und sind zeitlich verzögert.

Deshalb muß auch der zeitlich verzögerte Strom im Kraftwerk erzeugt und zum Verbraucher transportiert werden. Dieser Strom wird in der Physik als Blindstrom bezeichnet. Das Produkt aus diesem Strom mit der dazu-gehörigen Spannung wird demzufolge als



unkompenziert



kompenziert

**Bild 19:** Energiefluß mit und ohne Kompensation

her, sie kann also nicht genutzt werden.

### Vorgehensweise:

Schaltet man im Inselbetrieb einen induktiven Verbraucher (Motor) hinzu, nimmt dieser **Wirkenergie** ( $W_{\text{wirk}}$ ) und **induktive Blindenergie** ( $W_{\text{blind}}$ ) auf. Der Generator stellt neben der Wirkenergie auch die induktive Blindenergie bereit. Bei der Kompensation werden Kondensatoren zu der Last parallelgeschaltet, die zum Teil die benötigte Blindenergie liefern und so die Leitungen und den Generator entlasten (auf das Meßgerät für Blindleistung achten: Q verringert sich bei zugeschalteter Kompensation!).

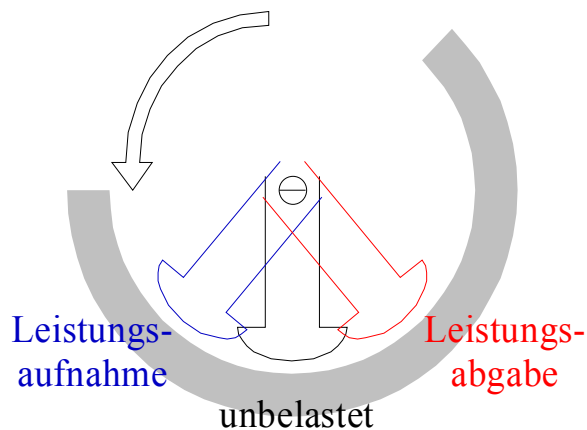
Der Modellgenerator muß die geometrische Summe von **Wirk-** und **Blind-**, die **Scheinleistung** bereitstellen. Der Wirkfaktor ( $\cos \varphi$ ) ist das Verhältnis von Wirk- zu Scheinleistung, das heißt je näher der  $\cos \varphi$  bei eins ist, desto weniger Blindleistung wird benötigt. Das Ziel der Kompensation ist es, einen Wirkfaktor nahe eins zu erreichen.

Blindleistung und die Energie als Blindenergie bezeichnet. Die Blindleistung und ebenso auch die Wirkleistung kann an den entsprechenden Meßgeräten Q und P abgelesen werden.

Der vom Verbraucher benötigte Blindstrom wird in der Praxis jedoch nicht direkt von den Kraftwerken geliefert, da dieser die Versorgungsleitungen zusätzlich belastet. Er kann auch durch einen voreilenden Strom aufgehoben werden. Diese Aufhebung wird Kompensation genannt und durch Zuschaltung von Kondensatoren realisiert. Die Blindleistung pendelt zwischen Generator und Verbraucher (bzw. zwischen Kondensatoren und Verbraucher) hin und

## 2.7 Der Generator im Phasenschieberbetrieb

Läuft ein Generator am Netz unbelastet und im übererregten Zustand, so liefert er induktive



**Bild 3:** Lastwinkel bei Generator- und Motorbetrieb

Erregerstrom, gibt er **induktive Blindleistung** ab (übererregt), oder nimmt **induktive Blindleistung** auf (unter-erregt, wirkt wie eine Spule). Das Meßgerät für Q zeigt, ob **induktive Blindleistung** aufgenommen oder abgegeben wird.

Blindleistung, das heißt, er wirkt wie eine Kapazität. Dabei bedeutet übererregt, daß der Strom in der Erregerwicklung größer als notwendig ist, um die Netzspannung zu liefern. Arbeitet der Generator untererregt, nimmt er induktive Blindleistung auf.

Zur Kompensation kann man deshalb einen Synchrongenerator bzw. ein Synchronmotor verwenden, der übererregt und unbelastet am Netz mitläuft.

### **Vorgehensweise:**

Schaltet man den Generator unbelastet ins Verbundnetz zu und ändert dann den

## 2.8 Der Lastwinkel des Generators

Am Netz (im Verbundbetrieb) gibt der Synchrongenerator um so mehr Leistung ab, je stärker er angetrieben wird. An einem starren Netz, das heißt an einem Netz mit festliegender Frequenz behält das Polrad bei größerer Belastung seine Drehzahl, eilt aber dem Drehfeld um einen größeren Lastwinkel vor. Der Generator arbeitet im Generatorbetrieb. Wird die Leistung an der Antriebswelle der Turbine zurückgenommen, trifft man auf den Fall, in dem der Generator am Netz unbelastet mitläuft und dabei weder Leistung abgibt, noch aufnimmt. Regelt man die Antriebsleistung weiter zurück, genügt sie nicht mehr, um den Generator am Netz mitlaufen zu lassen. Jetzt zieht das Netz den Läufer des Synchrongenerators mit, wobei dieser Leistung (und Strom) aus dem Netz bezieht. Der Generator läuft nun als Synchronmotor, wobei die Turbine den Motor bremsen will, also die Last im Motorbetrieb darstellt. Das Polrad läuft dem Drehfeld hinterher.

### **Vorgehensweise:**

1. Anlage einschalten und Generator im Inselbetrieb hochfahren
2. Generator synchronisieren und ans Verbundnetz schalten
3. Über den Umrichter die Antriebsleistung variieren (Leistungsmeßgerät für **Wirkleistung** beobachten)

## **3 Beschreibung des Kraftwerkmodells**

### **3.1 Beschreibung der Einzelkomponenten**

#### **3.1.1 Kraftwerkswagen**

Der Wagen ist mit vier feststellbaren Lenkrollen ausgerüstet. Durch die abnehmbare Rückwand und die zwei Fronttüren kann der Demonstrationsaufbau mit den Schaukästen im unteren Teil des Wagens von hinten her verstaut werden. Durch diese Verstaumöglichkeit in beiden Wagen wird ein einfacher Transport der gesamten Anlage gewährleistet.

Die Inneneinteilung im oberen Bereich des Wagens ist durch zwei Schubladen realisiert. Die linke Schublade enthält die Steuereinheit, mit der sich die gesamte Anlage bedienen läßt. Die rechte Schublade enthält die für die Visualisierung notwendigen Komponenten, wie Laptop, Stroboskop, Meßwandler sowie den Frequenzumrichter zur Steuerung des Antriebsmotors. Auf dem Rechner sind ein Softwareoszilloskop und eine Meßwerterfassung (für Generator- und Netzspannung, Wirk- und Blindleistung sowie der Wirkfaktor) installiert.

Der Aufbau besteht aus einer mit vier Sparlampen hinterleuchteten Schautafel und einem Bild, welches das jeweilige Kraftwerk darstellt. In diesem Schaukasten sind vier Meßgeräte für Generatorspannung, Wirkleistung, Blindleistung und den Wirkfaktor integriert. Die Komponenten Antriebsmotor und Generator, zuständig für die Bereitstellung der Energie, sind auf einem Stahlrahmen, welcher mit einer Holzplatte verbunden ist, montiert.

Die Verbindungskabel zwischen den Wagen und den Aufbauten, beziehungsweise den Wagen untereinander, werden durch eine im Wagenboden befindliche Öffnung geführt und mit dem jeweiligen Verteilerkasten verbunden.

#### **Auflistung der Komponenten:**

- Frequenzumrichter mit Bremsmodul, KEB Typ- Combivert 07.F0.200-1228
- Drehstrom-Asynchronmotor, KEB Typ 71L/2 (560 W)
- Drehstrom-Synchrongenerator, MSW Typ PA 8040
- Motorschutzrelais, Klöckner Möller Typ
- Netzgerät für Erregung, ELV Typ PS 9031 (Regelbar 0- 30V/ 0- 10A, 300W)
- Multi-Meßumformer, Gossen Metrawatt Typ SINEAX M1001 für P, Q,  $\cos \varphi$
- vier Drehspul- / Dreheisenmeßgeräte (für U, P, Q,  $\cos \varphi$ ), Gossen Metrawatt
- Stroboskop, Cornelsen Typ SF 215.10
- Speicherprogrammierbare Steuerung, Siemens Typ S5-95U
- PC- Laptop oder Mini-Tower (Intel Pentium Prozessor 100MHz)
- Software Nextview 2.5 für  $\mu$ Meter 8 oder Nextview light, BMC
- AD-Wandler  $\mu$ Meter 8 oder AD-Wandlerkarte MC-PC20.NHDL, BMC

### 3.1.2 Technische Daten der Einzelkomponenten des Kraftwerkswagen

#### 3.1.2.1 Umrichter, Typ Combivert 07.F0.200-1228, Hersteller KEB:

Scheinleistung	S	≈	1,8	kVA
Anschluß: 1 Phase, Spng / Freq	U / F	=	200 ... 240 / 50/60	V / Hz
Eingangsstrom	I <sub>in</sub>	=	9,0	A
max. Schaltfrequenz	F <sub>schalt</sub>	=	16	kHz
Ausgangs-Nennstrom	I <sub>out</sub>	=	4,5	A
Ausgangs-Phasenspannung	U <sub>out</sub>	=	220	V
max. Motornennleistung	P <sub>M</sub>	=	0,75	kW
Ausgangs-Frequenz	F <sub>out</sub>	=	0...408	Hz

Run – Daten des Umrichters, abrufbar im Display (FUNCT; UP / DOWN; FUNCT)

r._0	Anzeige der Software-Versionsnummer (Softwareversion)
r._1	Anzeige des Betriebszustandes (Statusanzeige)
r._2	Anzeige der aktuellen Ausgangsfrequenz des Umrichters (Istwertanzeige)
r._3	Anzeige der aktuellen Sollfrequenz (Sollwertanzeige)
r._4	Anzeige der aktuellen Ausgangsspannung in Volt (Ausgangsspannung)
r._5	Anzeige der aktuellen Zwischenkreisspannung in Volt (ZK-Spannung)
r._6	Die maximal gemessene Zwischenkreisspannung wird gespeichert und angezeigt. Durch betätigen der <i>ENTER</i> -Taste „Ausschalten des Umrichters“ oder Schreiben über Bus wird der Wert zurückgesetzt. (ZK-Spannung / Spitzenwert)
r._7	Die aktuelle Umrichterauslastung wird angezeigt. Die Anzeige erfolgt in % (max. 200%) (Aktuelle Auslastung)
r._8	Es wird die höchste Auslastung angezeigt, die während des Betriebs gemessen wurde. Durch ENTER, Ausschalten des Umrichters oder Schreiben über Bus wird der Wert zurückgesetzt. Die Anzeige erfolgt in % (max.200%). (Spitzenauslastung)
r.29	Die aktuelle Ausgangsfrequenz des Frequenzumrichters wird angezeigt. (Istfrequenz)

#### 3.1.2.2 Drehstrom-Asynchronmotor, Typ 71L/2, Hersteller KEB:

Nenndaten:

Wirkleistung	P	=	560	W
Scheinleistung	S	≈	300	VA
Drehzahl	n	≈	2860	1/min
Phasenspannung	U <sub>Δ</sub> / U <sub>Y</sub>	=	220 / 380	V
Phasenstrom bei 380V	I	=	1,8	A
Leistungsfaktor	cos φ	=	0,8	
Wirkungsgrad	η	=	0,74	

Drehmoment	M	=	1,9	Nm
------------	---	---	-----	----

### 3.1.2.3 Drehstrom-Synchrongenerator, Typ PA 8040, Hersteller MSW:

Nennwerten:

<b>Bei Erregung</b>	<b><math>I_{Err}</math></b>	=	<b>3,4</b>	<b>A :</b>
Scheinleistung	S	≈	180	VA
Drehzahl	n	≈	1500	1/min
Phasenspannung	$U_{\Delta} / U_Y$	=	220 / 380	V
Phasenstrom	I	≈	0,28	A
<b>Bei Erregung</b>	<b><math>I_{Err}</math></b>	=	<b>5</b>	<b>A :</b>
Scheinleistung	S	≈	300	VA
Drehzahl	n	≈	1500	1/min
Phasenspannung	$U_{\Delta} / U_Y$	=	220 / 380	V
Phasenstrom	I	=	0,45	A

### 3.1.2.4 Stroboskop, Typ SF 215, Hersteller Cornelsen:

- Stufenlose Regelung über den Drehknopf von 0 bis 300 Blitze pro Sekunde oder 60 bis 18000 U/min
- Funktionsschalter zum Wechsel der Anzeige von Blitz pro Sekunde auf U/min oder externes Triggern.
- Eingangsbuchsen für das externe Triggersignal. Mit einem Impulssignal, das eine Spannung von 3 bis 50V aufweist, kann die Blitzfrequenz extern gesteuert werden.  
*Das Triggersignal darf 300 Hz nicht übersteigen, da dann die Blitzröhre überlastet wird.*

Technische Daten:

- elektrische Anschlußleistung der Entladungsröhre (Blitzröhre): 12 Watt

### 3.1.2.5 Multimeßumformer, Typ Sineax M1001, Hersteller Gossen Metrawatt:

Technische Daten

Meßungen einphasig	P / Q / cos $\varphi$		
Meßzykluszeit	t	≤	350 ms bei 50 Hz
<u>Meßgröße:</u>			
Wirk- / Blindleistung	Genauigkeit	0,5%	
Leistungsfaktor des Netzes	Genauigkeit	0,5%	
<u>Ausgangsgröße:</u>			
Spannung	U	-10...10	V



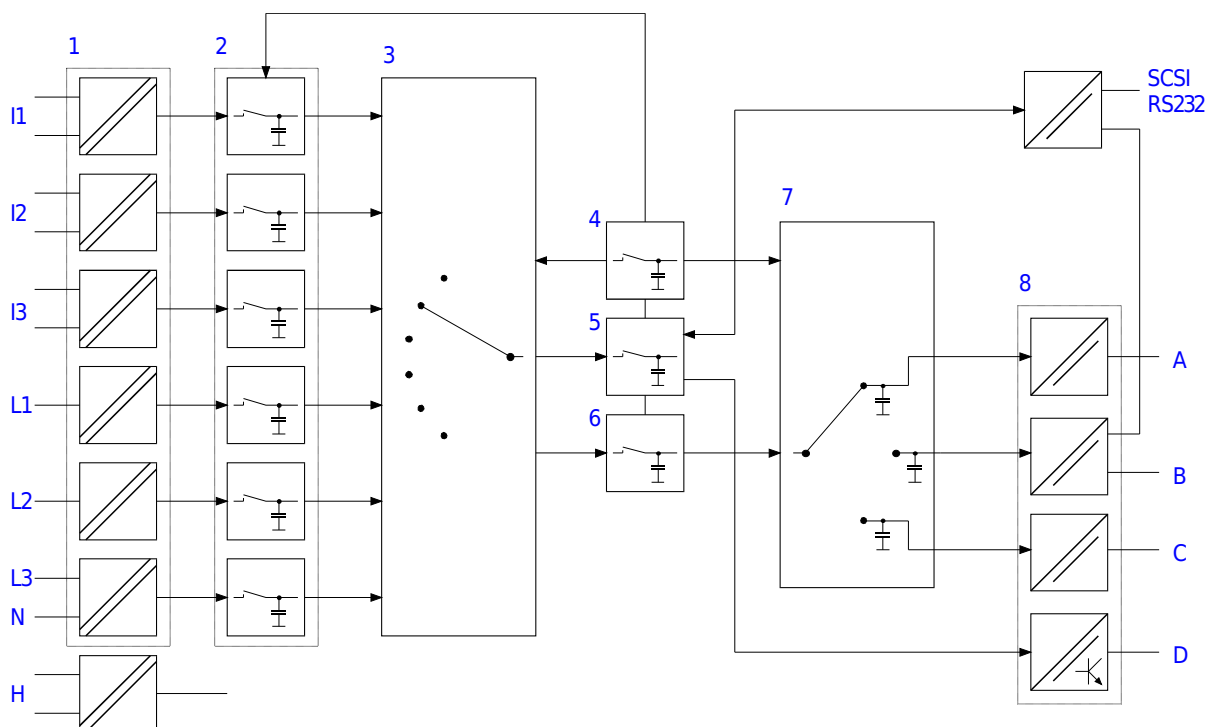
## Technische Beschreibung

Als Standard wird der Meßumformer SINEAX M 1001 für gleichbelastete Vierleiter-Drehstromnetze verbaut. In Sonderfällen kann für ungleiche Belastung auf Wunsch der Typ M 1004 eingesetzt werden.

