



Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.



RSC Engineering GmbH  
Rapid-Technologies, Science & Consulting



## VIRTUAL ENGINE KOLLOQUIUM 2025

# Experimentelle Untersuchung von Bürstendichtungen – Vorstellung des Prüfstands und des Versuchs-Rigs

RTS, RSC und DLR, 21.01.2025

## VORTRAGENDE



**Alexander Bührke**

Konstrukteur  
RENK Test System GmbH



**Tim Richter**

Geschäftsführer  
RSC Engineering GmbH



**Fabian Fuchs**

Gruppenleitung Rotorprüfstände  
DLR, Institut für Test und Simulation  
für Gasturbinen

**01** | Wissenschaftlicher Hintergrund und Anforderungen

**02** | Konzeptübersicht

**03** | Herausforderung Lagereinheit

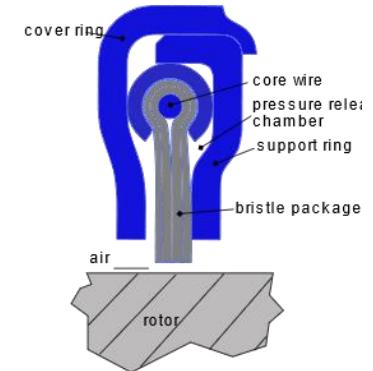
**04** | Vorstellung des Rigs

**05** | Herausforderung bei der Entwicklung

# Warum Bürstendichtungen?

## Aufgabe:

- Begrenzung von Leckagemassenströmen zwischen rotierenden und nicht rotierenden Komponenten
- Stand der Technik
  - Verwendung in Gas- und Dampfturbinen
  - Achsnahe Verwendung in Gasturbinen (z.B. Lagerkammern)
- Vorteile im Vergleich zu Labyrinthdichtungen
  - Kompaktere Bauform bei gleicher oder besserer Dichteefizienz
  - Toleranz gegenüber Kontakt zwischen rotierenden und nichtrotierenden Komponenten
- Ausblick
  - Nutzen der Bürstendichtungen im erweiterten Betriebsbereich (hohe Temperaturen, hohe Differenzgeschwindigkeiten), z.B. Spalte entlang des Hauptgaspfads
- Herausforderungen
  - Komplexes Betriebsverhalten; z.B. Hang-Up, Blow Down,...

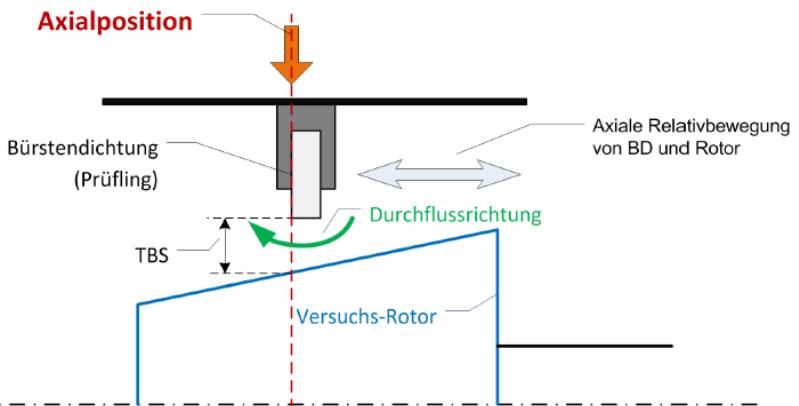


Schematischer Aufbau nach Ursprung, Moritz

# Anforderungen an die Versuche

## Was wollen wir bestimmen?

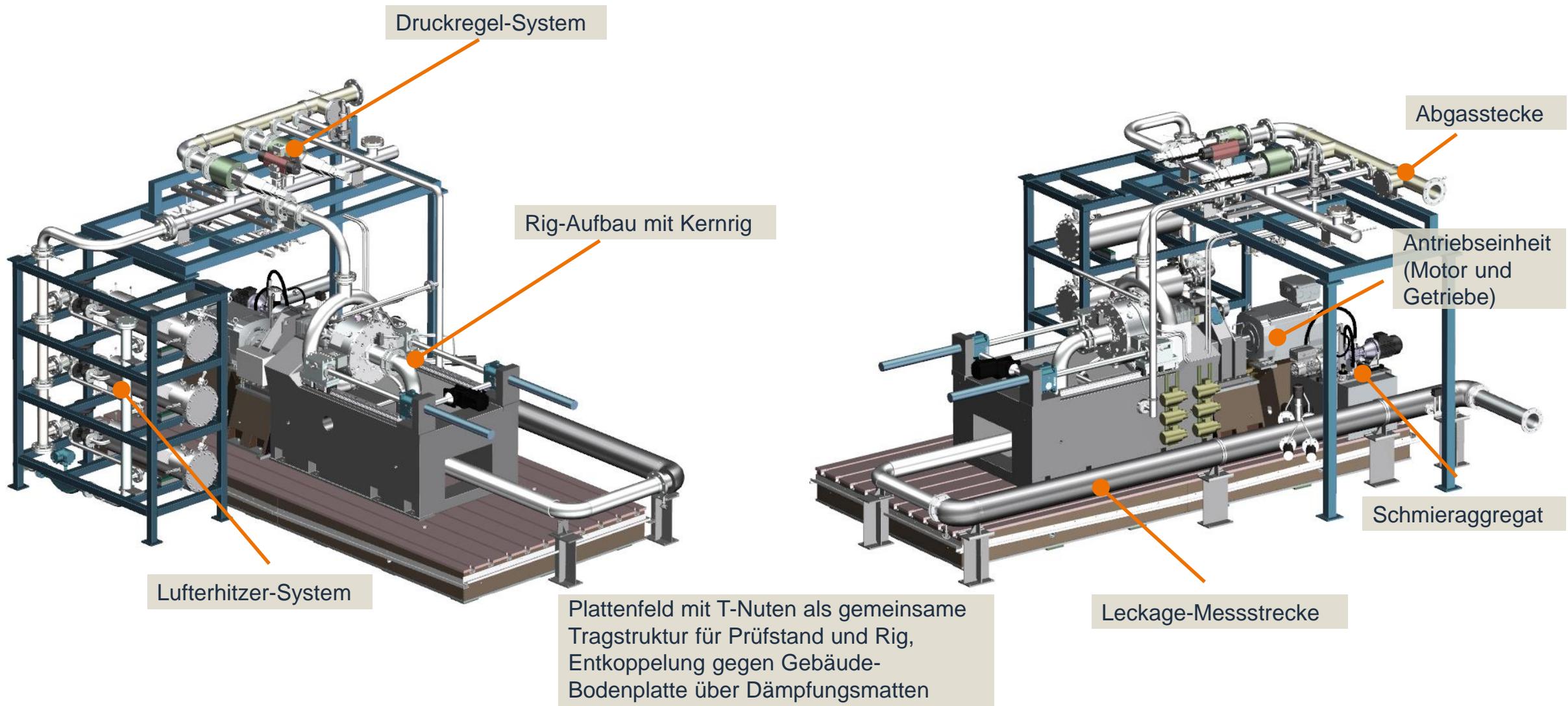
- Dichteefizienz: Einflussparameter auf den Leckagemassenstrom
- Verschleiß: Wie verhält sich Bürste und Rotor im Kontaktfall? Materialauf- oder Abtrag
- Wärmeeintrag: Wärmeströme während des Reibkontakts, z. B. relevant für Wandstärken der Bauteile



