

Technische Optimierungspotentiale bei elektrischen Antriebssystemen

Andreas Binder

Institut für Elektrische Energiewandlung

TU Darmstadt

abinder@ew.tu-darmstadt.de

Elektrische Energie sparen in der Industrie

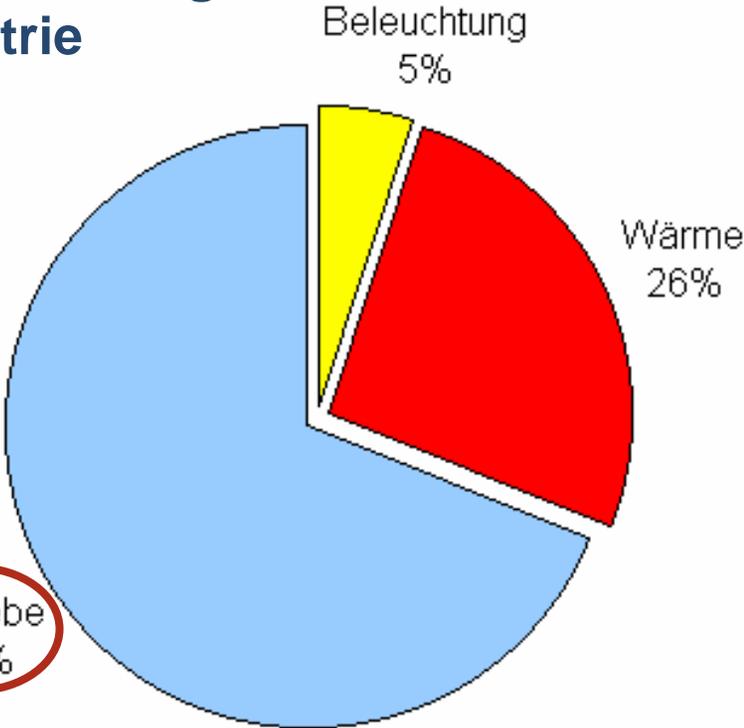
Nutzung der elektrischen Energie in der deutschen Industrie

- 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

- **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:

