



Picture: SMS Group

Lebensdauerabschätzung von Hochtemperaturbauteilen unter zyklischen Temperaturbeanspruchungen mit CFD/FEM-Modellen

Nicolas Dinsing

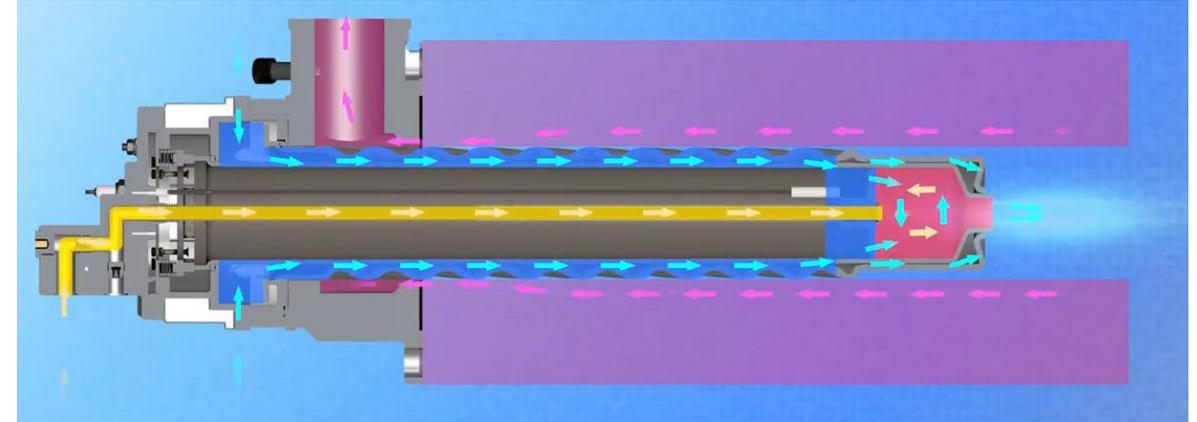
Aachener Ofenbau- und Thermoprozess-Kolloquium 2023

Aachen, 18.10.2023

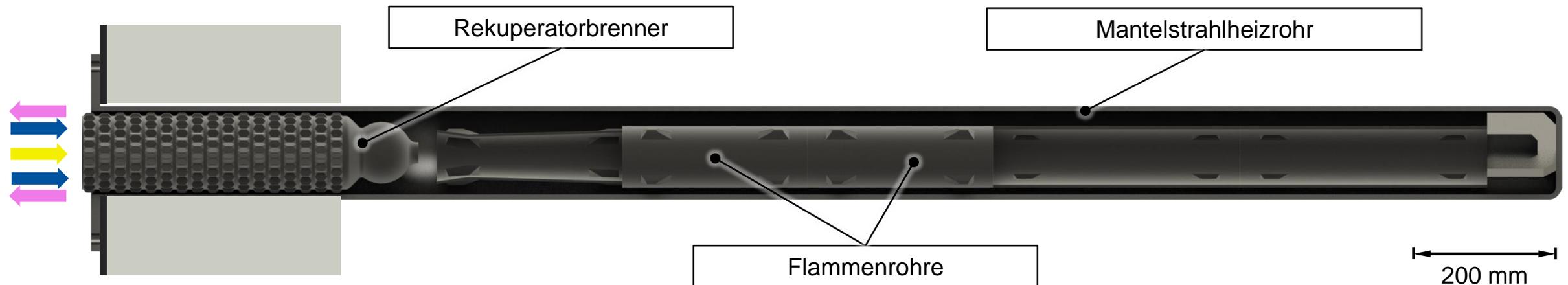
Motivation

Strahlheizrohre

- Indirekte Beheizung von Industrieöfen
- Stand der Technik: Einsatz von Rekuperatorbrennern
- Interne Abgasrezirkulation und FLOX® für niedrigere Emissionen und gleichmäßigere Temperaturverteilung
- Hohe Oberflächentemperaturen über 1.000 °C



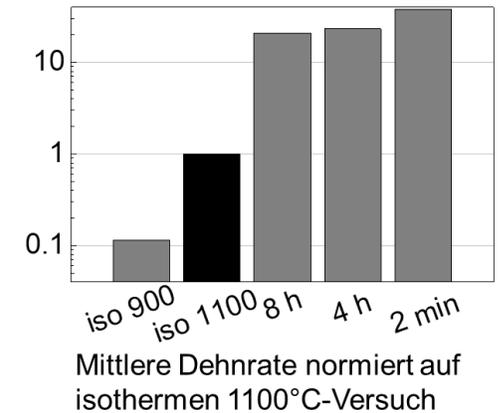
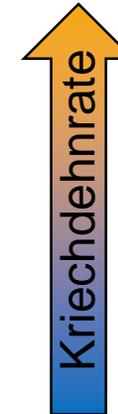
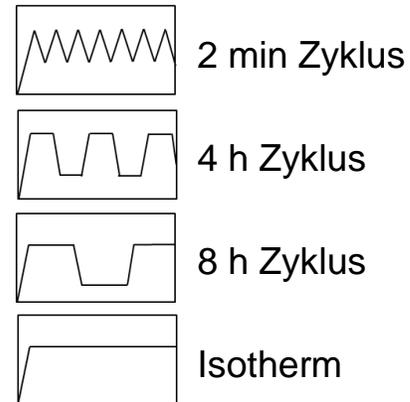
Source: Noxmat



Motivation

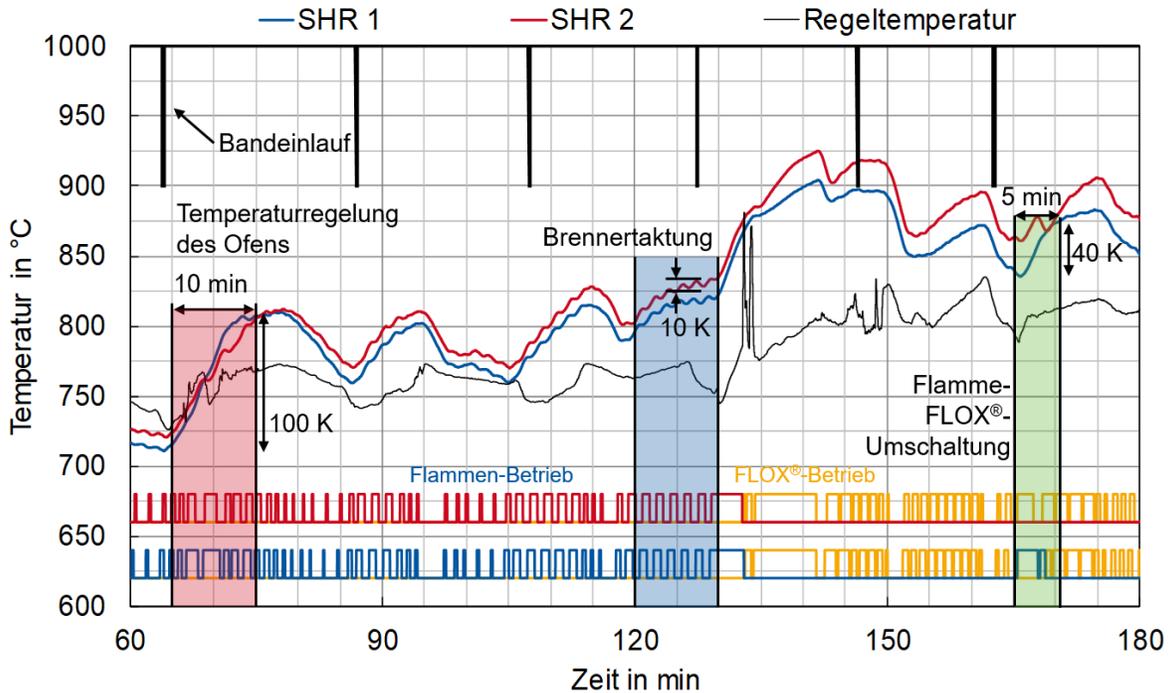
Aktuelle Forschung

- Kriechverformung führt zu signifikanten Verformungen bis zu Rissen
- Beschädigungen verringern Anlagenproduktivität und müssen ausgetauscht werden
- Verformung wird durch Temperaturwechsel beschleunigt. Abhängigkeiten:
 - Temperaturniveau
 - Temperaturänderungsrate
 - (thermisch induzierte) Spannungen
- **Aktuell: Erweiterung der Forschung auf überlagerte Temperaturwechsel**



