

Magnetgelagerter integrierter Pumpenantrieb



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

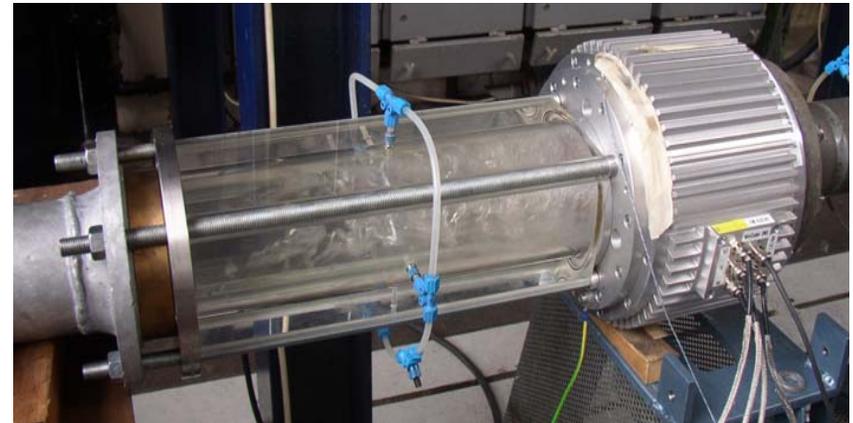
Industrietag

“Integrierte mechatronische Fluidfördersysteme”

23. April 2008

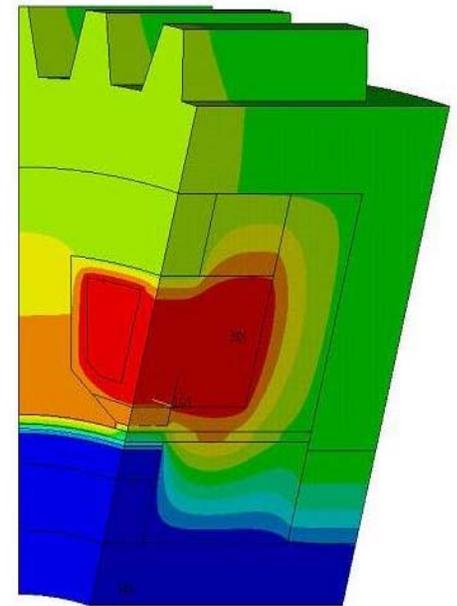
Technische Universität Darmstadt
Institut für Elektrische Energiewandlung

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Andreas Binder
Dipl.-Ing. Boris Janjic
bjanjic@ew.tu-darmstadt.de



Motor-Pumpeneinheit auf dem Prüfstand

- **Aufgabenstellung**
- **Antriebssystem**
- **Motorauslegung**
- **Magnetlager vs. Mechanische Lager**
- **Messergebnisse**
- **Weiterarbeit**



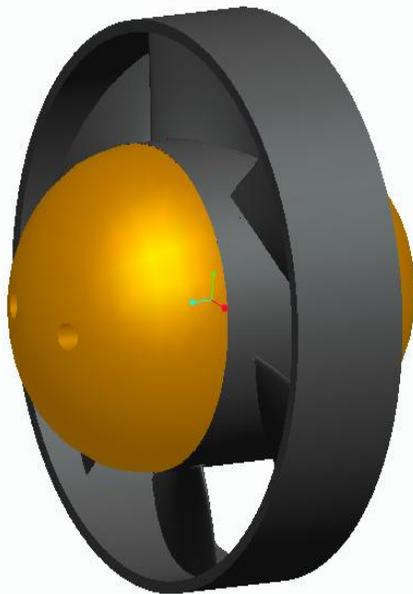
Thermische 3D Finite-Element-Berechnung des Antriebsmotors (Segmentdarstellung)

Axialradantrieb ohne rotierende Dichtungen, ohne Kupplung, ohne mechanische Lager

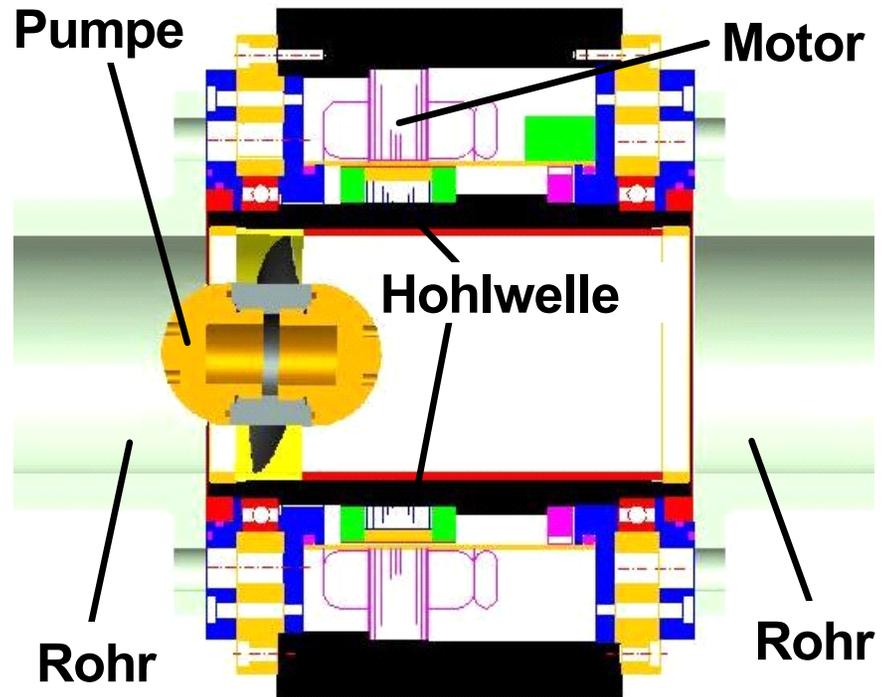


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Integration von Pumpenrad und Motorläufer – “Straight-Flow”- Anordnung



