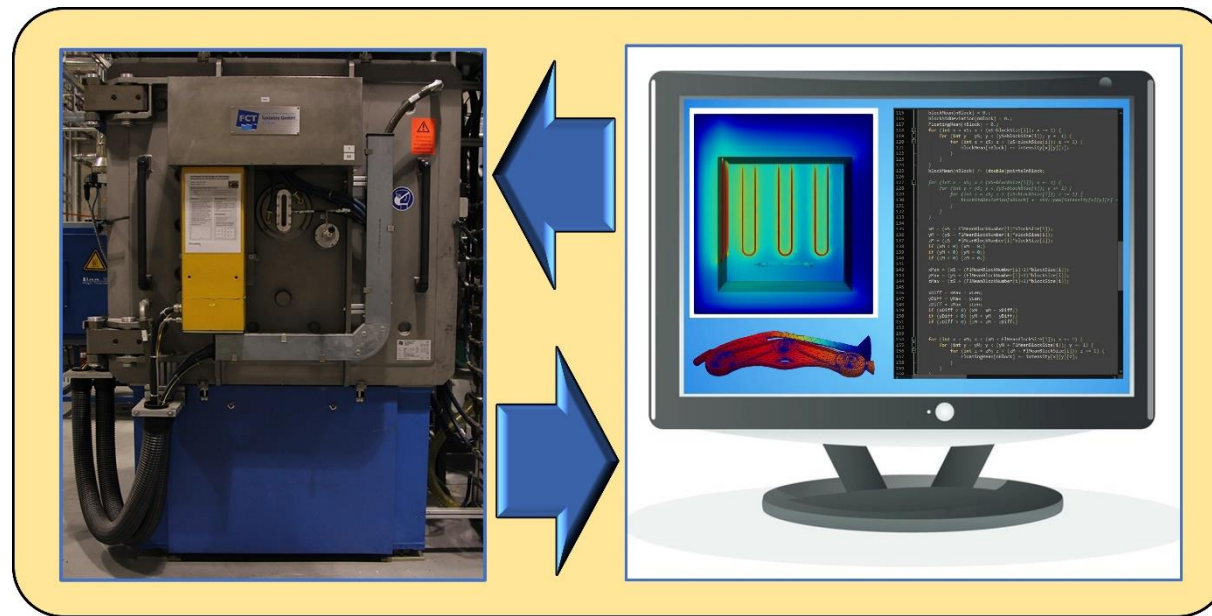


Energieeffiziente Thermoprozesse durch Digitale Zwillinge

Gerhard Seifert

Fraunhofer-Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau HTL, Bayreuth



1. Westerwälder Industriekolloquium
19./20.11.2024

Fraunhofer-Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau HTL



Bayreuth



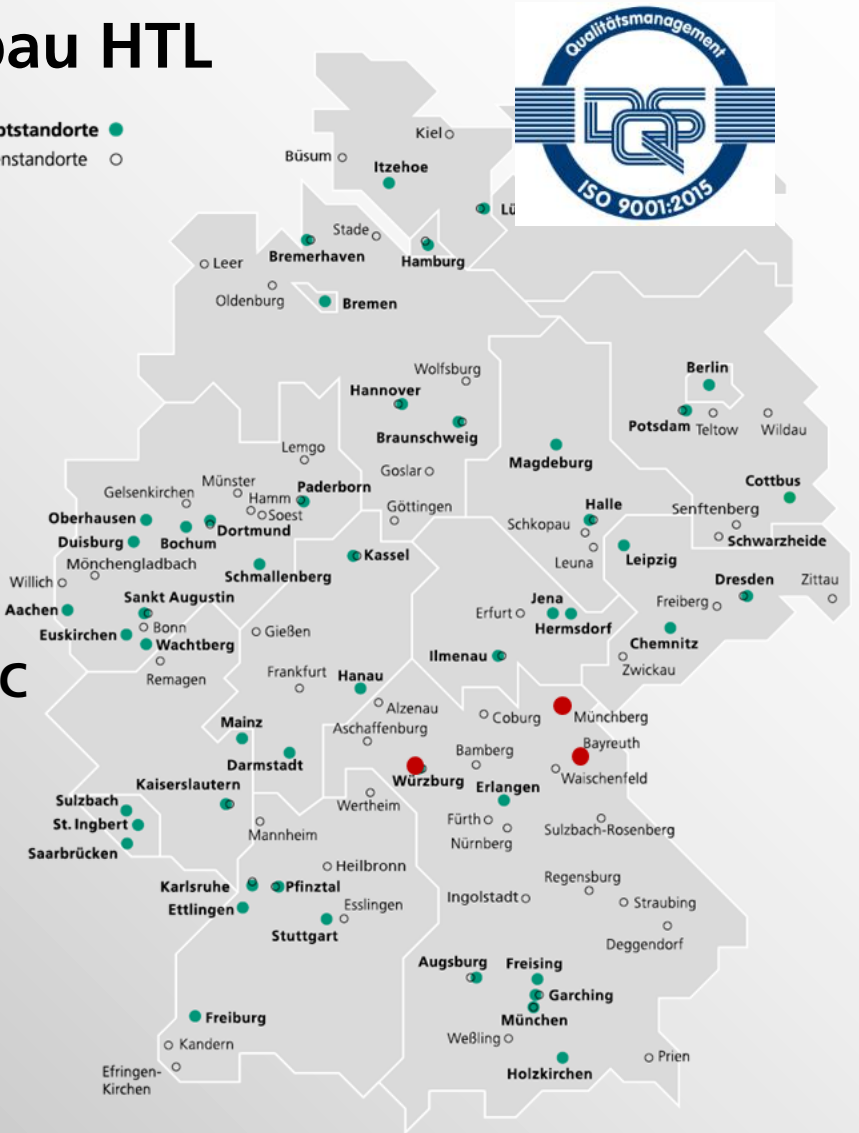
Würzburg



Münchberg

- **Gründung:** 01.2012
- **Mutterinstitut:** Fraunhofer ISC
Würzburg
- **Mitarbeiter:** 90 (55 PJ)
- **Laborfläche:** 4700 m²
- **Haushalt 2023:** 8,5 Mio. €

