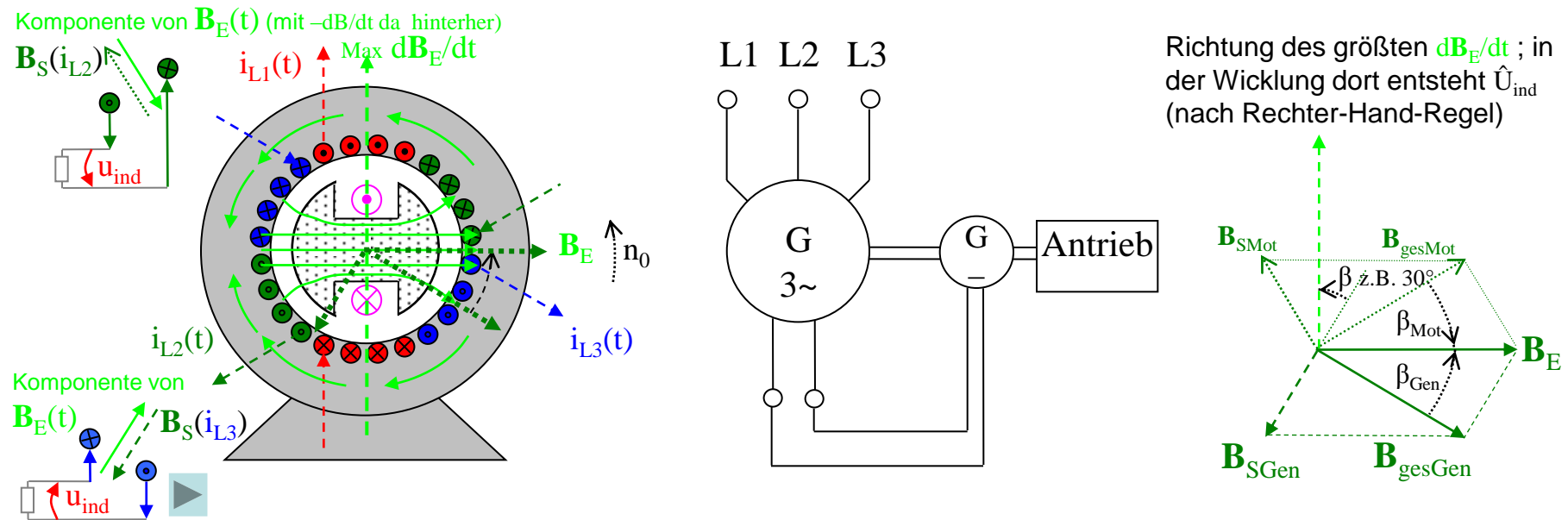


## Synchronmaschine

**Synchronmaschine** → Schenkel- und Vollpolmaschine überwiegende Anwendung → 1. Generator zur Elektroenergieerzeugung, 2. große Dauerantriebe auch Motor kombiniert mit Blindleistungskompensation.

