

Elektrische Maschinen und Antriebe



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Vorlesung WS 2 + 2

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



Quelle: Siemens AG



Elektrische Maschinen und Antriebe



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

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



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

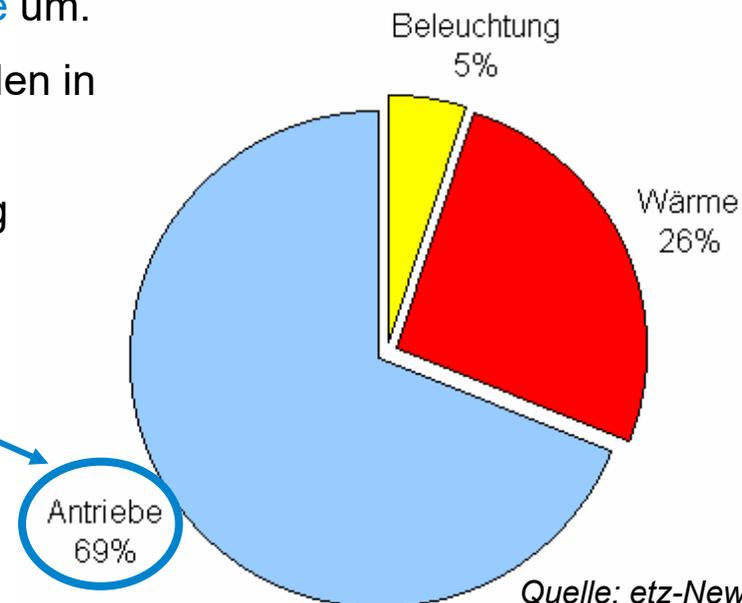
Bemessungsleistungen ca. 10^{-1} W ... 10^8 W



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 CO₂-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





Unvollständige Aufzählung:

- Repulsionsmotor
- Querfeldschweißgenerator,
- 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/m²

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

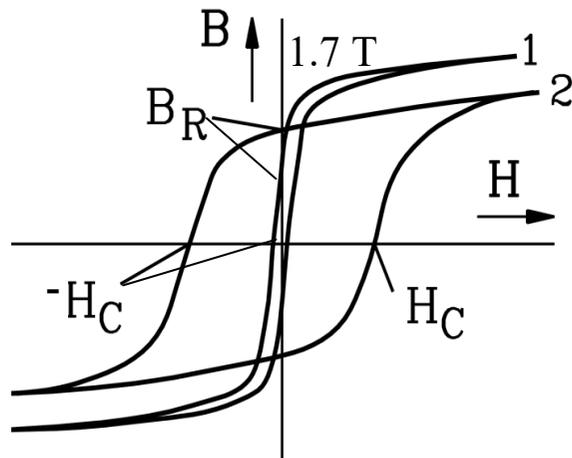
Ferro- und ferrimagnetische Werkstoffe (hier: isotrop angenommen)

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):** $\vec{F}(t) = i(t) \cdot (\vec{l} \times \vec{B}(t))$

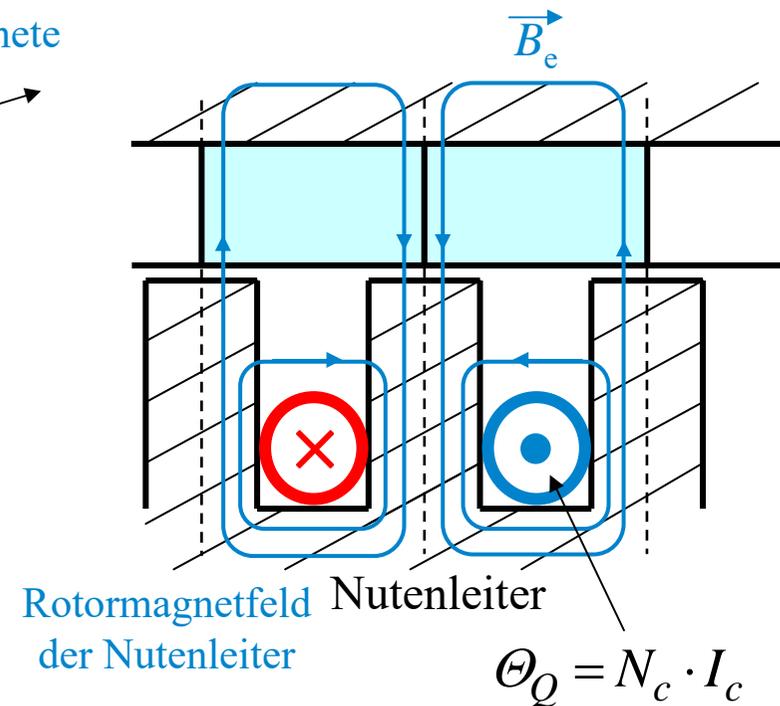
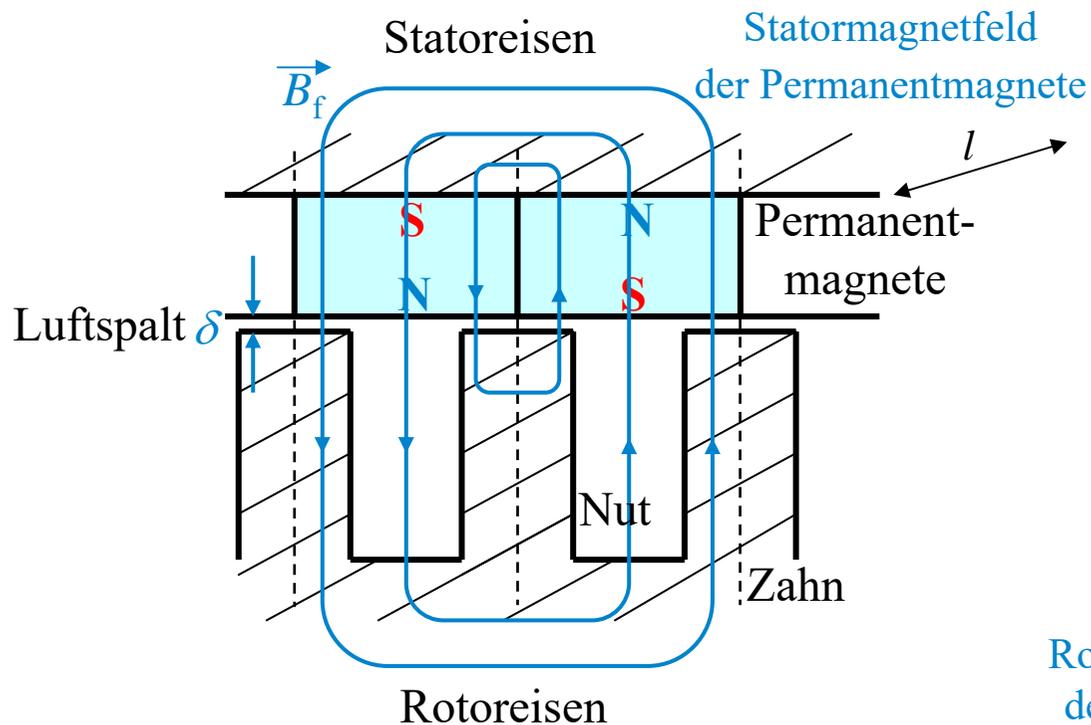
• **Kraft auf magnetisierbare Körper (Volumen V):** $\vec{F}(t) = \int_V \vec{f}(\vec{B}, \vec{x}, t) \cdot dV$

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



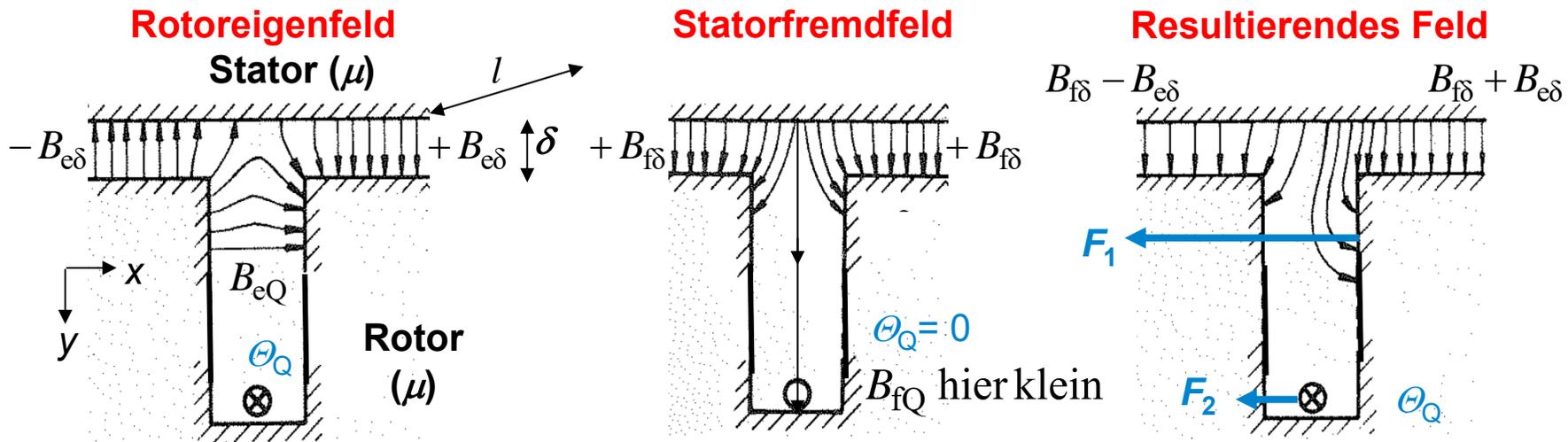
Beispiel: Periodische Nut-Zahn-Struktur: Genuteter Rotor, ungenuteter Stator

- 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:

$$\Theta_Q = 0, \text{ kein Eigenfeld:}$$

$$B_e = 0$$

- Nur Stator-Fremdfeld:

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

$$\text{Am Leiter: } B_{fQ} > 0$$

Kraft F_c auf den Rotor ist

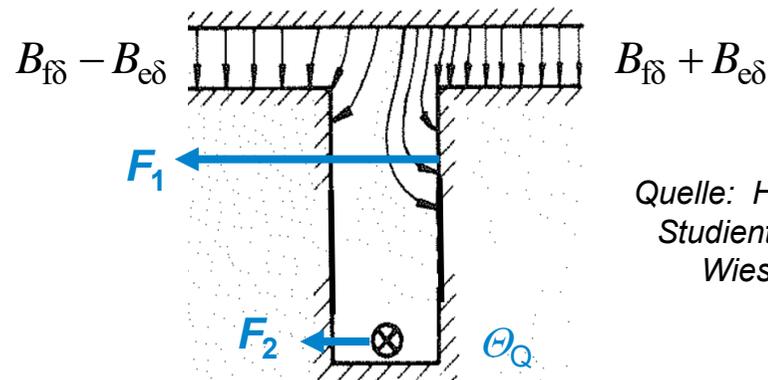
- 1: überwiegend magnetischer Zug an der Zahnflanke F_1
- 2: nur kleiner Anteil ist Leiterkraft F_2 (bei N_c Windungen)

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

Quelle: H. Kleinrath, Studentext 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

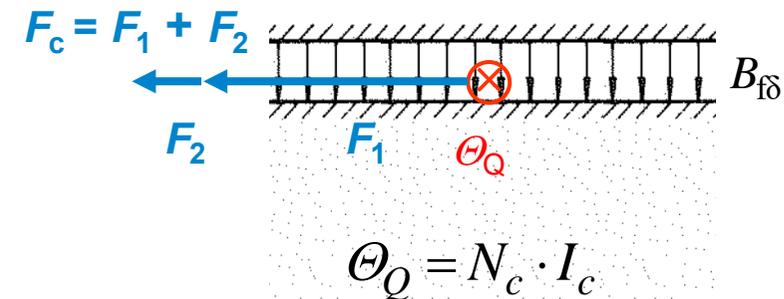
$$\vec{F}_1(t) = \int \vec{f}(\vec{B}, \vec{x}, t) \cdot dV$$

- 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



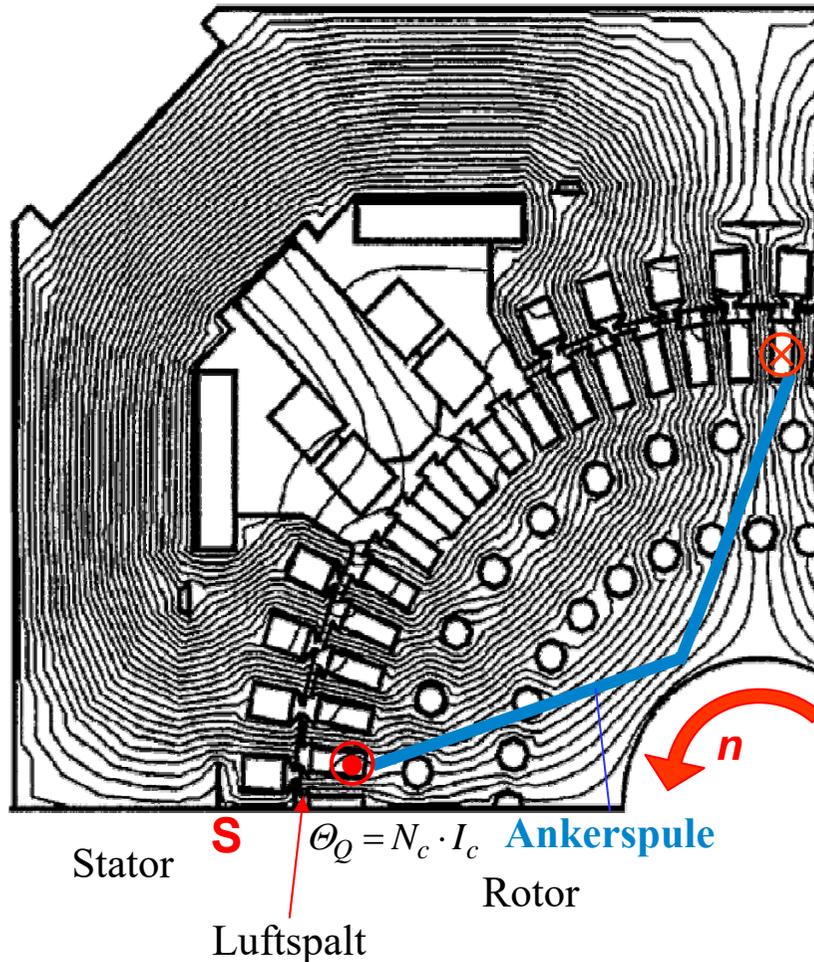
$$\Theta_Q = N_c \cdot I_c$$

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

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

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

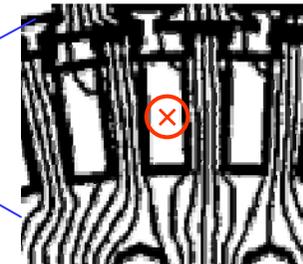
Beispiel: Kraft auf Gleichstrommaschinen-Rotor



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 μ 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*



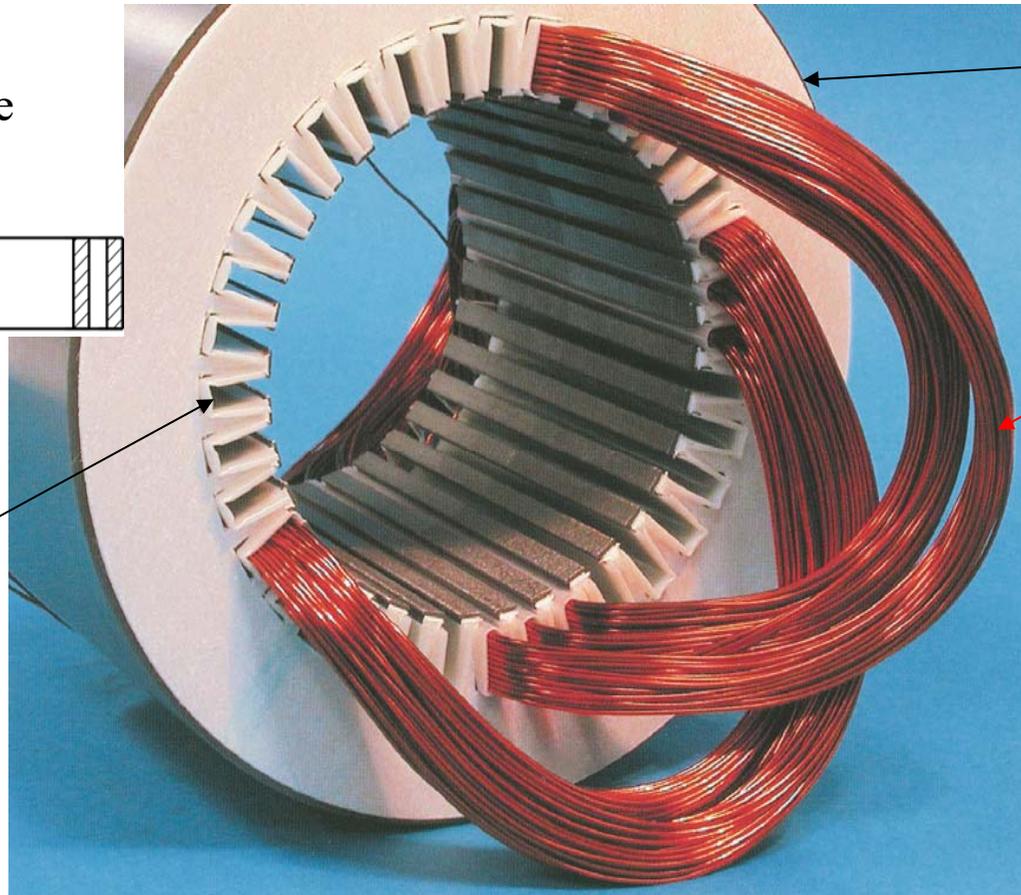
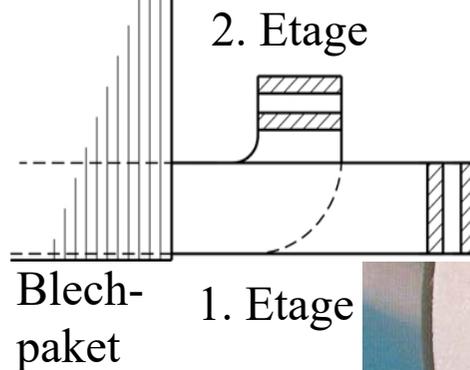
Komponenten elektrischer Maschinen

(zu Kapitel 2, 3 & 4)

Einschichtwicklung - Einlegebeispiel

Ergänzung

Bsp.: $q = 2$



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

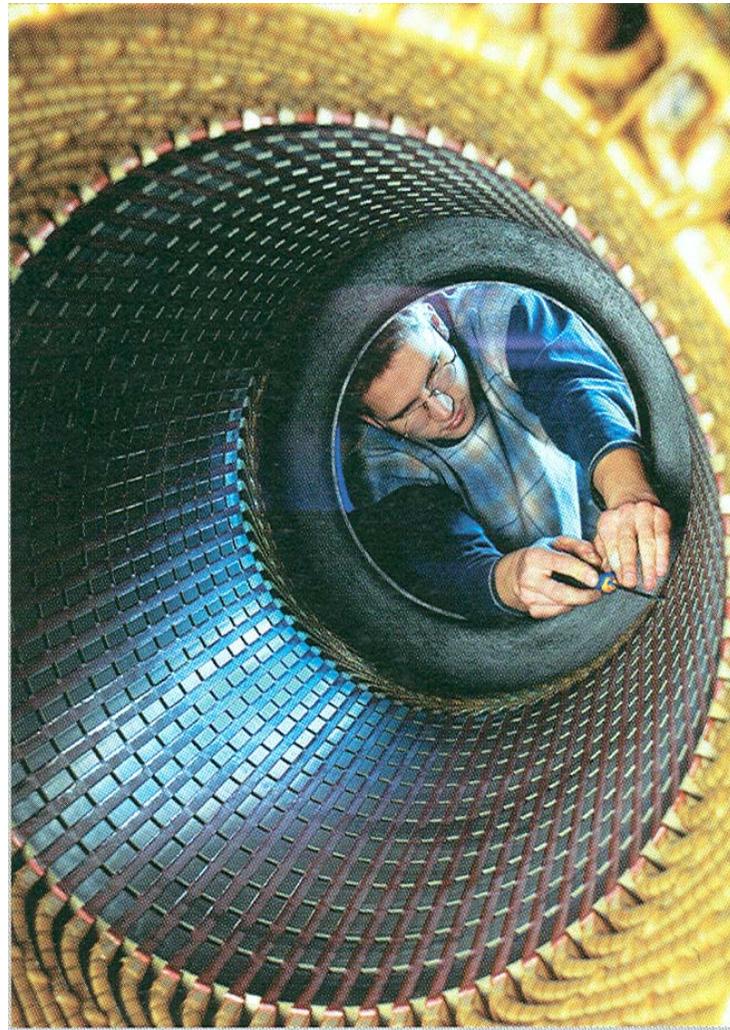
72 Spulen

$m = 3$ 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

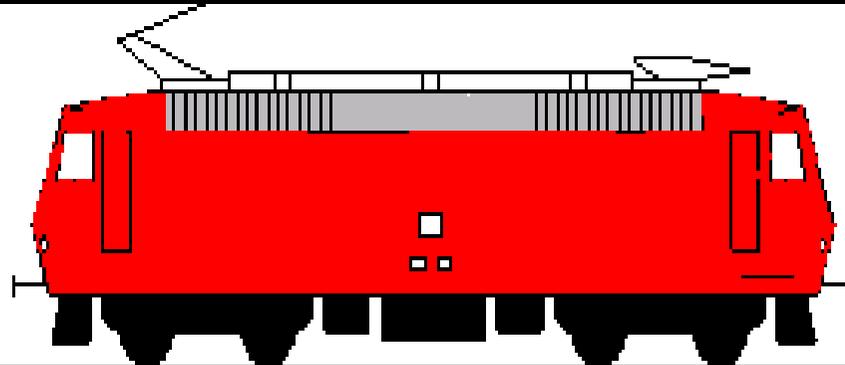
Komplette Stator-Drehstrom- -Zweischichtwicklung