Hauptstandorte ●
Nebenstandorte ○



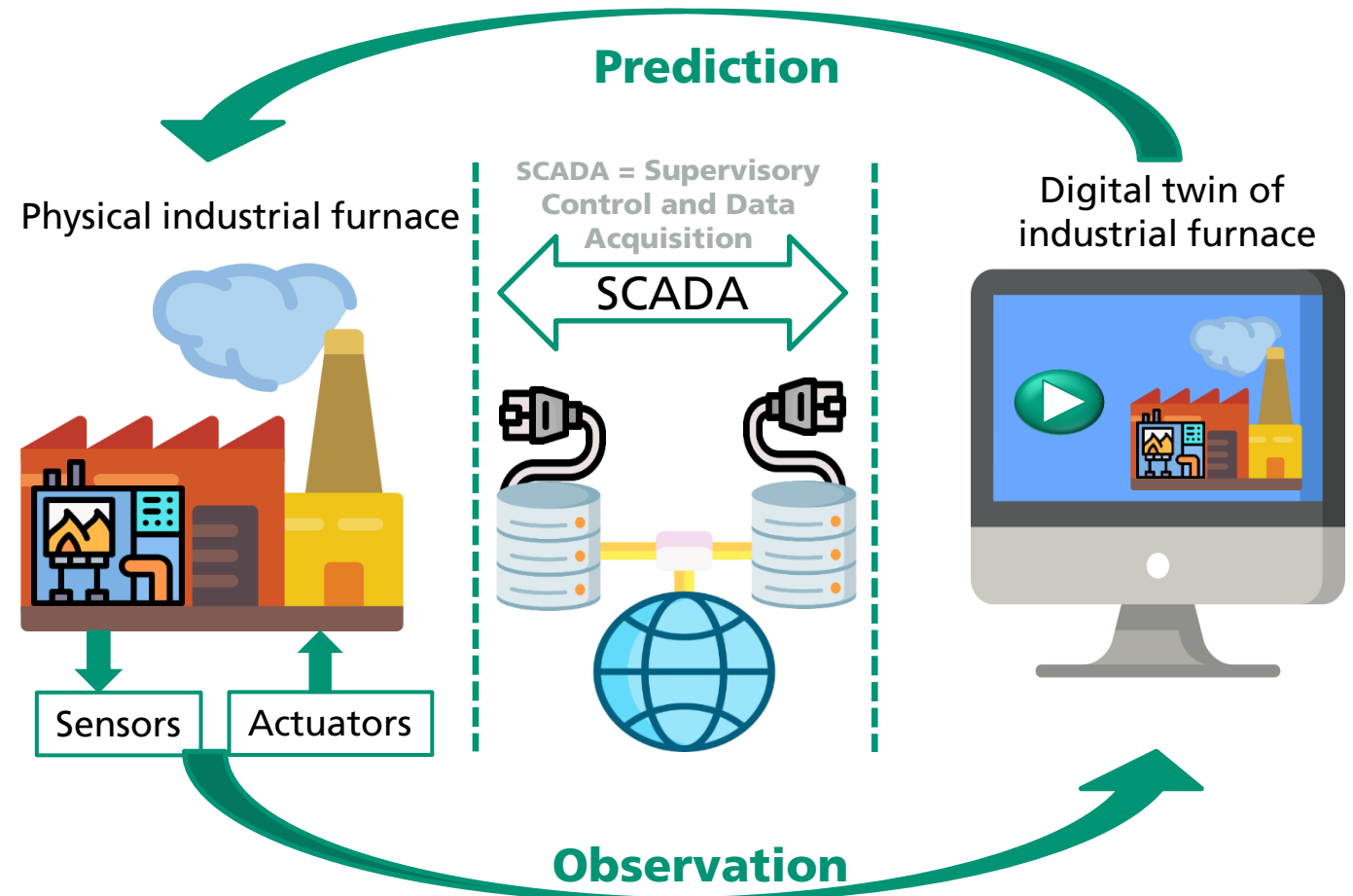
Mission des Fraunhofer-Zentrums HTL

- Das HTL gestaltet energieeffiziente Wärmeprozesse und trägt so zu einem nachhaltigen technologischen Fortschritt der Gesellschaft bei.
- Das HTL entwickelt / nutzt dazu
 - Hochtemperatur-Materialien, -Bauteile und -Messverfahren
 - Methoden zur Digitalisierung von Wärmeprozessen und Materialentwicklung (ICME).
- Primäres Ziel ist die Umsetzung seiner Entwicklungen in der Industrie.

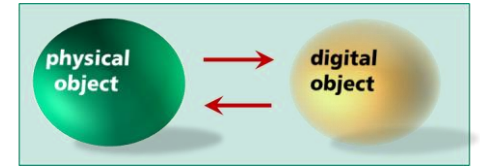
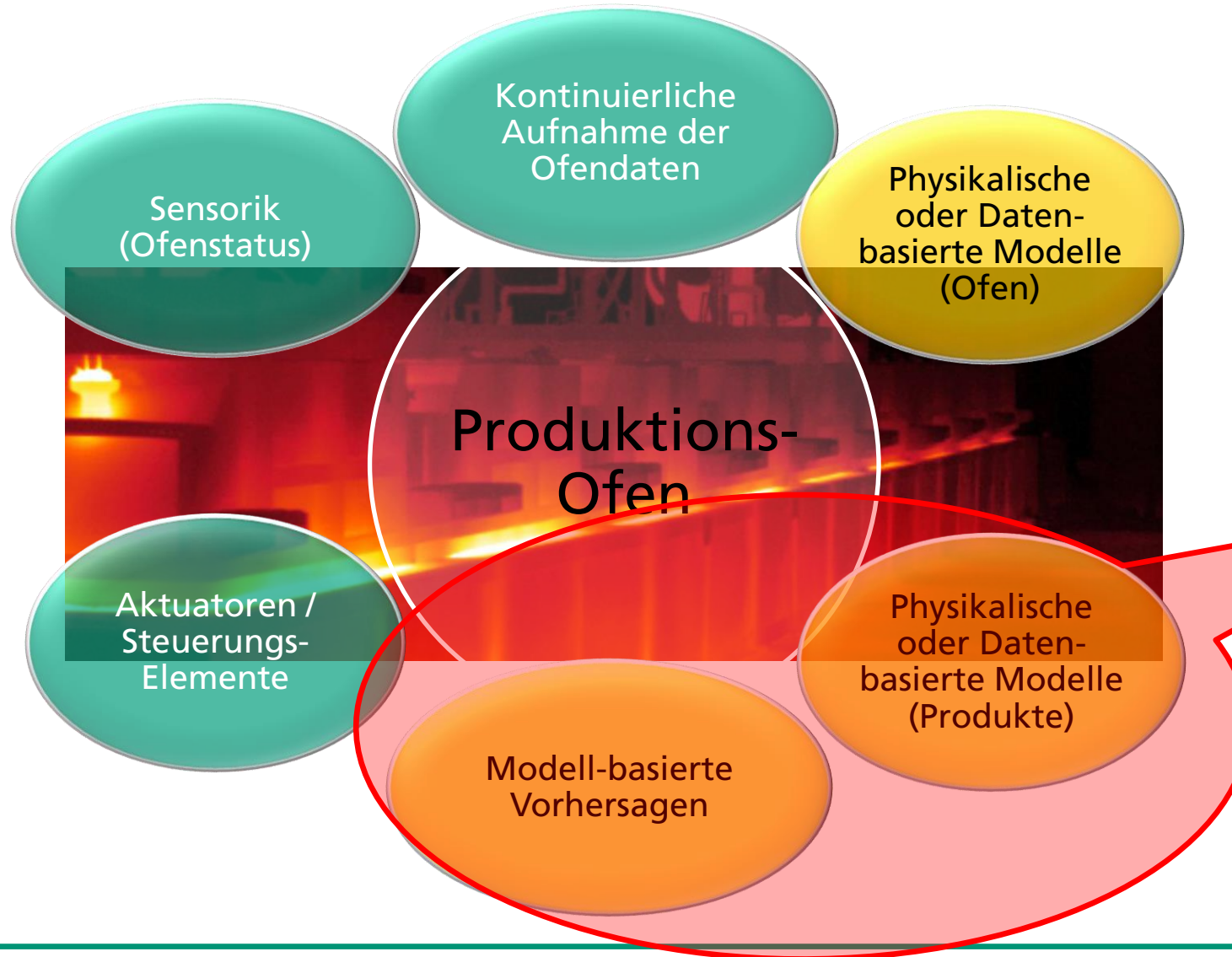


Motivation: wozu Digitale Ofen- bzw. Thermoprozess-Zwillinge?

- Vorteile durch Digitalisierung der Produktion:
 - Energie- und Materialeffizienz durch wissensbasierte Ofensteuerung
 - Produktnachverfolgung → systematische Fehlersuche und ständige Prozessoptimierung
 - Zielgenaue, vorausschauende Wartung der Öfen
 - Automatische Reaktion der Anlagen auf fluktuierendes Energie-Angebot (Preis, Strom/Gas etc.) → „demand side management“
 - Schnelles / automatisches Prozessdesign für neue Produkte



Was braucht man für einen zuverlässigen Digitalen Ofenzwilling?



Methodik des Fraunhofer HTL:

Materialverhalten im Thermoprozess steht im Mittelpunkt

Simulation von Thermoprozessen auf Basis präziser In-Situ Messdaten

Nachstellen der industriellen Wärmebehandlung in TOM-Anlagen (Thermo-Optische Messverfahren)

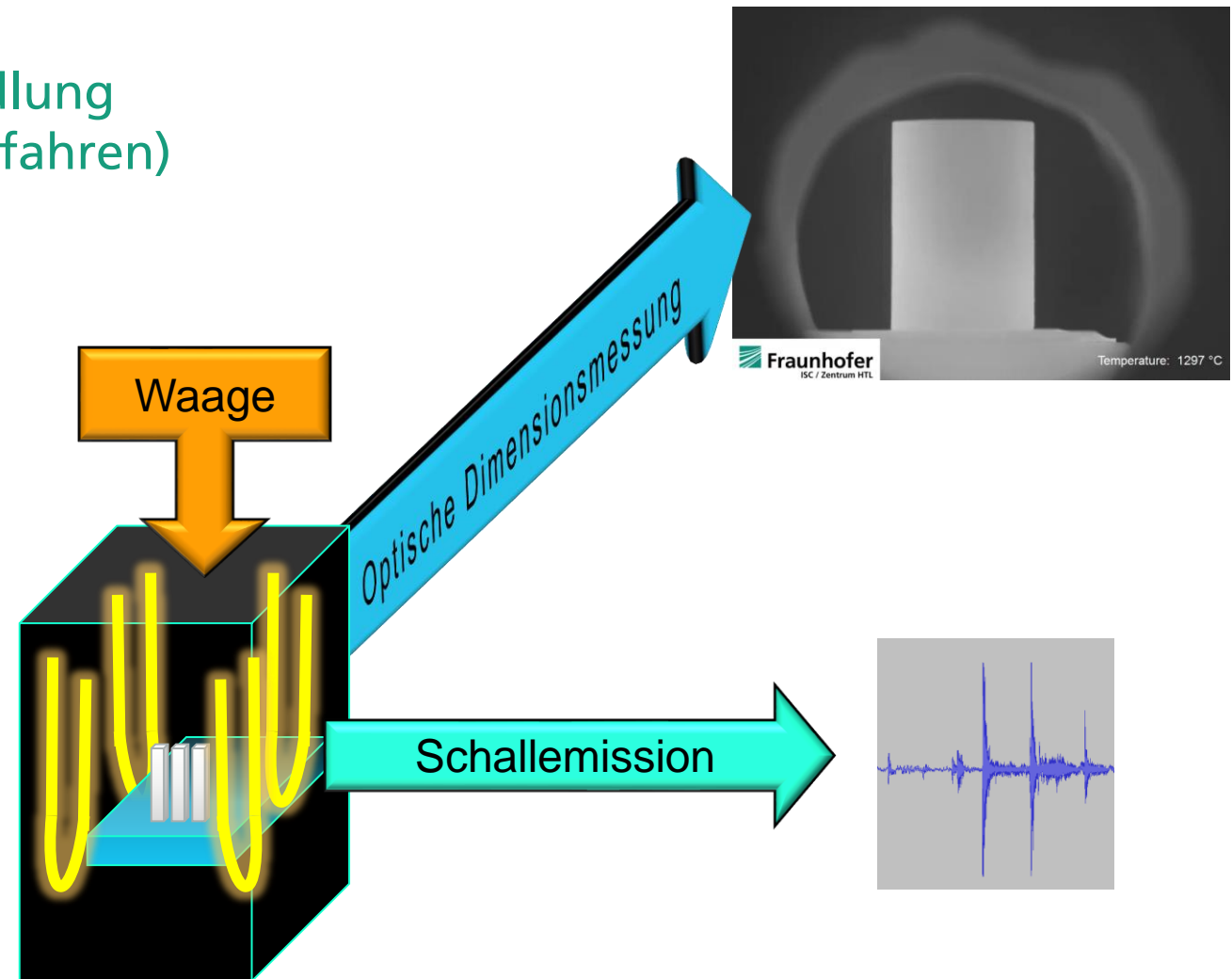
- Ofenatmosphäre
- Temperaturabgleich

In-Situ Messung von Materialeigenschaften

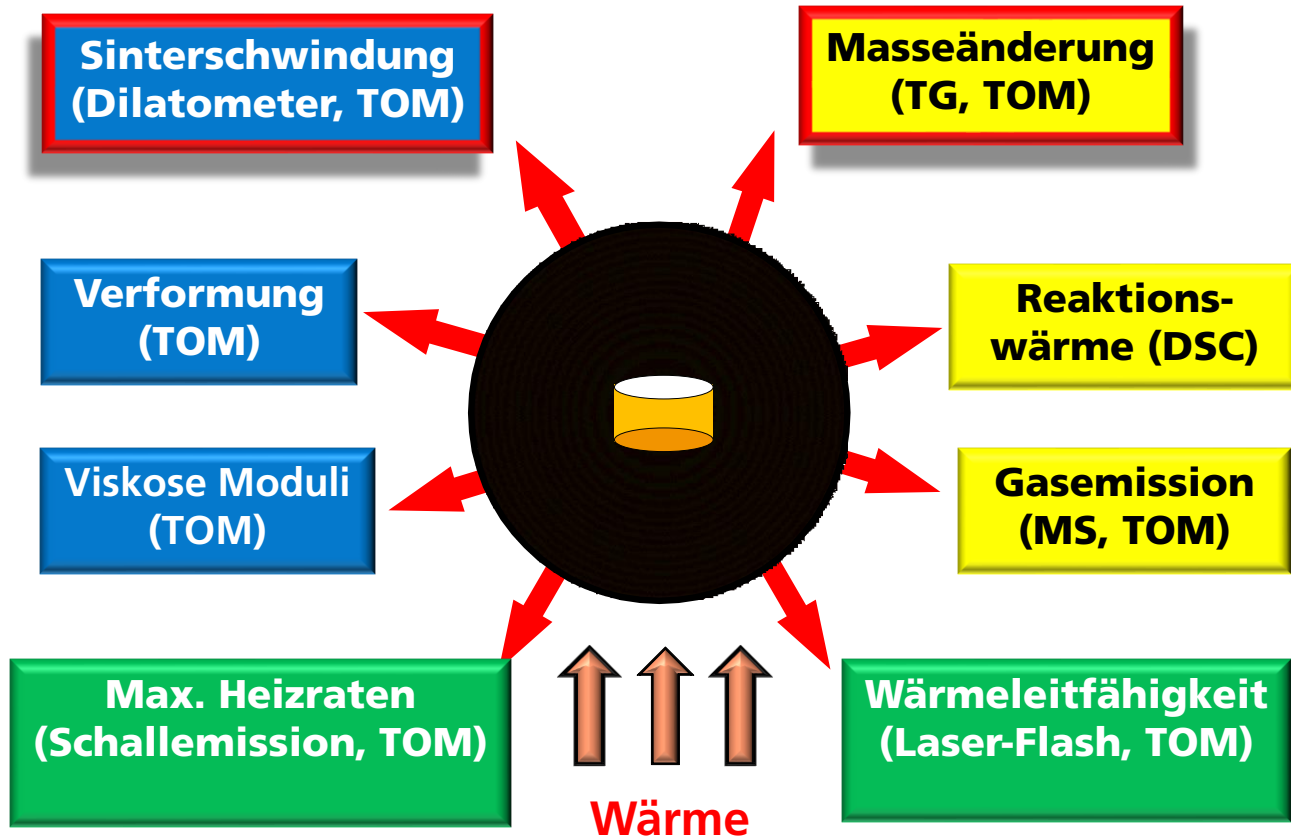
- Sinter-Schwindung
- Massenverlust beim Entbindern
- Schallemission bei Rissbildung ...

Simulation

- Temperaturverlauf
- Reaktionskinetik
- Mechanische Spannungen
- Wechselwirkung Produkt – Ofen



Erforderliche Messverfahren für die *in-Situ* Analyse von Sinter- und Entbinderungs-Prozessen



TOM: ThermoOptische Messanlagen

- Kontaktloses, optisches Messprinzip
- Dimensionsänderungen, Verformung
- Kriechen, Benetzung, ...
- Gewichtsänderung, Schallemission
- Thermoschock, Wärmeleitfähigkeit ...



TOM_air, ...

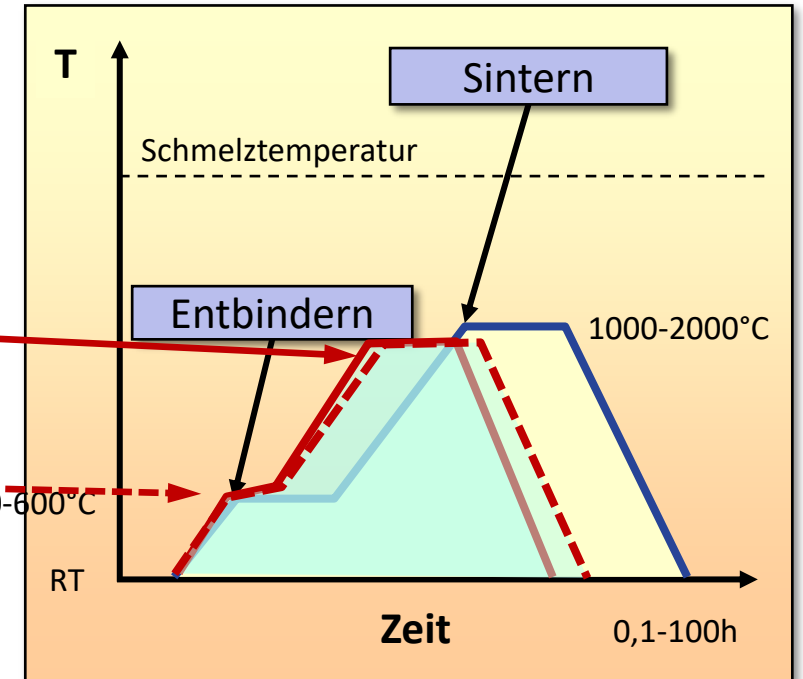
Sintern

Sintern und Entbindern

Entbindern

Digitales Design von Wärmebehandlungsprozessen für Keramiken (und Pulvermetalle) mit Fokus aufs Produktmaterial

- In-Situ-Messung Prozesskinetik
- In-Situ-Messung Materialeigenschaften
- Prozesssimulation (FE) für Bauteilgeometrie
- Ermittlung schnellster / effizientester T(t)-Zyklus am Computer inkl. Validierung
- Berücksichtigung von Brennstapel-Einflüssen
- Temperaturabgleich im Industrieofen
- Umsetzung am Industrieofen

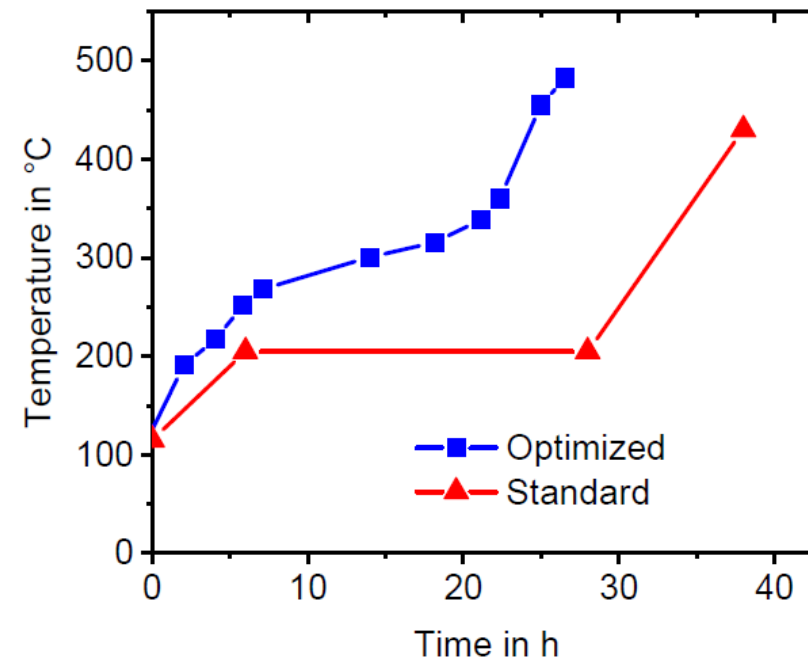
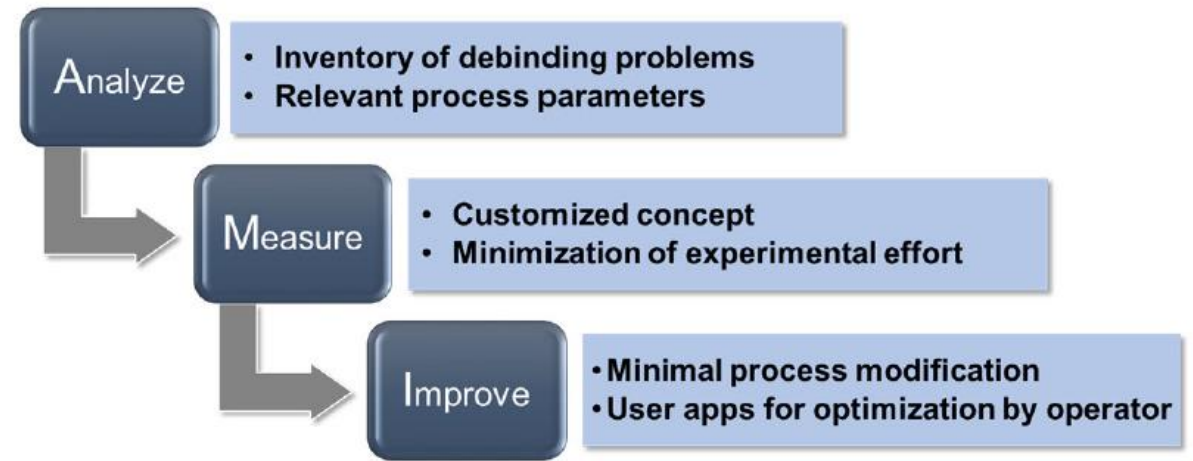


Design von Entbinderungsprozessen

- Basis sind In-Situ-Messungen am Grünkörper
- Ergebnis sind Anwender-Apps

4-Stufen-Ansatz:

1. Kleine Bauteile, wenig Binder
→ Kinetiksimulation
2. Große Bauteile, wenig Binderanteil
→ + Temperaturverteilung
3. Hoher Binderanteil, Vorkenntnis vorhanden
→ + Gasphasentransport
4. Hoher Binderanteil, neuer Prozess
→ + Mechanische Spannungen