Die Multi-Meßumformer der Reihe SINEAX M1000 erfassen gleichzeitig mehrere Größen eines elektrischen Netzes und verarbeiten sie zu drei analogen Ausgangsgrößen, die als eingeprägte Gleichstrom- oder aufgeprägte Gleichspannungssignale abgegeben werden. Die analogen Ausgangsgrößen stellen, je nachdem, wie die Meßumformer programmiert sind – zum Beispiel eine Wirkleistung, eine Blindleistung und den Leistungsfaktor dar.

Die RS 232-Schnittstelle an den Multi-Meßumformern dient dazu, um mittels PC und Software sowohl die Programmierung vorzunehmen, als auch um Zusatzfunktionen abzurufen.

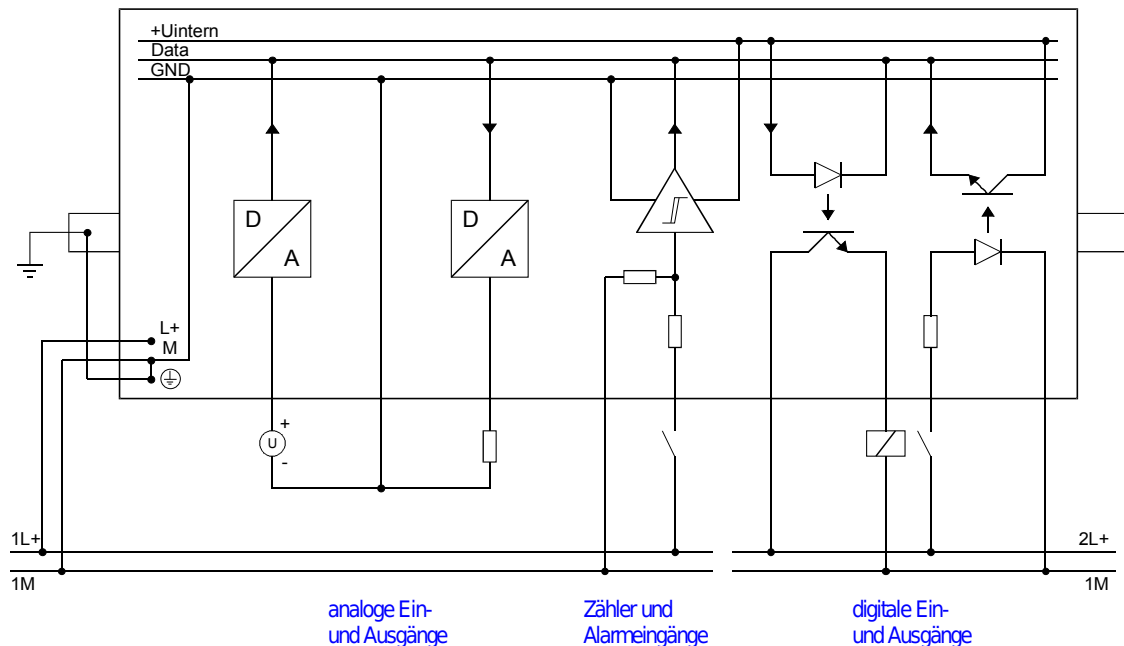
Alle Eingangsgrößen werden durch die Eingangswandler 1 galvanisch vom Netz getrennt, zeitgleich abgetastet und als Augenblickswerte in den Haltestufen 2 gespeichert. Über den Multiplexer 3 werden die gespeicherten Augenblickswerte seriell vom Mikroprozessor 5 verarbeitet. Die Meßwerte werden aus  $n \cdot 32$  Abtastwerten ( $n$ : Anzahl der Eingänge) berechnet. Den Meßablauf bestimmt die Ablaufsteuerung 4. Die vom Mikroprozessor ermittelten Meßwerte werden über den A/D- und D/A-Wandler 6 und die Multiplexer/Haltestufe 7 dem jeweiligen Ausgang zugeordnet. Jedes Ausgangssignal ist über je einen Trennverstärker 8 gegen jeden anderen Ausgang, gegen die Meßelektronik und gegen die Hilfsspannung H galvanisch getrennt.



**Bild 4:** Prinzipschaltung A, B, C: analoge Ausgänge; D: binärer Ausgang; Leiterspannungen  $L_1, L_2, L_3$  und  $N$ , Leiterströme  $I_1, I_2, I_3$

### 3.1.2.6 Speicherprogrammierbare Steuerung, Typ S5-95U, Hersteller Siemens:

Für den Betrieb der SPS sind neben der Steuerung S5-95U die Stromversorgung 931 und das Eprom - Speichermodul 375 notwendig.



**Bild 5:** Interner elektrischer Aufbau von Ein- und Ausgängen der S5-95U

- Alle digitalen Ein- und Ausgänge haben eine gemeinsame Masse, d. h. sie sind untereinander potentialgebunden. Sie sind durch Optokoppler vom Steuerstromkreis galvanisch entkoppelt und erlauben einen potentialgetrennten Aufbau.  
2 Gruppen mit je 8 Ausgängen (Gruppe = Anzahl von Ein- u. Ausgängen mit eigenem 24V Anschluß)  
1 Gruppe mit 16 Eingängen
- Die Massen der analogen Ein- und Ausgänge ist mit der Masse des Steuerstromkreises verbunden. Das selbe gilt für Zähler- und Alarめingänge. Deshalb sind alle Ein- und Ausgänge nur im potentialgebundenen Aufbau verwendbar.

#### Technische Daten der Digitalausgänge

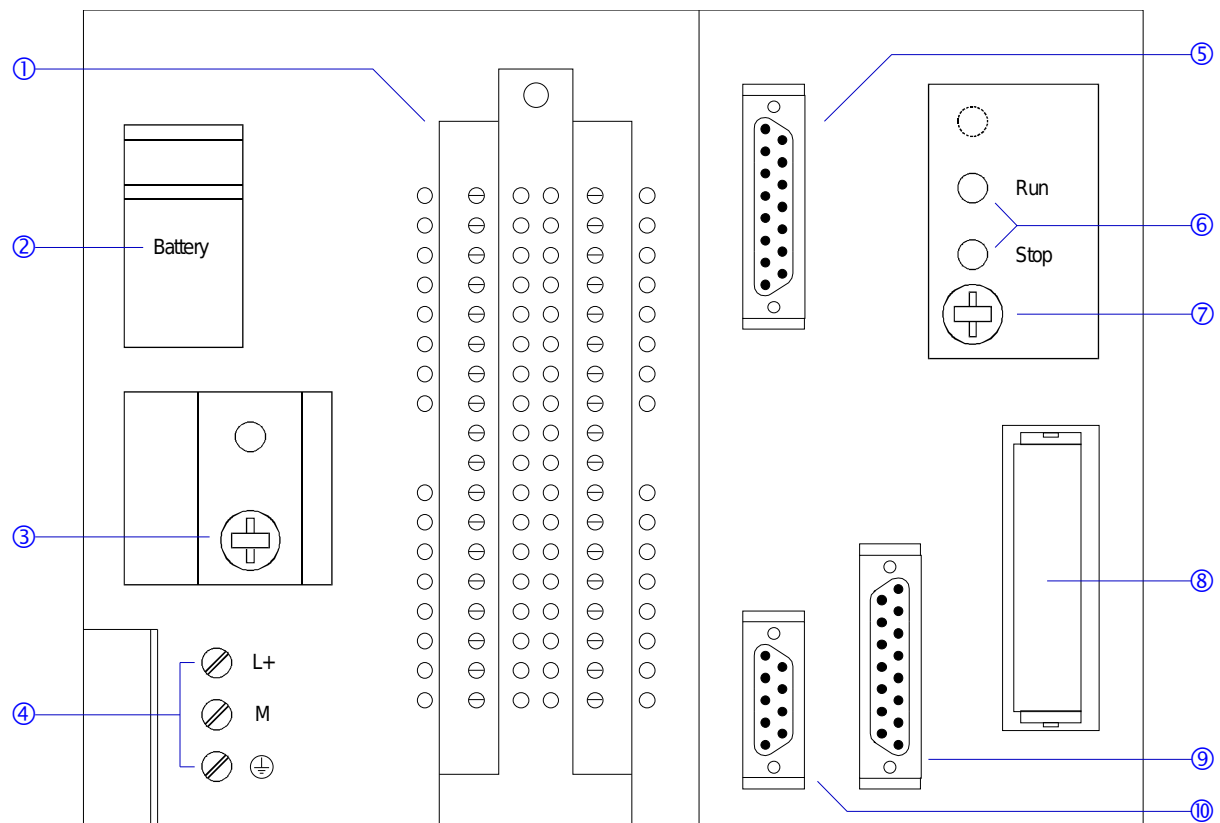
Lastspannung L+ zulässiger Ber.	20	...	30 V DC
Ausgangsstrom bei Signal „1“	max.	0,5 A	bei 60 °C
Lampenlast	max.	5 W	
Reststrom bei Signal „0“		≤400 µA	
Ausgangsspannung bei Signal „0“		2,4 V bei 6 kΩ Lastwiderstand	
Ausgangsspannung bei Signal „1“	max.	L+ (-0,6 V) bei 0,5 A	
Kurzschlußschutz		ja	elektronisch
Begrenzung d. ind. Abschltng (intern)		-16 V	
Schaltfrequenz bei ohmscher Last	max.	100 Hz	
Schaltfrequenz bei induktiver Last	max.	2 Hz	
Leitungslänge ungeschirmt	max.	100 m	

## Technische Daten der Digitaleingänge

Eingangsspannung bei Signal „0“	-30 V ... +5 V DC
Eingangsspannung bei Signal „1“	+13 V ... +30 V DC
Eingangsstrom bei Signal „0“	<1,5 mA
Eingangsstrom bei Signal „1“	<6,5 mA (bei 30 V)
Verzögerungszeit bei „0“ nach „1“	typ. 2,5 ms
Verzögerungszeit bei „1“ nach „0“	typ. 2,0 ms
Leitungslänge ungeschirmt	max. 100 m

## Anzeige, Bedienelemente und Schnittstellen der SPS Siemens S5-95U

- ① Anschlußklemmen für Digital- Ein- und Ausgänge und deren Spannungsversorgung
- ② Batteriefach
- ③ Schalter für Batteriemodus
- ④ Anschlußklemmen für Stromversorgung
- ⑤ Analog- Ein- und Ausgänge
- ⑥ Betriebsartenanzeige: grüne LED → Run; rote LED → STOP
- ⑦ Betriebsartenschalter
- ⑧ Schacht für Speichermodul E(E)PROM
- ⑨ Schnittstelle für PG oder PC oder OP oder SINEC L1-Bus
- ⑩ Serielle Schnittstelle (TTY 20mA)



**Bild 6:** Ansicht der speicherprogrammierbaren Steuerung S5-95U

### 3.1.3 Verbraucherwagen

Der Wagen ist mit feststellbaren Lenkrollen ausgerüstet. Die Schubladen sind zur Aufbewahrung von Stroboskop, Verbindungskabeln, der Dokumentation und anderem Zubehör vorgesehen. Die Rückwand des Wagens ist abnehmbar, um den Aufbau für die Lagerung oder den Transport verstauen zu können.

Der Aufbau besteht aus einer mit 6 Sparlampen segmentiert hinterleuchteten Schautafel. Die Schautafel zeigt auf eine Nachtaufnahme einer Stadt. Je nach Lastzuschaltung werden die einzelnen Segmente Unterteil / Oberteil dieser Stadt ebenfalls zugeschaltet.

Auf der Grundplatte des Aufbaus sind je 3x 25 W Lampen als Wirklast, sowie ein Drehstrom-asynchron-Kurzschlußläufermotor als induktive Last befestigt. Zwei Kondensatorbatterien für die Kompensation des Motors sind im Schaukasten verbaut.

Als „Hochspannungsleitung“ kann, falls erwünscht, der Kraftwerkswagen und der Verbraucherwagen mit 3 farbigen Leitungen (rot, gelb, grün) symbolisch verbunden werden.