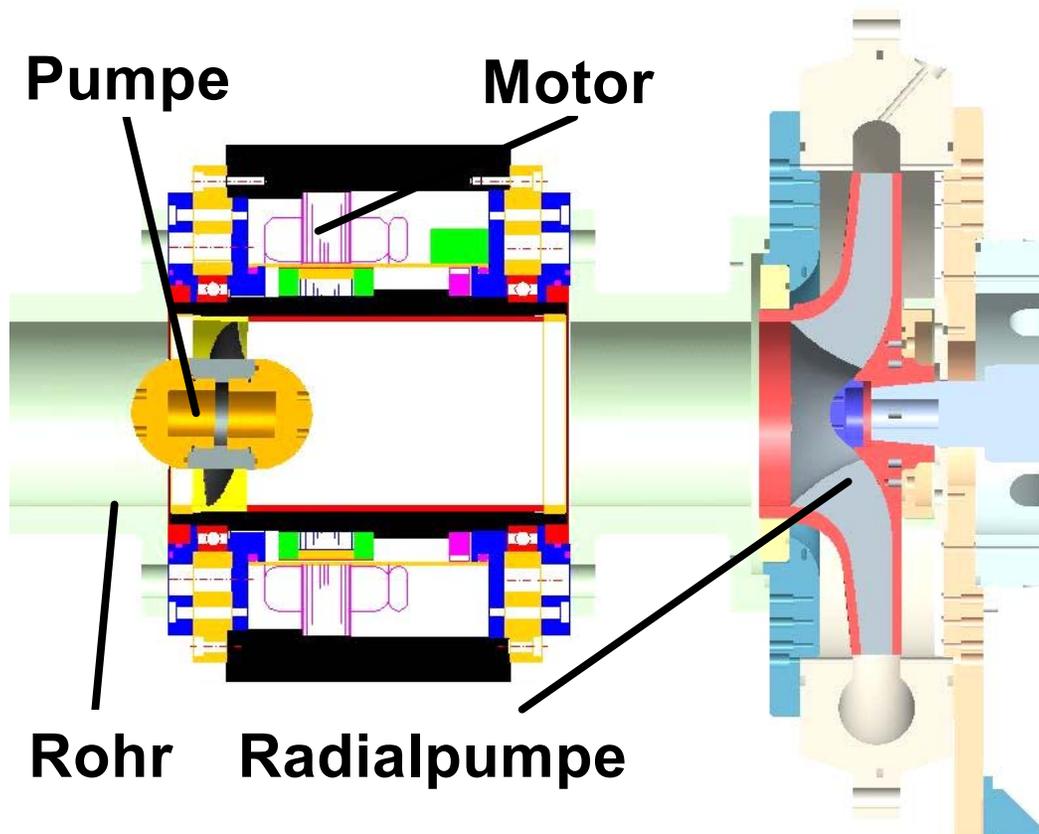
Axialpumpenrad



**„Autonomes“ System Pumpe-Antrieb
(hier: mechanische Lagerung)**

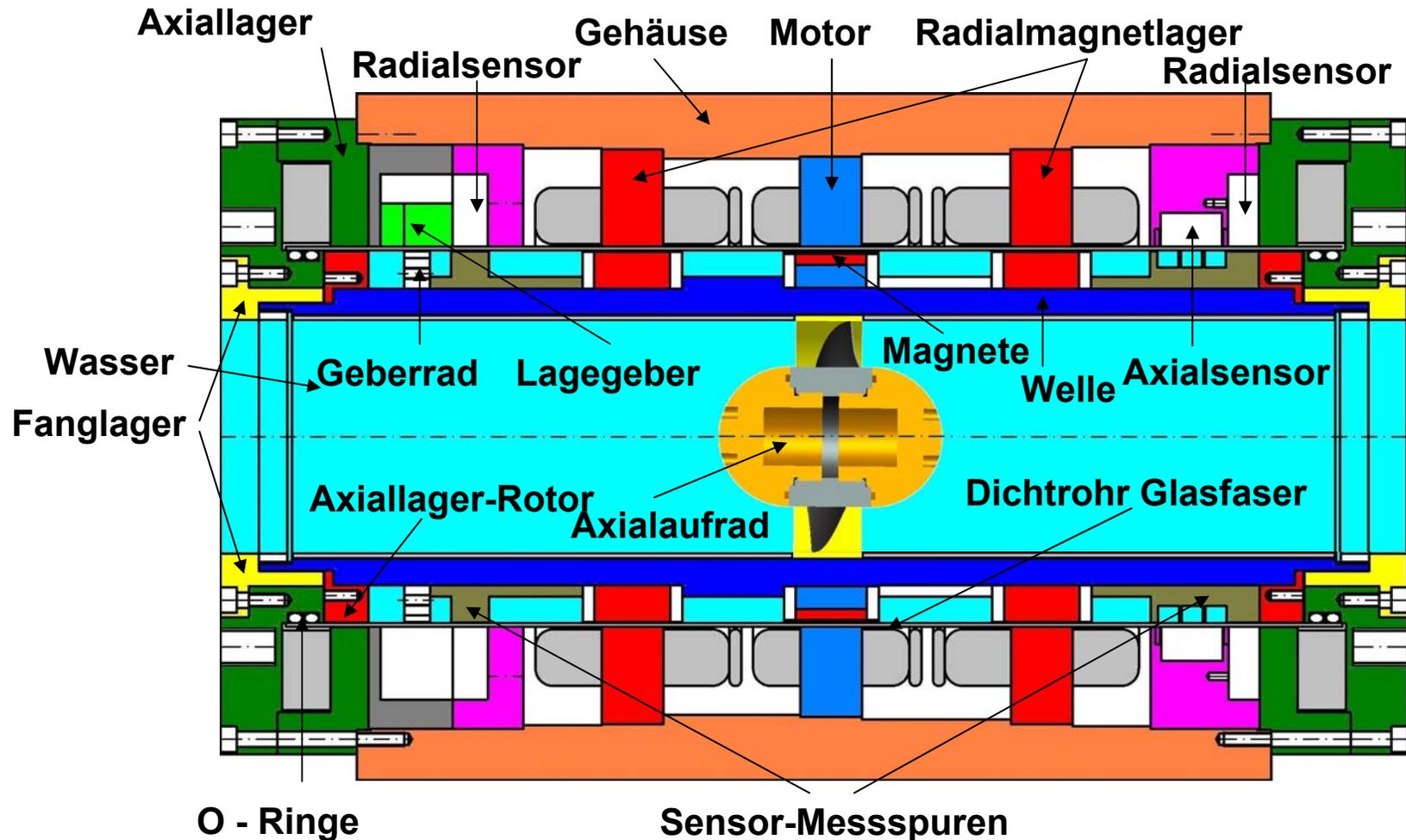


Nutzen: Strömungs-„Inducer“ für nachgeschaltete Radialpumpenstufe



- Erhöhung des Pumpenwirkungsgrads
- Vermeidung von Kavitation
- Erhöhung der Ausnützung
- Verlängerung der Lebensdauer

Komponenten des integrierten magnetgelagerten Pumpenantriebs



Auslegung des Dichtrohrs



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

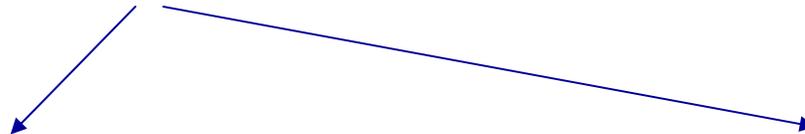
Pumpe und Motorrotor im Wasser



Dichtrohr schützt elektrische Statorkomponenten



Dichtrohrmaterial



Amagnetischer Stahl oder
Nickellegierung



Wanddicke klein: $d = 0.5 \text{ mm}$
sonst hohe Wirbelstromverluste
Prop. $\sim \text{Länge } l$ & $\sim \text{Dicke } d^3$

Glassfaserkomposit (GFK) oder
Kohlefaserkomposit (CFK)



Wanddicke groß $d = 1.5 \text{ mm}$
keine Wirbelstromverluste



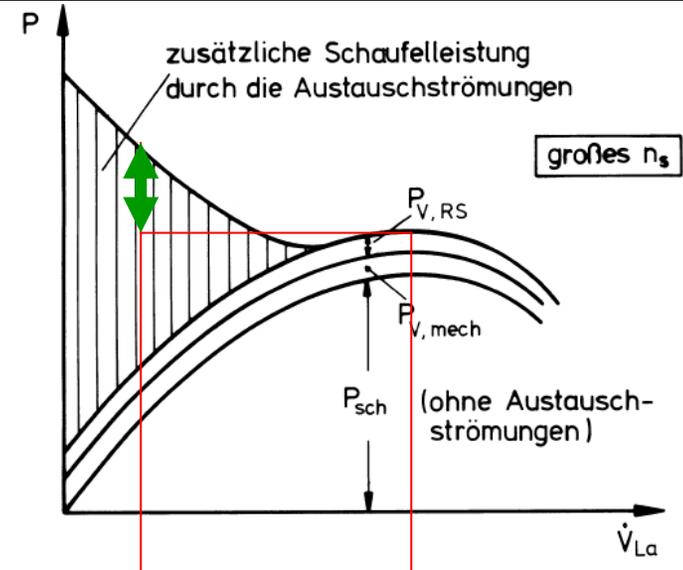
Bemessungsdaten der Pumpe

Nenndaten 1.0 kW

Durchflussrate [m ³ /h]/Druck [bar]	84 / 0.37
Druckhöhe [m]	3.75
Nenndrehzahl n [min ⁻¹]	3170

Maximalleistung (3.5 kW)

Maximaldrehzahl n [min ⁻¹]	5000
Leistung im Bestpunkt bei 5000/min [kW]	3.5



Motorbemessungsleistung: **1.2 kW** zusätzlich für Teillast- Reserve:
3.5 + 1.2 = 4.7 kW bei Maximaldrehzahl **5000/min**.

- Drehzahlveränderung \Rightarrow Umrichter
- Ringförmiger Motor mit wenig Aktivmasse \Rightarrow hohe Polzahl $2p = 8$: kleiner Fluss pro Pol
- Elektrische Frequenz $f_N = 333$ Hz eher hoch

$$p = \frac{f_N}{n} = \frac{333.33}{5000/60} = 4$$

Auswahl des Motortyps

Dichtrohr (1.55 mm), Wasserspalt (0.7 mm), Läuferbandage als Dichtung (0.8 mm)

Großer magnetisch wirksamer Spalt 3.05 mm

Welcher Motor ?

