

A large photograph showing a worker in a green jumpsuit and white hard hat inspecting the interior of a large, open electrical machine. The machine's interior is filled with complex wiring, including blue and white cables, and red-painted metal components. The worker is positioned on the left side of the frame, looking into the machine. The background shows industrial structures and a yellow pipe.

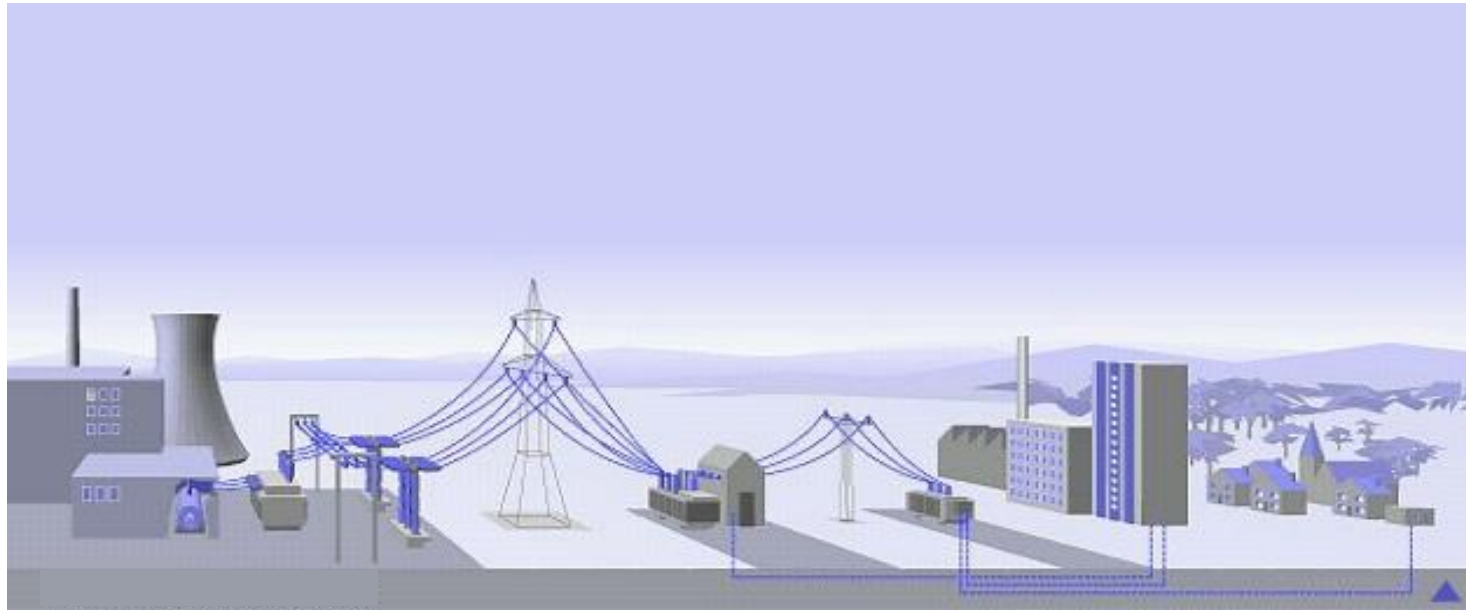
Grundlagen der elektrischen Energietechnik Teil 1: Grundlagen der Energieversorgung - Generator -

Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel | elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme | 17.04.2024

Drehstrom-Synchrongeneratoren

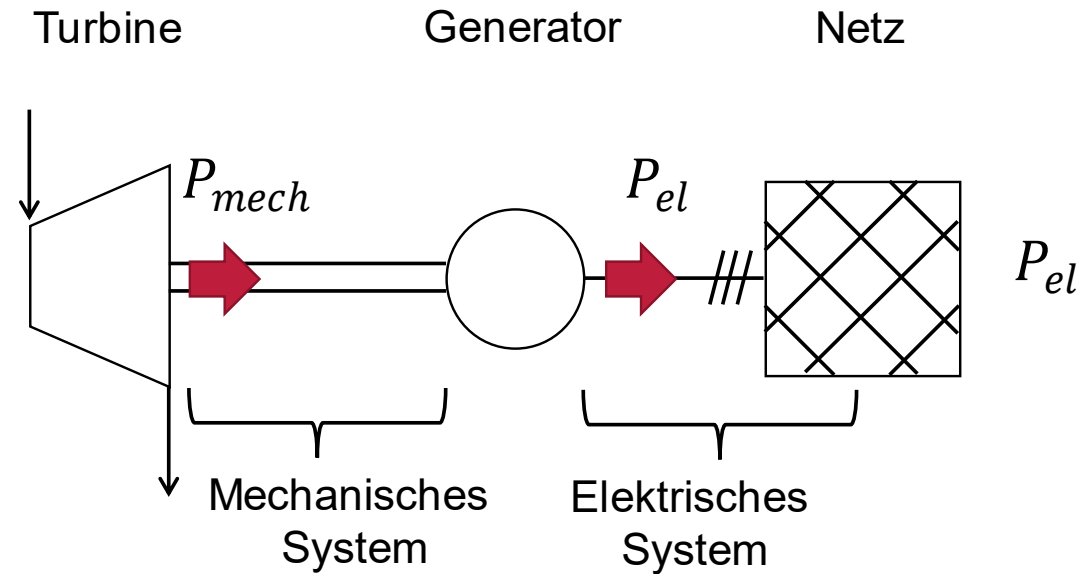
Lernziele:

- Kennenlernen des Aufbaus von Synchrongeneratoren
- Beherrschen des Ersatzschaltbildes und der Zeigerdiagramme
- Berechnung der Spannungen und Ströme bei Betrieb am starren Netz
- Verstehen der Stabilitätsbedingung



Agenda

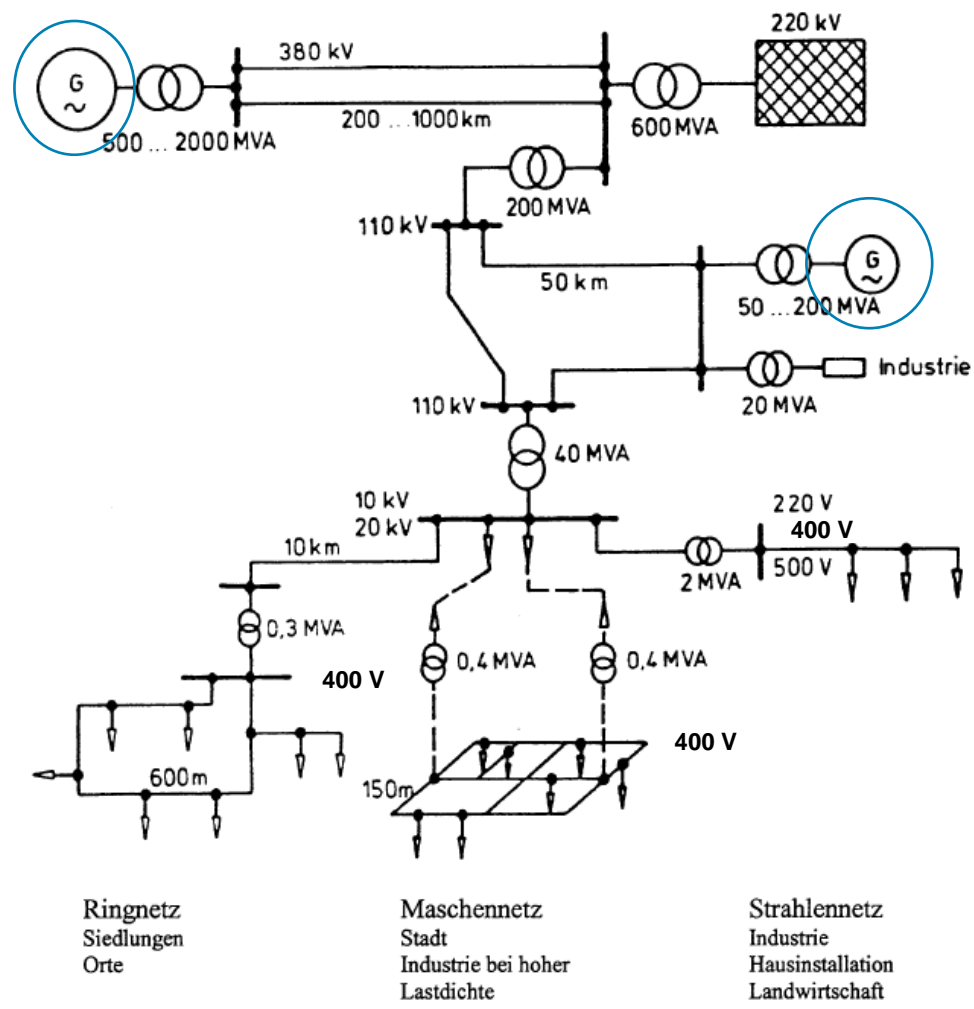
- 1 Synchrongenerator
- 2 Drehfeld und Ersatzschaltbild
- 3 Spannungen und Ströme
- 4 Stabilität



1 | Synchrongenerator

Elektrische Energieversorgung

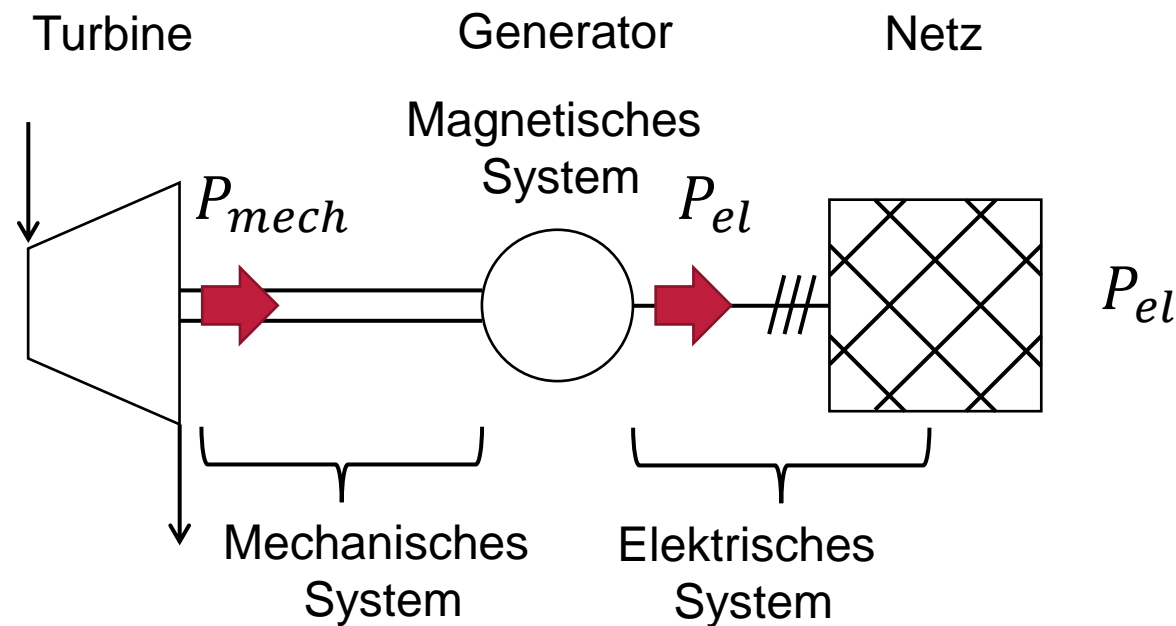
Drehstrom-Synchrongeneratoren



Konventionelles Groß-Kraftwerk

System: Turbine – Generator – Hochspannungsnetz

- Turbine liefert aus Kraftwerksprozess durch strömendes Medium (heißes Gas oder heißer Dampf) Antriebsleistung $P_{mech,T}$ über Drehwelle an Rotor
- Rotor-Magnetfeld induziert Spannungen in das elektrische System im Ständer
- Magnetfeld stellt über die Lorentzkraft den Kraftschluss zwischen elektrischem und magnetischem System her
- Elektrische Wirkleistung wird in Höchst-/ Hochspannungsnetz eingespeist