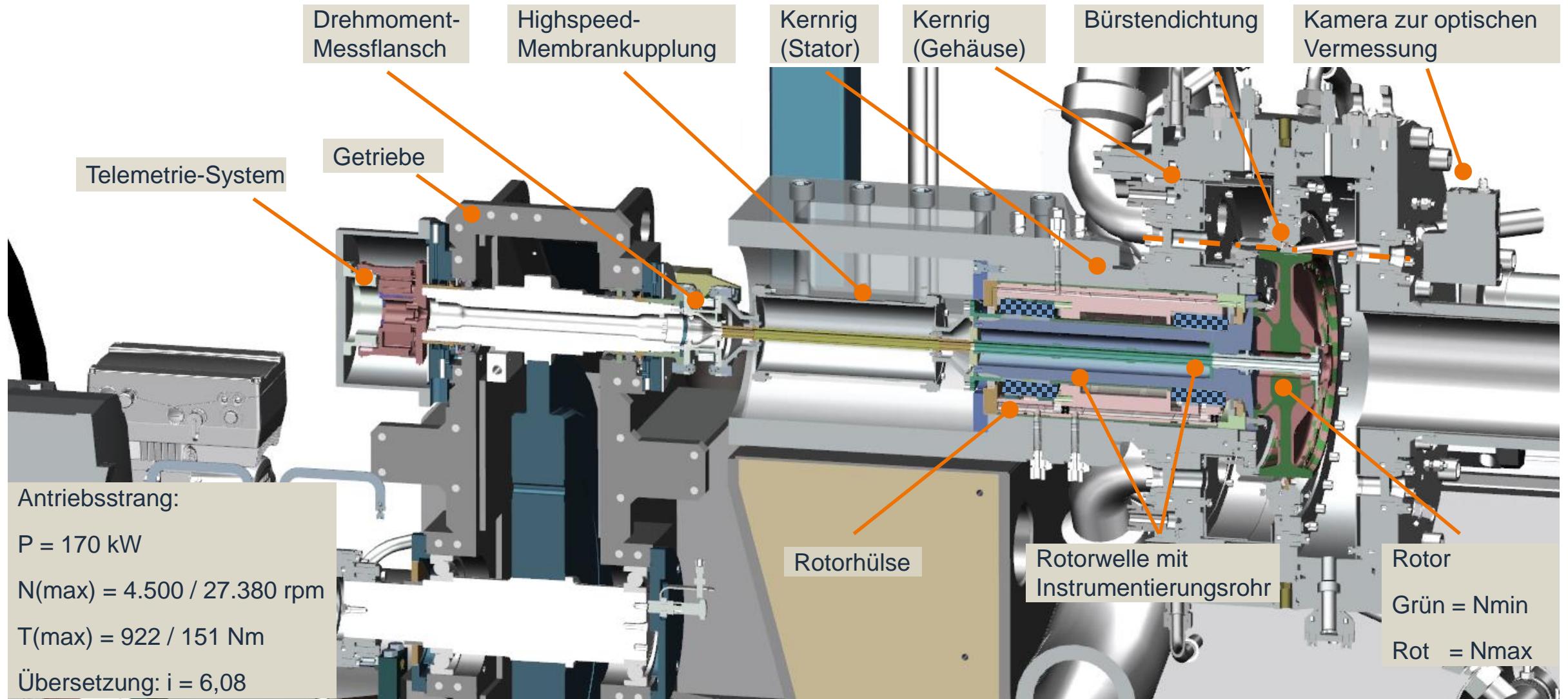
## Versuchsanforderungen:

- Einsatznahe Randbedingungen
  - Temperatur des Luftmassenstrom bis 400 °C
  - Umfangsgeschwindigkeiten bis ca. 400 m/s
  - Konstante Druckdifferenz über die Dichtung bis ca. 4 bar
  - Ergibt max. ca. 0,7-0,8 kg/s Luftmassenstrom (abhängig vom Dichtspalt)
- Einstellbare Betriebsbedingungen
  - Betriebsspalt (positiv / negativ)
- Messtechnik
  - Betriebsspalt
  - Leckagemassenstrom
  - Messung der Temperaturverteilung in den Bauteilen

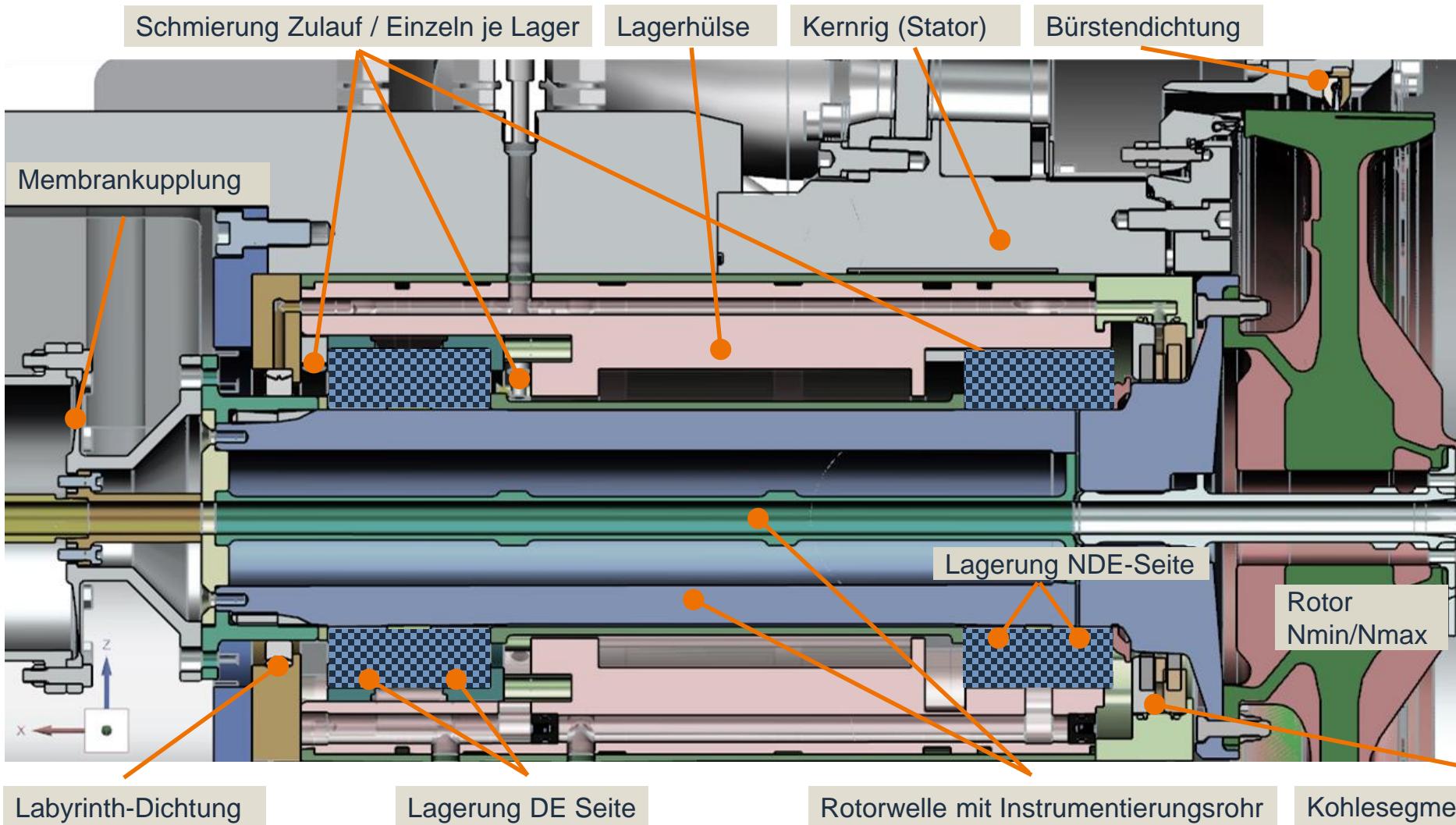
# Prüfstand



# Wellenstrang



# Rotorhülse Übersicht



## Anforderungen:

- Aufnahme verschiedener Rotoren mit unterschiedlich überhängender Masse und Umfangsgeschwindigkeiten
- Hohe Präzision der Lagerung für optische Vermessung der Rotor-Dichtungsschnittstelle
- Aufnahme Kabelstrang von rotierenden Messstellen