**Asynchron-
motor**

**Großer Magnetisierungs-
strom**

Reluktanz- Synchronmotor

**Verringerter
Reluktanzeffekt**

**Permanentmagnet-
Synchron-Motor**

**Dickere Magnete,
aber hoher
Wirkungsgrad**

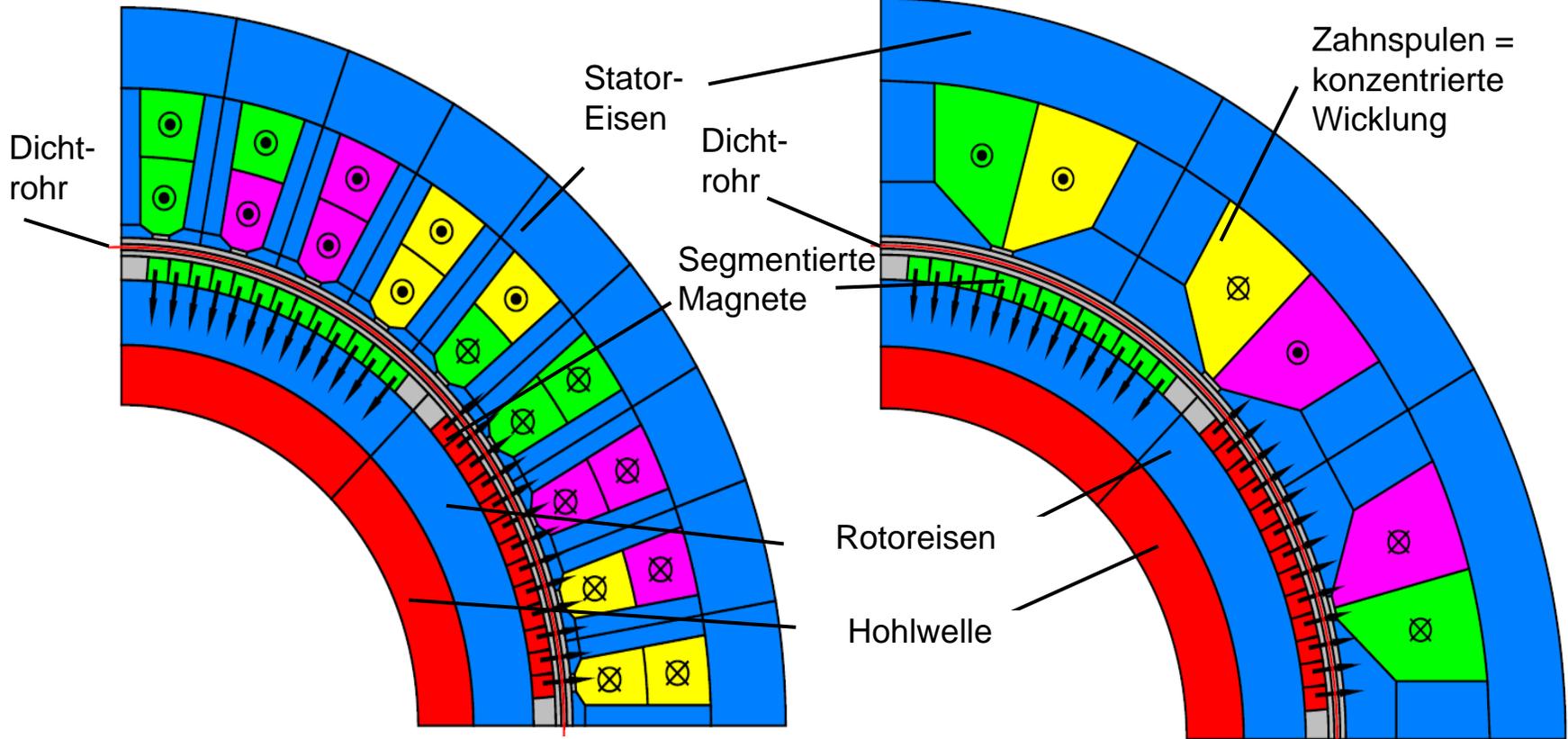
PM Synchronmotor: Drehstromwicklung verteilt oder konzentriert?



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Verteilt: Längere Wickelköpfe
($q = 1.5$ Nuten je Pol und Strang)

Konzentriert: Kurze Wickelköpfe
($q = 0.5$ Nuten je Pol und Strang)



Motor mit konzentrierter Wicklung ausgewählt, da axial kürzer



**Motordaten berechnet: (FEMAG) ($n_N = 5000 \text{ min}^{-1}$; $I_N = 7.74 \text{ A}$; $M_N = 9 \text{ Nm}$)
400 V, 4.7 kW, 333.3 Hz**

	Verteilte Wicklung	Konzentrierte Wicklung
Stator-Aussen-/ Innendurchmesser [mm]	240 / 163	240 / 163
Axiale Länge [mm]	86	66 (- 23 %)
Gesamtverluste [W]	621.9	550.6 (- 11 %)
Massen: Eisen / Kupfer [kg]	3.3 / 3.1	3.3 (-) / 2.4 (- 22 %)
Herstellkosten (Fa. Brenner) [%]		- 50 %
Momentenwelligkeit ungeschrägt [%]	2.6	9.2 (+ 354 %)

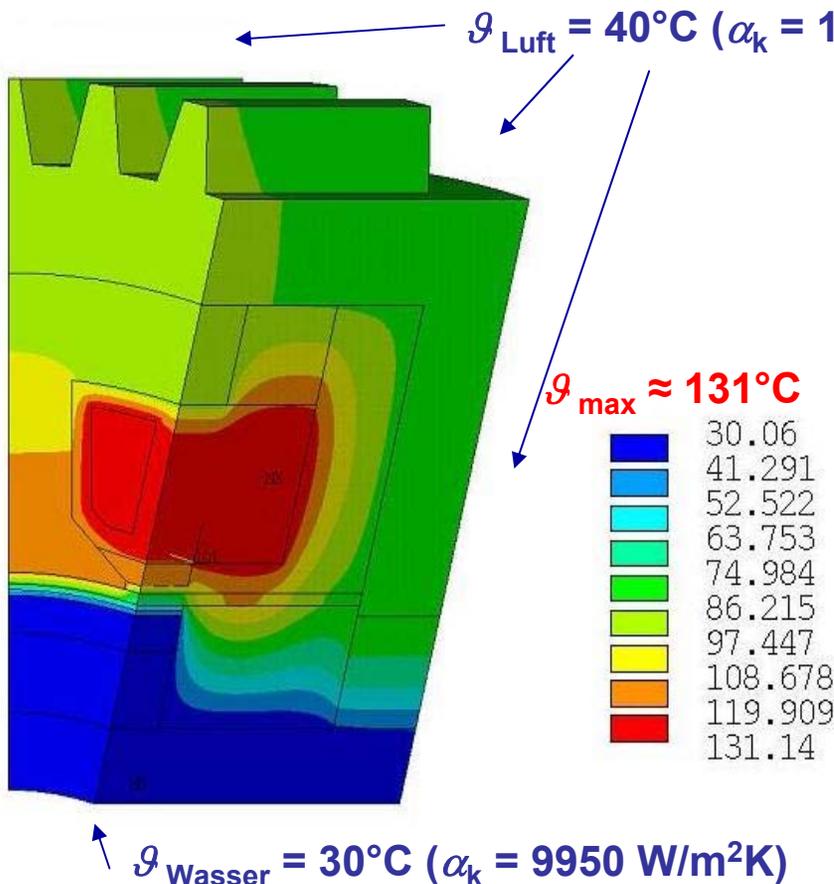


Thermische Berechnung des PM-Motors



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

3D-Modell (ANSYS): “Thermal äquivalente Nutleiter-Isolation“: Verringerung der Anzahl finiter Elemente – Oberflächen-Luft-Selbstkühlung ($n_N = 5000 \text{ min}^{-1}$; $I_N = 7.74 \text{ A}$; $M_N = 9 \text{ Nm}$)



Inneres Moment:

$$M_e = \frac{P_{Fe+fr} + P_m}{2\pi \cdot n} = 10 \text{ Nm}$$

Drehmomentkonstante:

$$k_T = 10 / 7.74 = 1.29 \text{ Nm/A}$$

Motorverluste

Motorwirkungsgrad

P_{Cu} [W]	61.5
P_{Fe} [W]	279.9
P_{fr} [W]	232.6
η_{mot} [%]	89.15

Die Maximaltemperatur **131°C** in der Wicklung (Isolierstoffe: Wärmeklasse F) ist begrenzt durch die **zulässige** Temperatur des Rotorlagegebers (**120°C**).