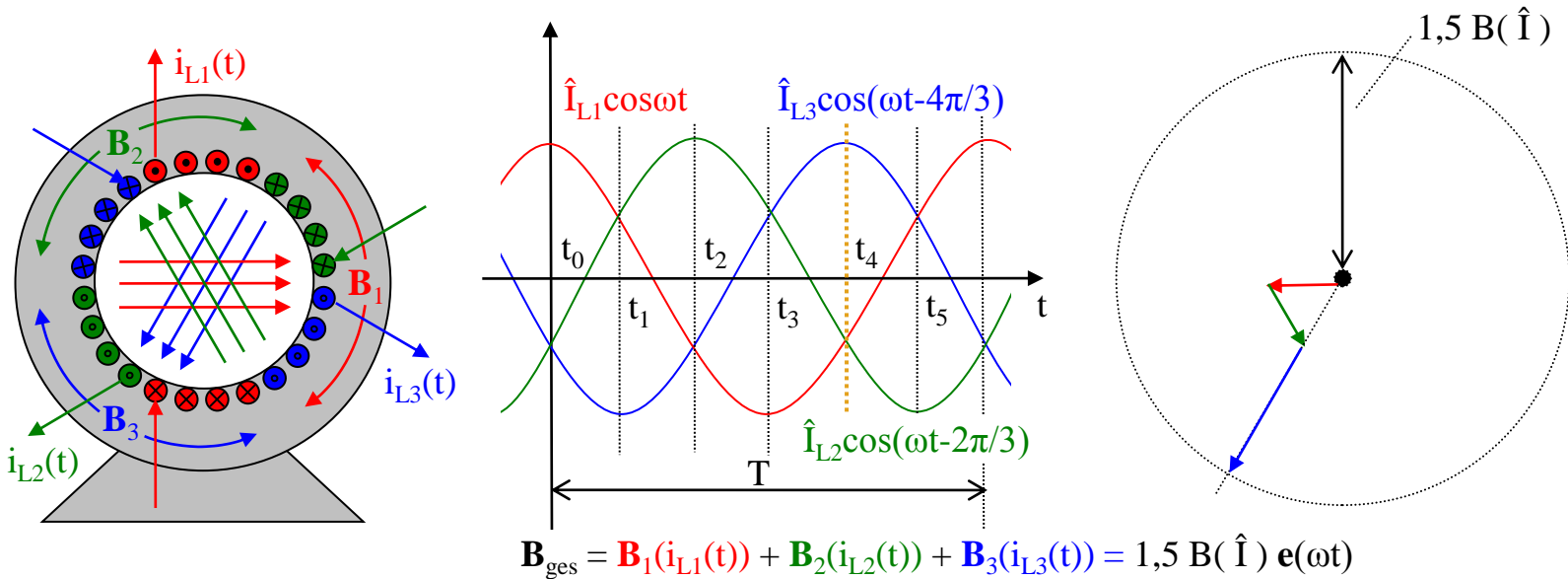


Polrad ist Elektromagnet (Permanentmagnet) und erzeugt das Erregerfeld  $\mathbf{B}_E$

Generatorbetrieb: Leerlauf;  $u_{ind} \rightarrow$  bei Last  $i_{Ständer} \rightarrow L_S$  verzögert  $i \rightarrow \mathbf{B}_S$

Motorbetrieb:  $i_{Ständer} \rightarrow$  Drehfeld  $\mathbf{B}_{SMot}$ ; mech. Leerlauf  $\rightarrow u_{ind}=u_L \rightarrow i_L \approx 0$ ; Last  $\rightarrow i_{Ständer}$

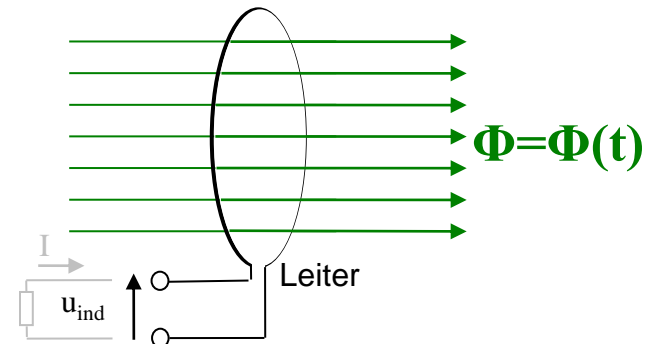
$\uparrow$  je mehr Polrad durch Last zurück desto  $i_{Ständer} \uparrow$ ;  $d\mathbf{B}_E/dt$  neg.  $\rightarrow u_{ind}$  neg.  $\rightarrow i_L, \mathbf{B}_S \downarrow$