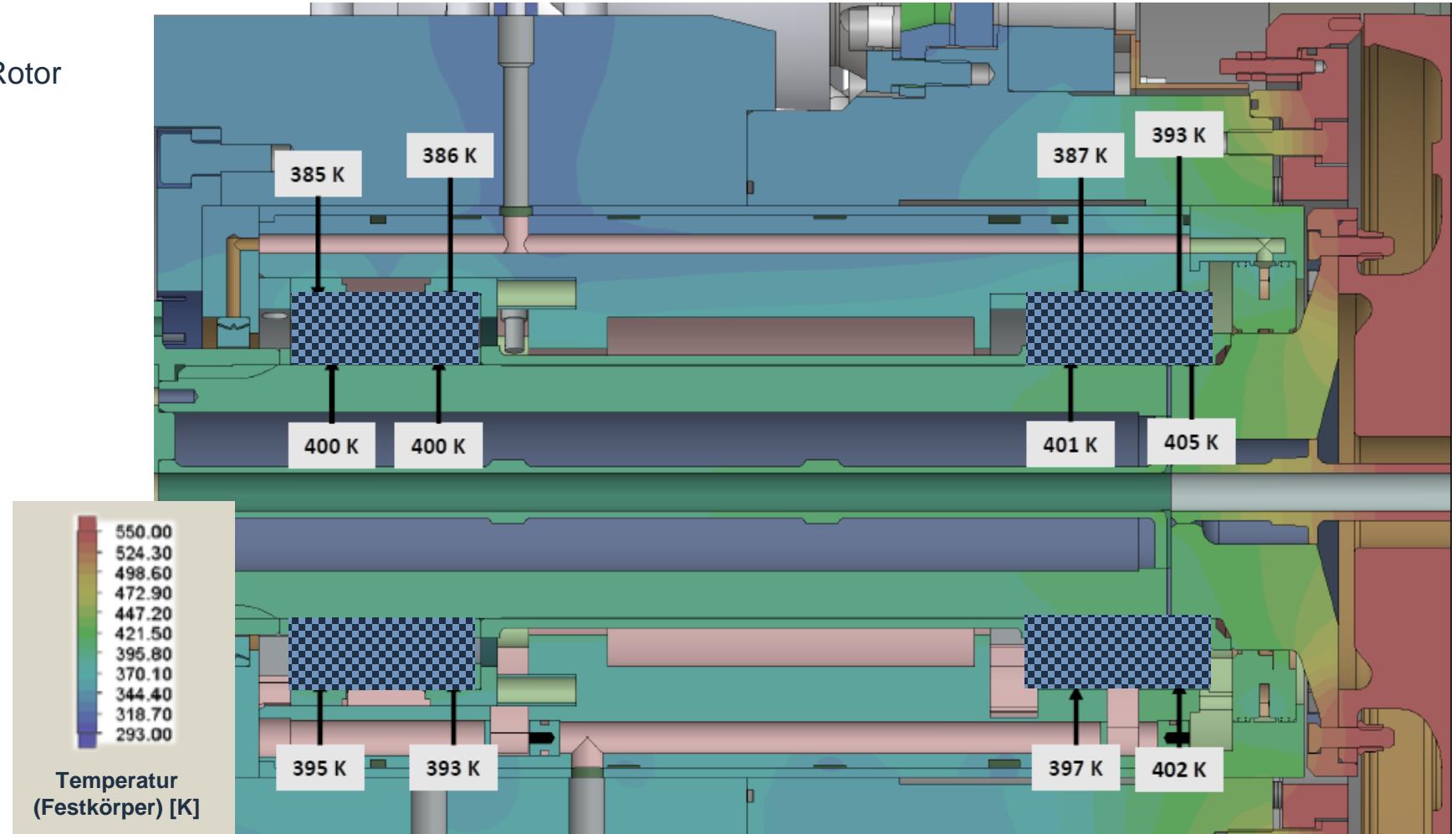
## Herausforderungen:

- Durch festgelegter Dichtungsdurchmesse begrenzter radialer Bauraum
- Direkte Ankoppelung heißer Druckraum
- Abdichtung von Maschinengehäuse und Druckraum
- Medienversorgung von Schmieröl, Kühlwasser und Druckluft

# Lagerung

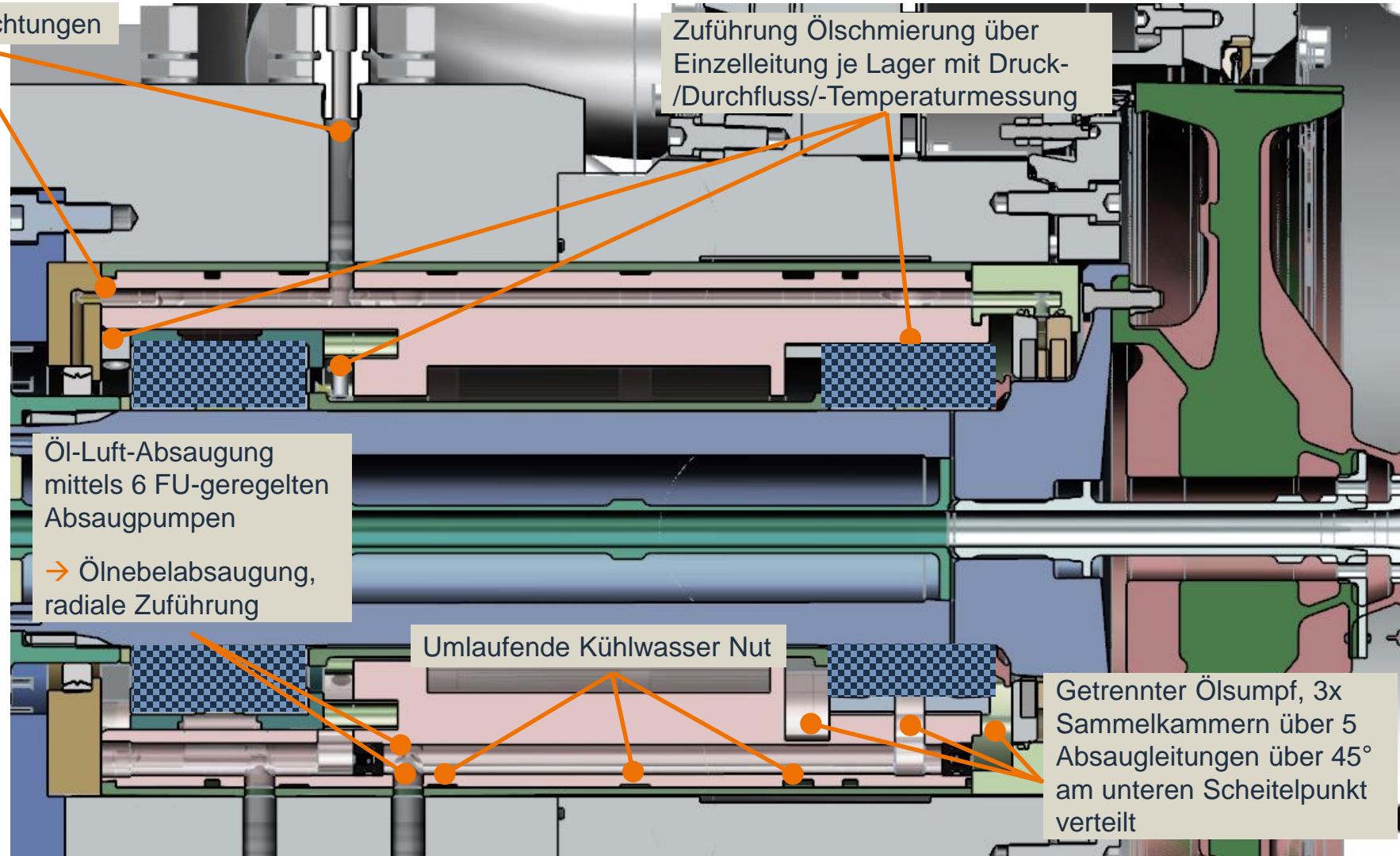
## Auszug aus Thermalrechnung

- Herausforderungen Lagerung
  - Temperurniveau durch heißen Rotor
  - Schmierung (Druckölschmierung)
  - Thermalhaushalt (Ölabsaugung)
  - Rotordynamik (Steifigkeiten)
  - Axialkräfte durch Achsschub
  - Unterkritischer Betrieb



# Rotorhülse Konditionierung

- Gelenkte Druckölschmierung der Lager auf Grund des Temperaturniveaus Lagerkammer nötig
- Ölversorgung pro Lager individuell einstellbar in Schmiermenge; Öldruck und Temperatur über Sammelleitung
- Schmiermenge wird iterativ während der Inbetriebnahme final bestimmt auf Basis der Lager-temperatur (Startwert über CFD-Rechnung) – Einzelüberwachung der Lager durch Temperatur-überwachung der Lageraußenringe und des rotornahen Lagerinnenrings
- Aktive Ölabsaugung zur Verhinderung von Anstauungen warmen Öls

