

## Innovative Energietechnik

# Entwicklungen zur Steigerung der Energieeffizienz bei elektrischen Antrieben

*Andreas Binder*

Institut für Elektrische Energiewandlung

TU Darmstadt

[abinder@ew.tu-darmstadt.de](mailto:abinder@ew.tu-darmstadt.de)

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



*Quelle: VEM; Deutschland*

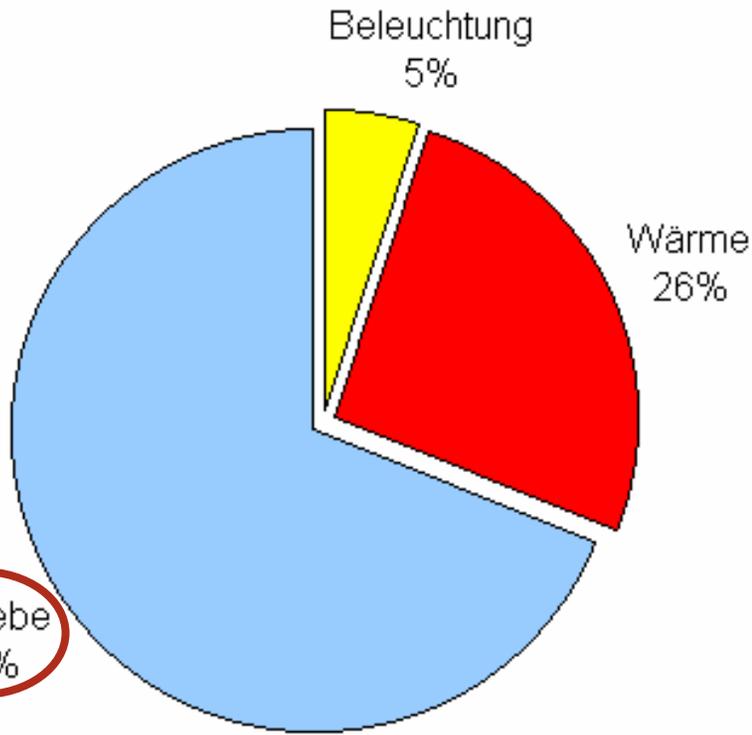
# Sparprogramm der EU

- **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 CO<sub>2</sub>-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

