

# Elektrische Maschinen und Antriebe



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Vorlesung WS 2 + 2

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Andreas Binder



Quelle: Siemens AG



## Vorlesung

**Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Andreas Binder**  
**Institut für Elektrische Energiewandlung**  
**TU Darmstadt**  
**64283, Landgraf-Georg-Straße 4, Darmstadt**  
**tel.: +49-6151-16-24181 o. 24180**  
**fax.:+49-6151-16-24183**  
**e-mail: [abinder@ew.tu-darmstadt.de](mailto:abinder@ew.tu-darmstadt.de)**

## Übungen

**M. Sc. Robin Köster**  
**Institut für Elektrische Energiewandlung**  
**TU Darmstadt**  
**64283, Landgraf-Georg-Straße 4, Darmstadt**  
**tel.: +49-6151-16-24193**  
**fax.:+49-6151-16-24183**  
**e-mail: [rkoester@ew.tu-darmstadt.de](mailto:rkoester@ew.tu-darmstadt.de)**

# Lernziele



**Verständnis der** Erzeugung magnetischer Drehfelder, Kraftbildung, Spannungsinduktion in elektrischen Wicklungssystemen

**Kennenlernen der Asynchronmaschinen** als Kurzschluss- und Schleifringläufermaschinen

**Einblicke in die Antriebstechnik mit Asynchronmaschinen** als Festdrehzahlantriebe am Netz und als drehzahlveränderbare, umrichter gespeiste Antriebe

**Verständnis der** Funktionsweise der **Synchronmaschinen** als Vollpol- und Schenkelpolmaschinen im Generator- und Motorbetrieb am Verbundnetz und im Inselnetz

**Kennenlernen der Gleichstromantriebe** mit Bauformen, DC-Antriebstechnik mit Stromrichterspeisung, Feldschwächbetrieb, Kommutierungsgrenzen



# Erwünschte Vorkenntnisse



Verständnis der Drehstromtechnik (Vorlesung ETiT 1)

## **Achtung:**

Eine kurze Wiederholung der Drehstromtechnik findet zu Beginn der Übungen statt!

Kenntnisse der elektrotechnischen Grundgesetze (Vorlesung ETiT 1 + 2)

Kenntnisse der Mathematik 1 und 2 (komplexe Rechnung, lineare Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten, *Fourier*-Reihenentwicklung)

Grundgesetze der Mechanik



## Vorlesungsinhalt

1. Einleitung
2. Drehfelder in elektrischen Maschinen
3. Mathematische Analyse von Luftspaltfeldern
4. Spannungsinduktion in Drehstrommaschinen
5. Die Schleifringläufer-Asynchronmaschine
6. Die Kurzschlussläufer-Asynchronmaschine
7. Antriebstechnik mit der Asynchronmaschine
8. Die Synchronmaschine
9. Erregereinrichtungen und Kennlinien
10. Gleichstromantriebe

# Vorlesungsbegleitung



- Moodle Download:

Deutsch (englisch Ausgaben ebenfalls vorhanden):

- Skript mit Aufgabensammlung
- Übungsaufgaben
- Foliensammlung zur Vorlesung

- Papierdruck: *CityCopies*, Holzstrasse 5:

Skript mit Aufgabensammlung, Übungsaufgaben, Foliensammlung

- (Exkursion)



**Schriftlich**

**2 Stunden**

**3 Berechnungsaufgaben**

**Verständnisfragen zur Theorie**

**2 Prüfungstermine pro Jahr**

**Liste der Verständnisfragen in der Aufgabensammlung**

## 1. Einleitung

### 1.1 Empfohlene Literatur

1.2 Verwendete Formelzeichen

1.3 Einsatzgebiete elektrischer Energiewandler (Übersicht)

1.4 Bedeutung der elektrischen Energiewandler für unsere Gesellschaft

1.5 Typenvielfalt elektrischer Maschinen und Antriebe

1.6 Prinzipien der elektromagnetischen Kraftbildung



# Gute Bücher über fundierte Grundlagen

Hinweis



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## Theoretische Elektrotechnik

Küpfmüller, K.; Mathis, K.; Reibiger, A.: 19. Aufl., Springer, Heidelberg, 2013

## Theoretische Elektrotechnik

Simonyi, K.: 10. Aufl.; Johann Ambrosius Barth, 1993 **(GEBRAUCHT)**

## Gerthsen Physik

Gerthsen, Ch.; (Meschede, D.): 24. Aufl.; Springer, Heidelberg, 2013

## Halbleiter-Schaltungstechnik

Tietze, U.; Schenk, Ch.; Gamm, E.: Springer, Heidelberg, 15. Aufl., 2016

## Mathematische Grundlagen der Elektrotechnik (+ Begleitband: Lösungen u. Hinweise)

Dirschmid, H.-J.: 4. Aufl.; Vieweg, 1990/1996 **(GEBRAUCHT)**

**Mathematik**, Arens, T. u. a.: 3. Aufl.; Spektrum Akad. Verlag / Springer, Heidelberg, 2015

## Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau

Grote, K.-H.; Feldhusen, J. (Hsg.): 24. Aufl.; Springer-Vieweg, Heidelberg, 2014

**Elektrische Maschinen**, Fischer, R.: Hanser, München, 17. Auflage, 2017

**Leistungselektronik**, Felderhoff, R.; Busch, U.: Hanser, München, 4. Auflage, 2006



# Zum Nachlesen: E-Maschinen & Antriebe



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



## A. Binder: Elektrische Maschinen und Antriebe:

Grundlagen, Betriebsverhalten,  
Springer;  
1. Aufl., 2012, 1218 S.  
2. Aufl., 2018, 1287 S.

Übungsbuch: Aufgaben mit Lösungsweg,  
Springer;  
1. Aufl., 2012, 308 S;  
2. Aufl., 2017, 498 S.



## 1. Einleitung

1.1 Empfohlene Literatur

1.2 **Verwendete Formelzeichen**

1.3 Einsatzgebiete elektrischer Energiewandler (Übersicht)

1.4 Bedeutung der elektrischen Energiewandler für unsere Gesellschaft

1.5 Typenvielfalt elektrischer Maschinen und Antriebe

1.6 Prinzipien der elektromagnetischen Kraftbildung

# Verwendete Formelzeichen (siehe Skript)



## Das griechische Alphabet:

$A \alpha$	Alpha	$B \beta$	Beta	$\Gamma \gamma$	Gamma	$\Delta \delta$	Delta
$E \varepsilon$	Epsilon	$Z \zeta$	Zeta	$H \eta$	Eta	$\Theta \vartheta$	Theta
$I \iota$	Jota	$K \kappa$	Kappa	$\Lambda \lambda$	Lambda	$M \mu$	My (mue)
$N \nu$	Ny (nue)	$\Xi \xi$	Xi	$O \omicron$	Omikron	$\Pi \pi$	Pi
$P \rho$	Rho	$\Sigma \sigma$	Sigma	$T \tau$	Tau	$Y \upsilon$	Ypsilon
$\Phi \varphi$	Phi	$X \chi$	Chi	$\Psi \psi$	Psi	$\Omega \omega$	Omega



## 1. Einleitung

1.1 Empfohlene Literatur

1.2 Verwendete Formelzeichen

1.3 Einsatzgebiete elektrischer Energiewandler (Übersicht)

1.4 Bedeutung der elektrischen Energiewandler für unsere Gesellschaft

1.5 Typenvielfalt elektrischer Maschinen und Antriebe

1.6 Prinzipien der elektromagnetischen Kraftbildung

# Einsatzgebiete elektrischer Energiewandler

## Übersicht



**Transformatoren:** Elektrische AC-Energieübertragung:  
Ändern der Spannungen/Ströme

**Gleichstrommaschinen:** DC-Betrieb, zumeist Motoren (seltener: Generatoren)

**Wechselstrommaschinen:** AC-Einphasenbetrieb (z. B. Einphasen-Reihenschlussmotoren)

**Drehstrom-Maschinen:** AC-3-Phasenbetrieb

**a) Synchronmaschinen:** Die meisten sind Großgeneratoren,  
es gibt aber auch viele Motoren:  
„klein“: Meist mit Permanentmagneterregung  
„groß“: Meist mit elektrischer Erregung

**b) Asynchronmaschinen:** Meist: E-Motoren aller Baugrößen !  
Als Generatoren häufig in Windturbinen (meist mit Schleifringläufer)



## 1. Einleitung

1.1 Empfohlene Literatur

1.2 Verwendete Formelzeichen

1.3 Einsatzgebiete elektrischer Energiewandler (Übersicht)

1.4 Bedeutung der elektrischen Energiewandler für unsere Gesellschaft

1.5 Typenvielfalt elektrischer Maschinen und Antriebe

1.6 Prinzipien der elektromagnetischen Kraftbildung

# Bedeutung der elektrischen Energiewandler für unsere Gesellschaft



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

- **Nahezu sämtliche E-Generatorsysteme** sind E-Maschinen
- Ein **Großteil heutiger Antriebstechnik** erfolgt mit E-Motoren
- **E-Generatoren und E-Motoren:** Bemessungsleistungen: **ca.  $10^{-1}$  W ...  $10^9$  W !**
- **E-Antriebstechnik:**
  - **Stationärantriebe:** Industrie und Gewerbe & Haushalt
  - **Fahrzeugantriebe:** E-Bahnen (Vollbahnen, Metros, Straßenbahnen)  
Automobiltechnik
- **Aktuelle Forschung und Entwicklung:**
  - ⇒ E-Mobility: Erhöhung von Wirkungsgrad, Leistungsgewicht kW/kg, ...
  - ⇒ magnetisch gelagerte High-Speed-Antriebe (Kompressoren)
  - ⇒ Permanentmagnet-Maschinen im MW-Bereich (Windkraft)
  - ⇒ Elektrisches Fliegen
  - ⇒ Supraleitende E-Maschinen

...





# Elektrische Motoren

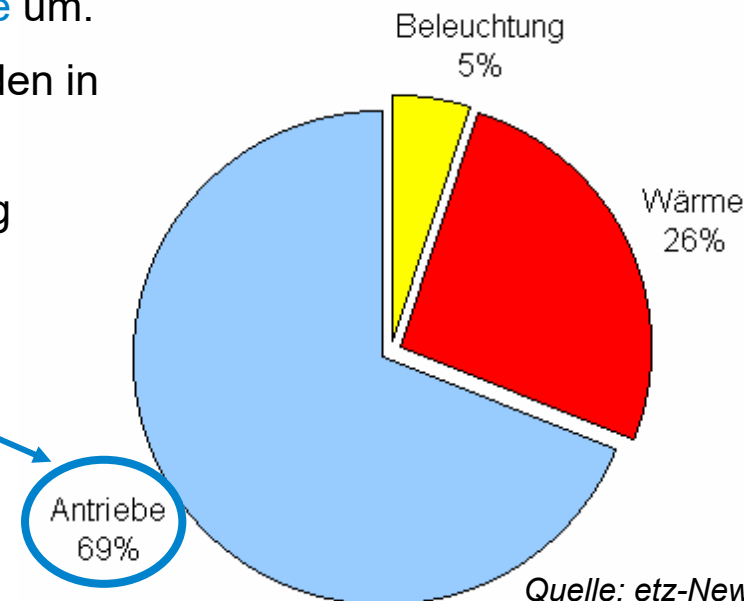
## Bemessungsleistungen ca. $10^{-1}$ W ... $10^8$ W



Quellen: Siemens AG (2), Aradex (1), Faulhaber (1); Germany

# Nutzung der elektrischen Energie in der deutschen Industrie

- 2021: In *Europa* wandeln Elektromotoren ca. 1470 TWh elektrische Energie in **mechanische Energie** und **Wärme** um.
- Etwa **47%** der elektrischen Energie werden in **Deutschland in der Industrie** benötigt.
- Davon werden ca. 70% zur Umwandlung in **mechanische Arbeit** verwendet.



Quelle: etz-Newsletter |  
VDE VERLAG, 11/2020

- **Endenergie für Antriebstechnik: 10%**
  - Industrie: 5%
  - Haushalt/Gewerbe/Verkehr: 5%
- **Geforderte CO<sub>2</sub>-Minderung in EU durch Antriebstechnik:**  
**10% von 780 Mio. To. = 80 Mio. To.**
  - Industrie: 39 Mio. To.
  - Haushalt/Gewerbe/Verkehr: 41 Mio. To.

## 1. Einleitung

1.1 Empfohlene Literatur

1.2 Verwendete Formelzeichen

1.3 Einsatzgebiete elektrischer Energiewandler (Übersicht)

1.4 Bedeutung der elektrischen Energiewandler für unsere Gesellschaft

**1.5 Typenvielfalt elektrischer Maschinen und Antriebe**

1.6 Prinzipien der elektromagnetischen Kraftbildung

# Elektrischer Maschinen und Antriebe

## Typenvielfalt (1)



**ROT:** in dieser Vorlesung

- **Mikromotoren (W):**
  - Piezoantriebe
  - elektrostatisch-kapazitive Aktoren, ...
- **Mini- und Kleinmotoren (< 1 kW):**
  - Universalmotor**
  - Glockenläufer-PM-DC-Motor
  - Spaltpolmotor**
  - Kondensatormotor**
  - Reluktanzmotor
  - Elektronikmotor
  - Hysteresemotor
  - Schrittmotoren (Reluktanz-, PM-Synchron- und Hybridschrittmotoren), ...



# Elektrischer Maschinen und Antriebe

## Typenvielfalt (2)

**ROT:** in dieser Vorlesung

- **Industrieantriebe, Mittelmaschinen (< 1 MW):**

- Netz- und umrichter gespeiste Käfigläufer-Asynchronmaschine

- PM-Synchronservomotor

- Synchron-Reluktanzmaschine

- Switched-Reluctance-Maschine

- Transversalflussmaschine

- PM und ele. erregte Synchron- und Gleichstrommaschinen

- **Großantriebe (< 100 MW):**

- Netz- und umrichter gespeiste Käfigläufer- & Schleifringläufer-Asynchronmaschine

- ele. erregte Synchron- und Gleichstrommaschine

- **Elektrische Generatoren:**

- Lichtmaschine

- selbsterregter Asynchrongenerator

- ele. erregte Synchron-Notstromaggregate

- doppelt gespeiste Asynchron-Windgeneratoren,

- PM-Synchrongeneratoren

- ele. erregte Synchronschenkelpol- und Vollpolmaschine

# Von der Zeit überholte Maschinenkonzepte



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

**Ergänzung**

## Unvollständige Aufzählung:

- Repulsionsmotor
- Quersfeldschweißgenerator,
- Dreileiter-Maschine
- Amplidyne
- Rototrol-Antrieb
- PESTARINI-Antrieb,
- Isthmuspol-Erregermaschine
- Unipolarmaschine
- WINTER-EICHBERG-Maschine,
- Ständer- und läufergespeiste Drehstrom-Nebenschlussmaschine,
- Ständergespeiste Drehstrom-Reihenschlussmaschine
- Doppelläufer-Maschine
- SIMODOM-Waschmaschinenmotor,
- Mittelfrequenz-Synchron-Gleichpolmaschinen:
  - a) Heteropolarbauweise:
    - SCHMIDT-LORENZ-Maschine,
    - GUY- oder Schwingfeld-Maschine
  - b) Homopolarbauweise:
    - ARCO-Maschine



## 1. Einleitung

1.1 Empfohlene Literatur

1.2 Verwendete Formelzeichen

1.3 Einsatzgebiete elektrischer Energiewandler (Übersicht)

1.4 Bedeutung der elektrischen Energiewandler für unsere Gesellschaft

1.5 Typenvielfalt elektrischer Maschinen und Antriebe

1.6 Prinzipien der elektromagnetischen Kraftbildung

- **Magnetische Feldstärke  $H$**  wird vom elektrischen Strom erregt.
- **Magnetische Polarisation  $J_M$**  (**Magnetisierung  $M = J_M/\mu_0$**  genannt) wird erregt von
  - a) Dauermagneten,
  - b) magnetisierten Werkstoffen (z. B. magnetisiertes Eisen).
- **Magnetische Flussdichte (magnetische Induktion)  $B$**  ist die Summe aus  $H$  und  $J_M$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{J}_M = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M}$$

In unmagnetisierbaren Körpern (z. B. Vakuum, idealisiert: Luft, ...):  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$

In magnetisierbaren Körpern (paramagnetisch, ferromagnetisch (Fe, Ni, Co),  
antiferromagnetisch, diamagnetisch, ferrimagnetisch):

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{J}_M$$

Einheiten:  $H, M$ : A/m,  $B, J_M$ : T („Tesla“) = Vs/m<sup>2</sup>

Permeabilität des Vakuums:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Vs/(Am)



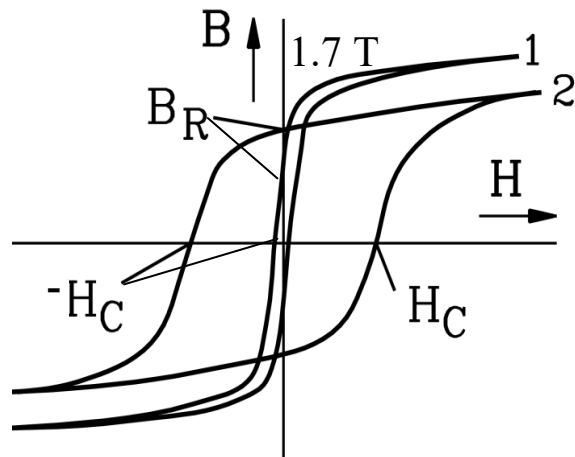
# Ferro- und ferrimagnetische Werkstoffe (hier: isotrop angenommen)

Wiederholung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

- $B(H)$ -Kurve hängt nichtlinear von  $H$  ab:  $\vec{B}(H) = \mu_0 \vec{H} + \vec{J}_M(H) = \mu_0 \cdot \mu_r(H) \cdot \vec{H}$
- $\mu_r(H)$ : **Relative Permeabilität**: z. B. spezielles Eisenblech:  $\mu_{r,\max} = \text{ca. } 5000 \dots 7000$
- $B(H)$ -Kurven haben eine „**Hysterese**“ = Schleifenform der  $B(H)$ -Kennlinie:  
Es treten **Remanenzflussdichte  $B_R$**  und **Koerzitivfeldstärke  $H_C$**  auf.



- 1: „Weichmagnetisches“ Material:  $H_C$  klein  
(ferromagnetisch: Eisen, Nickel, Kobalt, ...)
- 2: „Hartmagnetisches“ Material:  $H_C$  groß:  
Permanentmagnete  
(Ferrite, Al-Ni-Co-Magnete,  
Seltenerd-Hochenergiemagnete NdFeB, SmCo, ...)

- „**Sättigung**“ des Werkstoffs: Bei **Eisen** ab etwa 1.7 T !
- $B$  lässt sich trotz  $H$ -Vergrößerung kaum mehr erhöhen,  
da alle „Elementarmagnete“ im Werkstoff parallel zu  $H$  ausgerichtet  
sind.

Quelle: Fischer, R., El. Maschinen, Hanser-Verlag



# LORENTZ-Kraft und Kraft auf magnetisierbare Körper

Wiederholung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

- Für die elektromechanische Energiewandlung sind **elektrostatische Kräfte** (*Coulomb*-Kraft und Kraft auf elektrisch polarisierbare Körper) (außer bei Mikromotoren) meist **zu gering**, um technisch nutzbar zu sein.
- Führung der magnetischen Flussdichte  $B$  im **weichmagnetischen Eisen** (oder Co, ...), das **unterhalb seiner Sättigungsgrenze**  $< 1.7 \dots 1.8 \text{ T}$  magnetisch ausgenützt wird.

• **LORENTZ-Kraft**  $q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}(t))$  **auf geraden el. Leiter (Länge  $l$ ):**  $\vec{F}(t) = i(t) \cdot (\vec{l} \times \vec{B}(t))$

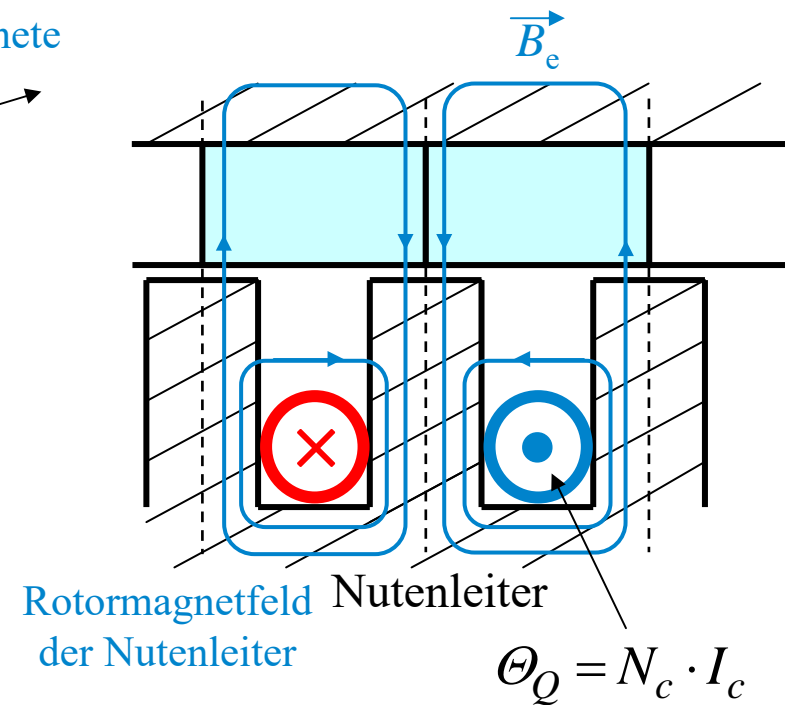
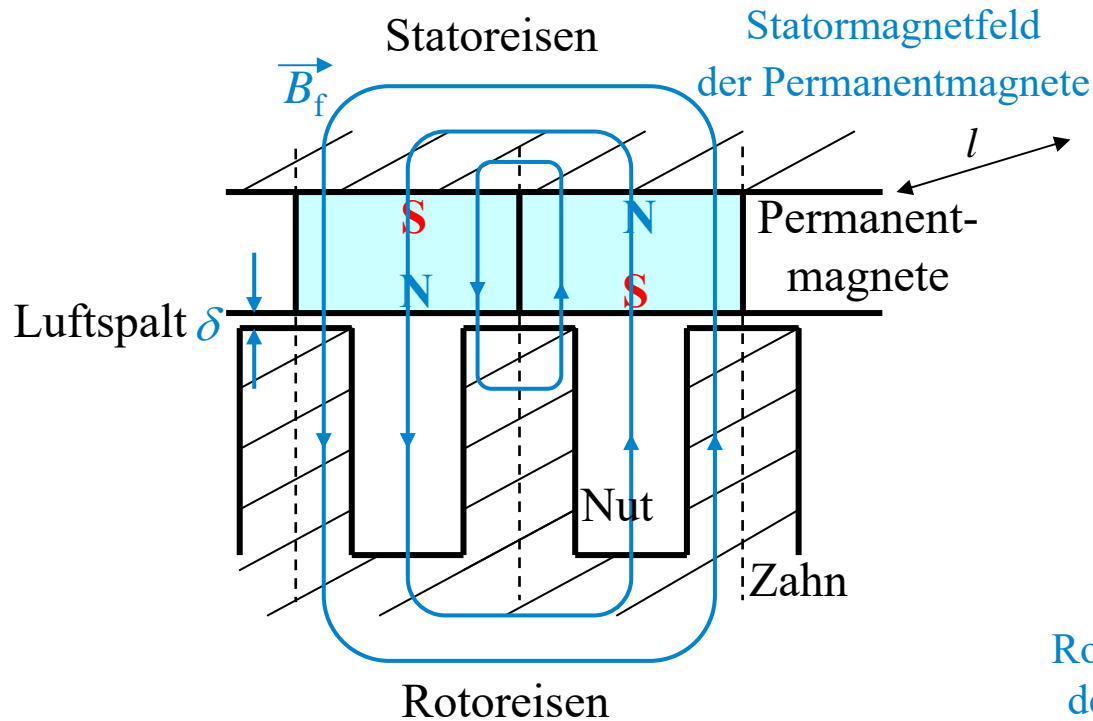
• **Kraft auf magnetisierbare Körper (Volumen  $V$ ):**  $\vec{F}(t) = \int_V \vec{f}(\vec{B}, \vec{x}, t) \cdot dV$

• **Volumen-Kraftdichte des magnetisierbaren Materials:**  $\vec{f}(\vec{B}, \vec{x}, t)$



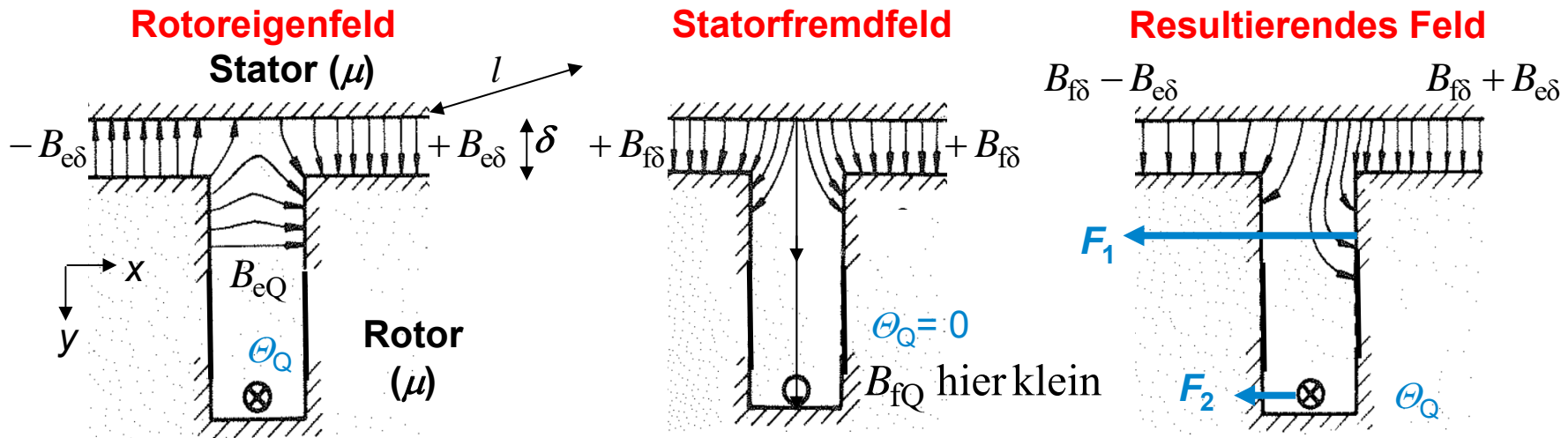
# Beispiel: Periodische Nut-Zahn-Struktur: Genuteter Rotor, ungenuteter Stator

- Die Erzeugung des Magnetfelds  $B$  erfolgt über  
 a) elektrisch stromdurchflossene Leiter      oder      b) Permanentmagnete.