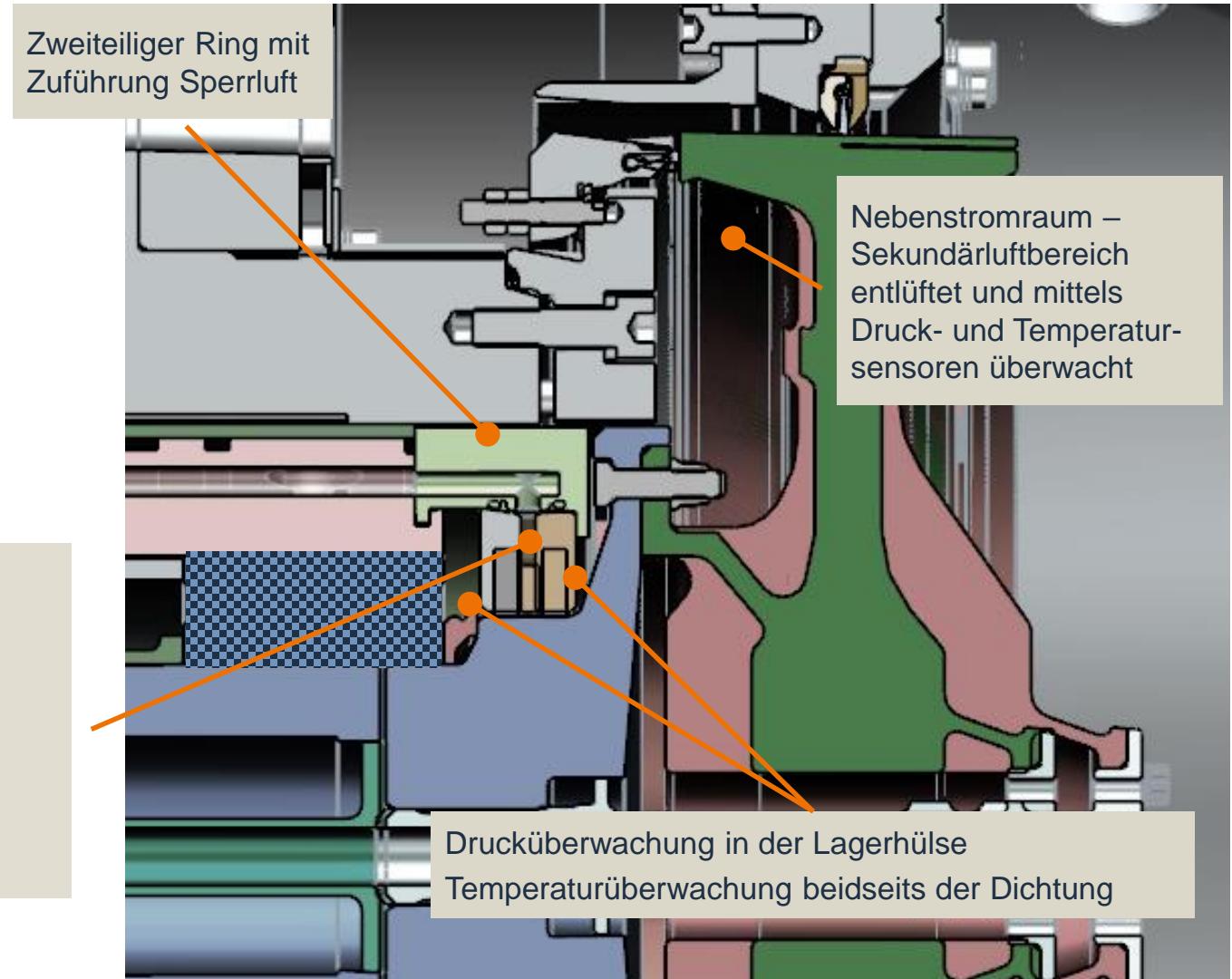


# Abdichtung zum Rotor

- Kritische Bedingungen
  - Ölschmierung darf nicht in Kontakt mit heißem Rotor (bis zu 400°C) kommen
  - Heiße Nebenstromgase (ca. 200°C) dürfen nicht ins Maschinengehäuse und an die Lagerung kommen
  - Verwendung einer Sperrluft gestützten Abdichtung
  - Überwachung beidseitig an Dichtung
  - Kein zusätzlicher Überhang wg. Rotordynamik

## Auswahl einer mehrteiligen Kohlesegment-Dichtung

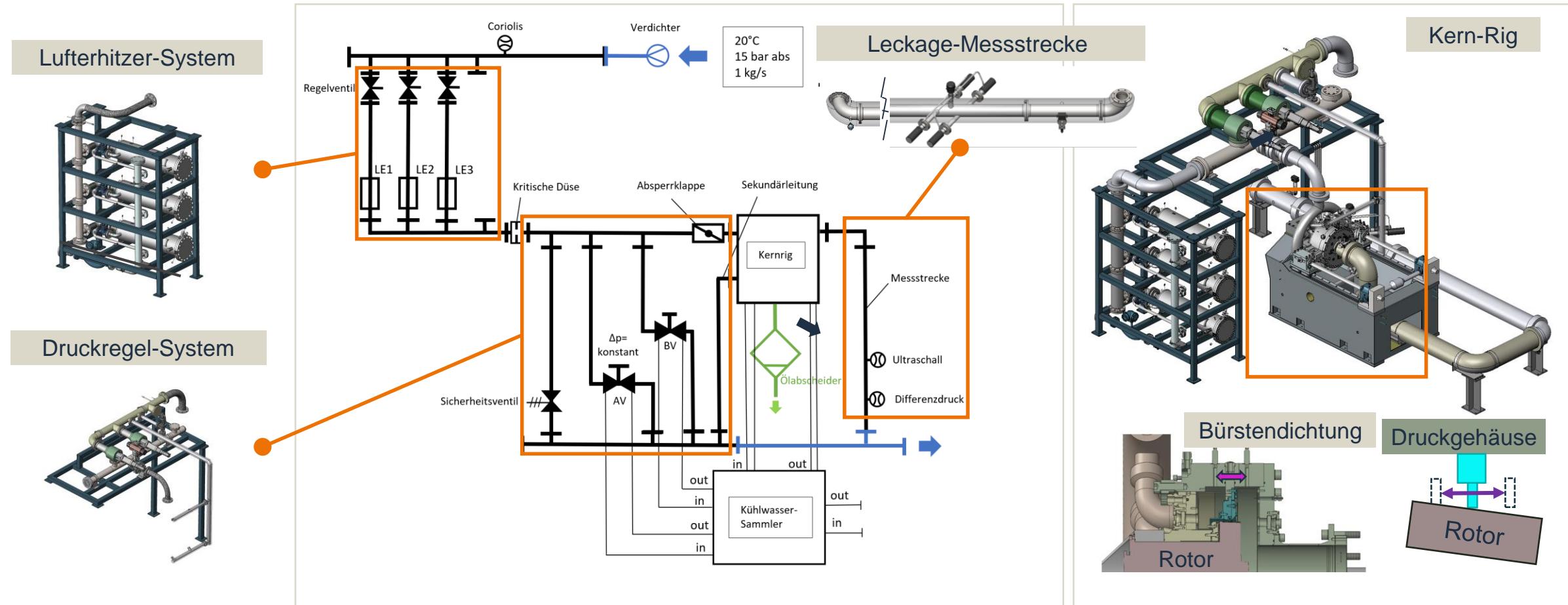
- Geteilter Kohlesegmentring
- Zentrale Sperrluftführung
- Einsetzbar für Umfangsgeschwindigkeiten bis 200 m/s ( $\varnothing 100 \rightarrow u_{max} = 141$  m/s)
- Auslegung auf max. 250°C Nebenstromgas
- Höhe Sperrluftdruck größer als umgebender Druck



# Übersicht der Komponenten

Die vom Verdichter bereitgestellte Druckluft wird im **Luftheritzer-System** auf die gewünschte Versuchstemperatur erhitzt.

Im **Druckregel-System** wird der gewünschte Betriebsdruck vor der Bürstdichtung eingestellt. Im **Kern-Rig** kann der Spalt zum drehenden Rotor eingestellt und variiert werden. Der sich ergebende Leckage-Massenstrom der Dichtung wird in der **Leckage-Messstrecke** gemessen.



