

# Hochdrehzahlantriebe und mögliche Einsatzgebiete



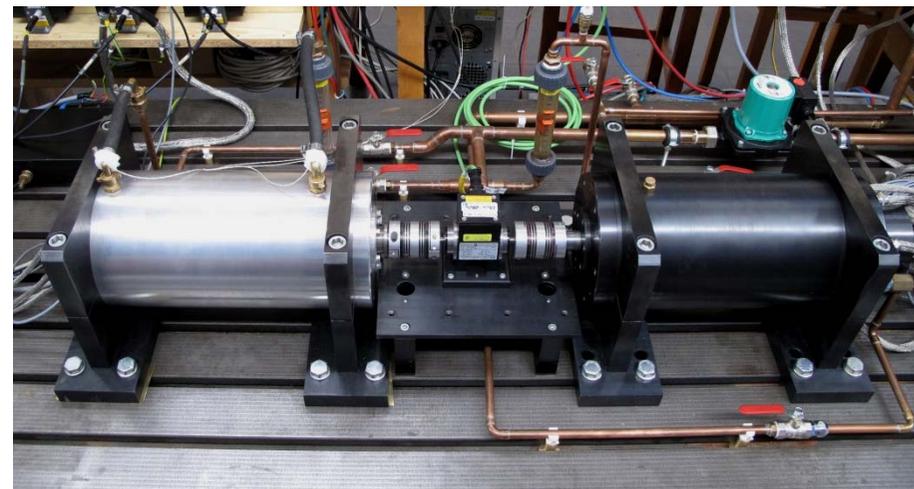
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Technisches Kolloquium „Welten von morgen“, 27.6.2013  
WITTENSTEIN motion control GmbH, Igersheim-Harthausen

**Technische Universität Darmstadt**  
Institut für Elektrische Energiewandlung

**Andreas Binder**

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



Quelle: *TU Darmstadt, Deutschland*



# Inhalt

- Einleitung
- E-Maschinentypen für Hochdrehzahleinsatz
- Bemessungsrichtlinien für Hochdrehzahlmaschinen
- Lagerungs- und Festigkeitsprobleme bei hohen Drehzahlen
- Ausführungsbeispiele und Anwendungen
- Zusammenfassung

---

# Hochdrehzahlantriebe und mögliche Einsatzgebiete

---



## Einleitung



# Einleitung

## - Vorteile von Hochdrehzahlanwendungen:

Hohe Leistung  $P$  bei **kleinem Bauvolumen**  
(„Leistung aus Drehzahl“)

Direktantriebe: **kein Getriebe** oder nur **einstufige Getriebe**

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

- Die Drehzahl  $n$  bestimmt die Leistung, das Drehmoment  $M$  die Baugröße der rotierenden Maschine.
- Dies gilt generell für alle Arten rotierender Maschinen !

### Beispiel:

Kleiner E-Motor und kleiner Turbokompressor trotz hoher Leistung

# Einleitung

## Typische Hochdrehzahlanwendungen:

Turbokompressoren

Turbomolekular-Vakuumpumpen

Hochgeschwindigkeits-Dreh- und Fräsbearbeitung

Motor-Generatoren für Schwungradspeicher

Generatoren für Mikrogasturbinen

E-Antriebe für Abgasturbolader

Zentrifugenantriebe

Antriebe für die Kunstfaserherstellung

# Einleitung

## Typische High-Speed-Drehzahl- und Leistungsbereiche:

- Pumpen: 8 000 ... 10 000 /min, ca. 10 ... 30 kW
- Lüfter, Verdichter: 40 000 ... 60 000 /min, 50 ... 500 kW
- Werkzeugmaschinen: 15 000 ... 80 000 /min, bis 100 kW
- Mikrogasturbinen: ... 70 000 /min, 100 kW

## ABER auch: Großmaschinen:

- Großverdichter: ... 15 000 /min, 1 ... 10 MW
- Großgeneratoren: 3000 ... 3600/min, bis 1000 MW

# Einleitung

## - Was bedeutet Hochdrehzahl-Betrieb?

NICHT NUR: hohe Drehzahl “Umdrehungen pro Sekunde”  $n$  !

SONDERN: Hohe Rotorumfangsgeschwindigkeit  $v = d \cdot \pi n > 100 \text{ m/s}$ .

( $d$ : Rotoraußendurchmesser)

- **Dadurch:** Hohe mechanische Spannungsbeanspruchung  $\sigma$  der Rotorkonstruktion durch die hohe Zentrifugalkraft !

Rotor-Tangentialzugspannung:  $\sigma_t \sim \rho \cdot v^2$   
(proportional zur Rotormassendichte  $\rho$  und zu  $v^2$ )

**Beispiel:** Zugfestigkeit von Stahlblech:  $R_{p,0.2} = \sigma_{0.2} = 350 \text{ N/mm}^2$

Dünnere rotierender Stahlring mit Durchmesser  $d$  bei  $v = 211 \text{ m/s}$ ,  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ :

Tangentialzugspannung:

$$\sigma_t = \rho \cdot v^2 = 350 \text{ N/mm}^2$$

a)  $d = 1.3 \text{ m}$ :  $n = 3000 \text{ /min}$

b)  $d = 90 \text{ mm}$ :  $n = 45000 \text{ /min}$ .



# Einleitung

Das sind **beides** High-Speed-Antriebe!



*Vierpoliger PM-Rotor mit zwei  
Radialmagnetlagern  
 $d = 90 \text{ mm}$ , 40 kW, 40 000 /min*

*Quelle: TU Darmstadt, Deutschland*



(C) 2007 Bryon Paul McCartney / all rights reserved.

*Zweipoliger, elektrisch erregter  
Turboläufer mit Öl-Gleitlagern  
 $d = 1.2 \text{ m}$ , 900 MW, 3000 /min*

*Quelle: © 2007 Bryon Paul McCartney/ all rights reserved*

---

# Hochdrehzahlantriebe und mögliche Einsatzgebiete

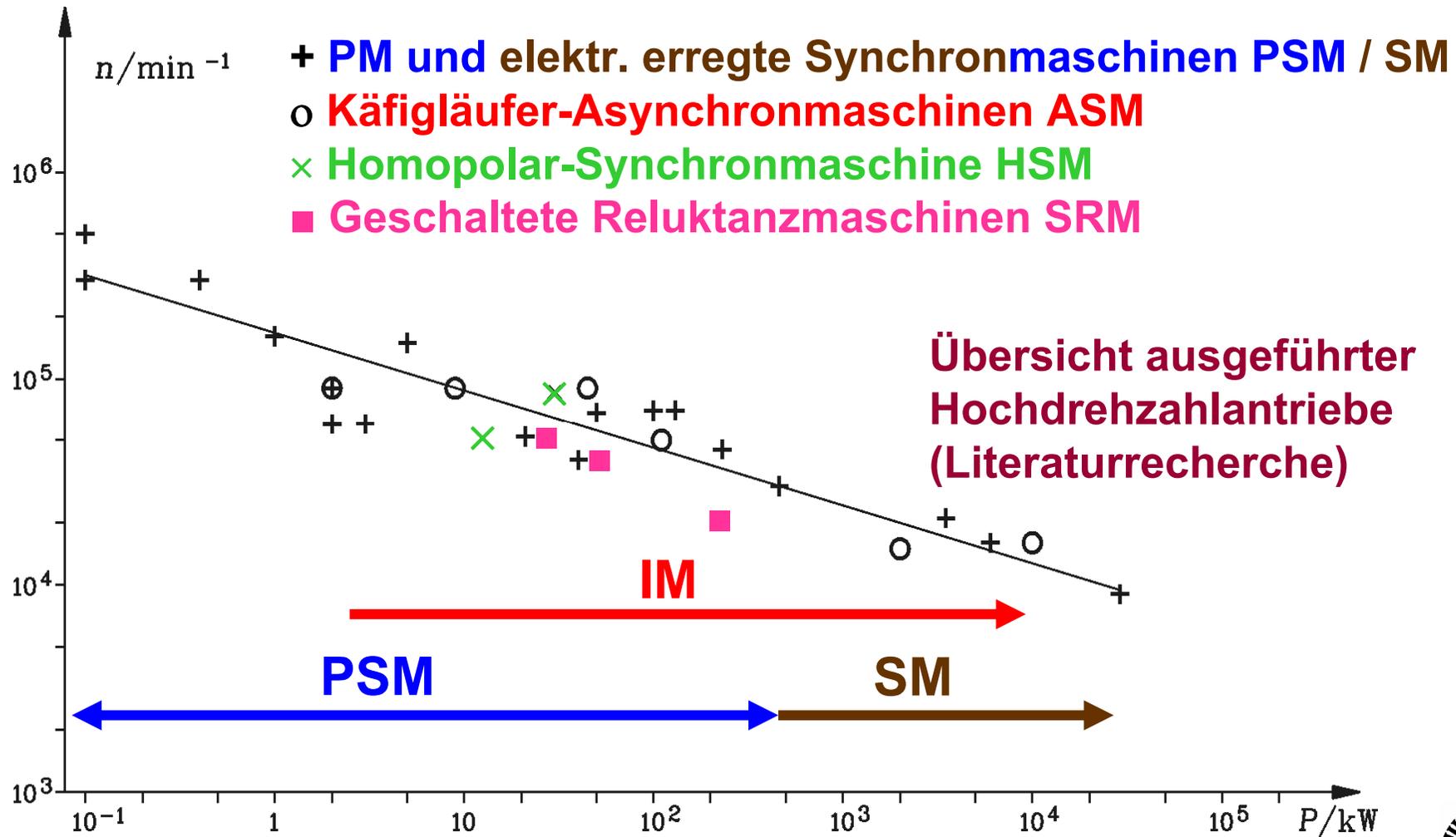
---



## E-Maschinentypen für Hochdrehzahleinsatz



# E-Maschinentypen für Hochdrehzahleinsatz



## Permanentmagnet-Synchronmaschinen (PSM)



*Vierpoliger PM-Rotor als lagerloser PSM-  
Antrieb mit einem Radialmagnetlager als  
zweite Lagerstelle*

*$d = 80 \text{ mm}$ ,  $40 \text{ kW}$ ,  $40\,000 \text{ /min}$*

Quelle: *TU Darmstadt, Deutschland*

- Oberflächenmagnete
- Kohlefaserbandage
- Rotorlagegeber  
oder  
geberloses Verfahren für  
feldorientierte Regelung

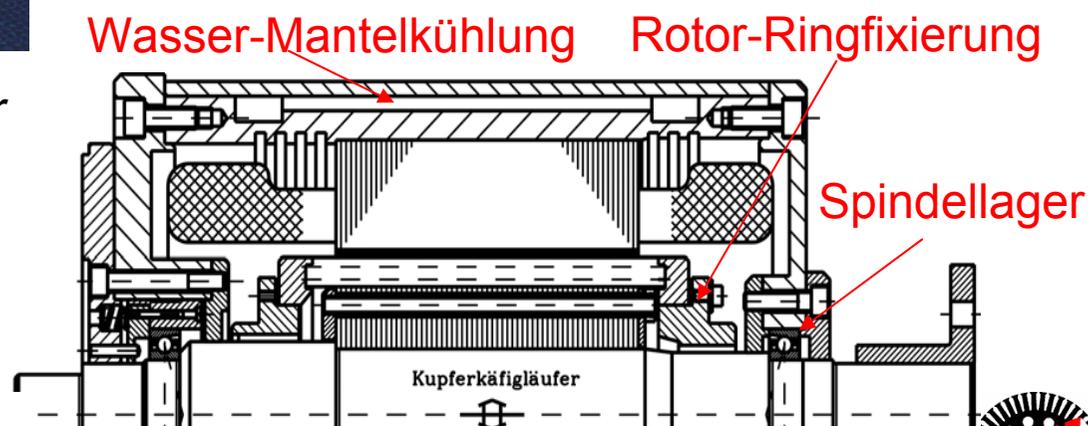
## Käfigläufer-Asynchronmaschinen (ASM)