$I_c$ : Leiterstrom,  $N_c$ : Windungszahl

# LORENTZ-Kraft auf stromdurchflossene Nutenleiter



- Luftspalt-Eigenfeld der stromdurchflossenen Nutenleiter ( $\mu \rightarrow \infty$ ):

$$B_{e\delta} = \frac{\mu_0 \Theta_Q}{2\delta} = \frac{\mu_0 N_c I_c}{2\delta}$$

- Kein Stator-Fremdfeld:

$$B_{f\delta} = 0$$

- Stromloser Nutenleiter:  $\Theta_Q = 0$ , kein Eigenfeld:  $B_e = 0$

- Nur Stator-Fremdfeld:

Im Luftspalt:  $B_{f\delta} > 0$

Am Leiter:  $B_{fQ} > 0$

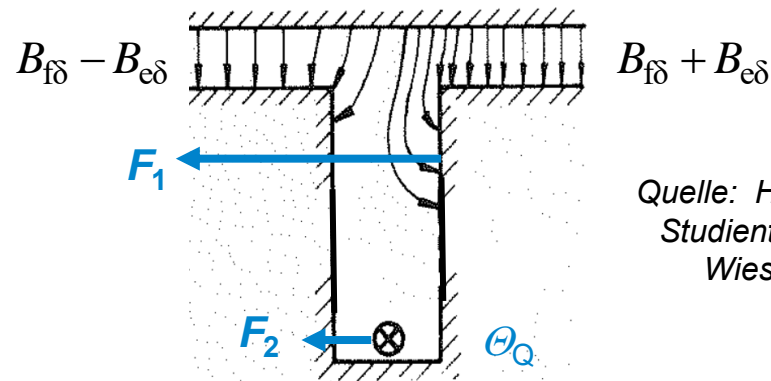
- Kraft  $F_c$  auf den Rotor ist
- 1: überwiegend magnetischer Zug an der Zahnflanke  $F_1$
  - 2: nur kleiner Anteil ist Leiterkraft  $F_2$  (bei  $N_c$  Windungen)

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{F}_c$$

Quelle: H. Kleinrath, Studententext 1975, Wiesbaden

# Ersatzweise Kraftberechnung auf den Rotor

## Resultierendes Stator- UND Rotorfeld bei Berücksichtigung der Nutung



Quelle: H. Kleinrath,  
Studententext 1975,  
Wiesbaden

Kraft auf den Rotor:

- 1: überwiegend magn. Zug an Zahnflanke  $F_1$

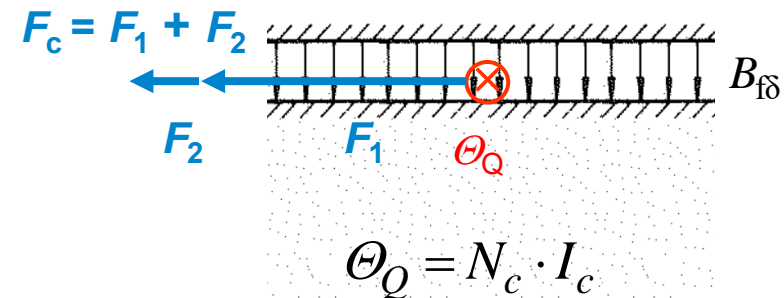
$$\vec{F}_1(t) = \int \vec{f}(\vec{B}, \vec{x}, t) \cdot dV$$

- 2: kleiner Anteil LORENTZ-Kraft  $F_2$  am Leiter

$$\vec{F}_2 = N_c \cdot I_c \cdot (\vec{l} \times \vec{B}_{fQ})$$

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{F}_c$$

## Statorfeld ALLEINE OHNE Berücksichtigung der Nutung



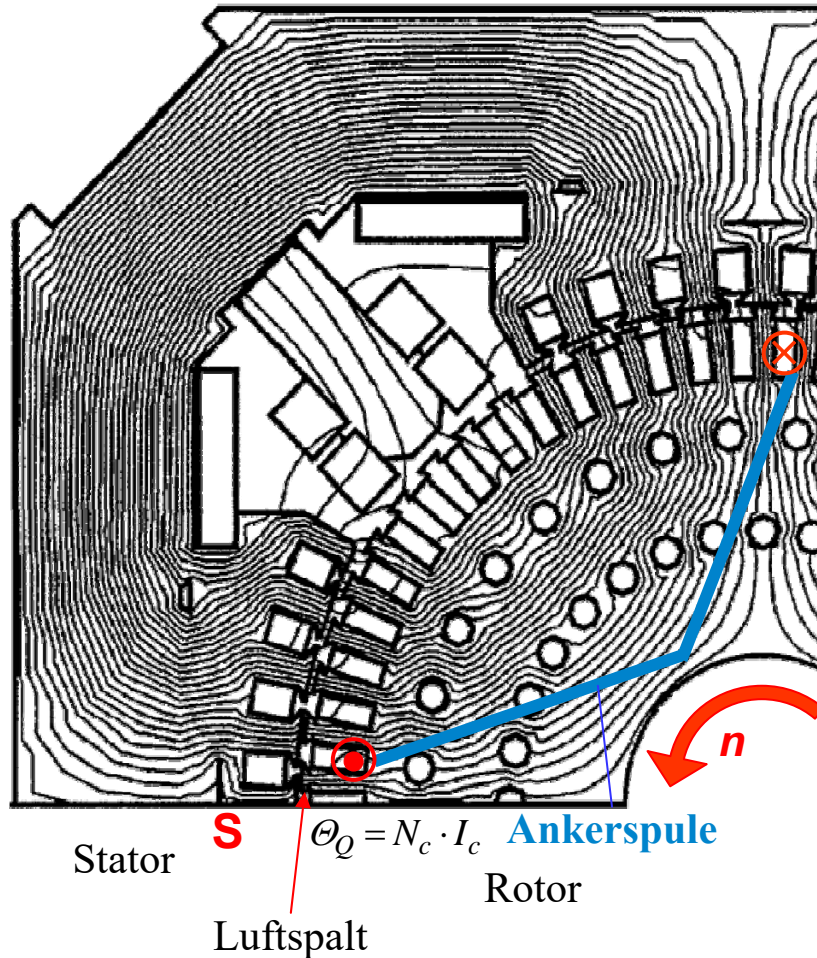
$$\Theta_Q = N_c \cdot I_c$$

ERSATZWEISE Berechnung der Kraft auf den Rotor (hier ohne Beweis):

- Statorfeld  $B_{f\delta}$  OHNE Einfluss der Nutung
- Leiter ( $\theta_Q$ ) an der Läuferoberfläche
- LORENTZ-Kraft  $F_c$  am Leiter:  $F_c = F_1 + F_2$

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = N_c \cdot I_c \cdot (\vec{l} \times \vec{B}_{f\delta}) = \vec{F}_c$$

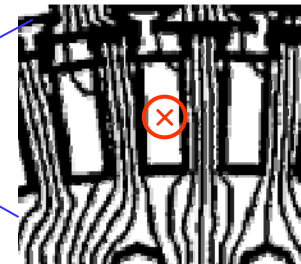
# Beispiel: Kraft auf Gleichstrommaschinen-Rotor



Quelle: ABB, Schweden

- $B$ -Feld am Nutenleiter  $B_{fQ}$  viel kleiner als  $B_{f\delta}$  im Luftspalt
- Echte LORENTZ-Kraft  $F_2$  viel kleiner als fiktive LORENTZ-Kraft  $F_c$  mit dem Leiter an der Oberfläche.

**N**



$$\vec{F}_2 = N_c \cdot I_c \cdot (\vec{l} \times \vec{B}_{fQ}) \ll \vec{F}_c$$

$$\vec{F}_c = N_c \cdot I_c \cdot (\vec{l} \times \vec{B}_{f\delta})$$

Der überwiegende Teil des Kraftangriffs erfolgt  
(1) an den magnetisierten Eisen-Zahnflanken  
und **nicht**  
(2) am Nutenleiter selbst!

Die wirkende Kraftsumme (1) + (2) ergibt aber **exakt**  
die obige Kraft  $\vec{F}_c$ , wenn  $\mu \gg \mu_0$ .

*Wir können so rechnen, als ob die Spulenleiter bei vernachlässigter Nutung an der Läuferoberfläche liegen!*



# LORENTZ-Kraft auf stromdurchflossene Nutenleiter in einem amagnetischen Rotor



- Bei einem AMAGNETISCHEN Rotor (z. B. aus Holz statt aus Eisen) würde wegen  $\mu_{\text{Holz}} \approx \mu_{\text{Luft}} = \mu_0$  KEINE Feldbündelung in den Holzzähnen stattfinden.
- Das Drehmoment  $M_e$  wird dann nur aus der Leiter-LORENTZ-Kraft  $F_c$  gebildet.
- Die Leiter liegen z. B.  
an der Läuferoberfläche beim Hebelarm (Radius)  $r_A$   
mit der Kraft  $\vec{F}_{cA} = \Theta_Q \cdot (\vec{l} \times \vec{B}(r_A))$   
oder in den Nuten beim Hebelarm  $r_B < r_A$  mit der Kraft  $\vec{F}_{cB} = \Theta_Q \cdot (\vec{l} \times \vec{B}(r_B))$
- Das Drehmoment auf den Rotor ist daher abhängig, wo der Leiter liegt!

$$M_{eA} = F_{cA} \cdot r_A > M_{eB} = F_{cB} \cdot r_B$$



## Zusammenfassung: Prinzipien der elektromagnetischen Kraftbildung

- Ferromagnetisches Materialgesetz:  
Hohe Eisenpermeabilität  $\mu$  im ungesättigten Eisen ( $B_{Fe} < \text{ca. } 1.7 \text{ T}$ )
- Magnetische Flussführung über weichmagnetisches Eisen
- Magnetkräfte  $F$  zur Erzeugung des Nutzmoments  $M_e$
- Magnetfelderregung über elektrische Ströme oder Dauermagnete
- Nutenleiter: Kraftangriff überwiegend auf das magnetisierbare Eisen
- Nutungseffekt wird für Kraftberechnung in der Folge vernachlässigt



**Ergänzung**

## Bildergalerie zur E-Maschinen und ihren Anwendungen

- Asynchronmaschinen
- Synchronmaschinen
- Gleichstrommaschinen

# Elektromechanik ist WICHTIG !



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Ergänzung

## Der Mann, der ZWEIMAL das Mikrofon revolutionierte !

- **1962:** *Bell Labs., Murray Hill, New Jersey, USA: Dr. G. Sessler & J. West* erfinden das Polymer-Elektret-Mikrofon („small size – low cost“)
- **1968:** Markteinführung
- **1983:** *TU Darmstadt, Deutschland: Prof. G. Sessler & D. Hohn* entwickeln das Miniatur-Kondensatormikrofon auf Siliziumbasis
- **2002:** Markteinführung



**Prinz Philip, Herzog v. Edinburgh**, überreicht **Prof. Gerhard Sessler** in *Edinburgh, UK*, den „Wolfson - J. C. Maxwell-Preis“ 2013 der *Royal Society of Edinburgh* und des *IEEE*

Quelle: *IEEE Region 8 News, Aug. 2013*



**Ergänzung**

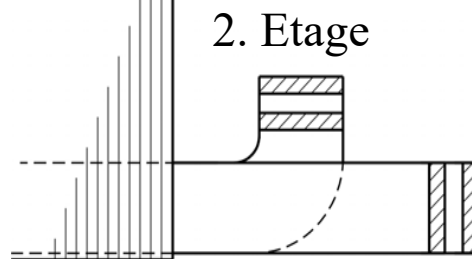
## Komponenten elektrischer Maschinen

**(zu Kapitel 2, 3 & 4)**

# Einschichtwicklung - Einlegebeispiel

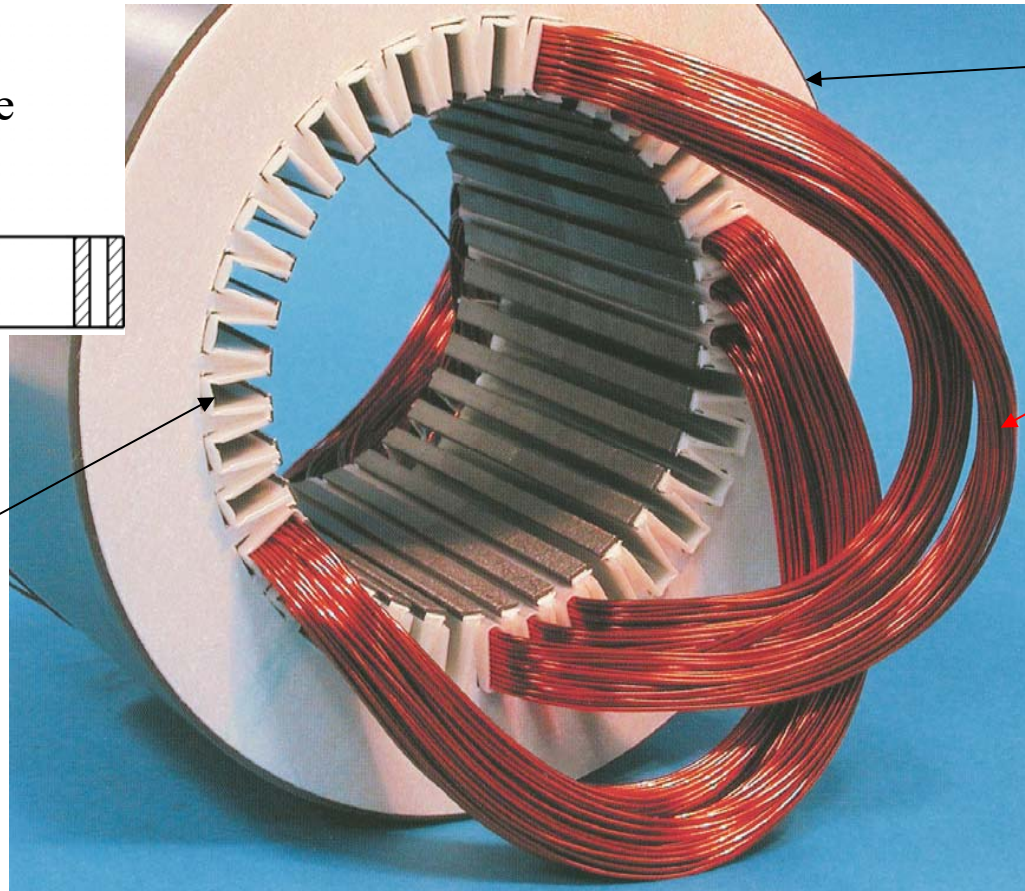
Ergänzung

*Bsp.:*  $q = 2$



Nutisolation

Nutisolation



Statorblechpaket

**Anmerkung:**

Hier: Geteilter  
Wickelkopf:

$$q = 2 \cdot 3 = 6$$

2 Spulengruppen –  
kurzer Wickelkopf

Quelle: Fa. Levitec,  
Lahnau,  
Deutschland

**Einlegebeispiel:**

Runddrahtspulen, konzentrisch,  $q = 2 \cdot 3 = 6$  Spulen je Gruppe, zweipolig  
36 Nuten, dreisträngige Wicklung  $m = 3$ ,  $Q = 2p \cdot m \cdot q = 2 \cdot 3 \cdot 6 = 36$

# Fertigung von Zweischicht-Drehstromwicklungen

Ergänzung

Einlegen von Formspulen in Statoren

Wickelkopf

Stator-  
blechpaket



60 Nuten  
für eine  
vierpolige  
Asynchron-  
maschine:  
 $q = 5$

$$Q = 2p \cdot m \cdot q = 4 \cdot 3 \cdot 5 = 60$$

Quelle:

ABB, Schweiz



# Komplettierte Zweischicht-Drehstromwicklung im Stator eines Asynchrongenerators

$Q = 72$  Nuten

72 Spulen

$m = 3$  Stränge

$2p = 4$  Pole

**$q = 6$  Nuten  
pro Pol und  
Strang**

$$Q = 2p \cdot m \cdot q =$$
$$= 4 \cdot 3 \cdot 6 = 72$$



## Ergänzung

- Zweischichtwicklung mit Formspulen nach dem Tränken und Aushärten des Tränkharzes
- Einige Harztropfen werden noch entfernt, um eine glatte Statorinnenoberfläche für den relativ kleinen Luftspalt zu erreichen

Quelle:

Winergy, Deutschland

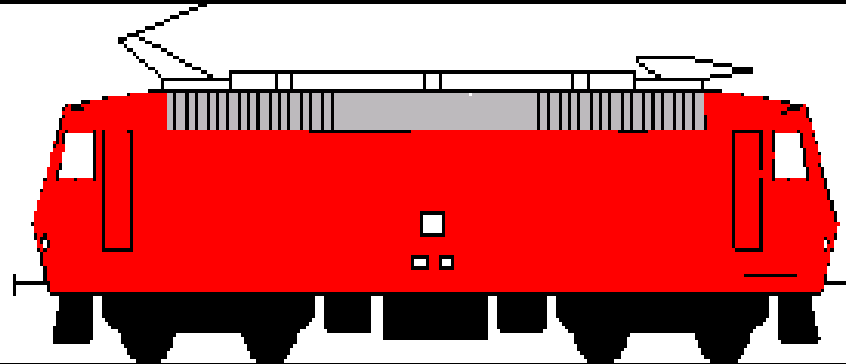
# Komplette Stator-Drehstrom- -Zweischichtwicklung

Ergänzung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

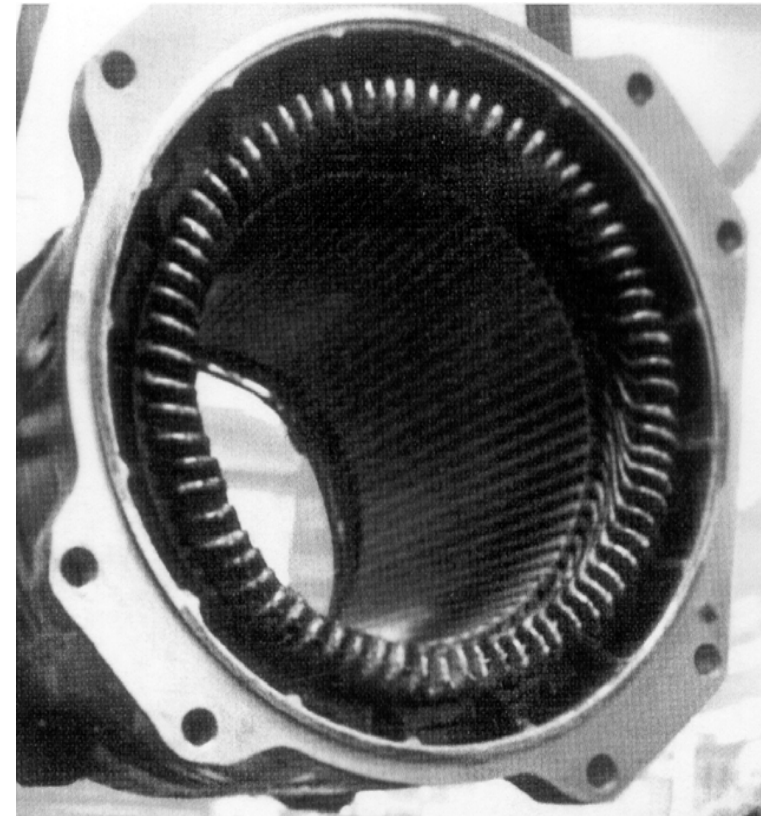
15 kV, 16.7 Hz



DB-Drehstromlokomotive 120

Fahrtrichtung

Bewickelter und getränkter Stator eines der vier Käfigläufer-Asynchron-Fahrmotoren der **ersten Drehstrom-Lokomotiv-Baureihe 120** der DB



$$2p = 4, Q = 72, m = 3, \\ q = Q / (2p \cdot m) = 6$$

Quelle: Siemens, Deutschland



# Dreiphasige Läuferwicklung der Schleifringläufermaschine



**Ergänzung**

Quelle: Winergy, Germany

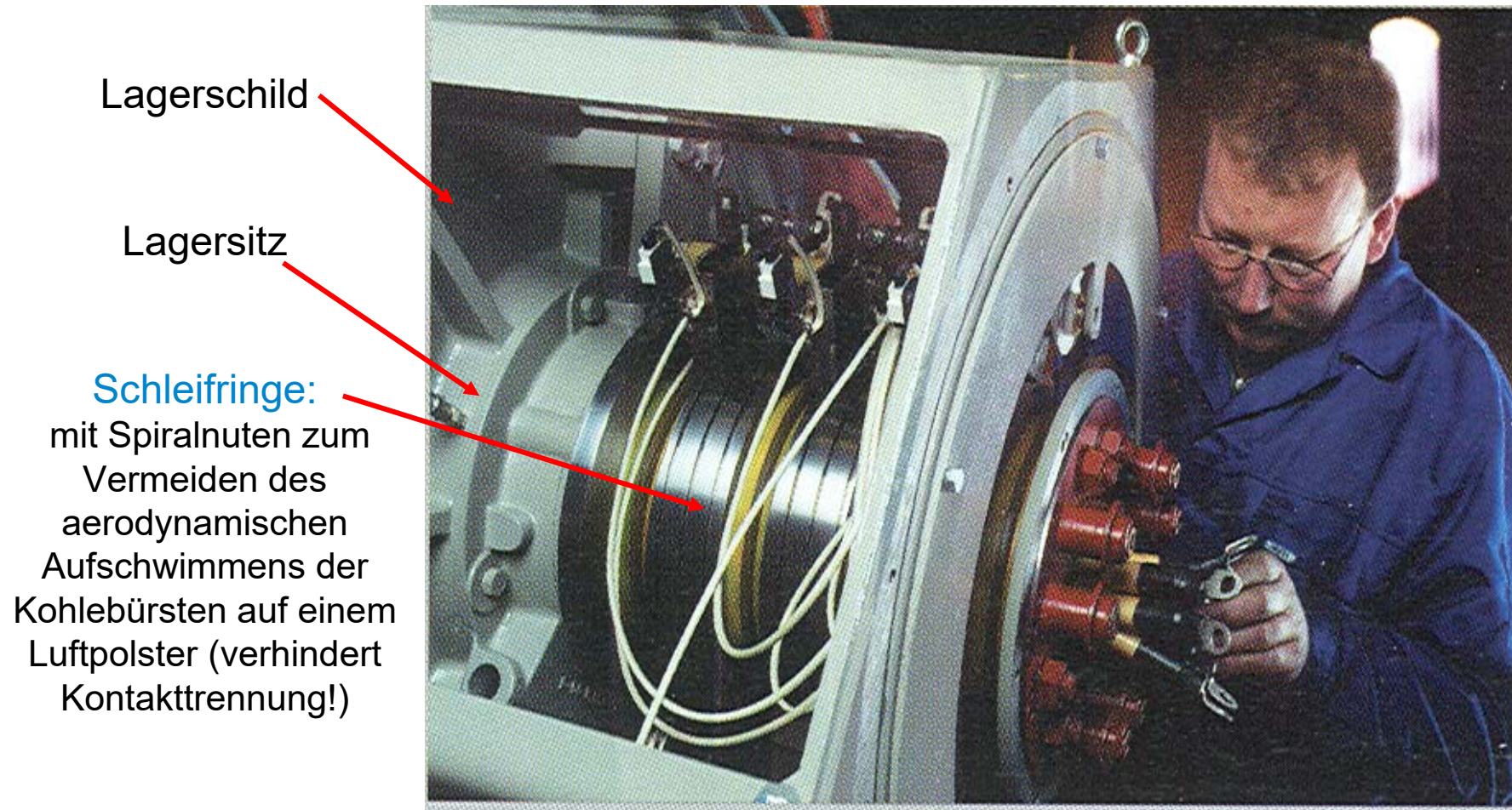


# Anschließen der Läuferwicklungsenden durch die hohle Welle an die drei Stahlschleifringe

Ergänzung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Lagerschild

Lagersitz

**Schleifringe:**

mit Spiralnuten zum Vermeiden des aerodynamischen Aufschwimmens der Kohlebürsten auf einem Luftpolster (verhindert Kontakttrennung!)

Quelle: Winergy,  
Deutschland



# Kupfer-Kurzschlusskäfig eines Asynchronmotors

Ergänzung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Quelle: Breuer Motoren, Deutschland



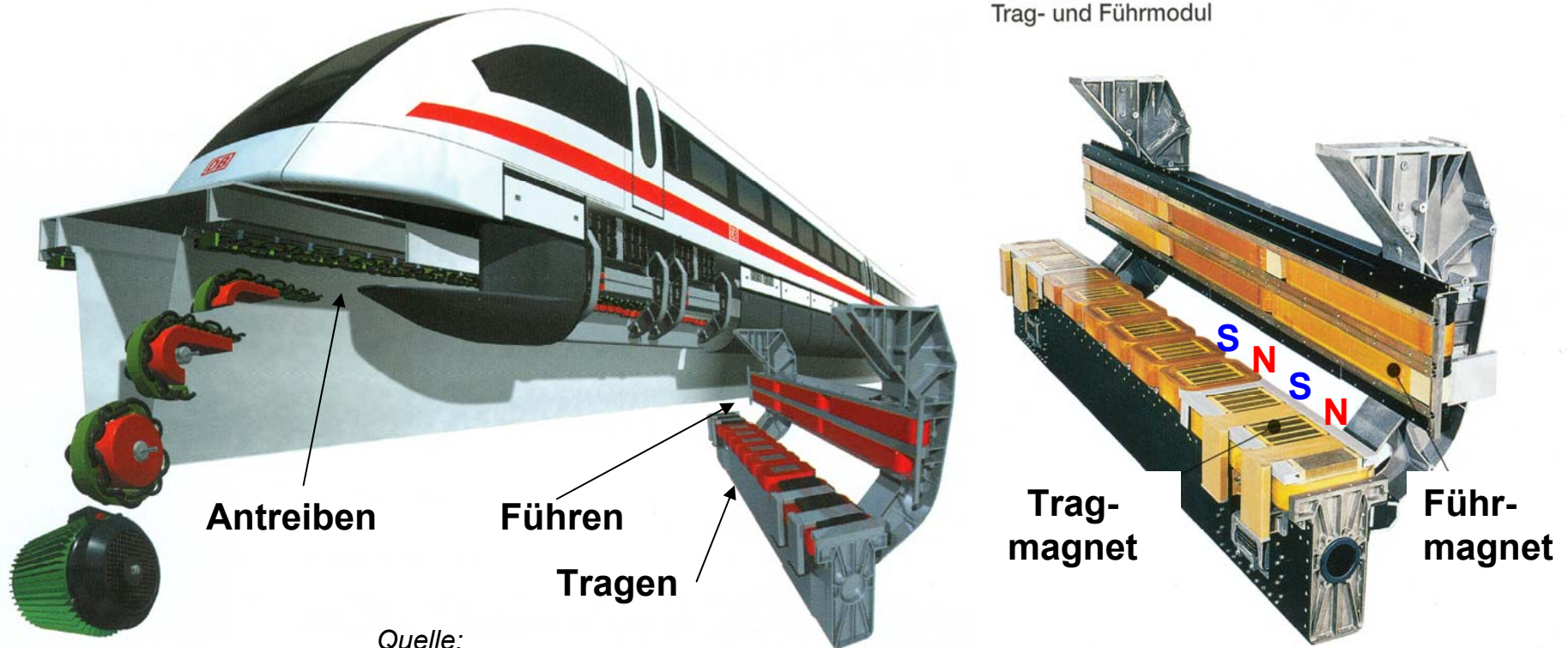
# Tragen und Führen beim *TRANSRAPID*



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Ergänzung

Trag- und Führmodul



Quelle:

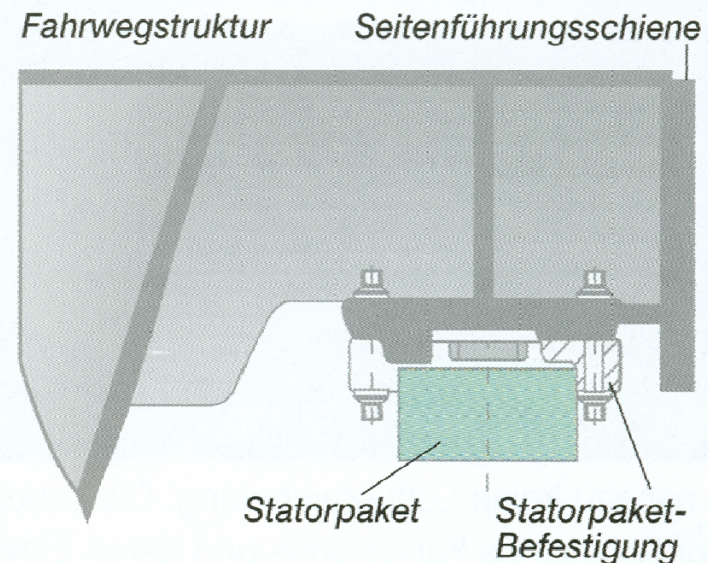
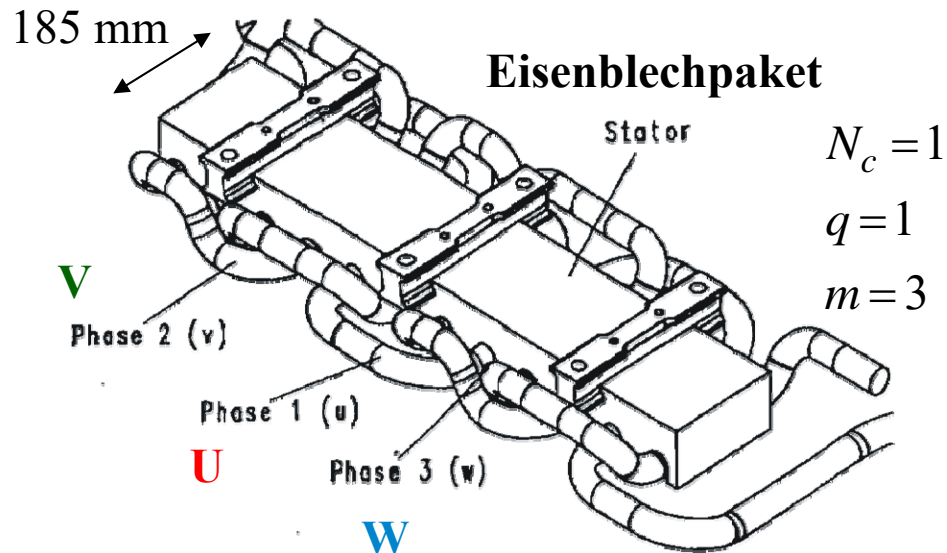
Thyssen Krupp & Siemens, Deutschland

Die Tragmagnete ziehen **von unten** bei einem geregelten **Luftspalt von ca. 10 ...13 mm** das Fahrzeug an den Stator des Linearmotors, der in der Trasse liegt. Dadurch erhält das Fahrzeug **OBERHALB** der Trasse eine **Bodenfreiheit von 150 mm**.