# Luftheritzer-System

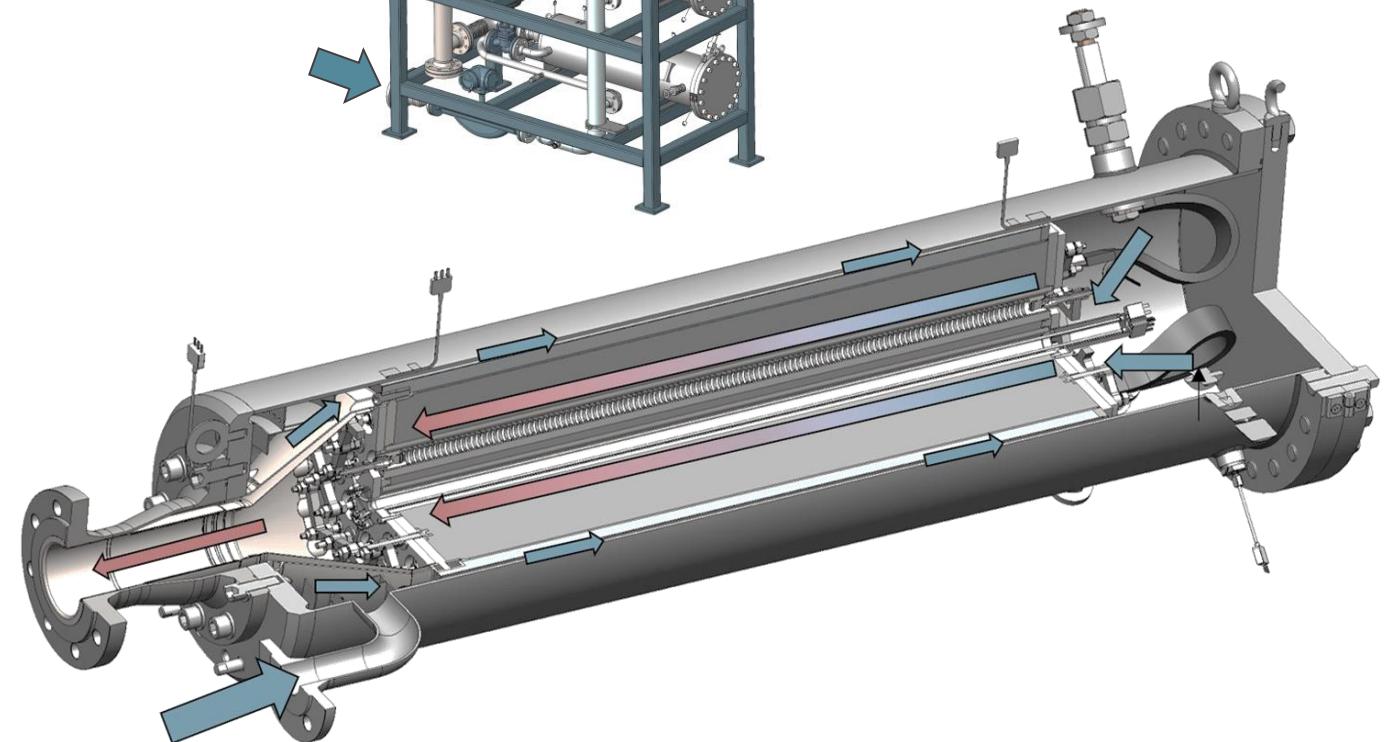
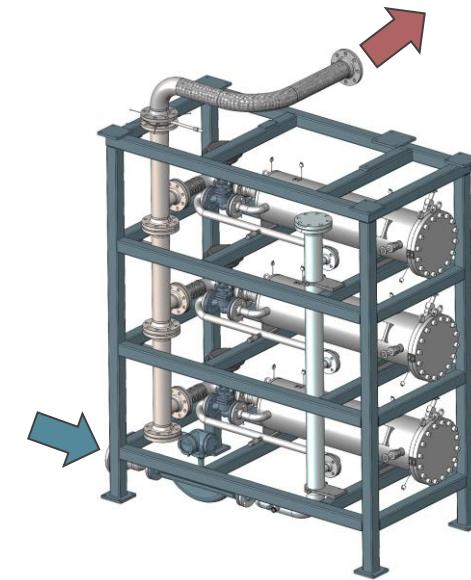
## ■ Funktion

Das Luftheritzer-System besteht aus drei 180 kW Luftheritzern die einzeln oder zusammen betrieben werden können. Hierdurch ist ein großes Betriebsspektrum abbildbar.

Kalte Druckluft strömt im vorderen Bereich in das Druckgehäuse ein. Sie strömt entlang der Patrone (Gegenstrom) zum hinteren Bereich des Luftheritzers. Von dort strömt sie entlang der Heizwendel (18 Stück) zurück und wird aufgeheizt.

## ■ Herausforderung

Eine besondere Herausforderung des Luftheritzer-Systems ist die Abdeckung eines großen Massenstrom-, des Druck- und der Temperaturbereichs. Dies konnte mit marktüblichen Komponenten nicht erreicht werden. Daher wurde speziell für den Prüfstand von RSC ein neues Produkt entwickelt.



## Leistungsdaten:

- 3 x 180 kW Heizleistung
- 4 - 16 bar Betriebsdruck
- 0,06 – 1,2 kg/s Luft
- 50°C – 500°C

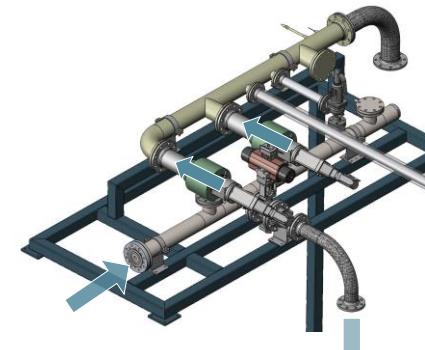
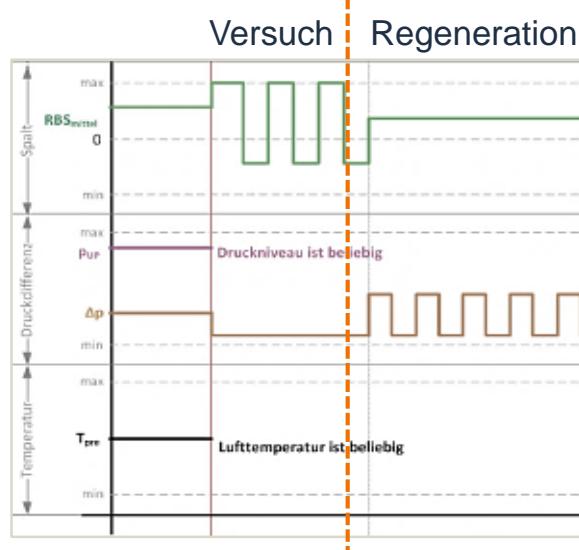
# Druckregel-System

## ■ Funktion

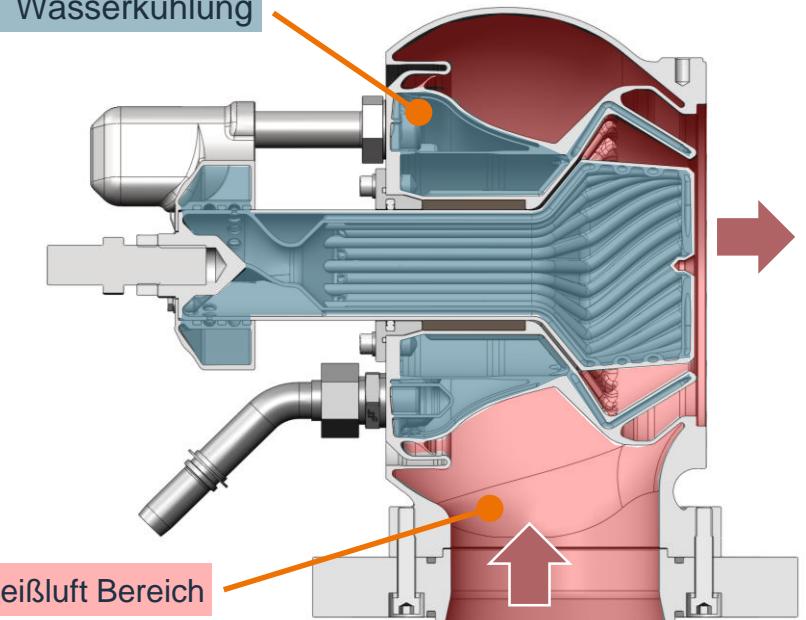
Je nach Betriebsmodus regelt das System entweder den Vordruck vor der Bürstendichtung und hält ihn konstant – auch bei variierendem Querschnitt –, oder es erzeugt Druckstöße zur Regeneration der Bürstendichtung. In den beiden elektrisch angetriebene Ventile wird jeweils ein Regelkolben verschoben, der den engsten Querschnitt einstellt. Dank eines langen Hub-Wegs lässt sich ein großer Querschnittsbereich sehr präzise einstellen.

## ■ Herausforderung

- hohe Einstellgeschwindigkeit
- hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit, unabhängig von Temperatureinflüssen,
- hohe Wiederholgenauigkeit



Wasserkühlung



**Leistungsdaten:**  
 → 1 – 9 bar Betriebsdruck  
 → 0,06 – 1,2 kg/s Luft  
 → 10°C – 450°C

# Kern-Rig

## ■ Funktion

Das Druckgehäuse besteht aus einem statischen Teil (gelb) und einem traversierbaren Teil (grün).

Der Rotor hat eine konische Umfangsfläche.

Durch Verschieben des traversierbaren Gehäuseteils verschiebt sich die axiale Position der Bürstendichtung im Bezug zum Rotor.