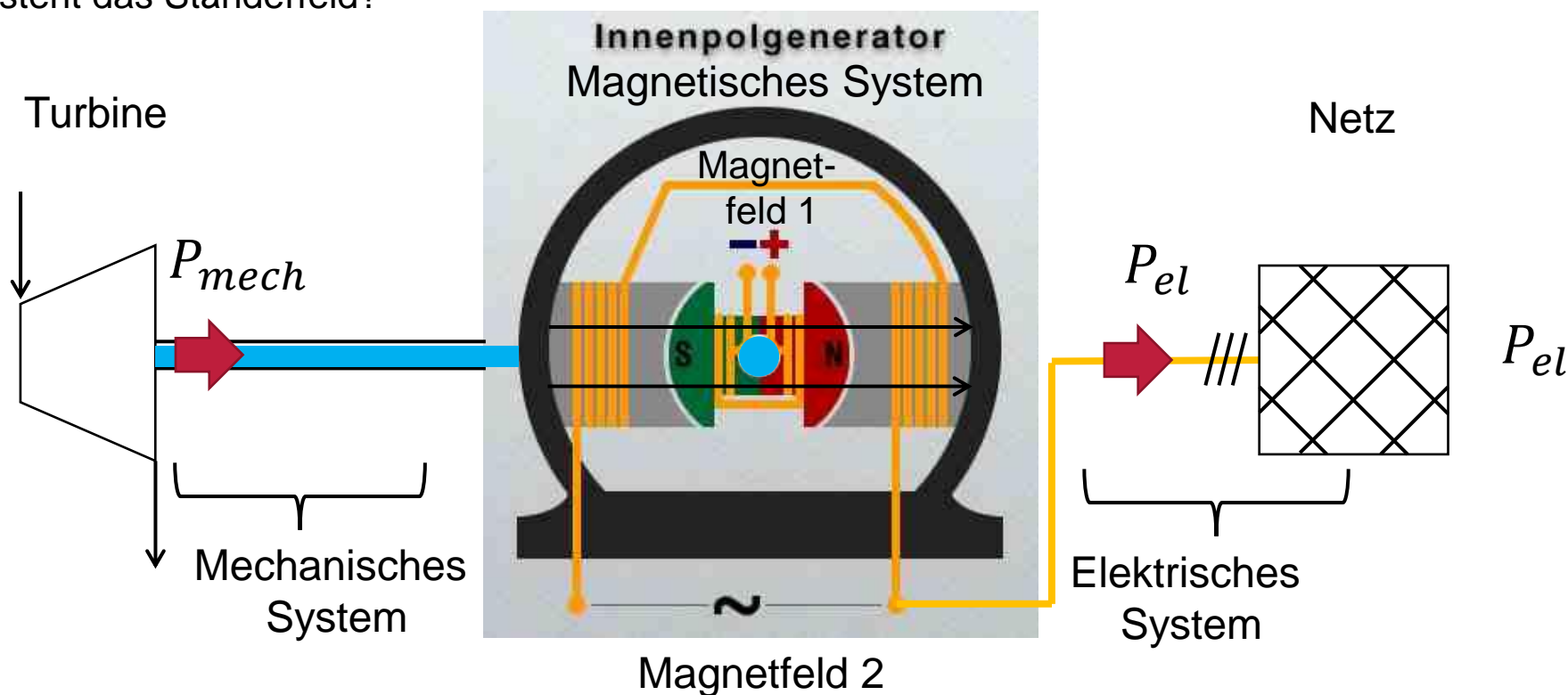


Konventionelles Groß-Kraftwerk

System: Turbine – Generator – Hochspannungsnetz

4.4.2.1 Qualitative Feldverhältnisse in einer Vollpolmaschine S. 181-183

- Was ist ein Drehfeld?
- Wie entsteht das Erregerfeld?
- Wodurch entsteht das Ständerfeld?



Ausführung von DS-Synchrongeneratoren

Dampfturbinengeneratoren werden als **Turbogenerator** mit hohen Drehzahlen (3000 min^{-1}) realisiert. Da die Beherrschung der Fliehkräfte im Vordergrund steht, sind die Turboläufer als einteiliges Schmiedestück mit Durchmessern bis 1 m und aktiven Läuferlängen bis 10 m ausgeführt. Die Leiter werden durch innenliegende Kanäle mit Wasser gekühlt. Die größten Turbogeneratoren weisen Scheinleistungen von 1600 MVA auf.



Schenkelpolgeneratoren

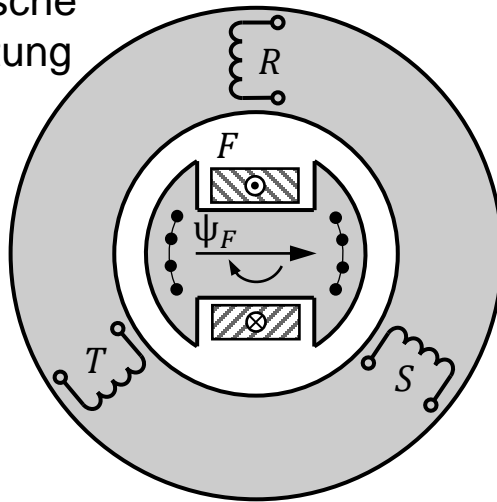
Schenkelpolläufer haben ausgeprägte Läuferpole für tiefere Drehzahlen. In der Anwendung gehören sie zu den langsam laufenden Antriebsmaschinen (z.B. Wasser-Turbinen, Dieselmotoren). Die Polzahl beträgt: $2p = 4, 6, 8, \dots$

F : Erreger- /Feldwicklung

D : Dämpferwicklung

ψ_F : Erregerfluss

\curvearrowright : mechanische
Drehrichtung



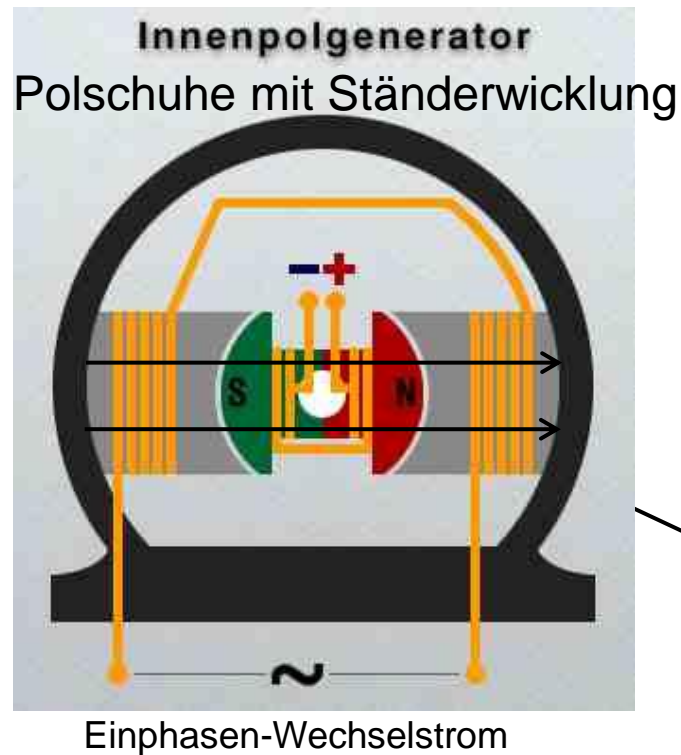
Läufer eines Schenkelpolgenerators



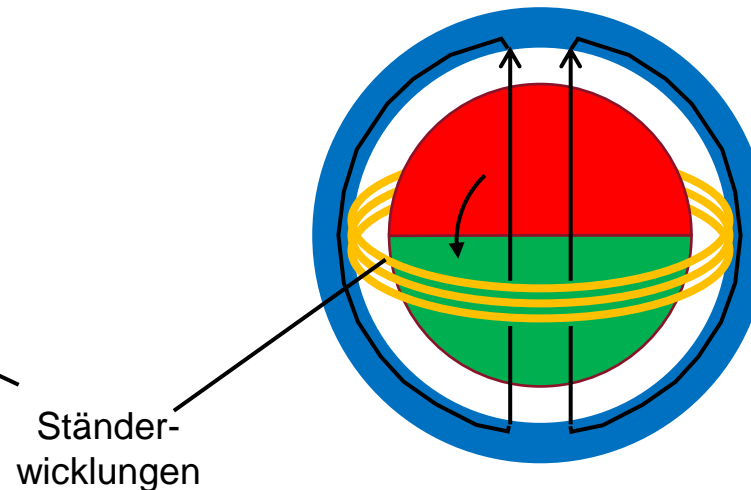
Orchester im Wasserkraftwerk ITAIPU

Aufbau Drehstrom-Synchrongeneratoren

Der Läufer enthält eine Erregerwicklung, die von einem Gleichstrom durchflossen wird. Der Erregerstrom wird über Schleifringe zugeführt. Dieser Läufer wird **Polrad** genannt. Der Ständer dient dem magnetischen Rückschluss. Die magnetische Flussänderung induziert eine sinusförmige Spannung in die Ständerwicklungen.

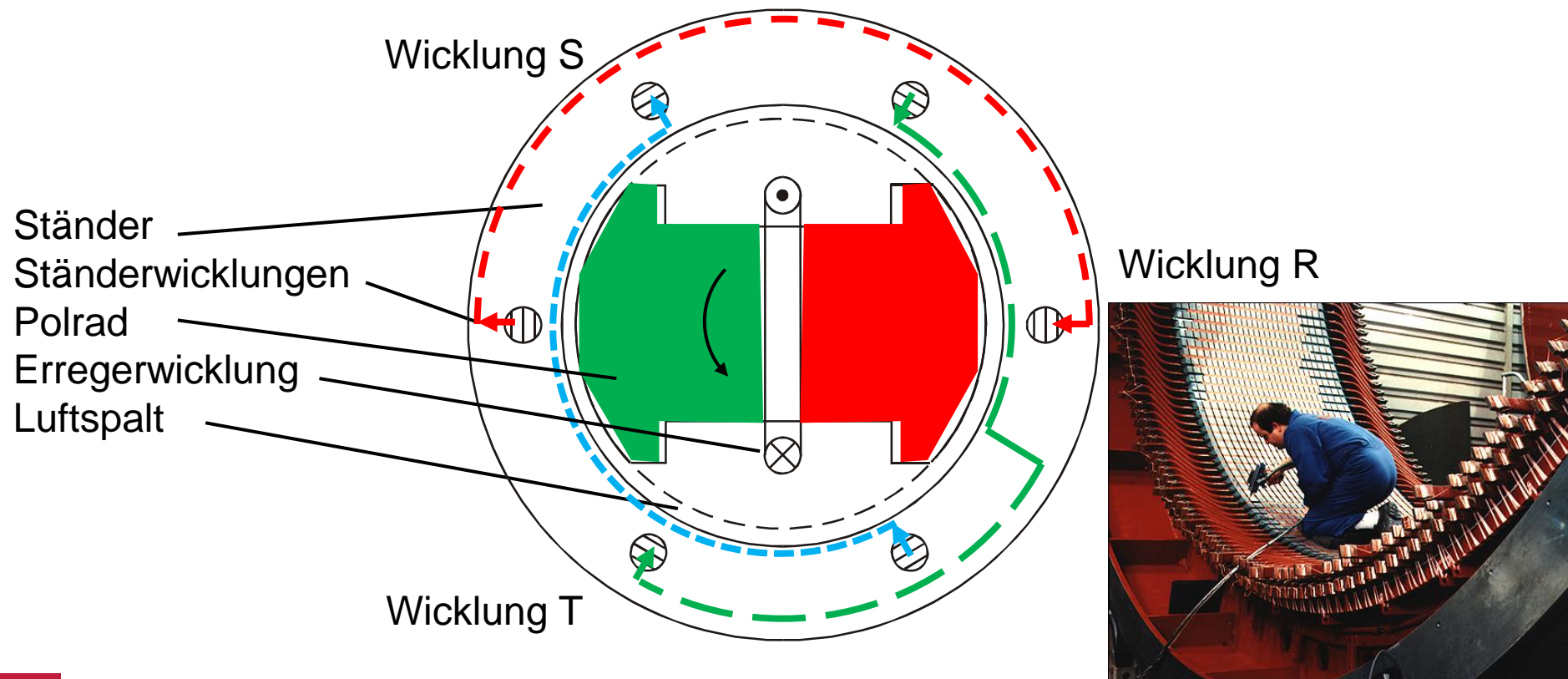


- Polrad erzeugt magnetische Feldlinien
- Rückschluss über Ständer
- Wicklung innen im Ständerkreis eingelegt