# Dreiphasige Langstatorwicklung im Ständerblechpaket

Ergänzung



**Drei „Phasen“ (Wicklungsstränge) U, V, W:** Wellenartig verlegte Aluminium-Kabel ergeben Spulen mit einer Windung pro Polpaar und Strang.

**Polteilung: 258 mm**, Einheiten zu je 4 Polen = 1032 mm, 24 Einheiten = 1 Sektion = 24.768 m, Eisenbreite 185 mm, zwei Spuren je Fahrweg

Mehrere Sektionen ergeben einen **Speiseabschnitt: Shanghai: 0.9 ... 5.0 km**

**Ca. 180 Pole** passen unter ein Fahrzeug (= 46 m Länge)

Quelle: Thyssen Krupp &  
Siemens, Deutschland

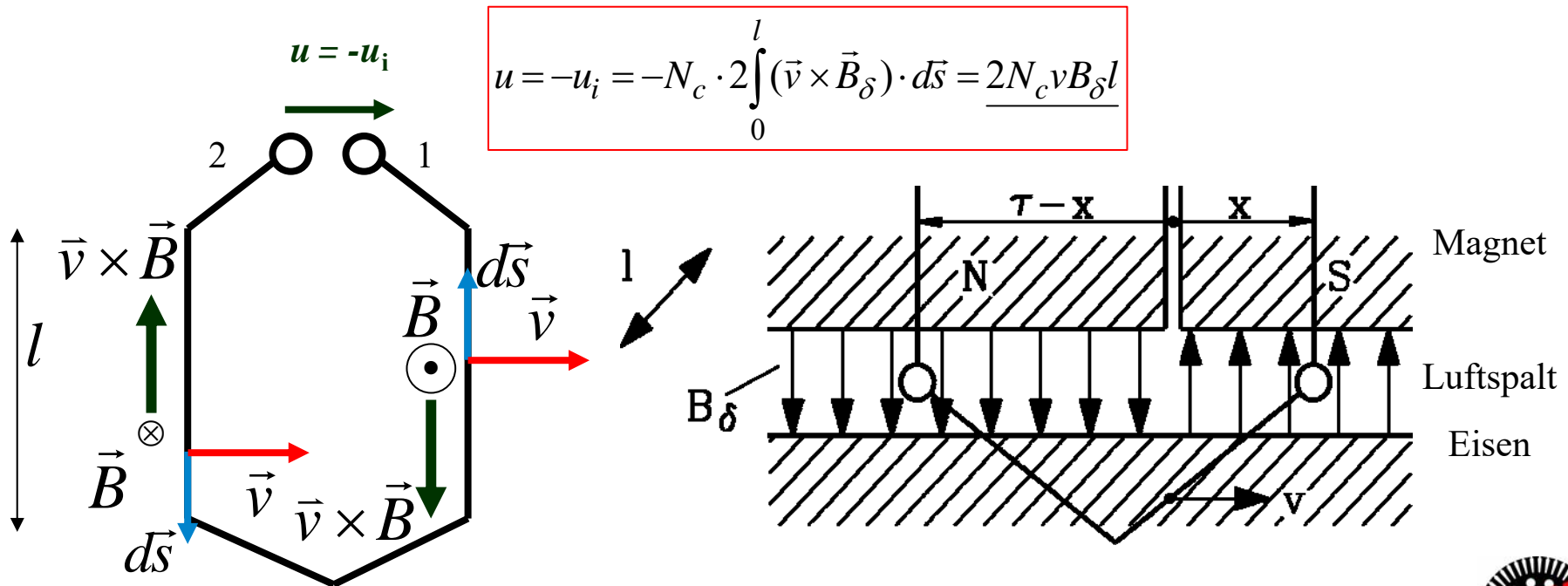
**Beispiel:**  
**Induktionsgesetz:**  
**Einfache Linearmaschine (1)**

Zum selber üben



- Spule (Windungszahl  $N_c$ , Spulenweite  $\tau$ ) im Luftspalt zwischen Eisenjoch und Permanentmagneten (Polfolge N-S-N-S, Polbreite  $b_p = \tau$ ) mit Geschwindigkeit  $v$  bewegt.

a)  $u_i$  für ruhenden Beobachter: **Bewegungsinduktion**, aber wegen  $\partial B / \partial t = 0$  keine Ruhinduktion. Kurve C "entartet" zur Länge  $2l$ , da die Stirnseiten der Spule im feldfreien Raum.  $\vec{v}$ ,  $\vec{B}$ ,  $\vec{s}$  aufeinander senkrecht:  $\vec{v} \times \vec{B}_\delta \uparrow \downarrow d\vec{s} \Rightarrow (\vec{v} \times \vec{B}_\delta) \cdot d\vec{s} = -vB_\delta ds$



# Beispiel: Induktionsgesetz: Einfache Linearmaschine (2)

Zum selber üben



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

b)  $u_i$  für mitbewegtem Beobachter: Für ihn ist  $v = 0$ , aber es tritt Flussverkehtungsänderung  $d\Psi/dt$  auf Grund der Spulenbewegung auf, da sich die Ortskoordinate ändert:

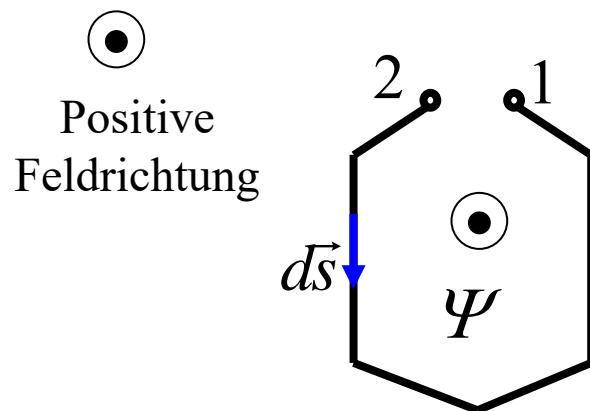
$$x = \int v \cdot dt \rightarrow v = dx/dt$$

Flussverkehtung:  $\Psi = N_c \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = -N_c \cdot l \cdot [(\tau - x)B_\delta - xB_\delta] = -N_c l B_\delta \cdot (\tau - 2x)$

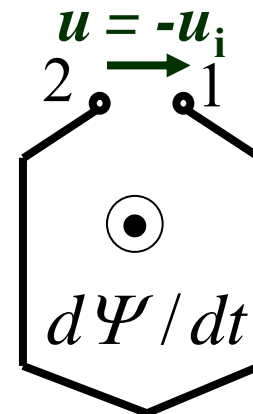
Klemmenspannung:  $u = -u_i = -(-d\Psi/dt) = -N_c l B_\delta \cdot d(\tau - 2 \cdot x)/dt = \underline{2N_c v B_\delta l}$

**Fazit:**

**Für a) ruhenden und b) bewegten Beobachter ist  $u_i$  identisch, obwohl die E-Felder unterschiedlich berechnet sind!** a)  $\vec{E} = \vec{E}_b = \vec{v} \times \vec{B}$ , b)  $\vec{E} = \vec{E}_{wi}$  wegen  $\partial\vec{B}/\partial t$



Positive  
Feldrichtung



$d\Psi/dt > 0$ :  
Flussverkehtung nimmt zu!



**Ergänzung**

## Schleifringläufer- Asynchronmaschinen und ihre Anwendungen

**(zu Kapitel 5 & 7)**



## Drehzahlvariabler Betrieb von Schleifringläufer-Asynchronmaschinen am Netz:

- Durch Veränderung der Läufervorwiderstände ist drehzahl-veränderbarer Betrieb des Schleifringläufer-Asynchronmotors am starren Sinusnetz möglich.

- **Beispiel:**

Vergleich "*Aufzugsantrieb*" und "*Pumpenantrieb*":

Absenken der Drehzahl auf 60% von  $n_{syn}$ .

Leistungsbilanz bei Vernachlässigung von  $R_s$  und  $P_{Fe}$ :

$$P_{e,in} \cong P_\delta = \Omega_{syn} M_e = P_{Cu,r} + 3R_v I_r^2 + P_m$$

$$P_m = 2\pi n M_e$$

$$P_\delta = 2\pi n_{syn} M_e$$



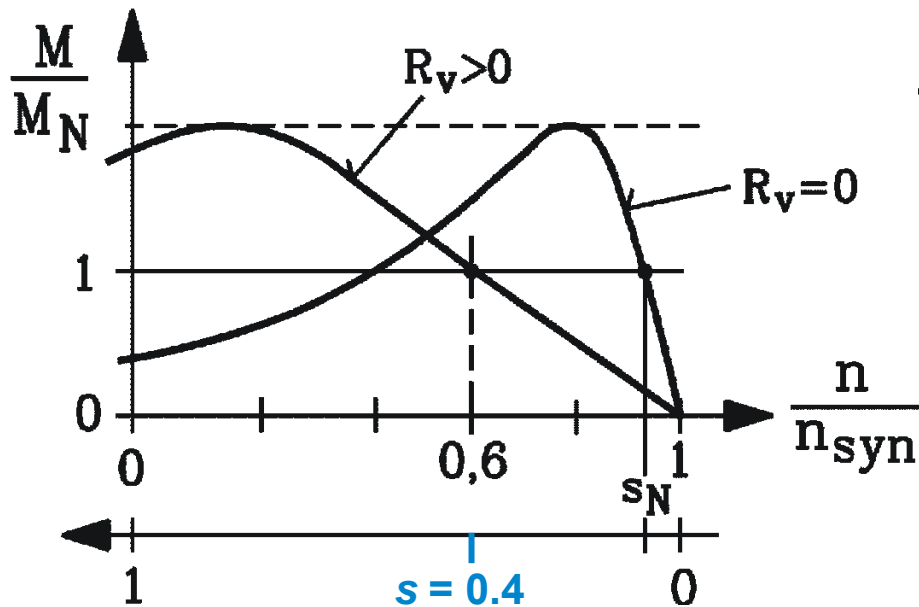


# Läuferwiderstände (2)

Zum selber üben



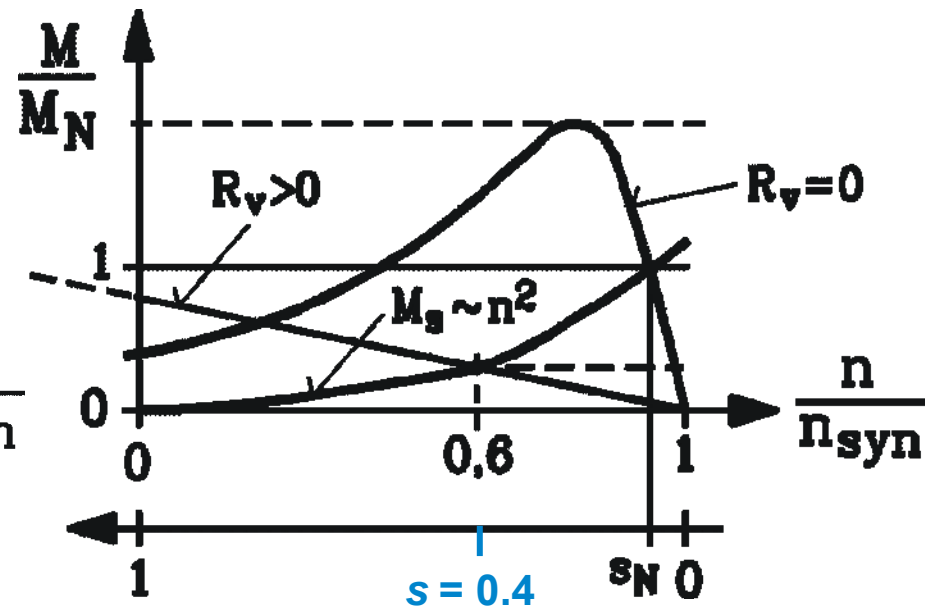
$M(n)$ -Kurve eines Schleifringläufer-Asynchronmotors mit externen Widerständen als **drehzahlveränderbarer Antrieb**



## Konstantes Gegendrehmoment

z. B. Aufzugsantrieb:

Technisch nicht brauchbar



## Quadratisch veränderliches Gegendrehmoment

z. B. Pumpenantrieb:

Technisch (früher) durchaus sinnvoll



# Läufervorwiderstände (3)

Zum selber üben



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

	Aufzugsantrieb	Pumpenantrieb
Gegenmoment der Last	$M_s = M_N = konst.$	$M_s = (n / n_{syn})^2 \cdot M_N$
Gegenmoment bei $n/n_{syn} = 0.6$	$M_s = M_N$	$M_s = 0.36 \cdot M_N$
$P_\delta(n) / P_{\delta N} = P_\delta(n) / (2\pi n_{syn} M_N)$	1	0.36
$P_m(n) / P_{\delta N}$	0.6	0.22
$(P_{Cu,r} + 3R_v I_r^2) / P_{\delta N}$	<b>0.4 (!)</b>	<b>0.14</b>

- **Konstantes Gegenmoment (Aufzugsantrieb):**

Absenkung der Drehzahl um 40% = Rotorverluste sind 40% von  $P_N$   
 ⇒ *technisch unbrauchbar.*

- **Quadratisches Gegenmoment (Pumpenantrieb):**

Absolutwert der Verlustleistung nur 14% von  $P_N$  = *erträglich !*

**Noch besser: Umrichter gespeiste Asynchronmaschine: Deutlich kleinere Verluste !**

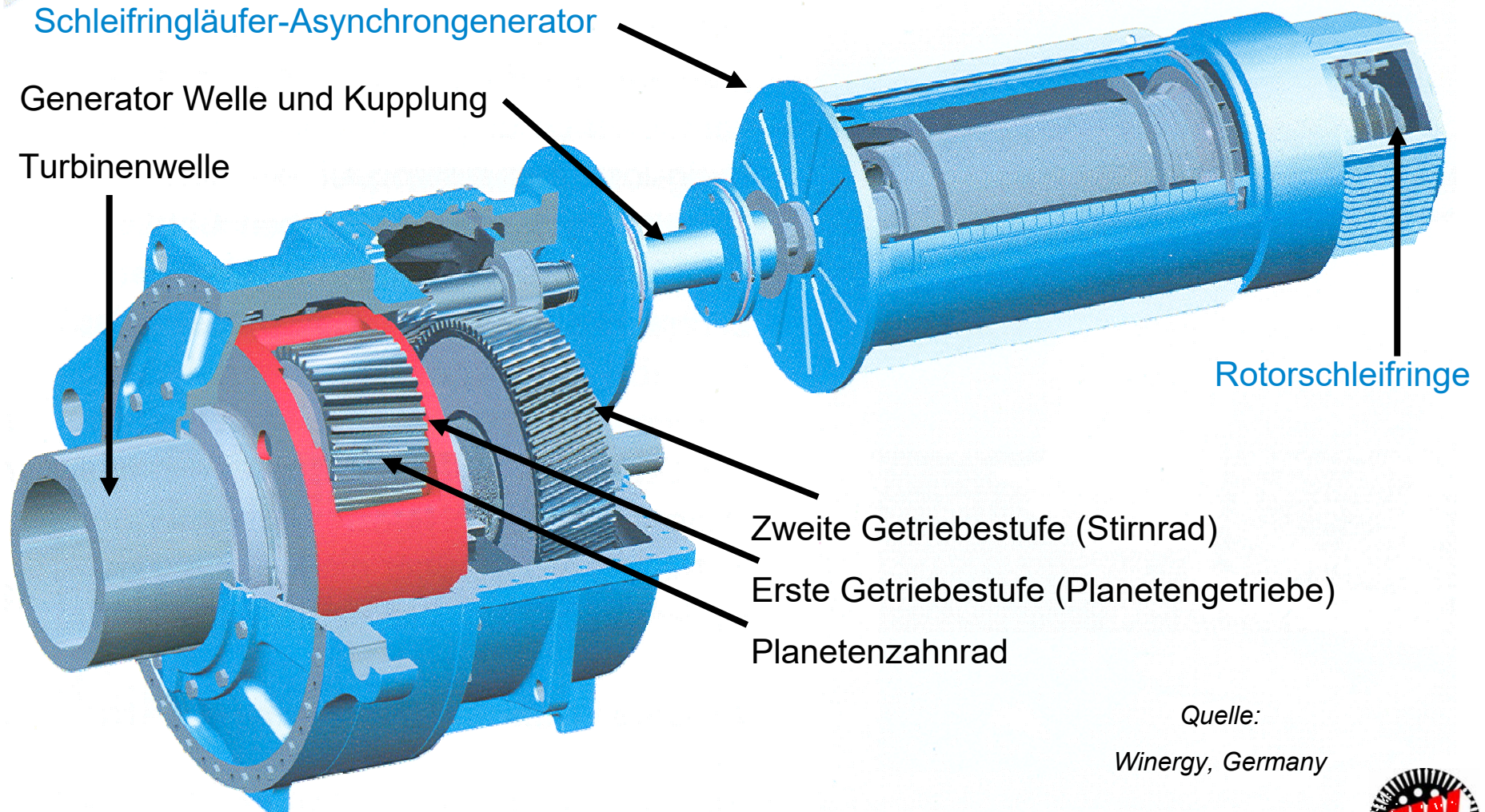


# Schleifringläufer-Asynchronmaschine als Windgenerator



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Ergänzung



Quelle:  
Winergy, Germany

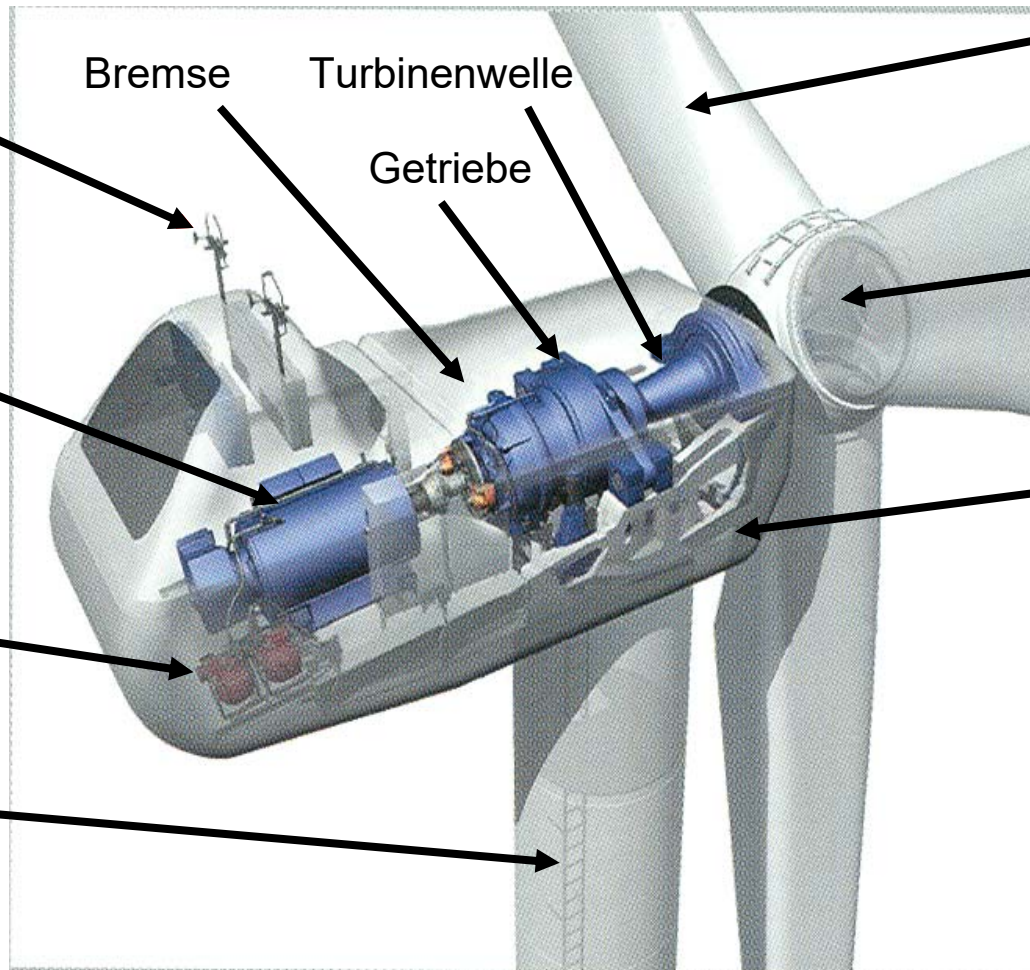


Windgeschwindig-  
keits- und  
Richtungsmesser

Wassermantel-  
gekühlter  
doppeltgespeister  
Asynchron-  
generator mit  
Schleifringläufer

Wasserpumpe für  
Kühlkreislauf

Mast



Rotorblätter

Nabe

Gondel

Quelle:  
Winergy  
Germany



## Beispiel:

# Doppeltgespeister Asynchron-Generator für Windturbinen

Ergänzung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## Schleifringläufer

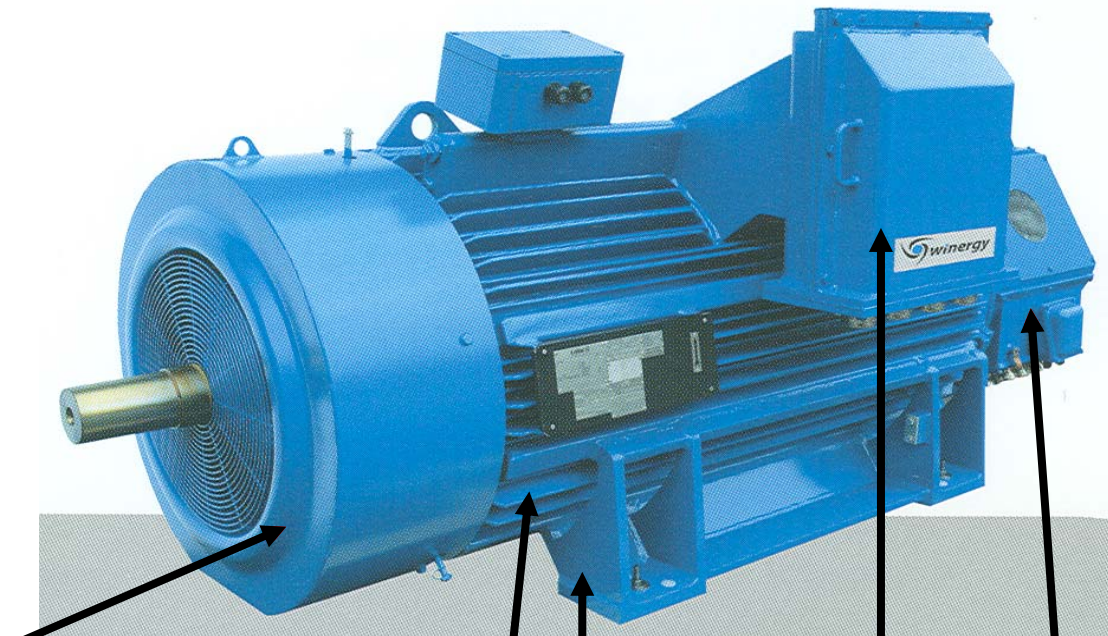
Getriebe 1: 60 zwischen  
Windrotor u. schnell  
drehendem Generator

Geschlossene  
Bauweise

Luftgekühlt

Grauguss-Gehäuse mit  
Kühlrippen

600 kW at 1155/min



Lüfterhaube (Lüfter darunter,  
auf die Welle montiert)

Fuß

Schleifring-  
Klemmenkasten

Kühlrippen

Klemmenkasten

Quelle:

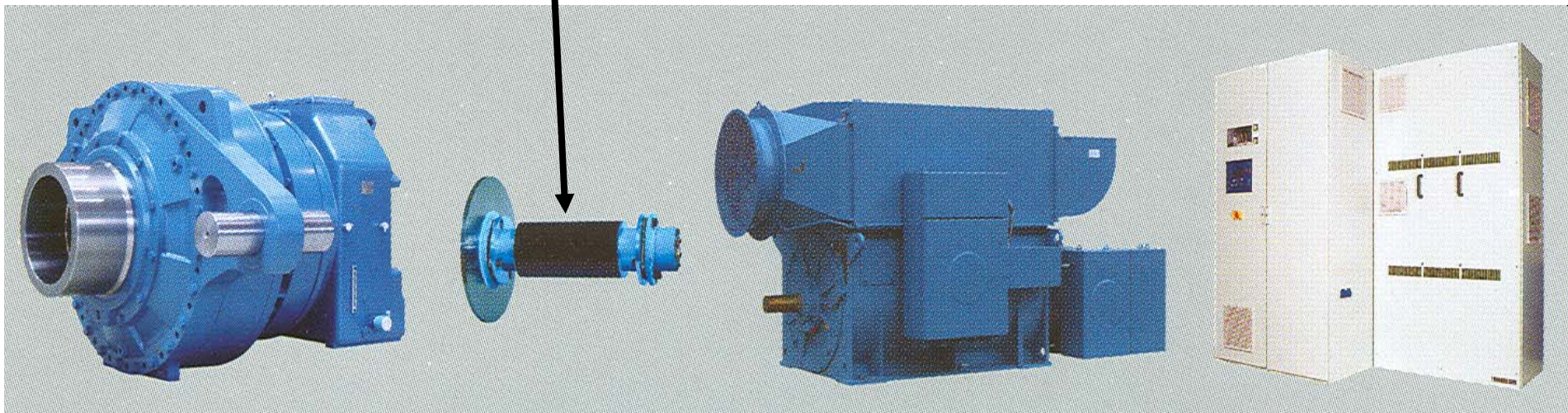
Winergy, Germany



# Komponenten eines doppeltgespeisten asynchronen Windgeneratorsystems 2 MW

**Ergänzung**

Kohlefaserwelle:  
isoliert elektrisch



Dreistufiges  
Getriebe

Generatorkupplung  
und Bremsscheibe

Schleifringläufer-Asynchron-  
generator

rotorseitiger Umrichter

1. Stufe: Planetengetriebe  
2. u. 3. Stufe: zweistuf. Stirnradgetriebe }  $i = 100$

Quelle:

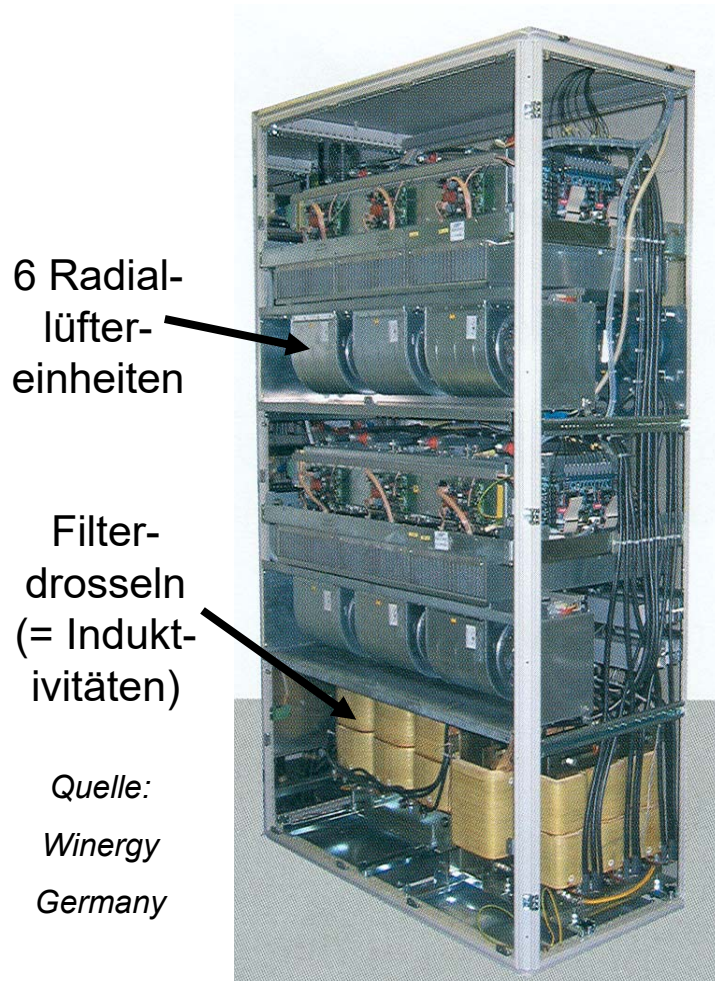
Winergy, Germany

# Rotorseitiger PWM-Spannungswidchenkreisumrichter

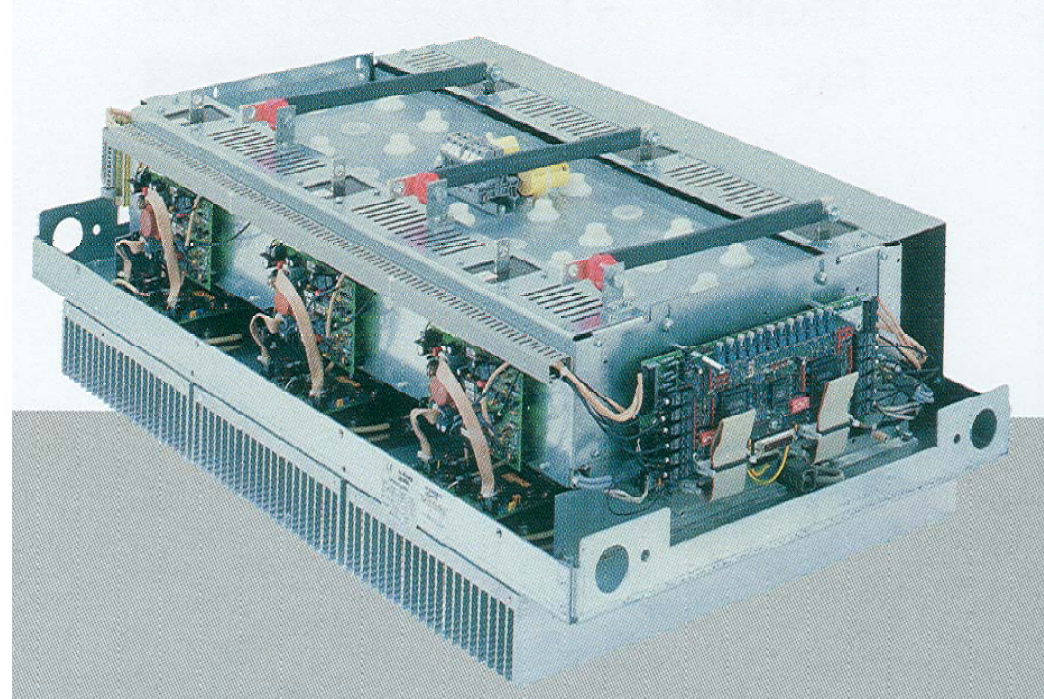
Ergänzung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Luftgekühlte IGBT-Wechselrichter-Brücke mit Kuhltruppen



Luftgekühlter Umrichter für 1.5 MW-Windenergieanlage:  
Umrichterbemessungsleistung 450 kVA = ca. 30% v.  $P_N$

Netzseitige verkettete Spannung: 690 V

Rotorseite: Bemessungsstrom = Rotornennstrom



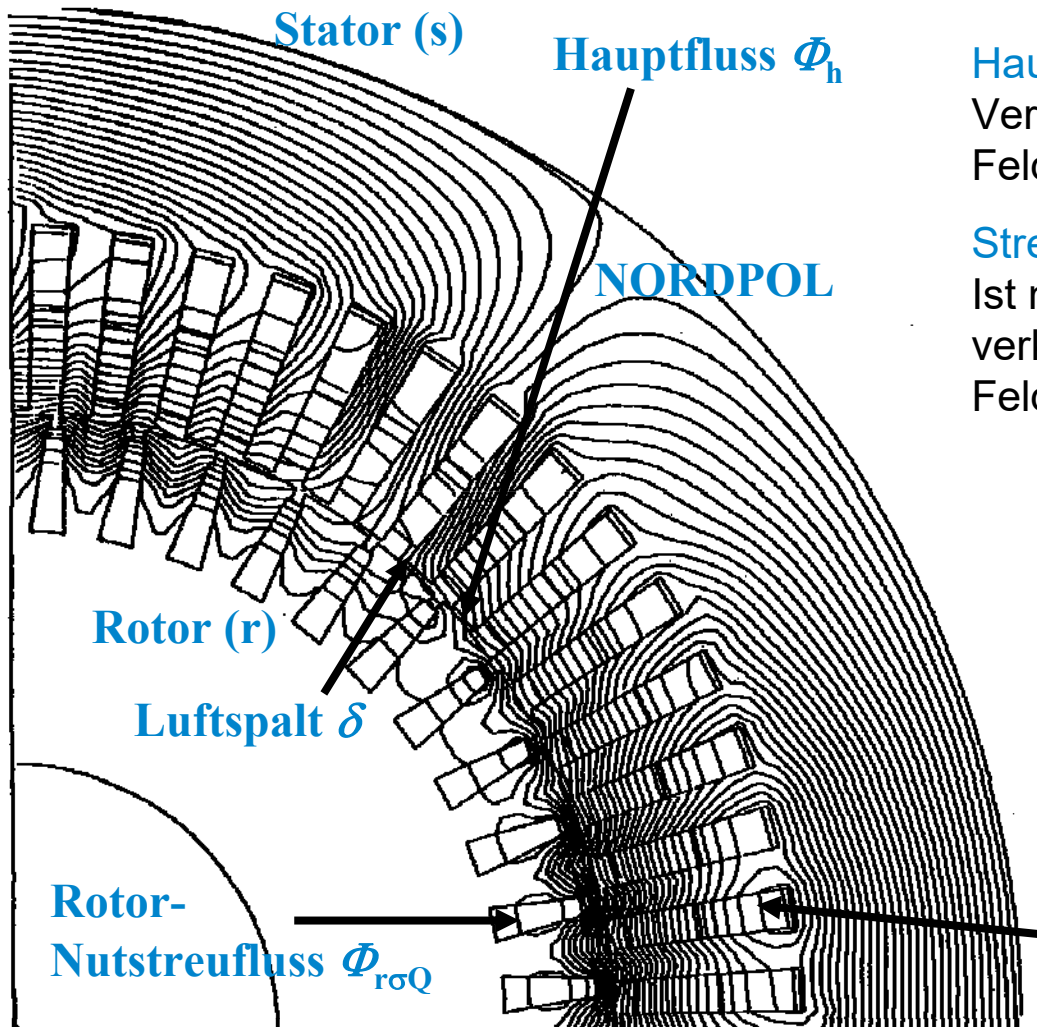
**Ergänzung**

## Käfigläufer- Asynchronmaschinen und ihre Anwendungen (zu Kapitel 6 & 7)



# Feldbild einer Käfigläufer-Asynchronmaschine

Ergänzung



**Hauptfluss  $\Phi_h$ :**  
Verkettet Stator- mit Rotorwicklung;  
Feldlinien gehen daher über den Luftspalt

**Streufluss  $\Phi_\sigma$ :**  
Ist nur mit Stator- oder Rotorwicklung  
verkettet,  
Feldlinien gehen NICHT über den Luftspalt

## **Beispiel:**

**Vierpoliger Keilstabläufer:**

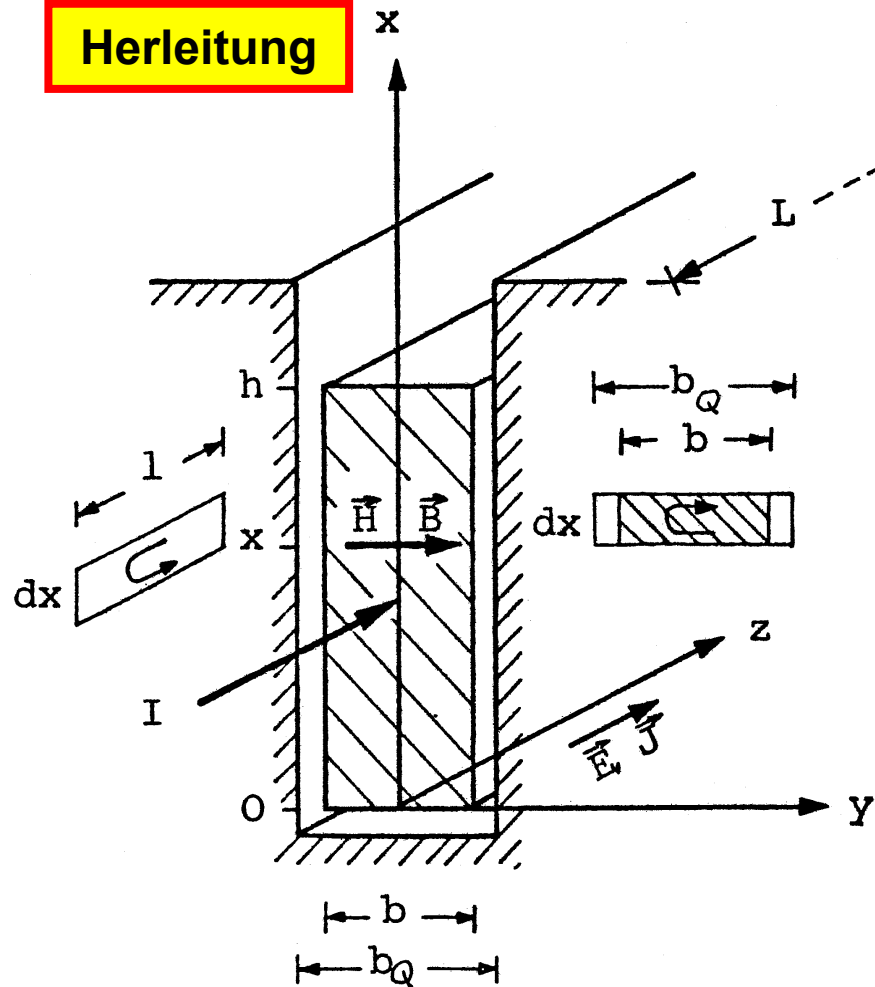
$$m_s = 3, q = 5, W/\tau_p = 13/15$$

**Feldbild bei Läuferstillstand ( $n = 0$ )**

- Läuferfrequenz = Ständerfrequenz
- Läuferstrom  $\underline{I}_r$  ist NAHEZU gegenphasig zum Ständerstrom  $\underline{I}_s$

# Stromverdrängung in einem massiven Rechteck-Nutenleiter

Herleitung



- **Ampere'scher Durchflutungssatz:**

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = \Theta = \vec{J} \cdot \vec{A} = \kappa \vec{E} \cdot \vec{A}$$

$$-H_y(x)b_Q + H_y(x+dx)b_Q = \kappa E_z b dx$$

$$-H_y(x)b_Q + \left(H_y(x) + \frac{\partial H_y}{\partial x} dx\right)b_Q = \kappa E_z b dx$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = \kappa \frac{b}{b_Q} E_z$$

1. Maxwell-Gleichung

- **Faraday'sches Induktionsgesetz:**

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{s} = u_i = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

$$E_z(x)l - E_z(x+dx)l = -\mu l \cdot dx \cdot \frac{\partial H_y}{\partial t}$$

$$E_z(x)l - \left(E_z(x) + \frac{\partial E_z}{\partial x} dx\right)l = -\mu l \cdot dx \cdot \frac{\partial H_y}{\partial t}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial x} = \mu \frac{\partial H_y}{\partial t}$$

2. Maxwell-Gleichung



# Berechnung des Wirbelstroms im Nutenleiter (1)



## Herleitung

- Lösung der linearen partiellen Differentialgleichungen:

Für sinusveränderliche Zeitfunktionen durch Verwendung der komplexen Zeiger → ergibt gewöhnliche lineare Differentialgleichungen!

$$H(x,t) = \operatorname{Re}\{\underline{H}(x) \cdot \sqrt{2} \cdot e^{j\omega t}\}, \quad E(x,t) = \operatorname{Re}\{\underline{E}(x) \cdot \sqrt{2} \cdot e^{j\omega t}\}, \quad J(x,t) = \operatorname{Re}\{\underline{J}(x) \cdot \sqrt{2} \cdot e^{j\omega t}\}$$

$$H(x,t) \rightarrow \underline{H}(x), \quad E(x,t) \rightarrow \underline{E}(x), \quad J(x,t) \rightarrow \underline{J}(x)$$

$$\frac{\partial \underline{H}_y}{\partial x} = \kappa \frac{b}{b_Q} \underline{E}_z \quad \frac{\partial \underline{E}_z}{\partial x} = j\omega\mu \underline{H}_y \quad \Longrightarrow \quad \frac{d^2 \underline{E}_z(x)}{dx^2} - j\omega\mu\kappa \frac{b}{b_Q} \underline{E}_z(x) = 0$$

- Lösung der gewöhnlichen linearen Differentialgleichung mit konstanten Koeffizienten sind Exponentialfunktionen !

$$\underline{E}_z(x) = \underline{C} e^{\lambda x} \quad \lambda_{1,2} = \pm \sqrt{j\omega\mu\kappa \frac{b}{b_Q}} = \pm(1+j) \sqrt{\pi f \mu \kappa \frac{b}{b_Q}} = \pm(1+j)\beta$$

$$\underline{E}_z(x) = \underline{C}_1 e^{-(1+j)\beta x} + \underline{C}_2 e^{(1+j)\beta x}$$

$$\beta = \sqrt{\pi f \mu \kappa \frac{b}{b_Q}}$$



# Berechnung des Wirbelstroms im Nutenleiter (2)

Herleitung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

$$\frac{\partial \underline{E}_z}{\partial x} = j\omega\mu \underline{H}_y \quad \Longrightarrow \quad \underline{H}_y(x) = -\frac{1+j}{j} \cdot \frac{\beta}{\omega\mu} \left( \underline{C}_1 e^{-(1+j)\beta x} - \underline{C}_2 e^{(1+j)\beta x} \right)$$

Randbedingungen:

An der unteren Leiterkante ( $x = 0$ ) ist die magn. Feldstärke Null:  $\underline{H}_y(0) = 0$ :  $\underline{C}_1 = \underline{C}_2 = \underline{C}$ .

$$\underline{H}_y(x) = \frac{1+j}{j} \cdot \frac{\beta}{\omega\mu} \cdot \underline{C} \left( -e^{-(1+j)\beta x} + e^{(1+j)\beta x} \right) = \frac{1+j}{j} \cdot \frac{\beta}{\omega\mu} \cdot \underline{C} \cdot 2 \cdot \operatorname{sh}[(1+j)\beta x]$$

An der oberen Leiterkante  $x = h$  ist die magn. Spannung gleich dem Leiterstrom  $\underline{I}$  ;  
daher ist die magn. Feldstärke:  $\underline{H}_y(x = h) = \underline{I}/b_Q$ .

$$\underline{C} = \frac{j}{1+j} \cdot \frac{\omega\mu}{\beta b_Q} \cdot \frac{\underline{I}}{2 \cdot \operatorname{sh}[(1+j)\beta h]}$$

$$\underline{H}_y(x) = \frac{\underline{I}}{b_Q} \cdot \frac{\operatorname{sh}[(1+j)\beta x]}{\operatorname{sh}[(1+j)\beta h]}$$

$$\underline{E}_z(x) = \frac{j}{1+j} \cdot \frac{\omega\mu}{\beta} \cdot \frac{\underline{I}}{b_Q} \cdot \frac{\operatorname{ch}[(1+j)\beta x]}{\operatorname{sh}[(1+j)\beta h]}$$

$$\underline{J}_z(x) = \kappa \underline{E}_z = \frac{j}{1+j} \cdot \frac{\omega\mu\kappa}{\beta} \cdot \frac{\underline{I}}{b_Q} \cdot \frac{\operatorname{ch}[(1+j)\beta x]}{\operatorname{sh}[(1+j)\beta h]}$$



# Resultierende Stromdichteverteilung

## Herleitung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

- Betrag der Stromdichteverteilung  $J$ :

Formeln: 
$$\begin{aligned} \operatorname{sh}(x + jy) &= \operatorname{sh} x \cos y + j \operatorname{ch} x \sin y \\ \operatorname{ch}(x + jy) &= \operatorname{ch} x \cos y + j \operatorname{sh} x \sin y \end{aligned}$$

$$J_z(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\omega \mu \kappa}{\beta} \cdot \frac{I}{b_Q} \cdot \sqrt{\frac{\operatorname{ch} 2\beta x + \cos 2\beta x}{\operatorname{ch} 2\beta h - \cos 2\beta h}}$$

- Vereinfacht für großes  $\beta$ :  $h \gg 1/\beta$ :

$$\cos(2\beta h) \ll \operatorname{ch}(2\beta h), \quad x' = h - x,$$

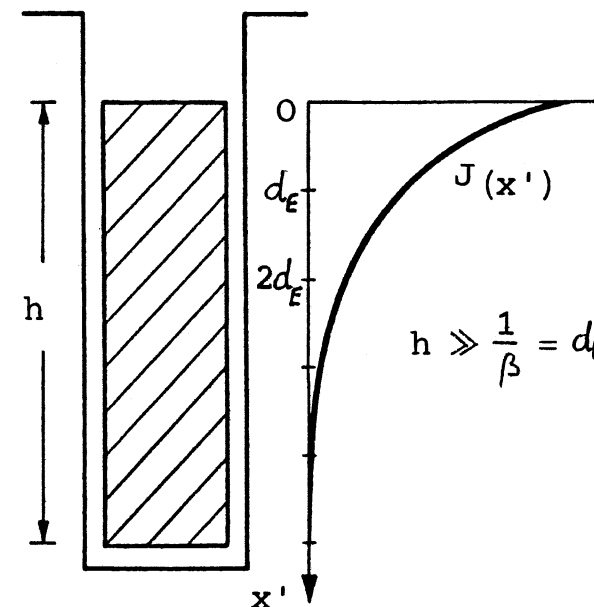
$$\operatorname{ch}(2\beta \cdot x) = (e^{2\beta \cdot x} + e^{-2\beta \cdot x}) / 2 \approx e^{2\beta \cdot x} / 2$$

$$\sqrt{\operatorname{ch}(2\beta \cdot x) / \operatorname{ch}(2\beta \cdot h)} \approx \sqrt{e^{2\beta \cdot x} / e^{2\beta \cdot h}} = e^{\beta(x-h)} = e^{-\beta \cdot x'}$$

$$J_z(x') = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\omega \mu \kappa}{\beta} \cdot \frac{I}{b_Q} \cdot e^{-\beta \cdot x'}$$

Eindringtiefe  $d_E$ :

$$d_E = \frac{1}{\beta} = \sqrt{\frac{b_Q}{b} \cdot \frac{1}{\pi f \mu \kappa}}$$



# Erhöhte Verluste durch Wirbelströme

## Herleitung



- Gesamtverluste im Leiter der Länge  $L$ :  $P_1 = \frac{b \cdot L}{\kappa} \cdot \int_0^h J_z^2 dx = I^2 R_{\sim} = k_R \cdot I^2 R_0$
- DC-Widerstand des Leiters:  $R_0 = \frac{L}{bh\kappa}$

$$P_1 = \frac{b \cdot L}{\kappa} \cdot \int_0^h \frac{1}{2} \left( \frac{\omega \mu \kappa}{\beta} \right)^2 \cdot \left( \frac{I}{b_Q} \right)^2 \cdot \frac{\cosh(2\beta x) + \cos(2\beta x)}{\cosh(2\beta h) - \cos(2\beta h)} dx = I^2 \cdot R_0 \cdot \xi \cdot \frac{\sinh 2\xi + \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi}$$

- Verlusterhöhung gegenüber DC:  $k_R = \frac{R_{\sim}}{R_0} = \varphi(\xi) = \xi \cdot \frac{\sinh 2\xi + \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi}$

“Reduzierte” Leiterhöhe:  $\xi = \beta \cdot h = \frac{h}{d_E} = h \cdot \sqrt{\pi f \mu \kappa \frac{b}{b_Q}}$

- Ab  $h > 0.5 d_E$  wird der Stromverdrängungseffekt deutlich merkbar.
- Ab etwa  $\xi = 3$  lineare Zunahme  $k_R \cong \xi$ .