## zeitveränderliches Magnetfeld

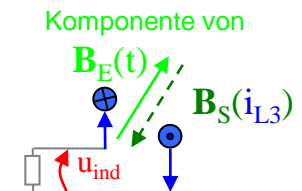
### Induktionsgesetz Ruheinduktion

$$u_{\text{ind}} = w \frac{d\Phi}{dt}$$



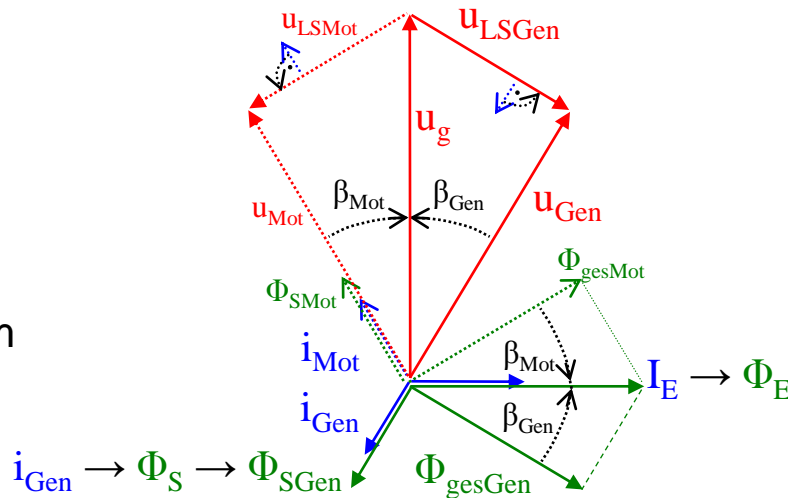
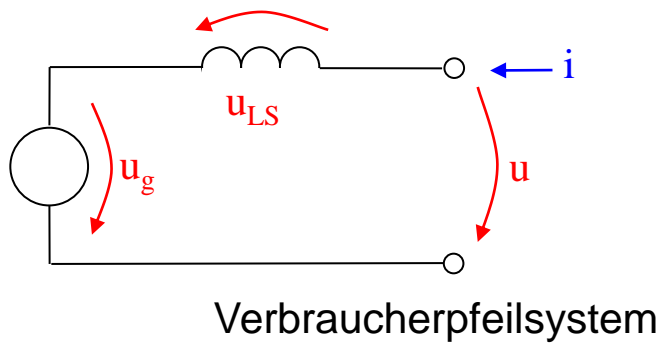
**Richtung** von  $u_{\text{ind}}$  wiederum nach der **Rechten-Hand-Regel**

Die **Lenz'sche Regel** ist auch hier unmittelbar erfüllt.



**Generator Polradwinkel  $\beta_{\text{Gen}}$  in Drehrichtung voraus**  
**Motor Polradwinkel  $\beta_{\text{Mot}}$  in Drehrichtung hinterher**

**Zeigerdarstellung** Spannungen, Ströme und **magnetischen Flüsse** → für Verbraucherfeilsystem → eine der gleichen Phasen → Raumzeiger



vom  $\Phi_E$  induzierte Spannung  $u_g$  → Richtung des größten  $(d\Phi_E/dt)$

Generatorbetrieb:  $i_{\text{Gen}}$  gegen die Richtung von  $u_{\text{Gen}}$  und  $u_{\text{LS}}$  geht  $90^\circ$  vor

kapazitive oder induktive Last → weniger oder mehr verzögert,  $\beta, \varphi = \langle u, i \rangle$

