

Elektrische Energietechnik – Energiewandlung

Andreas Binder

Institut für Elektrische Energiewandlung

TU Darmstadt

abinder@ew.tu-darmstadt.de

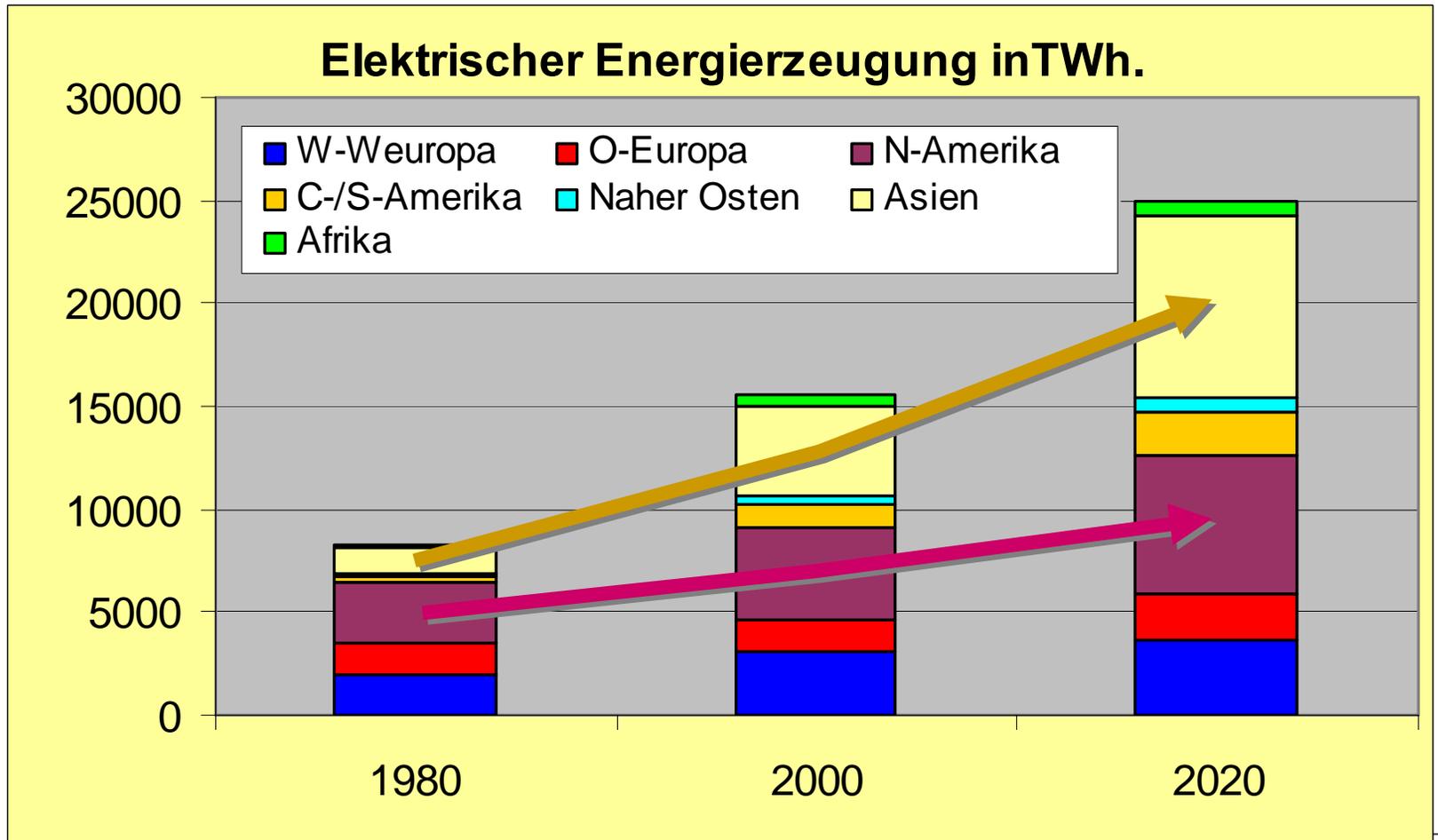


Vortrag - Inhaltsübersicht

- **Fakten zur elektrischen Energie**
- **Elektrische Energieerzeugung – heute und morgen**
- **Effiziente ele. Energienutzung in der Antriebstechnik**
- **Antriebstechnische Trends zum Energiesparen**
- **Ausblick**

Elektrische Energie weltweit

Asien und Nord-Amerika werden das Welt-Energieszenario der nächsten 20...30 Jahre bestimmen !



Quelle: VDN 1 TWh = 1 Tera-Wh = 1 000 Milliarden Wh = 10^{12} Wh

- <u>Bereitgestellte Primärenergie:</u>	14440 PJ
Energieverbrauch direkt:	7090 PJ
Stromprimärenergie:	5530 PJ
Sonstige:	1820 PJ

- Anteil Primärenergie für Stromerzeugung:
 $5530 / 14440 = 38 \%$

1 PJ = 1000 Tera-Joule = 10^{15} J



Nutzungsgrad 2004 Deutschland

- Primärenergie Stromerzeugung: 5530 PJ = 1536 TWh
Stromendverbrauch: 1820 PJ = 506 TWh

Mittlerer Wirkungsgrad der Stromerzeugung:

(Energieumwandlung & Transport)

$$506 / 1536 = 33 \%$$

- Bereitgestellte Endenergie: 9240 PJ = 2566 TWh
Nutzenergie beim Endverbraucher: 4918 PJ = 1366 TWh

Mittlerer Energie-Nutzungsgrad:

(beim Endverbraucher)

$$1366 / 2566 = 53.2 \%$$

1 TWh = 1 Tera-Wattstunde = 1000 Milliarden Wh

Sparprogramm der EU

- **EU: Grünbuch** „Eine europäische Strategie für nachhaltige, wettbewerbsfähige und sichere Energie“ (2006)
- In der EU benötigte Primärenergie zur Hälfte importiert.
- **Sparprogramm:**
 - Verbreiterung der Rohstoffbasis
 - Erhöhung der Umwandlungswirkungsgrade
 - verstärktes Energiesparen
- **Ziel:** Bis 2020: **20% der Energie** p.a. EU-weit eingespart
- Kostensenkung von ca. 60 ... 100 Mrd. Euro p.a.,
- Minderung CO₂-Ausstoß: um 780 Mio. Tonnen p.a.

Sparprogramme in Industrie, Verkehr, Haushalt !

Vortrag - Inhaltsübersicht

- **Fakten zur elektrischen Energie**
- **Elektrische Energieerzeugung – heute und morgen**
- **Effiziente ele. Energienutzung in der Antriebstechnik**
- **Antriebstechnische Trends zum Energiesparen**
- **Ausblick**

Elektrische Energieerzeugung – Energemix (*Deutschland 2006*)



Wind 5%



Wasser 3,5%



Biomasse 3,1%

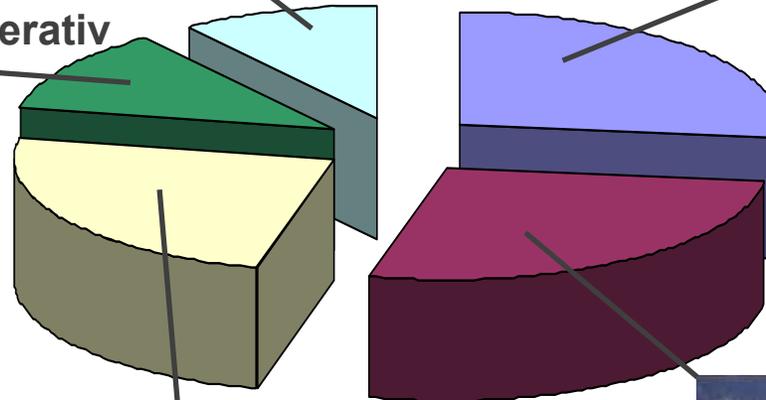


PV 0,3%



Erdgas + Sonstige 10%

Regenerativ
11,9 %



Steinkohle 27%



Kernkraft 24,1%

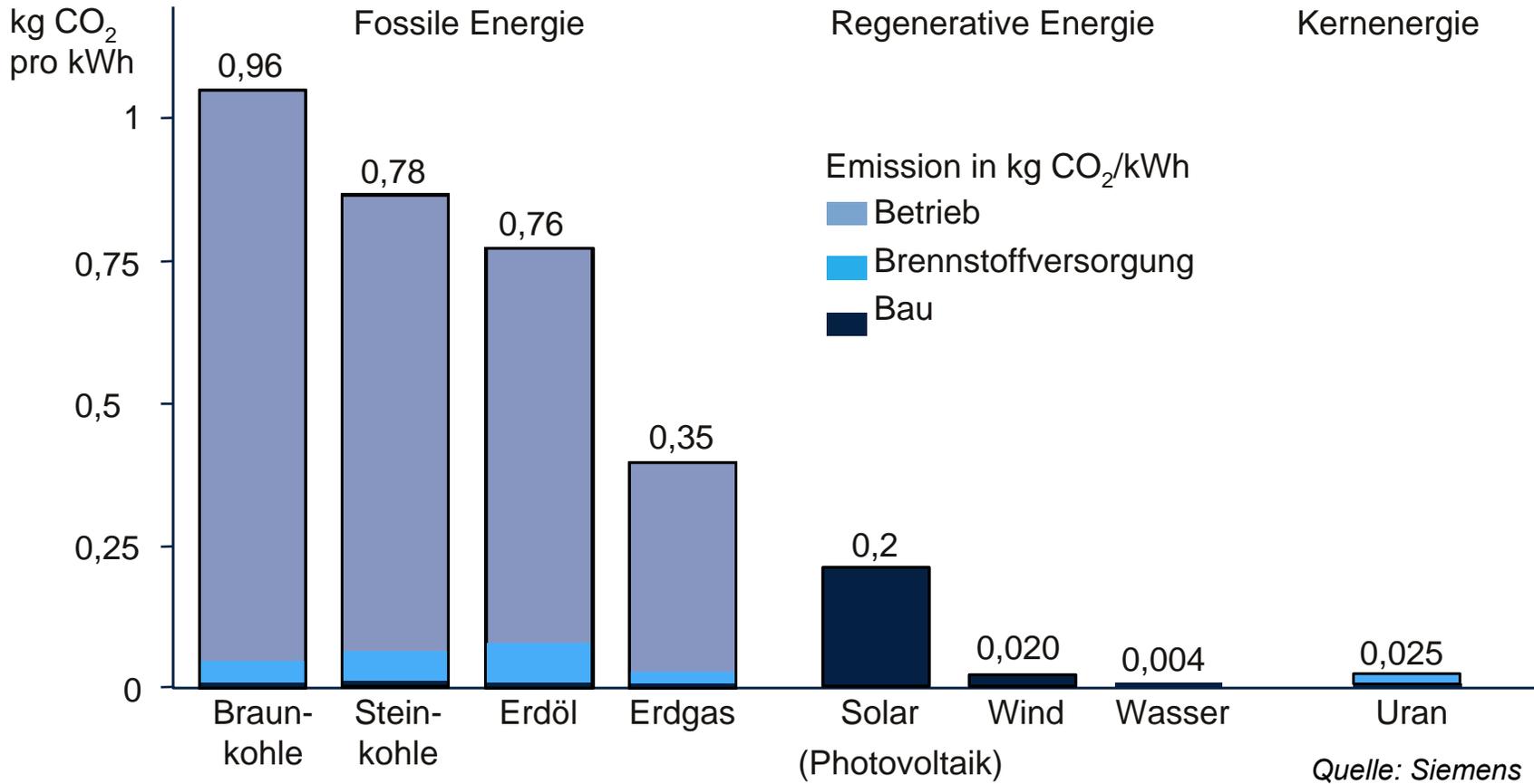


Braunkohle 27%

CO₂-Emission

CO₂-Emissionen bei der Stromerzeugung in verschiedenen Kraftwerkstypen

Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik



Kalorische Kraftwerke

Kalorische Kraftwerke: Strom aus thermischer Energie

- Stein-/Braunkohleverbrennung → Wasserdampf → el. Strom
- Kernspaltungsenergie → Wasserdampf → el. Strom
- Erdgasverbrennung → Rauchgas → el. Strom

Zugeführte therm.
Leistung P_{zu}
Heißdampf-
temperatur T_{zu}



Abgeführte el.
Leistung P_{ab}
Kondensat-
temperatur T_{ab}

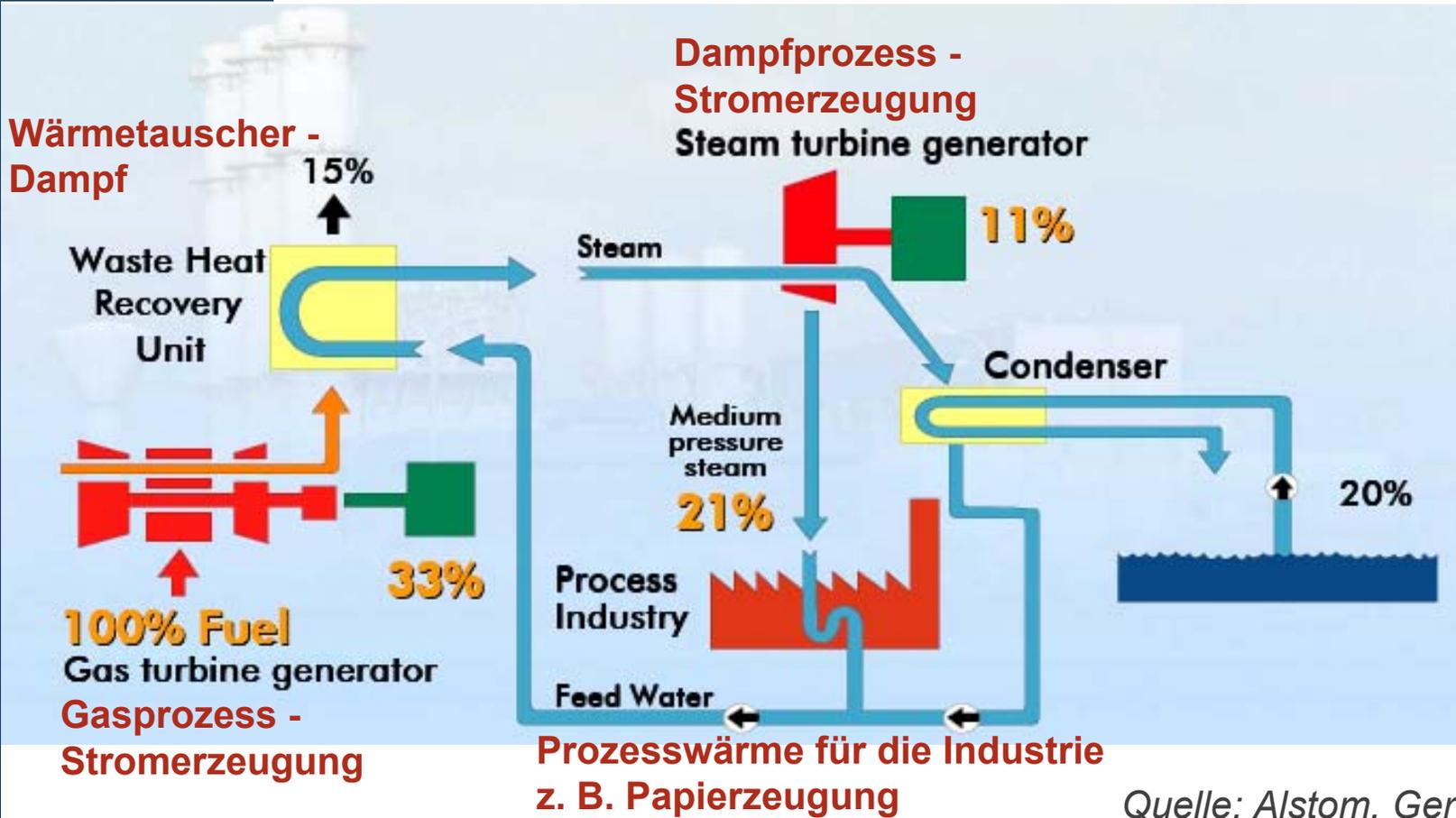
Bestmöglicher Wirkungsgrad
= Idealer *Carnot*-Prozess:



Abwärmeleistung
im Kühlmittel P_d

$$\eta_{\text{Carnot}} = P_{ab} / P_{zu} = 1 - T_{ab} / T_{zu}$$

Industrie-GuD-Kraftwerk – mit Kraft- Wärme-Kopplung (KWK)



Elektrischer Wirkungsgrad: $33 + 11 = 44\%$

Thermischer Wirkungsgrad: $44 + 21 = 65\%$

GuD-Kraftwerk *Irsching/Bayern (e.on)*: (fertig 2011)

530 MW elektrisch, Wirkungsgrad: **60%**

Weltspitze bzgl. Leistung und Wirkungsgrad

(zur Zeit: Weltspitze: 58,4 %)

- 40 000 Tonnen CO₂ p. a. durch Wirkungsgraderhöhung

z. Zt. weltweit im Mittel: GuD-Wirkungsgrade: **45 %**



Gasturbine: Numerische Strömungsoptimierung der Beschaufelung

Quelle: Siemens

- **Steinkohle-Kraftwerk *Moorburg* (Vattenfall):**

2 x 820 MW elektrisch, Wirkungsgrad: 46,5%

Wasserdampf: Eintritt: 600°C, 276 bar Überdruck

Ausgang: 26 mbar Unterdruck (Dampf bei ca. 20°C)

Wirkungsgrade im Mittel z. Zt. in Deutschland: 38%
weltweit: 30%

CO₂-Reduktion durch Wirkungsgradsteigerung:

Von 850 auf 700 Gramm/kWh el. Leistung

- **Braunkohle-Kraftwerk *Boxberg R* (Vattenfall):**

675 MW elektrisch, Wirkungsgrad: 43,3%

Wasserdampf: Eintritt: 600°C, 286 bar Überdruck

Ausgang: 39 mbar

CO₂-Reduktion von 1200 auf 900 Gramm/kWh el. Leistung

- CO₂-Abtrennung (Zukunft)
- Erdwärme
- Biomasse
- Wasser
- Wind
- Photovoltaik

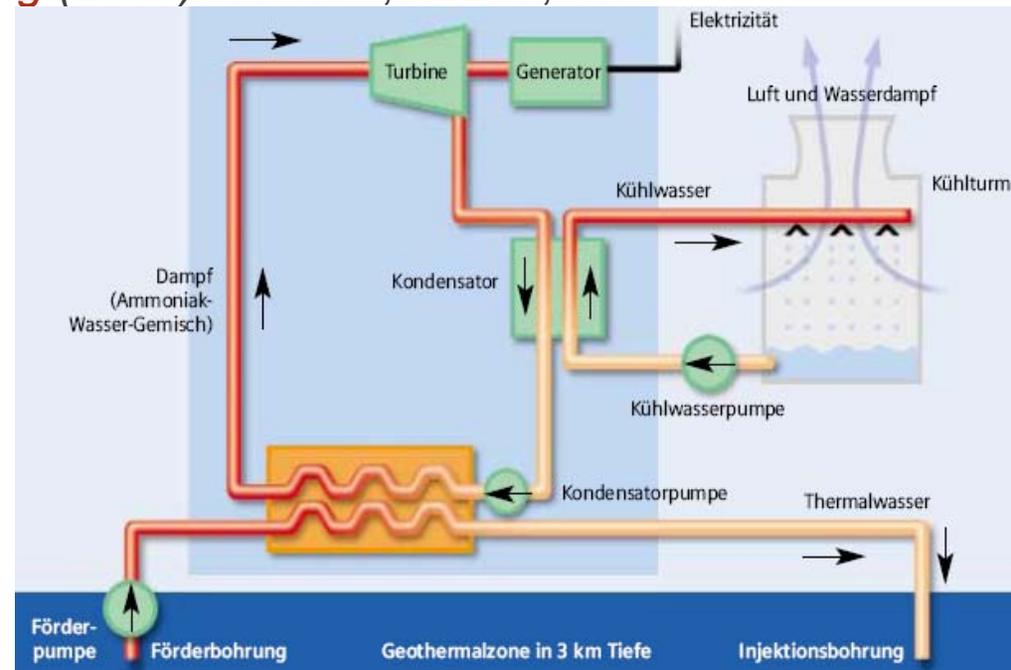
Stromerzeugung aus Erdwärme

- 3 km tiefes Bohrloch: ca. 120°C – erzeugter Wasserdampf: zu geringer Druck für Dampfturbine
- **Kalina-Prozess:** Wärmetauscher: Wasser-Ammoniak-Gemisch (Siedepunkt Ammoniak: -33°C): hoher Dampfdruck für Dampfturbine
- Geschlossener Kreislauf: Wärmetauscher zum Kühlturm
- **Projekt München-Unterhaching (2007):** 3300 m, 122°C, 150 l/s

a) 3,3 MW elektrisch

b) Heizfernwärme für
10 000 Personen, 25 l/s

- **CO₂-Vermeidung:**
12000 Tonnen pro Jahr



Quelle: Siemens

- **Biomasse:** Verbrennung organischer Materialien
 - Holz, - Deponiegas

Erzeugtes CO₂ ist gleich dem bei der Photosynthese benötigten CO₂ nachwachsender Pflanzen = **CO₂-neutral**

- **Probleme:** Ablagerungen und Korrosion in der Brennkammer

Ausführungsbeispiele:

Landesbergen (D) (2003): 20 MW el., 31% Wirkungsgrad, Holz

Düsseldorf (D): (08/2007): 25 GWh/a el., 78 GWh/a Heizung

- **Forschung: Holzvergasung**, in GuD-Kraftwerken mit verbrannt:
 - erwarteter Wirkungsgrad: 40%
 - bei Zumischung von Erdgas: 60%



Wasserkraftwerke

Niederdruck	Mitteldruck	Hochdruck
Volumenstrom hoch	Volumenstrom mittel	Volumenstrom klein
Flusskraftwerk	Flusskraftwerk	Speicherkraftwerk
Wallsee/Austria	3 Schluchten/ China	Bieudron/Schweiz
$H = 9.1 \text{ m}$	$H = 183 \text{ m}$	$H = 1883 \text{ m}$
$\dot{V} = 2880 \text{ m}^3/\text{s}$	$\dot{V} = 12295 \text{ m}^3/\text{s}$	$\dot{V} = 86 \text{ m}^3/\text{s}$
$P_e = 210 \text{ MW}$	$P_e = 18000 \text{ MW}$	$P_e = 1295 \text{ MW}$
Kaplan-Turbinen	Francis-Turbinen	Pelton-Turbinen
6 x 35 MW	26 x 692 MW	3 x 432 MW

Großprojekt Drei-Schluchten am Yangtse-kiang:

- Schiffbarmachung für Containerschiffe bis *Tschungking* (20 Mio. Einwohner)
- Stromerzeugung (18 GW !) als „Nebenprodukt“ !