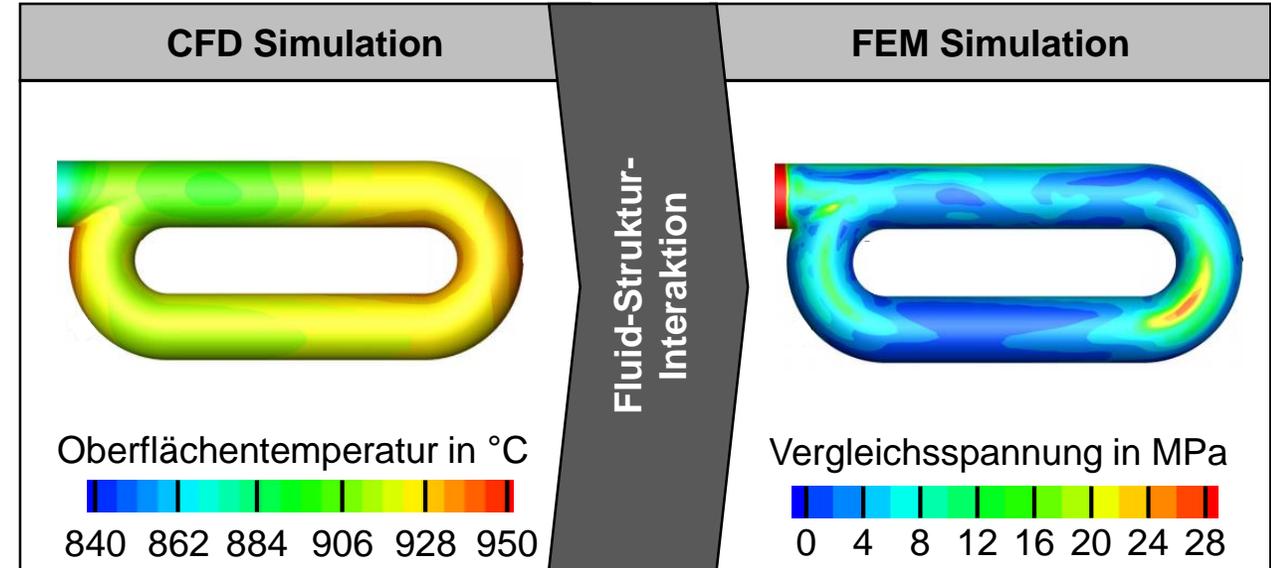
Motivation

Kriechverformung



Einflussfaktoren:

- Brennerbetrieb (Ein-Aus-Taktung, Betriebsmodus)
- Ofenumgebung



Berechnungsansatz:

- Einseitige Fluid-Struktur-Interaktion (FSI)
- Transiente Simulationsmodelle
- Voraussetzung: Effiziente CFD- und FEM-Modelle

CFD Modell

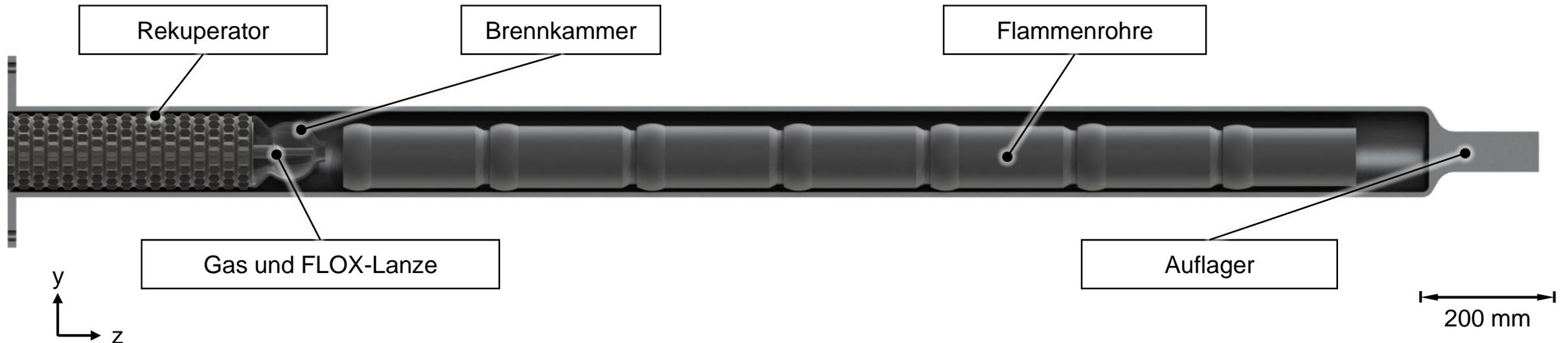
Geometrie und Gitter

Geometrie:

- Mantel-SHR Ø135 mm mit Rekumat C150 (WS Wärmeprozessestechnik GmbH)
- Flammenrohre mit Bajonettverschluss (Honeywell Kromschröder Elster GmbH)

Gitter:

- Poly-Hexcore Gitter
- 611,000 Zellen

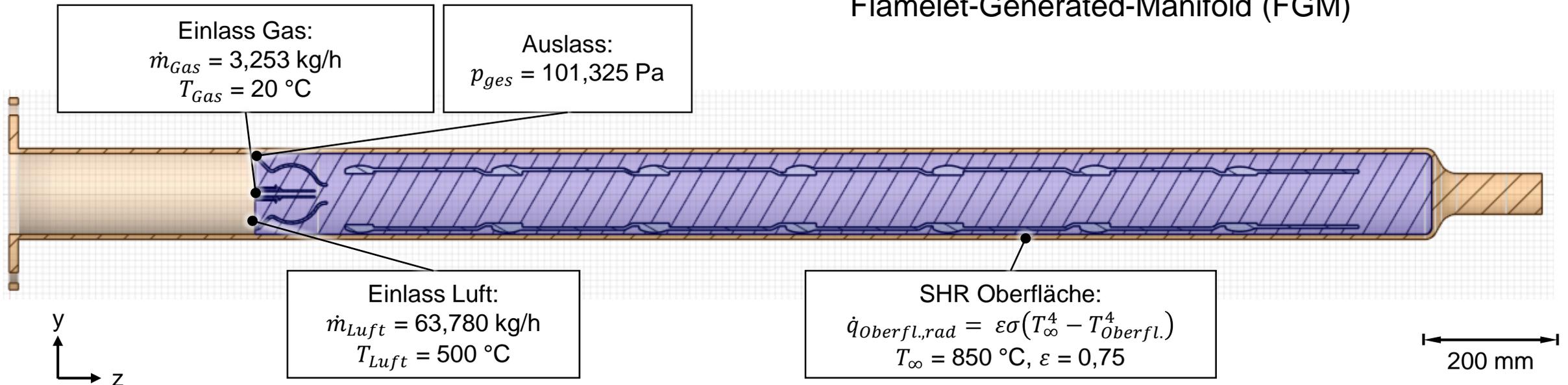


Randbedingungen:

- $P_{Brenner} = 45 \text{ kW}$ (FLOX), $\lambda = 1.15$
- Konstante Umgebungstemperatur (Ofenraumtemperatur) von 850 °C angenommen

Modelle:

- Strömung und Turbulenz: Realizable k- ϵ
- Energie und Strahlung: Discrete-Ordinates (WSGGM)
- Chemische Reaktionen: Species Transport (ST) oder Flamelet-Generated-Manifold (FGM)



Verbrennungsmodellierung

Species-Transport (ST):

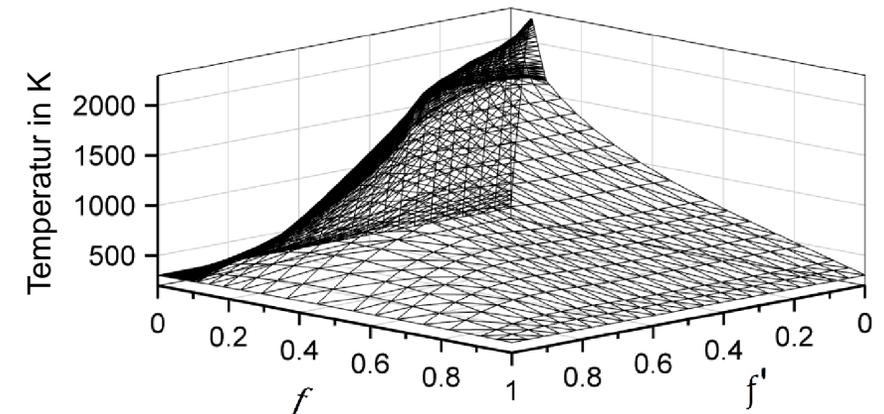
- Transportgleichungen für jede chemische Verbindung im Reaktionsmechanismus
- Quellterme: Integration kinetischer Reaktionsraten nach jeder Iteration

Flamelet-Generated-Manifold (FGM):

- Modellierung einer turbulenten Flamme als Vielzahl laminarer Diffusionsflammen
- Fünf Transportgleichungen:
 - Mischungsbruch f (0 = kein Brennstoff, 1 = nur Brennstoff)
 - Verbrennungsfortschritt \bar{c} (0 = nicht reagiert, 1 = vollständig reagiert)
 - Varianz f' and \bar{c}' und Enthalpieniveau H
- Berechnung einer Referenztabelle vor Simulation: Temperatur, Konzentrationen, etc.
- **Anwendung auf FLOX[®]-Verbrennung?**

```
SPECIES
H2      H      O      O2     OH     H2O    HO2    H2O2
CH2     CH2(S)  CH3    CH4    CO     CO2    HCO    CH2O
CH3O    C2H2    C2H3    C2H4    C2H5    C2H6
N2      AR
END
REACTIONS
O+H+M<=>OH+M      5.000E+17  -1.000  0.00
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/0.70/
O+H2<=>H+OH      5.000E+04  2.670  6290.00
O+H2O<=>OH+O2    2.000E+13  0.000  0.00
O+CH2<=>H+HCO    8.000E+13  0.000  0.00
O+CH2(S)<=>H+HCO  1.500E+13  0.000  0.00
O+CH3<=>H+CH2O   8.430E+13  0.000  0.00
O+CH4<=>OH+CH3   1.020E+09  1.500  8600.00
O+CO+M<=>CO2+M  6.020E+14  0.000  3000.00
```

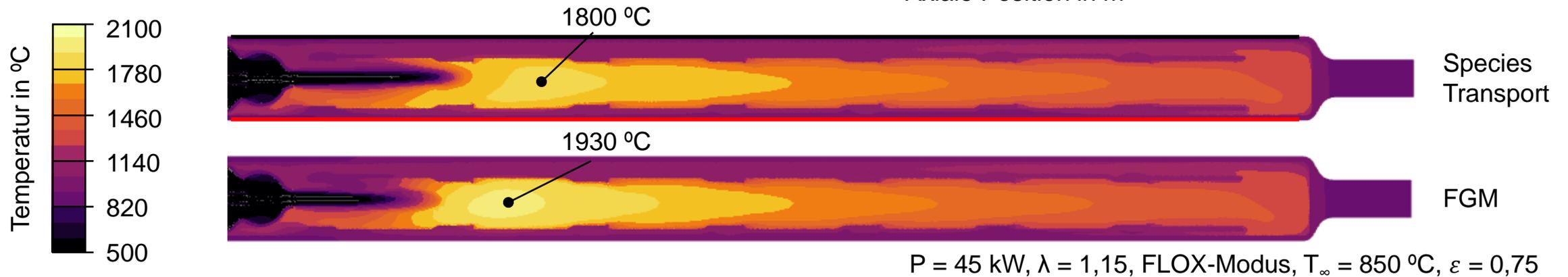
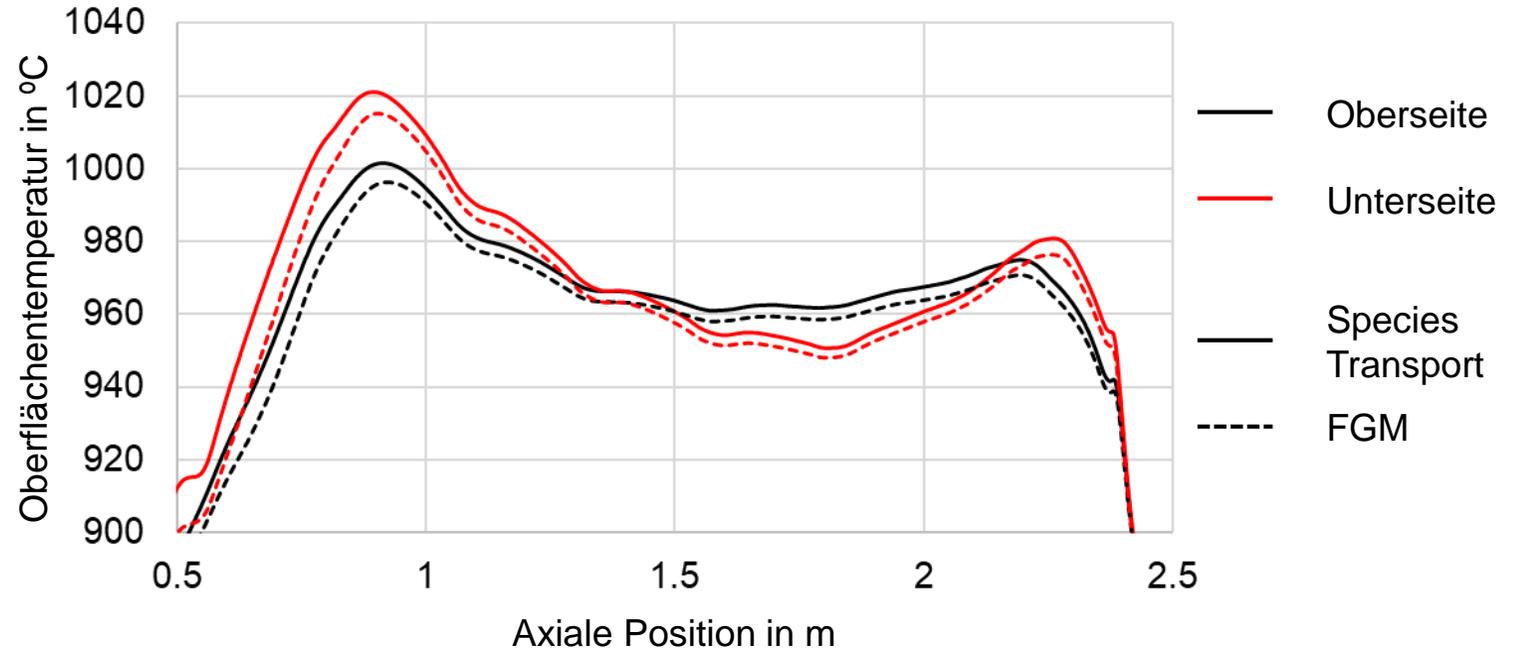
Auszug des Reaktionsmechanismus „DRM22“:
22 chemische Spezies, 104 Elementarreaktionen.



Auszug einer FGM Look-Up-Tabelle

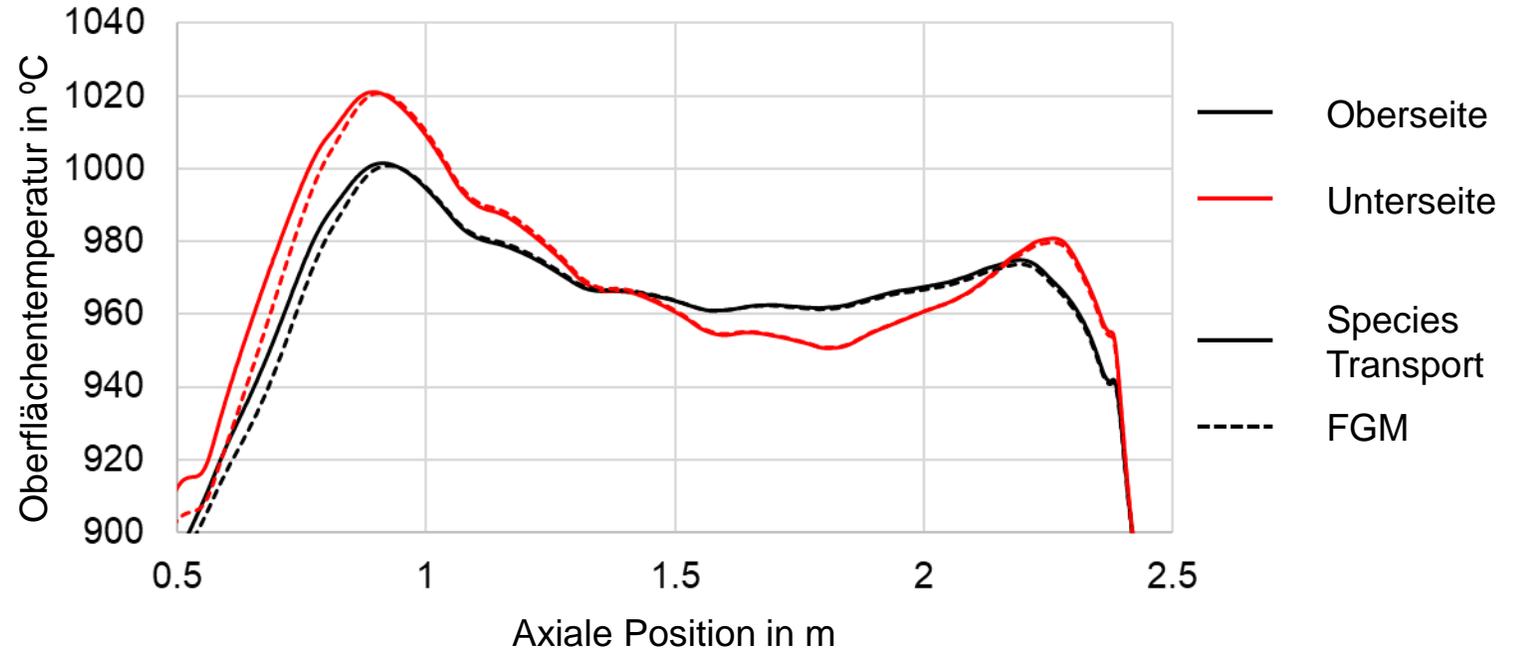
Ergebnisse: FLOX-Modus

- Freigesetzte Wärme unterschiedlich bei gleichen Massenströmen (~2 kW; 4,5%)
- Resultiert in unterschiedlichen Oberflächentemperaturen



Ergebnisse: FLOX-Modus

- Anpassung der Leistung über Massenströme resultiert in gleichen Temperaturverläufen
- **~70% kürzere Rechenzeit mit FGM**
- Bessere Randbedingung für Umgebungstemperatur?



Strahlungsrandbedingung

Herausforderungen:

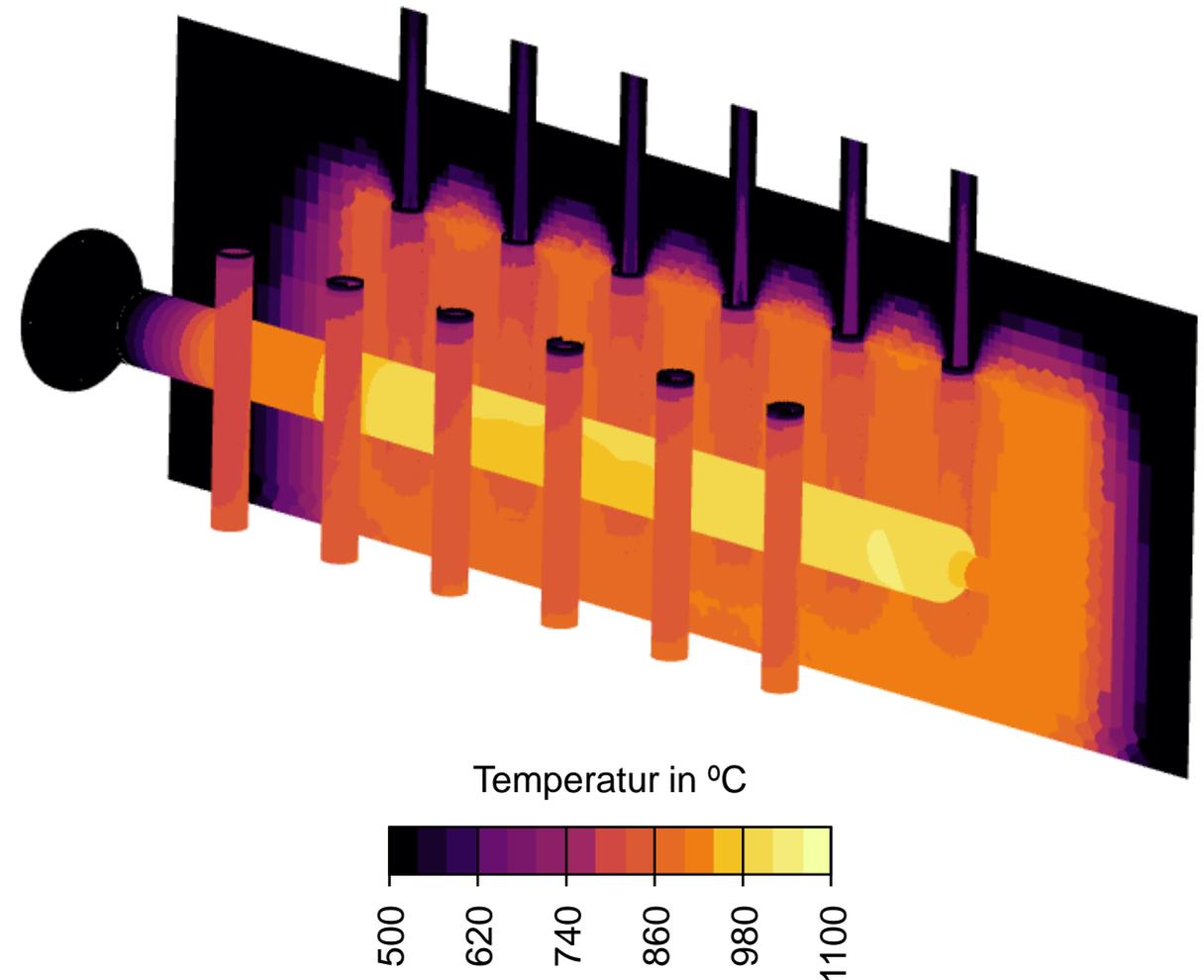
- Transiente Berechnungen können nur im separaten SHR-Modell durchgeführt werden
 - Berücksichtigung der Ofenumgebung führt zu längeren Rechenzeiten durch höhere Modellkomplexität und thermische Trägheit

Ziel:

- Genauere Randbedingung für den Strahlungsaustausch mit der Ofenumgebung

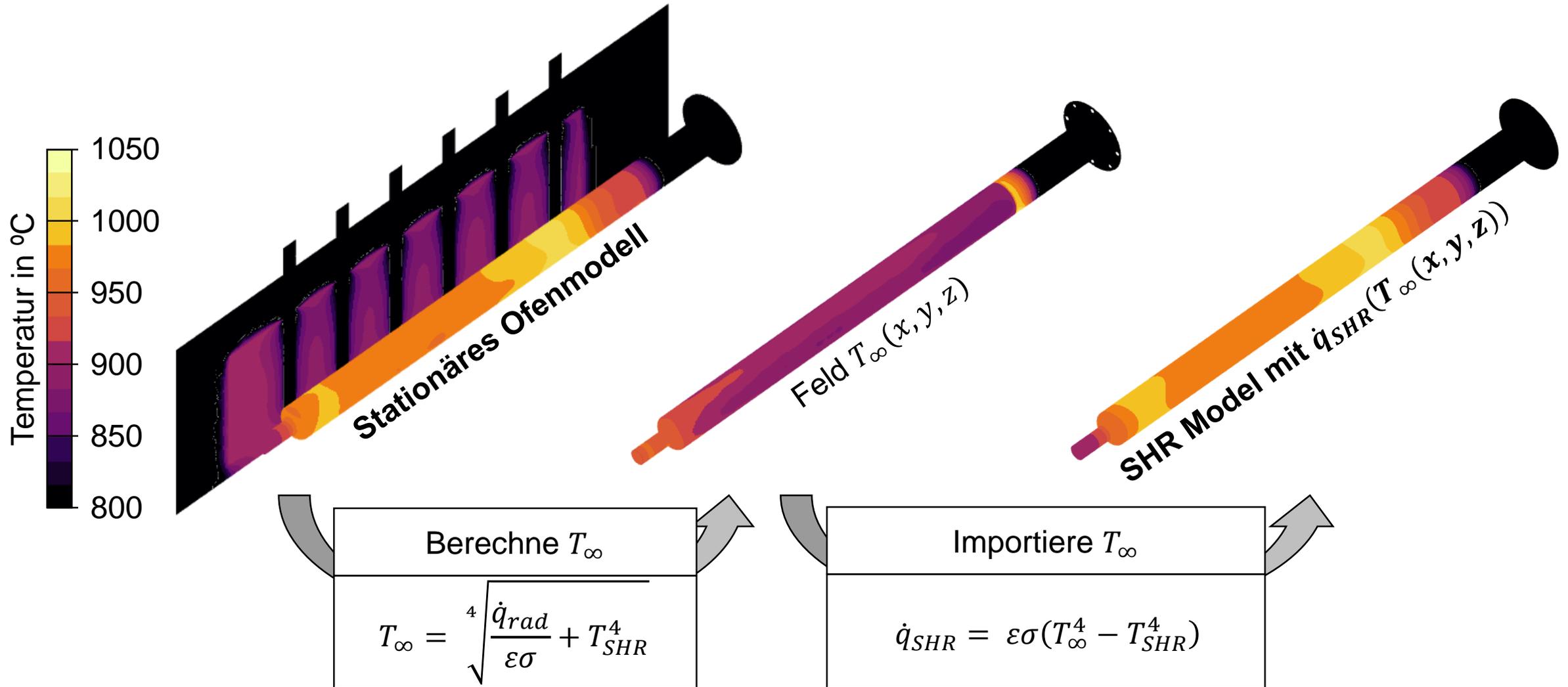
Methode:

- Berechnung der Wärmeströme in einem stationären Ofenmodell
- **Ortsabhängige Definition der Strahlungstemperatur T_∞ im SHR-Modell**



Strahlungsrandbedingung

Vorgehen



Strahlungsrandbedingung

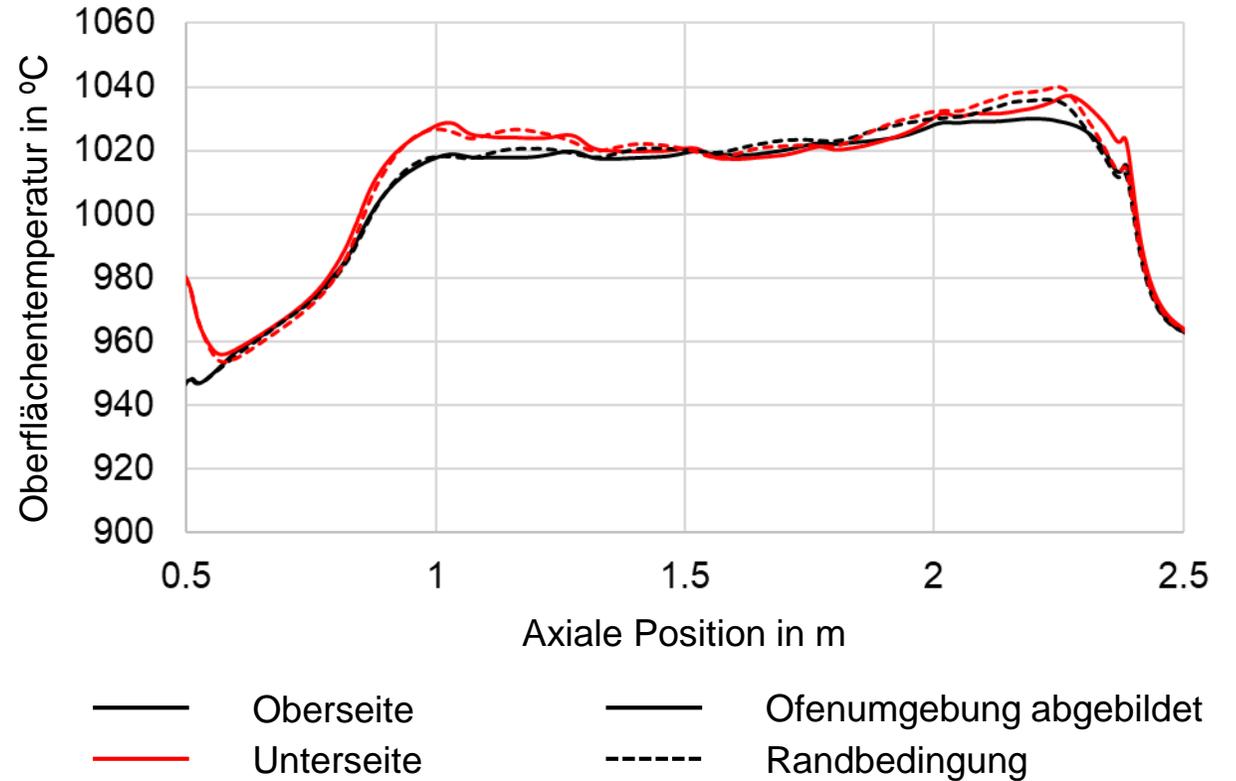
Ergebnisse

Ergebnis:

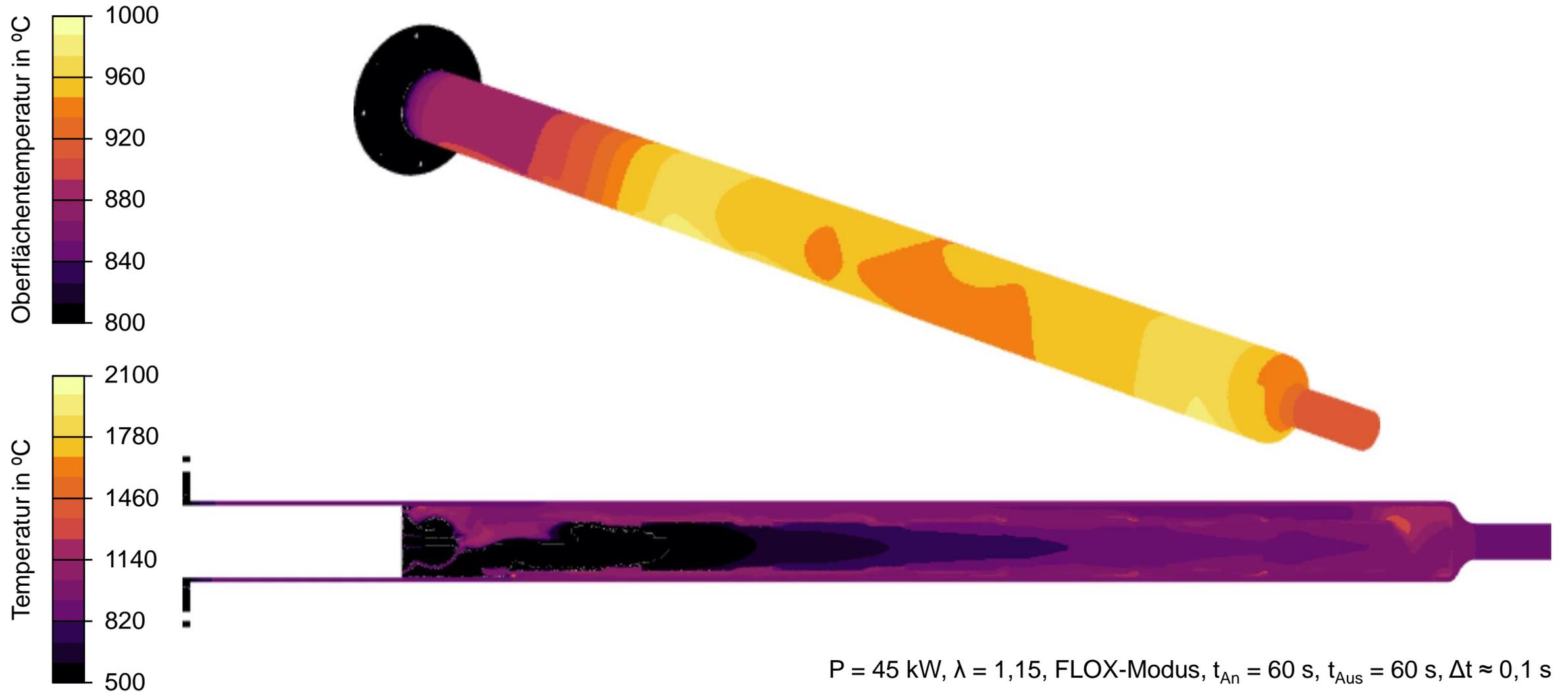
- Gute Übereinstimmung der Oberflächentemperaturen

Vorteile:

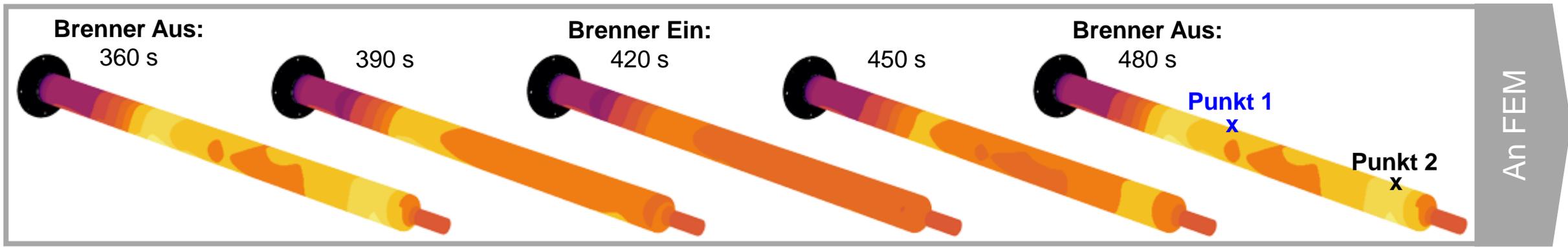
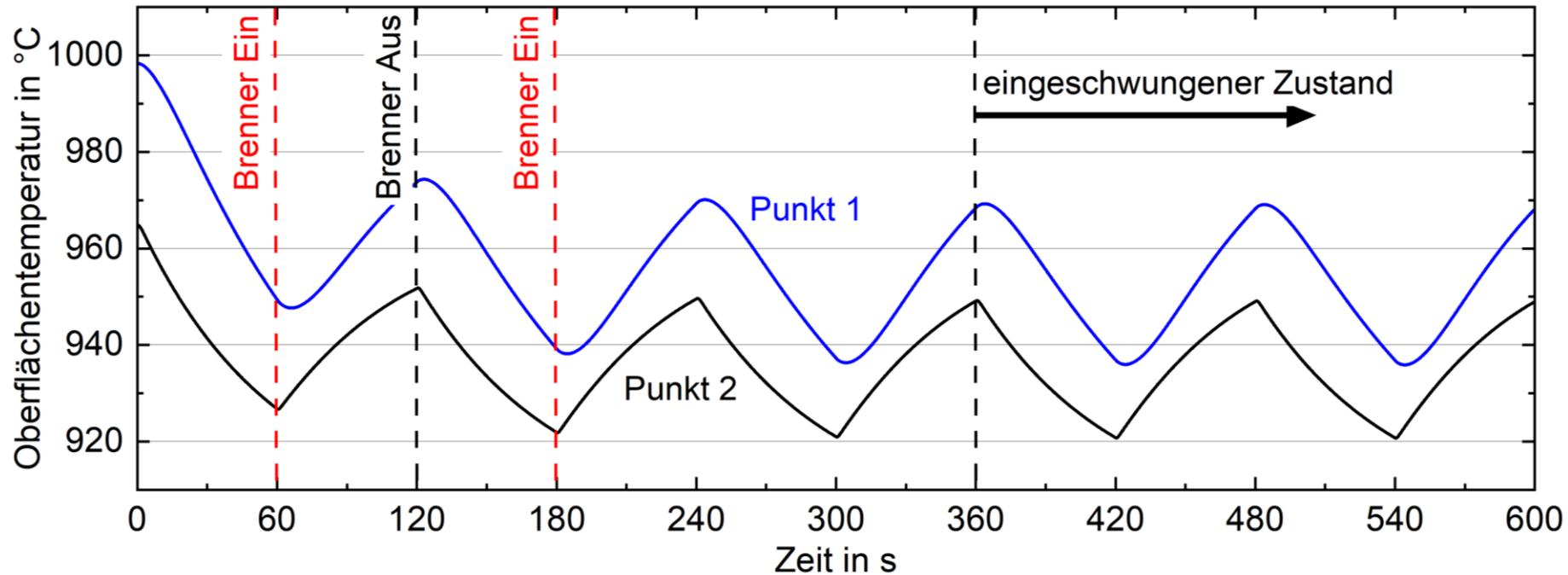
- Weniger steif als direkte Vorgabe von Wärmestromdichten
- Gitter des SHR-Modells ist ~70% kleiner



Transiente Berechnung



Transiente Berechnung



FEM-Modell

Geometrie und Gitter

Software:

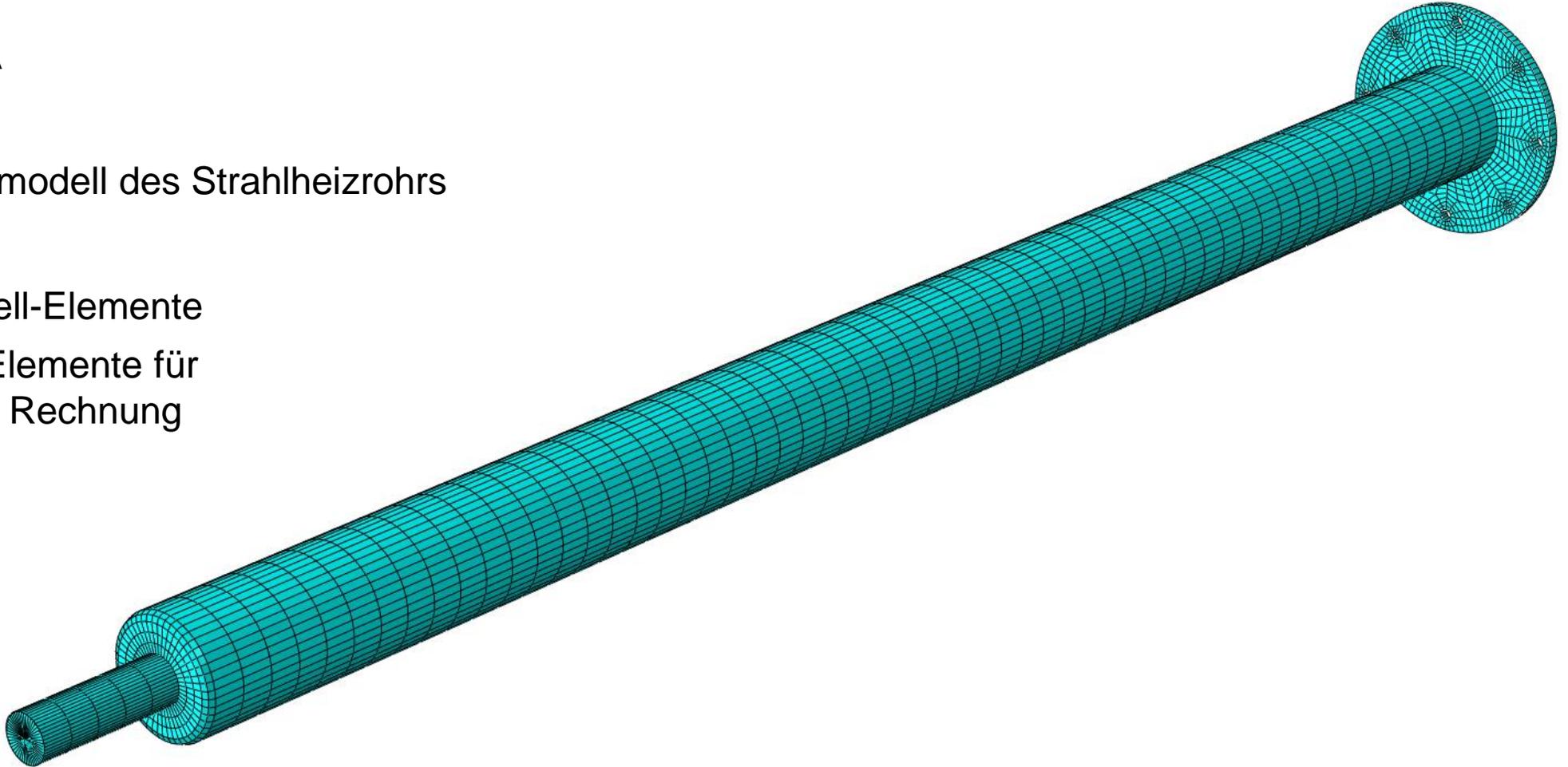
- Abaqus FEA

Geometrie:

- Oberflächenmodell des Strahlheizrohrs

Gitter:

- 4385 2D-Shell-Elemente
 - Keine 3D-Elemente für effizientere Rechnung

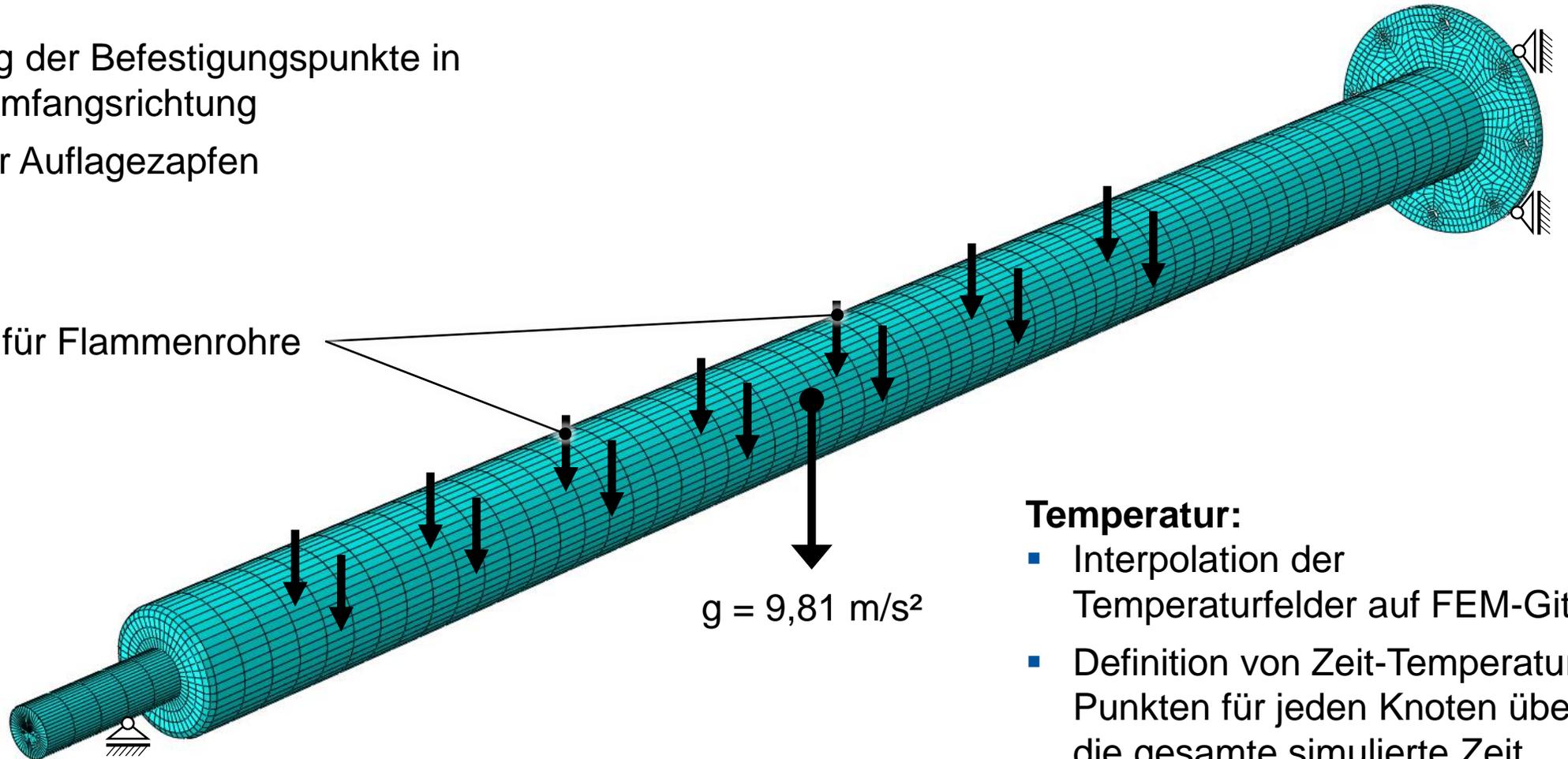


Einspannung:

- Einspannung der Befestigungspunkte in Axial- und Umfangsrichtung
- Gleitlager für Auflagezapfen

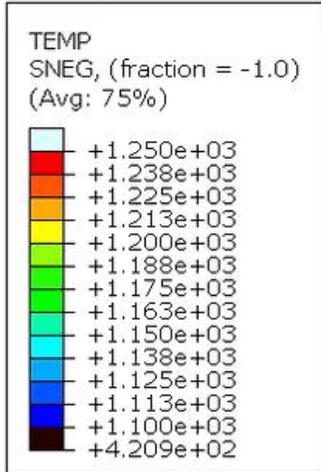
Lasten:

- Schwerkraft
- Punktlasten für Flammenrohre

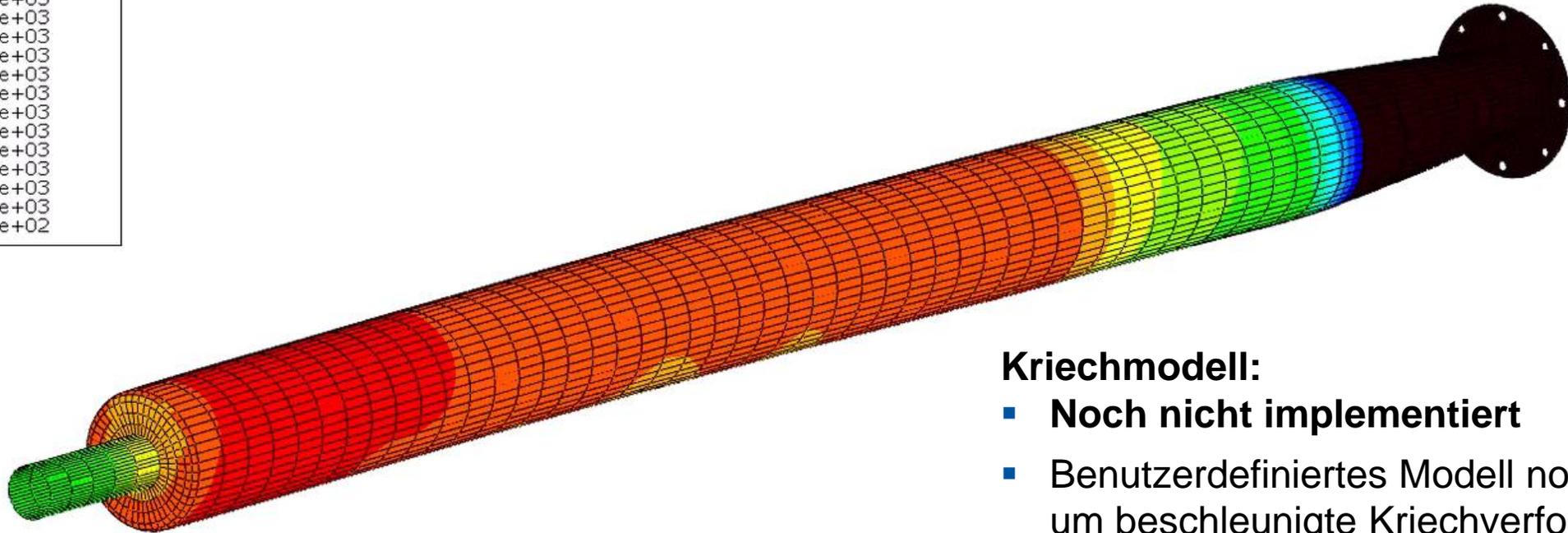


Temperatur:

- Interpolation der Temperaturfelder auf FEM-Gitter
- Definition von Zeit-Temperatur-Punkten für jeden Knoten über die gesamte simulierte Zeit



Skalierung: 100x



Kriechmodell:

- **Noch nicht implementiert**
- Benutzerdefiniertes Modell notwendig, um beschleunigte Kriechverformung zu berücksichtigen
- Modellentwicklung und Parametrisierung durch Projektpartner

Validierung

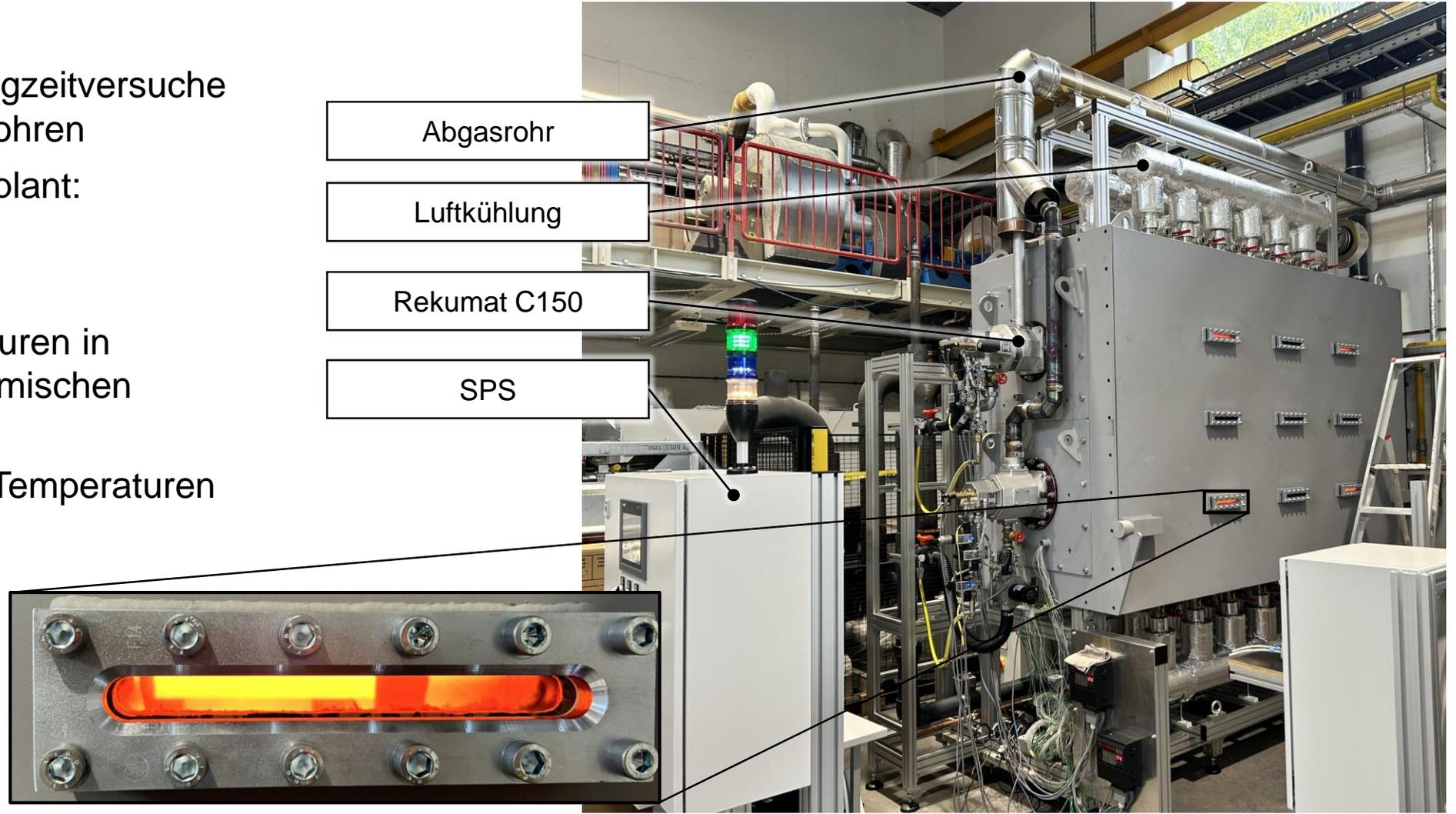
Langzeitversuche mit Mantelstrahlheizrohren