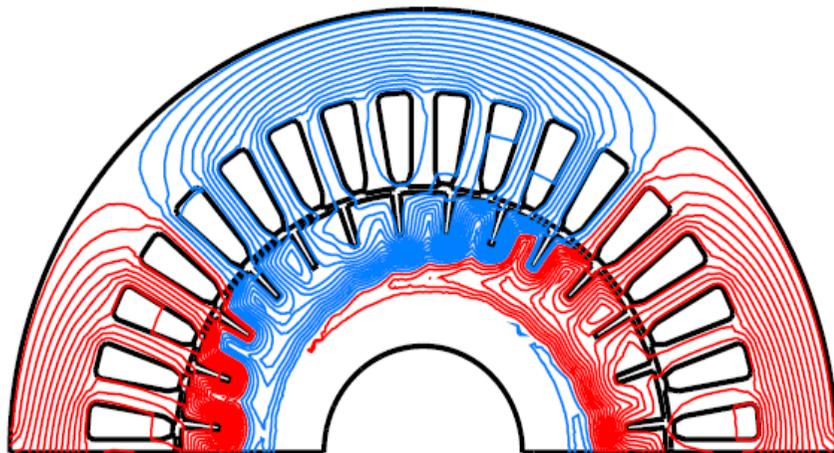
Vierpoliger geblechter ASM-Rotor  
mit Spindellagern  
 $d = 90 \text{ mm}$ ,  $30 \text{ kW}$ ,  $24\,000 \text{ /min}$

Quelle: TU Darmstadt, Deutschland

- Kupfer-Käfigläufer
- Zusätzlich: Rotor-Ringfixierung
- Kein Rotorlagegeber nötig
- Geblechte oder massive Läufereisenausführung



## Massivläufer-Asynchronmaschinen



*Vierpolige Massivläufer-ASM, Feldbild,  
Programm FLUX2D*

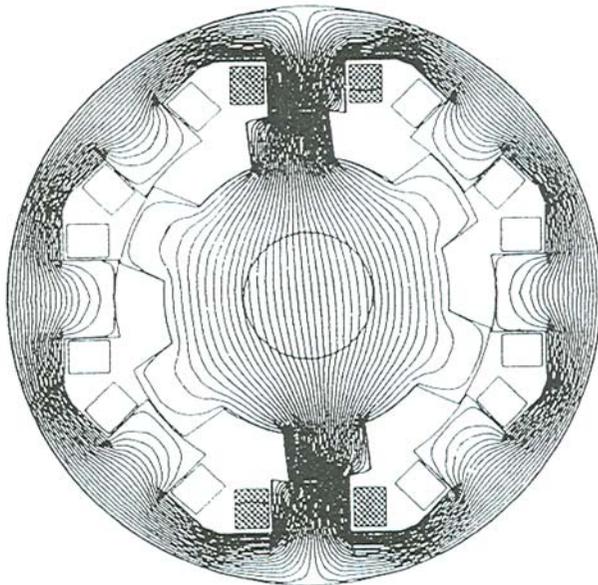
*Axial geschlitzter Massivläufer-Rotor mit  
Kupferendringen  
 $d = 90 \text{ mm}$ ,  $15 \text{ kW}$ ,  $24\,000 \text{ /min}$*

*Quelle: TU Darmstadt, Deutschland*

- Keine Rotorwicklung
- Geschlitzter Massivrotor mit Kupfer-Endringen
- Zusätzlich: ev. Rotor-Ringfixierung
- Kein Rotorlagegeber nötig
- Niedriger Leistungsfaktor



## Geschaltete Reluktanzmaschinen (SRM)

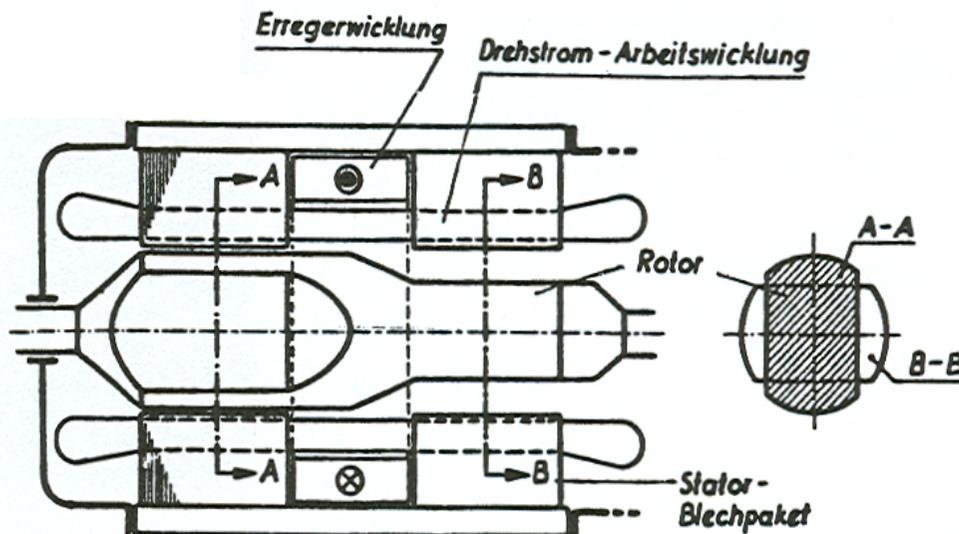


- Keine Rotorwicklung
- Kompakte Zahnspulen
- Rotorlagegeber  
oder  
geberloses Verfahren für Stromeinprägung
- Rotorlücken müssen amagnetisch  
verschlossen sein für niedrige Reibungsverluste

*Zweipolige, vierphasige SRM mit 8 Stator-  
und 6 Rotorzähnen*

Quelle: Omekanda, A. et al. ICEM, 1992

## Homopolar-Synchronmaschinen HSM



*Vierpolige, dreiphasige HSM mit Ringerregerwicklung und geteiltem Statorblechpaket*

- Keine Rotorwicklung
- Veränderliche Erregung über Stator-Ringwicklung
- Keine Schleifringe
- Minimum: Vierpolig
- Rotorlagegeber  
oder  
geberloses Verfahren für  
feldorientierte Regelung
- Massiver Eisenläufer
- Relativ niedrige Flussdichten und Wirkungsgrade

Quelle: Kleinrath, H.: *Stromrichtergespeiste Drehfeldmaschinen*, Springer, Wien, 1980

---

# Hochdrehzahlantriebe und mögliche Einsatzgebiete

---



## Bemessungsrichtlinien für Hochdrehzahlmaschinen



# Bemessungsrichtlinien für Hochdrehzahlmaschinen



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

- **Motoraktivabmessungen:** Stator-Bohrungsdurchmesser  $d_{si} \sim d$   
Aktive Rotor-Eisenlänge  $l_{Fe}$
- **Motor-Scheinleistung  $S$ :** Strangstrom und –spannung:  $I, U$ :  $S = 3 \cdot U \cdot I$
- **Esson's Ausnützungsziffer:**  $C \approx S / (d_{si}^2 \cdot l_{Fe} \cdot n)$

$$C = (\pi^2 / \sqrt{2}) \cdot k_w \cdot A \cdot B$$

- Amplitude der Luftspalt-Flussdichte  $B$ ,
- Windungszahl je Strang  $N_s \Rightarrow$  Effektiver Strombelag:  $A = 6 \cdot N_s \cdot I / (d_{si} \pi)$
- Wicklungsfaktor der Drehfeldwicklung  $k_w \cong 0.91$
- Wegen Hochdrehzahl: Hohe Reibungs-, Ummagnetisierungs- und Zusatzverluste:

Verringerung von  $C$  nötig !

$$C \sim A \cdot B \downarrow, \text{ wenn } n \uparrow$$



# Bemessungsrichtlinien für Hochdrehzahlmaschinen



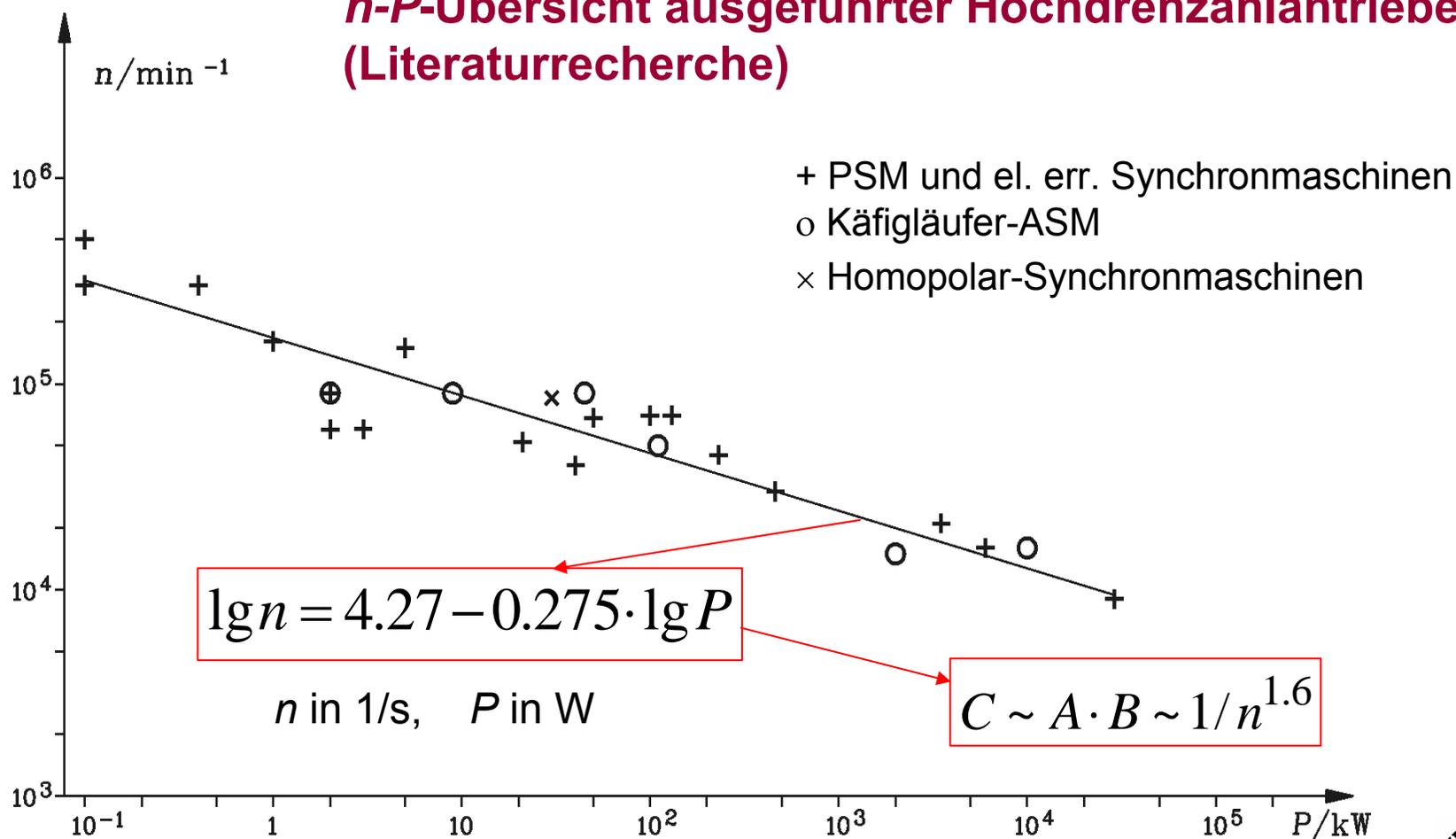
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

- **Statorfrequenz:**  $n = f_s / p$  z.B.  $n = 40000$  /min,  $2p = 4$  Pole:  $f_s = 1.33$  kHz
- Die max. zulässige Umfangsgeschwindigkeit  $v_{\max}$  und die Drehzahl  $n$  ergeben den Läuferdurchmesser  $d$ :  $n = v_{\max} / (d\pi) \rightarrow d \sim 1/n$
- Die erste Eigenbiegefrequenz begrenzt die Rotor-Schlankheit:  $\lambda = l_{Fe} / d$
- Rotor-Aktivvolumen  $V$ :  $V \sim d^2 l_{Fe} = \lambda_{\max} \cdot (\sigma_{0.2} / \rho)^{1.5} / (n \cdot \pi)^3$
- Ummagnetisierungsverluste  $P_{Fe}$  pro Kühloberfläche  $A_k$ :  $P_{Fe} / (\alpha A_k) \sim d \cdot f_s^2 \cdot B^2$  (Wärmeübergangszahl  $\alpha$ )  
 $\Rightarrow B$  absenken:  $B \sim 1/\sqrt{n}$
- Stator-Zusatzverluste  $P_{ad,s}$  pro Kühloberfläche  $A_k$ :  $P_{ad,s} / (\alpha A_k) \sim d \cdot J^2 \cdot f_s^2$   
 $\Rightarrow$  Stromdichte  $J$  absenken:  $J \sim 1/\sqrt{n} \sim A$
- $\Rightarrow$  Absenkung von  $C$  erforderlich:  $C \sim A \cdot B \sim 1/n$  empirisch:  $C \sim 1/n^{1.6}$



# Bemessungsrichtlinien für Hochdrehzahlmaschinen

## $n$ - $P$ -Übersicht ausgeführter Hochdrehzahlantriebe (Literaturrecherche)



# Bemessungsrichtlinien für Hochdrehzahlmaschinen



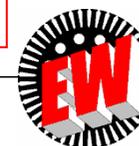
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## Verluste durch Stromwelligkeit bei Umrichterspeisung

- Spannung:  $U \sim n \cdot N_s \cdot k_w \cdot d \cdot l_{Fe} \cdot B$ :  $n \sim f_s$  hoch, daher  $N_s \sim 1/f_s$  klein
- Motorinduktivität relativ klein:  $L \sim \mu_0 \cdot N_s^2 \cdot l_{Fe} \sim 1/f_s^2$
- Hohe Statorfrequenz (z. B.  $n = 200000$  /min, zweipoliger Motor:  $f_s = 3.3$  kHz), daher hohe Schaltfrequenz nötig  $f_T \approx 5f_s$  für PWM
- Stromwelligkeitsamplitude  $I_T$  durch PWM relativ groß:  $I_T \sim U_T / (f_T \cdot L) \sim f_s$  ( $U_T$ : Amplitude der schaltfrequenten PWM-Spannung bei  $f_T$ )

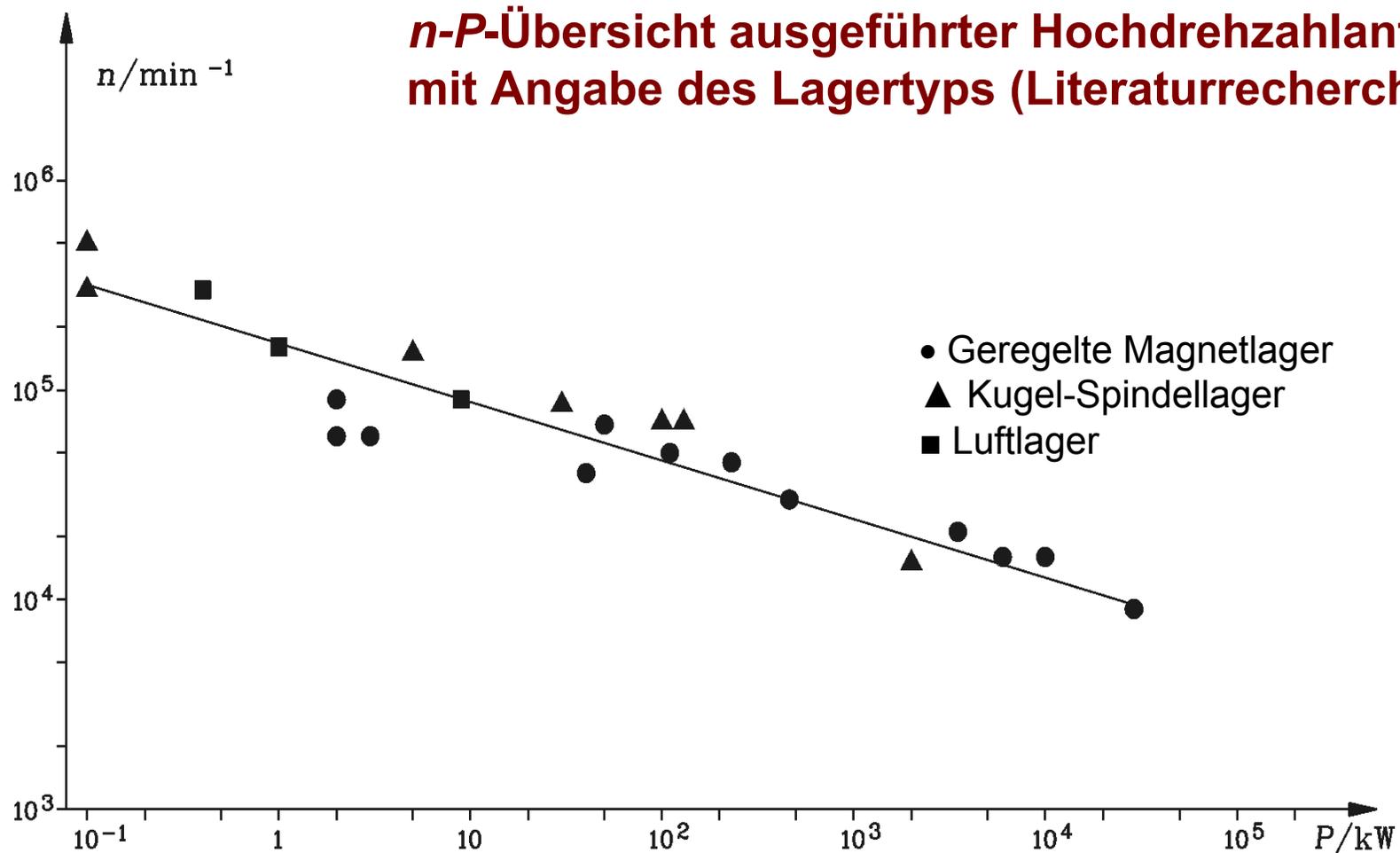
Resultat: Für niedrige Stromwelligkeit zur Verringerung der dadurch verursachten Zusatzverluste:

- a) sehr hohe Schaltfrequenzen  $f_T$
- b) 3-Punkt- statt Zweipunkt-Wechselrichter
- c) (nachgeführte) Sinus-Ausgangsfiler

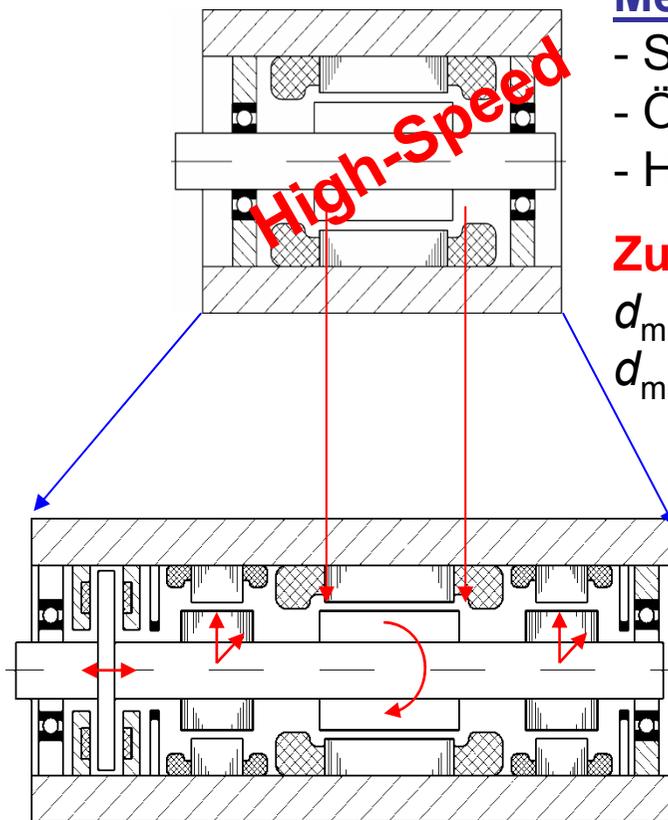


## Lagerungs- und Festigkeitsprobleme bei hohen Drehzahlen

# Lagerungs- und Festigkeitsprobleme bei hohen Drehzahlen



# Lagerungs- und Festigkeitsprobleme bei hohen Drehzahlen



## Mechanische Lager bei ausreichend kleiner Leistung:

- Spindellager (= kleine Kugeln = kleine Zentrifugalkräfte)
- Öl-Minimal-Schmierung für kleine Reibungsverluste
- Hybridlager (Keramikkugeln) für erhöhte Steifigkeit

## **Zulässige Lagerumfangsgeschwindigkeit $d_m \cdot n$ :**

$$d_m \cdot n = (1 \dots 2) \cdot 10^6 \text{ mm/min}$$

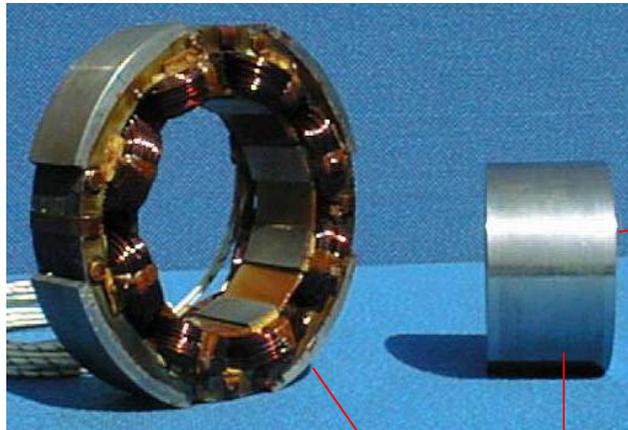
$d_m$ : Mittl. Lagerdurchmesser (mm),  $n$ : Drehzahl (1/min)

## Geregelte Magnetlager:

- Plus:**
- Kein mech. Kontakt
  - Kein Schmiermittel
  - Keine Lagerwartung
  - Sehr hohe Umfangsgeschwindigkeiten

- Minus:**
- Extra DC-Chopper-Speisung und Regelung
  - Abstandssensorik, Fanglager
  - Verlängerung der Maschine
  - Geringere dynamische Steifigkeit

# Lagerungs- und Festigkeitsprobleme bei hohen Drehzahlen



Quelle:  
EAAT,  
Chemnitz

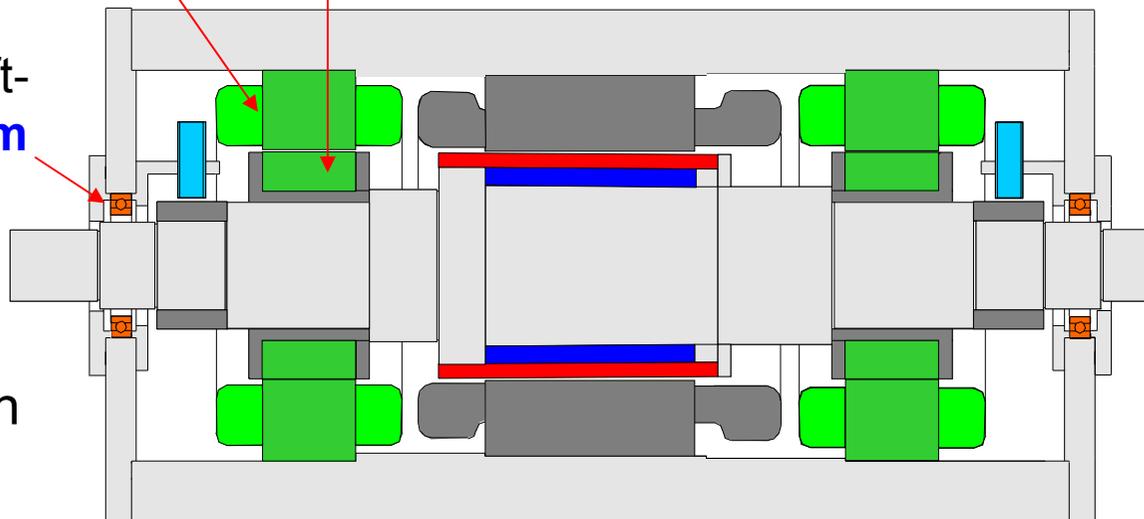


Quelle: TU Darmstadt  
 $d = 90 \text{ mm}$ ,  $P = 40 \text{ kW}$ ,  $n = 40000/\text{min}$