Wasser-Kraftwerke „Large Hydro“

- Hoher technischer Reifegrad, Wirkungsgrad ca. 80%
- Großprojekte in *Asien, Afrika, Lateinamerika*
- *Europa*: - Erneuerung (refurbishment) – Wirkungsgraderhöhung
 - Ausbau Kraftwerksleistung bestehender **Speicher**seen
z. B. *Kopswerk/Österreich*: + 500 MW (= + 100%)



*Kaplan-Turbine –
Donaukraftwerk Greifenstein*

Institut für Elektrische
Energiewandlung

Limbergsperre/Österreich

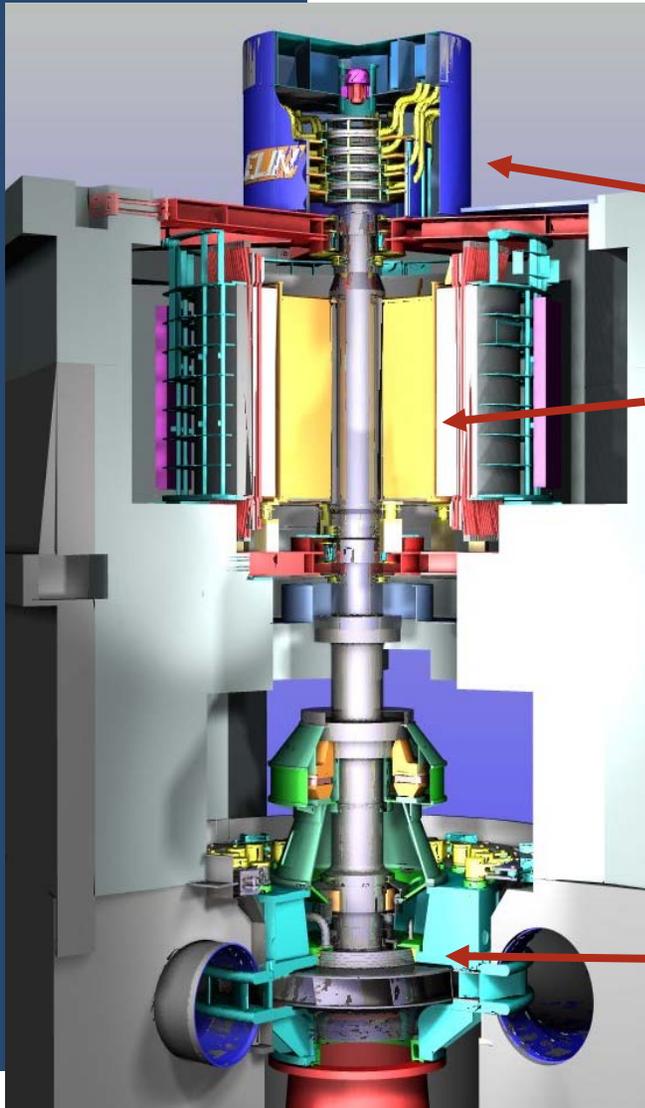
Vianden/Luxembourg (zehnte Maschine)



Pumpspeicher-
Kraftwerk
Geestacht

*Francis-
Turbinen*

Pumpspeicher-Kraftwerk *Goldisthal/Thüringen*



**Umrichter-
einspeisung**

2 x 340 MVA, 300 ... 346/min,
18-polig, 50 Hz

**Asynchron-
generatoren**

Innovation:

Drehzahlveränderbarer
Pumpbetrieb

Asynchrongeneratoren, im
Rotor über Umrichter
gespeist

Verbesserter Wirkungsgrad

Erweiterter Betriebsbereich
gegenüber Konstant-
Drehzahlbetrieb

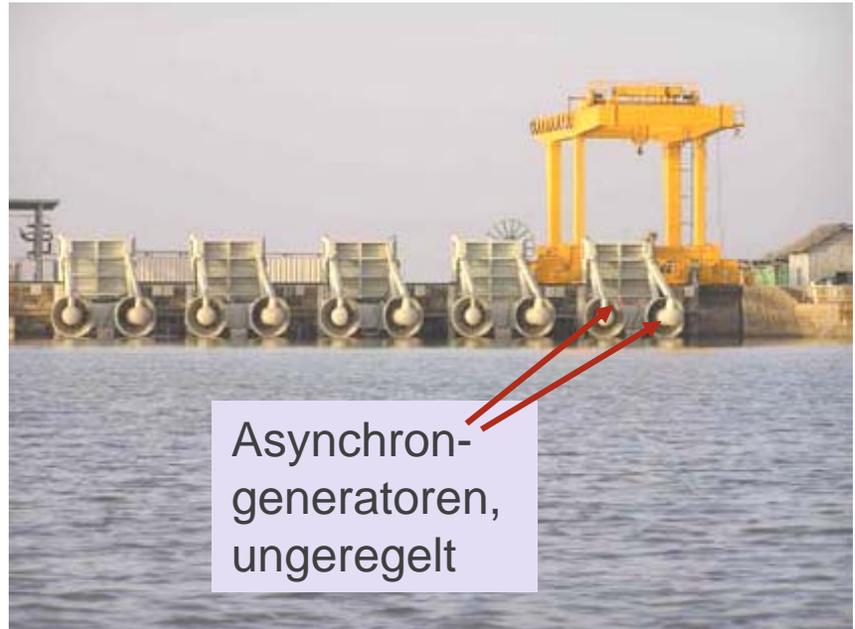
Pump-Turbine

Quelle: VA Tech Hydro

„Small Hydro Power“



Freudenau/Donau, Wien



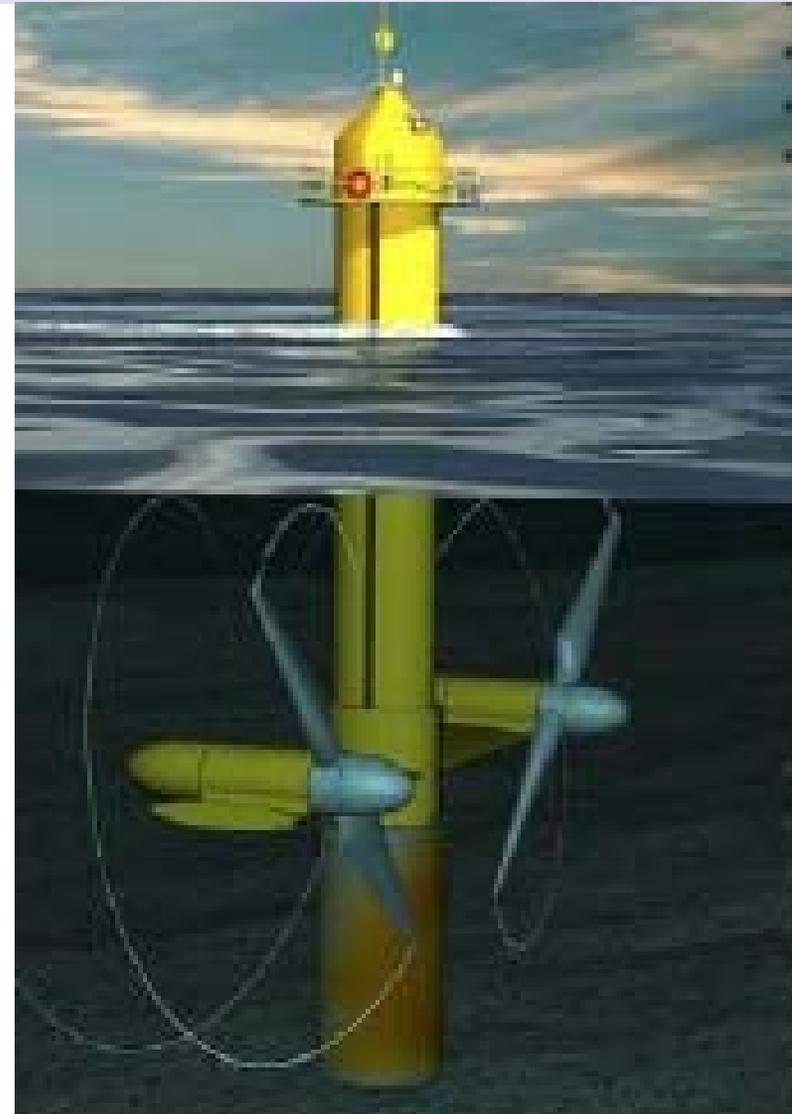
Asynchron-
generatoren,
ungeregelt

Djebel Aulia/Nil, Sudan Quelle: VA Tech

Beispiel:

- **Matrixturbine:** Nutzung des Restwassers in aufgestauten Flüssen (Flussschifffahrt)
- Zahlreiche kleine Propellerturbinen: Gute Integration in Dammtafeln
- Leistung pro Turbine: ca. 200 ... 500 kW

- Prinzip der Windturbine **unter Wasser**, Getriebe und Generator
- 10...20 /min je nach Gezeitenströmung
- Wesentlich kompakter als Windturbinen wegen der 1000-fach höheren Dichte „Wasser vs. Luft“
- **Zukunft:** Farmen mit ca. 40 Turbinen
- **Optimistische Schätzung:** Gezeiten- und Wellenkraftwerke könnten 10...15% von Englands Strombedarf decken



Quelle: Marine Current Turbines, Bristol, UK

Strangford Lough Pilotprojekt

- 600 kW-Propeller, 16 m Durchmesser
- Küste Nordirlands (*Strangford Lough*) Pilotprojekt mit 2 Turbinen



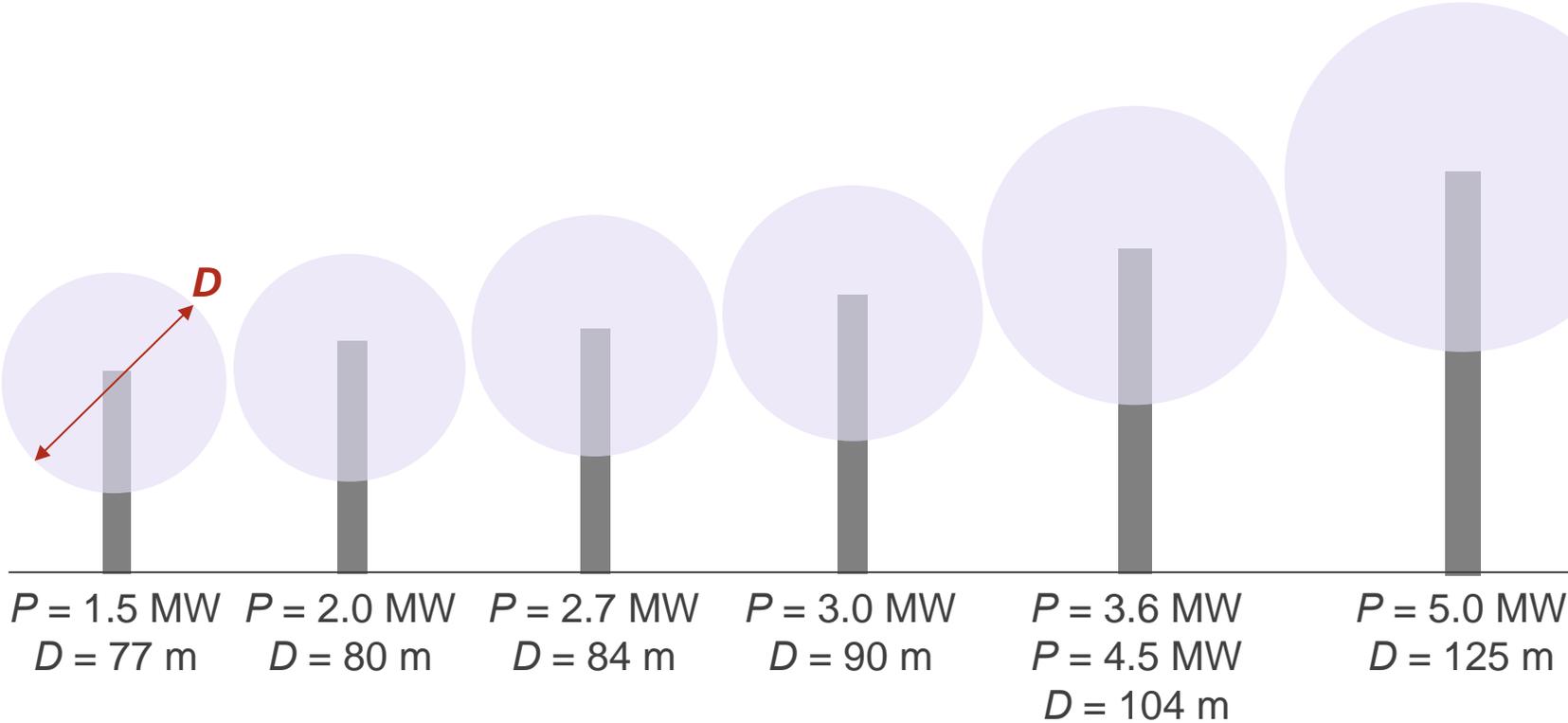
Quelle: Marine Current
Turbines, Bristol, UK

- Etwa **45% aus der kinetischen Windenergie entnehmbar**; Wind muss hinter der Windturbine („Lee“) abströmen können
- Standort-abhängig; statistisch schwankendes Windangebot
 - „on-shore“: **ca. 1500 Volllaststunden**
 - „off-shore“: **ca. 2500...3000 Volllaststunden**
- 1.5 / 2.5 / 3.5 MW-Turbineneinheiten sind „Standard“
- 5 MW-Einheiten in kleiner Stückzahl in Erprobung (z B. für off-shore)
- "fault-ride-through" Anforderung zukünftig erfüllen!
- **Windfarmen** – Ausgleich lokaler Schwankungen
- **Dreiblatt-Rotoren**
 - drehzahlvariabler Betrieb**
 - Anpassung an Windgeschwindigkeit**
 - a) Getriebe 1:100 und Asynchrongeneratoren
 - b) Getriebe 1:10 und Permanentmagnet-Synchrongeneratoren
 - c) OHNE Getriebe, PM-Synchrongeneratoren



Windgeneratoren - Leistungsdaten

- Rotorblattverstellung ("Pitch") zur Leistungsanpassung
- "Fahnenstellung" bei Sturm



P: Turbinen-Nennleistung

D: Rotorkreisdurchmesser

Getriebe-Windgeneratoren - *Beispiel: 5 MW*

Windrotor: 110 t

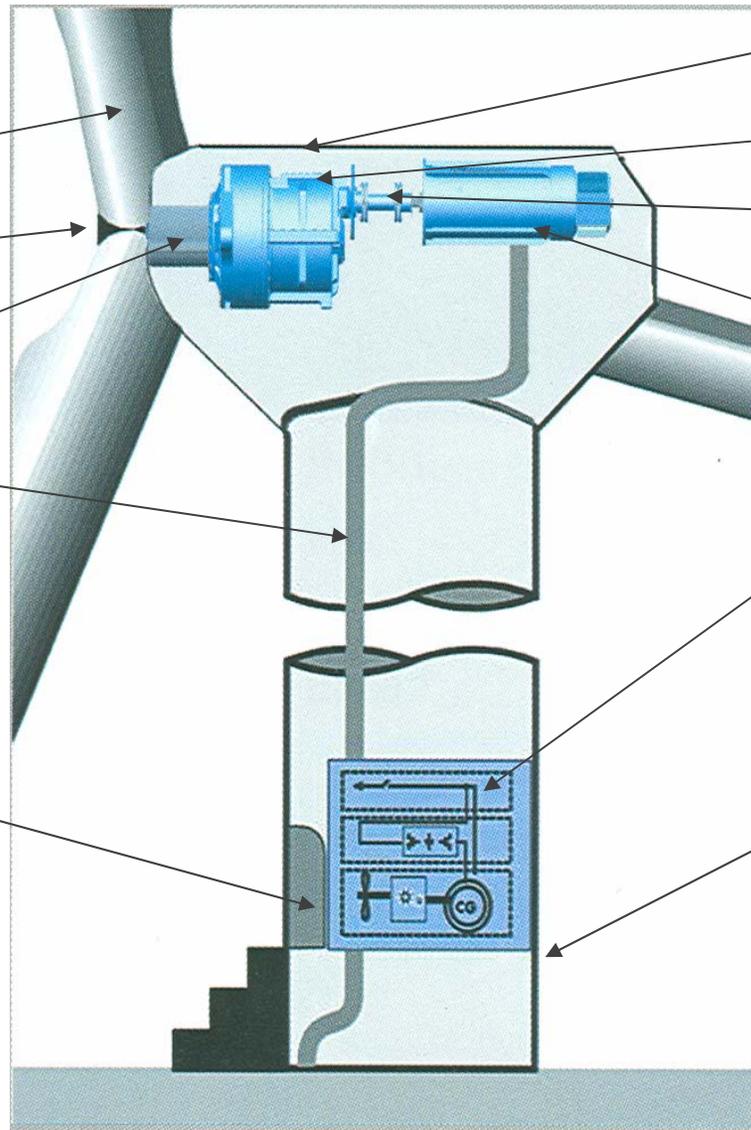
Rotorblatt

Rotornabe

Turbinenwelle

Generator-
Netzanschluss
dreiphasig 690 V

Transformator für
Erhöhung der
Spannung zum
Netz 20 kV



Gondel: 240 t

Dreistufiges Getriebe

Generatorwelle +
Kupplung

Asynchronengenerator
mit
Rotorschleifringen

Rotorseitiger
Umrichter

Mast

Quelle: Winergy, Germany

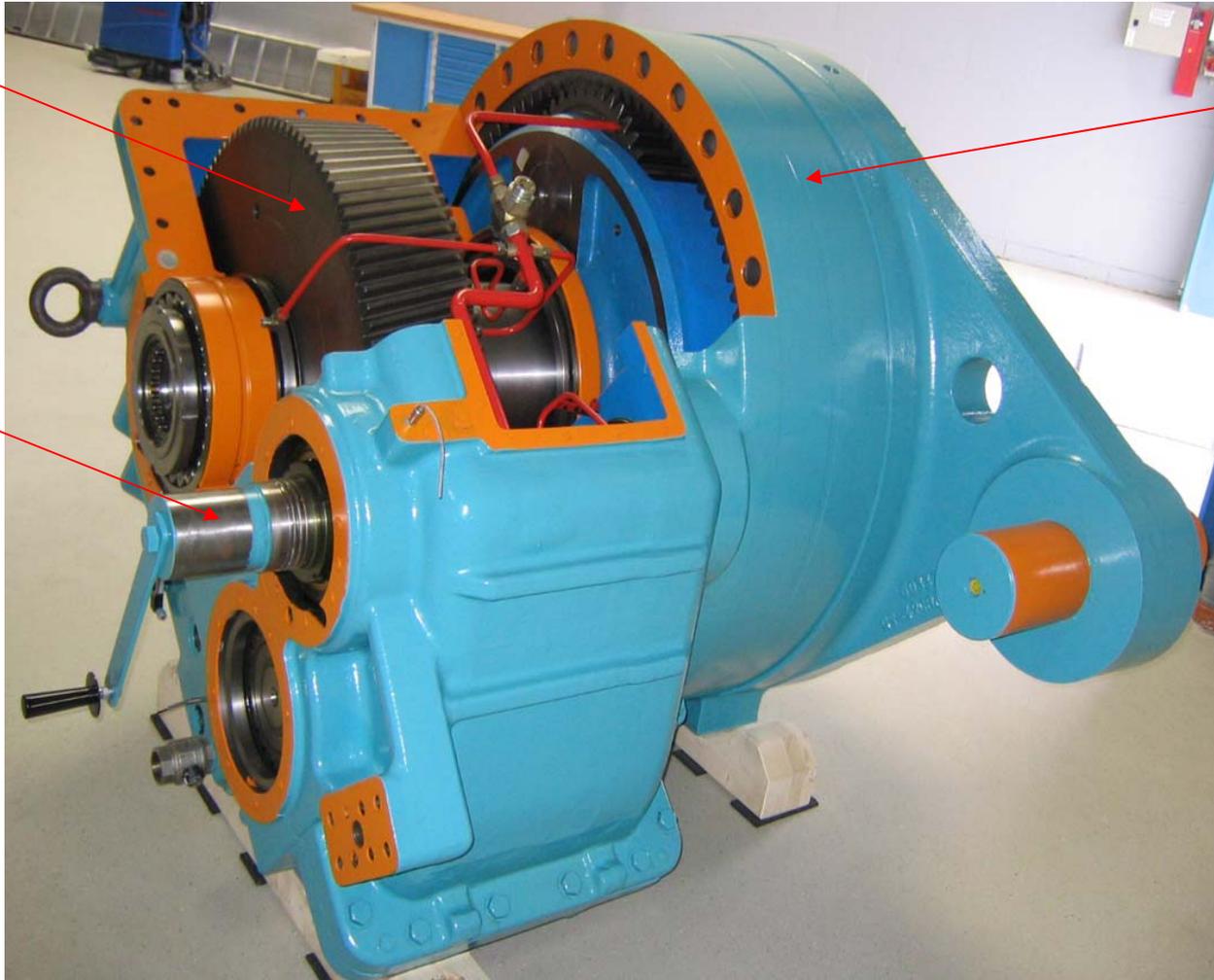
Planetengetriebe mit zwei Stirnradstufen

