

Die Zukunft der Antriebstechnik

Märkte und Entwicklungen

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Reichert, ETH Zürich

email: reichert@ee.ethz.ch

Prof. Dr.-Ing. habil. A. Binder, TU Darmstadt

email: abinder@ew.tu-darmstadt.de



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ETH Zürich
Prof. K. Reichert

Institut für Elektrische
Energiewandlung, Prof. A. Binder
FB 18 • Elektrotechnik und
Informationstechnik



Inhaltsübersicht

- **Anwendungsgebiete / Märkte** elektrischer Antriebe - Steigerungspotentiale
- **Neue Einsatzgebiete**
- **Technische Entwicklungen - Aktuelle Forschungsschwerpunkte**
- **Antriebs-System-Technik vom Netz zur Arbeitsmaschine**
- **Vernetzte Antriebe**
- **Entwicklung: Wartung - Diagnose / Monitoring**
- **Ausblick**



Inhaltsübersicht

- **Anwendungsgebiete Märkte elektrischer Antriebe - Steigerungspotentiale**
- **Neue Einsatzgebiete**
- **Technische Entwicklungen - Aktuelle Forschungsschwerpunkte**
- **Antriebs - System - Technik vom Netz zur Arbeitsmaschine**
- **Entwicklung: Wartung - Diagnose/Monitoring**
- **Vernetzte Antriebe**
- **Ausblick**



Quelle: ELIN



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ETH Zürich
Prof. K. Reichert

Institut für Elektrische
Energiewandlung, Prof. A. Binder
FB 18 • Elektrotechnik und
Informationstechnik



Die technische Welt **beruht** auf elektrischen Maschinen

Elektrische Energie ~ 20% der Gesamtenergie

→ Erzeugung: nahezu 100% mit Synchronmaschinen

→ Verbrauch: >50% mit Elektromotoren

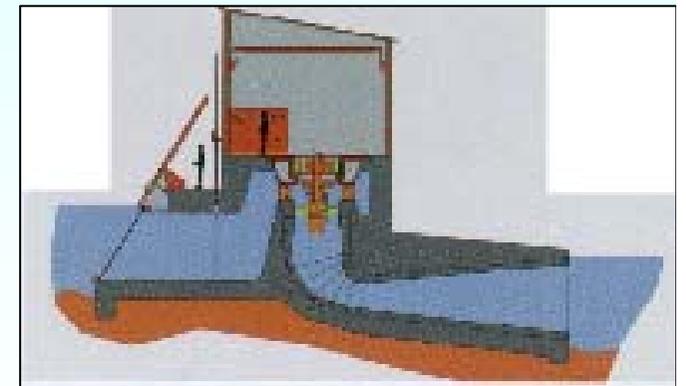
Industrieländer: 20 - 40 Elektrische Maschinen/Kopf

Beispiel: Schweiz, mehr als 200 Mio. elektrische Maschinen

Energiewandlung: >50 Mrd. CHF Investitionen
>15 Mrd. CHF p.a. Umsatz



Quelle: Siemens



Quelle: Oswald



Elektrische Maschinen sind „ideale“ elektromechanische Energiewandler

- Sehr hoher Wirkungsgrad 80% (ca.1kW) ... 99% (ca. 1GW)
- Zentral und dezentral einsetzbar
- abgasfrei , sauber , geräuschfrei
- anpaßbar , steuerbar , regelbar
- Leistungsbereich $10^{-9}W$... 10^9W , $f < 100$ kHz
- Vollständig recyclebar , hoher Entwicklungsstand



Quelle: Siemens



Elektromechanische Energiewandlung: ein **Wachstumsgebiet** !

- Energiebedarf weltweit steigend
- „Mechatronisierung“ benötigt elektrische Maschinen
 - Neue Technologien und Prozesse werden möglich
 - Ersatz und Schaffung von Arbeitsplätze
- Elektrische Maschinen erschließen neue Energiequellen und Energieerzeugungsformen:
 - Wind, – Gezeiten , – Small Hydro Power , – Micro-Gas-Turbinen
- Elektrische Maschinen und drehzahlvariable Antriebe ermöglichen Energiesparen -> Sparpotential in der Antriebstechnik



Quelle: ELIN



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ETH Zürich
Prof. K. Reichert

Institut für Elektrische
Energiewandlung, Prof. A. Binder
FB 18 • Elektrotechnik und
Informationstechnik



Anwendungsgebiete / Märkte elektrischer Antriebe

Industrie:

- Maschinen /Apparate
- Chemie
- Zellstoff/Papier
- Metallbearbeitung
- Textil
- Nahrungsmittel
- Steine/Erden
- Kunststoffe



Quelle: DaimlerChrysler

Verkehr:

- Bahn
- Automobile
- Schiffe
- Flugzeuge



Quelle: ELIN

Haushalt

Gewerbe

Landwirtschaft

Konsumgüter



Quelle: Siemens



Der Weltelektromarkt **wächst !**

■ 1995 ■ 2010

Südostasien / Japan / China 592 1935 +226%

USA / NAFTA 480 1161 +141%

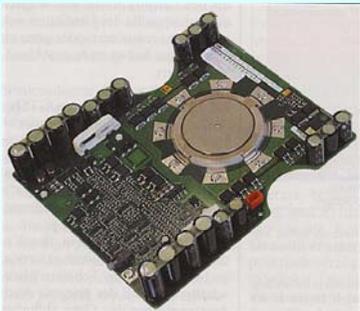
Europa 416 860 +107%

Welt 1600 4300 +169%

0 1000 2000 3000 4000 5000 6000
Angabe in Mrd.Euro



Quelle: ELIN



Quelle: Siemens

- Mittlere Wachstumsrate real 1995 - 2010 : 6.8% p.a.
- Stand 1998: Welt: 2150 Mrd. Euro
Anteil Europa 500 Mrd. Euro = 23 %



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

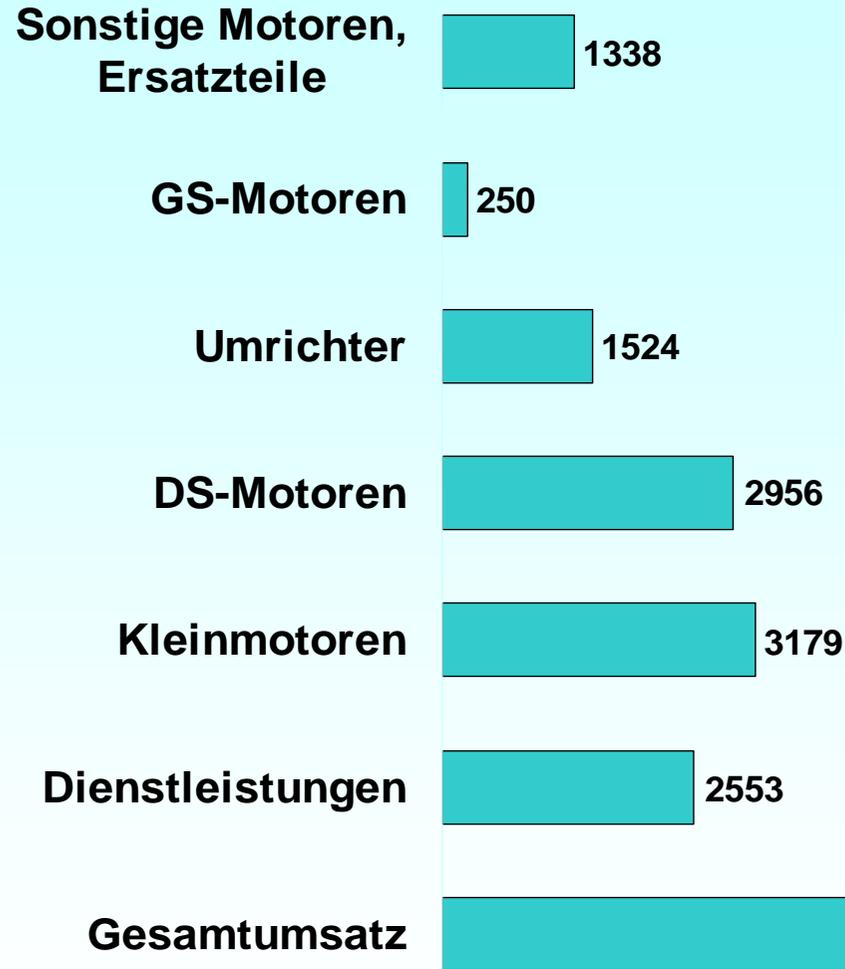
ETH Zürich
Prof. K. Reichert

Institut für Elektrische
Energiewandlung, Prof. A. Binder
FB 18 • Elektrotechnik und
Informationstechnik



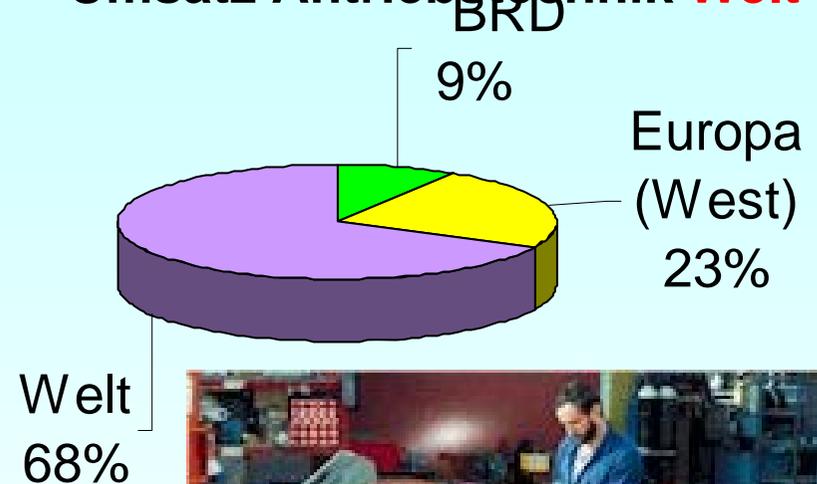
Produktion und Umsatz in der elektrischen Antriebstechnik

Umsatz Antriebstechnik Deutschland



Angabe in Mio. DM

Umsatz Antriebstechnik Welt



Quelle: ELIN

Quelle: ZVEI



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ETH Zürich
Prof. K. Reichert

Institut für Elektrische
Energiewandlung, Prof. A. Binder
FB 18 • Elektrotechnik und
Informationstechnik



Beispiel: Kleinmotoren

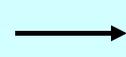
Europäischer Markt:

1999



2006

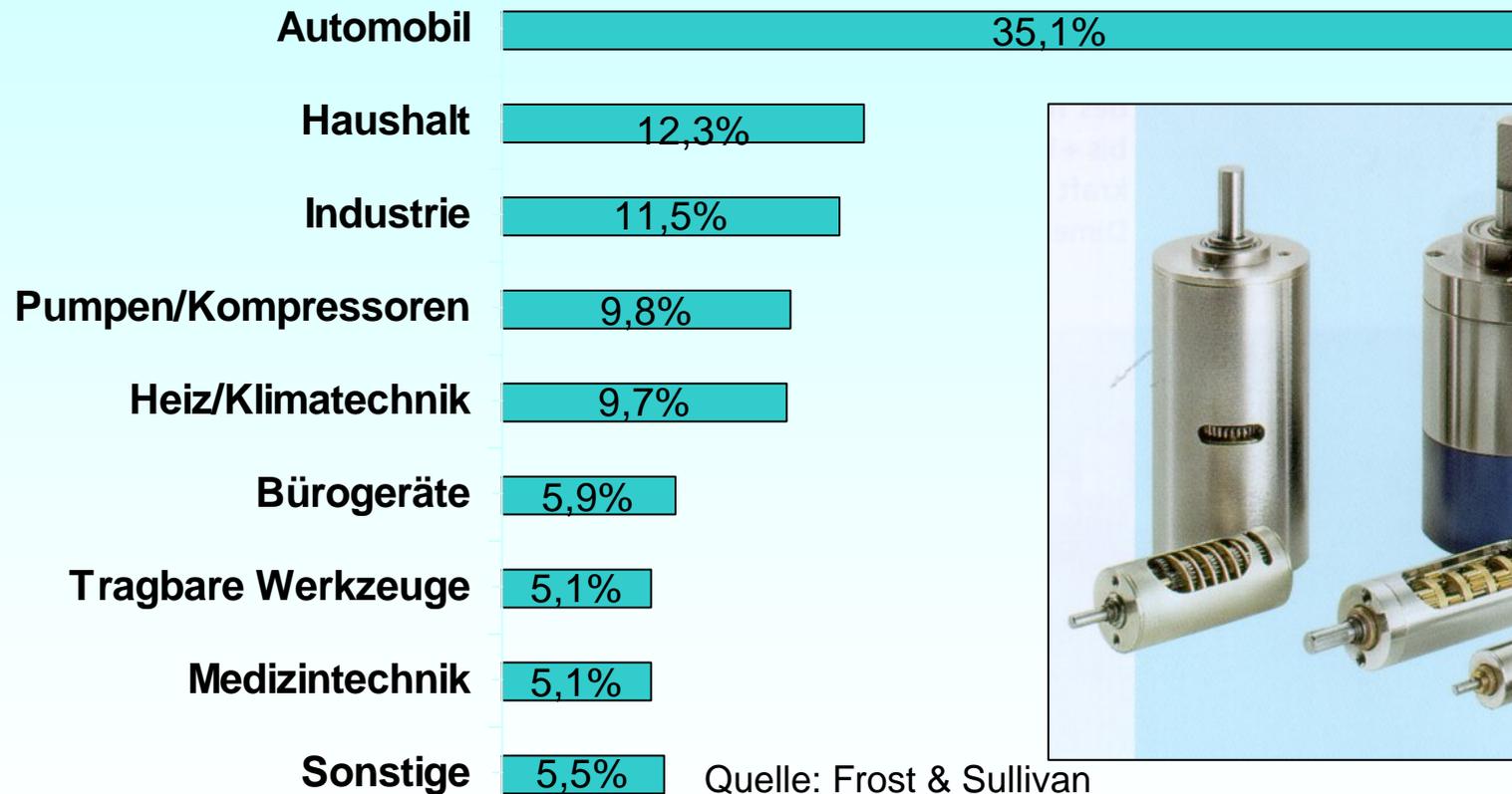
4,4 Mrd Us \$



5,4 Mrd Us \$

+3% p.a.

Anwendungen:



Quelle: Frost & Sullivan



Quelle: Faulhaber



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ETH Zürich
Prof. K. Reichert

Institut für Elektrische
Energiewandlung, Prof. A. Binder
FB 18 • Elektrotechnik und
Informationstechnik



Mehr elektrische Antriebe

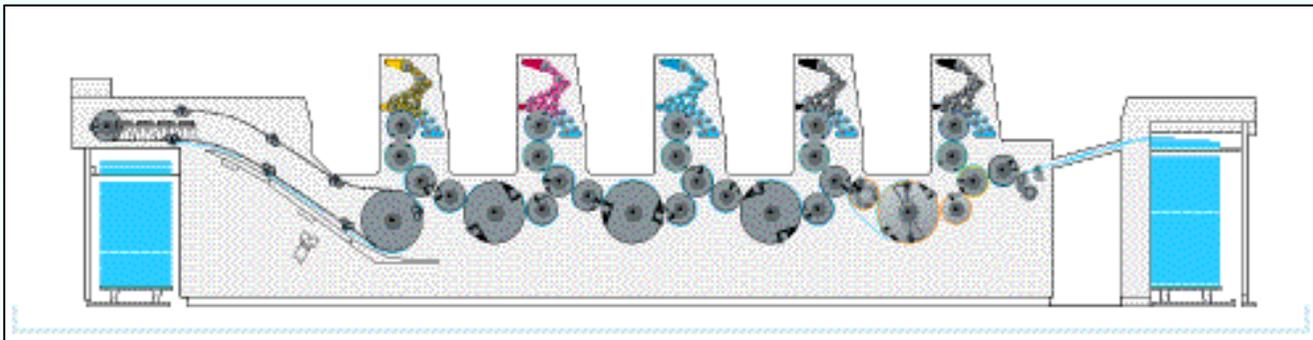
- **Industrie:** - **Ersatz mechanischer Komponenten** : Zentralantrieb durch verteilte Einzelantriebe ersetzt
- **Automobile:** - **Steer / Brake / Drive - by - wire** : Rasante Zunahme bei Kleinantrieben / Stellmotoren
 - Electric Propulsion, Brennstoffzellen-E-Auto, Hybrid-E-Auto
- **Schiffe:** **All-Electric-Ship** : Generation, Propulsion (drehzahlveränderbare „Gondel“ - Antriebe)
- **Flugzeug:** **Fly-by-wire**: Ersatz der Hydraulik durch Elektrik (All-Electric-Turbine)
- **Verteilte Energiesysteme:** „Mikro“-Gasturbinen mit **Hi-Speed-Generator** (50-200kW)
- **Konsumgüter:** **Kleinstmotoren** für Video / Audio, ...



Druckmaschinenantrieb



Ersatz der Königswelle mit dem Zentralantrieb durch verteilte, winkelsynchron drehende Einzelantriebe:
„Wellenlose“
Druckmaschine



Quelle: MAN-Roland



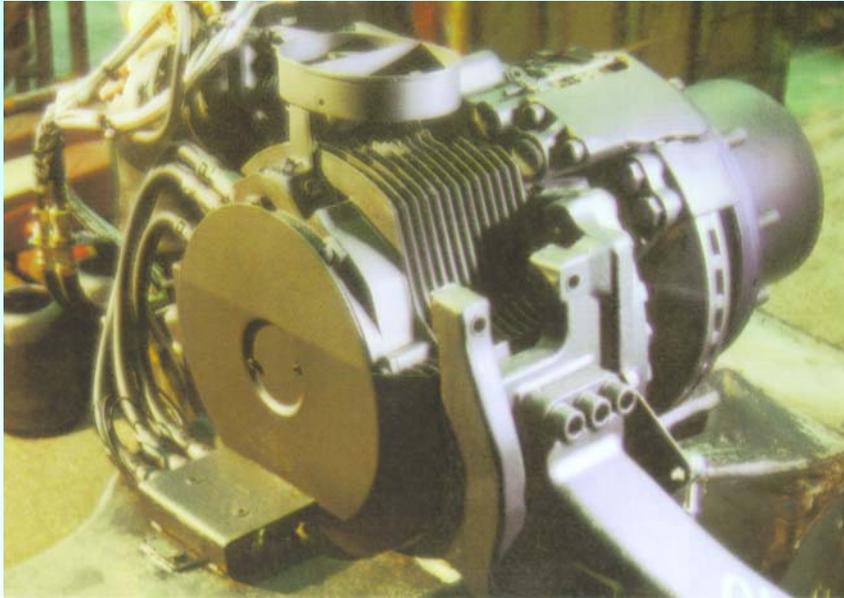
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ETH Zürich
Prof. K. Reichert

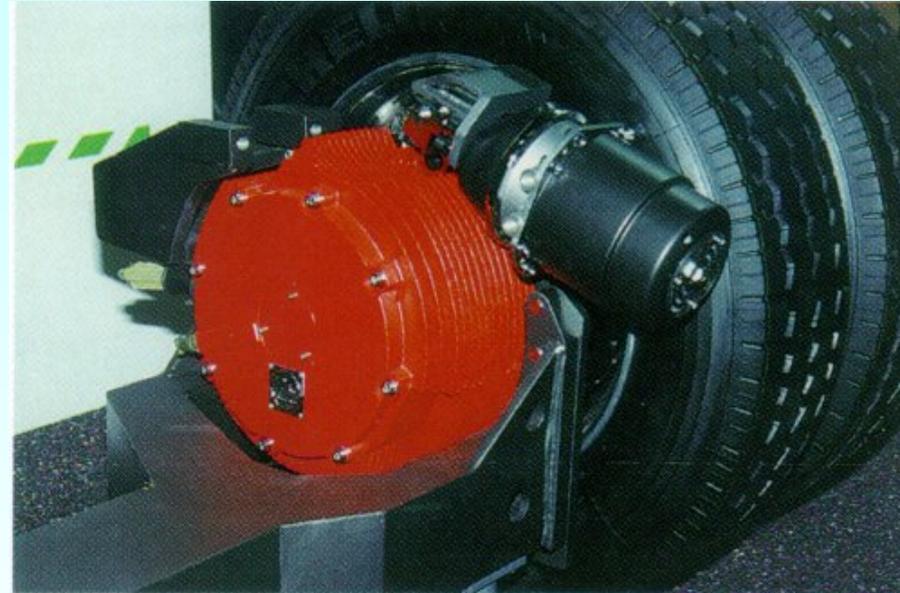
Institut für Elektrische
Energiewandlung, Prof. A. Binder
FB 18 • Elektrotechnik und
Informationstechnik