#### Auflistung der Komponenten:

- Wagen mit Aufbau
- Drehstrom-Kurzschlußläufermotor, MSW Typ PA 8041
- Wirklasten, 2 mal je 3 Glühlampen 25W (rot, grün, gelb)
- zwei Kondensatorbatterien

### 3.1.4 Technische Daten der Einzelkomponenten des Verbraucherwagens

#### 3.1.4.1 Drehstrom-Kurzschlußläufermotor mit Käfigläufer, Typ PA 8041, Herst. MSW:

Nennwerten:

Wirkleistung	P	=	180	W
Scheinleistung	S	≈	300	VA
Drehzahl	n	≈	1480	1/min
Phasenspannung	$U_{\Delta} / U_Y$	=	220 / 380	V
Phasenstrom	I	=	0,45	A
Wirkfaktor	$\cos \varphi$	=	0,6	
Wirkungsgrad	$\eta$	=	0,82	

Daten für Leerlauf:

Wirkleistung	$P_{\text{Leerlauf}}$	=	40	W
Scheinleistung	$S_{\text{Leerlauf}}$	=	100	VA
Drehzahl	$n_{\text{Leerlauf}}$	=	1370	1/min
Phasenstrom	$I_{\text{Leerlauf}}$	=	0,15	A
Wirkfaktor	$\cos \varphi_{\text{Leerlauf}}$	<	0,4	

## 3.2 Symboltabelle

E32.0	S0	Schalter	NOT-AUS
E32.1	S1	Taster	Anlage aus
E32.2	S2	Taster	Anlage ein
E32.3	S3	Schalter	Überstromrelais ein
E32.4	S4	Taster	Umrichter ein
E32.5	S5	Taster	Generator ein
E32.6	S6	Schalter	Verbund ein
E32.7	F4	Schließer 97,98	Störung
E33.0	S7	Schalter	Last 1
E33.1	S8	Schalter	Last 2
E33.2	S9	Schalter	Last 3
E33.3	S10	Schalter	Kondensatorbatterie 1
E33.4	S11	Schalter	Kondensatorbatterie 2
E33.5			
E33.6			
E33.7			
A32.0		Lampe grün	betriebsbereit
A32.1		K1	Umrichter EIN
A32.2		K2	Generator EIN
A32.3		K3	Kraftwerks-Beleuchtung
A32.4		Lampe gelb	Inselbetrieb
A32.5		Lampe blau	Verbundbetrieb
A32.6		Lampe transparent	Überstromrelais aktiv
A32.7		Lampe rot	Störung
A33.0		K4	Verbund
A33.1		K5	Last 1
A33.2		K6	Beleuchtung 1
A33.3		K7	Last 2
A33.4		K8	Beleuchtung 2
A33.5		K9	Last 3
A33.6		K10	Kondensatorbatterie 1
A33.7		K11	Kondensatorbatterie 2

### 3.3 Steckadapter - Belegung

#### 6-poliger Steckverbinder: Netz-Anschlußleitung ( Ceekon-Stecker)

1	L1
2	L2
3	L3
4	N
Schirm	PE

#### 24-poliger Steckverbinder: von X0 nach X2 (Aufbau von Wagen 1)

1	L1.1
2	L2.1
3	L3.1
4	N
5	U Umr.
6	V Umr.
7	W Umr.
8	1U1 Gen.
9	1V1 Gen.
10	1W1Gen.
11	L+
12	L-
13	SPS 0V (-24V), P-, Q-
14	A32.3
15	P+
16	Insel
17	Q+
18	Verb
19	cos $\varphi$ +
20	cos $\varphi$ -
21	Übers
22	
23	
24	
25 (Schirm)	PE

**24-poliger Steckverbinder: von X0 nach X4 (von Wagen 1 zu Wagen 2)**

1	L1.1
2	L2.1
3	L3.1
4	N
5	1U1 Gen.
6	1V1 Gen.
7	1W1 Gen.
8	SPS 0V (-24V)
9	A33.1
10	A33.2
11	A33.3
12	A33.4
13	A33.5
14	A33.6
15	A33.7
16	Reserve
17	“
Schirm	PE

**24-poliger Steckverbinder: von X4 nach X5 (Aufbau von Wagen 2)**

1	L1.1
2	L2.1
3	L3.1
4	N
5	1U1 Gen.
6	1V1 Gen.
7	1W1 Gen.
8	SPS 0V (-24V)
9	A33.1
10	A33.2
11	A33.3
12	A33.4
13	A33.5
14	A33.6
15	A33.7
16	Reserve
17	“
Schirm	PE

**3.3.1 Klemmenkennzeichnung für Leuchtanzeigen**

Klemme X0 im Verteilerkasten des Erzeugerwagens

Übers: Meldeleuchte Überstromrelais aktiv  
Insel: Meldeleuchte Inselbetrieb  
Verb: Meldeleuchte Verbundbetrieb  
0V SPS: Masse für Meldeleuchten

## 3.4 Funktionsbeschreibung

### 3.4.1 Kraftwerkwagen

#### 3.4.1.1 Übersichtsschaltplan des Kraftwerkmodells

Der Übersichtsschaltplan zeigt die Verdrahtung der einzelnen Komponenten. Dadurch läßt sich der funktionale Zusammenhang zwischen den Komponenten und der Einbauort erkennen.

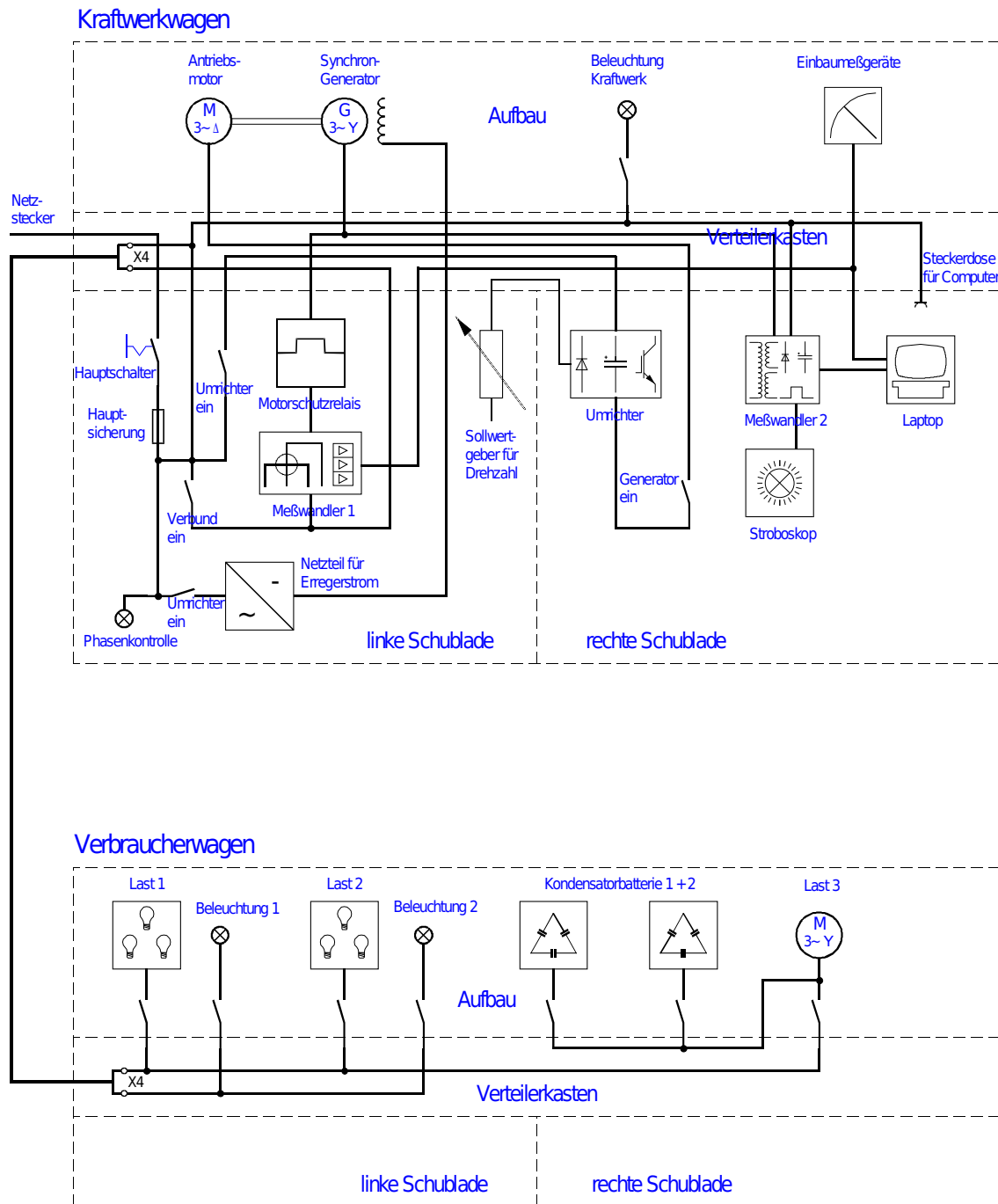


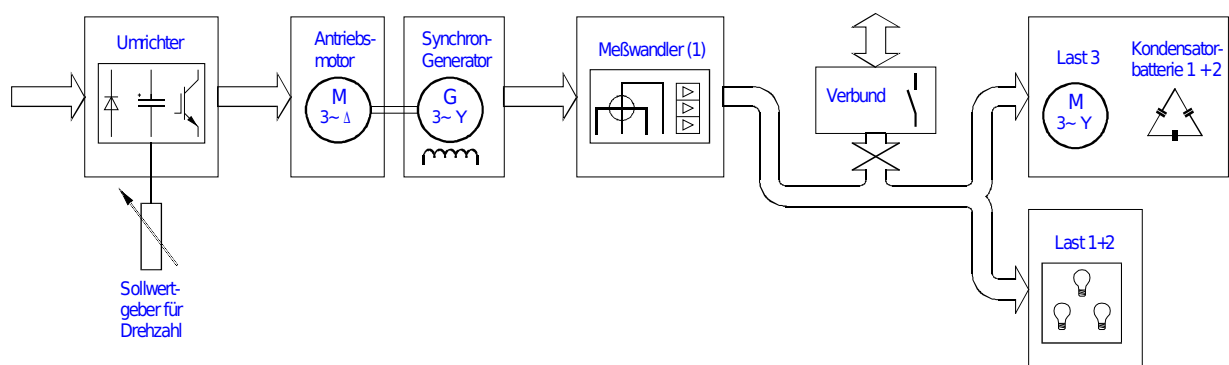
Bild 7: Übersichtsschaltplan des Kraftwerk-Demonstrationsmodell



### 3.4.1.2 Energiefluß des Kraftwerkmodells

Dieses Blockschaubild stellt die grundsätzliche Funktion sehr anschaulich und einfach dar.

1. Mit dem Regler (Sollwertsteller) läßt sich über den Umrichter einstellen, wieviel elektrische Leistung der Antriebsmotor aufnehmen soll. Diese Komponenten simulieren die Turbine, die mechanische Leistung an die Generatorwelle abgibt.
2. Der Synchrongenerator erzeugt aus der mechanischen Leistung elektrische Leistung.
3. Die elektrischen Größen (Spannung, Wirk-, Blindleistung, Wirkfaktor) des Synchrongenerators werden gemessen und auf den Meßwerken angezeigt (Meßumwandler, Spannungsmesser).
  - Nur im Inselbetrieb ist die gemessene abgegebene Blind- / Wirk-Leistung des Generators gleich der aufgenommenen Leistungen der Lasten.  
(Abgegebene Leistung vom Generator = aufgenommene Leistung von den Lasten)  
Für den Wirkfaktor gilt entsprechendes !
  - Im Verbund zeigen die Meßgeräte nur an, wieviel Blind- / Wirk-Leistung der Generator abgibt oder aufnimmt. Die Meßwerte besitzen keinen Zusammenhang mit den Leistungsaufnahmen der Lasten, da das Verbundnetz ebenfalls Leistung liefert. Aus demselben Grund kann im Verbundbetrieb die Funktion der Kompensation nicht über die Meßgeräte nachgewiesen werden.  
(Abgegebene Leistung vom Generator  $\neq$  aufgenommene Leistung von den Lasten)  
Für den Wirkfaktor gilt entsprechendes !
4. Über den Verbundschalter wird das Netz des Demonstrationsmodells an das Verbundnetz angeschlossen. Bei Schaltstellung ein kann Energie ins Verbundnetz abgegebenen oder vom Verbund bezogen werden.
5. Die Verbraucher nehmen elektrische Energie auf und wandeln sie in andere Energieformen um.



**Bild 8:** Energiefluß des Kraftwerk-Demonstrationsmodell

## 4 Bedienung des Kraftwerkmodells

In den Kapiteln 4 und 5 finden Sie die relevanten Informationen, um die Anlage fachgerecht zu bedienen. Es genügt nicht, wenn Sie Ihrerseits der Ansicht sind, die Anlage und die damit verbundenen elektrotechnischen Zusammenhänge zu beherrschen. Ihnen sollte bewußt sein, daß durch Fehlbedienung Komponenten der Anlage zerstört werden können.

### 4.1 Inbetriebnahme

#### 4.1.1 Vorbereitung:

##### 1. Plazierung der Demonstrationswagen

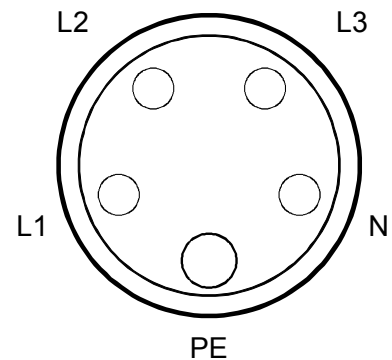
- Verbraucherwagen (*Wagen 2*) rechts (von vorne gesehen), neben den Erzeugerwagen (*Wagen 1*) schieben. Bremsrollen feststellen!

##### 2. Abnehmen der Rückwände, verbinden der Stecker

- Die Aufbauten herausnehmen und auf den jeweiligen Wagen abstellen. Die Fixierung der Aufbauten am Wagen geschieht durch Festdrehen der mitgelieferten Handräder (*Sterngriffe mit Gewindestangen*).
- Die Steckverbinder der Leitungen von den Aufbauten an den Buchsen der Verteilerkästen des jeweiligen Unterbaus einstecken (Steckbuchsen mit Bezeichnung *X0 nach X2* bzw. *X4 nach X5*).
- Mit dem Verbindungskabel *X0 nach X4* die beiden Wagen verbinden.
- An den Steckbuchsen der Schaukästen lassen sich die symbolischen Netzleitungen mit den Farben rot, gelb und grün einstecken. Diese Verbindungsleitung verfügt über keine Funktion!
- Wagen 1 mit der Netzanschlußleitung verbinden. Vor dem Einstecken des Netzsteckers nachsehen, ob Hauptschalter in Stellung 0 steht.

Das Drehfeld von Netz und Generator muß übereinstimmen, das heißt, daß das Drehfeld am Netzstecker rechtsdrehend vorliegen muß.

Wird die Anlage an einem linksdrehenden Drehfeld betrieben, können Schäden an der Anlage auftreten!



*Bild 9: CEE - Steckdose*

### 3. Ausrichten der Wagen

- Beide Schubladen des Erzeugerwagens öffnen.
- Keilriemen unter Spannung halten ( $\frac{1}{4}$  Umdrehung des Keilriemen um seine Achse muß möglich sein. Bei erhöhtem Keilriemenabrieb ist die Riemenspannung zu gering!).

#### 4.1.2 Betreiben der Anlage

##### Anlage AUS:

Der **Hauptschalter** befindet sich auf Stellung **0**. Alle Leuchtmelder sind ohne Funktion. Die Schalter **Last1** (Lampen1), **Last2** (Lampen2) und **Last3** (Motor) müssen ausgeschaltet sein.