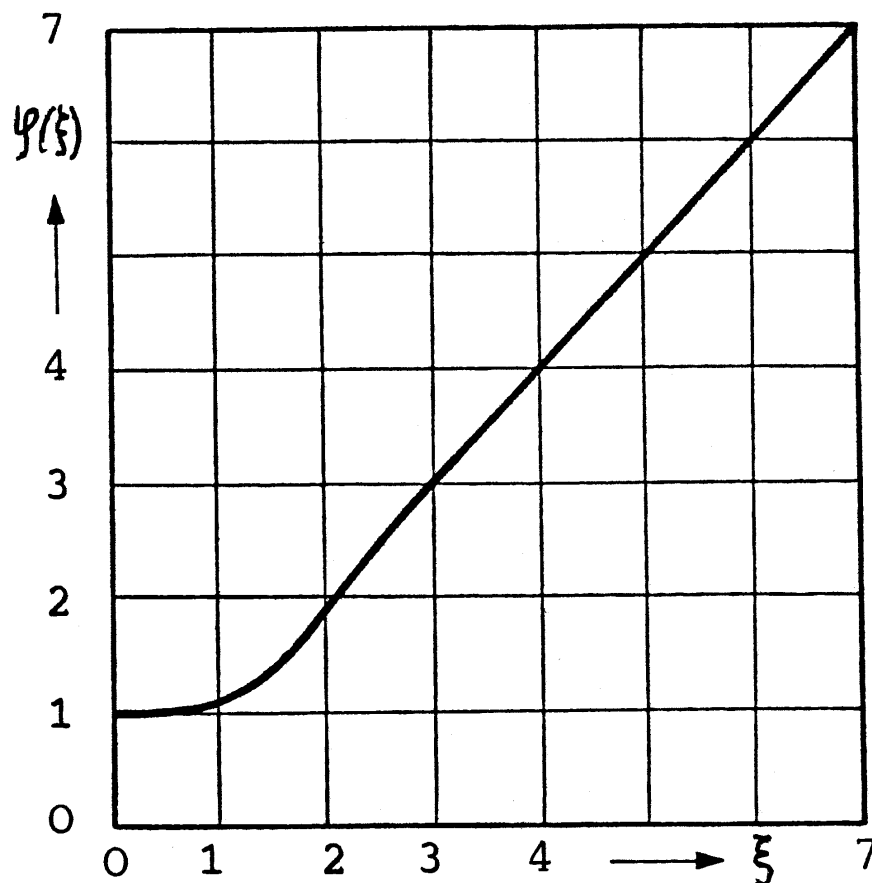


# Verlustzunahme im massiven Rechteck-Nutenleiter

Herleitung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



$$k_R = \frac{R_{\sim}}{R_0} = \varphi(\xi) = \xi \cdot \frac{\sinh 2\xi + \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi}$$

$\xi > 3$ :

$$R_{\sim} = k_R R_0 \approx \xi R_0 = \frac{h}{d_E} \cdot \frac{L}{bh\kappa} = \frac{L}{bd_E\kappa}$$



# Wirbelstromverluste im Rechteck-Kupfer-Nutenleiter

Zum selber üben



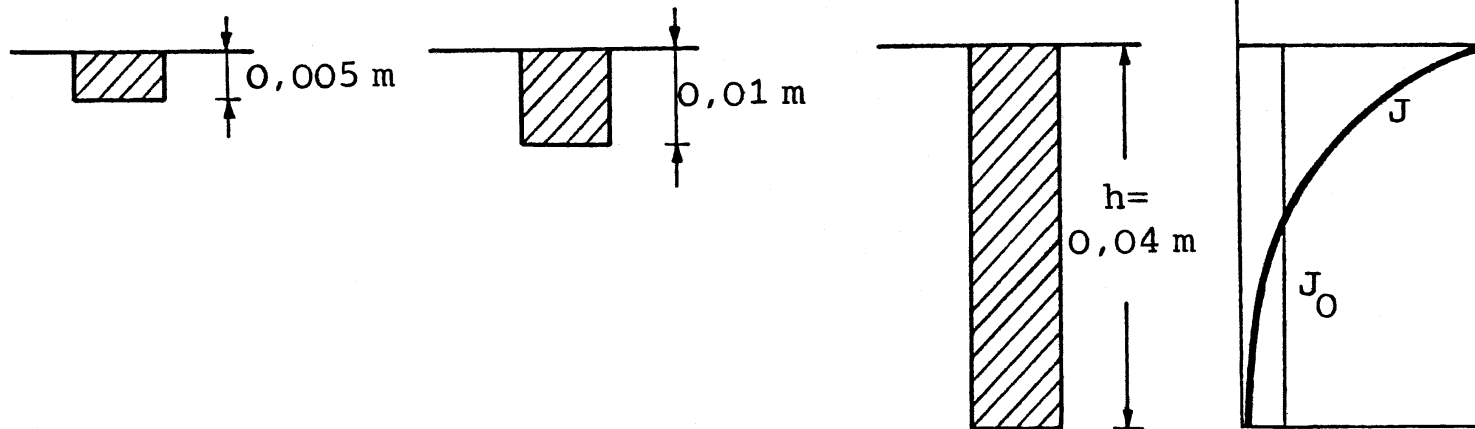
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## Beispiel:

Cu-Leiter mit unterschiedlichen Höhen  $h$  bei  $f = 50$  Hz:

$h$ : a) 5 mm, b) 10 mm, c) 40 mm

$\kappa = 50 \cdot 10^6$  1/m,  $\mu = \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Vs/(Am),  $b/b_Q = 1$ ,  $d_E = 0.01$  m = 10 mm



$$\xi = \frac{0,005}{0,01} = 0,5$$

$$k \approx 1,0$$

$$\frac{0,01}{0,01} = 1,0$$

$$k = 1,09$$

$$\frac{0,04}{0,01} = 4$$

$$k = 4,0$$

Verlustzunahme

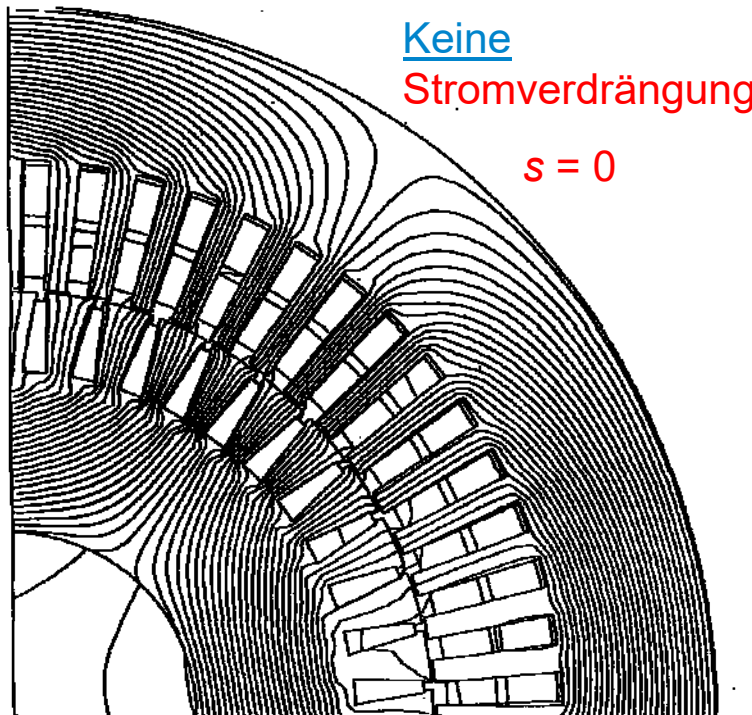




# Stromverdrängung im Feldbild

## Beispiel: Keilstabläufer

Ergänzung

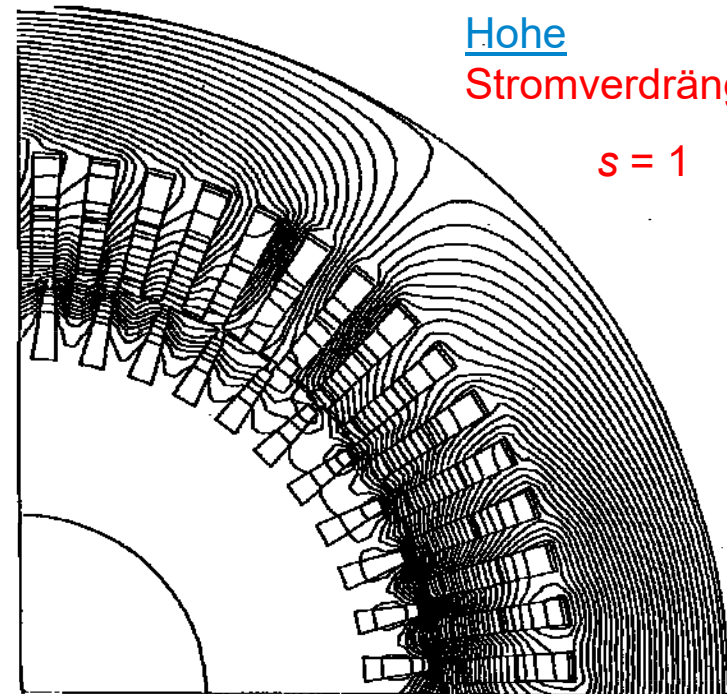


Keine  
Stromverdrängung

$s = 0$

**Leerlauf** ( $s = 0$ ):

Läufer stromlos:  
Hauptfeld dringt tief in den Läufer ein,  
Läuferfrequenz ist Null.



Hohe  
Stromverdrängung

$s = 1$

**Kurzschluss** ( $s = 1$ ):

Läuferstrom gegenphasig zum  
Ständerstrom, **Stromverdrängung**:  
Magnetfeld zu den Läuferstab-Oberkanten  
gedrängt, Läuferfrequenz =  
Ständerfrequenz.

## Beispiel: Bohrer-Antrieb

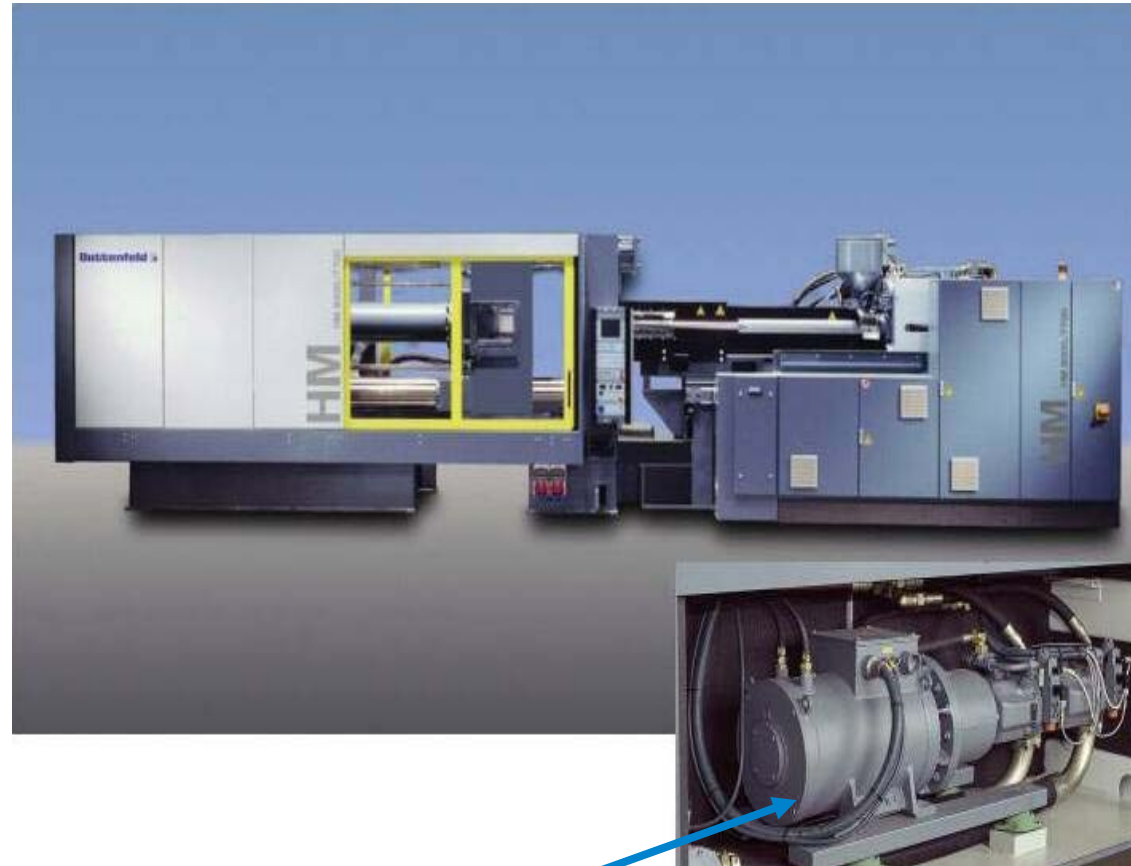
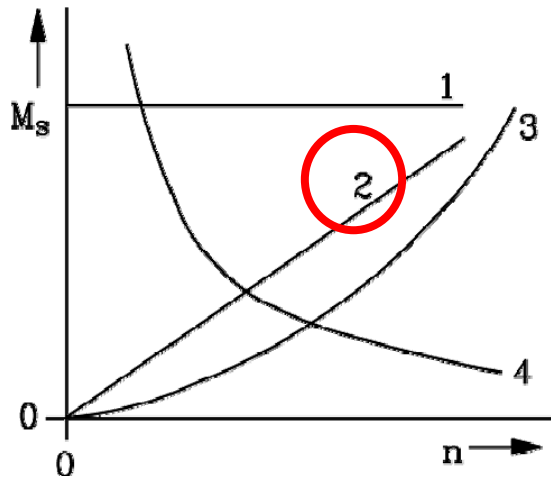
Ergänzung



Quelle: Aradex, Germany

# Extruder für Kunststoff-Spritzgussmaschinen

Ergänzung



Quelle:  
Battenfeld, Germany & ELIN  
EBG Motoren GmbH, Austria

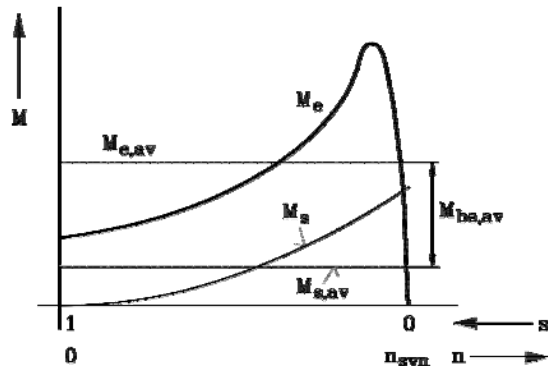
Wassermantelgekühlter  
Käfigläufer-Antriebsmotor

# Turboverdichterantriebe mit Festdrehzahl

Ergänzung

- Type: Käfigläufer zweipolig
- Leistung: 1850 kW
- Spannung: 6 kV/Netzspeisung
- Frequenz: 50 Hz
- Drehzahl: 2975 /min
- Kühlart: wassergekühlt
- Stückzahl: 3 Stück

- Turboverdichter
- niedriger Anlaufstrom  
hoher Wirkungsgrad



Quelle: ELIN EBG Motoren GmbH, Österreich

Projekt: „INFRA-LEUNA“  
Aufstellungsort: Deutschland



# Festdrehzahl-Asynchronantriebe für Schrämmkopf (Steinkohleabbau)

Ergänzung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

- Antrieb: Vierpolig, Asynchron
- Leistung: 150 kW
- Spannung: 400 V
- Frequenz: 50 Hz
- Drehzahl: 1480 /min
- Kühlart: wassermantelgekühlt
- Stückzahl: ~ 10 Stk./Jahr

- Antrieb des Schrämmkopfs von Bergbaumaschinen mit Käfigläufer-Asynchronmaschinen



**Projekt:** Kohlebergbau

**Aufstellungsort:** Indien, Russland, Mexiko

Quelle: ELIN EBG Motoren GmbH, Österreich



# DAHLANDER-Schaltung für Tunnelbohrmaschine: Einquadrantenbetrieb mit Drehzahlveränderung

- Antrieb: Käfigläufermotor
- Leistung: 250/250 kW
- Spannung: 400 V
- Frequenz: 50 Hz
- Drehzahl: **738/1488 /min**
- Kühlung: wassermantelgekühlt
- Stückzahl: 12 Stück  
Polzahl: 8 / 4



- Bohrkopftrieb für  
Tunnelbohrmaschine  
(Fa. Herrenknecht)

Einsatz unter dem  
Ärmelkanal



**Projekt:** 2 Tunnelbohrmaschinen für  
*Channel Tunnel Rail Link*

**Aufstellungsort:** *England*

Quelle: ELIN EBG Motoren GmbH, Österreich

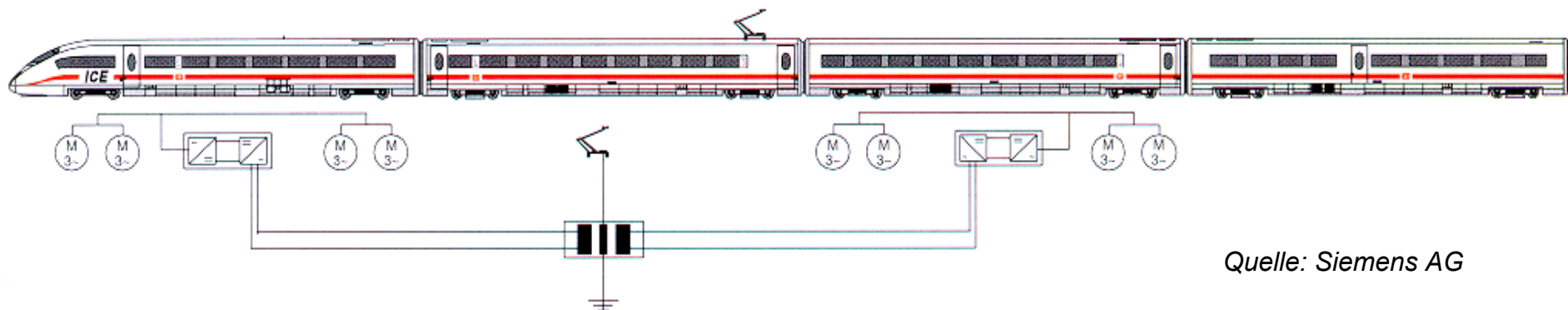


# Triebwagenkonzept : ICE 3 mit verteilten Asynchron-Antrieben

Ergänzung



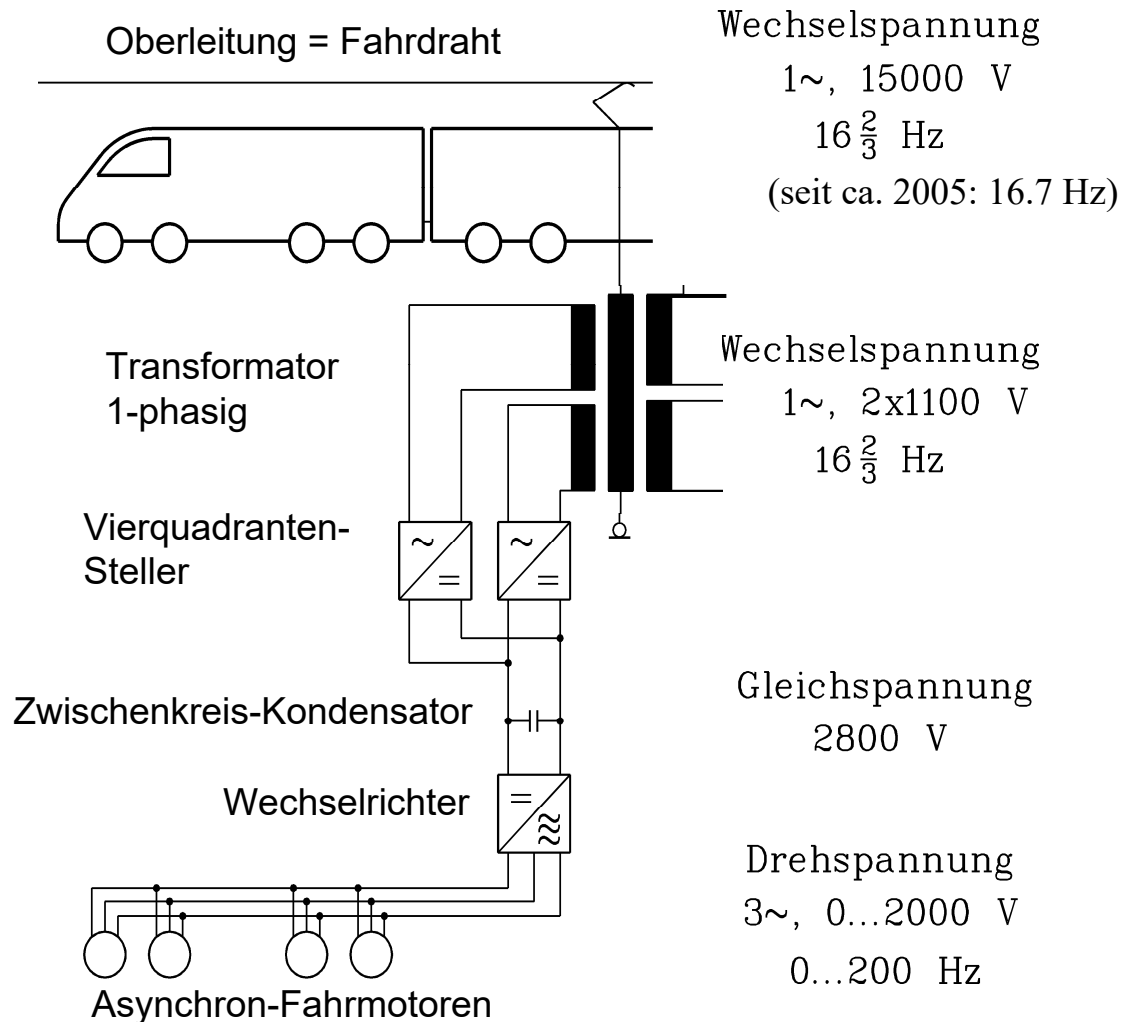
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Quelle: Siemens AG

# Elektrisches Antriebskonzept für den ICE3

Ergänzung



Fahrdrabt: Hochspannung über Stromabnehmer

Einphasentransformator: Verringerung der Spannung auf 2 x 1100 Volt, danach Hochsetzdrossel

Zwei Stromrichter formen die Wechsel- in Gleichspannung um

Wechselrichter erzeugt aus Gleichspannung ein Drehspannungssystem, das vier Asynchronmotoren versorgt



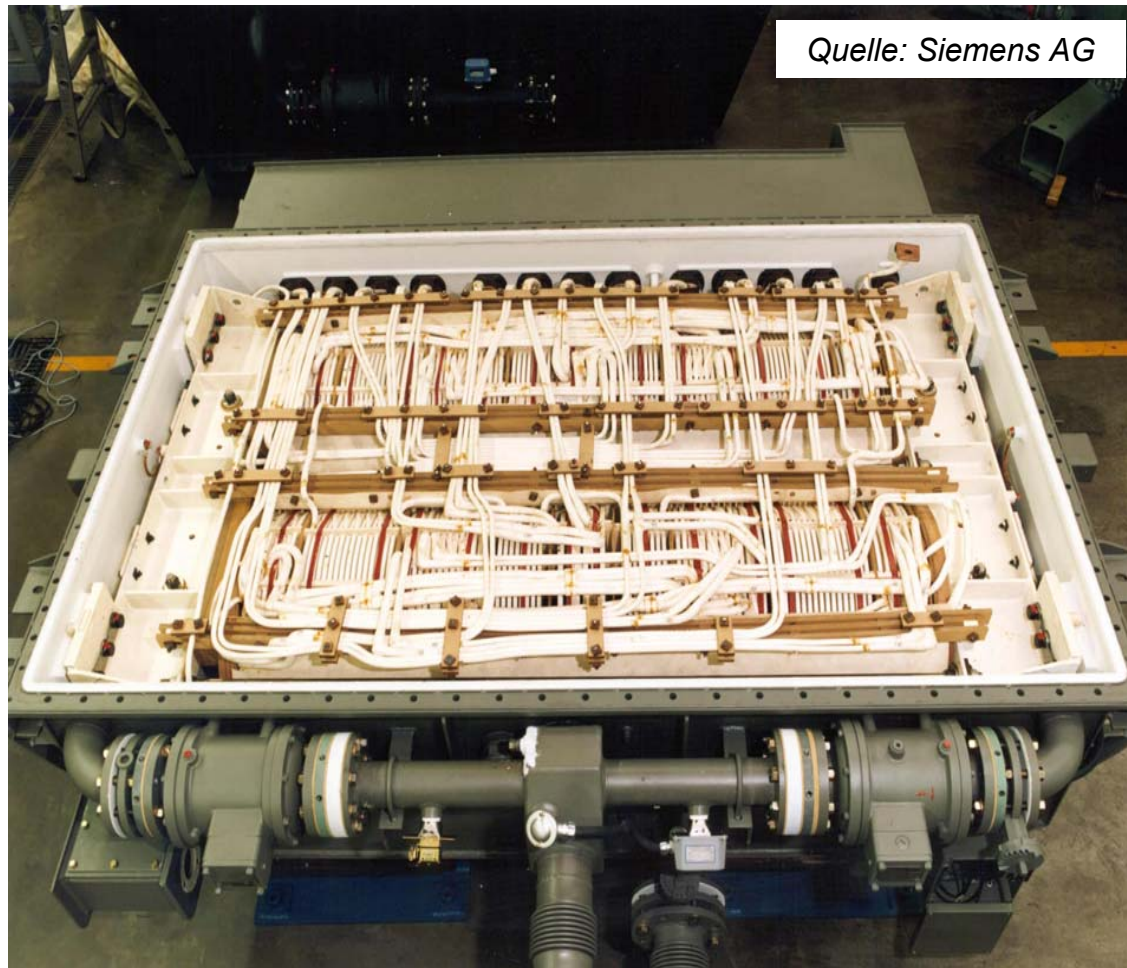


# ICE3: Traktions-Transformator (einphasig) Unterflur-Bauweise

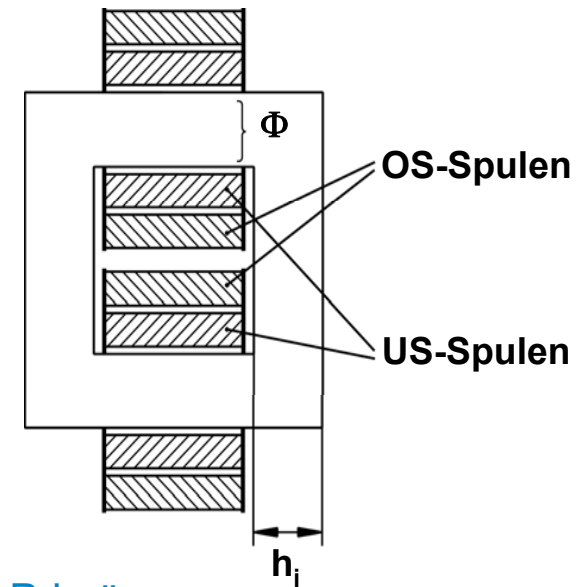
Ergänzung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Quelle: Siemens AG



Primär:

1x 15 kV, 16.7 Hz, 4.6 MVA

Sekundär:

4 x 1.1 kV, 1 MVA: Traktion

2 x 0.3 MVA: Hilfsbetriebe

9.1 Tonnen, Ölkühlung

Max. Wicklungs-

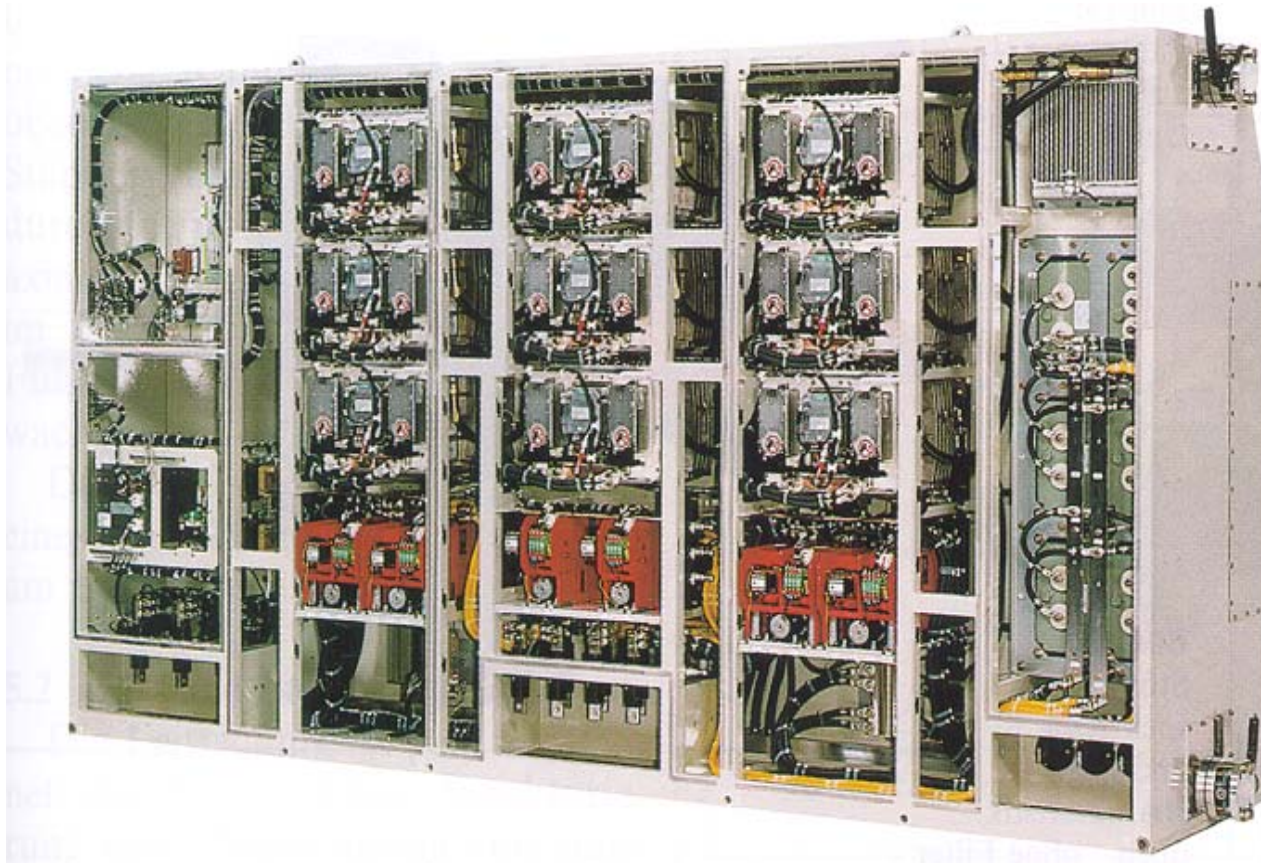
Erwärmung: 125 K

3.3 m



# Hochleistungslokomotive: Stehender Traktionsumrichter

Ergänzung



Bei ICE3:  
Traktions-  
umrichter  
liegend  
eingebaut

GTO:  
Gate-Turn-  
Off-Thyristor

**GTO-Traktionsumrichter mit Vierquadrantensteller,  
Gleichspannungszwischenkreis und Pulswechselrichter**

Quelle:  
Siemens AG



# ICE3: Asynchron-Fahrmotor

Selber nachrechnen



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

**ICE 3-Fahrmotor: Asynchronmotor mit Kupferstab-Kurzschlusskäfig-Läufer, Bemessungsleistung 513 kW, Luftinnenkühlung**

$$s_N = \frac{1800 - 1757}{1800} = 2.4\%$$

$$M_N = \frac{513000}{2\pi \frac{1757}{60}} = 2788 \text{ Nm}$$

$$S_N = \sqrt{3} U_N I_N = \\ = \sqrt{3} \cdot 1515 \cdot 250 = 656 \text{ kVA}$$