Rotorlagegeber



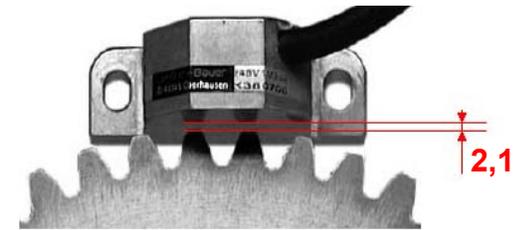
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

PM-Synchronmotor: Lagerfassung für q - Stromspeisung

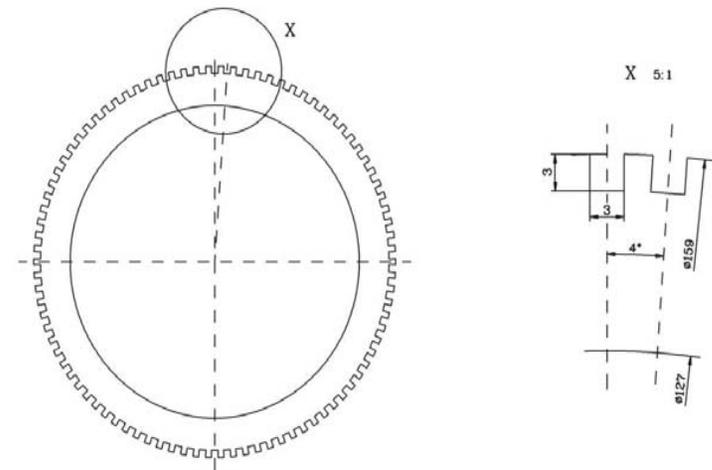
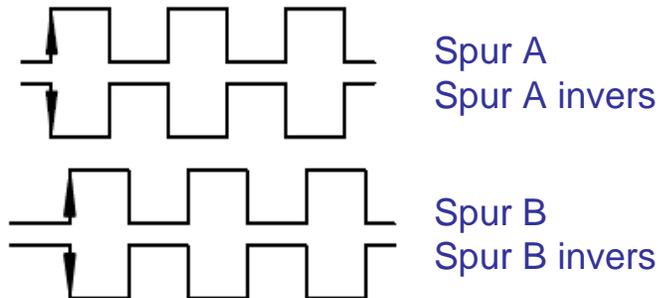
Problem: großer Messabstand ca. 2.1mm, wegen Dichtrohr
 $d = 1.5\text{mm}$

Messprinzip: Hall-Elemente, Differenzmessung

Ausgangssignale: HTL Rechtecksignale



Geberrad mit 90 Zähnen
(ferromagnetischer Edelstahl)



Anzahl der Impulse pro Umdrehung

$90 \times 4 = 360 \hat{=} \text{Auflösung von } 4^\circ \text{ elektrisch (} 360 \hat{=} 1^\circ \text{ mechanisch = } 4^\circ \text{ elektrisch, } p = 4 \text{)}$

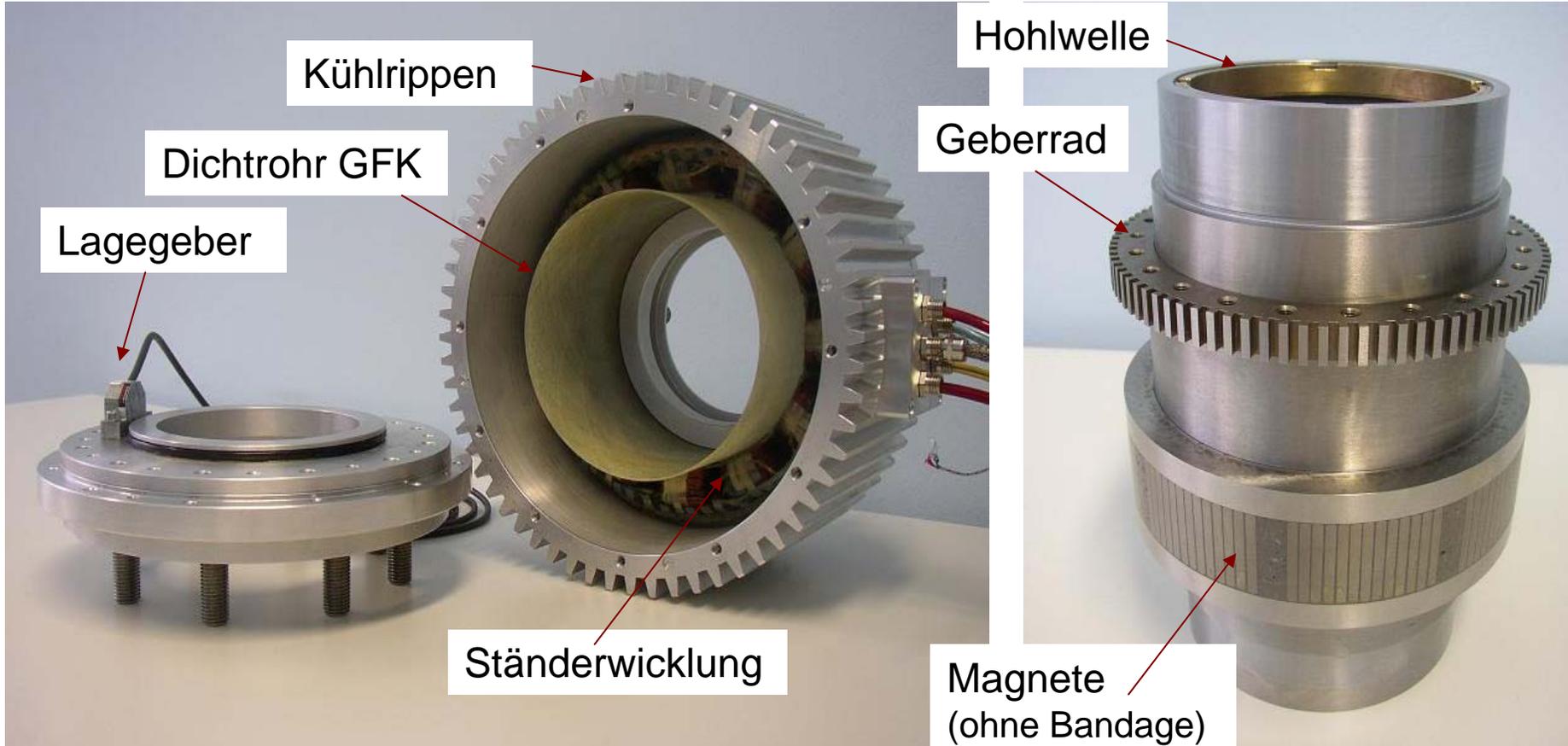
Umrichter benötigt TTL-Signale: HTL/TTL-Umsetzer ist nötig.