##### Anlage EIN:

1. Den **Hauptschalter** nach rechts auf Stellung **1** drehen. Alle drei Phasenkontrollanzeigen leuchten auf, falls die Sicherungen auf Stellung ON geschaltet sind. Nun befinden sich alle Peripheriegeräte unter Spannung.
  - Bleiben eine oder mehrere Glimmlampen dunkel, liegt ein Fehler vor, bei dem die Automaten auslösen, z.B. Kurzschluß!
  - Beim Einschalten leuchtet die rote STOP-LED an der SPS, blinkt danach (Programm-Laden) und erlischt. Mit dem Aufleuchten der grünen RUN-LED ist die SPS betriebsbereit.
2. Durch Betätigen des Tasters **Anlage ein** ist die Anlage betriebsbereit und wird in den Modus Inselbetrieb geschaltet. Die Einstellung des Schalters **Verbund** hat dabei keinen Einfluß. Die Melder „**Anlage betriebsbereit**“ (grün) und „**Inselbetrieb**“ (orange) leuchten auf.
3. Der Schalter **Überstromrelais ein** erlaubt es, die Anlage **mit** oder **ohne** Überstromrelais zu betreiben. Bei betätigtem Schalter ist das Relais aktiv, der Melder „**Überstromrelais aktiv**“ (transparent) leuchtet auf.
  - Bei Betrieb ohne Relais (**Normalfall**) kann die Anlage bis zur Leistungsgrenze des Generators betrieben werden. In diesem Modus zeigt der Melder „**Überstromrelais aktiv**“ (transparent) das Ansprechen des Überstromrelais an, ohne die Anlage abzuschalten.
  - Bei aktivem Relais wird die Anlage bei Überlast automatisch abgeschaltet und bringt den Störfall mit dem Melder „**Störung**“ (rot) zur Anzeige (**nur für den Demonstrationsfall**).
    - Erst nach Abkühlen des thermischen Motorschutzrelais ist ein Wiedereinschalten möglich. Dies zeigt sich durch Erlöschen des Melders „**Störung**“ (rot) bzw. der Melder „**Störung**“ (rot) und „**Überstromrelais aktiv**“ (transparent).
4. Der Taster **Umrichter ein** schaltet den Umrichter und das Netzgerät ein. Falls das Netzgerät selbst ausgeschaltet ist, sollte es nun eingeschaltet werden.
  - Das Netzgerät für die Erregung des Generators wird mit dem Umrichter eingeschaltet. Um die Erregerspulen nicht zu überlasten, darf die Anlage in diesem Betriebszustand nicht längere Zeit stehengelassen werden.
  - Damit der Umrichter Energie an den Antriebsmotor abgibt, müssen die Schalter „**Reglerfreigabe**“ und „**Drehrichtung**“ eingeschaltet sein oder jetzt betätigt werden. Mit dem 10-Gang-Wendelpoti, der als analoger Sollwertgeber für die Generatorfrequenz fungiert, wird

die Anlage im **Inselbetrieb** hochgefahren, bis die Nennbetriebsdaten erreicht sind. Im zulässigen Frequenz-Regelbetrieb zeigt das Umrichterdisplay **Fco** (*Konstantlauf vorwärts*) an, beim Beschleunigen **FAc**.

Jetzt läßt sich durch den Taster **Generator ein** der Generator einschalten.

Nachdem der Umrichter eingeschaltet wurde, sollte möglichst schnell seine Last, der Antriebsmotor für den Generator, zugeschaltet werden. Sonst erscheint nach ≈5 Sekunden die Fehlermeldung **EOC** (*Überstrom*) im Display des Umrichters. In diesem Fall muß die Anlage durch Taster **Anlage aus** abgeschaltet und neu angefahren werden. Erst nachdem das Display des Umrichters erloschen ist, kann die Anlage mit Taster **Anlage ein** erneut eingeschaltet werden.

5. Mit den Schaltern **Last1** (Lampen1), **Last2** (Lampen2) und **Last3** (Motor) lassen sich die einzelnen Lasten 1 bis 3 zu- und abschalten.
6. Die Schalter **Kondensatorbatterie 1** und **Kondensatorbatterie 2** bringen die Kondensatoren für die Kompensation zum Einsatz. Die Kondensatoren werden nur in Verbindung mit der eingeschalteten **Last 3** (Motor) wirksam. Falls die Kondensatoren nicht abgeschaltet werden, ist bei erneuter Zuschaltung der **Last 3** automatisch die Kompensation wirksam.

A. Nun können die Versuche für den Inselbetrieb durchgeführt werden.

7. Mit dem Schalter **Verbund ein** kann bei Erfüllung der Synchronisationsbedingungen das Generatormetz an das Verbundnetz geschaltet werden. Dazu sollte das Stroboskop in der Betriebsart „Externe Triggerung“ eingesetzt werden, nachdem die Triggerleitungen richtig gepolt am Stroboskop eingesteckt wurden. Der Verbundbetrieb wird mit der Meldeleuchte „**Verbund**“ (blau) signalisiert.

Wird die Anlage mit Taster **Anlage ein** in den betriebsbereiten Zustand geschaltet, ist der Betriebsmodus „**Inselbetrieb**“ (Meldeleuchte orange) unabhängig vom Zustand des Schalters **Verbund ein** angewählt. Die Leuchtdiode des Schalters **Verbund ein** zeigt nur den Schaltzustand an, während die Meldeleuchten den momentan aktiven Betriebszustand angeben.

B. Durchführung der Versuche im Verbundbetrieb.

8. Der Taster **Anlage aus** schaltet die Anlage ab. Die Anlage kann mit Taster **Anlage ein** erneut eingeschaltet werden, nachdem das Display des Umrichters erloschen ist.

Wird der Taster **Anlage ein** früher betätigt, erscheint im Umrichterdisplay die Fehlermeldung **EUP** (Unterspannung), wodurch ein erneutes Ausschalten des Kraftwerks durch Taster **Anlage aus** nötig wird.

9. Der Schalter **NOT-AUS** schaltet die Anlage ebenfalls ab und aktiviert den **Leuchtmelder „Störung“**, da es sich bei der Betätigung des Schalters um eine Störung handelt.

**Wichtig :**

**Nach der Betätigung von *Generator ein* ist darauf zu achten, daß der Schalter *Verbund ein* nicht unmittelbar danach betätigt wird.**

**Bevor in den Verbund geschaltet wird, muß der Generator synchronisiert werden.**

**Bei Mißachtung können Schäden an der Anlage auftreten !**

## 4.2 Unzulässige und kritische Betriebszustände

- Hochfahren im Verbundbetrieb  
extreme Belastungen treten dann auf, wenn mit einer Generatorfrequenz weit unter oder über 50 Hz im Verbund hochgefahren wird und der Generator zudem mit geringer oder ohne Erregung betrieben wird. (*Zu großer Frequenzunterschied: der Generator bleibt außer Tritt und kann die Netz-frequenz nicht erreichen. Betriebsdauern über  $\approx 5$  Sekunden können Schäden an der Anlage hervorrufen.*)
- Schalten in den Verbundbetrieb ohne Einhaltung der Synchronisationsbedingungen
  - großer Frequenzunterschied: große Gefahr zur Beschädigung der Anlage (*Motorschutzrelais, Antriebsmotor, Generator, eventuell Umrichter*),
  - großer Unterschied der Phasenlage: mechanische Belastung durch ruckartige Drehbewegung, wenn der Generator in die Netzphasenlage gezogen wird, Beschädigungsrisiko relativ gering, solange die Erregung nicht zu gering eingestellt ist,
  - großer Spannungsunterschied: keine Beschädigung ist zu erwarten bei Spannungsdifferenzen kleiner  $\approx 50V$ .
- Längerfristiger Betrieb  $> 15$  Minuten **mit** / **ohne** montierter Schutzhaube auf dem Kraftwerkswagen. (*Inselbetrieb mit allen Lasten, ohne / mit Kompensation; Verbundbetrieb mit Leistungsabgabe  $P$  oder  $Q > 150W$  oder mit **max.** / **min.** Erregung)  
(*Kühlwirkung für Antriebsmotor wird gemindert; besonders bei übererregtem Betrieb tritt neben erhöhtem Wicklungswiderstand magnetische Sättigung am Generator ein, was einen starken Spannungseinbruch zur Folge hat.*)*
- Längeres Verbleiben im „Anfahrbetrieb“, das heißt im Inselbetrieb bei kleinsten Frequenzen mit zugeschalteten Lasten: starke Belastung des Antriebsmotors.

## 4.3 Schutzmechanismen zur Sicherung der Anlage

- Das Netzteil zur Bereitstellung des Erregerstromes kann nicht über 6A liefern.
- Die Generatorfrequenz und somit auch die Generator Drehzahl kann 60 Hz bzw. 1800 1/min nicht überschreiten.

## 4.4 Meßwert-Visualisierung über Pentium-Rechner

### 4.4.1 Software

Die Software visualisiert die zu messenden Größen Generatorspannung, Netzspannung, Wirkleistung, Blindleistung und den Leistungsfaktor. Zudem sind die Oszillogramme der Generator- und Netzspannungen auf einem Pentium-Rechner abrufbar. Eingeteilt in folgende Projektbildschirme können die Werte am jeweiligen Instrument genau abgelesen werden und unterstützen somit die Vorführung:

**O1:** Oszilloskopdarstellung der Generator- (U) und Netzspannung (L1). Getriggert wird dabei auf L1. *(Mit der Space - Taste wird diese Anzeige ein- und ausgeschaltet.)*

**P1:** Analoge Darstellung von L1 und U

**P2:** Analoge Darstellung von P und Q

Gestartet wird die Software mit dem Einschalten des Rechners oder folgender Syntax:

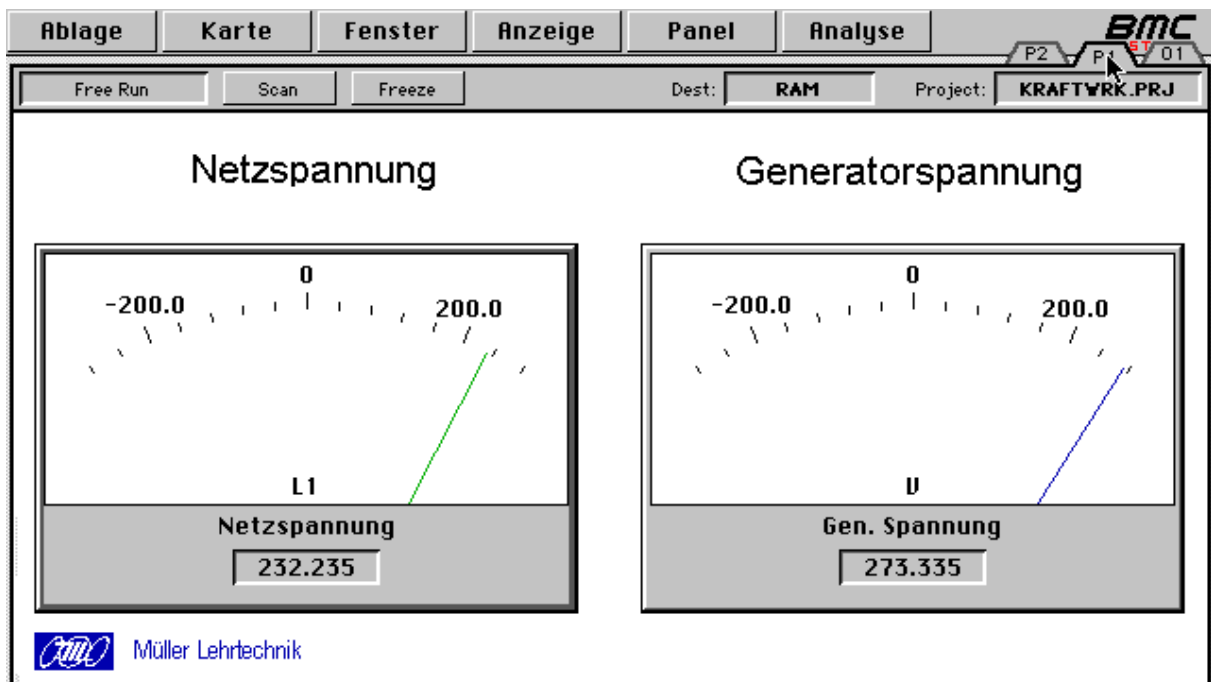
```
cd nextview <ENTER>
nextview <ENTER>
```

Nach dem Start des Rechners wird automatisch die Benutzeroberfläche der Software geladen und Sie können nun durch Anklicken der Karteikarten am oberen rechten Bildschirmrand die einzelnen Projekte aufrufen. Die Meßwerte werden nun über einen AD-Wandler eingelesen und stehen sofort zur Verfügung.

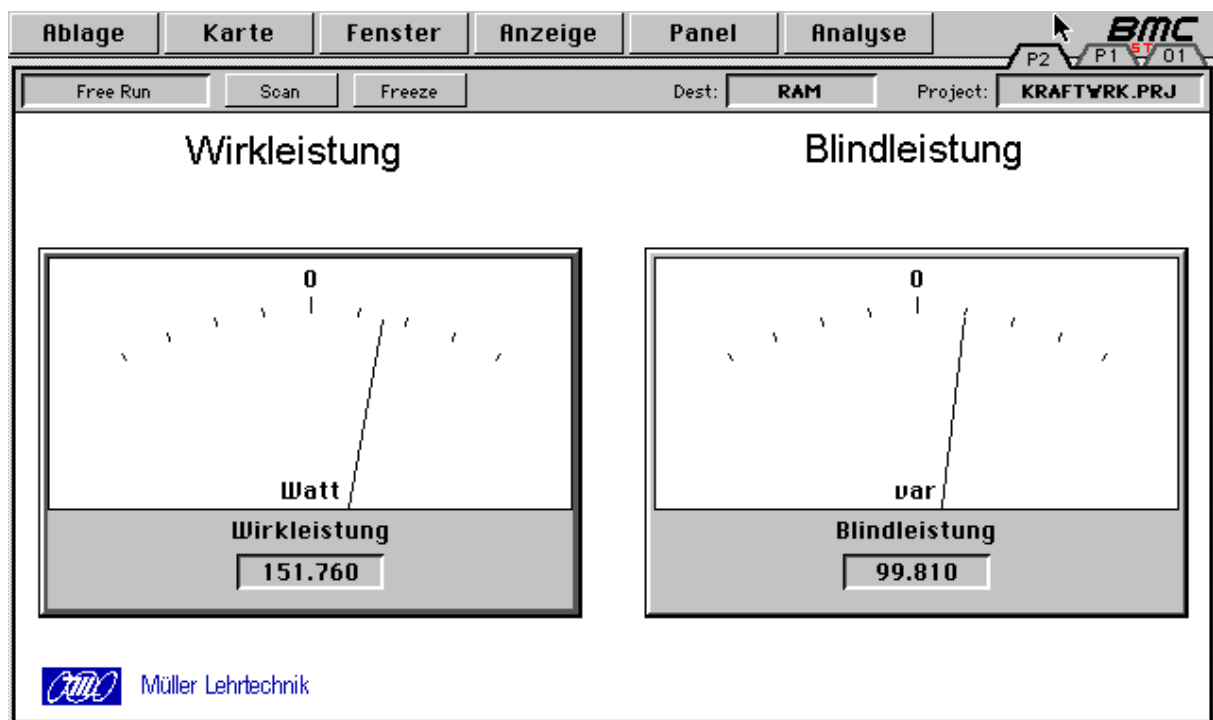
**Die Software ist so installiert, daß eventuelle Änderungen der Einstellung, hervorgerufen durch die Bedienung des Programmes, beim Beenden nicht gespeichert werden.**

Sind andere Einstellungen erwünscht, so kann die Software leicht angepaßt werden. Hierzu verweisen wir auf die Softwarebeschreibung von BMC. Die so erstellte Datei kann dann als zusätzliche Variante abgespeichert werden. Die Meßwerte-Verarbeitungssoftware erlaubt neben der Meßdatenaufzeichnung und Softwareoszilloskop auch die Prozeßvisualisierung in Echtzeit.

*Bild 10: Software-Oszilloskop von Nextview Light mit Generator- und Netzspannung*



*Bild 11: Die Prozeßvisualisierung zeigt die aktuellen Meßwerte der Meßgeräte des Kraftwerks an*



*Bild 12: Die aktuellen Meßwerte der Meßgeräte für Leistung und Blindleistung des Kraftwerks zeigt dieses Prozeßfenster an*

#### 4.4.2 Hardware

Die Hardware besteht aus dem AD-Wandlermodul  $\mu$ Meter 8 mit 8 analogen Eingängen und je einem digitalen Ein- und Ausgang. Das Modul wird an die parallele Druckerschnittstelle des Laptops angeschlossen.