Ergänzung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

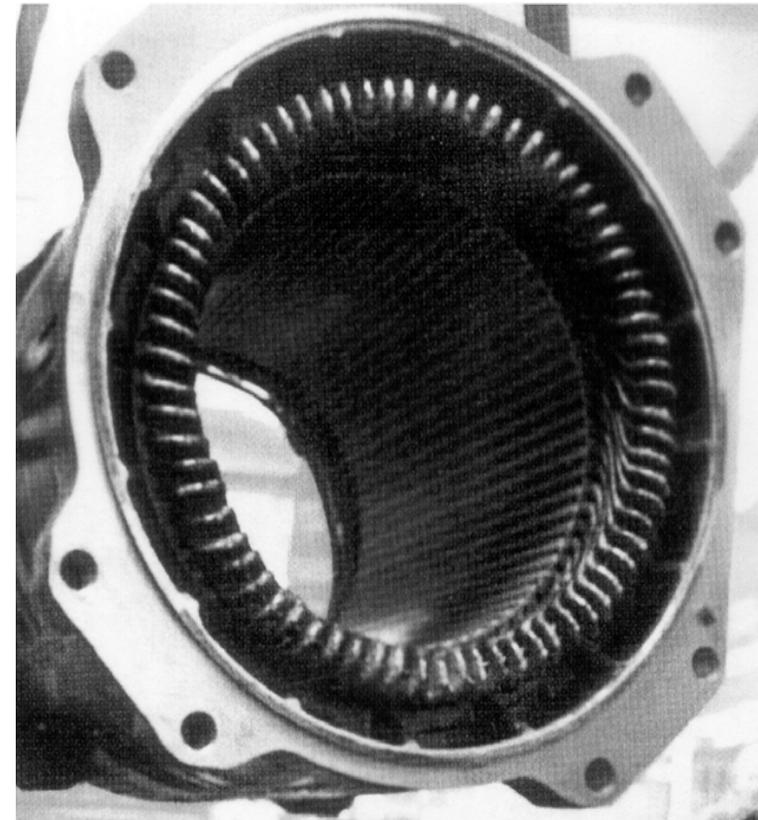
15 kV, 16.7 Hz



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

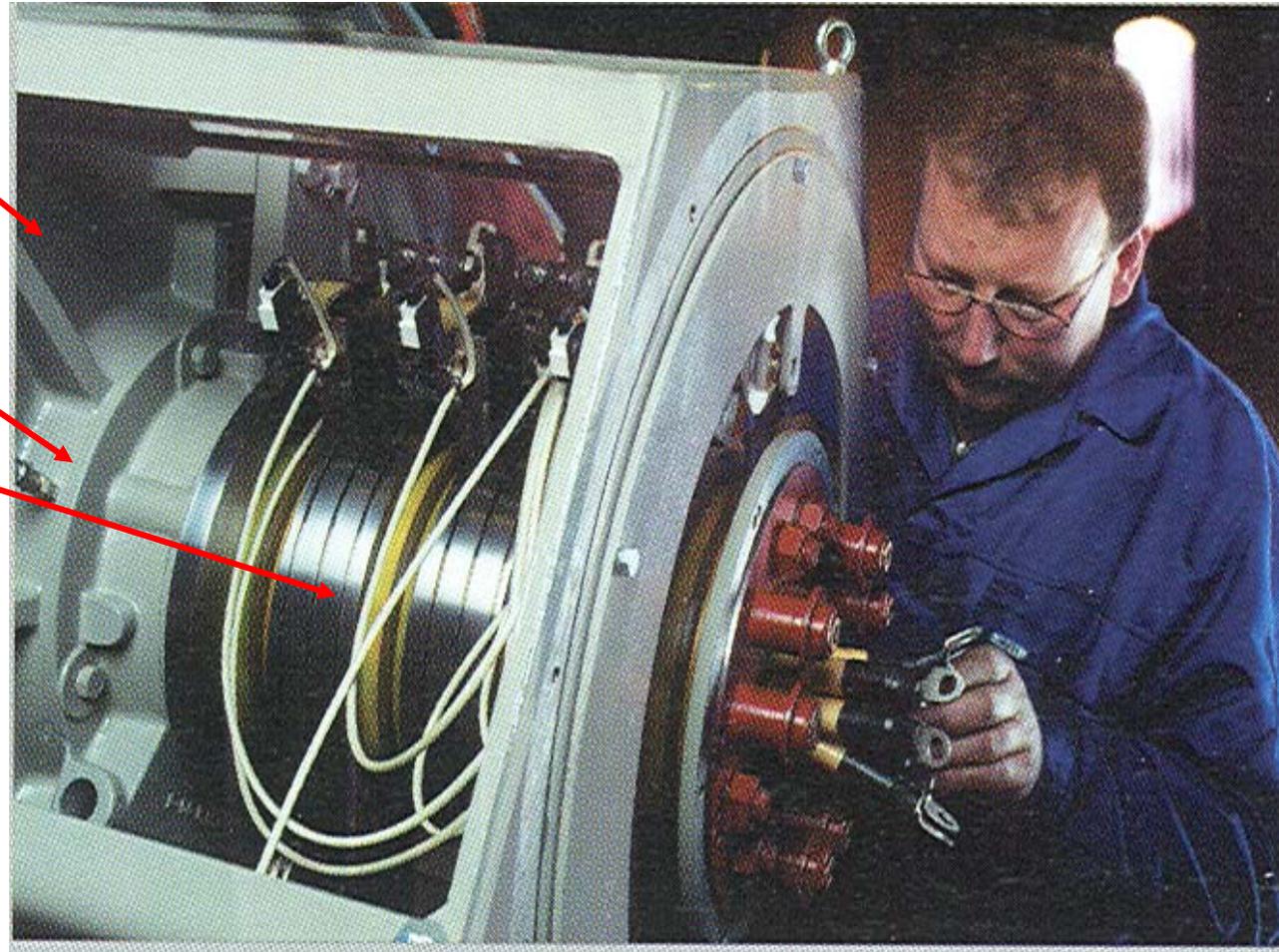


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

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



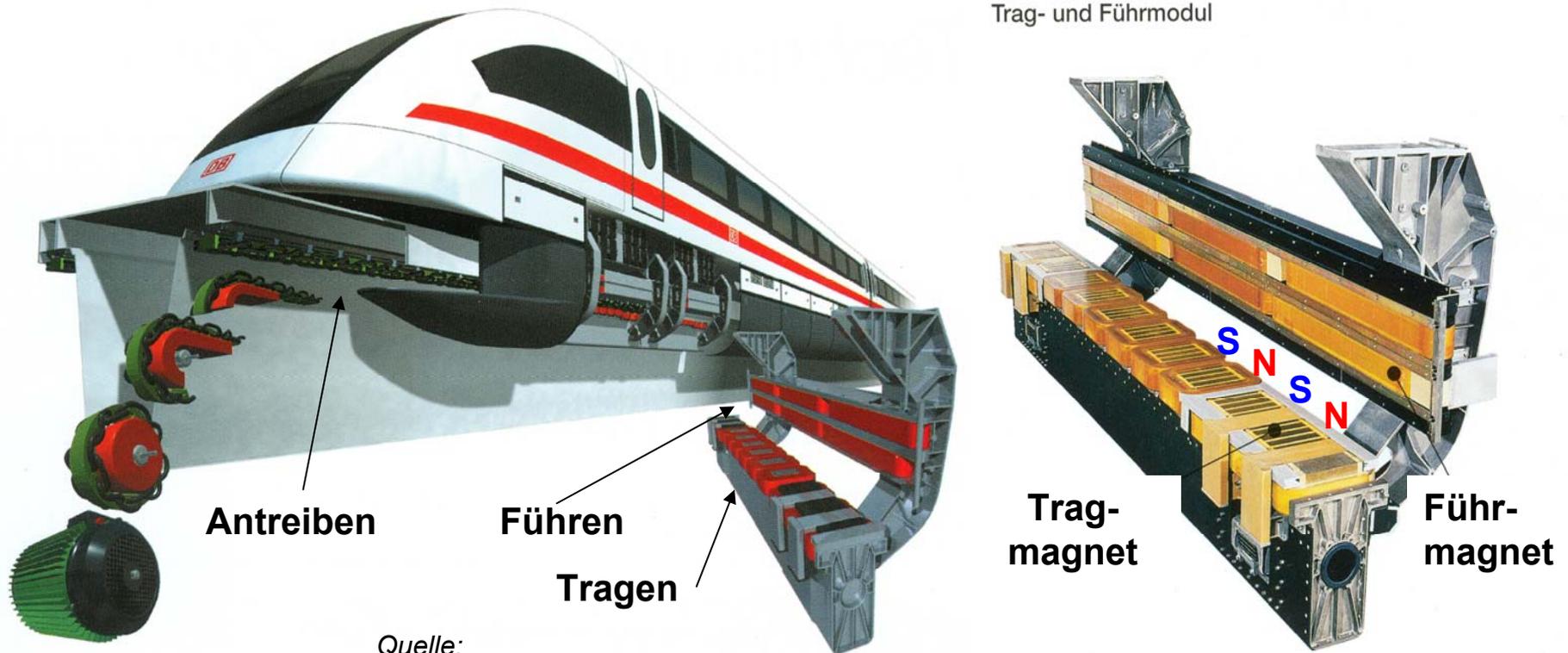
Tragen und Führen beim *TRANSRAPID*



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Ergänzung

Trag- und Führmodul



Quelle:

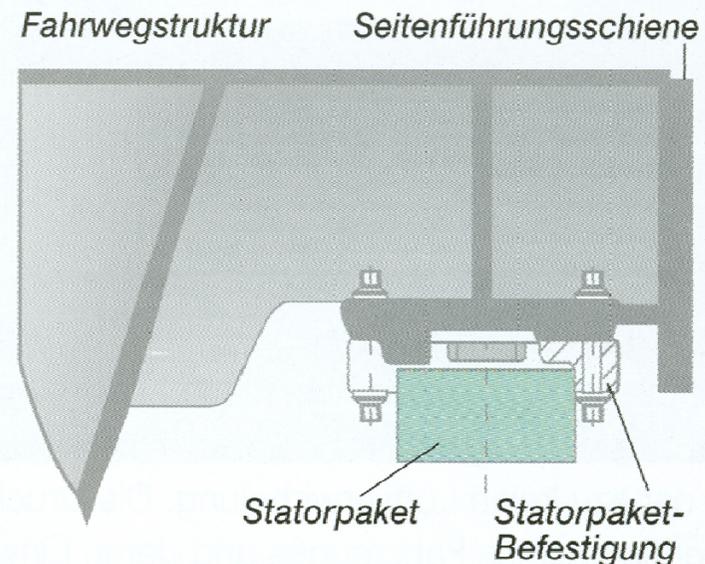
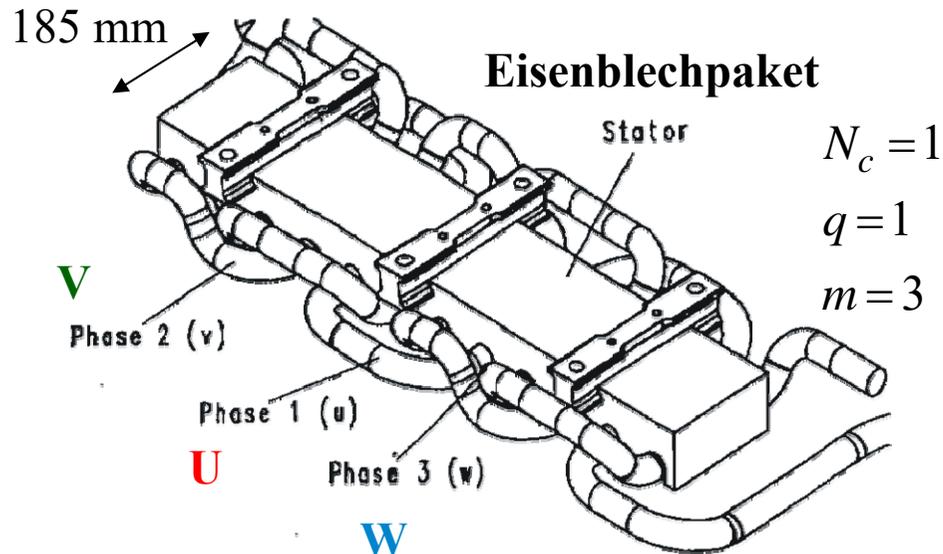
Thyssen Krupp & Siemens, Deutschland

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

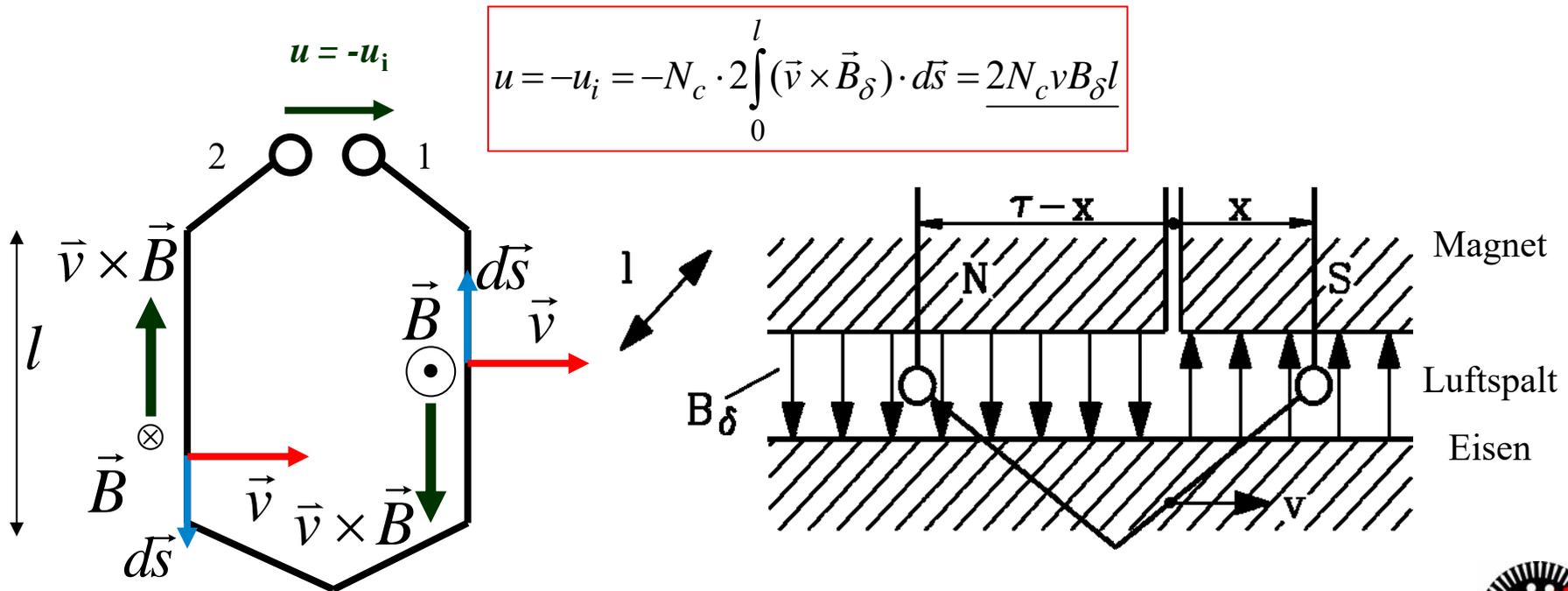
Beispiel:
Induktionsgesetz:
Einfache Linearmaschine (1)

Zum selber üben



- Spule (Windungszahl N_c , Spulenweite τ) 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 Flussverkettings-
änderung $d\Psi/dt$ auf Grund der Spulenbewegung auf, da sich die Ortskoordinate ändert:

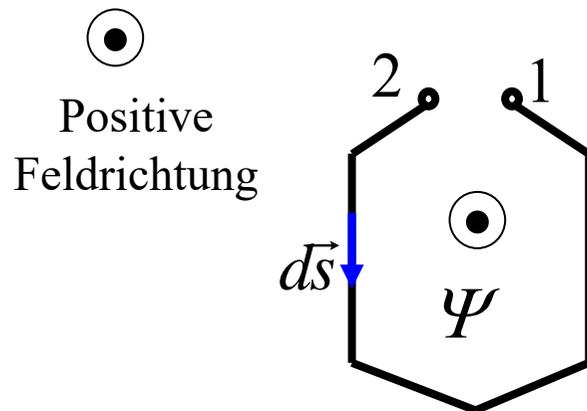
$$x = \int v \cdot dt \rightarrow v = dx/dt$$

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

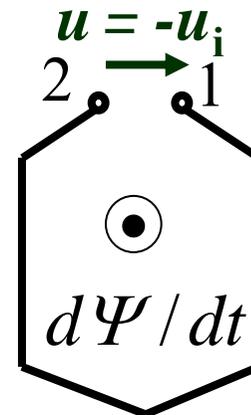
Klemmenspannung: $u = -u_i = -(-d\Psi/dt) = -N_c l B_\delta \cdot d(\tau - 2 \cdot x)/dt = \underline{2N_c v B_\delta l}$

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



$d\Psi/dt > 0$:
Flussverketting 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} :

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

$$P_m = 2\pi n M_e$$

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

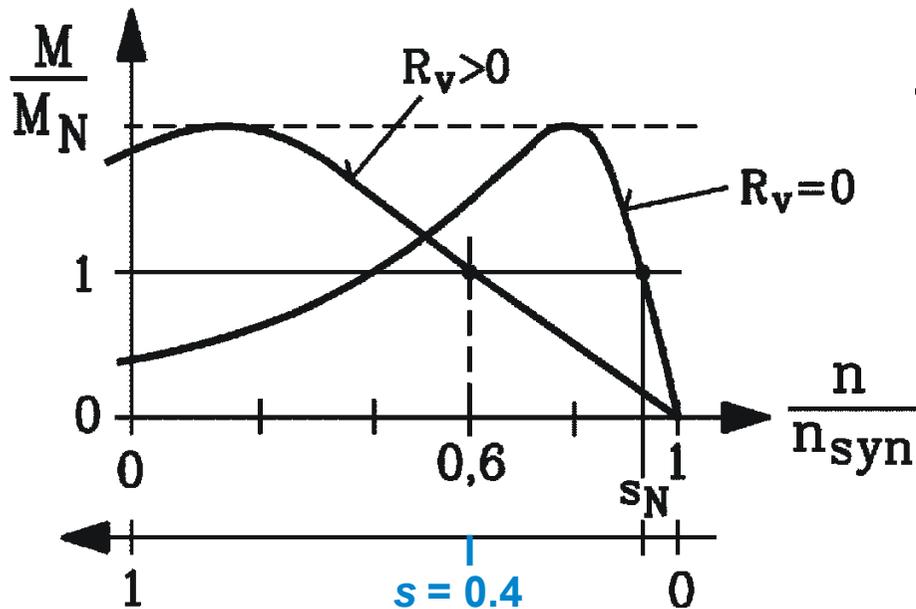


Läuferwiderstände (2)

Zum selber üben



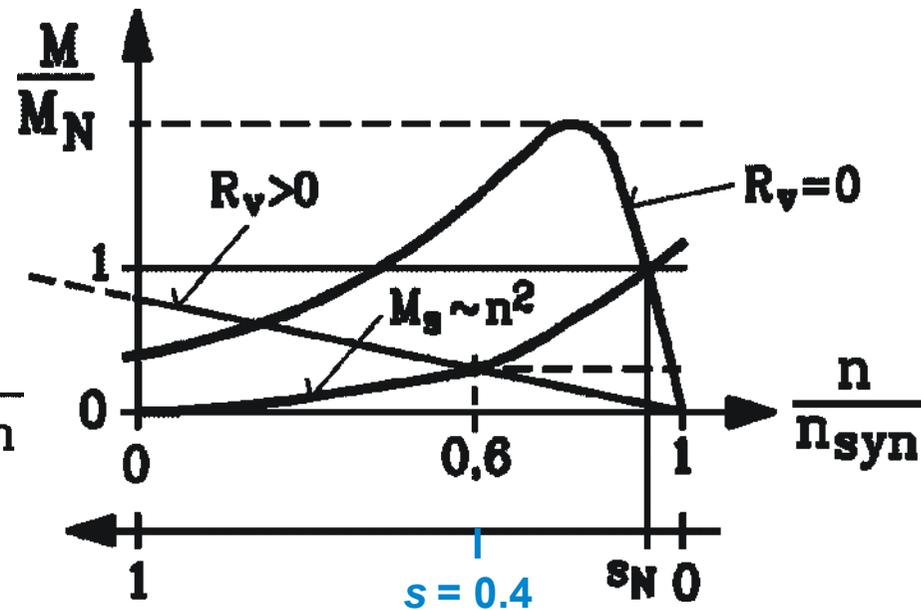
$M(n)$ -Kurve eines Schleifringläufer-Asynchronmotors mit externen Widerständen als **drehzahlveränderbarer Antrieb**



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
$(P_{Cu,r} + 3R_v I_r^2) / P_{\delta N}$	0.4 (!)	0.14

- **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 !