Übersetzung $i = 100, 15$ auf 1500/min

Leistung: 1.5 MW, 14 Tonnen, 300 l Öl

2. Stufe:
Stirnrad-
getriebe

3. Stufe:
Stirnrad-
getriebe
1500/min



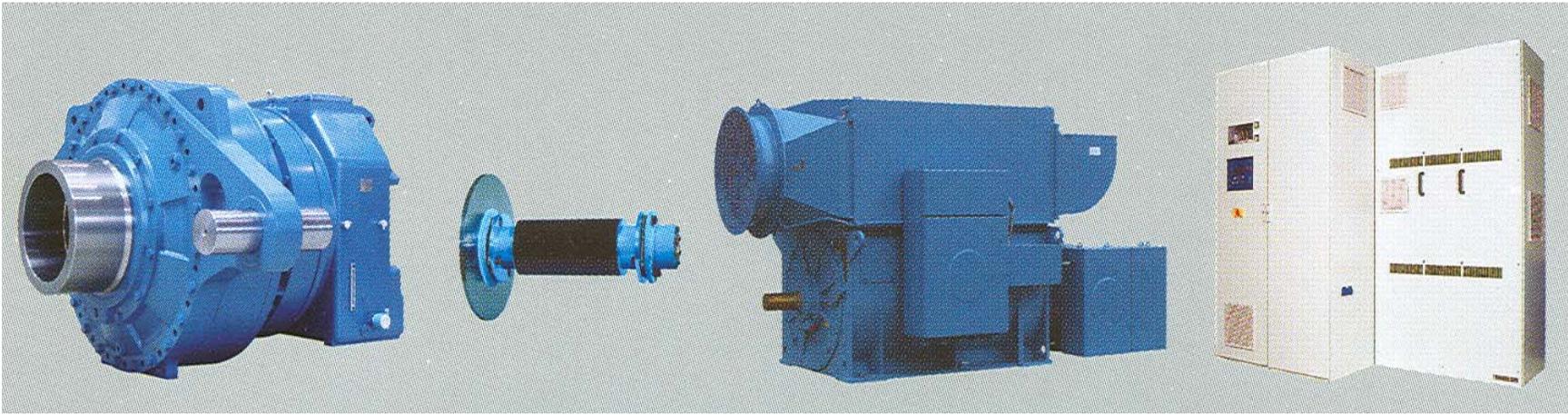
Erste
Stufe:

Planeten-
getriebe
15 U/min

Quelle:
GE Wind,
Germany

Getriebe-Windgeneratoren

Komponenten, *Beispiel: 2 MW*



3-stufiges Getriebe
Hohlwelle zum
Windrotor

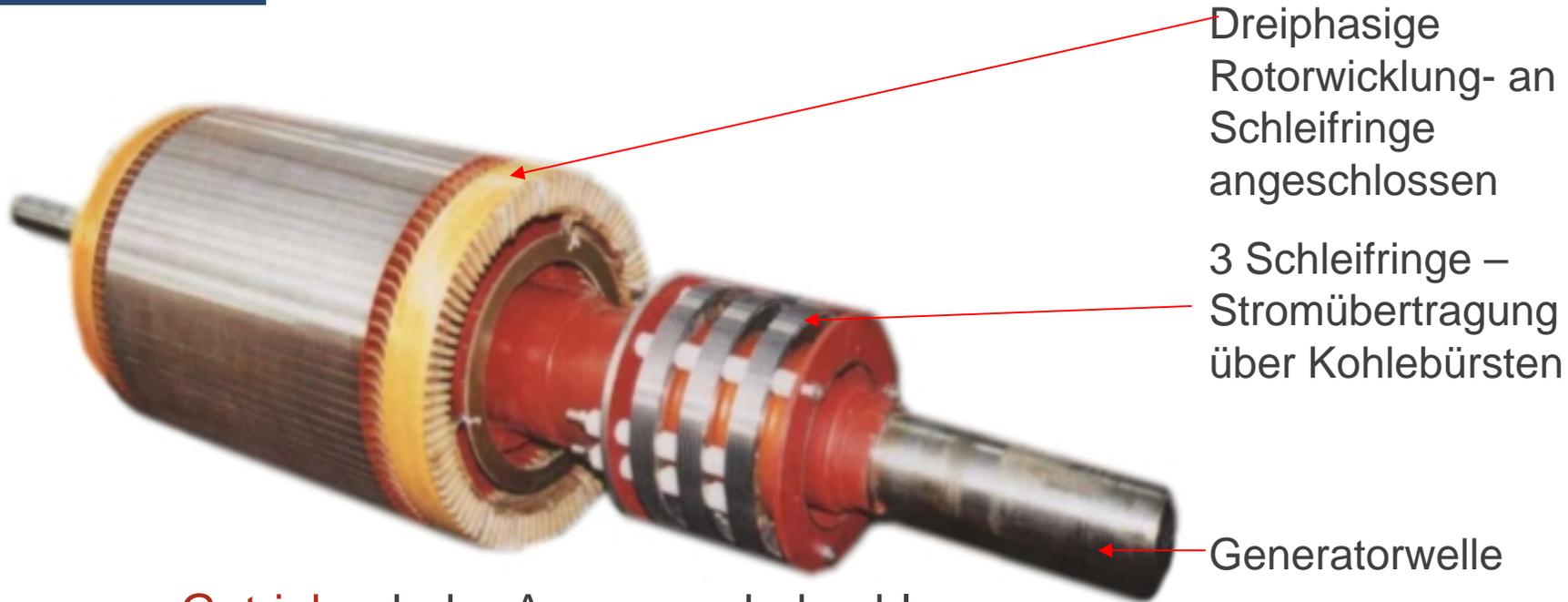
Generatorwelle
Bremsscheibe
Kohlefaser
Kupplung

Asynchrongenerator
Aufgebauter Kühler
Rotorschleifringe

Rotor-Umrichter
mit Netzfilter

Quelle: Winergy, Germany

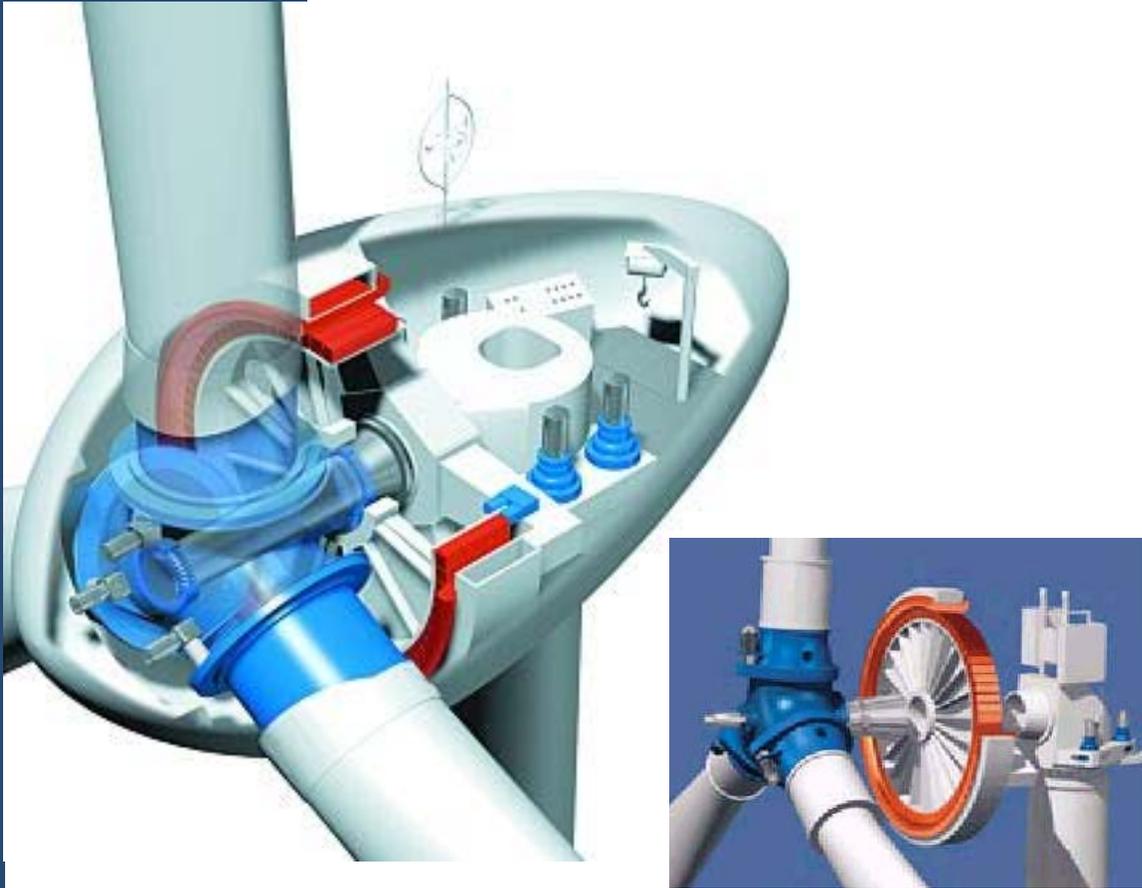
Rotor eines Asynchrongenerators Dreiphasig, drei Schleifringe



- **Getriebe:** hohe Ausgangsdrehzahl $n = 1500/\text{min}$, kleines Drehmoment
- **Kleiner Generator,** Netzfrequenz $f = 50 \text{ Hz}$
- Frequenz = Drehzahl x Polpaarzahl $f = n \cdot p$
- Niedrige Polzahl $2p = 4$

Quelle: GE Wind, Germany

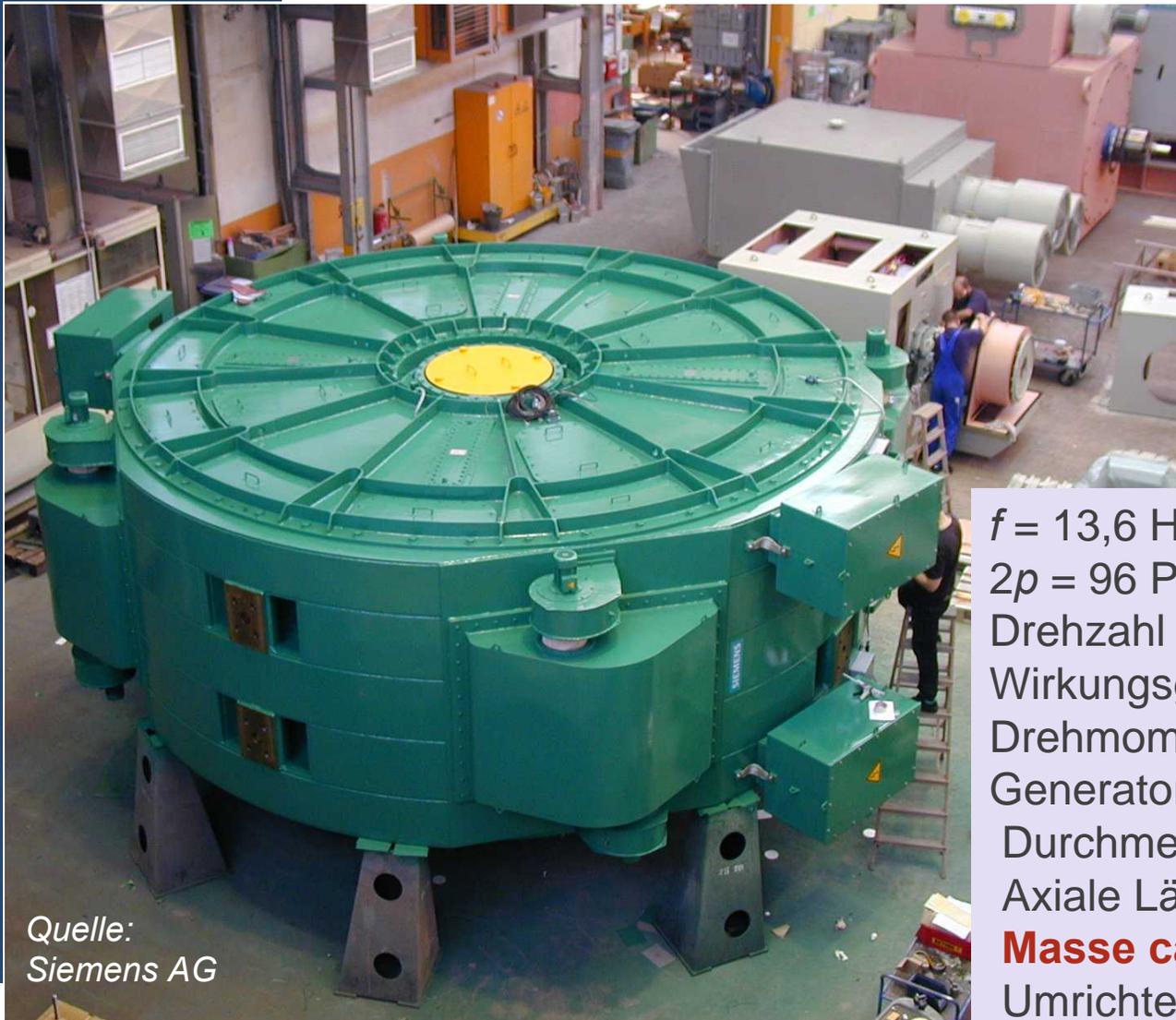
Getriebebelose Windgeneratoren



- **Große** Generatoren & Umrichter
- **Hohe** Investitionskosten, aber wartungsarm:
KEIN Getriebeöl, **KEINE** Kohlebürsten

Quelle: Enercon

Permanentmagnet-Windgenerator Scanwind / Norwegen 3 MW, 17/min



Quelle:
Siemens AG

$f = 13,6 \text{ Hz}$
 $2p = 96 \text{ Pole}$
Drehzahl $n = 17/\text{min}$
Wirkungsgrad 95,5%
Drehmoment: 1685 kNm (!)
Generator:
Durchmesser ca. 5,8 m,
Axiale Länge: ca. 2,3 m
Masse ca. 85 t
Umrichterleistung 3 MW

Photovoltaikkraftwerke



Solarpark Leipziger Land (Sachsen): 5 MW peak

Source: GEOSOL

Deutschland:

- Seit 2006: Weltweit höchste installierte Photovoltaik-Peak power
Zweiter Platz: *Japan*
- Installierte Photovoltaikleistung pro Kopf: 150% von *Japan*
- 750 MW neu installierte PV-Kraftwerksleistung (Private & Versorger)
- Installierte Summenleistung: 2.6 GW; erzeugte Energie: 2 TWh
- **770 Volllaststunden**
- Inselbetrieb-Nutzung (z.B. Verkehrssysteme): total 32 MW installiert

Über 30% Dünnschichtzellen in den neuen PV-Kraftwerken!

Beispiele:

- *Solarpark Gut Erlasee: (Arnstein/Bayern): 12 MW peak power*
- *Solarpark Pocking (Bayern): 10 MW peak*
- *Solarpark Leipziger Land (Sachsen): 5 MW peak*
- *BGZ Solarpark Passauer Land (Bayern): 3.3 MW*
- *Bürgersolarpark Fünfstetten: 1.7 MW peak*
- In Bau: bis 2009

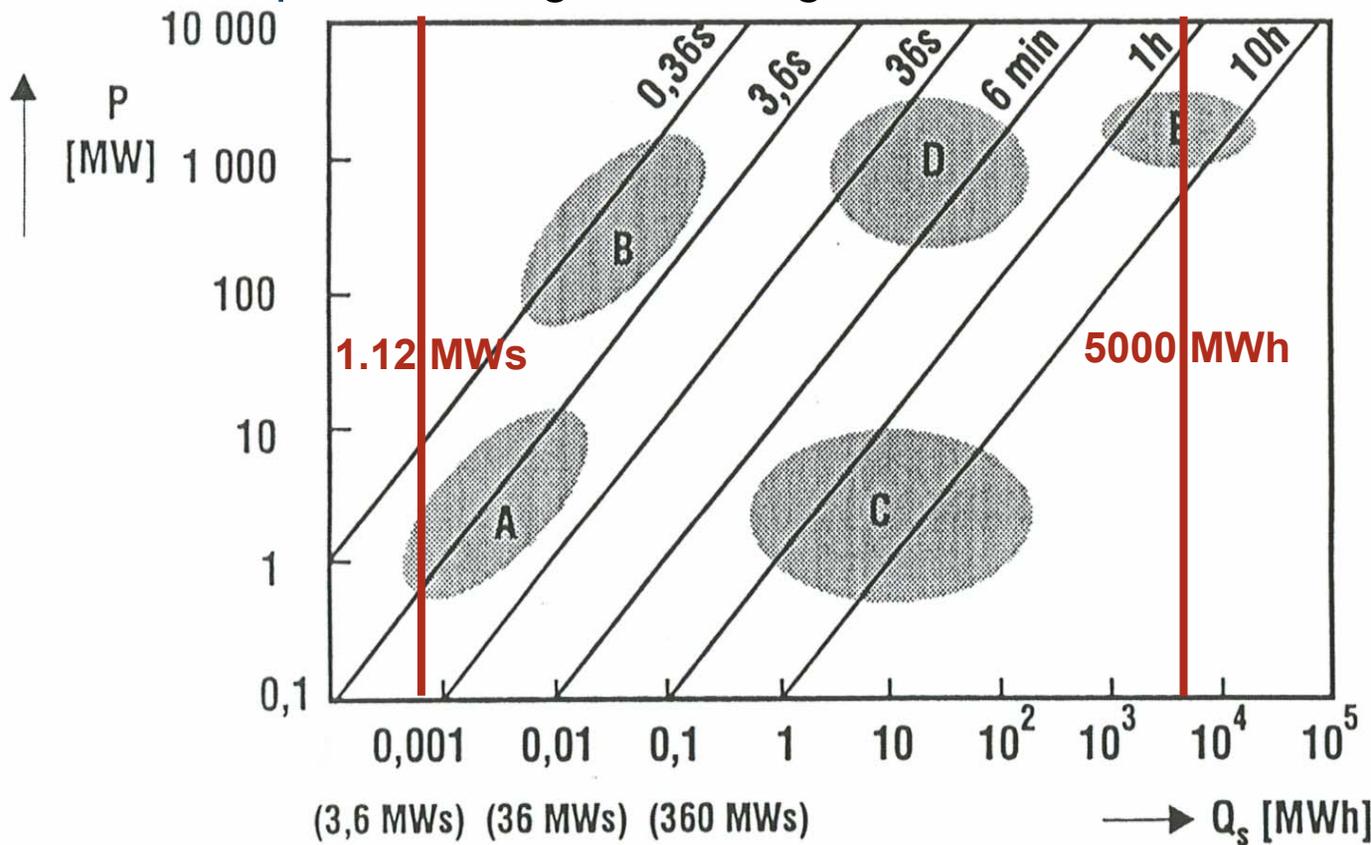
Solarpark Waldpolenz (Leipzig, Sachsen):