## 5 Anleitung zu den Vorfürungen

### 5.1 Wechselstromleistung

#### 5.1.1 Wirkleistung

Schaltet man einen Wirkwiderstand, z. B. ein Heizgerät, in einen Wechselstromkreis, so sind Spannung und Strom phasengleich. Durch Multiplikation zusammengehöriger Augenblickswerte von Strom und Spannung erhält man die Augenblickswerte der Leistung. Die Leistungskurve ist immer positiv, da Spannung und Strom bei einem Wirkwiderstand entweder beide gleichzeitig positiv oder gleichzeitig negativ sind. Positive Leistung bedeutet, daß die Leistung zum Verbraucher geht. Die Leistung hat die doppelte Frequenz wie die Spannung.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \hat{p} = \frac{1}{2} \cdot \hat{u} \cdot \hat{i} = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}$$

Die Wechselstromleistung kann durch Flächenverwandlung in eine gleichwertige Gleichstromleistung, die sogenannte Wirkleistung umgewandelt werden. Beim Wirkwiderstand ist die Wirkleistung halb so groß wie der Scheitelwert der Leistung. Die Fläche unter der Kurve ist die Wirkarbeit.

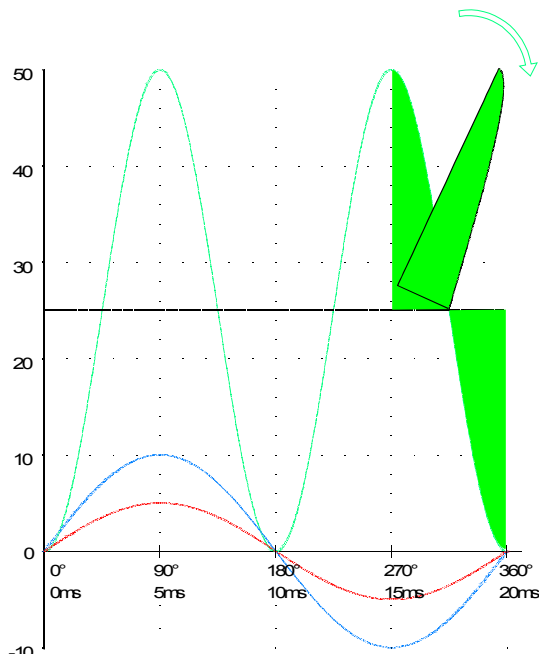


Bild 13: Wechselstromleistung bei ohmscher Last

#### 5.1.2 Scheinleistung

Sind Spannung und Strom phasenverschoben, ergibt die Multiplikation der Effektivwerte eine scheinbare Leistung. Man nennt sie deshalb Scheinleistung S. Die Wirkleistung P ist bei Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung immer kleiner als die Scheinleistung. Periodenabschnitte mit negativer Leistung bedeuten, daß Energie an das Netz zurückgeliefert wird. Während den Periodenabschnitten mit positiver Leistung wird Energie aus dem Netz entnommen. Die Differenz zwischen der positiven Energie und der negativen Energie wird im Verbraucher in Wirkarbeit umgesetzt.

Die Flächen unterhalb der x-Achse und die der Kurvenkappen sind Blindarbeit. Nur die im mittleren Kurvenbereich liegende Flächen bilden die Wirkarbeit, die in einer Periodendauer umgesetzt wird. Diese Energie können die Maschinen und Geräte nutzen.

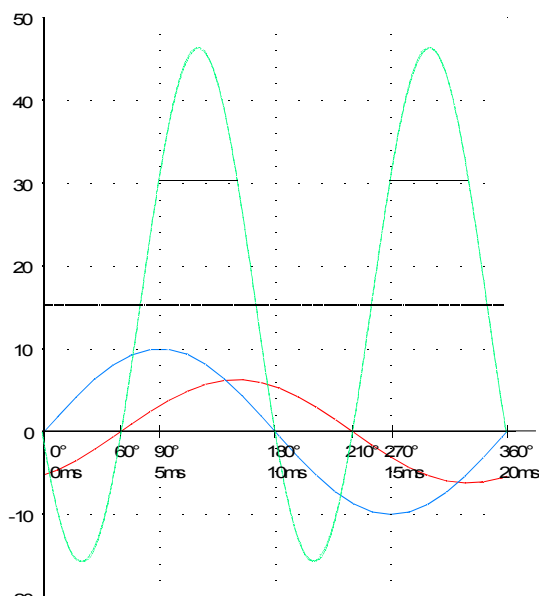
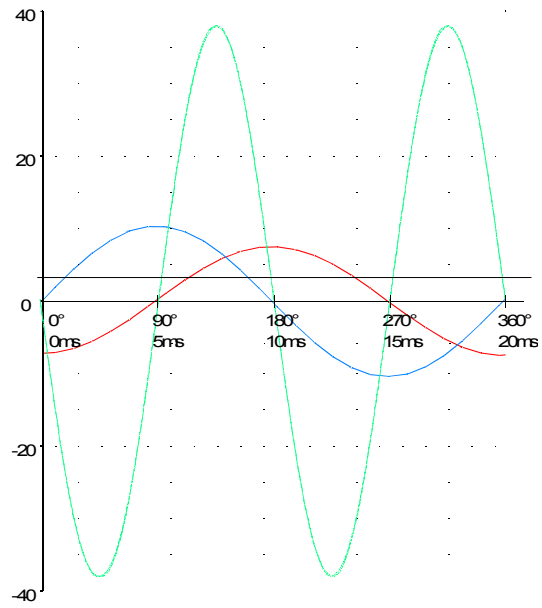


Bild 14: Wechselstromleistung bei einer Phasenverschiebung von 60°



### 5.1.3 Blindleistung

Beträgt die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom  $90^\circ$ , z.B. bei einer reinen Induktivität oder bei einer reinen Kapazität, so werden die positiven Flächenteile gleich groß wie die negativen. Die Wirkleistung ist dann Null und es tritt nur Blindleistung auf. Die ganze Energie pendelt dabei zwischen Verbraucher und Erzeuger hin und her.



**Bild 15:** induktive Blindleistung (Phasenverschiebung:  $90^\circ$ )

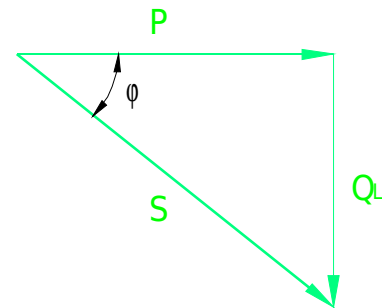
### 5.1.4 Wirkfaktor

Das Verhältnis von Wirkleistung zu Scheinleistung bezeichnet man als Leistungsfaktor oder Wirkfaktor.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

Der Leistungsfaktor ist ein Maß dafür, wieviel von der Scheinleistung in Wirkleistung umgesetzt wird. Bei gleichbleibender Wirkleistung ist die Scheinleistung und damit der Strom um so größer, je kleiner der  $\cos \varphi$  ist.

Der Zusammenhang zwischen den Leistungen kann auch an einem rechtwinkligen Dreieck dargestellt werden, ähnlich der Dreiecke für Spannungen (*Reihenschaltung*) bzw. Ströme (*Parallelschaltung*).

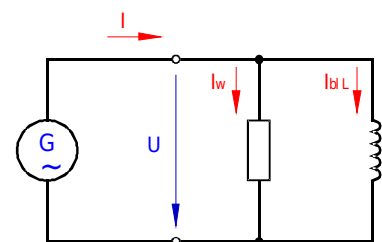


**Bild 16:** Leistungsdreieck

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

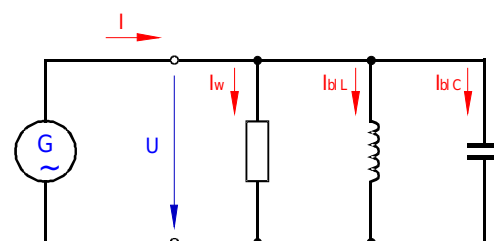
### 5.1.5 Kompensation

Zur Kompensation werden Kondensatoren oder Synchronmotoren verwendet. Ein Motor nimmt neben der Wirkleistung auch induktive Blindleistung auf, der dazu parallel geschaltete Kondensator dagegen kapazitive Blindleistung. Induktive Blindleistung und kapazitive Blindleistung sind um  $180^\circ$  phasenverschoben. Dadurch liefert der Kondensator immer dann Energie ans Netz, wenn die Induktivität des Motors Energie aufnimmt. Die gesamte Blindleistungsaufnahme aus dem Netz verringert sich. Bei gleicher Wirkleistung werden die aus dem Netz aufgenommene Scheinleistung und die aufgenommene Stromstärke kleiner.



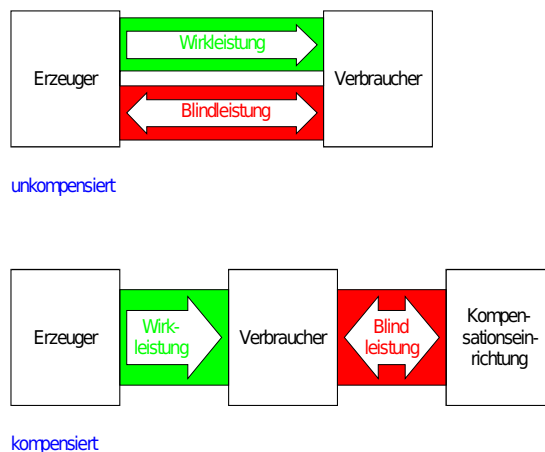
**Bild 17:** Anordnung ohne Kompensation

Das Ausgleichen der induktiven Blindleistung durch kapazitive Blindleistung nennt man kompensieren (*compensare = ausgleichen*).



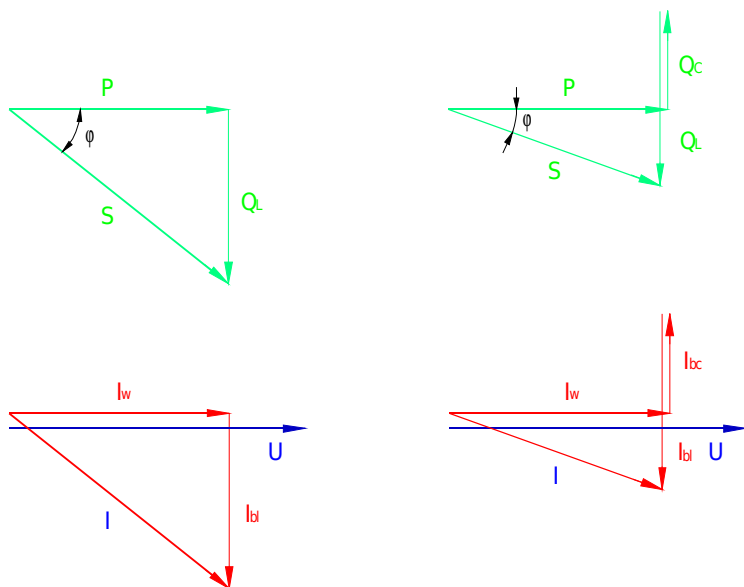
**Bild 18:** Verbraucher mit Kompensation

Durch die Blindleistung werden Erzeugeranlagen, Leitungen und Transformatoren belastet. Bei Kompensation der Blindleistung muß von den Erzeugeranlagen zu den Verbraucheranlagen bei gleicher Wirkleistung weniger Blindleistung übertragen werden, als ohne Kompensation notwendig ist. Dadurch werden Erzeugeranlagen und Energieübertragungsanlagen entlastet. Außerdem verringern sich die Energieverluste in den Übertragungsanlagen. Deshalb können Energiekosten und Materialkosten bei Erzeugeranlagen und Übertragungsanlagen eingespart werden.



**Bild 19:** Energiefluß mit und ohne Kompensation

Die Kompensation der Blindleistung bewirkt eine Verkleinerung des Phasenwinkels zwischen Wirkleistung und Scheinleistung und eine Vergrößerung des Wirkleistungsfaktors  $\cos \varphi$ . Wenn auf nahe  $\cos \varphi = 1$  kompensiert wird, pendelt der größte Teil der Blindleistung nur noch zwischen dem Verbraucher und der Kompensationsanlage hin und her. Deshalb wird die Kompensationsanlage möglichst nahe am Verbraucher aufgestellt.



**Bild 20:** Zeigerbilder der Leistungen, links ohne, rechts mit Kompensation.

Der Blindleistungsanteil, den der Generator liefern muß, errechnet sich aus:

$$Q_{Gen} = Q_L - Q_C$$

**Bild 21:** Zeigerbilder der Ströme entsprechend denen der Leistungen.

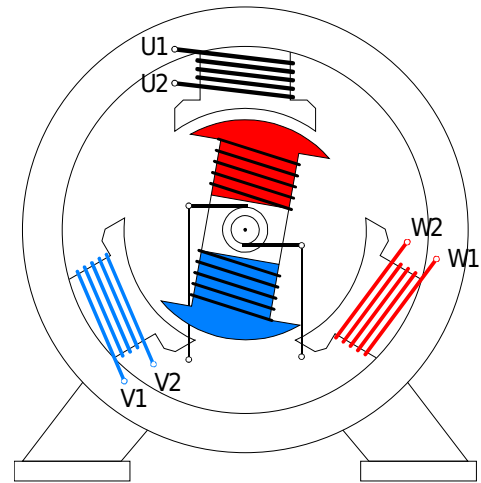
Der Blindstromanteil, den der Generator liefern muß, errechnet sich aus:

$$I_{bGen} = I_{bl} - I_{bc}$$

## 5.2 Wirkungsweise und Betriebsverhalten des Synchrongenerators

Der Läufer wird von einer Kraftmaschine angetrieben. Der Gleichstrom der Erregerwicklung erzeugt ein zum Läufer stillstehendes Magnetfeld. Durch die Drehung des Läufers entsteht aber für den Ständer ein Drehfeld. Dieses Drehfeld induziert in den drei Strängen der Ständerwicklung drei Spannungen, zwischen denen Phasenverschiebungswinkel von  $120^\circ$  bestehen. Dem Ständer kann Drehstrom entnommen werden.

Die induzierte Spannung des Synchrongenerators hängt vom Erregerstrom und von der Drehzahl ab. Von der Drehzahl hängt aber auch die Frequenz ab, die jedoch meistens vorgeschrieben ist. Deswegen wird die Spannung vom Erregerstrom eingestellt. Mit zunehmendem Erregerstrom tritt Sättigung ein, und die Leerlaufkennlinie wird flach.

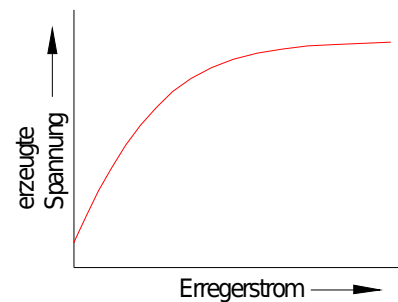


**Bild 22:** Drehstrom-Synchrongenerator

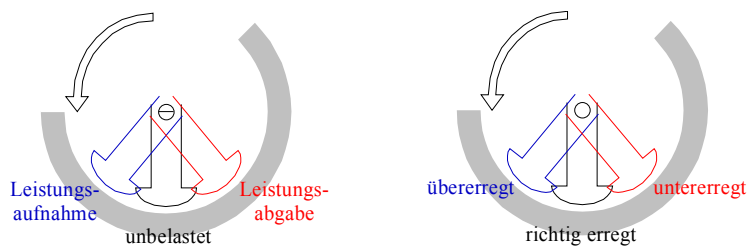
Wird der Synchrongenerator durch angeschlossene Verbraucher belastet, fließt auch in der Ständerwicklung Strom. Dieser Strom erzeugt dort durch Selbstinduktion einen Spannungsabfall. Wenn man vom Wirkwiderstand der Wicklung absieht, verhält sich ein belasteter Synchrongenerator wie ein belastungsunabhängiger Generator, mit dem in Reihe eine Induktivität geschaltet ist.