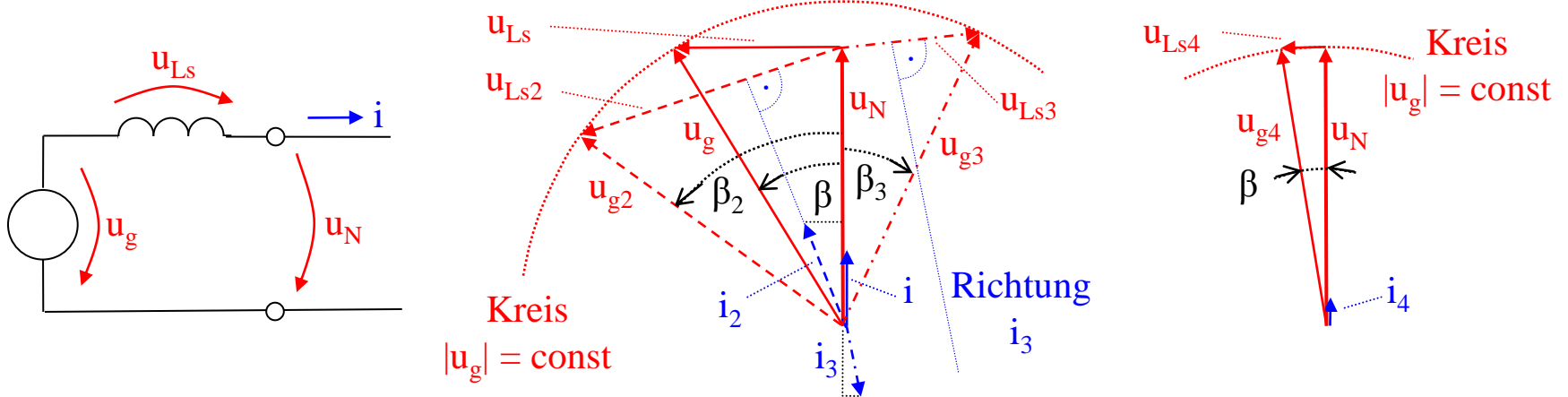
Motorbetrieb: zeigt  $i_{\text{Mot}}$  in Richtung von  $u_{\text{Mot}}$  und  $u_{\text{LS}}$  geht  $90^\circ$  vor

## Beim Betrieb der Synchronmaschine zwei Einflussmöglichkeiten:

- Vergrößerung/Verkleinerung Antriebsleistung  $\rightarrow \beta$  wird erhöht/verringert.
- Vergrößerung/Verkleinerung Erregung ( $\Phi_E$  bzw.  $I_E$ )  $\rightarrow U_{g\text{ eff}}$  erhöht/verringert.

## Parallelbetrieb zum starren Netz ( $U_N = \text{const}$ , $\omega_N = \text{const}$ , $\varphi_U = \text{const} = 0$ ) einphasige Ersatzschaltung

### 1. Veränderung der Antriebsleistung bei konstanter Erregung (Erzeugerpeilsystem)



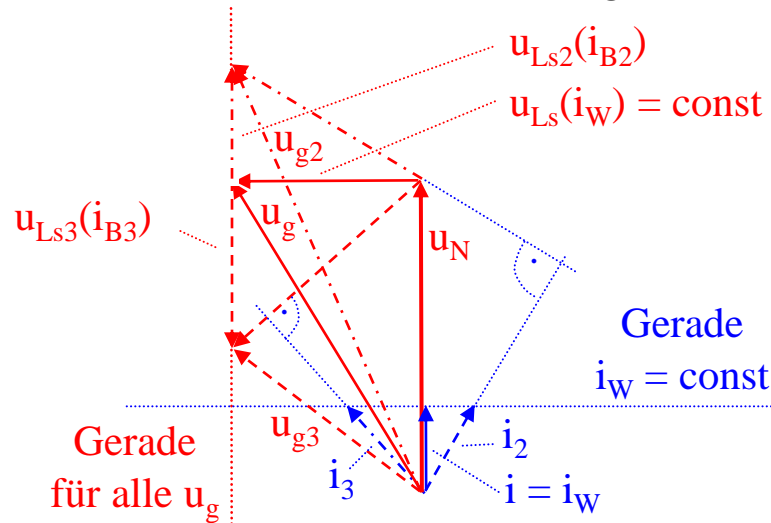
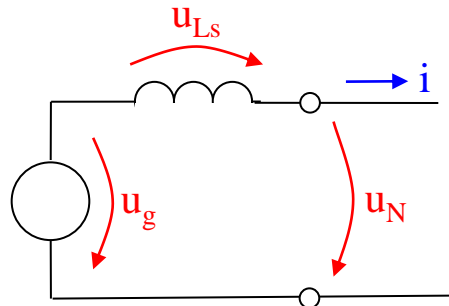
**Ausgangspunkt:**  $u_N$ ,  $u_{Ls}$ ,  $u_g$  und  $i$  so, dass Einspeisung **reiner Wirkleistung**