Prototypmotor 1



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Statorkomponenten

Rotorkomponenten



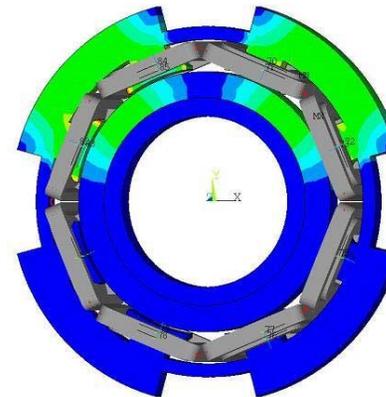
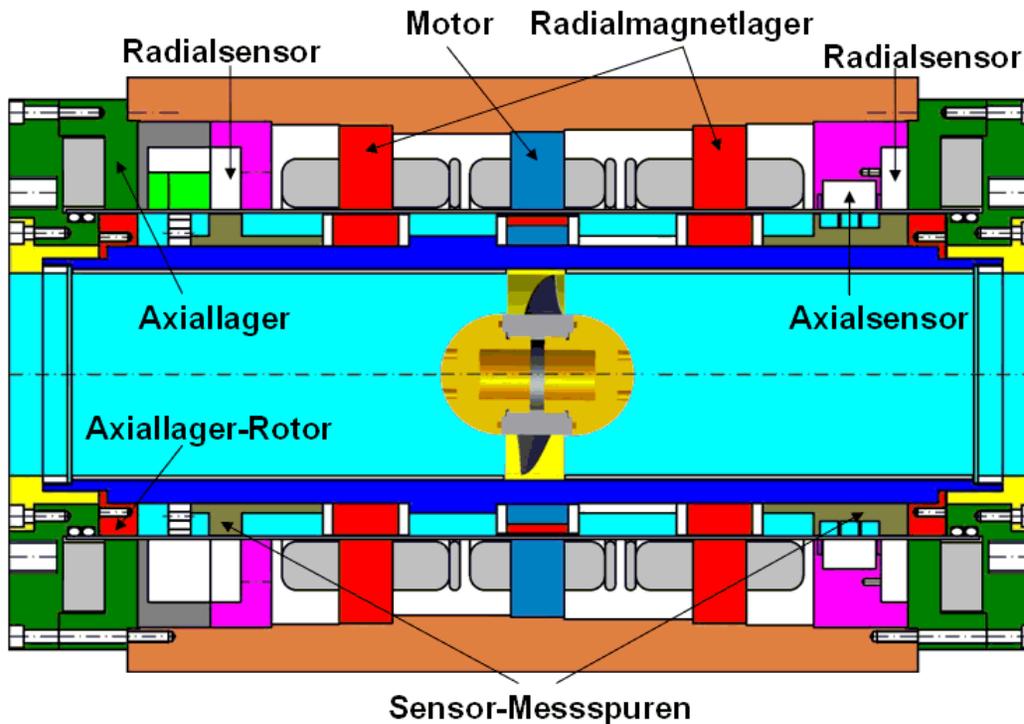
Magnetlagersystem



Magnetlager:

- radial

$$F_{\text{verikal,max}} = 380 \text{ N}$$

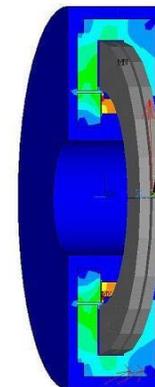


Flussdichte/T

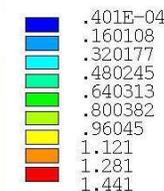


- axial

$$F_{\text{axial,max}} = 1250 \text{ N}$$



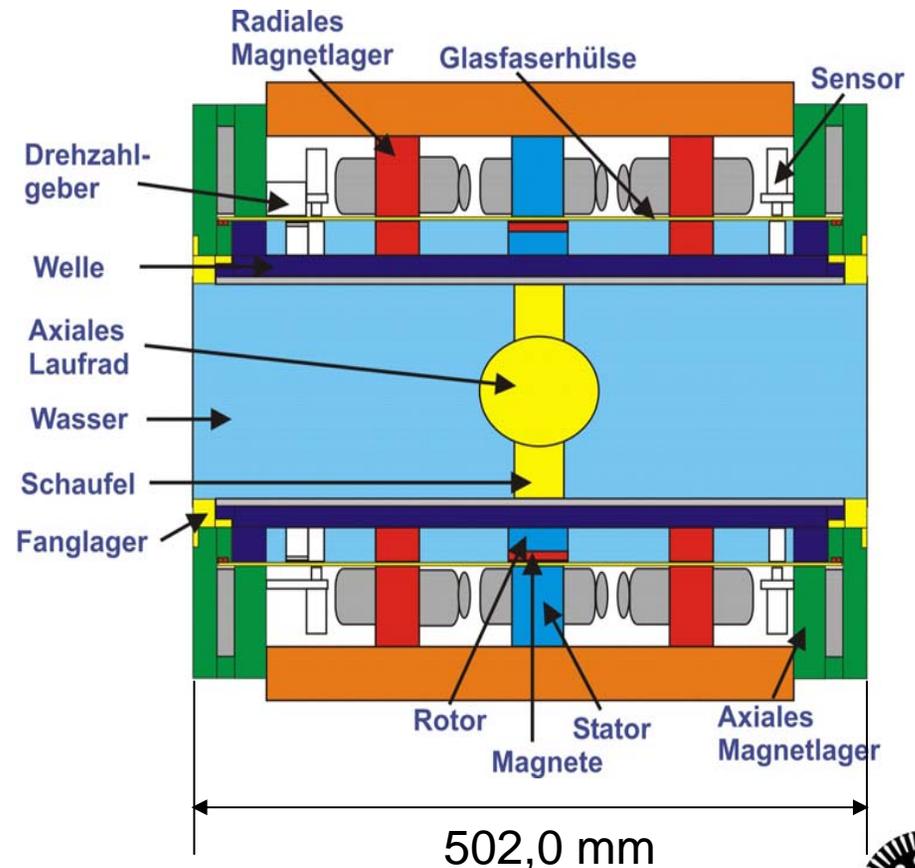
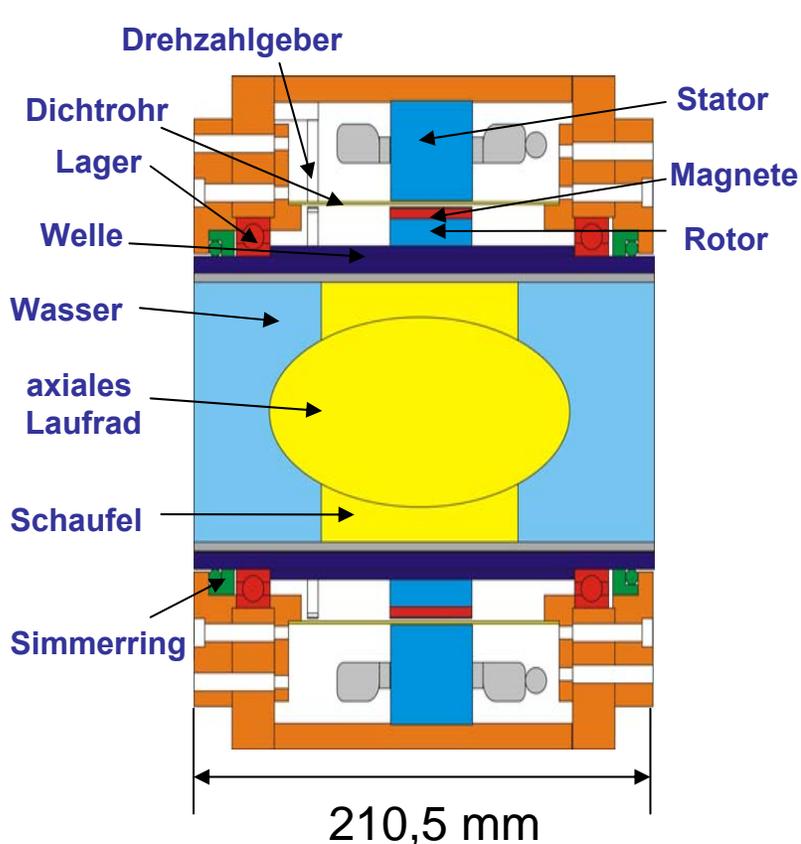
Flussdichte/T