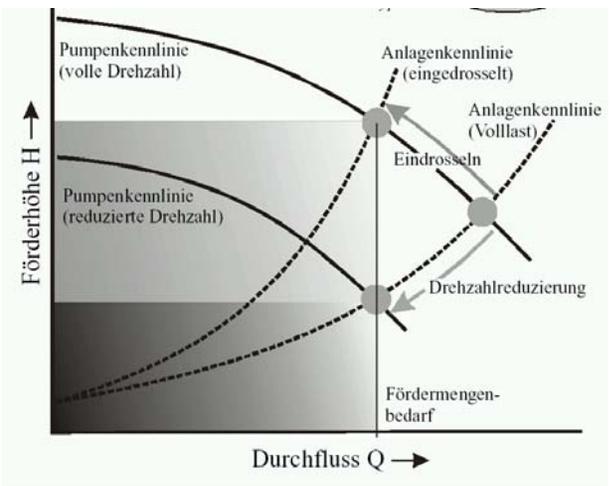
Motorwirkungs-
grad

1.4% ... 3%



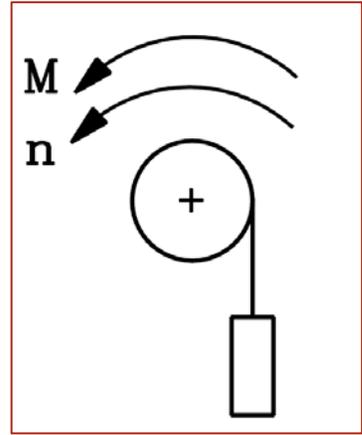
Drehzahl-
anpassung

8 % ... 10%



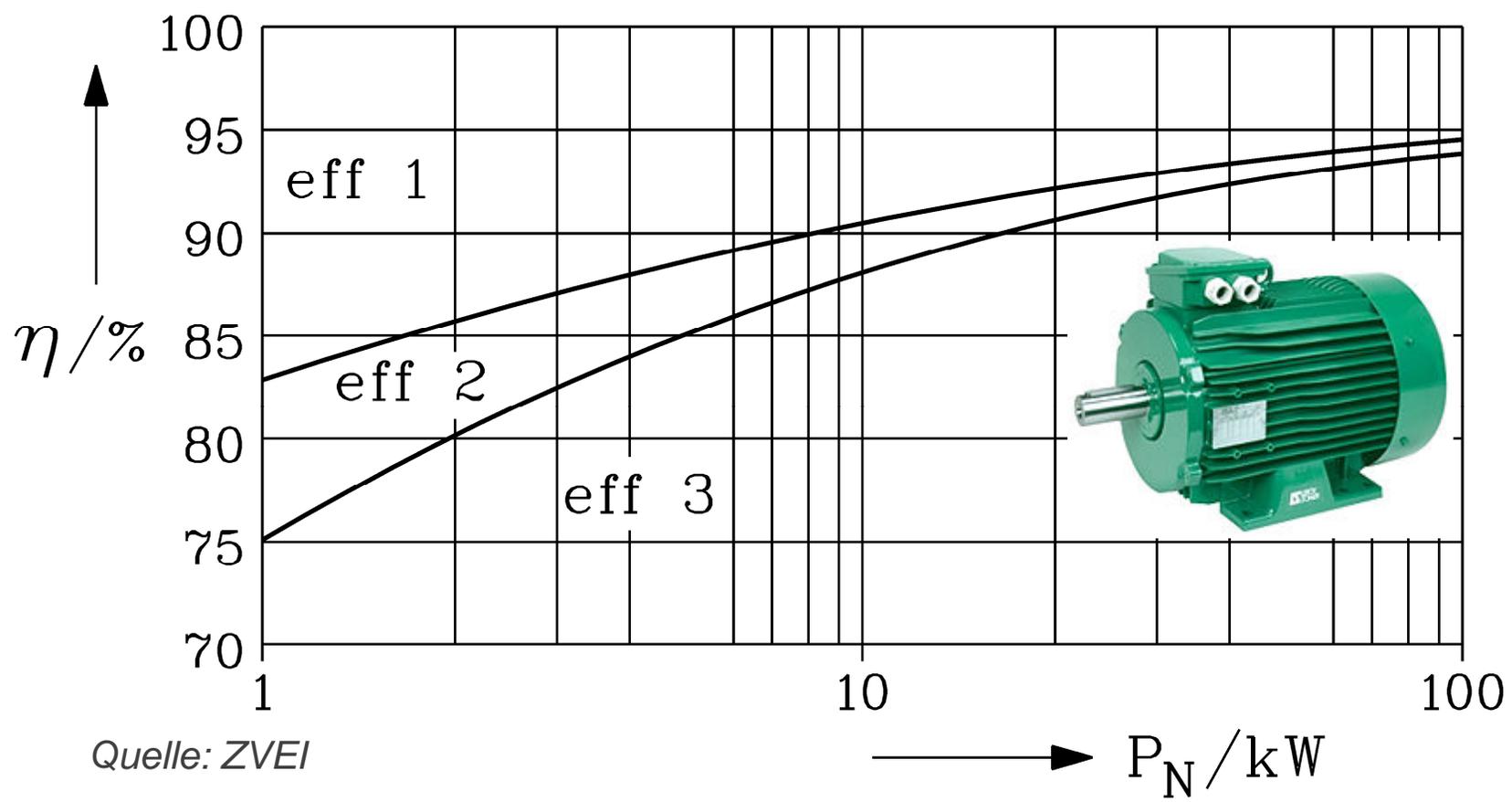
System-
optimierung

15 ... 20 %



Quelle: Leroy Somer;
France; KSB, Deutschland

Wirkungsgradgesteigerte Norm-Asynchron-Motoren



Quelle: ZVEI

- **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

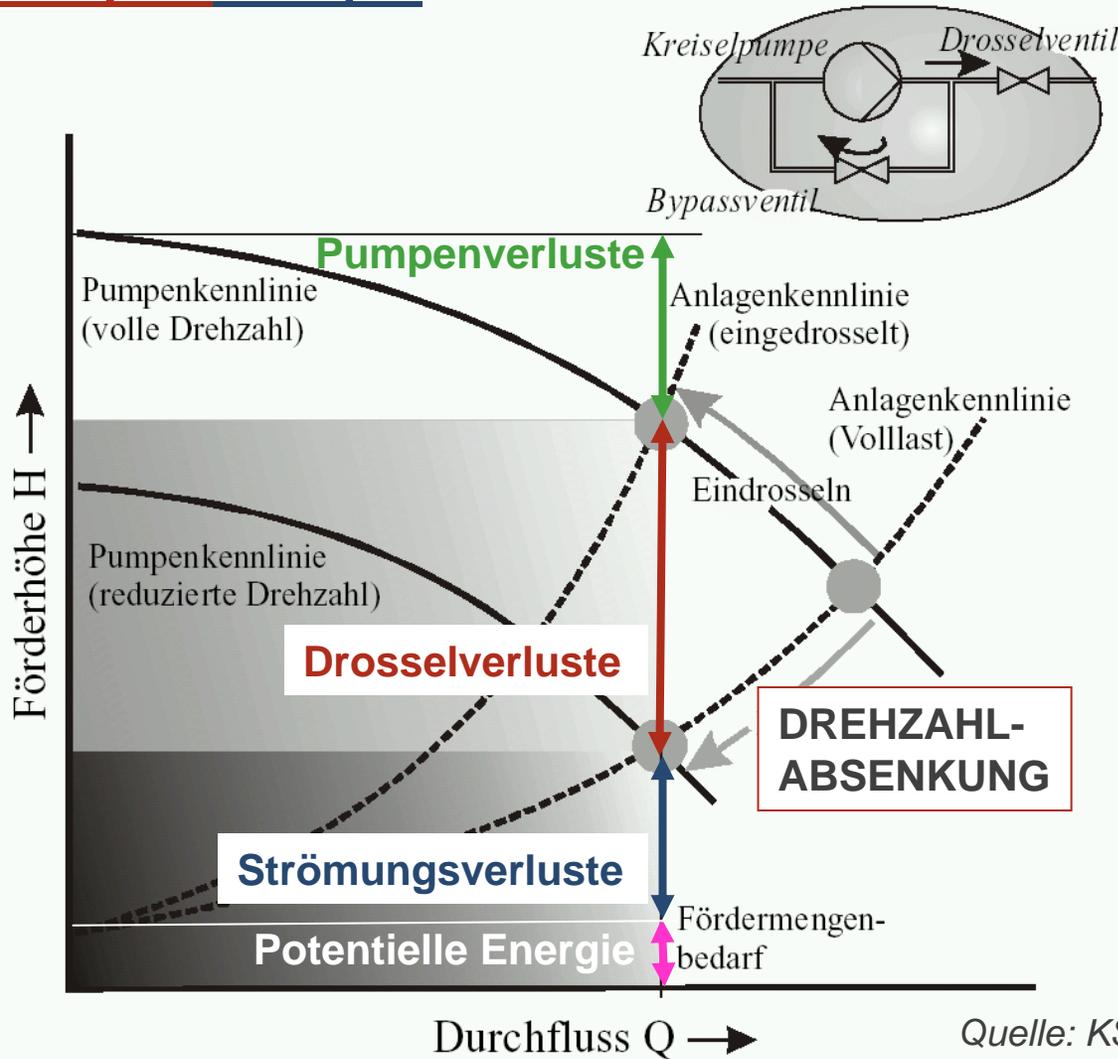
$$4\% \cdot 50\% \cdot 163 \text{ TWh} = 3.3 \text{ TWh}$$

 **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

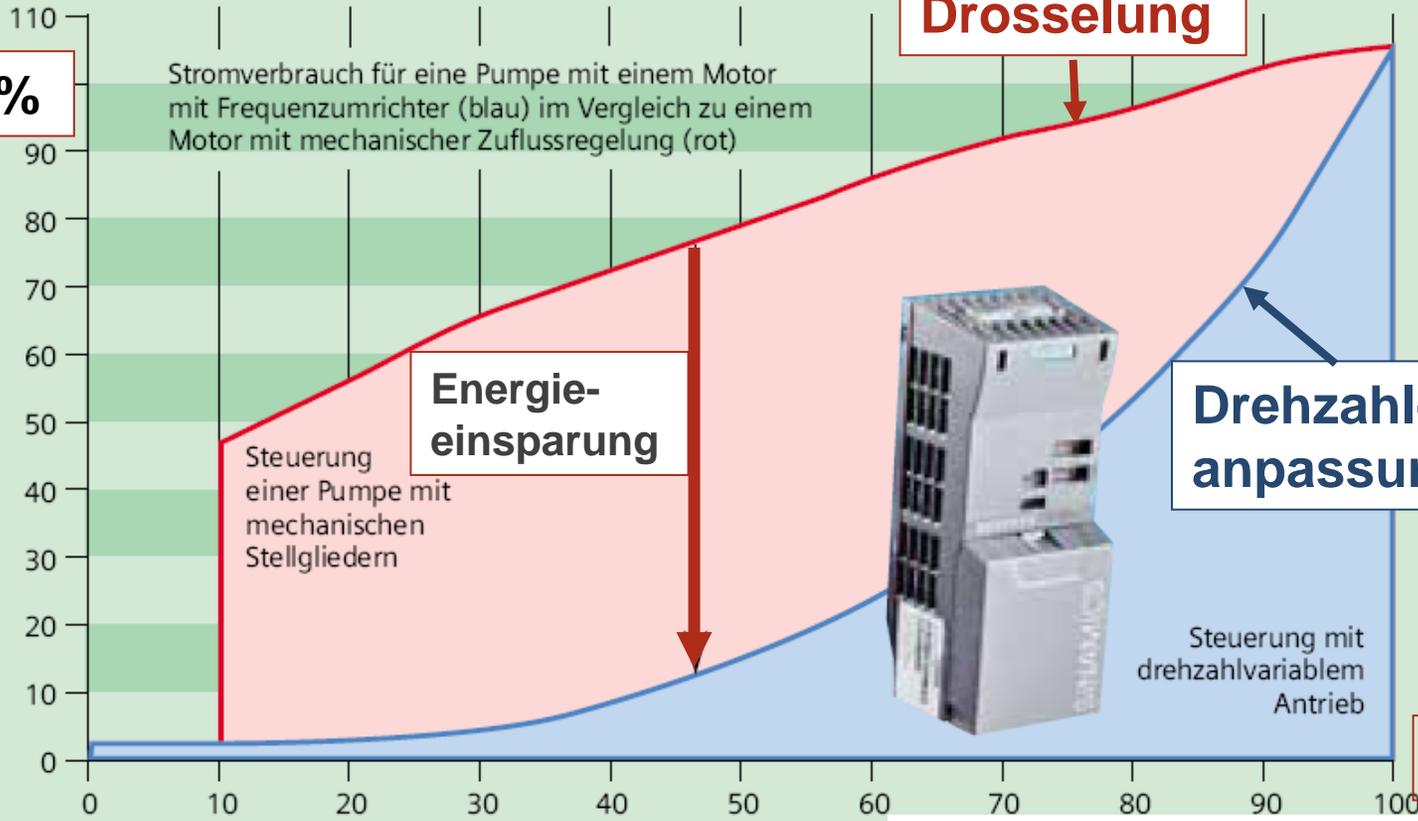
Vermeidung der Drosselverluste: Bis zu 60% Energieeinsparung !

