



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik

OVE / OGE – Wien 5. Okt. 2007

Innovative Energietechnik

Entwicklungen zur Steigerung der Energieeffizienz bei elektrischen Antrieben

Andreas Binder

Institut für Elektrische Energiewandlung

TU Darmstadt

abinder@ew.tu-darmstadt.de



Institut für Elektrische
Energiewandlung

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-techn. habil. Dr. h.c. Andreas Binder

0





Vortrag - Inhaltsübersicht

- **Energiesituation in der EU und Deutschland**
- **Energieeinsparpotentiale bei E-Antrieben**
- **Entwicklungen bei E-Motoren**
- **Zukunftsperspektiven - Ausblick**





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.

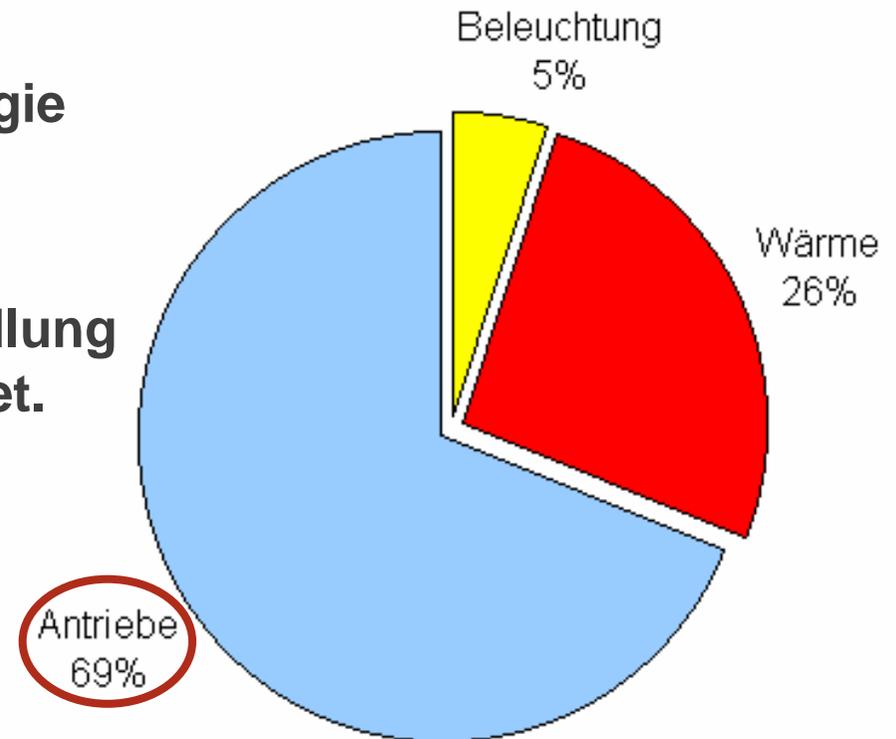
Sparprogramme in Industrie, Verkehr, Haushalt !





Elektrische Energie sparen in der Industrie

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



Die Antriebstechnik muss einen wesentlichen Beitrag zum Energiesparen leisten !

Industrielle ele. Energienutzung Deutschland 2004

Quelle: Automatisierungstechnische Praxis, 2002





Vortrag - Inhaltsübersicht

- Energiesituation in der EU und Deutschland
- **Energieeinsparpotentiale bei E-Antrieben**
- Entwicklungen bei E-Motoren
- Zukunftsperspektiven - Ausblick





Industrielle Antriebstechnik:

Geschätztes Energieeinsparpotential:

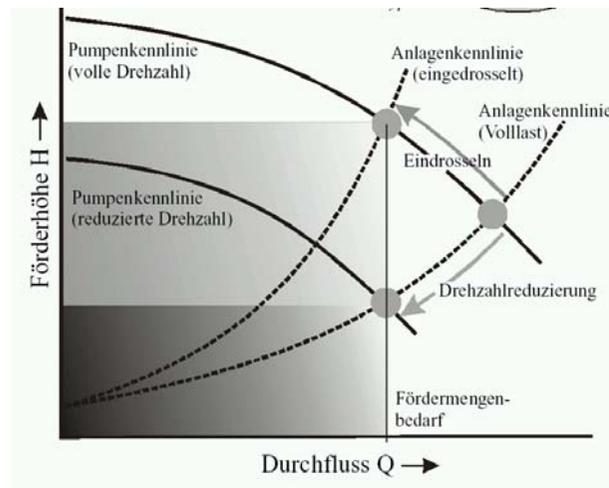
Motorwirkungs-
grad

1,4% ... 3%



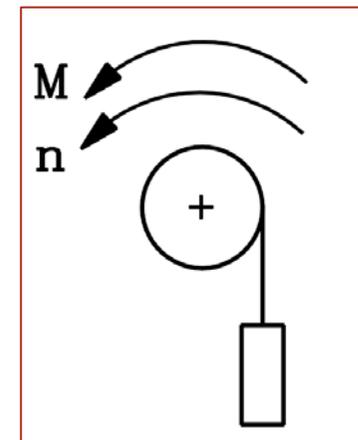
Drehzahl-
anpassung

8 % ... 10%



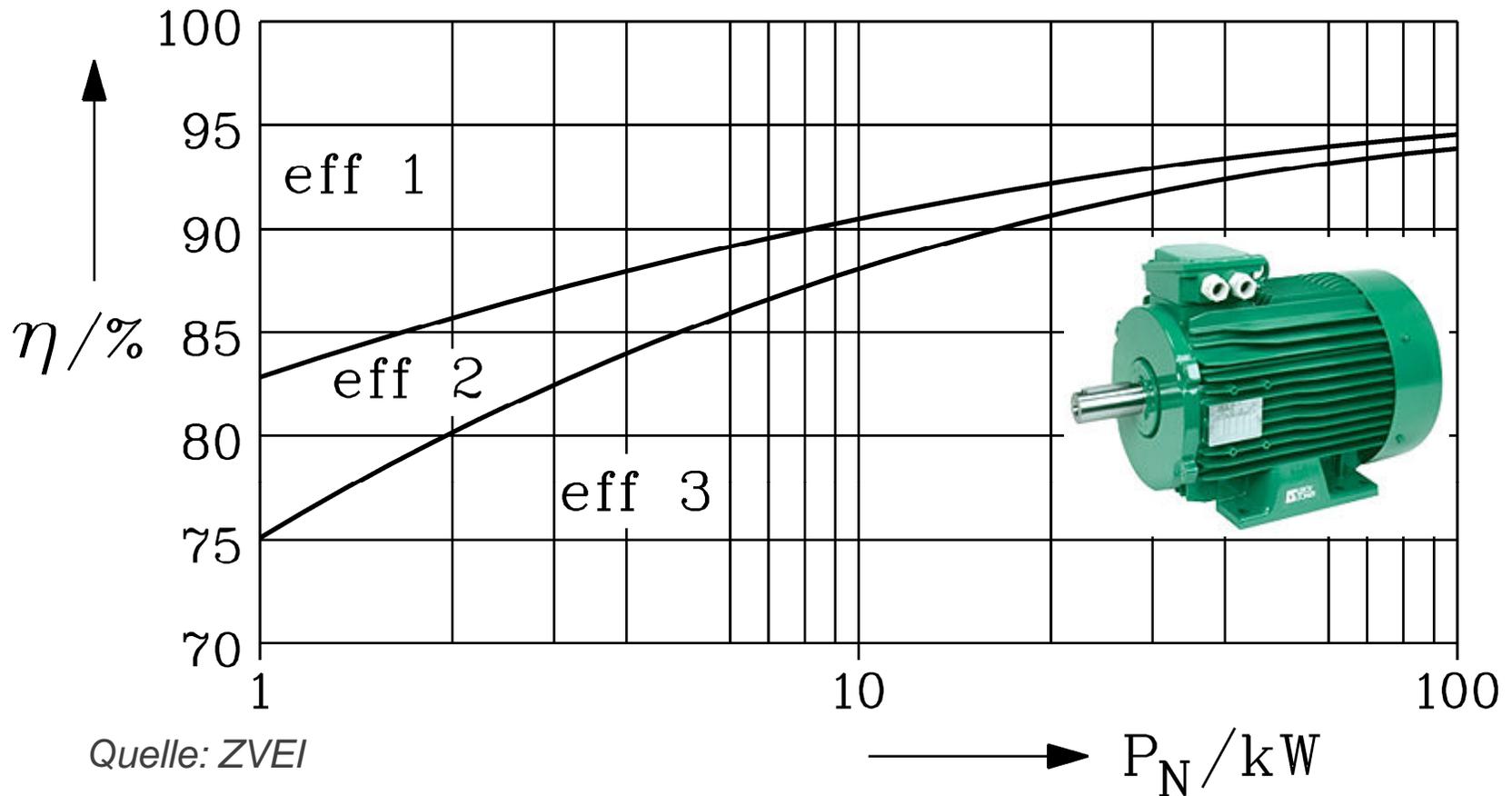
System-
optimierung

15 ... 20 %





Wirkungsgradgesteigerte Norm-Asynchron- Motoren



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



Energiesparpotential über den Motorwirkungsgrad

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

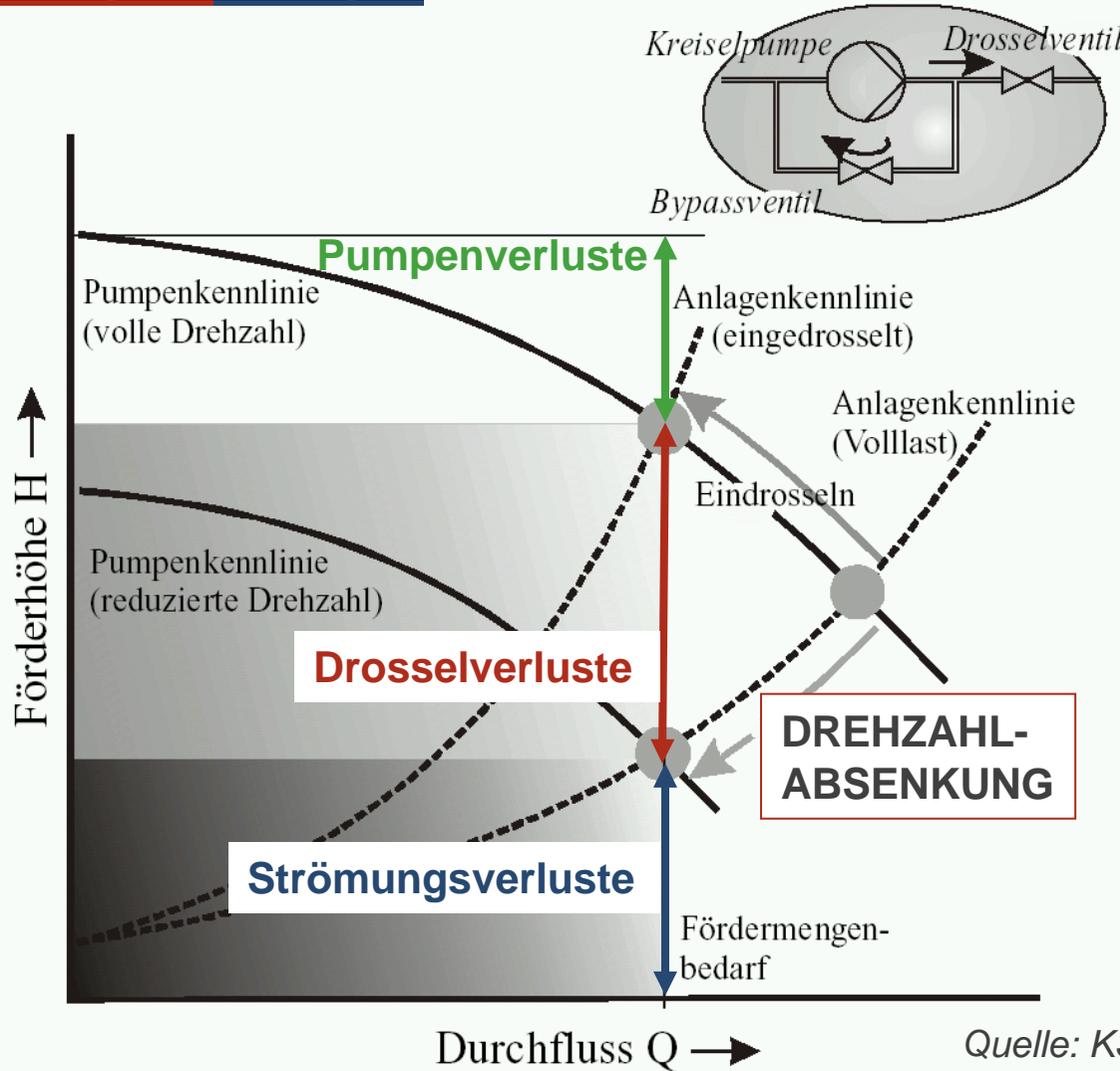
1 TWh = 1 Tera-Wattstunde = 1000 Milliarden Wh





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



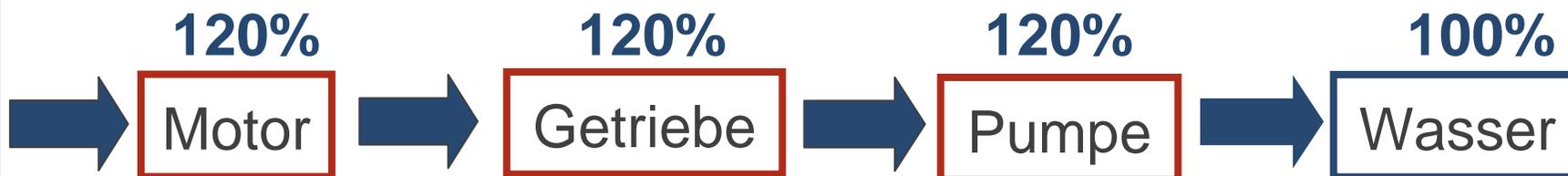


Systemoptimierung – Keine Überdimensionierung

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:

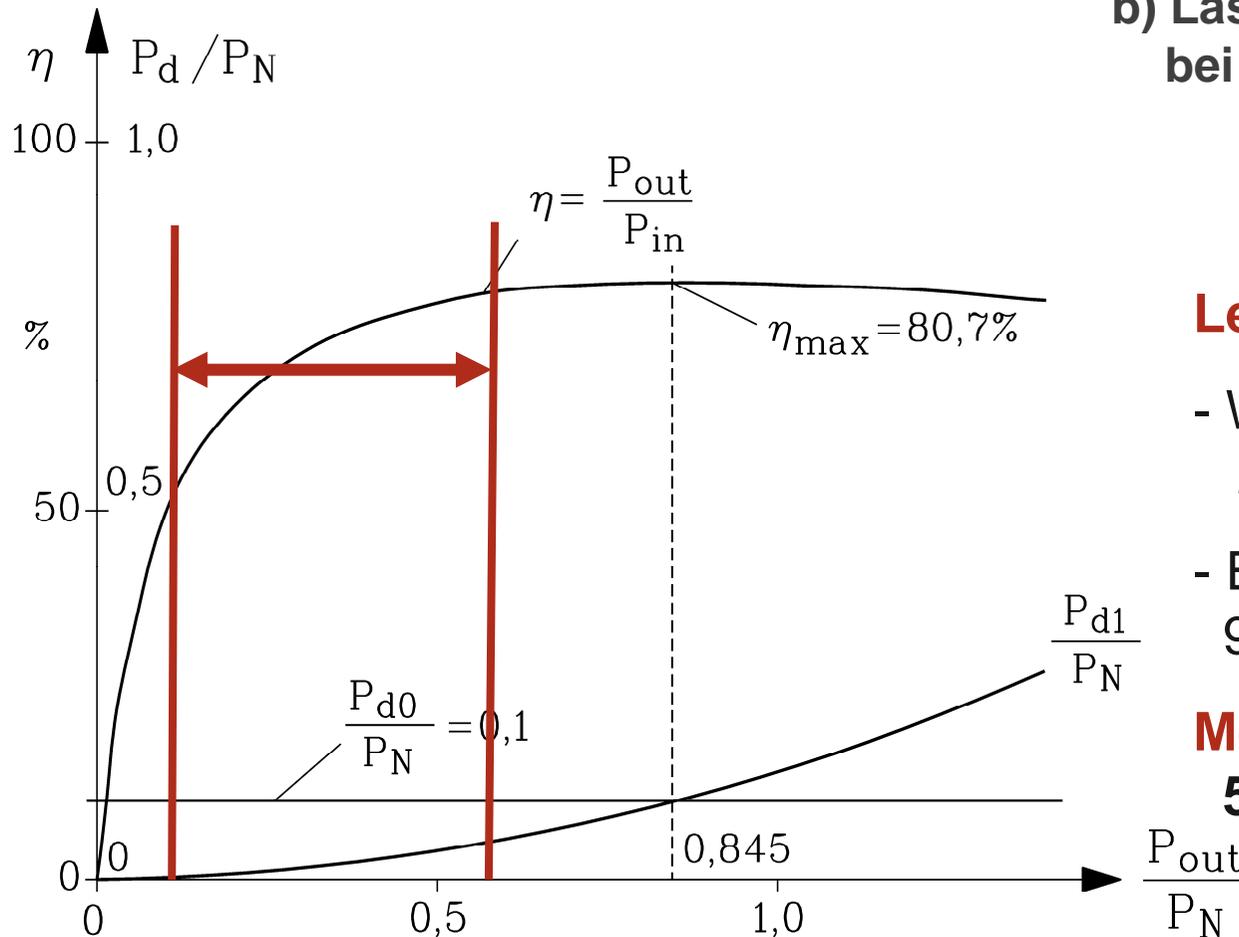
Zu hohe Leerverluste – zu hoher Energieverbrauch





Teillastbetrieb – schlechter Wirkungsgrad

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



Beispiel:

a) Leerverluste $0.1 P_N$

b) Lastverluste $\sim P^2$
bei Nennleistung: $0.14 P_N$

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

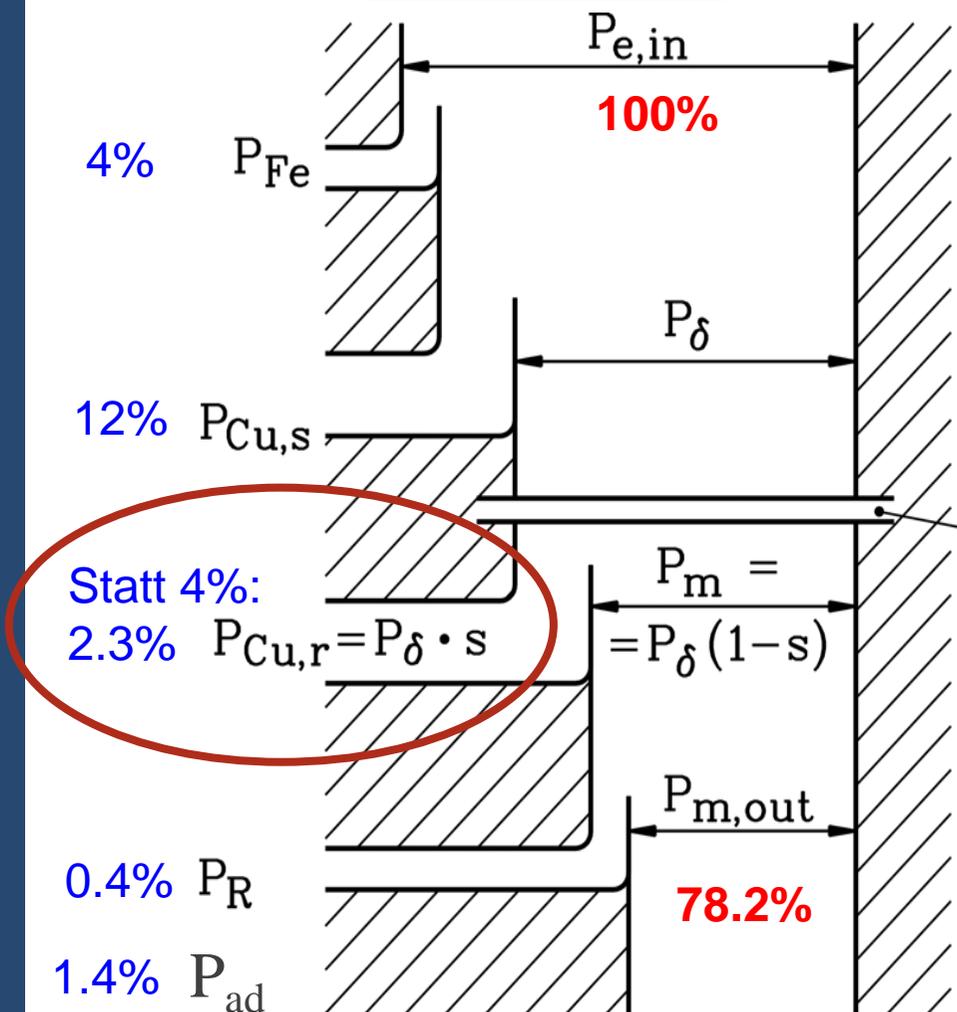
- Energiesituation in der EU und Deutschland
- Energieeinsparpotentiale bei E-Antrieben
- **Entwicklungen bei E-Motoren**
- Zukunftsperspektiven - Ausblick





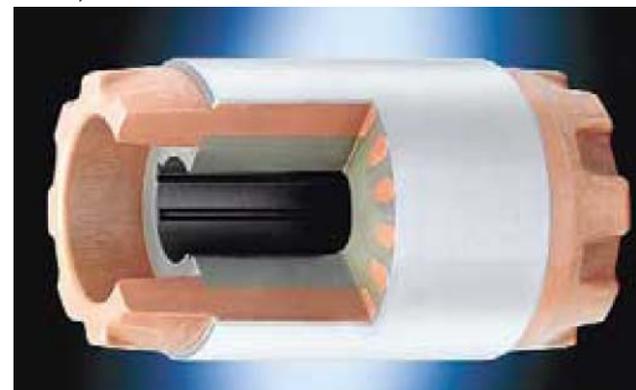
Kupferguss bei Norm-Asynchronmotoren – Premium efficiency

Verluststruktur:



Verlustarmer Läuferkäfig:

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



Quelle: SEW, Siemens





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)

Kostenersparnis: $0.36 \cdot 40 + 0.09 \cdot 900 = 95.4$ Euro

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

Quelle: SEV Bulletin, 2005





Verkaufte Normasynchronmotoren Industrie

Europa 2005: 2- und 4-polige Normasynchronmotoren ca. 1 ... 100 kW

<u>Motorenzahl</u>	<u>EFF1</u>	<u>EFF2</u>	<u>EFF3</u>
100%	9%	84%	7%

USA 2004: 2- und 4-polige Normasynchronmotoren ca. 0.7 ... 200 kW

<u>Motoren- zahl</u>	<u>3-star (Premium)</u>	<u>2-star (EFF1)</u>	<u>1-star (EFF2)</u>	<u>no star (EFF3)</u>
100%	16% 20% *)	54%	25%	5%

*) geschätzt für 2007

Quelle: SEV Bulletin, 2007





Drehzahlveränderung bei Drehfeldmaschinen

Drehfeldmaschinen:

Asynchron- oder Synchronmaschinen

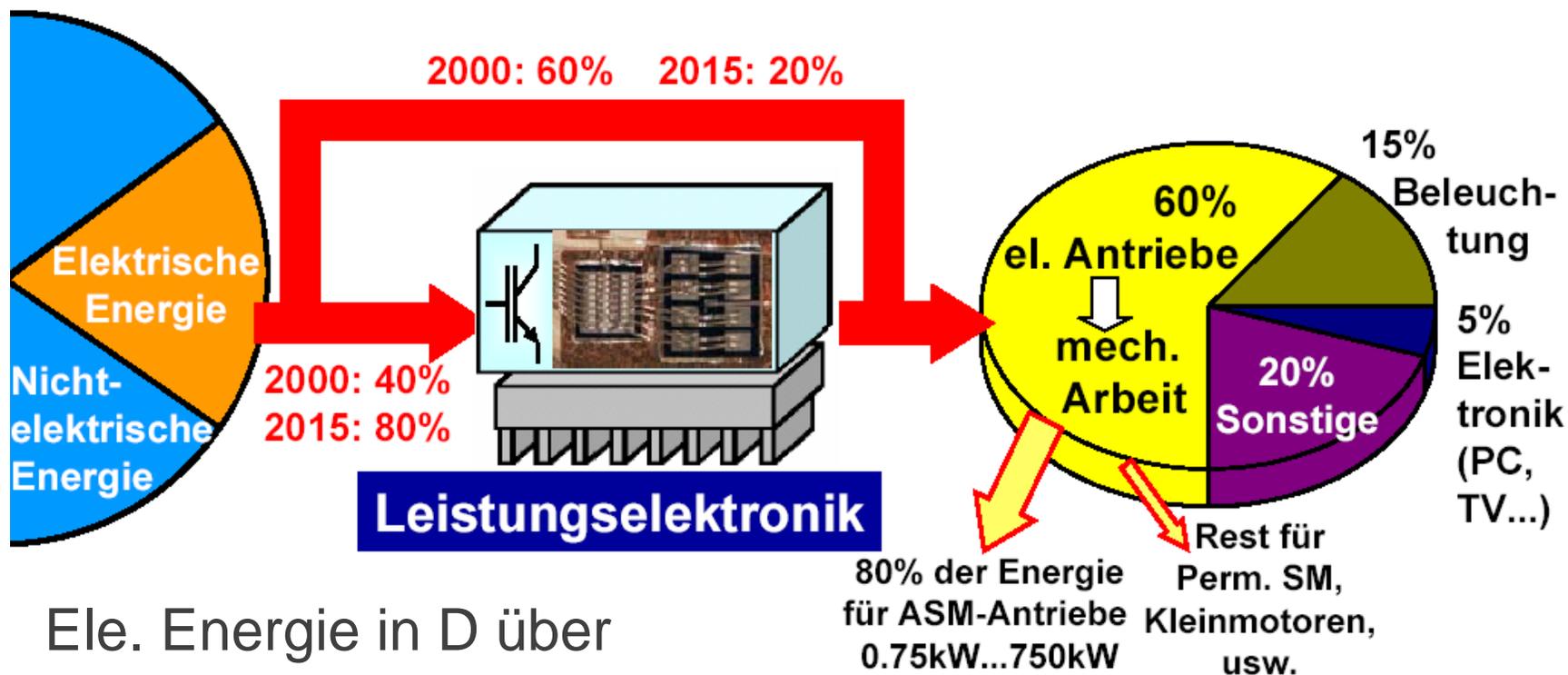
Drehzahlveränderung =
= Frequenzänderung =
= Umrichterspeisung

Umrichter-Vollast-Wirkungsgrad: 97%





Umrichterspeisung nimmt zu !



Ele. Energie in D über Umrichter umgeformt:

2000: 40%

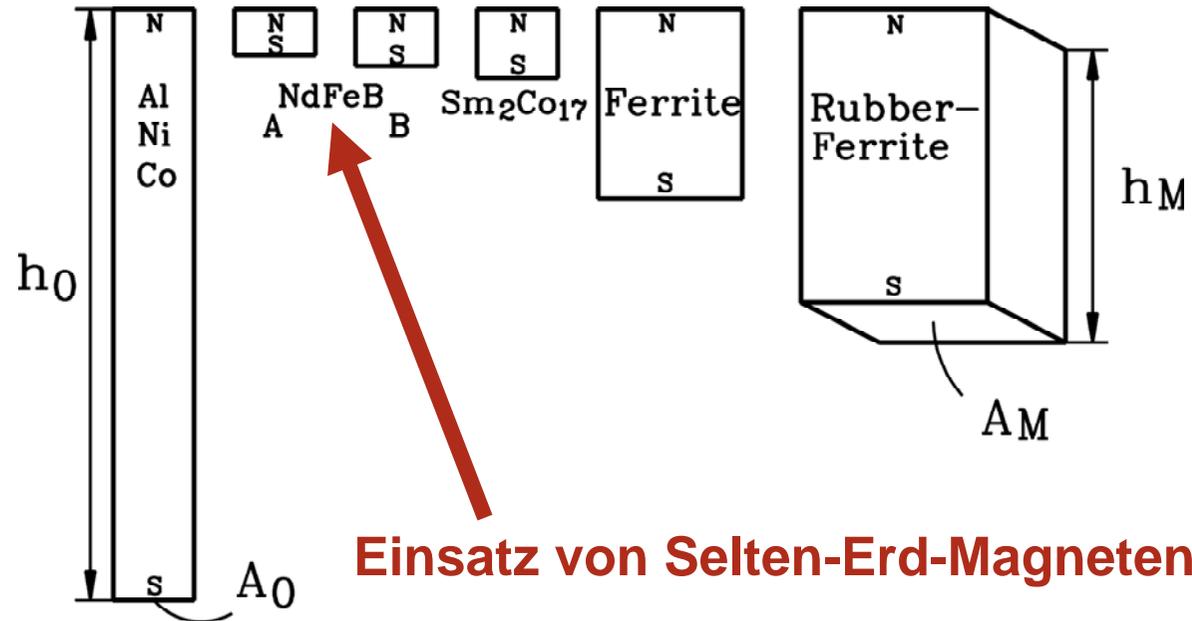
2015: 80%

Quelle: etz-Zeitschrift, 2007





Permanentmagnet-Synchronmaschinen



Benötigtes Magnetvolumen für

- gleichen Magnetfluss
- gleiche Entmagnetisierfestigkeit

Höchste Energiedichte bei Neodymium-Eisen-Bor-Magneten





Netzgespeiste Asynchron- vs. Umrichter- gespeiste Permanentmagnetmotoren

Verteilte Drehstromwicklung

	Asynchron eff2	PM-Synchron	PM-Synchron
Kühlungsart	Wellenlüfter	Fremdlüfter	Ohne Lüfter
Motorspeisung	Netz	Umrichter	Umrichter
Achshöhe	132 mm	100 mm	132 mm
Frequenz	50 Hz	100 Hz	75 Hz
Drehzahl	1450/min	1500/min	1500/min
Polzahl	4	8	6
Aktivmasse	40.4 kg	26.6 kg	50.5 kg
Motor-Leistung	7500 W	8950 W	8640 W
Wirkungsgrad	89.0%	91.0%	94.3%

Wirkungsgrad steigt



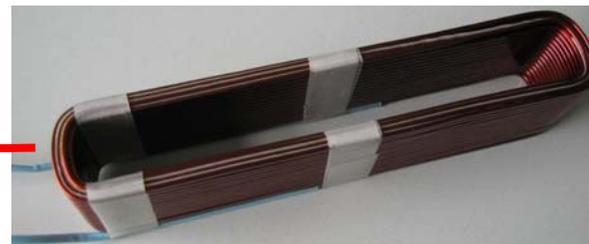


Zahnspulenwicklung für Permanentmagnetmotoren

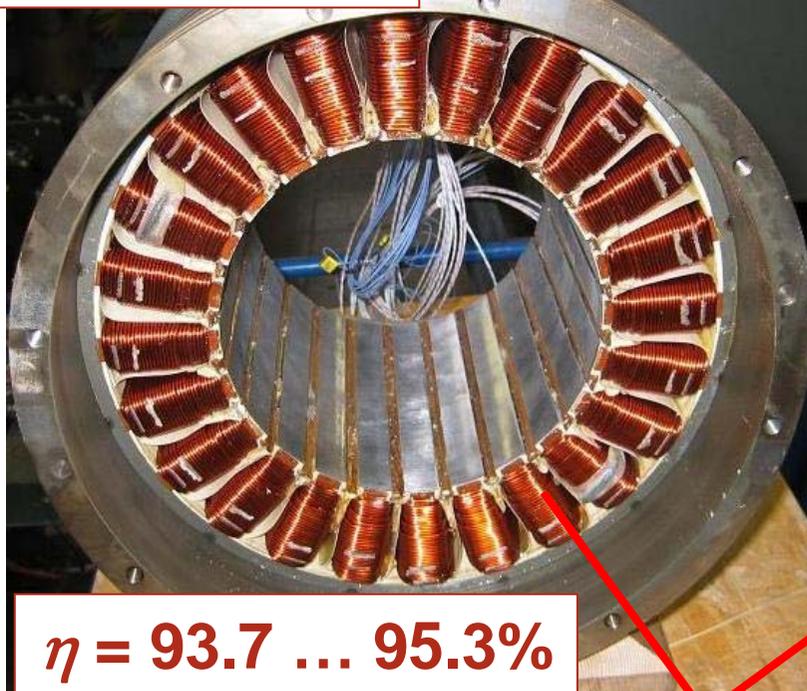
**Kompakte Stator-Kupfer-Wicklung –
geringere Stromwärmeverluste**

Kühlmantel

Zahnspule

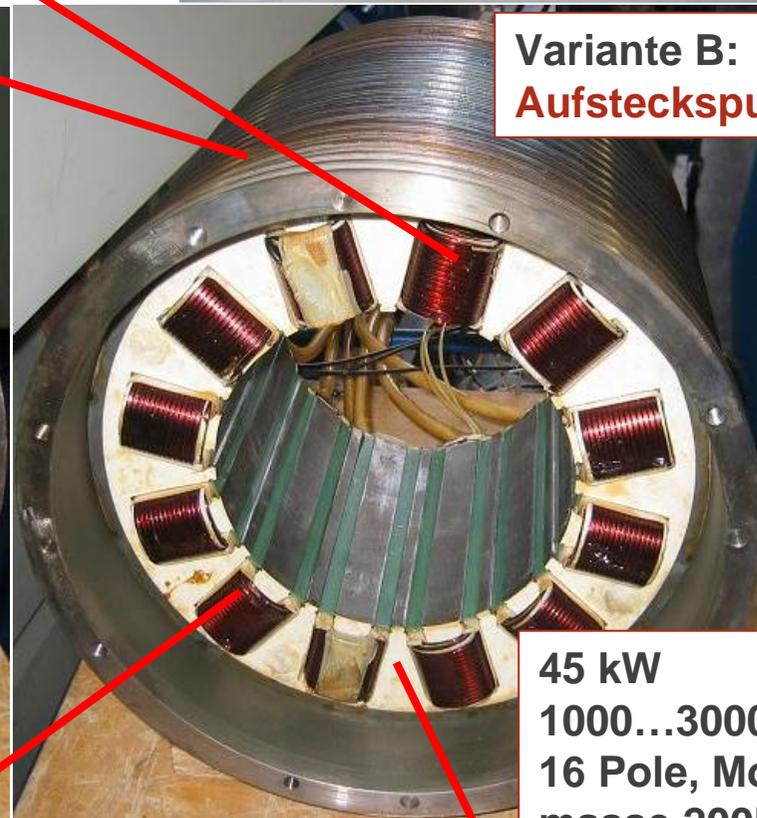


**Variante A: Rund-
drahtnadelwicklung**



$\eta = 93.7 \dots 95.3\%$

**Variante B:
Aufsteckspulen**



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

Stator-Wicklung

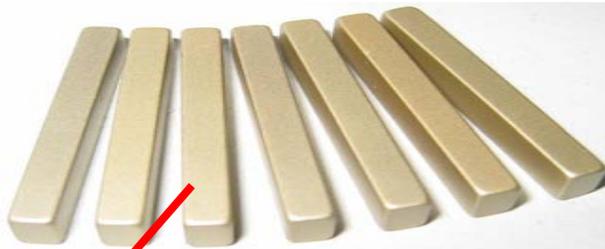
Blechpaket





Umrichter gespeiste Permanentmagnetmotoren für Industrieantriebe

Permanentmagnete erzeugen verlustfrei das Magnetfeld



Magnete



Welle

Kohlefaserbandage



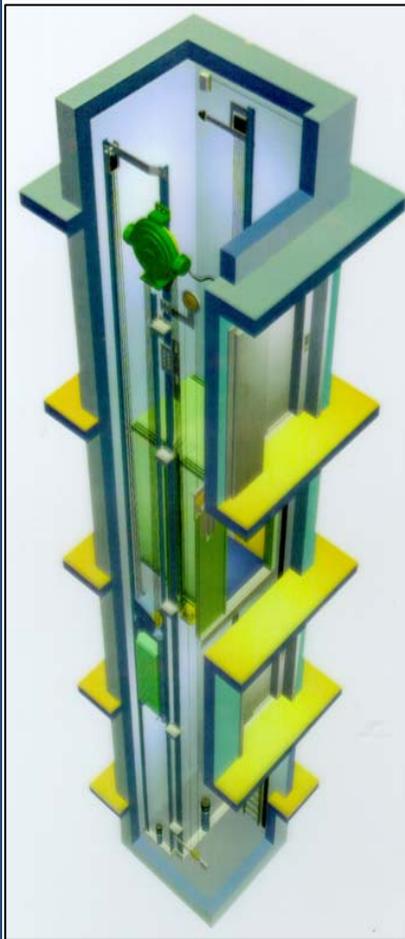
45 kW
1000...3000/min
16-polig, 200 kg

Rotorblechpaket



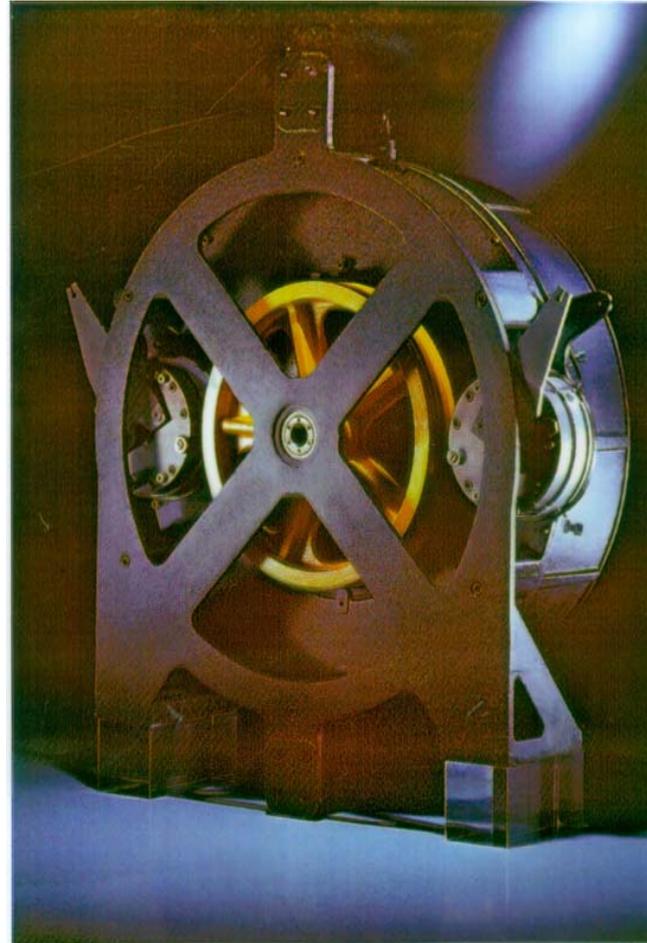


Aufzugdirektantrieb



PM-Scheibenläufer-
direktantrieb

Quelle: Kone, Finnland
Institut für Elektrische
Energiewandlung



PM-Aufzugs-Direktantrieb

Quelle: Siemens

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



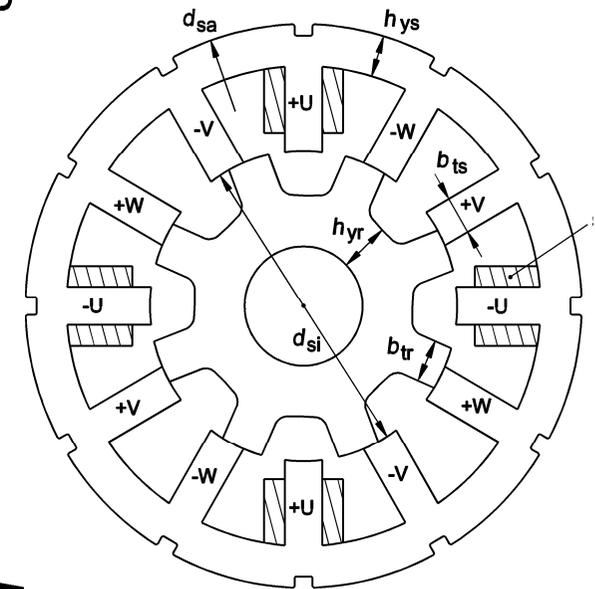
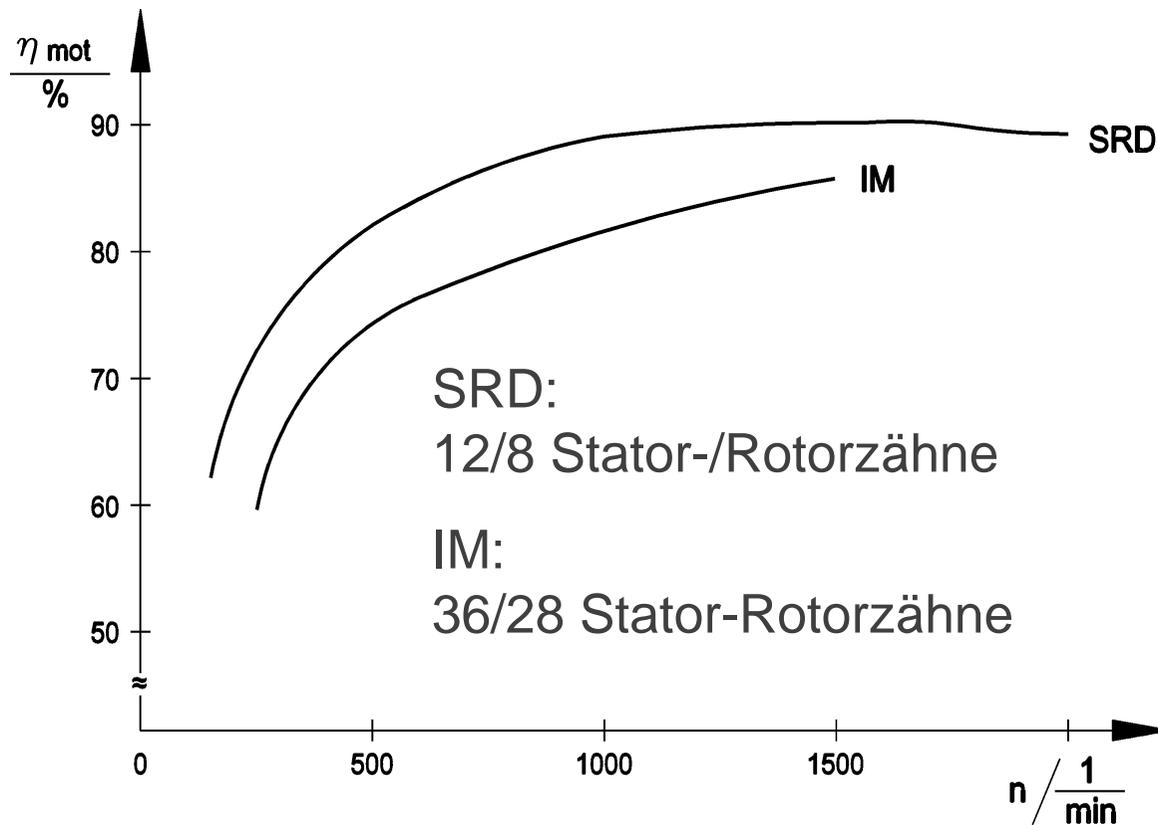


Geschalteter Reluktanzmotor

Geschalteter Reluktanzmotor: (Switched reluctance machine)

Vergleich mit umrichter gespeistem Norm-Asynchronmotor

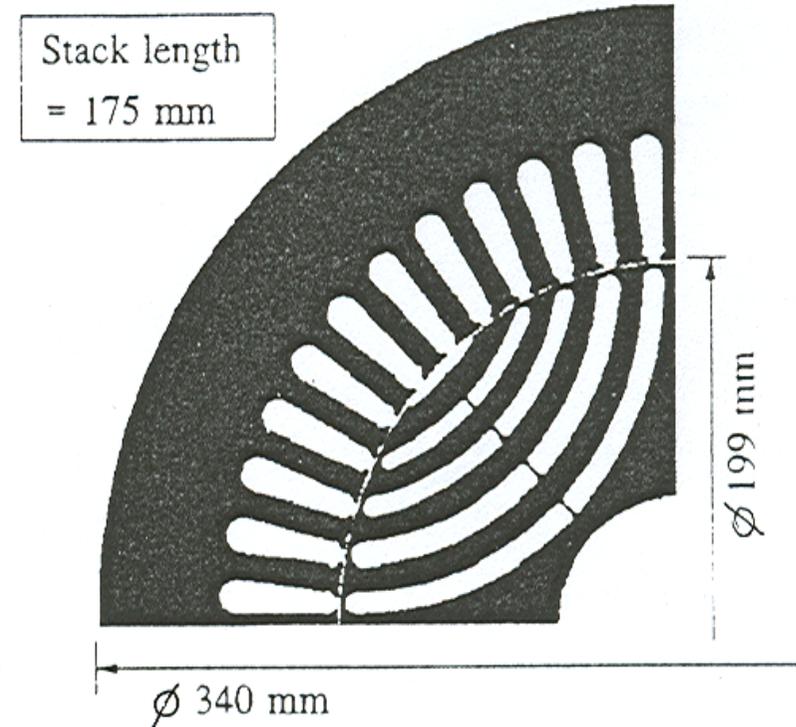
- beide vierpolig, 3-phasig: 54 Nm, 100 K Wicklungserwärmung





Synchrone Reluktanzmotoren mit Umrichterspeisung

- Dank hoher Reluktanz 1:10
gleiches Leistungs-Volumen-
Verhältnis wie
Asynchronmaschine
- Höherer Wirkungsgrad, da
keine Läuferverluste
- Leistungsfaktor mit 0.7 ... 0.8
etwas niedriger als bei
Asynchronmaschinen
- Kommerziell verfügbar





Hochdrehzahlantriebe für hohe Leistung



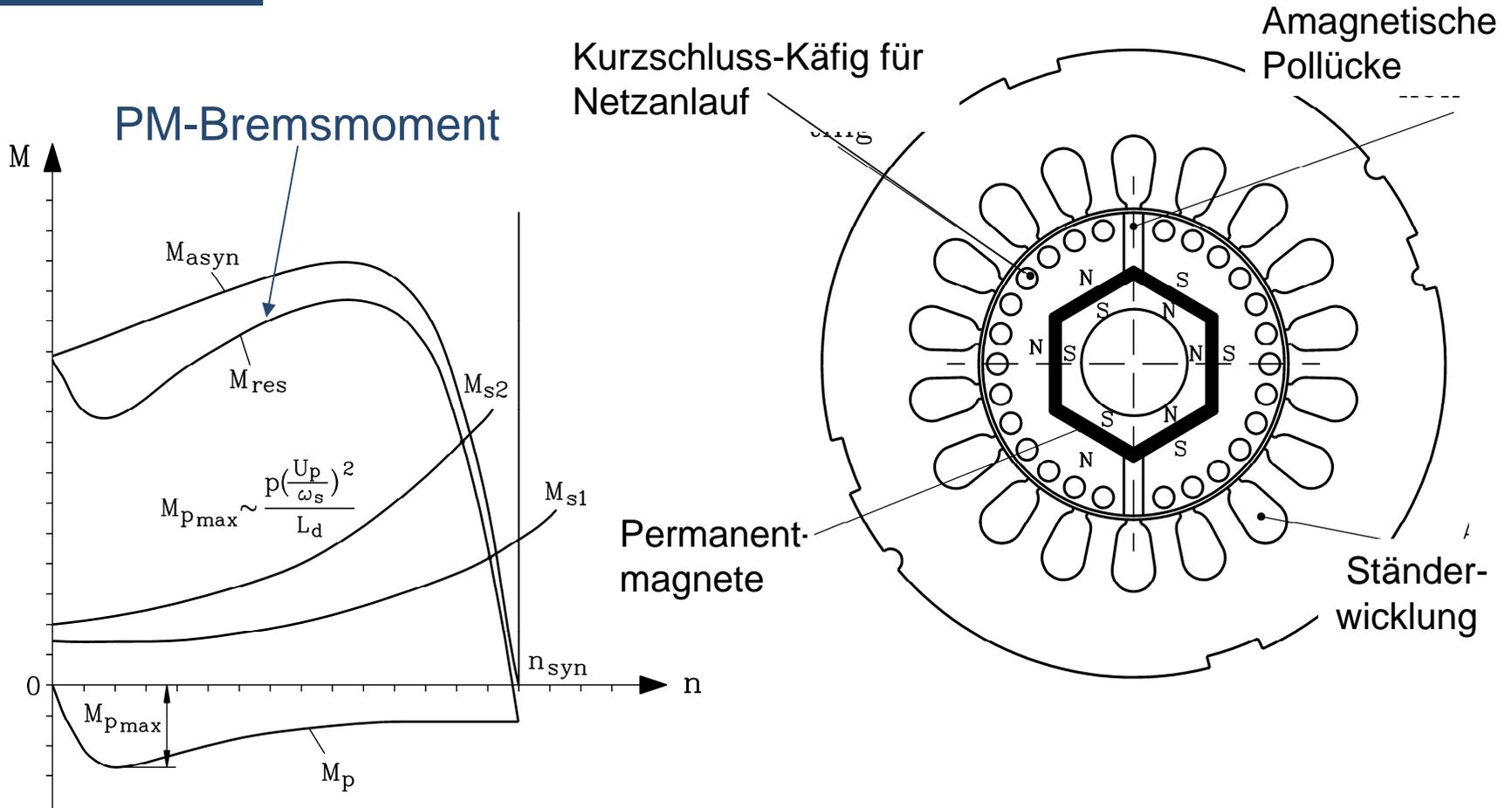
15000/min, 4 MW Käfigläufer-Asynchronmotor

- 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





Netzgespeiste PM-Synchronmaschinen



- Entwicklungsarbeit, PM-Läufer erzeugt Bremsmoment beim Hochlauf





Entwicklungen zur Steigerung der Energieeffizienz bei elektrischen Antrieben

Energiesparende Schiffsantriebe

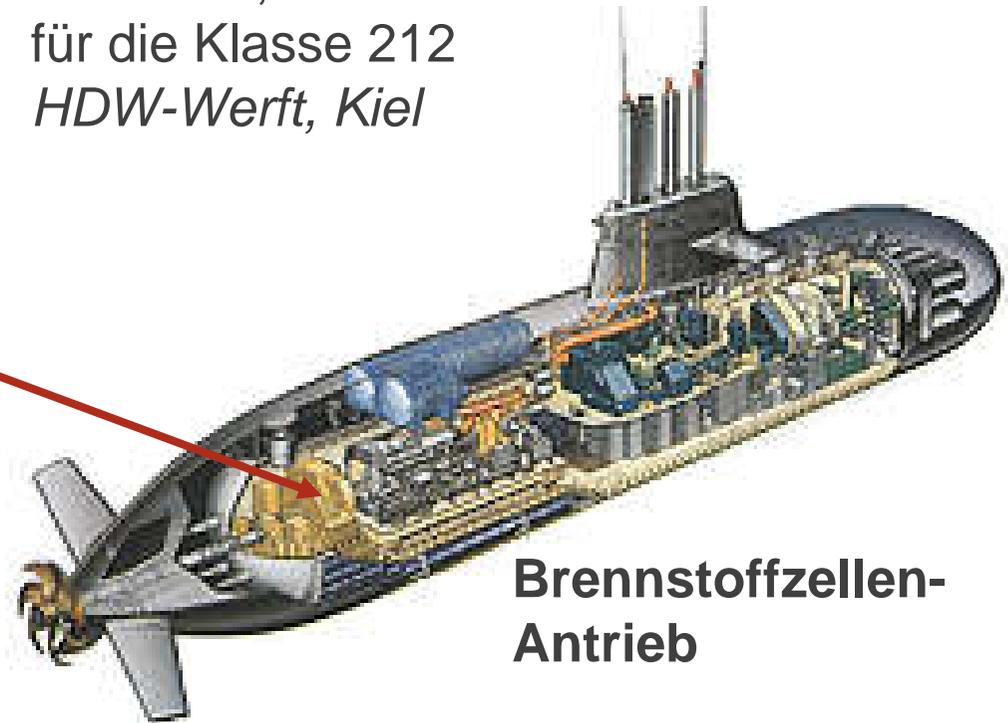




PM-Antriebe für Schiffe

Beispiel: U-Boot-Antrieb

1.100 kW, 230 / min
für die Klasse 212
HDW-Werft, Kiel



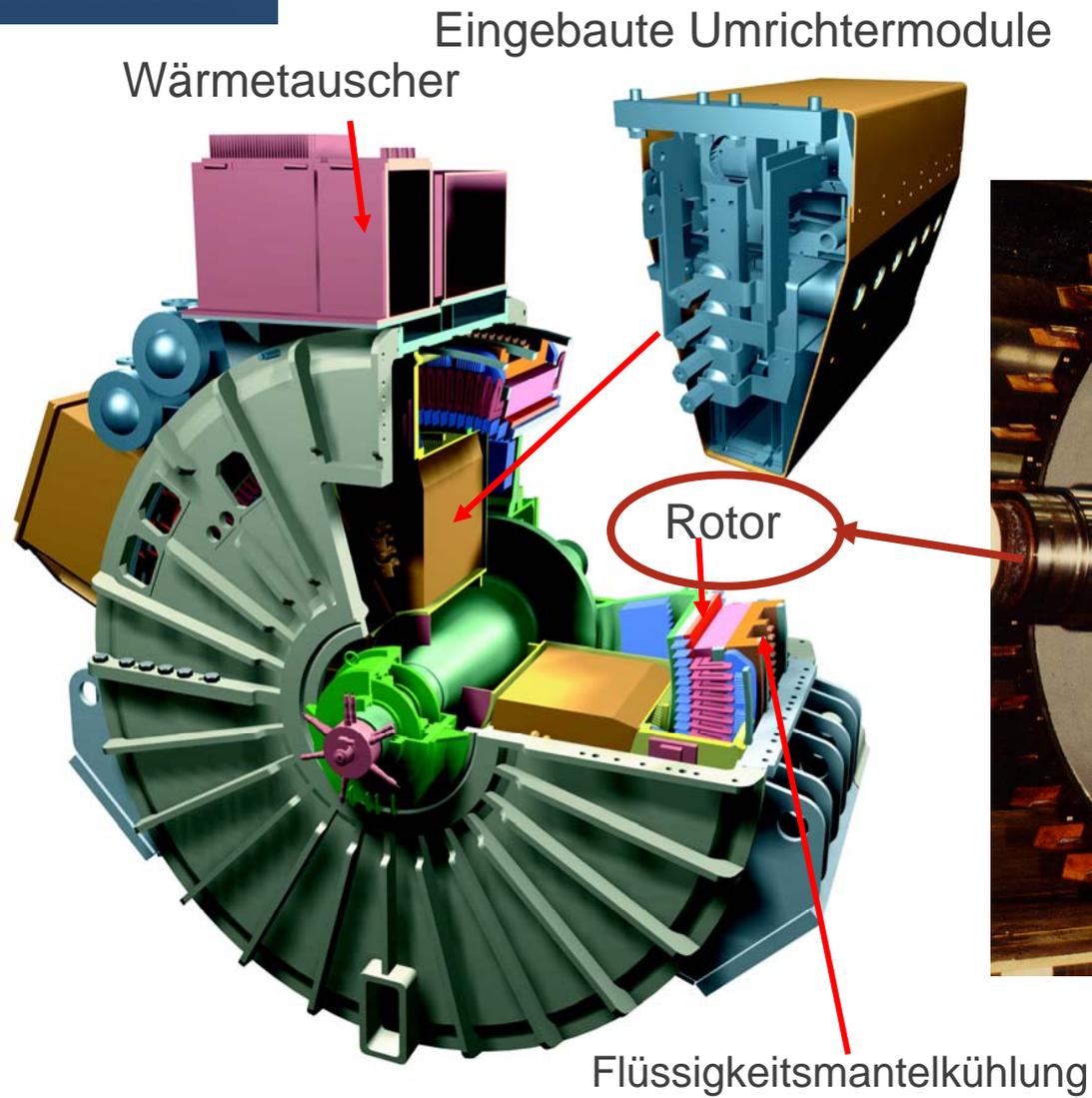
**Brennstoffzellen-
Antrieb**

Quelle: Siemens AG





PM-U-Boot-Antrieb



Quelle: Siemens AG





„All electric“-Ship



PM-Pod-Antrieb
(Drehbare Gondel)

PM-Antriebe:

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

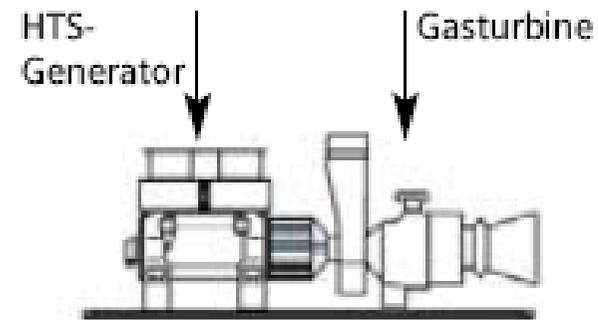
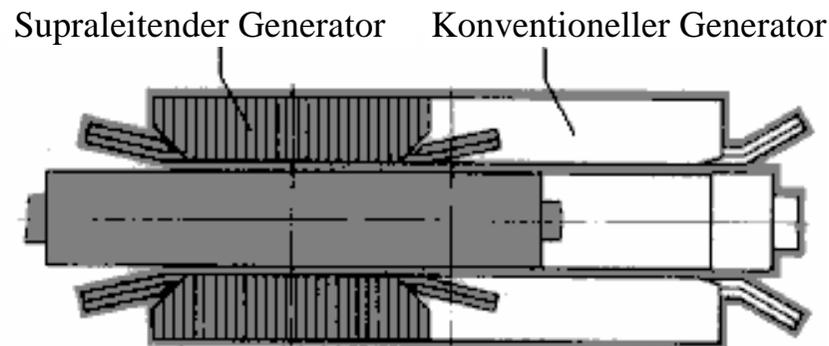
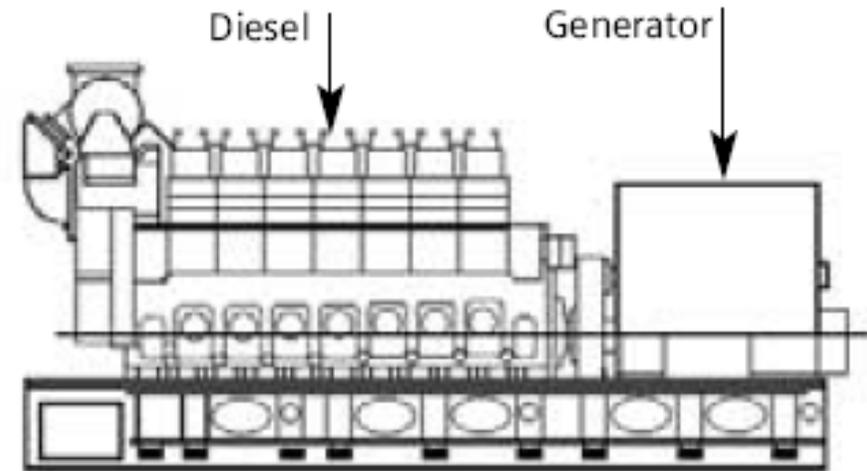




Supraleitende E-Maschinen

Weitere Entwicklung:

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





Synchrongenerator mit Hochtemperatur- Supraleiterwicklung (HTSL)

HTSL – 4-poliger 4 MW-Synchrongenerator für Schiffe im System-
Prüffeld, 1800/min, 60 Hz, Rotorwicklung bei -243°C , Neon-Kaltgas



Quelle:
Siemens AG



Vergleich des HTSL-Prototyps mit konventionellem Generator

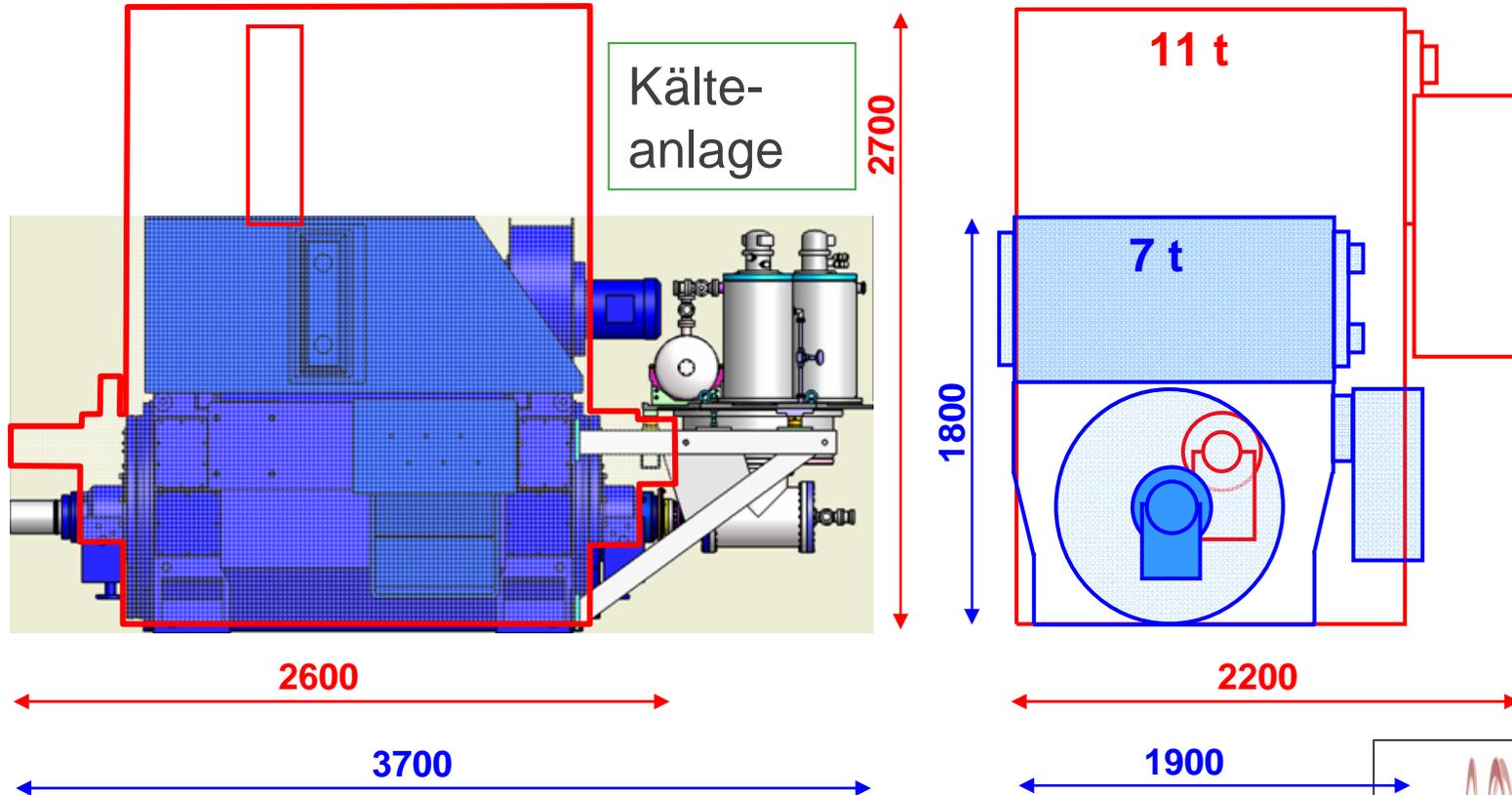
- Geringes Volumen und Gewicht

Quelle:

Siemens AG

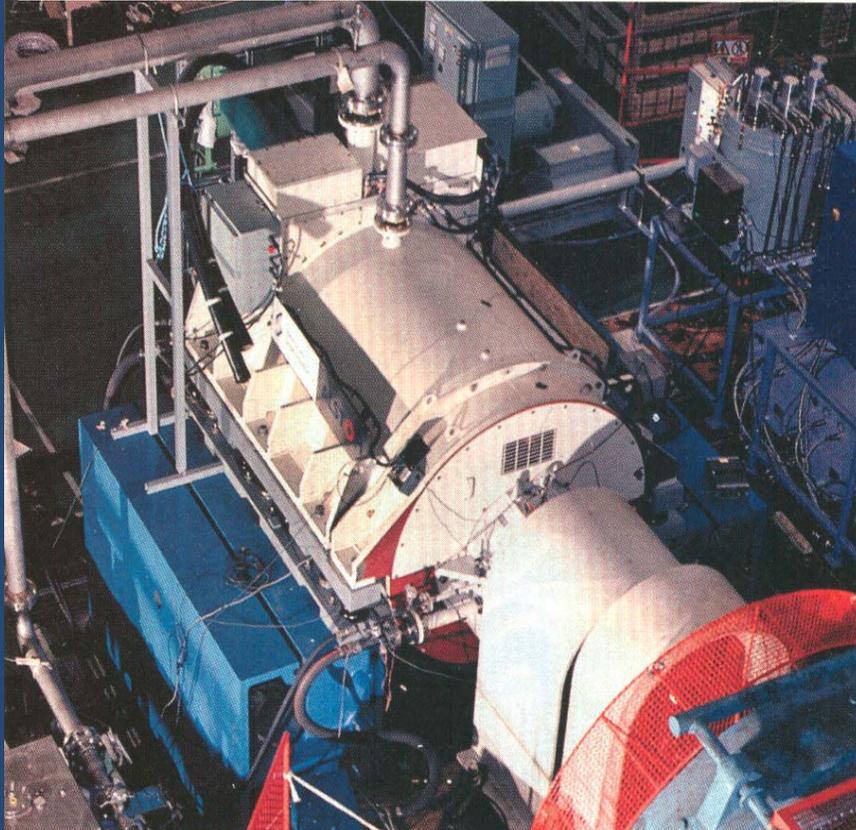
- Höherer Wirkungsgrad: **98.4% statt 96.1 % =
= nur 40% der Verluste**

4 MVA HTS Generator verglichen mit konventionellem Generator



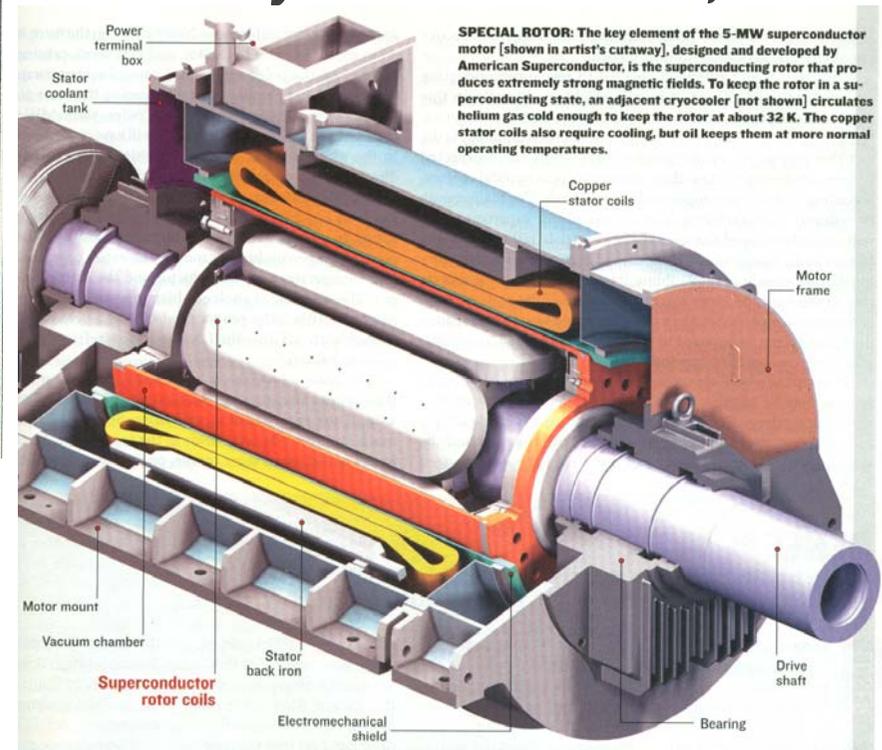


HTSL-Synchronmotor 5 MW



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

Quelle: *American Superconductor, Alstom*





Vortrag - Inhaltsübersicht

- Energiesituation in der EU und Deutschland
- Energieeinsparpotentiale bei E-Antrieben
- Entwicklungen bei E-Motoren
- **Zukunftsperspektiven - Ausblick**





Zukunftsperspektiven - Ausblick

- **Energieeinsparpotential in der Antriebstechnik ca. 20%**
- **Drehzahlveränderung: erfordert i. a. Umrichter**
- **PM-Technologie** nimmt an Bedeutung zu !
ABER: 50% der Rohstoffvorräte Neodymium liegen in China !
- **Entwicklungstätigkeit bei Firmen & Hochschulen für effiziente Antriebe**
- **Technisch Machbares versus erhöhte Investitionskosten**
- **Gesetzliche Anreize (Förderungen / Vorschriften) nötig**
- **Gesamtkostenbetrachtung (life-cycle-cost) anstelle Kaufpreis**





Entwicklungen zur Steigerung der Energieeffizienz bei elektrischen Antrieben

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

abinder@ew.tu-darmstadt.de