Am Netz gibt der Synchrongenerator um so mehr Leistung ab, je stärker er angetrieben wird. An einem starren Netz d. h. an einem Netz mit festliegender Frequenz, behält das Polrad bei größerer Belastung seine Drehzahl, eilt aber dem Drehfeld um einen größeren Lastwinkel vor.

Steigert man beim Synchrongenerator die Erregung über die für den Leerlauf erforderliche Erregung, so nimmt die Spannung  $U_0$  zu. Die Spannung  $U_{bl}$  ändert sich dann ebenfalls, da die Differenz von  $U_0$  und  $U_{bl}$  weiter gleich  $U$  sein muß. Da der Strom  $I$  senkrecht zu  $U_{bl}$  ist, ändert auch dieser seine Lage. Es wird jetzt Strom geliefert, welcher der Spannung nacheilt. Es wird also induktive Blindleistung geliefert. Diese Blindleistung kann die Blindleistung induktiver Verbraucher im Netz decken. Zu geringe Erregung von Synchrongeneratoren führt dagegen zur Aufnahme von induktiver Blindleistung.

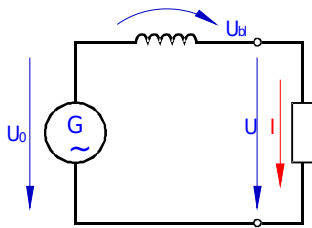


**Bild 23:** Induzierte Spannung eines Synchrongenerators bei konstanter Drehzahl

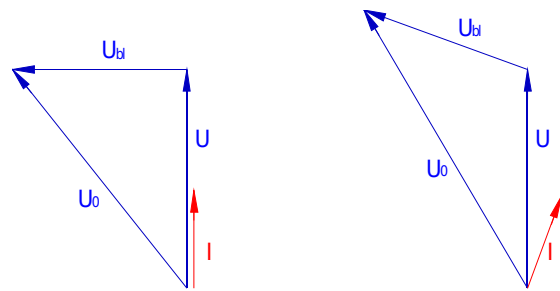


**Bild 24:** Lastwinkel des Synchrongenerators, links im Generator- und Motorbetrieb, rechts im Phasenschieberbetrieb

## Ersatzschaltbilder des Synchrongenerators und die entsprechenden Zeigerbilder



**Bild 25:** Vereinfachte Ersatzschaltung ohne den Wicklungswiderstand der Ständerspule

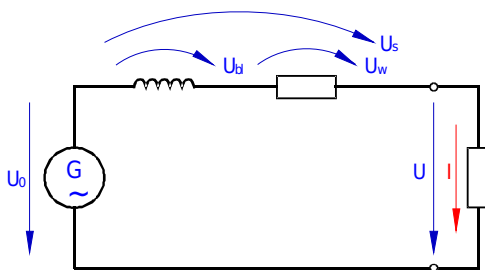


**Bild 26:** Zeigerbild von normal und über-erregtem Synchrongenerator (vereinfachte Schaltung)

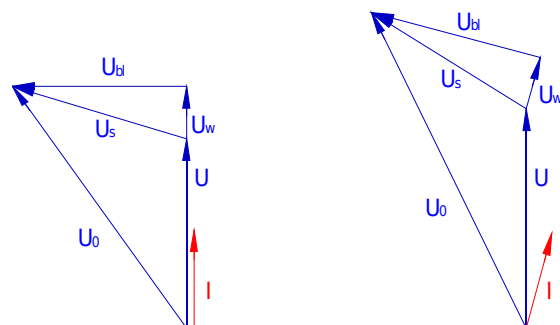
es gilt (linke Größe, linkes Zeigerbild):  
 $U_{bi} < U_{bl}$ ,  $U_0 < U_0$ ,  $I < I$ ,  $U = U$

### Induktion:

Beim Synchrongenerator tritt der Effekt der Spannungserzeugung durch Induktion der 2. Art (zeitliche magnetische Flußdichteänderung) auf.



**Bild 27:** Ersatzschaltung des realen Synchrongenerators



**Bild 28:** Zeigerbild von normal und über-erregtem Synchrongenerator (reale Schaltung)

es gilt (linke Größe, linkes Zeigerbild):  
 $U_{bi} < U_{bl}$ ,  $U_0 < U_0$ ,  $I < I$ ,  $U_w < U_w$ ,  $U_s < U_s$ ,  $U = U$

die Spule geschoben und wieder herausgezogen. Dabei sollte der Versuch mit zwei Spulen unterschiedlicher Wicklungen durchgeführt werden. Zudem sollte das Verhalten des Spannungsmessers beobachtet werden, wenn der Stabmagnet schnell, dann langsam in die Spule hinein- und herausgeschoben wird.

Als Ergebnis läßt sich folgendes Fazit ziehen:

In einer Spule, die von einem fremden, zeitlich sich ändernden Magnetfeld durchsetzt wird, tritt eine Spannung auf. Die Höhe der Induktionsspannung hängt von  $dB/dt$  und der Windungszahl (Induktivität) der Spule ab.

### 5.3 Inselbetrieb

Im Inselbetrieb kann durch Erhöhung der mechanischen Leistung (*höhere Drehzahl*) oder des Erregerstromes die Spannung vergrößert werden. Da die Frequenz festliegt, wird eine Spannungserhöhung praktisch nur durch den Erregerstrom geregelt.

1. Hochfahren auf Nenndrehzahl  $1500 \text{ 1/min}$  beziehungsweise auf Netzfrequenz  $50 \text{ Hz}$  und Nennspannung  $230\text{V}$ .
  - Das Stroboskop zeigt bei Einstellung „*externe Triggerung*“ einen „stehenden“ Generatorläufer. Die externe Triggerung ist die genaueste Betriebsart des Stroboskops. Dabei steuert die Netzspannung die Blitzfolge. Natürlich läßt sich auch die Betriebsart  $U/\text{min}$  mit Einstellung  $1500$  oder **Blitze pro Sekunde** mit  $50 (1/s = \text{Hz})$  verwenden.
  - Das Softwareoszilloskop zeigt zwei „stehende“ Spannungen an. Die (Verbunds-) Netzspannung (*weißes Signal*) dient als Referenz. Diese Vergleichsspannung besitzt eine konstante Nennfrequenz von  $50 \text{ Hz}$ .
2. Zuschalten der verschiedenen Lasten.
  - erste Wirklast (*Lampen*)
  - erste und zweite Wirklast (*Lampen*)
  - beide Wirklasten und induktive Last (*Motor im Leerlauf*)

#### A. Verhalten des Kraftwerks (*Was geschieht ?*):

- die Generatorspannung bricht ein (*Spannungsmesser am Kraftwerk*)
- die Generator Drehzahl geht zurück (*Stroboskop → der Generatorläufer „steht nicht mehr still“; Softwareoszilloskop → Generatorspannung „läuft“*)
- der Leistungsmesser zeigt eine größere Leistungsabgabe an (*Abgabe: der Zeiger bewegt sich im Bereich rechts der Null*)

Die Meßwerte für Blindleistung und  $\cos \varphi$  werden nicht mit in die Beobachtung einbezogen. Eine gesonderte Betrachtung folgt im Unterkapitel Kompensation.

#### B. Erklärung des Verhaltens (*Was bedeutet das für das Kraftwerk ?*):

- dem Generator wird mehr Leistung entnommen bei **gleichbleibender** zugeführter Turbinenleistung

#### C. Reaktion der Regeleinrichtung (*Wie muß das Kraftwerk reagieren ?*):

→ das Kraftwerk hat das Bestreben, die Spannung und deren Frequenz konstant auf den Nenndaten ( $230\text{V} / 50\text{Hz}$ ) zu halten. Das bedeutet:

⇒ über den Sollwertsteller des Umrichters geben wir mehr Leistung auf die Turbine (Antriebsmotor), bis sich Spannungs- und Drehzahl bzw. Frequenzwert wieder auf Nennwert befinden.

*Diesen Ausregelvorgang kann man vor jedem Zuschalten einer neuen Last durchführen, um zu zeigen, wie die Meßwerte erneut zurückgehen oder ohne Regelvorgang, um zu zeigen, wie sich Spannungs- und Frequenzwert weiter verringern.*

Die Leistung, die der Generator liefert, reicht nicht aus, um die Nenndaten des Netzes  $230\text{V} / 50\text{Hz}$  zu halten bzw. zu erreichen, wenn alle drei Lasten zugeschaltet sind. Der Generator ist somit „überlastet“.

Dieses Verhalten ist in *Tabelle 6.3* (ohne Ausregelvorgang) und *Tabelle 6.5* (mit Regelvorgang auf Nennwerte des Netzes 230 V / 50Hz) im *Kapitel 6 Messungen am Kraftwerkmodell* dokumentiert. Wird die Belastung verringert, tritt gegensätzliches Verhalten für Spannung und Frequenz auf. Diesen Vorgang nennt man Lastabwurf.

### 5.3.1 Kompensation

Die Wirkungsweise der Kompensation kann das Demonstrationsmodell nur im Inselbetrieb darstellen.<sup>1</sup> Es wird der obige Versuch (*Inselbetrieb*) durchgeführt. Jetzt wird das Verhalten der Blindleistung und des Wirkfaktors (Leistungsfaktor oder  $\cos \varphi$ ) betrachtet. Die Grundlagen für das Verständnis der elektrischen Vorgänge bei der Kompensation lesen Sie in *Kapitel 5.1 Wechselstromleistung* und *Kapitel 5.1.5 Kompensation*.

1. Hochfahren auf Nennwerte des Netzes (230V / 50 Hz)
2. Zuschalten der **Wirklasten** / **induktiven Last** und **eventuell der Wirklasten** / **Kondensatorbatterie 1, 2, 1+2**.

#### A. Verhalten des Kraftwerks (*Was geschieht ?*):

- der Blindleistungsmesser zeigt 0 an
- der  $\cos \varphi$  zeigt 1 an
- der Motor nimmt induktive Blindleistung auf (*induktiv: der Zeiger bewegt sich im Bereich rechts der Null*)
- der  $\cos \varphi$  nimmt einen Wert kleiner 1 an (*induktiv: der Zeiger bewegt sich im Bereich rechts der Eins*)
- der Generator muß jetzt weniger Blindleistung an die Verbraucher liefern, der Wert der Blindleistung wird kleiner
- der Wert des  $\cos \varphi$  steigt etwas in Richtung 1 an.

#### B. Erklärung des Verhaltens (*Was bedeutet das für das Kraftwerk ?*):

- wird der Generator mit ohmschen Verbrauchern (Wirklasten) belastet, gibt es **keine Phasenverschiebung** (zeitliche Verzögerung) zwischen Spannung und Strom ( $\rightarrow \cos \varphi = 1$ ). Der Generator liefert nur Wirkleistung, es tritt keine Blindleistung auf.
- durch die induktive Belastung muß der Generator neben Wirk- auch Blindleistung abgeben. Zwischen Spannung und zugehörigem Strom besteht eine Phasenverschiebung (zeitliche Verzögerung), d. h. es pendelt Blindleistung zwischen Erzeuger und Verbraucher hin und her ( $\rightarrow \cos \varphi < 1$ ).
- die Blindleistung, die der Generator mit zugeschalteter Kompensation bereitstellen muß ist geringer, da die Kondensatoren einen teil der induktiven Blindleistung liefern (=

<sup>1</sup> Siehe Kapitel 3.4.1.2 Energiefluß des Kraftwerkmodells

nehmen kapazitive Blindleistung auf). Da weniger Blindleistung zwischen Generator und Motor pendeln muß, werden Generator und Netzleitungen nicht so stark belastet (es fließt weniger Strom über die Leitung; der Blindleistungsanteil nimmt ab →  $\cos \varphi$  geht gegen 1).

### C. Reaktion der Regeleinrichtung (Wie muß das Kraftwerk reagieren ?):

→ die Kraftwerkbetreiber sind bestrebt, daß der Wirkfaktor im Netz zwischen einem Wert von 0,8 induktiv und 0,9 kapazitiv liegt. Mit Blindleistung lassen sich keine Geräte und Maschinen betreiben, er belastet nur die Versorgungsleitungen und Transformatoren. Elektrische Großverbraucher wie z. B. Industriebetriebe müssen deshalb durch Kompensationseinrichtungen selbst dafür sorgen, daß der  $\cos \varphi$  in dem vorgeschriebenen Bereich bleibt.

Meßwerte für die Kompensation entnehmen Sie der *Tabelle 6.5 im Kapitel 6 Messungen am Kraftwerkmodell*.

## 5.4 Verbundbetrieb

Im Verbundbetrieb kann durch Ändern der Erregung und der mechanischen Leistung die Spannung **nicht** geregelt werden, da das Netz konstant auf 230V / 50Hz gehalten wird. Erhöht man die mechanische Leistung oder die Erregung, so bleibt die Spannung konstant. Das Kraftwerk kann, indem diese Größen verändert werden, Wirkleistung beziehen oder abgeben und im Phasenschieberbetrieb induktive Blindleistung aufnehmen oder liefern.

1. Hochfahren auf Nenndrehzahl *1500 1/min* beziehungsweise auf Netzfrequenz *50 Hz* und Nennspannung *230V* im Inselbetrieb.
2. Synchronisieren des Generators mit dem Netz. Dazu müssen vier Bedingungen beachtet werden.
  - gleiche Phasenlage
  - gleiche Frequenz
  - gleiche Spannung
  - gleiche Phasenfolge (Drehrichtung) von Netz- und Generatorspannung
3. In den Verbund schalten, sobald die Synchronisationsbedingungen erfüllt werden.
4. Zuschalten der verschiedenen Lasten.
  - erste Wirklast (*Lampen*)
  - erste und zweite Wirklast (*Lampen*)
  - beide Wirklasten und induktive Last (*Motor im Leerlauf*)
5. Nun wird auf die Turbine **mehr / weniger** Energie gegeben. Dies geschieht über den Sollwertsteller des Umrichters, der dem Antriebsmotor entsprechend dem Stellwert elektrische Leistung zuführt. (*Für diese Betrachtung spielt es keine Rolle, ob oder welche Lasten zugeschaltet sind*). Die Erregung bleibt konstant.