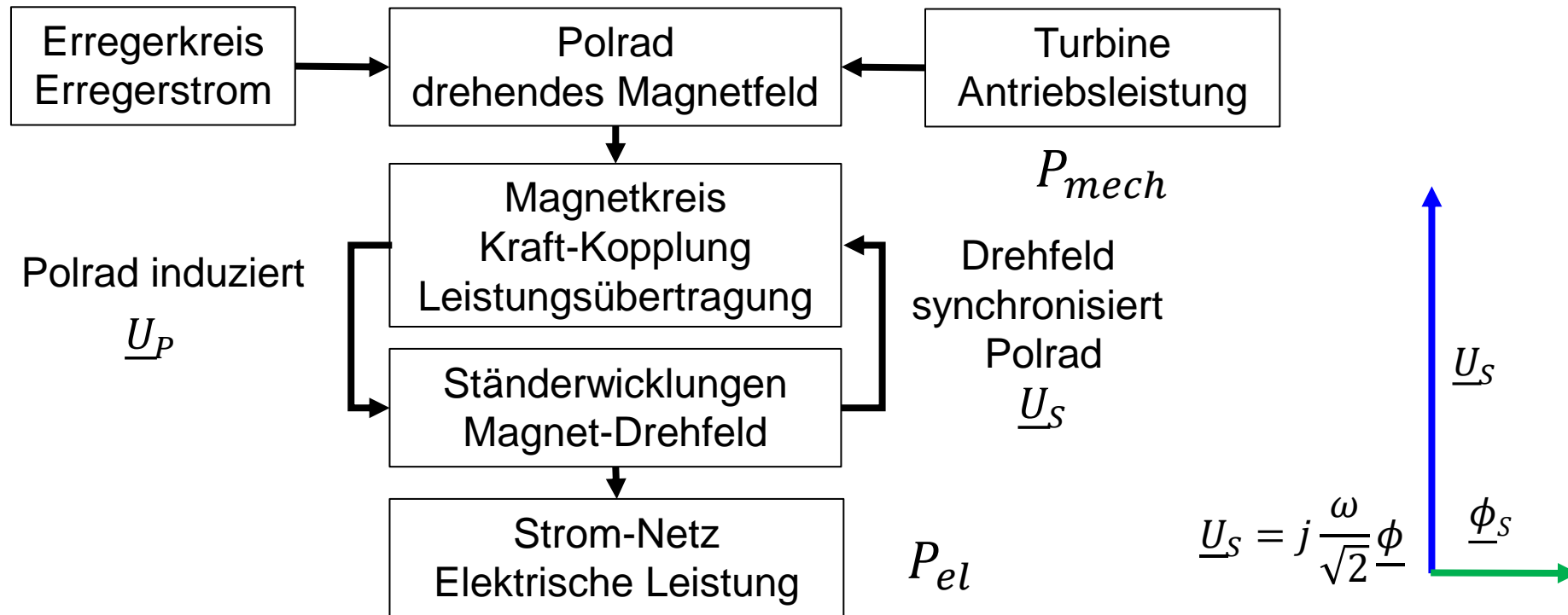
Drehstromwicklung

Drehstrom-Innenpolgenerator in zweipoliger Ausführung $p=1$. Das Polrad wird von einem magnetischen Gleichfeld durchströmt. Der Ständer dient dem magnetischen Rückschluss. Die Ständerwicklung besteht aus isolierten Kupferstäben, die senkrecht zur Zeichenebene in Nuten im Ständer der Maschine eingebaut sind.



Wirkprinzip Synchrongenerator

Das Polrad wird von einem magnetischen Gleichfeld erregt. Polrad und Ständer bilden Magnetkreis. Die Ständerwicklungen erzeugen Magnet-Drehfeld, das das Polrad über Kraft-Kopplung synchronisiert. Kopplung Wicklungs-Spannungszeiger und Magnetfeldzeiger über $\underline{U}_S = j\omega\phi/\sqrt{2}$





Lerneinheit

Ein Drehstrom-Synchrongenerator hat folgende Kenndaten:

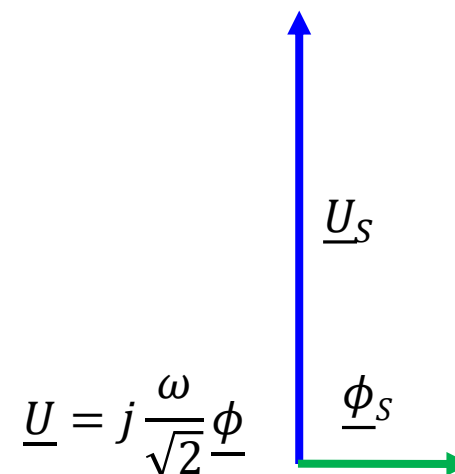
Polradspannung

Ständerspannung

Umdrehungsgeschwindigkeit 3000 pro Minute

Netzfrequenz 50 Hz

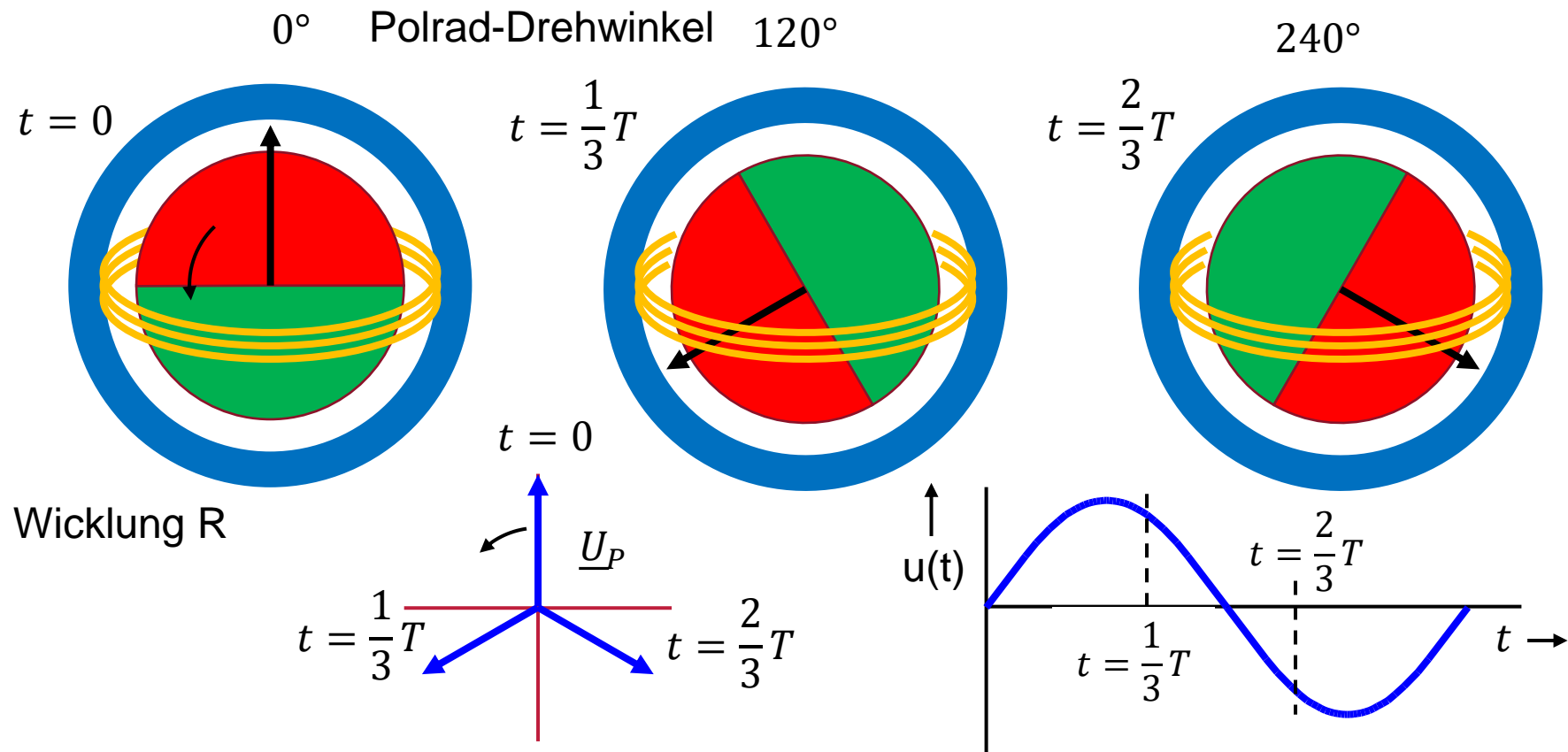
- Bestimmen Sie den Magnetfluss durch das Polrad und die Ständerwicklungen
- Zeichnen Sie ein Zeigerdiagramm mit den beiden Flüssen im Magnetkreis



2 | Drehfeld und Ersatzschaltbild

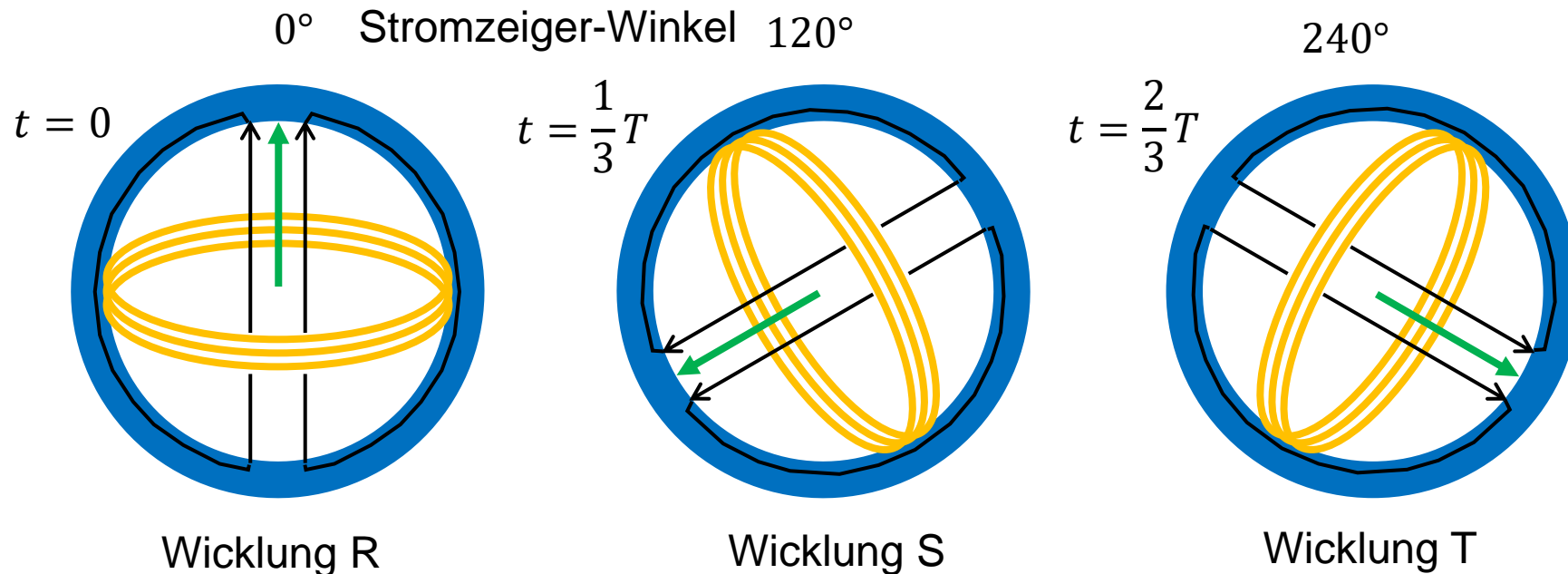
Drehfeld durch Polrad

Das drehende Polrad prägt einen räumlich veränderlichen magnetischen Fluss in den Ständer ein (Drehfeldwelle). In die Ständerwicklungen (hier Wicklung R) wird die **Polradspannung** induziert. Die Raumzeiger-Position des drehenden Polrades entspricht dem Zeiger der induzierten Polradspannung im Zeigerdiagramm.