$U_N = 1515 \text{ V}$  verkettet

$I_N = 250 \text{ A}$

$P_N = 513 \text{ kW}$

$n_N = 1757/\text{min}$  bei 60 Hz

Nennmoment: 2788 Nm

$2p = 4$

Max. 6000/min bei 200 Hz

Masse: 740 kg

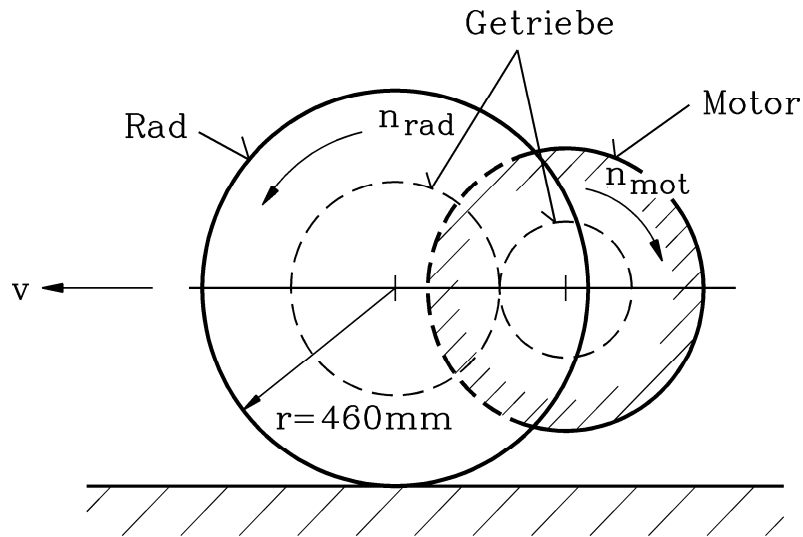
Max. Wicklungserwärmung:  
200 K

Quelle: Siemens AG



# ICE3: Kraftübertragung vom Asynchronmotor auf die Räder

Selber nachrechnen



Motorläufer dreht sich auf Grund variabler Frequenz der Motorspannung mit veränderbarer Drehzahl:  $n_{mot} = 0 \dots 5300 \text{ /min}$

Ein einstufiges **Getriebe** verringert die hohe Motor-Drehzahl  $n_{mot}$  auf die langsamere Raddrehzahl  $n_{rad}$

**Triebzug:**

$$v_{\max} = 330 \text{ km/h} = 91.7 \text{ m/s}; n_{\text{rad},\max} = v_{\max} / (2\pi r)$$

$$n_{\text{rad},\max} = 91.7 / (2\pi \cdot 0.46) = 31.7 \text{ Umdrehungen je s} = 1900 \text{ /min}$$

**Getriebeübersetzung:**  $i = 2.78$ :

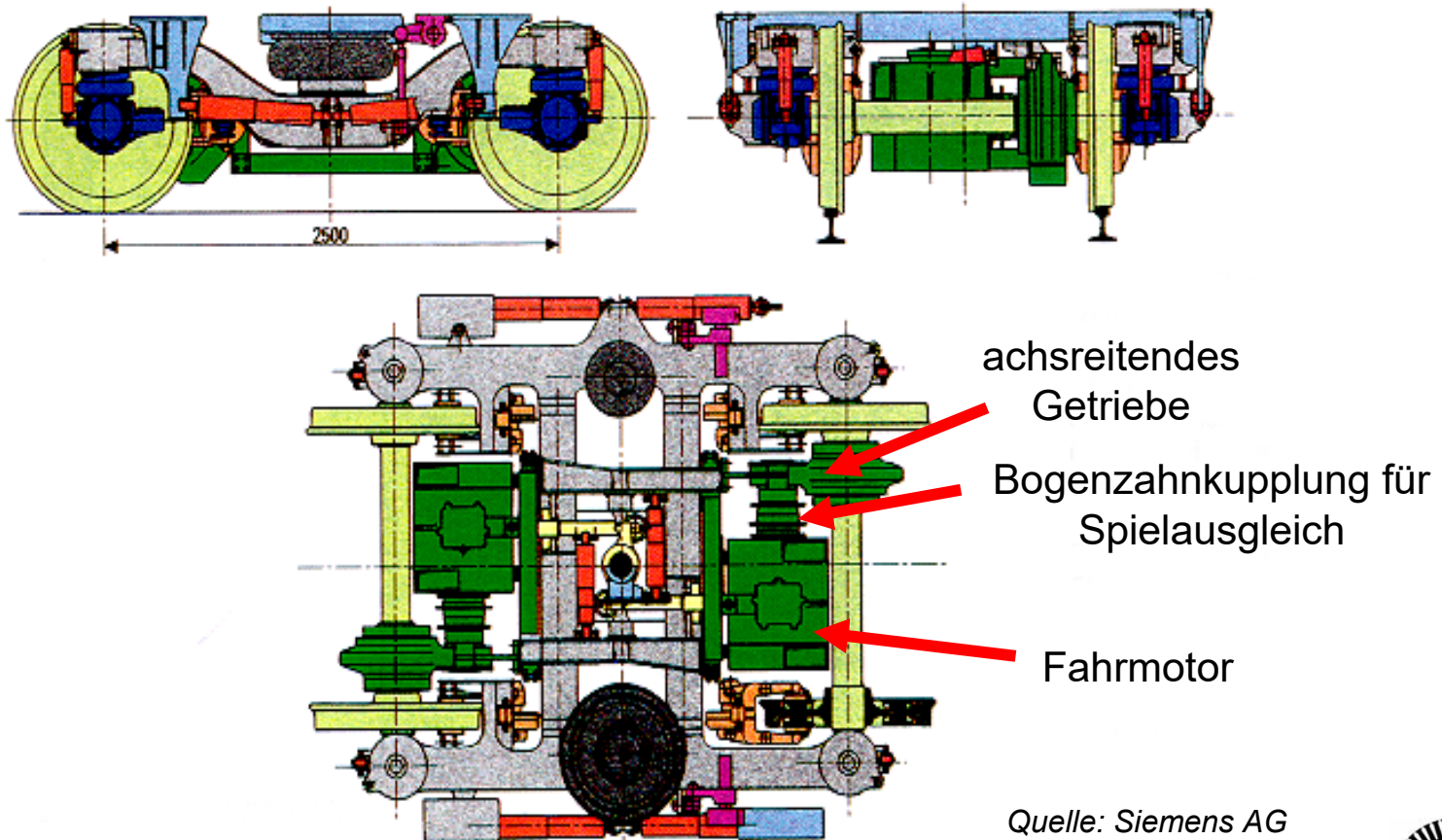
$$n_{\text{mot},\max} = i \cdot n_{\text{rad},\max} = 2.78 \cdot 1900 = 5300 \text{ /min}$$



# ICE3: Triebdrehgestell (1)

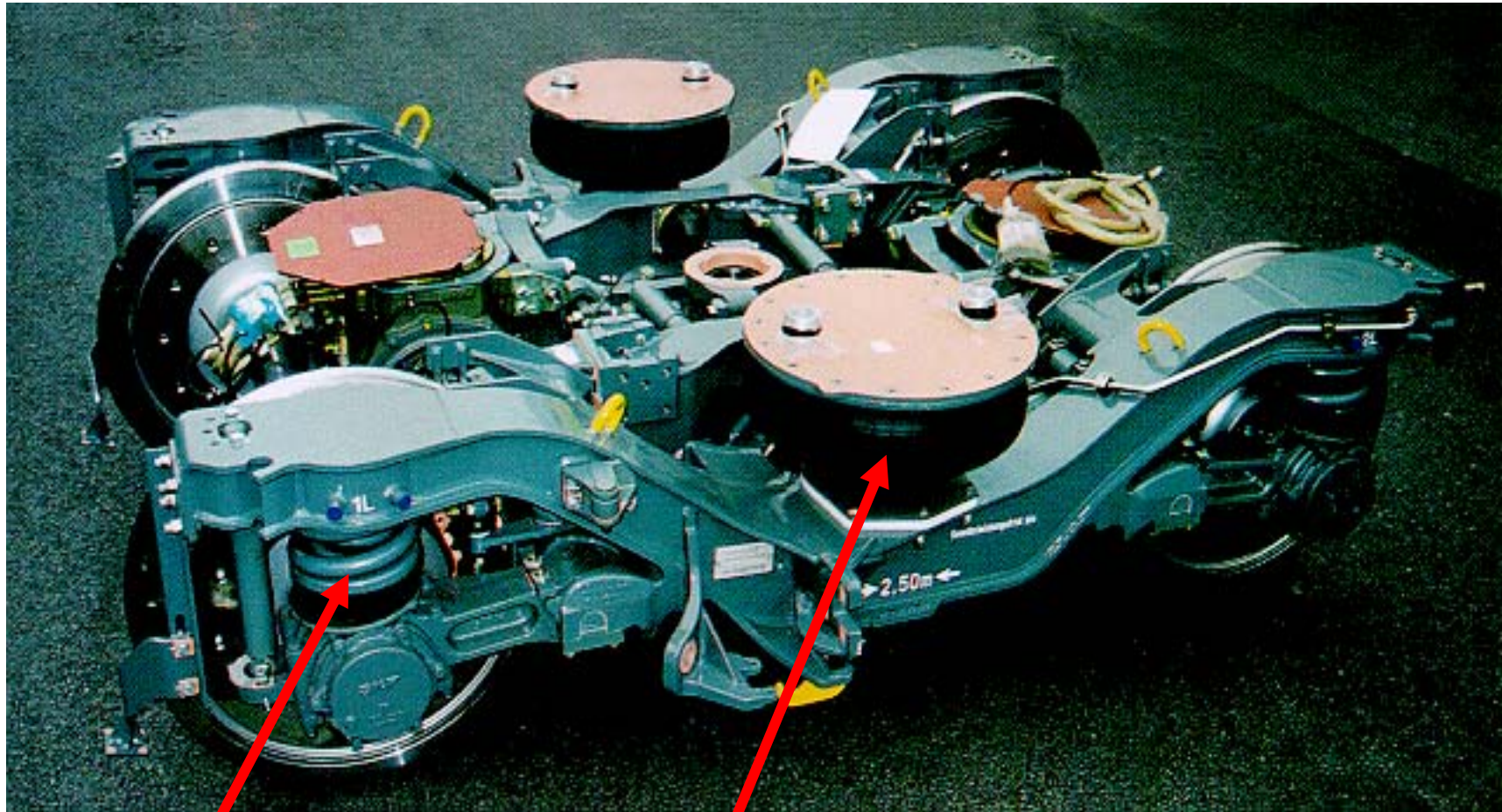
Ergänzung

Triebdrehgestell ICE 3 mit drehgestellfesten Fahrmotoren und achsreitenden einstufigen schrägverzahnten Stirnrad-Getrieben



# ICE3: Triebdrehgestell (2)

Ergänzung



Primärfederung

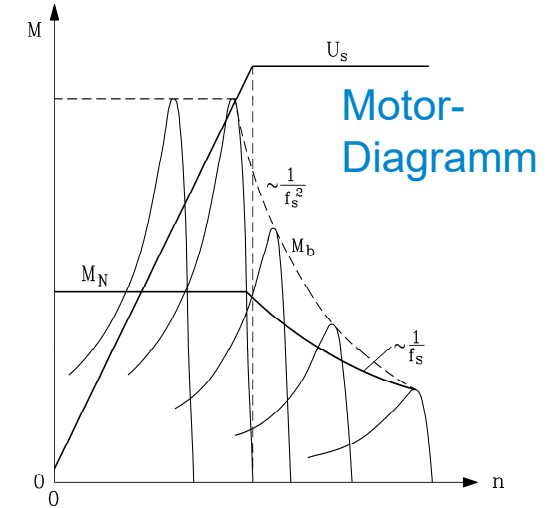
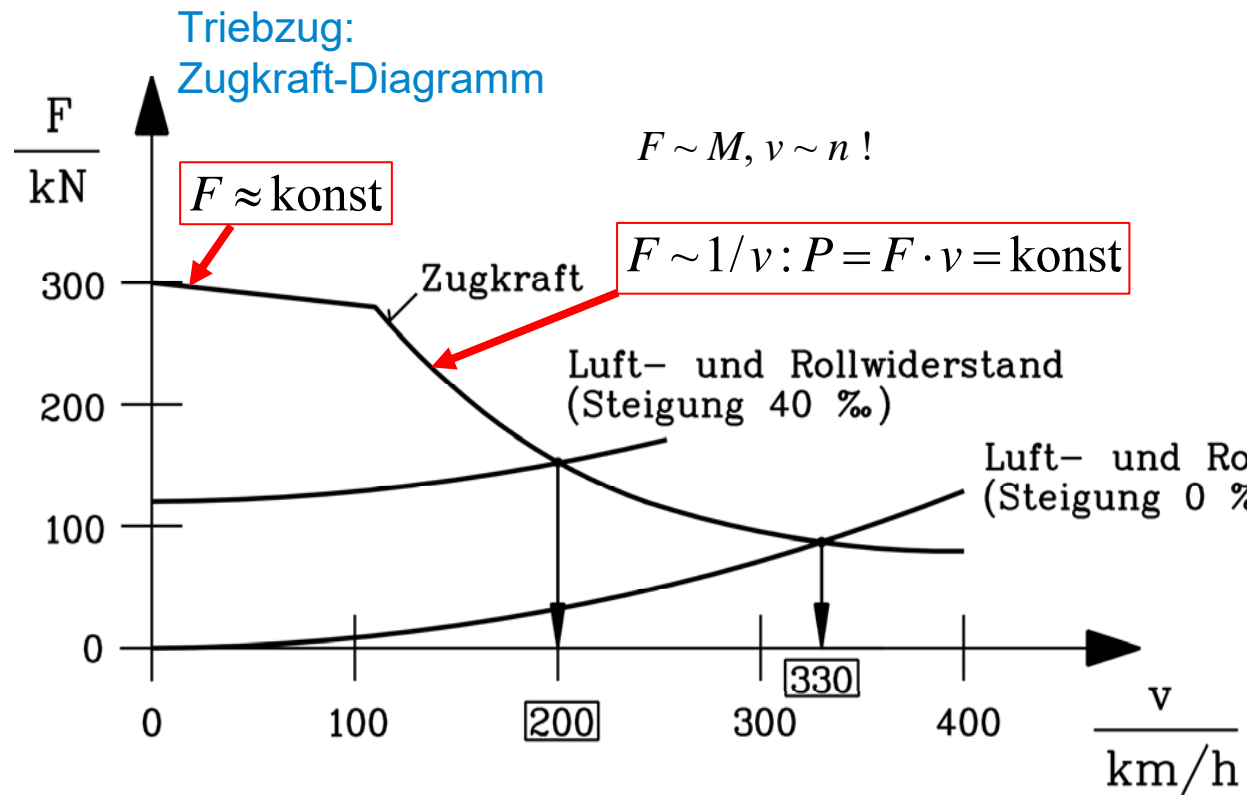
Sekundärfederung

Quelle: Siemens AG



# ICE3: Welche maximale Geschwindigkeit ist möglich ?

**Ergänzung**



- Ebene Gleisstrecke: max. Geschwindigkeit ist  $v_{\text{max}} = 330 \text{ km/h}$
- Steigung mit 4‰: max. Geschwindigkeit ist nur noch  $200 \text{ km/h}$



# ICE3: Maximale Beschleunigung & Fahrtzeiten

Ergänzung



	Max. Beschleunigung
0 ... 250 km/h	0.59 ... 0.18 m/s <sup>2</sup>
300 ... 350 km/h	0.03 m/s <sup>2</sup>

## Beispiele für Fahrtzeiten

7 min für 20 km

$v_{\max} = 300$  km/h

41 min für 200 km

$v_{\max} = 350$  km/h

Auf der Strecke *Frankfurt/Main – Köln*:

nur  $v_{\max} = 300$  km/h realisiert !

Quelle: Thyssen Krupp

$$a = F/m: 0.59 \text{ m/s}^2 = 300 \text{ kN} / 508.5 \text{ t}$$

Triebzugmasse  $m = 508.5$  t verteilt auf 32 Achsen:  $508.5/32 = \text{ca. } 16$  t je Achse !





# Beispiel: All-electric ferry Ampere (Fjellstrand)

Ergänzung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Fährbetrieb pro Tag:

34 Mal ca. 6 km von *Lavik* nach *Oppedal* (Norwegen) in ca. 20 min.

Beförderungskapazität: 120 Autos und 360 Personen

**Antrieb:**

Zwei  
wechselrichter-  
gespeiste  
Asynchron-  
motoren mit je  
450 kW

**Energiespeicher:**

Lithium-Ionen-  
Akku mit einer  
Kapazität von  
1000 kWh (10 t)



**Aufladung bei  
jedem Hafens-  
Halt:**

Netzanschluss  
zu schwach,  
daher Lithium-  
Ionen-Akku mit  
260 kWh zur  
Pufferung

Quelle: Siemens – Pictures of the Future , 2016

**50% Gewichtsreduktion** der Fähre durch Fertigung aus Aluminium  
im Vergleich zu konventionelle Fähren aus Stahl

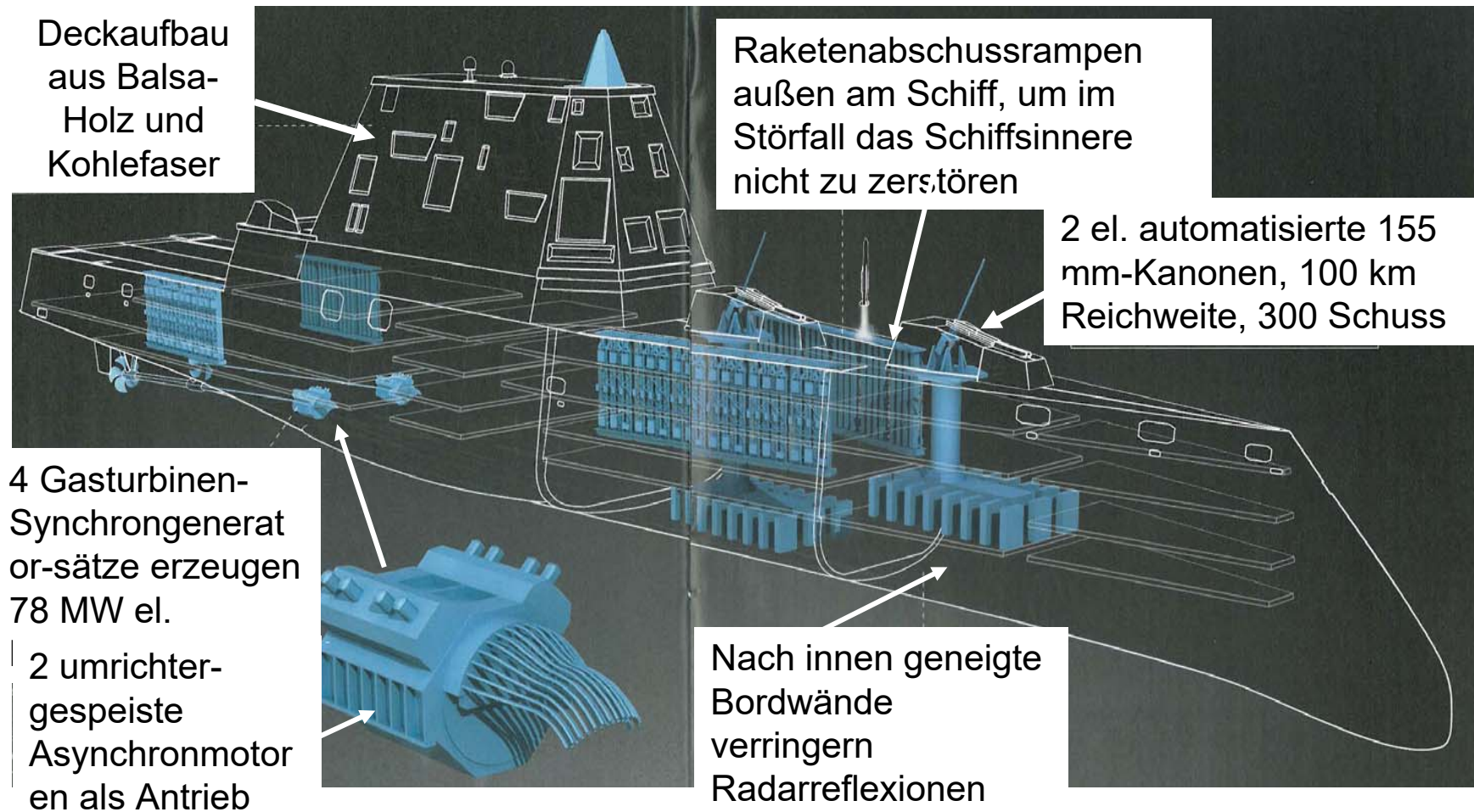


# Beispiel: All-electric ship U.S.S. Zumwalt (US Navy)

Ergänzung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Quelle: IEEE Spectrum , 2013



**Ergänzung**

## Synchronmaschinen und ihre Anwendungen

**(zu Kapitel 8 & 9)**

# Vollpol-Synchronmaschine

## Fertigung des Statorblechpakets

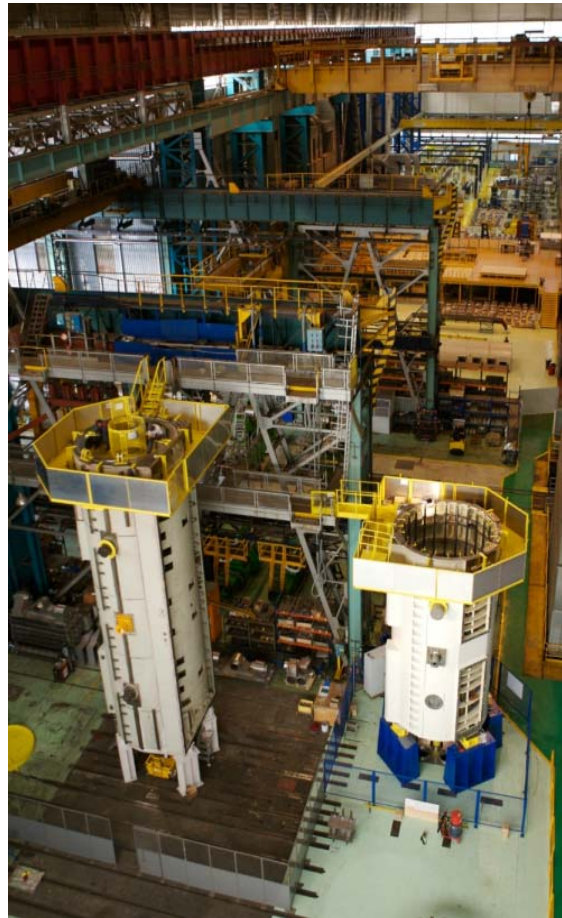
Ergänzung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

### Turbo- Generator

„Einblechen“  
des Stator-  
Blechpakets  
im  
Schichtturm



(C) 2007 Bryon Paul McCartney / all rights reserved.



(C) 2007 Bryon Paul McCartney / all rights reserved.