**A. Verhalten des Kraftwerks (*Was geschieht ?*):**

- die Generatorspannung bleibt konstant (*Spannungsmesser am Kraftwerk*)
- die Generatordrehzahl bleibt konstant
- der Leistungsmesser zeigt weiterhin dieselbe Leistungsabgabe an, bei exakter Synchronisation 0 (*folgender grüner Text gilt für nicht exakte Synchronisation:*)
- der Leistungsmesser zeigt einen Wert **rechts der Null** für **Leistungsabgabe** / **links der Null** für **Leistungsaufnahme** an
- die Blindleistung und der daraus resultierende  $\cos \varphi$  bleiben bei **allen** Versuchen konstant, da die Erregung des Synchrongenerators nicht verändert wird. (*Für den richtig erregten Generator gilt:  $\rightarrow \cos \varphi = 1$ , Blindleistung = 0*)

**B. Erklärung des Verhaltens (*Was bedeutet das für das Kraftwerk ?*):**

- der Generator läuft nach exakter Synchronisation weder im Generator- noch im Motorbetrieb, er ist im Leerlauf (*nicht exakte Synchronisation, Generator wird gegenüber dem Leerlauf **stärker** / **weniger stark** angetrieben: **gibt** / **nimmt** selbst bei stärkerer Belastung **dieselbe** Leistung **ab** / **auf**, da die zugeführte Turbinenleistung konstant ist. Damit die Nenndaten des Netzes aufrecht erhalten bleiben, wird die **überschüssige** / **fehlende** Leistung **ins** / **aus dem** Verbundnetz **abgegeben** / **entnommen**).*
- durch **erhöhen** / **erniedrigen** der Turbinenleistung Generator **gibt** / **nimmt** der Generator Leistung **ab** / **auf**. Mit zunehmender Änderung vergrößert sich der Lastwinkel, das Polrad **eilt** / **läuft** dem Drehfeld **voraus** / **hinterher**. Der Synchrongenerator arbeitet im **Generatorbetrieb** / **Motorbereich**. Bei **Motorbetrieb** (wirkt am Verbundnetz als Motor) **entnimmt** der Generator Leistung aus dem Verbundnetz, die Antriebsturbine **bremst** ihn. Im normalen **Generatorbetrieb** (wirkt am Verbundnetz als Generator) liefert er **Leistung** an den Verbund, **angetrieben** durch die Turbine.

**C. Reaktion der Regeleinrichtung (*Wie muß das Kraftwerk reagieren ?*):**

→ das Kraftwerk hat das bestreben, die Spannung und deren Frequenz konstant auf den Nenndaten ( $230V / 50Hz$ ) zu halten. Das bedeutet, daß Kraftwerke, die noch Reserve besitzen, für am Maximum betriebene Kraftwerke die noch fehlende elektrische Energie bereitstellen. Bestimmte Kraftwerkstypen können auf Belastungsänderungen nicht so schnell reagieren. Hier helfen z. B. Wasserkraftwerke, den kurzfristigen Energiebedarf zu decken.

*Um sehr einfach die Konstanz des Verbundnetzes zu zeigen läßt sich der Versuch auch wie folgt durchführen:*

1. Demonstrationsanlage hochfahren
  2. eine Wirklast zuschalten und den Generator auf Nennwerte ( $230V / 50Hz$ ) des Netzes einstellen
  3. Generator synchronisieren
  4. in den Verbund schalten
  5. zweite Wirklast zuschalten
  6. beide Lasten abschalten
- A. keine Änderung an den Meßgeräten  
B. siehe oben  
C. siehe oben



Im Gegensatz zum Inselbetrieb bricht weder die Spannung zusammen, noch geht die Drehzahl zurück. Die zusätzlich benötigte Energie, um die Nenndaten des Netzes  $230V / 50Hz$  zu halten bzw. zu erreichen, liefern die Kraftwerke aus dem Verbund.

Der Generator kann nicht „überlastet“ werden. Gibt der Generator mehr Leistung ab, als seine „eigenen“ Verbraucher beziehen, dann liefert er die überschüssige Energie ans Verbundnetz. Somit ist eine große Versorgungssicherheit gewährleistet. Fällt ein Kraftwerk aus, so müssen die anderen Kraftwerke des Verbundes gemeinsam die fehlende Energie bereitstellen. Auch im Verbundnetz muß Verbrauch und Erzeugung stets ausgewogen sein.

Dieses Verhalten ist in der *Tabelle 6.8 im Kapitel 6 Messungen am Kraftwerkmodell* dokumentiert.

### 5.4.1 Phasenschieberbetrieb

Den Phasenschieberbetrieb kann ein Synchrongenerator nur fahren, wenn er an das Verbundnetz geschaltet ist. Nur dann bleibt bei Änderung des Erregerstromes die Klemmenspannung konstant, wobei die geometrische Differenz von induzierter Generatorspannung (*durch Erregung veränderbar*) und Verbundnetzspannung (*konstant*) am Innenwiderstand (Wicklungswiderstand und Induktivität) abfallen muß.<sup>1</sup> Falls der Generator über oder untererregt ist, ergibt sich dabei eine Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom. Dadurch liefert oder bezieht der Generator induktive Blindleistung.

1. Hochfahren auf Nennwerte des Netzes ( $230V / 50 Hz$ )
2. In den Verbund schalten, sobald die Synchronisationsbedingungen erfüllt werden.
3. Nun wird der Generator **untererregt** / **richtig erregt** / **übererregt**. Dies geschieht über den Stromregler des Netzteils für den Erregerstrom. (*Für diese Betrachtung spielt es keine Rolle, ob oder welche Lasten zugeschaltet sind*). Der Sollwertsteller des Umrichters wird nicht verändert.

#### A. Verhalten des Kraftwerks (Was geschieht ?):

- der Generator nimmt induktive Blindleistung auf (*kapazitiv: der Zeiger bewegt sich im Bereich links der Null*) → er wirkt am Netz wie eine Induktivität
- der  $\cos \varphi$  nimmt einen Wert kleiner 1 an (*kapazitiv: der Zeiger bewegt sich im Bereich links der Eins*)
- der Blindleistungsmesser zeigt für 0 an für den richtig erregten Synchrongenerator
- der  $\cos \varphi$  zeigt 1 an für den richtig erregten Synchrongenerator
- der Generator gibt induktive Blindleistung ab (*induktiv: der Zeiger bewegt sich im Bereich rechts der Null*) → er wirkt am Netz wie eine Kapazität

---

<sup>1</sup> Siehe Kapitel 5.2 Wirkungsweise und Verhalten des Synchrongenerators

- der  $\cos \varphi$  nimmt einen Wert kleiner 1 an (induktiv: der Zeiger bewegt sich im Bereich rechts der Eins)
- die Wirkleistung bleibt bei allen Versuchen konstant (bei 0), da der Sollwertsteller des Umrichters nicht verändert wird

**B. Erklärung des Verhaltens (Was bedeutet das für das Kraftwerk?):**

Siehe Kapitel 3.2.1.2 Verhalten und Wirkungsweise eines Synchrongenerators.

**C. Reaktion der Regeleinrichtung (Wie muß das Kraftwerk reagieren?):**

→ große Synchronmotoren oder -generatoren, die übererregt und unbelastet am Netz laufen, liefern induktive Blindenergie und können deshalb zur Kompensation verwendet werden.

Meßwerte für den Phasenschieberbetrieb entnehmen Sie der *Tabelle 6.7 im Kapitel 6 Messungen am Kraftwerkmodell*.

## 6 Messungen am Kraftwerkmodell

Die Meßreihen verdeutlichen das Verhalten des Synchrongenerators. In der folgenden Tabelle sind die Meßgrößen zusammengestellt, die für die Messungen benötigt werden.

**Zusammenfassung der Meßgrößen:**

Erregerstromstärke	$I_{err}$	Einstellung an den Stromreglern des Erregernetzteils
Generatorfrequenz	$f_{gen}$	Einstellung über den Sollwertsteller für die Umrichterfrequenz, wobei das Stroboskop in der Betriebsart ext. Trig. betrieben wird Ablesung über das Stroboskop im Modus $1/s$ bei $f_{gen} \neq 50$ Hz
Umrichterfrequenz	$f_{umr}$	Einstellung über die analoge Sollwertvorgabe des Umrichters Ablesung über das Umrichterdisplay (Tastenfolge: <i>Func Down Down Func</i> )
Strom der Ständerwicklungen	$I_{Gen}$	rechnerische Ermittlung
Generatorspannung	$U_{Gen}$	Meßwertausgabe über Dreheisenmeßwerk
Wirkleistung	$P$	Meßwertausgabe vom Multimeßumformer über Drehspulmeßwerk
Blindleistung	$Q$	Meßwertausgabe vom Multimeßumformer über Drehspulmeßwerk
Leistungs- / Wirkfaktor	$\cos \varphi$	Meßwertausgabe vom Multimeßumformer über Drehspulmeßwerk

**Zeichenerklärung:**

L1, L2, L2	Lasten 1 bis 3, der Schaltzustand <i>EIN</i> wird durch <b>X</b> dargestellt
C1, C2	Kondensatorbatterien 1 und 2, der Schaltzustand <i>EIN</i> wird durch <b>X</b> dargestellt
-	bedeutet, daß der Schaltzustand der Last bedeutungslos ist (immer abgeschaltet)

**Vorbereitung für die Messungen:**

- Am Erregernetzteil den großen und kleinen Spannungsreglerknopf auf höchste Spannung einstellen.
- Anlage unter folgenden Bedingungen ca. 5 min warmlaufen lassen:  
Verbundbetrieb; Generator läuft am Netz nur mit ( $P \approx 0$ ;  $Q \approx 0$ ); alle Lasten ein; zwischen den Meßreihen die Anlage kurz abschalten ( $\approx 2$  min)

### 6.1 Generatorspannung, unbelastet in Abhängigkeit vom Erregerstrom bei $f = 50 \text{ Hz}$ (Inselbetrieb)

Vorgehensweise:

- Generatorzahl auf 50Hz halten, Generator läuft ohne Last
- Erregerstrom nach den angegebenen Werten einstellen

Erregerstromstärke $I_{\text{err}}$ [A]	Generatorspannung $U_{\text{Gen}}$ [V]	Generatorfrequenz $f_{\text{Gen}}$ [Hz]
2,0	177	50
2,5	202	50
3,0	220	50
3,4	230	50
3,5	232	50
4,0	240	50
4,5	248	50
5,0	252	50
5,5	257	50
6	260	50

### 6.2 Generatorbetrieb mit konstanter Spannung und Umrichterfrequenz

Vorgehensweise:

- die Umrichterfrequenz im Leerlauf so einstellen, daß  $f_{\text{Gen}} = 50 \text{ Hz}$
- Generatorspannung über den Erregerstrom möglichst auf 230 V halten

$I_{\text{err}}$ [A]	$U_{\text{Gen}}$ [V]	P [W]	Q [var]	$\cos \varphi$	$I_{\text{Gen}}$ [A]	$f_{\text{Gen}}$	$f_{\text{Umr}}$	L1	L2	L3	C1	C2
3,35	230	0	0	1		50,0	51,3					
4,15	230	70	0	1		48,5	51,3	X				
5,39	230	140	0	1		46,5	51,3	X	X			
6,00	210	40	210	0,38 ind		48,5	51,3			X		
6,00	218	40	180	0,42 ind		48,6	51,3			X	X	
5,65	230	50	110	0,56 ind		48,7	51,3			X		X
4,81	230	58	60	0,76 ind		48,7	51,3			X	X	X
6,00	226	115	70	0,89 ind		47,0	51,3	X		X	X	X

### 6.3 Generator mit konstanter Erregung und Umrichterfrequenz

Vorgehensweise:

- die Umrichterfrequenz im Leerlauf so einstellen, daß  $f_{\text{Gen}} = 50 \text{ Hz}$
- Spannungsänderungen werden weder über die Umrichterfrequenz noch über die Erregung ausgeregelt

$I_{\text{err}}$ [A]	$U_{\text{Gen}}$ [V]	P [W]	Q [var]	$\cos \varphi$	$I_{\text{Gen}}$ [A]	$f_{\text{Gen}}$	$f_{\text{Umr}}$	L1	L2	L3	C1	C2
3,16	225	0	0	1		50,0	51,3					
3,16	212	60	0	1		48,8	51,3	X				
3,16	200	110	0	1		47,5	51,3	X	X			
3,16	168	25	130	0,40 ind		49,2	51,3			X		
3,16	205	38	40	0,77 ind		49,2	51,3			X	X	X
3,16	160	68	120	0,64 ind		48,3	51,3	X		X		
3,16	192	88	40	0,94 ind		48,0	51,3	X		X	X	X
3,16	152	100	100	0,80 ind		47,2	51,3	X	X	X		
3,16	180	128	40	0,97 ind		46,7	51,3	X	X	X	X	X

## 6.4 Generatorbetrieb mit konstanter Erregung und Frequenz

Vorgehensweise:

- Die Umrichterfrequenz wird nachgeregelt und dadurch die Generatordrehzahl auf 50Hz gehalten

$I_{\text{err}}$ [A]	$U_{\text{Gen}}$ [V]	P [W]	Q [var]	$\cos \varphi$	$I_{\text{Gen}}$ [A]	$f_{\text{Gen}}$	$f_{\text{Umr}}$	L1	L2	L3	C1	C2
4,00	242	0	0	1		50	51,4					
4,00	236	75	0	1		50	53,0	X				
4,00	230	140	0	1		50	55,8	X	X			
4,00	193	30	170	0,37 ind		50	52,6			X		
4,00	228	40	50	0,76 ind		50	52,6			X	X	X
4,00	187	138	140	0,77 ind		50	57,6	X	X	X		
4,00	211	160	40	0,98 ind		48,8	60,0	X	X	X	X	X

## 6.5 Generator im Normalbetrieb bei konstanter Spannung und Frequenz

Vorgehensweise:

- Im normalen Regelbetrieb wird die Generatordrehzahl (über  $f_{\text{Umr}}$ ) und der Erregerstrom nachgestellt

$I_{\text{err}}$ [A]	$U_{\text{Gen}}$ [V]	P [W]	Q [var]	$\cos \varphi$	$I_{\text{Gen}}$ [A]	$f_{\text{Gen}}$	$f_{\text{Umr}}$	L1	L2	L3	C1	C2
3,45	230	0	0	1		50	51,3					
3,74	230	70	0	1		50	53,0	X				
4,00	230	140	0	1		50	56,7	X	X			
6,00	217	40	220	0,36 ind		50	53,0			X		
6,00	223	40	185	0,40 ind		50	52,9			X	X	
4,89	230	40	100	0,56 ind		50	52,6			X		X
4,10	230	40	50	0,75 ind		50	52,5			X	X	X
6,00	213	99	200	0,57 ind		50	55,8	X		X		
6,00	221	100	175	0,64 ind		50	55,9	X		X	X	
5,27	230	110	96	0,83 ind		50	55,7	X		X		X
4,52	230	110	45	0,94 ind		50	55,6	X		X	X	X
6,00	205	140	180	0,72 ind		46,6	60,0	X	X	X		
6,00	210	155	158	0,77 ind		45,9	60,0	X	X	X	X	
6,00	215	160	100	0,89 ind		46,0	60,0	X	X	X		X
6,00	214	165	70	0,94 ind		44,4	60,0	X	X	X	X	X

## 6.6 Temperaturverhalten von Generator und Lasten

Vorgehensweise:

- Generatorzahl und Erregerstrom werden auf die Maximalwerte eingestellt

$I_{\text{err}}$ [A]	$U_{\text{Gen}}$ [V]	P [W]	Q [var]	$\cos \varphi$	$I_{\text{Gen}}$ [A]	$f_{\text{Gen}}$	$f_{\text{Umr}}$	L1	L2	L3	t [min]
6,00	207	150	180	0,73 ind		-	60	X	X	X	kalt
6,00	202	140	180	0,72 ind		-	60	X	X	X	1
6,00	200	140	180	0,72 ind		-	60	X	X	X	2
6,00	198	140	170	0,72 ind		-	60	X	X	X	3

## 6.7 Generator am Netz im Phasenschieberbetrieb

*Einstellen einer „exakten“ Synchronisation:*

- Generatorspannung / -frequenz im Inselbetrieb auf 230V / 50Hz einstellen (auf Netzspannung einstellen, die etwas kleiner als 230V sein kann), der Generator läuft ohne Last
- Generatorzahl auf 50Hz halten
- nachdem in den Verbund geschaltet wurde, müssen P und Q möglichst 0, der  $\cos \varphi$  entsprechend 1 anzeigen (ohne Last)
- schält man nun zwischen Verbund- und Inselbetrieb hin und her, sollten sich die Werte der Generatorspannung, und Generatorfrequenz sowie die Wirk-, Blindleistung und der Wirkfaktor möglichst wenig ändern. (Generator „ruckelt“ nicht und läuft im Inselbetrieb nur sehr langsam weg; Meßgeräte schlagen beim Umschalten nicht aus)  
Wird eine Wirkleistung angezeigt ( $> 10\text{W}$ ), stimmt die Generatorzahl nicht exakt, bei der Anzeige von Blindleistung ( $> 10\text{var}$ ) muß der Erregerstrom angepaßt werden.