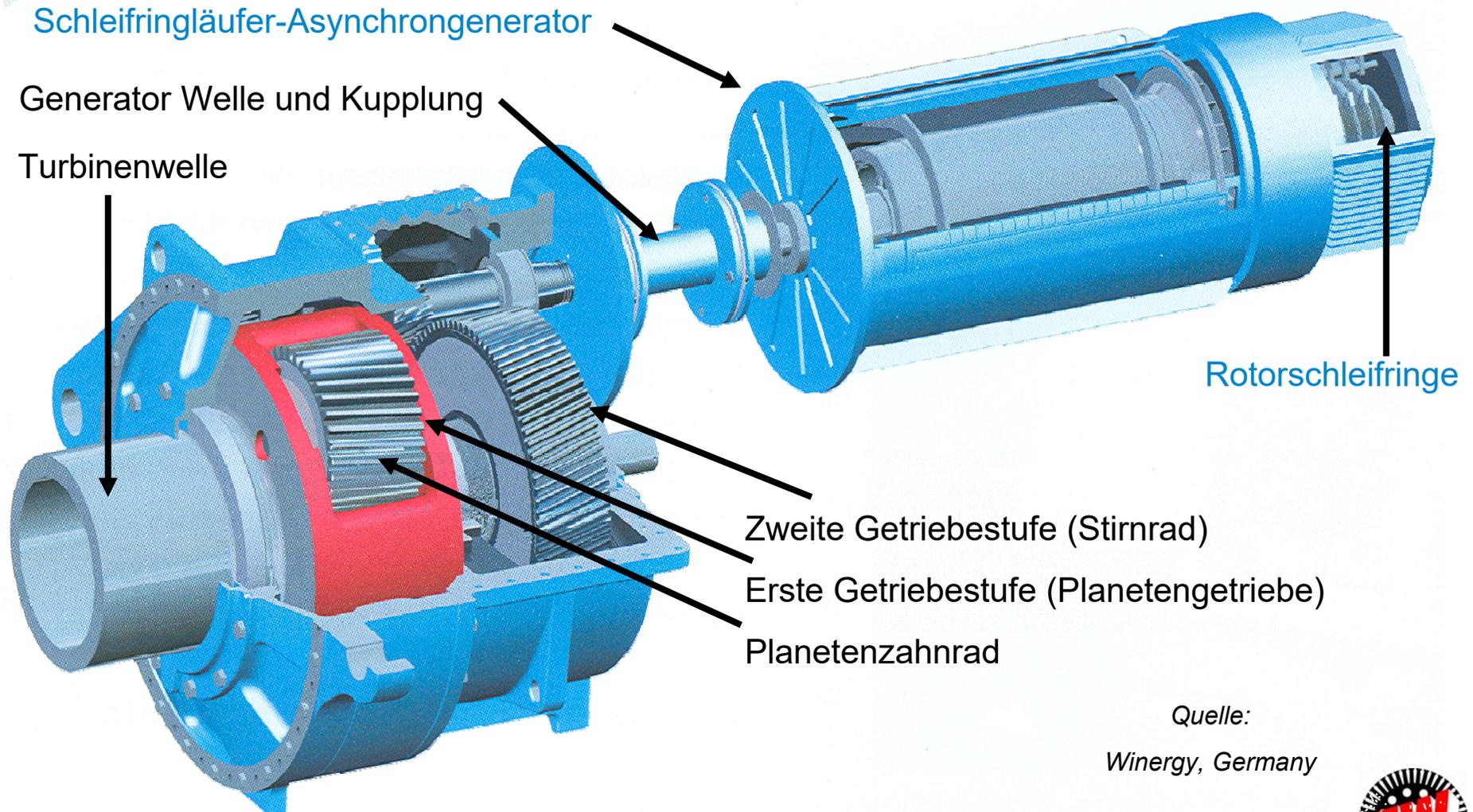


Schleifringläufer-Asynchronmaschine als Windgenerator



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Ergänzung



Quelle:
Winergy, Germany

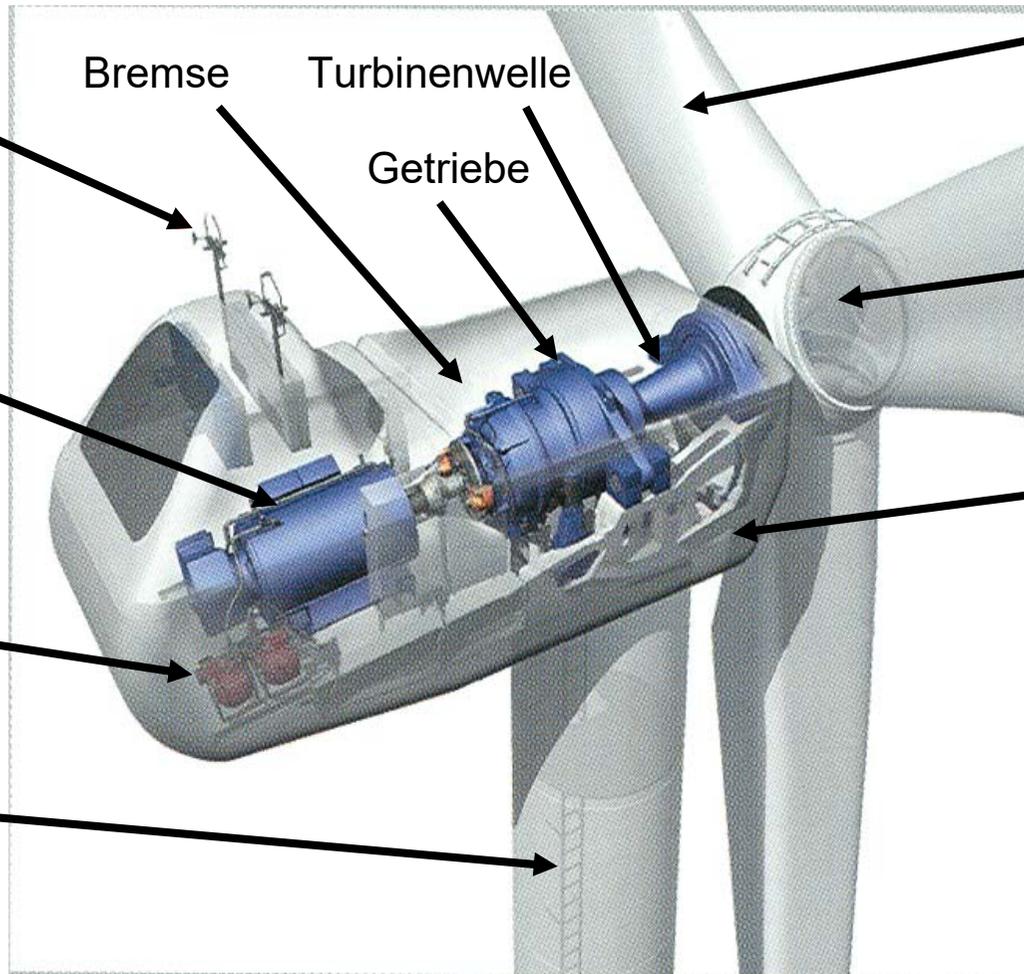


Windgeschwindig-
keits- und
Richtungsmesser

Wassermantel-
gekühlter
doppeltgespeister
Asynchron-
generator mit
Schleifringläufer

Wasserpumpe für
Kühlkreislauf

Mast



Rotorblätter

Nabe

Gondel

Quelle:
Winergy
Germany



Beispiel: Doppeltgespeister Asynchron- Generator für Windturbinen

Ergänzung



Schleifringläufer

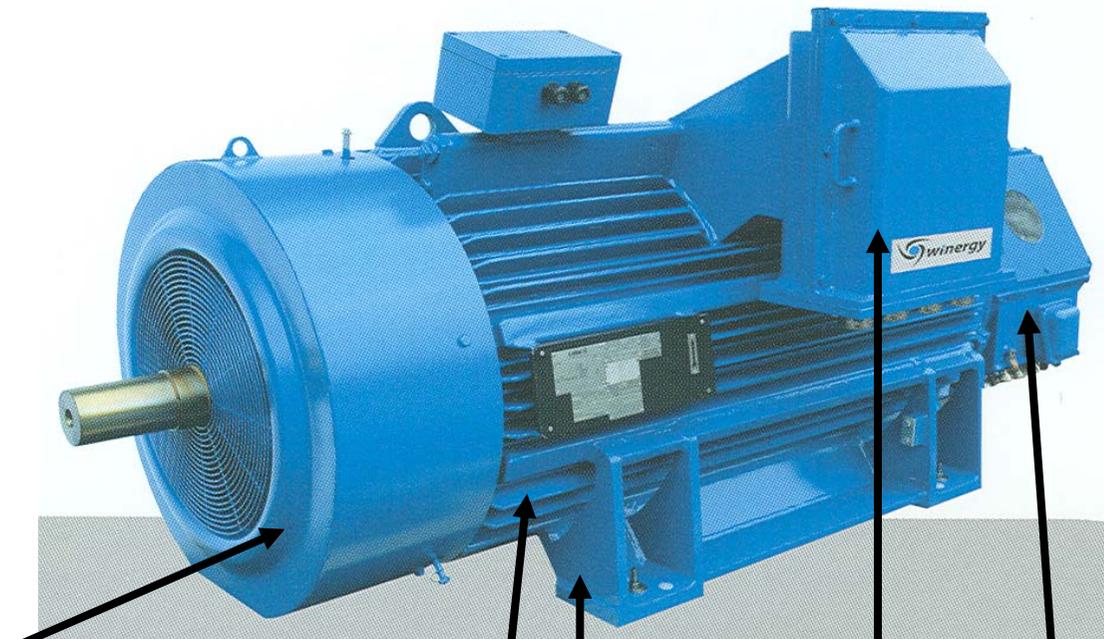
Getriebe 1: 60 zwischen
Windrotor u. schnell
drehendem Generator

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:

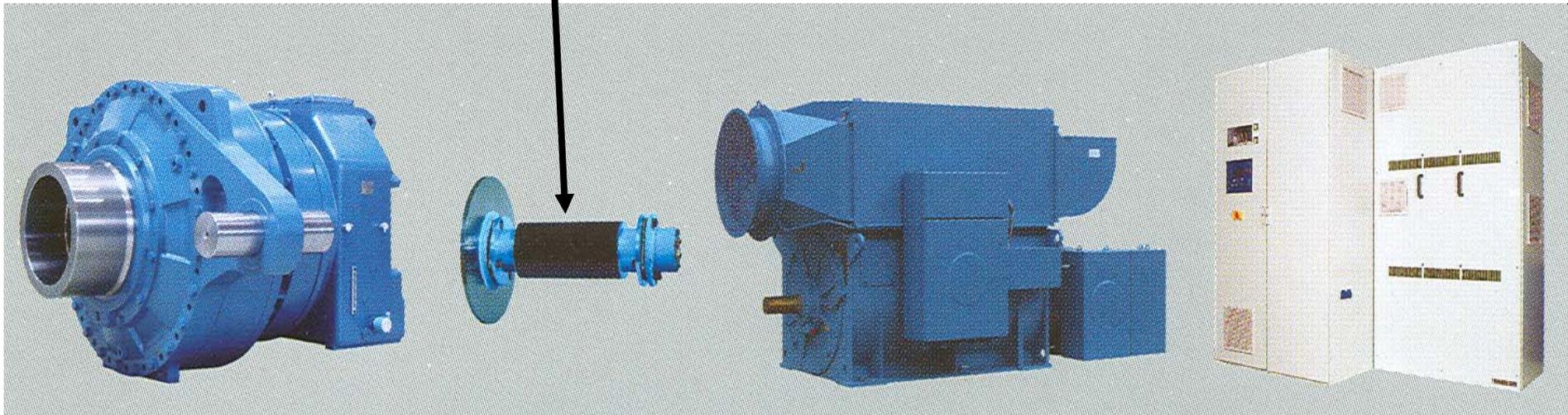
Winergy, Germany



Komponenten eines doppeltgespeisten asynchronen Windgeneratorsystems 2 MW

Ergänzung

Kohlefaserwelle:
isoliert elektrisch



Dreistufiges
Getriebe

Generatorkupplung
und Bremsscheibe

Schleifringläufer-Asynchron-
generator

rotorseitiger Umrichter

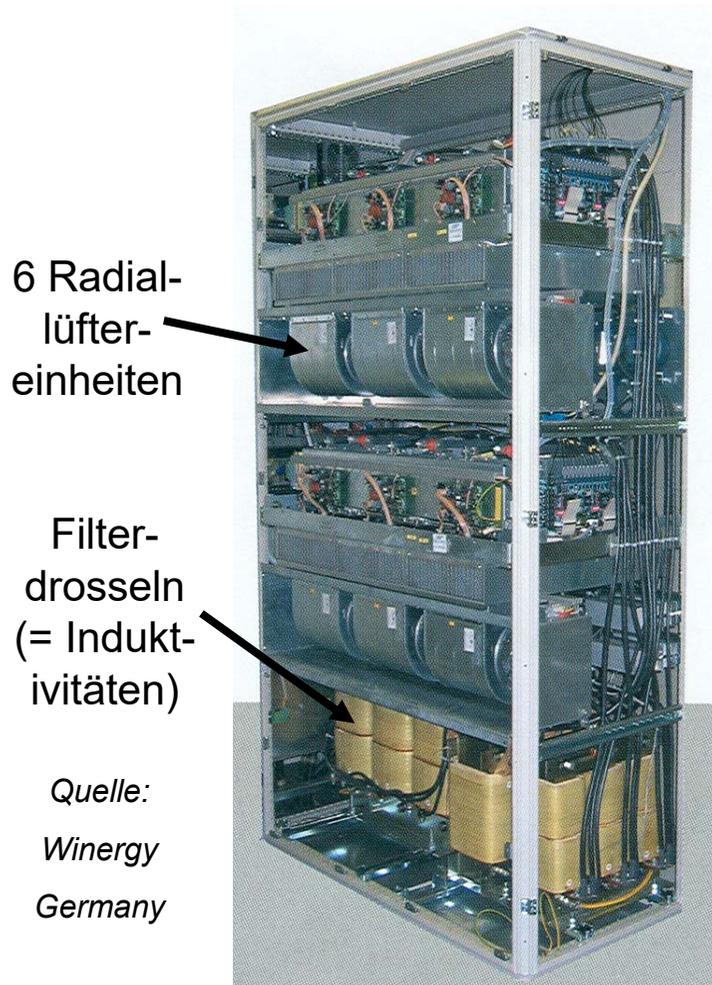
1. Stufe: Planetengetriebe
2. u. 3. Stufe: zweistuf. Stirnradgetriebe } $i = 100$

Quelle:

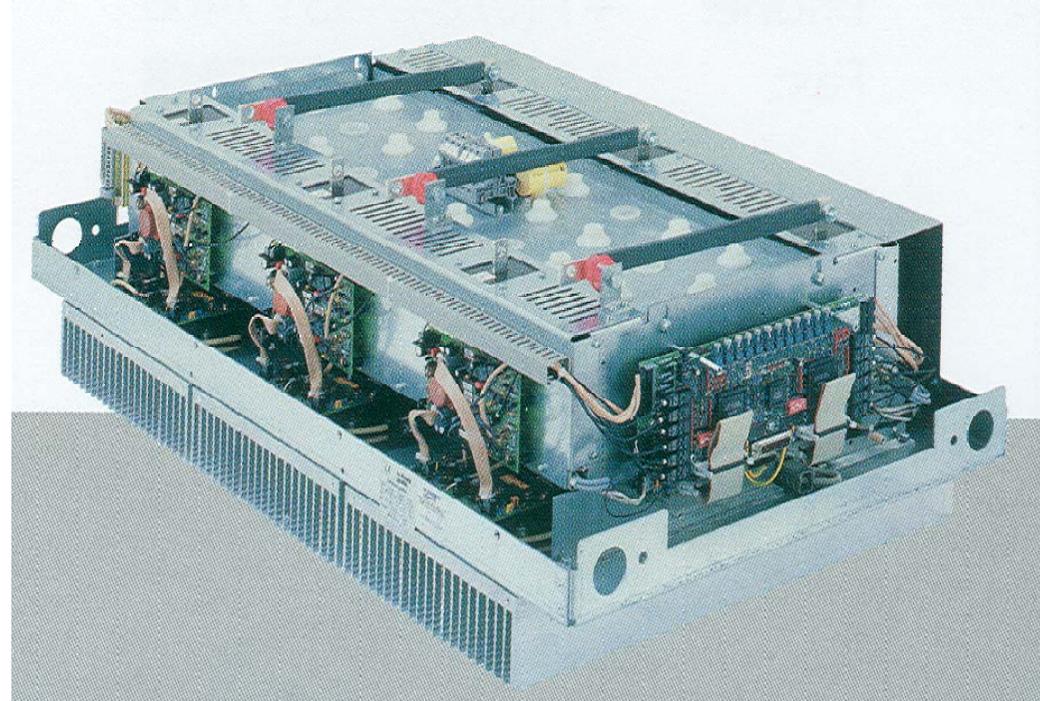
Winergy, Germany

Rotorseitiger PWM-Spannungswidchenkreisumrichter

Ergänzung



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

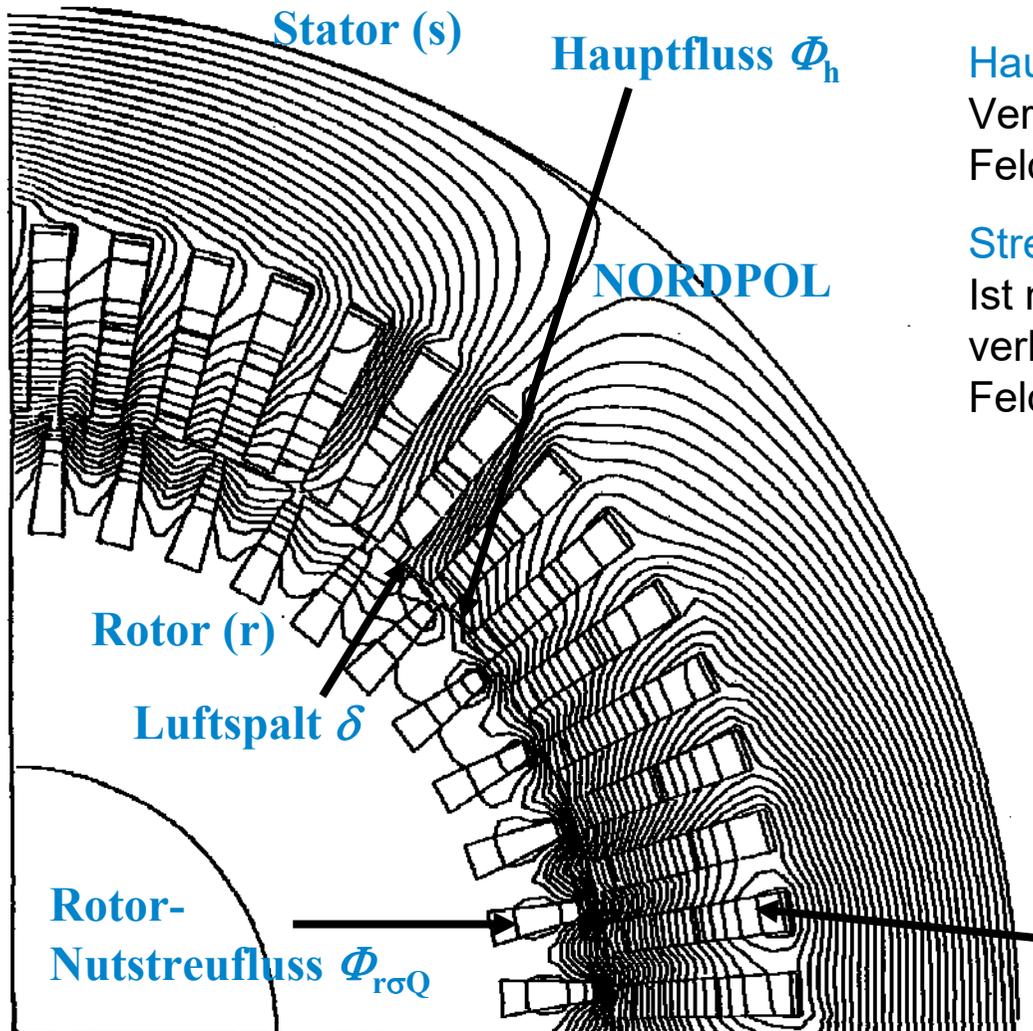
Rotorseite: Bemessungsstrom = Rotornennstrom