**Erhöhung** der Antriebsleistung  $\rightarrow u_N$ ,  $u_{Ls2}$ ,  $u_{g2}$ ,  $i_2 \rightarrow \beta_2 > \beta$  **höherer** Wirkstrom

**Verringerung** der Antriebsleistung  $\rightarrow \beta_3$  (negativ) **Entnahme** Wirkleistung aus Netz

Veränderung der **Antriebsleistung beeinflusst** in der Praxis nur **Wirkleistung**.

2. Veränderung der **Erregung** bei konstanter Antriebsleistung (Erzeugerpeilsystem)



**Ausgangspunkt:**  $u_N$ ,  $u_{Ls}$ ,  $u_g$  und  $i$  so, dass Einspeisung **reiner Wirkleistung**  
 konstante Antriebsleistung  $\rightarrow$  Wirkleistung, Wirkanteil des Stromes konstant,  
 $\rightarrow$  Zeigerspitzen aller Ströme auf Gerade ( $i_W = \text{const}$ )  
 $\rightarrow$  Zeigerspitzen aller induzierten Spannungen  $u_g$  auf einer Geraden  
 $u_g$  wird **vergrößert**  $\rightarrow$  induktive Last  $\rightarrow$  der Strom ( $i_2$ ) läuft gegen  $u_N$  nach  
 $u_g$  wird **verkleinert**  $\rightarrow$  kapazitive Last  $\rightarrow$  der Strom ( $i_3$ ) läuft gegen  $u_N$  vor

Veränderung der **Erregung**  $u_g$  durch  $I_E$  beeinflusst nur **Blindleistung**.

## Parallelbetrieb:

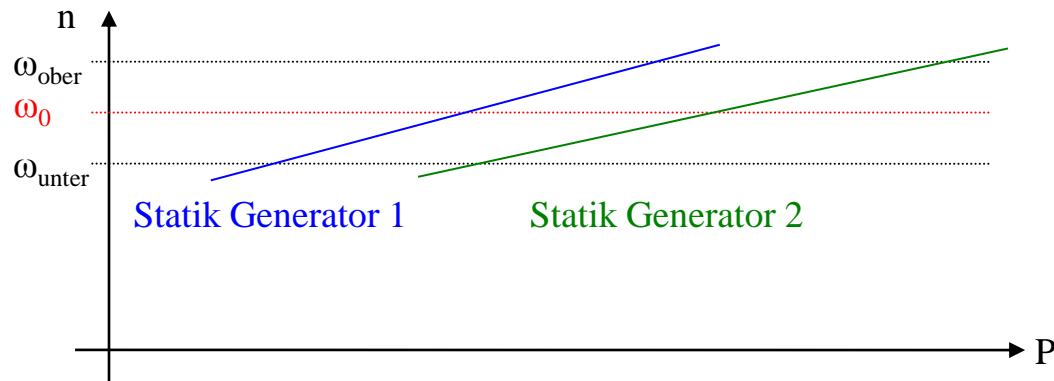
→ durch Einstellen (oder Regeln) der **Antriebsleistung** → **Wirkleistungsübernahme**

→ durch Einstellen (oder Regeln) der **Erregung** → **Blindleistungsübernahme**

Für Parallelbetrieb von Generatoren → Leistungsanteile beteiligter Generatoren sind entsprechend aufzuteilen

**Vergrößerung** der Antriebsleistung → **Drehzahlerhöhung** → Erhöhung **Netzfrequenz**

**Zusammenwirken** von Generatoren: einzeln Drehzahlen der Antriebsmaschinen nach statischer Kennlinie (Statik) regeln → **Aufteilung der Wirkleistung**