In diesem Zustand läuft der Generator am Netz unbelastet mit, das heißt, die Stromstärke in den Ständerwicklungen gehen gegen null.

Vorgehensweise:

- Erregung so einstellen, daß die angegebenen Blindleistungswerte auftreten
- bei der ersten und letzten Meßwerte-Zeile die Wirkleistung über die Umrichterfrequenz genau auf 0 einstellen (diese beiden Messungen zuletzt durchführen)

$I_{err}$ [A]	$U_{Gen}$ [V]	P [W]	Q [var]	$\cos \varphi$	$I_{Gen}$ [A]	$f_{Gen}$	$f_{Umr}$	L1	L2	L3	C1	C2
1,37	230	0	222	0,25ka p		50	51,9	-	-	-	-	-
1,37	228	-40	200	0,32ka p		50	51,2	-	-	-	-	-
2,19	230	-20	100	0,32ka p		50	51,2	-	-	-	-	-
3,31	230	-20	10	1		50	51,2	-	-	-	-	-
4,42	230	-20	100	0,34 ind		50	51,2	-	-	-	-	-
6,00	228	-40	200	0,34 ind		50	51,2	-	-	-	-	-
6,00	230	0	180	0,23 ind		50	51,7	-	-	-	-	-

## 6.8 Generator im Verbund bei Wirkleistungsabgabe und -aufnahme

Vorgehensweise:

- Erregung auf die vorgegebenen Werte und Umrichterfrequenz so einstellen, daß die angegebene Wirkleistung auftritt

$I_{err}$ [A]	$U_{Gen}$ [V]	P [W]	Q [var]	$\cos \varphi$	$I_{Gen}$ [A]	$f_{Gen}$	$f_{Umr}$	L1	L2	L3	C1	C2
3,31	222	-200	78	0,94 ind		50	49,0	-	-	-	-	-
2,00	223	-160	100	0,88ka p		50	49,5	-	-	-	-	-
3,31	222	-160	60	0,94 ind		50	49,4	-	-	-	-	-
6,00	222	-160	240	0,61 ind		50	49,9	-	-	-	-	-
2,00	227	-100	100	0,75ka p		50	50,1	-	-	-	-	-
3,31	225	-100	40	0,92 ind		50	50,0	-	-	-	-	-
6,00	226	-100	230	0,50 ind		50	50,5	-	-	-	-	-
3,31	230	-10	10	1 ind		50	51,2	-	-	-	-	-
2,00	232	100	220	0,56ka p		50	55,8	-	-	-	-	-
3,31	231	100	70	0,85ka p		50	54,0	-	-	-	-	-
6,00	232	100	122	0,73 ind		50	54,6	-	-	-	-	-
3,31	235	160	118	0,85ka p		50	58,1	-	-	-	-	-
4,00	232	160	60	0,94ka p		50	60,0	-	-	-	-	-
5,50	235	160	60	0,93 ind		50	60,0	-	-	-	-	-
6,00	235	160	90	0,90 ind		50	60,0	-	-	-	-	-



## 6.9 Auslastung des Umrichters

Die Auslastung in Prozent wird im Umrichterdisplay abgelesen (Tastenfolge *FUNC*; solange *UP* drücken, bis *r\_7* erscheint; *FUNC*)

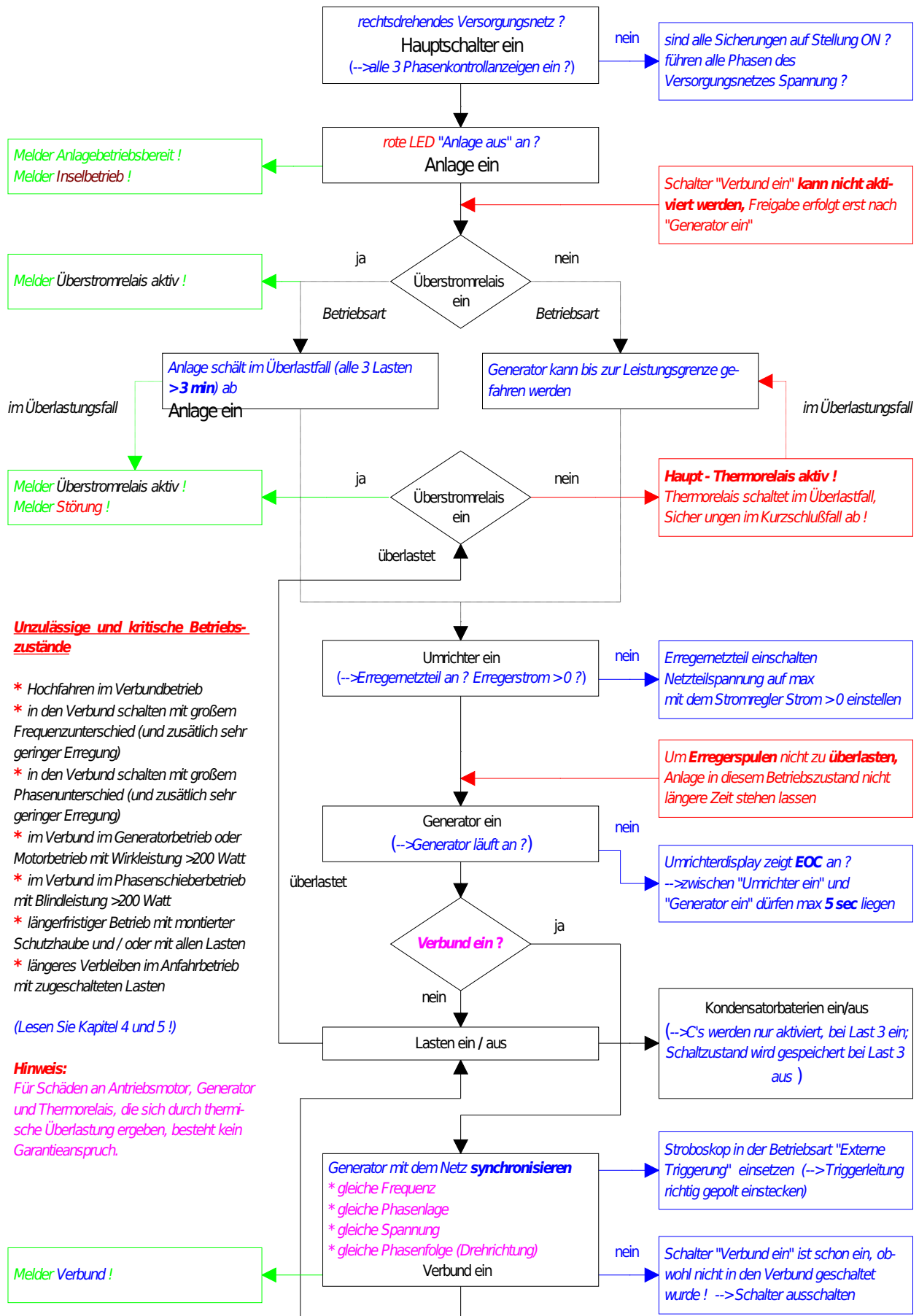
Betriebszustand	$U_{Gen}$ [V]	$I_{err}$ [A]	P [W]	$f_{Umr}$	<i>r_7</i>
Verbundbetrieb: Generator läuft nur mit		3,16	0	51,3	15 %
Inselbetrieb: Generator unbelastet		3,16	0	50,0	15 %
Verbundbetrieb: Generator liefert Wirkleistung ans Netz		3,16	160	60,0	37 %
Verbundbetrieb: Generator nimmt Wirkleistung auf		3,16	-100	50,0	0 %
Inselbetrieb: alle Lasten		3,16	118	50,0	29 %
Inselbetrieb: alle Lasten und Kondensatoren		3,16	140	50,0	33 %
Inselbetrieb: alle Lasten		6,00	142	50,0	39 %
Inselbetrieb: alle Lasten und Kondensatoren		6,00	150	50,0	42 %

Die Spitzenauslastung wird in Prozent im Umrichterdisplay abgelesen (Tastenfolge *FUNC*; solange *UP* drücken, bis *r\_8* erscheint; *FUNC*)

Betriebszustand	$I_{err}$ [A]	P [W]	$f_{Umr}$	<i>r_8</i>
Hochlaufen des Generators ohne Last	3,16	-	51,3	32 %
Hochlaufen des Generators mit den Lasten ohne Kondensatoren	3,16	-	60,0	89 %

**Bild 30:** *Anleitung zur Bedienung der Anlage*





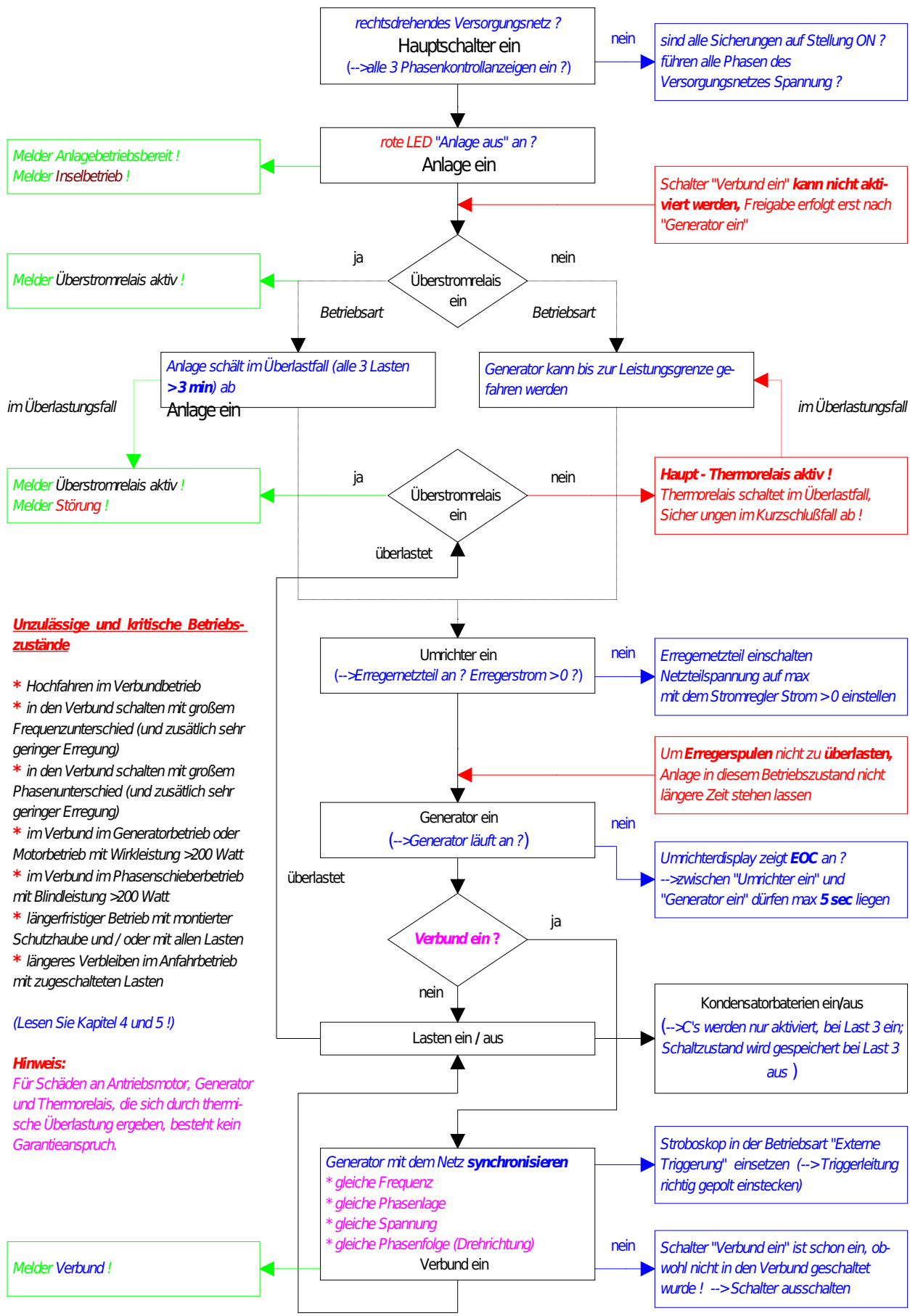
**Unzulässige und kritische Betriebszustände**

- \* Hochfahren im Verbundbetrieb
- \* in den Verbund schalten mit großem Frequenzunterschied (und zusätzlich sehr geringer Erregung)
- \* in den Verbund schalten mit großem Phasenunterschied (und zusätzlich sehr geringer Erregung)
- \* im Verbund im Generatorbetrieb oder Motorbetrieb mit Wirkleistung >200 Watt
- \* im Verbund im Phasenschieberbetrieb mit Blindleistung >200 Watt
- \* längerfristiger Betrieb mit montierter Schutzhaube und / oder mit allen Lasten
- \* längeres Verbleiben im Anfahrbetrieb mit zugeschalteten Lasten

(Lesen Sie Kapitel 4 und 5 !)

**Hinweis:**

Für Schäden an Antriebsmotor, Generator und Thermorelais, die sich durch thermische Überlastung ergeben, besteht kein Garantieanspruch.



**Unzulässige und kritische Betriebszustände**

- \* Hochfahren im Verbundbetrieb
- \* in den Verbund schalten mit großem Frequenzunterschied (und zusätzlich sehr geringer Erregung)
- \* in den Verbund schalten mit großem Phasenunterschied (und zusätzlich sehr geringer Erregung)
- \* im Verbund im Generatorbetrieb oder Motorbetrieb mit Wirkleistung >200 Watt
- \* im Verbund im Phasenschieberbetrieb mit Blindleistung >200 Watt
- \* längerfristiger Betrieb mit montierter Schutzhaube und / oder mit allen Lasten
- \* längeres Verbleiben im Anfahrbetrieb mit zugeschalteten Lasten

(Lesen Sie Kapitel 4 und 5 !)

**Hinweis:**

Für Schäden an Antriebsmotor, Generator und Thermorelais, die sich durch thermische Überlastung ergeben, besteht kein Garantieanspruch.