Lagerung: Mechanisch vs. magnetisch



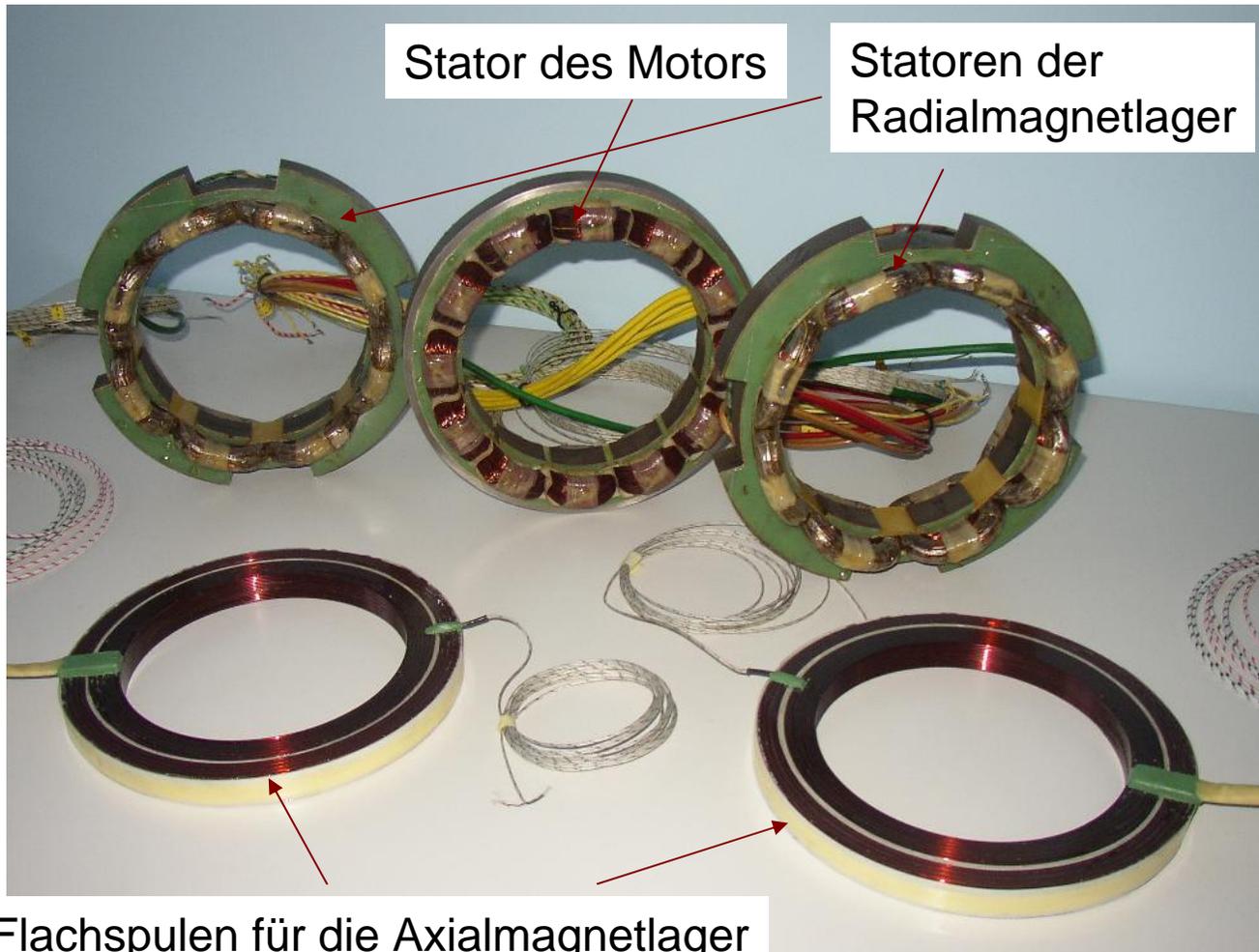
- **Magnetlagerung:** Deutlich länger und teurer, aber: wesentlich kleinere Verluste, keine Dichtprobleme am Simmerring (Auswaschen des Lagerfetts)



Gefertigte Komponenten des integrierten magnetgelagerten Pumpenantriebs



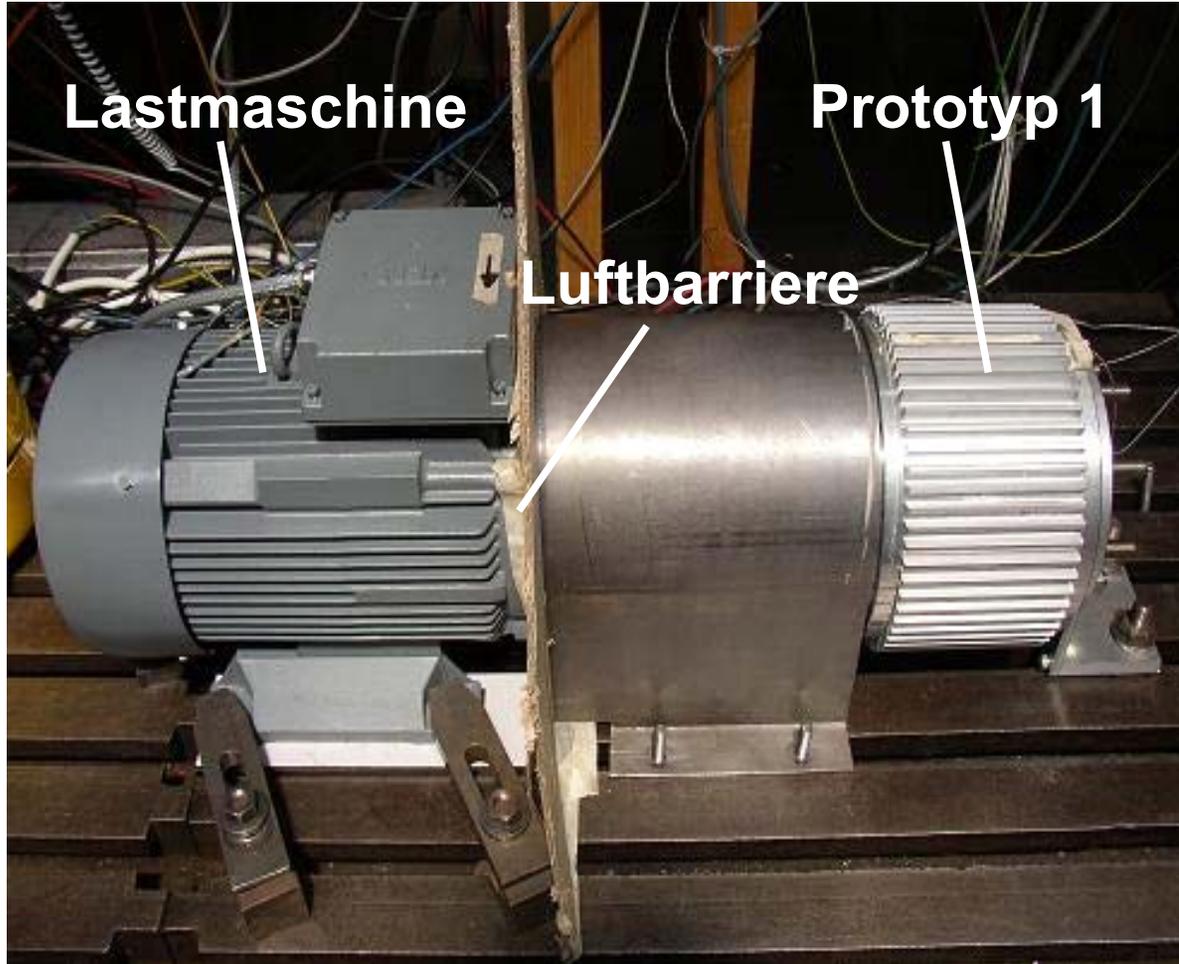
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Test: Motor Prototyp 1 in Luft (ohne Pumpenrotor)



