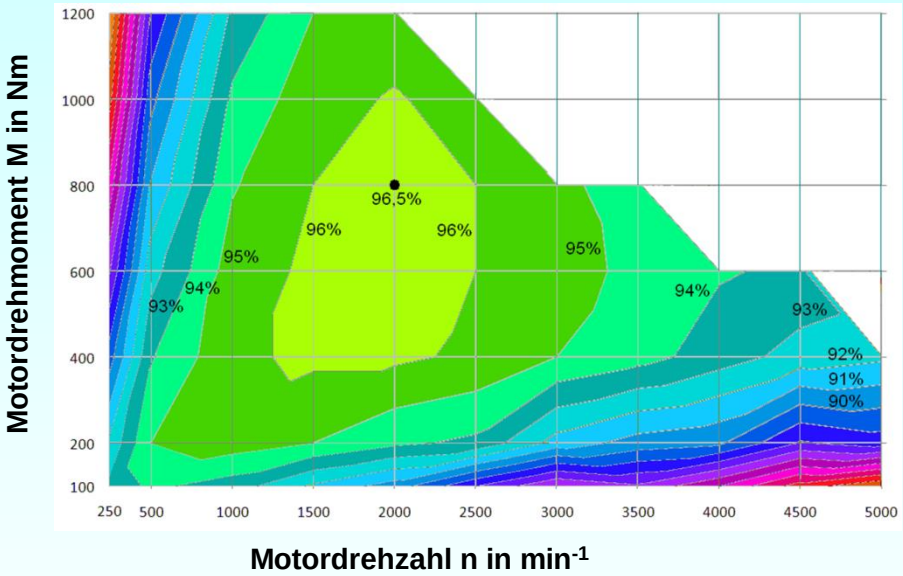
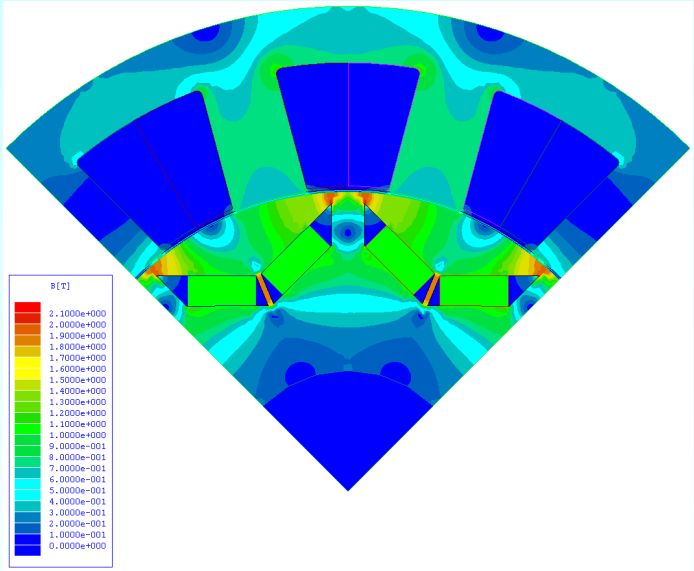
# Innovationen bei elektrischen Traktionsmaschinen für Straßen- und Schienenanwendungen




## Prof. Dr. phil. Dr.-Ing. habil. Harald Neudorfer

**Institut für elektrische Energiewandlung / TU – Darmstadt**

**Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe / TU – Wien**

**Allgemein beeideter und gerichtlich zertifizierter Sachverständiger**

**Staatlich befugter und beeideter Ziviltechniker für Elektrotechnik**

# Vortragsübersicht

1 Arten von elektrischen Maschinen – Übersicht

2 Verluste und Temperaturgrenzen bei Elektrischen Maschinen

3 Optimierungspotential durch Einsatz

- Innovativer Maschinentechnologien
- Innovativer Materialien
- Innovativen Magnetanordnungen
- Innovativen Kühlmethoden
- Gesamtsystem Wechselrichter

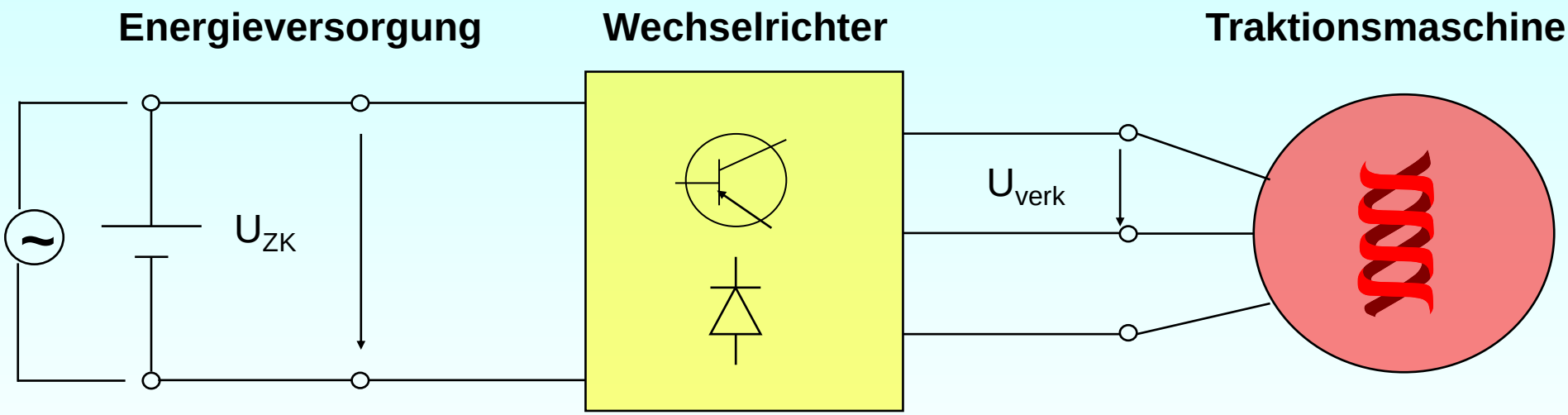
4 Parasitäre Effekte

5 Wirtschaftliche Risken

6 Entwicklung von Wirkungsgraden von Antrieben

7 Zusammenfassung

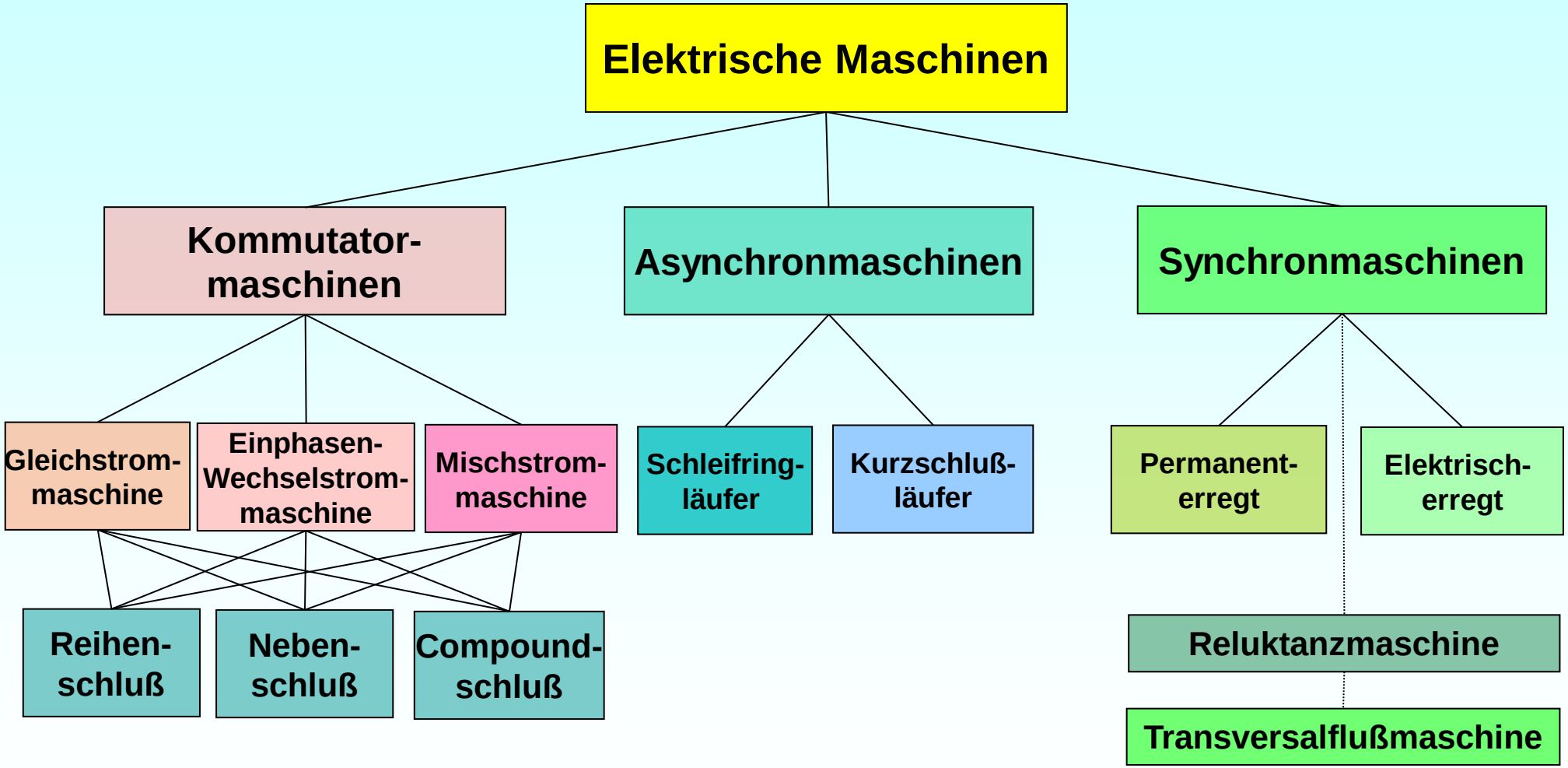
# Grundstruktur des elektr. Antriebsstranges




| | | | |
|---|---|---|---|
| **NV:** | **$U_{ZK}$ = 600 -750 V** | **IGBT-WR** | **Asynchronmaschine ASM** |
| **VB:** | **$U_{ZK}$ = 500 – 2300 V** | **Transistor-WR** | **PM-Synchronmaschine PSM** |
| | | | **Switched Reluctance Masch. SRM** |
| | | | **Gleichstrommaschine GSM** |
| | | | **Transversalflußmaschine TFM** |

**NV: Nahverkehr, VB: Vollbahn**

# 1 Arten von elektrischen Maschinen – Übersicht




Einteilung der Elektrischen Maschinen

# 1 Arten von elektrischen Maschinen

| Maschine | AS | PSM | SR | GS | TF |
|---|---|---|---|---|---|
| Momentendichte | +/- | ++ | + | - | ++ |
| Wirkungsgrad | +/- | ++ | +/- | - | + |
| Masse | + | ++ | + | - | ++ |
| Stand der Technik | ++ | + | +/- | ++ | -- |
| Wechselrichter | + | +/- | - | ++ | -- |
| Kosten Maschine | +/- | +/- * | + | -- | - |
| Kosten System | +/- | - | - | +/- | - |
| Fertigung | + | +/- | ++ | - | -- |
| Geräusch | + | ++ | - | + | -- |

AS: Asynchron-, PSM: Permanentmagnet-Synchron-, SR: Switched Reluctance-,
GS: Gleichstrom- TF: Transversalfluß-Maschine * abhängig von den Selten-Erden-Materialien

# 1 Arten von elektrischen Maschinen

## Allgemeine Beanspruchungen elektrischer Traktionsmaschinen

### Mechanische Beanspruchung

| | | |
|---|---|---|
| Stoßbelastung | Automotivbereich | 5 - 10 g |
| | Bus / LKW Bereich | 10 – 25 g |
| | Bahnbereich | 30 – 100 g |

Dichtungen bei rotierenden Teilen
kompakte Bauweise
Fliehkraftbelastungen auf dem rotierenden Teilen

### Thermische Beanspruchung

| | |
|---|---|
| Umgebungstemperatur: | - 30 °C bis +90 °C |
| Luftfeuchtigkeit: | bis 100 % |

Thermische Ausnützung
Isolationsklasse 180/200/220/250 max. mittlere Wicklungstemperaturen