**Netzfrequenz** ist bei dieser Art der Regelung **nicht konstant**:

Große Verbundnetze → Frequenzgenauigkeit  $< \pm 0,5\%$  (49,75 bis 50,25 Hz)

Regelung **Spannung**  $U_N$  über Erregung → **Aufteilung der Blindleistung**

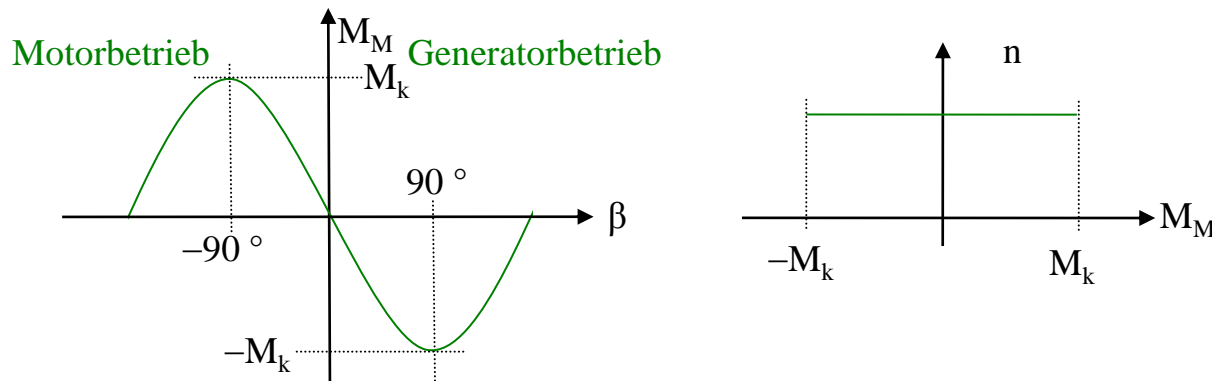
## Inselbetrieb eines einzelnen Generators:

Spannungsregler → Erregung so, dass Ausgangsspannung konstant bleibt.

Drehzahlregler → Antriebsleitung so, dass die Frequenz konstant bleibt.

→ Anpassung an aktuelle Last (mit Wirk- und Blindanteil).

## Kennlinien der Synchronmaschine

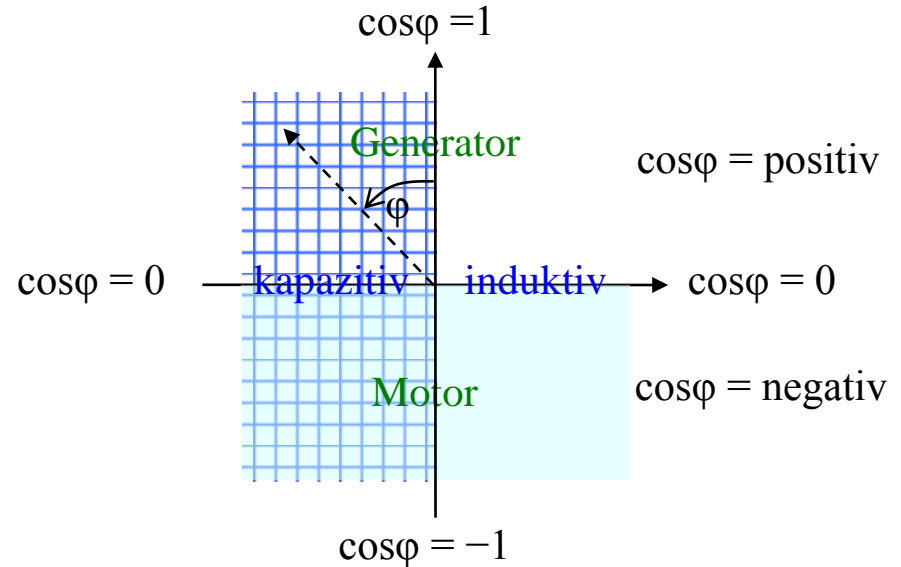
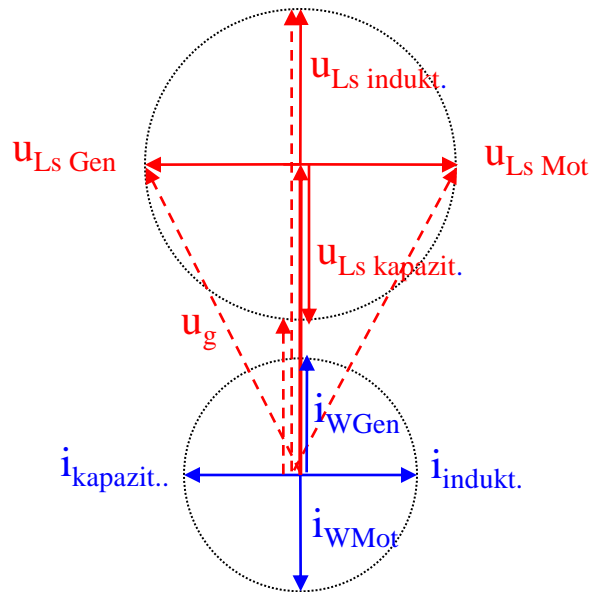


Nur von  $-90^\circ < \beta < 90^\circ$  **stabile Arbeitspunkte**, Drehzahl bleibt völlig **konstant**

Überschreiten der Kippmomente → Synchronmotor (-generator) → „außer Tritt“

Nennbetrieb in der Regel bei  $\pm 15$  bis  $\pm 30^\circ$

## Betriebszustände der Synchronmaschine alle 360 °



### Anlauf einer Synchronmaschine:

- Hochfahren durch Fremdantrieb (Antriebsmaschine beim Generator)
- asynchroner Hochlauf mit zusätzlichem Kurzschlusskäfig oder
- Frequenzhochlauf (langsameres Erhöhen der Frequenz bis Sollfrequenz (Anfangsfrequenz, bei der sich Motor allein in Synchronismus zieht))

### Drehzahlregelung nur Frequenzstellung



### Hauptanwendungsgebiete:

- Generatoren bis ca. 1000 MW (mit einem Wirkungsgrad von ca. 98,5%),
- Motoren für große Dauerlasten (z.B. Gebläseanlagen) in Kombination mit Blindleistungskompensation,
- Antriebsverbände mit hohen Forderungen an synchronen Lauf
- in neuerer Zeit der Stromrichter motor (umrichter gesteuertes Synchronmotor, bei dem z.B. ein Polradsensor die Frequenz steuert).

### Kühlung:

- Trotz hoher Wirkungsgrade ist bei großen Maschinen eine effektive Kühlung.
- Diese wird je nach Ausführung und Anwendung als Luft- oder auch Wasserkühlung vorgesehen.

## 2.4 Auswahl eines Motors für eine Antriebsaufgabe

Vor der Auswahl eines Motors → **Analyse** der Antriebsaufgabe

1. **Ermittlung** der benötigten Antriebsleistung, Drehzahl, Drehzahlstellung ...

2. Betriebsart, bei der Leistung umgesetzt wird. In VDE 0530 acht Betriebsarten
- S1 Dauerbetrieb
  - S2 Kurzzeitbetrieb
  - S3 Aussetzbetrieb ohne Einfluss des Anlaufs auf die Erwärmung
  - S4 Aussetzbetrieb mit Einfluss des Anlaufs auf die Erwärmung
  - S5 Aussetzbetrieb mit Einfluss des Anlaufs und Bremsens auf die Erwärmung
  - S6 Durchlaufbetrieb mit Aussetzbelastung
  - S7 Unterbrochener Betrieb mit Anlauf und Bremsung
  - S8 Unterbrochener Betrieb mit periodisch wechselnder Drehzahl und Leistung

### 3. **Motorausführung:**

- Befestigung, z.B. Fußmotor, Flanschmotor ...
- Lagerarten, z.B. Wälzlager ...
- Achsenausführung, z.B. ein oder zwei Achsenenden, mit Gewinde ...
- Norm- und Listenmotore
- Sondermotore, z.B. Bremsmotore, Getriebemotore
- Schutzart, Sonderschutz (Luftfeuchtigkeit, Tropenfestigkeit ... Explosionsschutz)
- Kühlung, z.B. Selbstkühlung (natürlich ohne Einwirkungen), Eigenkühlung ...
- Stromart, Spannung, Frequenz, Schaltung
- Schutztechnische Angaben, z.B. Überlastschutz, Temperaturüberwachung ...)