550000 Solarmodule, 40 MW pk
bedeckte Grundfläche: 220 Hektar
40 Million kWh/a
20000 Tonnen CO₂ pro Jahr vermieden



Speichergrößen - Einsatzbereiche

- A, B: Kleinspeicher: USV: schneller Leistungsausgleich (ms-Bereich)
- C, D: Mittlere Speicher: Kraftwerksleistungsausgleich (Primärregelung – Sekundenreserve)
- E: Großspeicher: Tageslastausgleich

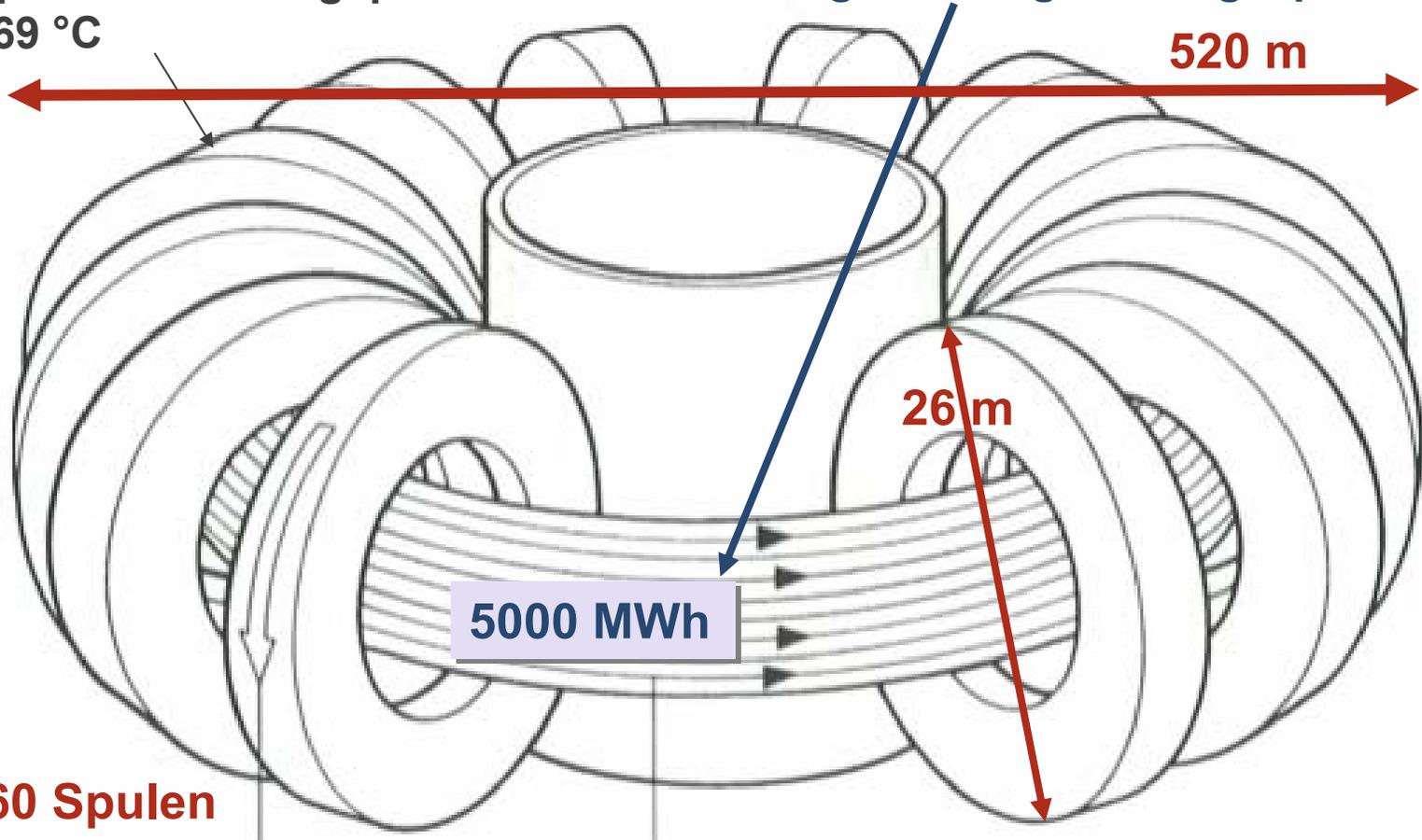


Quelle:
Komarek,
FSZ Karlsruhe

Zukunft: Magnetische Großspeicher?

Supraleitende Ringspulen
- 269 °C

Energie im Magnetfeld gespeichert



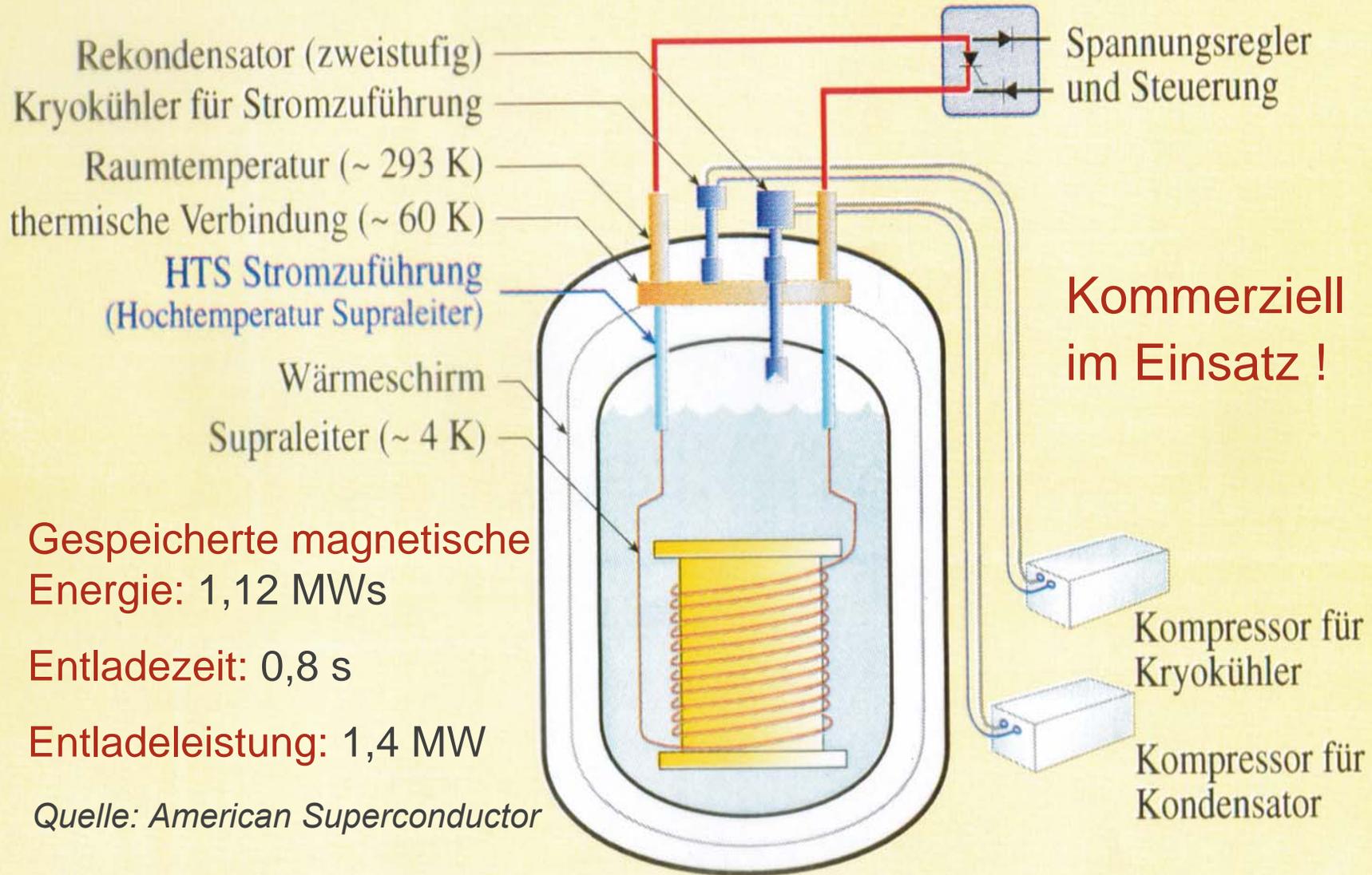
360 Spulen

Spulenstrom
150 kA

Magnetische Flussdichte
9 T

Quelle: Max-Planck-Gesellschaft

Supraleitende magnetische Klein- Energiespeicher (im Handel)



- **Fakten zur elektrischen Energie**
- **Elektrische Energieerzeugung – heute und morgen**
- **Effiziente ele. Energienutzung in der Antriebstechnik**
- **Antriebstechnische Trends zum Energiesparen**
- **Ausblick**

Elektrische Energie sparen in der Industrie

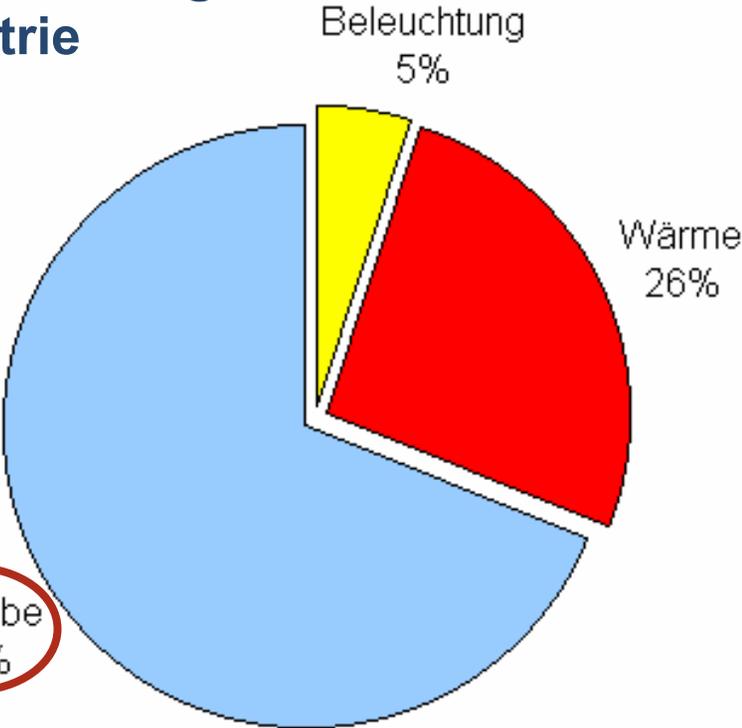
Nutzung der elektrischen Energie in der deutschen Industrie

- Etwa **47%** der elektrischen Energie werden in Deutschland **in der Industrie** benötigt.
- Davon werden 69% zur Umwandlung in **mechanische Arbeit** verwendet.

Antriebstechnik:

- Nutzung der Endenergie: ca. 10%
- Industrie: 5%
 - Haushalt/Gewerbe/Verkehr: 5%

Antriebe
69%



- ### Geforderte CO₂-Minderung EU:
- ca. 10% von 780 Mio. To. = ca. 80 Mio. To.
- Industrieantriebe: 39 Mio. To.
 - Haushalt, Gewerbe, Verkehr: 41 Mio. To.

Quelle: Automatisierungstechnische Praxis, 2002

Wirkungsgrad: Verhältnis von abgegebener zu aufgenommener **Leistung** für einen bestimmten Lastpunkt: „Drehzahl/Drehmoment“: n, M

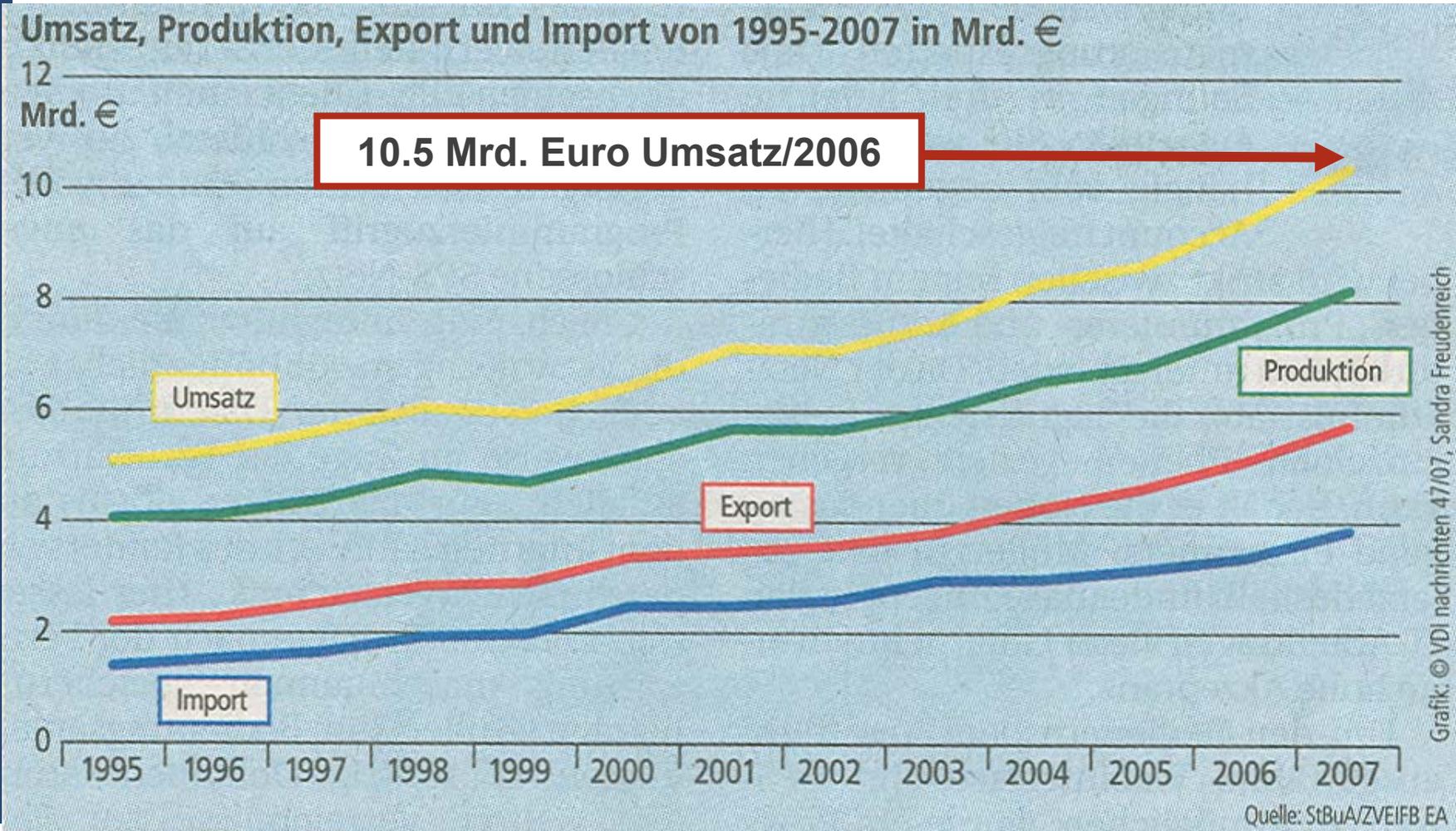
$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{abgegebene Leistung}}{\text{zugeführte Leistung}}$$

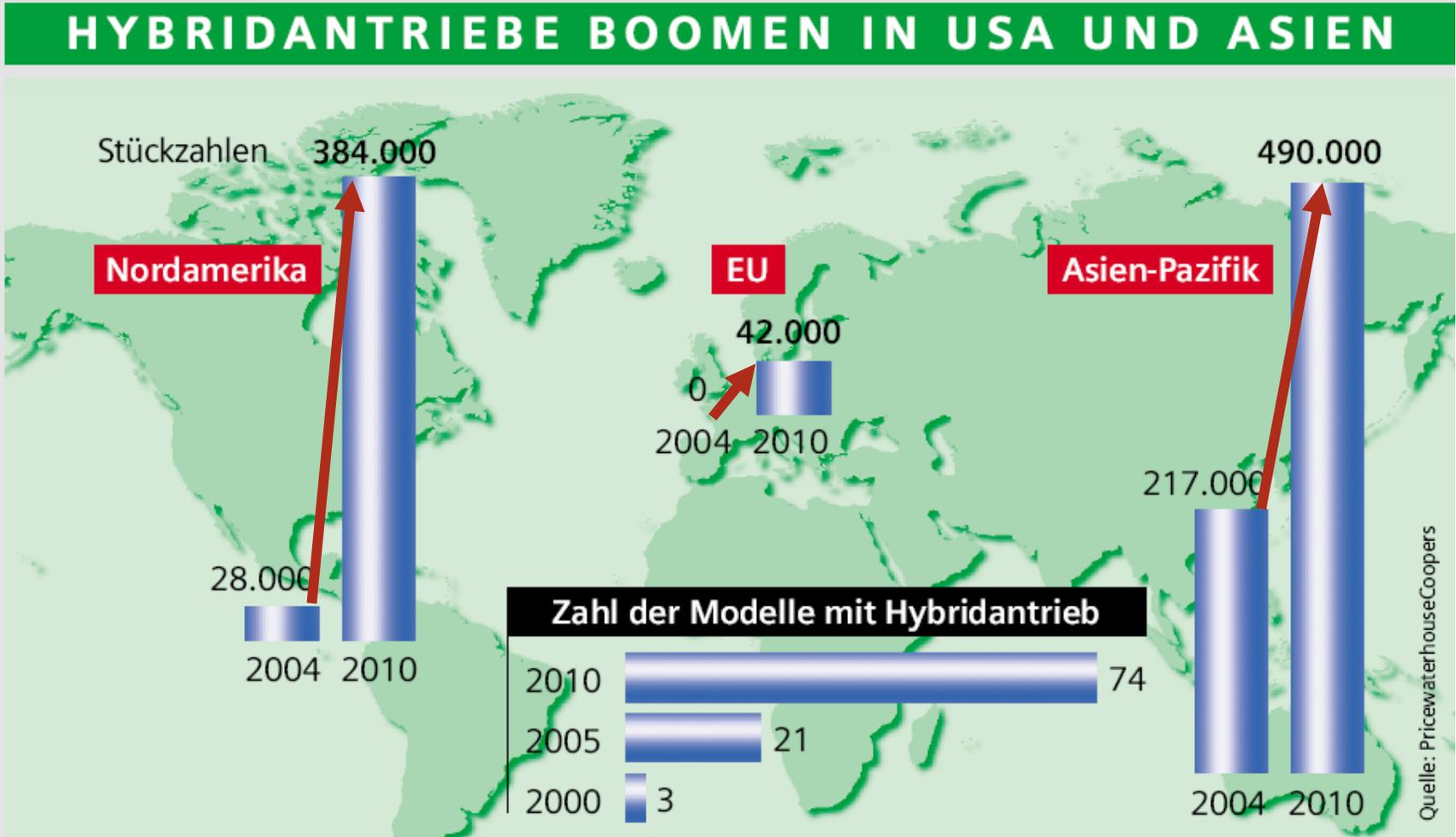
Effizienz: Verhältnis von abgegebener zu aufgenommener **Energie** für ein definiertes Lastspiel

- Unterschiedliche Lastpunkte n, M
- Für unterschiedlich lange Betriebsdauern im jeweiligen Lastpunkt

Marktsituation „Industrieantriebe“

Deutschland: Gesamte Antriebstechnik (inkl. Kleinantriebe, Umrichter)





2004 → **2010**

Industrielle Antriebstechnik:

Geschätztes Energieeinsparpotential:

Motorwirkungs-
grad

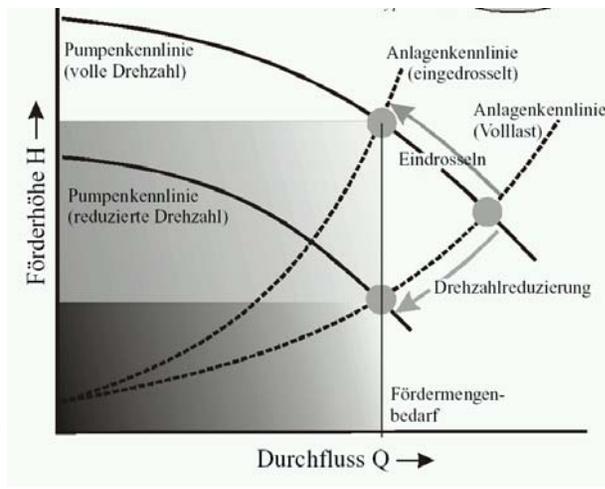
1.4% ... 3%



Quelle: Leroy Somer;
France; KSB, Deutschland

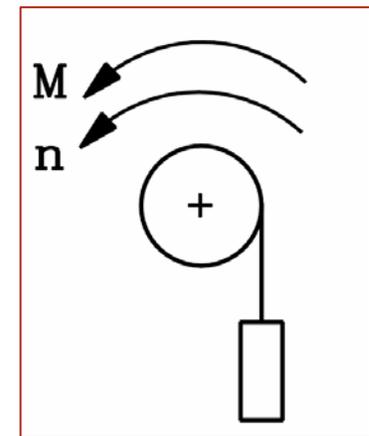
Drehzahl-
anpassung

8 % ... 10%

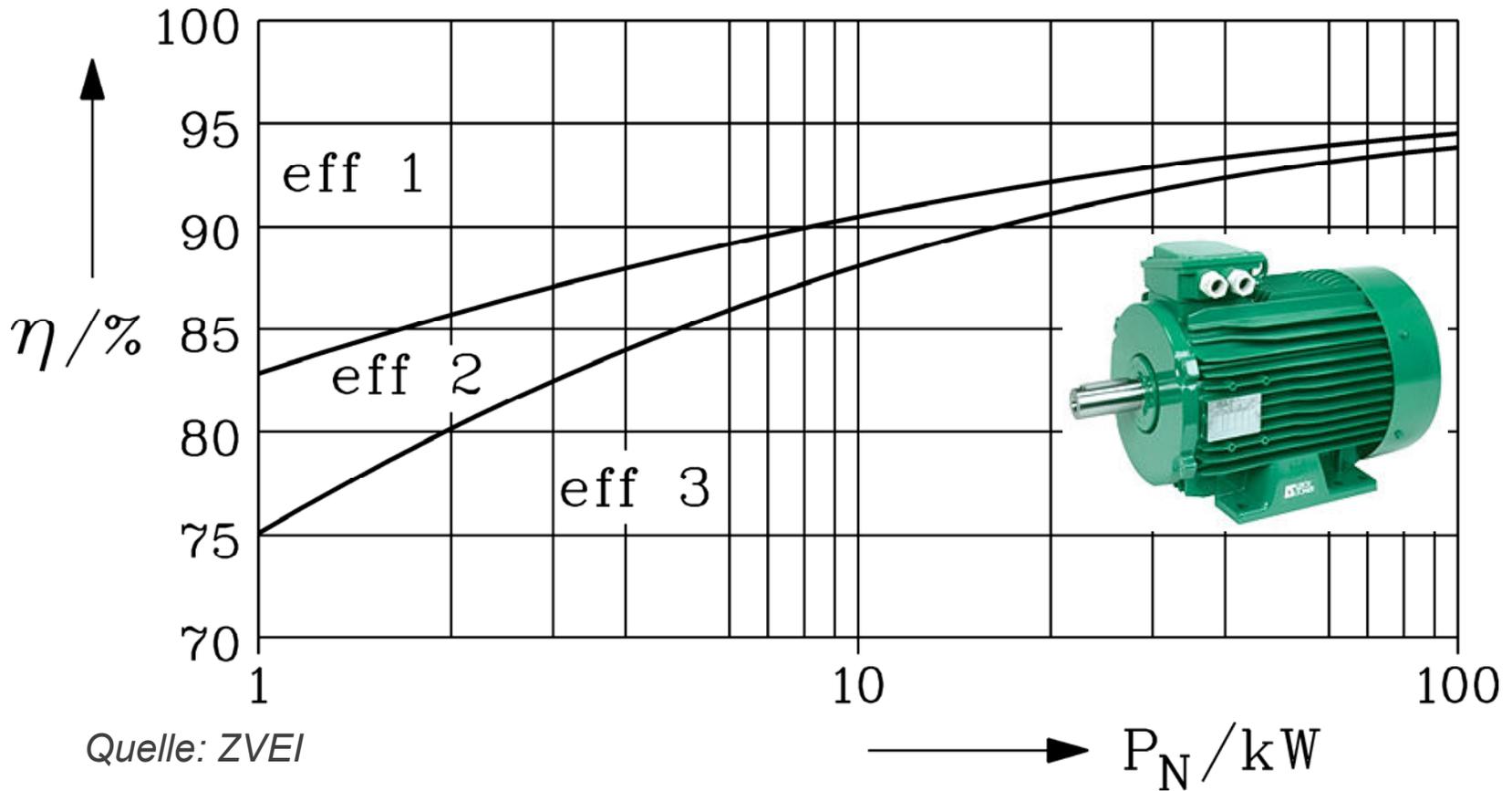


System-
optimierung

15 ... 20 %



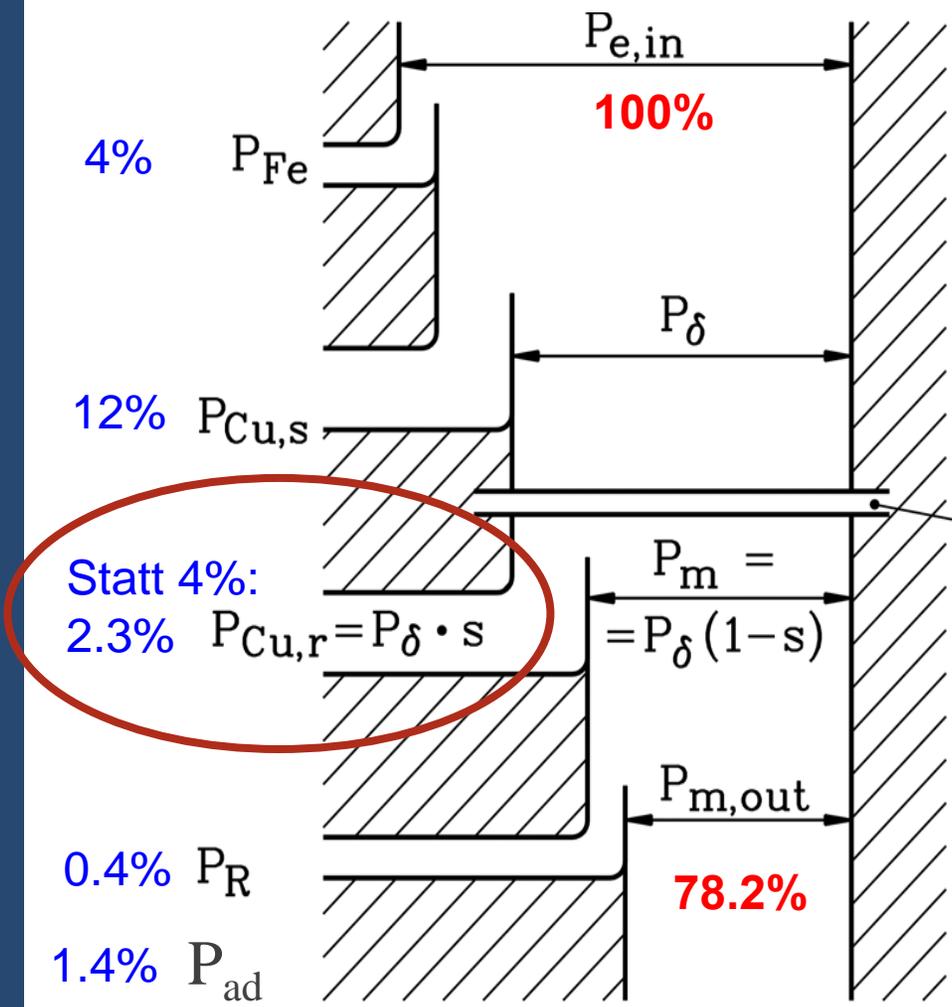
Wirkungsgradgesteigerte Norm-Asynchron-Motoren



- **Wirkungsgrad η** über der **Motornennleistung P_N** , vierpolige Norm-asynchronmotoren, Nenndrehzahl ca. 1500/min, 50 Hz Netzfrequenz

Kupferguss bei Norm-Asynchronmotoren – Premium efficiency

Verluststruktur:



Verlustarmer Läuferkäfig:

Einführung der Kupferdruckguss-Technik (Rotguss statt Aluminiumdruckguss): $P_{Cu,s}$ und $P_{Cu,r}$ sinken !



Quelle: SEW-Eurodrive, Siemens

Abschätzung für Deutschland:

a) Elektrische Energienutzung (2004):	504 TWh	100%
b) Industrie: 47%	237 TWh	47%
c) Antriebstechnik:	163 TWh	69% von 47%

Maßnahme:

- neue Motoren mit mittlerer Wirkungsgraderhöhung 4 %
- für 50 % der Industrieantriebe

$$4\% \cdot 50\% \cdot 163 \text{ TWh} = 3.3 \text{ TWh}$$

 **1.4 %** (3.3 TWh) Reduktion p.a. des Industriestromverbrauchs

1 TWh = 1 Tera-Wattstunde = 1000 Milliarden Wh

Eff1-Motoren Amortisation

Beispiel: 22 kW-Motor, Betriebszeit 10 h je Werktag = 2500 h/Jahr
EFF1-Motor um 185,-- Euro teurer

Motor	EFF1	EFF2
86% Last	92.6%	91%
Leistungsaufnahme	20.52 kW	20.88 kW
Leistungsdifferenz	- 0.36 kW	
Energieaufnahme/Jahr	51.3 MWh	52.2 MWh
Einsparung/Jahr	- 900 kWh	

Kosten:
Energie: 9 ct/kWh, Leistung: 40,-- Euro/(kW u. Jahr)
Kostensparnis: $0.36 \cdot 40 + 0.09 \cdot 900 = 95.4$ Euro

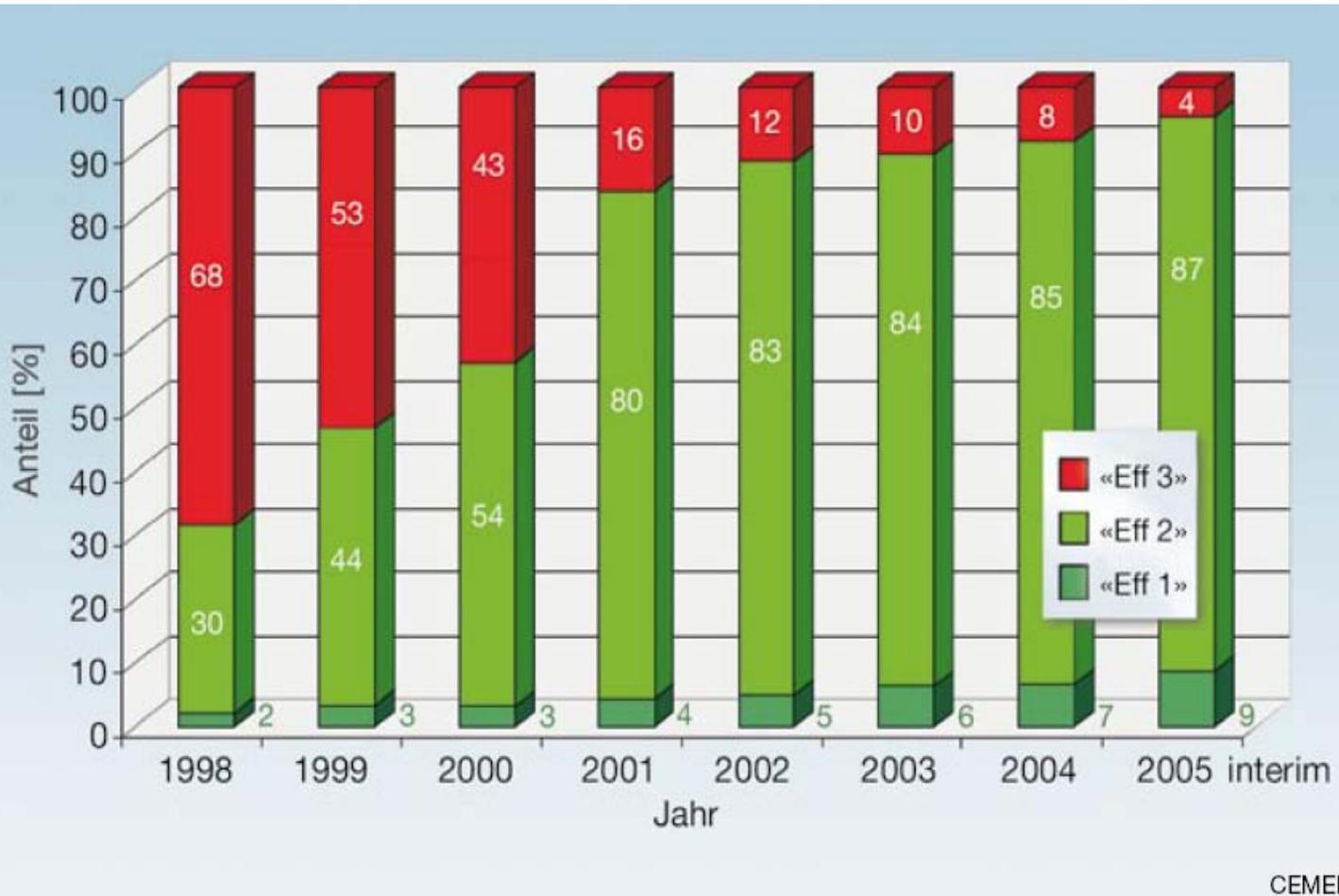
Amortisationszeit: $185 / 95.4 = 1.9 = \text{ca. } 2 \text{ Jahre}$

Quelle: SEV Bulletin, 2005



CEMEP: Marktentwicklung Standardmotoren

- Der Anteil verkaufter eff2-Motoren **stieg ständig** zu Lasten der eff3-Motoren
- Der Anteil eff1-Motoren ist noch klein.



Quelle: SEV
Bulletin, 2005

Industrieantriebe: Anteil der Drehfeldmaschinen steigt rapide:

Asynchron- oder Synchronmaschinen

Drehzahlveränderung =

= Frequenzänderung =

= Umrichterspeisung

$$n_{syn} = f_s / p$$

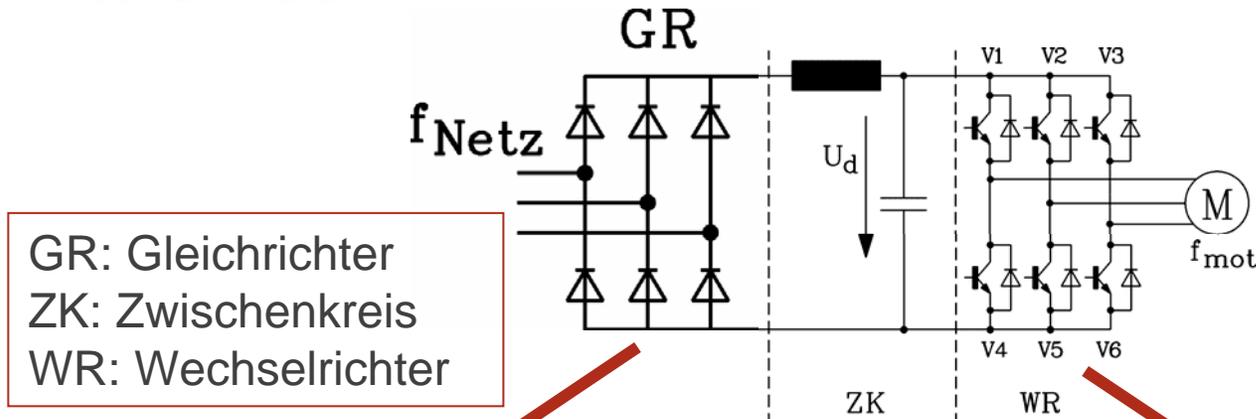
f_s : Ständerfrequenz

p : Polpaarzahl

n_{syn} : Synchrondrehzahl

Umrichter-Vollast-Wirkungsgrad: 96% ... 97%

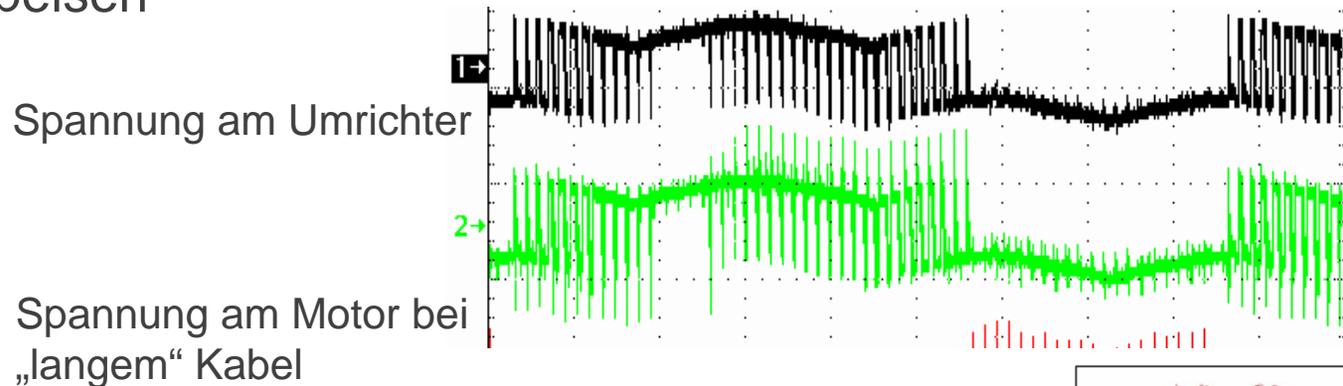
Hart schaltende Zweipunkt-Umrichter mit Gleichspannungszwischenkreis



GR: Gleichrichter
ZK: Zwischenkreis
WR: Wechselrichter

- Ungesteuerte Gleichrichterbrücke
= kein Rückspeisen

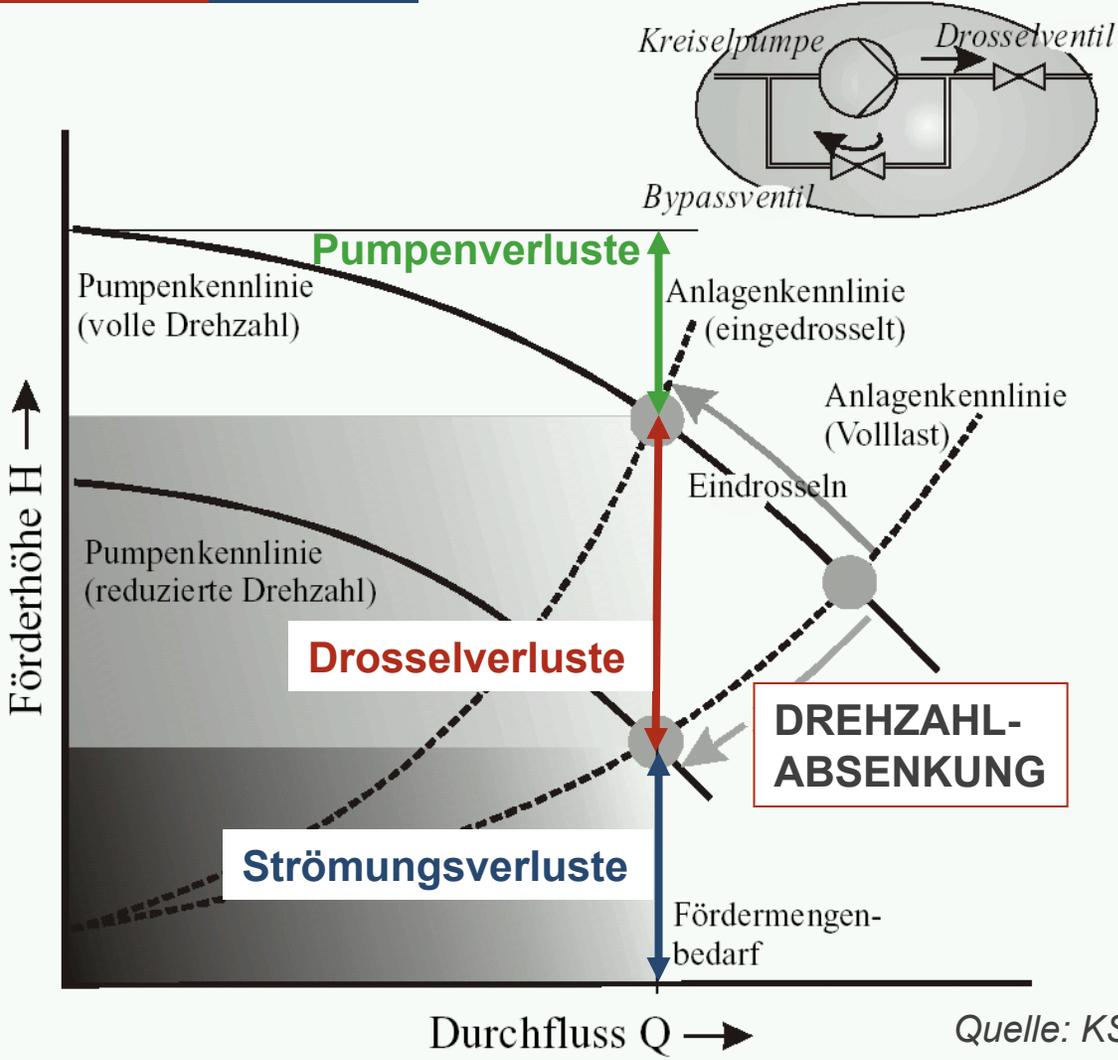
- Zweipunktschaltverfahren



- **Erfolgsgeschichte des IGBT** (Insulated Gate Bipolar Transistor):
Kombination: MOS-FET zur Ansteuerung der Basis eines Leistungs-Bipolartransistors
- **Spannungs-Zwischenkreisumrichter** bis in den Mittelspannungs- und MW-Bereich
- Schnelles, verlustarmes Schalten (ca. 100 ns bei 560 V)
- „Hartes Schalten“ ohne Snubber-Kreise
- **ABER: Grenzen** bei der Senkung der Durchlass- und Schaltverluste
- „Hartes Schalten“: Rückstrom von Si-Leistungsdioden = erheblicher Anteil der Einschaltverluste der IGBTs.
- **Perspektive bei SiC-Leistungs-Halbleitern:**
sehr schnelles Schalten, sehr kleine Schaltverluste
niedrige Durchlassverluste

Drehzahlanpassung spart Verluste

Beispiel: Pumpe: Volumenstrom soll verändert werden !



a) **Volumenstrom-Drosselung** beim Festschritzantrieb

b) Durch **Drehzahlabsenkung** verminderter Volumenstrom

Vermeidung der Drosselverluste: Bis zu 60% Energieeinsparung !