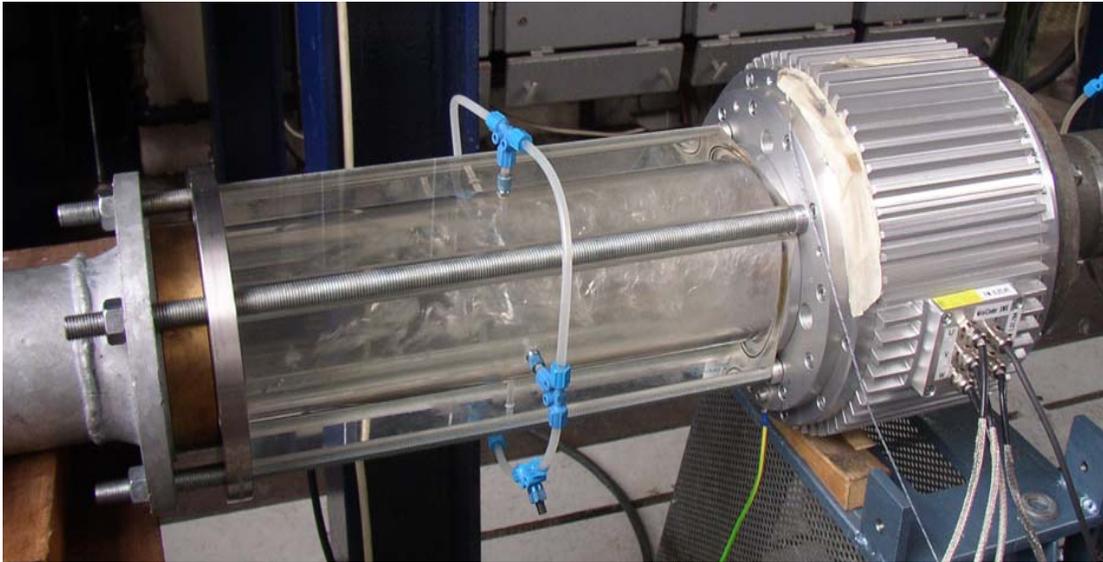
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



- Motor mechanisch gelagert
- Umrichterbetrieb
- drehzahlvariabel
- Verlustmessung
- Erwärmungsmessung
- Tests erfolgreich

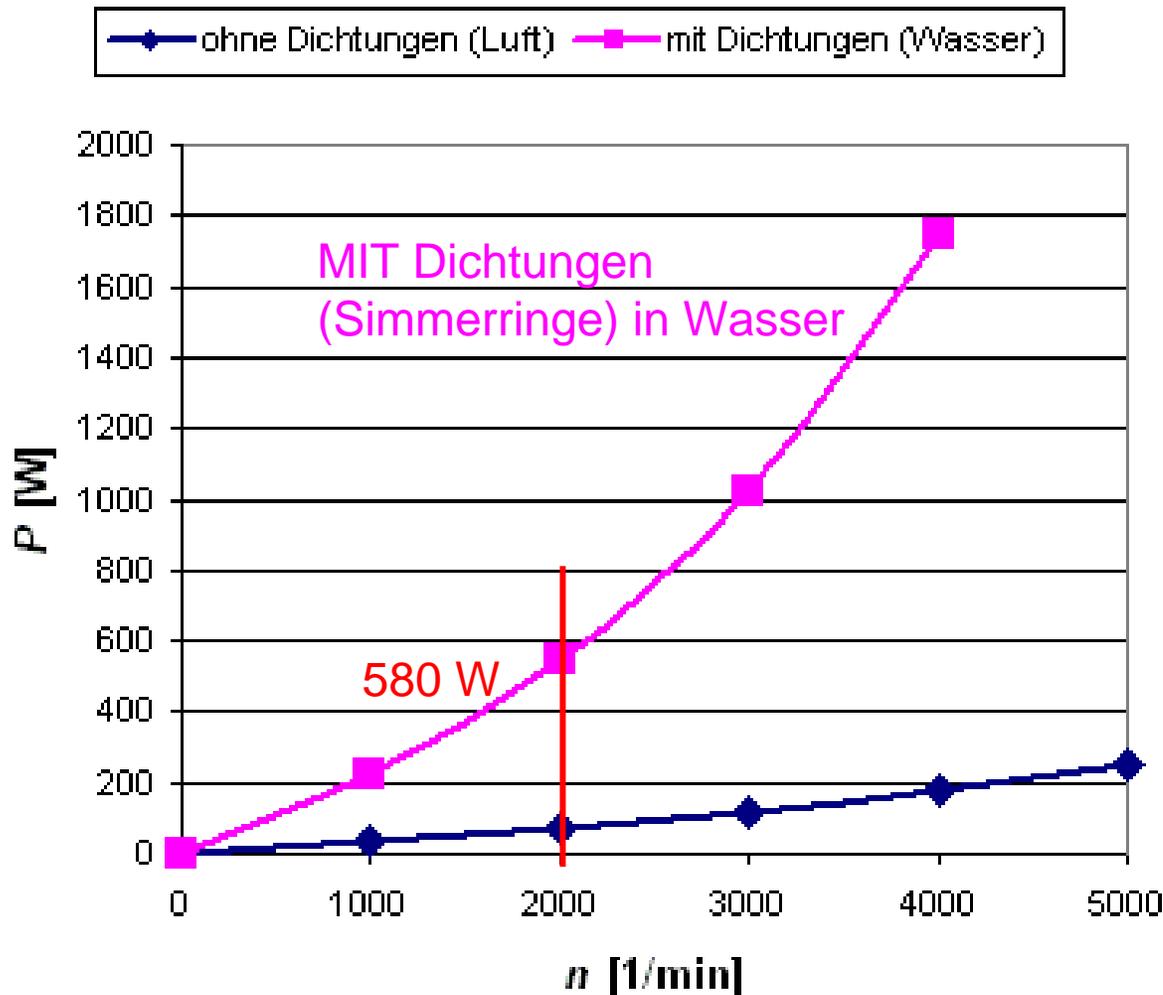


Prototyp 1 : Messung mit Pumpenrad am hydraulischen Prüfstand



- Motor & Pumpe
mechanisch gelagert
- Umrichterbetrieb
- drehzahlvariabel
- Verlustmessung
- Erwärmungsmessung
- sehr hohe Reibungs-
verluste, Lagerfett aus-
gewaschen, Lager
geschädigt (Tausch)

Elektrische Leistungsaufnahme des Motors (Luft vs. Wasser) ohne Pumpenrad



Prototyp 1:

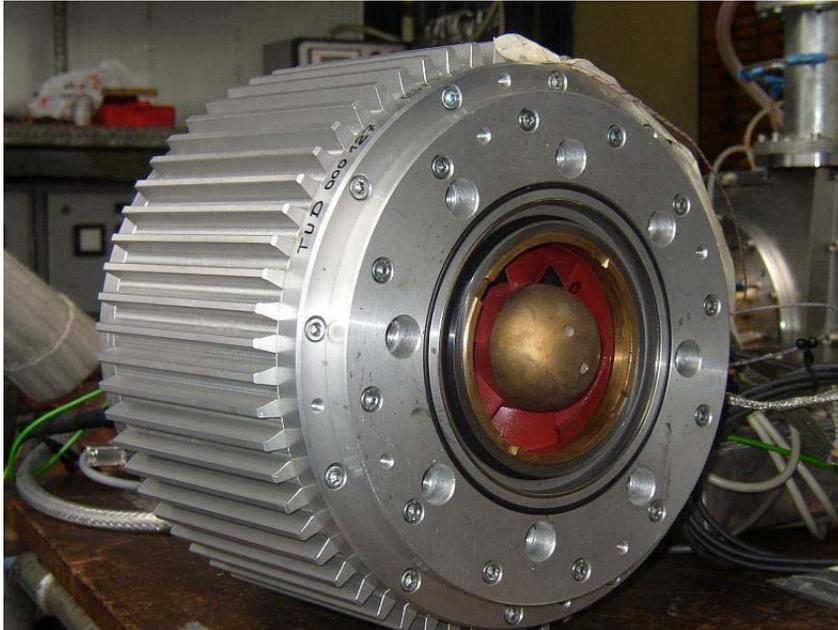
- Mechanische
Lagerung
(am Ende der Mess-
Serie, daher maximale
Reibung)