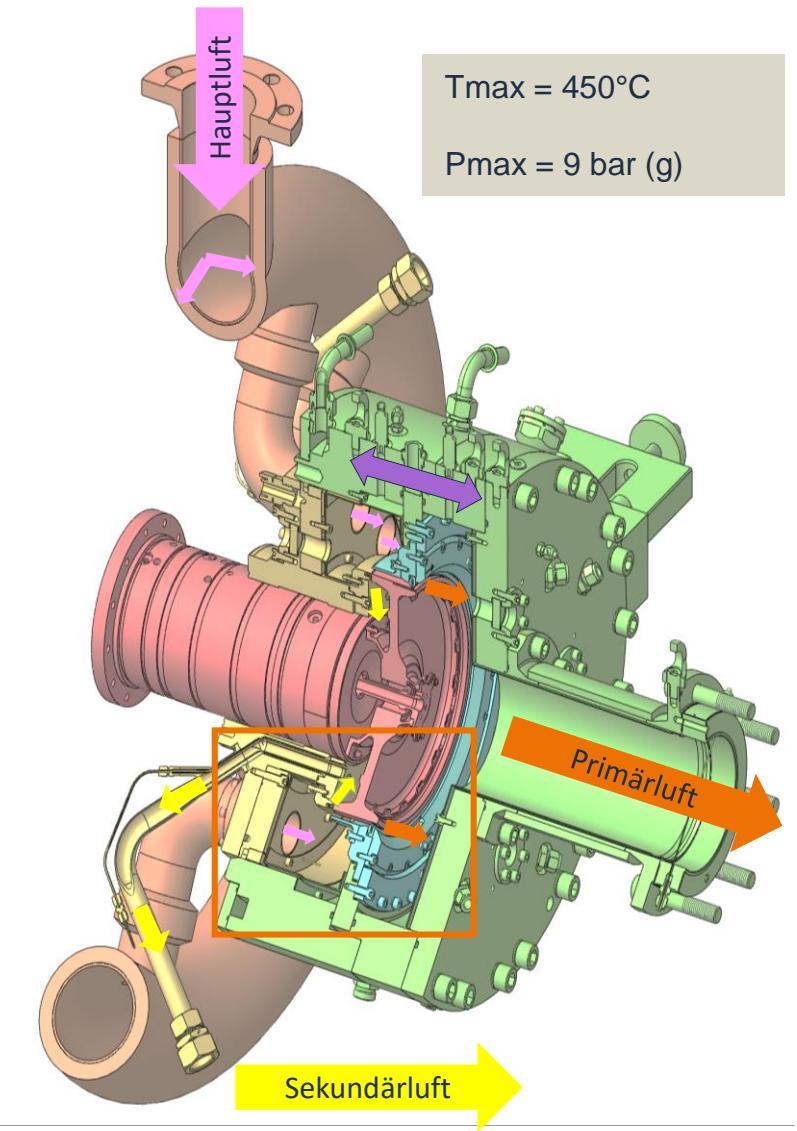
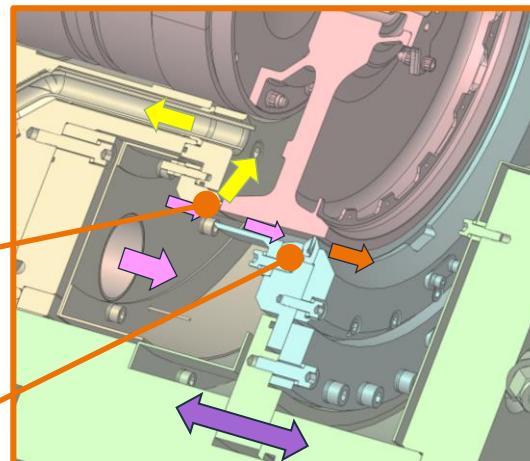
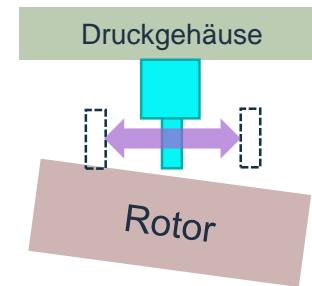
Somit lässt sich während des Betriebs der Spalt zwischen Rotor und Dichtung variieren.

Durch Verstellschrauben lässt sich vor Versuchsbeginn gezielt eine Exzentrizität einstellen.

Hierdurch können auch unsymmetrische Anstreifvorgänge untersucht werden.

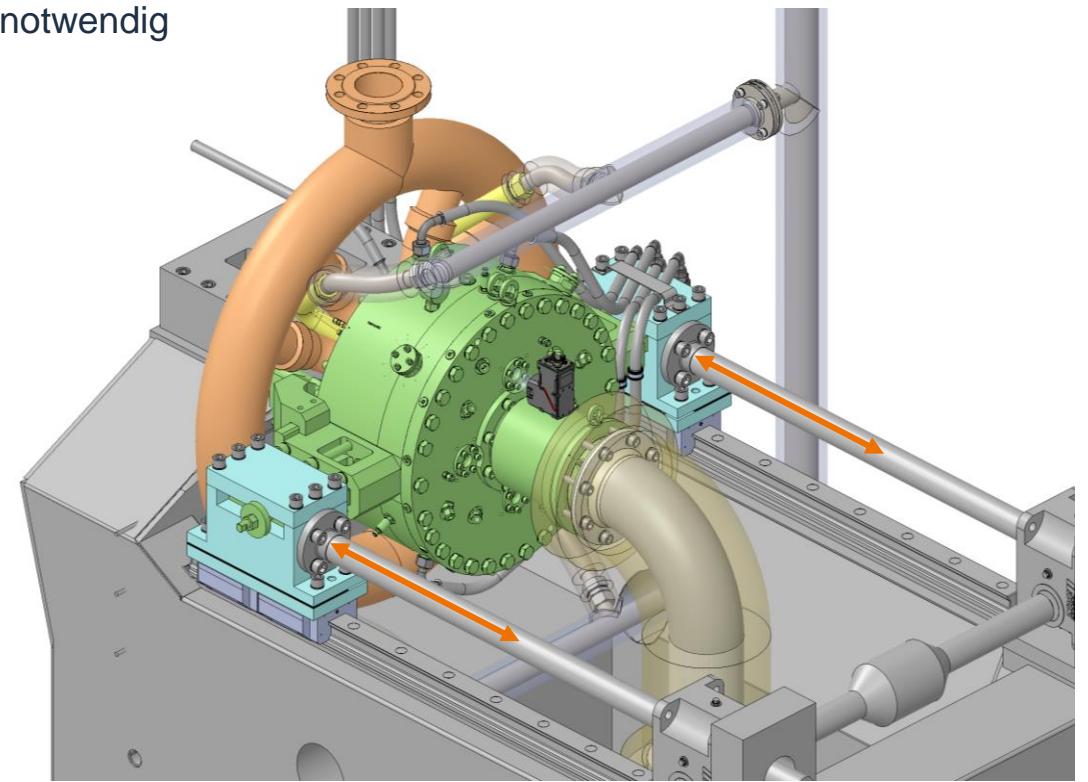
Sekundärdichtung

Versuchsträger  
(Bürstendichtung)



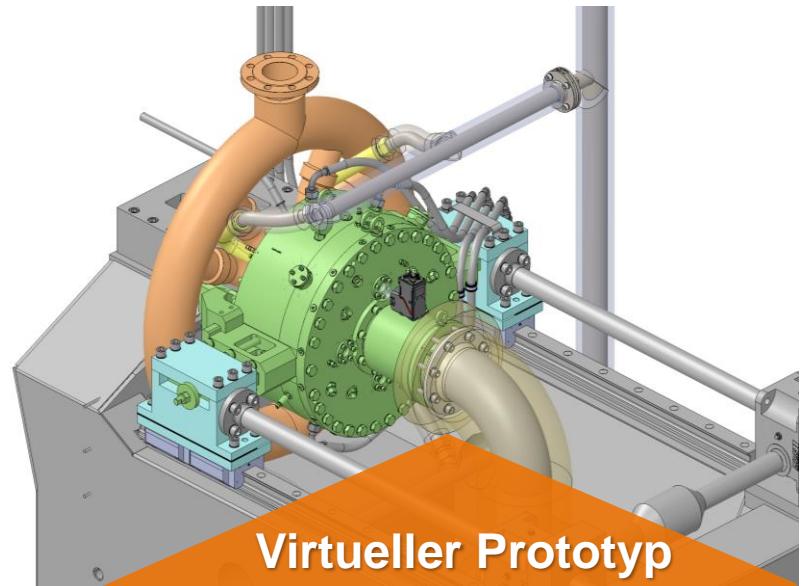
# Kern-Rig

- Sicherheit
  - Druckgerät nach DGRL
  - Maschine nach Maschinenrichtlinie
  - hohe Temperaturen (450°C)
  - Berstschutz
- Technik
  - hohe Präzision trotz hoher Temperaturen und schwankendem Druck
  - optische Zugänglichkeit
- Handling
  - kurze Rüstzeiten
  - hohe Flexibilität für zukünftige Anwendungen
  - enger Bauraum
- Wirtschaftlichkeit
  - geringe Stückzahlen
  - teure Materialien und Herstellungsprozesse
  - diverse Lieferanten mit jeweiligen Spezialisierungen notwendig