Quelle: KSB, Frankenthal



Dimensionierung durch Sicherheitszuschläge:

Beispiel: E-Motor, Getriebe, Pumpe: je +20% Zuschlag

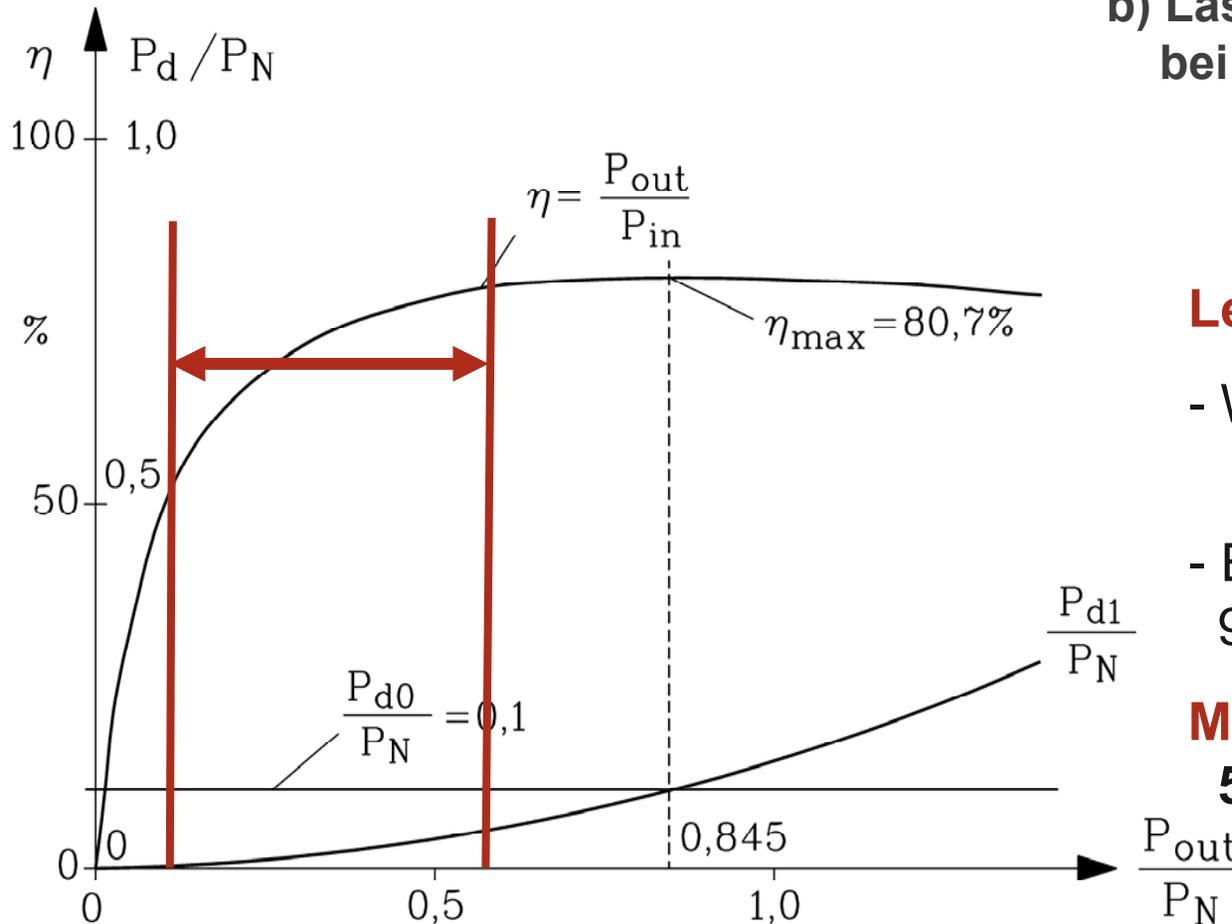
Motor um 72 % überdimensioniert: $1.2 \cdot 1.2 \cdot 1.2 = 1.73$



Teillastbetrieb des E-Motors:

Zu hohe Leerverluste – zu hoher Energieverbrauch

Max. Motor-Auslastung: $1/1.73 = 58\%$



Beispiel:

- a) Leerverluste $0.1P_N$
- b) Lastverluste $\sim P^2$
bei Nennleistung: $0.14P_N$

Leistungsbereich:

- Wasser:
20% 100%
- E-Motor:
9% ... 58 %

Motorwirkungsgrad:
50% ... 79%

Aufzug:

1 Tonne Tragfähigkeit, 17 m Förderhöhe, 5 Haltestellen

- a) **Alter Antrieb:**
- Festdrehzahlantrieb 8.8 kW-E-Motor,
 - polumschaltbar „langsam-schnell“
 - konventionelles Getriebe
 - mechanisches Bremsen
- b) **Neuer Antrieb:**
- 7.5 kW-E-Motor
 - Drehzahlveränderung über Umrichter
 - Verlustarmes Getriebe – Sythetiköl
 - Energierückspeisung beim Bremsen

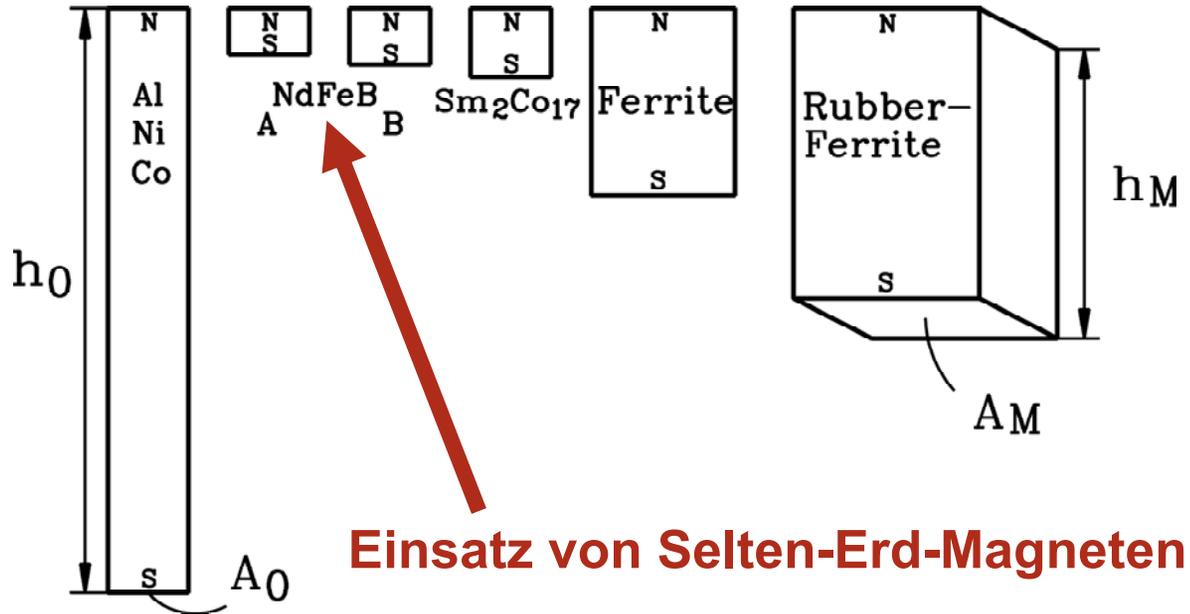
Energieersparnis pro Fahrt: 81 % bei Vollast (best case)

**Amortisationszeit bei 400 Fahrten täglich:
nach 5.5 Jahren !**

Quelle: ZVEI

Vortrag - Inhaltsübersicht

- **Fakten zur elektrischen Energie**
- **Elektrische Energieerzeugung – heute und morgen**
- **Effiziente ele. Energienutzung in der Antriebstechnik**
- **Antriebstechnische Trends zum Energiesparen**
- **Ausblick**



Benötigtes Magnetvolumen für

- gleichen Magnetfluss
- gleiche Entmagnetisierfestigkeit

Höchste Energiedichte bei Neodymium-Eisen-Bor-Magneten

Zahnspulenwicklung für Permanentmagnetmotoren

Quelle: TU Darmstadt

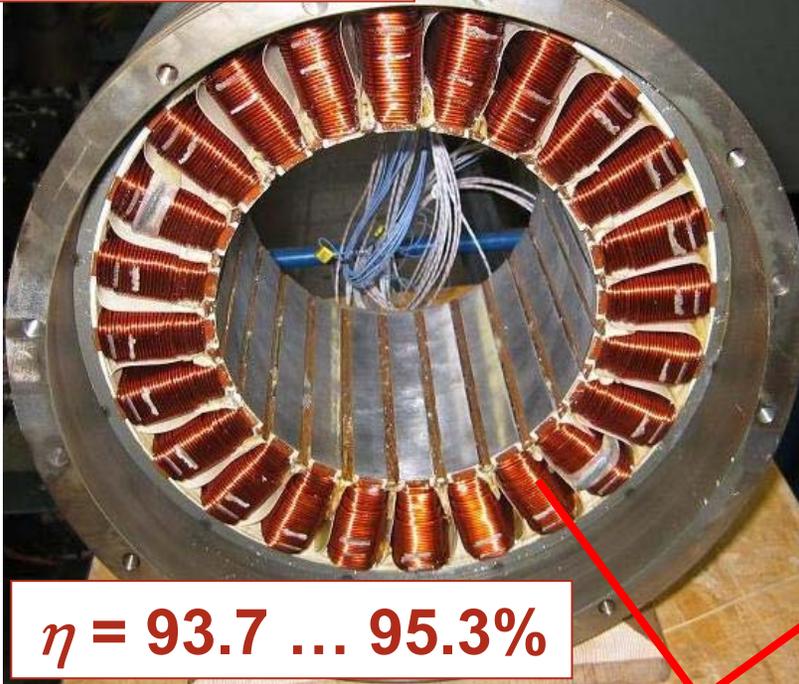
**Kompakte Stator-Kupfer-Wicklung –
geringere Stromwärmeverluste**

Kühlmantel

Zahnspule

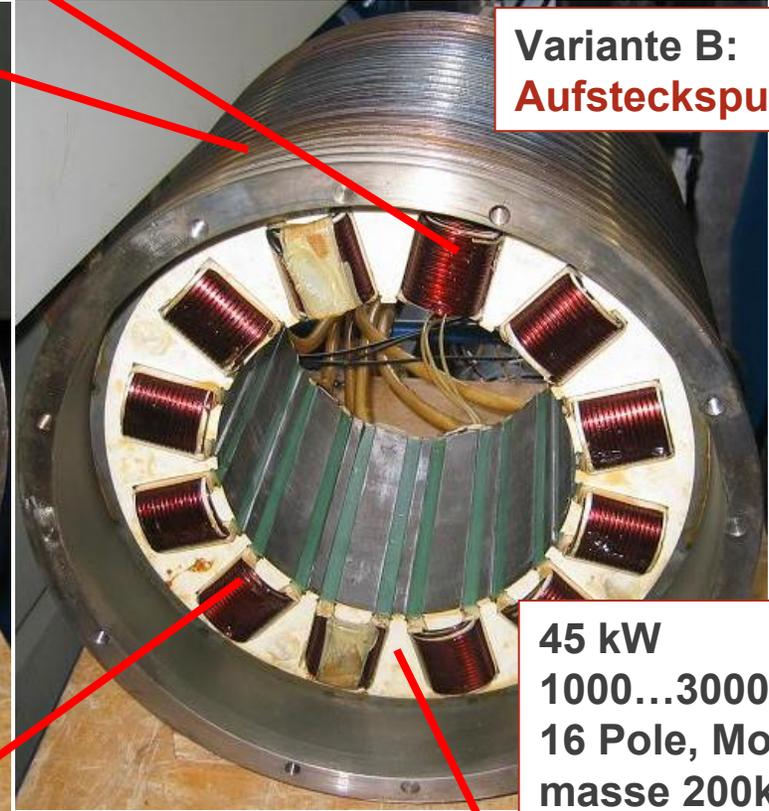


**Variante A: Rund-
drahtnadelwicklung**



$\eta = 93.7 \dots 95.3\%$

**Variante B:
Aufsteckspulen**



45 kW
1000...3000/min
16 Pole, Motor-
masse 200kg

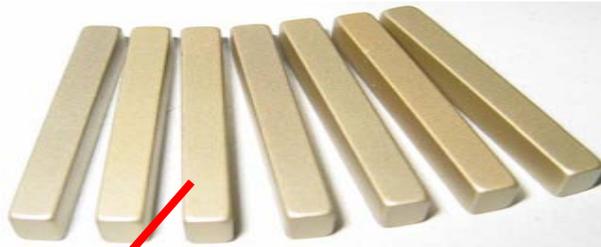
Stator-Wicklung

Blechpaket

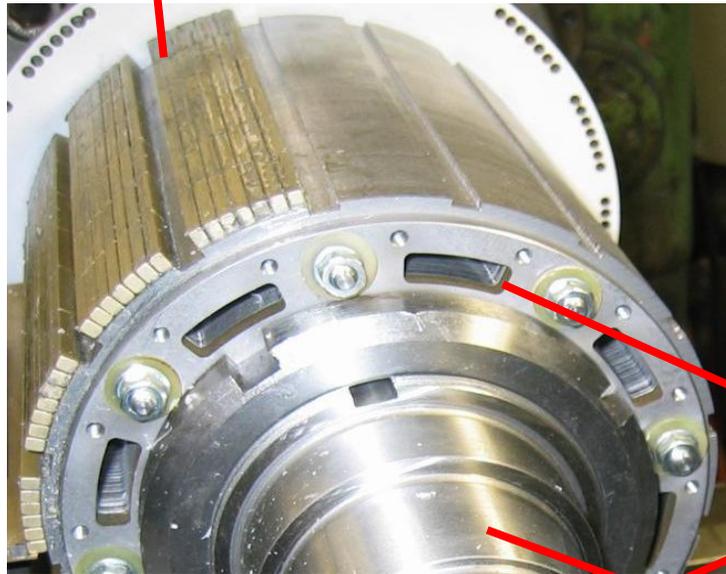
Umrichter gespeiste Permanentmagnetmotoren für Industrieantriebe

Quelle: TU Darmstadt

Permanentmagnete erzeugen verlustfrei das Magnetfeld



Magnete



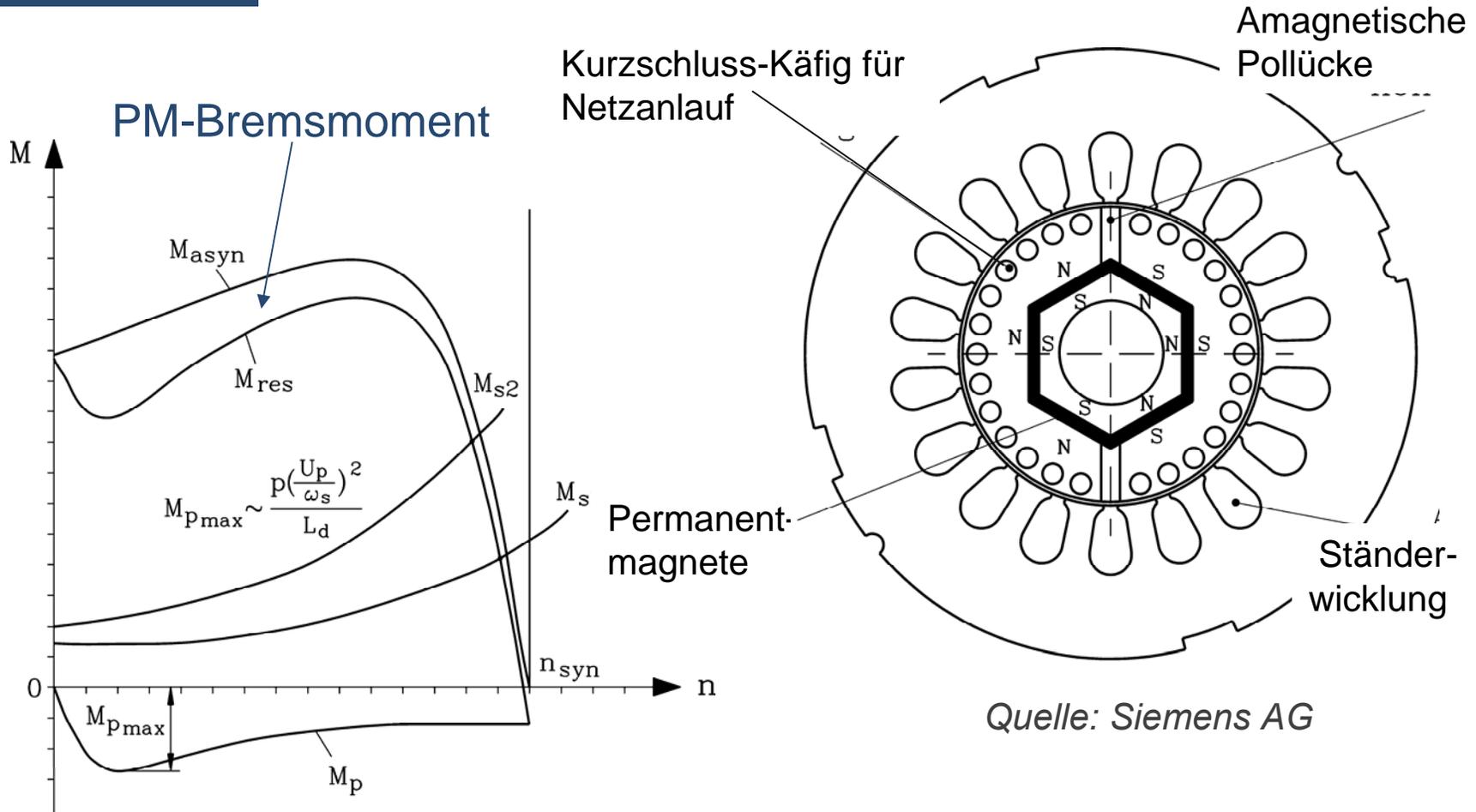
Welle

Kohlefaserbandage



45 kW
1000...3000/min
16-polig, 200 kg

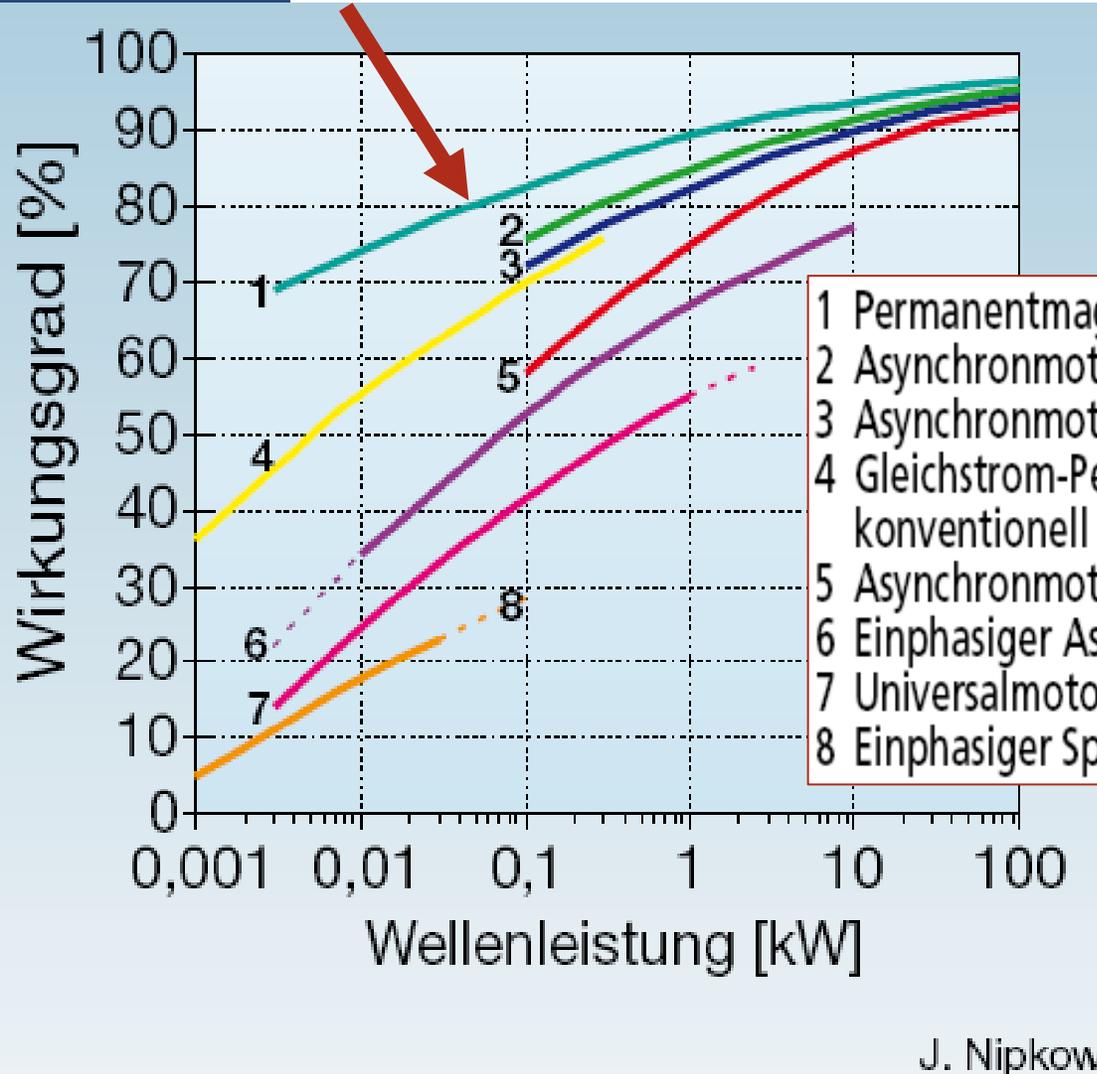
Rotorblechpaket



- Entwicklungsarbeit, PM-Läufer erzeugt Bremsmoment beim Hochlauf

- **Höchste Stückzahlen:** Investitions- und Konsumgüterbereich
 - Datenverarbeitungsgeräte
 - Automobilbereich
 - Elektrowerkzeuge
 - Haushaltsgeräte
- **In Haushaltsgeräten:** Leistungsbereich unter 750 W: Verbrauch von ca. 33 % der in deutschen Haushalten umgesetzten elektrischen Energie, davon über 55 % in Kühl- und Gefriergeräten
- Im Haushaltsgerätebereich (*Deutschland*) **jährliches Einsparpotential 8 TWh.**
- **Erste Ansätze:** Energiesparenden Kleinantrieben im High-End-Lüfter-Bereich und bei Heizungsumwälzpumpen