Ergänzung

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

Feldbild einer Käfigläufer-Asynchronmaschine

Ergänzung



Hauptfluss Φ_h :
Verkettet Stator- mit Rotorwicklung;
Feldlinien gehen daher über den Luftspalt

Streufluss Φ_σ :
Ist nur mit Stator- oder Rotorwicklung
verkettet,
Feldlinien gehen NICHT über den Luftspalt

Beispiel:

Vierpoliger Keilstabläufer:

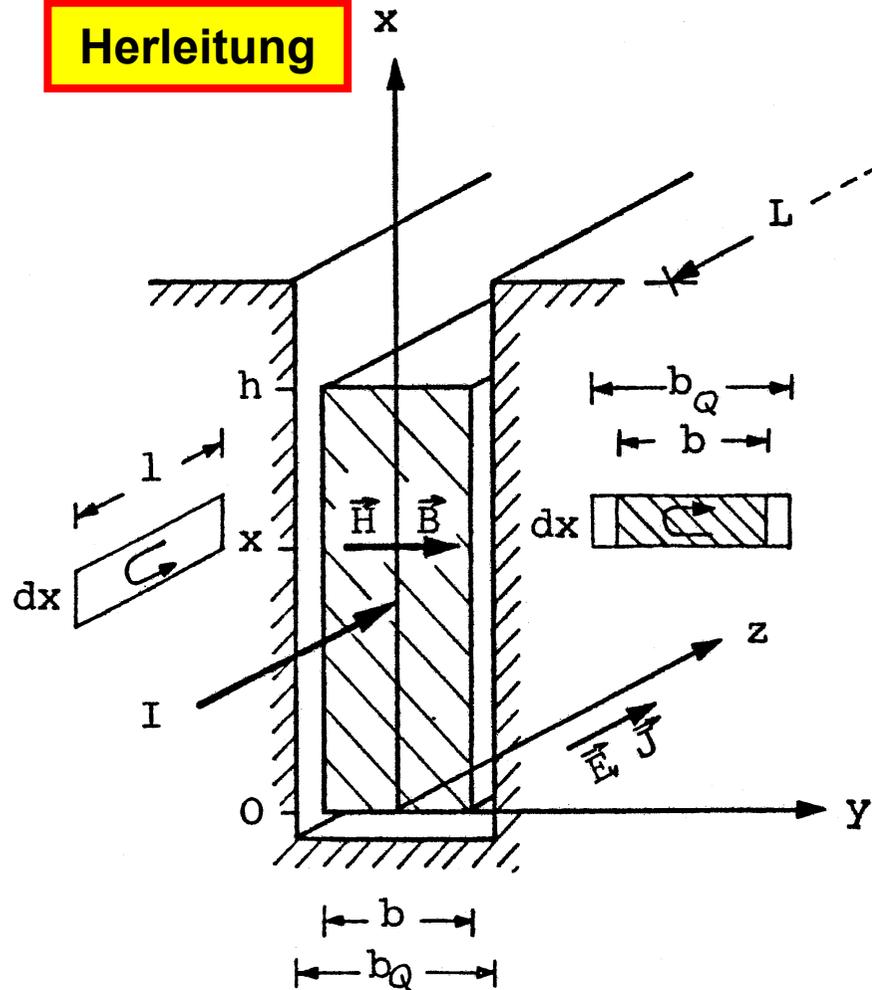
$$m_s = 3, q = 5, W/\tau_p = 13/15$$

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



- Betrag der Stromdichteverteilung J :

Formeln: $\text{sh}(x + jy) = \text{sh } x \cos y + j \text{ch } x \sin y$
 $\text{ch}(x + jy) = \text{ch } x \cos y + j \text{sh } x \sin y$

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

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

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

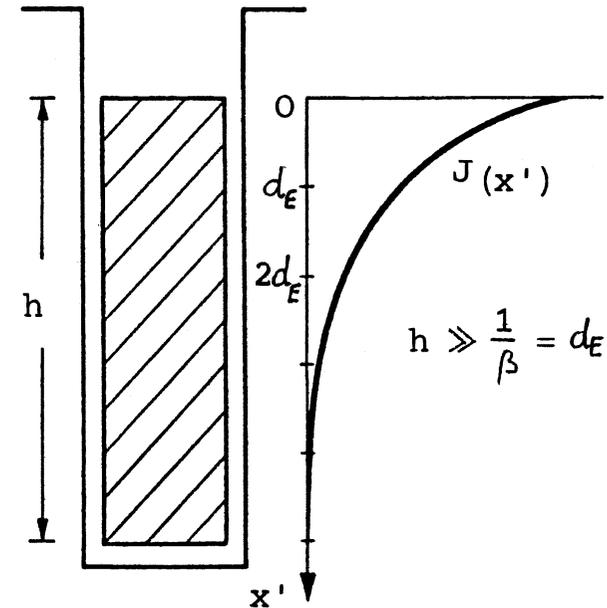
$\text{ch}(2\beta \cdot x) = (e^{2\beta \cdot x} + e^{-2\beta \cdot x}) / 2 \approx e^{2\beta \cdot x} / 2$

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

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

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 $k_R \cong \xi$.

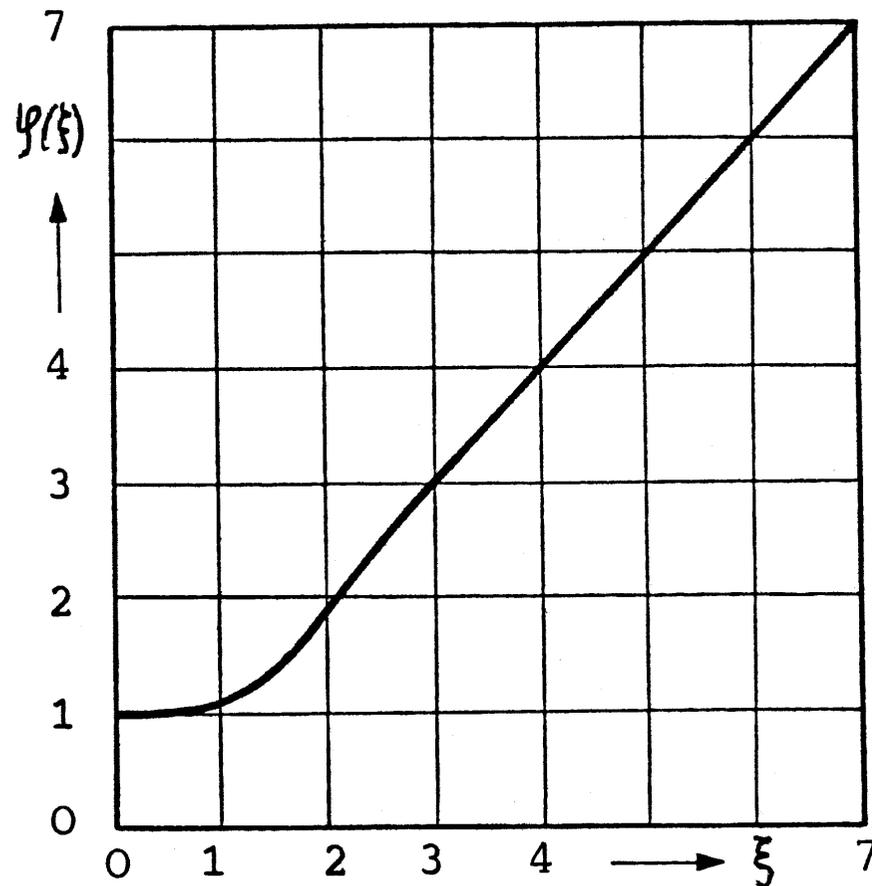


Verlustzunahme im massiven Rechteck-Nutenleiter

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



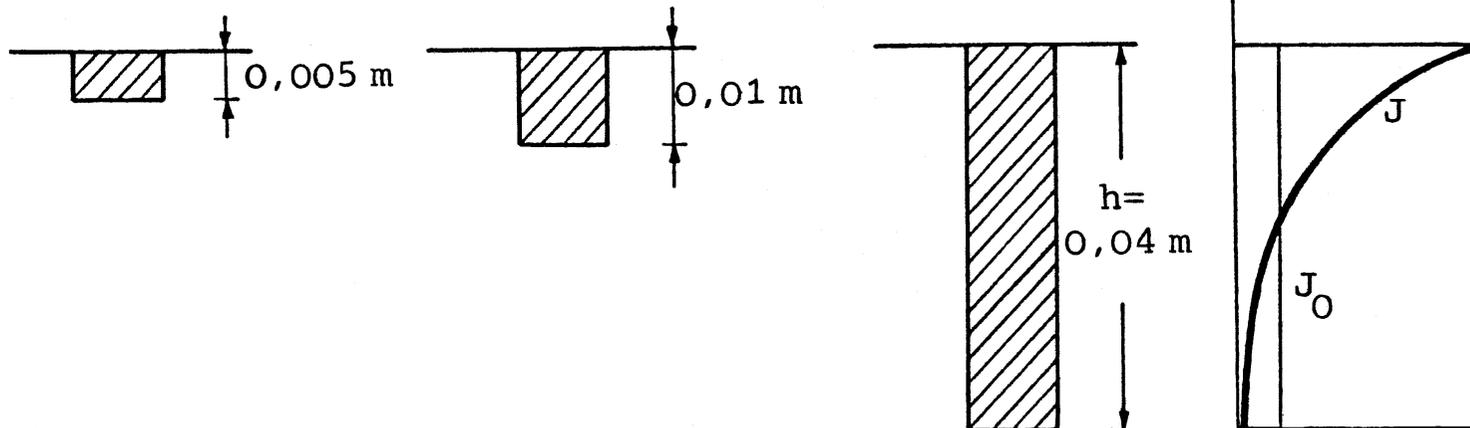
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

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



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

$$k \approx 1,0$$

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

$$k = 1,09$$

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

$$k = 4,0$$

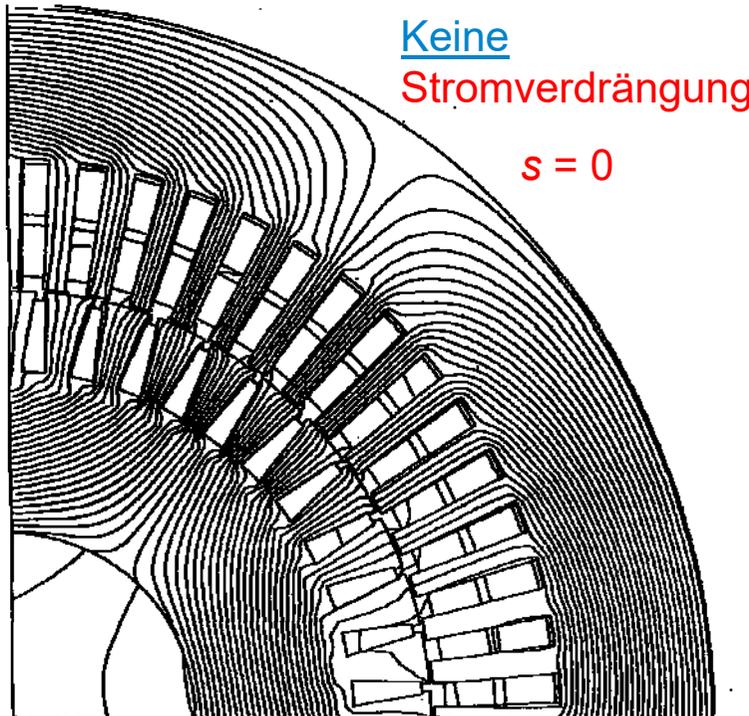
Verlustzunahme



Stromverdrängung im Feldbild

Beispiel: Keilstabläufer

Ergänzung

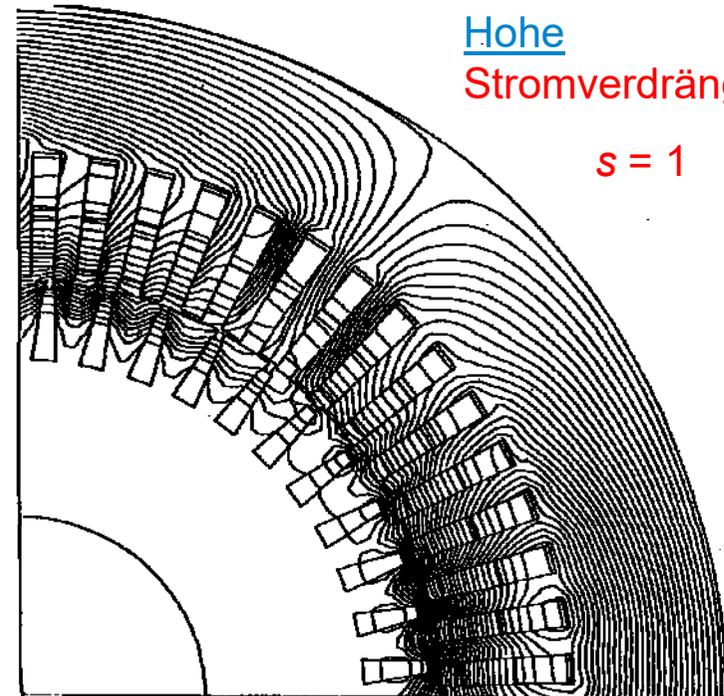


Keine
Stromverdrängung

$s = 0$

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

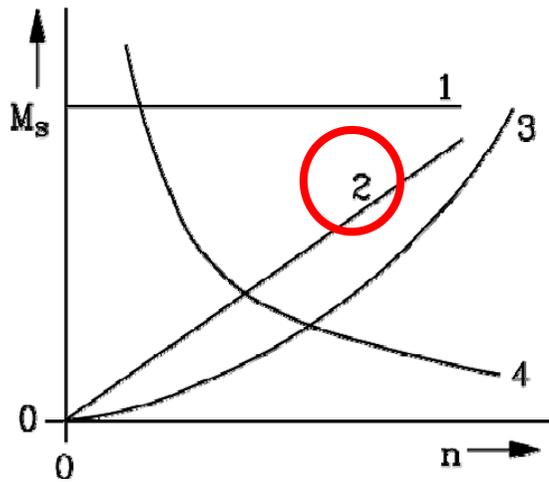
Ergänzung



Quelle: Aradex, Germany

Extruder für Kunststoff-Spritzgussmaschinen

Ergänzung



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

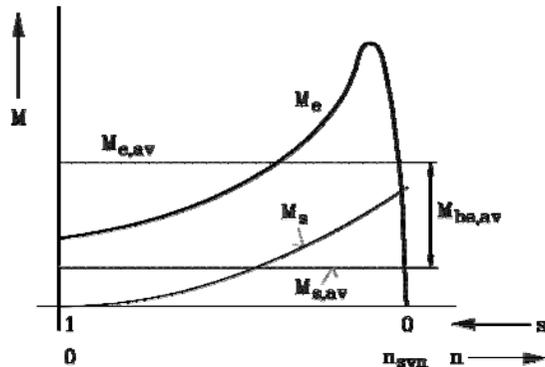
Wassermantelgekühlter
Käfigläufer-Antriebsmotor

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

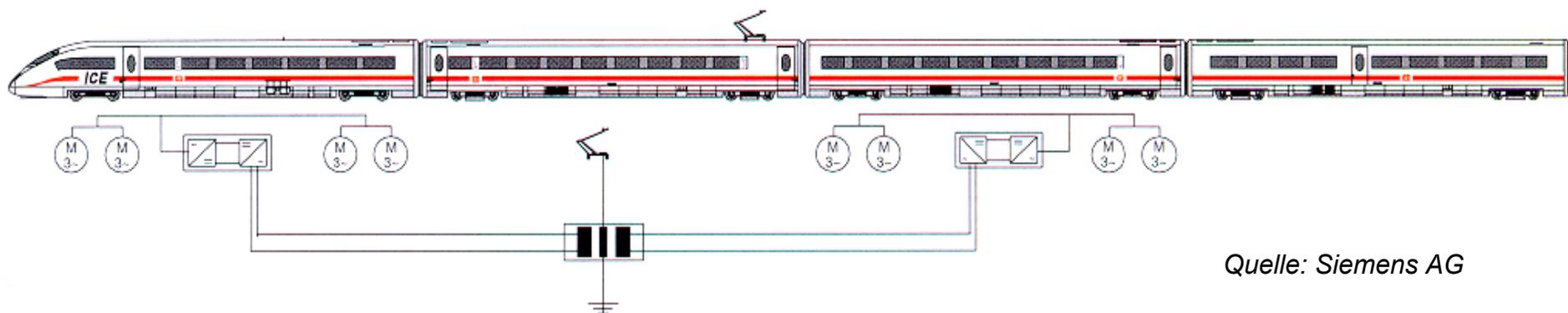


Triebwagenkonzept : ICE 3 mit verteilten Asynchron-Antrieben

Ergänzung



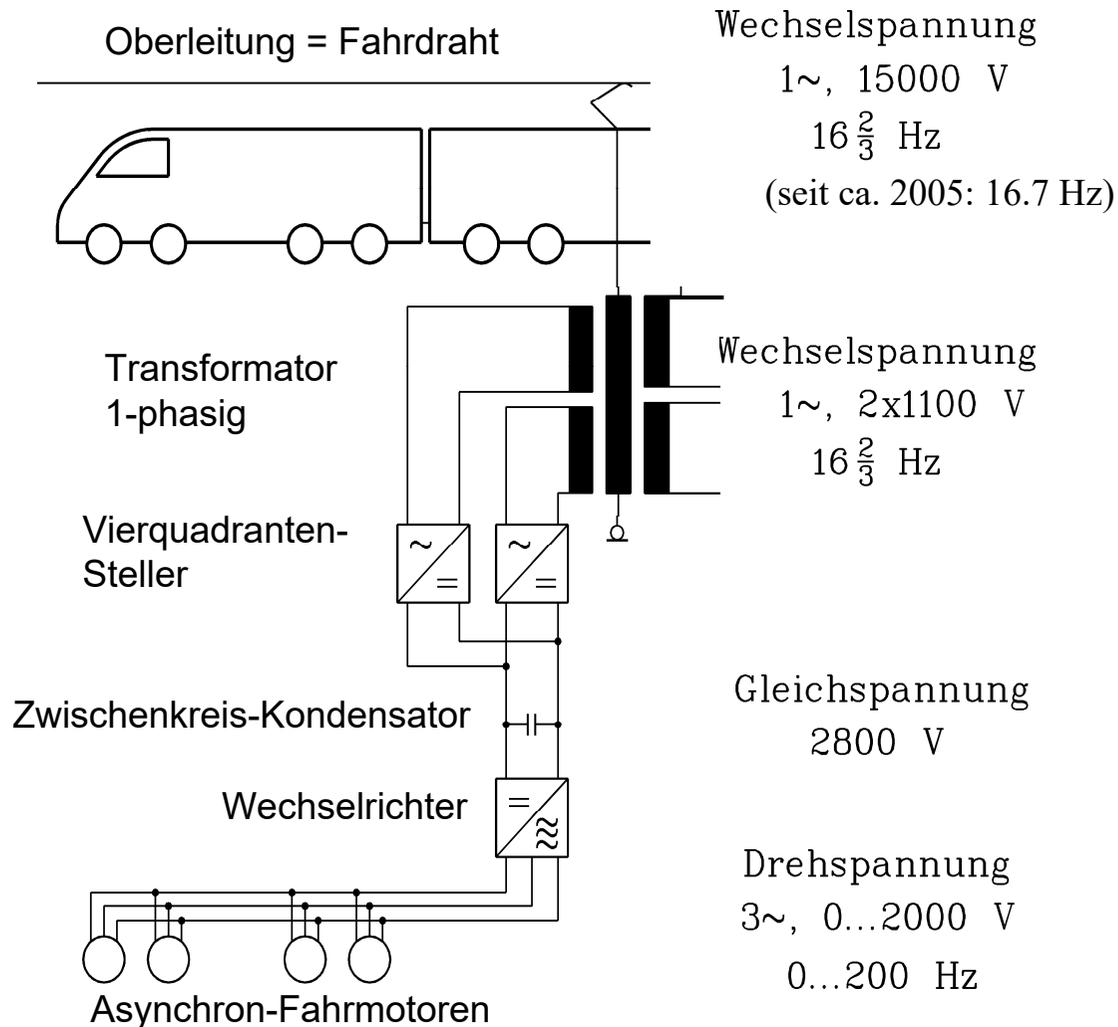
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Quelle: Siemens AG