Quelle:

**ALSTOM**



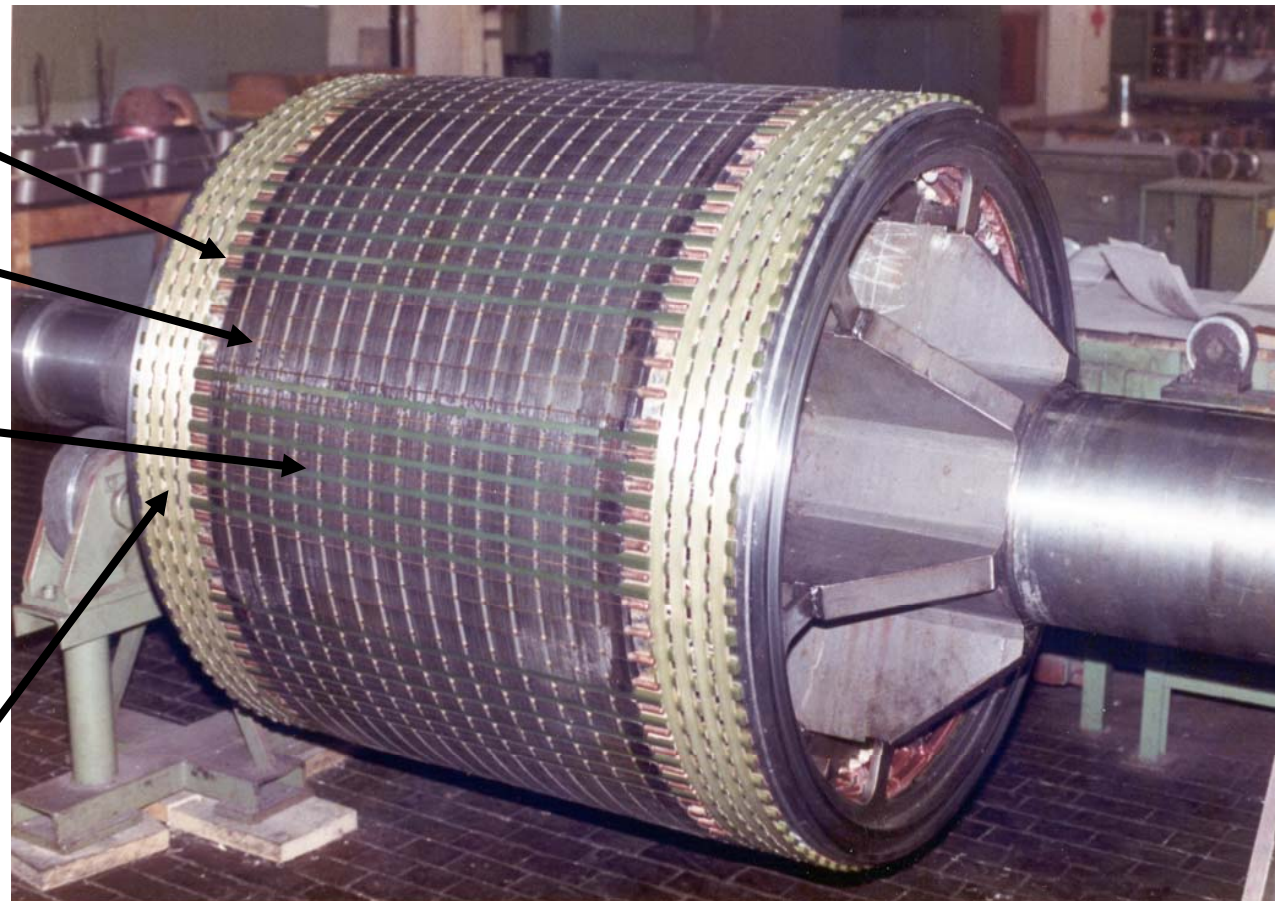
# Rotor einer Vollpol-Synchronmaschine 8-polig

Ergänzung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

- Drei Feldspulen pro Pol:  $q_r = 3$
- Dämpferkäfig mit 9 Stäben pro Pol**
- Radiale Lüftungsschlitze
- Rotor aus Blechen geschichtet
- Glasfaser-Bandage fixiert die Feldwicklung im Stirnbereich



Quelle: Andritz Hydro, Bhopal, India



# Vollpol-Synchronmaschine „Hochzeit“: Zusammenführen von Stator und Rotor zum kompletten Generator

Ergänzung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Vierpoliger  
Turbo-  
Generator

1500/min

$$q_r = 6, 2p = 4$$

Einführen des  
Rotors mit dem  
Kran

Wicklungs-  
kappen



Quelle:

**ALSTOM**

4-poliger Turbogenerator für ca. 1.6 GW - Einsatz in Kernkraftwerken



# Schenkelpol-Synchronmaschine

## Statorfertigung

Ergänzung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

### Wasserkraftgenerator

ca. 400 MW

Bewickeltes  
Statorblechpaket

Verkeilung der  
Nutenkeile



Quelle:

**ALSTOM**

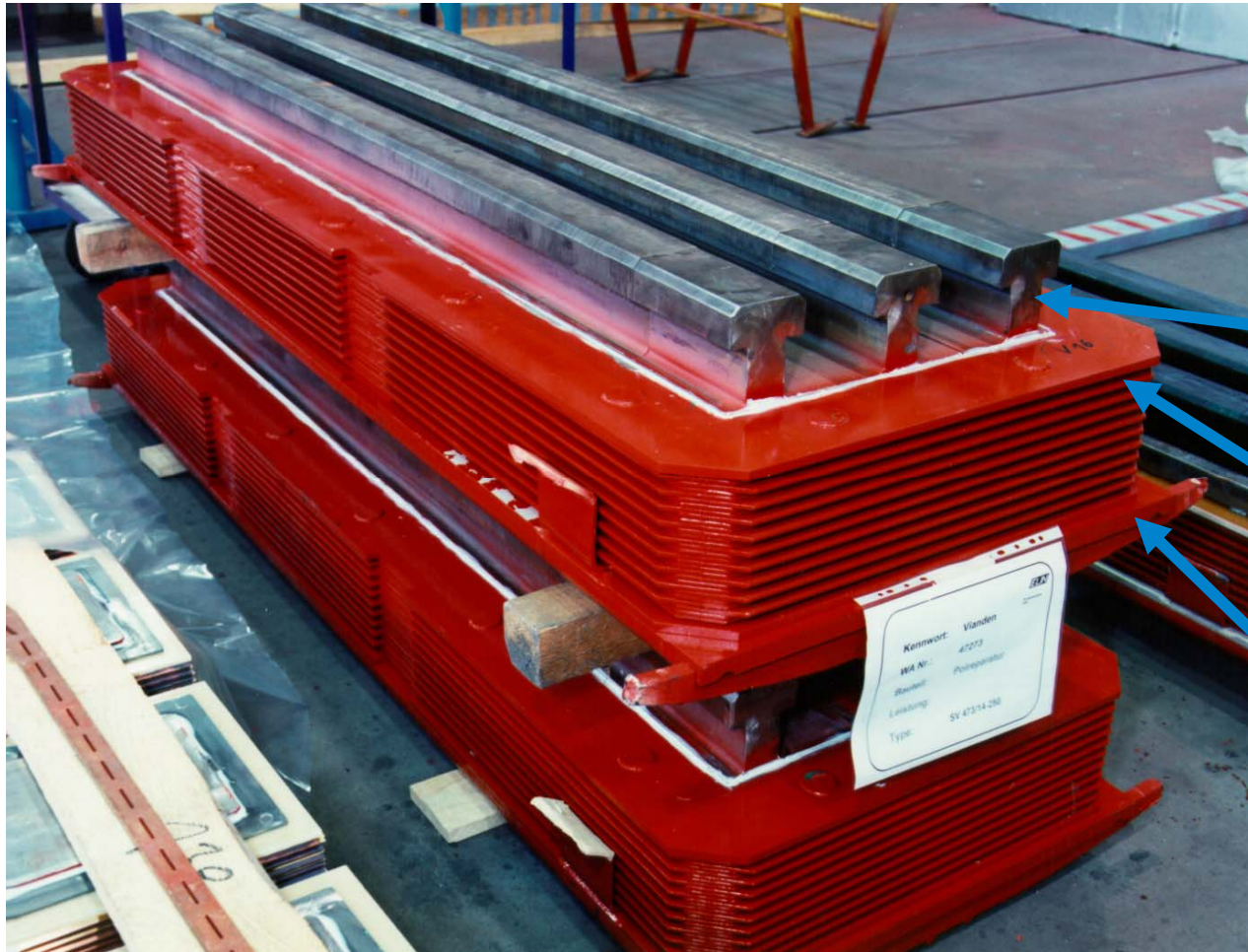


# Bewickelte Schenkelpole vor dem Einbau in den Rotor

Ergänzung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Pumpspeicher-  
werk Vianden

Luxemburg

Dreifach-  
Hammerkopf-  
Befestigung

Breitere  
Kupferwindungen  
wirken als  
"Kühlrippen"

Dämpfering-  
segment

Quelle:

Andritz Hydro,  
Austria



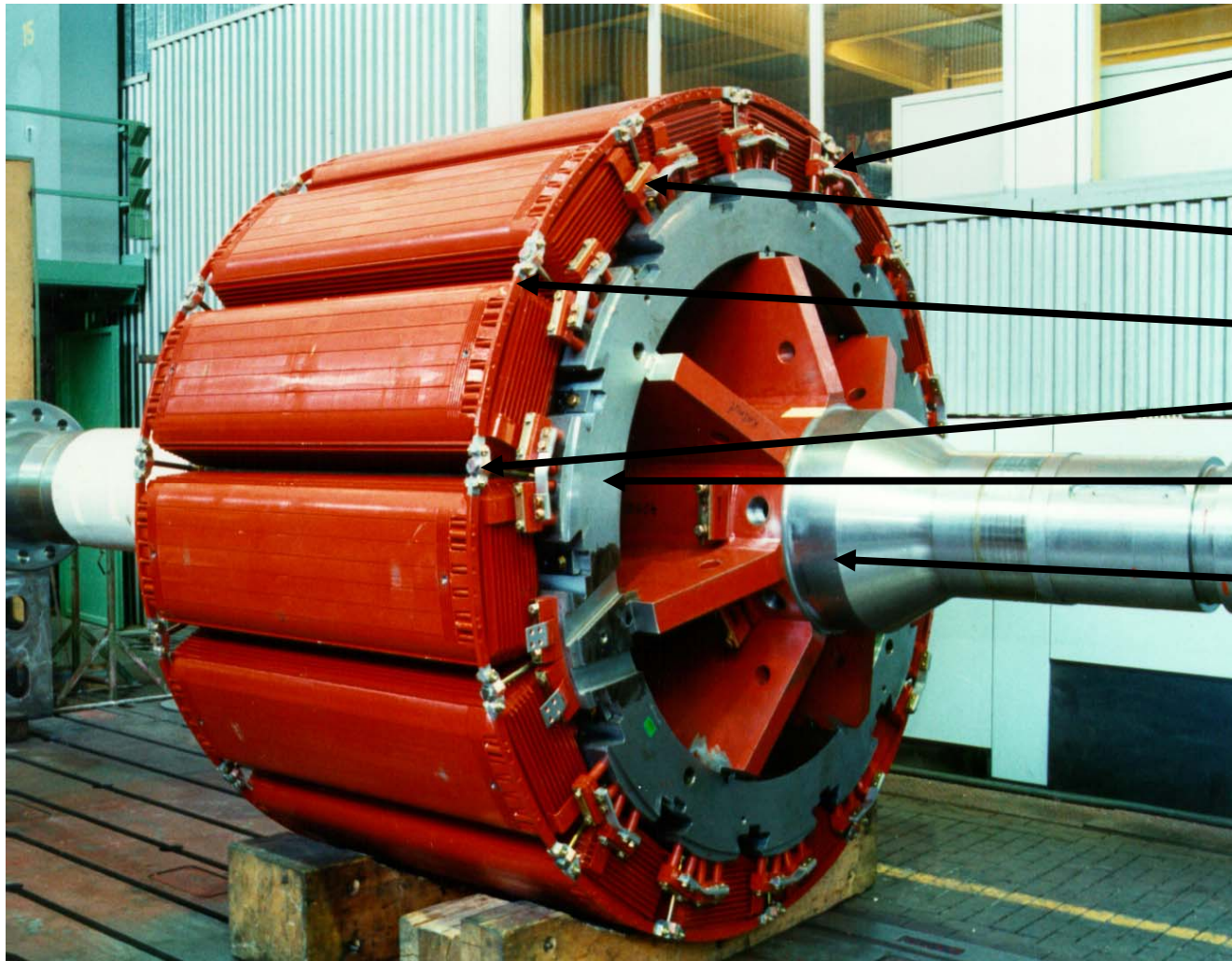


# Synchronmaschine: 14-polig Komplettierter Schenkelpol-Rotor

Ergänzung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Schwabenschwanz-  
fixierung der  
Schenkelpole

“Kühlrippen” durch  
breitere Kupferleiter

Dämpfering

Dämpferhaltebolzen

Rotor-Eisenrück-  
schluss

Rotor-Stegwelle zur  
Kupplung mit Turbine

Quelle:

Andritz Hydro, Austria



# Schenkelpol-Synchronmaschine – „Hochzeit“: Rotor-Montage auf der Anlage in den Stator



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## Ergänzung

### Wasserkraftgenerator

*Drei Schluchten  
(Three Gorges)  
Yang-tse-kiang  
China*

840 MVA, 80-polig

*Francis-Turbinen*

Staumauer 180 m

32 x 700 = 22 400 MW

2012: 98.1 TWh

$$n = f/p = 50/40 = 1.25/s = 75/\text{min}$$

Quelle:

**ALSTOM**



# Schenkelpol-Synchronmaschine – „Hochzeit“: Rotor-Montage auf der Anlage in den Stator



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## Ergänzung

### Wasserkraftgenerator

*Drei Schluchten  
(Three Gorges)  
Yang-tse-kiang  
China*

840 MVA

80-polig

*Francis-Turbinen*

Staumauer 180 m

32 x 700 = 22 400 MW

2012: 98.1 TWh

Quelle:

**ALSTOM**



# Schenkelpol-Synchronmaschine – „Hochzeit“: Rotor-Montage auf der Anlage in den Stator



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## Ergänzung

Wasserkraft-  
generator

*Karakaya  
Euphrat, Türkei*

315 MVA/ 300 MW  
40-polig

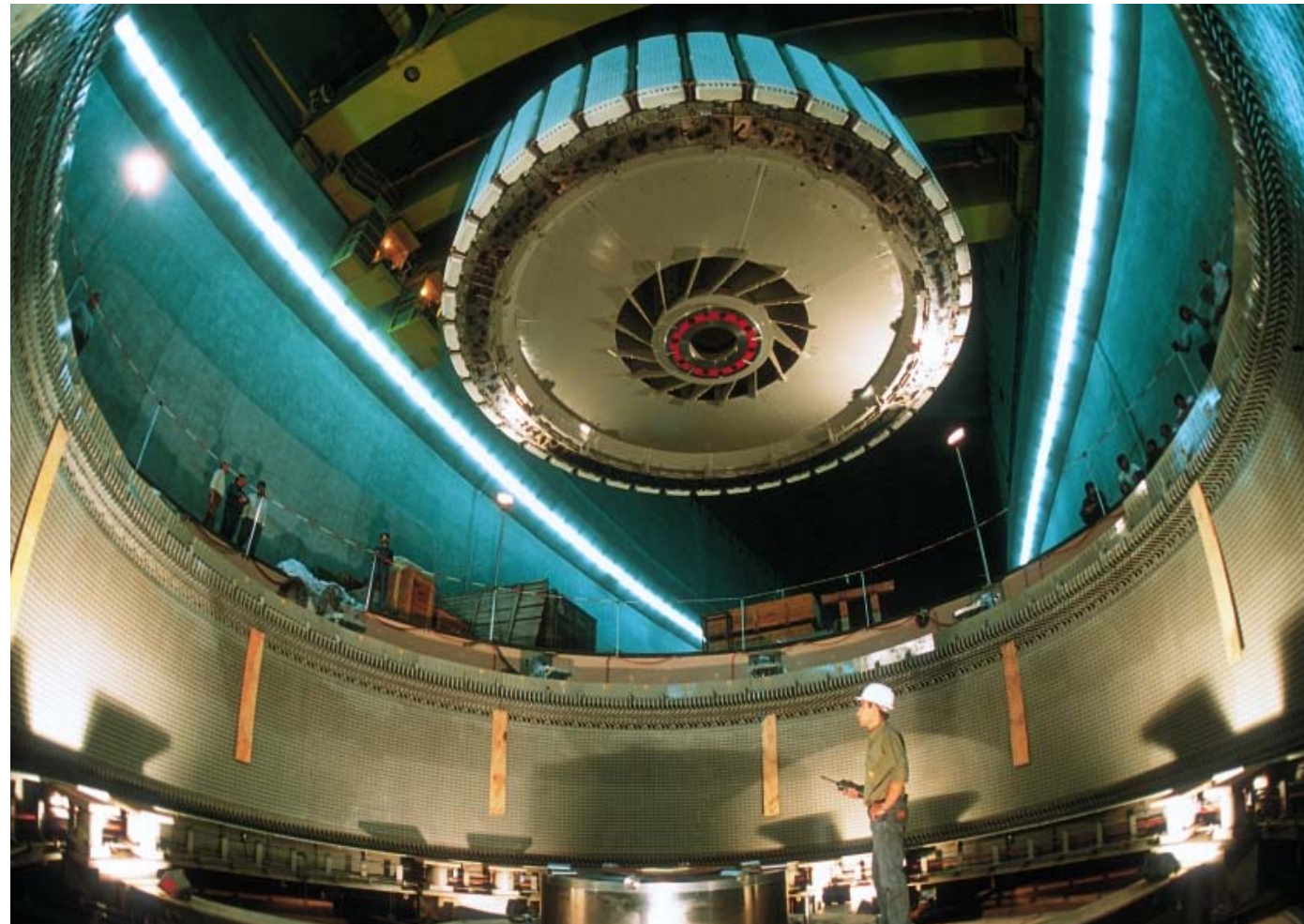
$n = f/p = 50/20 =$   
 $2.5/s = 150/min$

*Francis-Turbinen*

Staumauer 158 m

6 x 300 = 1800 MW

Quelle: **ALSTOM**



# Inselbetrieb: Synchrongenerator als Kfz-Lichtmaschine

Ergänzung

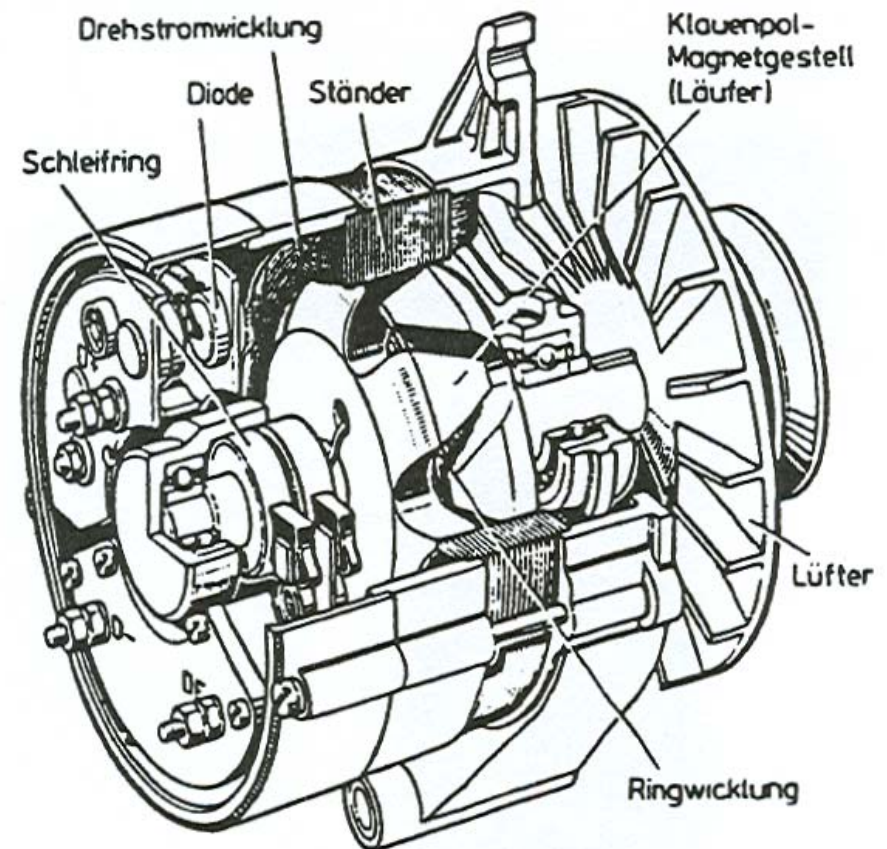


TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## Synchron-Lichtmaschine:

- dreiphasig,  $q = 1$ , Einschicht-Wellenwicklung, 12-polig
- Klauenpoläufer elektrisch erregt
- Angetrieben über Keilriemen von Verbrennungskraftmotor drehzahlvariabel
- Diodengleichrichter der Ständerleistung für 12 V oder 24 V Gleichspannung
- Diodengleichrichter für Rotorerregung
- Transistorspannungsregler hält unabhängig von Drehzahl  $n$  und Ständerstrom  $I_s$  über variablen Feldstrom  $I_f$  die Ständerspannung konstant

- **Daten:** z. B.:  
12...14 V, 90 A, 1 kW, 3000 ... 6500/min



Quelle:

Bosch, Deutschland



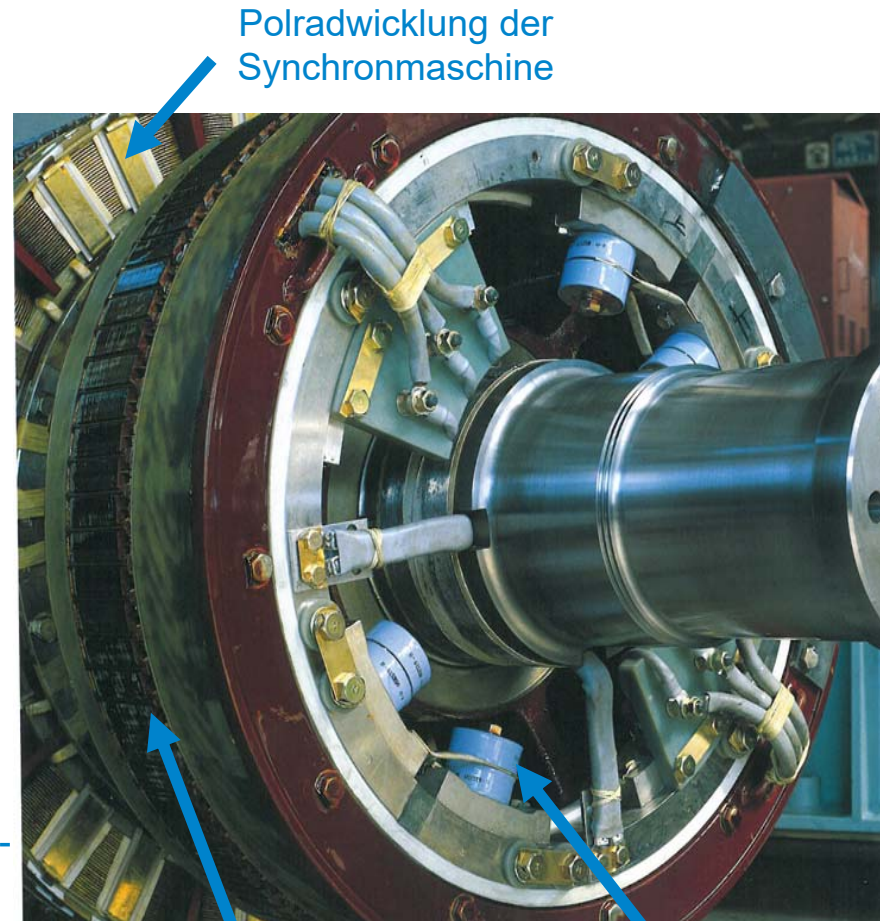
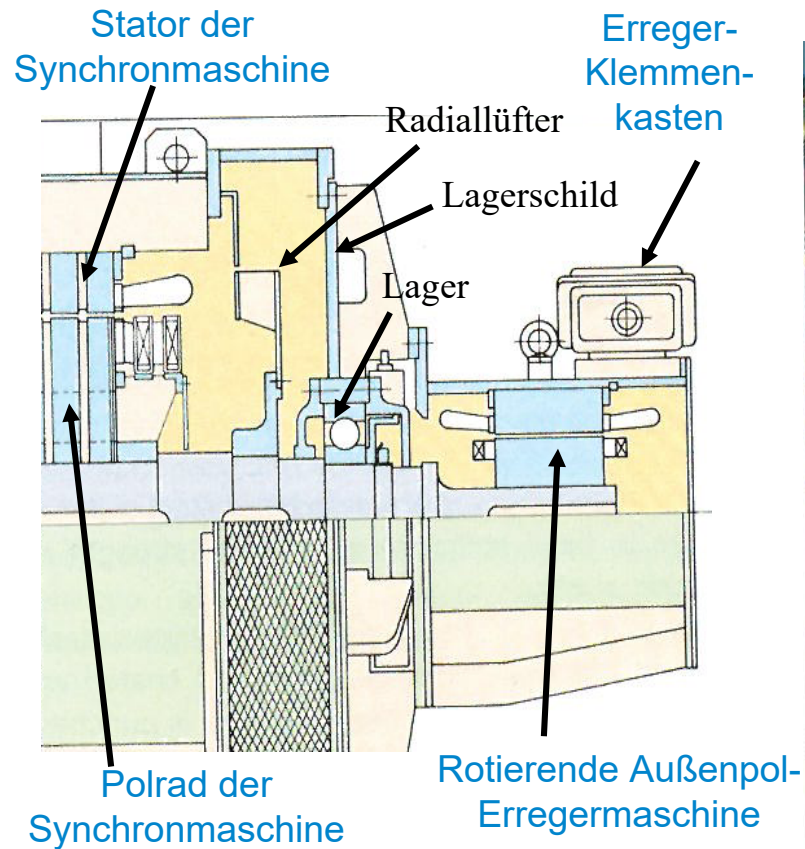
# Erregung des Polrads über einen rotierenden Gleichrichter

Ergänzung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Beispiel: 3 MW-Schiffsgenerator



Quelle: Taiyo Electric Co.; Ltd., Japan,  
Cat. No. M015-2, M006-5

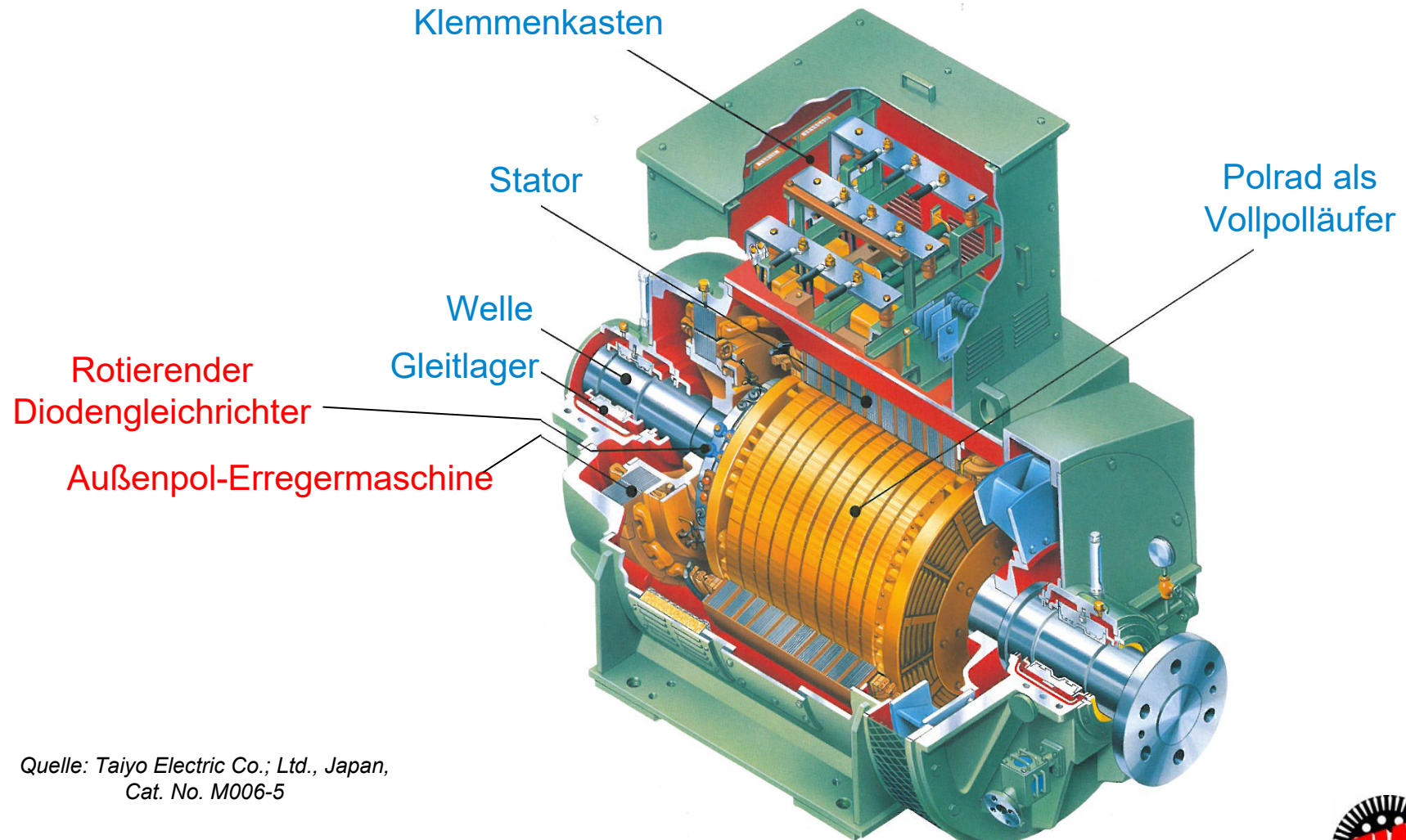


# 3 MW-Schiffsgenerator Mit rotierender Erregermaschine

Ergänzung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Quelle: Taiyo Electric Co.; Ltd., Japan,  
Cat. No. M006-5



# PM-Synchronmotor als Roboterantrieb

Ergänzung



Quelle: Kuka, Deutschland

*Ein-Arm-Roboter mit PM-Synchronantrieben*

- Jede **Achse des Roboters** wird von einem umrichter gespeisten PM-Motor angetrieben.
- Polradlagegeber wird zur Umrichtersteuerung und als **Positionsgeber** verwendet = einfache Positionsregelung jeder Achse: **“Lageregelung”**.





