

Internationaler ETG-Kongress

Energiesparen mit moderner Antriebstechnik – Potentiale und technische Möglichkeiten

Andreas Binder

Institut für Elektrische Energiewandlung

TU Darmstadt

abinder@ew.tu-darmstadt.de

- **Energiepolitischer Hintergrund**
- **Energieeinsparpotentiale in der Antriebstechnik**
- **Ansatzpunkte für Energiesparmaßnahmen**
 - **Werkstoffe**
 - **Industrie-E-Motoren**
 - **Stromrichter**
 - **Antriebssysteme**
 - **Kleinantriebe**
- **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 CO₂-Ausstoß: um 780 Mio. Tonnen p.a.

Sparprogramme in Industrie, Verkehr, Haushalt !

Energie 2004 *Deutschland*

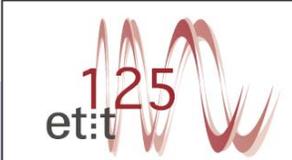
- **Primärenergie: 14 440 PJ (= 100 %)**
 Öl + Gas 59 %, Kohle 25 %, Nuklear 12 %, Regenerativ: 4 %
- **Bereitgestellte Endenergie =**
 = Primärenergie - Umwandlungsverlust Stromerzeugung
9240 PJ (= 64 %)
- **Endenergieverbrauch: 9240 PJ (= 100 %)**

DAVON 20 % ELEKTRISCHE ENERGIE !

Verbraucher:	Haushalt	30%
	Verkehr	28%
	Industrie	26%
	Gewerbe / Handel / Dienstleistungen	} 16 %

Quelle: *BWK 58*
(2006), p.46-51

1 PJ = 1 Peta-Joule = 1 000 000 Milliarden Ws



Elektrische Energie sparen in der Industrie

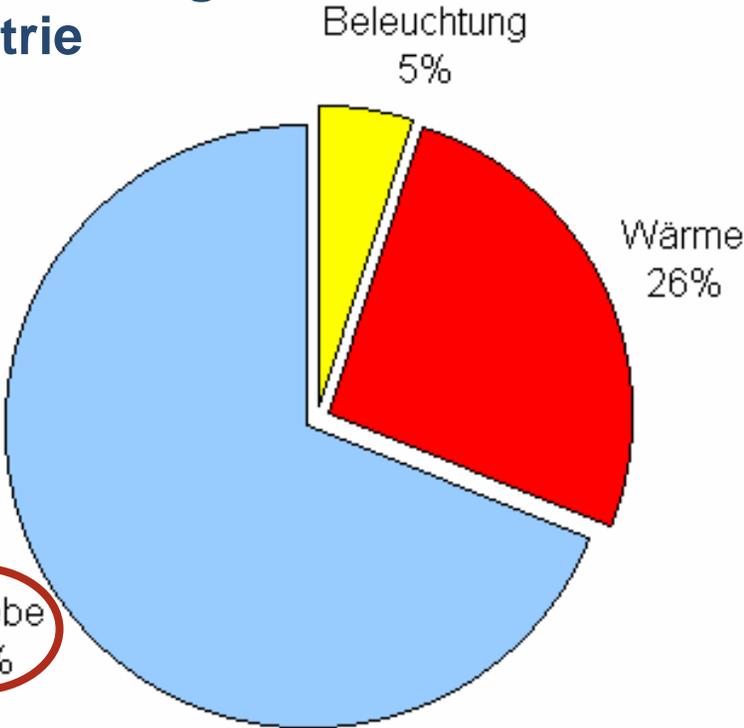
Nutzung der elektrischen Energie in der deutschen Industrie

- 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%

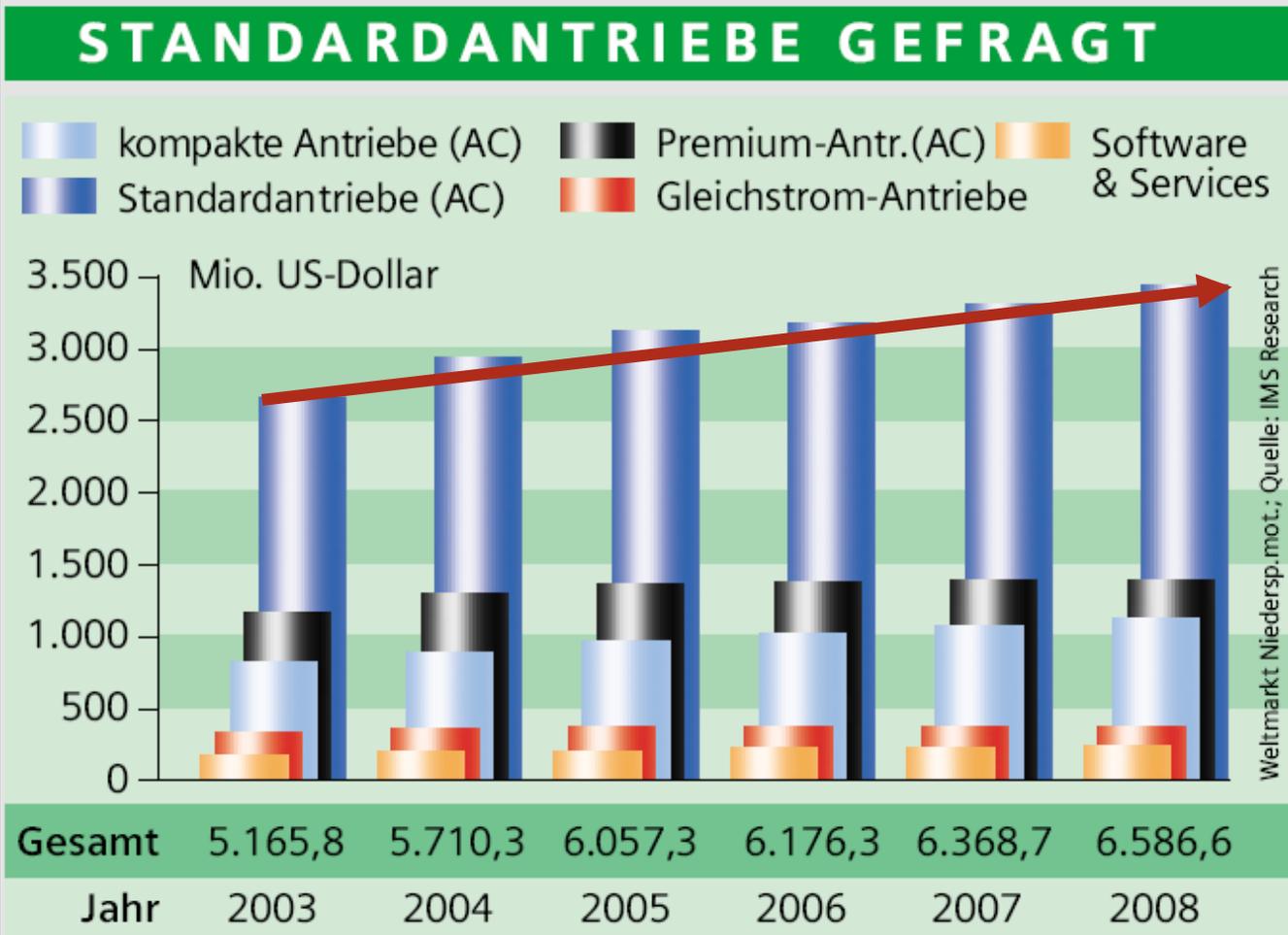


- ### Geforderte CO₂-Minderung EU:
- ca. 10% von 780 Mio. To. = ca. 80 Mio. To.
- Industrieantriebe: 39 Mio. To.
 - Haushalt, Gewerbe, Verkehr: 41 Mio. To.

Quelle: Automatisierungstechnische Praxis, 2002

Marktsituation „Industrieantriebe“

Weltmarktentwicklung AC+DC-Motoren bis 690 V



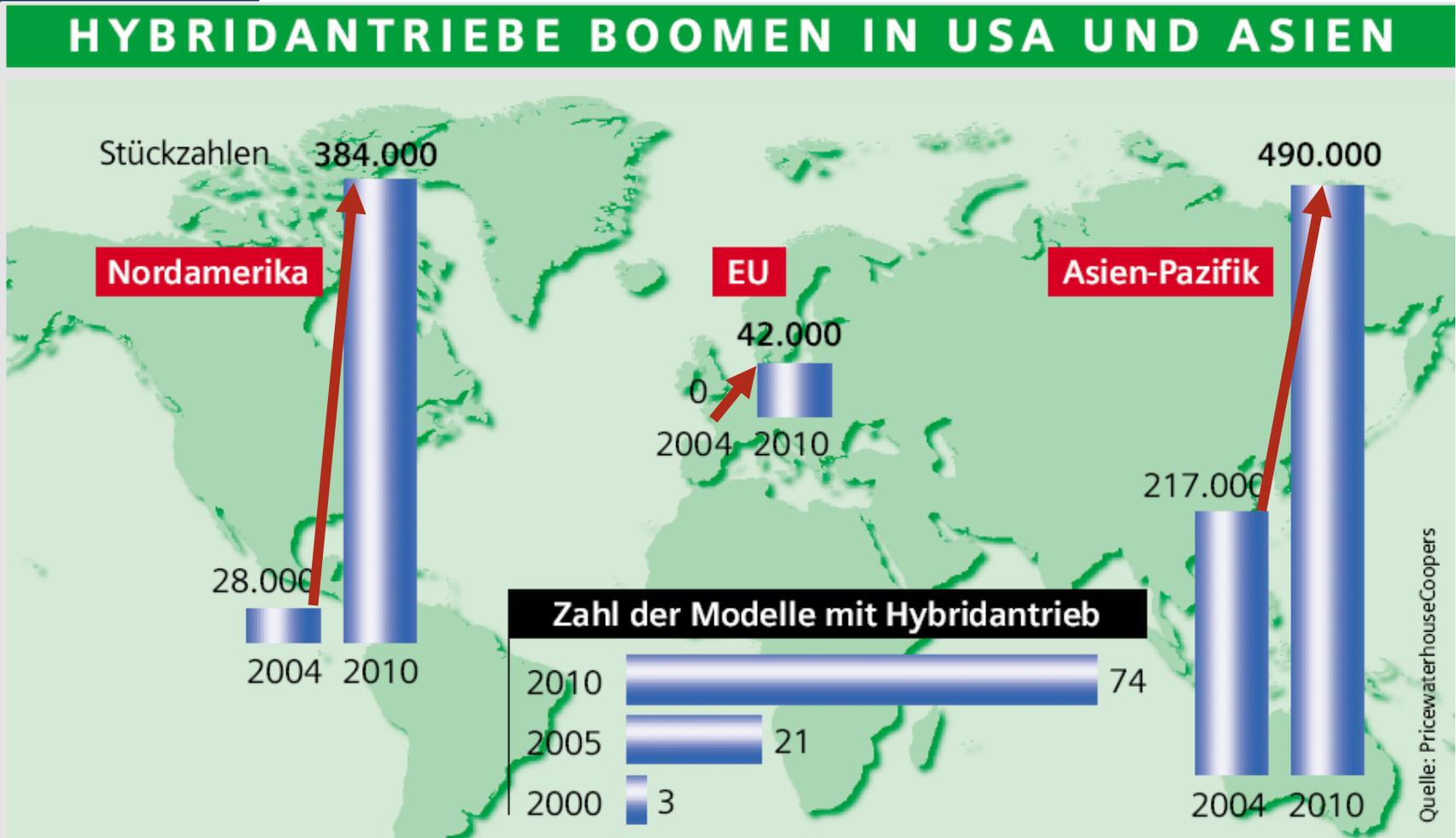
Standard-AC:
Asynchronmot.
25 ... 500 kW

Kompakt-AC:
Asynchronmot.
1 ... 25 kW

Premium-AC:
Hi-performance
Asynchronmot.
PM-Motoren

**Deutschland:
(2005):**
Gesamte Antriebs-
technik (inkl.
Kleinantriebe,
Umrichter)
8.6 Mrd. Euro

Zukunftsmarkt: E-Antriebe für Hybrid-Automobile ?



2004 → **2010**

- **Energiepolitischer Hintergrund**
- **Energieeinsparpotentiale in der Antriebstechnik**
- **Ansatzpunkte für Energiesparmaßnahmen**
 - **Werkstoffe**
 - **Industrie-E-Motoren**
 - **Stromrichter**
 - **Antriebssysteme**
 - **Kleinantriebe**
- **Zukunftsperspektiven - Ausblick**



Quelle: Leroy Somer; France

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

Industrielle Antriebstechnik:

Geschätztes Energieeinsparpotential:

Motorwirkungs-
grad

1.4% ... 3%

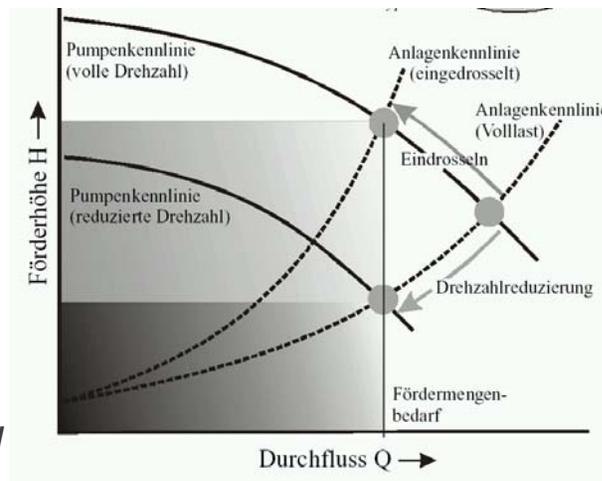


Quelle: Leroy Somer;
France; KSB, Deutschland

Institut für Elektrische
Energiewandlung

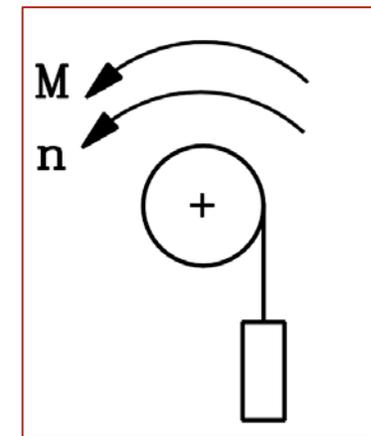
Drehzahl-
anpassung

8 % ... 10%

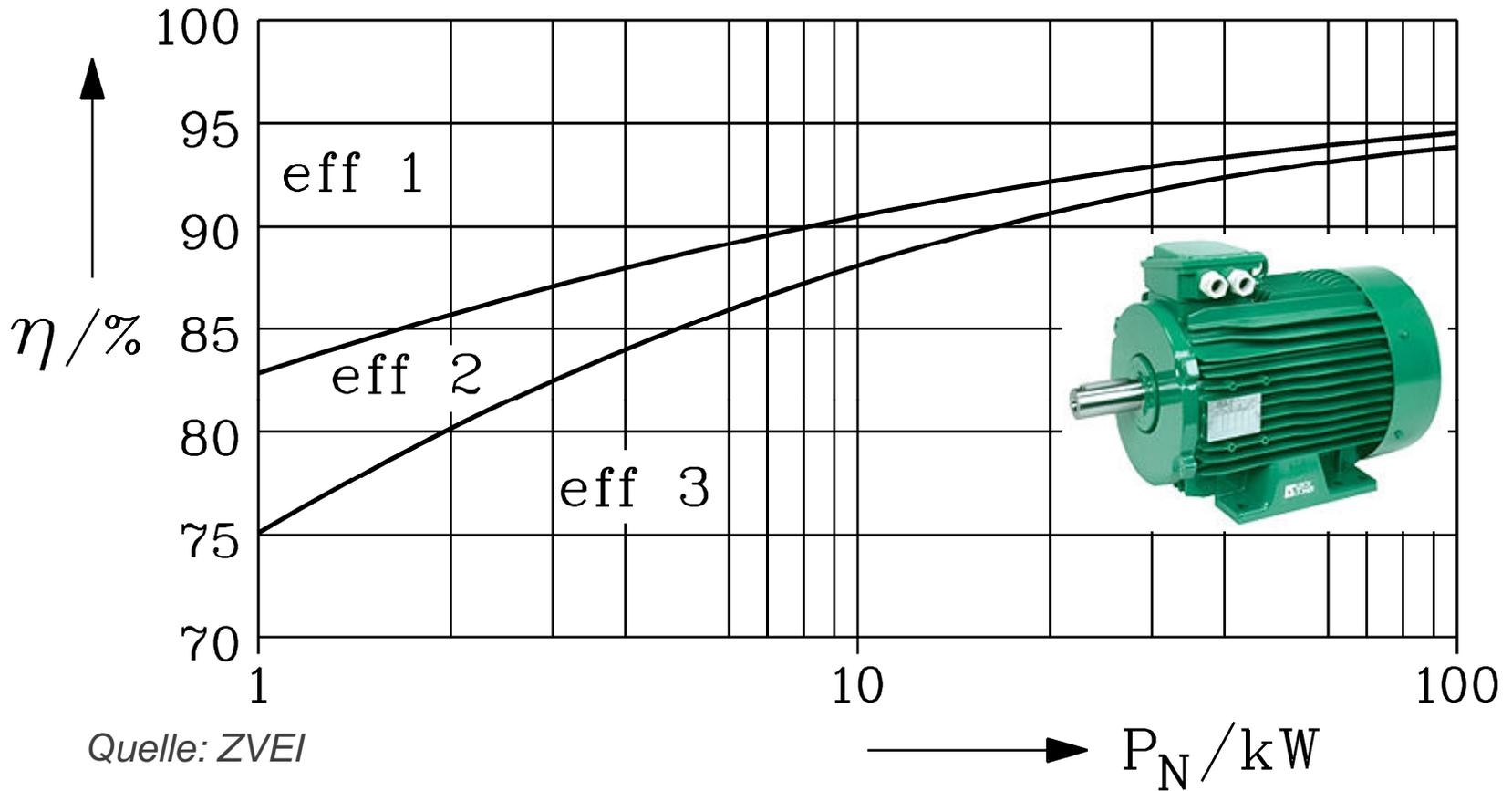


System-
optimierung

15 ... 20 %



Wirkungsgradgesteigerte Norm-Asynchron-Motoren



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

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

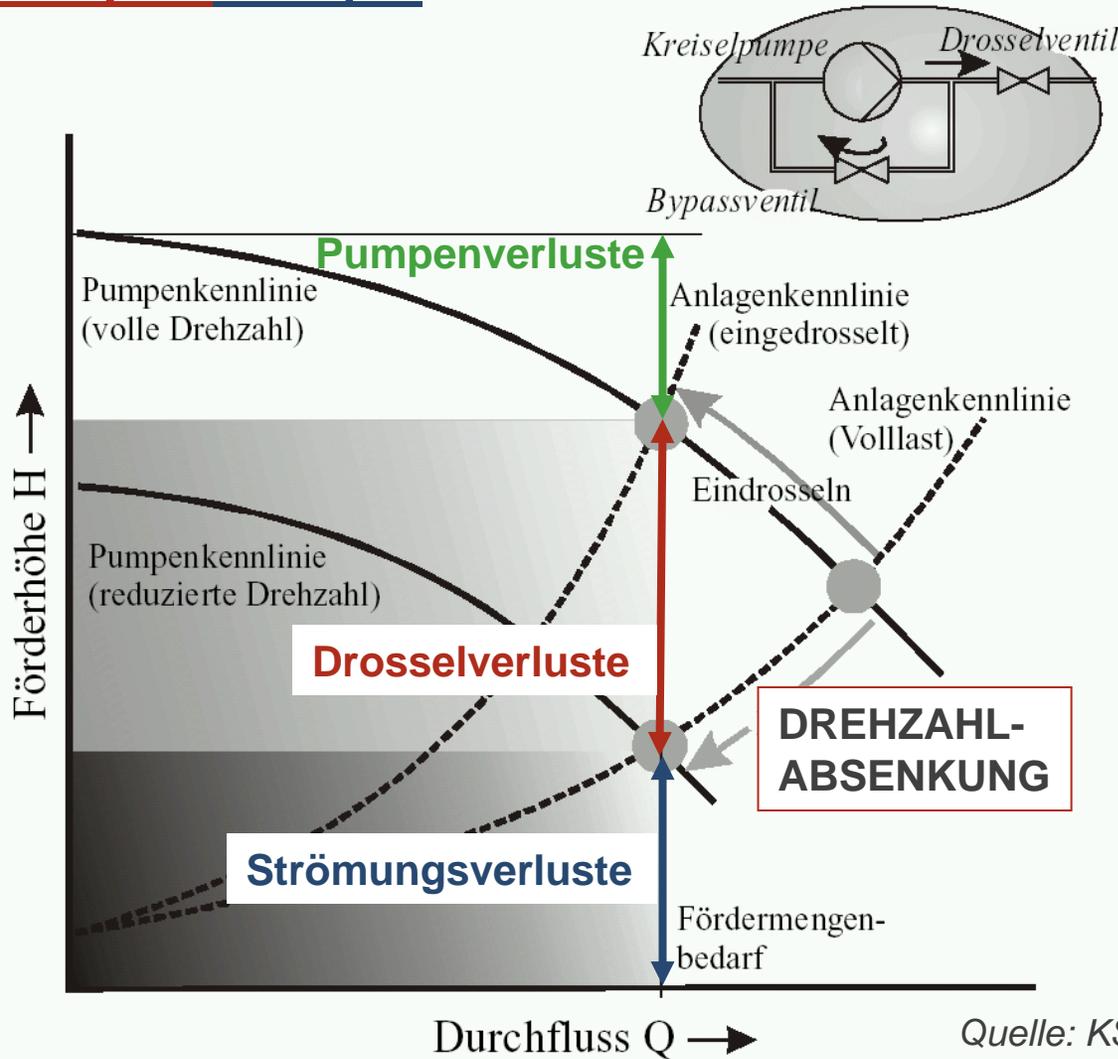
$$4\% \cdot 50\% \cdot 163 \text{ TWh} = 3.3 \text{ TWh}$$