Drehfeldwelle durch Drehstromwicklung

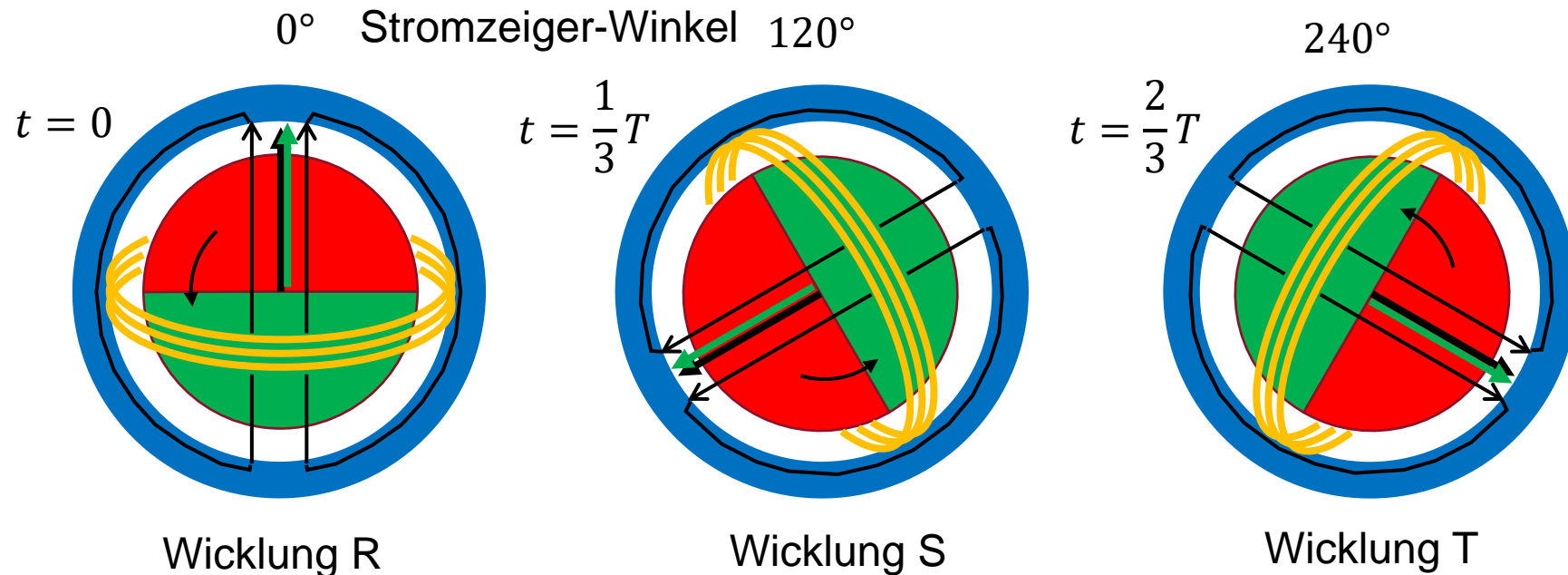
Der Stromzeiger eines Drehstromsystems beschreibt den Zeitpunkt des maximalen Stroms in der betreffenden Wicklung. Zum Winkel $\omega \cdot t = 0$ ist der Strom maximal in der Phase R und das Ständer-Magnetfeld zeigt in die Wicklungsachse R (Raumzeiger). Der **Raumzeiger** dreht sich entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn durch die Maschine und erzeugt ein zeitlich und räumlich veränderliches Magnetfeld (Drehfeldwelle).



Kopplung Drehfeldwelle

Das drehende Ständer-Magnetfeld übt eine Kraft bzw. Drehmoment auf das Polrad aus. Das Polrad dreht sich **synchron** mit dem Drehfeld mit.

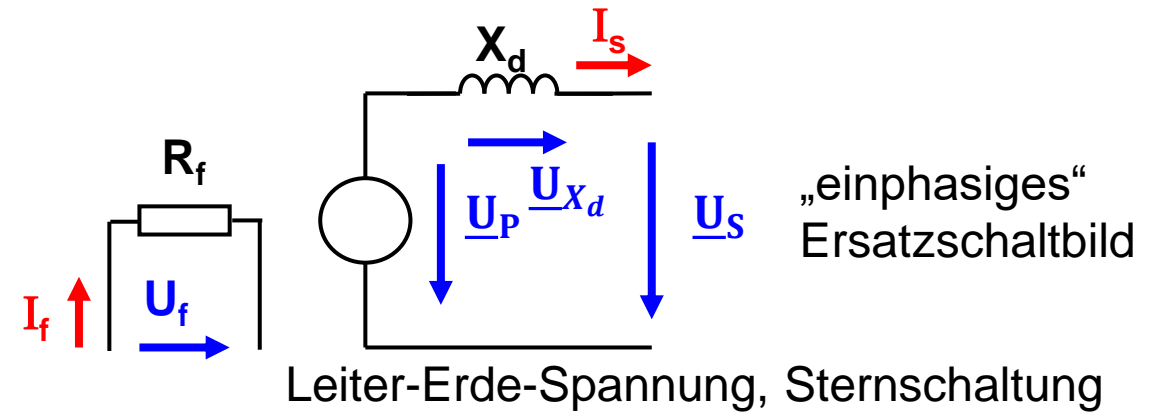
Die **Lorentzkraft** beschreibt die Kraftwirkung. Im Generatorbetrieb wird das Polrad durch die Kraftwirkung gebremst. Mit zunehmendem Ständerstrom verstärkt sich die Kraftwirkung linear.



Einphasiges Ersatzschaltbild Drehstrom-Synchrongenerator

Der Erregerstromkreis wird mit Gleichstrom gespeist. Die Induktivität der Ständerkreiswicklung ist die **synchrone Reaktanz X_d** . Der Ständerkreisverlustwiderstand wird vernachlässigt.

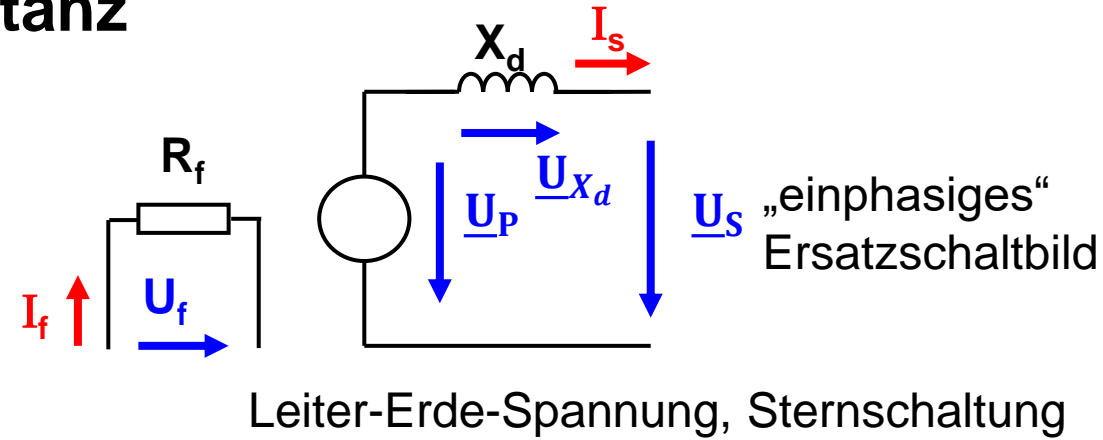
Erregergleichstrom	I_f
Polradspannung	U_p
Ständerstrom	I_s
Ständerspannung	U_s
Spannung über Synchronreaktanz	U_{X_d}



- **Generatorbetrieb** für die Netzanwendung im Ezeuger-Zählpfeilsystem
- Polrad erhält durch Gleichstrom ein **einstellbares Magnetfeld**
- Polradbewegung induziert in Ständerwicklungen die **Polradspannung**
- **Ständerstrom** induziert Spannung U_M in Ständerwicklung (Magnet-Drehfeldwelle)
- Der **Magnetkreis** bremst im Generatorbetrieb das Polrad
- **Polradspannung** ist Spannungsquelle für Hochspannungsnetze
- **Netzfrequenz f** entspricht **Umdrehungsgeschwindigkeit n** des Generators ($p=1$)

Magnetkreis - synchrone Reaktanz

Polradspannung	U_p
Synchrone Reaktanz	X_d
Ständerspannung	U_S



Die Wicklungen im Ständerkreis sind in Sternschaltung geschaltet.

Aus den Bemessungswerten von Ständerspannung U_S und Ständerstrom I_S (bzw. Scheinleistung S) ergibt sich der induktive Blindwiderstand = synchrone Reaktanz

Bemessungswerte einsetzen: $X_d = \frac{U_{X_d}}{I_S}$ $x_d = \frac{X_d \cdot I_S}{U_S} = \frac{U_{X_d}}{U_S}$ mit $I_S = \frac{S}{3 \cdot U_S}$

Die **relative synchrone Reaktanz** x_d ist eine wichtige Kenngröße der Synchronmaschine. Richtwerte für Turbogeneratoren sind $x_d = 1,2 \dots 1,5$



Lerneinheit

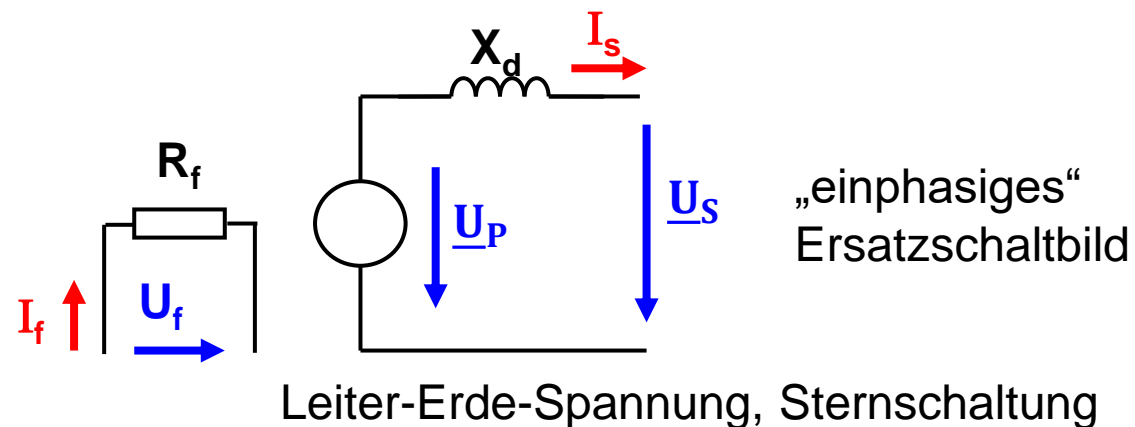
Ein Drehstrom-Synchrongenerator hat folgende Kenndaten:

Scheinleistung $S = 600 \text{ MVA}$

Betriebsspannung $U_S = 20 \text{ kV}$

Relative synchrone Reaktanz $x_d = 1,5$

- Bestimmen Sie bitte den Ständerstrom!
- Wie groß ist die synchrone Reaktanz (Blindwiderstand) ?