OHNE Dichtungen
(Simmerringe) in Luft

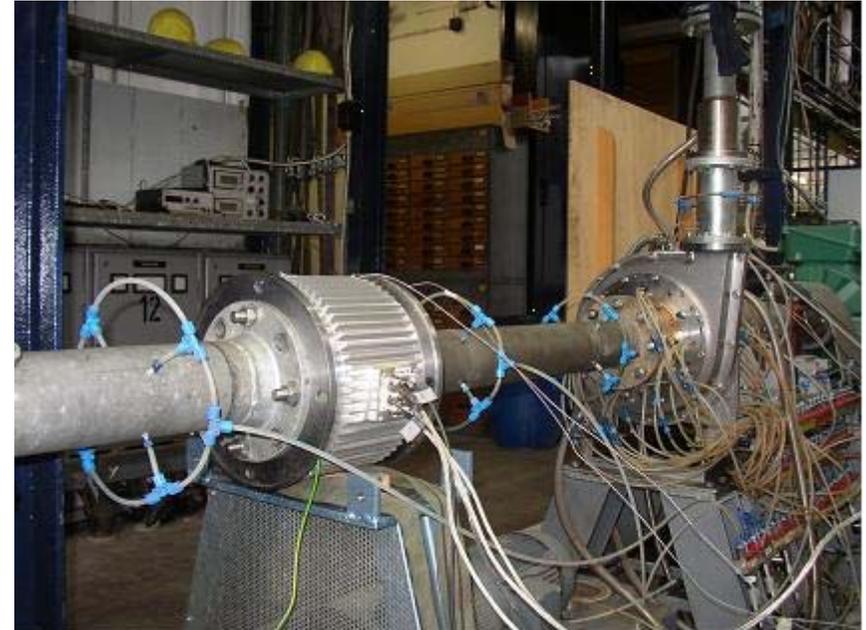
Elektrische Leistungsaufnahme des Motors mit Pumpenrad und mechanischer Lagerung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Integration von Laufrad und Prototyp-Motor 1



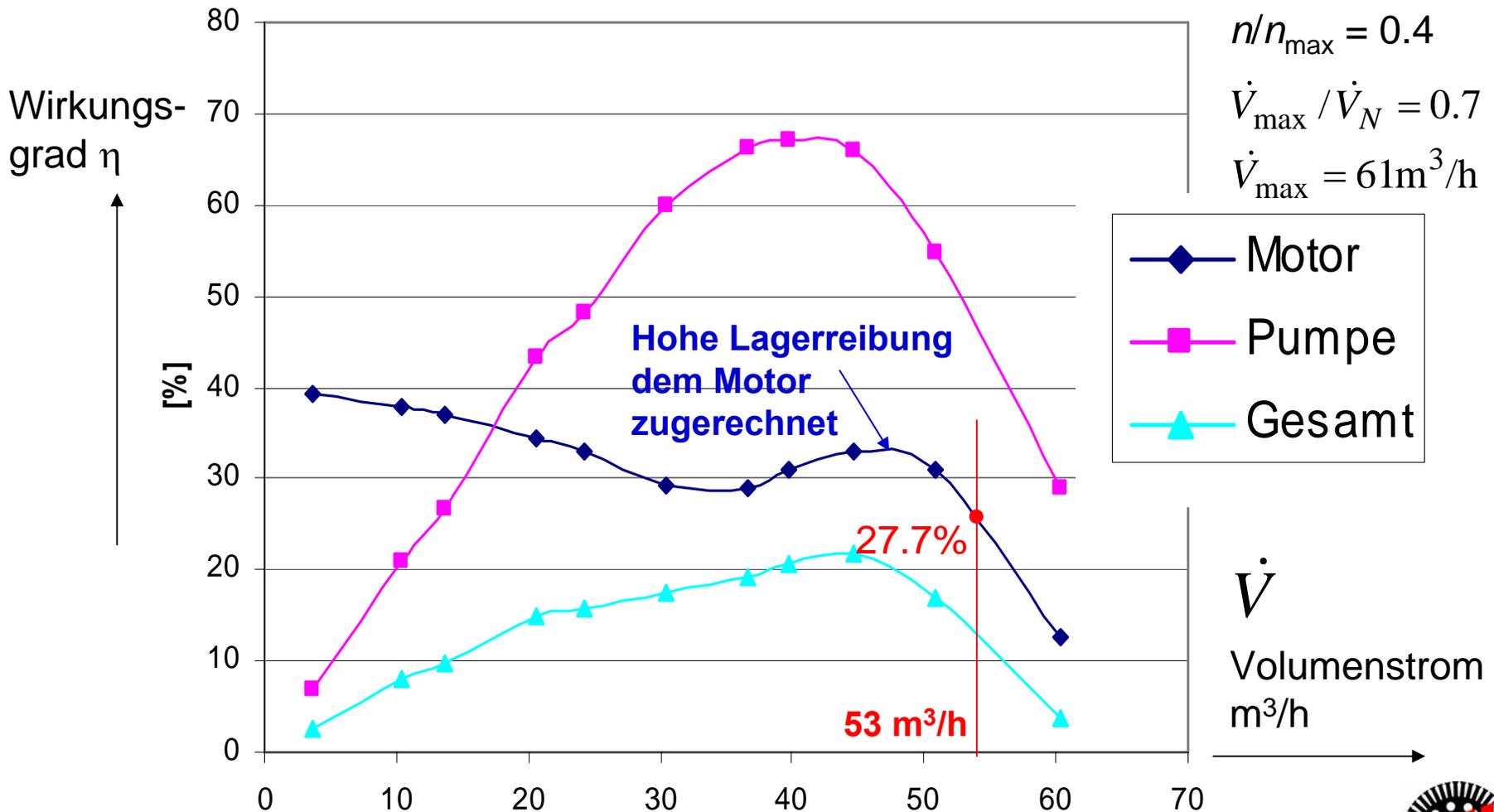
Messung von Antrieb 1 am Pumpenprüfstand:
Vordergrund: Motor + Axialpumpe
Hintergrund: Radialpumpe



Wirkungsgrad-Messung Axialpumpe & Motor 1: Beispiel: Drehzahl $n = 2000/\text{min}$



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Kontrollrechnung Wirkungsgrad

$n = 2000/\text{min}$



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Wellenmoment	$M \sim n^2$	4.3 Nm	1.07 Nm
Drehzahl	n	4000/min	2000/min
Druck	Δp	0.64 bar	0.16 bar
Volumenstrom	V	106 m ³ /h	53 m ³ /h
Inneres Drehmoment	$M_e = (P_{\text{Fe+fr}} + P_m)/(2\pi n)$	8.4 Nm	3.8 Nm
Stromwärmeverluste	$P_{\text{Cu}} = 3R \cdot I^2, M_e = k_T I$	43.4 W	8.9 W
Ummagnetisierungsverluste	$P_{\text{Fe}} \sim n^{1.8}$	280 W	54 W
Reibungsverluste *)	P_{fr}	1450 W	521 W
Motorabgabeleistung	$P_m = 2\pi \cdot n \cdot M$	1801 W	224 W
Summenverluste	$P_d = P_{\text{fr}} + P_{\text{Fe}} + P_{\text{Cu}}$	1773 W	584 W
Motorwirkungsgrad	$\eta = P_m / (P_m + P_d)$	50.4 %	27.7 %

*) zu groß wegen mechan. Lagerung



Zusammenfassung & Ausblick



- Ein **drehzahlveränderbarer Straflo-Direktantrieb** für ein Axialpumpenrad wurde gebaut und erprobt.
- Die **mechanische Lagerung** kann nicht dauerhaft gedichtet werden und stellt nur eine Zwischenlösung dar. Eine nochmalige hydraulische Messung soll erfolgen, da die Reibungsverluste den Wirkungsgrad stark beeinflussen.
- Die Endausbaustufe ist ein **magnetisch schwebender Antrieb**, der zur Zeit mechanisch aufgebaut wird (Fertigstellung in 2 Monaten).
- Eine **drehzahlveränderbare PM-Axialflussmaschine** für einen integrierten Antrieb einer Radialpumpenstufe wurde ausgelegt. Das Auslegungsverfahren wurde an hand eines bestehenden Axialflussmotors (Fa. Johannes Hübner, Giessen) erfolgreich überprüft.
- Der Aufbau und der Test sollen in einem **Folgeprojekt** durchgeführt werden.





Danke für Ihre Aufmerksamkeit !