 **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

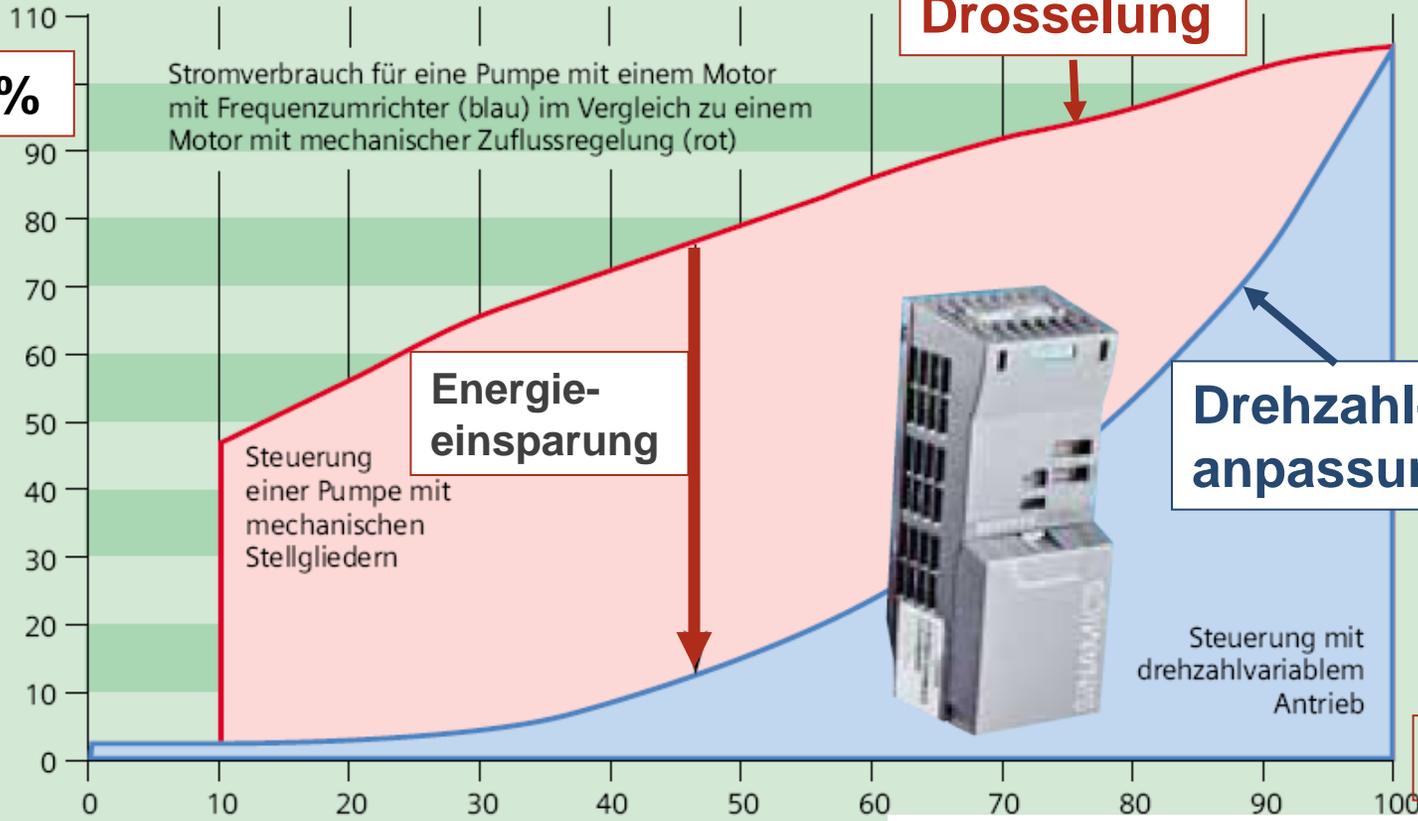
Vermeidung der Drosselverluste: Bis zu 60% Energieeinsparung !

Quelle: KSB, Frankenthal

FREQUENZ-UMRICHTER HELFEN STROM SPAREN

Stromverbrauch (%)

100%



Drosselung

Energieeinsparung

Drehzahlanpassung



100%

Durchflussmenge (%)

Quelle: Siemens AG

Dimensionierung durch Sicherheitszuschläge:

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

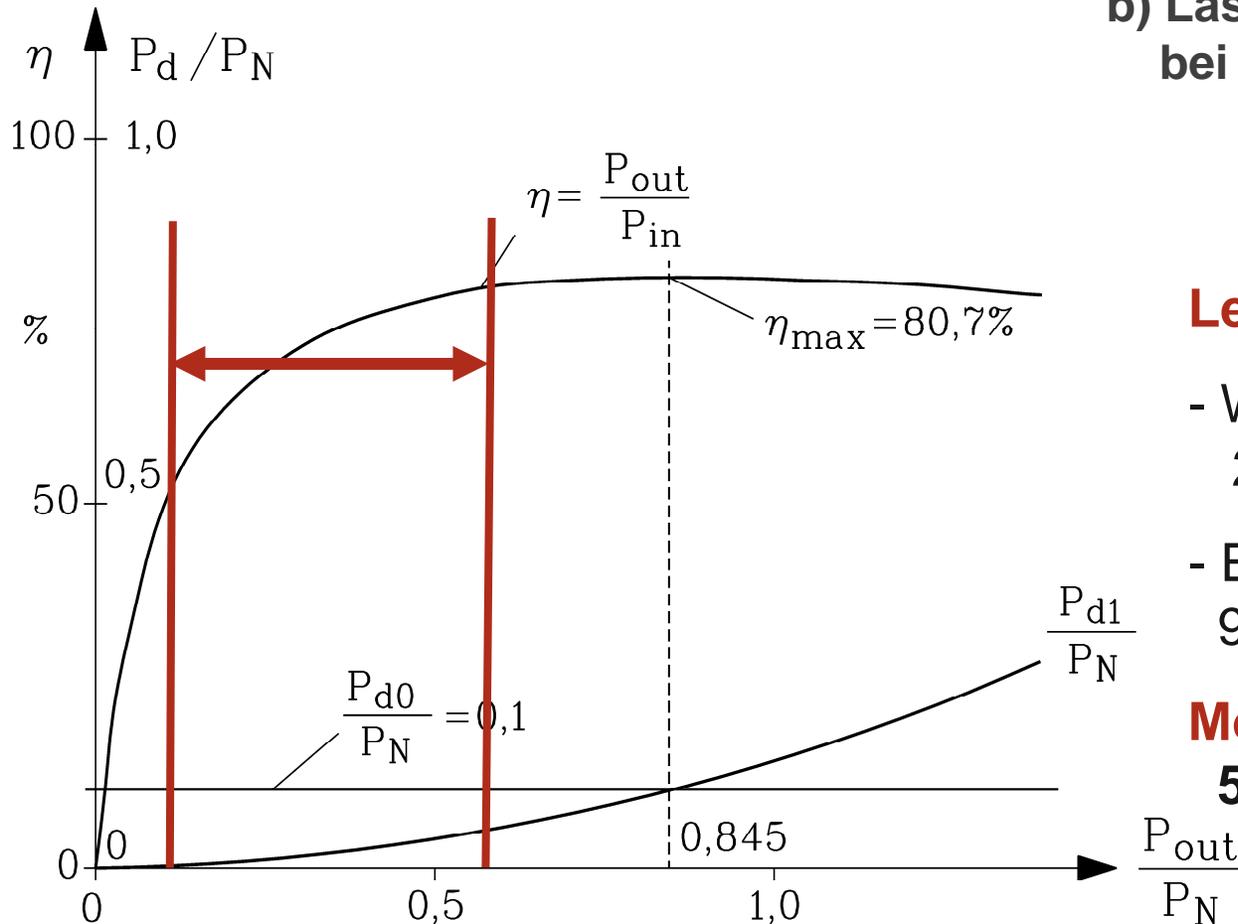
Motor um 72 % überdimensioniert: $1.2 \cdot 1.2 \cdot 1.2 = 1.73$



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

- **Energiepolitischer Hintergrund**
- **Energieeinsparpotentiale in der Antriebstechnik**
- **Ansatzpunkte für Energiesparmaßnahmen**
 - **Werkstoffe**
 - **Industrie-E-Motoren**
 - **Stromrichter**
 - **Antriebssysteme**
 - **Kleinantriebe**
- **Zukunftsperspektiven - Ausblick**

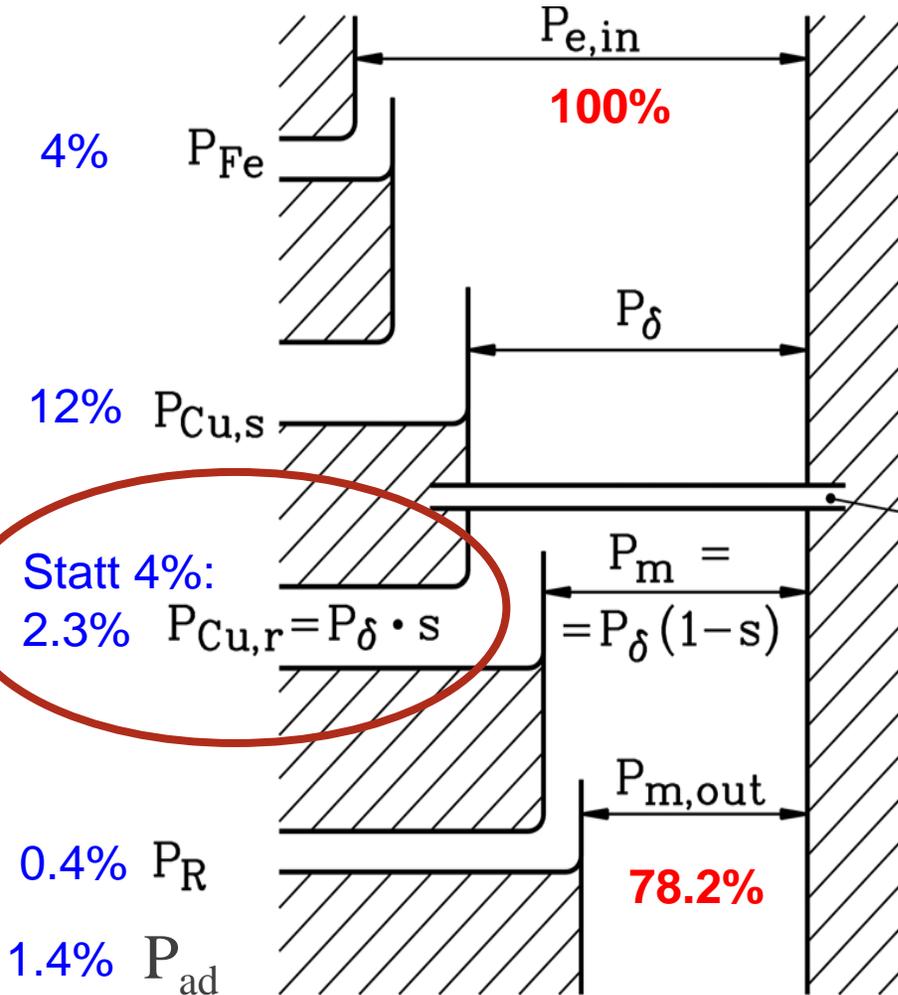


Quelle: SEW-Eurodrive, Deutschland

- **Werkstoffe** für energiesparende Antriebssysteme
 - „Kupfer – Eisen – Magnete – Isolierstoffe“
für **E-Motoren**
 - Silizium versus Siliziumkarbid für **Umrichter-Schaltelemente**
 - Aufbautechnik der Schaltelemente – bessere **Entwärmung / Kühlung**
 - Werkstoffe für verlustarme **Getriebe** (hier nicht behandelt)

Kupferguss bei Norm-Asynchronmotoren – Premium efficiency

Verluststruktur:



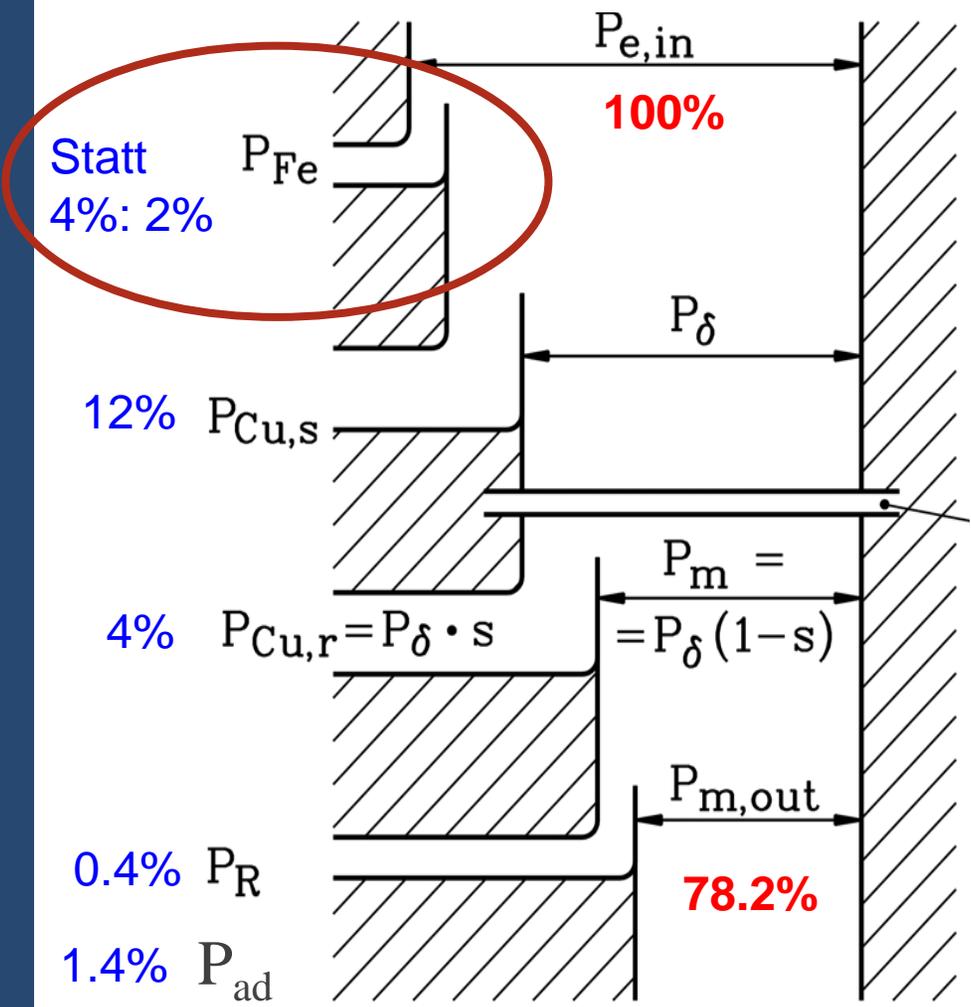
Verlustarmer Läuferkäfig:

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



Verlustarmes Dynamoblech

Verluststruktur:

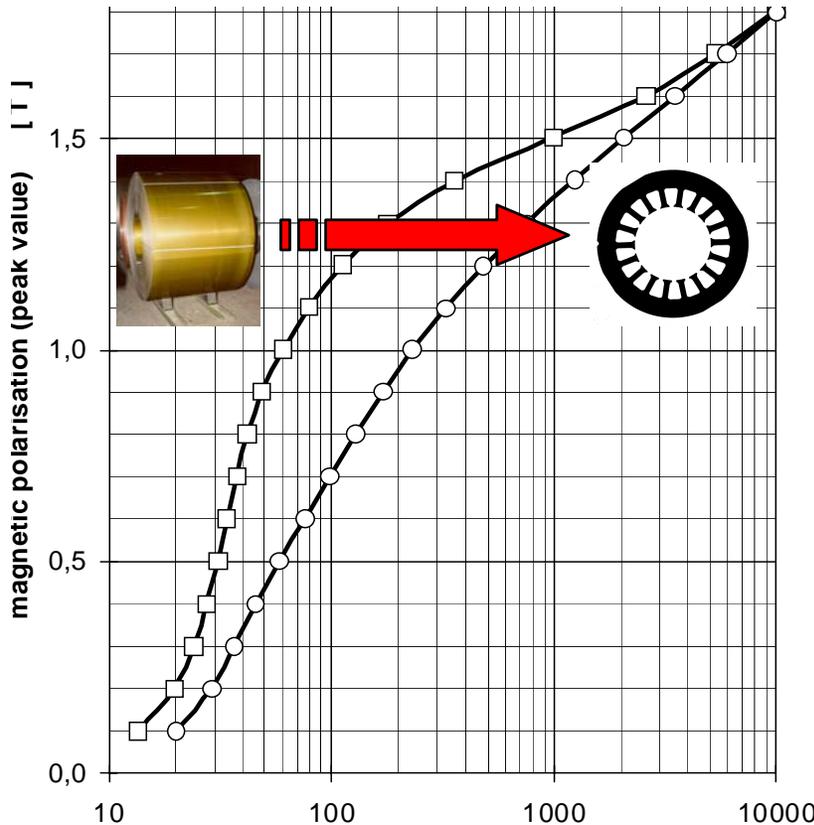


Verlustarmes Dynamoblech –

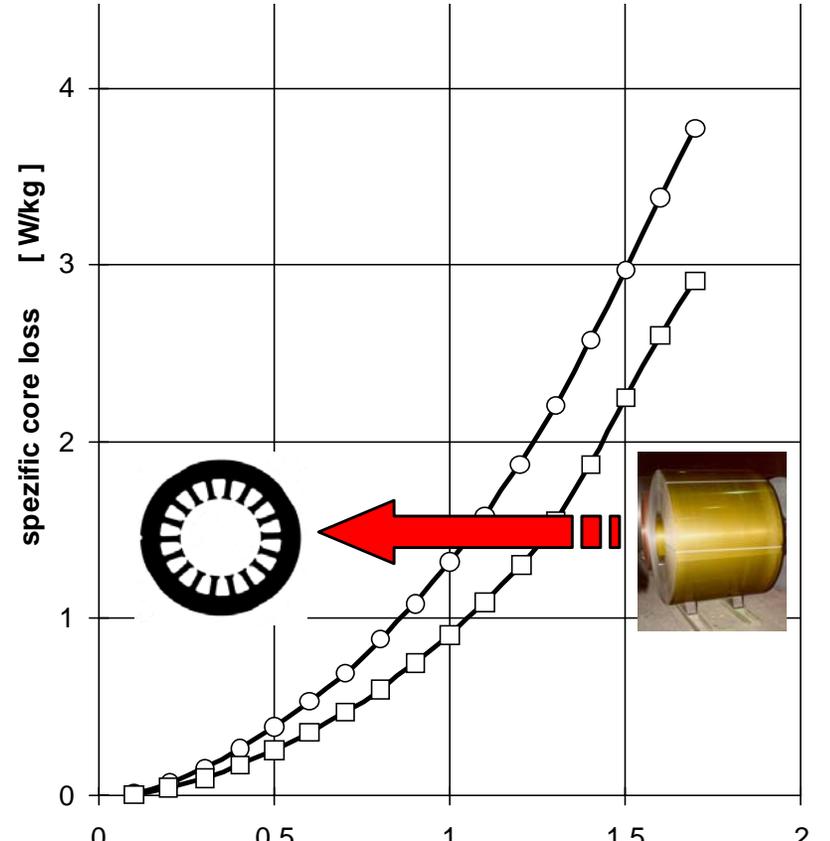
- Senkung der Ummagnetisierungsverluste P_{Fe} !
- Si-Beigabe erhöht den ele. Widerstand – senkt die Wirbelstromverluste: ABER: verringert aber die Magnetisierbarkeit !
- Magnetisierungsstrom und damit $P_{Cu,s}$ steigen !
- Daher: Entwicklung von höher magnetisierbaren Blechsorten !

Verarbeitungseinfluss auf die Eigenschaften des Dynamoblechs

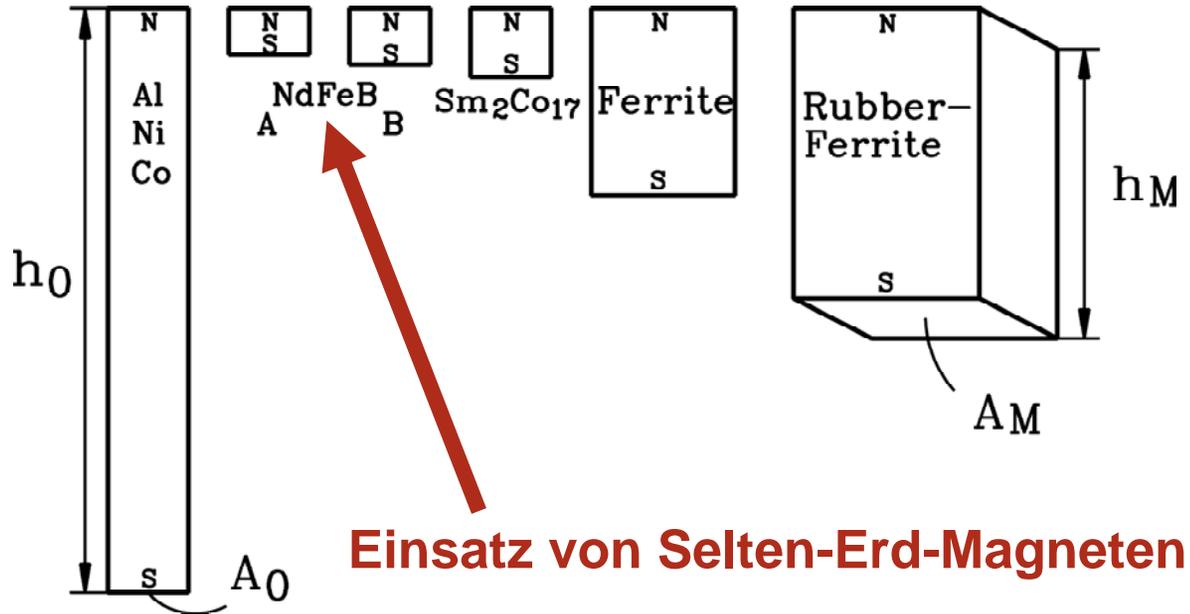
Magnetische Polarisation J [T]



Verlustdichte p [W/kg]



Quelle: Schoppa, RWTH Aachen, 2001

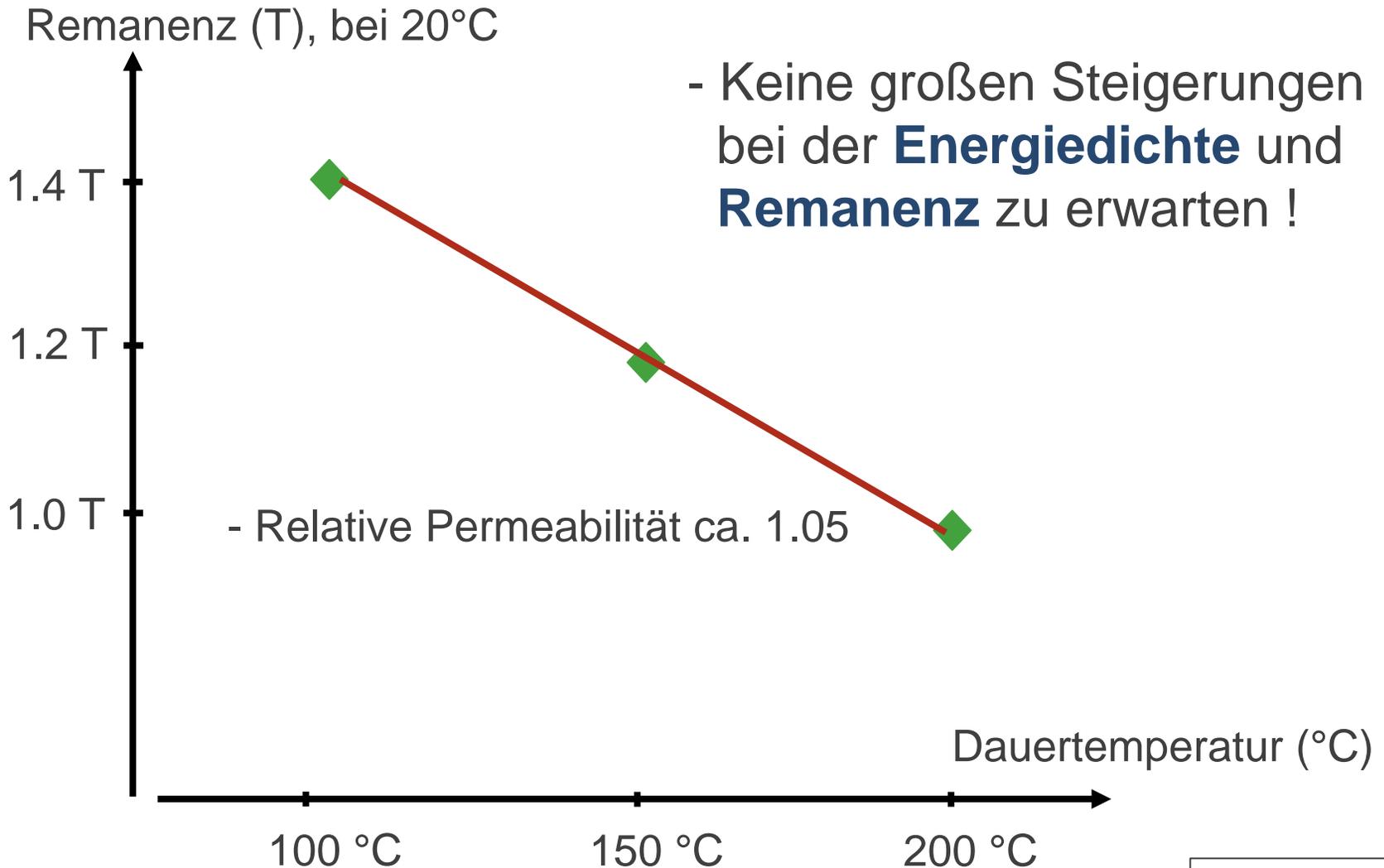


Benötigtes Magnetvolumen für

- gleichen Magnetfluss
- gleiche Entmagnetisierfestigkeit

Höchste Energiedichte bei Neodymium-Eisen-Bor-Magneten

Typische Grenzen für NdFeB-Magnete



- **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 !

- **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

- 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.

- **Energiepolitischer Hintergrund**
- **Energieeinsparpotentiale in der Antriebstechnik**
- **Ansatzpunkte für Energiesparmaßnahmen**
 - **Werkstoffe**
 - **Industrie-E-Motoren**
 - **Stromrichter**
 - **Antriebssysteme**
 - **Kleinantriebe**
- **Zukunftsperspektiven - Ausblick**



Quelle: Siemens, Deutschland

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

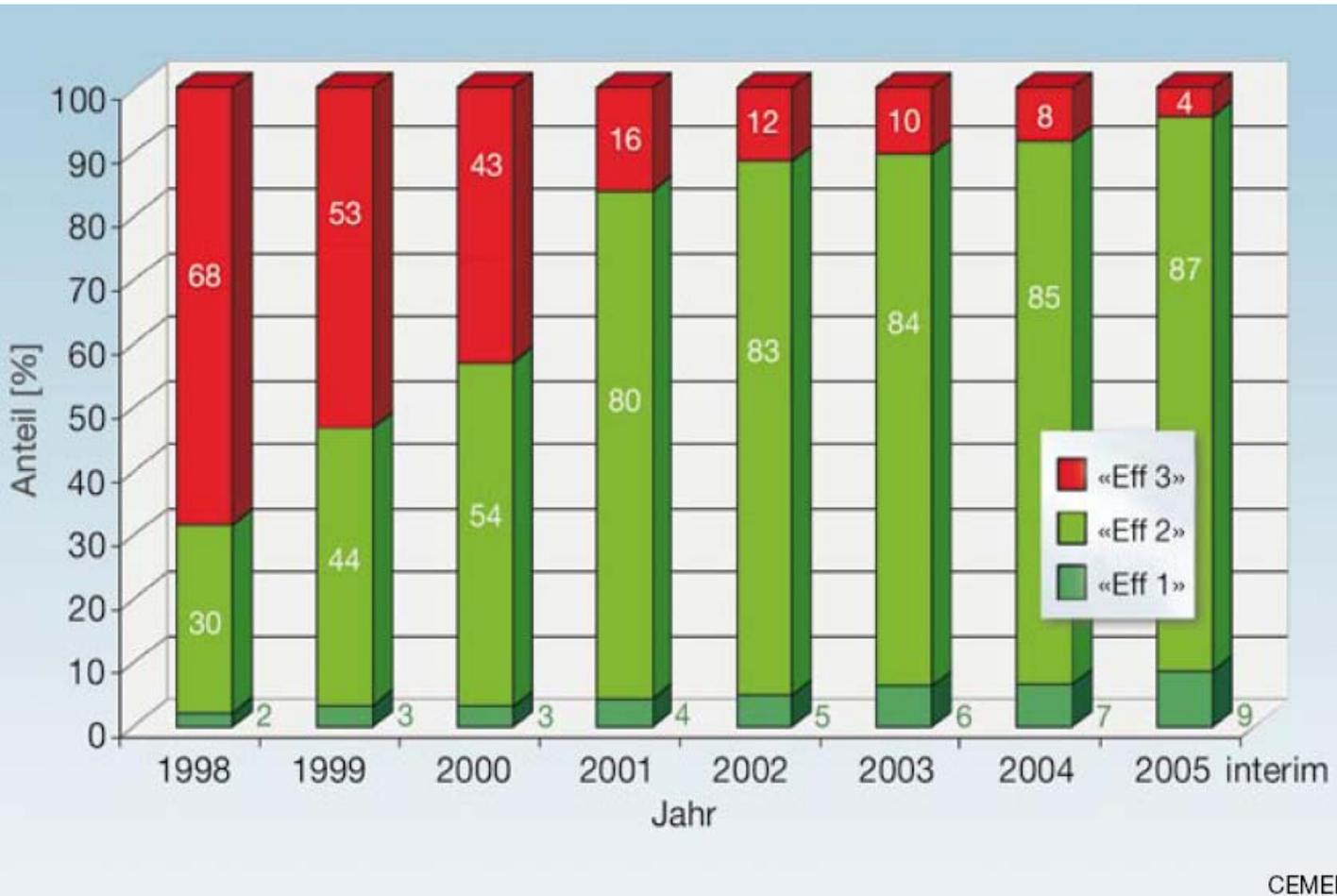
Amortisationszeit: $185 / 95.4 = 1.9 = \text{ca. } 2$ Jahre

Quelle: SEV Bulletin, 2005



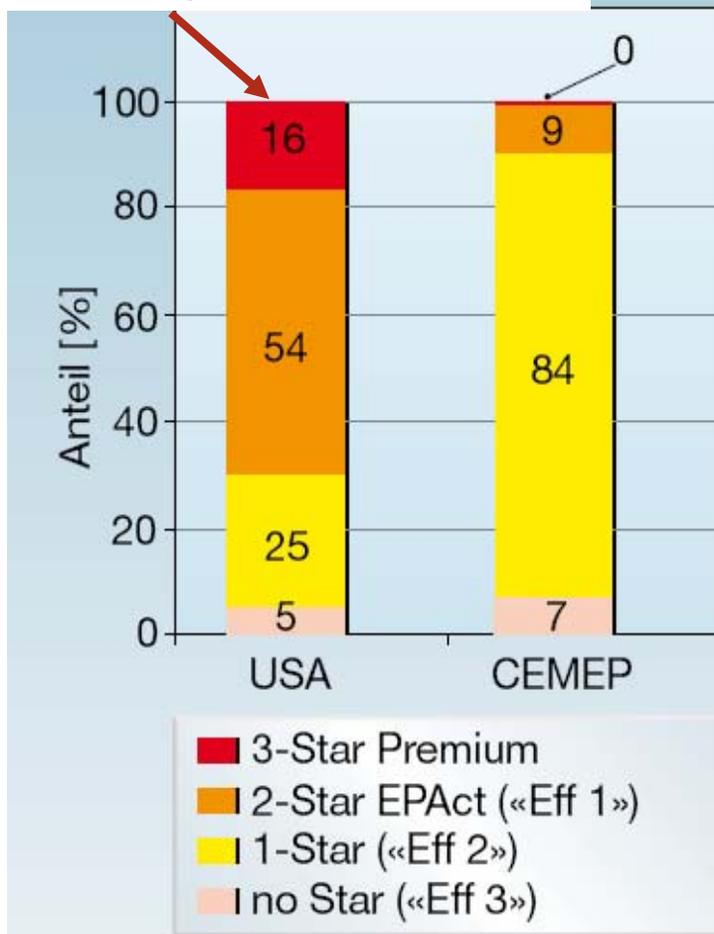
CEMEP: Marktentwicklung Standardmotoren

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



Quelle: SEV
Bulletin, 2005

3-star Premium:
ca. 20% geschätzt für 2007



Europa 2005:
(CEMEP)

2- und 4-polige
Normasynchronmotoren
ca. 1 ... 100 kW

USA 2004:

2- und 4-polige
Normasynchronmotoren
ca. 0.7 ... 200 kW

Quelle: SEV Bulletin, 2007

SEEM

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



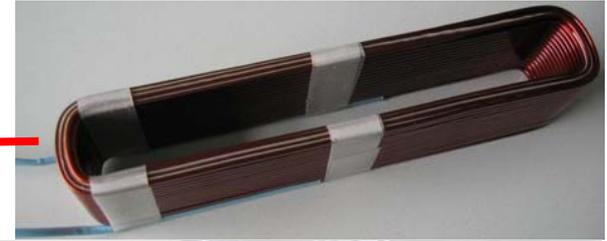
Zahnspulenwicklung für Permanentmagnetmotoren

Quelle: TU Darmstadt

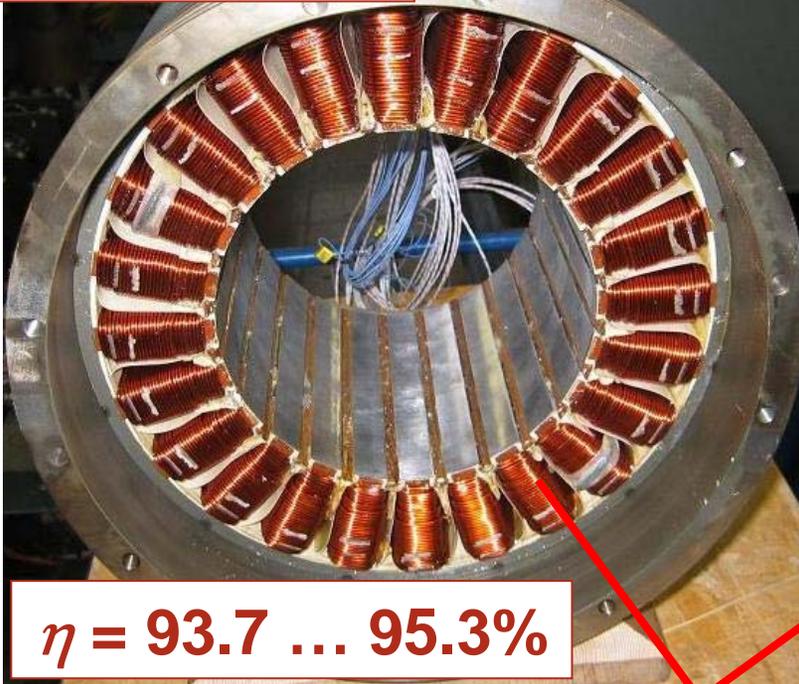
**Kompakte Stator-Kupfer-Wicklung –
geringere Stromwärmeverluste**

Kühlmantel

Zahnspule

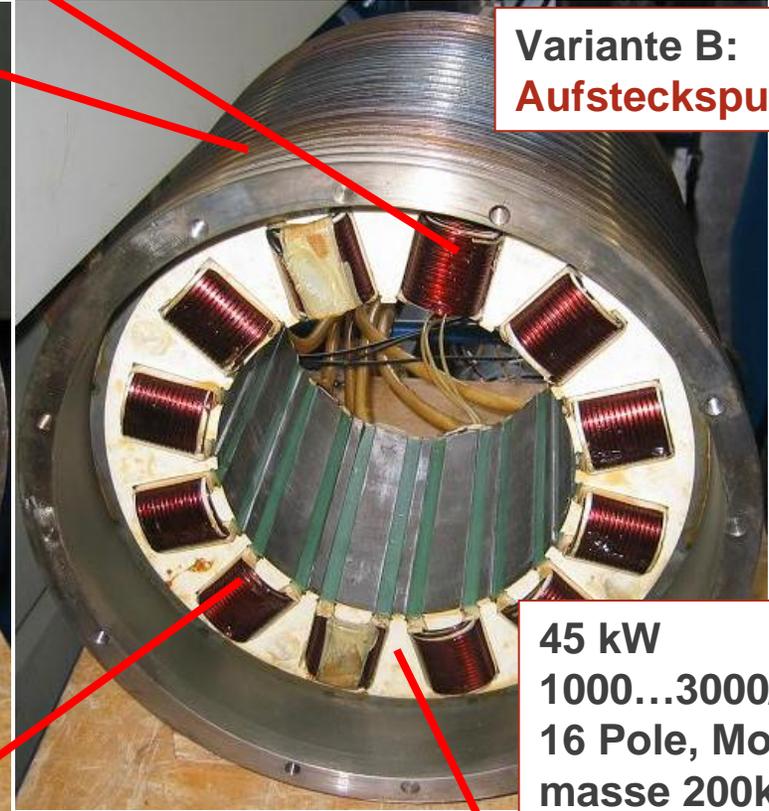


**Variante A: Rund-
drahtnadelwicklung**



$\eta = 93.7 \dots 95.3\%$

**Variante B:
Aufsteckspulen**



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

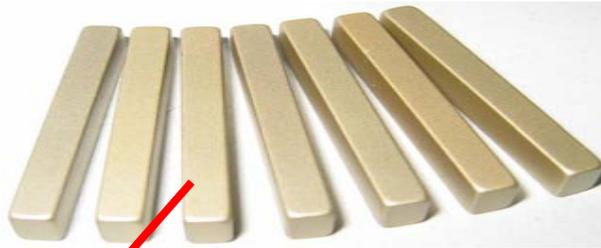
Stator-Wicklung

Blechpaket

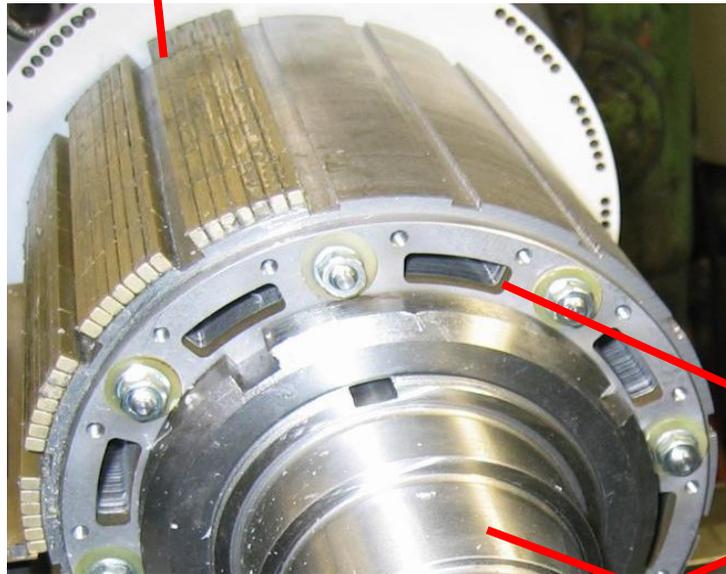
Umrichter gespeiste Permanentmagnetmotoren für Industrieantriebe

Quelle: TU Darmstadt

Permanentmagnete erzeugen verlustfrei das Magnetfeld



Magnete



Welle

Kohlefaserbandage



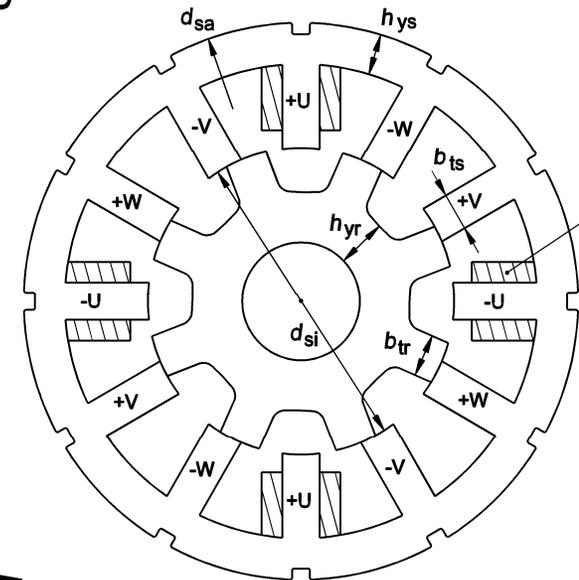
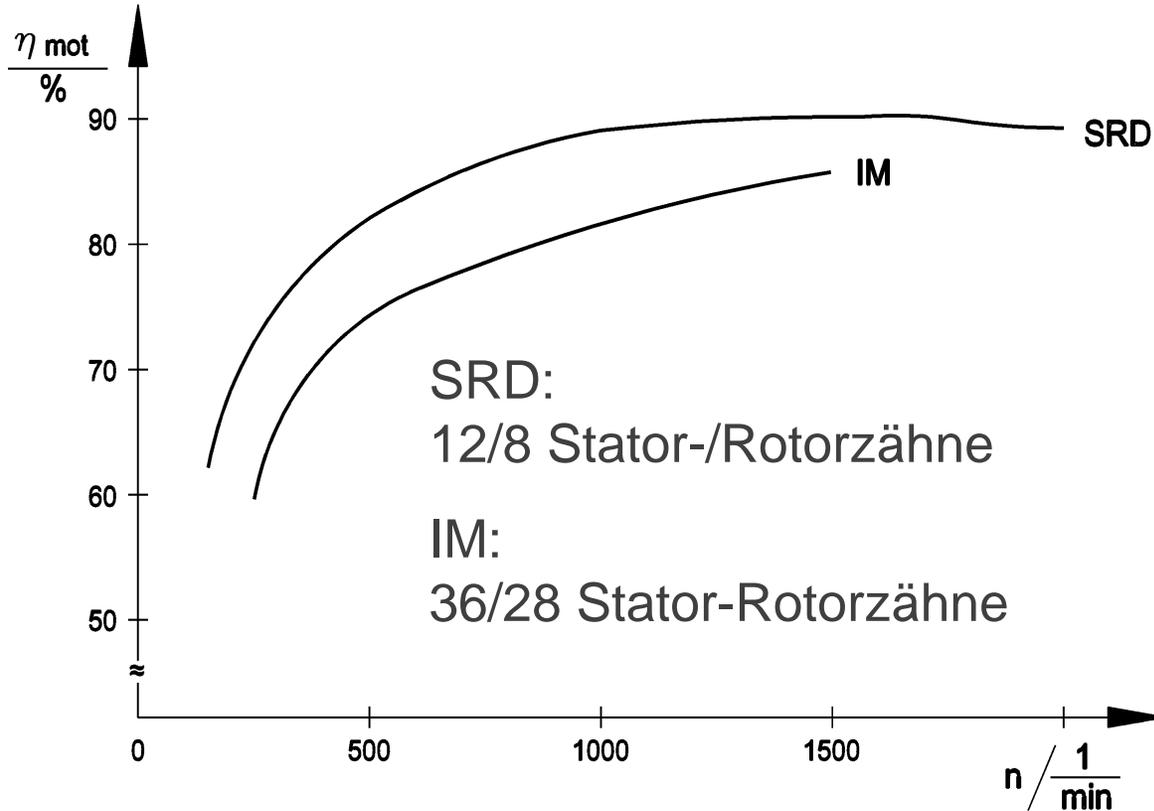
45 kW
1000...3000/min
16-polig, 200 kg

Rotorblechpaket

Geschalteter Reluktanzmotor

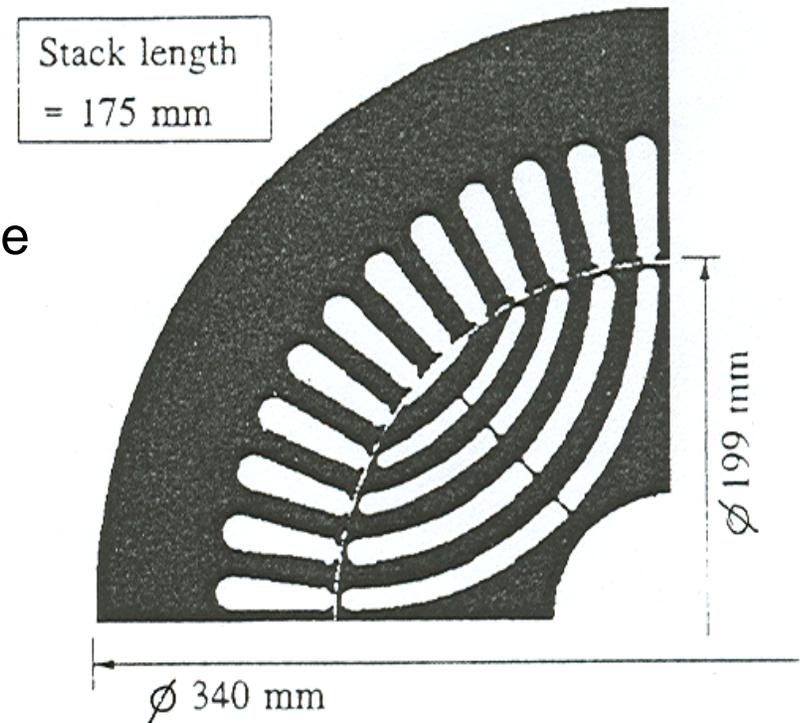
Geschalteter Reluktanzmotor: (Switched reluctance machine SRD)

Vergleich mit umrichter gespeistem Norm-Asynchronmotor (IM)
- beide vierpolig, 3-phasig: 54 Nm, 100 K Wicklungserwärmung



Synchrone Reluktanzmotoren mit Umrichterspeisung

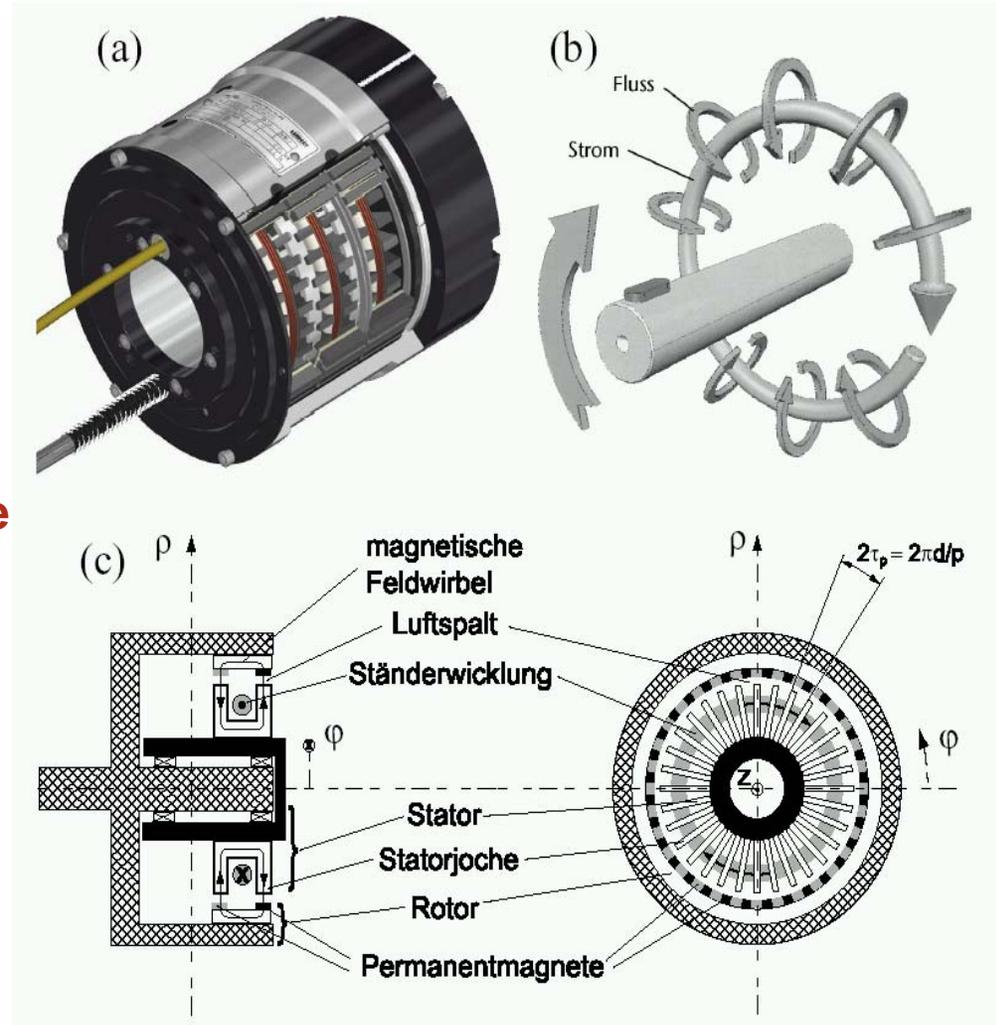
- Dank hoher Reluktanz-
unterschiede 1:10 gleiches
Leistungs-Volumen-Verhältnis wie
Asynchronmaschine
- Höherer Wirkungsgrad, da
keine Läuferverluste
- Leistungsfaktor mit 0.7 ... 0.8
etwas niedriger als bei
Asynchronmaschinen
- Kommerziell verfügbar



Quelle: M. Kamper, Südafrika

Transversalflussmaschinen

- Flussführung **quer** zur Bewegung
- Strom- u. Magnetpfad **entkoppelt**
- Kurze Ringspulen = **geringe** Stromwärmeverluste
- **hochpolig**, daher Langsamläufer
- Bei höheren Drehzahlen **hohe** Zusatzverluste !



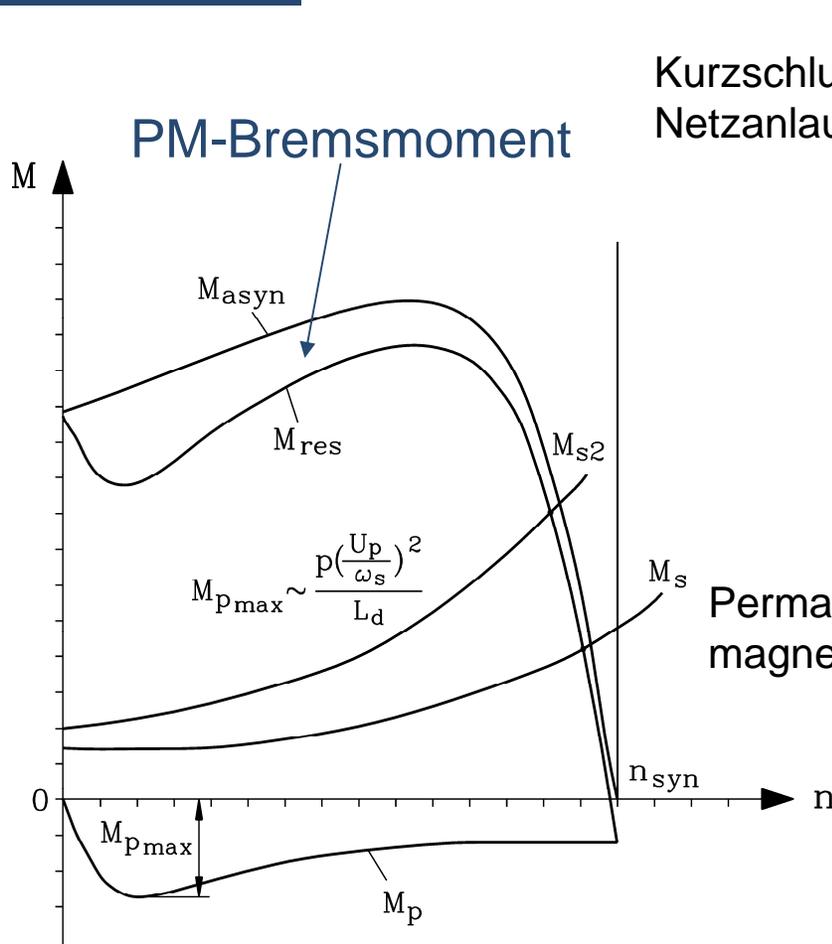
Quelle: Lust Antriebstechnik



15000/min, 4 MW Käfigläufer-Asynchronmotor

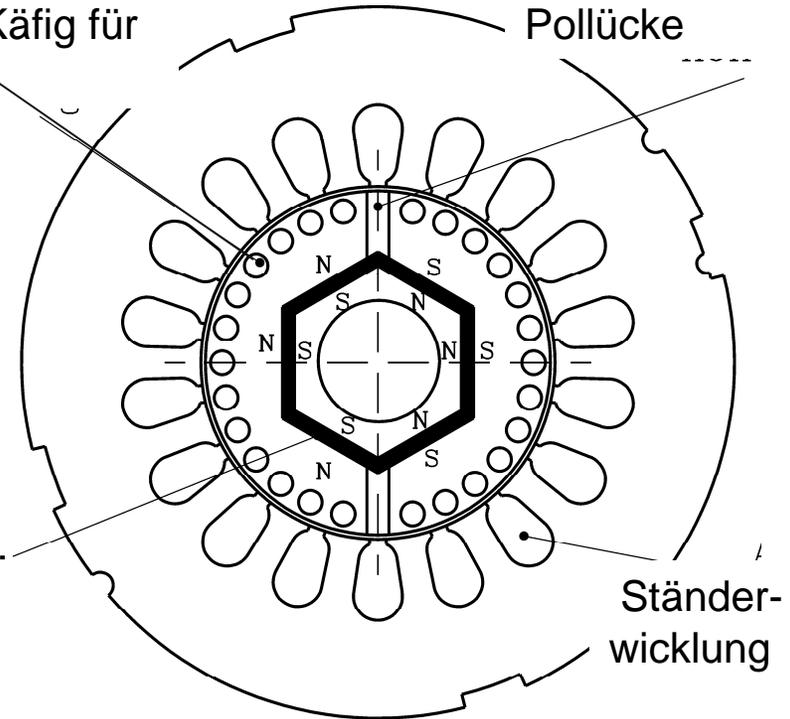
- Antriebe für **Gaspipeline**-Kompressoren
- Typisch 4 MW, 15000/min, 2.5 kNm ... 16 MW, 6000 /min, 25.5 kNm
- Kupferkäfig, 2-polig, **massiver** Eisenrotor, **ca. 240 m/s**
- **Aktive Magnetlagerung**, rotiert oberhalb der ersten Biegeeigenfrequenz
- Mittelspannungs-IGBT-PWM-Spannungszwischenkreisumrichter

Quelle: Siemens AG



Kurzschluss-Käfig für Netzanlauf

Amagnetische Pollücke



Quelle: Siemens AG

- Entwicklungsarbeit, PM-Läufer erzeugt Bremsmoment beim Hochlauf

- **Energiepolitischer Hintergrund**
- **Energieeinsparpotentiale in der Antriebstechnik**
- **Ansatzpunkte für Energiesparmaßnahmen**
 - **Werkstoffe**
 - **Industrie-E-Motoren**
 - **Stromrichter**
 - **Antriebssysteme**
 - **Kleinantriebe**
- **Zukunftsperspektiven - Ausblick**



Quelle: Siemens AG

Industrieantriebe: Anteil der Drehfeldmaschinen steigt rapide:

Asynchron- oder Synchronmaschinen

Drehzahlveränderung =

= Frequenzänderung =

= Umrichterspeisung

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

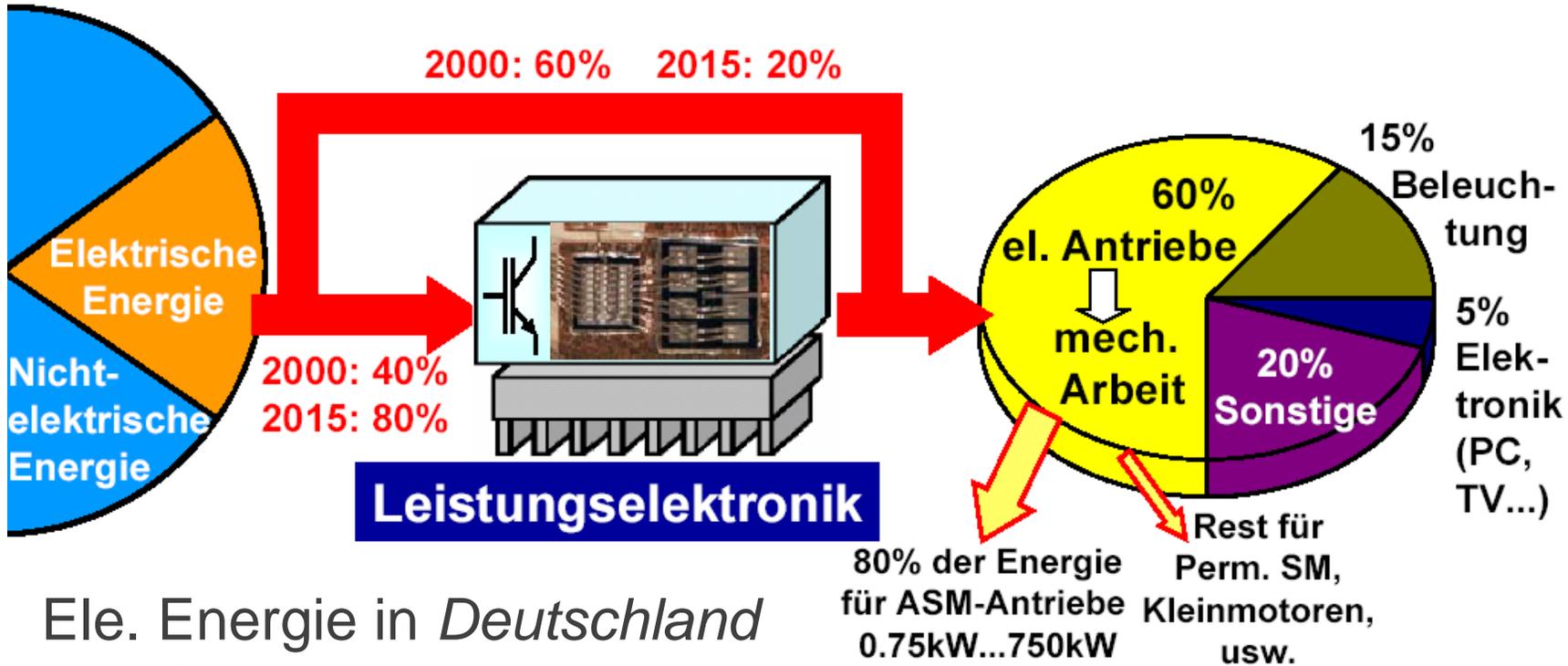
f_s : Ständerfrequenz

p : Polpaarzahl

n_{syn} : Synchrondrehzahl

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

Umrichterspeisung nimmt zu !



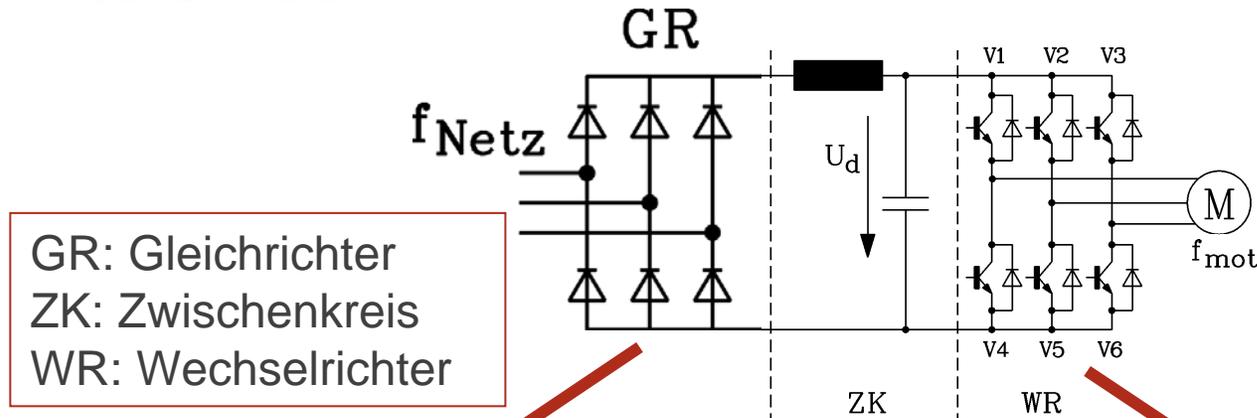
Ele. Energie in *Deutschland* über Umrichter umgeformt:

2000: 40%

2015: 80%

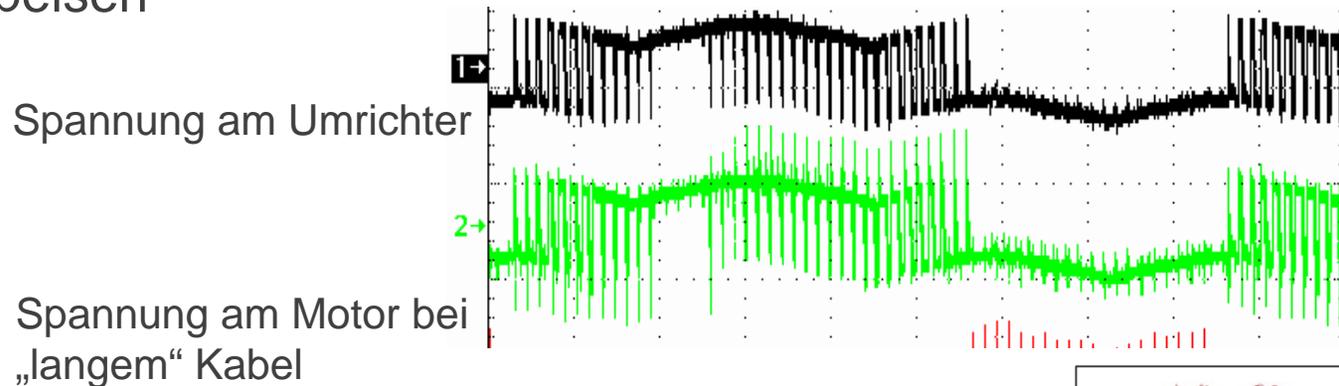
Quelle: etz-Zeitschrift, 2007

Hart schaltende Zweipunkt-Umrichter mit Gleichspannungszwischenkreis



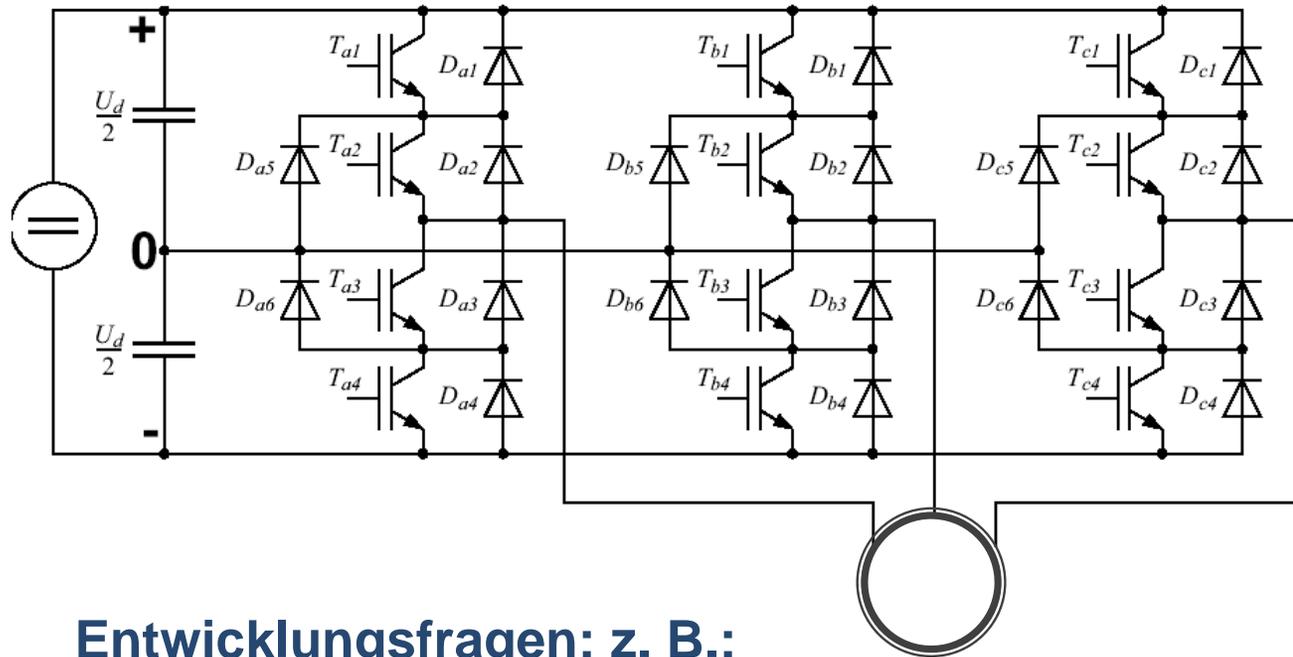
- Ungesteuerte Gleichrichterbrücke
= kein Rückspeisen

- Zweipunktschaltverfahren



- **Netzseitig aktiv gesteuerte** Gleichrichterbrücken (pulsfrequent) auch bei kleinen Leistungen = Rückspeisung der Bremsenergie.
- Einsatz **statischer Energiespeicher** (Super-Caps) im Zwischenkreis (hohe Leistungsdichte); Steigerung der Zyklenzahl nötig!
- **Übergang zu Dreipunkt-Umrichter**: höhere Zahl von stromführenden Leistungshalbleitern = mehr Durchlassverluste, **aber**: niedrigere Spannungsklasse, geringere Schaltfrequenzen = weniger Verluste
- **Auch rückspeisefähig**: a) Matrix-Umrichter, b) Stromrichter ohne Zwischenkreiskondensator mit netzseitig netzfrequentem Schalten
- Weiterentwicklung zur Verlustverringerung: **Weich bzw. resonant schaltende** Umrichtertopologien z. B. für High-Speed-Antriebe

Dreipunktwechselrichter

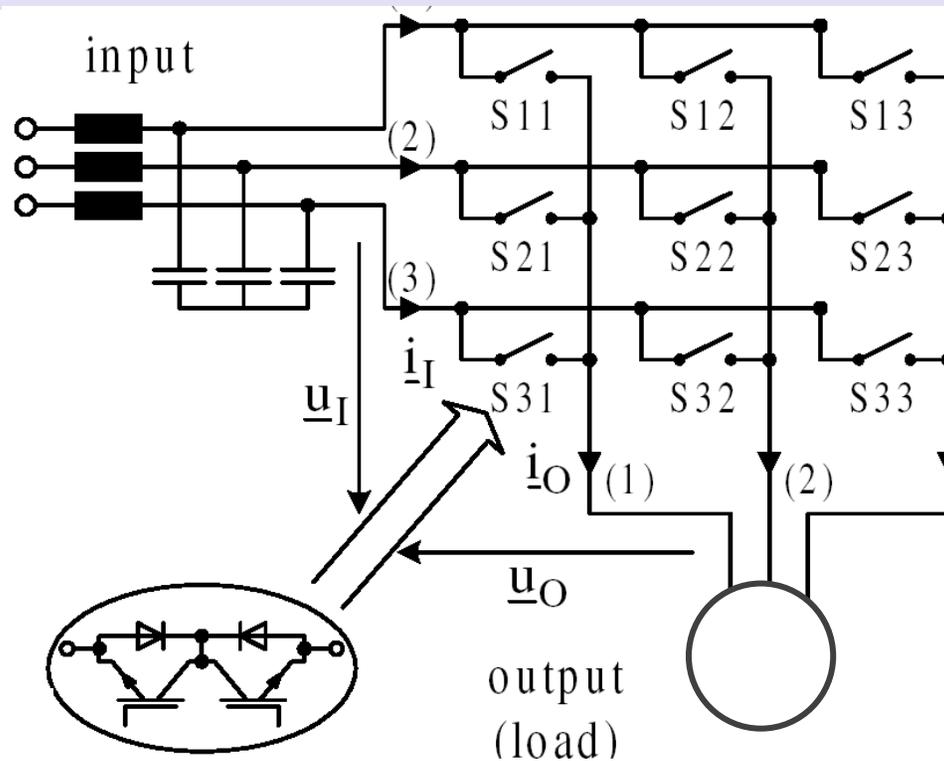


Entwicklungsfragen: z. B.:

- Steuerverfahren mit reduzierter/ohne Gleichtaktspannung
- Einsparung von Ausgangsfiltern
- Optimierte Steuerprofile

Quelle: P. Mutschler, TU Darmstadt

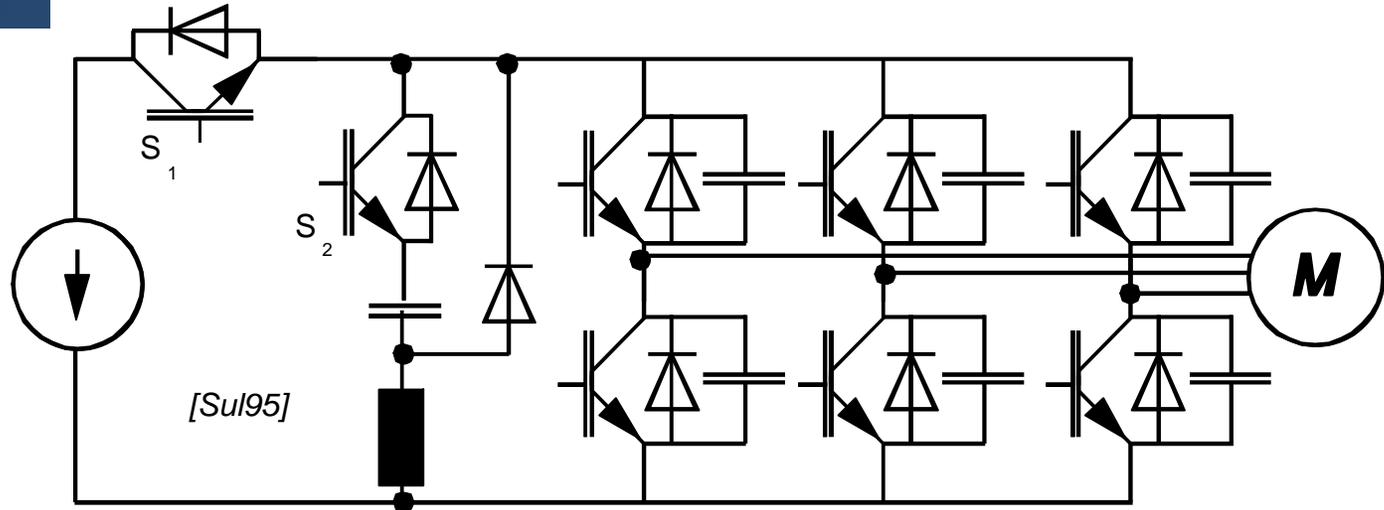
Matrix-Umrichter



Quelle:
P. Mutschler
TU Darmstadt

Entwicklungsfragen: z. B.:

- Netzfilter-Auslegung
- Steuerverfahren für reduzierte Gleichtaktspannung.
- Kommutierung mit optimierten Steuerprofilen möglich ?



Entwicklungsfragen: z. B.:

- Auslegung auf gewünschte du/dt
- Zusätzlicher Freiheitsgrad: Nullspannungsvektor ohne Gleich-taktspannung durch $U_B=0$
- Netzseitiger Stromrichter ebenfalls resonant möglich.

Quelle: Sul, K.; Kim, J.: IEEE-PES 10/4, 1995, 479 - 484

- **Energiepolitischer Hintergrund**
- **Energieeinsparpotentiale in der Antriebstechnik**
- **Ansatzpunkte für Energiesparmaßnahmen**
 - Werkstoffe
 - Industrie-E-Motoren
 - Stromrichter
 - **Antriebssysteme**
 - Kleinantriebe
- **Zukunftsperspektiven - Ausblick**

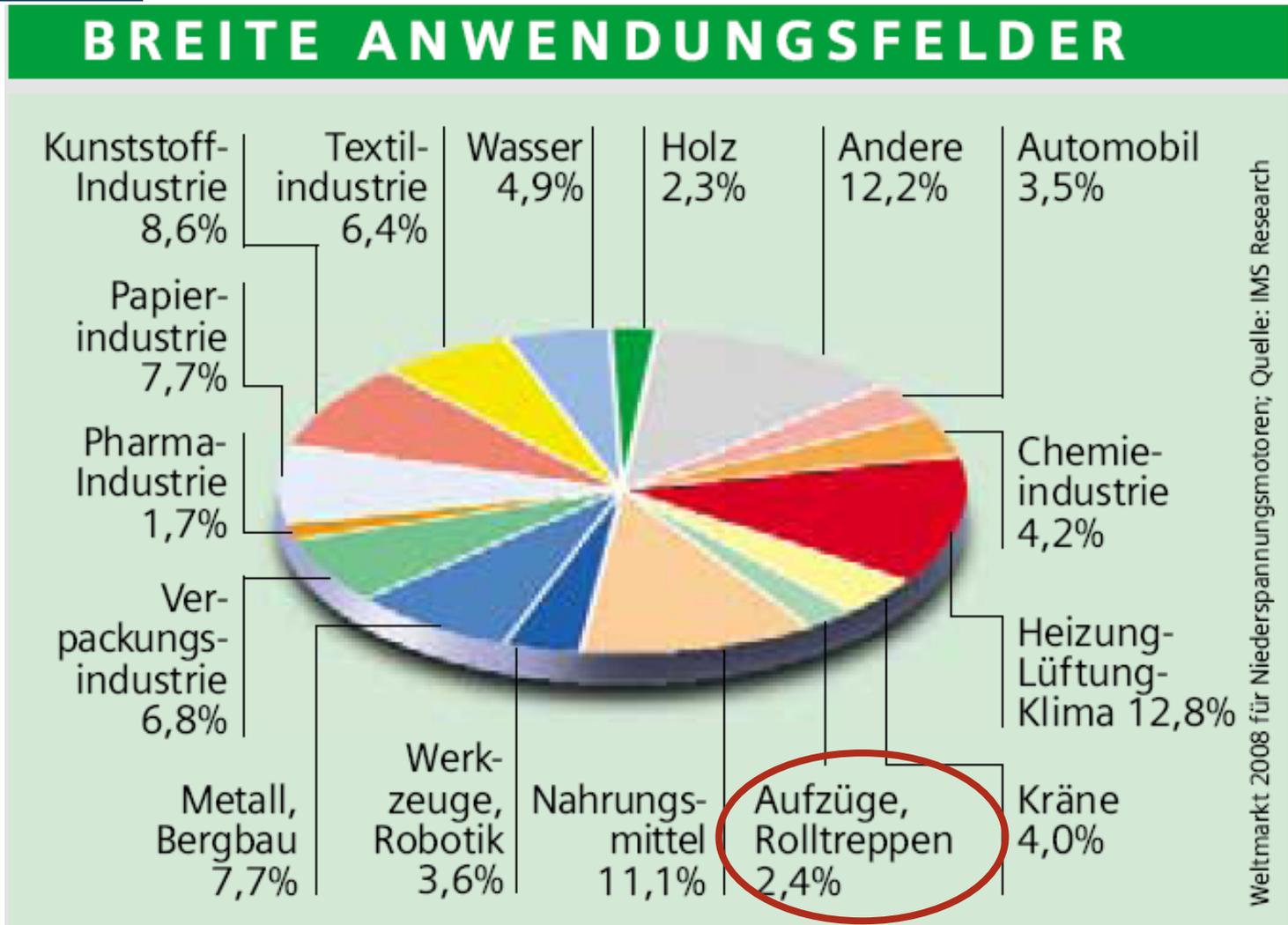


Quelle: SEW-Eurodrive

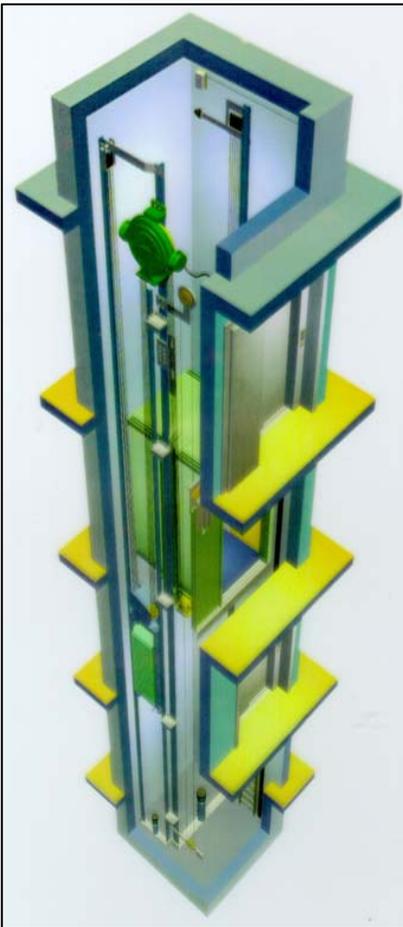
Energieeffizienz bei elektrischen Antrieben in der Industrie



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**

- Hochdrehzahlanwendungen:

Turbo-Kompressoren

Turbomolekular-Vakuumpumpen

High-speed Drehen & Fräsen

Generator-Motor für Schwungräder

Generatoren für Mikrogasturbinen

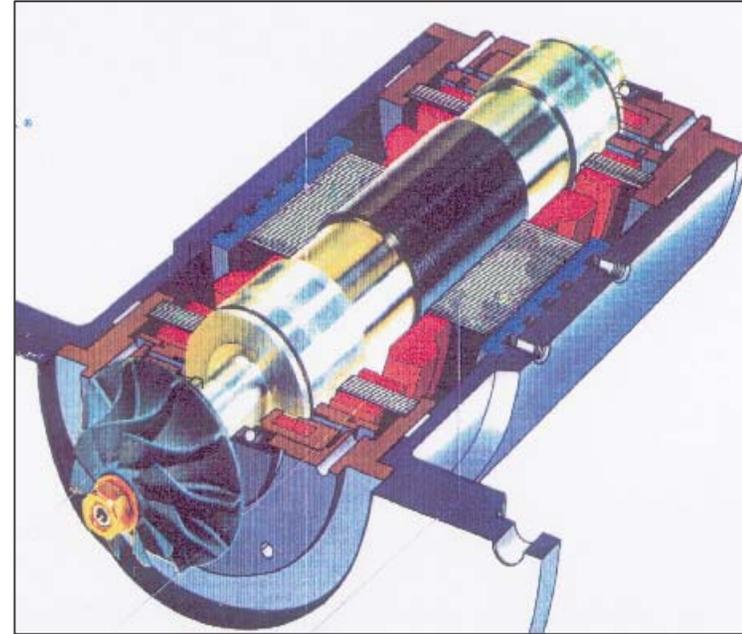
E-Antriebe für Turbolader

- Vorteile:

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

Hohe Leistungsdichte – **dank kleinen Volumens**

Kein Getriebe: erhöhter Wirkungsgrad, weniger Wartung



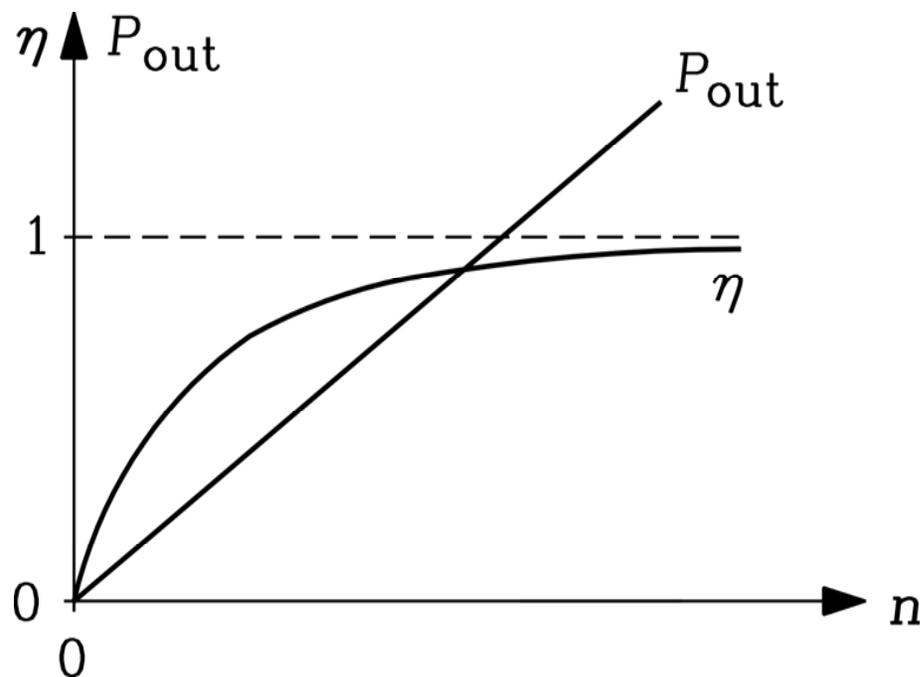
Magnetisch schwebender PM-Turbo-Kompressor-Rotor

Quelle: Piller, Germany

Hi-Speed – guter Wirkungsgrad ?

- Bei gegebenem Drehmoment steigt der Wirkungsgrad bei dominanten I^2R -Verlusten mit der Drehzahl.
- Denn: Moment $M \sim A \cdot B_{\delta} \cdot d^2 \cdot I_{Fe} \sim p \cdot \Phi I = \text{"Fluss x Strom"}$

Wirkungsgrad $\eta = P_{out} / P_{in} \approx 2\pi n M / (2\pi n M + m R I^2)$



Vergleich Hi-Speed: Asynchron-/PM-Synchron

Messung bei 800 Hz, Sinusbetrieb, 30 kW, 24000/min

Motor	Asynchron, Kupferkäfig	PM-Synchron, $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$
U_s (verkett.), I_s , $\cos\varphi$	330 V, 72.8 A, 0.77	311 V, 62.2 A, 0.95
Drehzahl, Schlupf	23 821 /min, 0.008	24 000 /min, 0.0
Abgabeleistg. P_{out}	29 933 W	30 157 W
$P_{Cu,s}$, $P_{Cu,r}$	537 W, 251 W	353 W, 0 W
P_{Fe} , P_{R_1} , P_z	650 W, 480 W, 49 W	660 W, 440 W, 100 W
Kühlwassertemp.	ein: 41.5 °C, aus: 47.5 °C	ein: 44.4 °C, aus: 48.1 °C
Kühlwasserstrom	3.25 l/min	3.25 l/min
Erwärmung: Wickelkopf / Nut *)	84.5 K / 68.5 K	42 K / 36 K
Wirkungsgrad	93.7 %	95.1 %

*) Erwärmung über Wasseraustrittstemperatur

Quelle: TU Darmstadt

**PM-Synchron vs. Asynchrontechnologie:
niedrigere Verluste und Erwärmung**

Energieeffizienz bei elektrischen Antrieben im Verkehr



Quelle: Siemens, Pictures of the Future

Energiesparende **Schiffsantriebe**

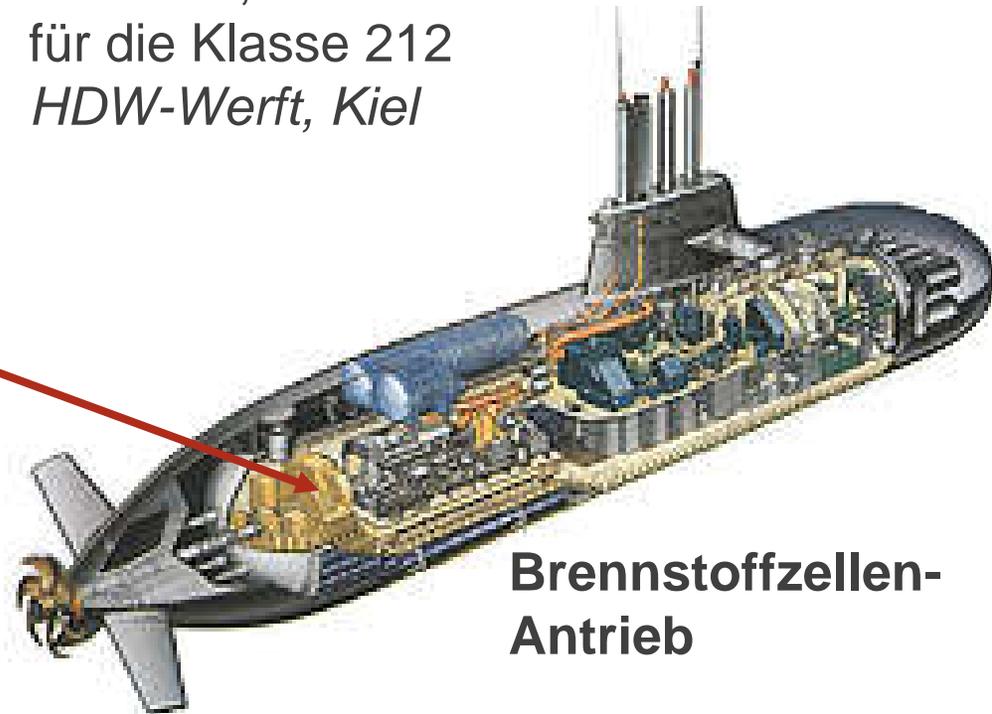
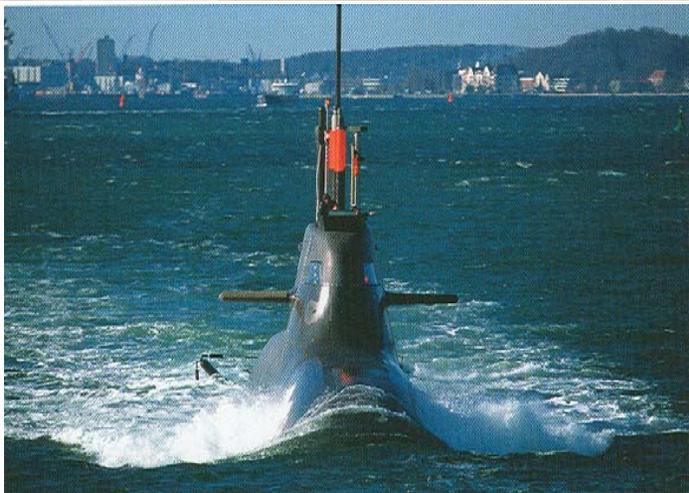


Quelle: Siemens, Pictures
of the Future



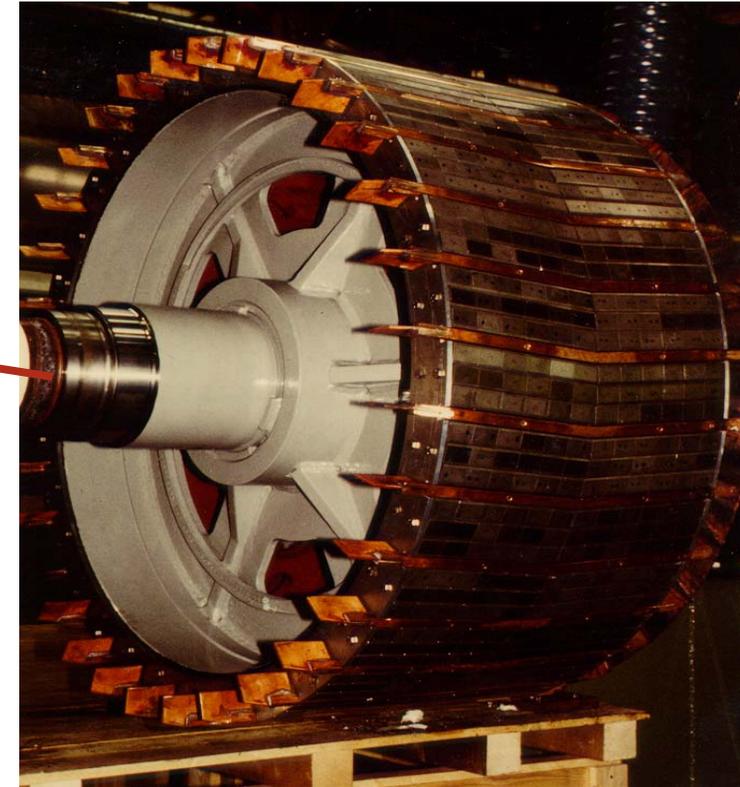
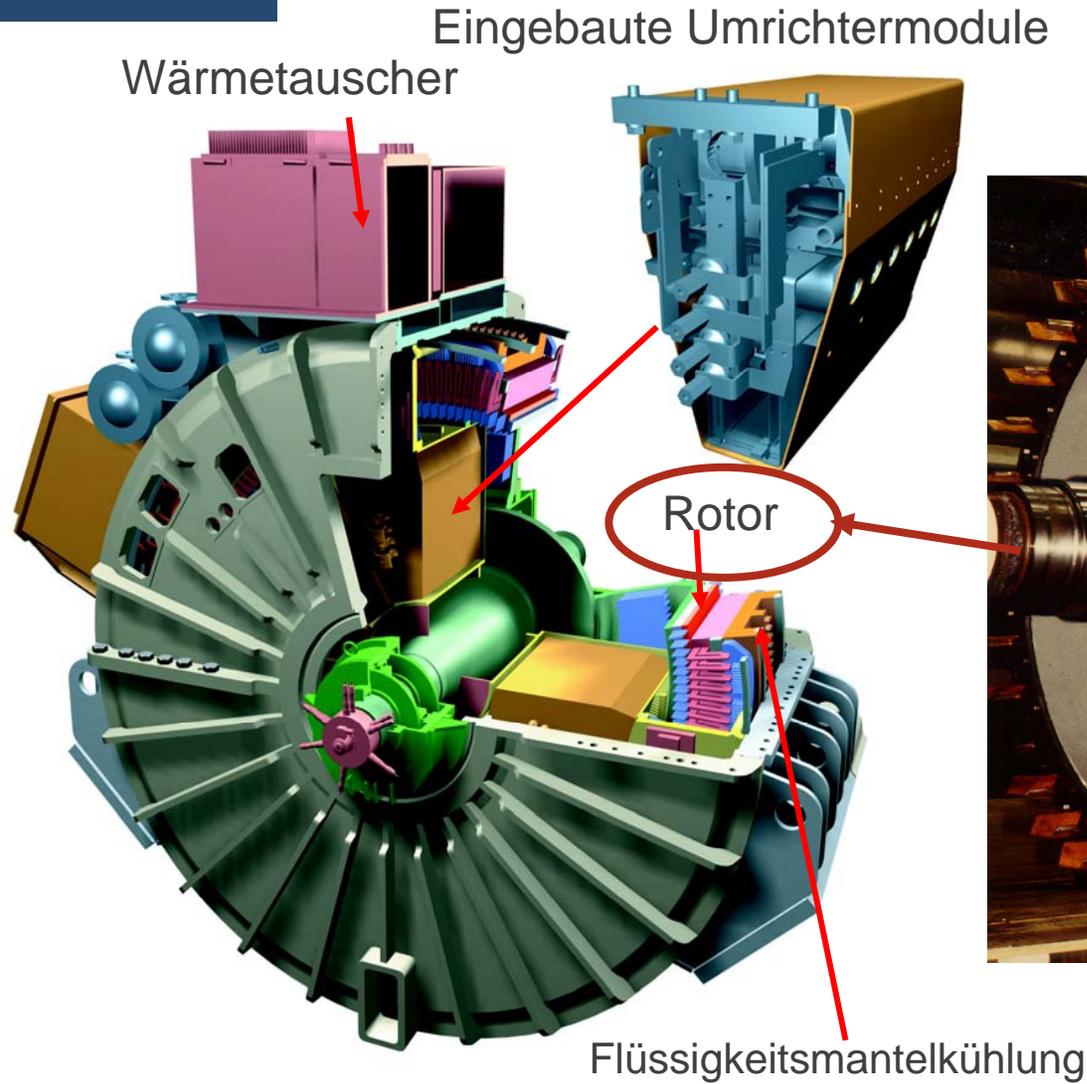
Beispiel: U-Boot-Antrieb

1100 kW, 230/min
für die Klasse 212
HDW-Werft, Kiel



**Brennstoffzellen-
Antrieb**

Quelle: Siemens AG



Quelle: Siemens AG



PM-Pod-Antrieb
(Drehbare Gondel)

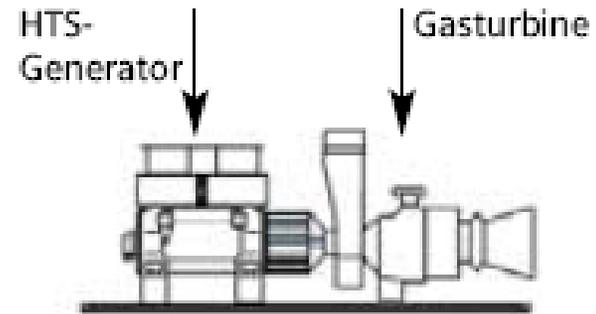
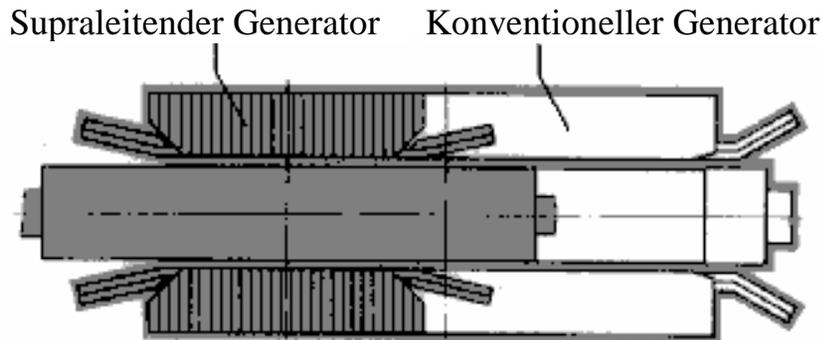
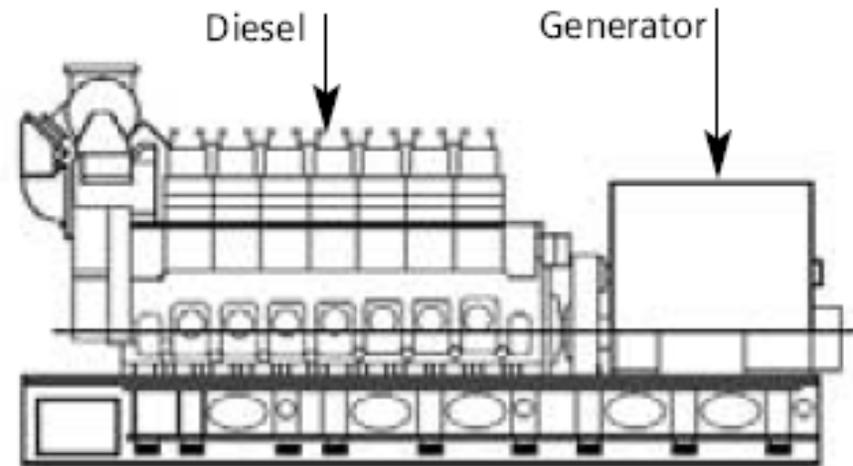
PM-Antriebe:

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



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

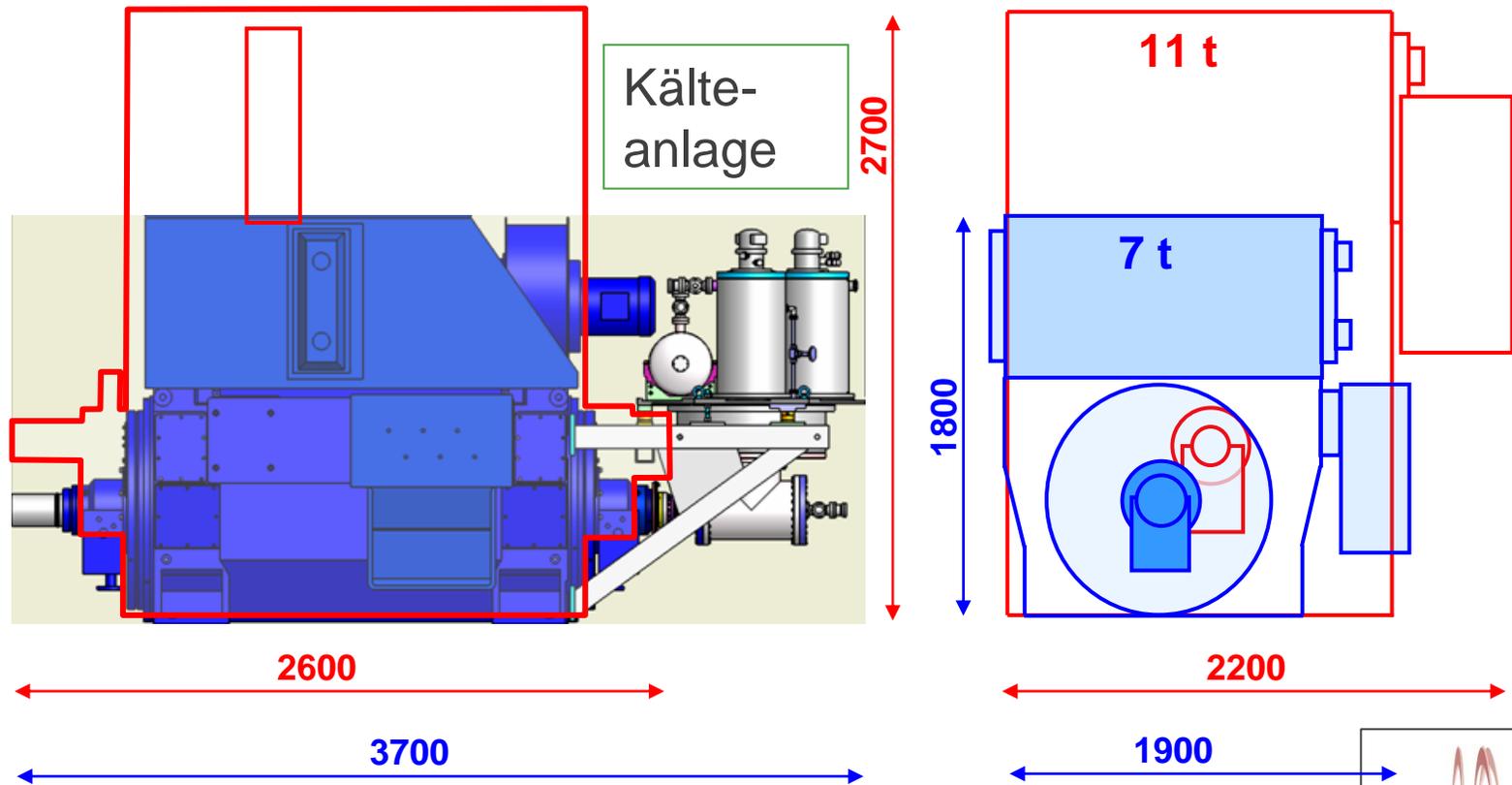


Vergleich des HTSL-Prototyps mit konventionellem Generator

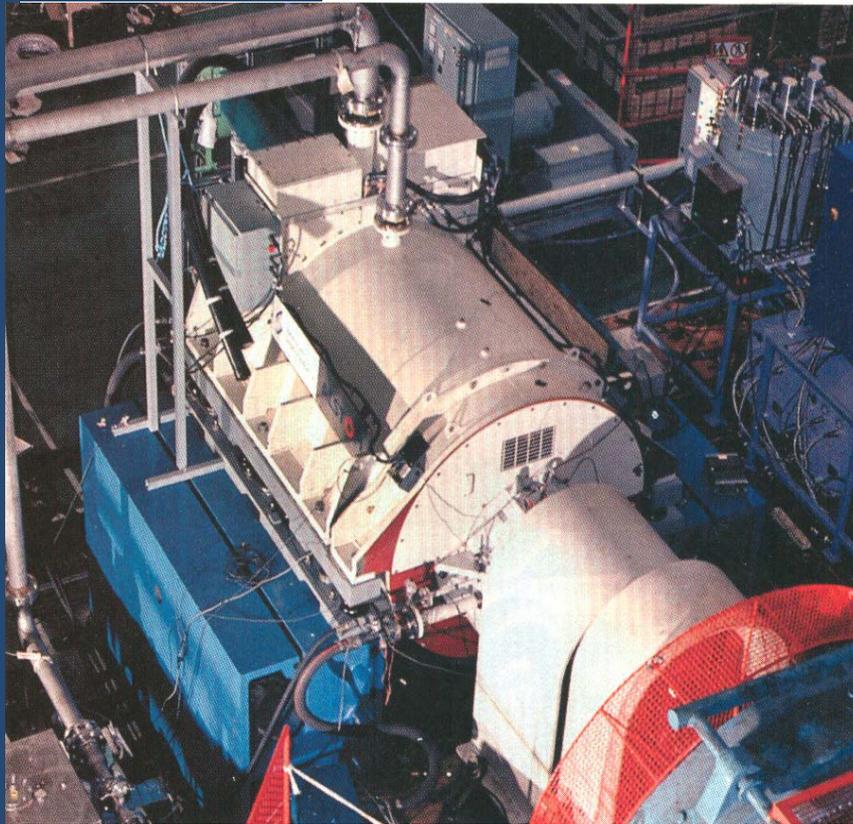
- Geringes Volumen und Gewicht
- Höherer Wirkungsgrad: **98.4% statt 96.1 % =
= nur 40% der Verluste**

Quelle:
Siemens AG

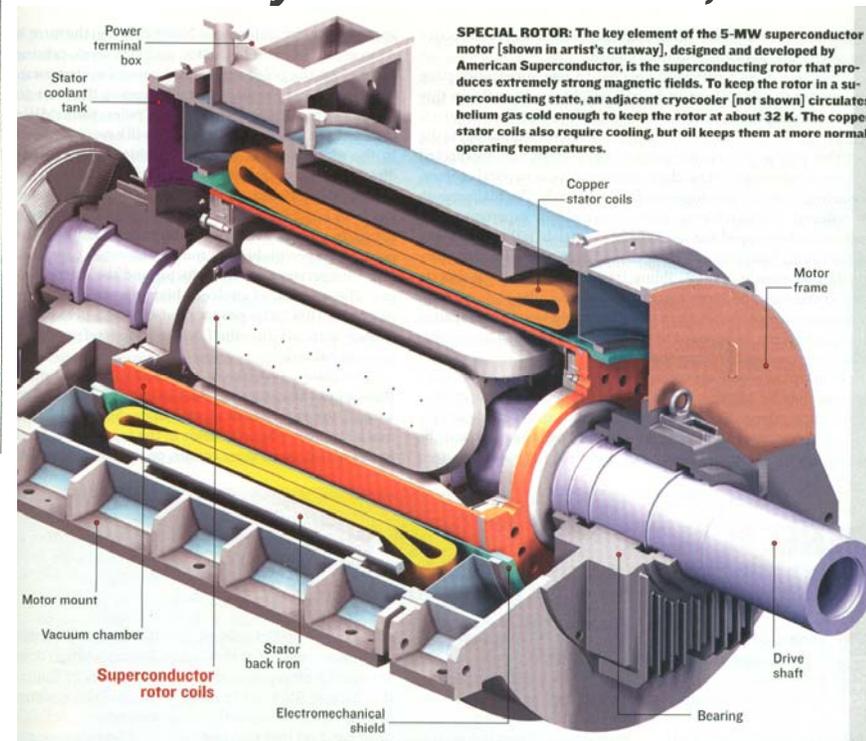
4 MVA HTS Generator verglichen mit konventionellem Generator



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*

Energiesparende elektrische **Traktion**

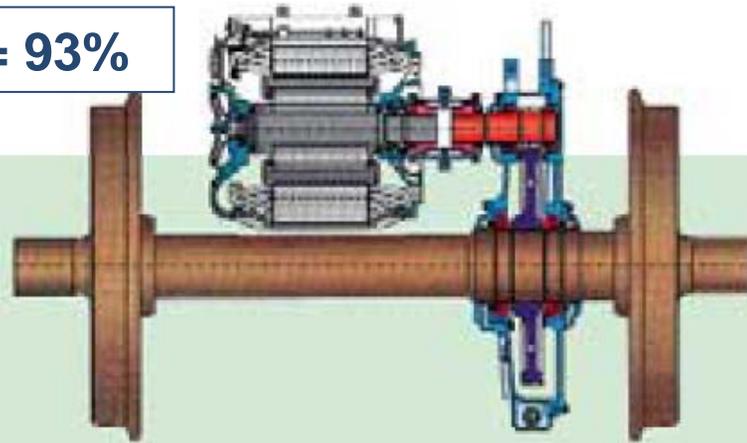


Quelle: Siemens, *Pictures
of the Future*

PM-Direktantrieb statt Asynchronantrieb mit Getriebe

Quelle:
Siemens AG

$\eta = 93\%$

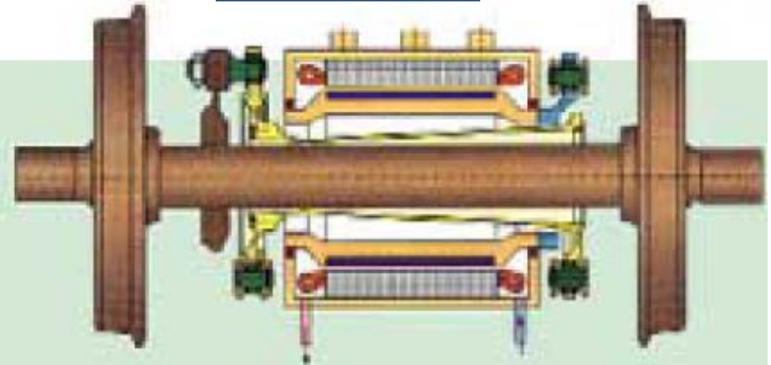


Asynchron-Fahrmotor mit Getriebe:

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 %

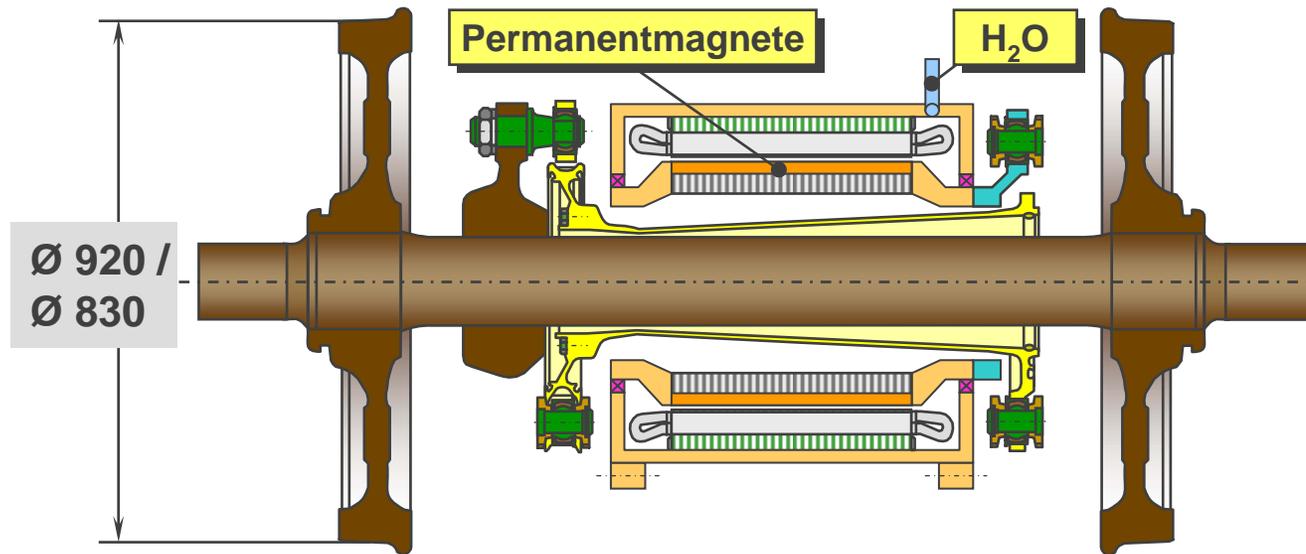
Geräusch..... 90 dB(A) d.h. 80% leiser
Stirnradgetriebe..... entfällt

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:
TU Darmstadt /
Siemens AG

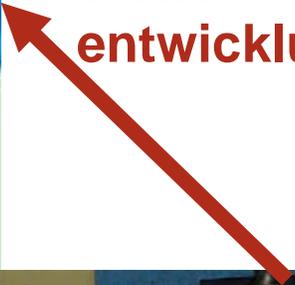
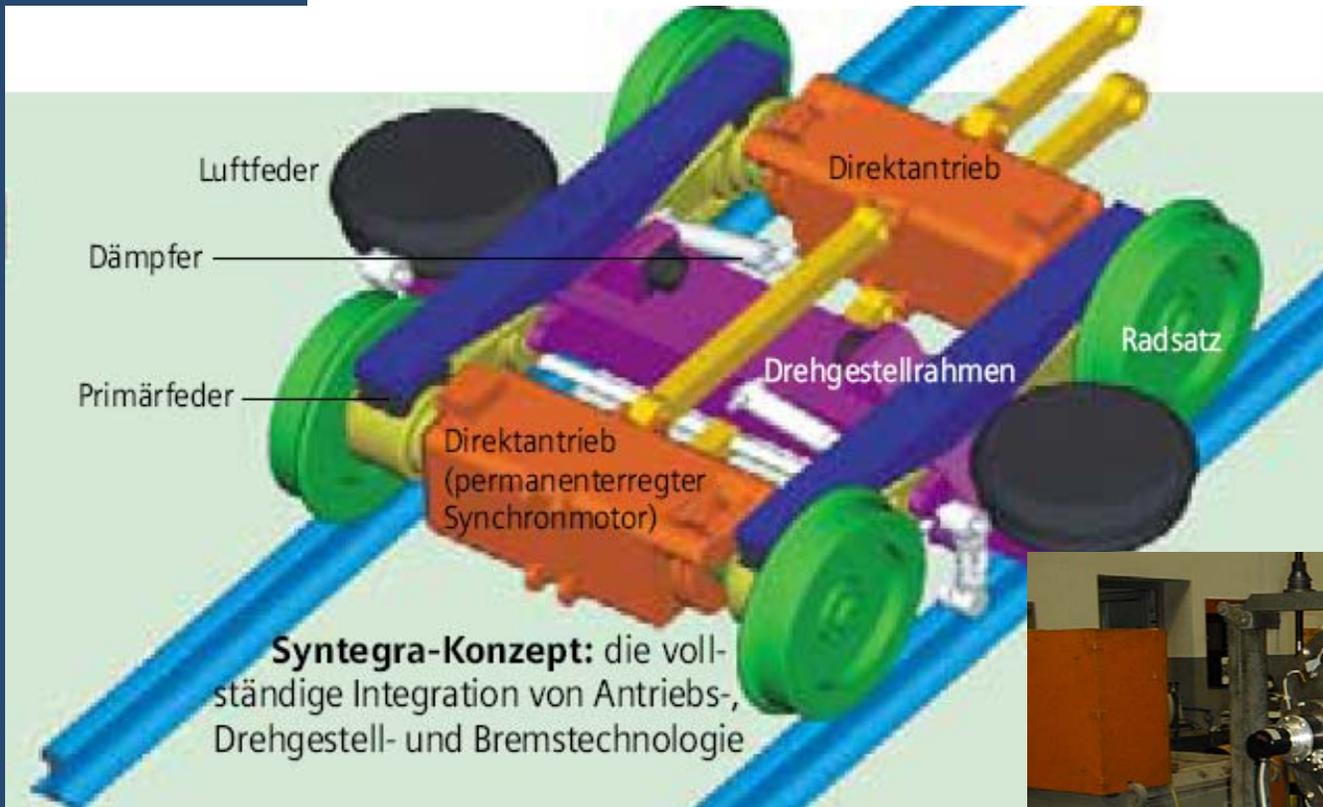


- **Getriebelos, voll abgefedert mit Kardan-Hohlwellen-Kupplung**
- **Masse ca. 640 kg ohne Kupplung**
- **Drehmoment max. 8600 Nm, dauernd 7700 Nm, Leistung 500 kW**
- **Drehzahl max. 2110 min⁻¹, Nenndrehzahl 817 min⁻¹**
- **Wasser-Mantelkühlung, Läufer nahezu verlustfrei**

Permanenterregte Drehstrom-Synchronmaschine

Quelle:
Siemens AG

**Weiter-
entwicklung**

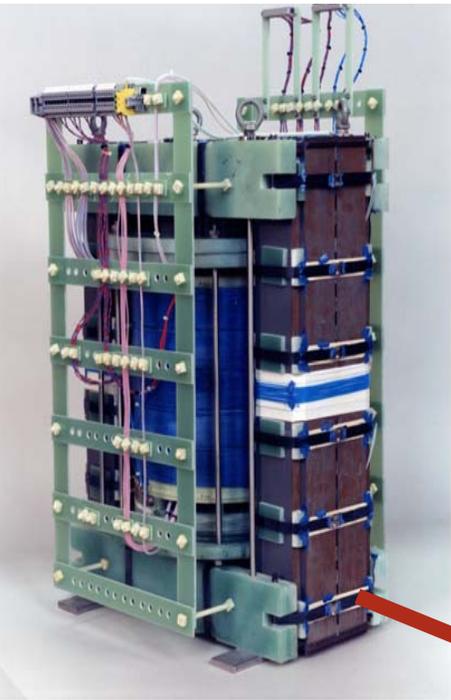
**Direktantriebe für Metros:
Im Drehgestell unabgefedert
integriert, elektrische Bremse über
PM-Maschine**

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

Supraleitender (HTSL) Loktransformator

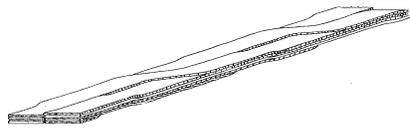
Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik

100-kVA-Modelltrafo



Quelle:
TU Darmstadt /
Siemens AG

AC-Verbundleiter

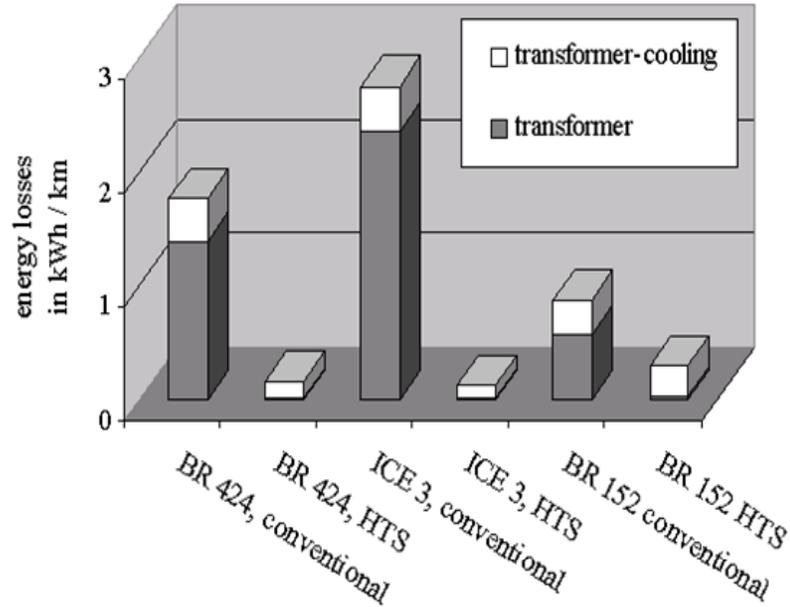


An-Bord-
Prototyp?



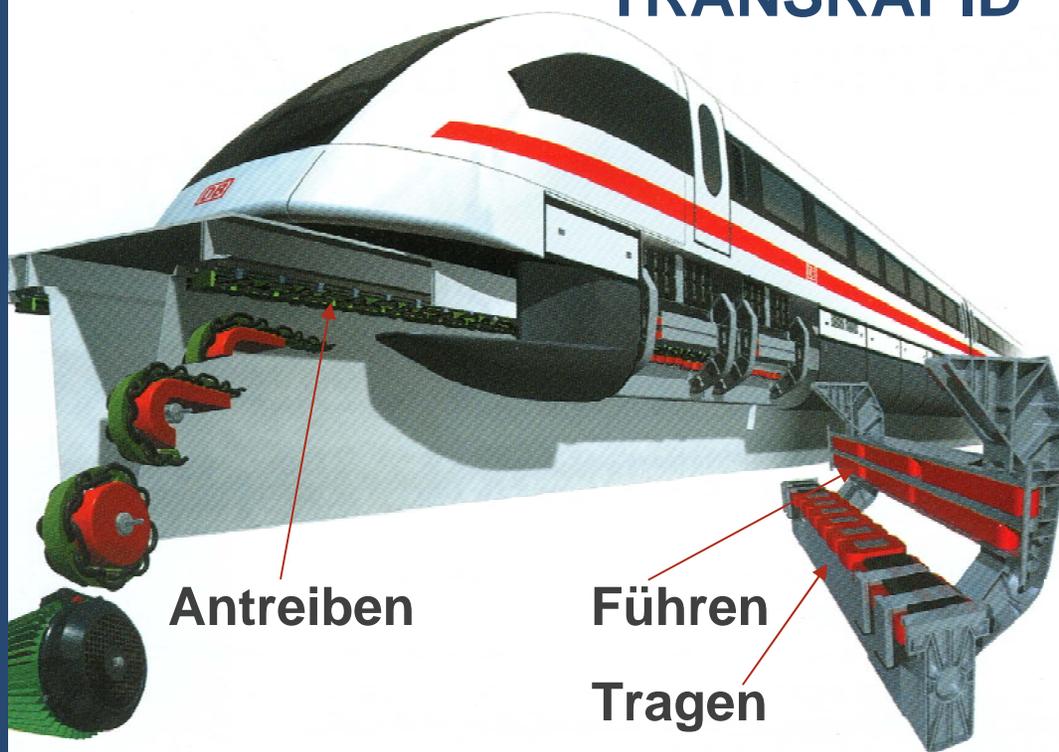
1-MVA-Demonstrator

Energieeinsparpotential

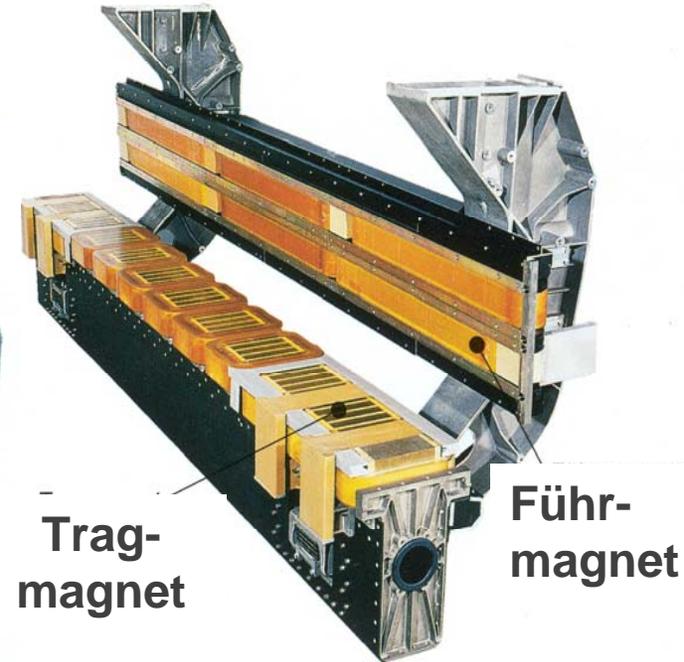


Hochgeschwindigkeitsbahnen in Magnetschwebetechnik

TRANSRAPID



Trag- und Führmodul

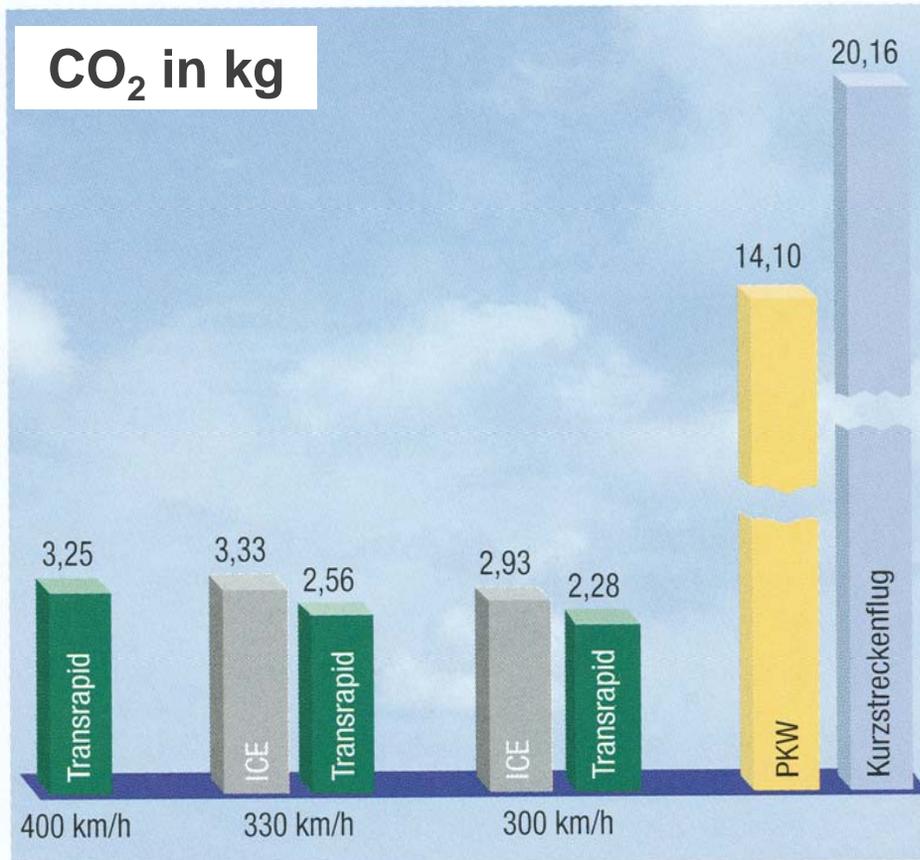


Die Tragsmagnete ziehen **von unten** bei einem **Luftspalt von ca. 10...13 mm** das Fahrzeug an den Stator des Linearmotors, der in der Trasse liegt. Dadurch erhält das Fahrzeug **OBERHALB** der Trasse eine **Bodenfreiheit von 150 mm**.

Quelle: Thyssen

Emissionen / Energiebedarf Hochgeschwindigkeitsbahnen

**CO₂-Emission in kg je 100 Sitzplätze
und je 1 Kilometer Fahrstrecke**



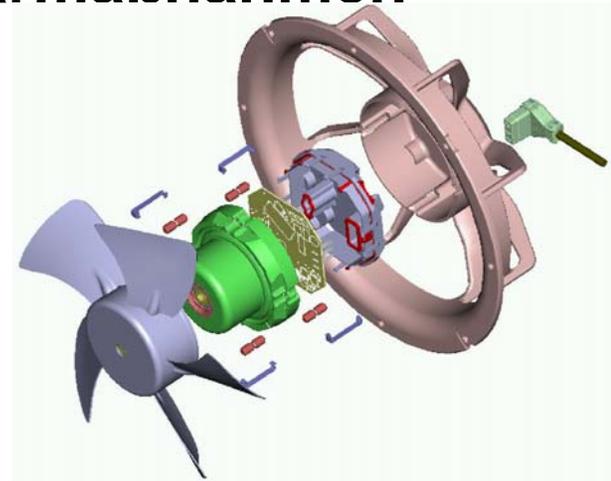
**Spezifischer Energiebedarf
pro Sitzplatz und Kilometer:**

v	ICE 3	TRANSRAPID
km/h	Wh	Wh
200	29	22
300	51	34
400	-	52
500	-	geplant *) long-distance

***) Alternative zum Kurzstreckenflug !!**

Quelle: Thyssen

- **Energiepolitischer Hintergrund**
- **Energieeinsparpotentiale in der Antriebstechnik**
- **Ansatzpunkte für Energiesparmaßnahmen**
 - Werkstoffe
 - Industrie-E-Motoren
 - Stromrichter
 - Antriebssysteme
 - **Kleinantriebe**
- **Zukunftsperspektiven - Ausblick**

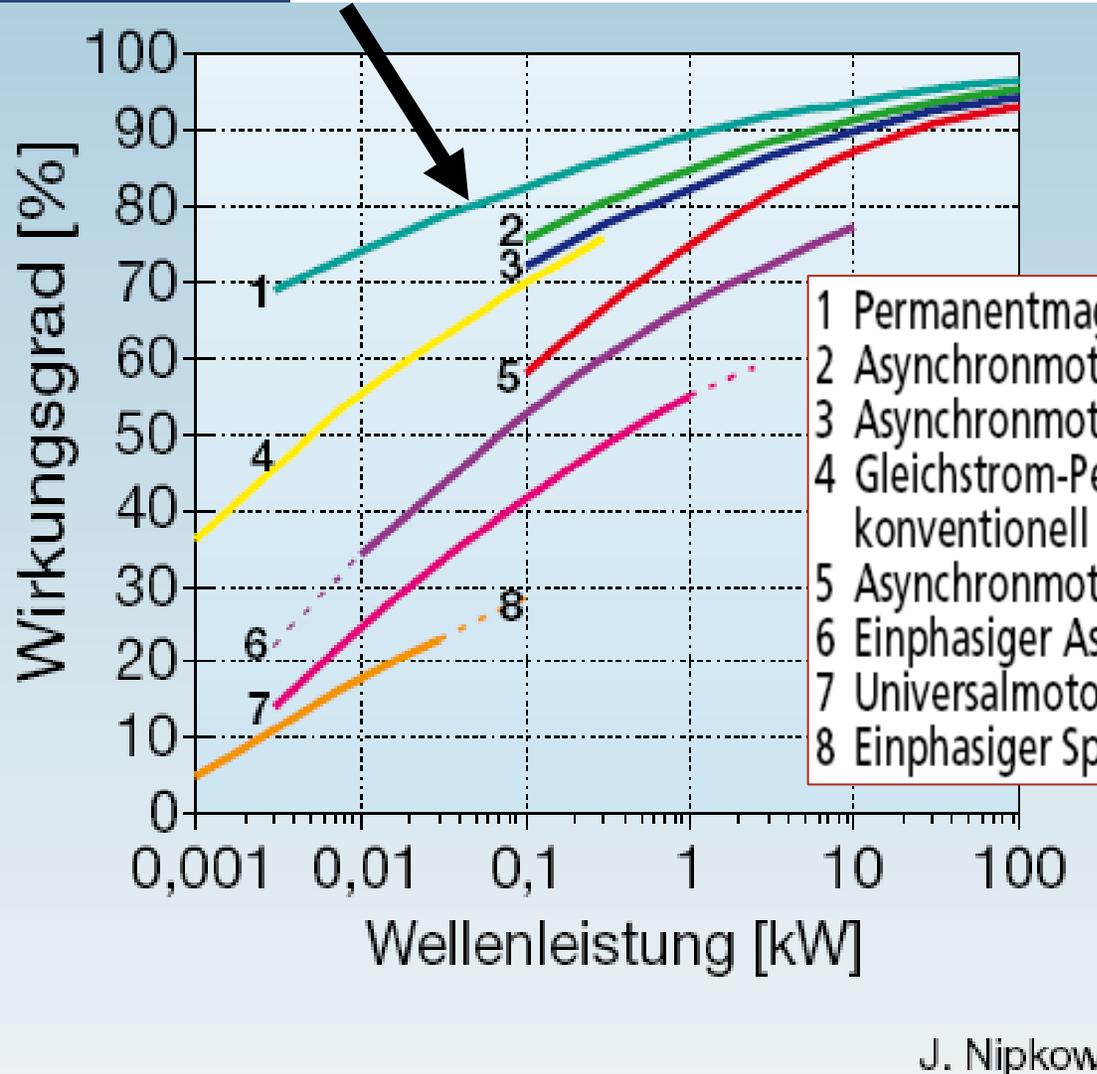


Quelle:
ebm, Künzelsau

- **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

- **Kühlgeräte: Kompressoren:**
robuste, billige Widerstandshilfsstrangmotoren (einphasige Asynchronmotoren)
- **Heizungspumpen:** Kondensatormotoren (als Spaltrohrmotorpumpen)
Spaltrohr: großer magnetisch wirksamer Luftspalt
Wirkungsgrad nur ca. **30 ... 40 %**
- **Laugenpumpenantriebe** (Waschmaschinen, Geschirrspülern):
Spaltpolmotoren: Wirkungsgrad: **5 ... 20%**
- **Alternative:** PM-Synchronmotoren mit kostengünstigen Ferritmagneten
Wirkungsgrad: **60 ... 70%**
Integrierte Motorelektronik erforderlich
Power-factor-correction-Schaltung für sinusförmigen Netzstrom
- **PM-Antriebe helfen Energie sparen, sind aber teurer !**

Typische Vollast-Wirkungsgrade

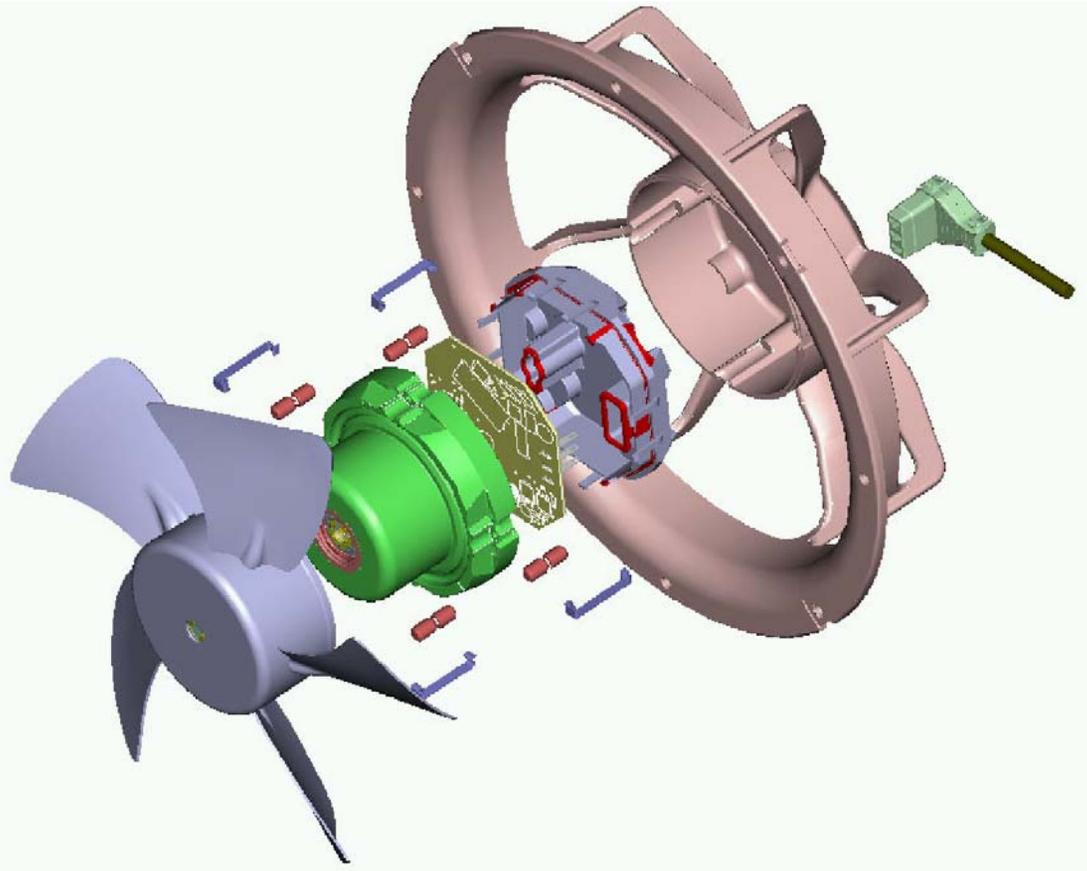


- 1 Permanentmagnetmotor spezial, elektronisch
- 2 Asynchronmotor, 3-Stern ***
- 3 Asynchronmotor, 2-Stern **
- 4 Gleichstrom-Permanentmagnetmotor, konventionell
- 5 Asynchronmotor, 1-Stern *
- 6 Einphasiger Asynchronmotor, Betriebskondensator
- 7 Universalmotor (Kollektormotor)
- 8 Einphasiger Spaltpol-Asynchronmotor

Quelle: SEV Bulletin, 2005

J. Nipkow

High-End-Lüfter-Antriebssystem



Quelle:
ebm, Künzelsau

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

- **Energiepolitischer Hintergrund**
- **Energieeinsparpotentiale in der Antriebstechnik**
- **Ansatzpunkte für Energiesparmaßnahmen**
 - **Werkstoffe**
 - **Industrie-E-Motoren**
 - **Stromrichter**
 - **Antriebssysteme**
 - **Kleinantriebe**
- **Zukunftsperspektiven - Ausblick**



Quelle: ABB

- **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