Radialmagnetlager: Luftspalt **0.4 mm**

PM-Rotor mit zwei Radialmagnetlagern

Fanglagerluftspalt: **0.2 mm**

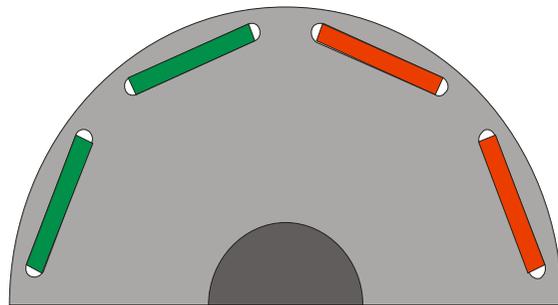


40 kW,  
40000/min

Motor-Luftspalt:  
**0.7 mm**

Max.  
Magnetlagerkraft  
= 6-fache  
Gewichtskraft

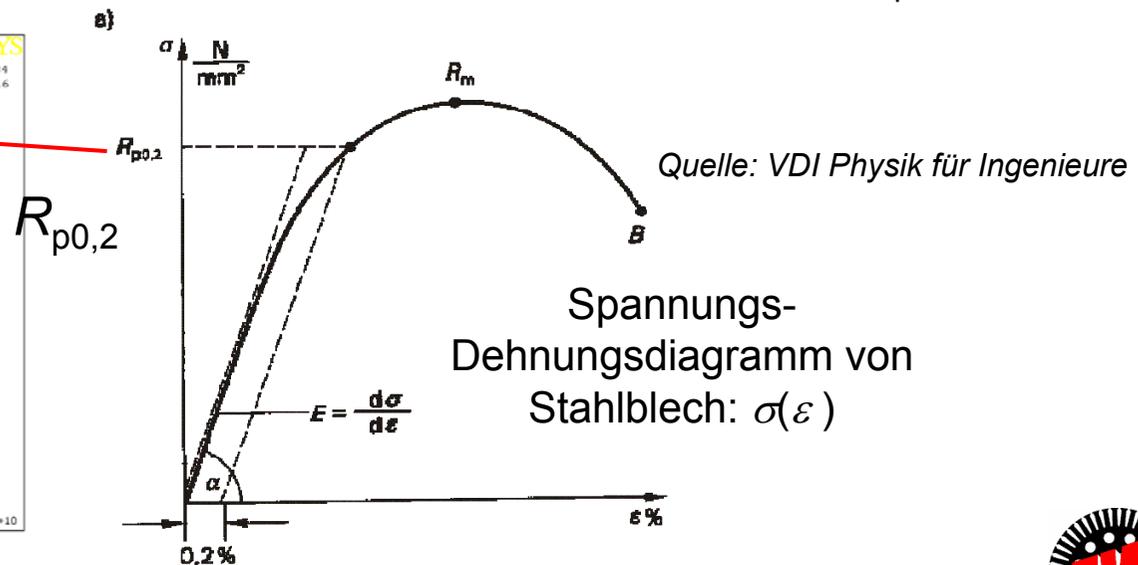
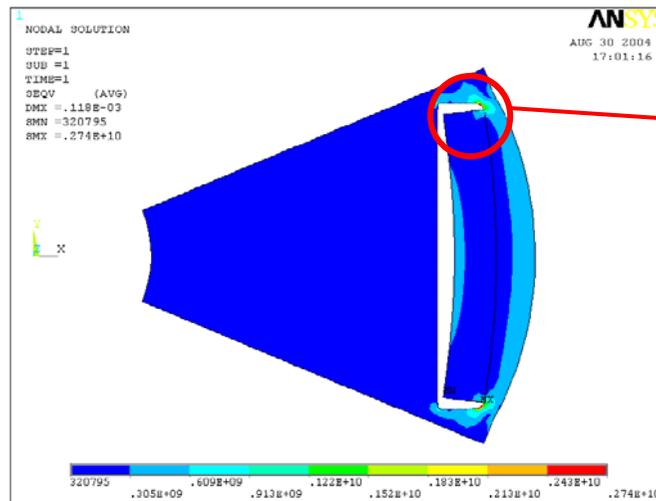
# Lagerungs- und Festigkeitsprobleme bei hohen Drehzahlen



## Magnetfixierung durch das Rotorblech: („vergrabene“ Magnete)

- Keine Bandage
- Kleiner magnetisch wirksamer Luftspalt
- Flusskonzentration bei High-Speed i.d.R. nicht möglich

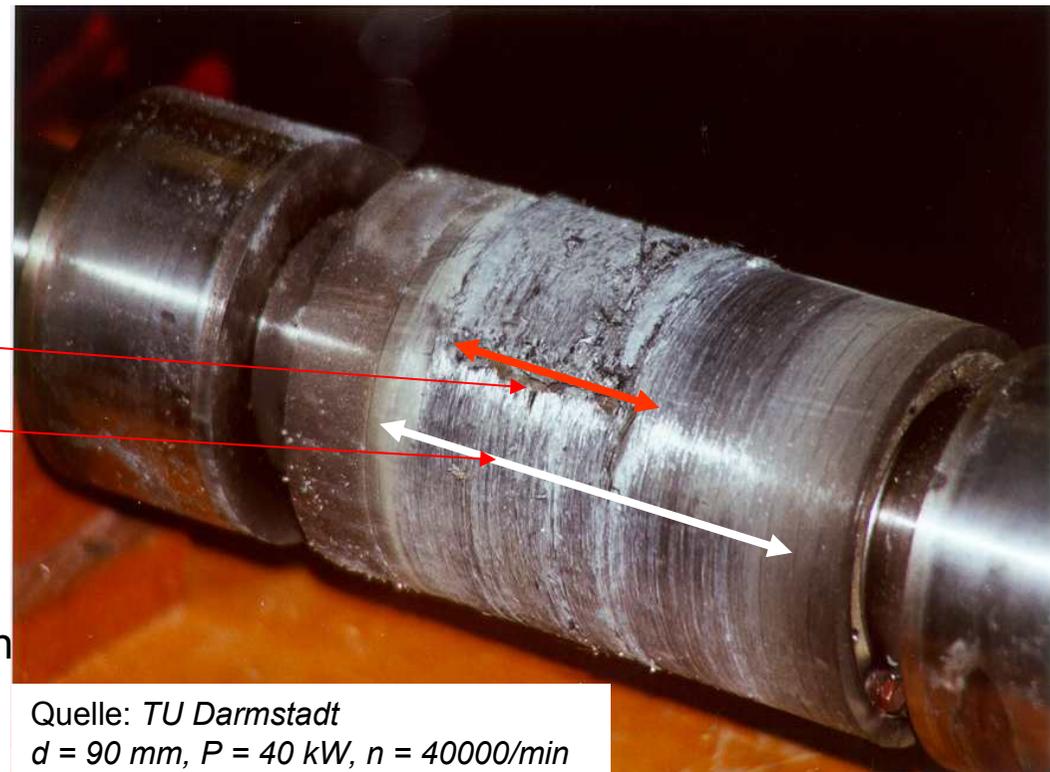
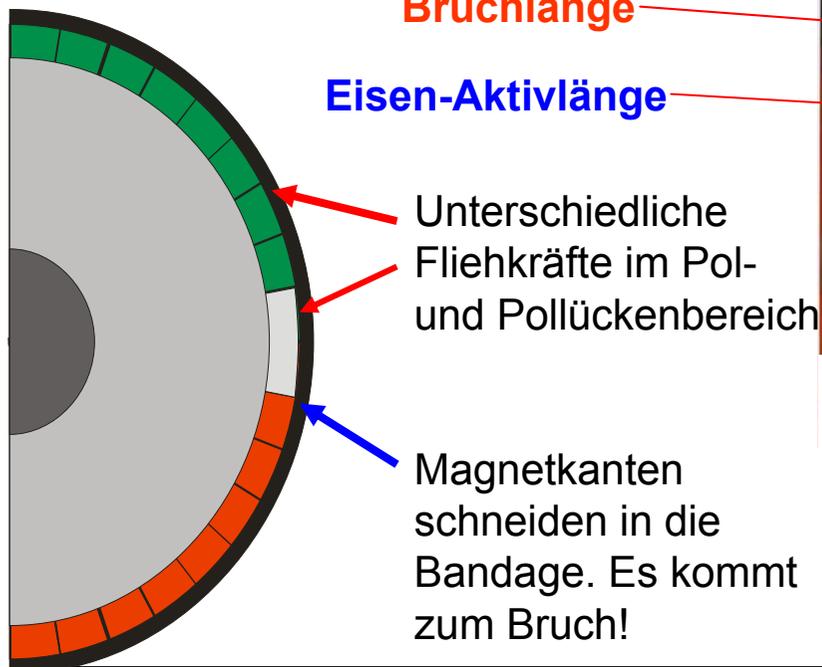
- Genaue mech. Spannungsberechnung bei 120% Überdrehzahl erforderlich
- Soll: Max. Vergleichsspannung unter 0.2%-Dehnungs-Zugspannung  $R_{p0,2}$



# Lagerungs- und Festigkeitsprobleme bei hohen Drehzahlen

## **Beispiel:** Bandagenbruch durch zu hohe Magnetkantenpressung

Bandagenbruch bei  
35000/min



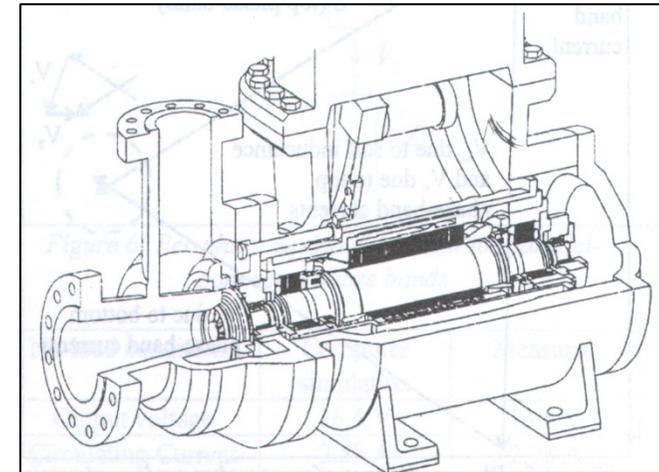
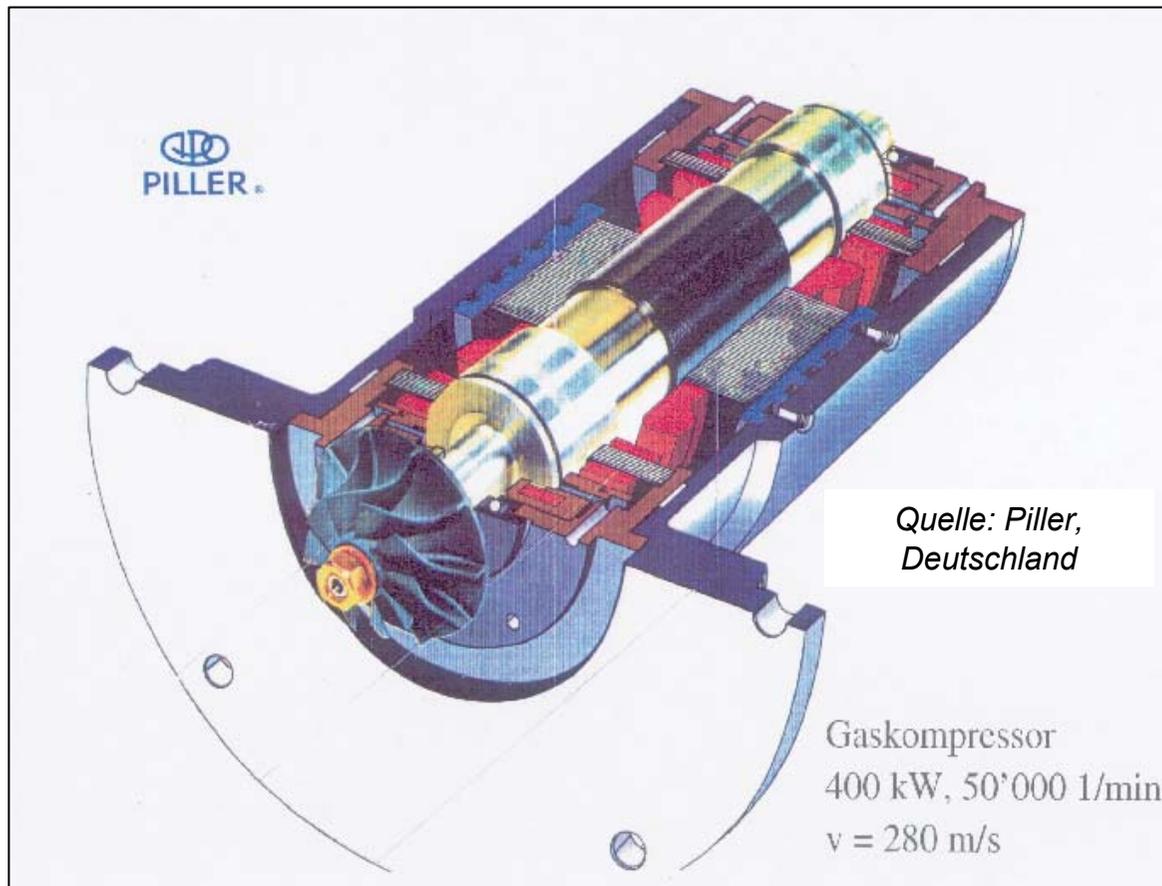
*4-poliger PM-Rotor mit 85% Polbedeckung und einer Kohlefaserbandage, mit Magnetlagern*

## Ausführungsbeispiele und Anwendungen

# Ausführungsbeispiele und Anwendungen

## Hochdrehzahl-Gaskompressor

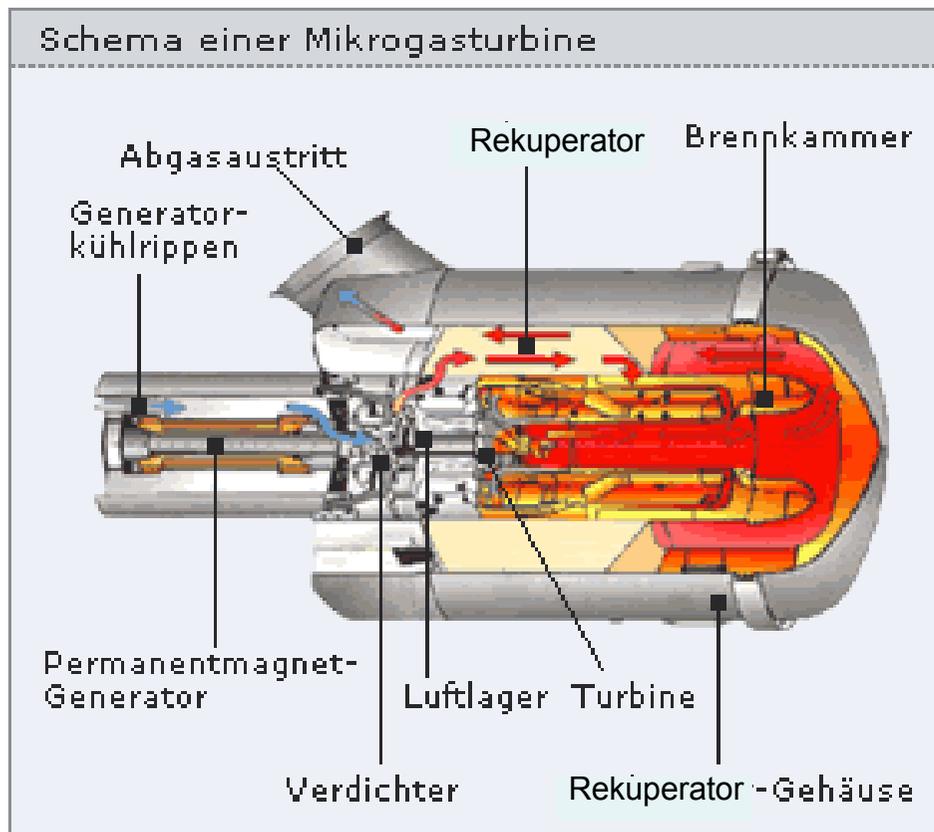
$$n = 50000 / \text{min}, v = d_{si} \pi n = 280 \text{ m/s}, d_{si} = 107 \text{ mm}$$



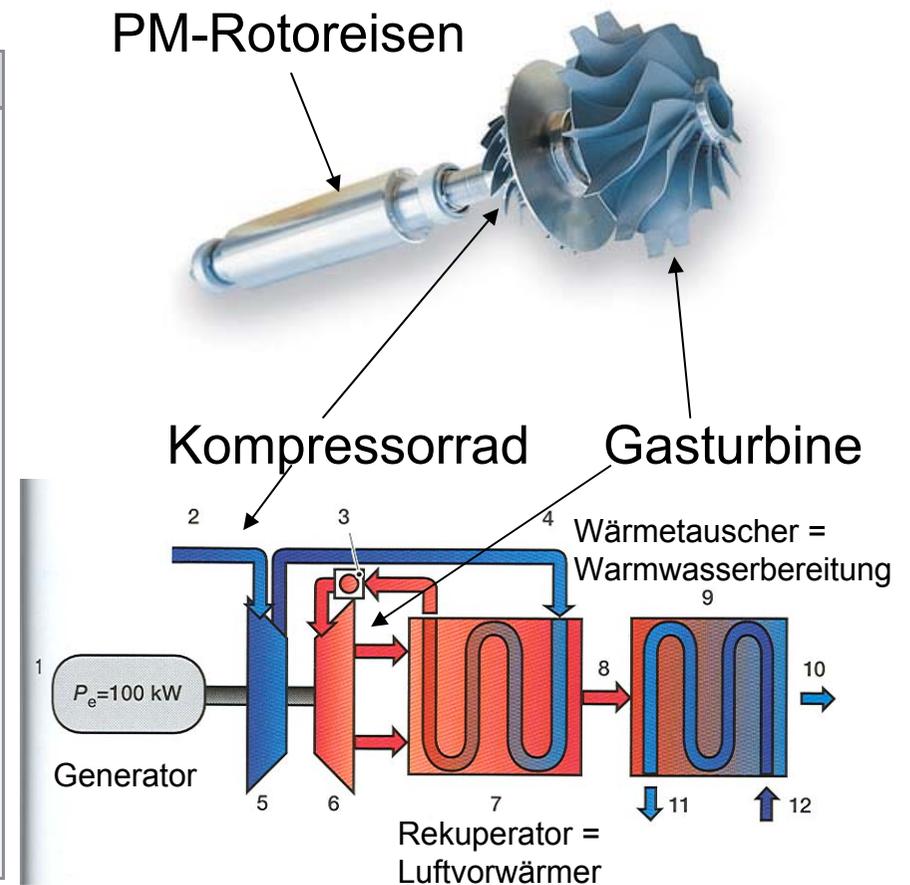
- Magnetlagerung axial und radial
- 400 kW, 50000/min
- Kleine Kompressorrad-abmessungen
- Kohlefaserbandage
- **Getriebeles**

# Ausführungsbeispiele und Anwendungen

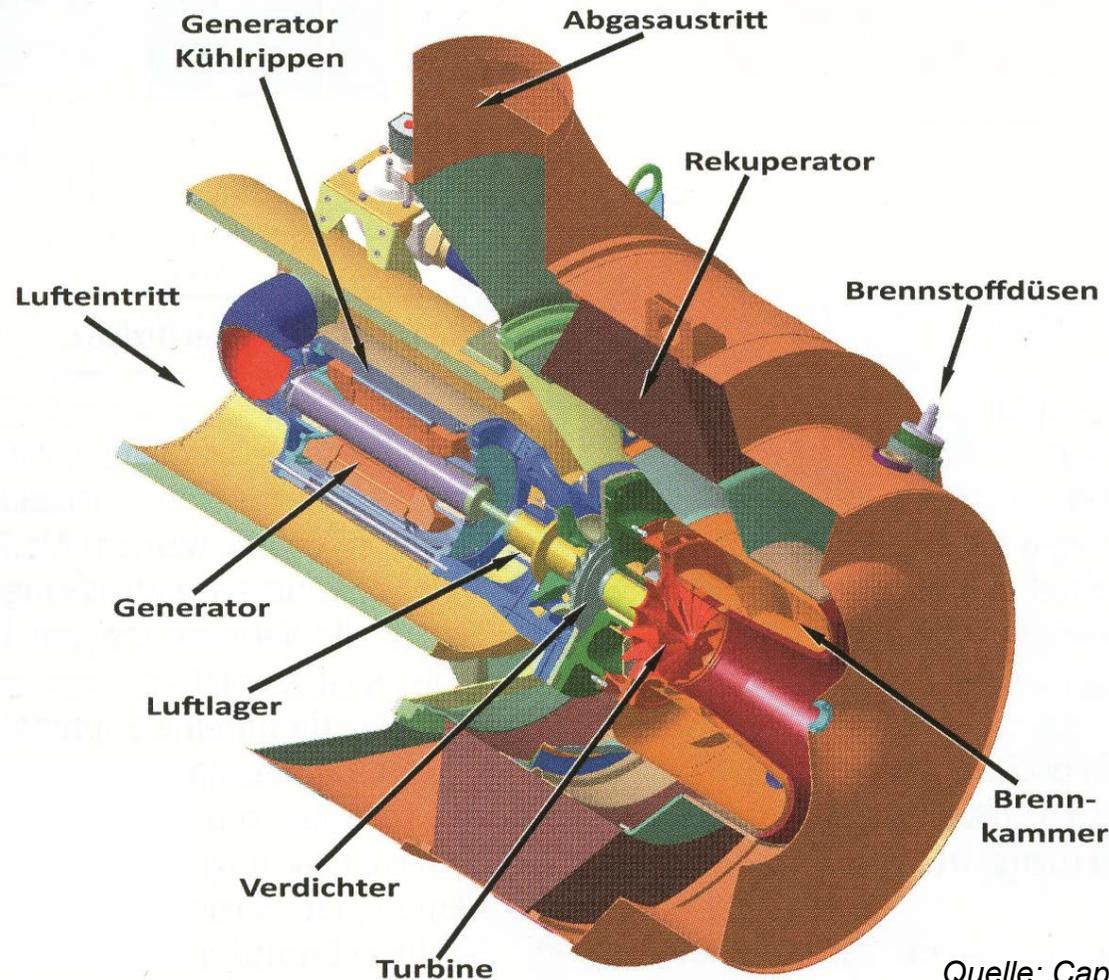
Mikrogasturbine: **getriebeles**, daher Hochdrehzahl-PSM-Generator nötig  
(z. B. 100 kW)



Quelle: ABB, Schweden



# Ausführungsbeispiele und Anwendungen



## „Mikro“-Gasturbine:

### Vorteile:

Gleichzeitige Erzeugung von Wärme und el. Energie, daher hoher thermischer Wirkungsgrad – hohe Gasausnutzung!

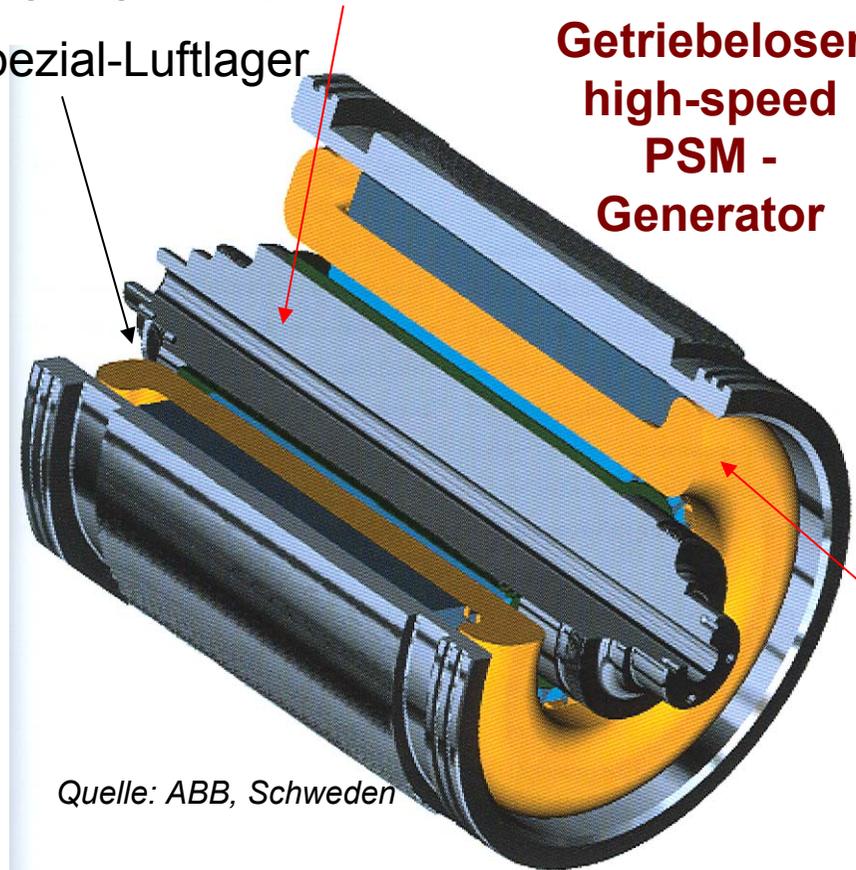
Quelle: Capstone, aus: BWK 64 (2012), no. 11

# Ausführungsbeispiele und Anwendungen

Massiveiserner Rotorkörper für hohe Biegeeigenfrequenz

Spezial-Luftlager

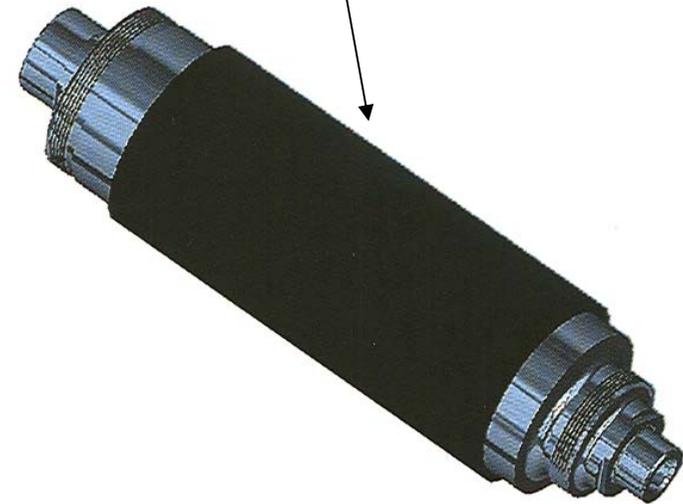
**Getriebeloser  
high-speed  
PSM -  
Generator**



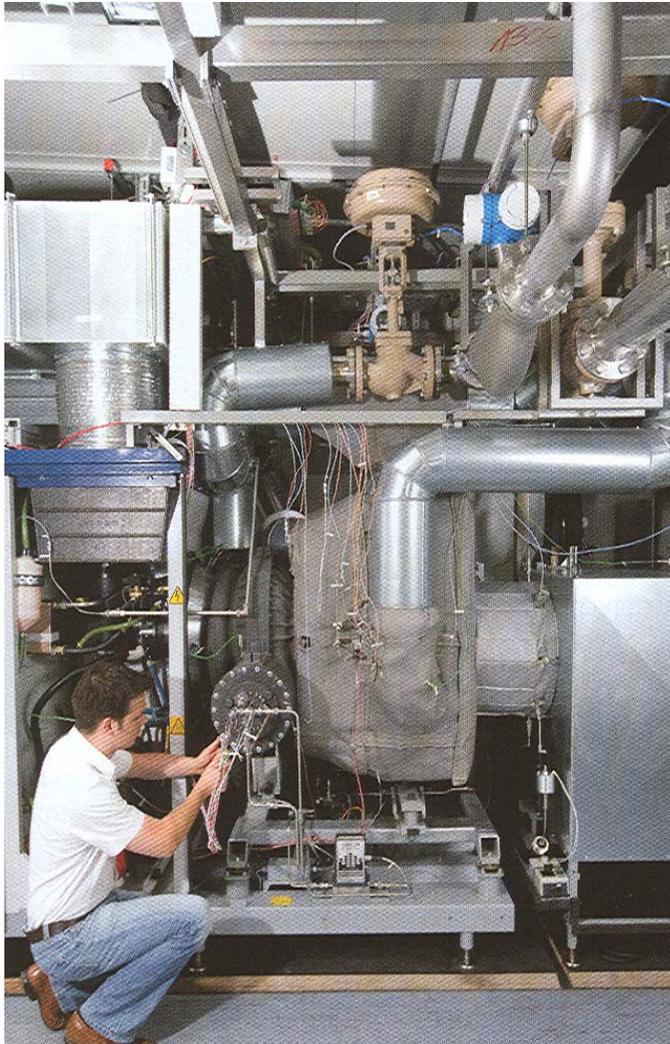
Quelle: ABB, Schweden

70 000/min, 2300 Hz, vierpoliger PSM-Rotor

Kohlefaserbandage



Stator-Drehfeldwicklung vergossen in Harz, Luftmantelkühlung



## Mikrogasturbinen

- Typische Leistungen 50 ... 300 kW ("mikro")
- Drehzahlen 40 000 ... 240 000 / min
- Lärm: nur ca. 65 dB(A) in 1 m Abstand
- Elektrischer Wirkungsgrad 28 ... 33%
- Thermischer Wirkungsgrad 75 ... 90%
- Lebensdauer 80 000 h
- Wartungsintervalle 6 000 h
- Generalüberholung nach 30 000 h

Quelle: BWK 62 (2010), no. 9, p. 65



## Hochdrehzahl-Notstromaggregat: JetVolt-System (1)

- Stromerzeugung mit einer Gasturbine mit integriertem Getriebe und Steuereinheit
- Turbine (ohne Rekuperator ausgeführt): daher nur 10 kg bei 14 PS, 100 000/min
  - sehr klein und leicht
  - im Vergleich zu einem Dieselaggregat 3 ... 5- mal kleiner
  - Verschiedenste flüssige Brennstoffe einsetzbar, da Turbine mit dem Rauchgas betrieben
- Generator über ein Getriebe 5:1 auf 20 000/min übersetzt, dadurch wirkt Turbinenträgheitsmoment 25-fach = geringer Drehzahl-einbruch bei Lastzuschaltung

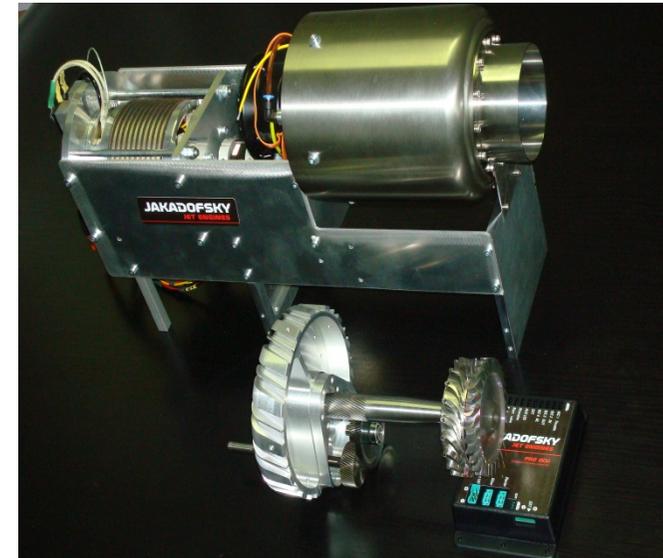
Quelle: Wittenstein, Deutschland &  
Jakadofsky, Kottlingbrunn, Österreich





## Anwendungen für das Hochdrehzahl-Notstromaggregat JetVolt

- Autarke Energie für Pumpen u. Tauchpumpen, z. B. Techn. Hilfswerk (THW), Feuerwehr, ...
- Stromversorgung für Baustellen
- Autarke Energie für mobile Arbeitsmaschinen bzw. Plattformen
- Militärische Zwecke

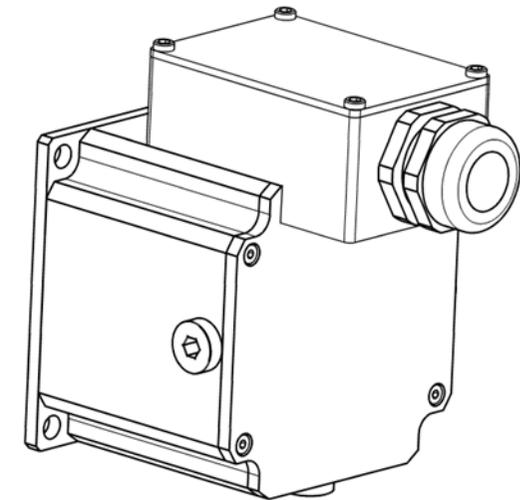
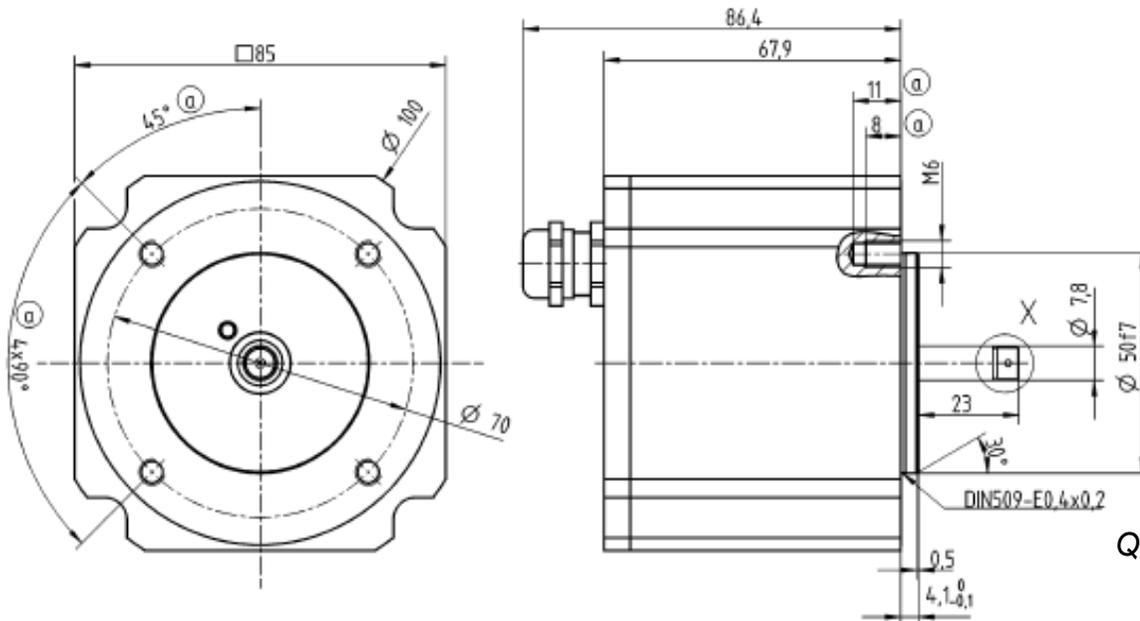


*Quelle: Wittenstein, Deutschland &  
Jakadofsky, Kottlingbrunn, Österreich*

# Ausführungsbeispiele und Anwendungen

## Hochdrehzahltrieb cyber<sup>®</sup> speed motors ca. 4 kW bei 70 000/min

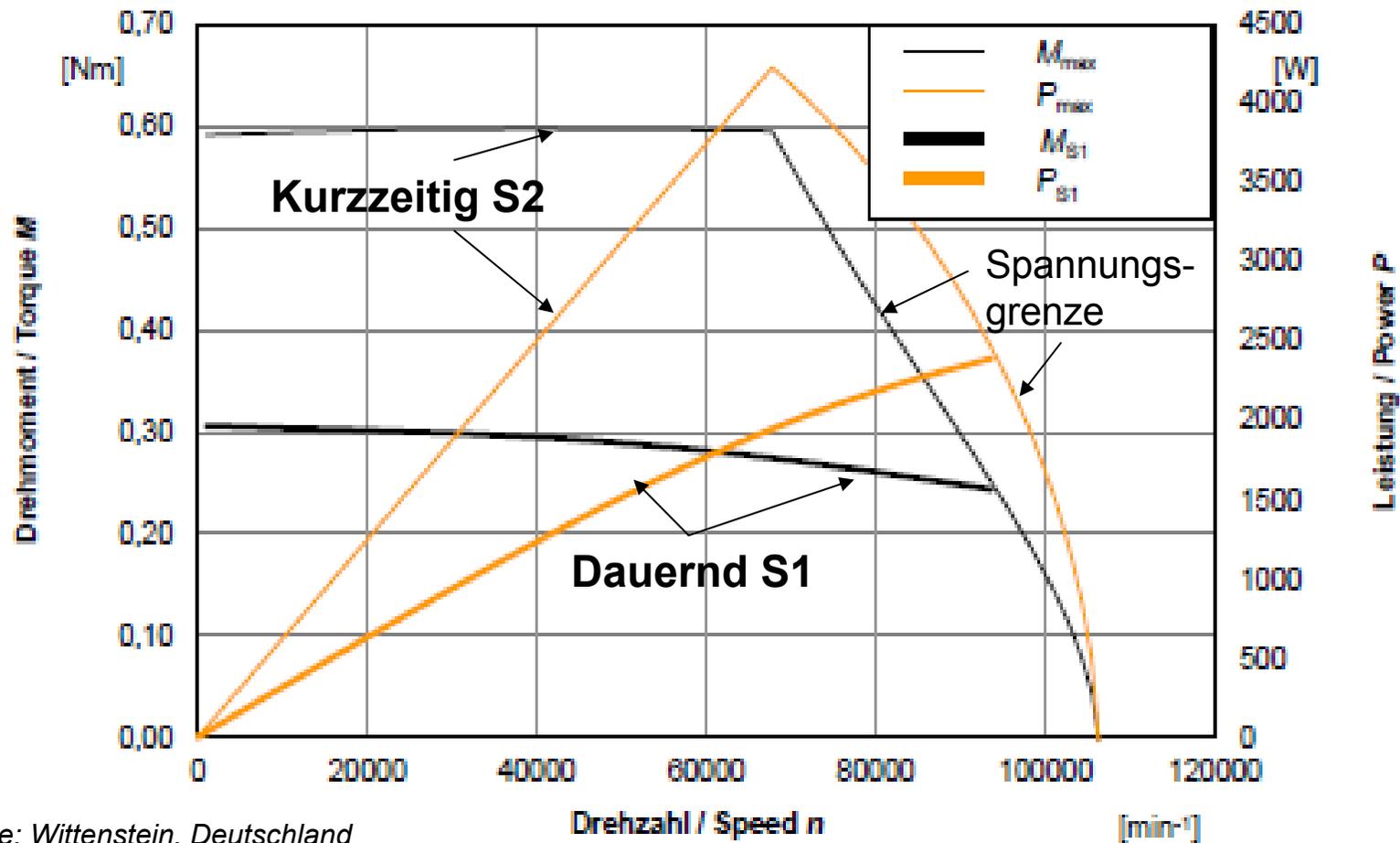
- Hochdrehzahltrieb für höchste Leistungsdichte bei hohen Drehzahlen
- Feedback: geberlos
- Kühlart: wassermantelgekühlt
- Schutzart: spritzwassergeschützt



Quelle: Wittenstein, Deutschland

# Ausführungsbeispiele und Anwendungen

## Hochdrehzahltrieb cyber<sup>®</sup> speed motors: Motorkennlinie



Quelle: Wittenstein, Deutschland

# Ausführungsbeispiele und Anwendungen



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## Hochdrehzahlantrieb cyber<sup>®</sup> speed motors:

### Motorparameter

$$n_{\max} = 106\,570/\text{min}$$

$$n_N = 93\,664/\text{min}$$

Wärmeklasse H 180°C

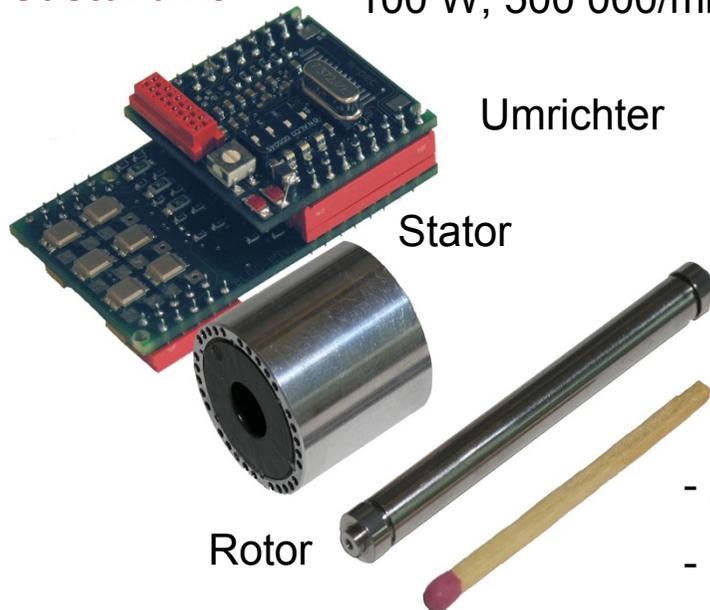
Zwischenkreisspannung	$U_{DC}$	42	V
Drehmomentkonstante	$k_m$	$4,6 \cdot 10^{-4}$	Nm/A
Spannungskonstante	$k_e$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	Vs
Kühlmitteleintrittstemperatur	$\vartheta_{in}$	80	°C
Maximale Wicklungstemperatur	$\vartheta_{max}$	180	°C
Wärmeübergangswiderstand	$R_{th}$	0,97	K/W
Maximale Leistung	$P_{max}$	4231	W
Maximales Drehmoment	$M_{max}$	0,60	Nm
Maximaler Strom	$I_{max}$	132	A
Dauerstillstands Drehmoment	$M_0$	0,31	Nm
Dauerstillstandsstrom	$I_0$	70	A
Leerlaufdrehzahl	$n_0$	106570	1/min
Bemessungsdrehmoment	$M_n$	0,24	Nm
Bemessungsstrom	$I_n$	56	A
Bemessungsdrehzahl	$n_n$	93664	1/min
Anschlußwiderstand	$R_a$	$8,5 \cdot 10^{-4}$	$\Omega$
Anschlußinduktivität	$L_a$	0,027	mH
Elektrische Zeitkonstante	$\tau_e$	3,2	ms
Polpaarzahl	$p$	1	
Massenträgheitsmoment Motor	$J$	$11,3 \cdot 10^{-8}$	kgm <sup>2</sup>
Masse Motor	$m$	1,88	kg



# Ausführungsbeispiele und Anwendungen

## Kleinstgenerator als tragbare Stromversorgung über eine Kleinst- Gasturbine

100 W, 500 000/min



$d_m$ : mittlerer Lagerdurchmesser

Drehmoment	$M_N$	2 mNm
Phasenspannung	$U_N$	11 V
Phasenstrom	$I_N$	3 A
Frequenz	$f_N$	8.3 kHz
Rotoraußendurchmesser	$d$	6 mm
Aktiveisenlänge	$l_{Fe}$	15 mm

- Zweipoliger PSM mit Blockspannungspeisung
- Titan-Rotorbandage
- Umfangsgeschwindigkeit: 157 m/s
- Mechanische Lager  $n \cdot d_m \cong 2 \cdot 10^6$  mm/min  
(rel. kurze Gesamtbetriebszeit)

Quelle: Zwysig et al., ETH Zürich, Schweiz



## Hochleistungs-Hochdrehzahl-Käfigläufermotoren als Gaskompressorantriebe



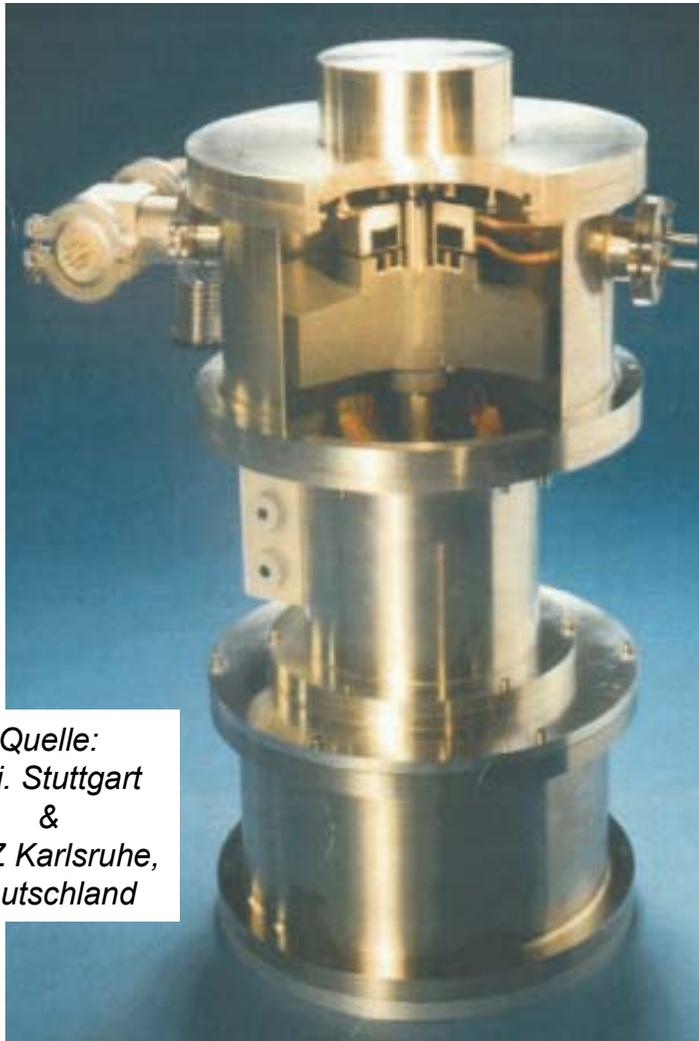
*15000/min, 4 MW Käfigläufer-Rotor*

- Bemessungsdaten: 4 MW, 15000/min, 2.5 kNm ... 16 MW, 6000 /min, 25.5 kNm
- Zweipolig, Kupferkäfig, Massiveisen-Rotor,  $v = \text{ca. } 240 \text{ m/s}$
- Radialmagnetlager, Betriebsdrehzahl oberhalb der ersten Biegekritischen
- Mittelspannungs-IGBT-PWM-Umrichter

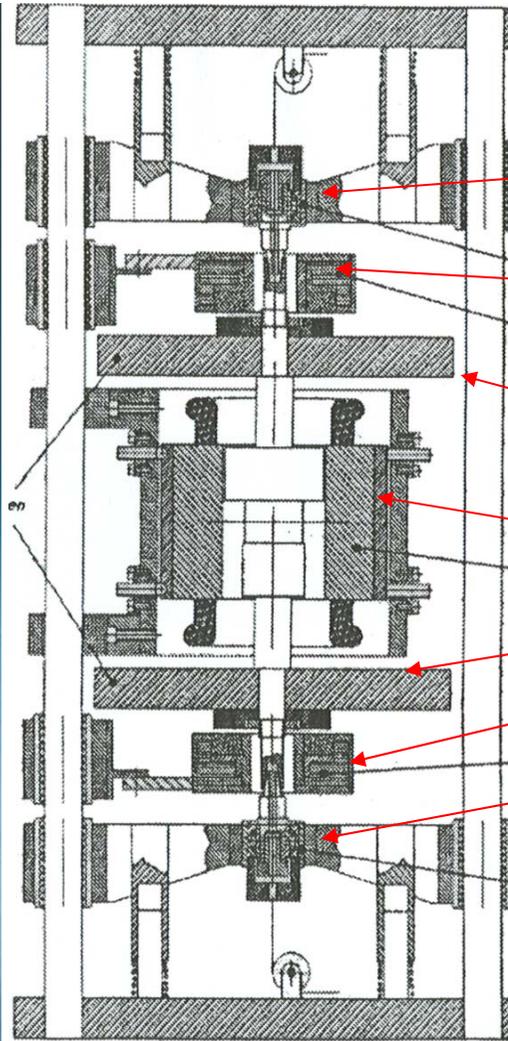
Quelle: Siemens AG



# Ausführungsbeispiele und Anwendungen



Quelle:  
Uni. Stuttgart  
&  
FSZ Karlsruhe,  
Deutschland



## Schwungradspeicher mit Homopolar-Generator

Fanglager

HTSL-Magnetlager 77 K  
(Yttrium-Barium-Cuprat)  
HTSL = Hochtemperatur-  
Supraleiter

Schwungrad

Homopolar-Generator

Schwungrad

HTSL-Magnetlager 77 K

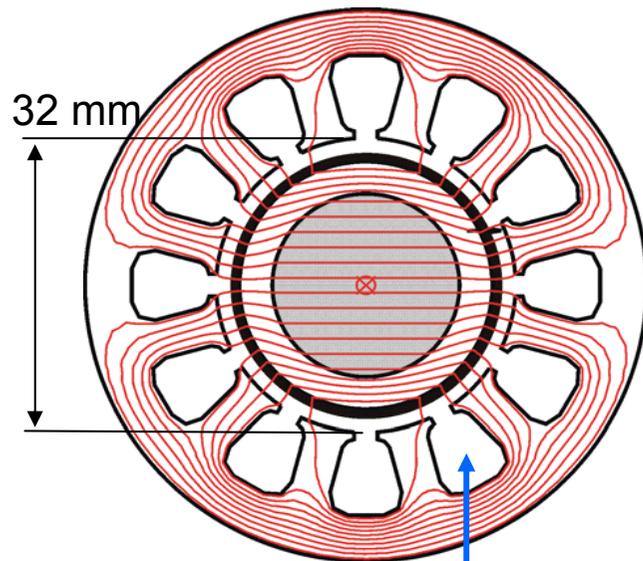
Fanglager

**300 Wh, 10 kW,  
50 000/min  
Vakuumbetrieb**

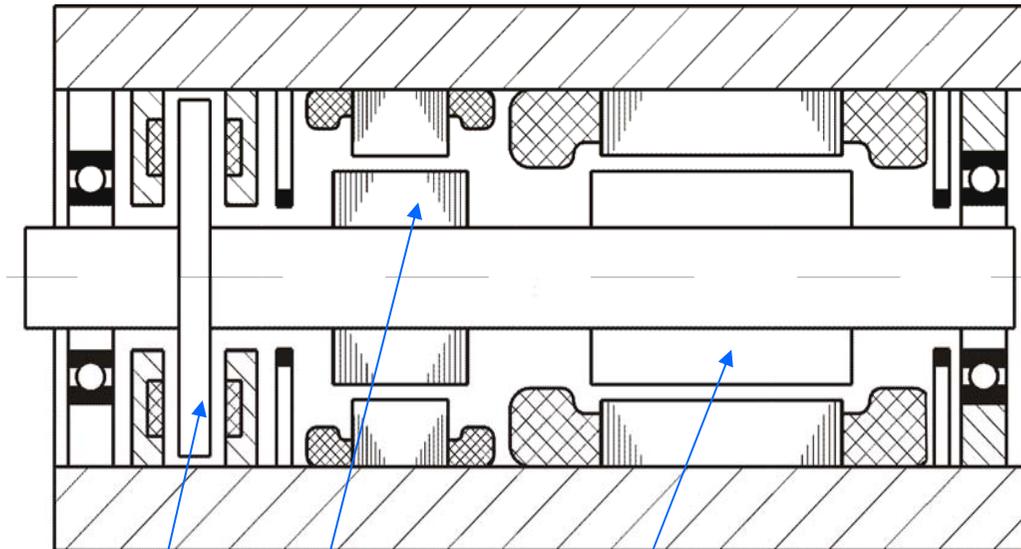


# Ausführungsbeispiele und Anwendungen

## Lagerloser Hochdrehzahl-PSM als Kompressorantrieb 500 W, 60 000/min



Rotor-Leerlaufeld, Programm FEMAG



Axial- &  
Radialmagnet-Lager

Lagerloser PSM als  
Motor UND  
Radialmagnetlager

### Lagerloses Konzept:

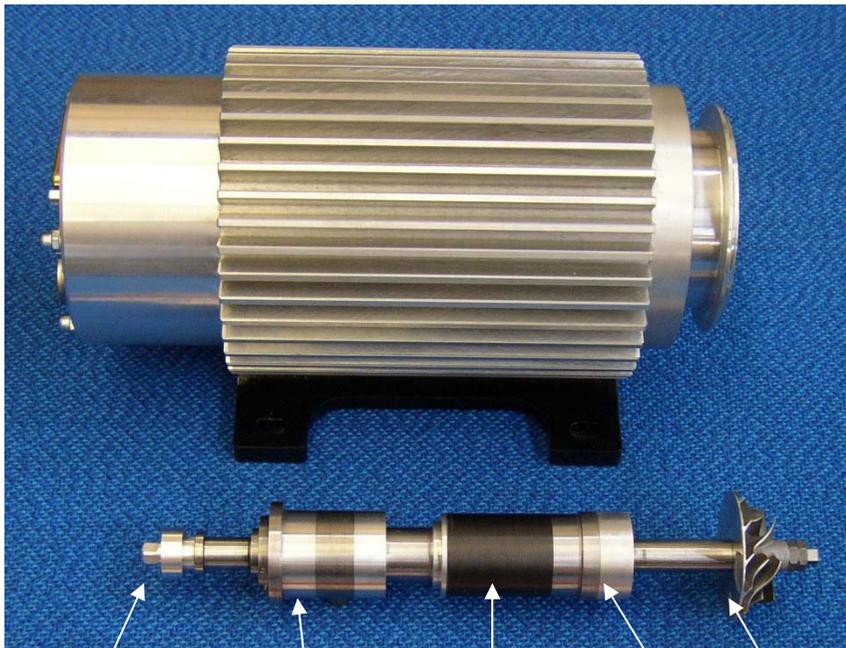
Zwei 3-phasige Statorwicklungen mit der Polzahldifferenz 2 ergeben einen magnetisch einseitigen Zug, der als Magnetlagerkraft genutzt wird

- Zweipolige Antriebswicklung  $2p_1 = 2$
- Vierpolige Tragwicklung  $2p_2 = 4$

Quelle: TU Darmstadt, Deutschland

# Ausführungsbeispiele und Anwendungen

## Ausgeführter Prototyp 500 W / 60 000 /min



Axialsensor- Spur    Magnetlager mit Messspur    PM-Rotor    Mess- spur    Kompressor- rad

- Stator: Luft-Oberflächengekühlt (natürl. Konvektion)
- Rotor: PM-Läufer: NdFeB-Magnethülse
- Kohlefaserbandage

Ansteuerung des lagerlosen Motors mit der Leistungselektronik ML51008 (LEViTEC)

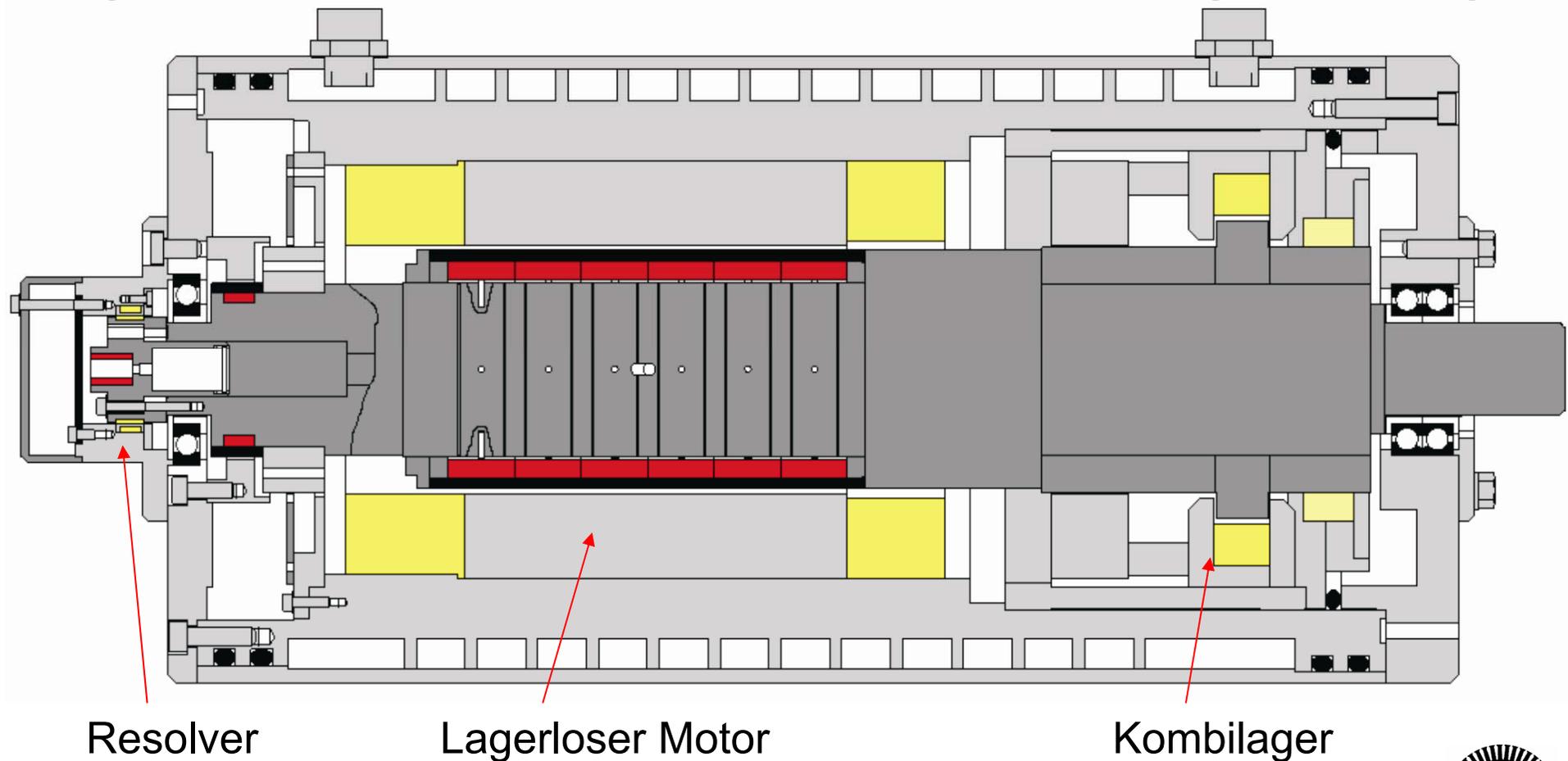


- Rotation bis 60 000 /min
- Tragwicklung als Magnetlager: Feldorientierte  $d-q$ -Strom-Regelung
- Zweiter Lagerpunkt ist Kombi-Axial-Radial-Magnetlager

Quelle: TU Darmstadt & Levitec, Lahnau, Deutschland

# Ausführungsbeispiele und Anwendungen

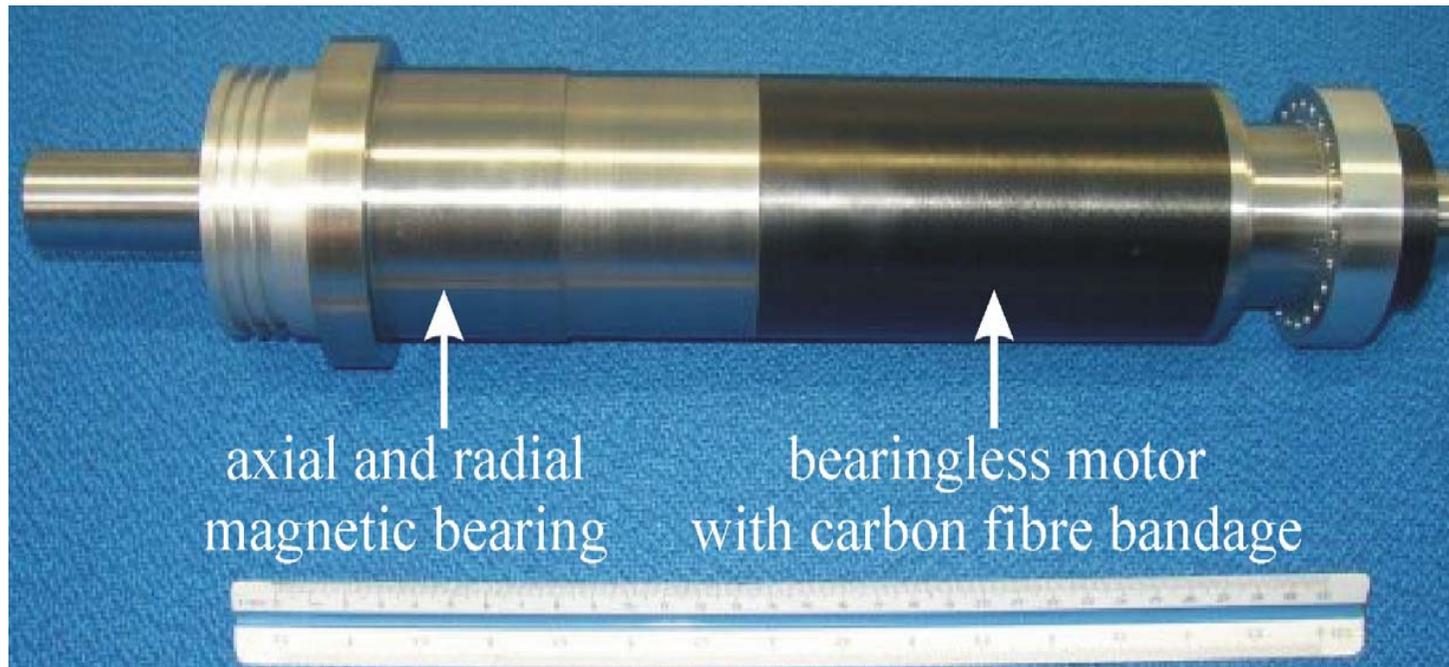
## Lagerloser Motor 40 kW, 40 000/min mit Axial-Radial-Magnetkombilager



Quelle: TU Darmstadt & Levitec, Lahnu, Deutschland

# Ausführungsbeispiele und Anwendungen

## Läufer des lagerlosen High-Speed PSM-Motors 40 kW, 40000/min



40000/min

40 kW

Vierpolig

$f_s = 1333 \text{ Hz}$

$v = 167 \text{ m/s}$

### LAGERLOSES Tragen:

#### Zwei 3-phasige Statorwicklungen:

- Vierpolige Antriebswicklung  $2p_1 = 4$
- Sechspolige Tragwicklung  $2p_2 = 6$

- Rotor geschleudert  
bei 44000/min ( $v = 185 \text{ m/s}$ )

Quelle: TU Darmstadt & Levitec, Lahnu, Deutschland



---

# Hochdrehzahlantriebe und mögliche Einsatzgebiete

---



## Zusammenfassung



# Zusammenfassung

- Hochdrehzahl = hohe Läufer-Umfangsgeschwindigkeiten 100 ... 250 m/s
- Kleines Volumen-Leistungs-Verhältnis & getriebeloses Antriebssystem
- Großer Bereich “Leistung/Drehzahl” gebauter Hi-Speed-Antriebe:  
1 000 000 /min, 0.1 kW ... 3800 /min, 80 MW
- PM & elektr. erregte Synchronmaschinen, Käfigläufer- & Massivläufer-Asynchronmaschinen, Homopolarsynchronmaschinen, geschaltete Reluktanzmaschinen
- Umrichter Ausgangs-Grundfrequenz bis zu einigen kHz
- Ausgangsfilter oder andere Stromglättungsmaßnahmen empfohlen
- Breite Einsatzmöglichkeiten: Deshalb deutliche Zunahme von Hi-Speed-Anwendungen zu erwarten

# Hochdrehzahlantriebe und mögliche Einsatzgebiete

*Danke für ihre Aufmerksamkeit !*

Quelle: TU Darmstadt, Deutschland