Elektrisches Antriebskonzept für den ICE3

Ergänzung



Fahrdrabt: Hochspannung über Stromabnehmer

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

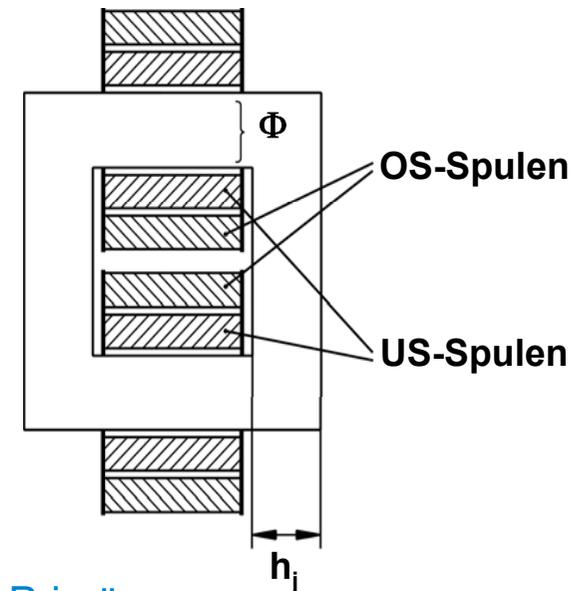
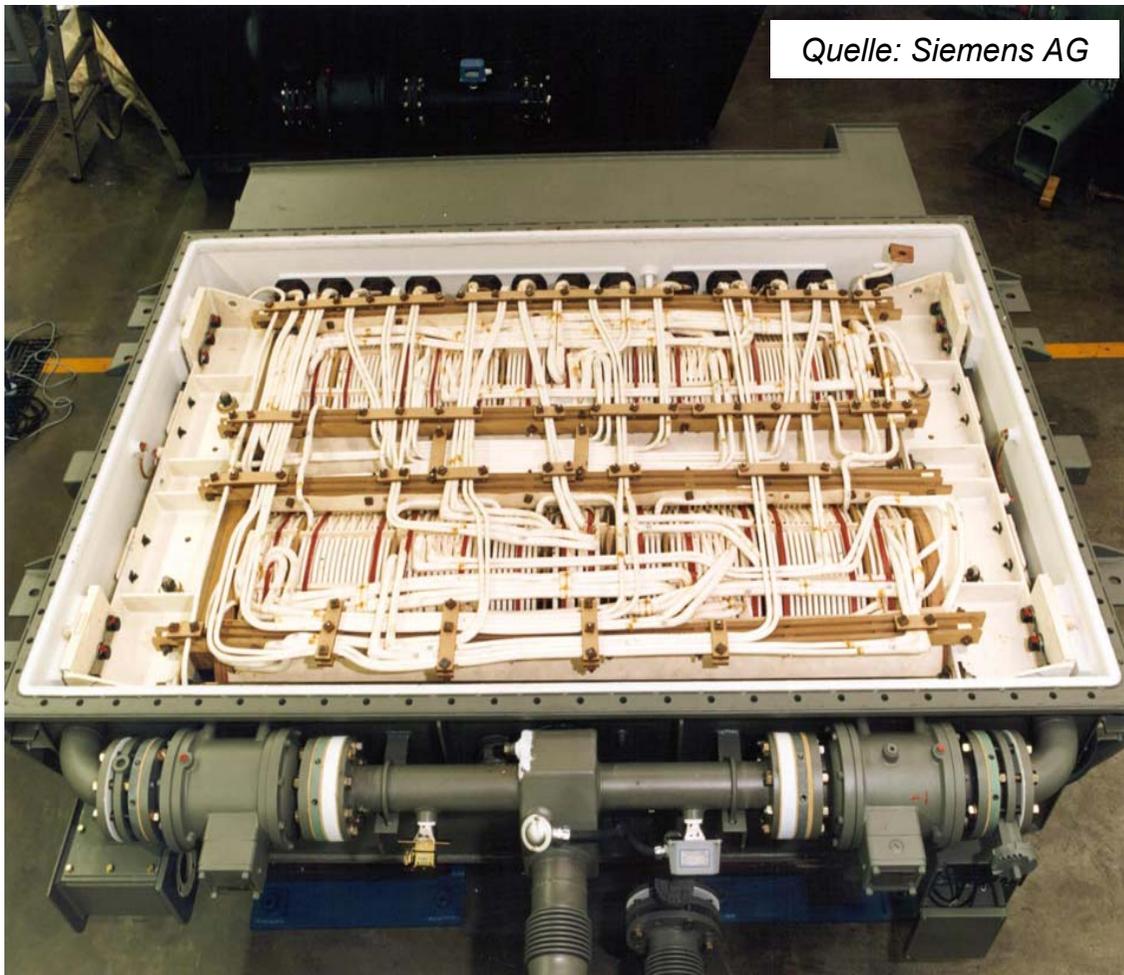
Zwei Stromrichter formen die Wechsel- in Gleichspannung um

Wechselrichter erzeugt aus Gleichspannung ein Drehspannungssystem, das vier Asynchronmotoren versorgt



ICE3: Traktions-Transformator (einphasig) Unterflur-Bauweise

Ergänzung



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

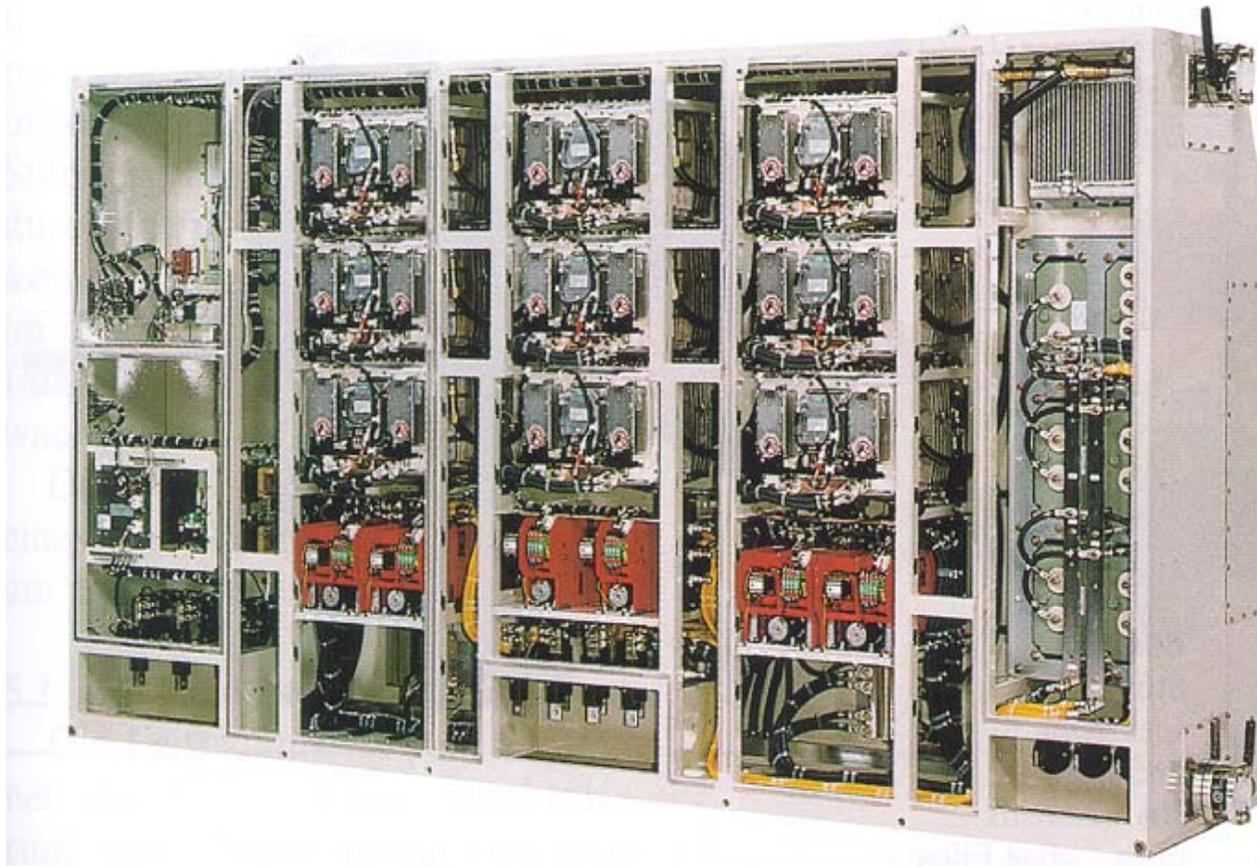
9.1 Tonnen, Ölkühlung
Max. Wicklungs-
Erwärmung: 125 K

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

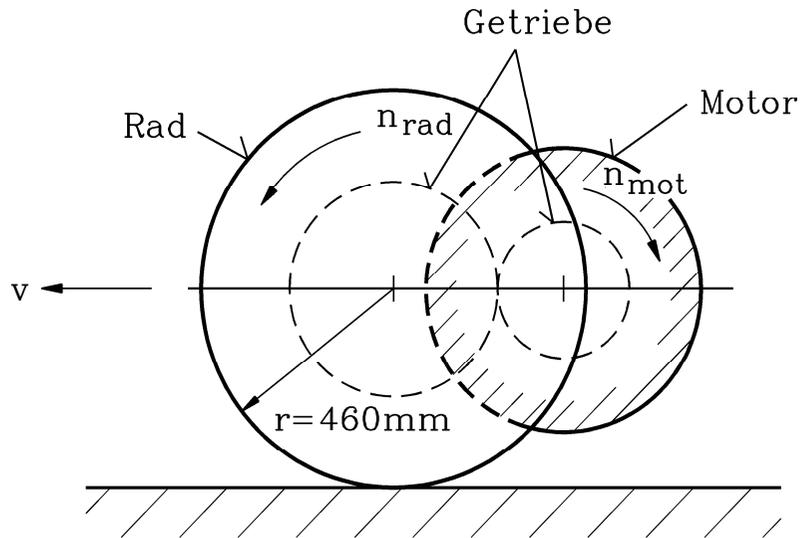
Max. Wicklungserwärmung:
200 K

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: $i = 2.78$:

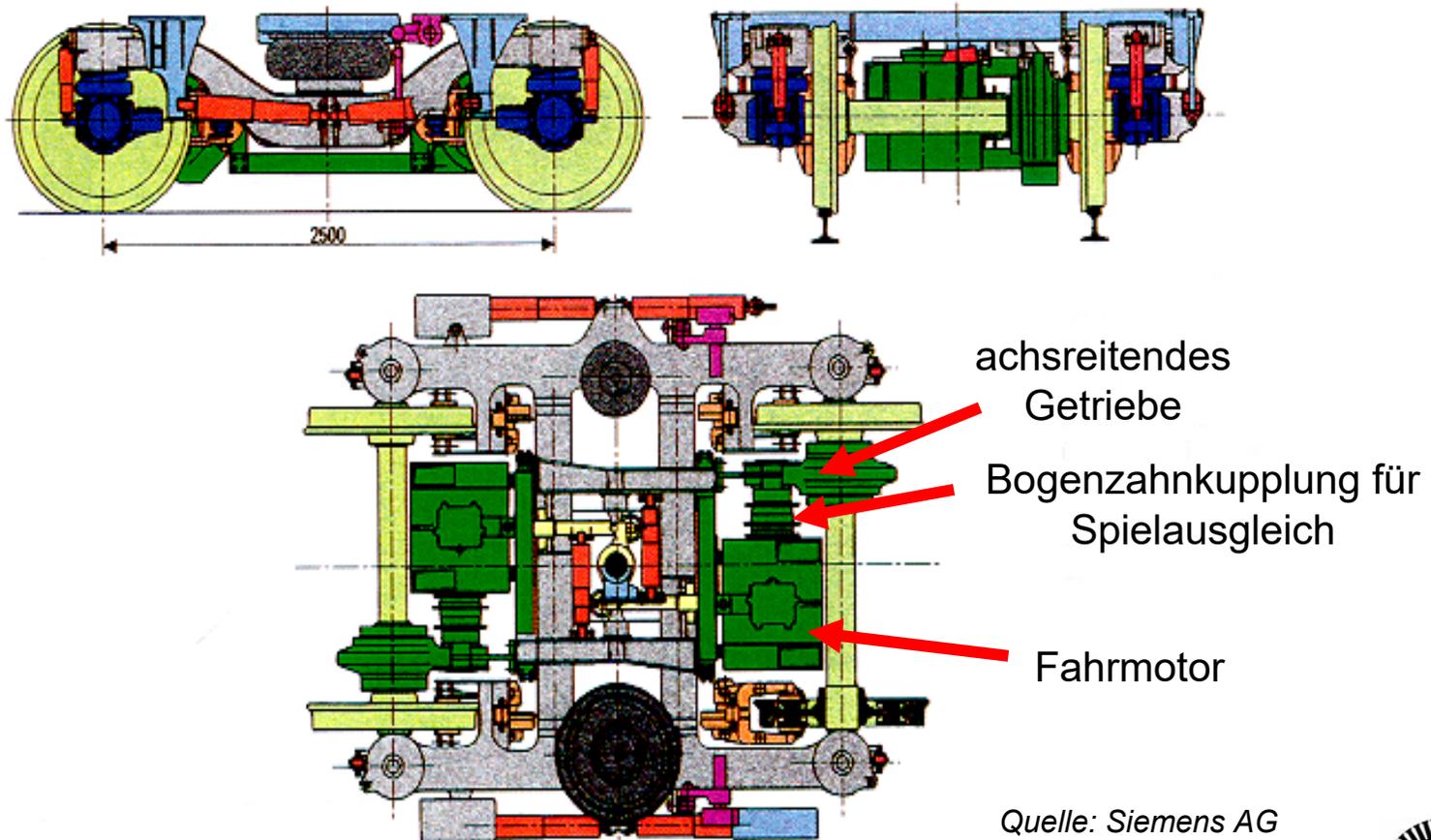
$$n_{\text{mot},\max} = i \cdot n_{\text{rad},\max} = 2.78 \cdot 1900 = 5300/\text{min}$$



ICE3: Triebdrehgestell (1)

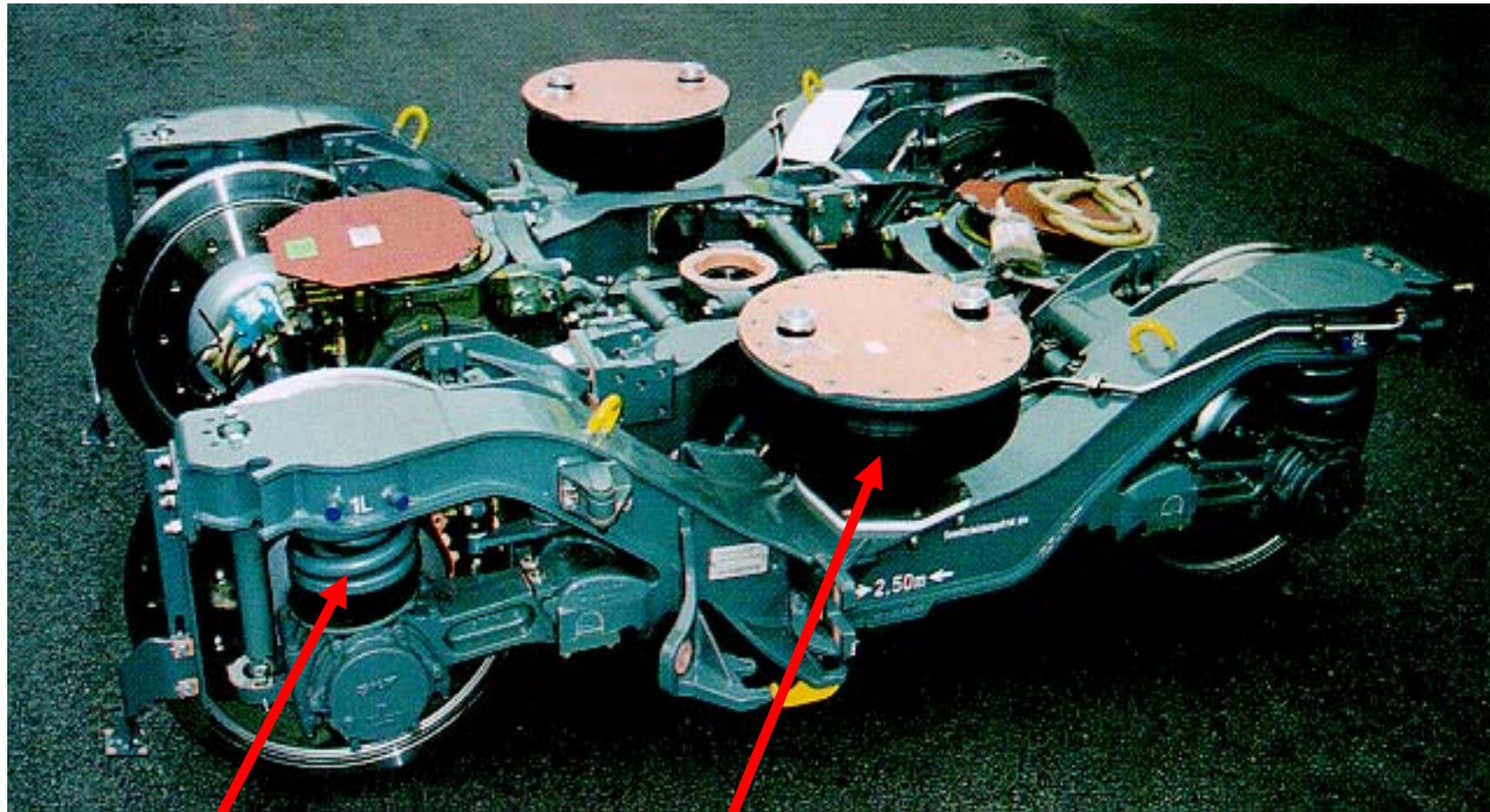
Ergänzung

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



ICE3: Triebdrehgestell (2)

Ergänzung



Primärfederung

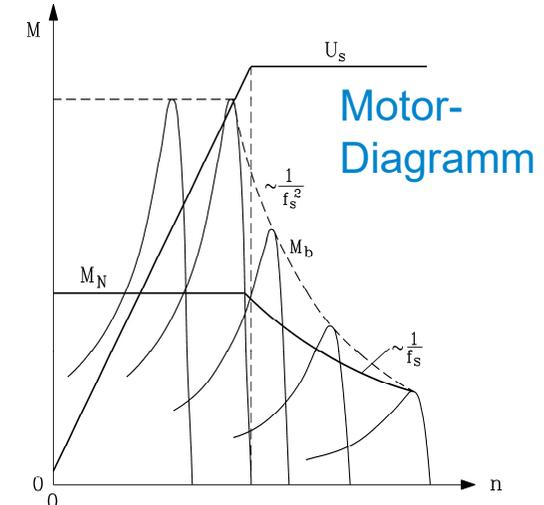
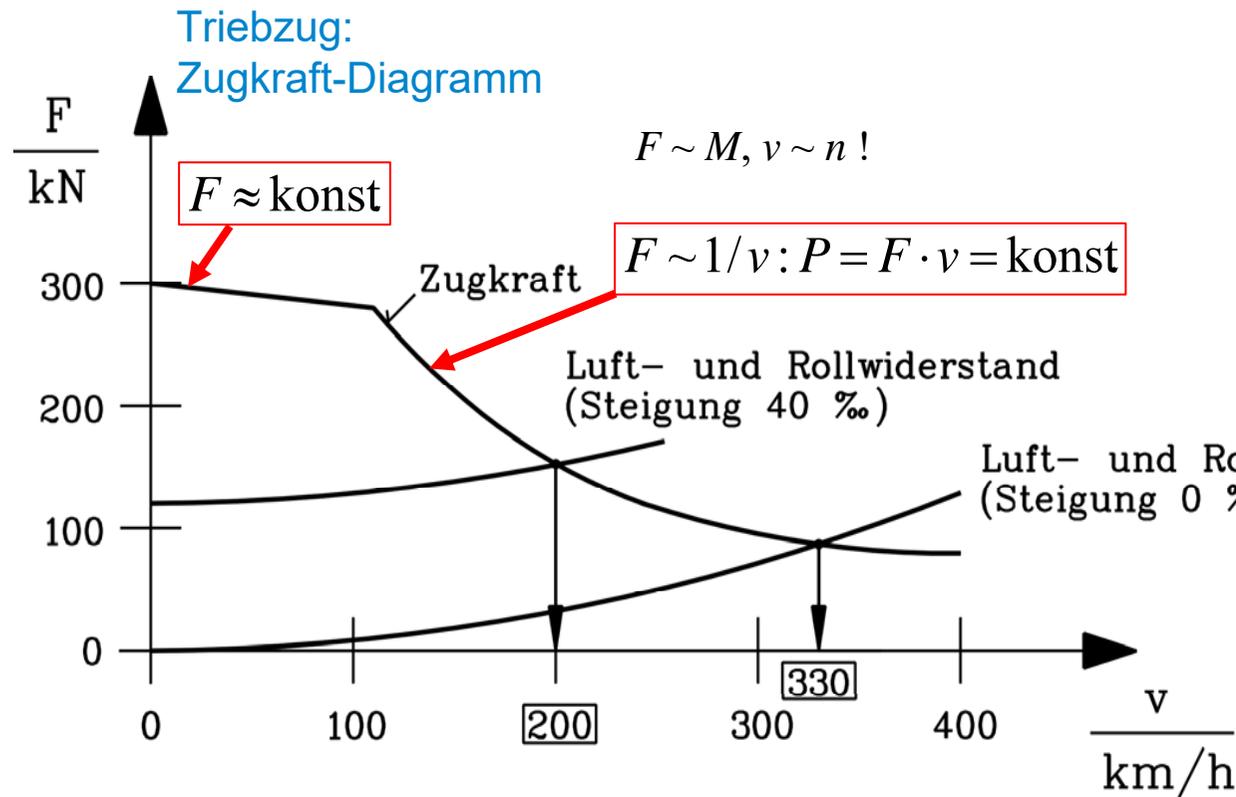
Sekundärfederung

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 km/h



ICE3: Maximale Beschleunigung & Fahrtzeiten

Ergänzung



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

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



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

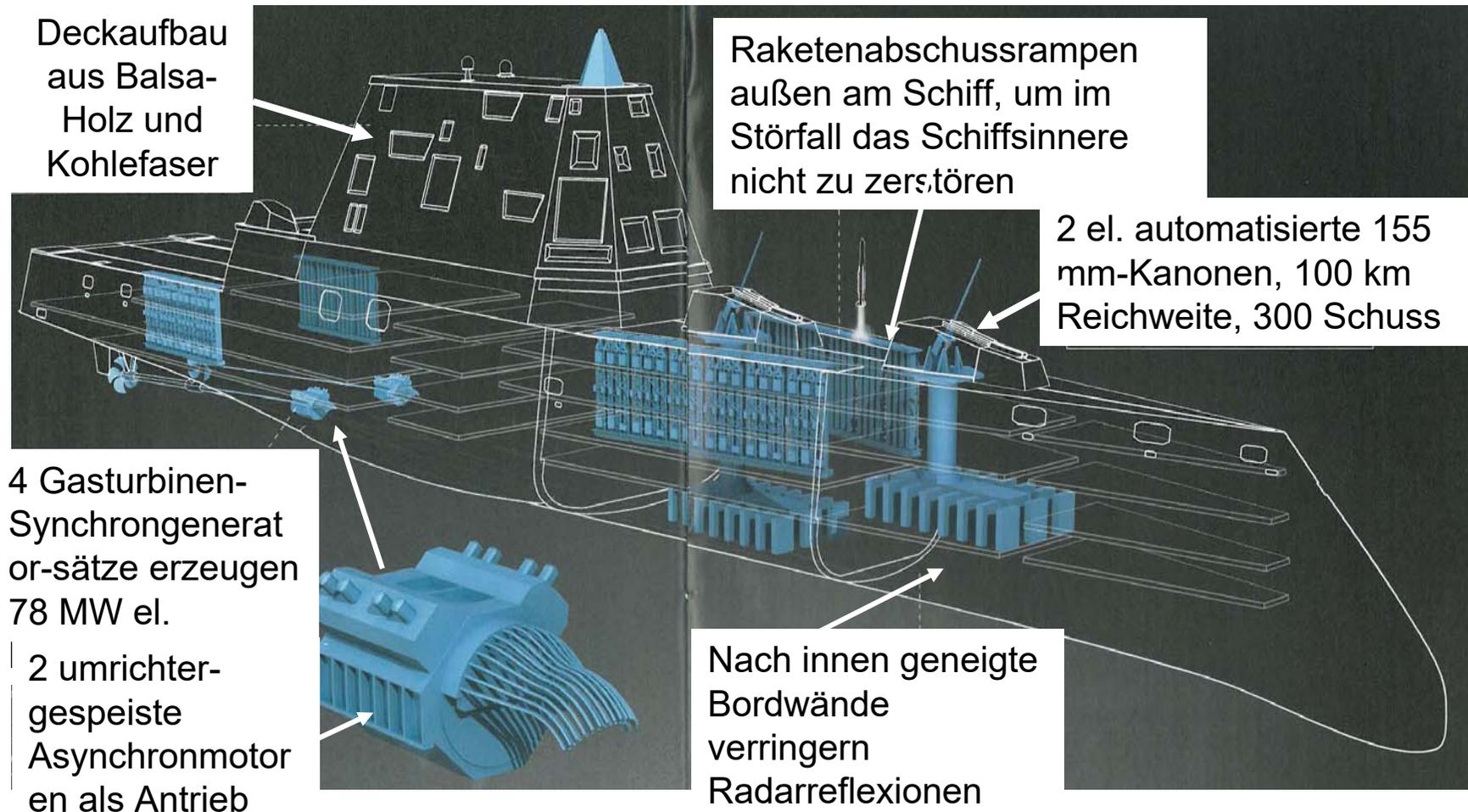


Beispiel: All-electric ship U.S.S. Zumwalt (US Navy)

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



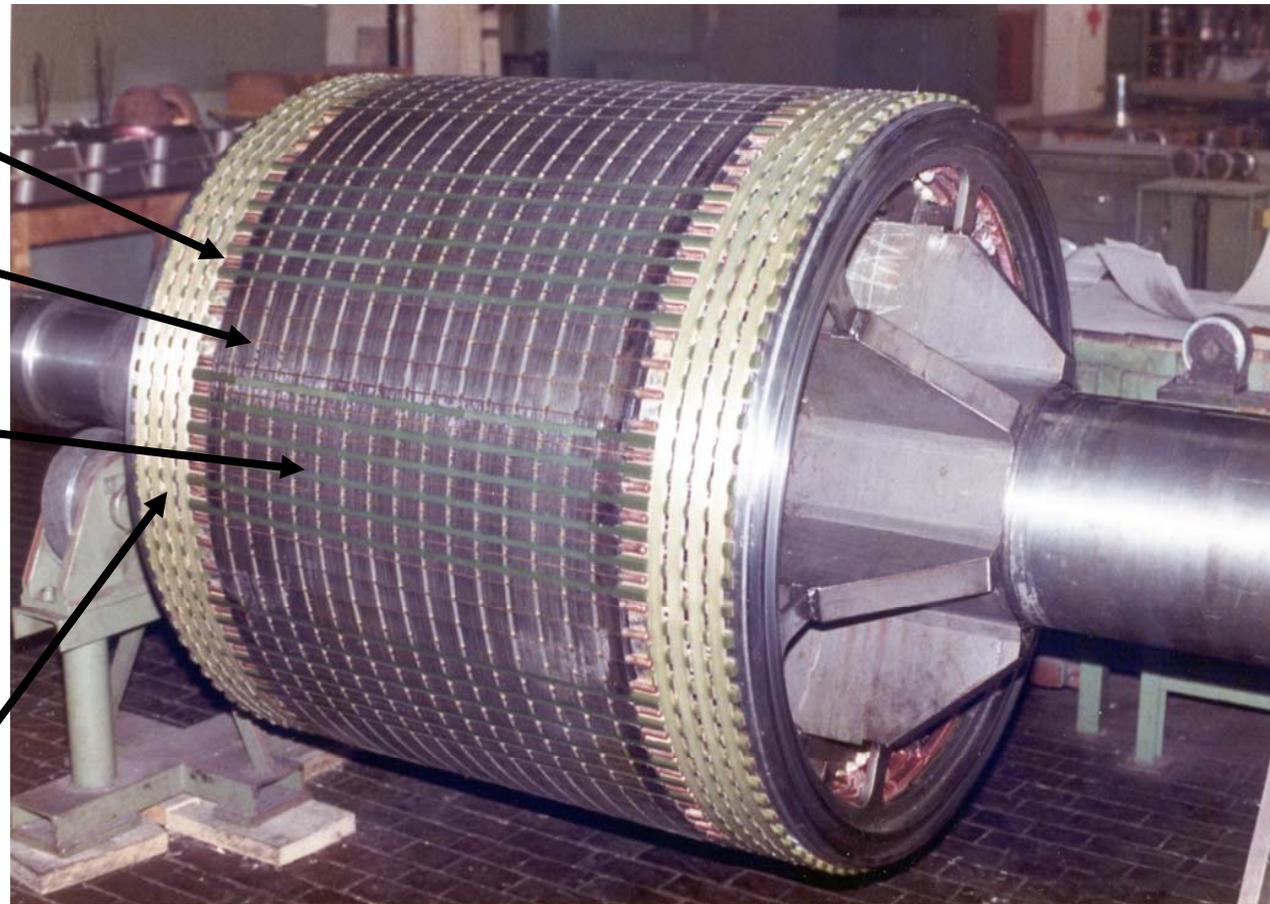
Rotor einer Vollpol-Synchronmaschine 8-polig

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

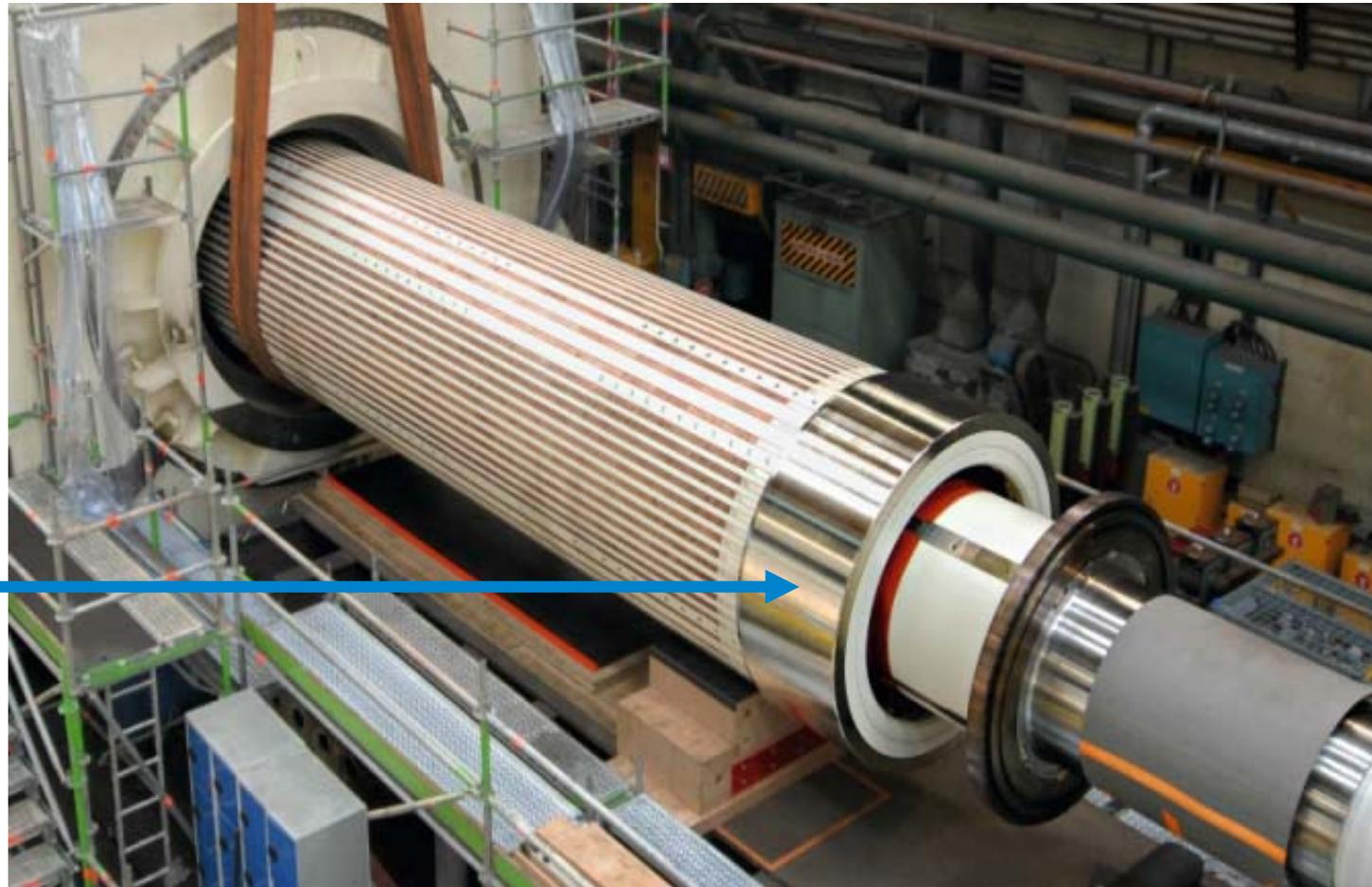
Vierpoliger
Turbo-
Generator

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



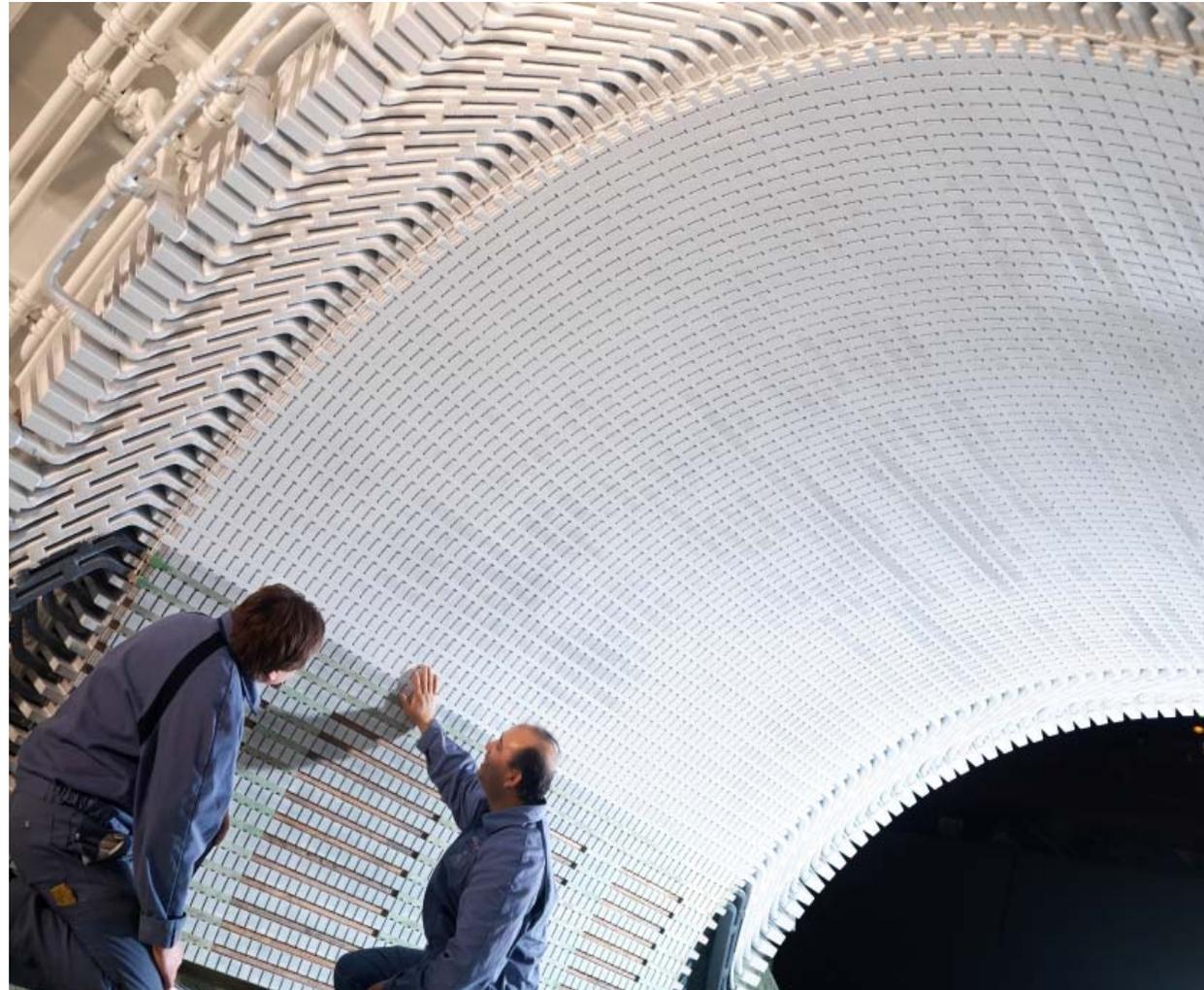
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Wasserkraftgenerator

ca. 400 MW

Bewickeltes
Statorblechpaket

Verkeilung der
Nutenkeile



Quelle:

ALSTOM

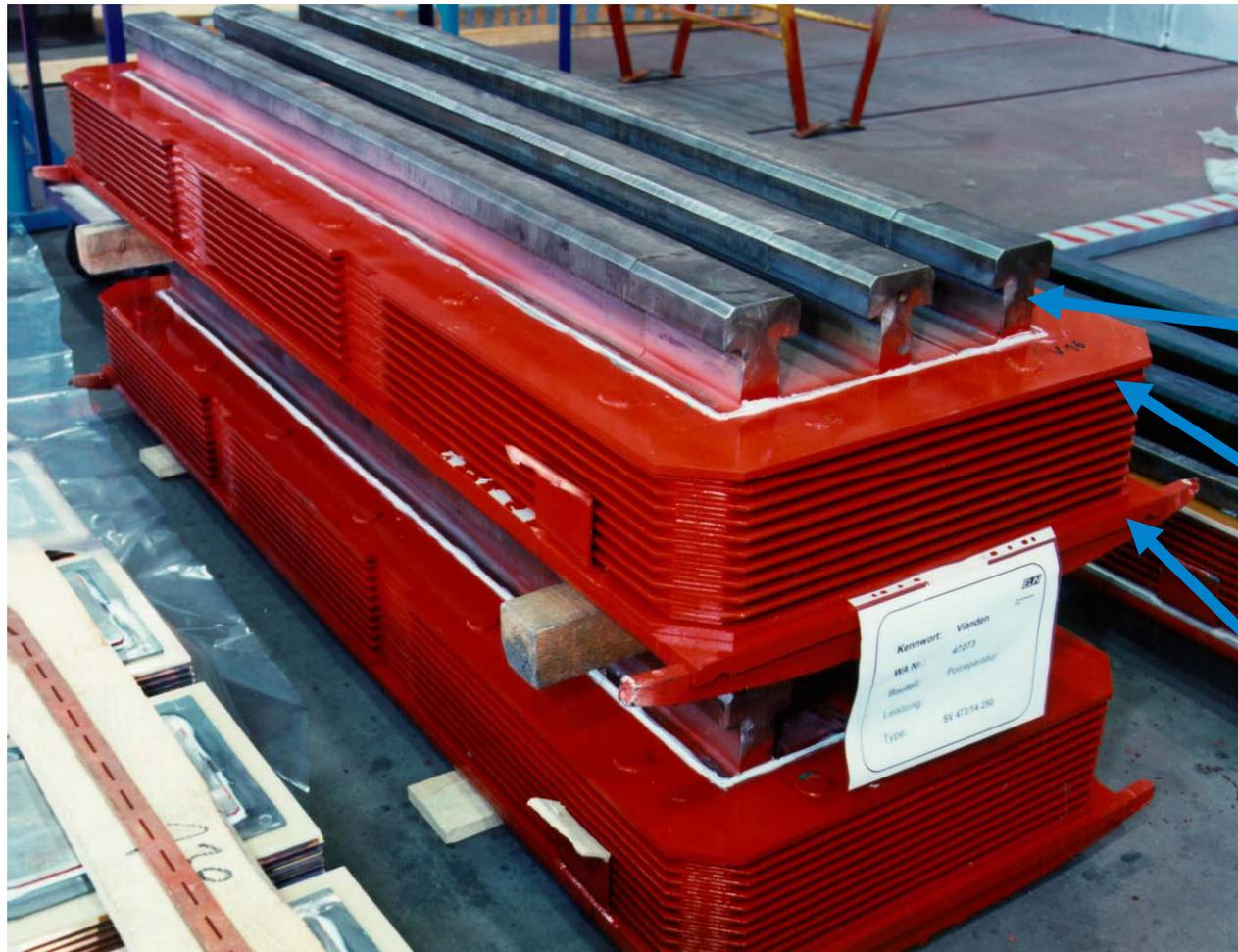


Bewickelte Schenkelpole vor dem Einbau in den Rotor

Ergänzung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Pumpspeicher-
werk Vianden