### Elektrische Beanspruchung

| | |
|---|---|
| Sinusspeisung: | Prüfspannung lt. Norm |
| Wechselrichterspeisung: | du/dt = bis 10 kV/µs bei IGBT- WR, 50 kV/µs bei SiC- WR |

| | | |
|---|---|---|
| Lebensdauer: | Automotivbereich | 10 Jahre (200.000 – 250.000 km) |
| | Bus / LKW Bereich | 10 – 15 Jahre (600.000 – 1.000.000 km) |
| | Bahnbereich | 30 – 40 Jahre (x Millionen km) |

# 1 Unterschied Traktionsmotor PKW / Bus / Bahn

| | Einheit | PKW | Busse / LKW | Bahn |
|---|---|---|---|---|
| Lebensdauer | Jahr | bis 10 | bis 15 | bis 40 |
| Vibration | $m/s^2$ | 50 - 100 | 100- 250 | 200 - 1000 |
| Stückzahlen | | hoch | gering | gering |
| Leistung | kW | 50 - 150 | 200 - 400 | 50 - 1600 |
| Hersteller | | viele | wenige | wenige |
| Maschinentype | | PSM (ASM) | PSM (ASM) | ASM (PSM) |
| Streckenkilometer | km | 200.000 | 1 Million | Millionen |
| Innovations-bereitschaft | | groß | mittel | gering |

# 1 Ausnutzung elektrischer Maschinen

## Allgemeine Auslegungskriterien elektrischer Maschinen

**Innere Scheinleistung**

$$S_N = D_i^2 \cdot l_{Fe} \cdot n \cdot \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot \xi_1 \cdot A \cdot B_1$$

**Esson´sche Leistungszahl**

$$C = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot \xi_1 \cdot A \cdot B_1$$

**Drehmoment**

$$M \sim D_i^2 \cdot l_{Fe} \cdot C \sim V_{Rotor} \cdot C$$

**weitere Auslegungsparameter: Wärmeabfuhr, Fliehkräfte, thermische Klasse, Stöße und Vibrationen, Umweltbedingungen, Einsatzdauer,…**

| | | Industrieantriebe | Traktionsantriebe |
|---|---|---|---|
| Esson´sche Leistungszahl | kVAmin/m³ | 2 bis 5* | 3 bis 10* |
| Thermische Klasse | EN 60034/60085 | 155/180 | 180/200/220/250 |
| Einsatztemperatur | °C | - 20 bis 40 | - 40 bis 60 |
| Spannungsversorgung | | Sinus bzw. WR | Wechselrichter WR |

* je nach Baugröße, Kühlart, Einsatzbedingungen

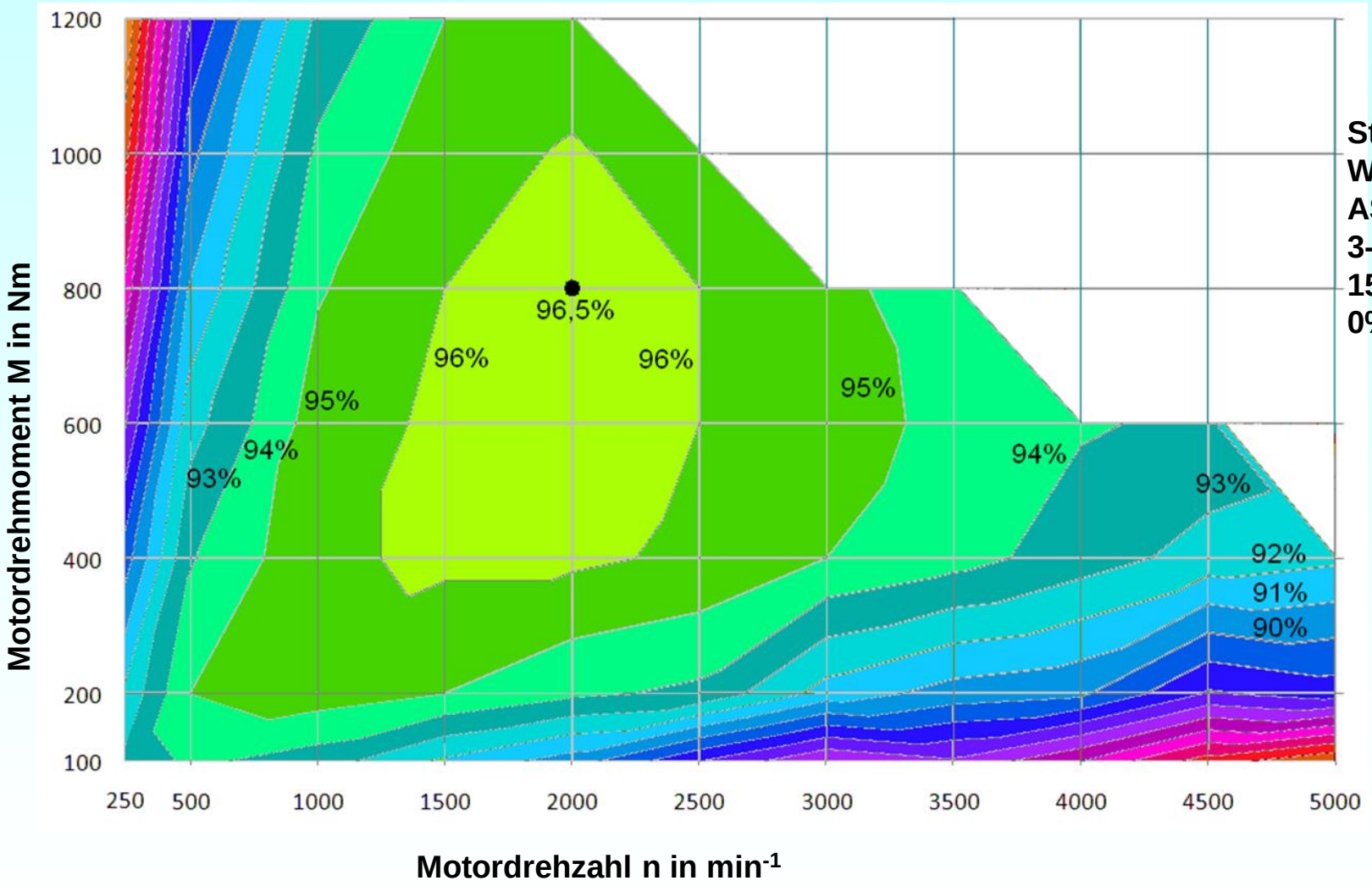
# 1 Vergleich ASM / PSM

## Fremdventilierter Busmotor

| Typ | TMF | TMPF |
|---|---|---|
| Art | **ASM** | **PSM** |
| P | **120 kW** | **200 kW** |
| n | 1705 $min^{-1}$ | 1925 $min^{-1}$ |
| M | 672 Nm | 993 Nm |
| $\dot{V}$ | 0,25 $m^3/s$ | 0,25 $m^3/s$ |
| m | 350 kg | 342 kg |
| $\eta_{max}$ | 92,6 % | 96,5 % |

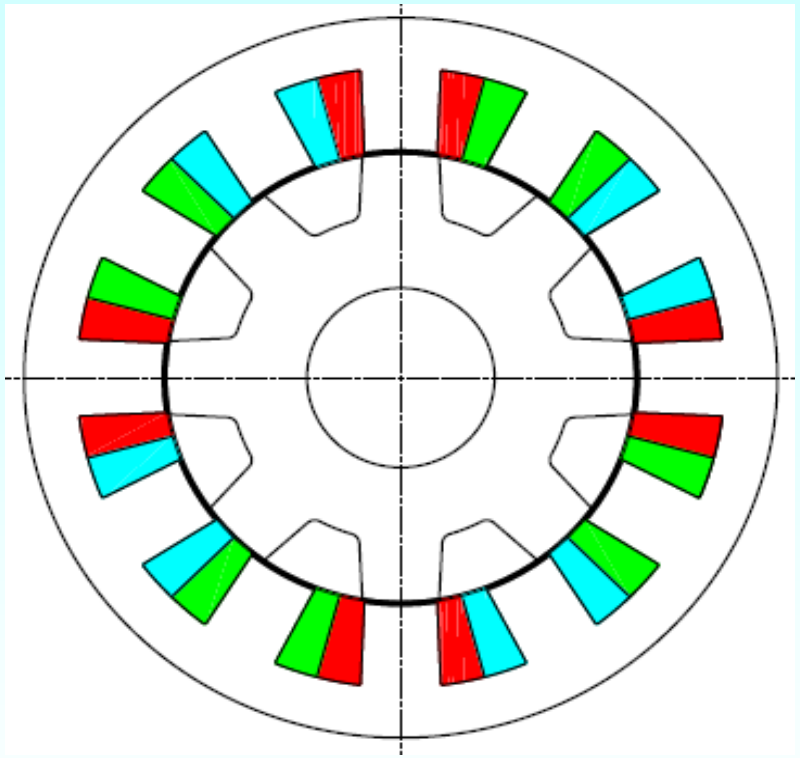
**Steigerung der abgegebenen mechanischen Leistung: 67 %**
**Steigerung des abgegebenen mechanischen Drehmomentes: 48 %**

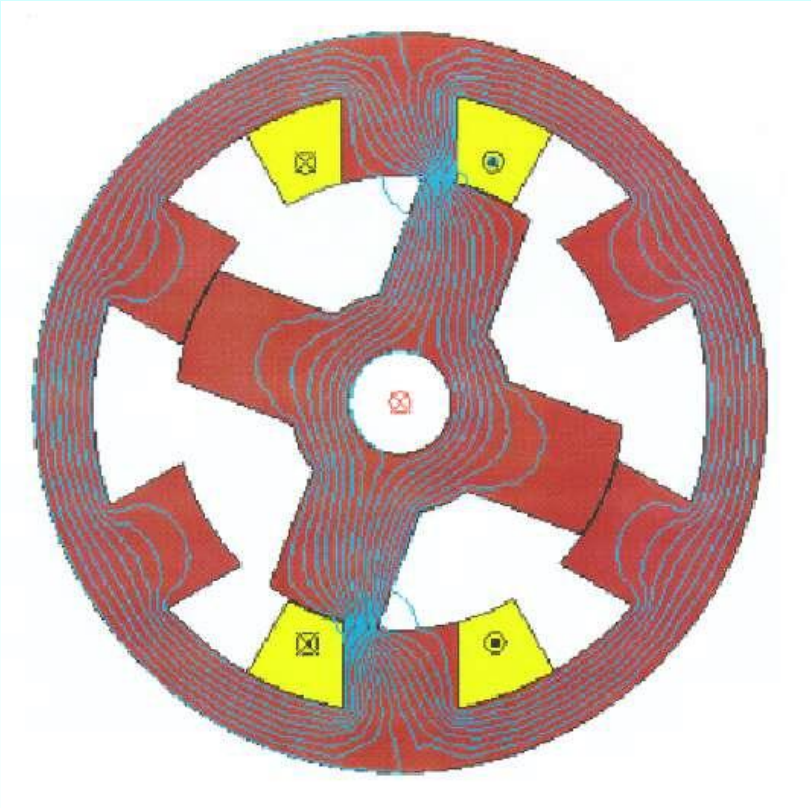
# 1 PM-Motor TMPF : Wirkungsgrad Kennlinienfeld