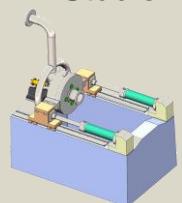
# Kern-Rig Entwicklungsprozess

- Maßnahmen, um komplexen Herausforderungen Gerecht zu werden
  - enge Projektpartnerübergreifende Zusammenarbeit
  - konsequenter Einsatz virtueller Validation
  - detailreicher virtueller Prototyp

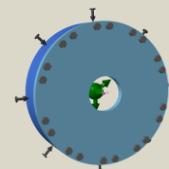


Virtueller Prototyp

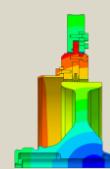
- CAD-Studie



- FE-Vorauslegung



- FE-Vorauslegung



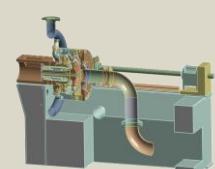
- FEM-Teilmodelle



- FEM-Impaktrechnung



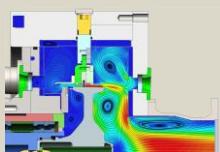
- FEM-Gesamtmodell



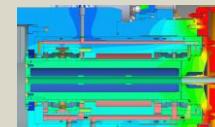
- Excel Vorauslegung



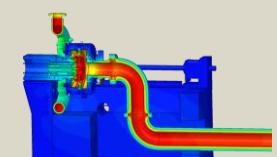
- CFD-Vorauslegung



- CFD-Teilmodelle



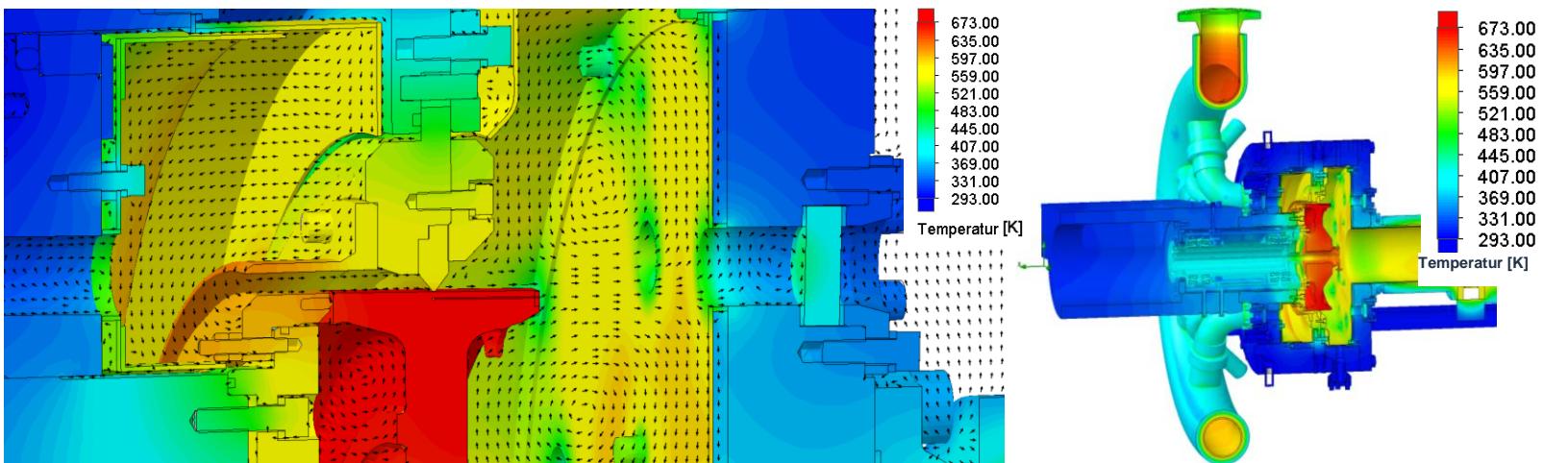
- CFD-Gesamtmodell



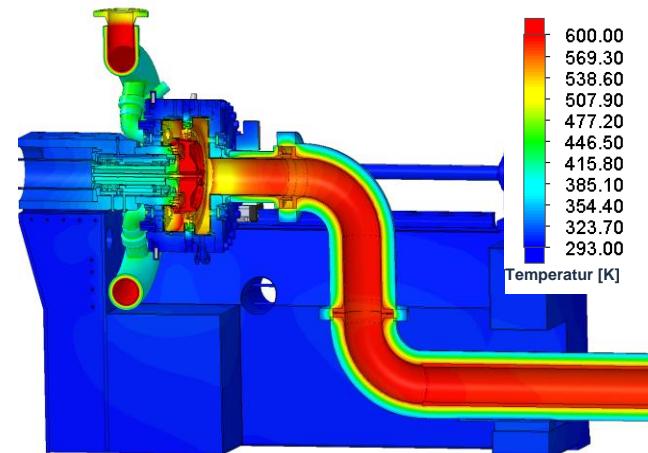
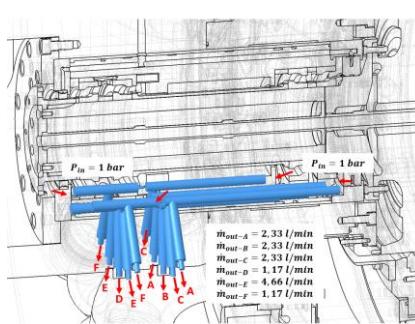
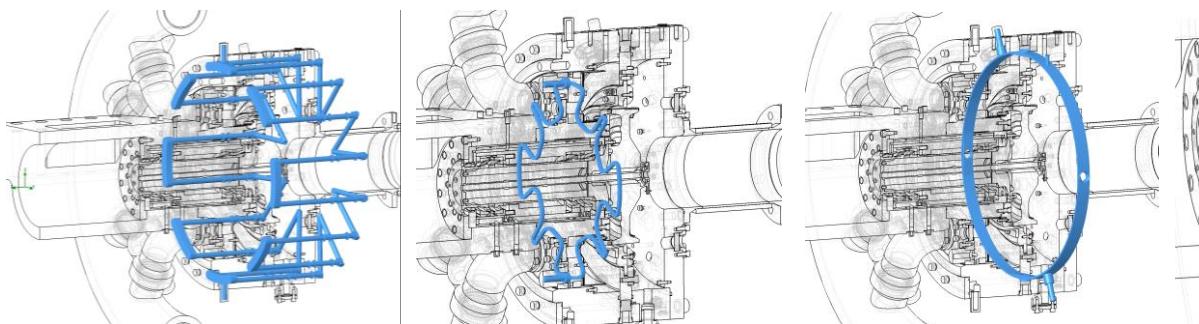
# Kern-Rig

## Detailgrad der CFD-Analyse

- Ziele
  - Strömungsfeld vor der Bürstendichtung
  - Temperaturverteilung der Bauteile für Verschiebung und Festigkeitsanalyse
  - Auslegung und Optimierung der Kühlung