### 4. **Kostenvergleich**

### Aufgabe 2.3.1

Bei unsymmetrischer Last am Drehstromnetz werden gemessen:

$U_{L1} = 230 \text{ V}$ ,  $I_{L1} = 5 \text{ A}$  und  $P_{W1} = 920 \text{ W}$  bei einer induktiven Last,

$U_{L2} = 230 \text{ V}$ ,  $I_{L2} = 7 \text{ A}$  und  $P_{W2} = 1450 \text{ W}$  bei einer induktiven Last und

$U_{L3} = 230 \text{ V}$ ,  $I_{L3} = 4 \text{ A}$  und  $P_{W3} = 855 \text{ W}$  bei einer kapazitiven Last.

Frage 1: Wie groß sind die drei  $\cos\varphi$  und der Ausgleichsstrom im Nullleiter?

Frage 2: Wie lauten die symmetrischen Komponenten der Ströme?

### Aufgabe 2.3.2

Parameter der Ersatzschaltung einer Asynchronmaschine (Kurzschlussläufer)

Leerlaufversuch (mit Antrieb bis zur synchronen Drehzahl):

Sternschaltung  $U = U_N = 220 \text{ V}$ ,  $I = 0,05 \text{ A}$  und  $\cos\varphi = 0,2$

Kurzschlussversuch (mit festgebremstem Läufer):

$U = 140 \text{ V}$ ,  $I = I_N = 0,93 \text{ A}$  und  $\cos\varphi = 0,14$  gemessen.

Nennbetrieb:

$\cos\varphi_N = 0,78$ , mechanische Leistung  $P = 0,33 \text{ kW}$  Widerstand einer Wicklung:  $R_1 = 12,4 \Omega$

Frage 1: Wie lauten  $R_1 + R_2'$ ,  $X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}'$ ,  $X_h$  und  $R_{Fe}$ ?

Frage 2: Wie groß sind  $s$  und  $\eta$  bei Nennbetrieb?

Hinweis: Benutzen Sie bei Leerlauf die Näherung  $R_1 = X_{\sigma 1} = 0$ , vernachlässigen Sie bei Kurzschluss und Belastung  $I_{Fe}$  und  $I_{\mu}$  und beachten Sie, dass  $P$  für drei Phasen gilt.

Zusatzaufgabe: Vergleichen Sie das Vorgehen mit dem Transformator.

## **Aufgabe 2.3.3**

Messung der Ständerinduktivität einer Synchronmaschine am Versuchsstand

### **Versuchsaufbau:**

Der Synchrongenerator, eine Antriebsmaschine (Gleichstromnebenschlussmotor) und die Drehzahlmessung werden mechanisch und elektrisch nach Vorlage angeschlossen.

### **Versuchsdurchführung:**

Drehzahl, Spannung, Strom und Erregerstrom werden gemessen. Bei Generatorbetrieb werden Drehzahl und Erregung konstant gehalten, Spannung und Strom werden für Leerlauf und zwei Ohm'sche Belastungen gemessen.

### **Versuchsauswertung:**

Für konstante Induktionsspannung ( $I_E$  und  $n$  konstant) werden mit Zeigerdiagrammen jeweils  $U_{LS}$  und  $\beta$  ermittelt. Aus  $U_{LS}$ ,  $\omega$  und  $I$  wird die Ständerinduktivität berechnet. Die Ergebnisse beider Lastfälle sind zu vergleichen.