**Steigerung des Wirkungs-grades:**
**ASM- PSM**
**3-4% im Bestpunkt,**
**15-25% beim Anfahren**
**0% bei n max**

# 1 Geschaltete Reluktanzmaschine SRM





**Blechquerschnitt [3]**

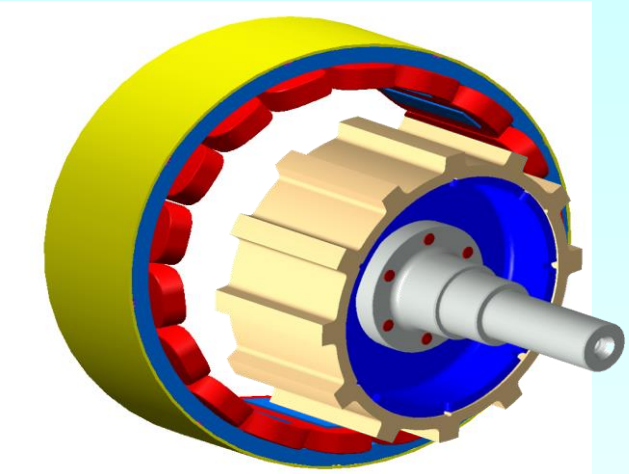
**12 Statorzähne, 8 Rotorzähne**

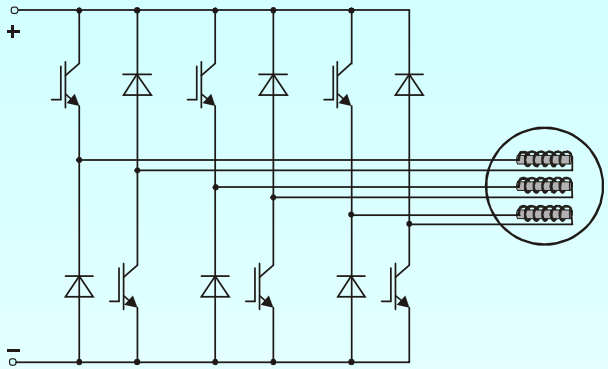
**Magnetischer Fluss bei einer 6/4 SRM**

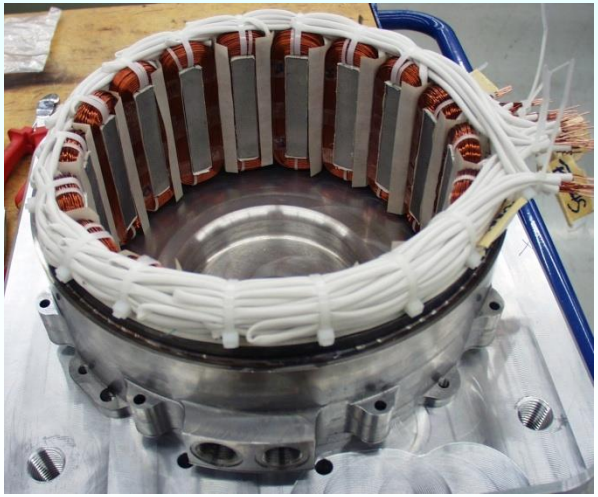
# 1 Geschaltete Reluktanzmaschine SRM

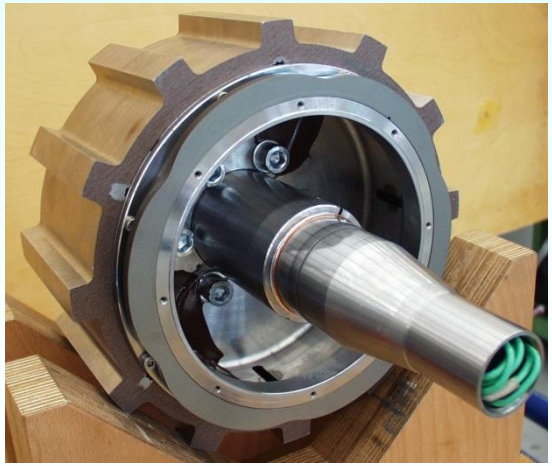
- Einzelzahnwicklung
- Rotor nur Blechpaket
- Rotorlagegeber

+ geringe Kosten
+ einfacher Rotoraufbau
- 6 Anschlußleitungen
- Motorsteuerung
- Eisenverluste bei $f_{max}$



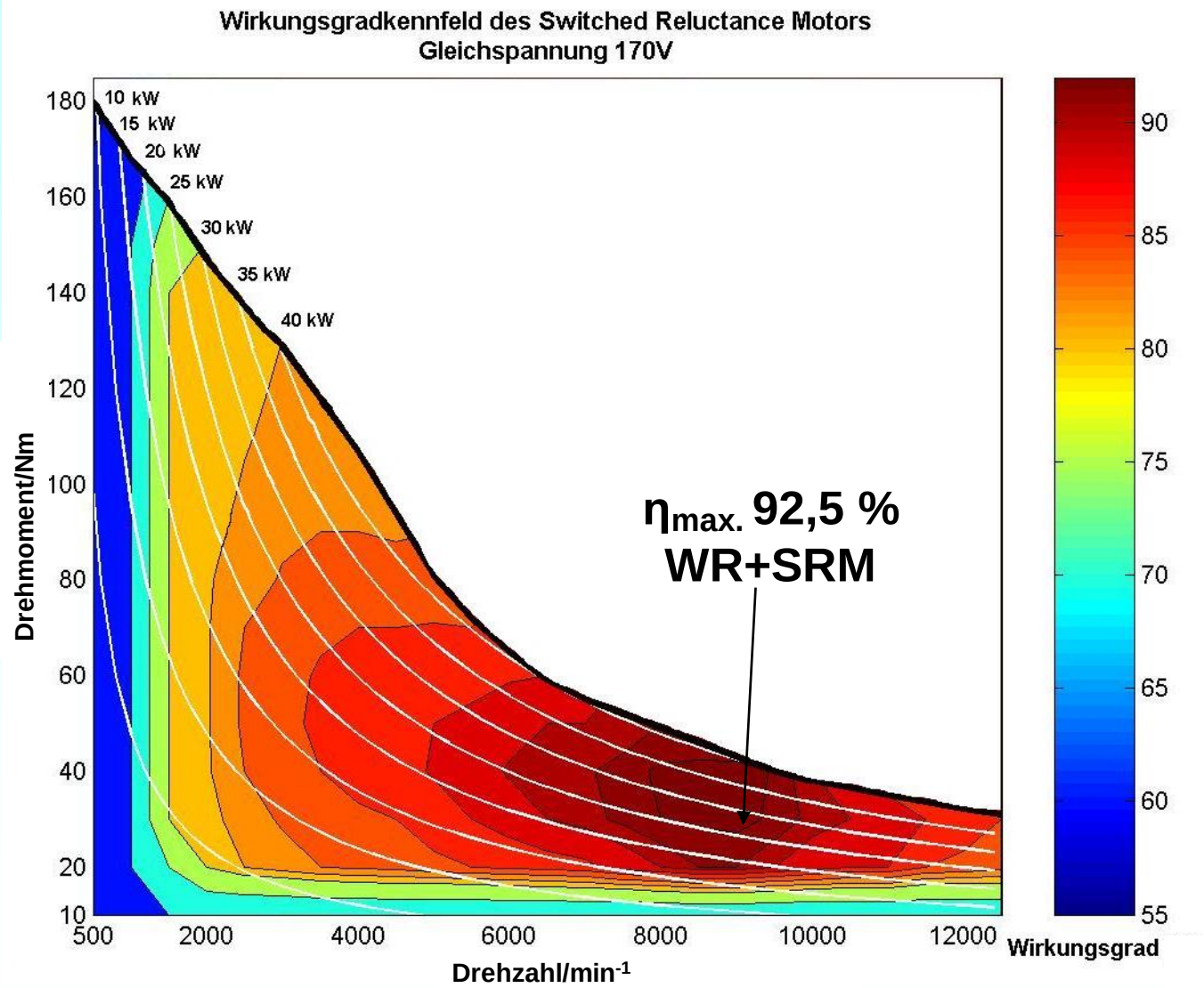




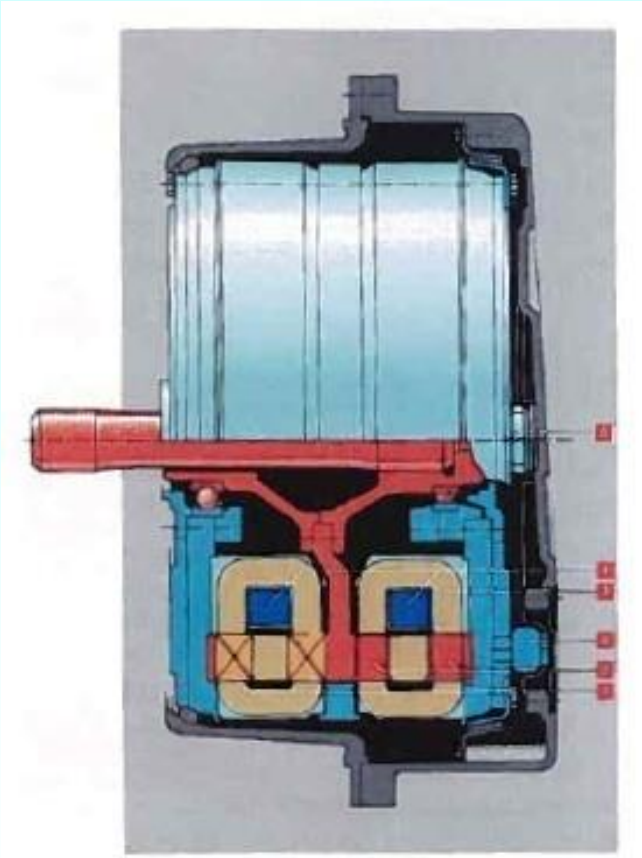
# 1 Geschaltete Reluktanzmaschine SRM

**SRM**

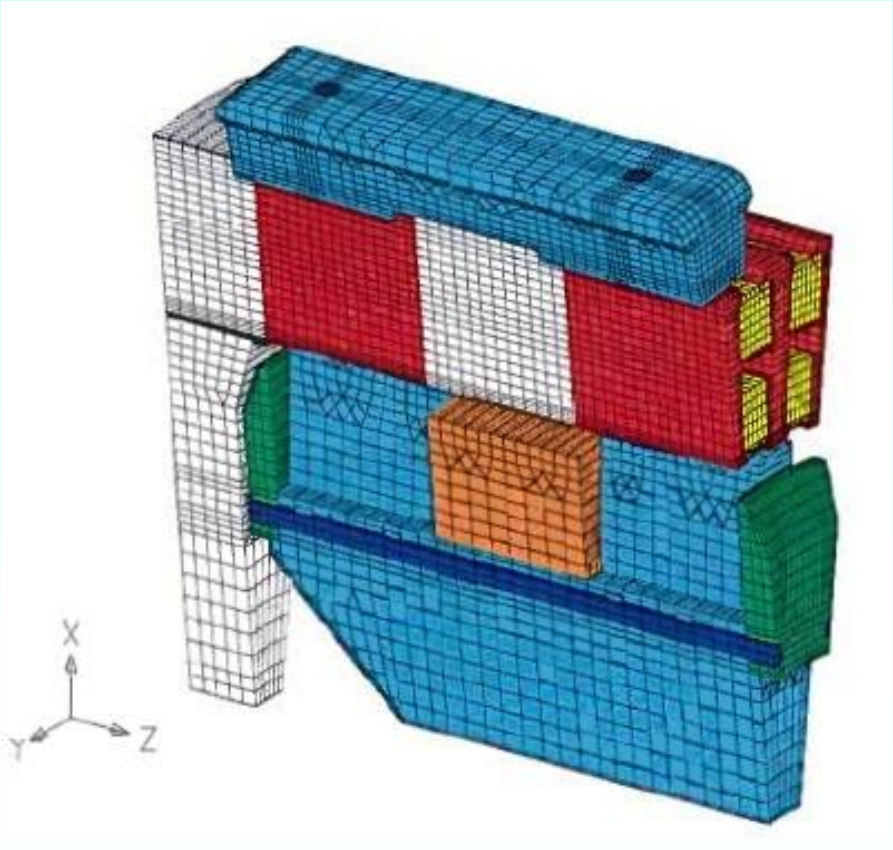



Habilitationsschrift Seite 282

# 1 Transversalflussmaschine TFM



Querschnitt einer TMF nach Bauweise von Voith




FE- Berechnung der beiden Statorteile und des Rotorteiles

# 1 Transversalflussmaschine TFM

**Vorteile der TMF:**

- Hohe Leistungs- und Momentendichte
- sehr einfache Spulenkonstruktion und Fertigung
- keine Wickelköpfe, somit kürzere axiale Länge
- Direktantrieb (z. B. Rad) ohne Getriebe möglich

**Nachteile der TMF:**

- aufwendige Konstruktion bei einer 3 – phasige Ausführung
- hoher Streuflussanteil (schlechter cos φ)
- durch hohe Polzahl hohe Statorfrequenzen
- magnetische Felder in drei Richtungen
- viele, aber gleiche magnetische Eisenteile
- Drehzahllagegeber notwendig (bei bei PM und SR)

# 2 Temperaturgrenzen bei elektrischen Maschinen

| | | Industriemaschinen | Traktionsmaschinen |
|---|---|---|---|
| | | EN 60034 | EN 60349 |
| Wicklung: | Temperaturklasse | max. mittlere Wicklungstemperatur | |
| | 180 | 180 °C | (220 °C) |
| | 200 | (200 °C) | 240 °C |
| | 220 | (220 °C) | 260 °C |
| | 250 | (250 °C) | (290 °C) |

**ASM:** bei Kurzschlussläufer keine Temperaturgrenze in Norm, es dürfen benachbarte Teile durch Erwärmung nicht beeinträchtigt werden.

**PSM:** Grenztemperatur der PM abhängig vom Material
bei Selten Erden Magneten (NdFeB – Magneten) ca. 180 – 200 °C
bei Ferriten SmCo – Magneten höher (bis 300 °C)

**Lager:** Wälzlager ohne Temperaturstabilisierung bis max. 150 °C

**Lagerfett:** abhängig von Grundstoff (mineralische oder synthetische Öle)
max. jedoch 150 bis 170 °C, starke Beeinträchtigung der Lebensdauer

**Dynamoblech:** max. 300 °C bei Lackbeschichtung darüber Veraschung des Lackes
max. 500 °C bei phosphatierten Blechen

# 2 Verluste in elektrischen Maschinen

**Verluste elektrische Maschinen**

| | | |
|---|---|---|
| **Ummagnetisierungs-verluste** | Stator: ASM, PSM, SRM<br>Rotor: ASM, PSM, SRM | $P_{fe} = k_1 .B^2 . f + k_2 .B^2 . f^2$<br>- Hystereseverluste<br>- Wirbelstromverluste |
| **Stromwärmeverluste** | Stator: ASM, PSM, SRM<br>Rotor: ASM | $P_{cu} = I^2 . R_w$<br>$R_w – R_k.(1+\alpha.\Delta \theta)$ |
| **PM-Verluste** | Rotor: PSM | Wirbelstromverluste |
| **Reibungsverluste** | Luft- und Lagerreibung | |
| **Zusatzverluste** | $P_{zus} = 0{,}005 . P_{zu}. (I^2/I_n^2)$ lt. Norm | |
| **Wechselrichter-bedingte Zusatzverluste** | <u>Abhängigkeiten:</u><br>Taktfrequenz, Induktivitäten, Zwischenkreisspannung, LE-Bauelemente | |

# 3 Innovative Maschinentopologien

**Kombination Radialfluss- und Axialflussmaschine**

**Bei Radialflussmaschinen wirkt der drehmomentbildende Luftspalt nur auf der Mantelfläche der Rotoroberfläche. In Kombination mit Axialflussmaschine werden auch die Stirnflächen der Rotoroberfläche elektromagnetisch ausgenutzt.**

**Axialflussmaschine**

**Bei besonderen Maschinenabmessungen (D>>L) sind Radialflussmaschinen eine sinnvolle Alternative.**

**Quelle: University of Alabama**

**Quelle: Hokkaido University**

**ASM mit N1 phasiger, polumschaltbarer Statorwicklung**

**Die Statorwicklung besteht aus Kupferstäben, die auf der Verschaltungsseite durch einen „Kurzschlussring“ leitend verbunden sind. Auf der anderen Seite ist ein N1 phasiger Wechselrichter direkt mit dem Kupferstab verbunden.**

**Quelle: BW-Uni München Prof. Gerling**

# 3 Innovative Maschinentopologien

**Kombination Innenläufer-Außenläufermaschine und Kombination Radialfluss- und Axialflussmaschine**

Bei dieser Maschinentopologie werden auf dem Stator eine Wicklung für einen Außenläufer und eine für einen Innenläufer angeordnet. Dadurch wird die drehmomentbildende Luftspaltoberfläche vergrößert.

Quelle: HET Motors

**Elektrisch erregte Synchronmaschine mit induktiver Energieübertragung der Erregerleistung**

Um schleifende Teile (Kohlenbürsten) zu vermeiden, wird eine induktive Übertragung im Hochfrequenzbereich (100 kHz) verwendet. Dadurch erreicht man eine elektrisch erregte Synchronmaschine ohne Wartungsteile.

Quelle: Chalmers University of Technology

# 3 Innovativer Materialien

## Verminderung der Eisenverluste

### Verwendung von innovativen Dynamoblechen

**Kobaltblech (CoFe):**
**Hohe Sättigungsflussdichte, daher höhere Ausnutzung und kleinere Baugröße**
**Geringere Verluste verglichen mit siliziumlegiertem Blech (SiFe)**
**Vergleichbare mechanische Eigenschaften wie SiFe**

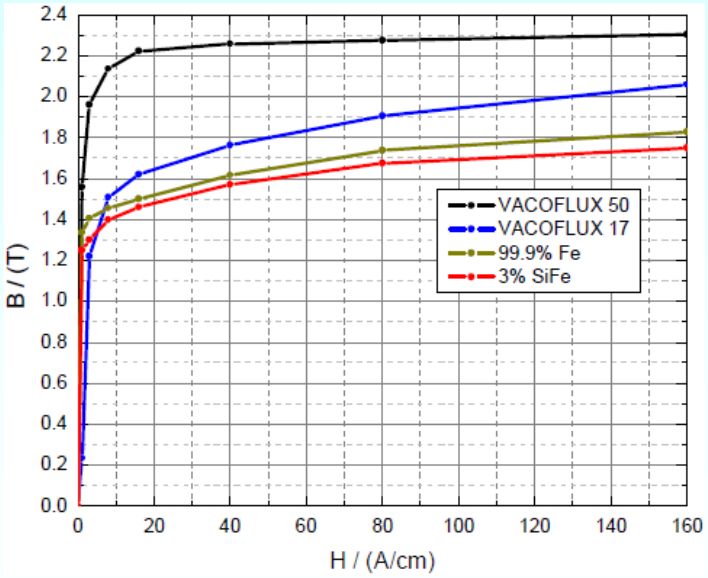



**Bild: VAC**

| Eisenverluste in W/kg | 50 Hz; 1 T | 50 Hz; 1,5 T | 400 Hz; 1 T |
|---|---|---|---|
| SiFe: M400-50A | 1,7 | 4,0 | 29,0 |
| CoFe: VACOFLUX 50 | 1,0 | 1,8 | 15,5 |

# 3 Innovativer Materialien

## Verminderung der Stromwärmeverluste

- **Verwendung von Supraleiter**
  **Supraleiter sind Materialien, deren elektrischer Widerstand beim Unterschreiten einer „kritischen Temperatur“ Te (auch Sprungtemperatur) auf Null fällt und die externen Magnetfelder aus ihrem Inneren verdrängt werden. (Meißner-Ochsenfeld Effekt)**

- **Metallische Supraleiter: Sprungtemperatur < 23 K (-250,15°C) z.B.: Al: 1,14 K**
- **Eisenhaltige Supraleiter: Sprungtemperatur < 55 K (-218,15°C) z.B.: SmFeAs0 0,85, 53,5 K**
- **Hochtemperatur Supraleiter: Sprungtemperatur >138 K (-135,15°C) z.B.: $Hg_{0,8}Tl_{0,2}Ba_2Ca_2Cn_3O_8$**
- **Keramische Supraleiter (Cuprate) spröde Materialien z.B.: Yttriumbariumkupferoxid $YBa_2Cn_3O_{7-5}$**
- **Siedetemperatur Stickstoff 77 K**
- **Anwendung: Supraleiter-Lager, Erzeugung starker Magnetfelder, Energiewandlung**
- **Nachteil: enormer Kühlungsaufwand für Traktionsmaschinen**

# 3 Innovativer Materialien

**Composite-Materialien aus Kupfer und Carbon/Nanotubes**

**Carbon Nanotubes weisen in bestimmten Konfigurationen eine deutlich höhere elektrische Leitfähigkeit als Kupfer auf. Nachteile sind derzeit die enormen Kosten.**

**Quelle: Oak Ridge National Laboratory, USA**

**Kobalt-Eisen-Bleche**

**Kobalt-Eisen-Bleche haben um ca. 10-20% höhere Induktionswerte bei gleichem Durchflutungsaufwand. Dadurch kann das Drehmoment der Maschine um diesen Bereich erhöht werden.**
**Nachteil: Die Bleche sind ca. 20 mal teurer als siliziumlegierte Eisenbleche.**

**Quelle : VAC**

**SMC (Soft Magnetic Composites)**

**Pulververbundwerkstoff, der in relativ komplexen Geometrien hergestellt werden kann, geringe Dichte, dreidimensionale Flussführung, günstige magnetische Eigenschaften bei hohen Frequenzen, kleine Wirbelstromverluste, daher geringe Verluste bei Wechselrichterspeisung.**

**Quelle : Höganäs**

# 3 Innovative Materialien

**Permanentmagneten mit reduziertem Dysprosiumanteil**

Dysprosium ist ein teures und rares Selten-Erde-Element. Ziel ist es, dysprosiumfreie Permanentmagnete zu erzeugen, die jedoch hohe Entmagnetisierungsfestigkeit aufweisen.

Quelle : Daido Steel

**Weichmagnetische nanokristalline Materialien**

Höhere Sättigungspolarisation
Dies kann durch einen monokristallinen Aufbau erzeugt werden. Derzeit sind diese Materialien jedoch extrem teuer.

Quelle: TU- Wien

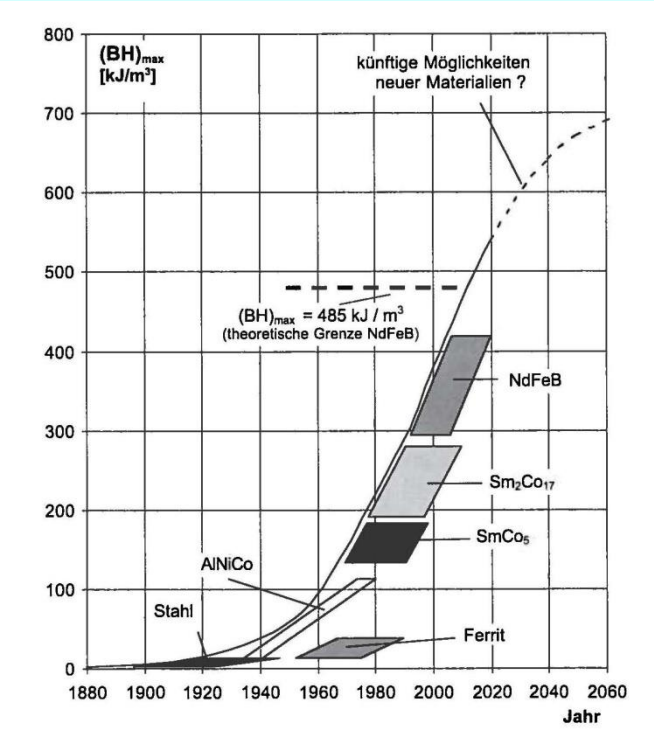
**Siliciumcarbid als Halbleitermaterial für Wechselrichter**

Wesentliche Verringerung der Schaltverluste, dadurch höhere Taktfrequenzen möglich. Dies ergibt auch geringere wechselrichterbedingte Zusatzverluste in der Traktionsmaschine

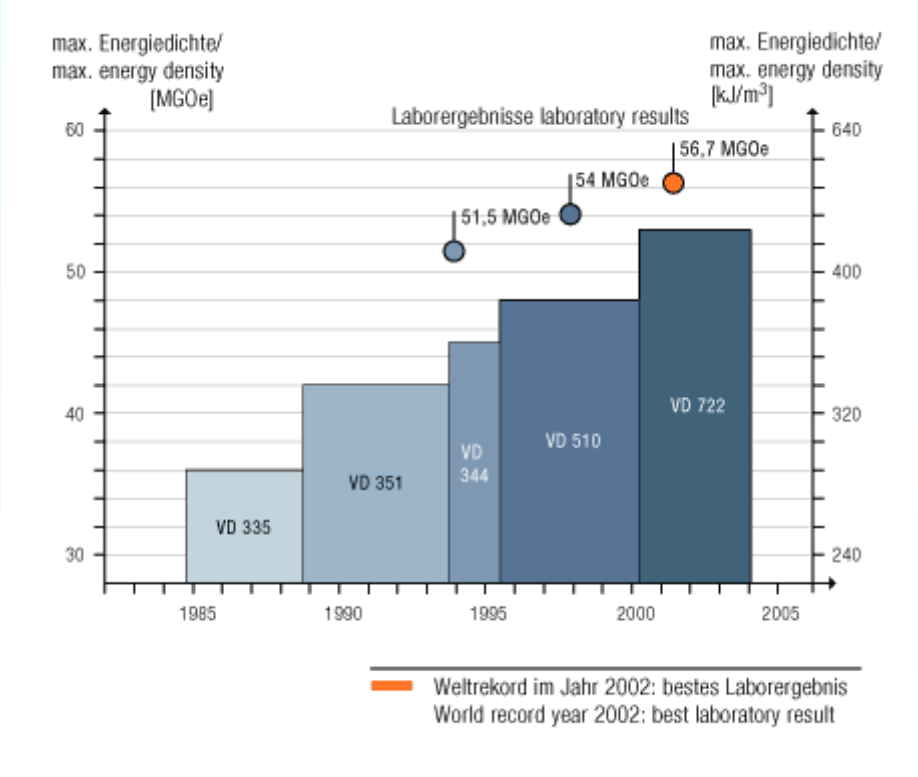
Quelle: Mitsubishi

## Verminderung der PM-Verluste

### Teilung der PM in Einzelmagnete: Reduzierung der Wirbelstromverluste




**Entwicklung der Energiedichten $(BH)_{max}$ von Dauermagneten und deren Potential**




**Entwicklung der Energiedichte von Dauermagneten**

**Quelle: VAC**

# 3 Innovative Magnetanordnungen

| | |
|---|---|
| **Halbach Anordnung** | **Durch Verdrehung von einzelnen kleinen Permanentmagneten um jeweils 90° erreicht man eine Konzentration der Feldlinien auf einer Magnetseite.** |
| **PSM Maschine mit 90° Stellung der PM** | **PSM mit Rotor aus lammelierten Blechen und PM mit radialer Anordnung (90° - Stellung) bestehend und mit zwei Edelstahlpressringen auf beiden Seiten verschraubt dadurch starke Flusskonzentration.** |
| **Kombination synchrone Reluktanzmaschine mit PSM mit Ferrit-Magneten** | **Durch vermehrten Einsatz des Reluktanzmomentes ist es möglich, auf hochpreisige Selten-Erden-Elemente Magnete zu verzichten und stattdessen günstige Ferritmagnete einzusetzen.** |

# 3 Innovative Kühlmethoden

**Spaltrohrkühlung**

Um den Statorbereich 1 (Statorwicklung 3 und Statorblechpaket 2) von den rotierenden Teilen 4 zu trennen, wird ein dünnes Rohr 6 im Bereich des Luftspaltes in axialer Richtung angebracht.

**Traktionsmaschine mit Luftwellenkühlung**

In einer Hohlbohrung der Welle ist eine spiralförmiger Radialförderschnecke angeordnet, die Luft vom Außenraum in einen abgeschlossenen Raum im Rotor fördert.

Quelle: Dissertation Ruf

# 3 Innovative Kühlmethoden

**Heat Pipes**

Thermische Leitfähigkeit ca. 10 mal größer als bei Kupfer. Voraussetzung ist jedoch, dass das verwendete Fluid an der heißen Seite verdampft und auf der kalten Seite kondensiert.

Quelle : Advanced Cooling Technologies

**Direktdrahtkühlung für E-Traktionsmaschinen**

Durch den Hohlleiter der Statorwicklung wird eine Kühlflüssigkeit gepumpt, welche die Statorkupferverluste dirket am Verlusort abführt. Bei hohen Windungszahlen und somit hoher Leiterlänge entsteht ein Druckabfall von bis zu 60 bar.

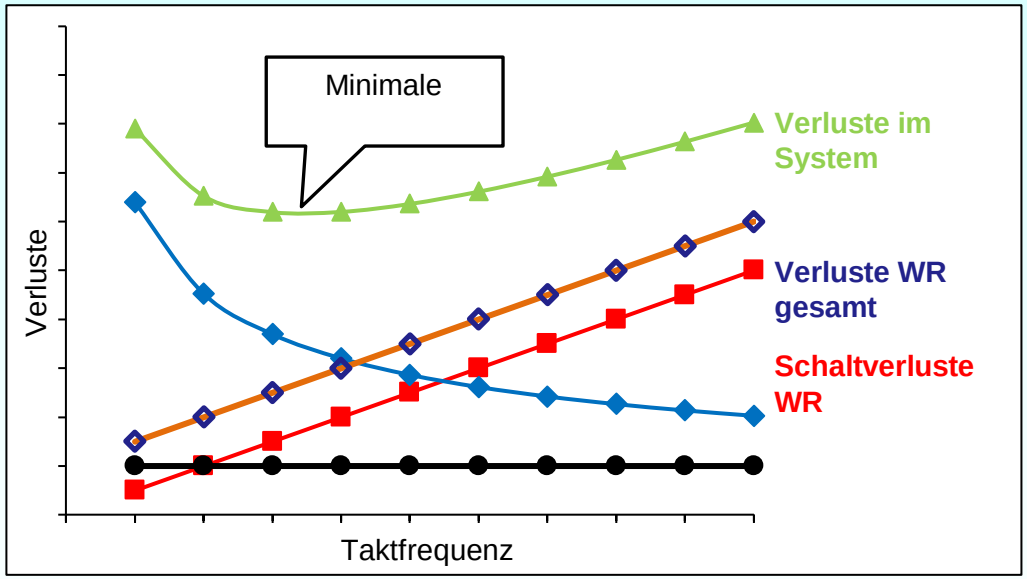
Quelle : Naderer Firma Dynamic E- flow

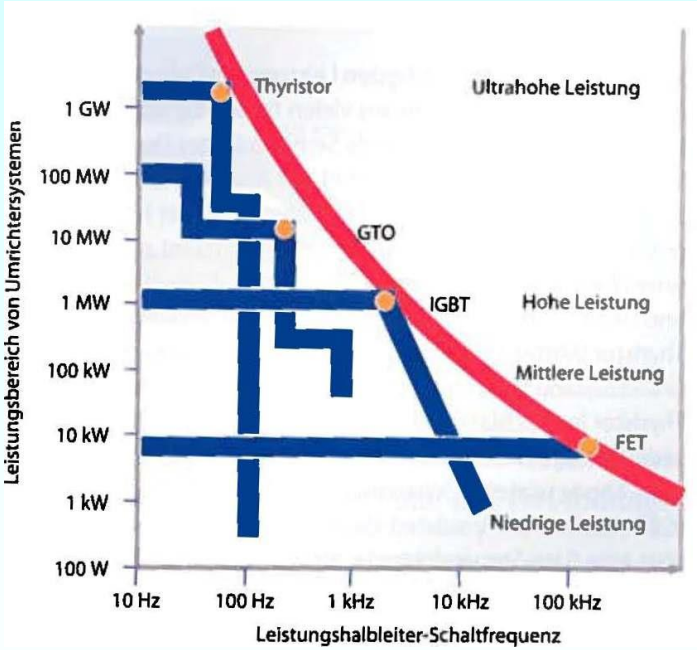
# 3 Gesamtsystem mit Wechselrichter

## Verminderung der wechselrichterbedingten Zusatzverluste

**Erhöhung der Taktfrequenz -> geringe Strom- und Spannungsoberschwingungen**

**Anpassung der Zwischenkreisspannung**




**Leistungsbereich typischer leistungselektronischer Wandler in Abhängigkeit von der Schaltfrequenz der Leistungshalbleiter: Je größer die Umrichterleistung, desto niedriger die Schaltfrequenz**

# 4 Parasitäre Effekte durch WR- Speisung

## Parasitäre Erscheinungen

→ hohe Ausnutzung → Wechselrichterspeisung

**Drehmoment-pulsationen**

- Resonanz-erscheinungen
- Rotorstab-brüche

Totalschaden

**Geräusche**

- Erhöhter Schalldruck- bzw. Schall-Leistungspegel
- Unangenehme Sinustöne (Sirenentöne)

**Zusatzverluste**

- Temperatur-erhöhung

Reduzierung der Betriebsdauer durch Alterung

**Lagerströme**

- Lager-schäden

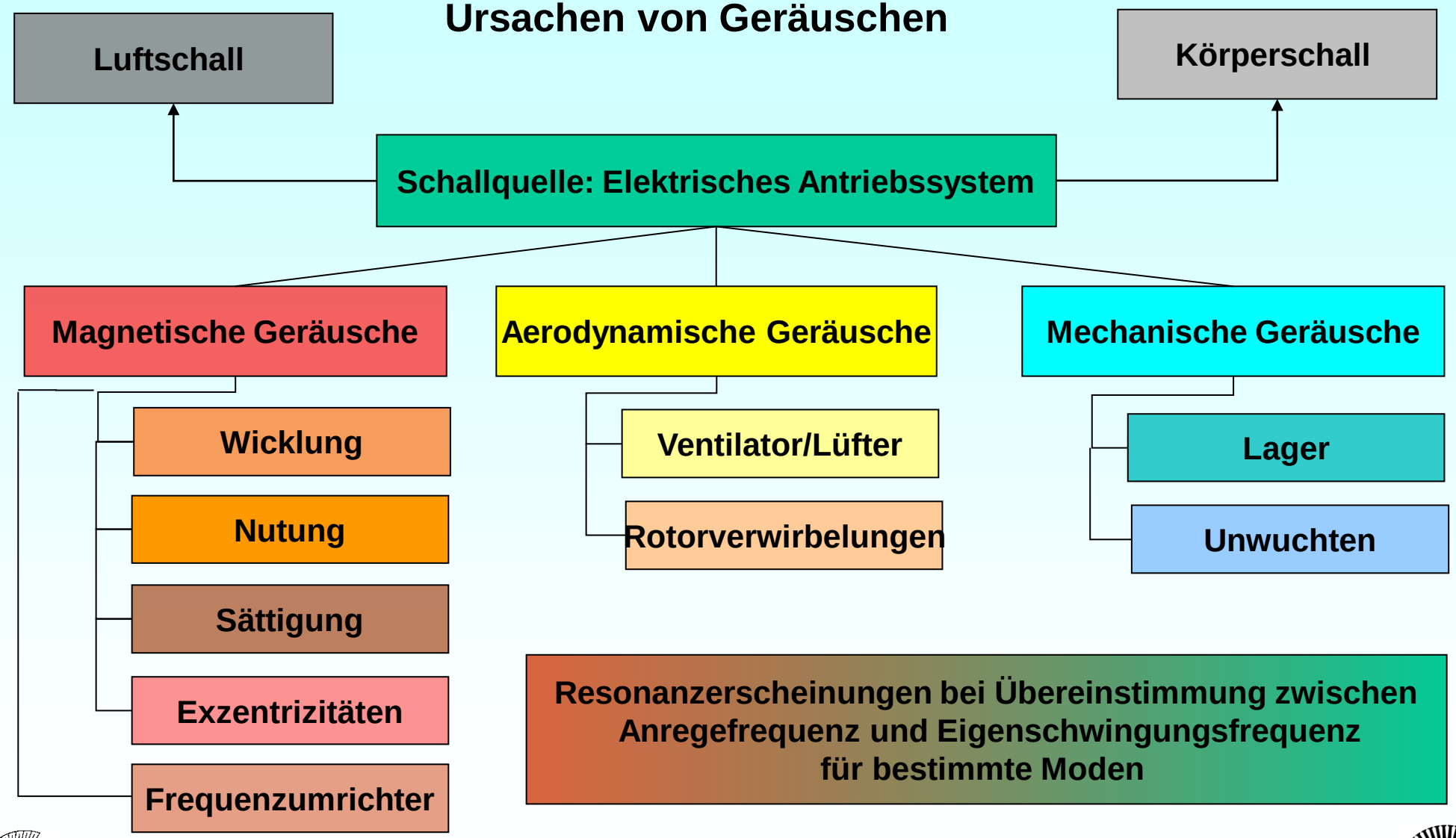
Totalschaden

**Weitere Effekte**

- elektro-magnetische Verträglichkeit
- Fertigungs-toleranzen
- Beanspruchung durch Spannungs-flanken

# 4 Parasitäre Effekte durch WR- Speisung

## Ursachen von Geräuschen



# 4 Parasitäre Effekte durch WR- Speisung

## Entwicklungsabschnitte

| | |
|---|---|
| **Elektromagnetische Feldberechnung** | Ermittlung der Größe und Form der radialen Kraftwellen |
| **Mechanische Verformungsberechnung** | Abhängig von der Steifigkeit des Stators bzw. Anzahl der mech. Knotenpunkte |
| **Akustische Berechnung** | Berechnungsformeln nach Jordan, FE-Berechnungen Programm (z.B. RWTH – Aachen) |
| **Konstruktion, Aufbau der Maschine** | Abhängig von der Form der Kraftwellen bzw. Knotenpunkte |
| **Akustische Messungen** | Schalldruck,- und Schallleistungspegelmessung<br>Messung mit akustischer Kamera |
| **Maßnahmen, Modifikationen** | Veränderung der Taktfrequenz des WR, Dämpfung von Bauteilen, Vermeidung von Resonanzen |

# 4 Parasitäre Effekte durch WR- Speisung

## Berechnung der Radialkraftzugwellen [12]

**Ständerfeldwelle**

$$B_\nu(x_1,t) = \hat{B}_\nu \cdot \cos\left(\frac{\nu \pi x_1}{\tau_p} - 2\pi f t\right), \quad \nu = 1 + 2m_1 g, \quad g = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$$

**Läuferfeldwelle**

$$B_\mu(x_2,t) = \hat{B}_\mu \cdot \cos\left(\frac{\nu \pi x_2}{\tau_p} - 2\pi \cdot s \cdot f t\right), \quad \mu = 1 + g \cdot \frac{N_2}{p}, \quad g = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$$

**MAXWELL´scher Radialzug**

$$\sigma(x,t) = \frac{B^2(x,t)}{2\mu_0} \sim \left(\sum_\nu B_\nu + \sum_\mu B_\mu\right)^2 \Rightarrow \sigma_{\mu\nu} \sim B_\nu^{\ 2} + 2B_\nu B_\mu + B_\mu^{\ 2}$$

**Radialkraftzugwellen**

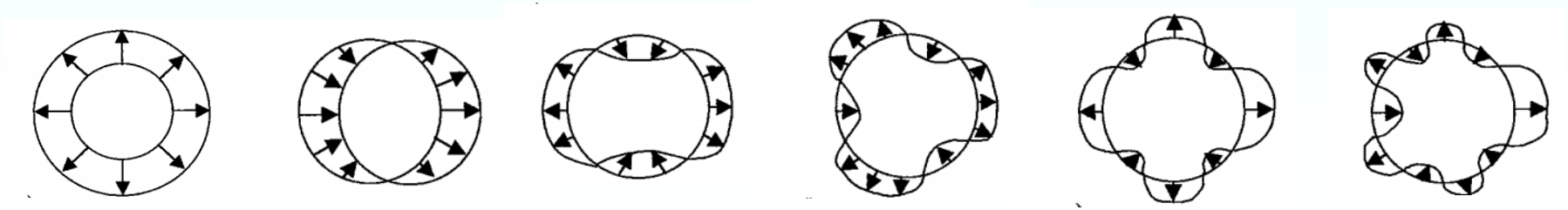
$$\sigma_{\nu\mu}(x_1,t) = \frac{\hat{B}_\nu \hat{B}_\mu}{2\mu_0} \cdot \cos\left(2r \cdot \frac{\pi x_1}{2p\tau_p} - 2\pi f_{Ton} t\right)$$

**Anzahl der Kraftwellen-Knoten am Maschinenumfang**

$$2r = 2p \cdot |\nu \pm \mu|$$

**Anregende Tonfrequenz**

$$f_{Ton} = f \cdot |(\mu - 1) \cdot (1 - s) + 2| \qquad f_{Ton} = f \cdot |(\mu - 1) \cdot (1 - s) - 0|$$



r = 0 r = 1 r = 2 r = 3 r = 4 r = 5

**relevant für WR:**

***r* = 0 und**

***r* = 2*p***

# 4 Parasitäre Effekte durch WR- Speisung

## Lagerströme

**Gleichtaktspannung des Umrichters**

**Hohes du/dt an den Motorklemmen**

**Gleichtakt- Lagerspannung**

**Hochfrequenter Erdstrom**

**(kleiner) kapazitiver Lagerstrom**

**EDM- Strom**
Electric Discharge Machining

**Hochfrequenter zirkularer Lagerstrom**

**Lagerstrom durch Rotorerdstrom**

**Mischformen, Überlagerungen, Einkopplungen in andere Systeme,…**

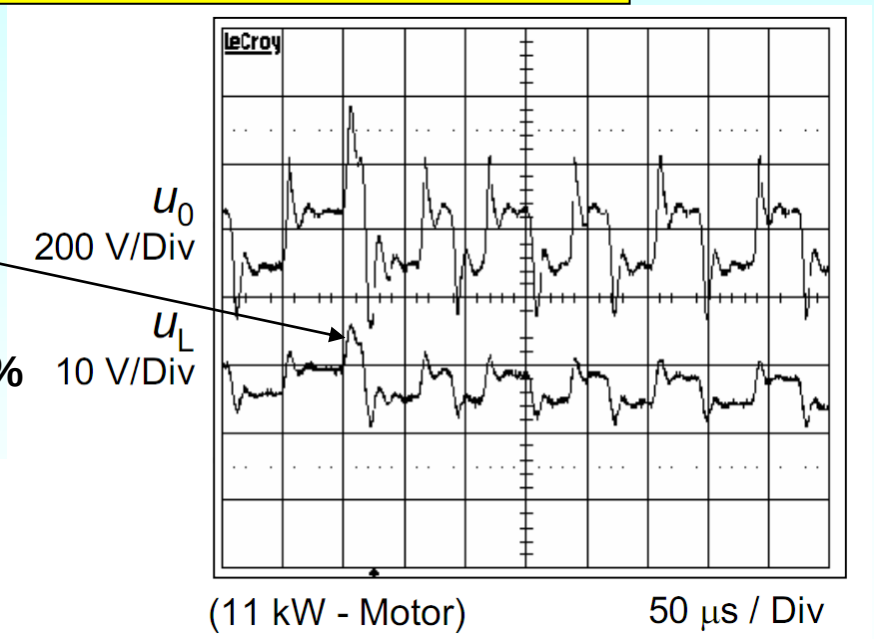
# 4 Parasitäre Effekte durch WR- Speisung

## Gleichtaktspannung des Umrichters

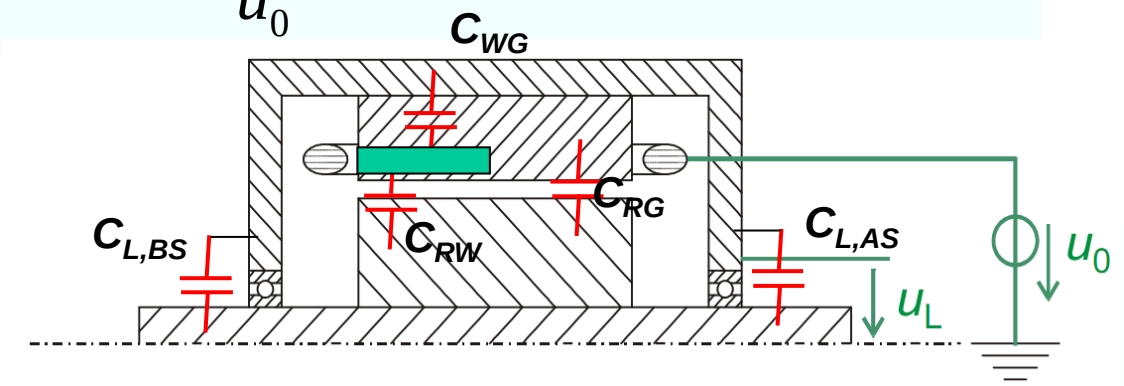
**Hohes du/dt an den Motorklemmen**

**Kapazitäten in der Maschine**

**Abbildung der Gleichtaktspannung der Statorwicklung über dem Lager**
**(bei intaktem Schmierfilm des Lagers)**




$$BVR = \frac{u_L}{u_0}$$ **= Bearing Voltage Ratio = 5 bis 10 %**




$u_o$ =Nullspannung der Statorwicklung

$u_L$ =Nullspannung des Lagers

**Quelle: Mütze**

# 4 Parasitäre Effekte durch WR- Speisung

**EDM- Strom**
**Electric Discharge Machining**

**Gleichtaktspannung des Umrichters**

↓

**Hohes du/dt an den Motorklemmen**

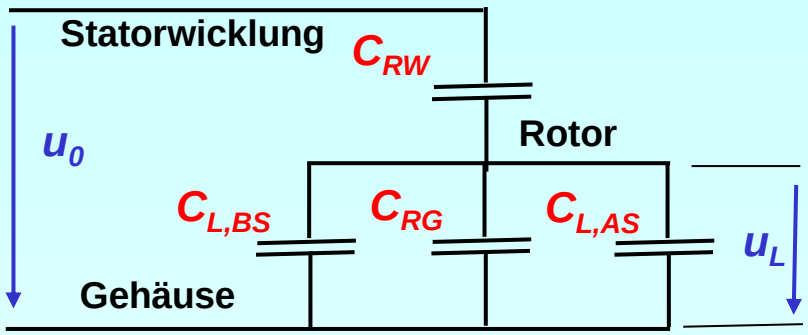
↓

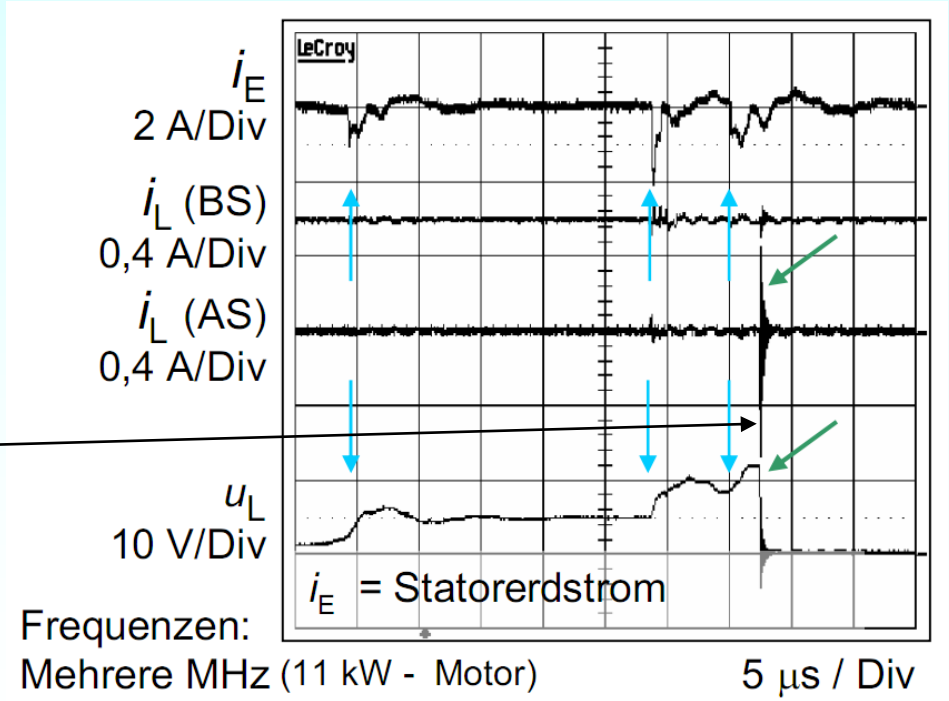
**Abbildung der Gleichtaktspannung der Statorwicklung über dem Lager**
**(bei intaktem Schmierfilm des Lagers)**