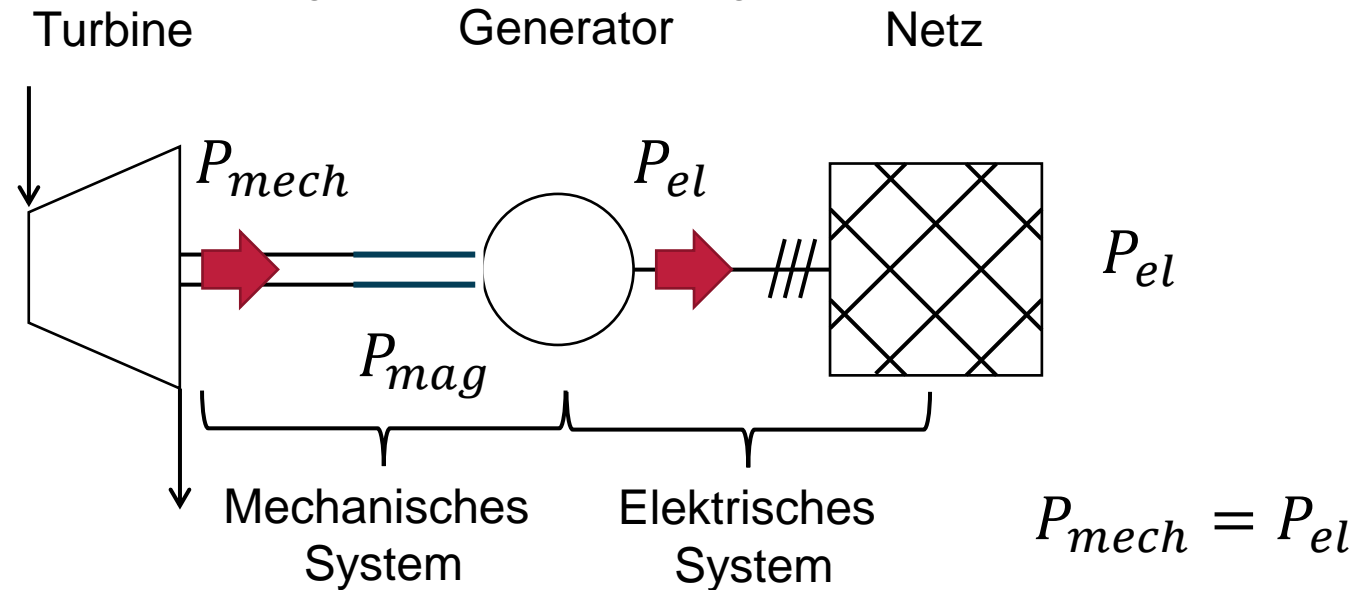


3 | Spannungen und Ströme

Gekoppeltes System

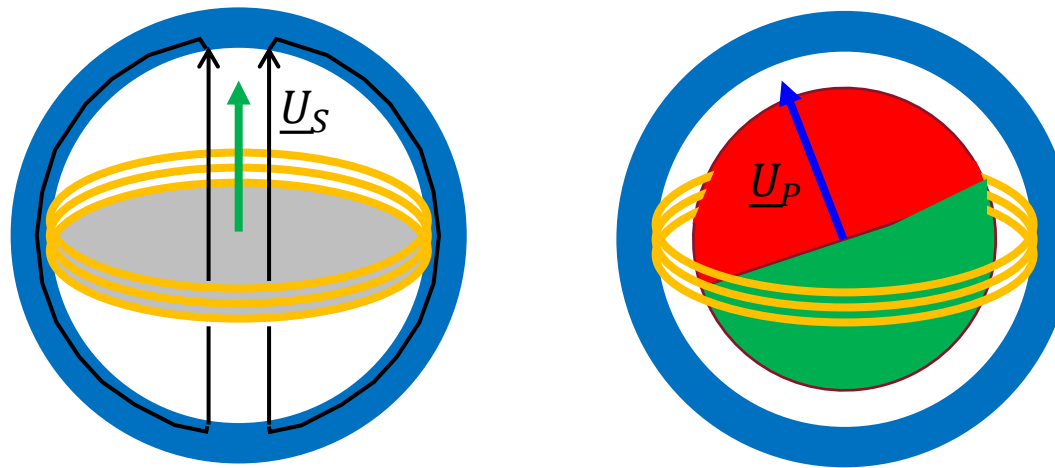
Turbine – Generator – Hochspannungsnetz

- Turbine liefert Antriebsleistung $P_{mech,T}$ für Generator
- In Hochspannungsnetz eingespeiste elektrische Leistung erzeugt Ständerstrom
- Ständerstrom im Generator erzeugt rotierendes Magnetfeld
- Ständer-Magnetfeld bremst Turbine durch magnetisches Gegen-Drehmoment (verursacht durch Ständerstrom und damit induzierter Spannung U_M)
- Stationärer Zustand stellt sich im Gleichgewicht beider Leistungen ein

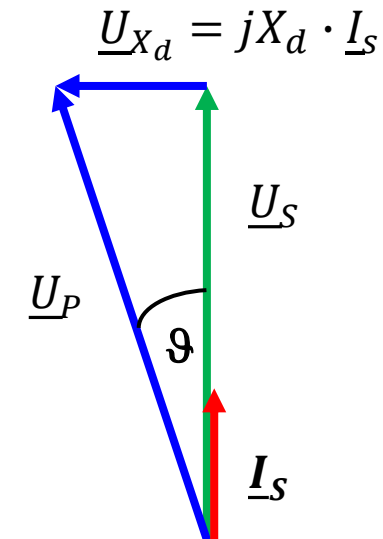


Raumzeiger Drehstrom-Synchrongenerator (1)

- Die **Polradspannung** wird in der Ständerwicklung durch das mechanisch drehende Polrad mit seinem Magnetfeld induziert.
- Der Strom in der Ständerwicklung erzeugt ein räumlich drehendes **Ständer-Magnetfeld**, repräsentiert durch die Ständerspannung.
- Das mechanisch angetriebene Polrad-Magnetfeld, repräsentiert durch Polradspannung, eilt der Ständerspannung um den **Polradwinkel** ϑ voraus.

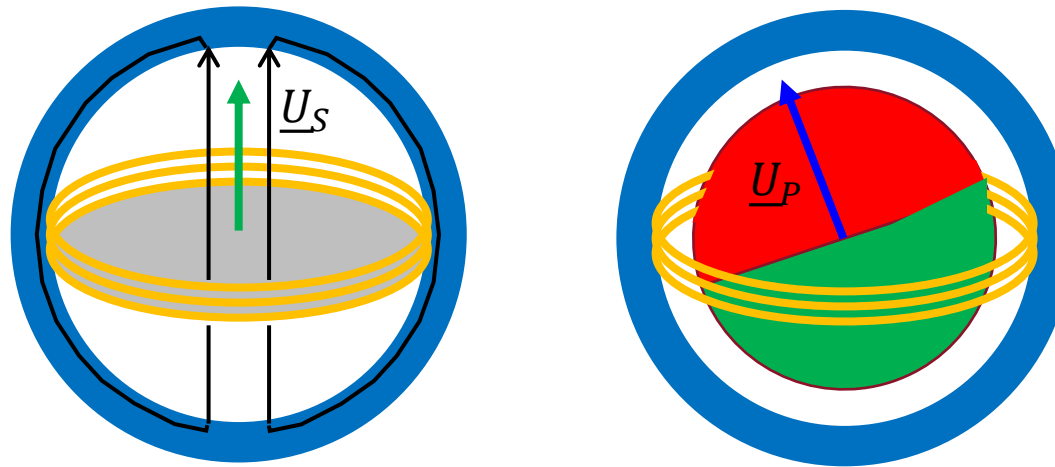


Ergänzung durch beide
Nachbarphasen-Wicklungen

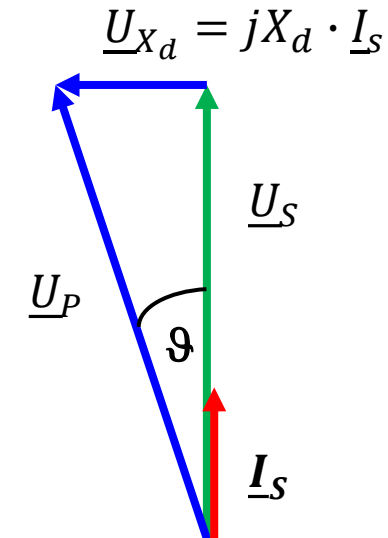


Raumzeiger Drehstrom-Synchrongenerator (2)

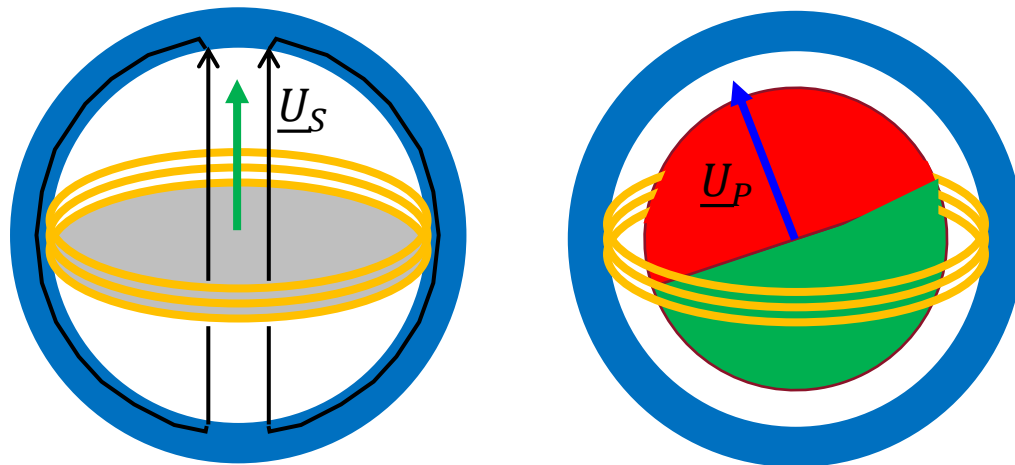
- Der Polradwinkel erzeugt eine **Spannungsdifferenz** zwischen Ständer- und Polradspannung, die den **Ständerstrom** durch die synchrone Reaktanz erzeugt.
- Das Polrad wird durch das drehende **Ständer-Magnetfeld** gebremst.
- Durch die Lorentzkraft ist das **bremssende Drehmoment** proportional zum Ständerstrom bzw. zur Spannung U_M an der synchronen Reaktanz.



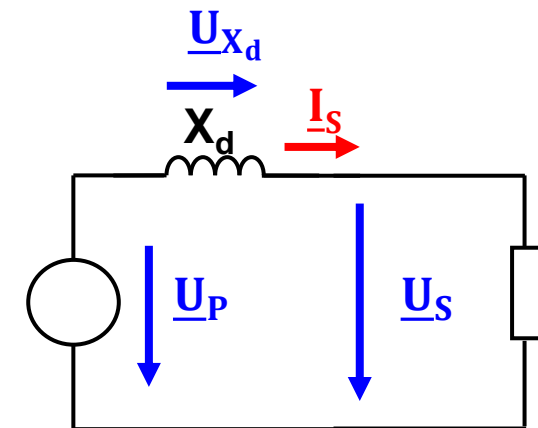
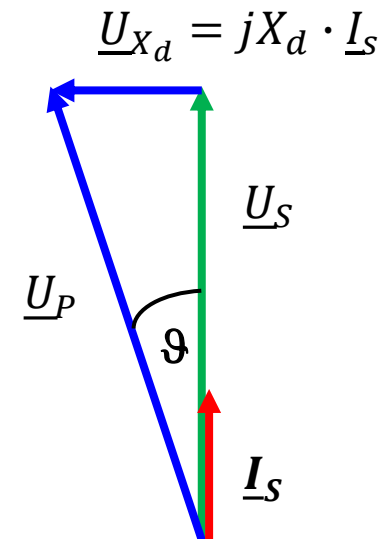
Ergänzung durch beide
Nachbarphasen-Wicklungen



Raumzeiger Drehstrom-Synchrongenerator (3)