# PM-Synchronmotor als Kurbelwellenstarter und Hilfsantrieb für „Mild Hybrid“

Ergänzung

## Außenläufer-PM-Synchronmaschine $2p = 28$

### *Scheibentyp*

Viersträngige Einschicht-Zahnspulenwicklung mit Zwischenzähnen

16 Zahnspulen in 32 Nuten (mit Zwischenzahn)

Zahnspulenweite = Polteilung



Statorspulen auf dem Innenstator

Permanentmagnete auf Außen-Läuferglocke als Oberflächenmagnete

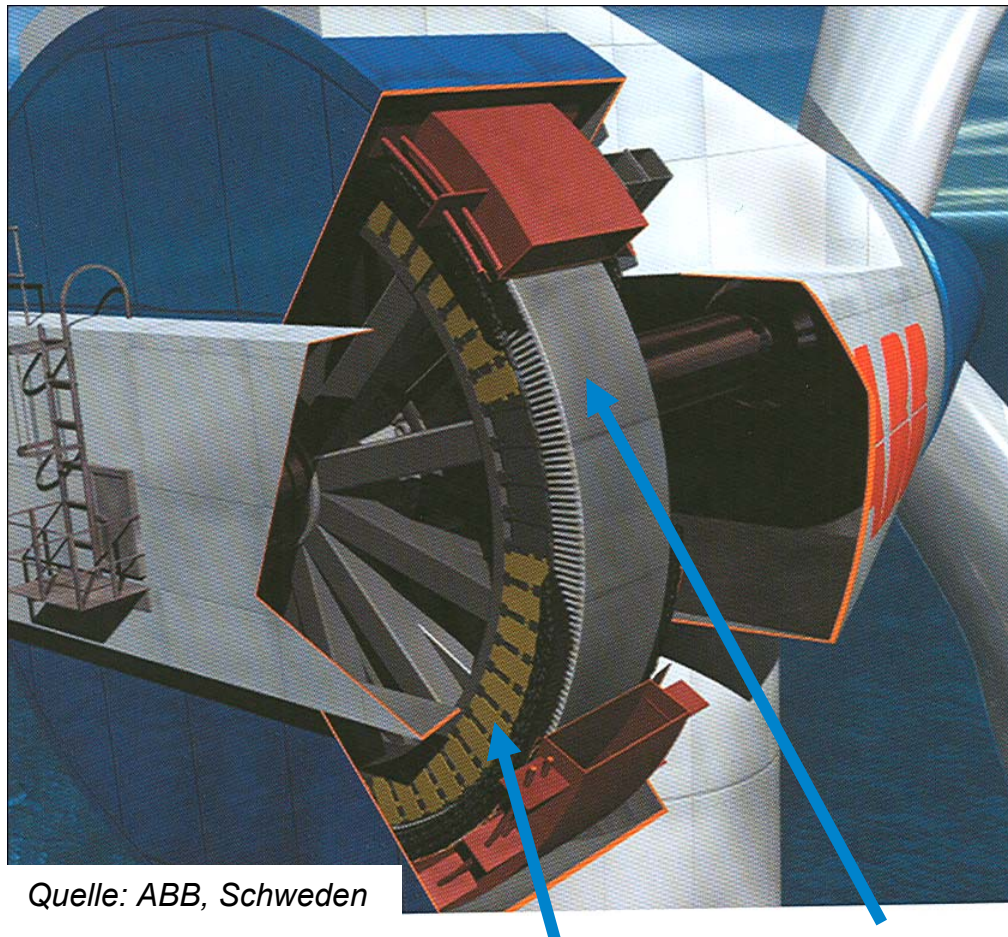
Quelle: ZF/Dr. Müller und Fichtel & Sachs

# Getriebeloser Permanentmagnet-Synchron-Generator

Ergänzung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Quelle: ABB, Schweden

Permanentmagnetrotor

Stator mit Drehfeldwicklung

*Scheibentyp*

**Hohe Polzahl für niedrige Drehzahl**

- Generator in Windturbine eingebaut
- Kein Getriebe zwischen Turbine und Generator
- Generator dreht langsam wie Windturbine ca. 15/min
- Großes Turbinendrehmoment = Generator Drehmoment, daher großer Generatordurchmesser



# All-electric air-plane ANTARES 23E mit PM-Synchronmotor-Antrieb

Ergänzung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Quelle: IEEE Spectrum , 2013

- ANTARES 23E: Elektrisch angetriebenes Flugzeug (*Fa. Lange Aviation, Deutschland*), Konstrukteur: *Loek Boermans* (NL). Spannweite 23 m,
  - permanentmagneterregter Synchronmotor mit Umrichterspeisung (42 kW),
  - Li-Ionen-Batterie VL41M von *Fa. SAFT*. Crash-protected cockpit.
- Maximale Steighöhe: 3500 m, Gleitstrecke 60 km aus 1000 m Höhe.
- Zulassung für innerdeutschen Flugverkehr
- Preis: 205.000,-- Euro (inklusive On-board Batterieladegerät)



# All-electric solar air-plane HELIOS (NASA Dryden Center)

Ergänzung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Quelle: IEEE Spectrum , 2011

- Unbemanntes Nur-Flügel-Aufklärungsflugzeug für Stratosphärenhöhe 30 000 m
- 750 kg Flugzeugmasse, Flügelspannweite 75.3 m (10.7 m mehr als *Boeing 747* !)
- Energie aus Solarzellen 40 kW peak, 18.5% Wirkungsgrad, 184 m<sup>2</sup> (Fa. SunPower Corp. CA)
- Sonnenlicht von oben, Wolken-reflektiertes Licht von unten
- Li-Ionen-Batterien an Bord für „Back-up“ (200 Wh/kg)
- 14 E-Motoren à 1.5 kW für „unbegrenzte“ Flugdauer (typisch 18 Stunden) bei 270 km/h



# Vollpolmaschine als drehzahl- veränderbarer Walzwerksantrieb (Stromrichterbetrieb) (1)

Zum Nachrechnen



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

- Synchron-Vollpolmaschine, 12-polig,  
elektrisch erregt
- Nennmoment: 1.78 MNm, 0 ... 58.5/min
- Nennleistung: 10.9 MW, 58.5 ... 112.5/min
- Betrieb mit  $\cos\varphi = 1$
- ca. 2.5-fach überlastbar kurzzeitig:

Max. Drehmoment: 4.3 MNm

Max. Leistung: 26.5 MW

- 5.5m-Grobblech-Walzgerüst  
(*Dillinger Hüttenwerke AG*)

$$P_N = 2\pi \frac{58.5}{60} 1.78 = 10.9 \text{ MW}$$

Quelle: Siemens AG Deutschland

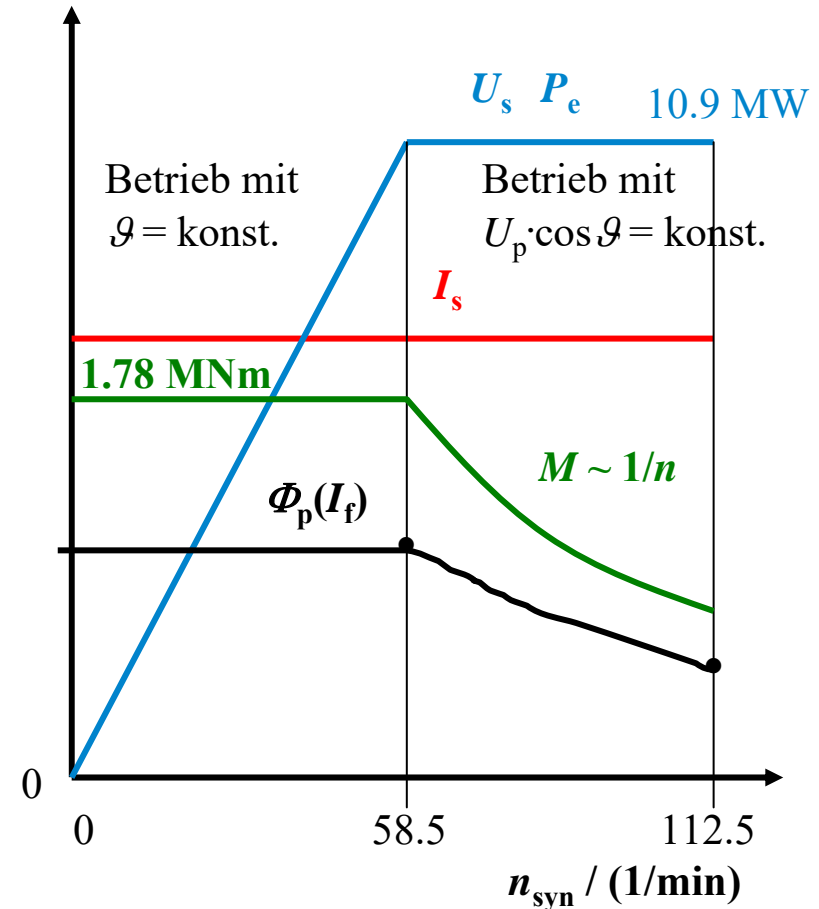
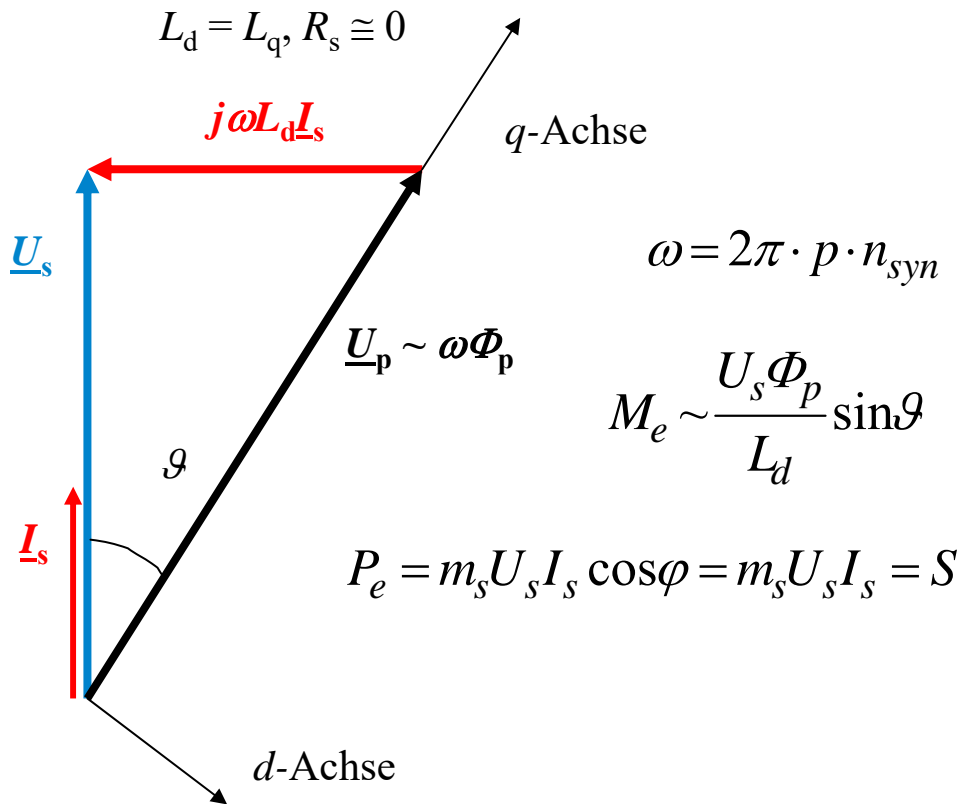


# Vollpolmaschine als drehzahl- veränderbarer Walzwerksantrieb (Stromrichterbetrieb) (2)

Zum Nachrechnen



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



- „Normalerregt“:  $\cos \varphi = 1$
- Umrichterscheinleistung  $S = \text{Wirkleistung } P_e$
- Minimal mögliche Umrichterbemessungsleistung  $S = P_e$ : **Kostengünstige Lösung!**



**Ergänzung**

## Gleichstrommaschinen und ihre Anwendungen (zu Kapitel 10)

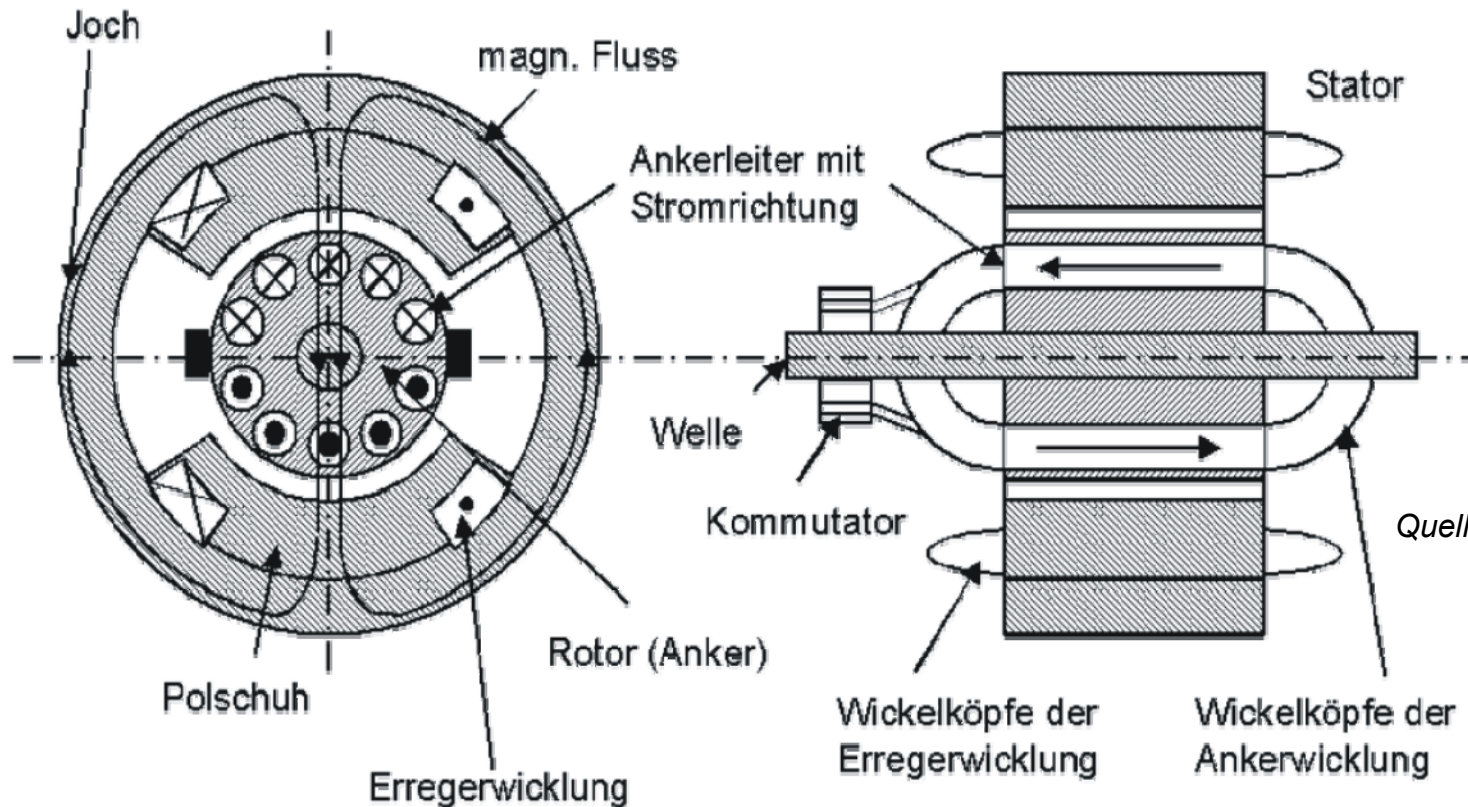
# Zweipolige Gleichstrommaschine Prinzip-Aufbau

Ergänzung



## Elektrische Felderregung

■ Weichmagnetisches Eisen



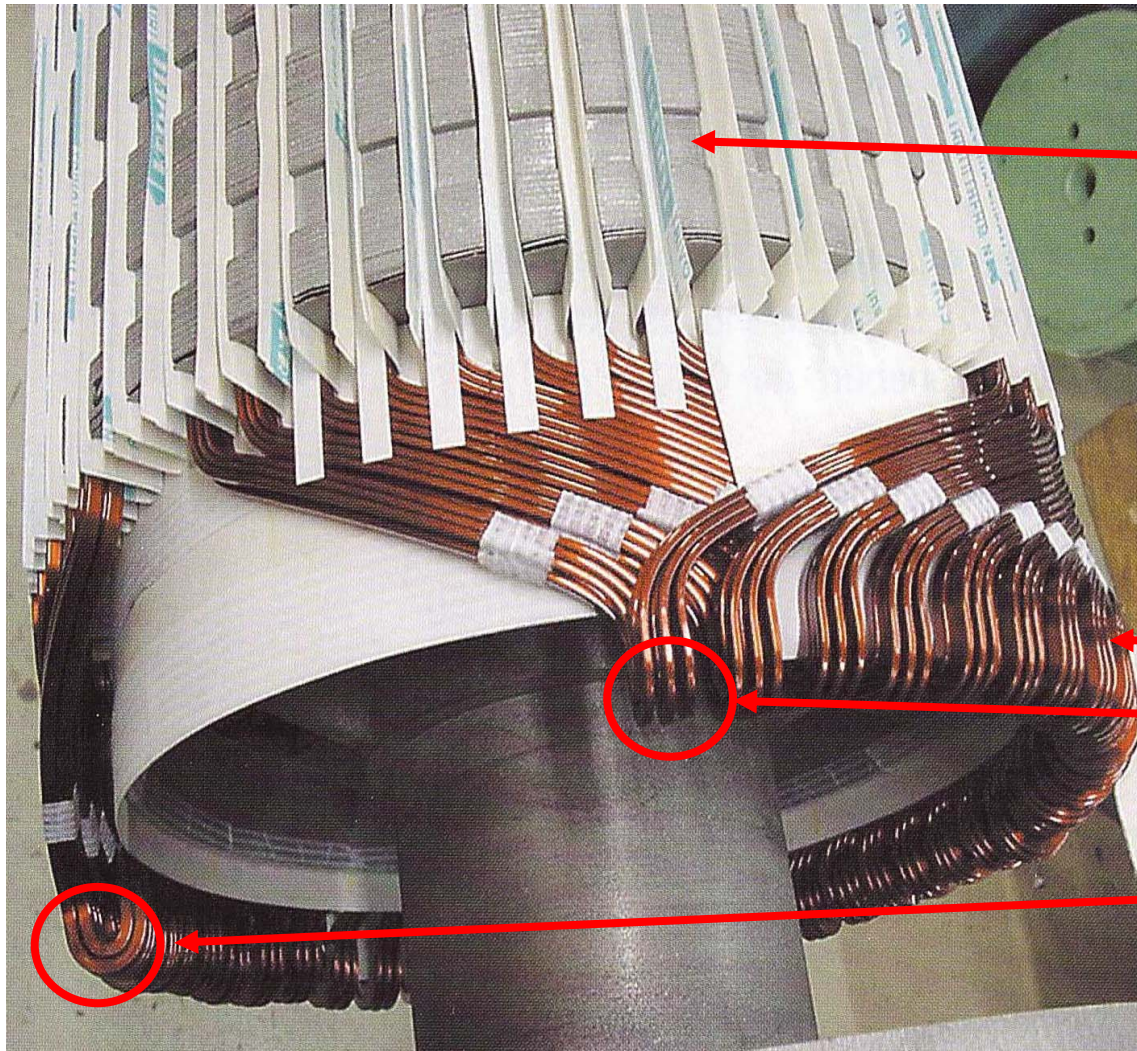
Quelle: Universität Stuttgart





# Einlegen der Zweischicht-Ankerspulen in keillose Nuten

Ergänzung



**Nuten ohne Keile:** Die Wicklung wird nur mit Glasfaserbandagen („Umfangsnuten“ im Blechpaket) bandagiert

Vorteil: Geringere Nuthöhe = geringere Ankerstreuinduktivität = **geringere Reaktanzspannung**

Vierpoliger Wickelkopf

$u = 3$  Spulenseiten je Nut und Schicht

$N_c = 2$  Windungen je Spule

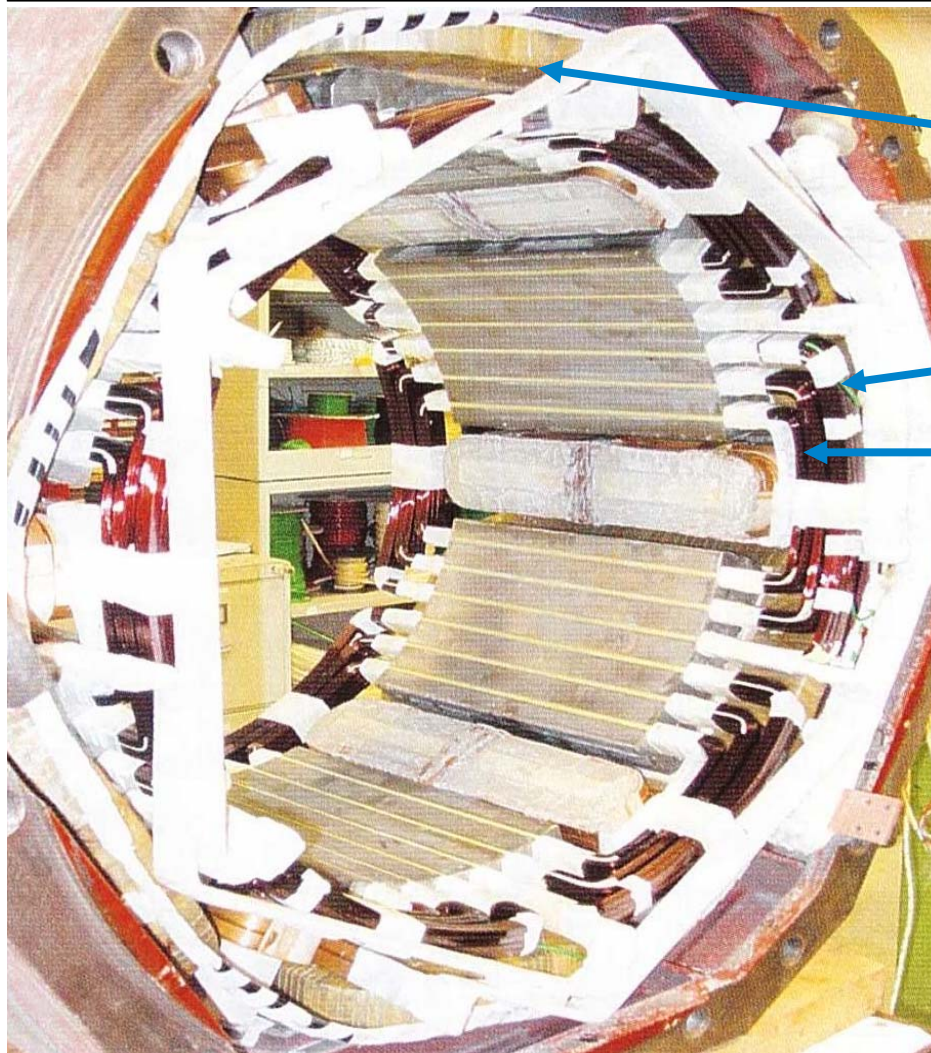
Quelle: Fa. Brenner, Bürstadt

# Bewickelte Ständerpole – sechspolig

Ergänzung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Erregerwicklung

Kompensations-  
wicklung

Wendepolwicklung

**Kompensierter Gleichstrommotor 970 kW**

Quelle: Fa. Brenner, Bürstadt



# Kleine permanentmagneterregte Gleichstrommaschinen

Ergänzung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Quelle: Faulhaber,  
Germany

**Gleichstrom-Kleinstmotoren für Präzisionsantriebe**



# Gleichstrom-Kleinmotoren und Getriebe

Ergänzung



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



**Gleichstrom-Kleinmotoren**

**Beispiel:** Ankerspannung ca. 4 ... 6 V, Leistung ca. 10 W



**Mehrstufige Kleingetriebe**

Quelle: Faulhaber,  
Deutschland



# Grosse Gleichstrom- Maschinen

Ergänzung

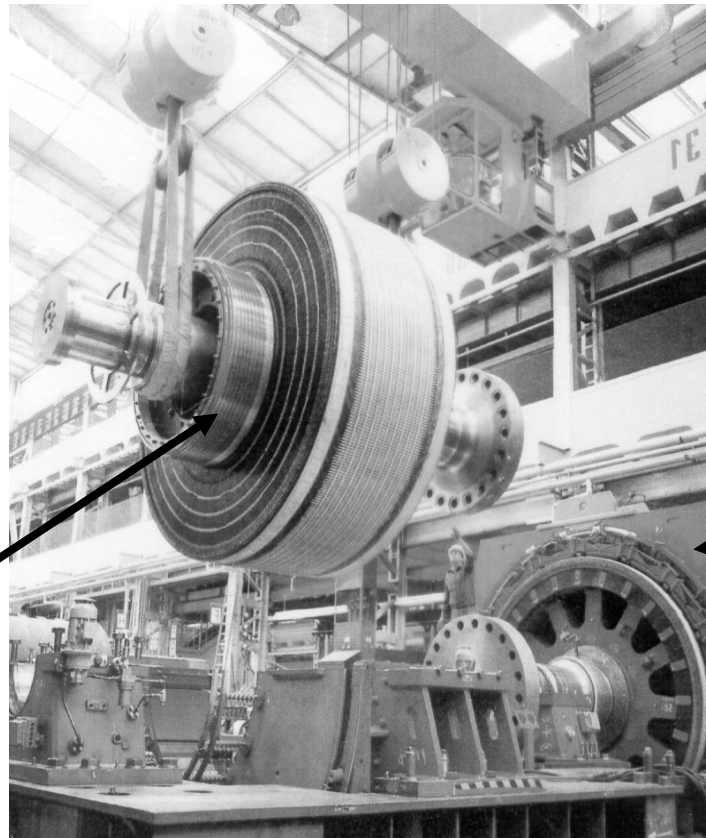


**Größte Gleichstrommaschinen** als Walzwerks-Grobgerüstantriebe mit 6 MW ... 12 MW bei Drehzahlen von ca. 100/min gebaut.

Um die Leistung weiter zu erhöhen, wurden zwei Maschinen hintereinander gekuppelt (**“Tandem”-Bauweise**)

**Montage eines Läufers einer Gleichstrommaschine 12 MW**

Kommutator



Zweite  
Gleichstrommaschine

Quelle: Siemens AG