Experiment:

- Versuchsofen für Langzeitversuche mit Mantelstrahlheizrohren
- Langzeitversuche geplant: ~3000 h pro Rohr

Messungen:

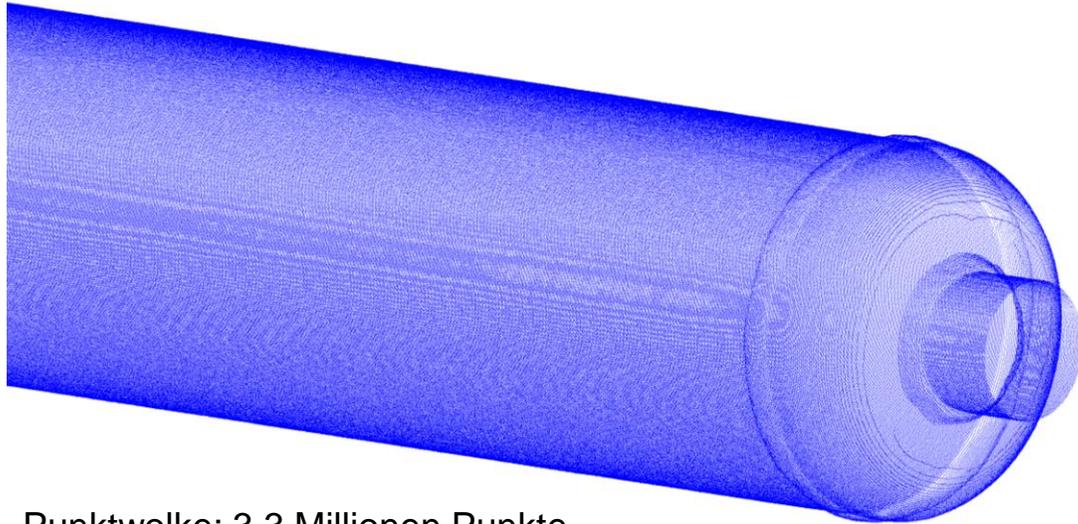
- Oberflächentemperaturen in stationären und dynamischen Zuständen
- Volumenströme und Temperaturen für Energiebilanz
- Axiale Längenausdehnung des Rohrs



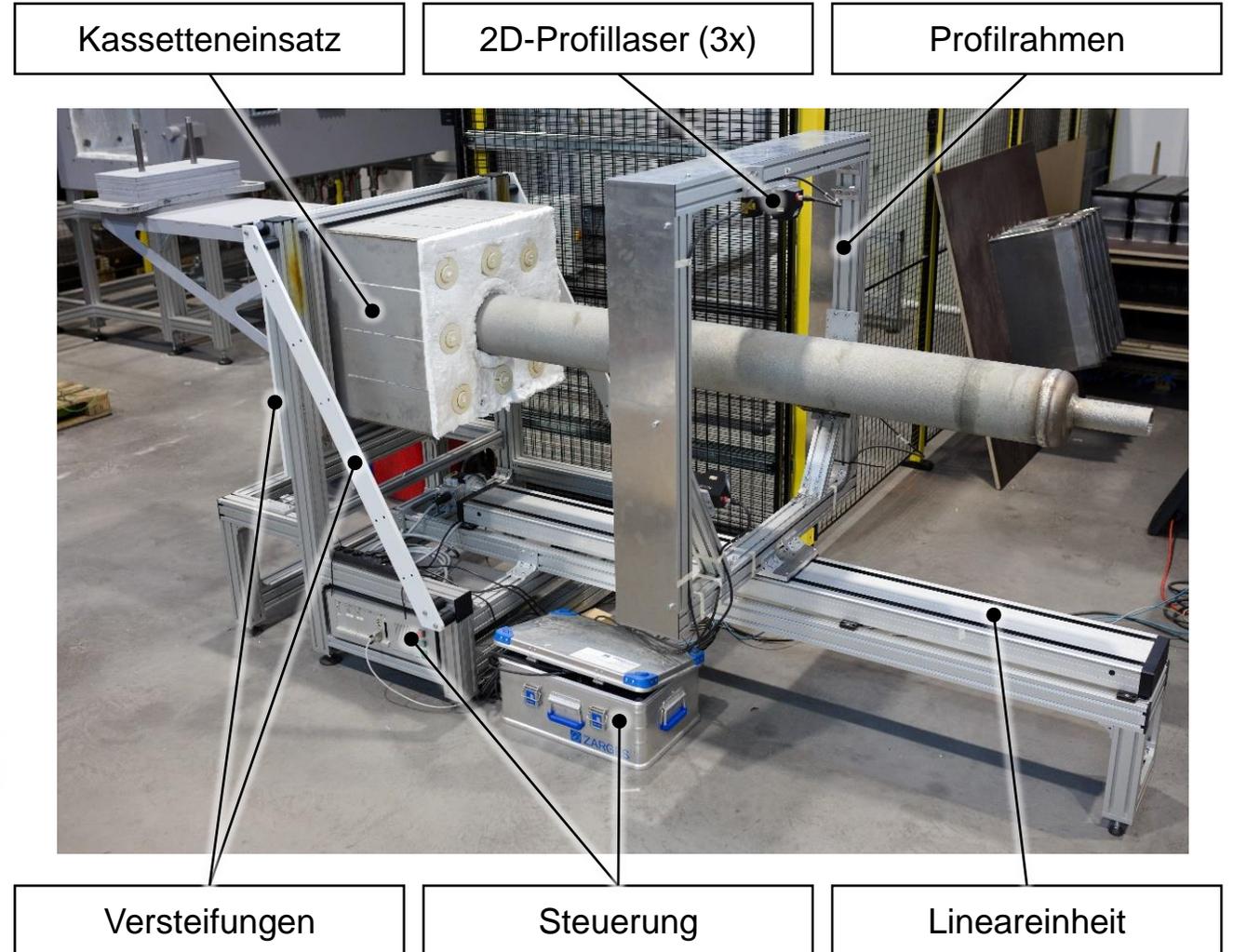
Validierung

Kriechverformung

- Vermessung der Oberfläche durch 2D-Profillaser
- Vorher-Nachher-Vergleich der Strahlheizrohrform



Punktwolke: 3,3 Millionen Punkte



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Forschungsnetzwerk
Mittelstand

Industrielle
Gemeinschaftsforschung



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Thinking the Future
Zukunft denken

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Nicolas Dinsing, M.Sc.
Wissenschaftlicher Mitarbeiter - Verbrennung
Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik

RWTH Aachen University
Kopernikusstraße 10
52074 Aachen
www.iob.rwth-aachen.de
Tel.: +49 241 80 25964
E-Mail: dinsing@iob.rwth-aachen.de



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