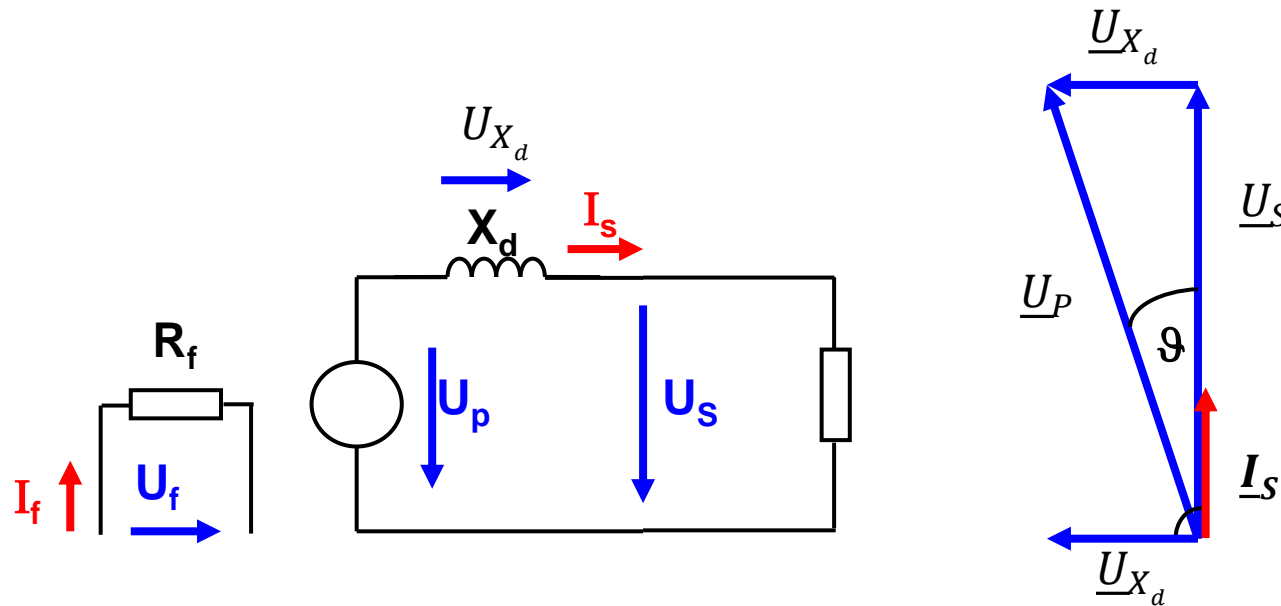


Ergänzung durch beide Nachbarphasen-Wicklungen



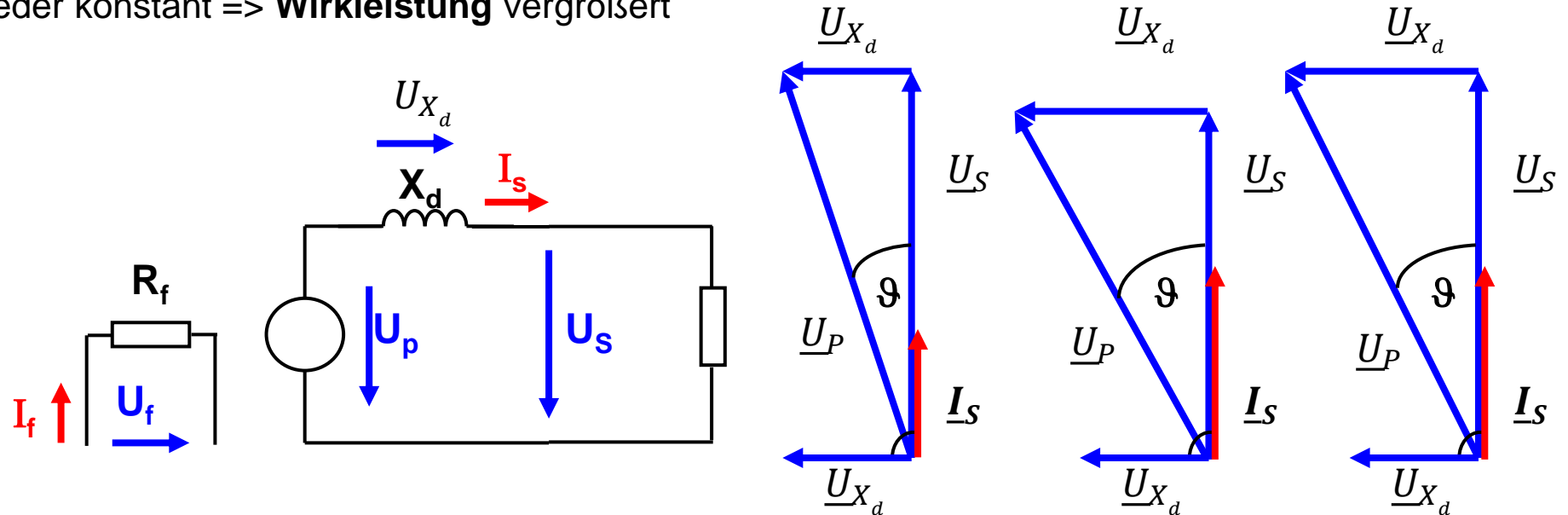
Zeigerdiagramm Drehstrom-Synchrongenerator Bsp. 1

- **Wirkleistung** wird in Verbraucher eingespeist
- Zeiger Ständerstrom liegt **parallel** zum Zeiger Ständerspannung (= Wirkstrom)
- Spannung an **synchroner Reaktanz** X_d eilt Ständerstrom um 90° voraus
- Spannung an der synchronen Reaktanz X_d ist die Zeiger-Differenz zwischen **Ständerspannung** und **Polradspannung**
- Polradspannung eilt Ständerspannung um **Polradwinkel** ϑ voraus



Zeigerdiagramm Drehstrom-Synchrongenerator Bsp. 2

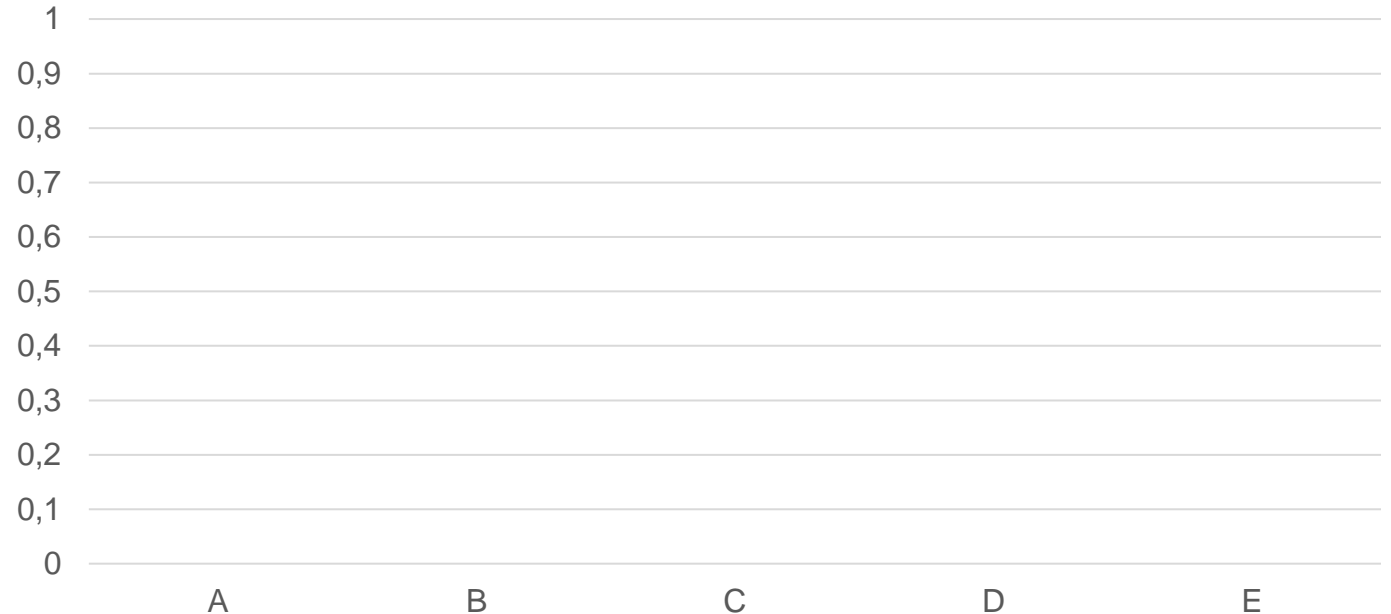
- **Verbraucherwiderstand** verringert sich
- Erhöhung **Ständerstrom** in Verbraucher
- Betrag der Spannung an **synchroner Reaktanz** X_d vergrößert
- Betrag **Polradspannung** zunächst konstant
- Vergrößerung **Polradwinkel** ϑ
- Erhöhung **Erregerstrom** => Vergrößerung Polradspannung
- Ständerspannung wieder konstant => **Wirkleistung** vergrößert



eduVote - Belastung von Synchronmaschinen

Der Betrieb von Synchrongeneratoren im Leerlauf bezeichnet man als „Phasenschieberbetrieb“. Welche Aussagen sind richtig? (Mehrere Antworten möglich)

- a) Im übererregten Betrieb wirkt der SG wie ein Kondensator.
- b) Im untererregten Betrieb wirkt der SG wie ein Widerstand.
- c) Im übererregten Betrieb wirkt der SG wie eine Spule.
- d) Im untererregten Betrieb wirkt der SG wie ein Spule.
- e) Im untererregten Betrieb wirkt der SG wie ein Kondensator.



ID = j.grobler@tu-braunschweig.de
Umfrage noch nicht gestartet



Umfrage starten



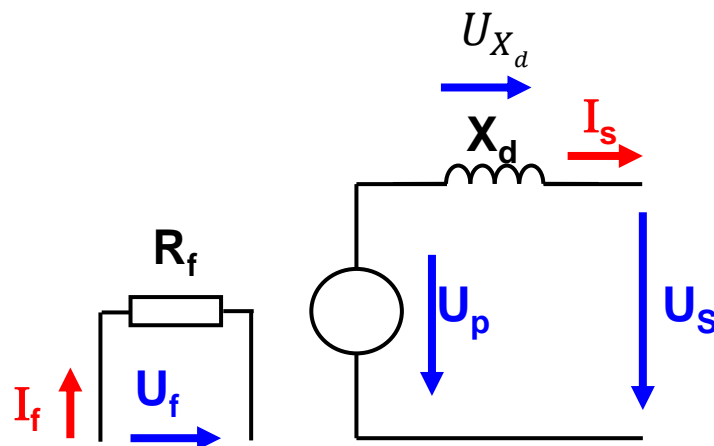
Lerneinheit

Ein Kraftwerk mit einem 600 MVA Generator mit $x_d = 1,5$ liefert an den Ständeranschlüssen eine induktive Blindleistung von 300 Mvar.

Die Ständer-Stern-Spannung beträgt 20 kV.

Zeichnen sie das Zeigerdiagramm und rechnen sie in kartesischen Koordinaten.

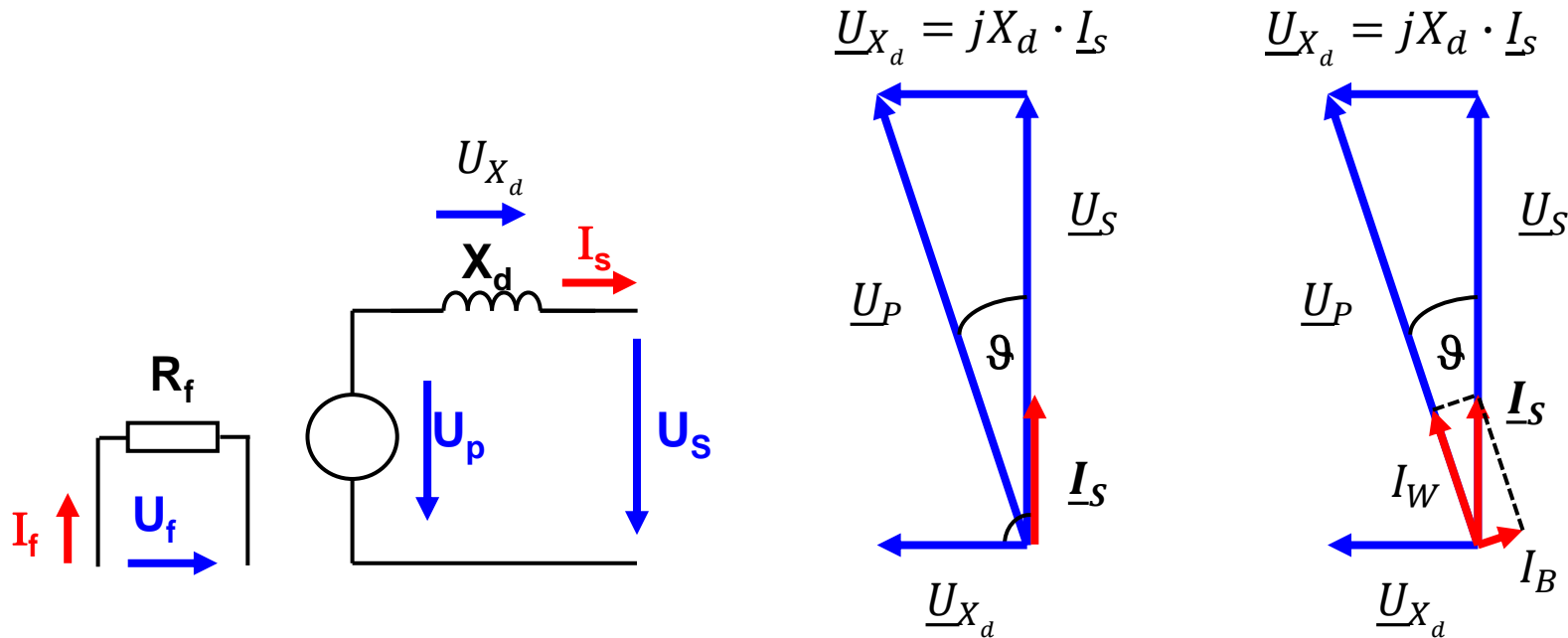
- Bestimmen Sie den Ständerstrom
- Wie groß ist die Spannung an der synchronen Reaktanz?
- Welche Polradspannung ist am Generator einzustellen?
- Wie groß ist der Polradwinkel ϑ ?



4 | Stabilität

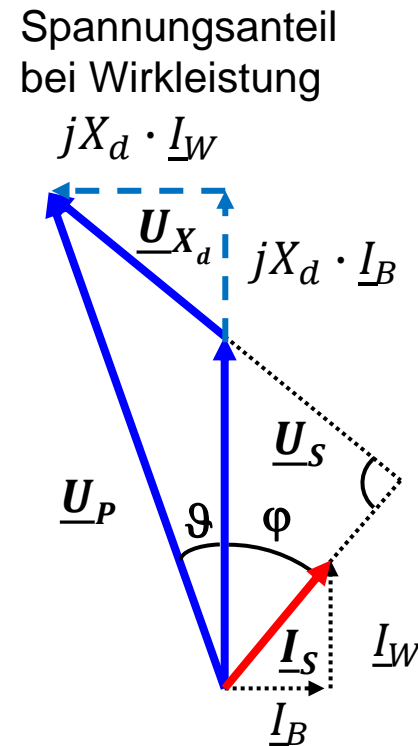
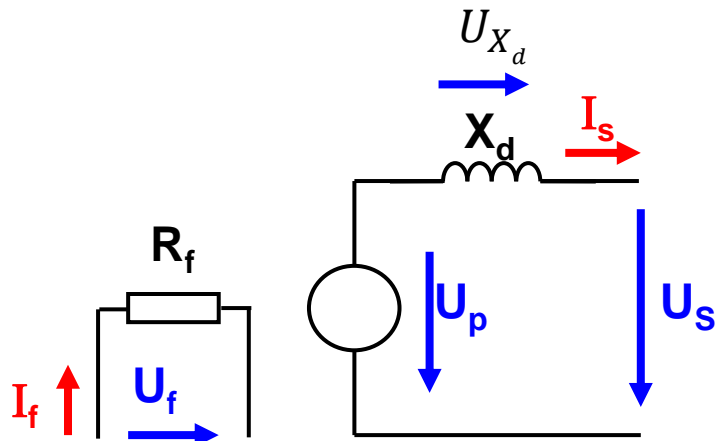
Zeigerdiagramm Drehstrom-Synchrongenerator

- Annahme: **Wirkleistung** wird in Hochspannungsnetz eingespeist
- Aufteilung Ständerstrom in Wirk- und Blindanteil für **Polrad-Spannungs-Quelle**
- Polrad-Spannungs-Quelle liefert **Wirkleistung** und **Blindleistung**
- Gesamte Blindleistung ist konstant durch **Drehfeldwelle** in den Phasen

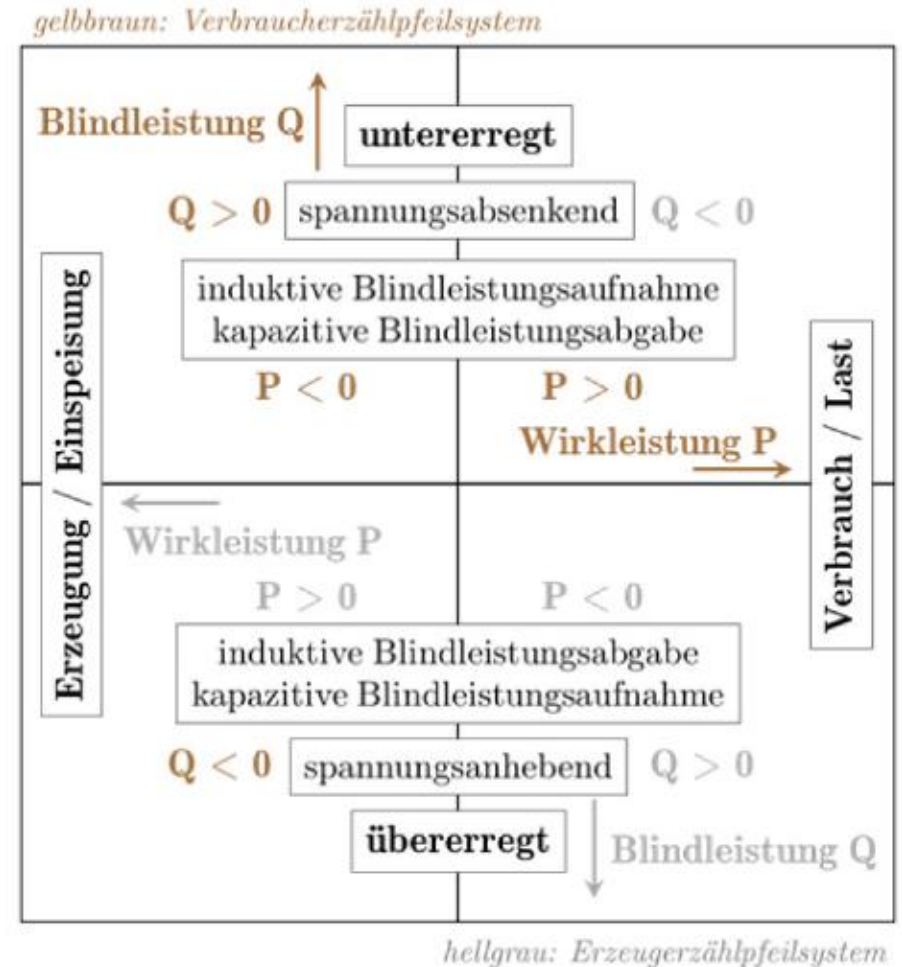


Zeigerdiagramm Drehstrom-Synchrongenerator

- Allgemein wird **Wirkleistung** und **Blindleistung** ins Netz eingespeist
- Ständerstrom** teilt sich auf in Wirkstrom und Blindstrom
- Blindstrom verursacht Längs-Spannung und verlangt **größere Polradspannung**
- Wirkstrom verursacht Quer-Spannung und **Polradwinkel** ϑ



Übersicht Begriffe und Vorzeichen
im Verbraucher- und
Erzeugerzählfeilsystem



Zeigerdiagramm Drehstrom-Synchrongenerator

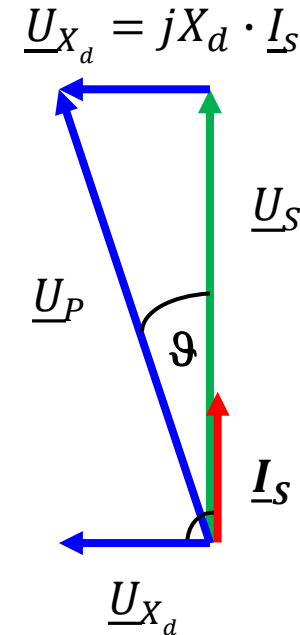
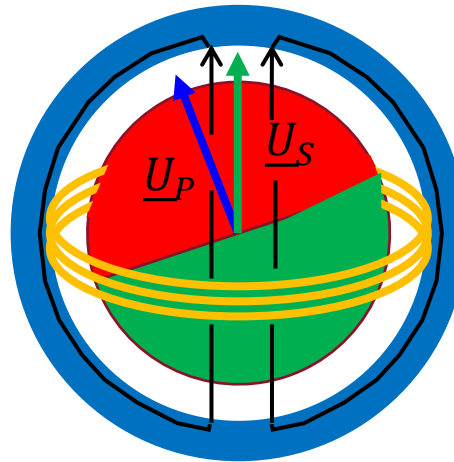
- Generator gibt elektrische Wirkleistung ab
- Wirkleistung ergibt sich aus Ständerstrom, Ständerspannung und **Leistungsfaktor $\cos\varphi$**
- Im **Beispiel** liegen Zeiger für Ständerstrom und Ständerspannung parallel
- Damit beträgt der Leistungsfaktor $\cos\varphi = 1$
- Polradwinkel bestimmt über Geometrie im Zeigerdiagramm die Wirkleistung

$$P = 3 \cdot U_S \cdot I_S$$

$$U_P \cdot \sin\vartheta = X_d \cdot I_S$$

$$I_S = \frac{U_P}{X_d} \cdot \sin\vartheta$$

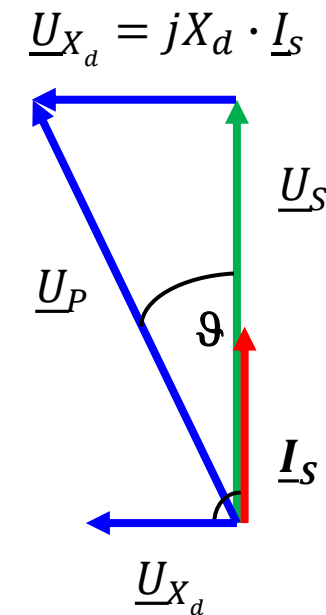
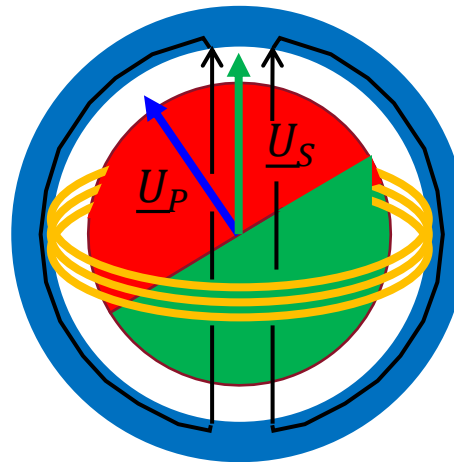
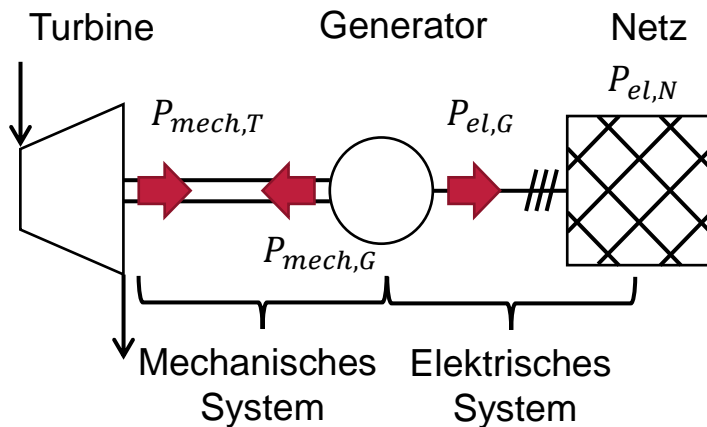
$$P = 3 \cdot \frac{U_S \cdot U_P}{X_d} \cdot \sin\vartheta$$