> 10 verschieden Luft-, Wasser- und Ölkreisläufe

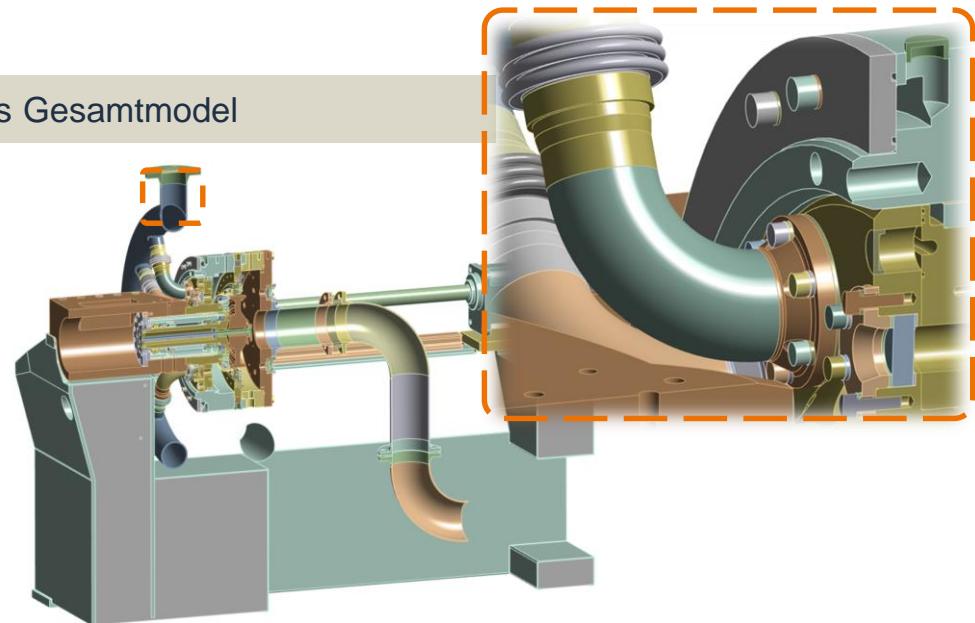


# Kern-Rig

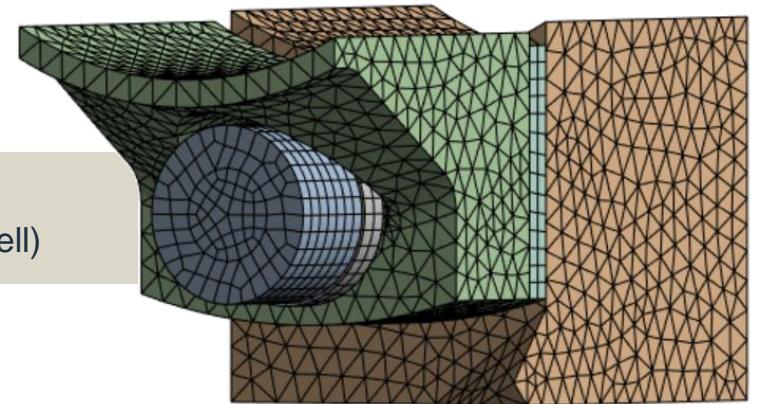
## Detailgrad der FEM-Analyse

- Dank moderner Simulationssoftware und Hardware ist eine Analyse basierend auf sehr detailreichen virtuellen Modellen möglich
- Berücksichtigt sind beispielsweise:
  - > 10 verschiedene Materialien
  - nichtlineares, temperaturabhängiges Materialverhalten
  - Temperaturverteilung aus CFD-Analyse
  - Schraubenverbindungen incl. Vorspannkräfte
  - > 1000 Kontakte (linear und nichtlinear)
  - > 8 Millionen Konten im Modell:  
Die Software ermöglicht es Teilmodelle basierend auf dem Gesamtmodell zu erstellen und somit Detailanalysen z.B. der Schrauben durchzuführen.

umfangreiches Gesamtmodell

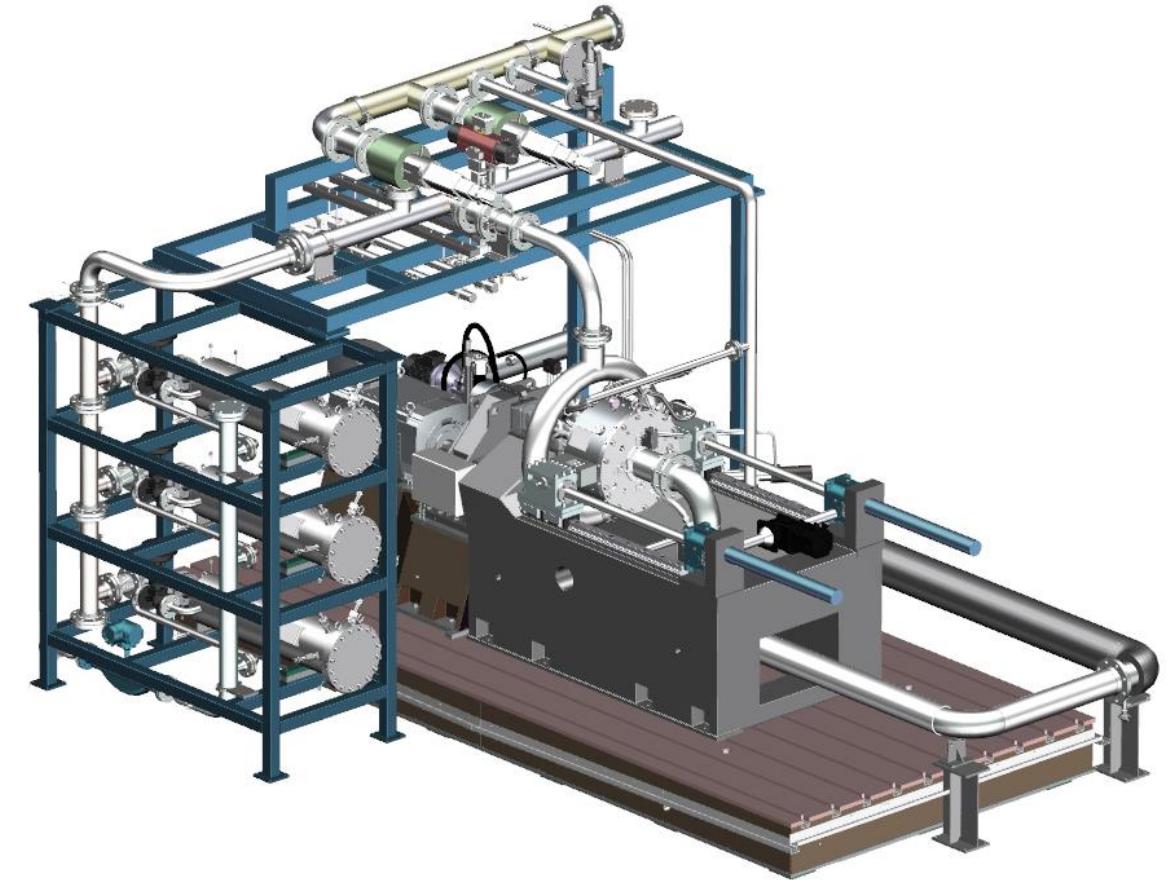
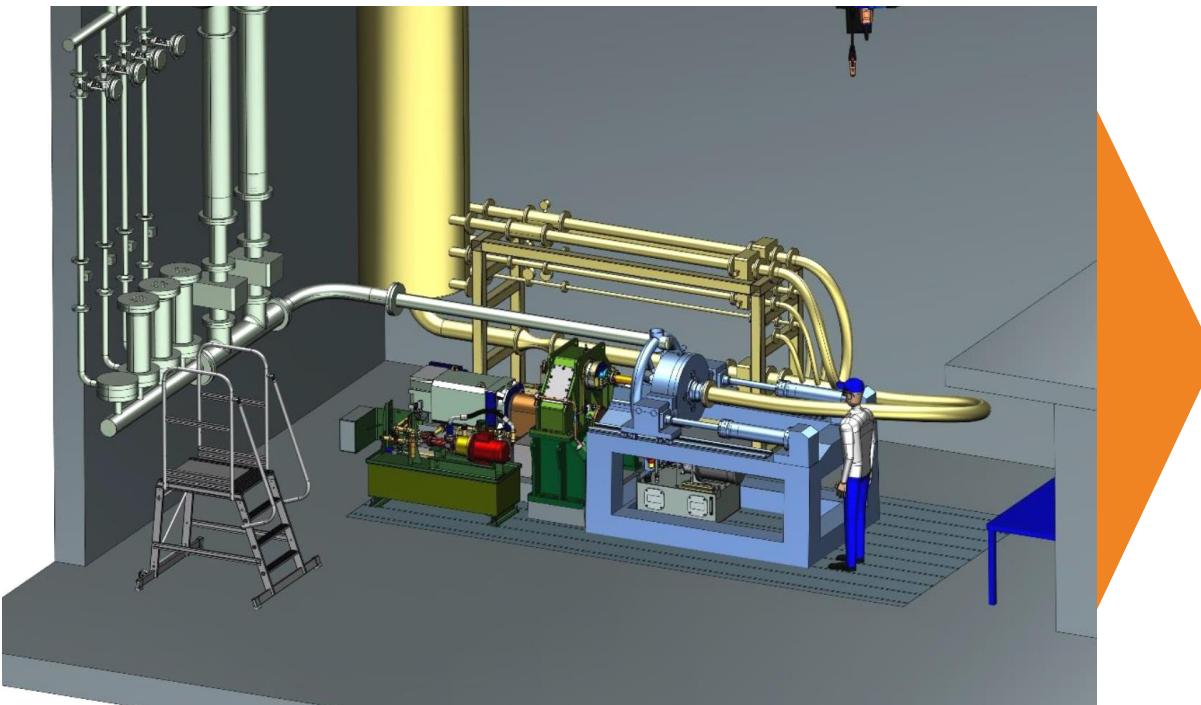


hochauflöste Teilmodelle  
(basierend auf Gesamtmodell)



# Fazit & Ausblick

- Durch die Integration des Know-hows aller Projektbeteiligten und den konsequenten Einsatz der virtuellen Produktentwicklung seit Beginn der Studie ist das Projektteam in der Lage, viele Herausforderungen frühzeitig zu erkennen und zu lösen.
- Montage bei DLR Mitte 2025



► TRUSTED PARTNER.

Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit!