

**Permanentmagneterregter Direktantrieb
für die elektrische Traktion
am Beispiel des ICE 3**

A. Binder, Th. Koch

Institut für Elektrische Energiewandlung

Technische Universität Darmstadt

A. Jöckel

Siemens AG, A&D LD T D2

Bahnantriebe / Nürnberg

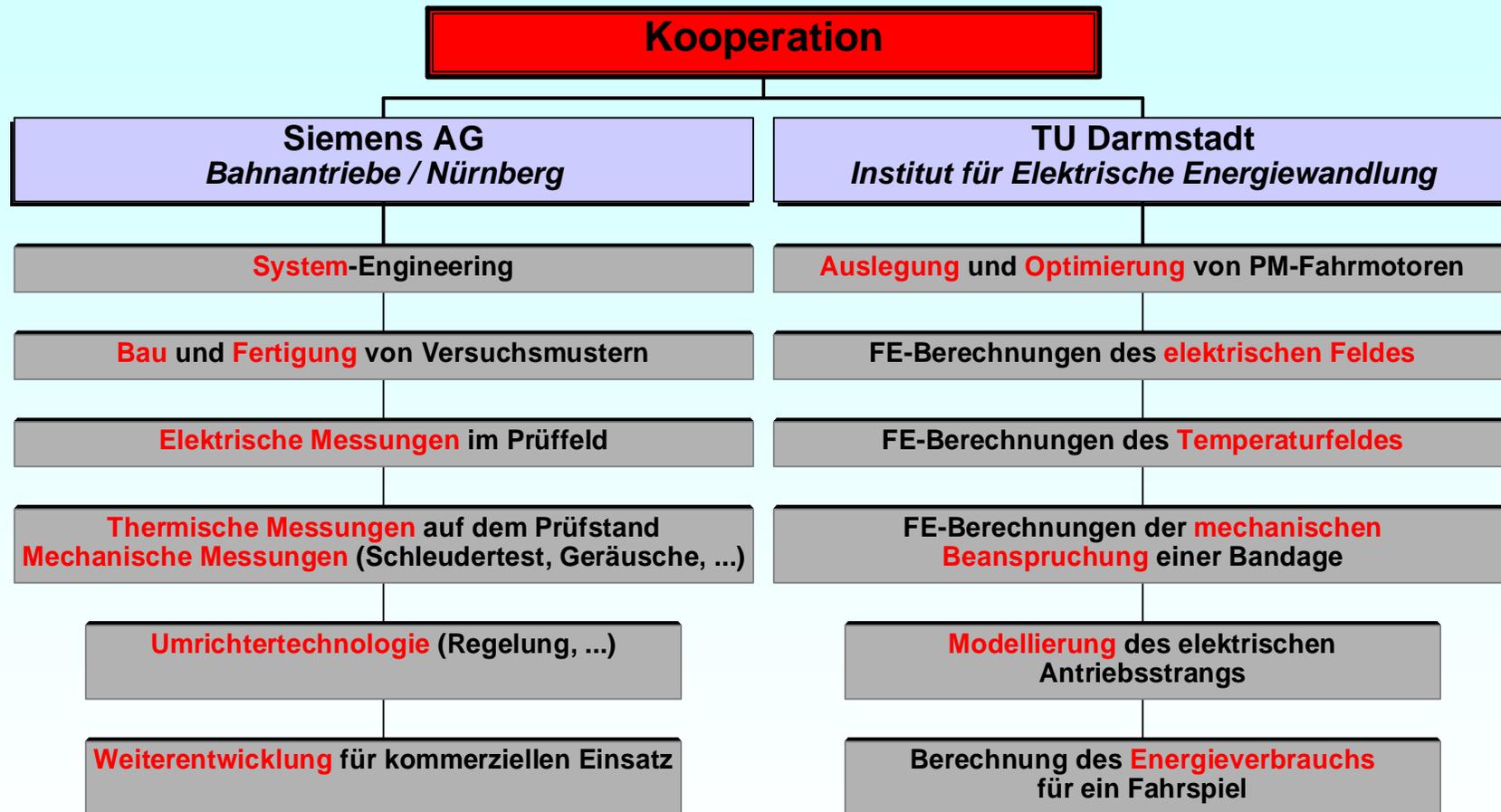


Inhaltsverzeichnis

- **ICE 3 Antrieb: Technischer Stand**
- **Permanentmagnet-Direktantrieb: Auslegung**
- **Schnellfahrstrecke Frankfurt-Köln: Simulation**
- **Zusammenfassung und Ausblick**



Getriebelose Antriebe für Hochgeschwindigkeitszüge



Worüber reden wir ?

Direktantrieb = **getriebeloser** Antrieb für den **ICE 3**

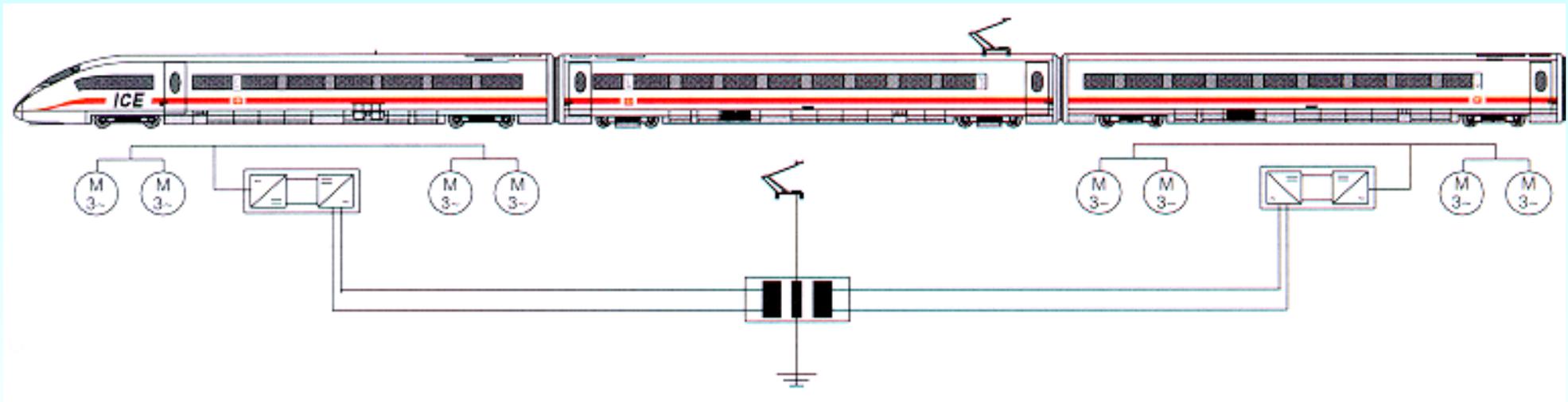


Der deutsche **Hochgeschwindigkeitstriebzug ICE 3**
für **330 km/h** Höchstgeschwindigkeit



ICE 3 - derzeitige Antriebstechnik

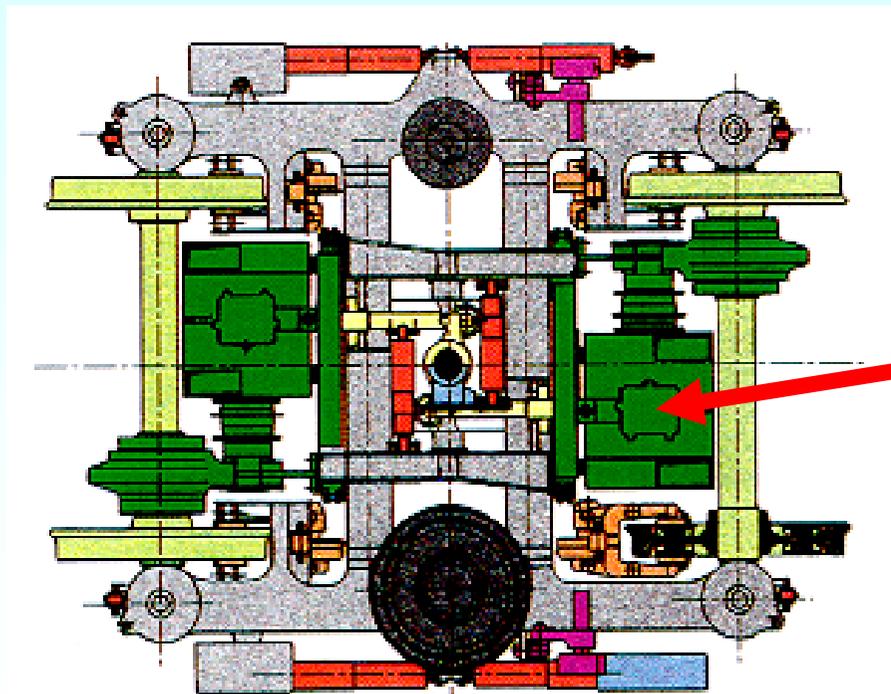
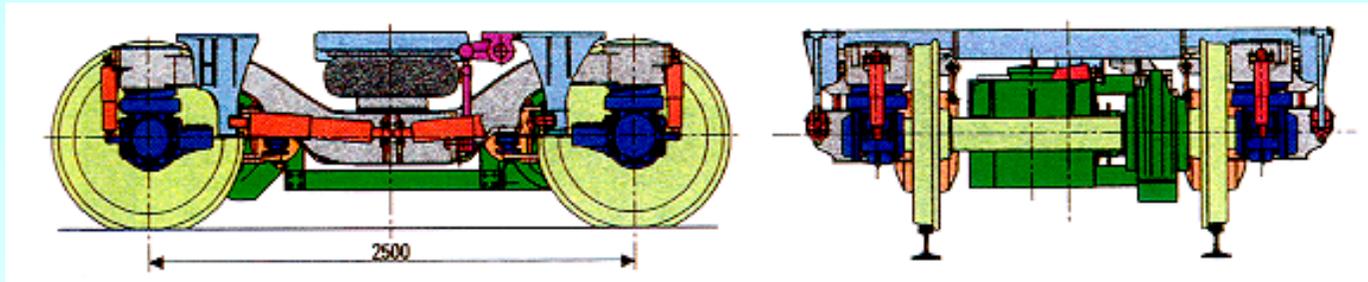
➔ Triebzugkonzept mit verteilter Antriebsleistung ➜



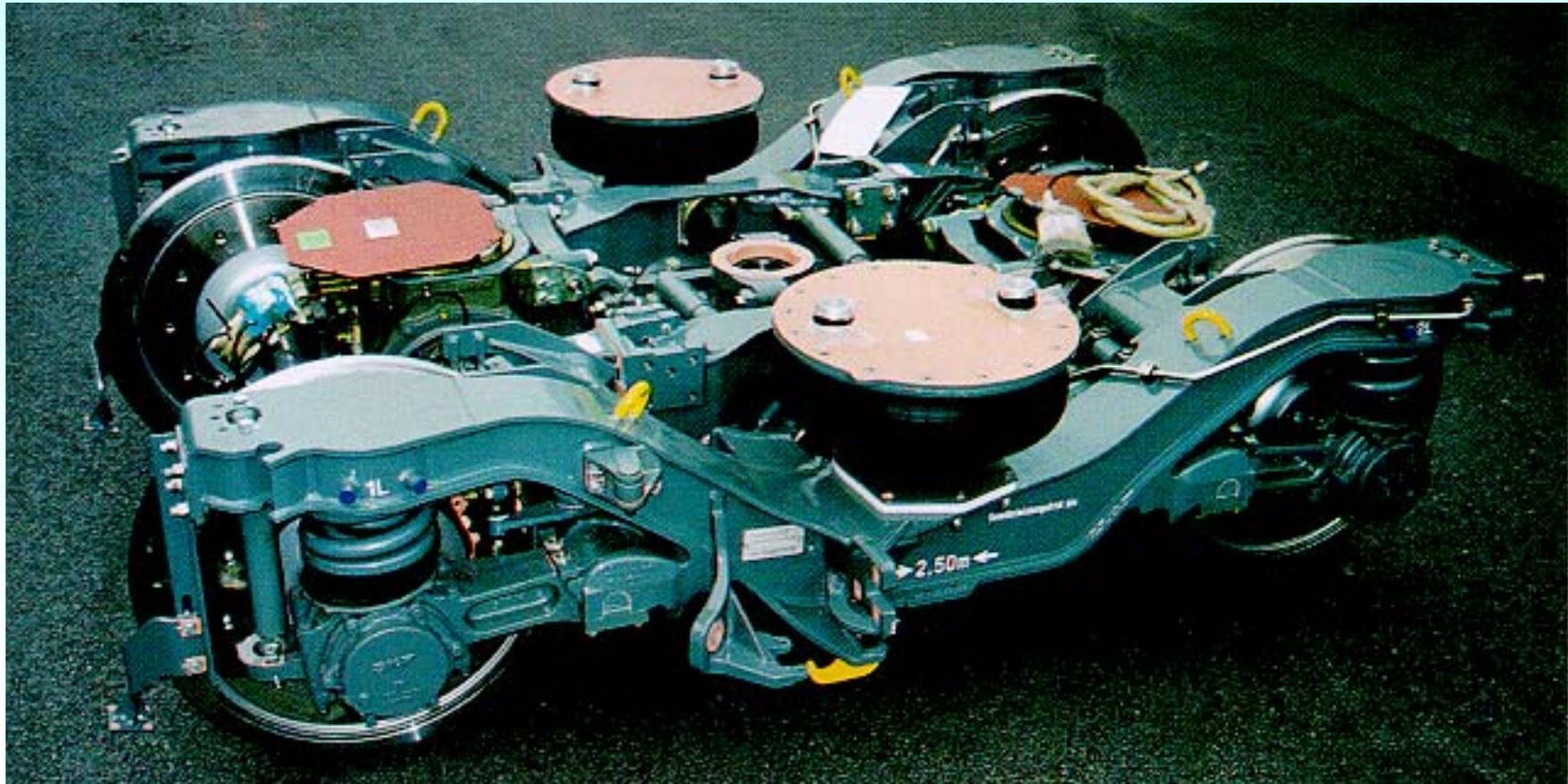
- **16** Fahrmotoren
- Käfigläufer-Asynchronmaschinen
- **Kühlsystem:** Luft, durchzugsbelüftet
- **500 kW** pro Fahrmotor
- **Gruppenantrieb:** 1 Umrichter für 4 Motoren



ICE 3 - Drehgestell, Getriebe, Asynchronfahrmotor



ICE 3 - Drehgestell mit Radsätzen, Motoren, Getrieben



Spezifikation des Antriebs: **ICE 3** der Deutschen Bahn AG

Hauptdaten eins Hochgeschwindigkeitszuges

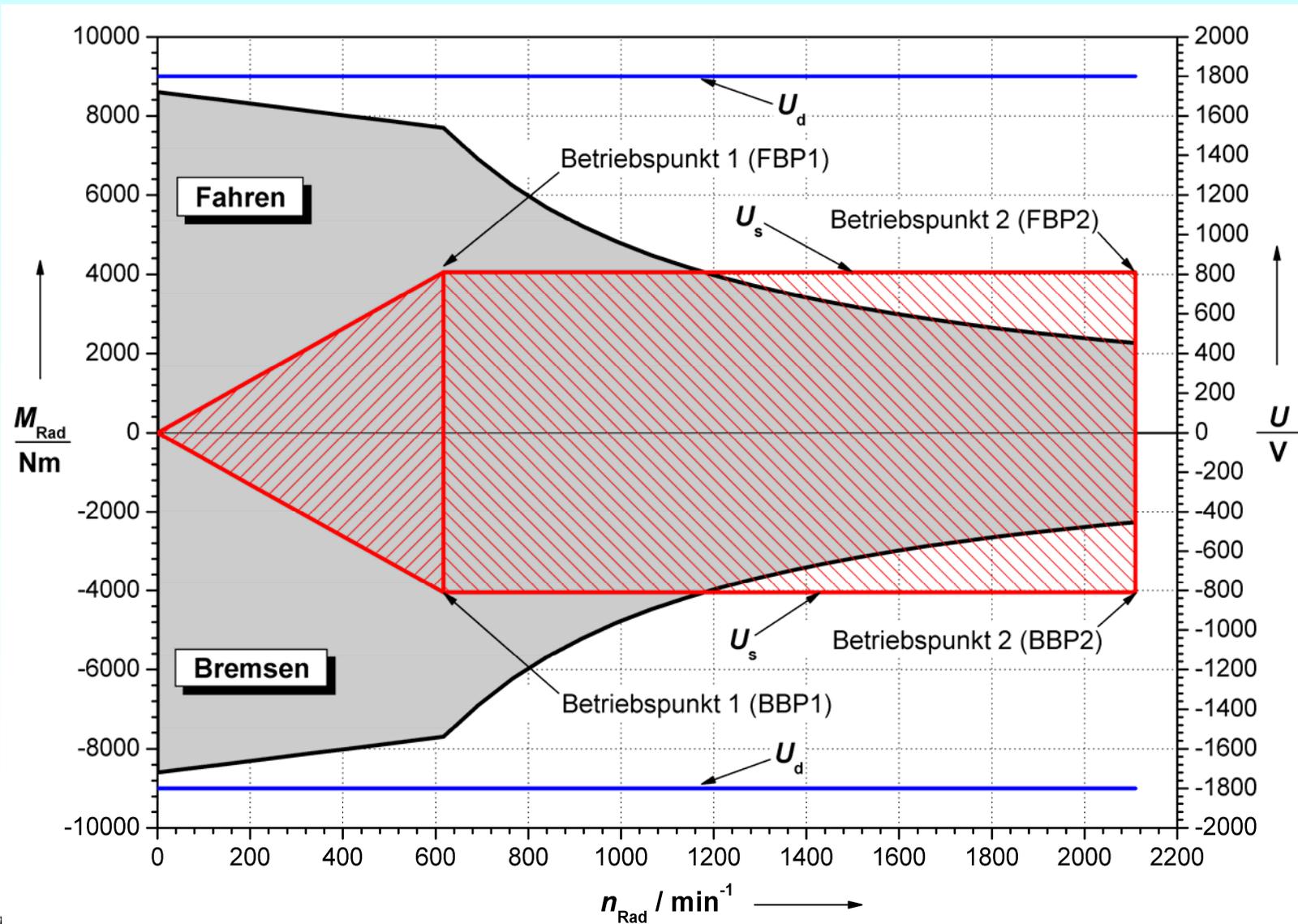
🕯 Dauerleistung P_{Dauer} (16 Motoren)	8000 kW
🕯 Anfahrzugkraft F_{Z0}	300 kN
🕯 Zugkraft im Nennpunkt F_{Z1}	270 kN
🕯 Höchstgeschwindigkeit v_{max}	330 km/h

Antriebs-Spezifikationen

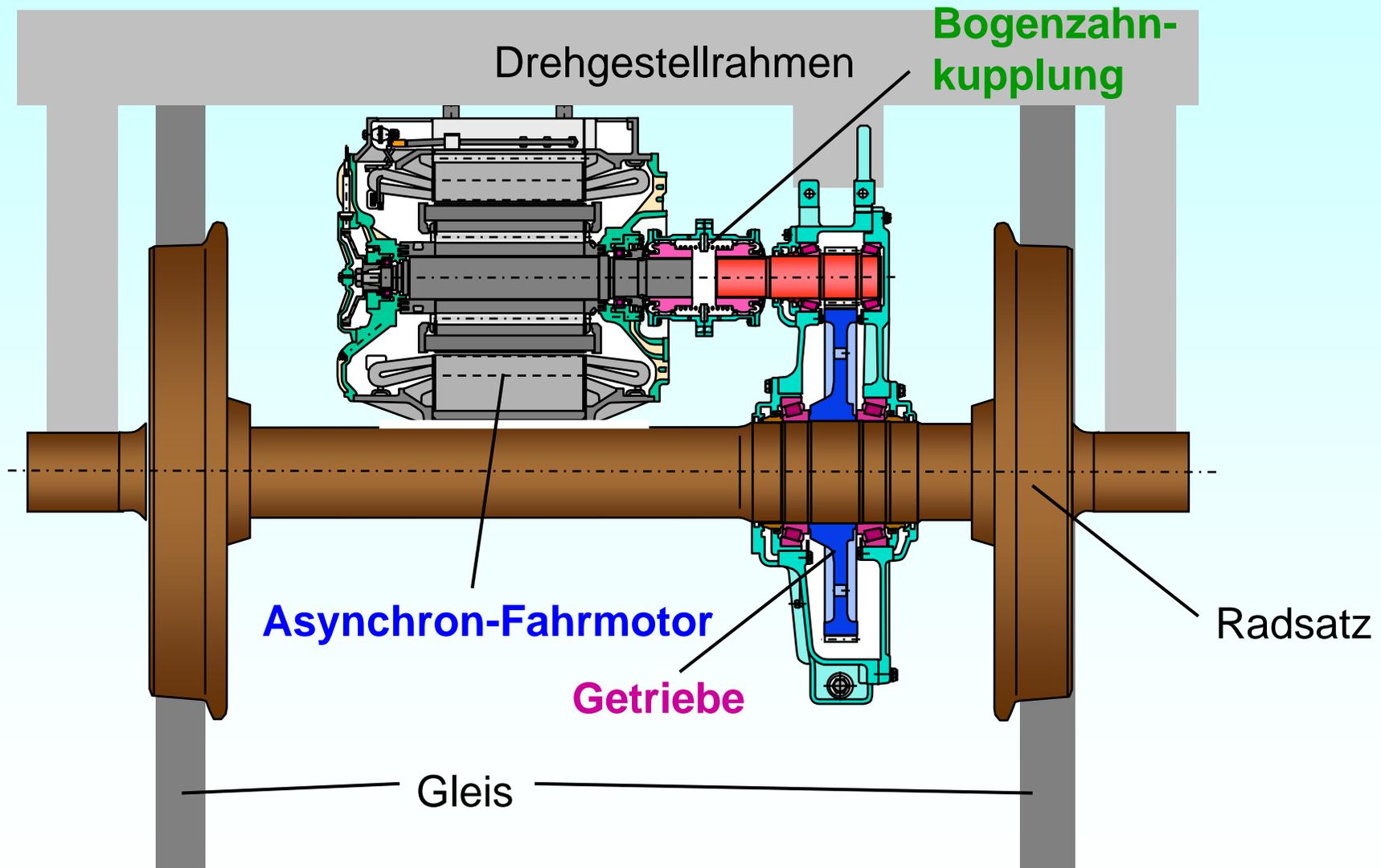
🕯 Nennleistung pro Fahrmotor P_N	500 kW
🕯 Nenn Drehzahl n_{P1} des Radsatzes	617 /min
🕯 Maximale Drehzahl n_{P2}	2110 /min
🕯 Nennmoment M_{P1}	7700 Nm
🕯 Max. Radsatz-Moment M_{P0} ($n = 0$ /min)	8600 Nm
🕯 Schock- und Vibrationslevel	50 m/s²
🕯 Umgebungstemperatur-Bereich	- 30°C ... + 40°C



Spezifikation des Antriebs: **ICE 3** der Deutschen Bahn AG



Stand der Technik: Asynchron-Fahrmotor mit Bogenzahnkupplung und achsreitendem Getriebe

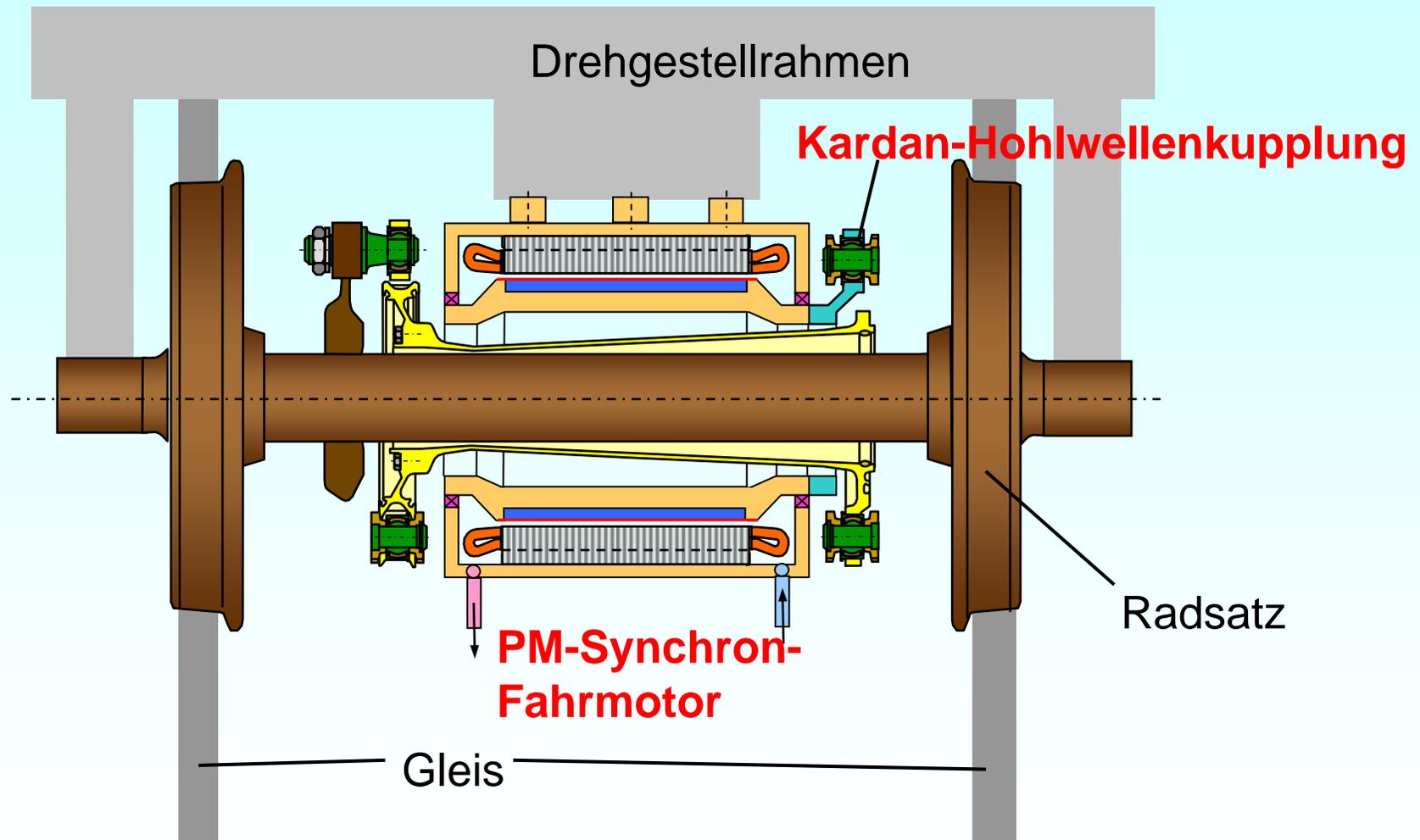


Stand der Technik: Eigenschaften des Antriebssystems

- ▶ **Wirkungsgrad** von Motor + Getriebe max. 93...94%
- ▶ **Masse** von Motor, Kupplung + Getriebe 1080 kg
- ▶ **Schalleistungspegel** Fahrmotor max. 105 dB(A)
- ▶ Kupplung und Getriebe ölgeschmiert ✂ **Wartung**
- ▶ Hohes **Stoßkurzschluss-Moment** ca. $5 \cdot M_r$
- ▶ wechselrichterbedingte **Pendelmomente** ca. $0.5 \cdot M_r$
- ▶ Fahrmotor fremdbelüftet **Lüfterlärm**
- ▶ **Gruppenantrieb** 1 PWR speist 4 Motoren niedriger Invest

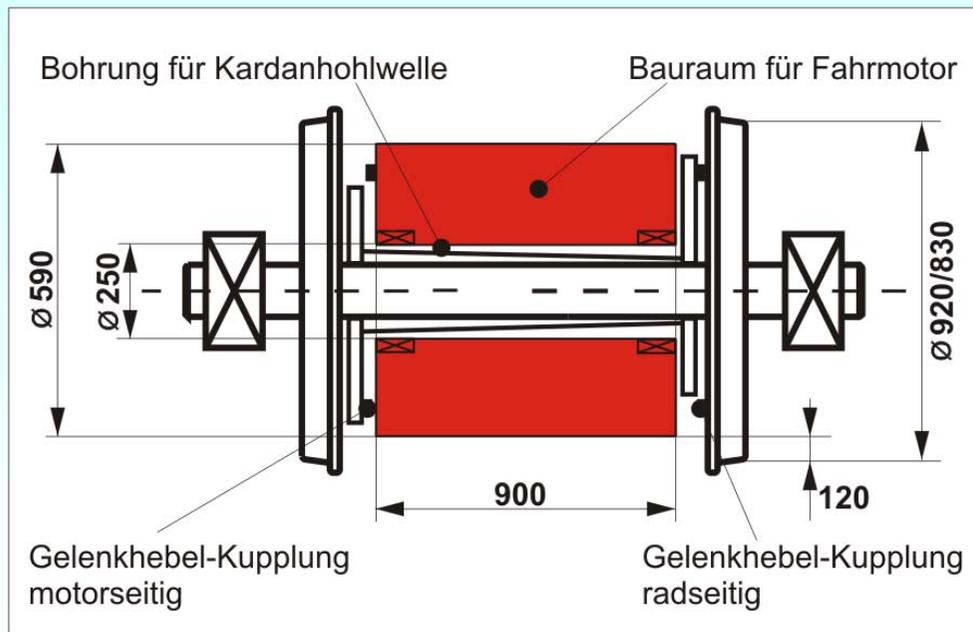


Grundkonzept des **getriebelosen** Antriebssystems

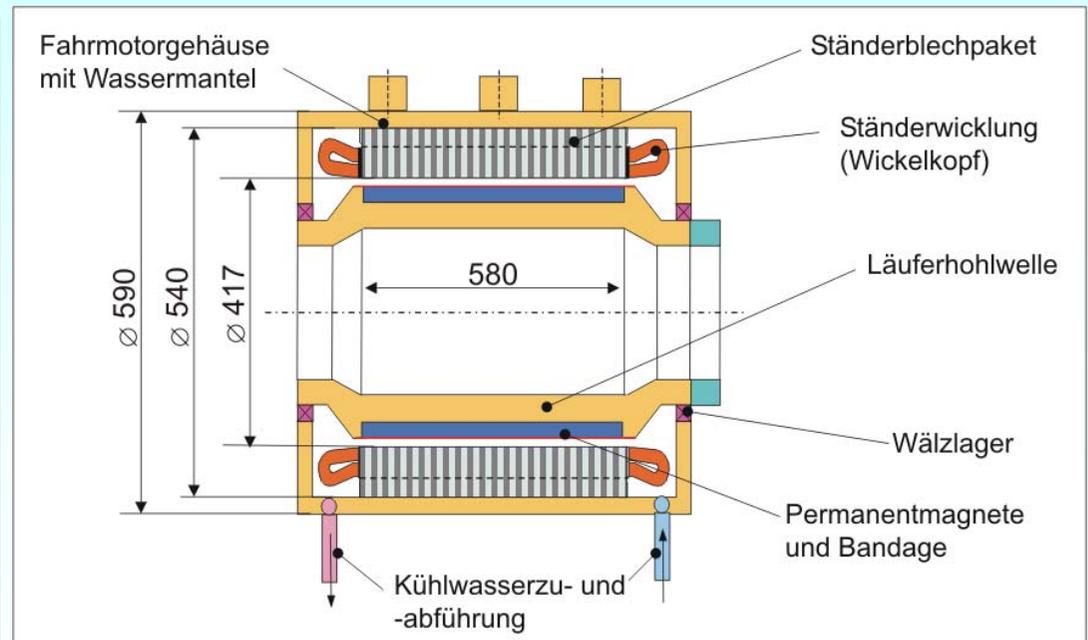


Anordnung und schematischer Längsschnitt des Direktantriebs

Anordnung und Bauraum für einen vollabgefederten ICE - Direktantrieb

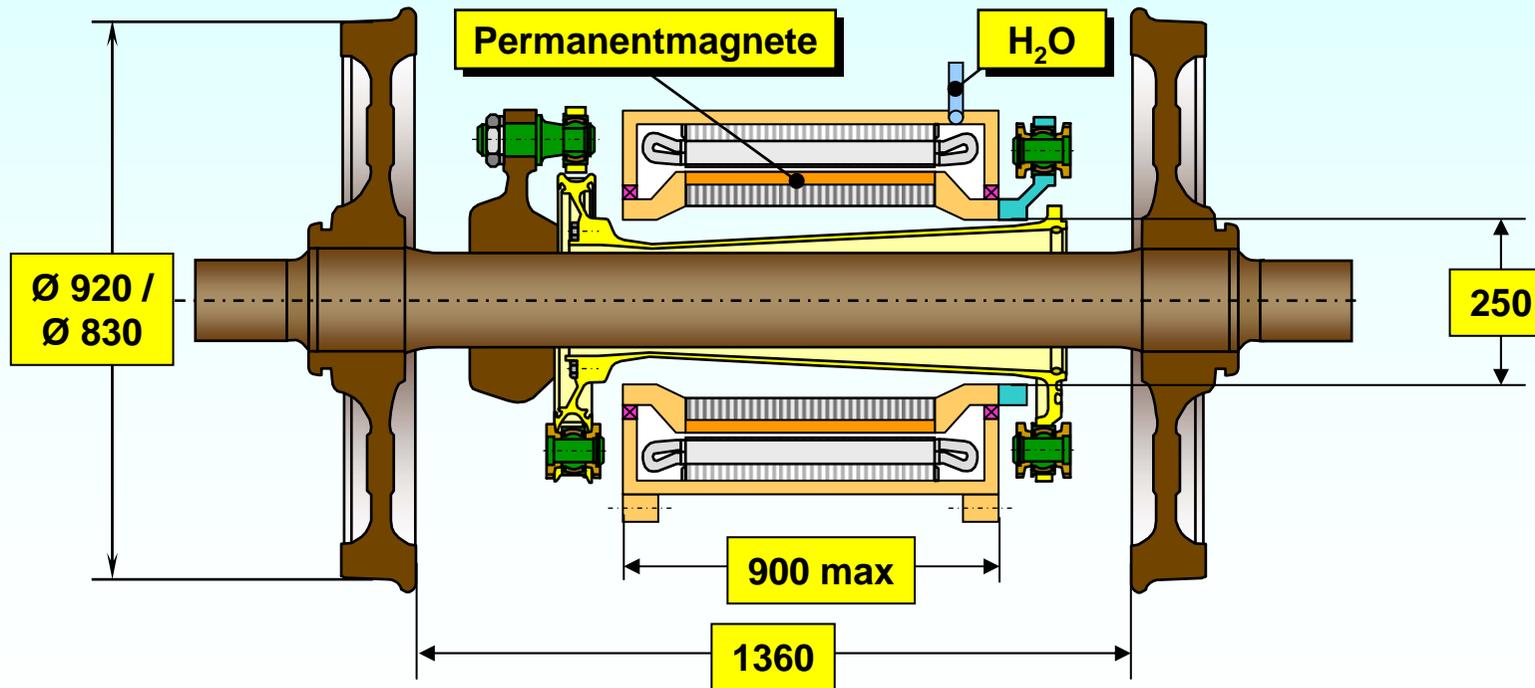


Schematischer Längsschnitt des ICE - Direktantriebs



Einbauraum: Grenzen für die Motorbemessung

Nennleistung P_N pro Motor (Abgabeleistung)	500 kW
Max. Außendurchmesser d_{\max} des Motors	590 mm
Min. Innendurchmesser d_{\min} des Motors	250 mm
Max. axiale Länge des Motors	900 mm

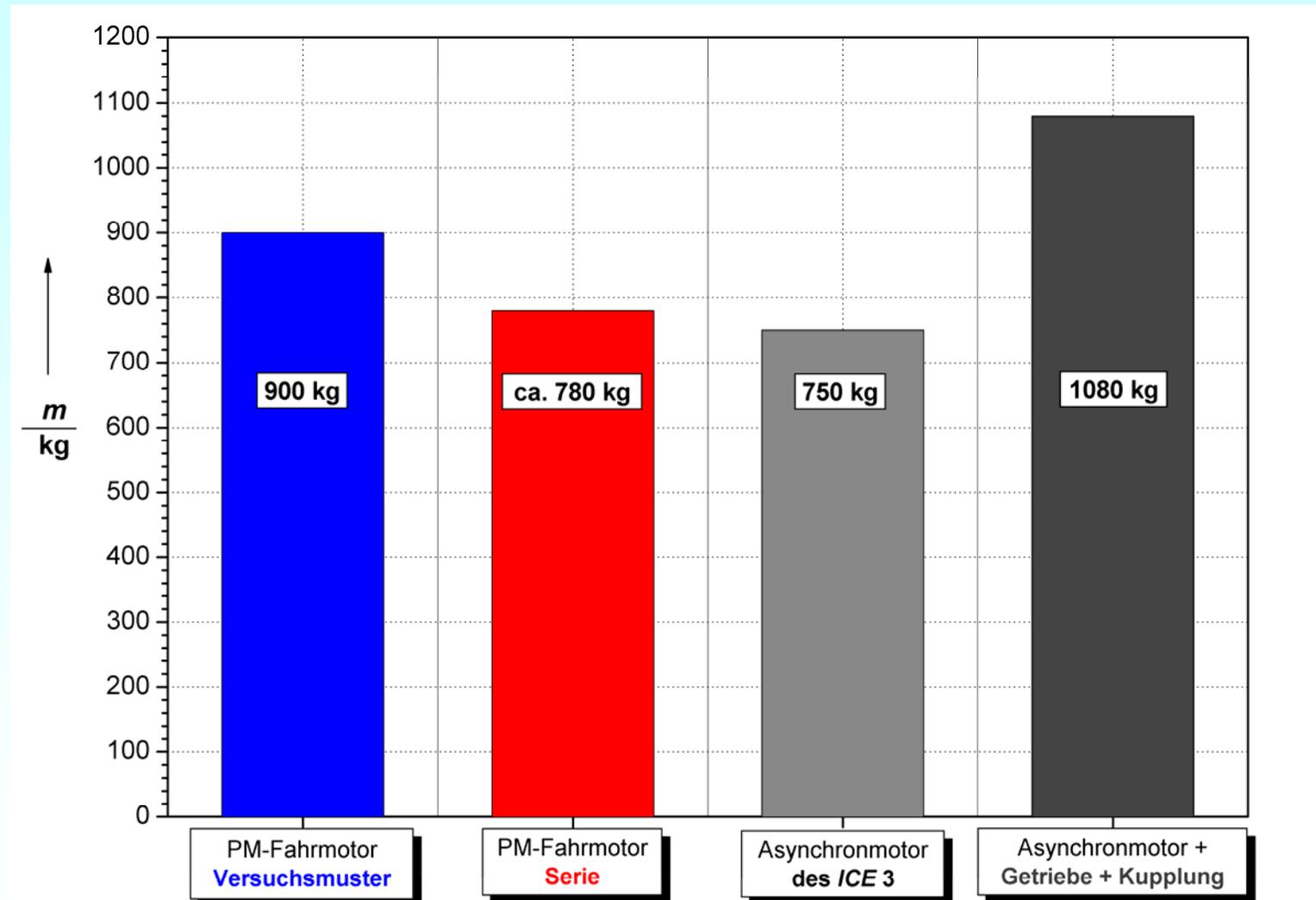


Systemvorteile des Direktantriebs

- ▶ Höherer Wirkungsgrad ca. +2%
- ▶ Niedrigere Antriebsmasse ca. -20%
- ▶ Niedrigere Lärmemission ca. -80%
- ▶ Weniger Wartungsaufwand - xx EUR
- ▶ Geringeres Stoßkurzschluss-Drehmoment ca. -70%
- ▶ Geringere PWR-bedingte Pendelmomente ca. -50%
- ▶ Verringerte ungefederte Masse ca. -20%
- ▶ Wasserkühlung bietet einfache Einbautechnik ++

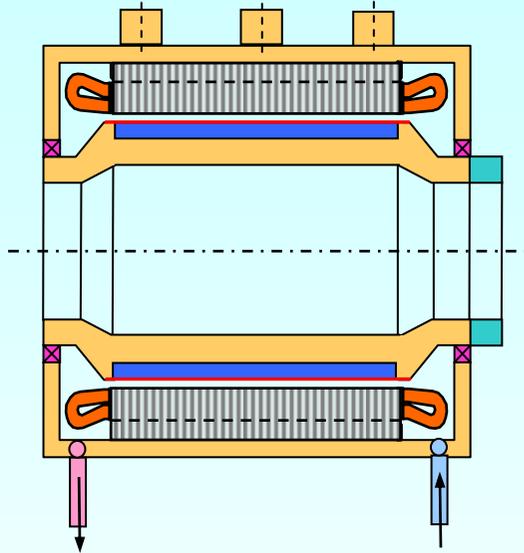


Motormassen im Vergleich: PM-Fahrmotor versus Asynchronmotor

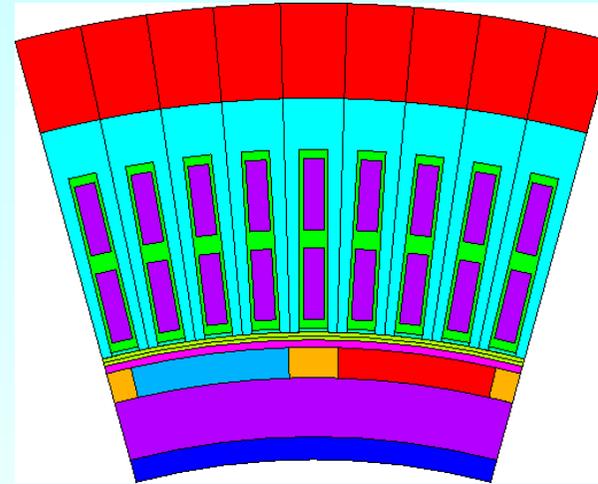


Elektromagnetisches Design des PM-Synchron-Fahrmotors

Schematischer Längsschnitt



2D FE-Modell / Querschnitt



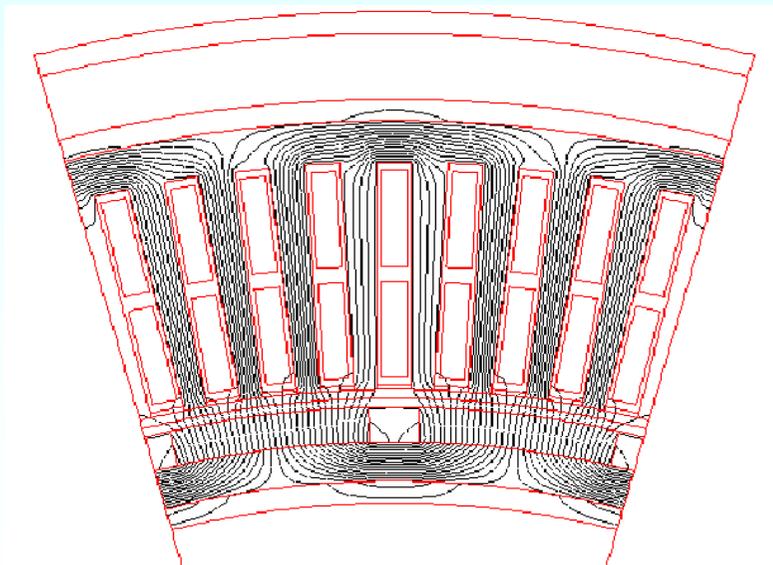
- ▶ Drehstrom-**Synchronmaschine** mit **Permanentmagneten**
- ▶ Drehstromwicklung mit Isolationssystem der Wärmeklasse 200
- ▶ Max. Klemmenspannung 1400 V, max. Strom 320 A
- ▶ **24-poliger Läufer** mit NdFeB-Oberflächenmagneten
- ▶ **Langer Feldschwächbereich** \varnothing Dauerkurzschlussstrom = Nennstrom
- ▶ Wassermantelkühlung, Maschine **völlig geschlossen**



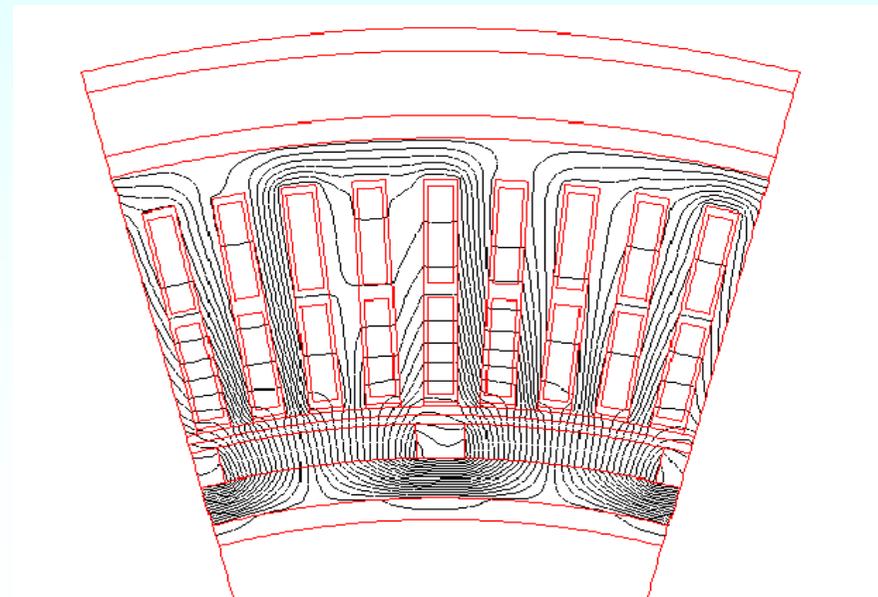
2D-Feldberechnung für den PM-Synchron-Fahrmotor

- ▶ Elektromagnetische **Auslegung** beginnt mit analytischem Tool
- ▶ **Nachrechnung** und **Optimierung** mit 2D FE-Berechnung (ANSYS®)
- ▶ Berechnung des Drehmoments mit dem MAXWELL'schen Spannungstensor

**Feldlinienbild im Grund-
drehzahlbereich (Leerlauf)**
 $n = 617 \text{ min}^{-1}$



**Feldlinienbild im Feldschwächbereich
(max. Drehzahl, volle Leistung)**
 $n_{\text{max}} = 2110 \text{ min}^{-1}, P = 500 \text{ kW}$

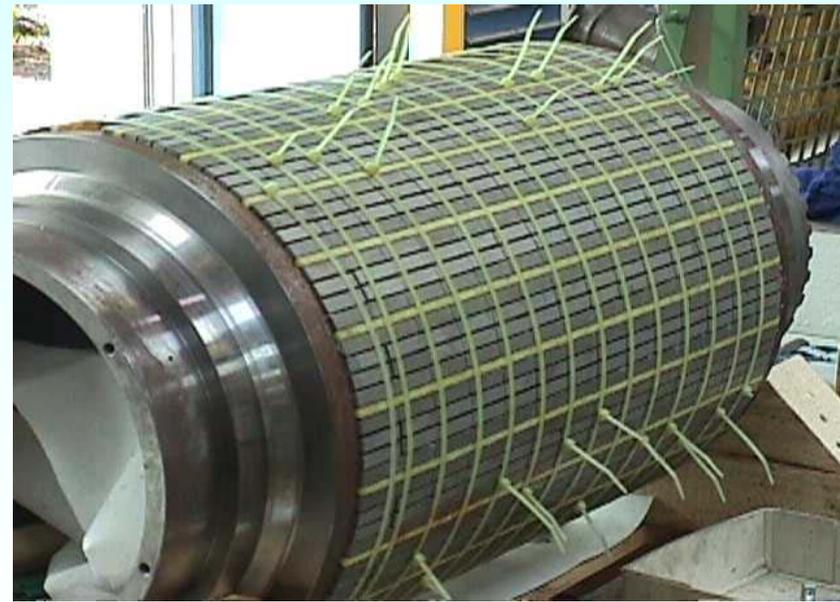


Fertigung eines **Versuchsmusters** bei Siemens in Nürnberg

- ▶ Standard-**Formspulenwicklung** mit MICALASTIC-T[®] Isolationssystem Klasse 200
- ▶ Standard-Blechpaket M330-50A im Ständer
- ▶ Aufbringen magnetisierter **NdFeB-Magnete** auf der Läufer-Oberfläche
- ▶ **Bandage** des Läufers aus Polyglass[®], bewährt bei DC-Fahrmotoren
- ▶ Festigkeit der Bandage wurde bei TUD/EW mit FEM-Rechnungen überprüft



Ständerwicklung im „weißen Zustand“ vor der Imprägnierung

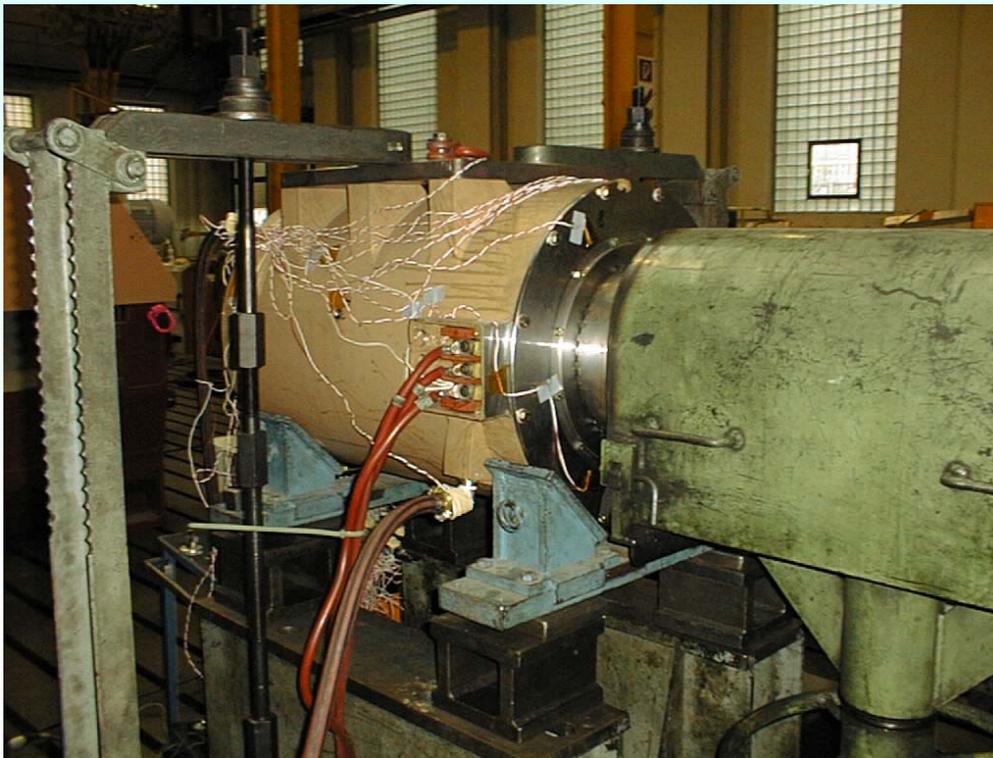


Magnetmontage auf dem Läufer beendet vor Aufbringen der Bandage



Messungen auf dem Prüfstand in Nürnberg

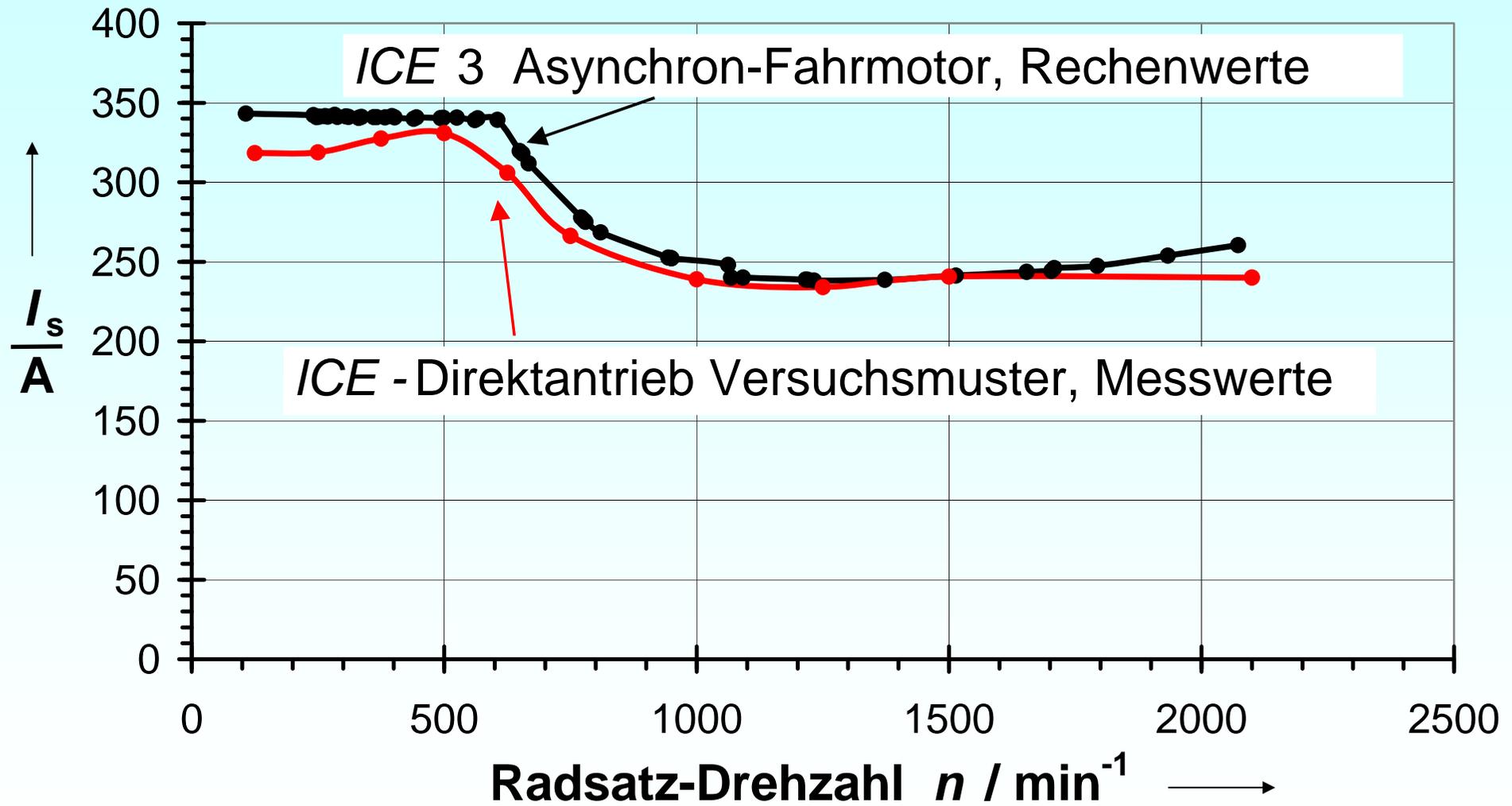
- ▶ Leerlauf mit offenen Klemmen (angetrieben durch Lastmaschine)
- ▶ Kurzschluss (stationär und Stoßkurzschluss)
- ▶ Erwärmungsläufe (am Sinusumformer und am IGBT-Pulswechselrichter)
- ▶ Schleuderversuche



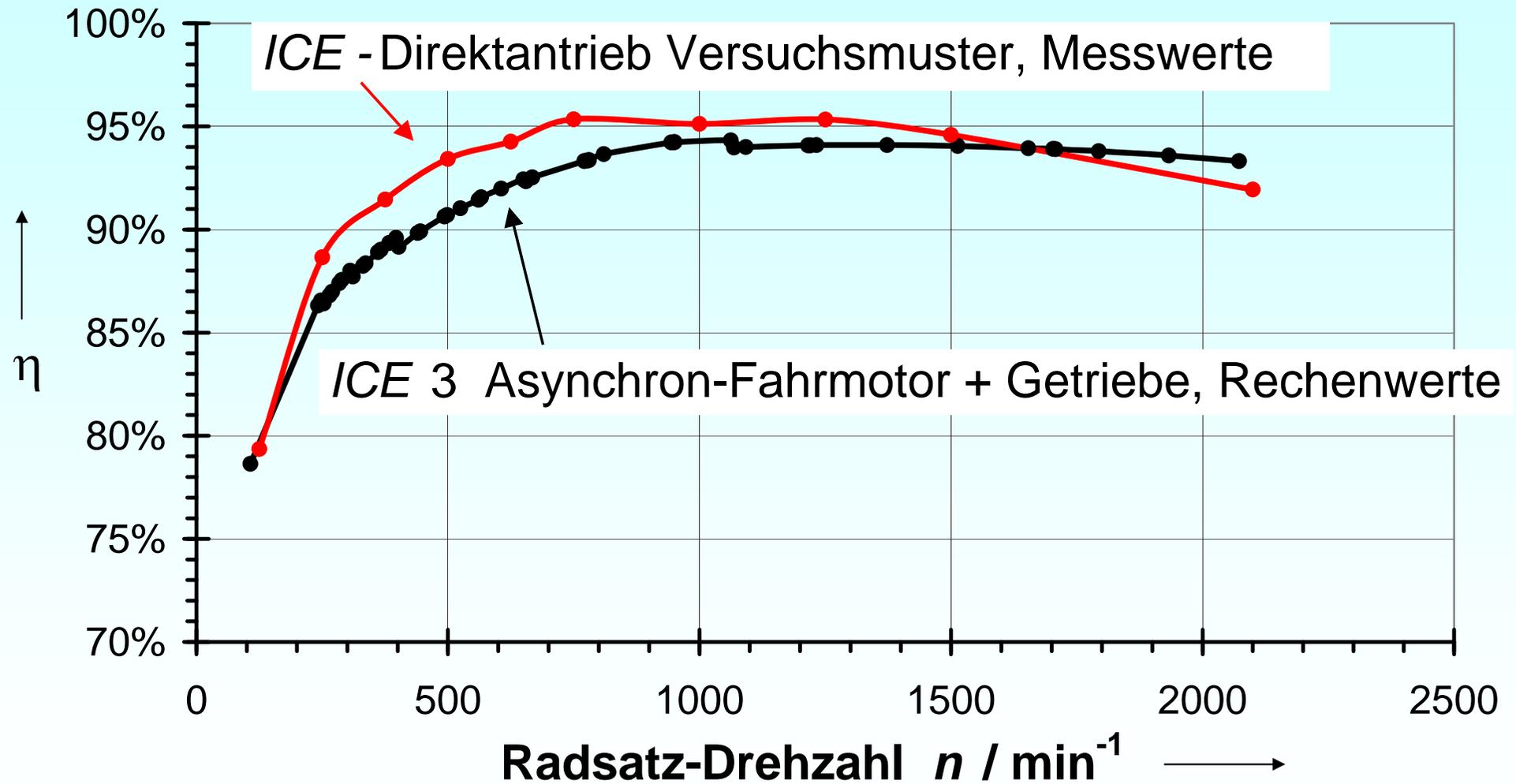
*Versuchsmuster im
Nürnberger Prüffeld,
gekuppelt an Lastmaschine*



Gemessene Stromaufnahme des PM-Fahrmotors



Gemessener Wirkungsgrad des PM-Antriebs bei Umrichterspeisung



Thermische Auslegung des PM-Synchron-Fahrmotors

- ▶ **Zulässige Erwärmung elektrischer Maschinen ist begrenzt:**
 - Wärmebeständigkeit der Isolierstoffe
 - max. zulässige Lagertemperaturen (Fettalterung)
 - Siedepunkt des Kühlmittels
- ▶ **Problem:** max. Temperaturen sind im Wickelkopf
- ▶ **Thermisches 3D FE-Modell** (Programmpaket ANSYS®)
- ▶ **Verifizierung des 3D FE-Modells durch Messergebnisse:**
Erwärmungsvorgang
- ▶ **Kühlflüssigkeit: 56% Wasser + 44% Antifrogen®**
- ▶ **Frostsicherheit: -30 °C**
- ▶ **Siedepunkt: 108 °C**

Ziel ist die Bearbeitung wichtiger betriebsrelevanter Fragen:

- ▶ Maximale Fahrgeschwindigkeit im **Schleppbetrieb** ohne jede Kühlung ?
- ▶ Fahrmotor ausgruppiert und abgetrennt: Temperaturverlauf im Fahrmotor ohne jede Kühlung im **Fahrspiel Frankfurt(M) - Köln ?**

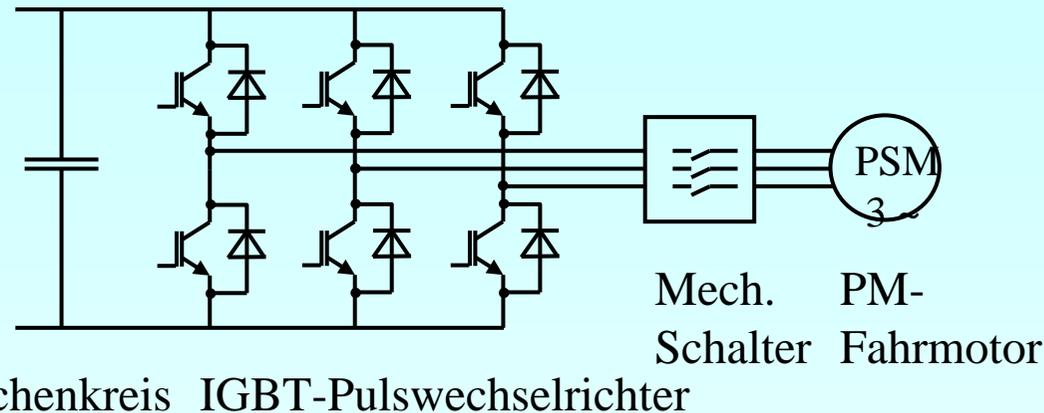


Systemnachteile des PM-Direktantriebs

- ▶ Notwendigkeit eines **Schalters** zwischen PWR und Fahrmotor: sonst **Überspannung** am Umrichter
- ▶ **Leerverluste / Wicklungsverluste bei Windungsschlüssen** bei abgetrenntem Motor  redundante Pumpe
- ▶ **Einzelantrieb**: 1 PWR speist 1 Fahrmotor, wegen feldorientierter Regelung und unterschiedlicher Polradwinkel
- ▶ **Höhere Investkosten** für das Antriebssystem wegen Einzelantrieb



Redundantes Kühlkonzept und PWR-Schutzkonzept



Kühlkonzept im Redundanzfall:

- 1. **Stufe:** 1 PWR in Störung - Wasserkühlung für den Wagen mit 3 Antrieben läuft weiter
- 2. **Stufe:** Pumpe des Kühlsystems in Störung - redundante Pumpe springt ein
- 3. **Stufe:** Redundante Pumpe in Störung, d.h. ganzer Wagen ohne Wasserkühlung:
Weiterbetrieb mit ausgruppierten Antrieben ist möglich

Standard-Schutzreaktion des Wechselrichters ist Nullzeiger - nicht Wechselrichtersperre

- keine Gefahr von Überspannungen im Zwischenkreis
- bei länger dauernden PWR-Störungen Ausgruppieren des Fahrmotors vom Wechselrichter über mechanischen Schalter

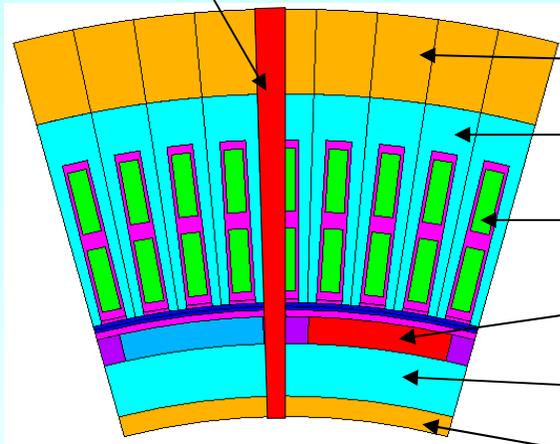


3D FE-Modell für thermische Berechnungen

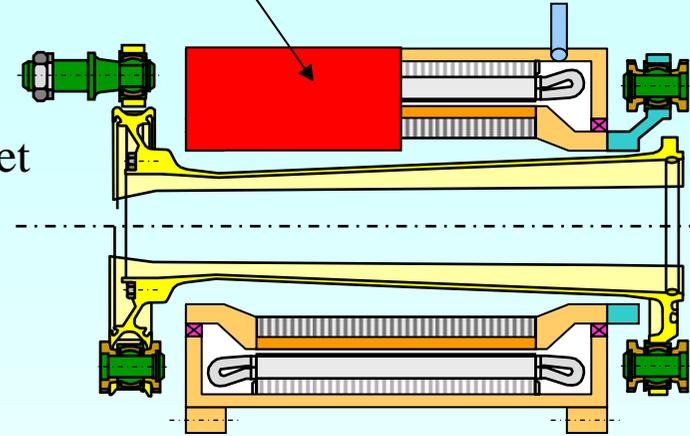
FE-Modell

Symmetriebedingungen

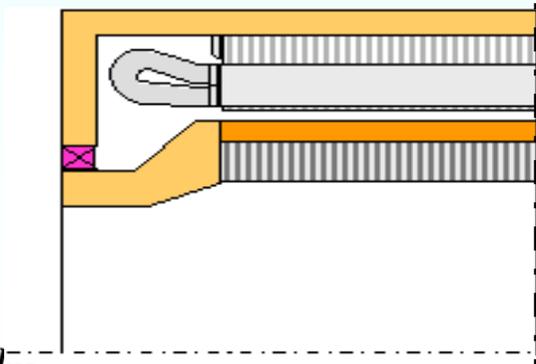
FE-Modell



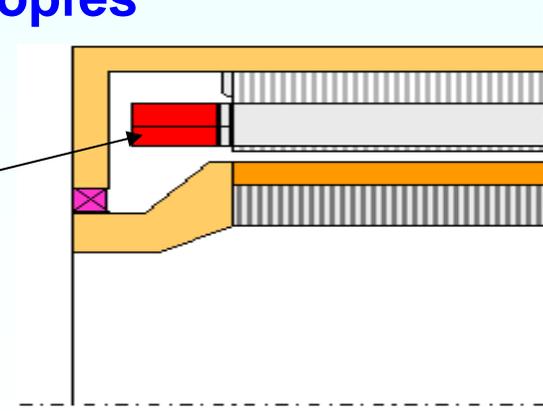
- Gehäuse
- Ständer-Blechpaket
- Wicklung
- Magnete
- Rotor-Blechpaket
- Hohlwelle



Vereinfachung des Wickelkopfes



FE-Modell



Thermisches 3D FE-Modell: Randbedingungen

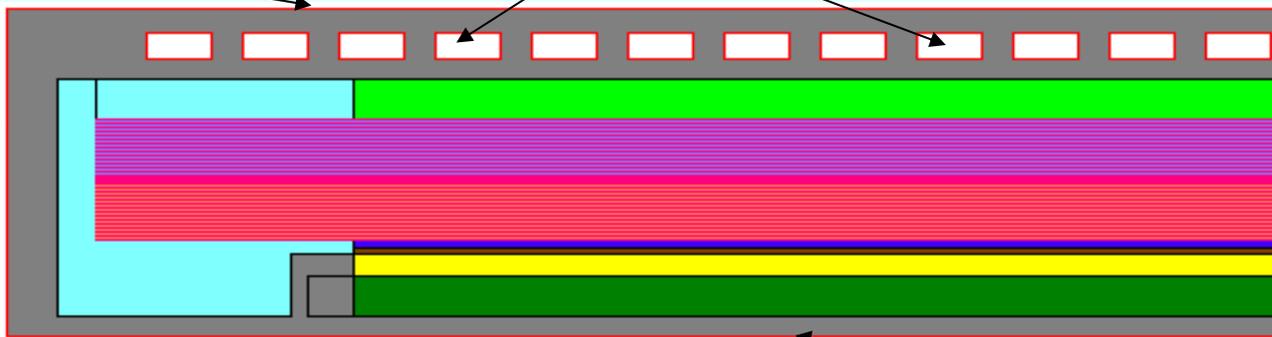
Physikalische Daten der *Kühlflüssigkeit*

$\vartheta / ^\circ\text{C}$	$\rho / \text{kg/m}^3$	$\lambda / \text{W/mK}$	$c / \text{J/kg K}$
20	1075	0,431	3450
40	1064	0,425	3510
80	1039	0,419	3620

$P \neq 0 \text{ W}$
 $a = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$

Kühlkanäle

Kühlflüssigkeit: Wasser + Antifrogen[®]



■ Gehäuse

■ Luft

■ Luftspalt

■ Magnete

■ Rotor-Blechpaket

■ Ständer-Blechpaket

■ Bandage

■ Wicklung/Unterschicht

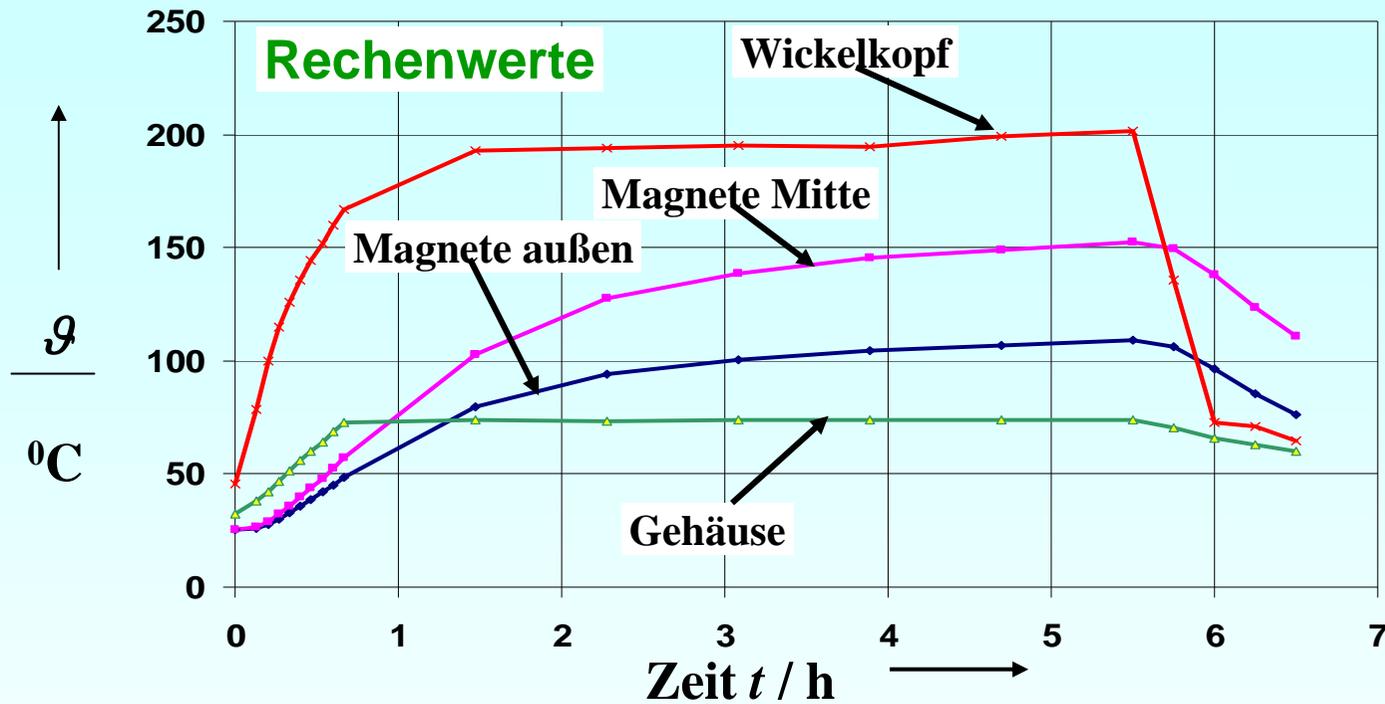
■ Wicklung/Oberschicht

■ Isolation

$P = 0 \text{ W}$
 $a = 0 \text{ W/m}^2\text{K}$



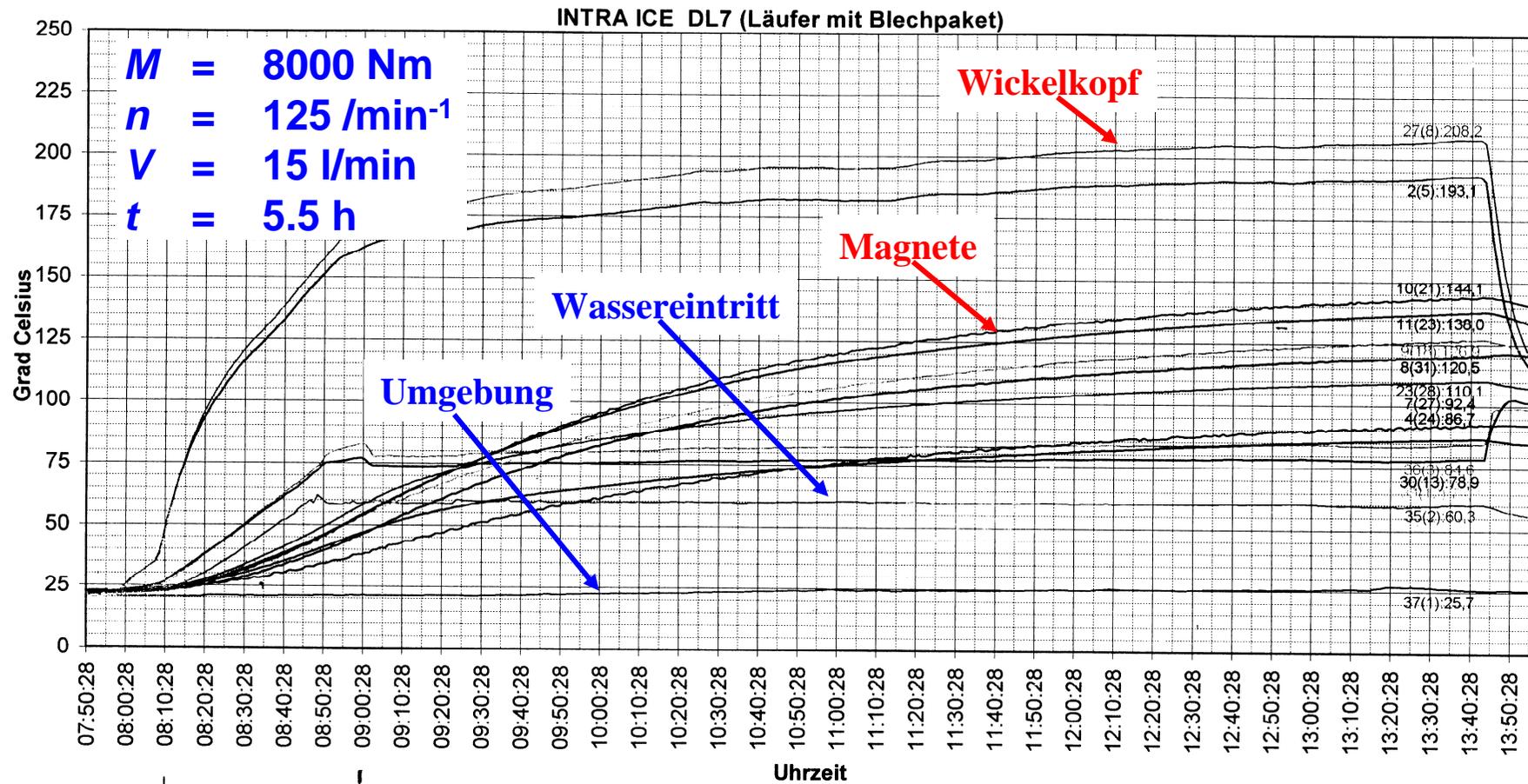
Erwärmungslauf: Vergleich Rechnung - Messung



t / h	Gehäuse			Wickelkopf		
	Rechnung $\theta / ^{\circ}\text{C}$	Messung $\theta / ^{\circ}\text{C}$	Fehler $\Delta / \%$	Rechnung $\theta / ^{\circ}\text{C}$	Messung $\theta / ^{\circ}\text{C}$	Fehler $\Delta / \%$
0,33	51	50	2	126	120	5
0,67	73	75	-3	167	160	4
3,08	74	80	-8	195	196	0
5,50	74	75	-1	201	208	-3



Gemessener **Erwärmungslauf** des Versuchsmusters im Prüffeld

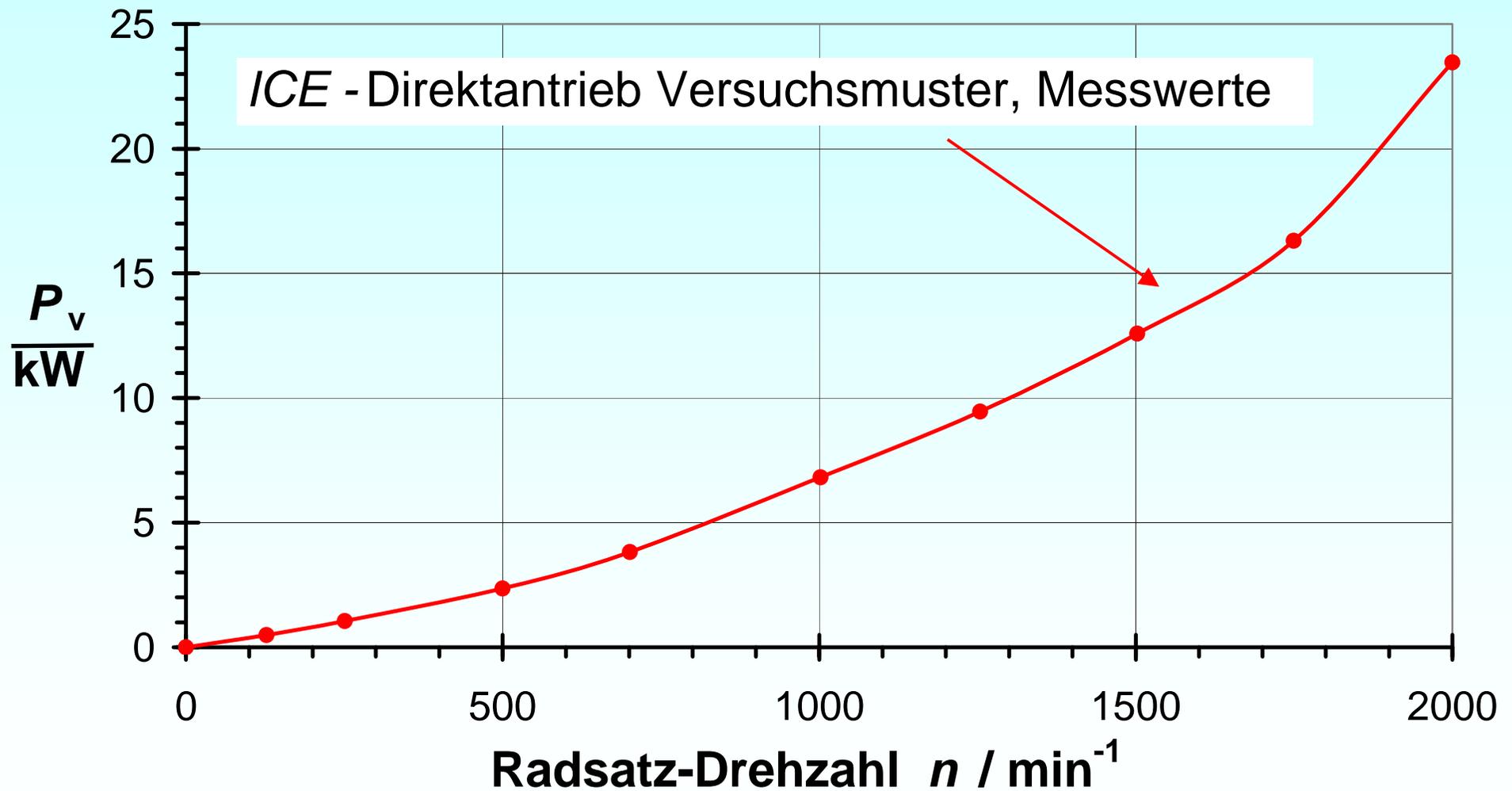


- | | | |
|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| — 37 (1) Raum | — 35 (2) Wasser ein | — 36 (3) Wasser aus |
| — 2 (5) AS-Wickelkopf | — 27 (8) BS-Wickelkopf | — 34 (12) Gehäuse Mitte 0 Grad |
| — 30 (13) Gehäuse Mitte 240 Grad | — 9 (18) Magnete AS | — 10 (21) Magnete Mitte |
| — 11 (23) Magnete BS | — 4 (24) AS-Lager, Außenring | — 7 (27) AS-Lager, Innenring |
| — 23 (28) BS-Lager, Außenring | — 8 (31) BS-Lager, Innenring | (): Bez. b. Lfr. ohne Blechpak. |

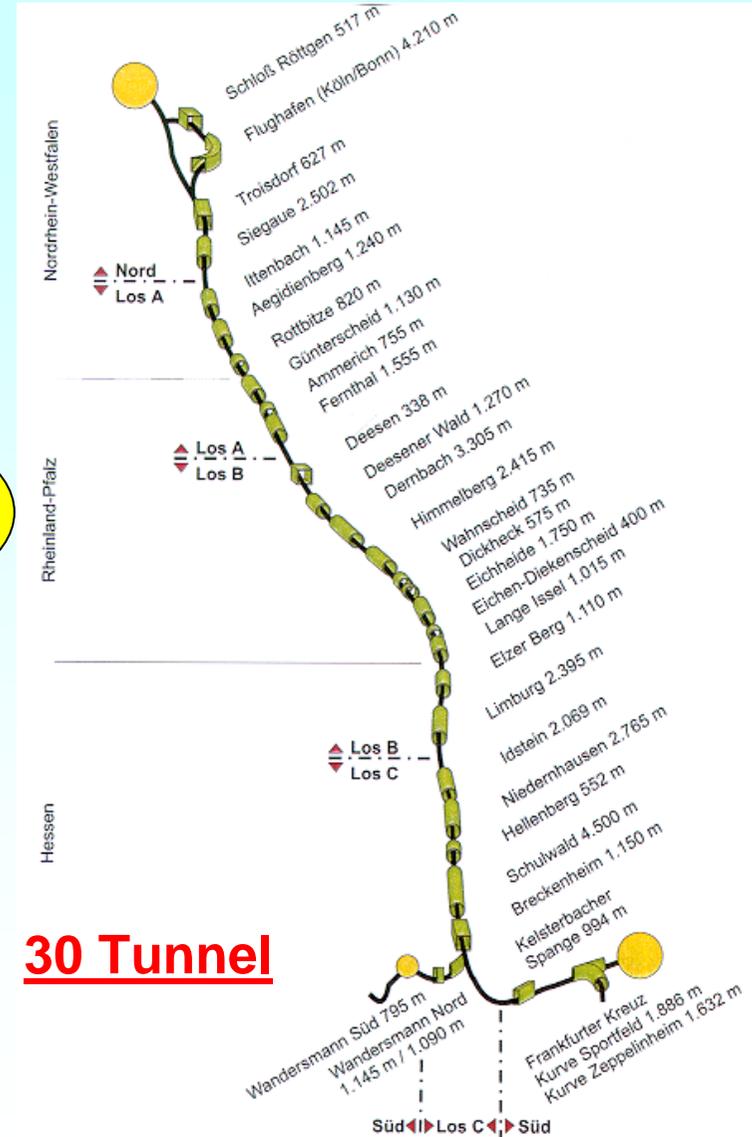
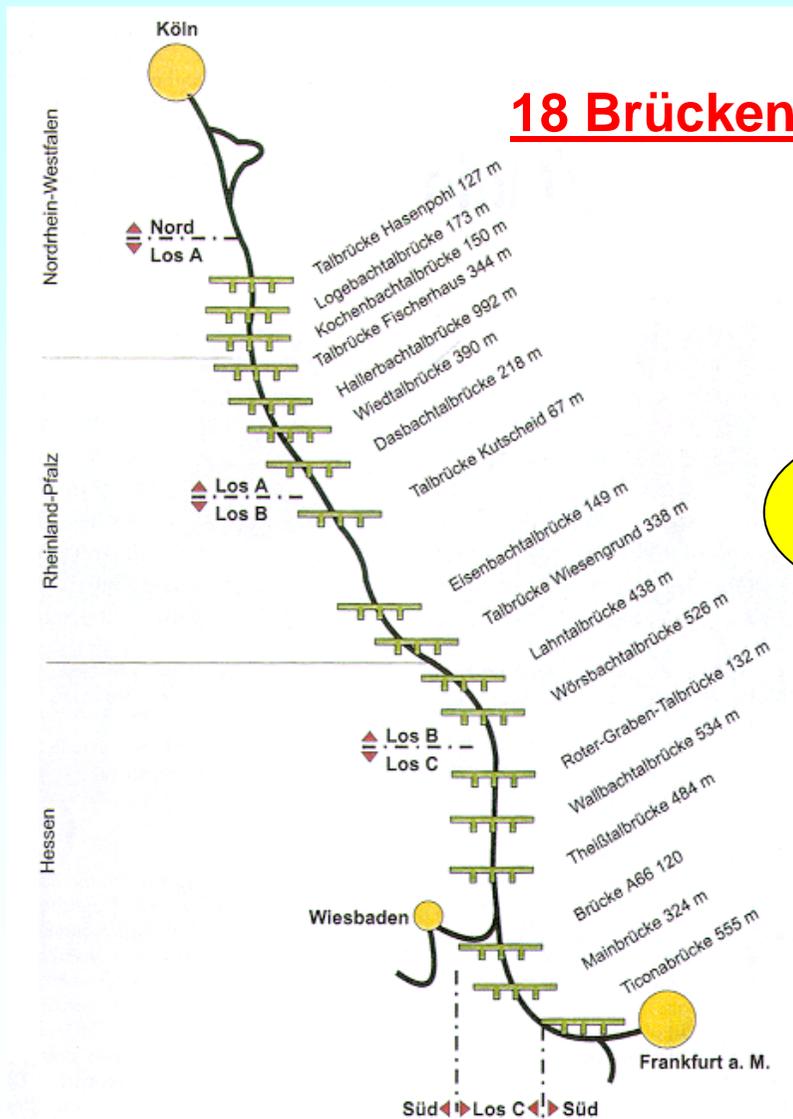
2.4.2001
 B QM2
 Poppe



Gemessene Leerlaufverluste bei offenen Klemmen



Neue Strecke von Frankfurt/Main nach Köln



Berechnete **Verluste** bei **Sinusspeisung**

➔ ICE 3 - PM-Direktantrieb ←

	Nenn- drehzahl	Maximal- drehzahl
> Moment	7700 Nm	2270 Nm
> Drehzahl	617 /min	2110 /min
> Strom	251 A	253 A
> Ständerfrequenz	123.4 Hz	422 Hz
> Stromwärme- und Stromverdrängungs- verluste bei 115°C Wicklungstemperatur	14820 W	26864 W
> Ummagnetisierungsverluste	5419 W	7755 W
> Reibungs- und Ventilationsverluste	71 W	357 W
> Wirbelstromverluste im Gehäuse	251 W	61 W
> Wirbelstromverluste in den Magneten	20 W	101 W
Summenverluste bei Sinusspeisung	20581 W	35138 W



Berechnete **Verluste** bei **Umrichterspeisung**

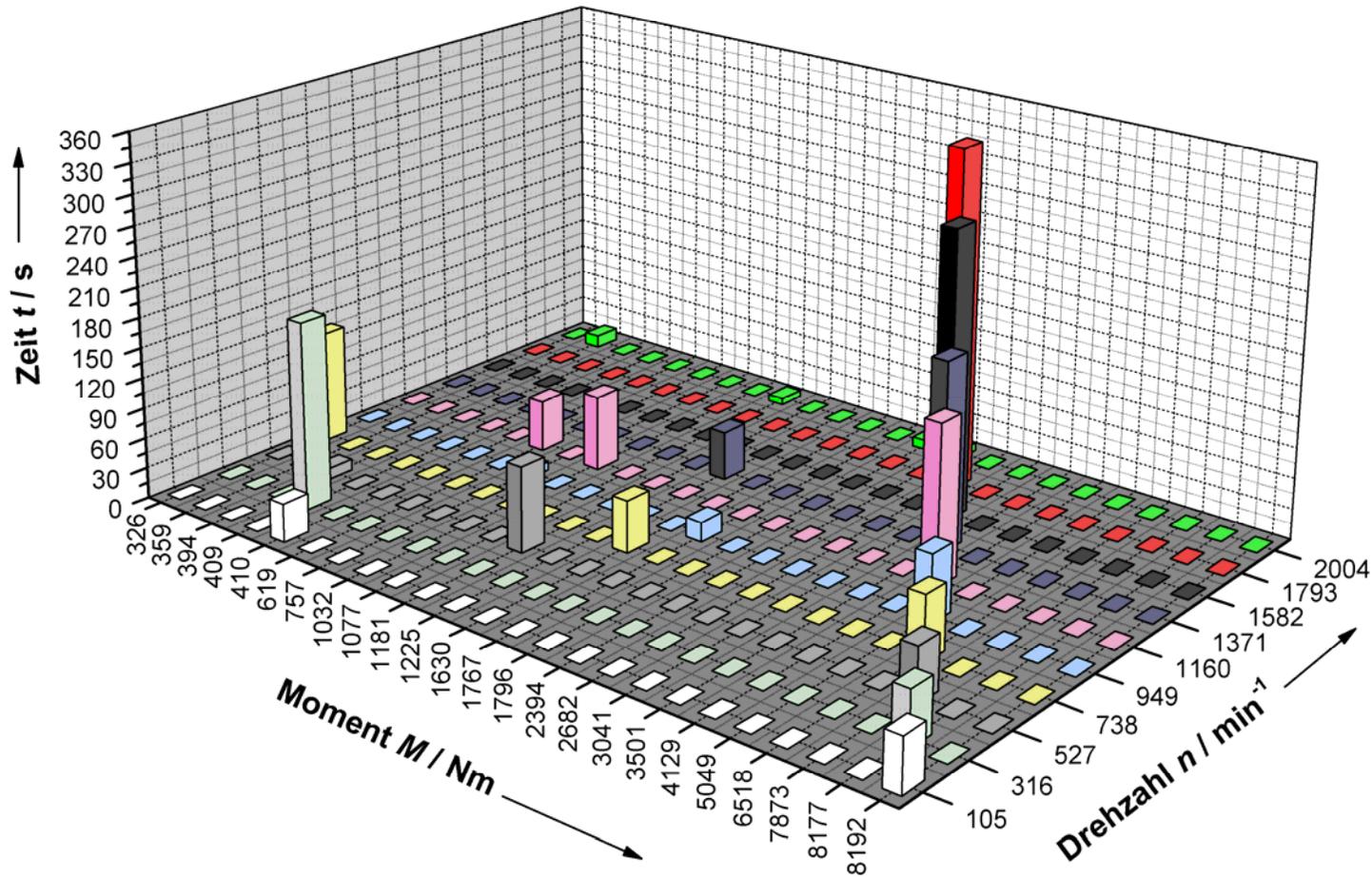
➔ **ICE 3 - PM-Direktantrieb** ←

Gesamtverluste P bei Sinusspeisung	20581 W	35138 W
Umrichter-Betriebsart	PWM $f_p = 600$ Hz	Block- Betrieb
> Zusätzliche Ummagnetisierungsverluste	61 W	43 W
> Oberschwingungs-Stromwärmeverluste bei 115 °C Wicklungstemperatur	256 W	15 W
> OS-Stromverdrängungsverluste	475 W	505 W
> Zusätzliche Wirbelstromverluste in den Permanentmagneten	100 W	103 W
Gesamtverluste im Motor P_d	21473 W	35804 W



Frankfurt/Köln: Drehmoment/Drehzahl-Anforderungen "Fahren"

ICE 3 - Lastkollektiv im motorischen Betrieb

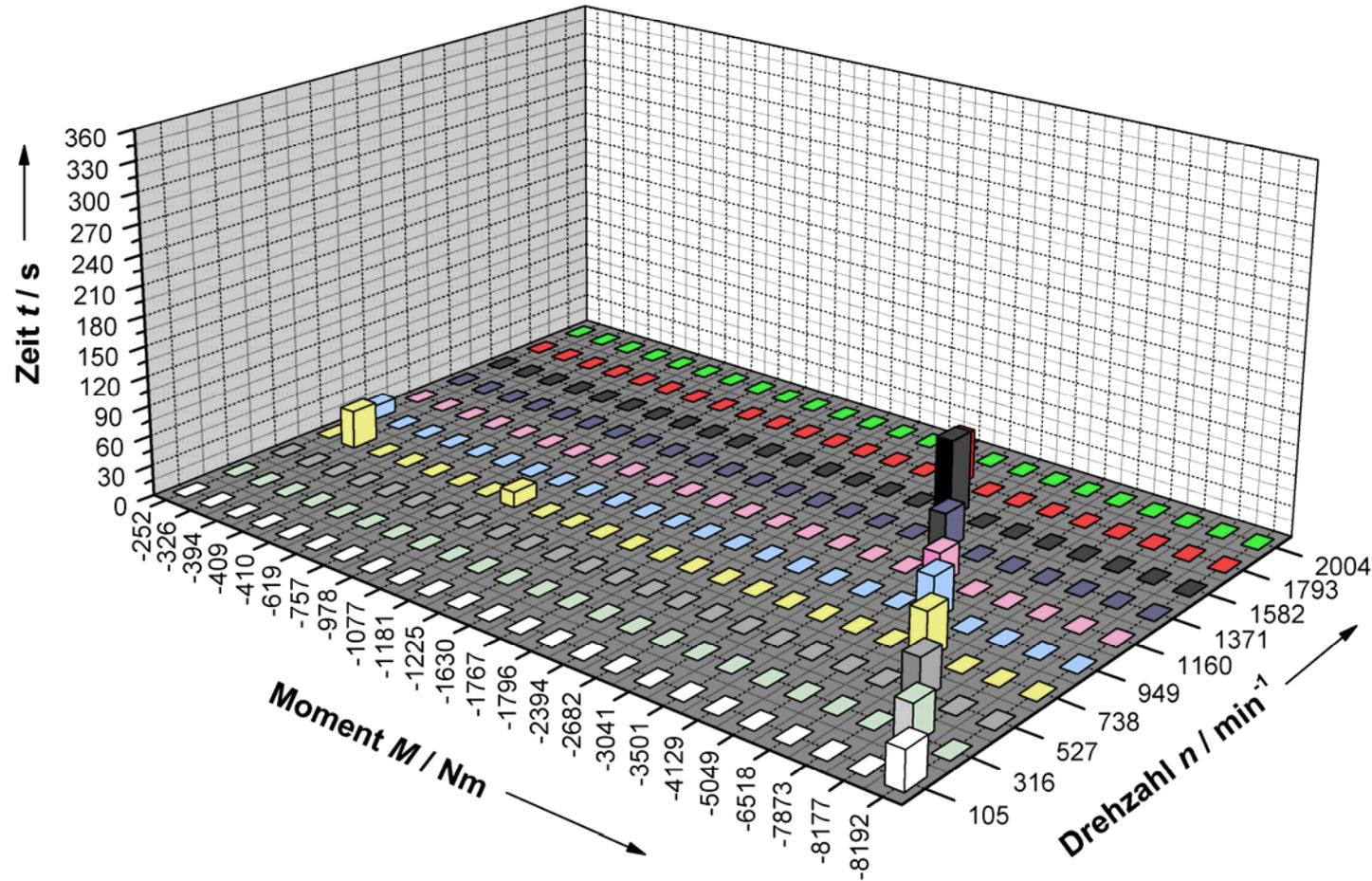


Gesamte Fahrzeit = 65,2 min Motorbetrieb = 46,2 min Generatorbetrieb = 11,3 min Halten = 7,8 min



Frankfurt/Köln: Drehmoment/Drehzahl-Anforderungen "Bremsen"

ICE 3 - Lastkollektiv im generatorischen Betrieb



Gesamte Fahrzeit = 65,2 min **Motorbetrieb = 46,2 min** **Generatorbetrieb = 11,3 min** **Halten = 7,8 min**



Berechnung des Energieverbrauchs im Fahrspiel

➔ Methode der **Verlustleistungsberechnung**

$$\Rightarrow P_{d,i} = f(n_i, M_i)$$

➔ **Energieverbrauch** für jeden einzelnen Betriebspunkt

$$\Rightarrow W_{d,i} = P_{d,i} \cdot t_i$$

➔ Energieverbrauch für **das gesamte Fahrspiel**
(Antreiben und regeneratives Bremsen)

$$\Rightarrow W_d = \sum_i P_{d,i} \cdot t_i$$

➔ Gesamter Energieverbrauch im Fahrspiel:

$$\Rightarrow W_d = W_{d,motor} + W_{d,generator}$$



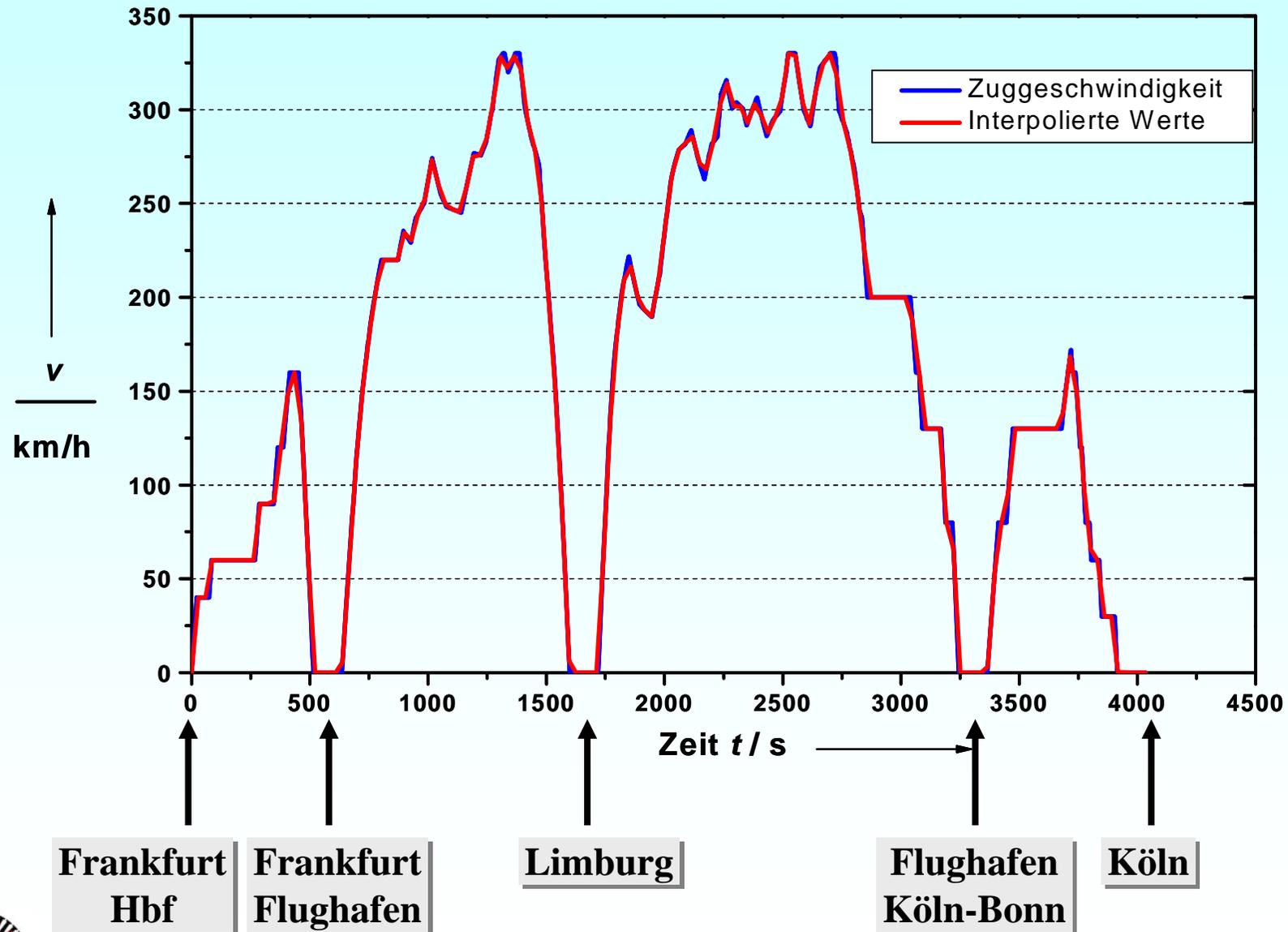
Energieverbrauch W_d des ASM- und PM-Fahrmotors

	Serien-Antrieb	Versuchsmuster
Motortyp	Käfigläufer-Asynchronmaschine (ASM)	Permanentmagnet-Synchronmotor (PM)
Drehmoment-Übertragung	Mit Getriebe	Getriebelos
Kühlsystem	Luft, Fremdlüfter, Innenkühlung	Flüssigkeits-Mantel-Kühlung
Berechneter Energieverbrauch je Motor	19.5 kWh (Getriebe + Motor)	16.4 kWh

- Der **Direktantrieb** als **Versuchsmuster** würde **3.1 kWh** weniger als der optimierte Serien-Asynchron-Antrieb mit Getriebe verbrauchen
- Die **gesamte Energieeinsparung wäre** 49.6 kWh pro Zug
PRO JAHR: **145 MWh** (bei 8 Zügen pro Tag)

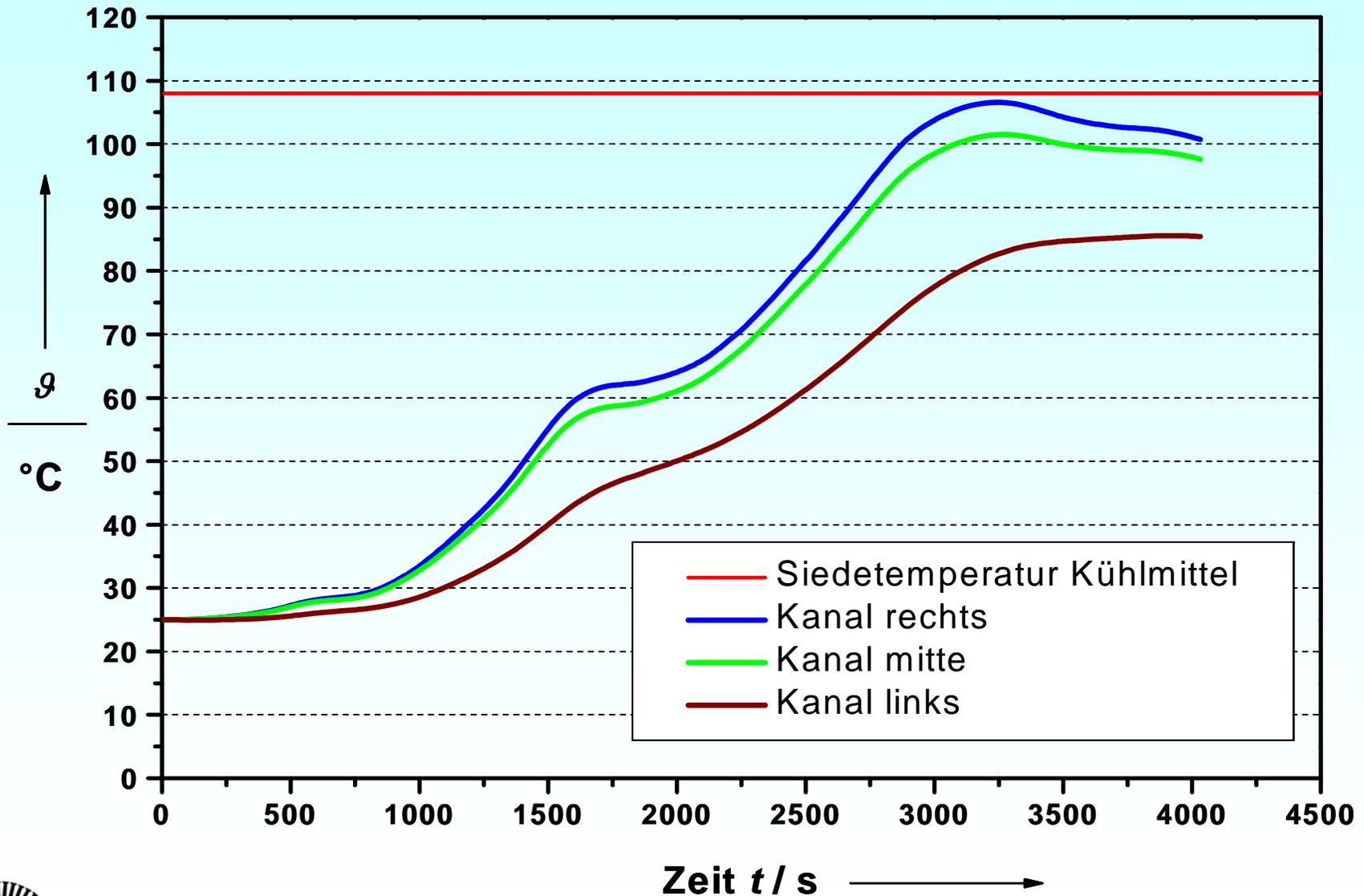


Fahrspiel *Frankfurt (M) - Köln*



Berechneter Temperaturverlauf: Fahrspiel *Frankfurt(M) - Köln*

Fahrmotor ist ausgruppiert und hat anfangs Umgebungstemperatur



Zusammenfassung und Ausblick

Entwicklung eines getriebelosen Antriebssystems mit folgenden Komponenten:

- *permanenterregte Drehstrom-Synchronmaschine, gekapselt und wassergekühlt*
- Pulswechselrichter mit 3.3kV-IGBT Modulen, Einzelspeisung, Wasserkühlung
- *d-q*-Regelungseinheit
- klassische Kardan-Hohlwellenkupplung zum Radsatz.

Das getriebelose Antriebssystem bietet folgende Vorteile:

- höherer Wirkungsgrad des Fahrmotors
- keine Verluste/ kein Wartungsaufwand für das Getriebe
- kein Getriebelärm sowie verringerter Motorlärm durch Wasserkühlung
- ölfreies Antriebssystem.

Untersucht werden derzeit Anwendungen für Metros und Nahverkehrszüge, da hier ein Einsatz in naher Zukunft zu erwarten ist !