Typische Vollast-Wirkungsgrade

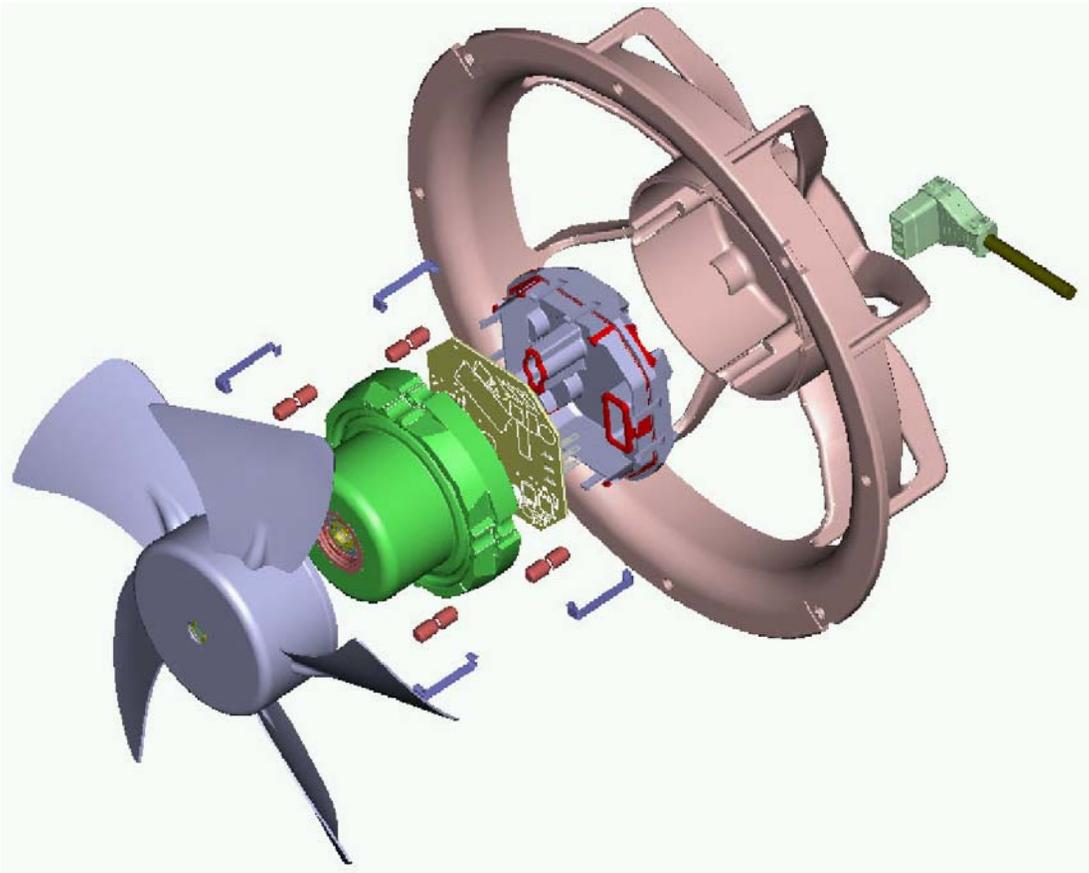


- 1 Permanentmagnetmotor spezial, elektronisch
- 2 Asynchronmotor, 3-Stern ***
- 3 Asynchronmotor, 2-Stern **
- 4 Gleichstrom-Permanentmagnetmotor, konventionell
- 5 Asynchronmotor, 1-Stern *
- 6 Einphasiger Asynchronmotor, Betriebskondensator
- 7 Universalmotor (Kollektormotor)
- 8 Einphasiger Spaltpol-Asynchronmotor

Quelle: SEV Bulletin, 2005

J. Nipkow

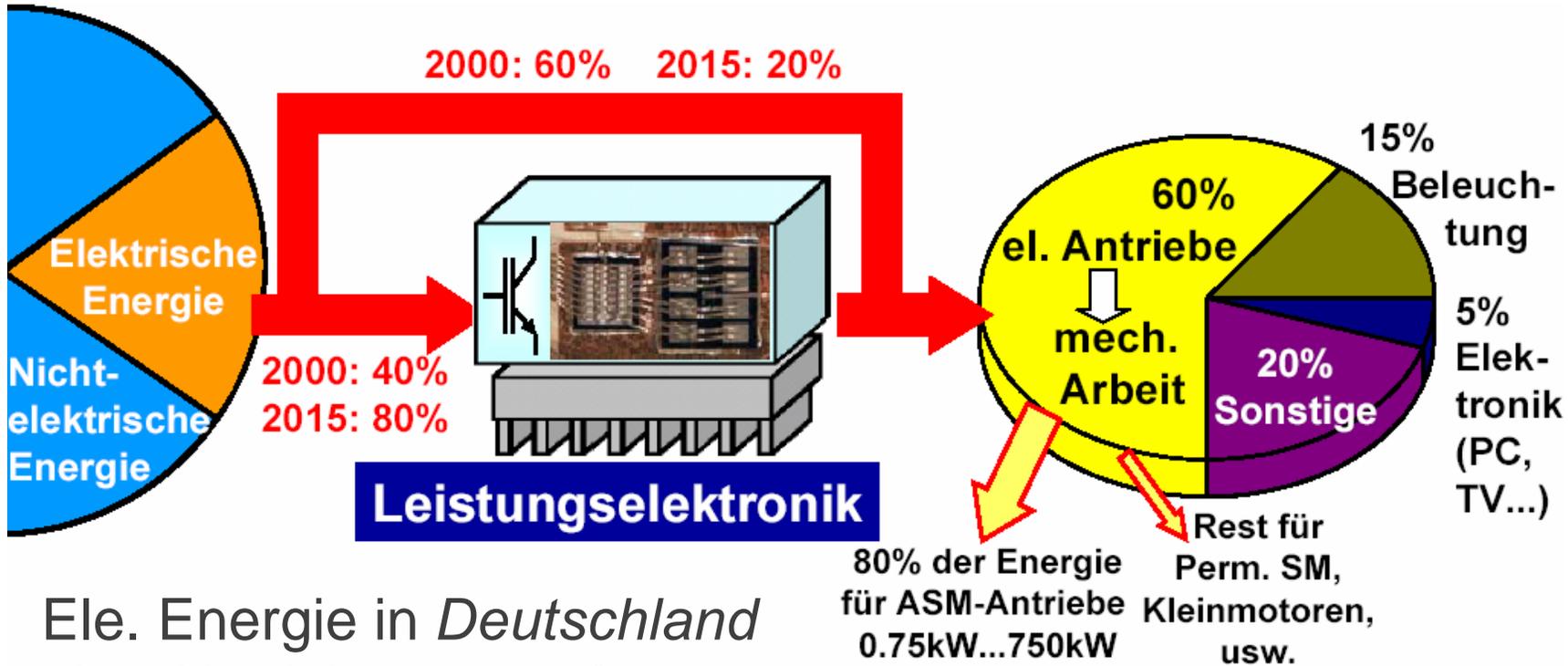
High-End-Lüfter-Antriebssystem



Quelle:
ebm, Künzelsau

Getriebeloser PM-Lüfter-**Kleinantrieb** mit integrierter Ansteuerelektronik („Umrichterspeisung“)

Umrichterspeisung nimmt zu !



Ele. Energie in *Deutschland* über Umrichter umgeformt:

2000: 40%

2015: 80%

Quelle: etz-Zeitschrift, 2007

- **SiC (Siliziumkarbid)**: Deutlich größerer Abstand zwischen Valenz- und Leitfähigkeitsband als bei Silizium (Si)
- Dadurch theoretisch stabiler Betrieb bis **600°C**
Sperrschicht-Dauertemperatur bei deutlich verringerten Schaltverlusten (Si-Halbleiter: 125 ... 150°C).
- Deutlich **höhere kritische Feldstärke** in SiC erlaubt dünnere Bauelemente mit niedrigeren Verlusten.
- **Ziel**: Verlusthalbierung im Umrichter: Wirkungsgrade von jetzt 96% auf 98% steigern !

- Erfolgreiche *deutsche* Forschung:

- Welterste SiC-Schottky-Leistungsdiode (2002)
- Welterster hartschaltender Wechselrichters mit JFETs (2003)
- 20kV bipolare SiC-Schaltelemente werden erforscht

ABER:

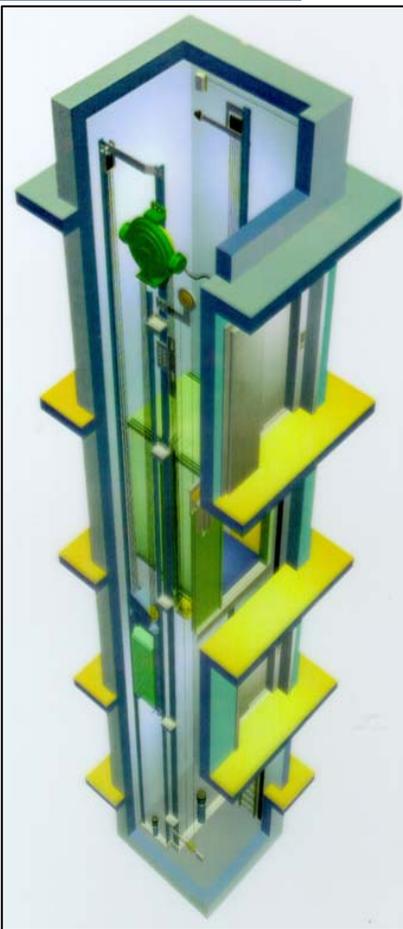
- Höhere SiC-Bauelemente-Kosten
- Bis dato nur relativ kleine Ströme
- Verfügbare Anschluss-, Montage- und Isolationstechnologie ist für Silizium entwickelt (bis ca. 200°C)
- Neue Materialien und Anschluss-/ Montagetechniken für Temperaturen bis 500 ... 600°C müssen entwickelt werden.

Energiesparende Industrieantriebe



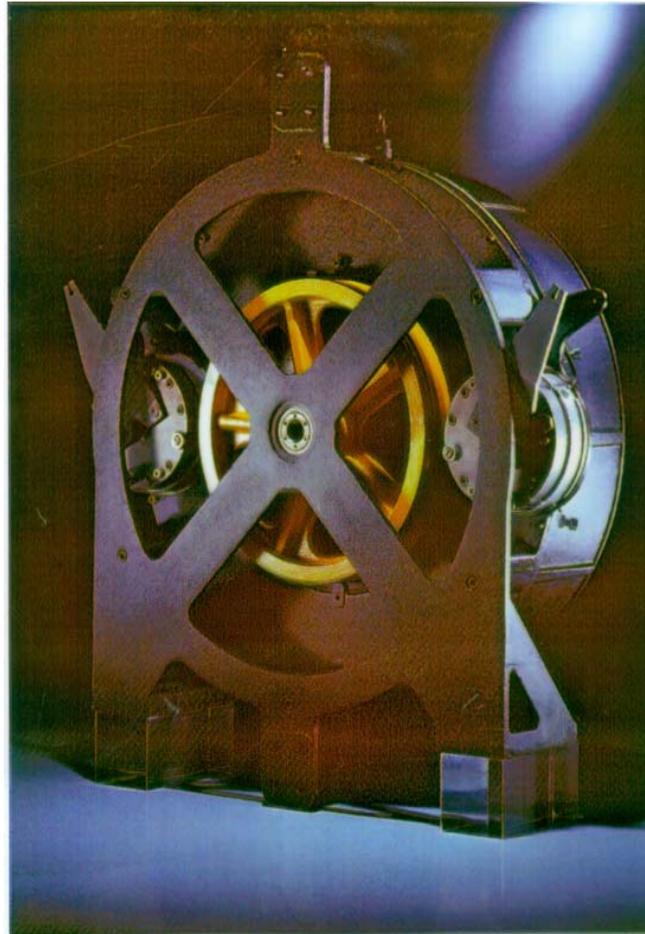
Quelle: Siemens AG

Aufzugdirektantrieb



PM-Scheibenläufer-
direktantrieb

Quelle: Kone, Finnland
Institut für Elektrische
Energiewandlung



PM-Aufzugs-Direktantrieb

Quelle: Siemens

- **Wegfall** des Maschinenhauses
- **Getriebe**lose Antriebe
- Komfort - Antriebe durch stufenlose Drehzahlveränderung
- Verlustarme Ausführung durch **Permanentmagnete**



15000/min, 4 MW Käfigläufer-Asynchronmotor

- Antriebe für **Gaspipeline**-Kompressoren
- Typisch 4 MW, 15000/min, 2.5 kNm ... 16 MW, 6000 /min, 25.5 kNm
- Kupferkäfig, 2-polig, **massiver** Eisenrotor, **ca. 240 m/s**
- **Aktive Magnetlagerung**, rotiert oberhalb der ersten Biegeeigenfrequenz
- Mittelspannungs-IGBT-PWM-Spannungszwischenkreisumrichter

Quelle: Siemens AG

Hochdrehzahlantriebe

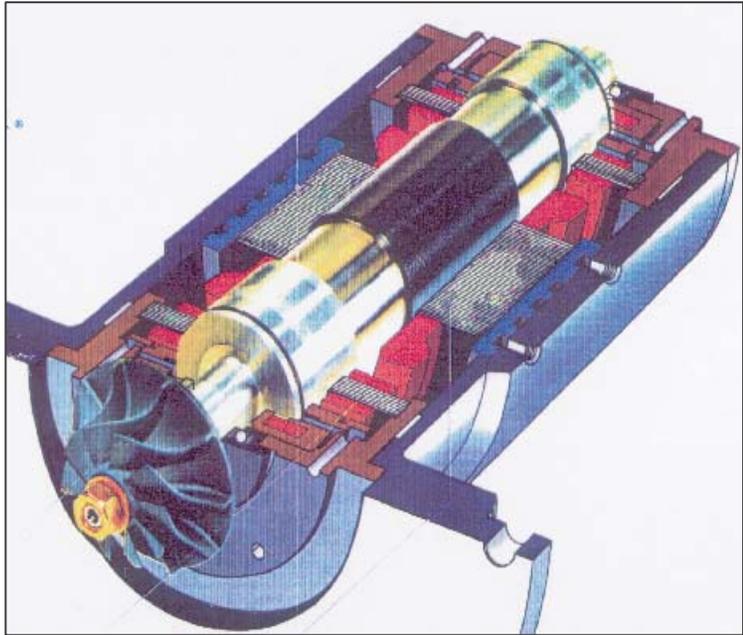
- Hochdrehzahlanwendungen:
 - Turbo-Kompressoren
 - Turbomolekular-Vakuumpumpen
 - High-speed Drehen & Fräsen
 - Generator-Motor für Schwungräder
 - Generatoren für Mikrogasturbinen
 - E-Antriebe für Turbolader

- Vorteile:

$$P = 2\pi \cdot n \cdot M$$

Hohe Leistungsdichte – dank kleinen Volumens

Kein Getriebe: erhöhter Wirkungsgrad, weniger Wartung



Magnetisch schwebender PM-Turbo-Kompressor-Rotor

Quelle: Piller, Germany

Energiesparende **Schiffsantriebe**



Quelle: Siemens, Pictures
of the Future



PM-Pod-Antrieb
(Drehbare Gondel)

PM-Antriebe:

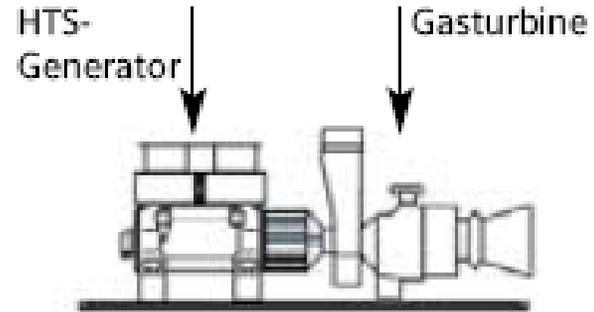
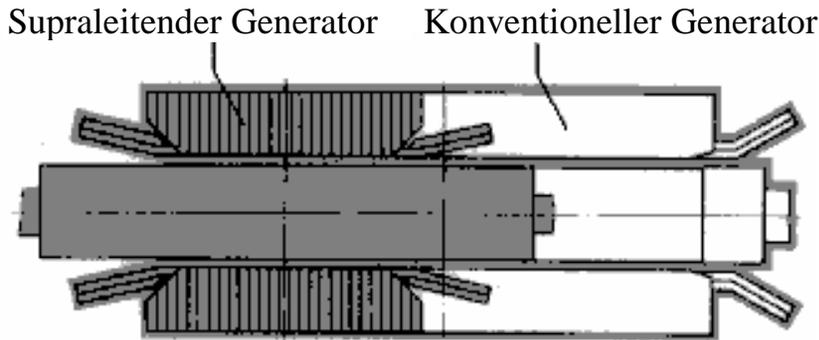
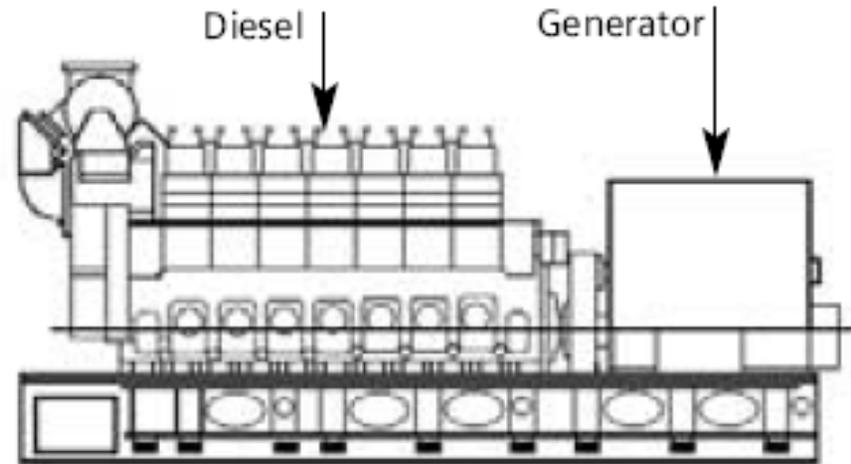
- Wirkungsgradvorteil durch Motor und **Drehzahlanpassung**
- Schiffsdiesel arbeitet möglichst im **Bestpunkt**
- **Gondel** spart Steuerruder ein



Supraleitende E-Maschinen

Weitere Entwicklung:

- Generator schnelldrehend, supraleitend (HTSL)
- HTSL-Motor
- leichter, kleiner, besserer Wirkungsgrad, höhere Überlastfähigkeit



Zusätzlich: Dieselaabgase – Wärmetauscher – Dampfturbine – Stromerzeuger: - 12% Dieserverbrauch

Synchrongenerator mit Hochtemperatur-Supraleiterwicklung (HTSL)

HTSL – 2-poliger 4 MW-Synchrongenerator für Schiffe im System-Prüffeld, 3600/min, 60 Hz, Rotorwicklung bei -243°C , Neon-Kaltgas

Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik



Quelle:
Siemens AG

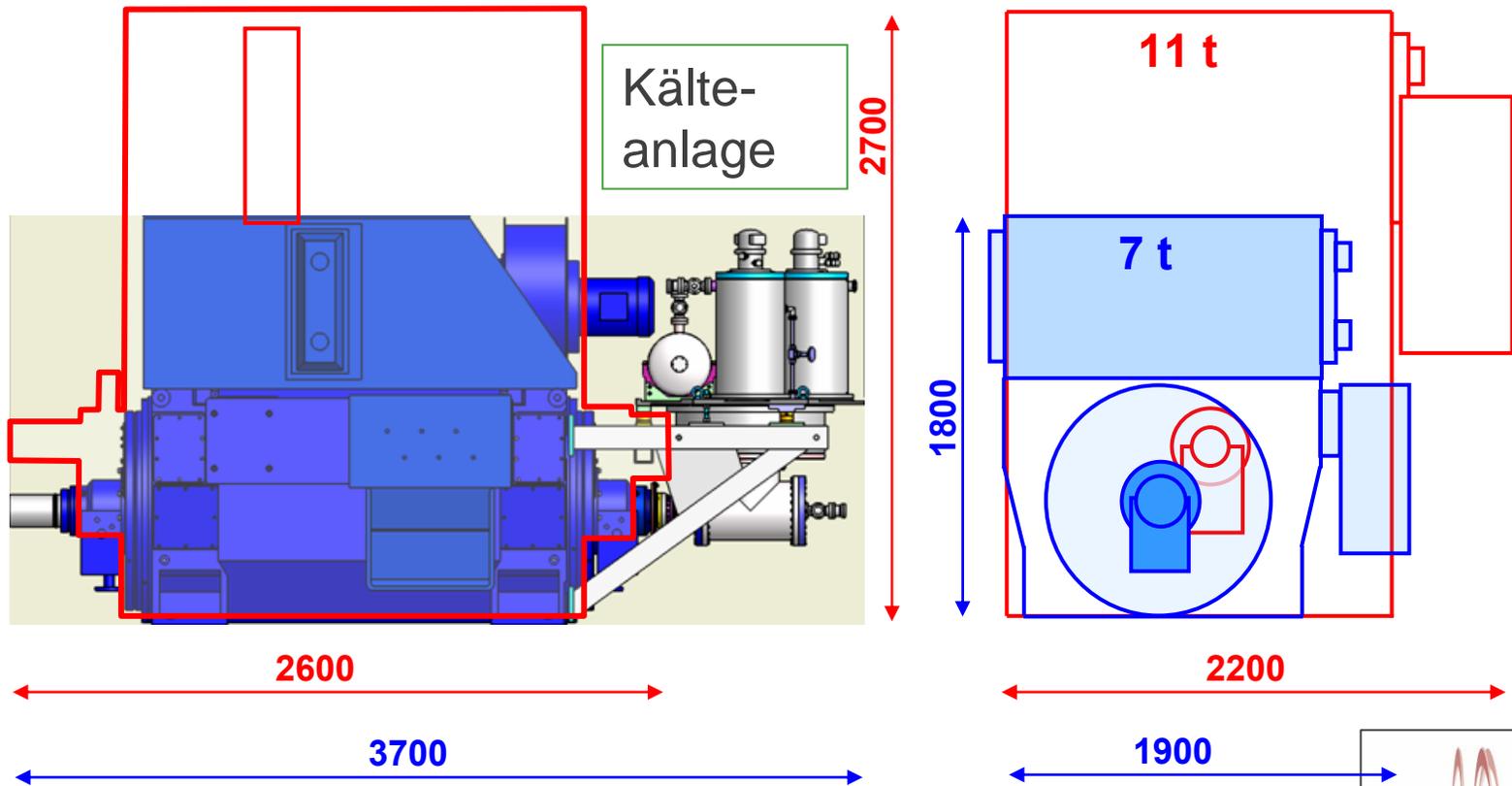


Vergleich des HTSL-Prototyps mit konventionellem Generator

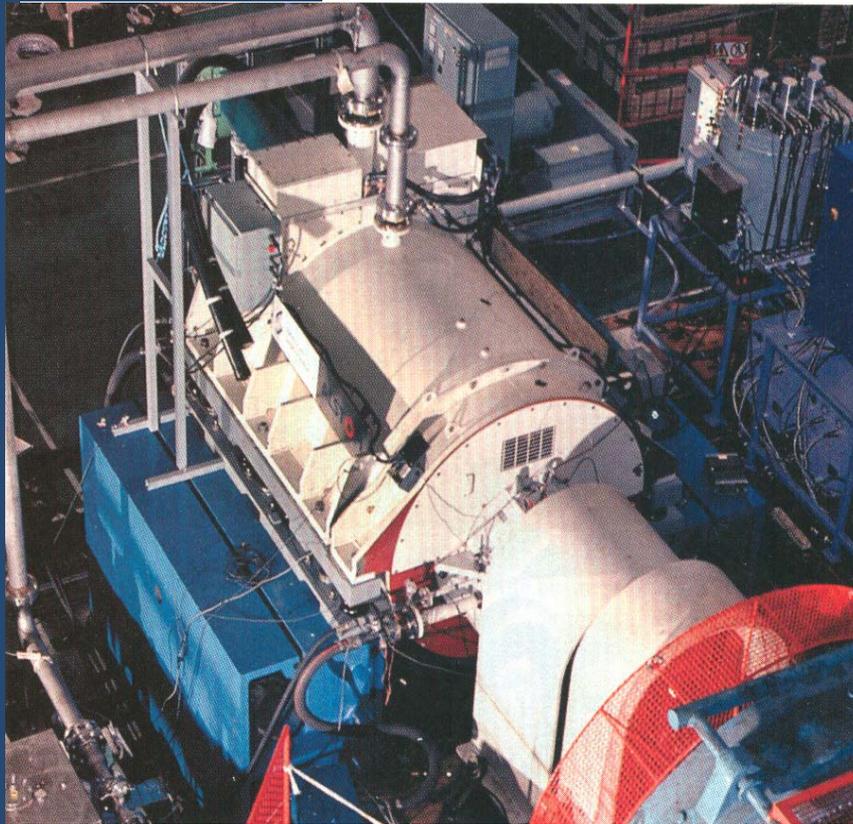
- Geringes Volumen und Gewicht
- Höherer Wirkungsgrad: **98.4% statt 96.1 % =
= nur 40% der Verluste**

Quelle:
Siemens AG

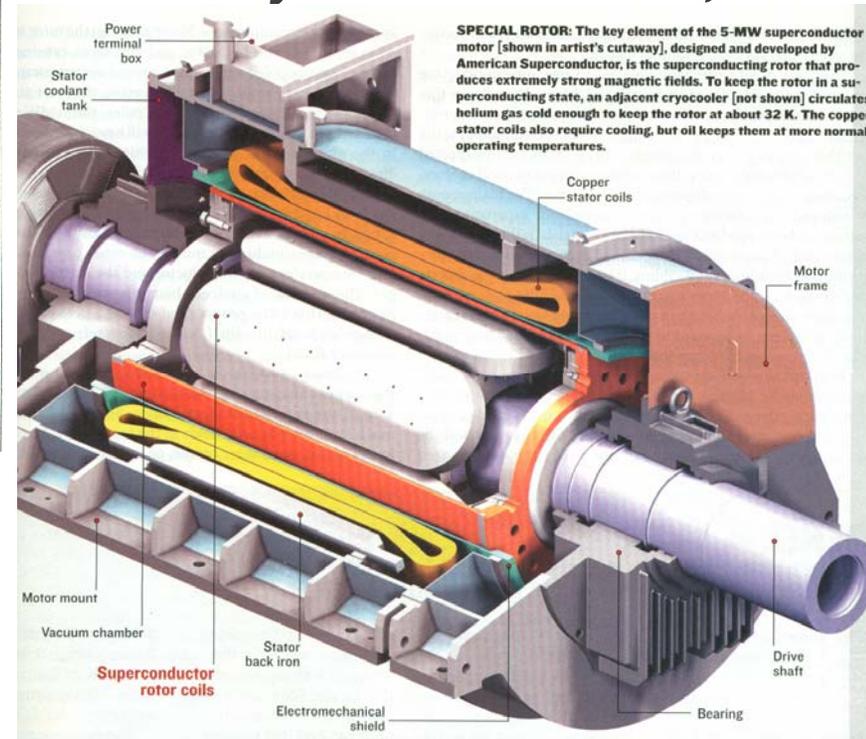
4 MVA HTS Generator $2p = 2$: Vergleich zu konventionellem Generator $2p = 4$



HTSL-Synchronmotor 5 MW



- Motor für Schifffantrieb auf dem Prüfstand (*Rugby, UK*)
- *Nennmoment: 208 kNm*
- *Nennzahl: 230 /min*
- *US Navy Tests in Florida, USA*



Quelle: *American Superconductor, Alstom*

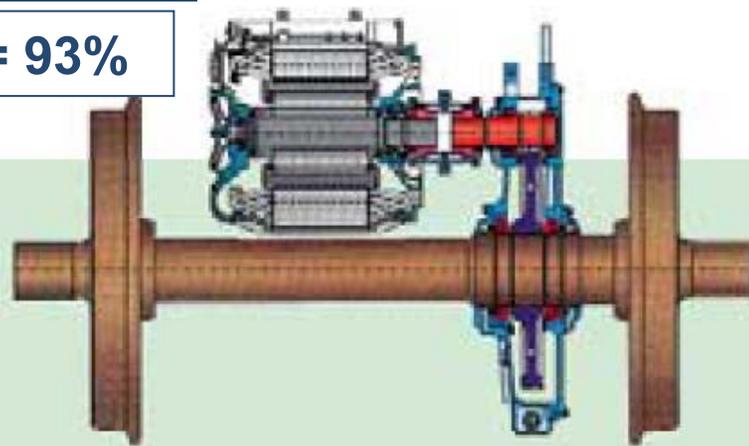
Energiesparende elektrische **Traktion**



Quelle: Siemens, *Pictures
of the Future*

PM-Direktantrieb statt Asynchronantrieb mit Getriebe

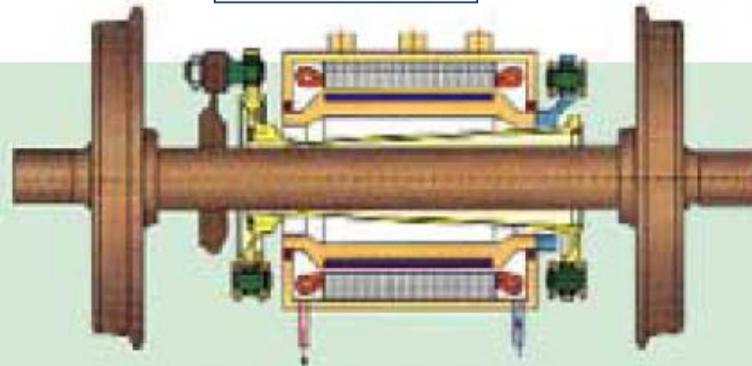
$\eta = 93\%$



Asynchron-Fahrmotor mit Getriebe:

Wirkungsgrad.....	93 %
Masse.....	100 %
Geräusch.....	105 dB(A)
Stirnradgetriebe.....	ölgeschmiert

$\eta = 96\%$



Neuer getriebeloser Antrieb mit PM-Motor:

Wirkungsgrad.....	96 %
Masse.....	-30 %
Motor.....	-10 %
Getriebe/Kupplung.....	-20 %
Geräusch.....	90 dB(A) d.h. 80% leiser
Stirnradgetriebe.....	entfällt

Quelle:
Siemens AG

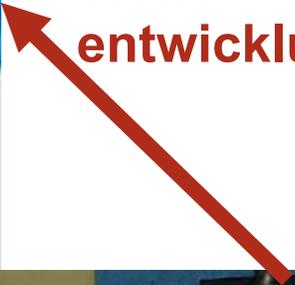
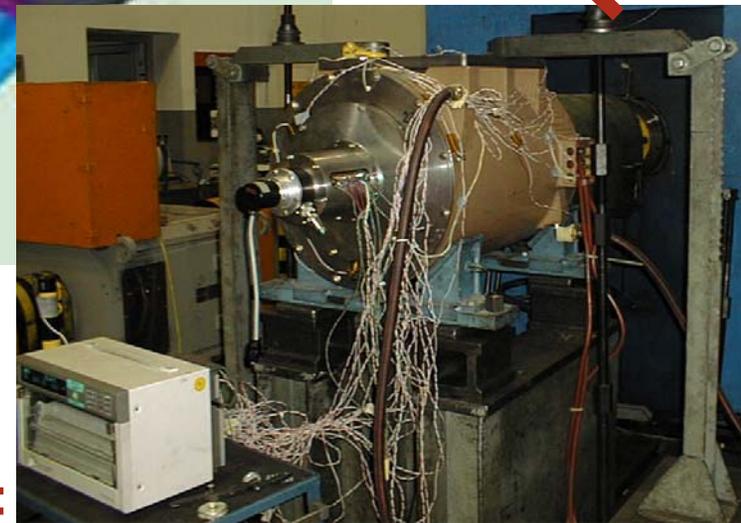
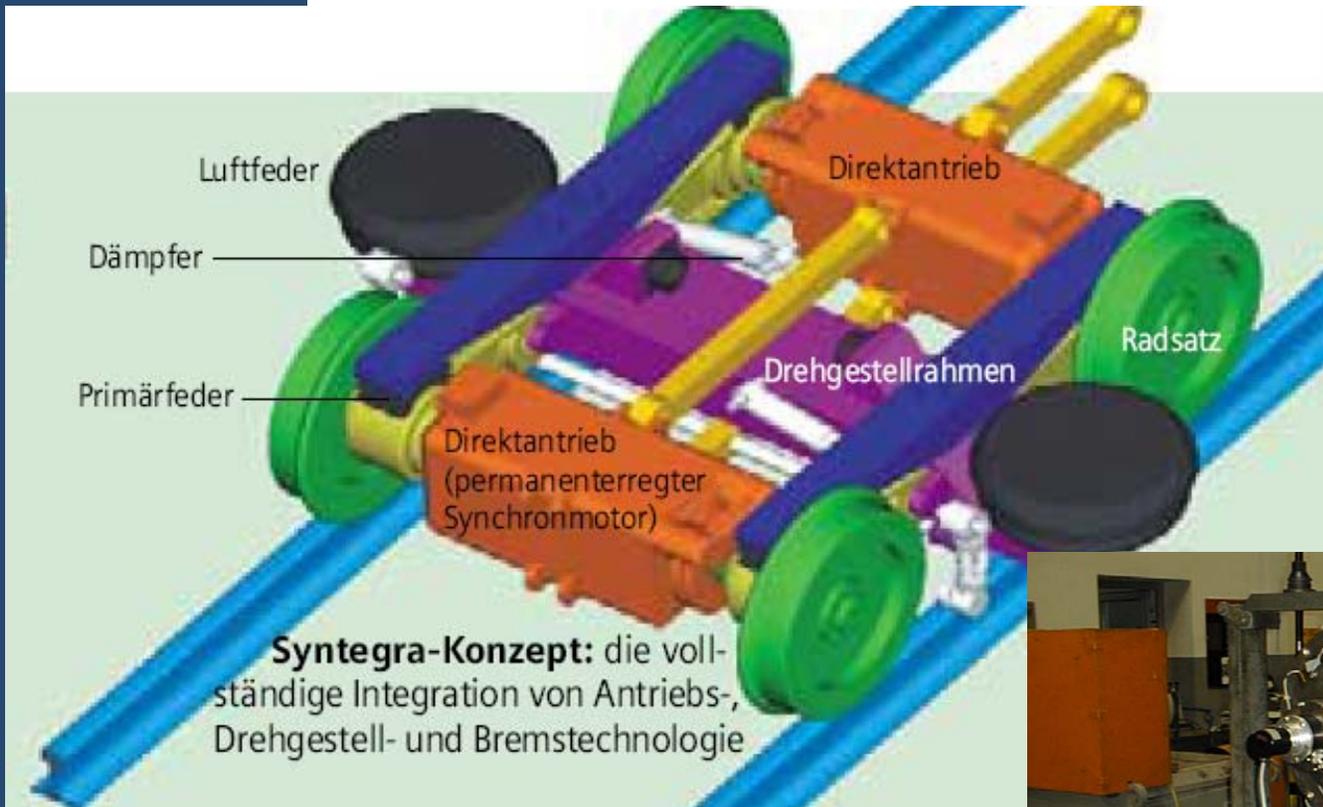
Studie zu hochpoligem PM-Direktantriebe für ICE3-Hochgeschwindigkeitszug: Strecke *Frankfurt/Main-Köln*:

Bei Umstieg von der Asynchron- auf die Synchronmotortechnik Energieeinsparung **von 15%**.

Permanenterregte Drehstrom-Synchronmaschine

Quelle:
Siemens AG

**Weiter-
entwicklung**

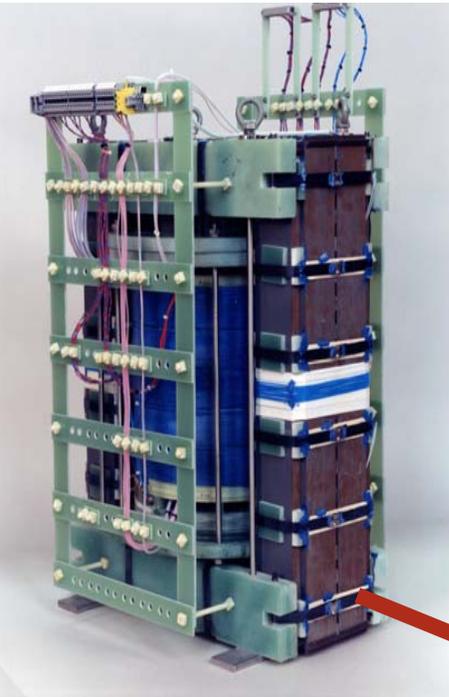



**Direktantriebe für Metros:
Im Drehgestell unabgefedert
integriert, elektrische Bremse über
PM-Maschine**

**Prototypenprobung:
500 kW-PM-Direktantrieb im Prüffeld**

Supraleitender (HTSL) Loktransformator

100-kVA-Modelltrafo



Quelle:
TU Darmstadt /
Siemens AG

AC-Verbundleiter

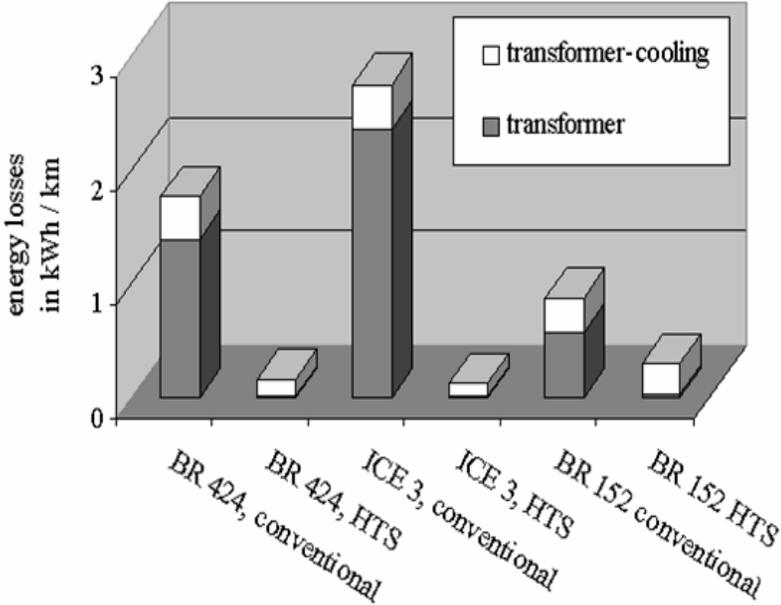


An-Bord-
Prototyp?



1-MVA-Demonstrator

Energieeinsparpotential



Vortrag - Inhaltsübersicht

- **Fakten zur elektrischen Energie**
- **Elektrische Energieerzeugung – heute und morgen**
- **Effiziente ele. Energienutzung in der Antriebstechnik**
- **Antriebstechnische Trends zum Energiesparen**
- **Ausblick**

- **Deutschland: Weltspitze** bei installierter Wind- und PV-Leistung
- **Ziel:** Regenerative Energieerzeugung **von 11% auf 25%** steigern!
- Zunehmender Bedarf an neuen **Energiespeichern und Übertragungsleitungen**
- „Richtiger“ **Energie-Mix** von konventionellen und zunehmend regenerativen Energiequellen!
- **Energieeinsparpotential** in der Antriebstechnik **ca. 20%**
- **Drehzahlveränderung** spart Energie: erfordert i. a. **Umrichter**
- **Gesetzliche Anreize** (Förderungen / Vorschriften) nötig
- **Gesamtkostenbetrachtung** (life cycle cost) anstelle Kaufpreis

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

abinder@ew.tu-darmstadt.de