Zeigerdiagramm Drehstrom-Synchrongenerator

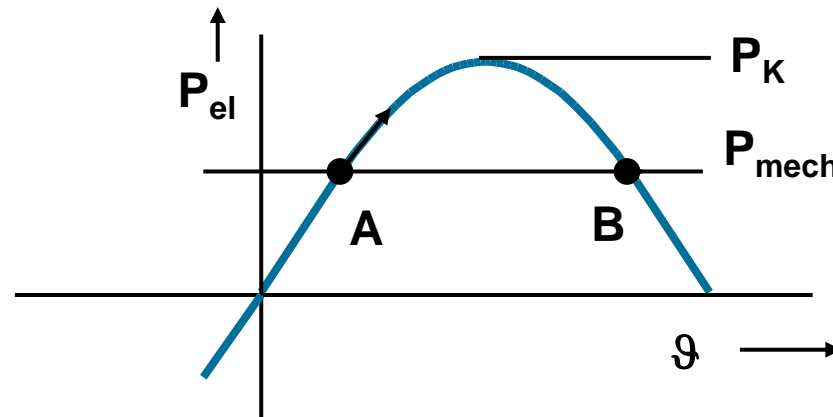
- **Beschleunigt** die Turbine den Generator, dann wird der Polradwinkel größer
- Der **Ständerstrom** steigt u. die elektrisch abgegebene Wirkleistung wird größer
- Ist die zugeführte Turbinenleistung kleiner als die elektrisch abgegebene Wirkleistung, dann wird das Polrad **abgebremst**
- Der Polradwinkel verkleinert sich wieder in den **stabilen** Ausgangszustand

$$P = 3 \cdot \frac{U_S \cdot U_P}{X_d} \cdot \sin \vartheta$$



Betriebsdiagramm Drehstrom-Synchrongenerator

- Stabilität der Wirkleistungsabgabe in ein **Verbundnetz** auf den **Bezugs-Spannungszeiger** (hier Bezeichnung U_S)
- Wirkleistung ist **Sinusfunktion** in Abhängigkeit vom Polradwinkel
- Maximalwert der Wirkleistung ist **Kippleistung P_K**
- Mechanische Turbinenleistung ist **stationär** gleich elektrischer Wirkleistung
- Schnittpunkte sind mathematische Lösungen für Arbeitspunkte
- **Schnittpunkt A** ist stabiler Arbeitspunkt (B instabil)
- Polradwinkel über 90° sind instabil

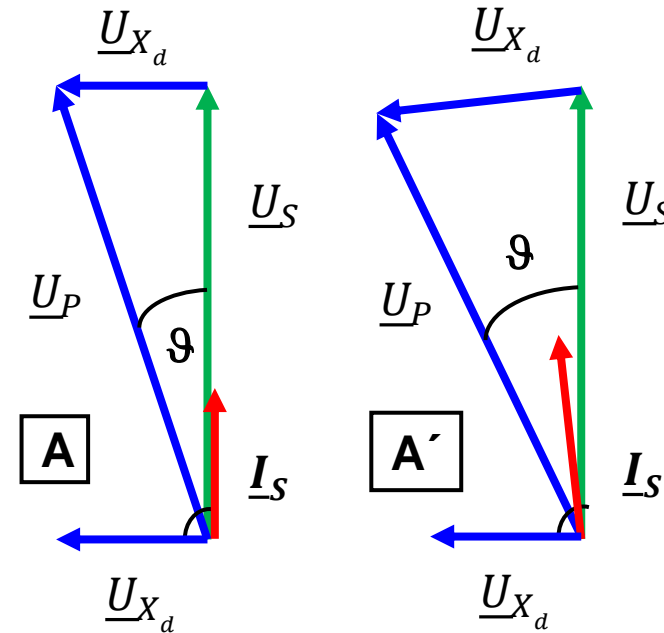
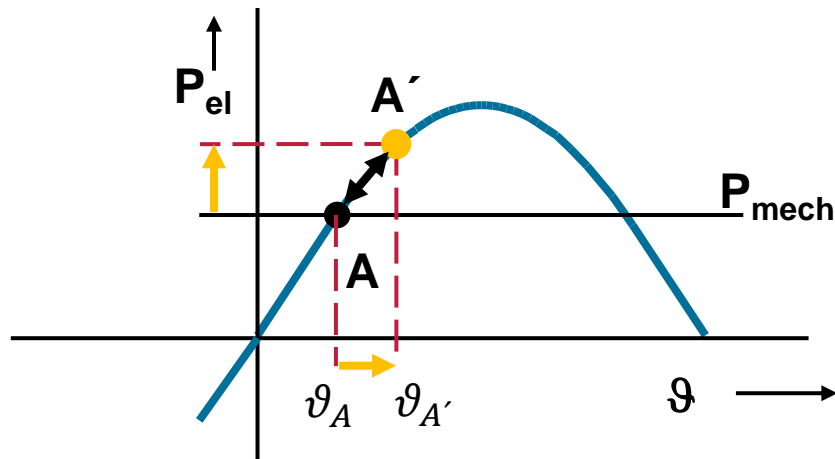


$$P_K = 3 \cdot \frac{U_S \cdot U_P}{X_d}$$

$$P = P_K \cdot \sin \vartheta$$

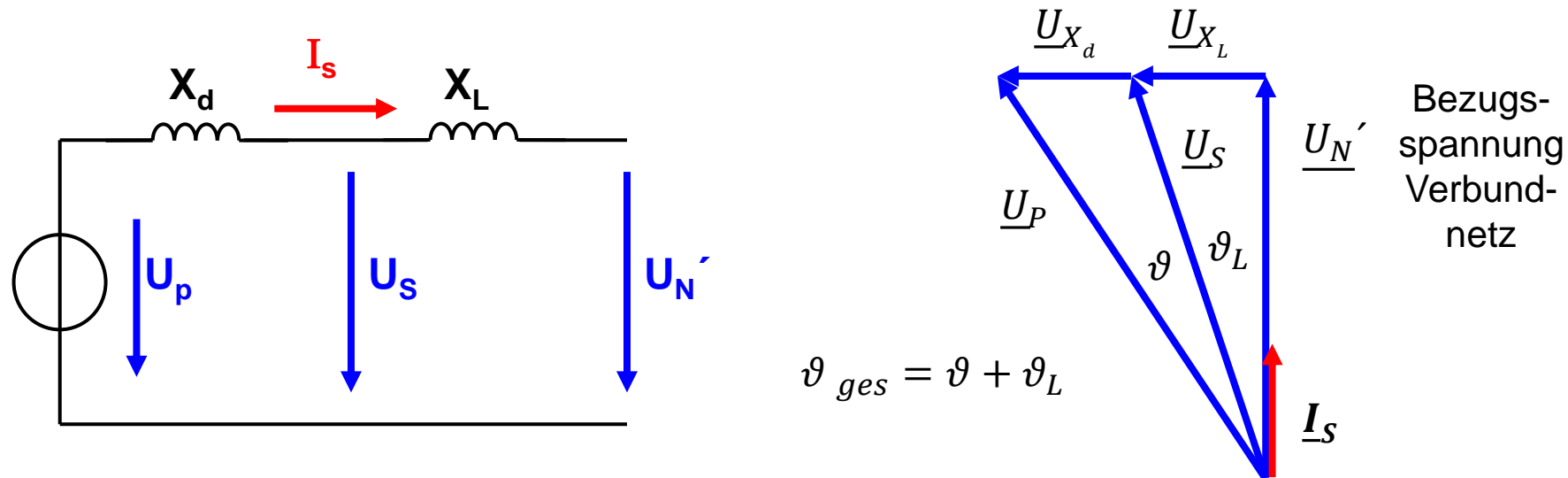
Betriebsdiagramm Drehstrom-Synchrongenerator

- **Annahme** Polradwinkel ist größer (A')
- Vergrößerte Einspeisung von **Wirkleistung** ins Netz
- Elektrische Leistung ist **größer** als Turbinenleistung
- Polrad wird **abgebremst** u. Polradwinkel nimmt ursprünglichen Wert wieder an
- A ist stabiler Betriebspunkt (Richtwert Polradwinkel 30°)



Betrieb am starren Netz

- Netzspannung ist konstant und durch **Verbundnetz** vorgegeben
- Generator ist über **Leitung** mit Verbundnetz verbunden mit $X_L' = 0,25 \Omega/\text{km}$
- **Stabiler** Netzbetrieb bedeutet, dass die Polradspannung \underline{U}_P zur Netzspannung \underline{U}_N' einen konstanten Winkel einnimmt
- Damit wird der **Gesamt-Polradwinkel** ϑ_{ges} durch den zusätzlichen Übertragungswinkel ϑ_L vergrößert
- Länge der **Übertragungsstrecke** ist daher aus Stabilitätsgründen begrenzt

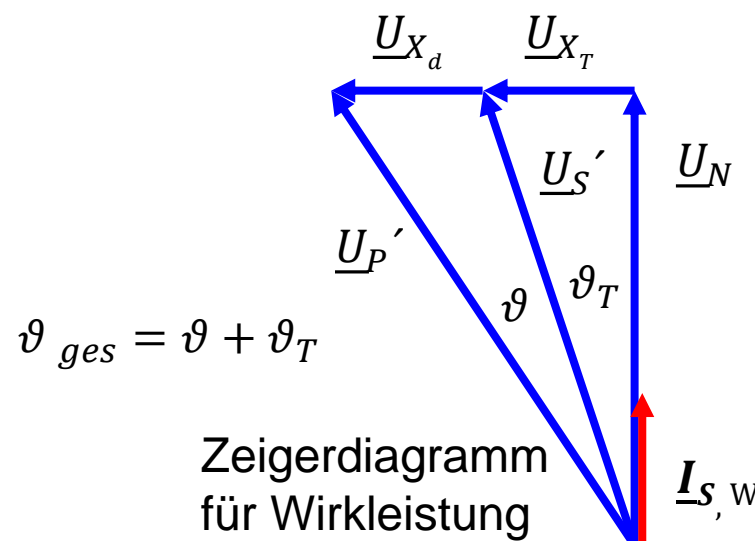
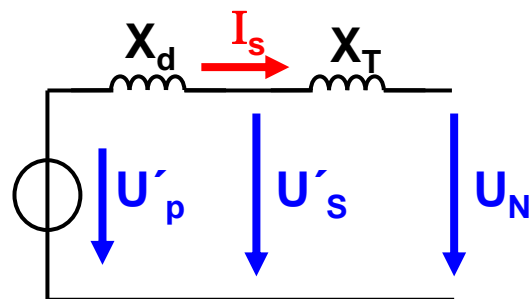




Lerneinheit

Ein Kraftwerk mit einem 600 MVA Generator mit $x_d = 1,5$ speist über einen Maschinentrafo in ein 420 kV Netz ein. Der 630 MVA Trafo mit $u_K = 0,1$ ist im Umspannwerk direkt an das Verbundnetz angeschlossen. Das Netz befindet sich im Schwachlast-betrieb und hat bei einer Spannung von 380 kV einen kapazitiven Blindleistungsbedarf von 100 MVar und einen Wirkleistungsbedarf 100 MW. Ergänzen sie das Zeigerdiagramm und rechnen sie in kartesischen Koordinaten mit getrennten Wirk- und Blindanteilen.

- Bestimmen Sie den Strom, den das Kraftwerk in das Netz einspeist!
- Welcher Übertragungswinkel ϑ_T stellt sich im Trafo ein?
- Welche Polradspannung ist am Generator eingestellt?
- Wie groß ist der Polradwinkel ϑ ?
- Bewerten Sie den gesamten Übertragungswinkel ϑ_{ges} !



Fragen?

Nächste Vorlesung:
Energiewirtschaft und
Netzbetrieb