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

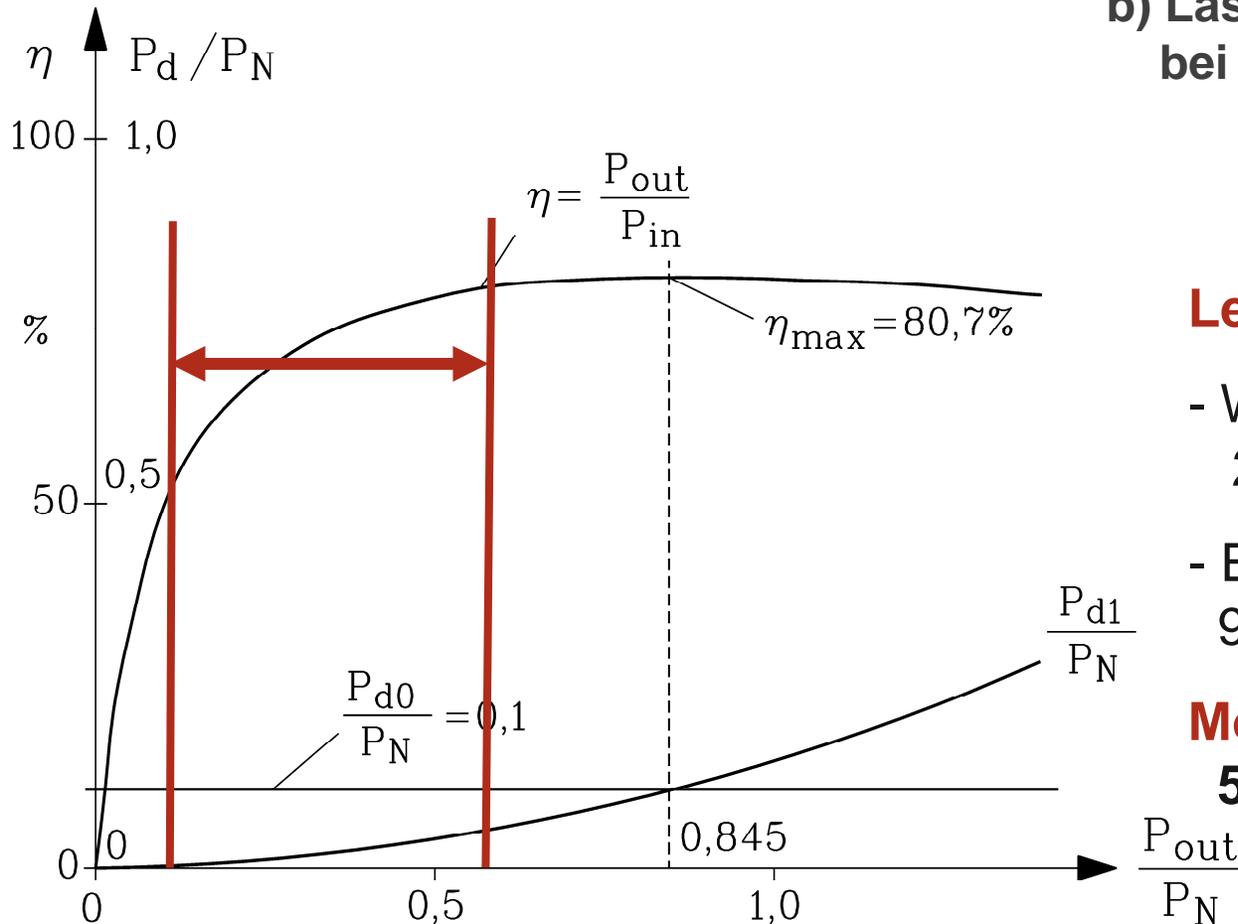
Motor um 72 % überdimensioniert: $1.2 \cdot 1.2 \cdot 1.2 = 1.73$



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

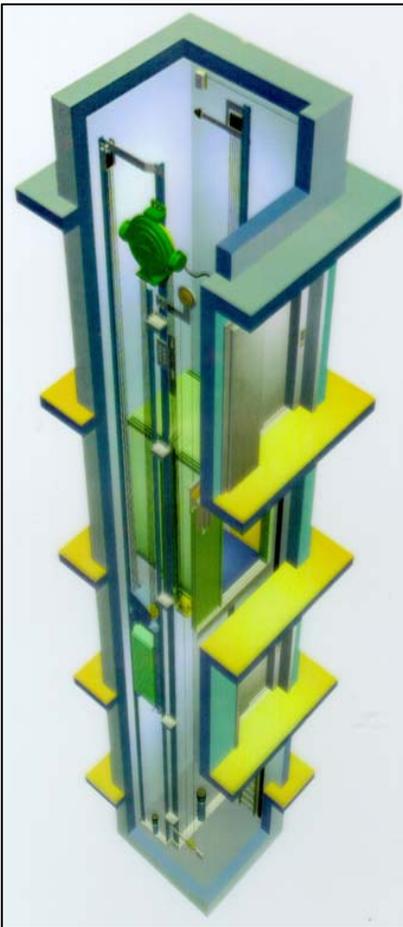
- a) **Alter Antrieb:**
- Festdrehzahlantrieb 8.8 kW-E-Motor,
 - polumschaltbar „langsam-schnell“
 - konventionelles Getriebe
 - mechanisches Bremsen
- b) **Neuer Antrieb:**
- 7.5 kW-E-Motor
 - Drehzahlveränderung über Umrichter
 - Verlustarmes Getriebe – Synthetiköl
 - Energierückspeisung beim Bremsen

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

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

Quelle: ZVEI

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**

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

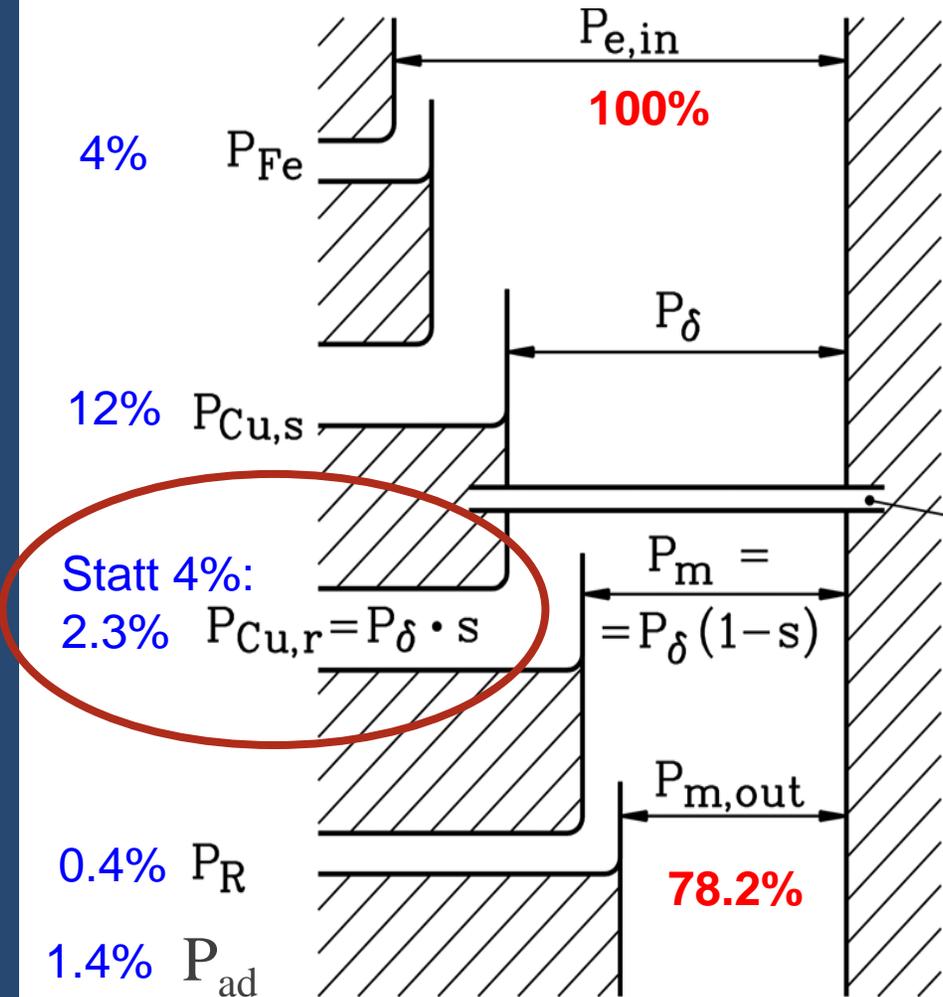


Quelle: SEW-Eurodrive, Deutschland

- **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:

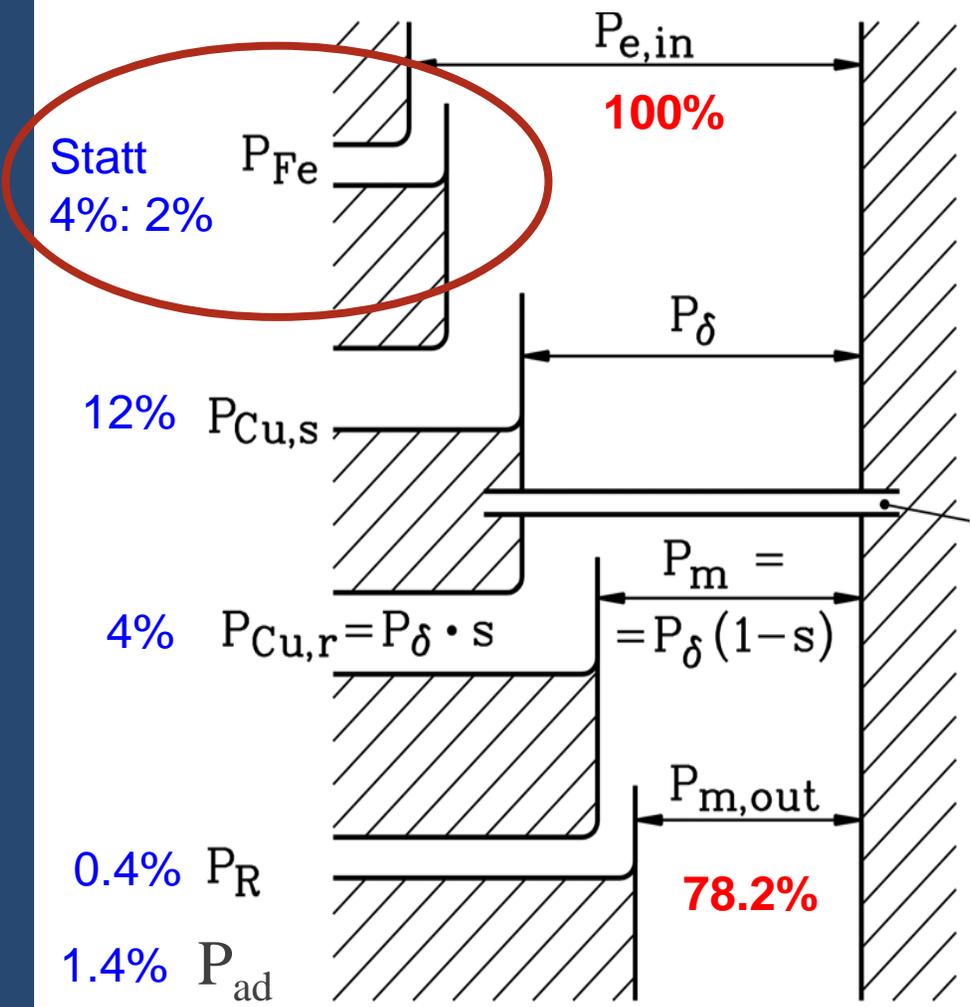
Einführung der Kupferdruckguss-Technik (Rotguss statt Aluminiumdruckguss): $P_{Cu,s}$ und $P_{Cu,r}$ sinken !



Quelle: SEW-Eurodrive, Siemens

Verlustarmes Dynamoblech

Verluststruktur:

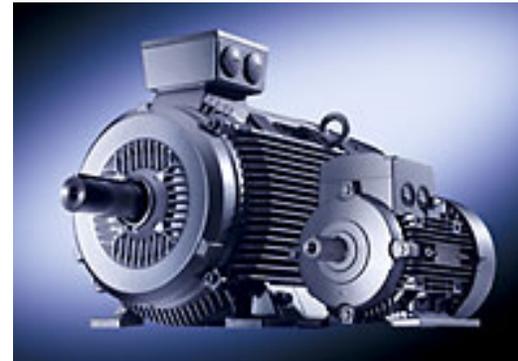


Verlustarmes Dynamoblech –

- 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 !

- **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 !

- **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

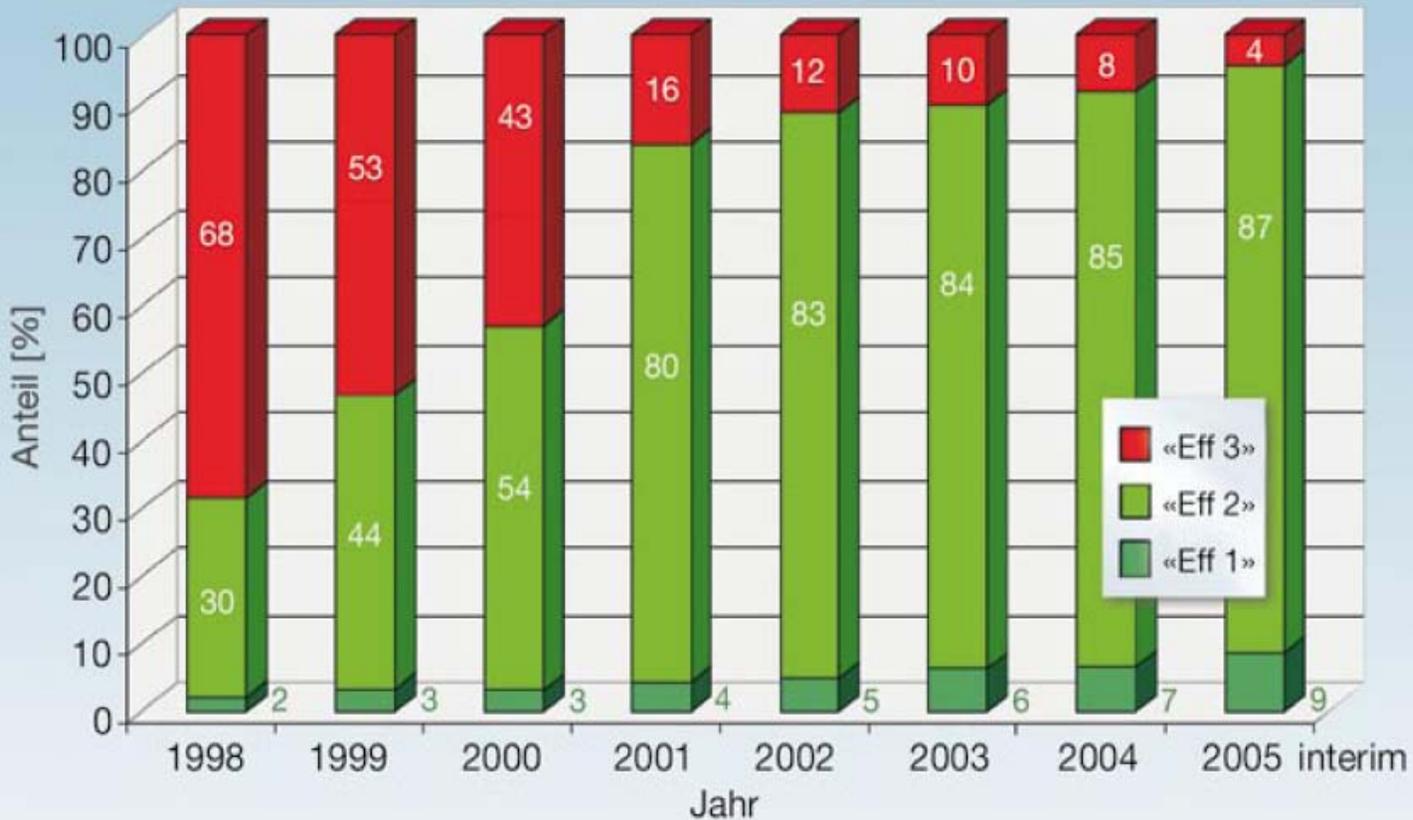
Amortisationszeit: $185 / 95.4 = 1.9 = \text{ca. } 2$ Jahre

Quelle: SEV Bulletin, 2005



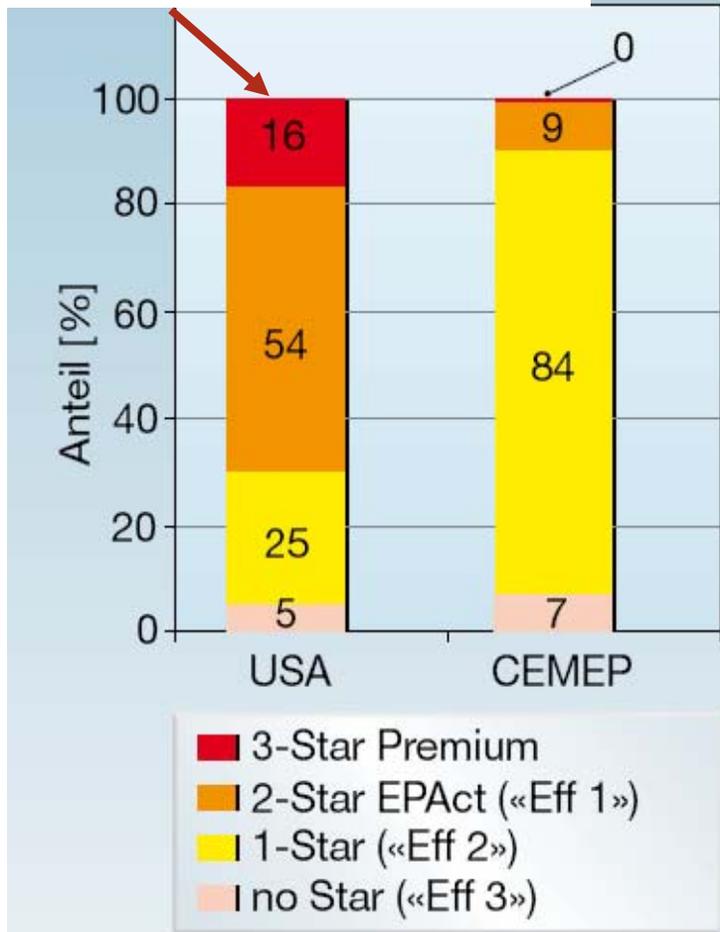
CEMEP: Marktentwicklung Standardmotoren

- 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 PM-Synchronmotoren – medium speed

Quelle: TU Darmstadt

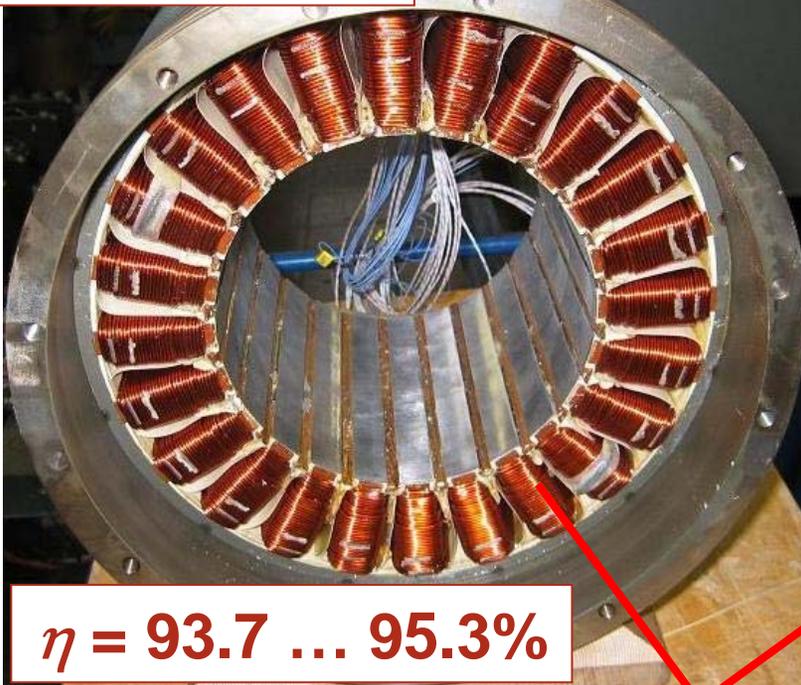
Kompakte Stator-Kupfer-Wicklung – geringere Stromwärmeverluste

Kühlmantel

Zahnspule

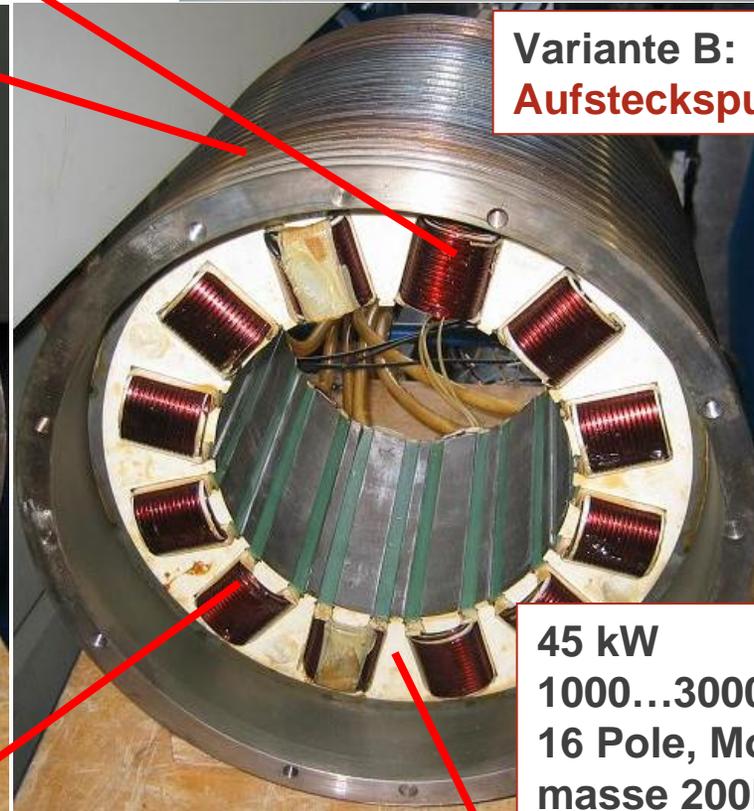


Variante A: Runddrahtnadelwicklung



$\eta = 93.7 \dots 95.3\%$

Variante B: Aufsteckspulen



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

Stator-Wicklung

Blechpaket

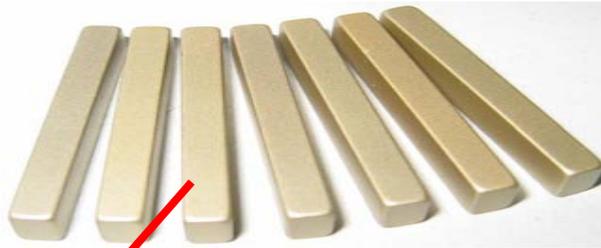
Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik



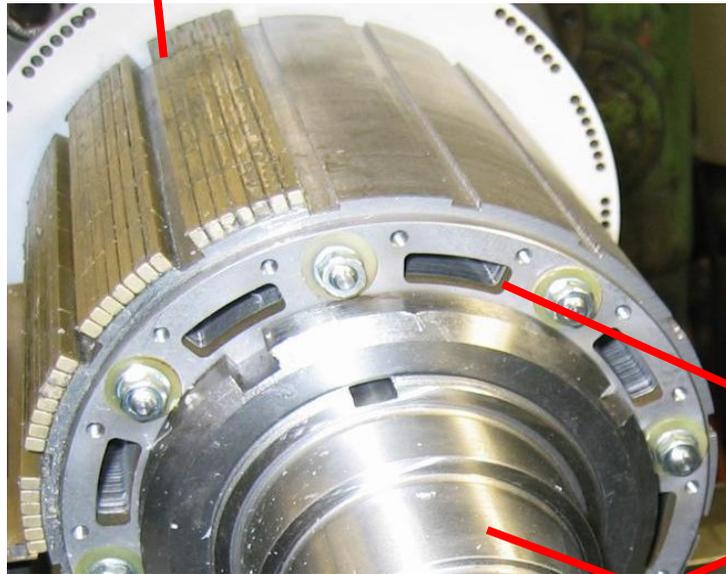
Umrichter gespeiste Permanentmagnetmotoren für Industrieantriebe

Quelle: TU Darmstadt

Permanentmagnete erzeugen verlustfrei das Magnetfeld



Magnete



Welle

Kohlefaserbandage



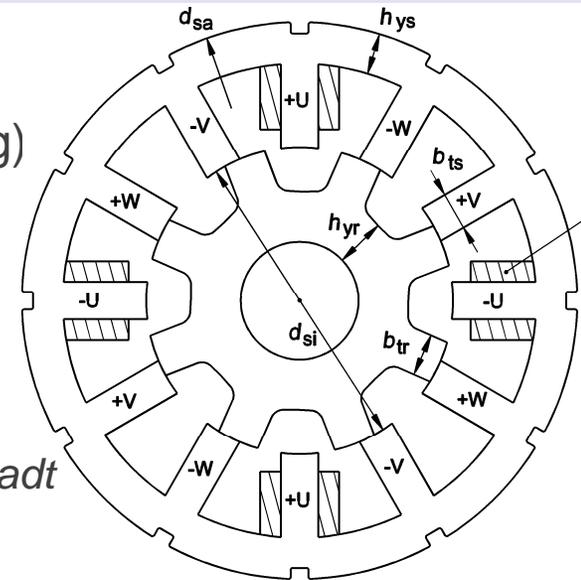
45 kW
1000...3000/min
16-polig, 200 kg

Rotorblechpaket

Geschalteter Reluktanzmotor: (Umrichterspeisung)

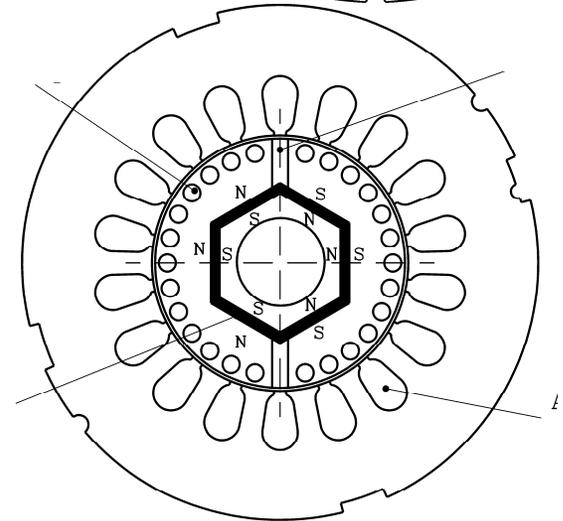
- Einsatz als drehzahlveränderbarer Antrieb
- Guter Teillast- und Vollastwirkungsgrad (i. a. höher als umrichtergespeister Norm-Asynchronmotor)
- ABER: spezielle Motor-/Umrichterbauform, ev. geräuschanfällig

Quelle: TU Darmstadt



Netzgespeiste PM-Synchronmaschinen:

- Festdrehzahl-Antrieb
- Statt Norm-Asynchronmotor:
besserer Wirkungsgrad
- ABER: Anlaufmoment durch PM-Bremsmoment verringert



- **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

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

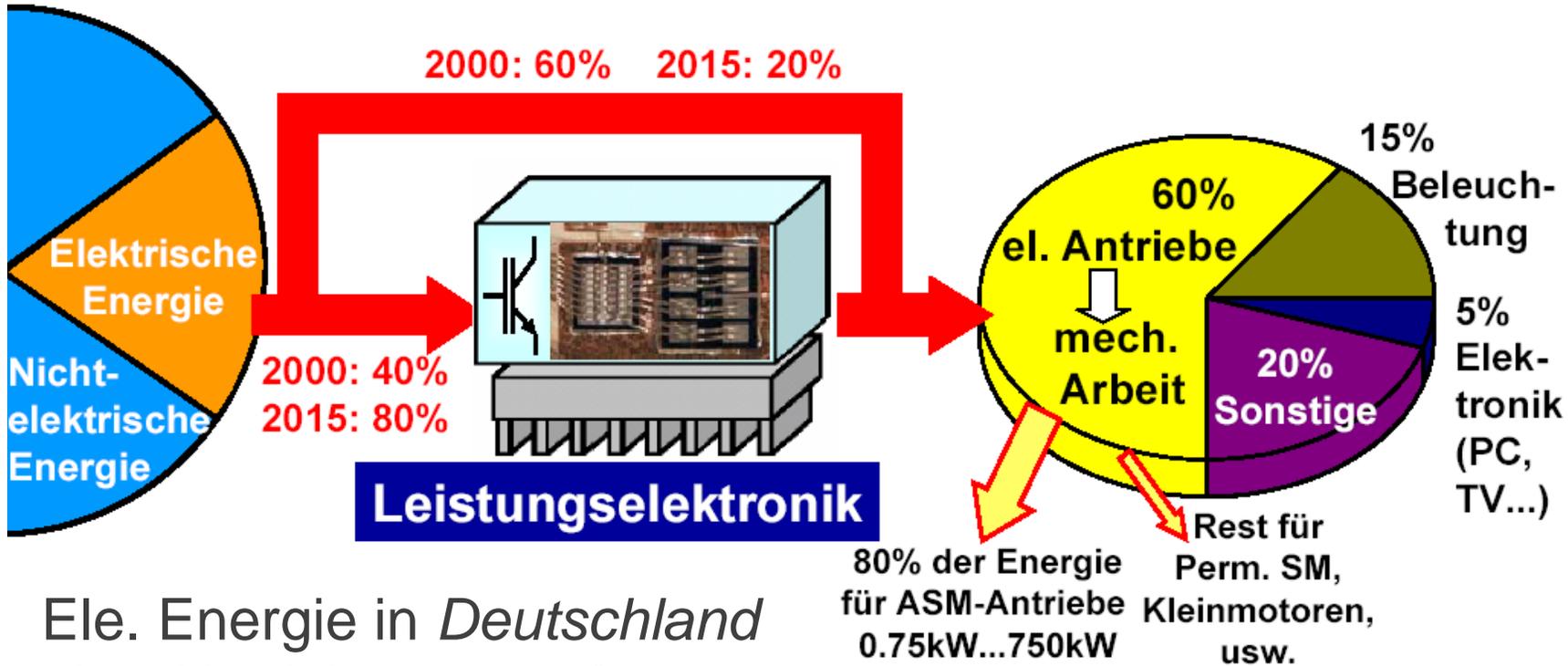
f_s : Ständerfrequenz

p : Polpaarzahl

n_{syn} : Synchrondrehzahl

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

Umrichterspeisung nimmt zu !



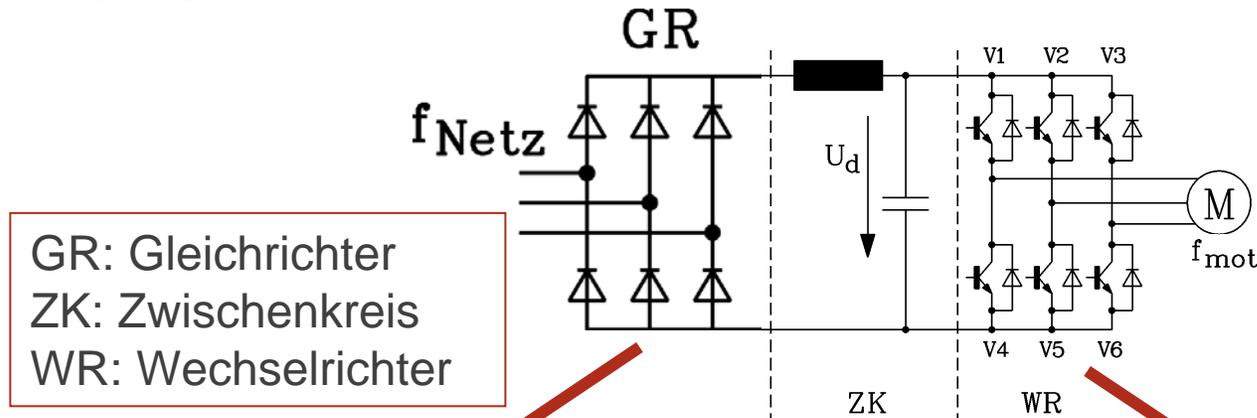
Ele. Energie in *Deutschland* über Umrichter umgeformt:

2000: 40%

2015: 80%

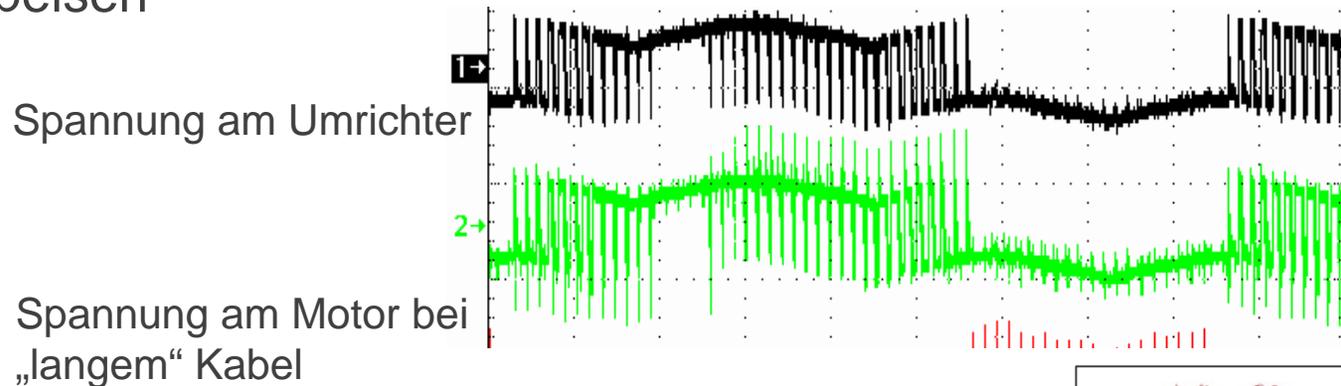
Quelle: etz-Zeitschrift, 2007

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

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



Quelle: SEW-Eurodrive

Hochdrehzahlantriebe

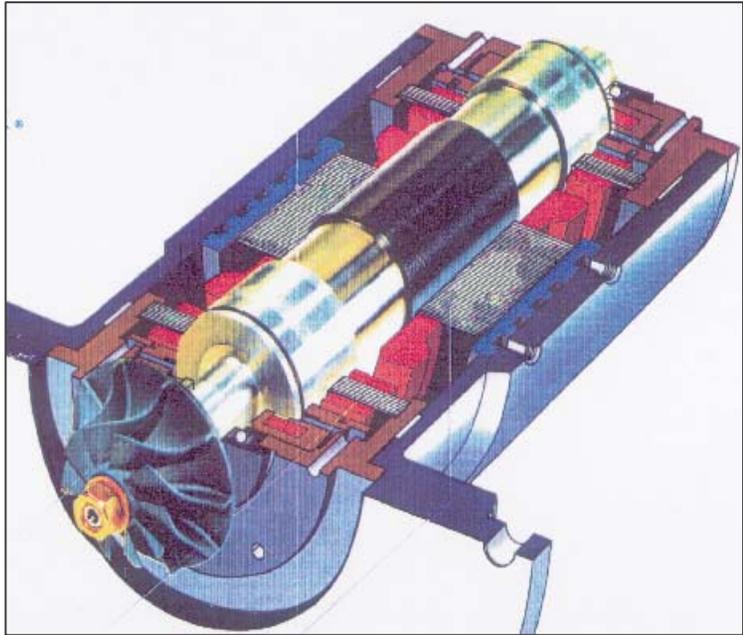
- Hochdrehzahlanwendungen:
 - Turbo-Kompressoren
 - Turbomolekular-Vakuumpumpen
 - High-speed Drehen & Fräsen
 - Generator-Motor für Schwungräder
 - Generatoren für Mikrogasturbinen
 - E-Antriebe für Turbolader

- 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

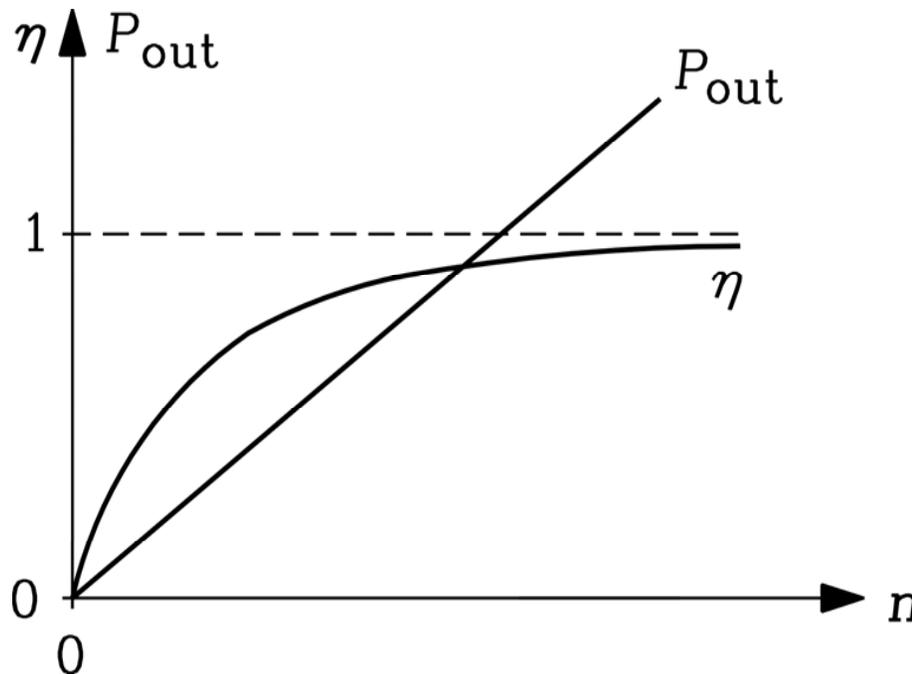
n: Drehzahl, M: Drehmoment



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



I : Strom
 R : ele. Widerstand
 A : Strombelag
 B_δ : magn. Flussdichte
 Φ : magn. Fluss pro Pol
 p : Polpaarzahl des Motors
 d : Motorläufer: Durchmesser
 l_{Fe} : Motorläufer: Länge
 m : Wicklungsstrangzahl (i. a. 3)



15000/min, 4 MW Käfigläufer-Asynchronmotor

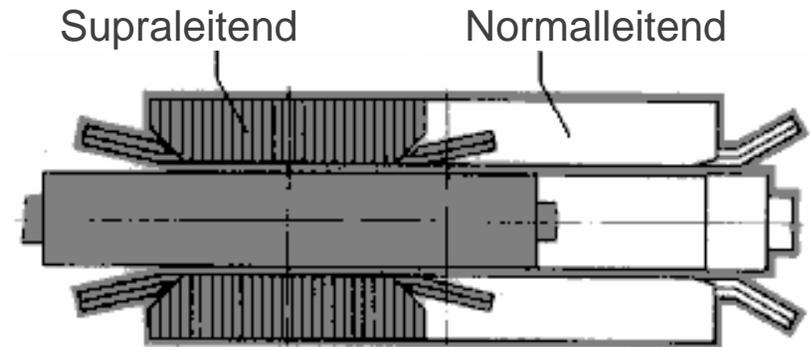
- Antriebe für **Gaspipeline**-Kompressoren
- Typisch 4 MW, 15000/min, 2.5 kNm ... 16 MW, 6000 /min, 25.5 kNm
- Kupferkäfig, 2-polig, **massiver** Eisenrotor, **ca. 240 m/s**
- **Aktive Magnetlagerung**, rotiert oberhalb der ersten Biegeeigenfrequenz
- Mittelspannungs-IGBT-PWM-Spannungszwischenkreisumrichter

Quelle: Siemens AG

- **Werkzeugmaschinen:** Hochtourige Spindelantriebe für Drehen und Fräsen, Asynchron- und Synchronbauart mit Permanentmagneten (mit Feldschwächung), letzteres wegen kühlem Läufer (Werkstückerwärmung) bevorzugt.
- **Turbomolekularpumpen:** magnetgelagert wegen extremen Vakuumbedingungen.
- **Schwungradspeicherantriebe:** magnetgelagert wegen Verlustarmut, Synchron-Permanentmagnetmaschinen wegen geringen Verlusten.
- **Turboverdichter (Schaufel-Kompressoren):** hohe Drehzahl erlaubt kleine Bauweise des Kompressors trotz hohem Druck, teilweise auch magnetgelagert wegen Verlusten.
- **Starter-Generator in Flugtriebwerken:** redundante Wicklungsausführung aus Sicherheitsgründen, Switched-Reluctance-Antrieb ausgeführt wegen robuster Läuferbauform

Entwicklung:

- Hochtemperatur-Supraleiter anstelle Kupferleiter
- Kühlung: Flüssiger Stickstoff
- Synchronmaschine
- Kleineres Bauvolumen
- Höherer Wirkungsgrad
- Höhere Überlastfähigkeit



Quelle: Prof. Liese, TU Dresden

Mögliche Einsatzgebiete: (im kleineren Leistungsbereich)

Einbau-Motoren in großen Kältekompressoren anstelle von Kryomotoren

Direktantrieb versus Getriebemotor

- PM-Torque-Antrieb getriebelos
- Asynchron-Getriebemotor
- PM-Synchron-Getriebemotor

Vergleich: 4000 Nm, 200/min, 84 kW, Wassermantelgekühlt:

Umrichterbetrieb: Wirkungsgrad ca. 97% (hier: 100%)

Getriebewirkungsgrad im Mittel 95%.

Bezeichnung	Permanent- erregter Torquemotor	Asynchron- Getriebe-motor	Permanterregter Synchron- Getriebemotor
Getriebeübersetzung	-	12.8	9.4
Motordrehzahl	200	2552	1871
Verlustleistung	7365	11865	8075
Wirkungsgrad	91.9	87.6	91.2
Achshöhe	280	160	160

Der Gesamtwirkungsgrad im Nennpunkt für den hochpoligen Direktantrieb (Torque-Motor mit Zahnspulenwicklung) mit 91.9% am höchsten.

Getriebe-Motoren: durch den Getriebewirkungsgrad (ca. 95 ... 97%) etwas verschlechtert.

Quelle: K. Greubel, A. Storath, Siemens AG

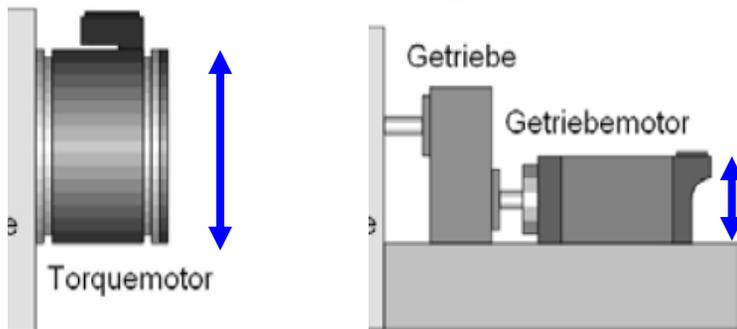


Direktantrieb versus Getriebemotor

- **Höhere Energieeffizienz** des getriebelosen Antriebs im Drehzahlspiel 0 ... 200/min !

- PM-Torque-Antrieb getriebeles	86.9%
- Asynchron-Getriebemotor	77.1%
- PM-Synchron-Getriebemotor	85.7%

- **ABER: Spezieller Torque-Motor** (Kosten !)
Größerer E-Motor getriebeles: AH 280 statt 160 mm !

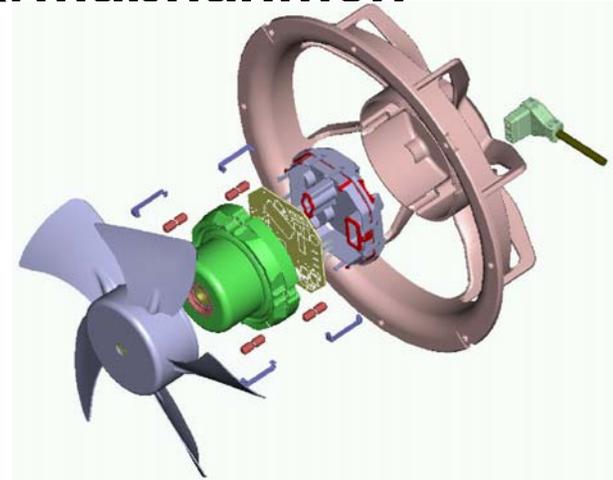


Ab Getriebeübersetzung $i = 1:10$ wird getriebeleser Motor zu groß!

- **Deutlich höhere Dynamik** des Direktantriebs:
 Zykluszeit: - **PM-Torque-Antrieb getriebeles** **22 ms**
 - **Asynchron-Getriebemotor** **51 ms**
 - **PM-Synchron-Getriebemotor** **38 ms**

Quelle: K. Greubel, A. Storath, Siemens AG

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

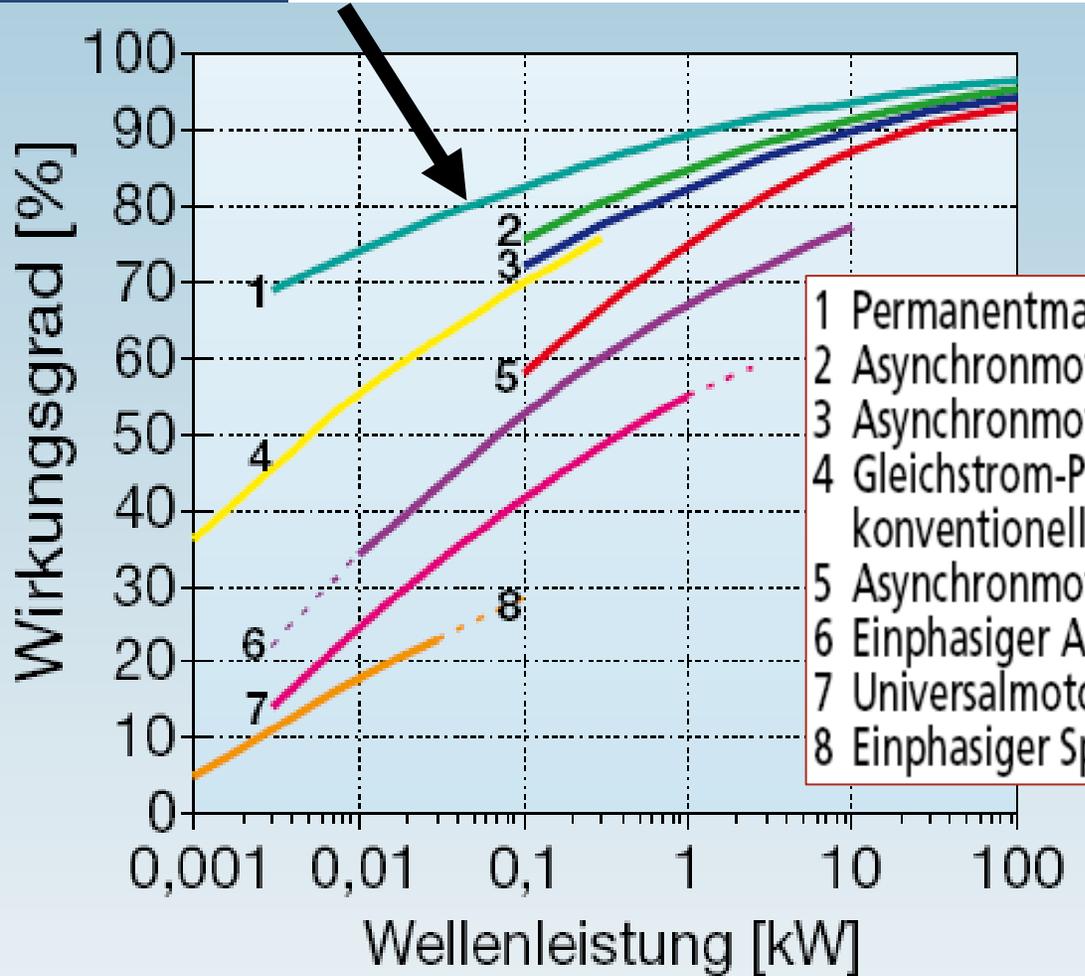


Quelle:
ebm, Künzelsau

- **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

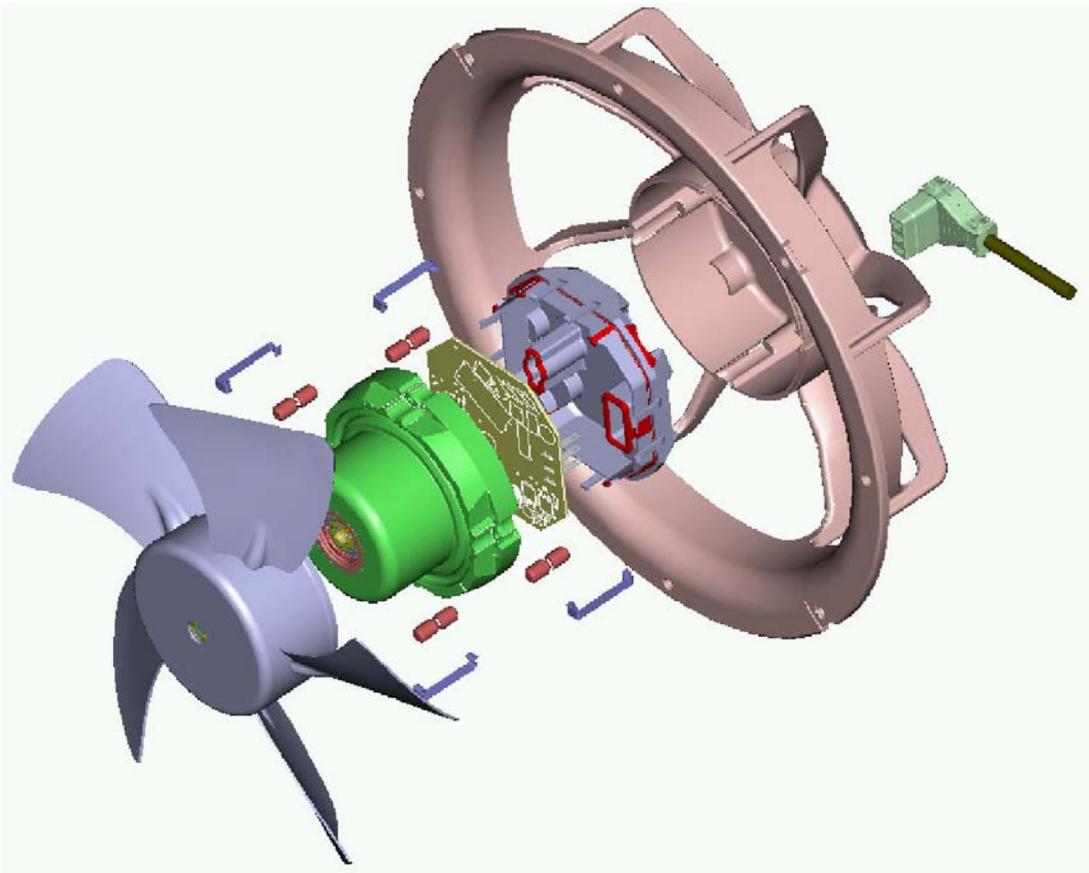


- 1 Permanentmagnetmotor spezial, elektronisch
- 2 Asynchronmotor, 3-Stern ***
- 3 Asynchronmotor, 2-Stern **
- 4 Gleichstrom-Permanentmagnetmotor, konventionell
- 5 Asynchronmotor, 1-Stern *
- 6 Einphasiger Asynchronmotor, Betriebskondensator
- 7 Universalmotor (Kollektormotor)
- 8 Einphasiger Spaltpol-Asynchronmotor

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