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



Quelle: VEM; Deutschland

## Industrielle Antriebstechnik:

### Geschätztes Energieeinsparpotential:

Motorwirkungsgrad

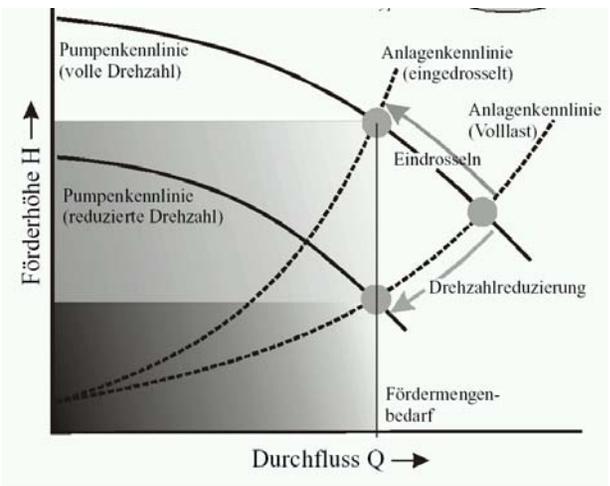
1,4% ... 3%



Quelle: Leroy Somer; France; KSB, Deutschland

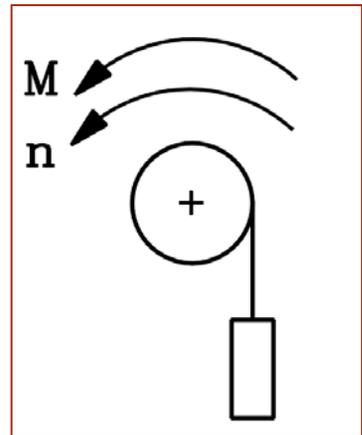
Drehzahlanpassung

8 % ... 10%



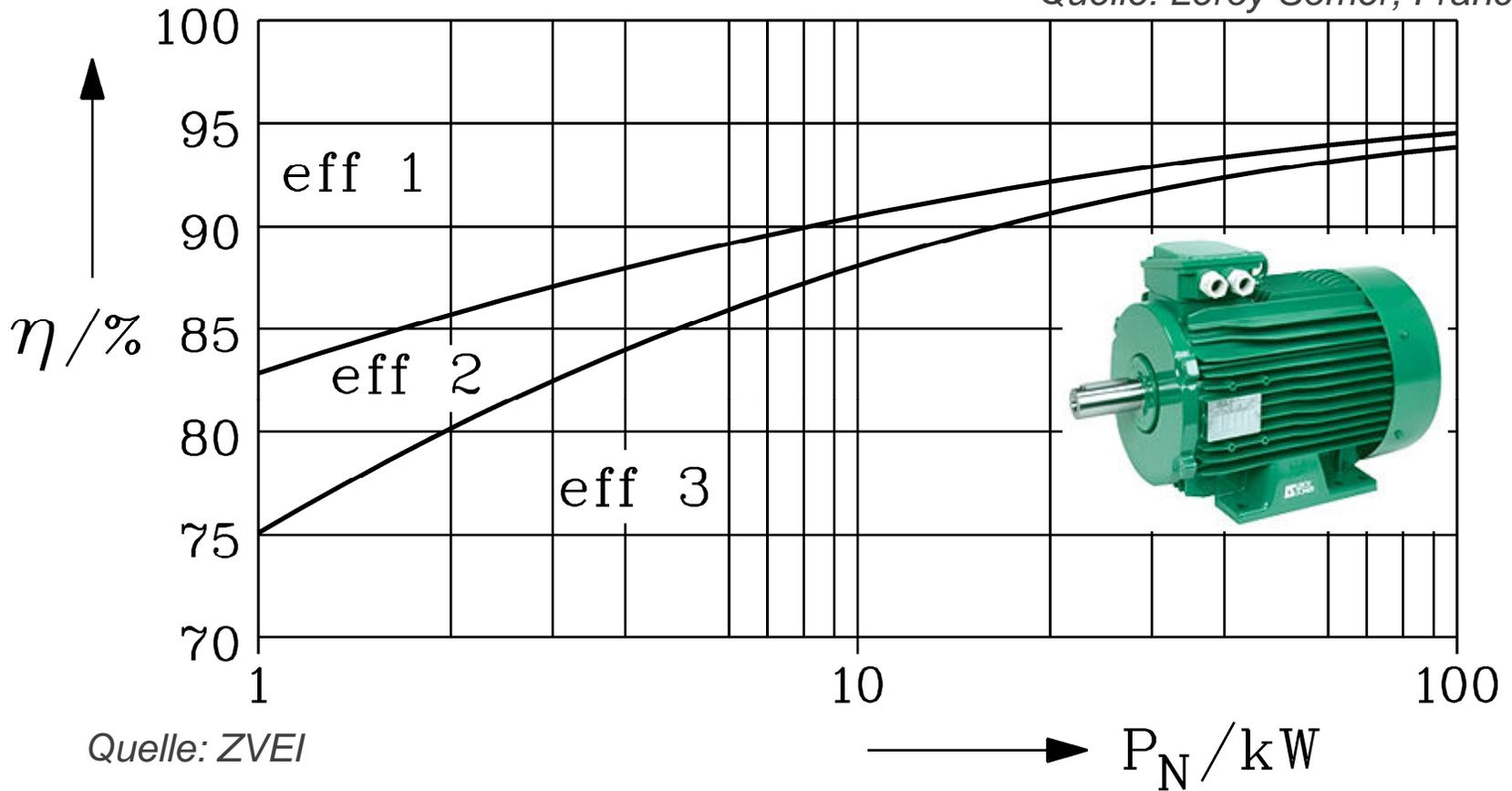
Systemoptimierung

15 ... 20 %



# Wirkungsgradgesteigerte Norm-Asynchron-Motoren

Quelle: Leroy Somer, France



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

## 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

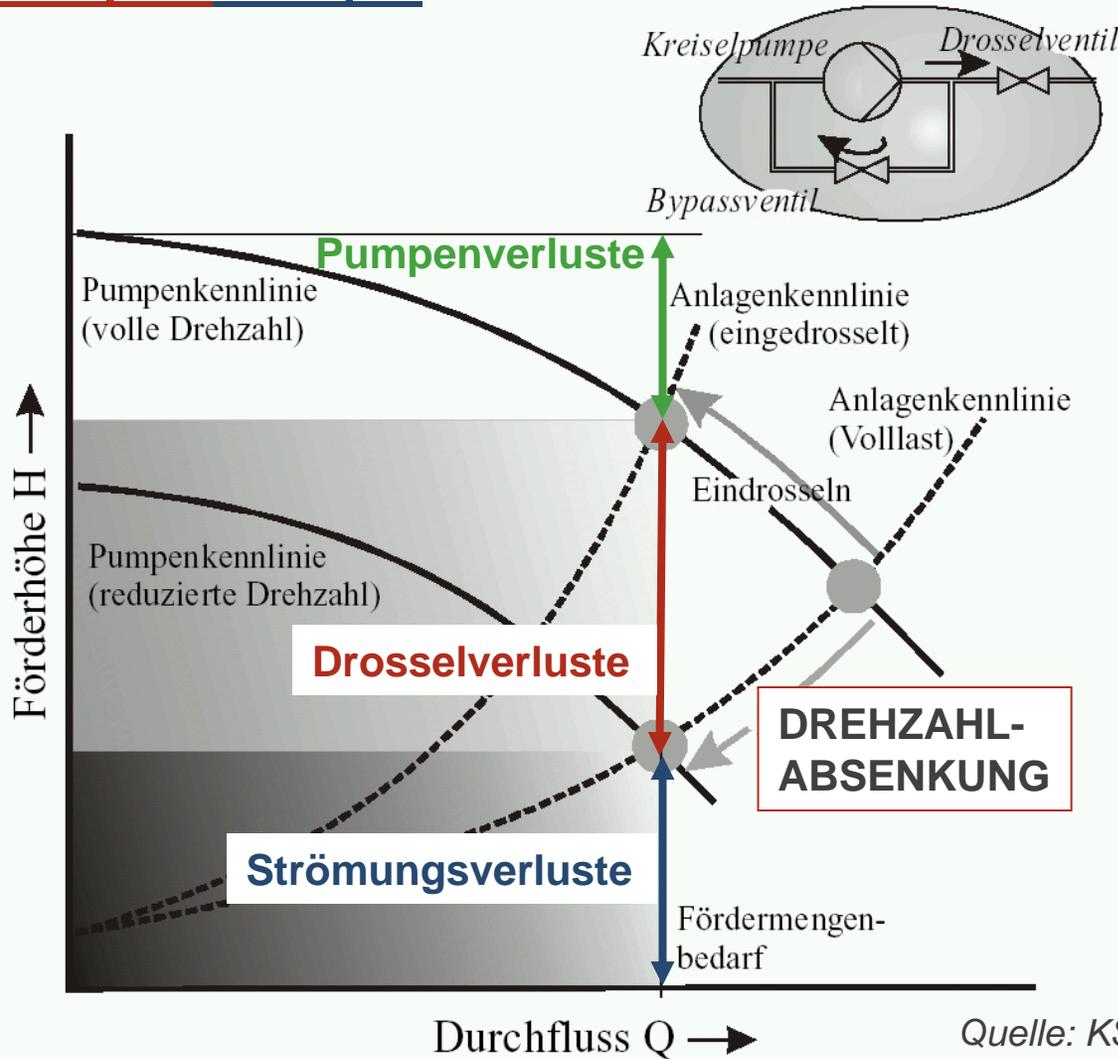
$$4\% \cdot 50\% \cdot 163 \text{ TWh} = 3.3 \text{ TWh}$$

 **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

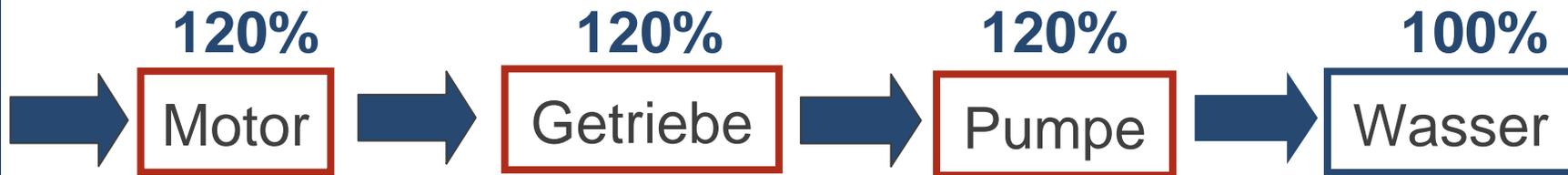
**Vermeidung der Drosselverluste: Bis zu 60% Energieeinsparung !**

Quelle: KSB, Frankenthal

## Dimensionierung durch Sicherheitszuschläge:

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

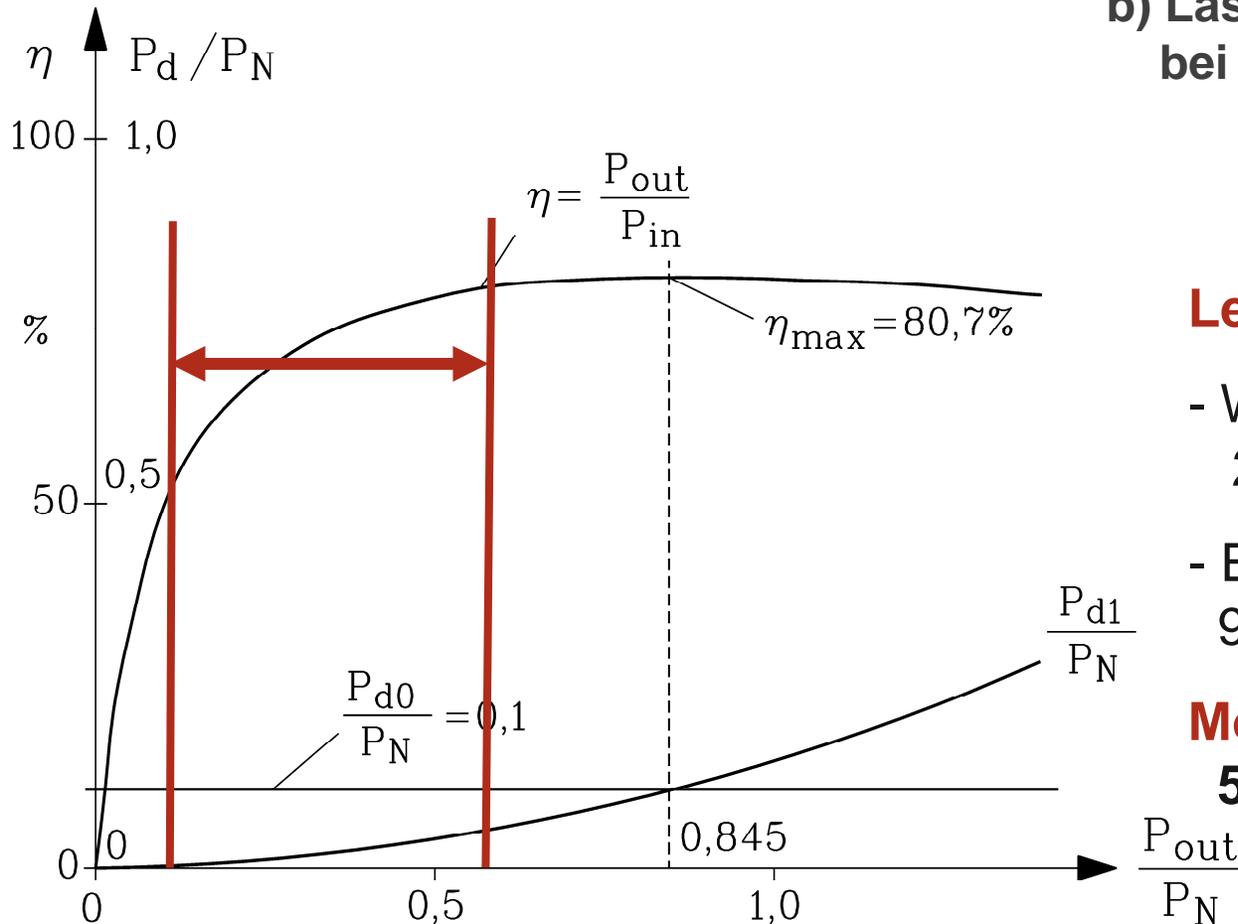
Motor um 72 % überdimensioniert:  $1.2 \cdot 1.2 \cdot 1.2 = 1.73$



## Teillastbetrieb des E-Motors:

Zu hohe Leerverluste – zu hoher Energieverbrauch

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



**Beispiel:**

- a) Leerverluste  $0.1 P_N$
- 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

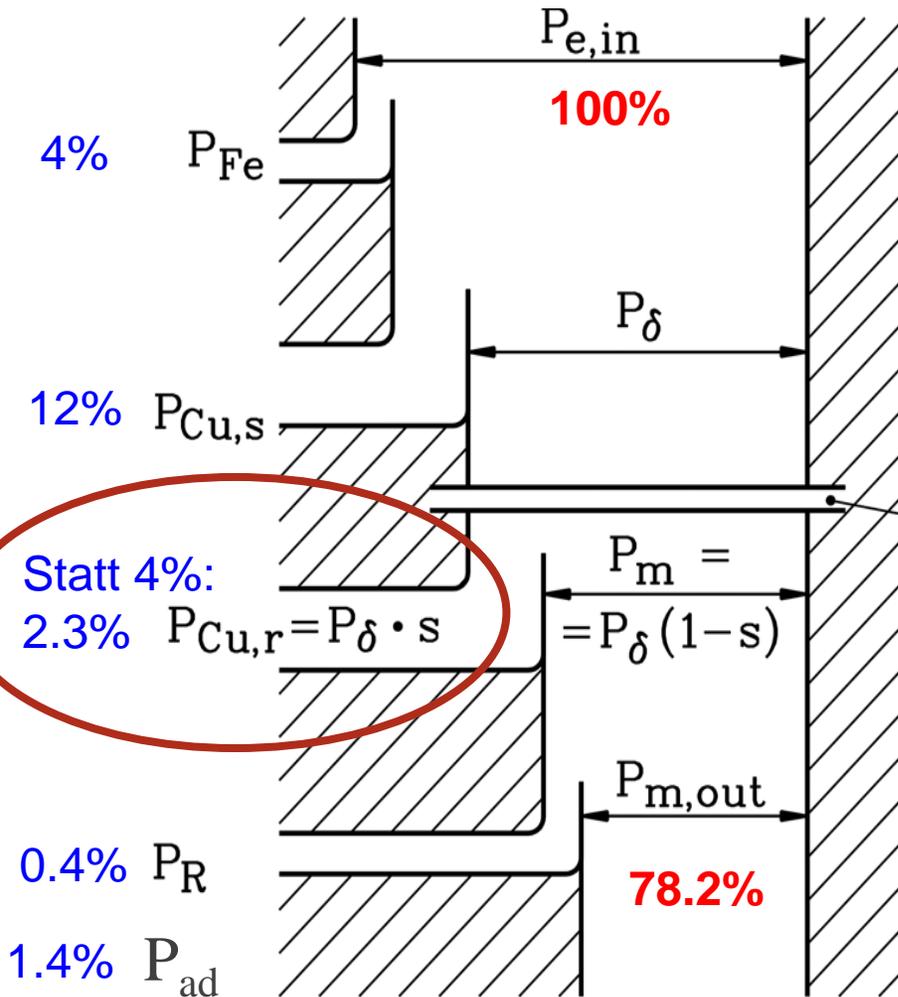
- Energiesituation in der EU und Deutschland
- Energieeinsparpotentiale bei E-Antrieben
- **Entwicklungen bei E-Motoren**
- Zukunftsperspektiven - Ausblick



Quelle: VEM; Deutschland

# 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)

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

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

Quelle: SEV Bulletin, 2005



**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%	<b>84%</b>	7%

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

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

\*) geschätzt für 2007

Quelle: SEV Bulletin, 2007

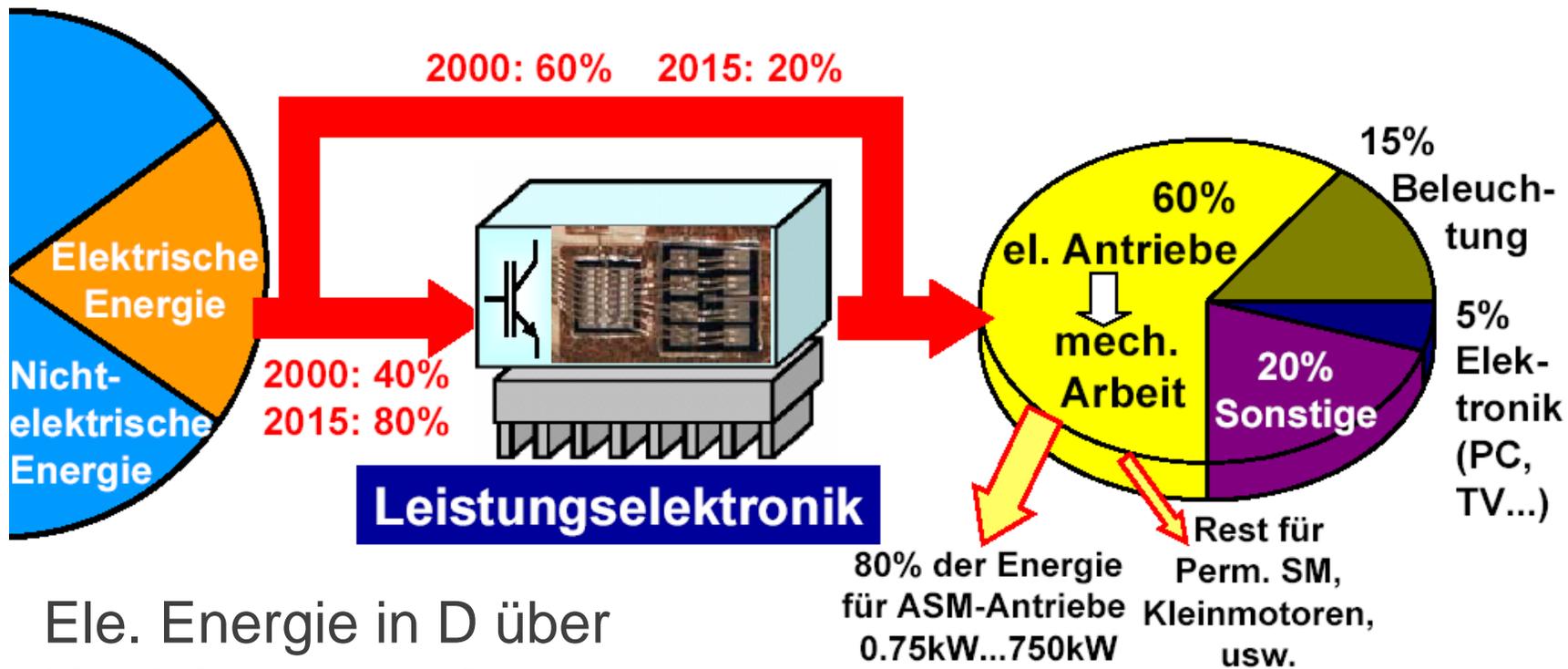
## Drehfeldmaschinen:

Asynchron- oder Synchronmaschinen

**Drehzahlveränderung =**  
**= Frequenzänderung =**  
**= Umrichterspeisung**

Umrichter-Vollast-Wirkungsgrad: 97%

# Umrichterspeisung nimmt zu !

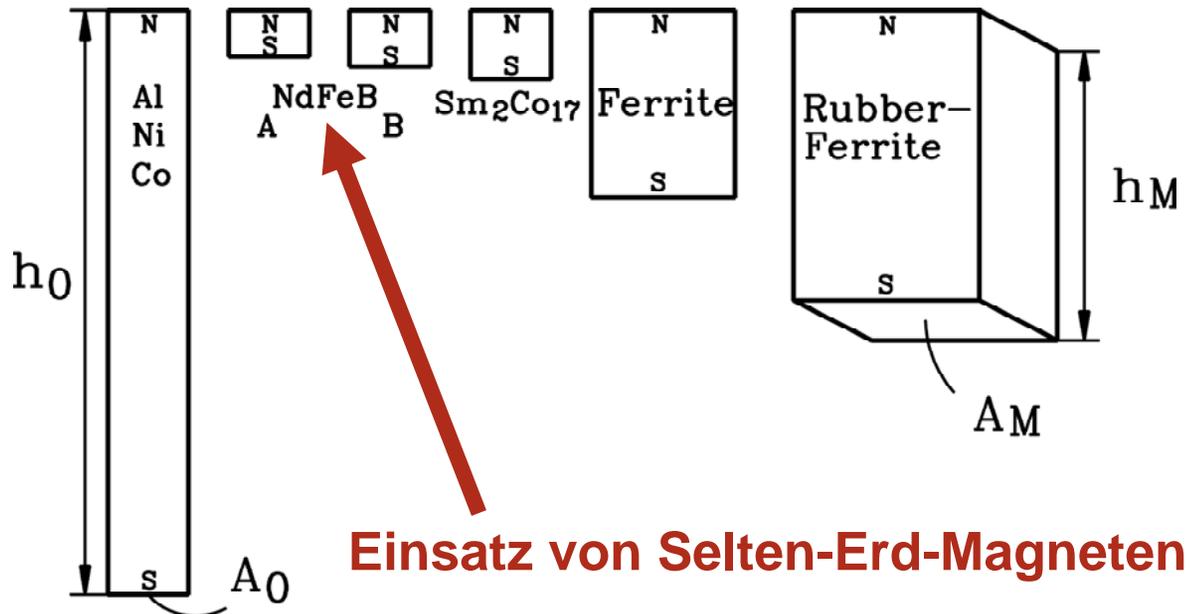


Ele. Energie in D über Umrichter umgeformt:

2000: 40%

2015: 80%

Quelle: etz-Zeitschrift, 2007



## 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	<b>89.0%</b>	<b>91.0%</b>	<b>94.3%</b>



**Wirkungsgrad steigt**

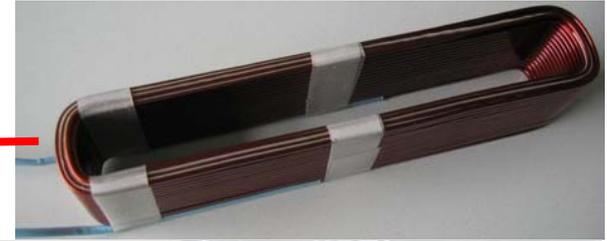
# Zahnspulenwicklung für Permanentmagnetmotoren

Quelle: TU Darmstadt

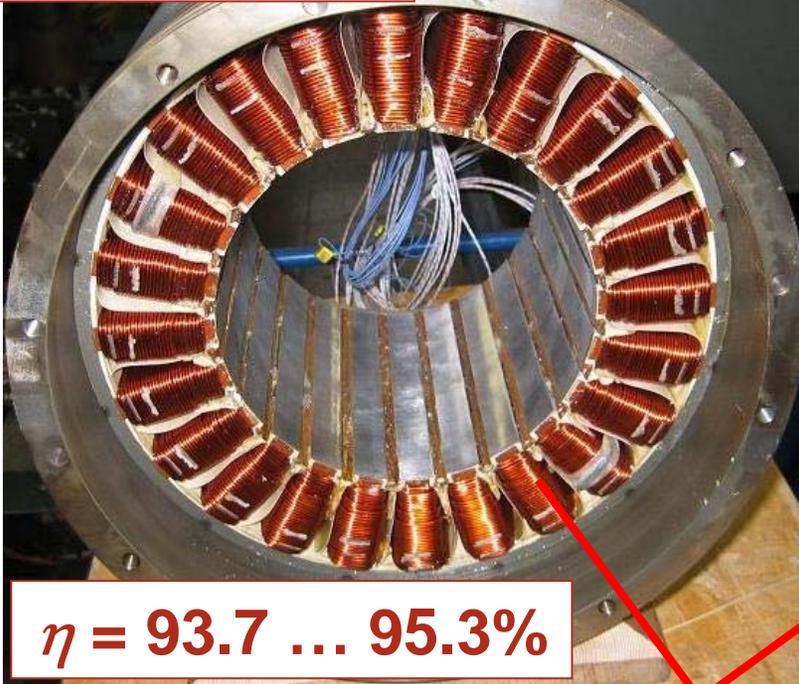
**Kompakte Stator-Kupfer-Wicklung –  
geringere Stromwärmeverluste**

**Kühlmantel**

**Zahnspule**

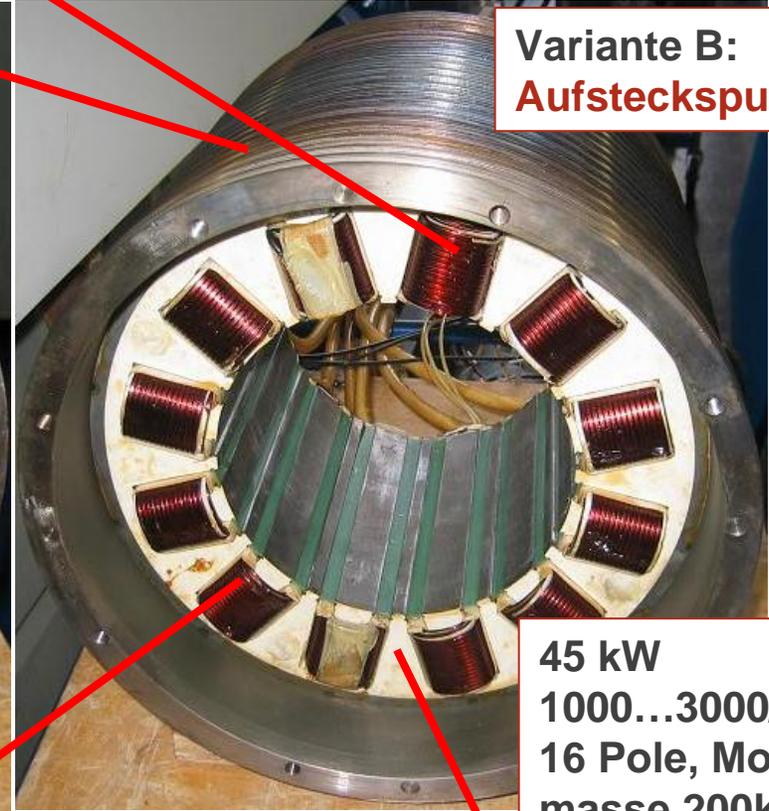


**Variante A: Rund-  
drahtnadelwicklung**



$\eta = 93.7 \dots 95.3\%$

**Variante B:  
Aufsteckspulen**



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

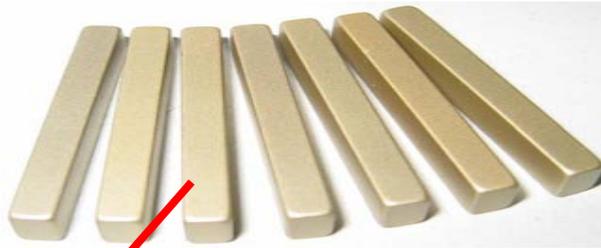
**Stator-Wicklung**

**Blechpaket**

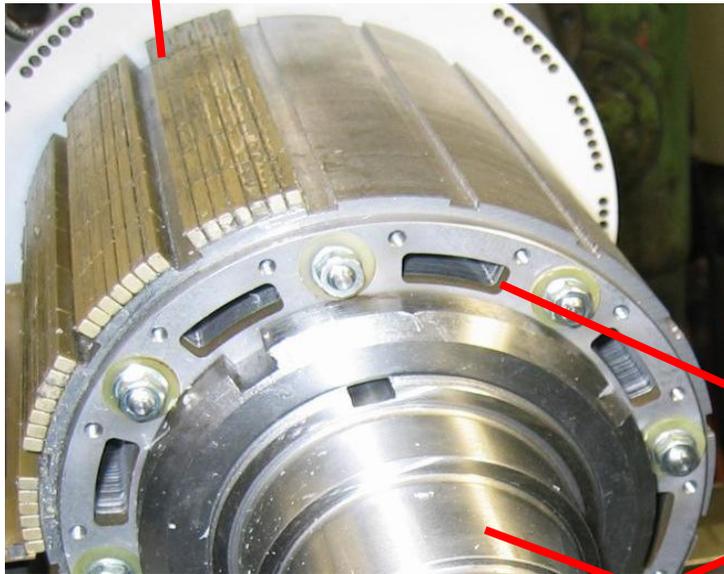
# Umrichter gespeiste Permanentmagnetmotoren für Industrieantriebe

Quelle: TU Darmstadt  
**Kohlefaserbandage**

Permanentmagnete erzeugen  
verlustfrei das Magnetfeld



**Magnete**



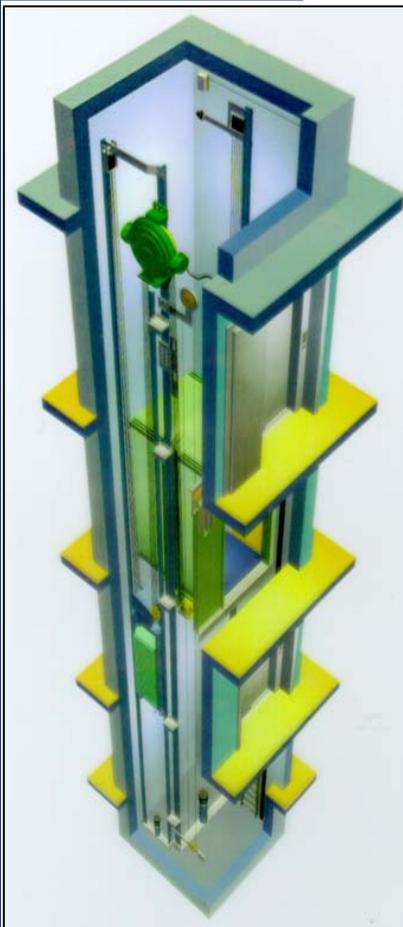
**Welle**



**Rotorblechpaket**

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

# Aufzugdirektantrieb



PM-Scheibenläufer-  
direktantrieb

Quelle: Kone, Finnland  
Institut für Elektrische  
Energiewandlung



PM-Aufzugs-Direktantrieb

Quelle: Siemens

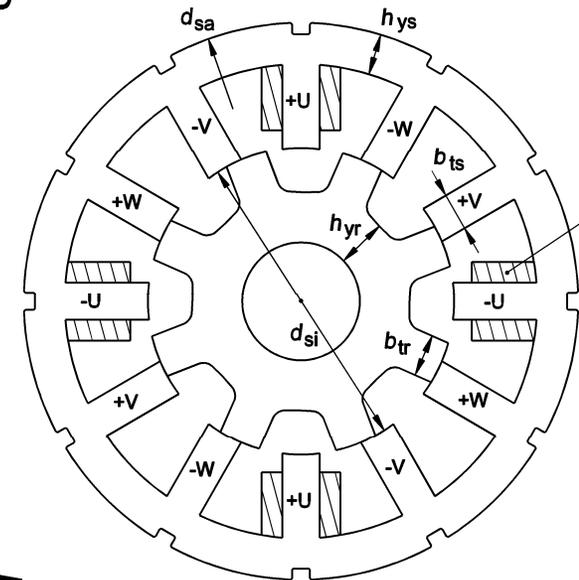
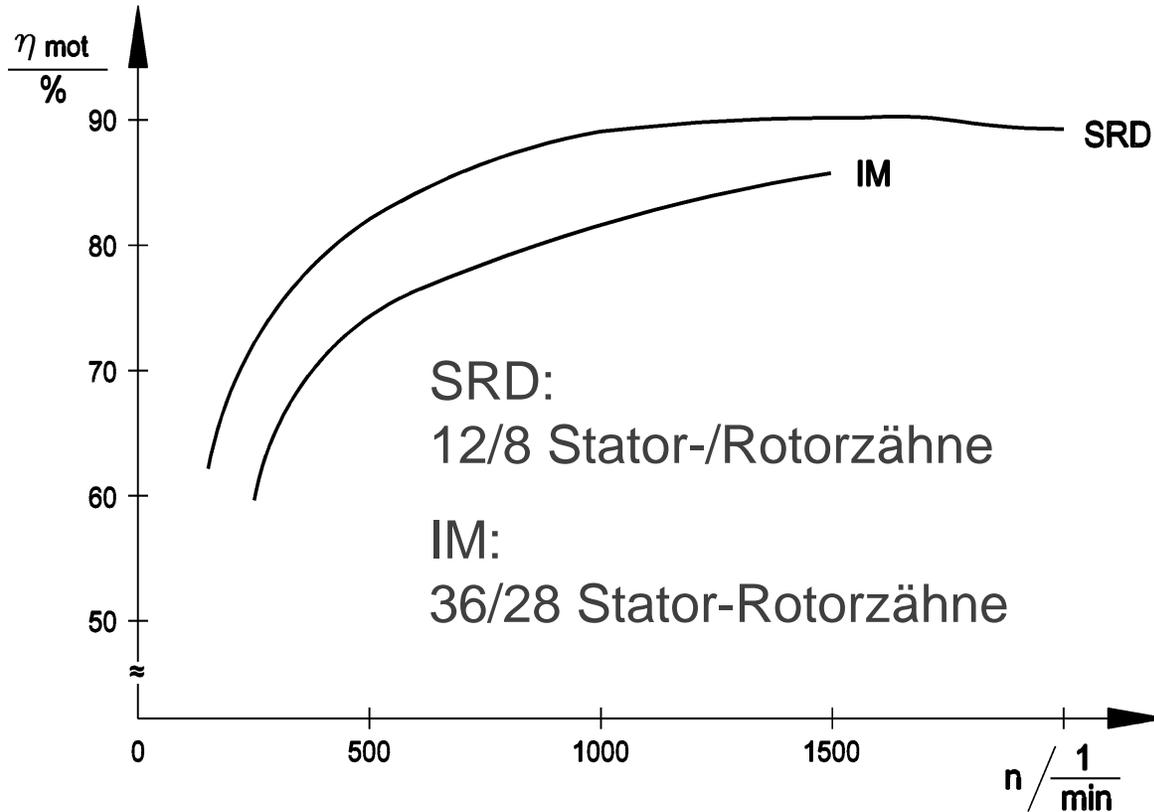
- Wegfall des Maschinenhauses
- **Getriebelose** Antriebe
- Komfort - Antriebe durch stufenlose Drehzahlveränderung
- Verlustarme Ausführung durch Permanentmagnete

# Geschalteter Reluktanzmotor

## Geschalteter Reluktanzmotor: (Switched reluctance machine)

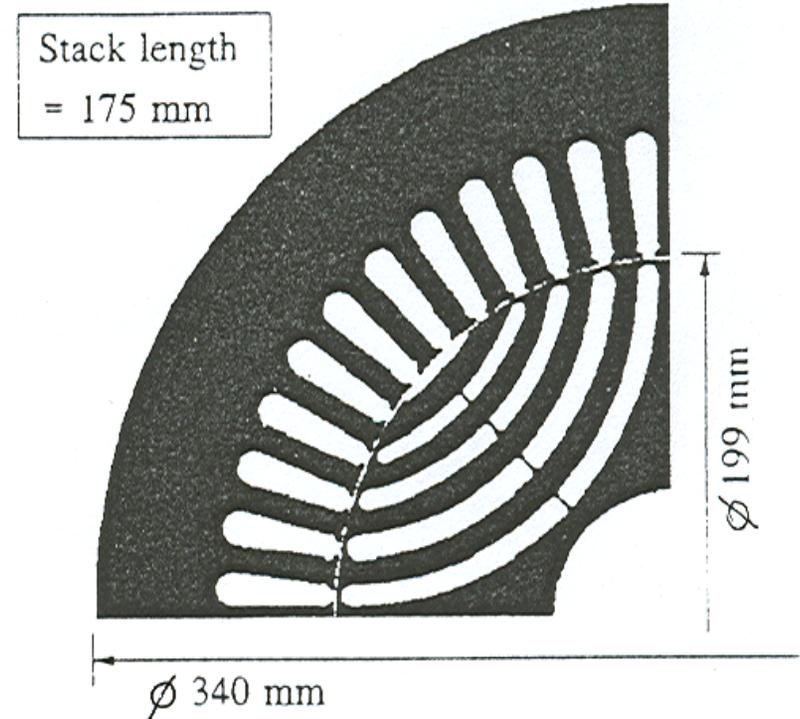
Vergleich mit umrichter gespeistem Norm-Asynchronmotor

- 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



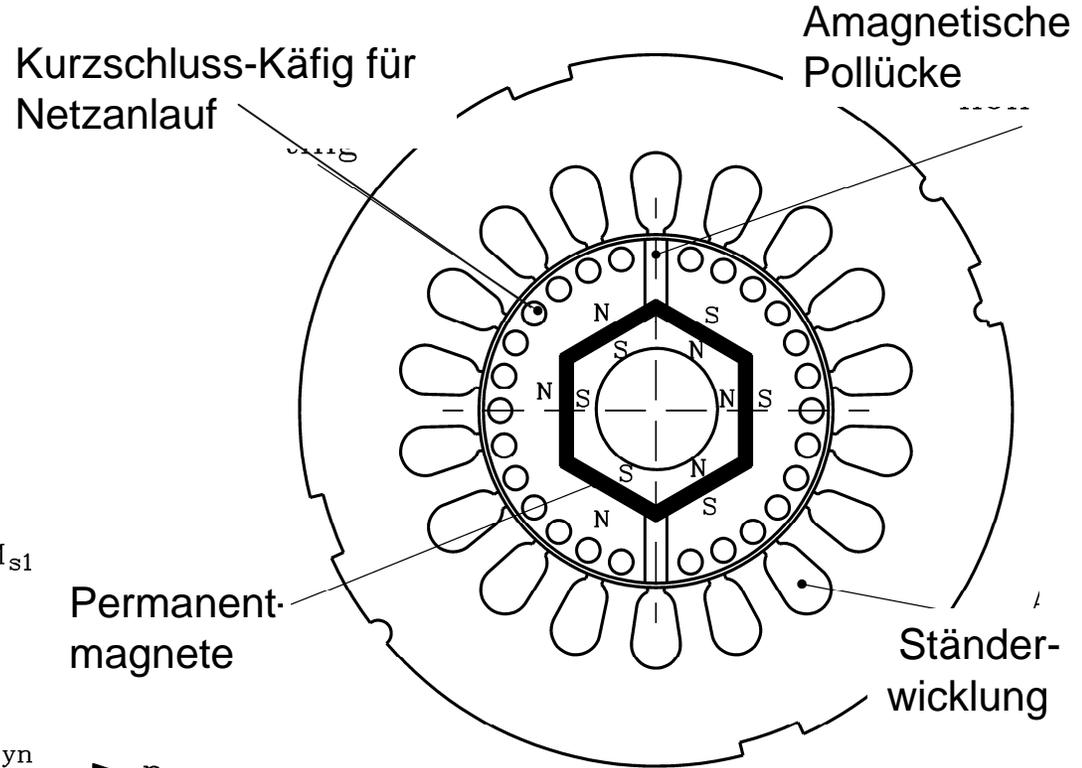
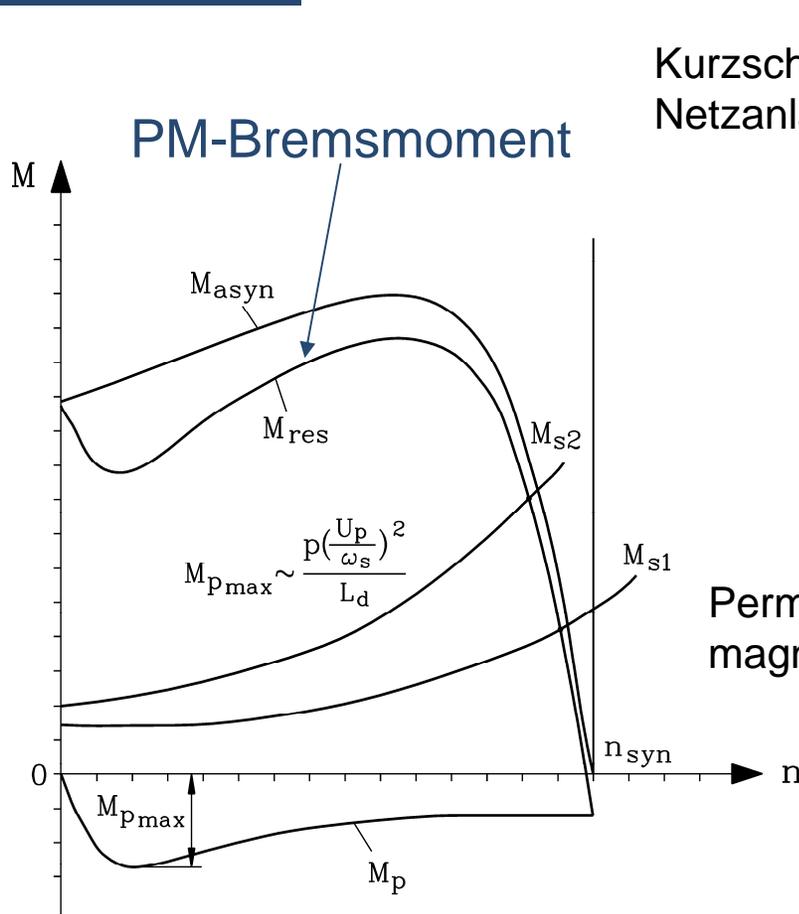
Quelle: Uni. Kapstadt, Südafrika



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-Spannungswiderrichter

Siemens AG



Quelle: Siemens; Deutschland

- Entwicklungsarbeit, PM-Läufer erzeugt Bremsmoment beim Hochlauf

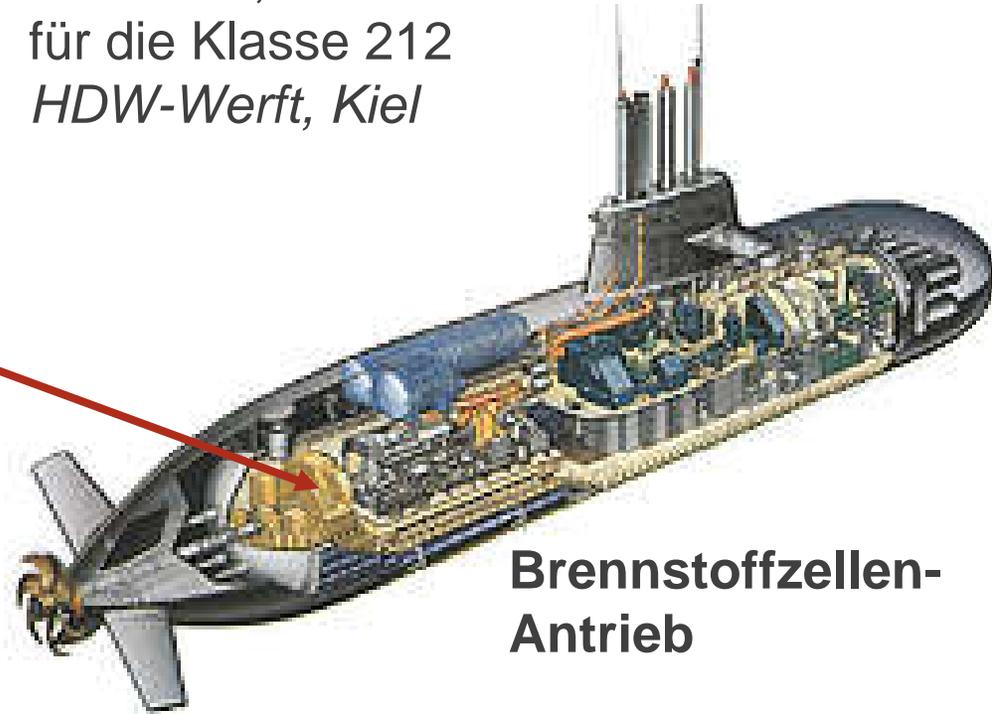
## Energiesparende Schiffsantriebe



Quelle: Siemens, Pictures  
of the Future

## Beispiel: U-Boot-Antrieb

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

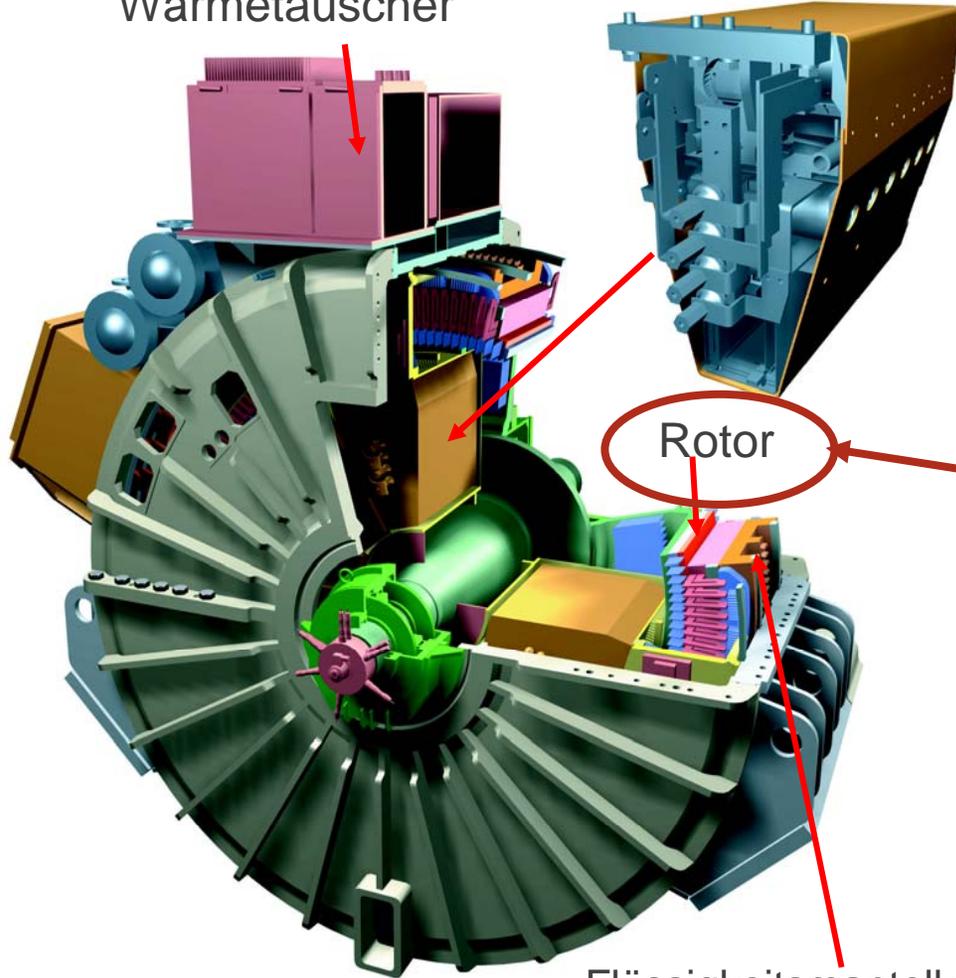


**Brennstoffzellen-  
Antrieb**

Quelle: Siemens AG

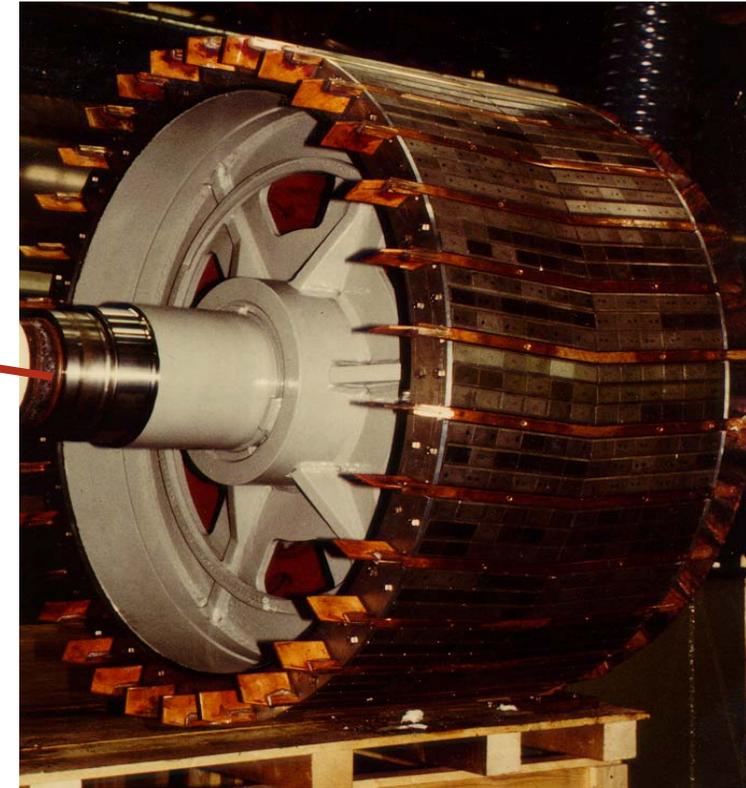
Eingebaute Umrichtermodule

Wärmetauscher



Rotor

Flüssigkeitsmantelkühlung



Quelle: Siemens AG



PM-Pod-Antrieb  
(Drehbare Gondel)

## PM-Antriebe:

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

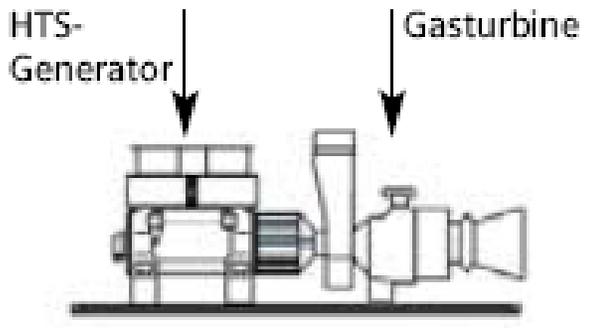
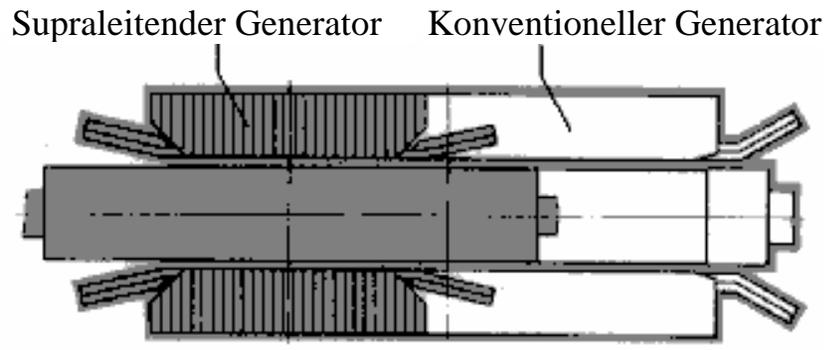
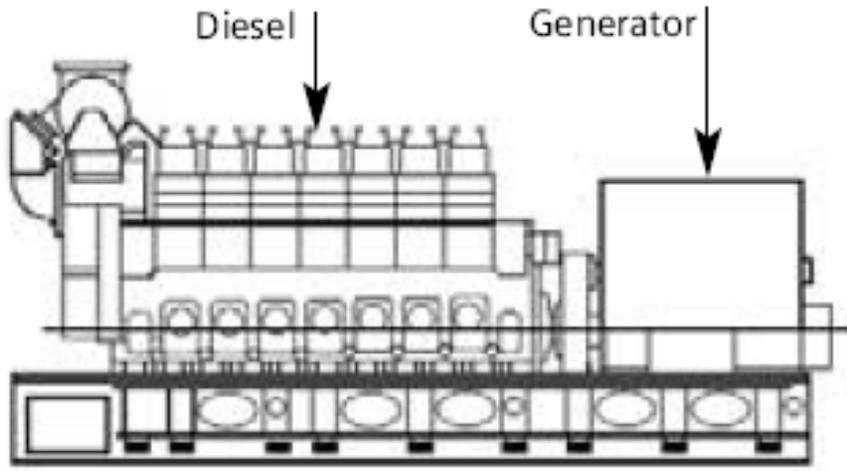


Quelle: Siemens, Pictures  
of the Future

# 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  $-243^{\circ}\text{C}$ , Neon-Kaltgas



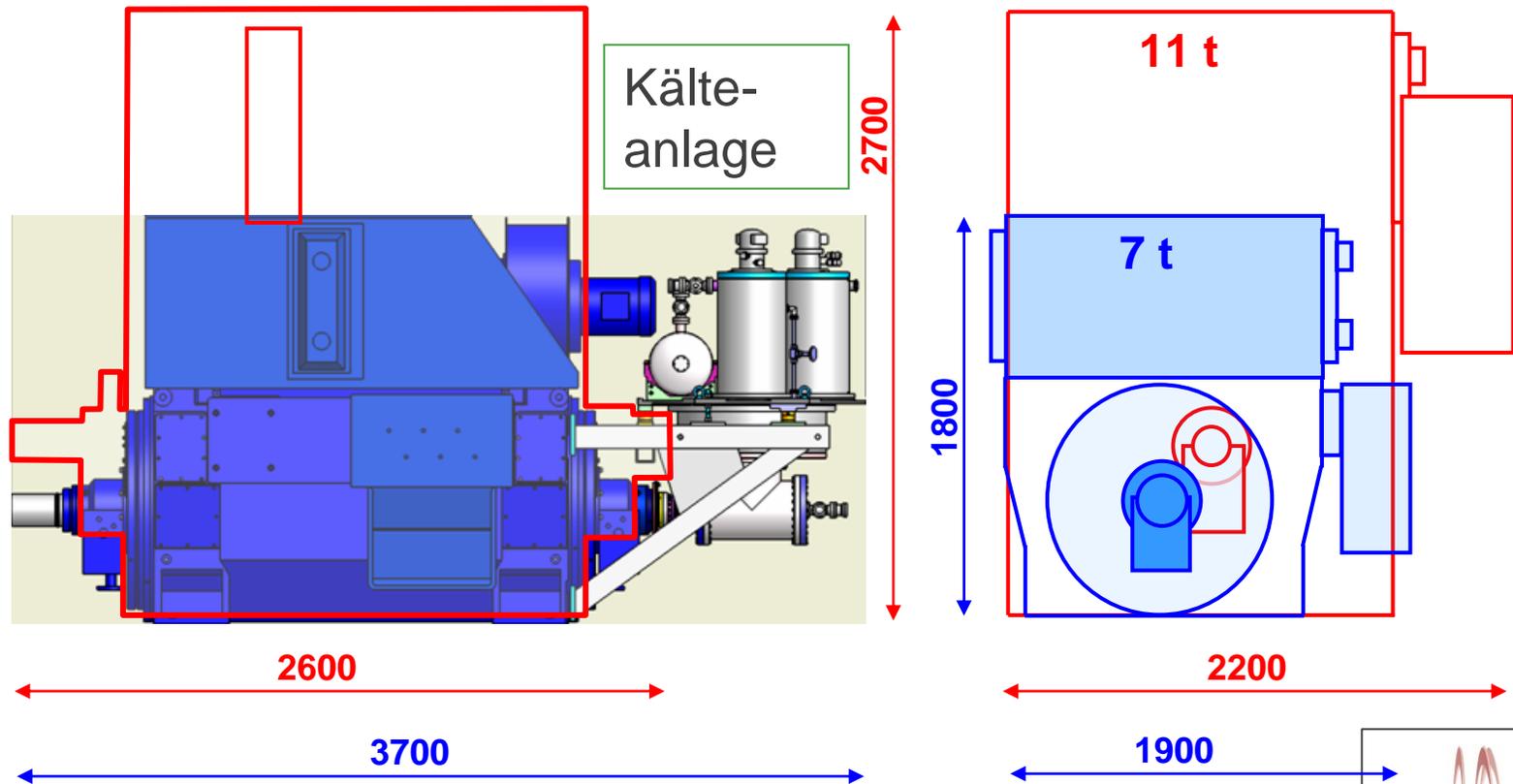
Quelle:  
Siemens AG

# Vergleich des HTSL-Prototyps mit konventionellem Generator

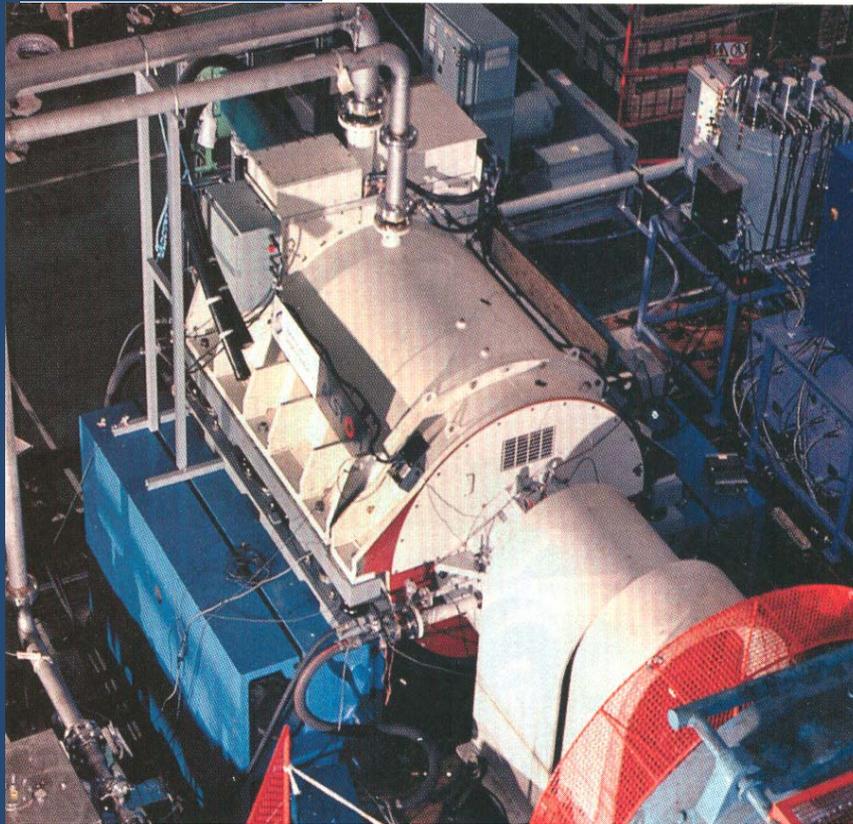
- Geringes Volumen und Gewicht
- Höherer Wirkungsgrad: **98.4% statt 96.1 % =  
= nur 40% der Verluste**

Quelle:  
Siemens AG

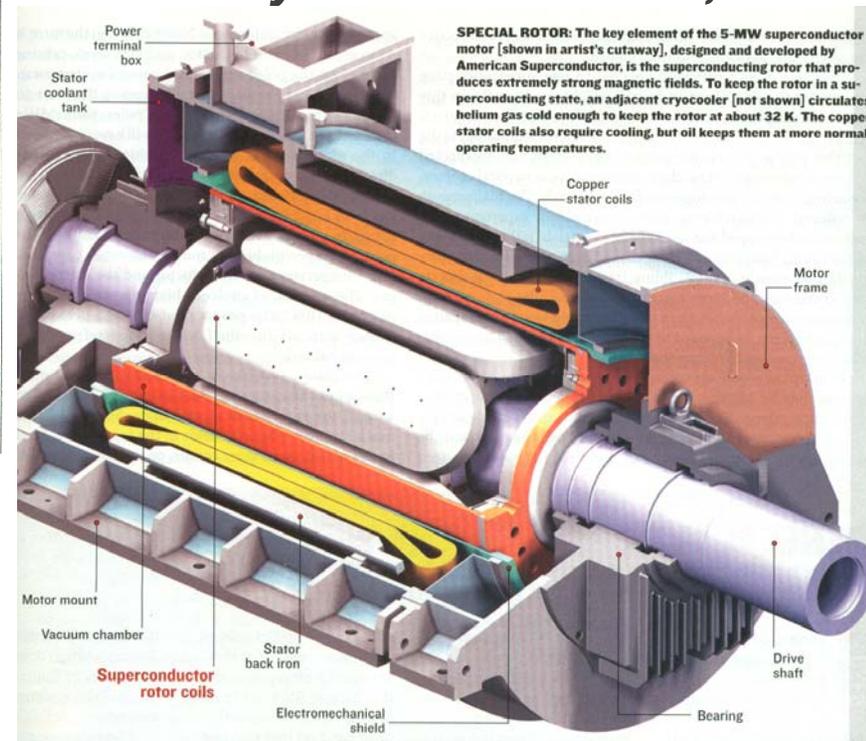
## 4 MVA HTS Generator verglichen mit konventionellem Generator



# 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*

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



Quelle: SVEM,  
Deutschland

- **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**

***Danke für Ihre Aufmerksamkeit!***

**abinder@ew.tu-darmstadt.de**