↓

**Spannungsaufbau im Lager →Entladestrom, wenn die Schwellenspannung des Lagers überschritten ist**

$$BRV = \frac{u_L}{u_o} = \frac{C_{RW}}{C_{RW} + C_{RG} + 2C_L}$$




**Quelle: Mütze**

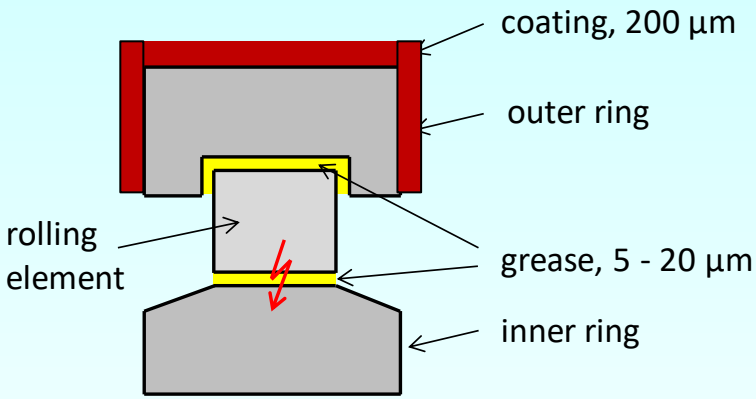
## Bearing as an electrical device

**bearing acts as a cylindrical capacitor with capacitance:**

$$C = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r \frac{l}{\ln(R_2/R_1)}$$

**reactance (alternating current resistance):**

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi f \cdot C} \qquad \downarrow X_C = \frac{1}{2\pi f \uparrow \cdot C}$$

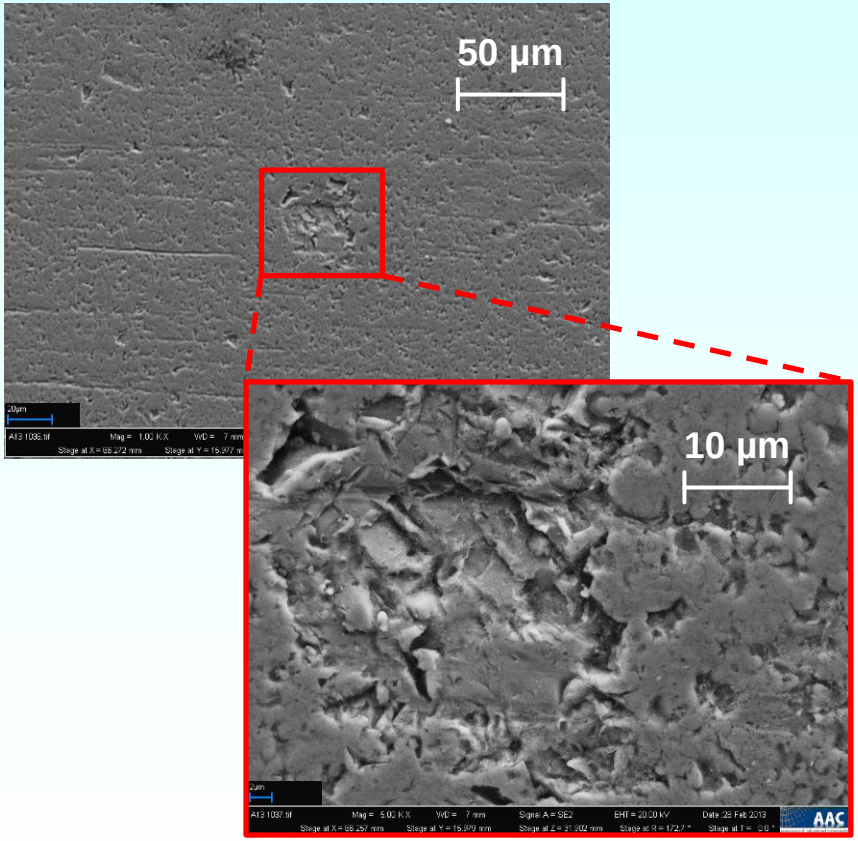


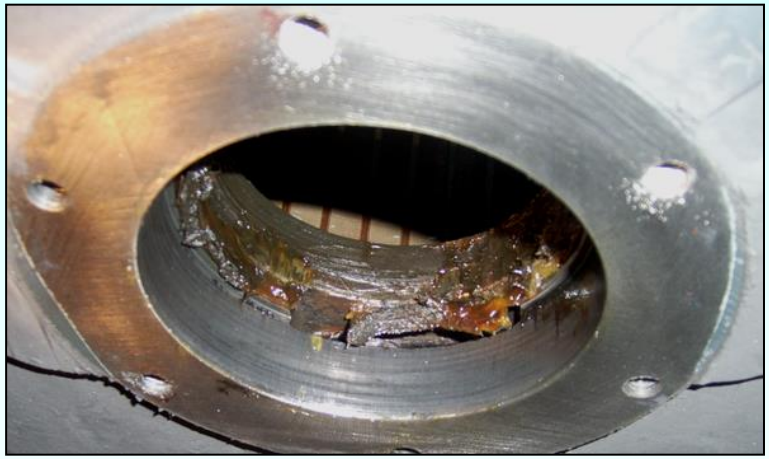

**coated bearings are only able to prevent low frequency bearing currents (circulating currents), but not high frequency bearing currents induced by inverter**

## Damage caused by bearing currents

**damage of**

- **bearing surface (micro pittings)**
- **grease / oil**



# 4 Parasitäre Effekte durch WR- Speisung

| | Si Technologie | SiC Technologie |
|---|---|---|
| Taktfrequenzen | 2 - 20 kHz | 20 – 100 kHz |
| Drehmomentenpulsationen | | geringer |
| Magentische Geräusche | | geringer |
| Wechselrichterbedingte Zusatzverluste | | geringer |
| Spannungsanstiegsgeschwindigkeiten | 1 -7 kV/µs | 10 – 100 kV/µs |
| Beanspruchung Isolationsmaterial | | höher |
| EMD Lagerschäden | | häufiger |
| EMV | | höhere Frequenzen |
| Kosten (derzeit) | | höher |
| Anzahl der Hersteller (derzeit) | viele | geringer |

# 5 Wirtschaftliche Risiken

## Verfügbarkeit von Rohstoffen für Permanentmagnet - Maschinen

**Seltene Erden:** 17 Metalle Vorkommen in der Erdkruste weit häufiger als Edelmetalle, jedoch ist die Aufbereitung sehr aufwändig

14 Metalle Lanthanoide (OZ 58 -77), La, Sc, Y (Nebengruppe IIIb)

(für PM) Cerium Cr, Dysprosium Dy, Erbium Er, Europium Eu, Gadolinium Gd, Holmium Ho, Lanthan La, Lutetium Lu, Neodym Nd, Praseodym Pr, Promethium Pm, Samarium Sm, Scandium Sc, Terbium Tb, Thulium Tm, Ytterbium Yb, Yttrium Y

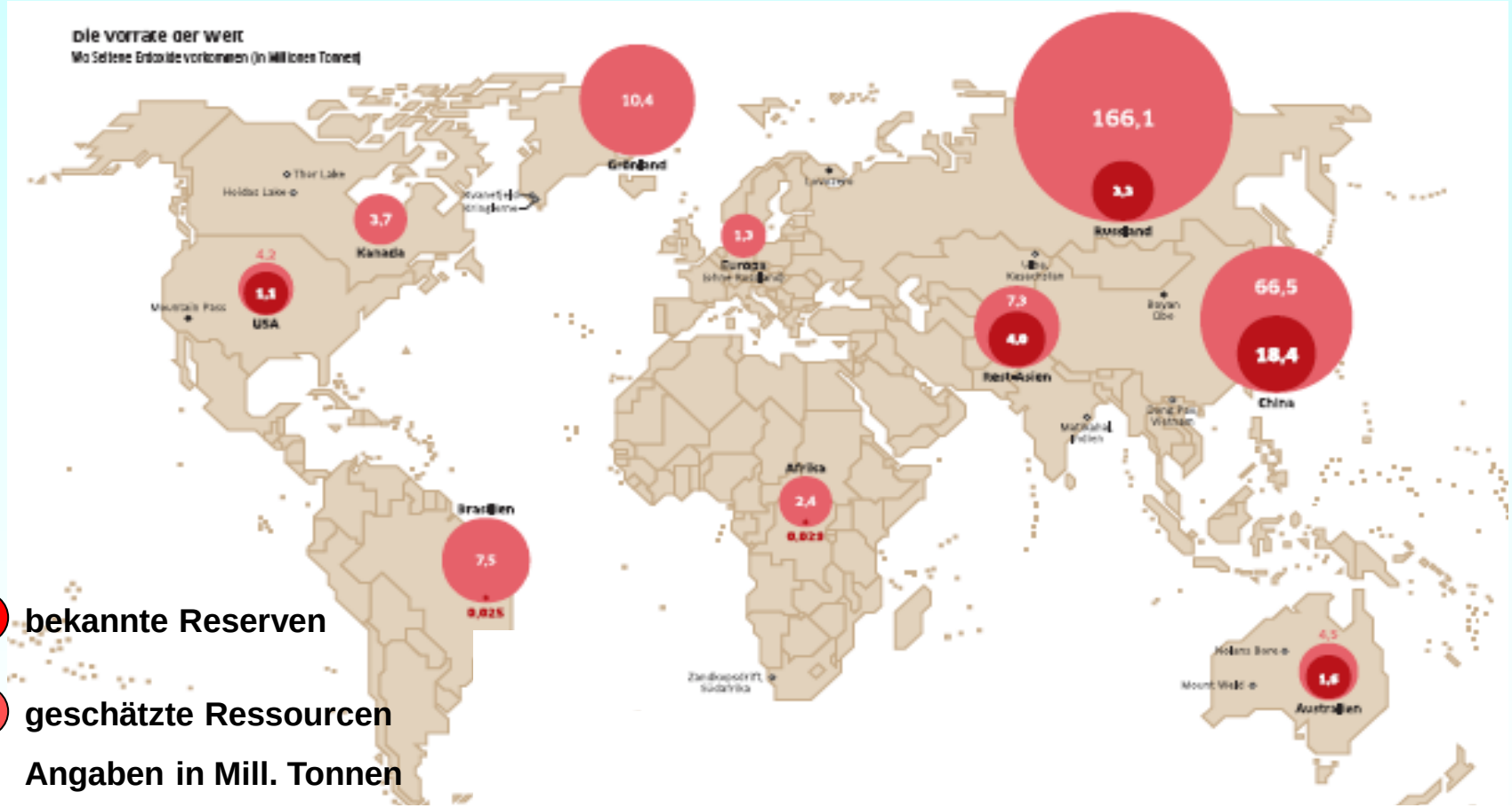
Wachstum von 1997 – 2007: 20- fache

| | |
|---|---|
| Katalysatoren für Raffination: | 25 % |
| Glas,- Keramikindustrie | 20 % |
| Metallurgie | 10% |

| | |
|---|---|
| Weltweiter Bedarf 2019: | 180.000 t |
| Batterien | 13 % |
| Permanentmagnete | 25 % |
| Bildschirmindustrie | 6 % |
| Atomindustrie | 1 % |

# 5 Wirtschaftliche Risiken

## Seltene Erdenoxide: Vorräte der Welt




bekannte Reserven

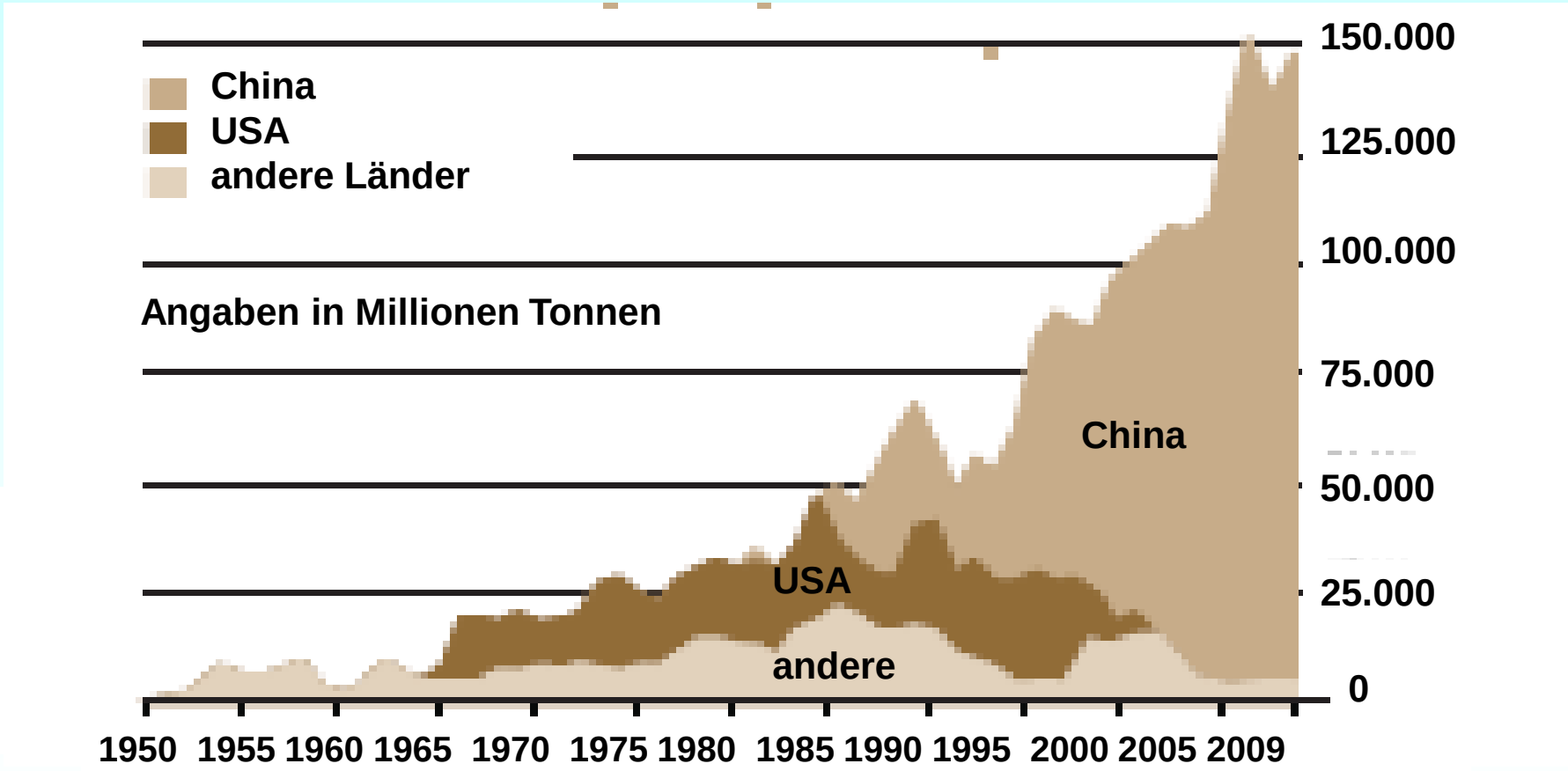
geschätzte Ressourcen

Angaben in Mill. Tonnen

Quelle: GREENPEACE MAGAZIN 2.11; Infografik Carsten Raffel, Bundesanstalt für Geowissenschaften Rohstoffe (BRG) U.S. Geological Survey)

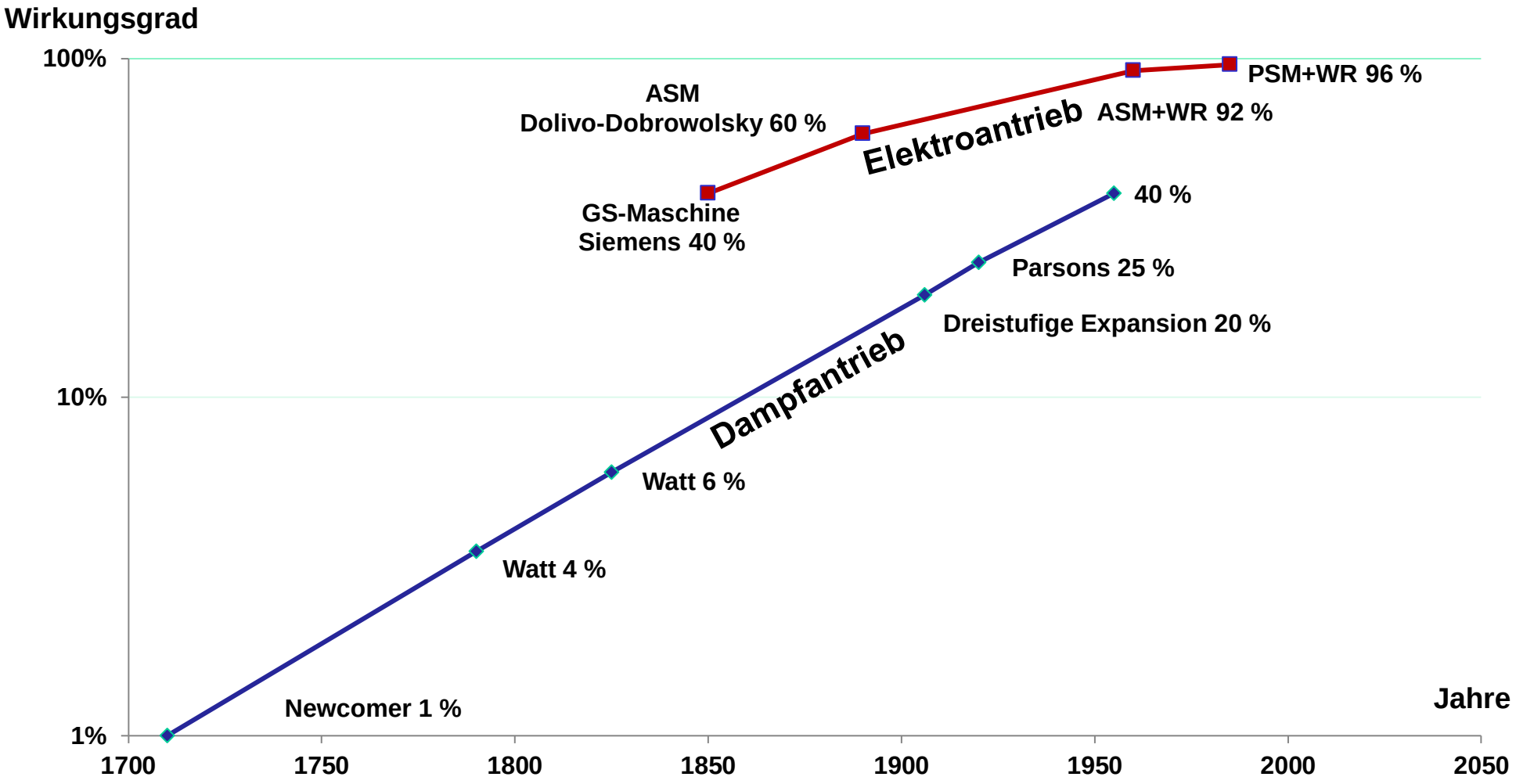
# 5 Wirtschaftliche Risiken

## Förderung von seltenen Erdenoxiden

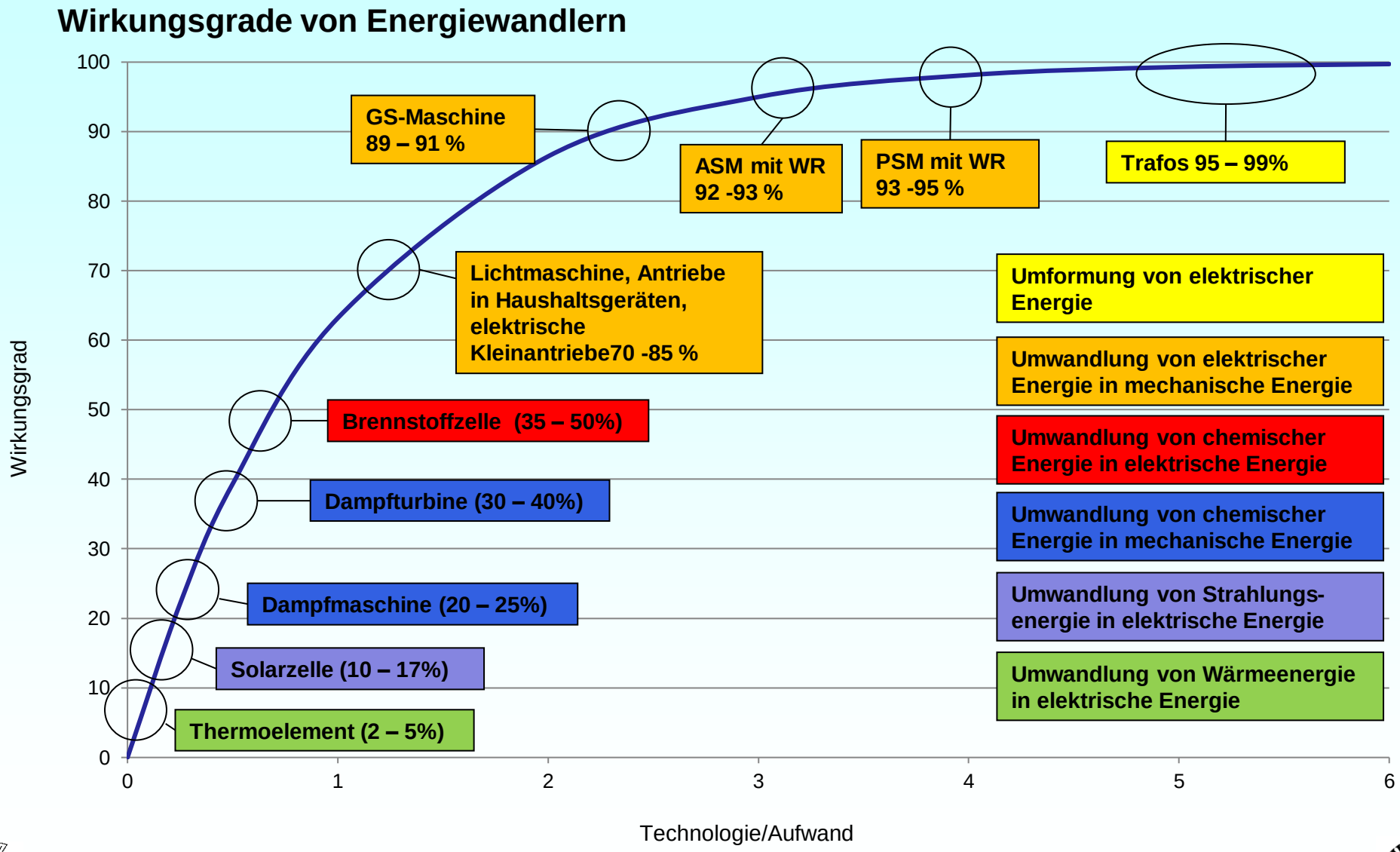



Quelle: GREENPEACE MAGAZIN 2.11; Infografik Carsten Raffel, Bundesanstalt für Geowissenschaften Rohstoffe (BRG) U.S. Geological Survey)

# 6 Entwicklung des Wirkungsgrades von Antrieben



# 6 Entwicklung des Wirkungsgrades von Antrieben



# 7 Zusammenfassung

**Innovationen auf dem Gebiet der**

| | |
|---|---|
| **Maschinentechnologien** | **ESM, PSM und SRM, Axialflussmaschine und alle Kombinationen** |
| **Materialien** | **Co Bleche, Nanokistalienes Kupfer** |
| **Kühlmetoden** | **Direktleiterkühlung, Spaltrohr** |
| **Magnetanordnungen** | **Halbachanorndung, Ferrite mit Flusskonzentration** |
| **Wechselrichteranspeisung** | **SiC - Bauelemente** |

# Ankündigung

## CADFEM online Seminar

**3 Tage vom Mo 17.8. bis Mi 19.8.2020**

**Mo und Di: Kompaktwissen E- Maschinen**
**Mi : Parasitäre Effekte bei WR- Speisung**

**mOre driVE : Internationale Konferenz OVE**
**More Drive**
**2 Tage vom Mi 27.1. bis Do 28.1.2021**
**in Wien (mit Abendveranstaltung)**

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

**Telefon: 0043-676-5042721**

**e-mail: prof.dr.dr.neudorfer@emdrive.at**

**harald.neudorfer@tuwien.ac.at**

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

**Allgemein beeideter und gerichtlich zertifizierter Sachverständiger**

**Staatlich befugter und beeideter Ziviltechniker(mit ruhender Befugnis)**

**Professor an der TU - Darmstadt und Lehrbeauftragter der TU - Wien**