Radnabenantriebe für Niederflur-E-Busse mit Brennstoffzellen als Energiequelle



Quelle: Daimler-Chrysler



Quelle: Oswald



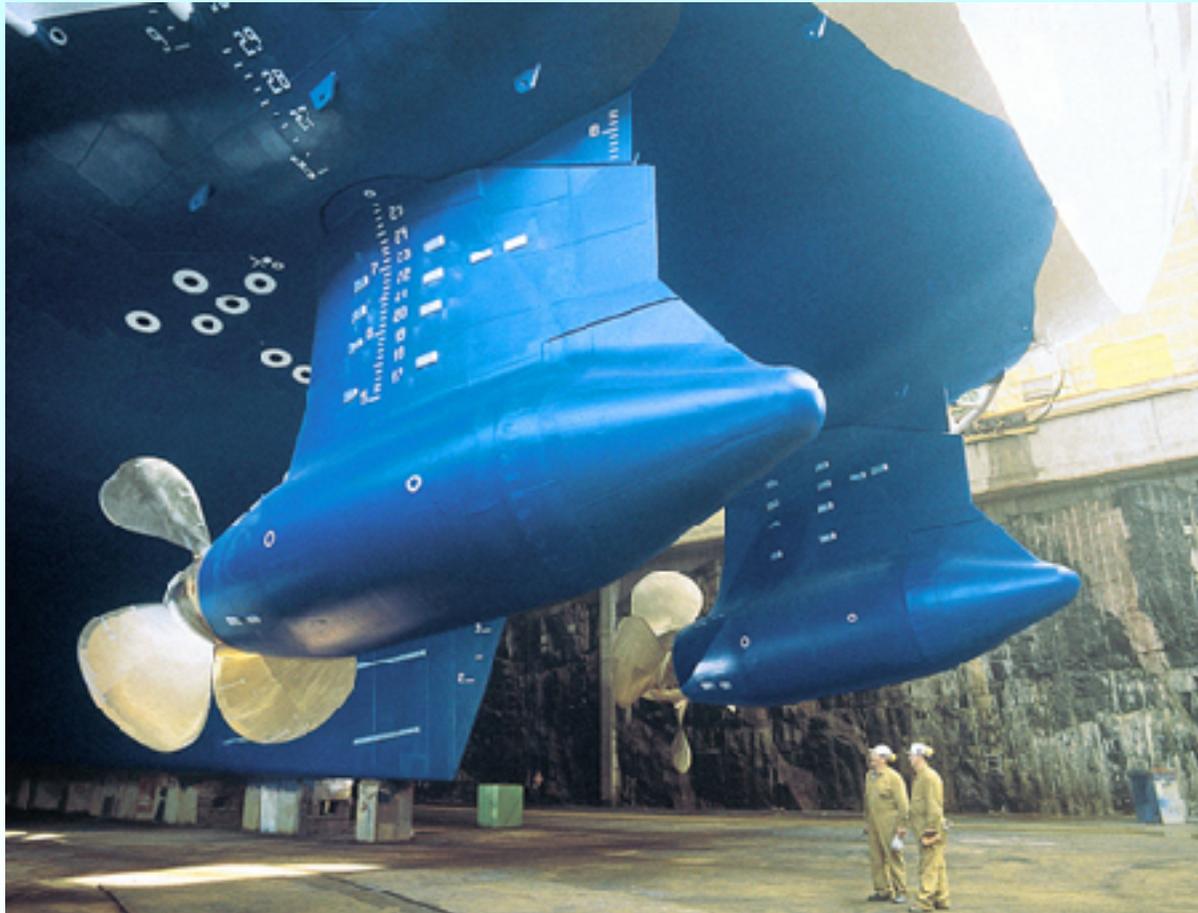
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ETH Zürich
Prof. K. Reichert

Institut für Elektrische
Energiewandlung, Prof. A. Binder
FB 18 • Elektrotechnik und
Informationstechnik



All - Electric - Ship



- Erhöhte Freiheitsgrade in der Manövrierfähigkeit
- Energieeinsparung durch Drehzahlveränderung
- Entfall des Steuerruders

Quelle: ABB



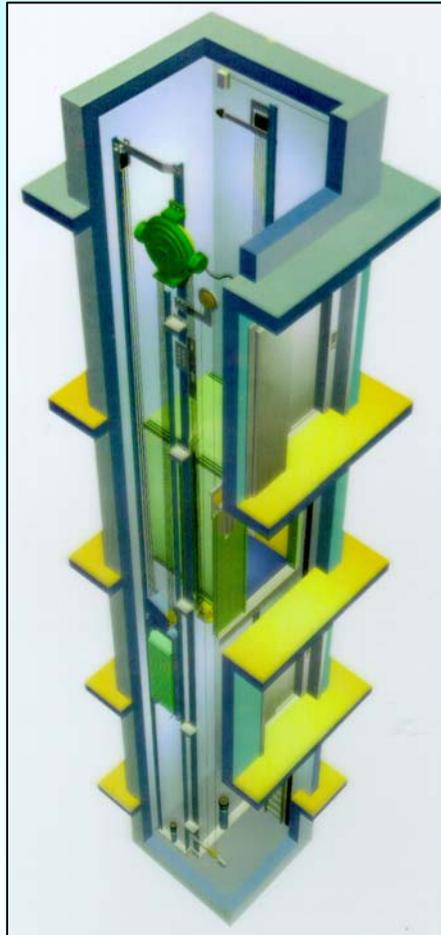
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ETH Zürich
Prof. K. Reichert

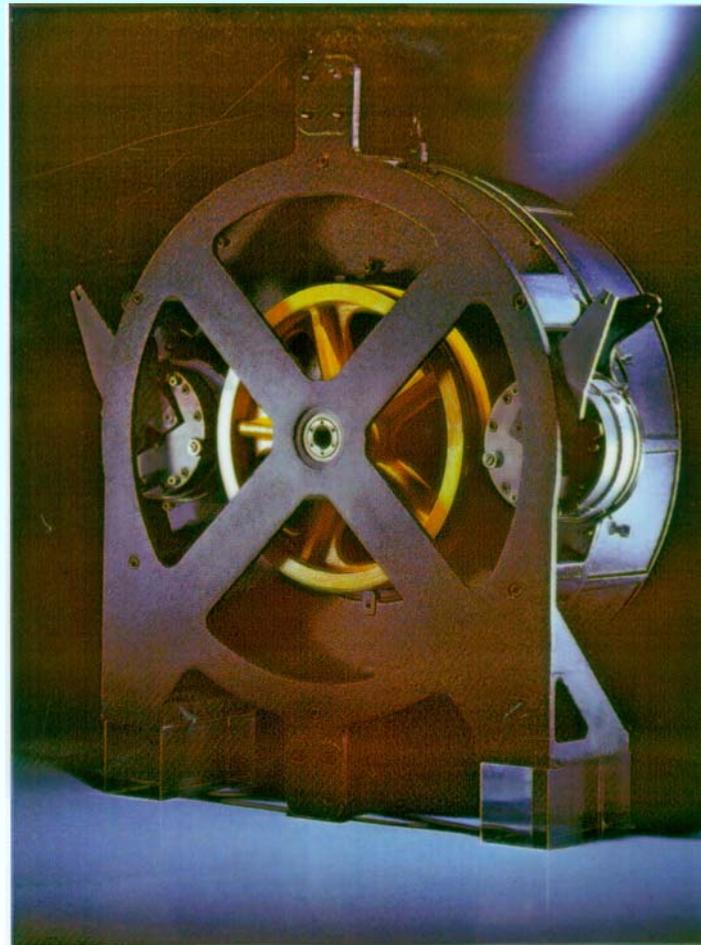
Institut für Elektrische
Energiewandlung, Prof. A. Binder
FB 18 • Elektrotechnik und
Informationstechnik



Aufzugdirektantrieb



Quelle: Kone



Quelle: Siemens

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



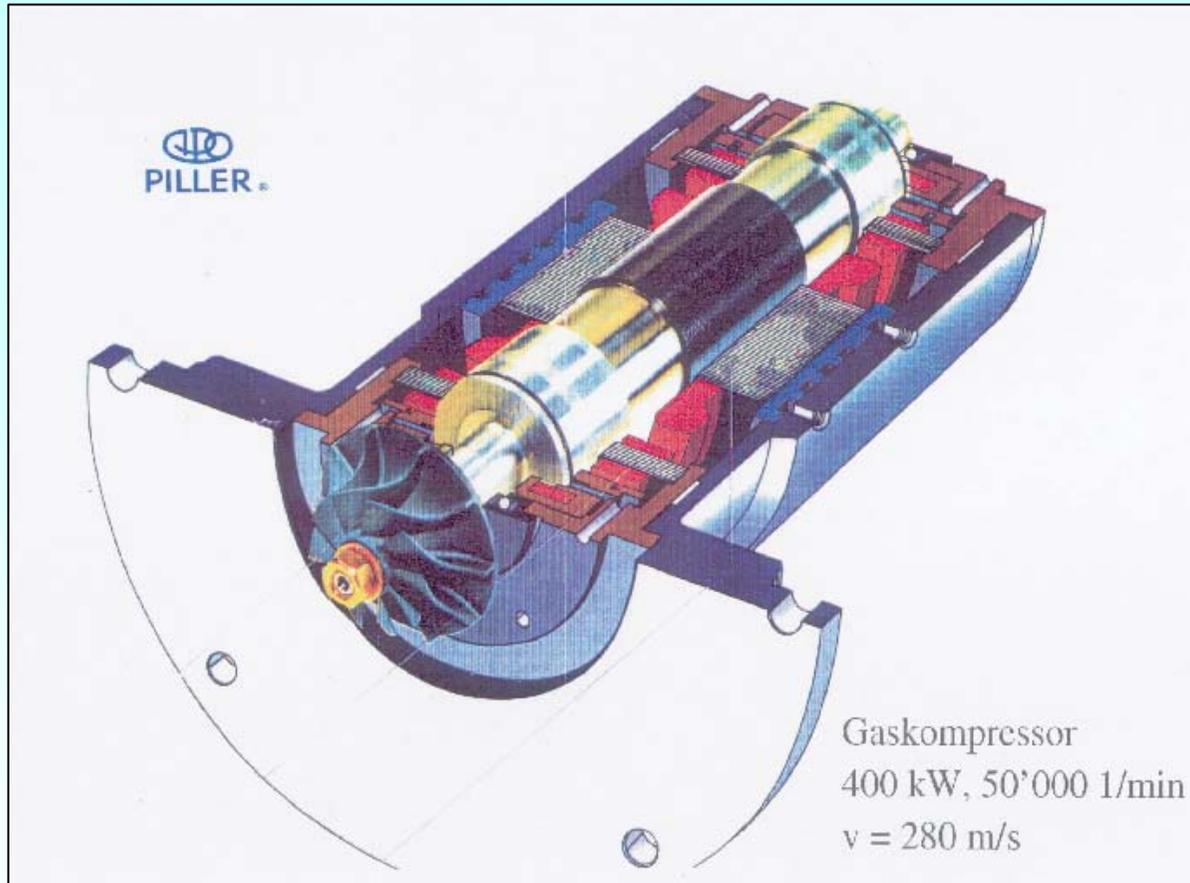
Neue Einsatzgebiete für elektrische Antriebe

Beispiele:

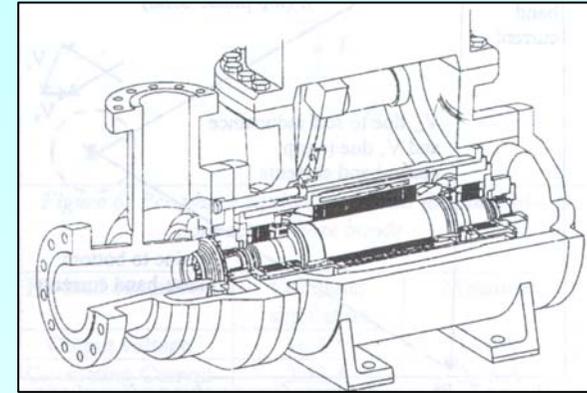
- **Maschinen / Apparate:**
 - Mechanische Komponenten → Verteilte E-Antriebe
 - Hydraulik → Direktantrieb
 - Transmissionswellen → synchronisierte Motoren
 - mech. Kurvenscheiben → elektronisch gesteuerte Positionierantriebe
- **Pumpen / Kompressoren:**
 - Festdrehzahlantrieb + Drosselventile → Drehzahlveränderbare Antriebe (Umrichter + Motor)
 - Pipeline: Kompressorstation mit Turbinenantrieb → Hi-Speed Motor
- **Textil:**
 - Strickmaschinen/ Webmaschine (Zentralantrieb für die Nadeln) → Je Nadel ein kleiner Linearmotor (variable Muster)



Gaskompressor: Verdichterstationen in Pipelines



Quelle: Piller



Quelle: Piller

- Magnetgelagerte Antriebe
- Kleine Abmessungen sehr hohe Leistung
- Deutlich verlustärmer als herkömmliche Turbinenantriebe



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

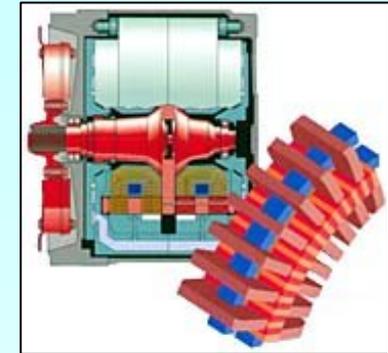
ETH Zürich
Prof. K. Reichert

Institut für Elektrische
Energiewandlung, Prof. A. Binder
FB 18 • Elektrotechnik und
Informationstechnik



Technische **Entwicklungen** bei elektrische Maschinen

- **Neue Topologien**
 - Switched Reluctance Drives: robust, billig
 - Modulare Synchronmaschine
 - Transversalflußmaschine



Quelle: Voith

- **Neue Werkstoffe**
 - Selten-Erd-Magnete erhöhte Energiedichte
 - Nichtmetallische Funktionswerkstoffe (Glas-/Kohlefaser)
 - Supraleitereinsatz (HTSL: -190°C)
 - Metallpulverpressteile



Quelle: Oswald



Quelle: TU-Darmstadt

- **Neue Konstruktionen**
 - Aktive/Passive Magnetlagerung \Rightarrow Hohe Drehzahlen
 - Segmentierte Zahnpulentechnik \Rightarrow Hohe Leistungsdichte
 - Lineartechnologie \Rightarrow Wegfall mech. Übertragungselemente \Rightarrow hohe Dynamik



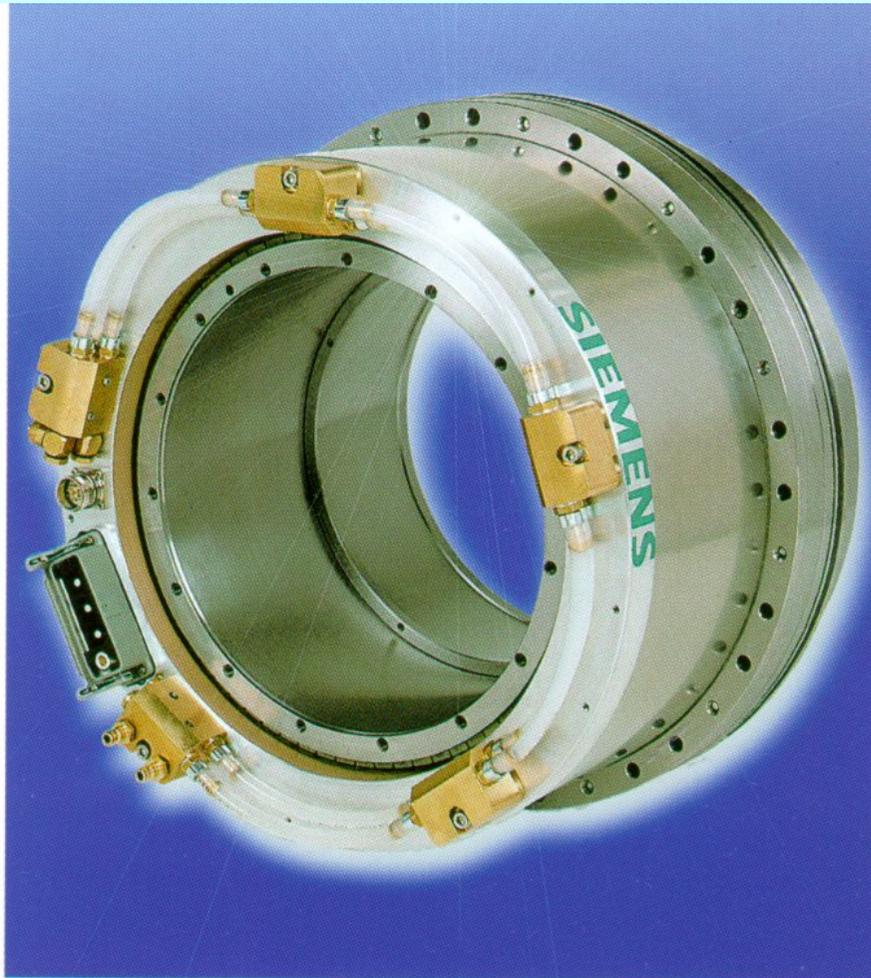
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ETH Zürich
Prof. K. Reichert

Institut für Elektrische
Energiewandlung, Prof. A. Binder
FB 18 • Elektrotechnik und
Informationstechnik



Torque - Motor



Quelle: Siemens

- Hohes Drehmoment bei reduzierten Drehzahlen
- Präzisionsantrieb mit minimaler Momentenwelligkeit z.B. für Koordinatentische
- Getriebelose, massenarme Ausführung
- Hoher Wirkungsgrad durch PM-Erregung
- „Modulare“ Synchronmaschine



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ETH Zürich
Prof. K. Reichert

Institut für Elektrische
Energiewandlung, Prof. A. Binder
FB 18 • Elektrotechnik und
Informationstechnik



High - Speed Permanentmagnetläufer, vierpolig



Innovative Materialien / Techniken:

- Kohlefaser
- Selten - Erd - Magnete
- Magnetlager
- 40kW
- 40000 1/min

Quelle: TU Darmstadt



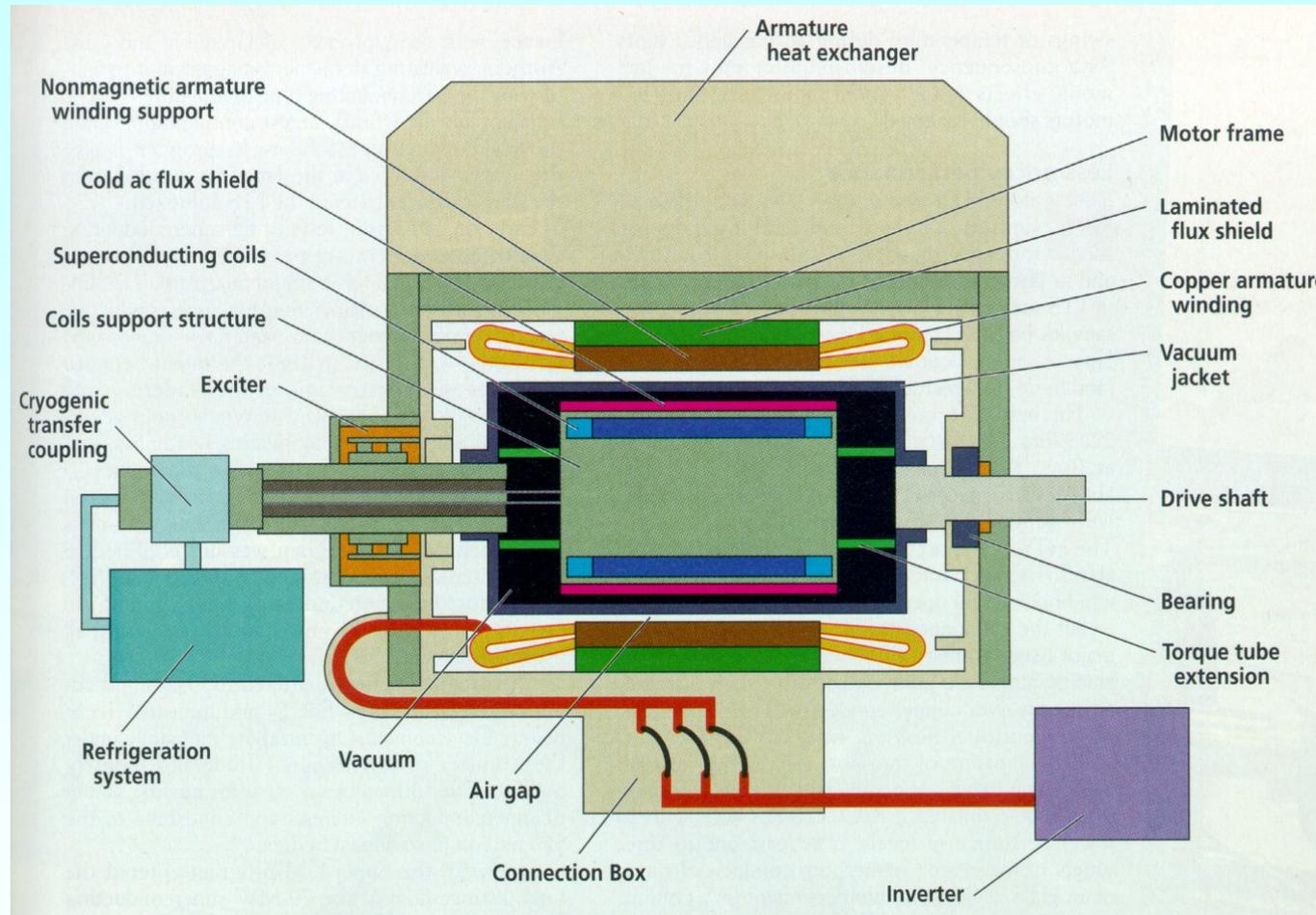
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ETH Zürich
Prof. K. Reichert

Institut für Elektrische
Energiewandlung, Prof. A. Binder
FB 18 • Elektrotechnik und
Informationstechnik



Supraleitender Synchronmotor



Einsatz von BiSCCo - HTSL -Spulen im Läufer, vierpoliger Synchronmotor mit He-Gaskühlung bei 30 K Quelle: Reliance



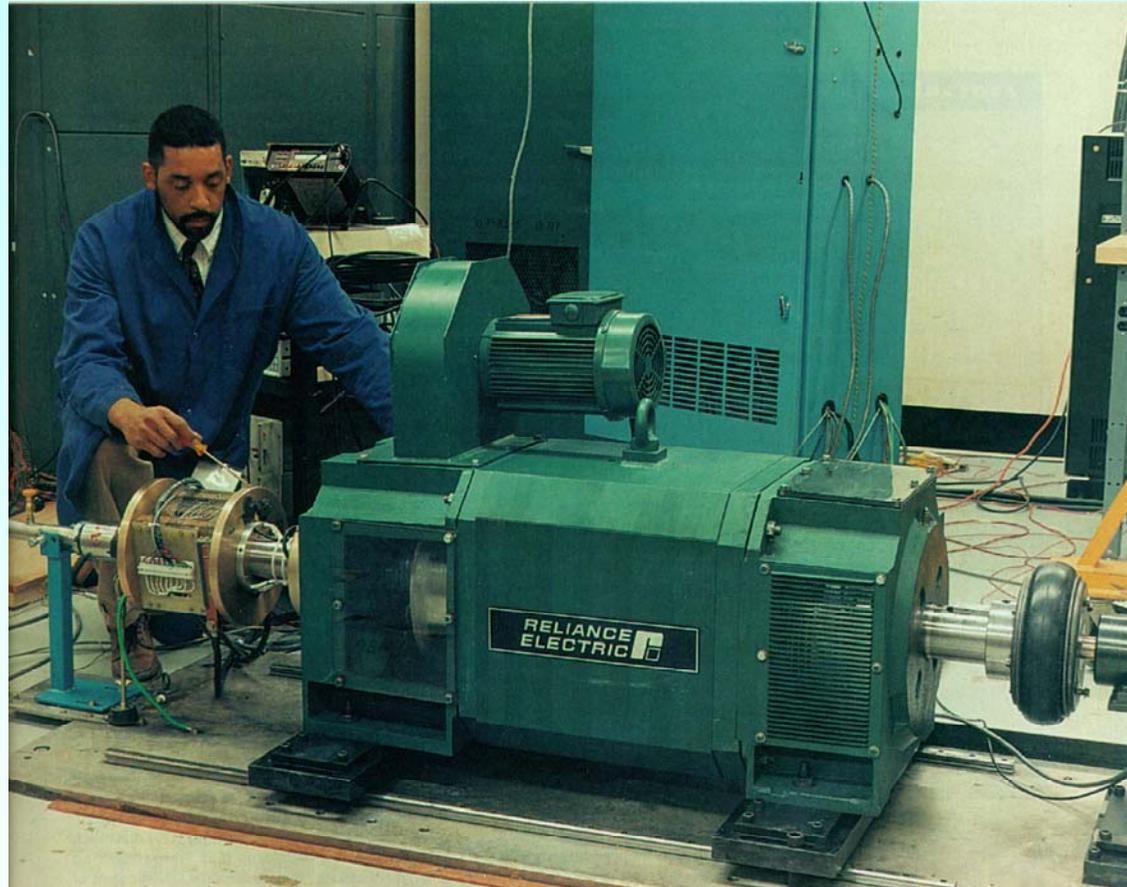
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ETH Zürich
Prof. K. Reichert

Institut für Elektrische
Energiewandlung, Prof. A. Binder
FB 18 • Elektrotechnik und
Informationstechnik



Supraleitender Synchronmotor



**Einsatz von Hochtemperatur-Supraleitern: Prototyp-Synchronmaschine 149kW
mit supraleitendem Läufer (746kW und 3730kW in Planung) Quelle: Reliance**



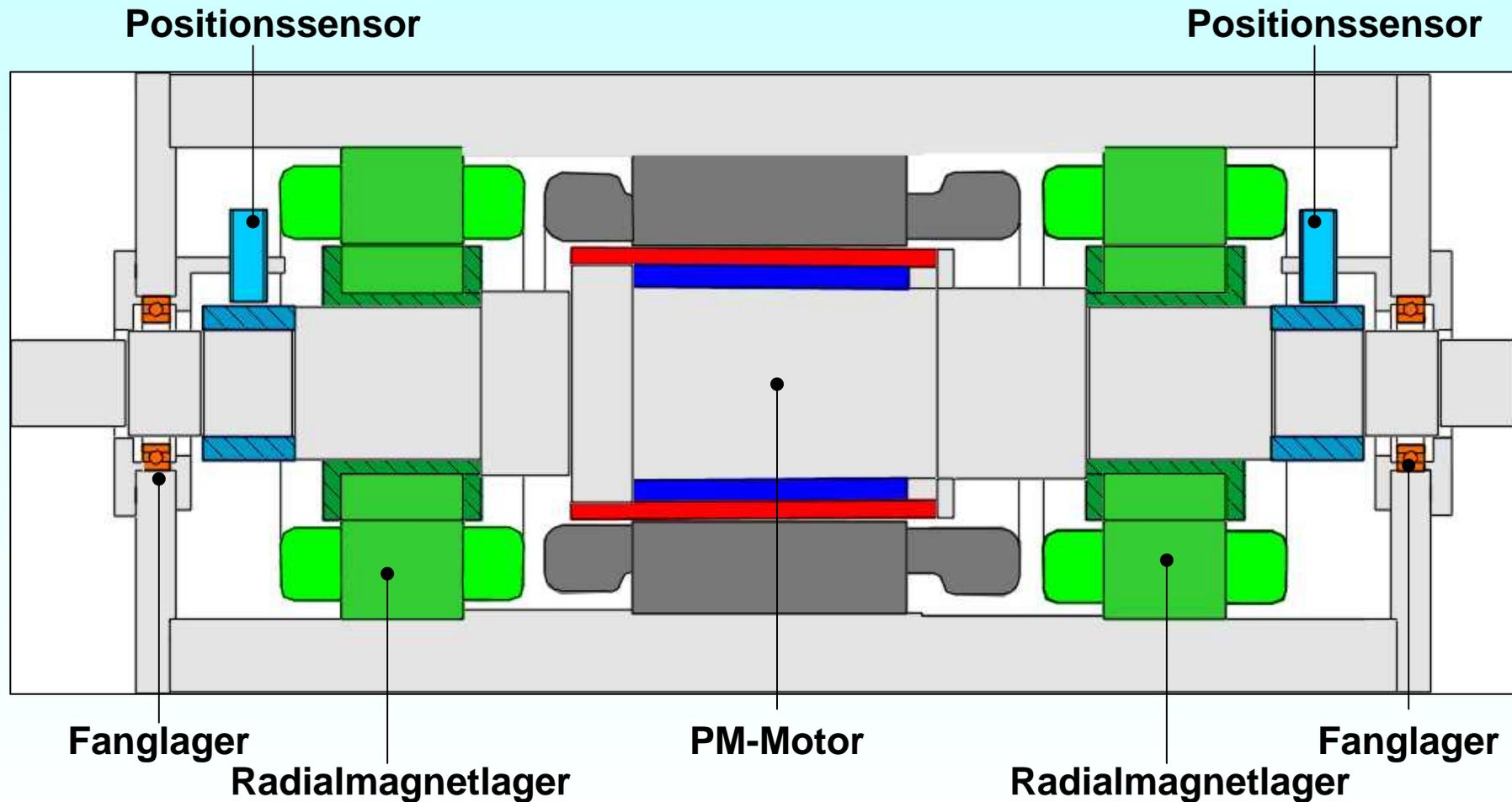
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ETH Zürich
Prof. K. Reichert

Institut für Elektrische
Energiewandlung, Prof. A. Binder
FB 18 • Elektrotechnik und
Informationstechnik



Magnetgelagerter Hi - Speed - Motor PM-Motor mit 2 Radial - Magnetlagern, Ausführung 40000/min, 40 kW, mit Flüssigkeitsmantelkühlung



Quelle: TU Darmstadt



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ETH Zürich
Prof. K. Reichert

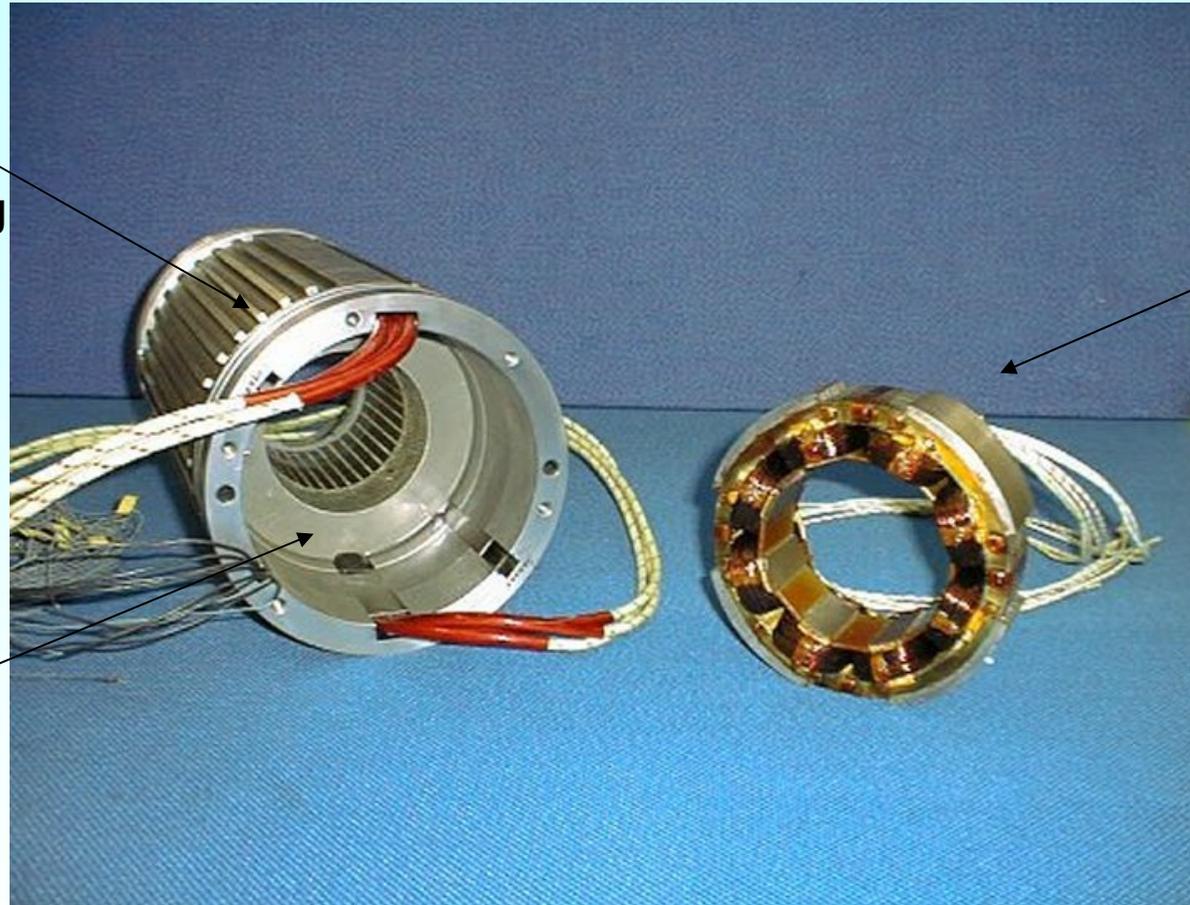
Institut für Elektrische
Energiewandlung, Prof. A. Binder
FB 18 • Elektrotechnik und
Informationstechnik



Ständer vergossen für Flüssigkeitsmantel-Kühlung und vorderes Radialmagnetlager

Wasserkanäle
für Mantelkühlung

Vergossene
Wickelköpfe der
Statorwicklung



Radialmagnet-
lager vor dem
Einbau

40000 1/min, 40 kW Quelle: TU Darmstadt



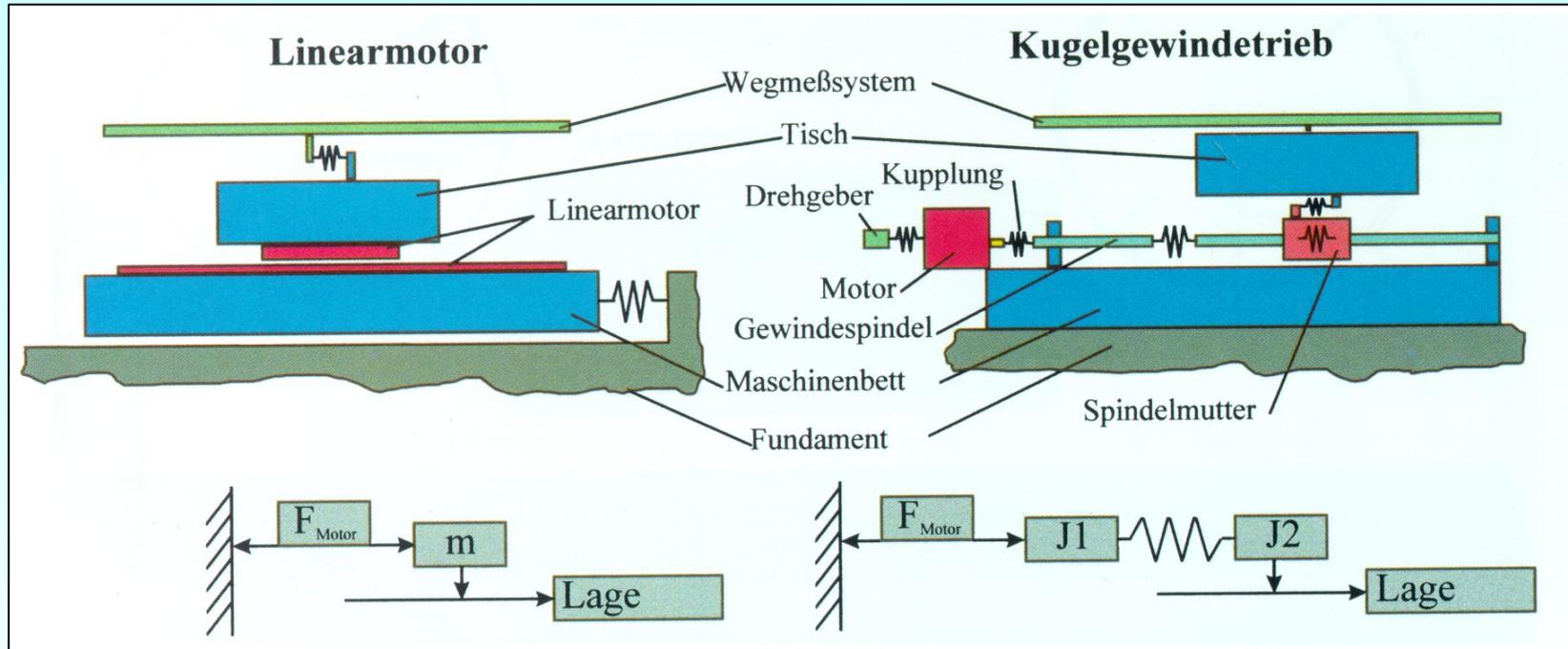
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ETH Zürich
Prof. K. Reichert

Institut für Elektrische
Energiewandlung, Prof. A. Binder
FB 18 • Elektrotechnik und
Informationstechnik



Vorschubantrieb: **Linearmotor** vs. **Kugelgewindetrieb**



– 1 - Massen - Schwinger

– 2 - Massen - Schwinger

– Keine dynamisches Umkehrspiel

– Dynamisches Umkehrspiel

– Höhere Bahngenaugigkeit

– Erhöhte Regeldynamik

Quelle: Krauss-Maffei



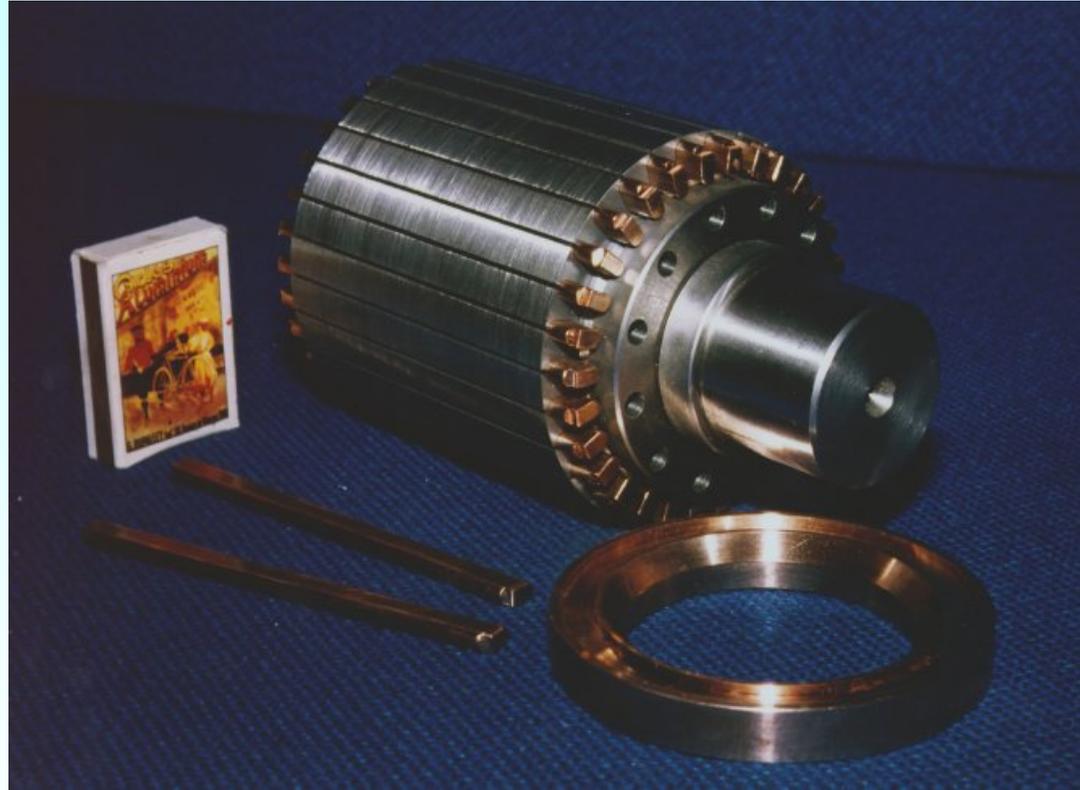
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ETH Zürich
Prof. K. Reichert

Institut für Elektrische
Energiewandlung, Prof. A. Binder
FB 18 • Elektrotechnik und
Informationstechnik



Hohe Leistungsdichte, aber auch Fliehkräfte bei High-Speed-Antrieben



Quelle: TU Darmstadt

- Hohe Leistungsdichte: 25 kW/dm^3 Läufer volumen dauernd durch -
a.) hohe Drehzahl , b.) Wassermantelkühlung
- Hohe Fliehkräfte: Läuferstab (23g) „wiegt“ bei 24000/min 0,6 Tonnen !



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ETH Zürich
Prof. K. Reichert

Institut für Elektrische
Energiewandlung, Prof. A. Binder
FB 18 • Elektrotechnik und
Informationstechnik



Technische **Entwicklung** bei Umrichter / Antriebssystemen

- **Neue Topologien**

- Matrixumrichter \Rightarrow Kein Zwischenkreis nötig
- H-Brückenelemente \Rightarrow Für Switched Reluctance

- **Neue Werkstoffe / Bauelemente**

- Silizium-Karbid statt Silizium \Rightarrow Hohe Schaltfrequenz; Geringe EMV
- IGBT für Mittelspannung \Rightarrow Ablösung der aufwendigen GTO - Technik
- Integrierte Umrichtermotoren \Rightarrow Umrichter im Motor
- Vernetzte Aufstellung \Rightarrow „Vor-Ort-Intelligenz“ im Umrichter, leistungsfähige Busse
- Hohe Rechenleistung „verteilt“ \Rightarrow Sensorlose / Sensorarme Antriebe (Diagnose / Monitoring)



Quelle: ELIN



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ETH Zürich
Prof. K. Reichert

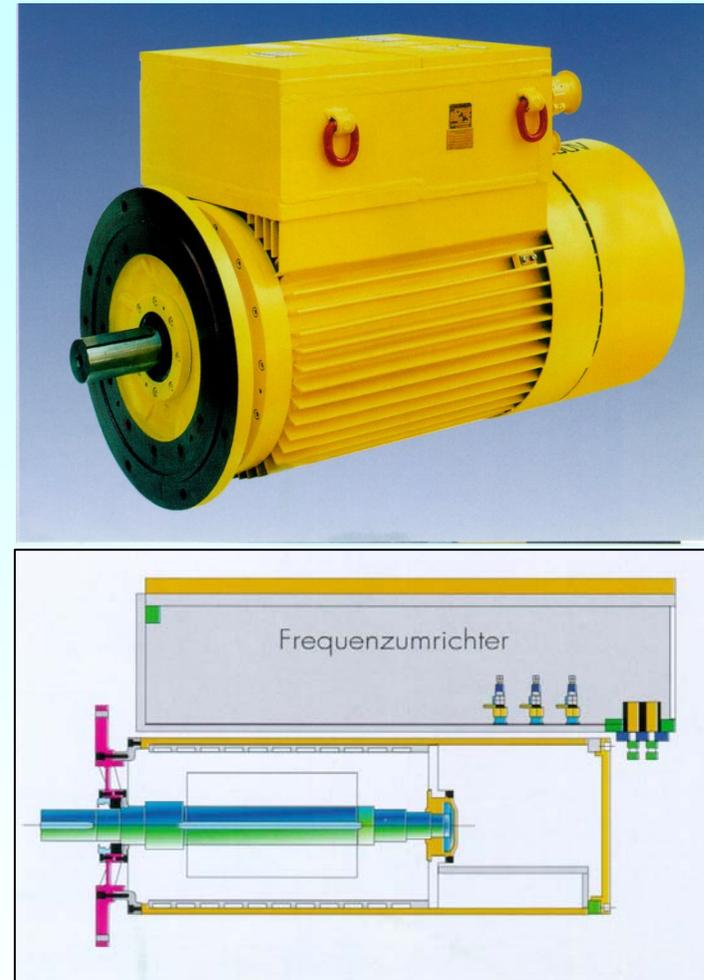
Institut für Elektrische
Energiewandlung, Prof. A. Binder
FB 18 • Elektrotechnik und
Informationstechnik



Integrierte UmrichterMotoren / Integrierte Sanftanlaufeinrichtung



Quelle: Siemens



Quelle: Breuer



Beispiele aktueller Forschungsschwerpunkte

Optimierung des Antriebssystems Motor - Umrichter

- **hohe Schaltfrequenz:**

Vorteile: Geräuschreduktion; sinkende Zusatzverluste; sinkende Momentenwelligkeit; höhere Dynamik

Nachteil: hohe Spannungssteilheit du/dt

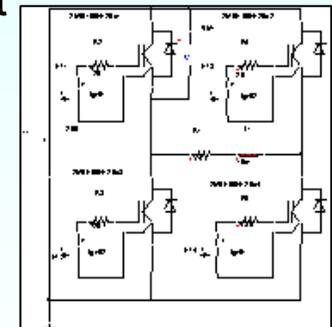
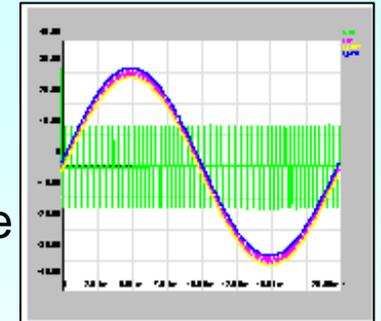
- **hohes du/dt :** → Reflexion von Spannungswellen, daraus folgt eine hohe Wicklungsbeanspruchung

→ mech. Lager als elektrische Kapazität: daraus folgt eine Anregung von Lagerströmen

→ Ladeströme in langen Motorkabeln (Zuleitungen)

- **Abhilfen:**

- Verbesserte Wicklungs-Isolationssysteme
- verbesserte Lagertechnologie / Lagerisolierung
- Umrichter Ausgangsfilter / Pulsmuster-Optimierung



Früher: Einzelantrieb → Heute: Energiewandlungssysteme

Elektromechanische Energiewandler

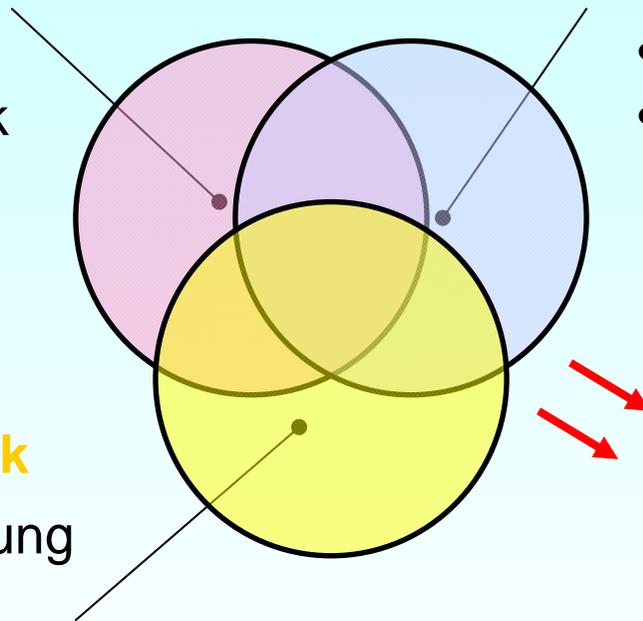
- EL. Maschinen
- System
- Leistungselektronik

EI. Netz - Speisung

- Komponenten
- System
- Leistungselektronik

Informationstechnik

- Schutz, Überwachung
- Regelung
- Identifikation, Diagnose
- Optimierung
- Integration



Anwendungen

- Energieerzeugung
- Industrie, Gewerbe
- Verkehr
- Haustechnik
- Verbrauchergeräte
- Informatik



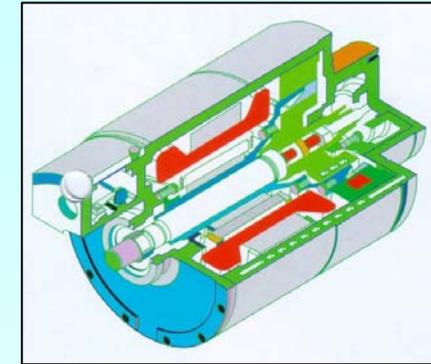
Drehzahlveränderbare Antriebe **sparen Energie**

- Verbrauch Europäische Union: < 1000 TWh p.a.
- **Sparpotential** (bis 2010) geschätzt:
 - E-Motoren: ~ 25 TWh p.a.
 - Drehzahlveränderbare Antriebe: ~ 67 TWh p.a.



Einsparung Kraftwerksleistung ($\eta \sim 0.5$): 20000 MW

- **Voraussetzungen:**
 - Einsatz von η -Motoren (USA: Energy Policy Act)
 - Drehzahlveränderbare Antriebe statt Festdrehzahlantriebe
z.B.: bei Pumpen, Lüftern, Kompressoren, Klimatechnik,...



Quelle: Breuer



Quelle: Breuer



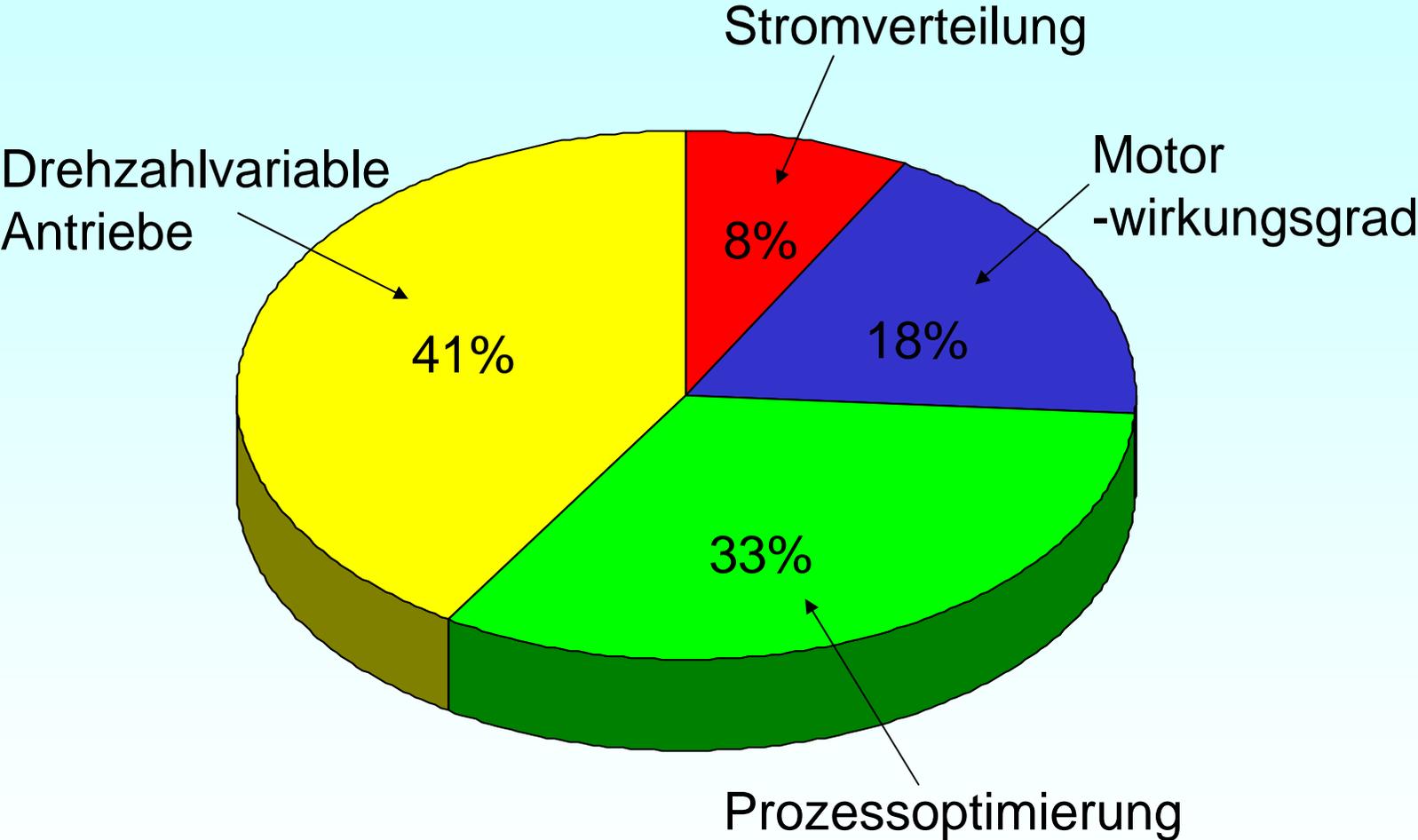
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ETH Zürich
Prof. K. Reichert

Institut für Elektrische
Energiewandlung, Prof. A. Binder
FB 18 • Elektrotechnik und
Informationstechnik



Energiesparpotential Antriebssysteme



Quelle: US Department of Energy



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

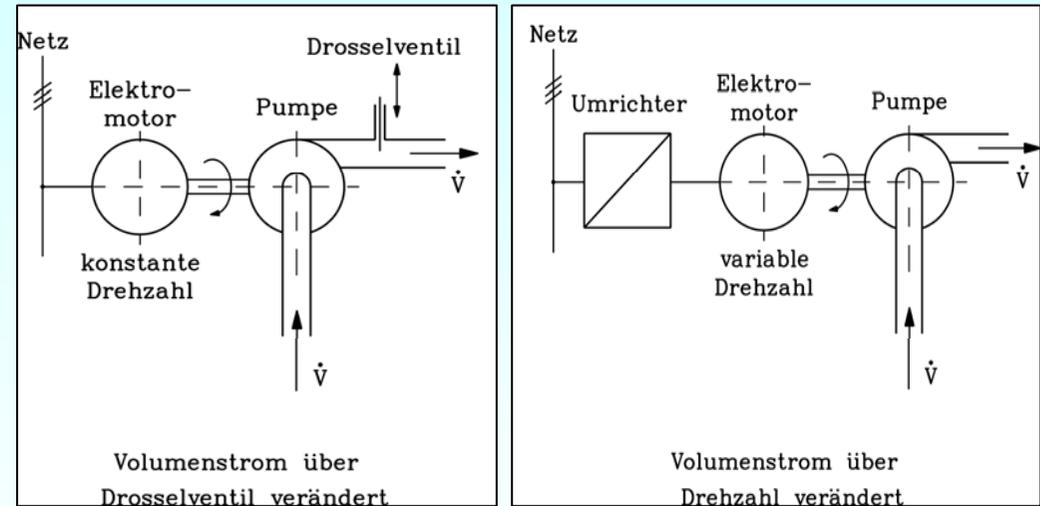
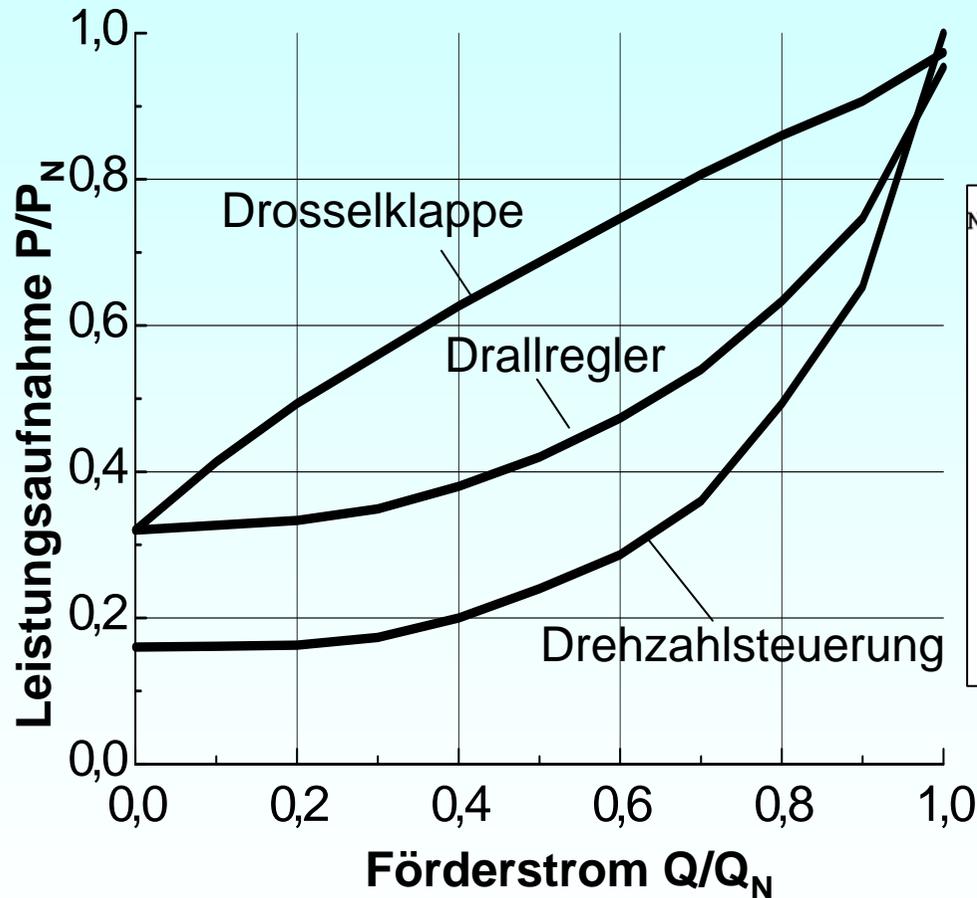
ETH Zürich
Prof. K. Reichert

Institut für Elektrische
Energiewandlung, Prof. A. Binder
FB 18 • Elektrotechnik und
Informationstechnik

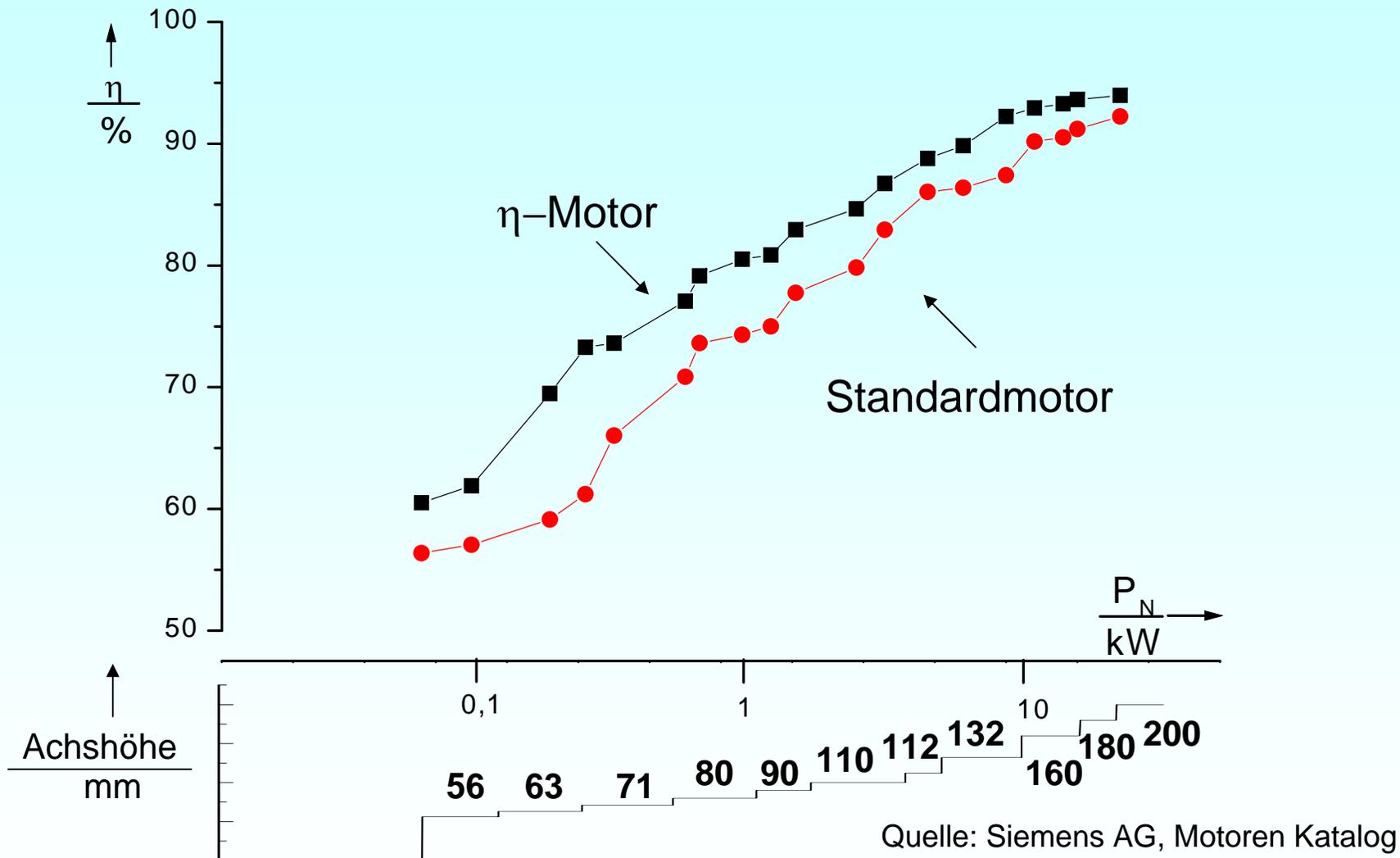


Energieeinsparung in der Pumpen-/ Heiz-/ Klimatechnik durch drehzahlveränderbare Antriebe

- Veränderbarer Volumenstrom $Q \rightarrow$ typisch 30% - 40% der Nennleistung eingespart



Drehstrom-Käfigläufer-Normmotoren: Wirkungsgradvergleich

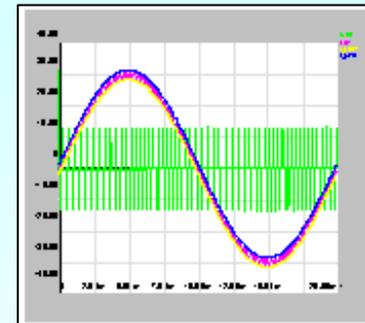


Netzfreundlichkeit drehzahlveränderbarer Antriebe

- **Kleine Anlaufströme** auch bei Anfahren mit Nennmoment

Aber:

- Abweichungen von den Netzsinusform: Oberschwingungen Hz...kHz
- Steuer- / Kommutierungsblindleistung
- EMV (ca. 200 kHz ... 2 MHz)



moderne **Abhilfen**: (Neben Kommutierungsdrosseln / Siebkreisen)

- gesteuerte Netzgleichrichter („Active Front End“) bzw. aktiver Filter
Vorteil: • geringe niederfrequente Oberschwingungen
• verbesserter Leistungsfaktor
- Netzfilter: verbesserte EMV
- (Künftig: SiC - Technologie : verbesserte EMV)



Wartung - Monitoring - Diagnose

Bei **Großmaschinen gängige Praxis** mit großem Entwicklungsfortschritt

- Wicklungsüberwachung on-line (Teilentladungen, Ozongehalt)
- Lager-/Schwingungsüberwachung (Beschleunigungsmesser, Trendanalyse)
- Temperaturüberwachung (Trendanalyse)



Quelle: Breuer

Auch **bei „kleinen“ Antrieben durch Rechenleistung vor Ort**
(Umrichter oder Zusatzgeräte)

- Lastrechner \Rightarrow Stromüberwachung
- Stabbruchererkennung durch Beobachtermodelle
- Temperaturmessung (Trendanalyse)
- Isolationswiderstandsüberwachung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ETH Zürich
Prof. K. Reichert

Institut für Elektrische
Energiewandlung, Prof. A. Binder
FB 18 • Elektrotechnik und
Informationstechnik



Beispiel einer **rechnergestützten Instandhaltung**

Standort: BASF, Ludwigshafen: Antriebe in sensitiven Prozessen

- **Hauptfehler: Lagerausfall** \Leftrightarrow Schock - Puls - Methode (SPM)
 \Leftrightarrow Meßnippel + Sicht-/Hörkontrolle

- 125000 E-Motoren: 800 Motoren: $U_N = 6 \text{ kV}$;
80% der Motoren: $P_N < 15 \text{ kW}$

- Alle Motoren ab AH 250mm mit Meßnippel bestellt

- 8000 E-Motoren in den Überprüfungs-Routen, 3 Durchläufe / Jahr

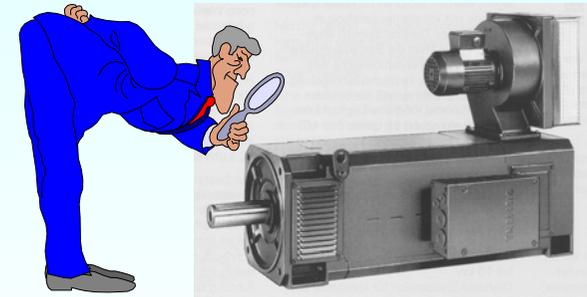
- **Meßbericht - Datenbank - Trend**

→ Keine ungeplanten Stillstände

→ Verlängerte Revisionsabstände

→ Verringerte Stillstandszeiten, da Ersatzteile vorab bestellt

- Vorteile rechtfertigen den erhöhten Personaleinsatz (Betriebselektriker)



Diagnose-Plattform MIMOSA

- MIMOSA = Machinery Information Management Open System Alliance

1994: San Diego / USA: Firmensitz

- Zusammenschluß Antriebsfirmen \Rightarrow Erarbeitung genormter Schnittstellen für Diagnosedatenaustausch und Nachverarbeitung
- Austauschprotokoll CRIS (Common Relational Information Schema)
- Vorteil: **Gleichartige Diagnose** für Antriebssysteme **unterschiedlicher** Hersteller weltweit!
- Volle Nutzung der IT (Information Technology) für Monitoring unterschiedlicher Meßgrößen auf einheitlicher Basis.

Weitere Informationen: www.mimosa.org



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ETH Zürich
Prof. K. Reichert

Institut für Elektrische
Energiewandlung, Prof. A. Binder
FB 18 • Elektrotechnik und
Informationstechnik



Ausblick

- ➤ Einsatzdichte elektrischer Antriebe nimmt zu
- ➤ Vernetzte, dezentrale, intelligente Antriebe setzen sich durch
- ➤ Ersatz von Mechanik durch elektrische Antriebe: erhöhte Flexibilität
- ➤ Verlustarme Antriebe gewinnen an Bedeutung (Gesetzgebung!)
- ➤ Automatisierung ohne elektrische Antriebe undenkbar
- ➤ Anteil der Umrichter gespeisten Antriebe steigend