Luxemburg

Dreifach-
Hammerkopf-
Befestigung

Breitere
Kupferwindungen
wirken als
"Kühlrippen"

Dämpferring-
segment

Quelle:

Andritz Hydro,
Austria

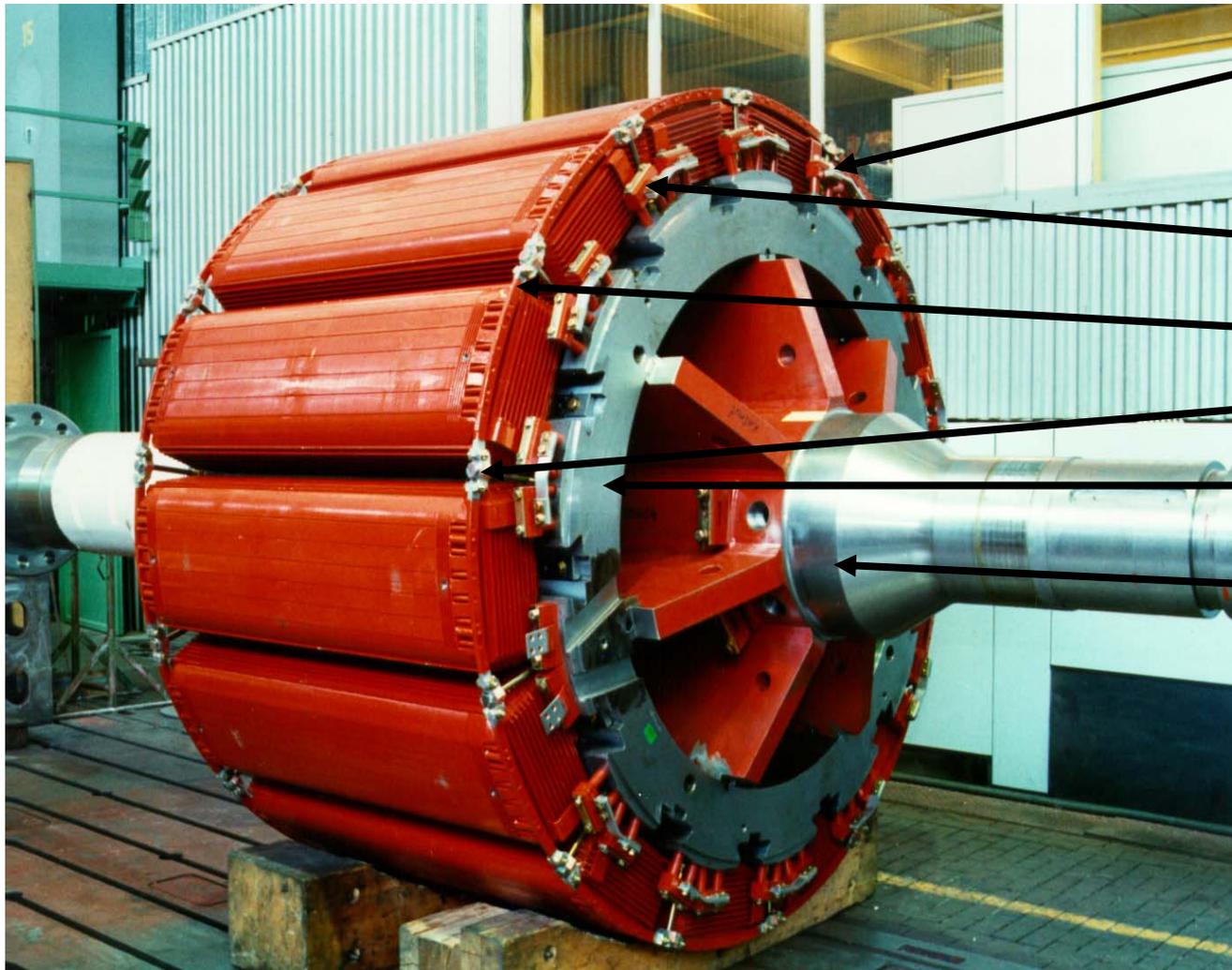


Synchronmaschine: 14-polig Komplettierter Schenkelpol-Rotor

Ergänzung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Schwalbenschwanz-
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

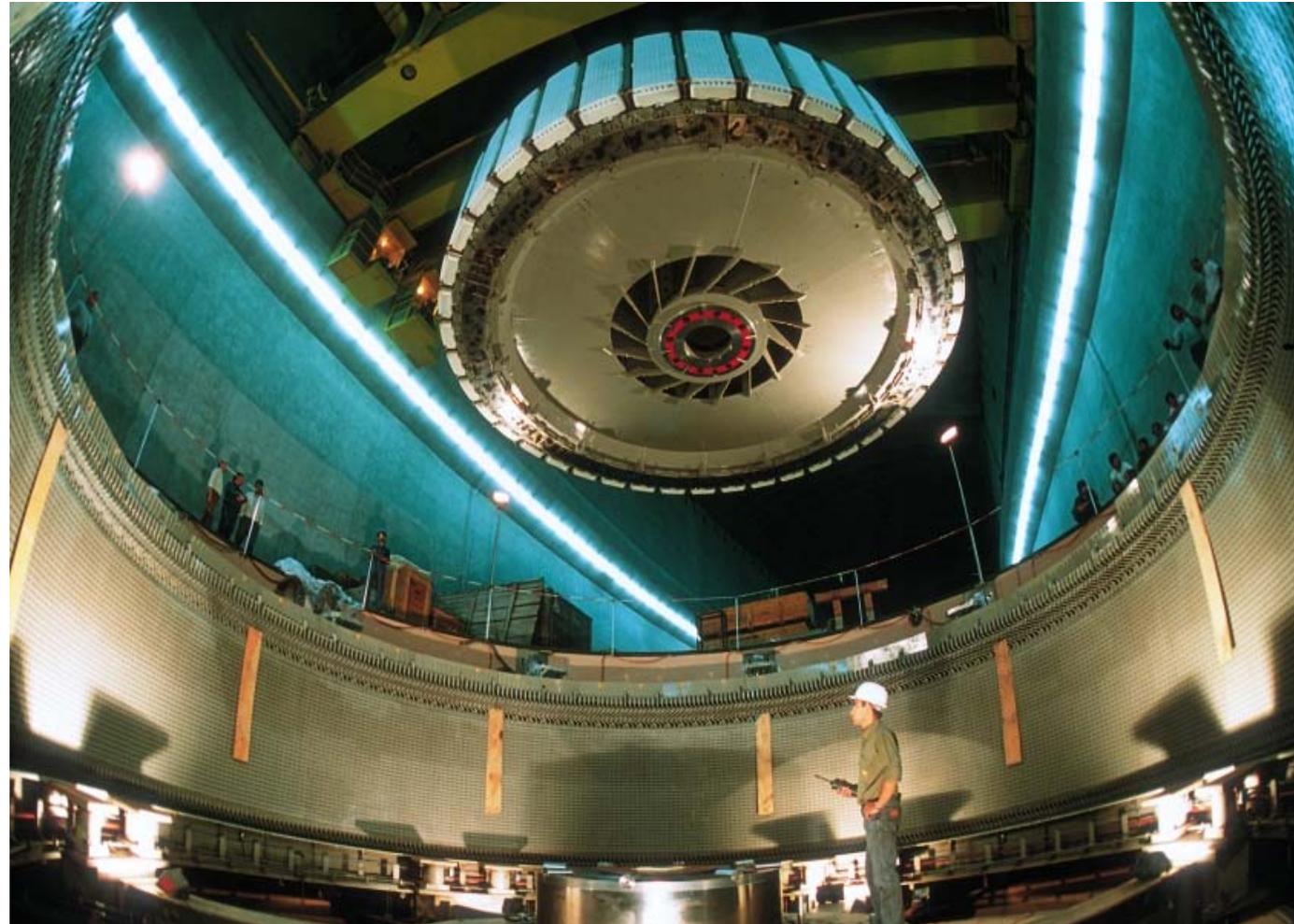
$n = f/p = 50/20 =$
 $2.5/s = 150/min$

Francis-Turbinen

Staumauer 158 m

6 x 300 = 1800 MW

Quelle: **ALSTOM**



Inselbetrieb: Synchrongenerator als Kfz-Lichtmaschine

Ergänzung

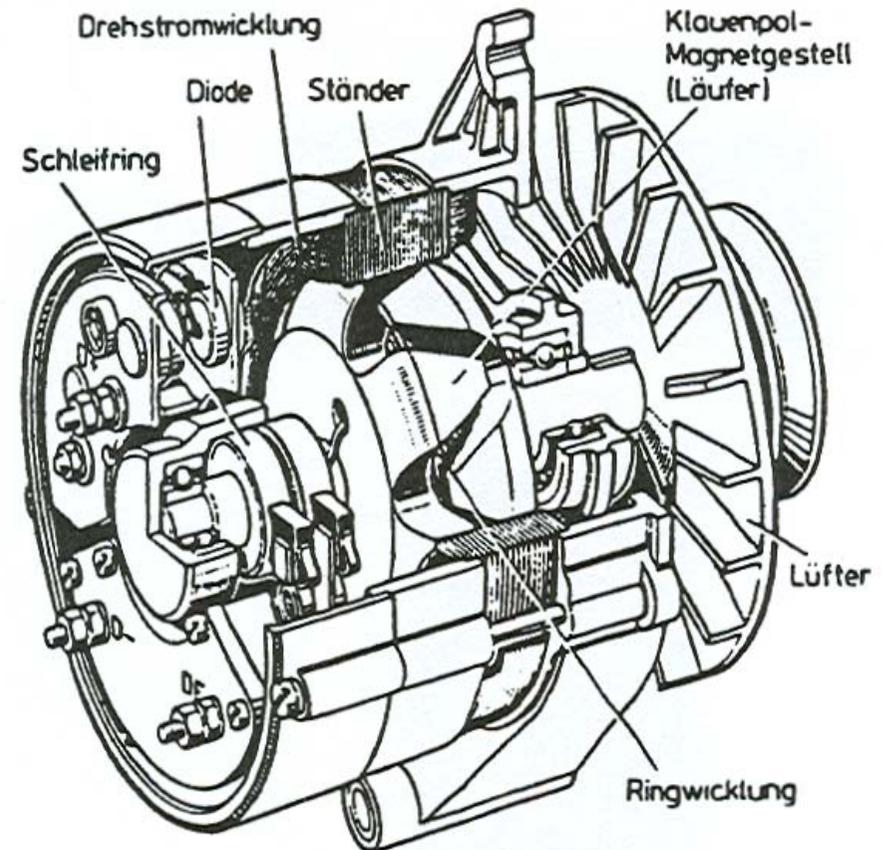


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

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



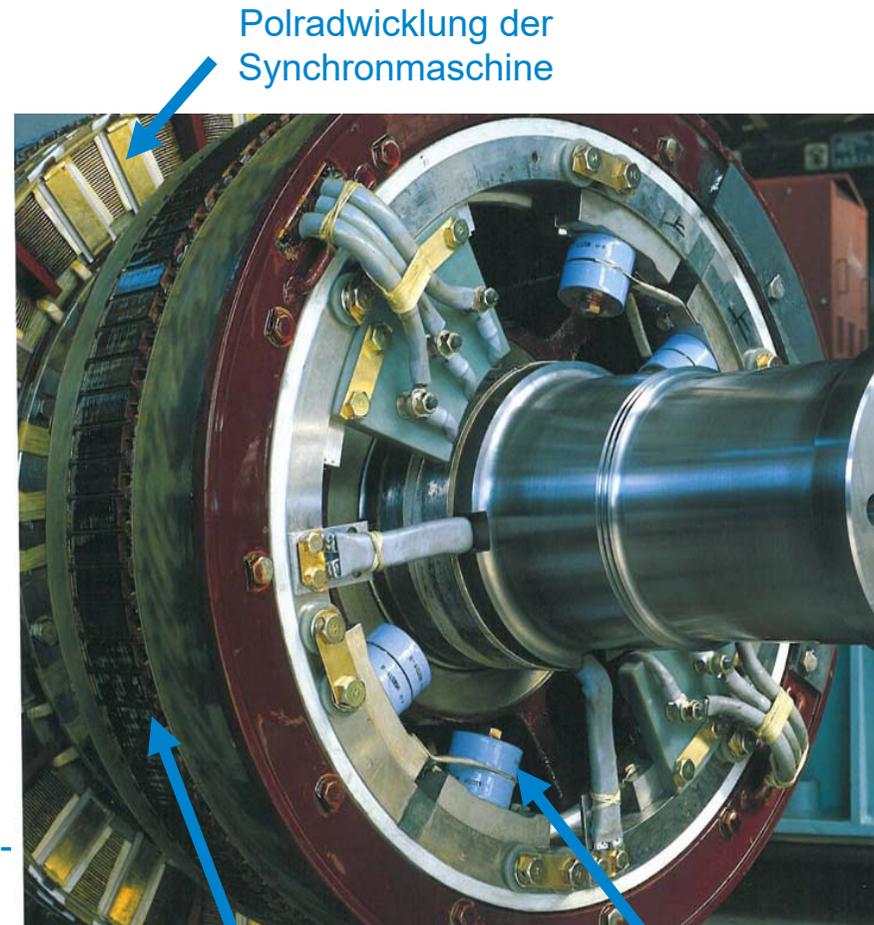
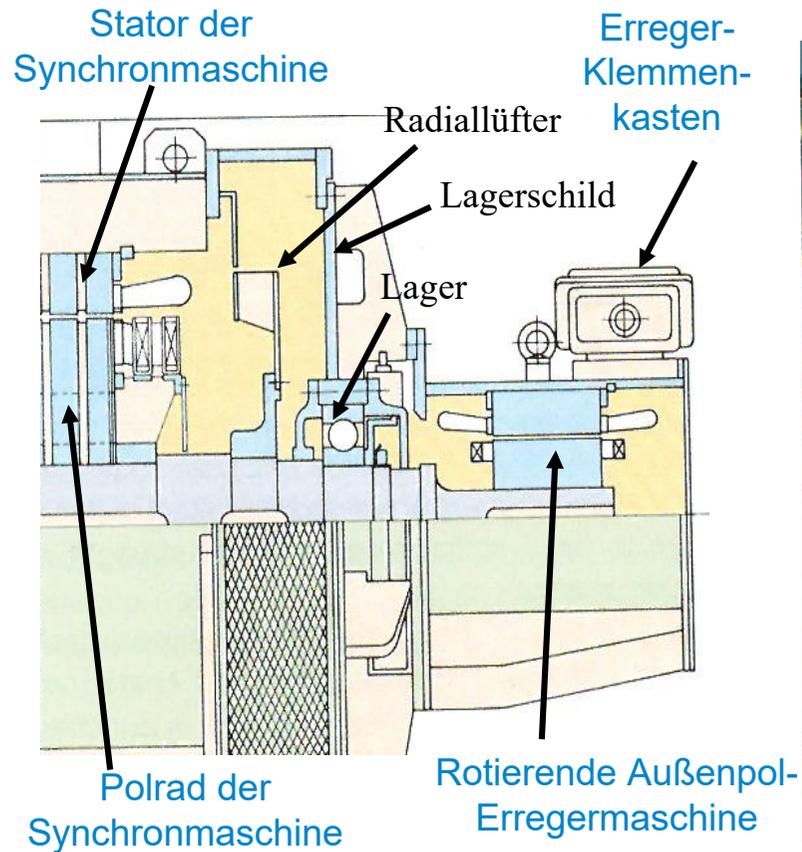
Erregung des Polrads über einen rotierenden Gleichrichter

Ergänzung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Beispiel: 3 MW-Schiffsgenerator



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

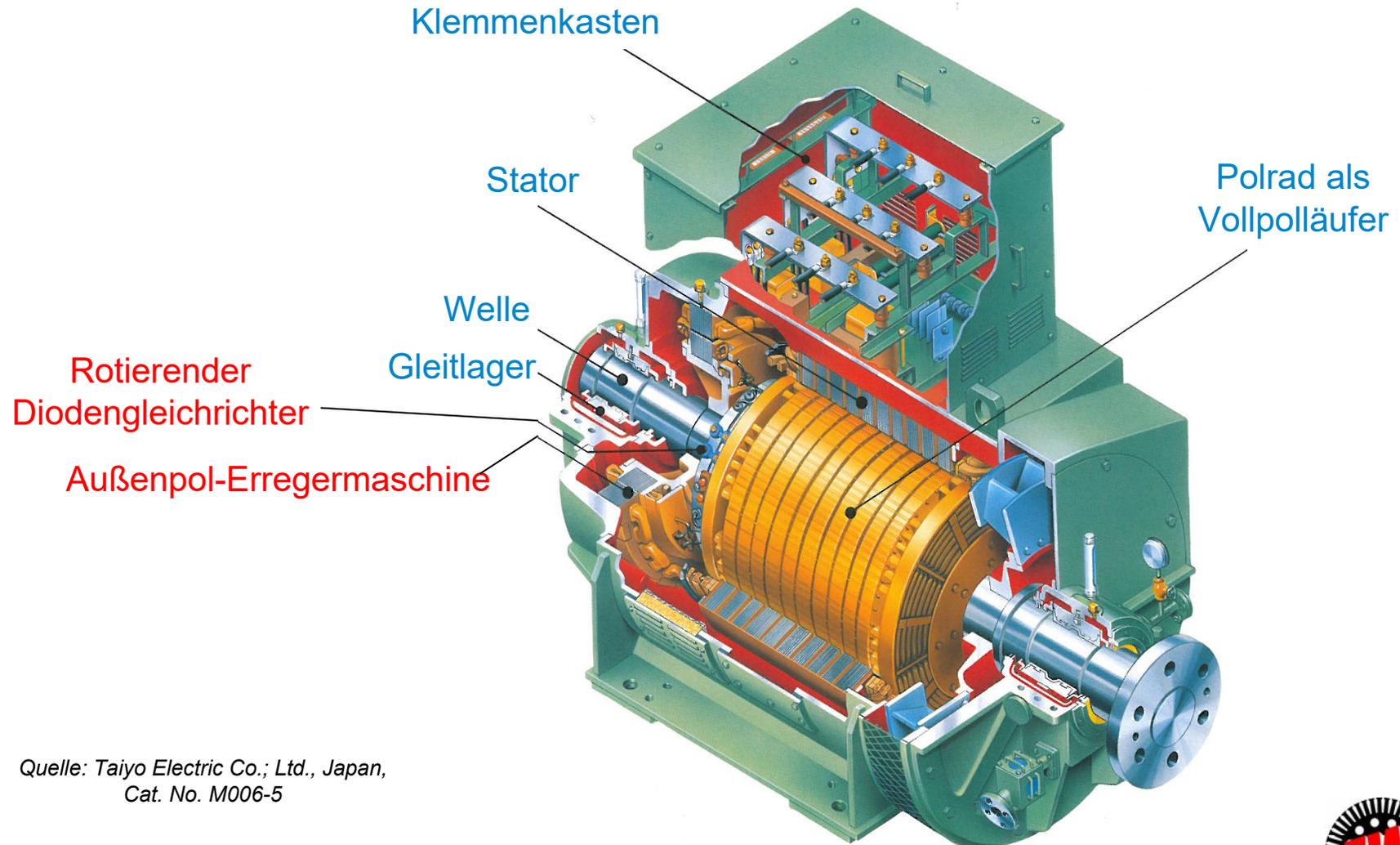


3 MW-Schiffsgenerator Mit rotierender Erregermaschine

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

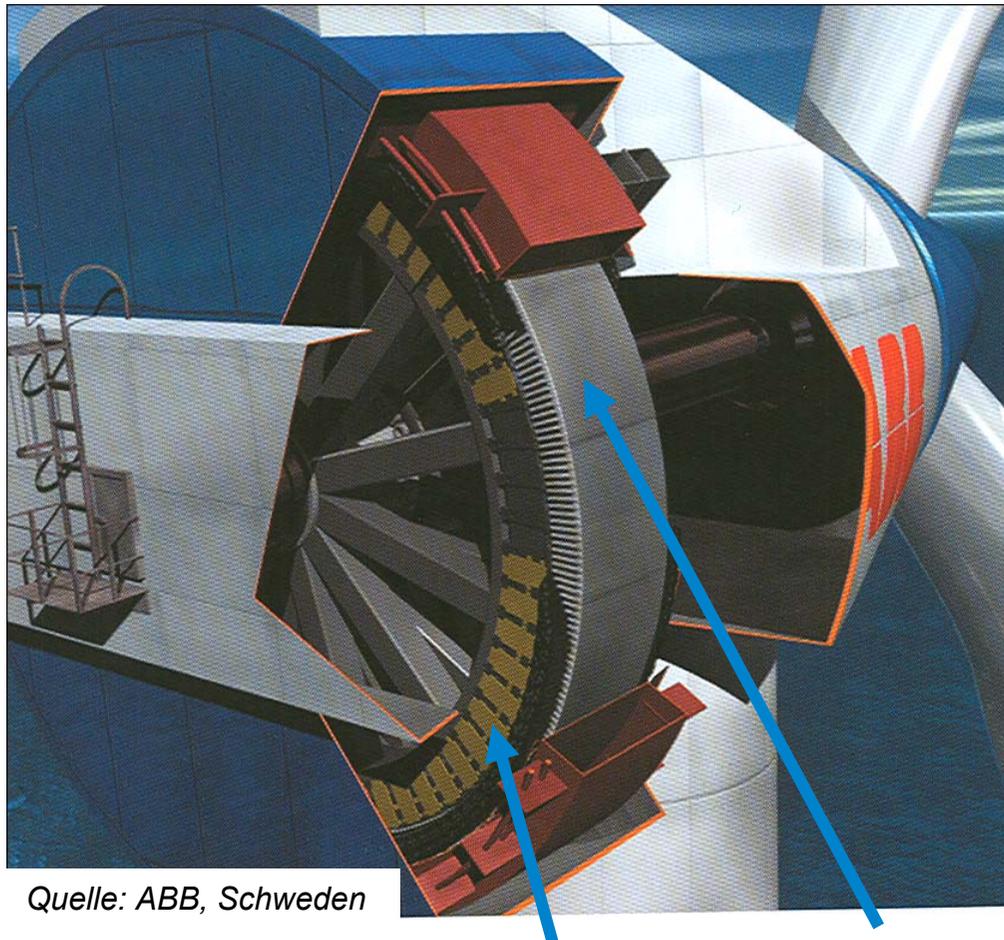
Quelle: ZF/Dr. Müller und Fichtel & Sachs

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 m² (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

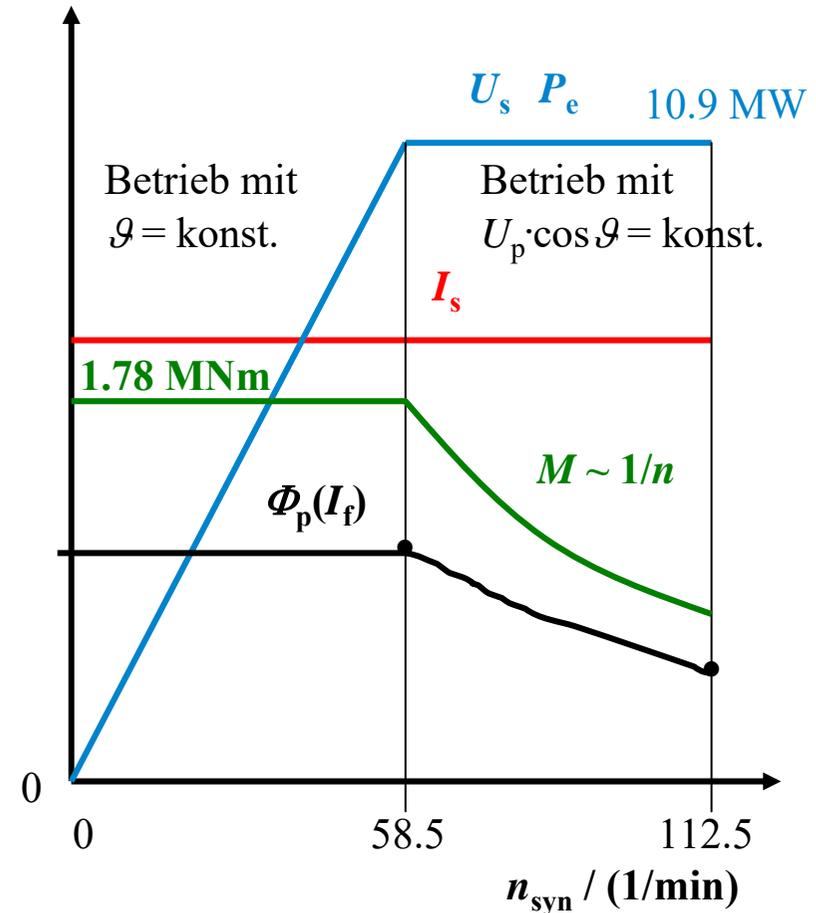
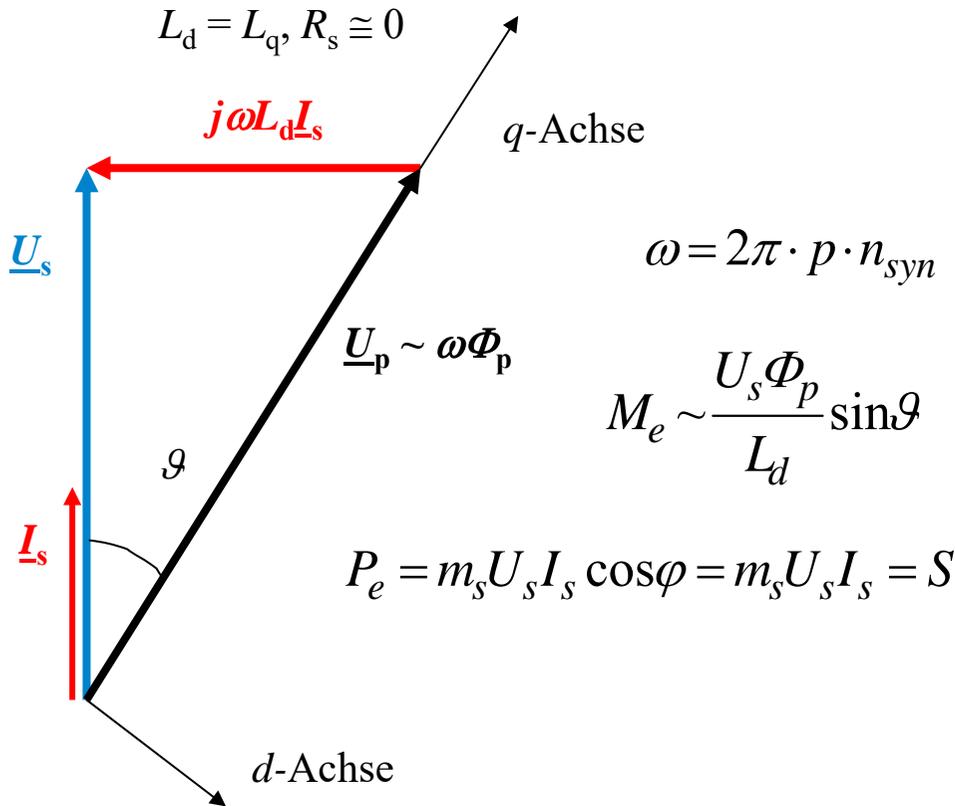


Vollpolmaschine als drehzahl- veränderbarer Walzwerksantrieb (Stromrichterbetrieb) (2)

Zum Nachrechnen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



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



Ergänzung

Gleichstrommaschinen und ihre Anwendungen (zu Kapitel 10)

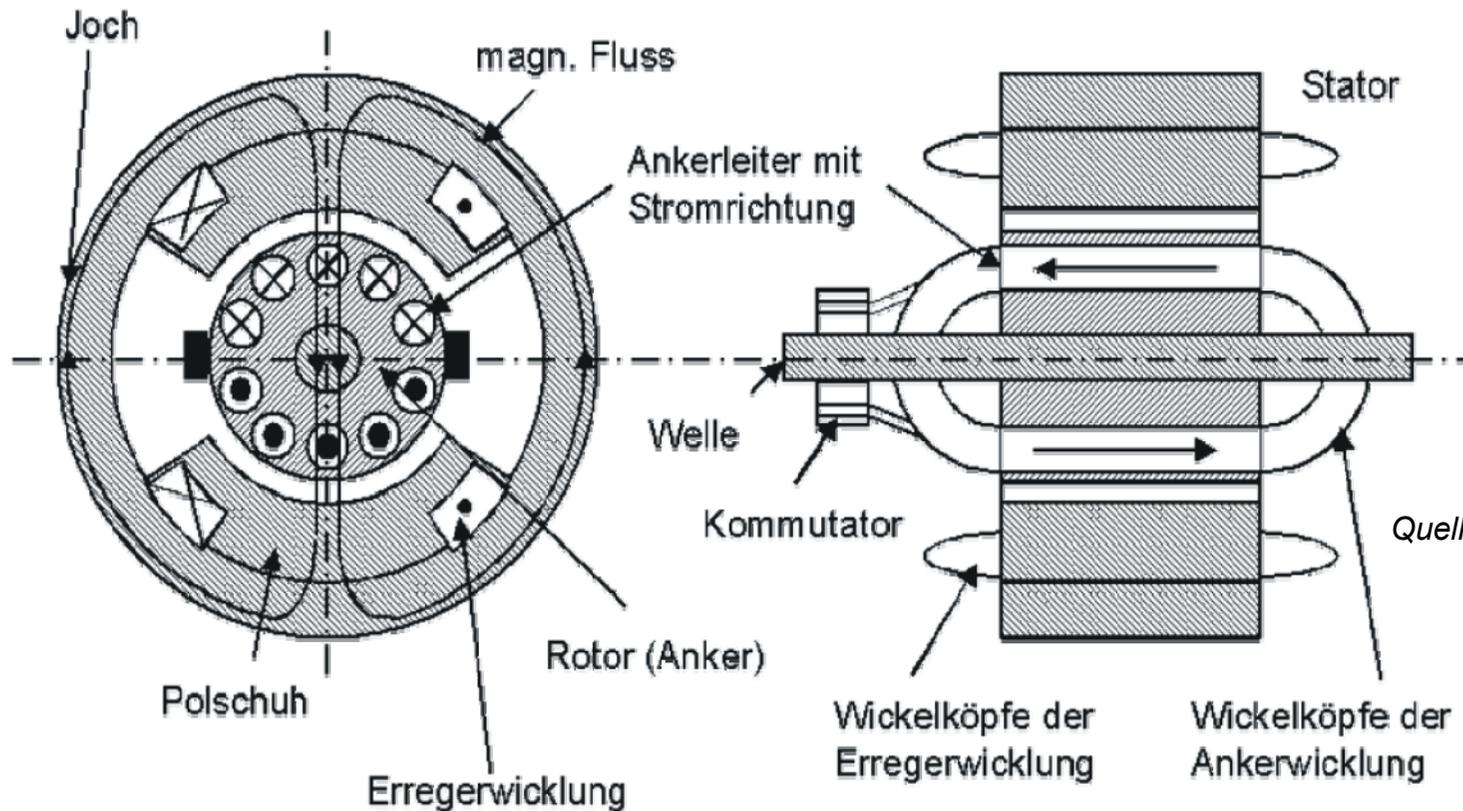
Zweipolige Gleichstrommaschine Prinzip-Aufbau

Ergänzung



Elektrische Felderregung

■ Weichmagnetisches Eisen

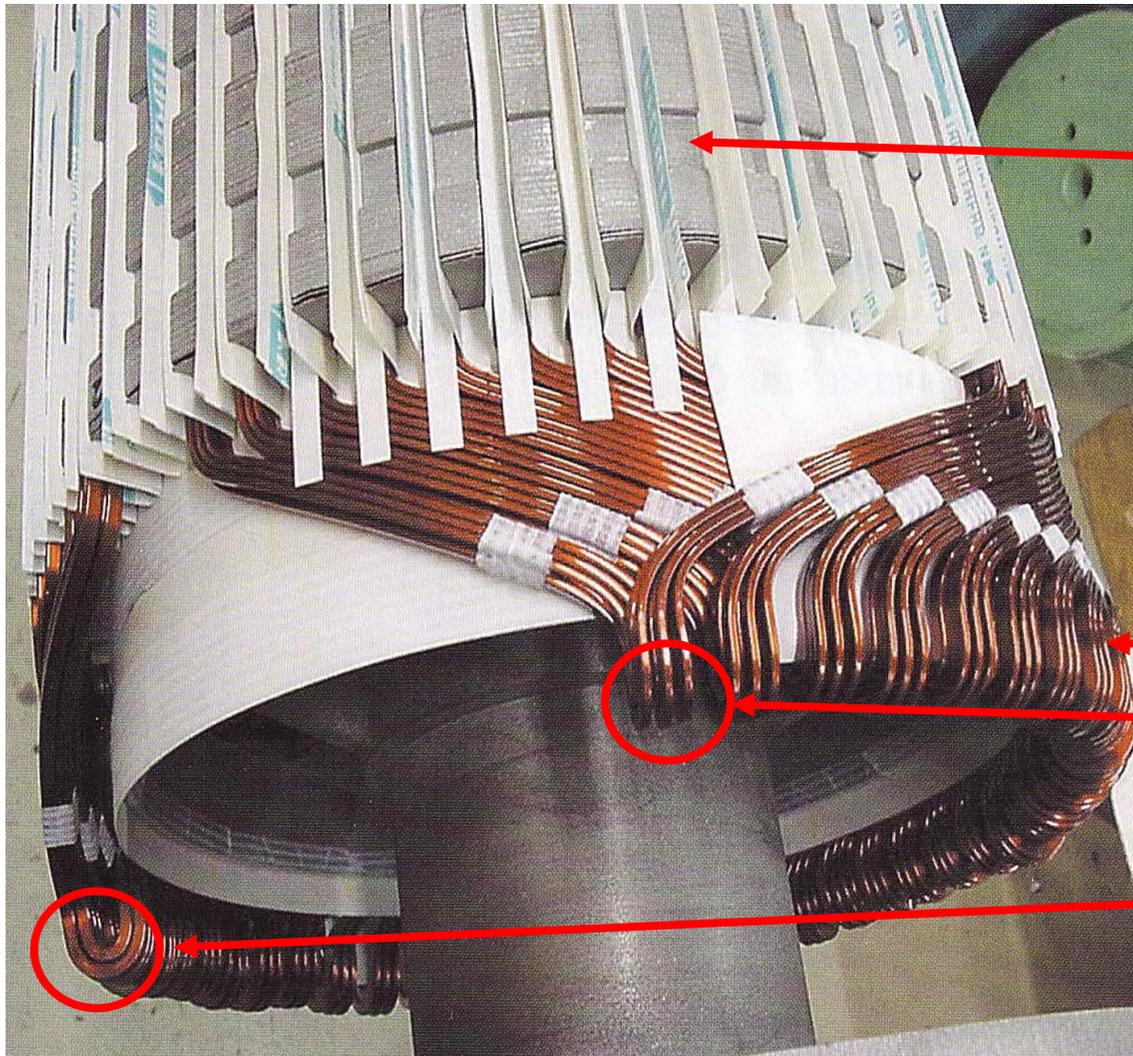


Quelle: Universität Stuttgart



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

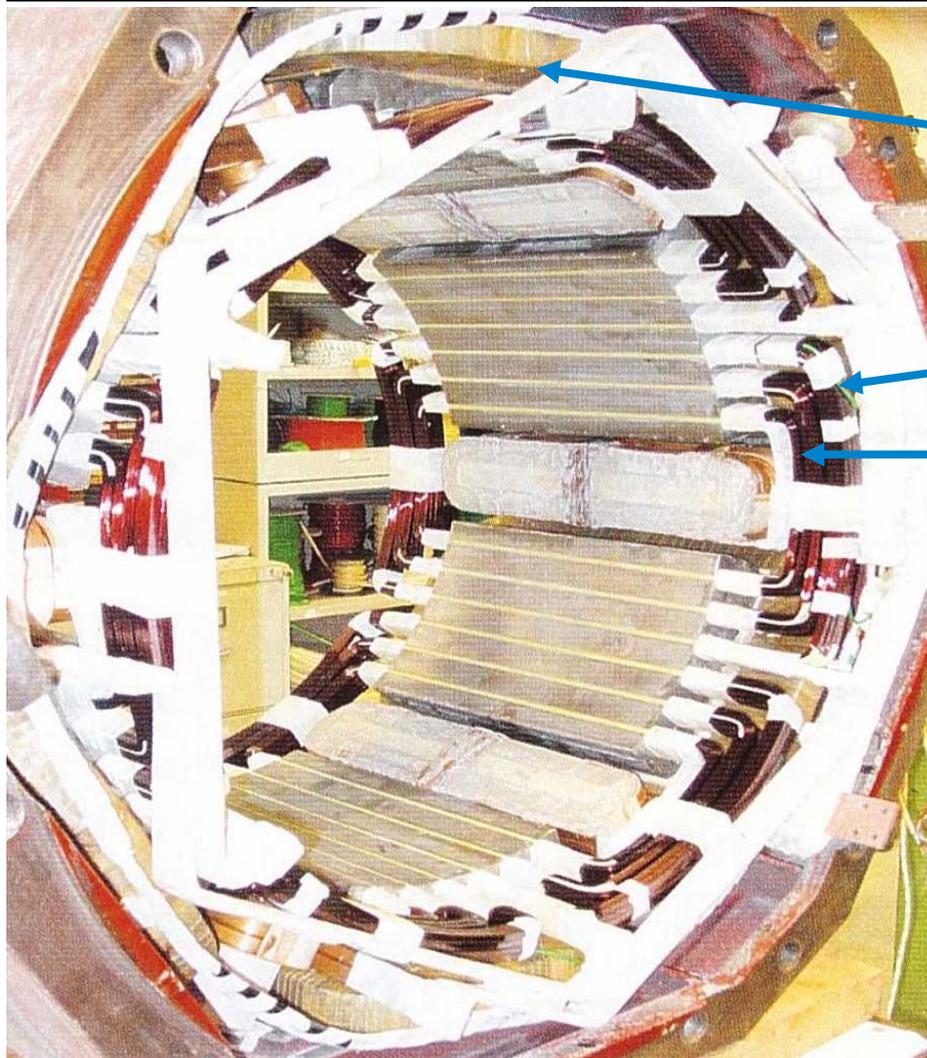


Bewickelte Ständerpole – sechspolig

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

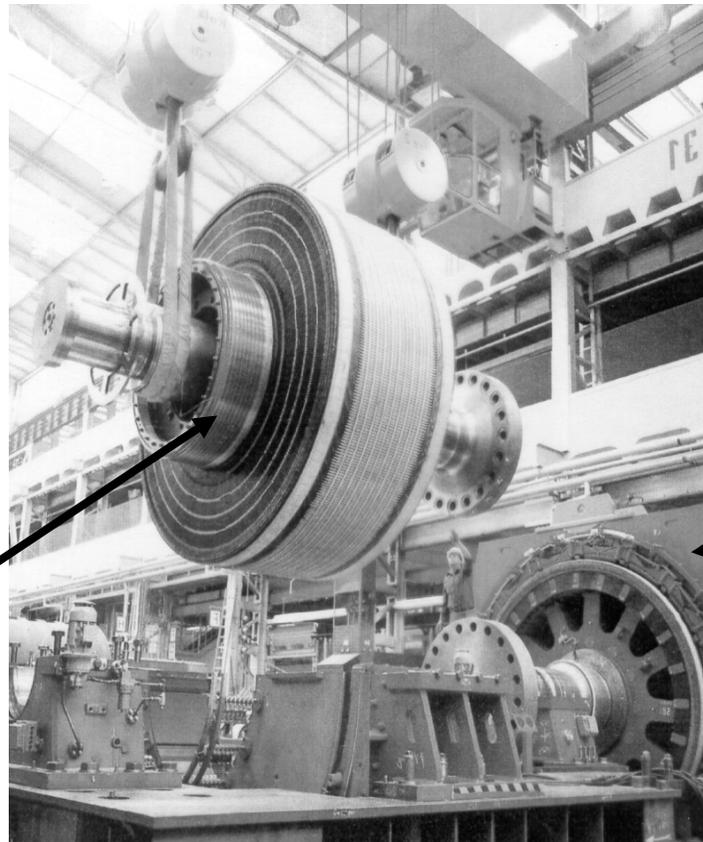


Größte Gleichstrommaschinen als Walzwerks-Grobgerüstantriebe mit 6 MW ... 12 MW bei Drehzahlen von ca. 100/min gebaut.

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