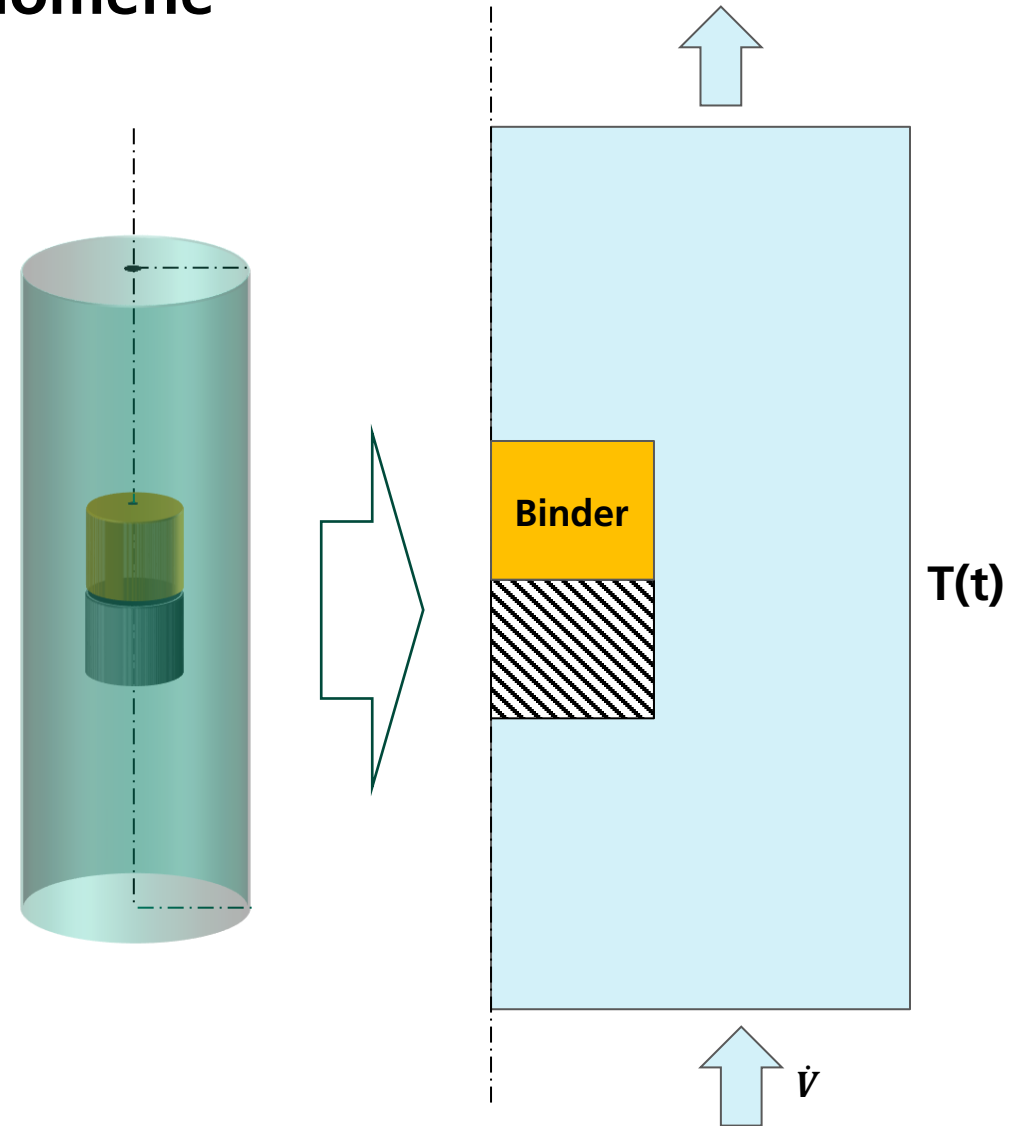


Entbinderung – im Modell berücksichtigte Phänomene

- Für Modellierung in Stufe 4 benötigte Prozesse
 - Wärmeübertragung
 - Chemische Reaktionen des Binders (Oxidation, Pyrolyse)
 - Gasfluss und Druckaufbau während des Prozesses
 - Mechanische Spannungen durch Druck- und Temperaturgradienten

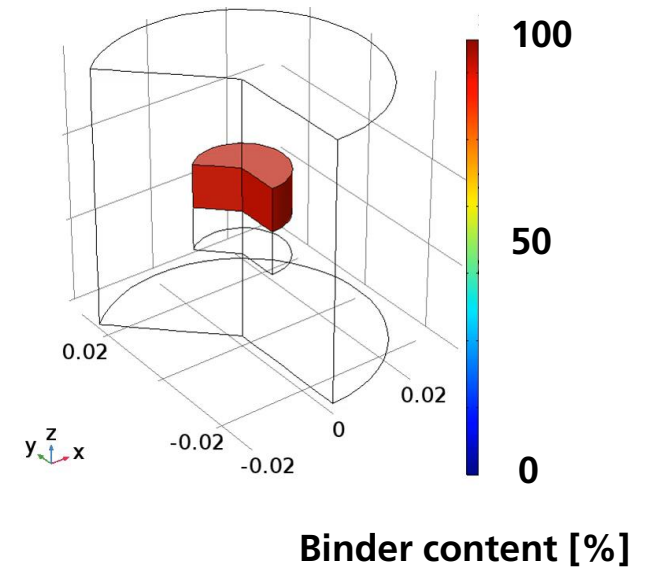
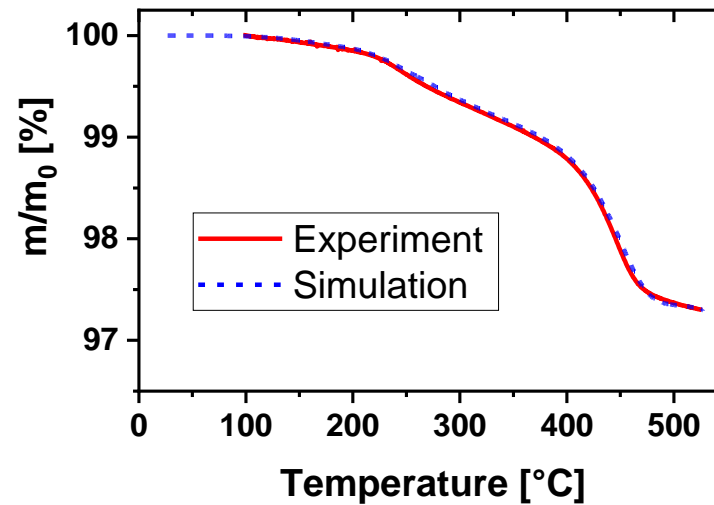
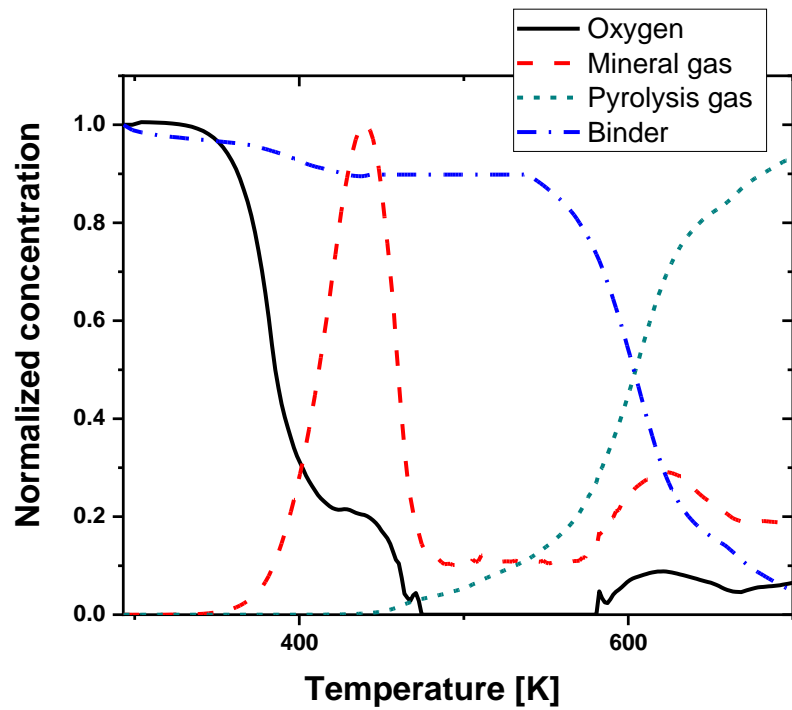
- Der Masseverlust Δm bestimmt die Kinetik:

$$\frac{dm}{dt} = e^{a+b\frac{1}{T}}$$



Entbinderung – einfaches Beispiel

- Ergebnisse für zylindrische Probe
- Sowohl Pyrolyse als auch Oxidation berücksichtigt



Anwender-spezifische Apps zur Thermoprozess-Optimierung

Eigenschaften der Apps

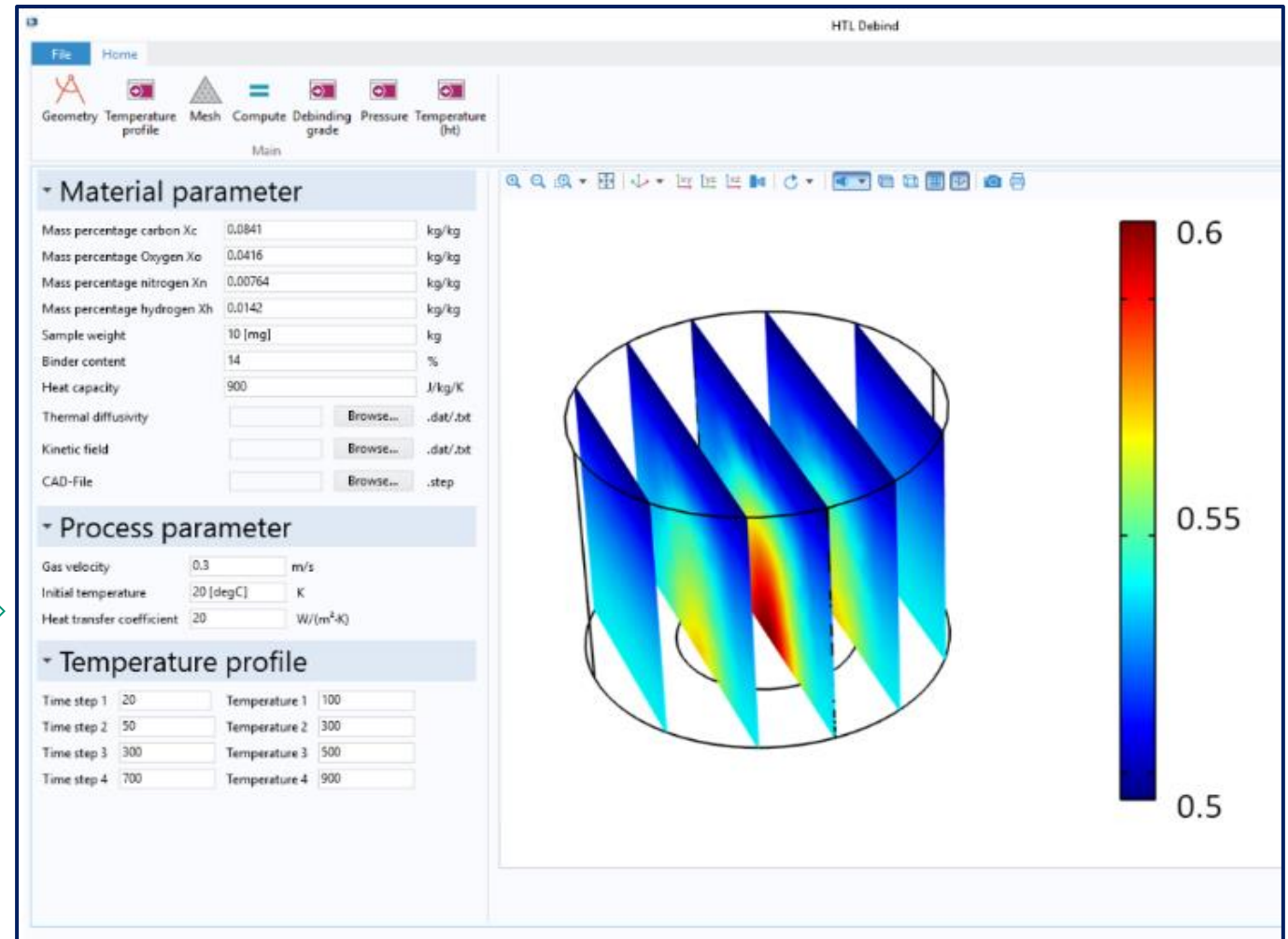
- Materialmodell implementiert
- Einlesen der Produktgeometrie (CAD)
- Variable Prozessbedingungen
- Ausgabe von Ergebnissen (Endform, mech. Spannungen etc.)

Bereits realisierte Wärmeprozesse

- Entbinderung
- Pyrolyse / Dehydratation
- Sintern

Optionen (in Arbeit)

- Scale-up ↔ Brennstapel / Ofen
- Schmelzinfiltration



Experiment-basiertes Kontinuumsmodell zur Sinter-Optimierung

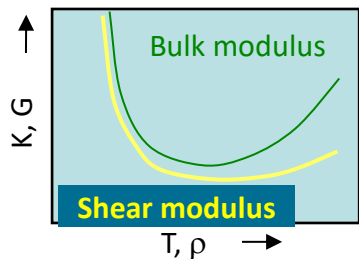
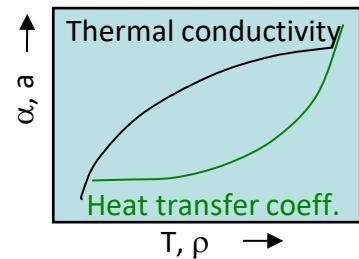
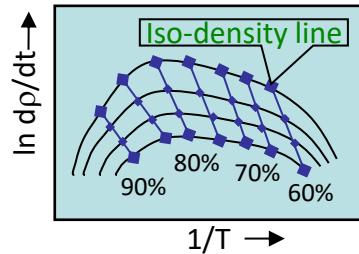
In-Situ-Messung

Optische Dilatometrie

Laser-Flash

TMA + ...

Parametrisierung



Kinetic Field

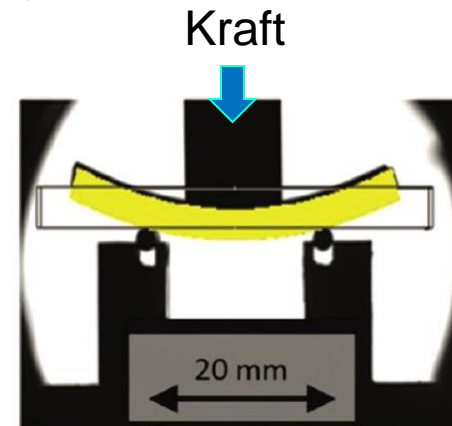
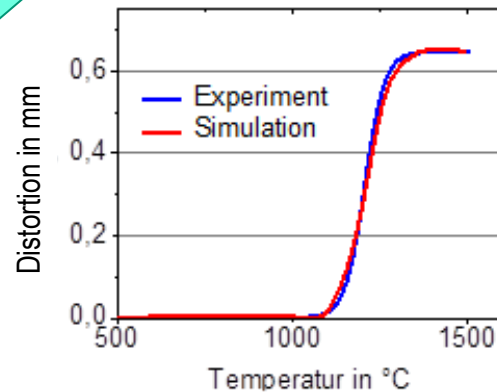
Temperatur-Feld

Spannungs-Feld

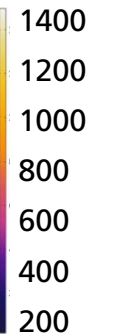
FE Simulation



Validierung



Beispiel: 3D-gedruckte Keramik



Anwender-spezifische Sinter-App

Sintering

Home

Geometry Mesh Compute 3D-Plot Densification Temperature

Main

Material parameter

Green density kg/m³

Final density kg/m³

CAD-File

Sample diameter mm

Sample height mm

CAD-Import .stl/.step

Gravity direction

Process/simulation parameter

Gas velocity m/s

Initial temperature °C

End temperature °C

Heat rate K/min

Process time min

Time step min

Mesh size

Temperature profile


Time [min]	Temperature [°C]
0	900
650	1500
1800	1500
1900	1500

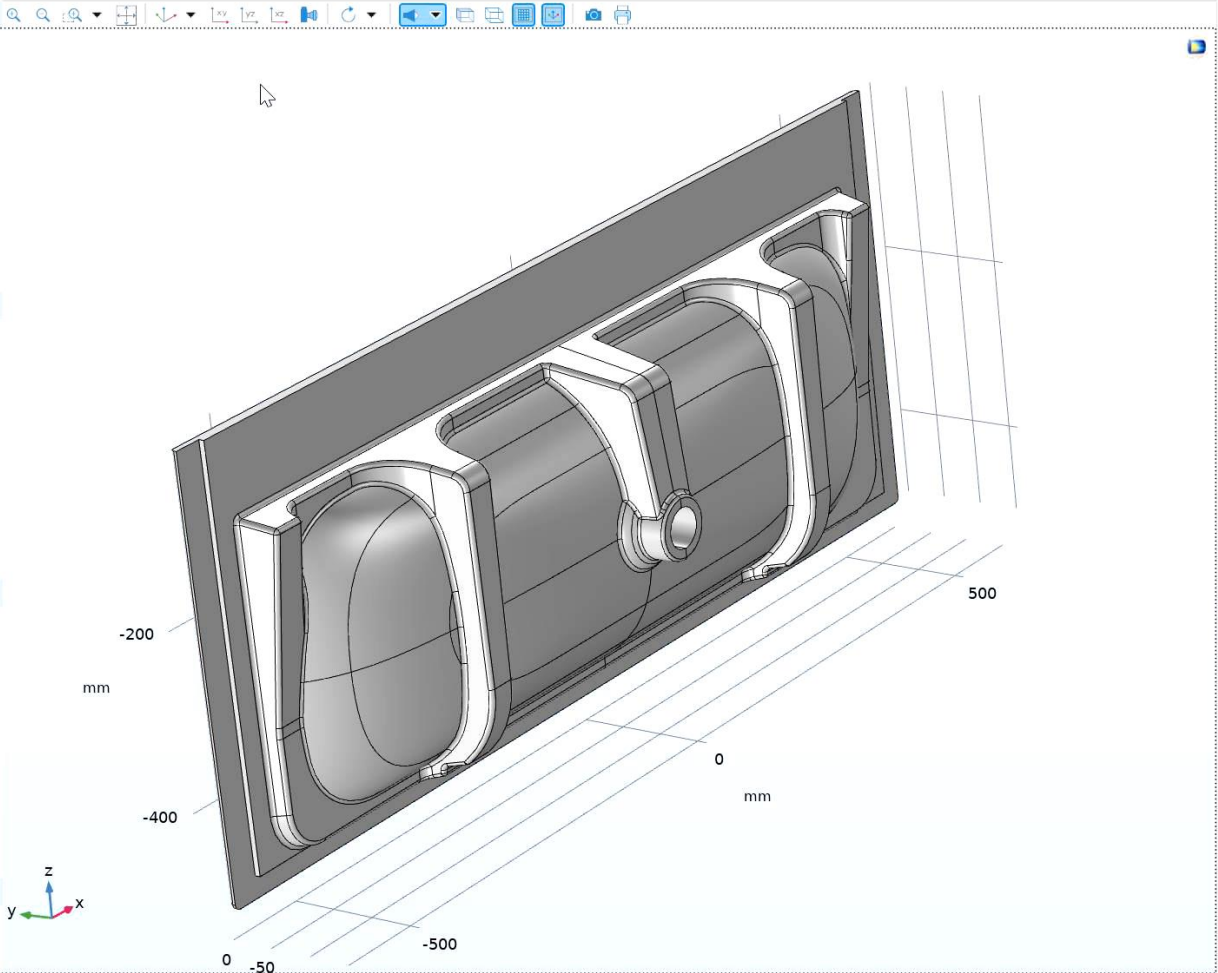
Constraints

Surrounding Choosing areas, that are in contact with the furnace atmosphere

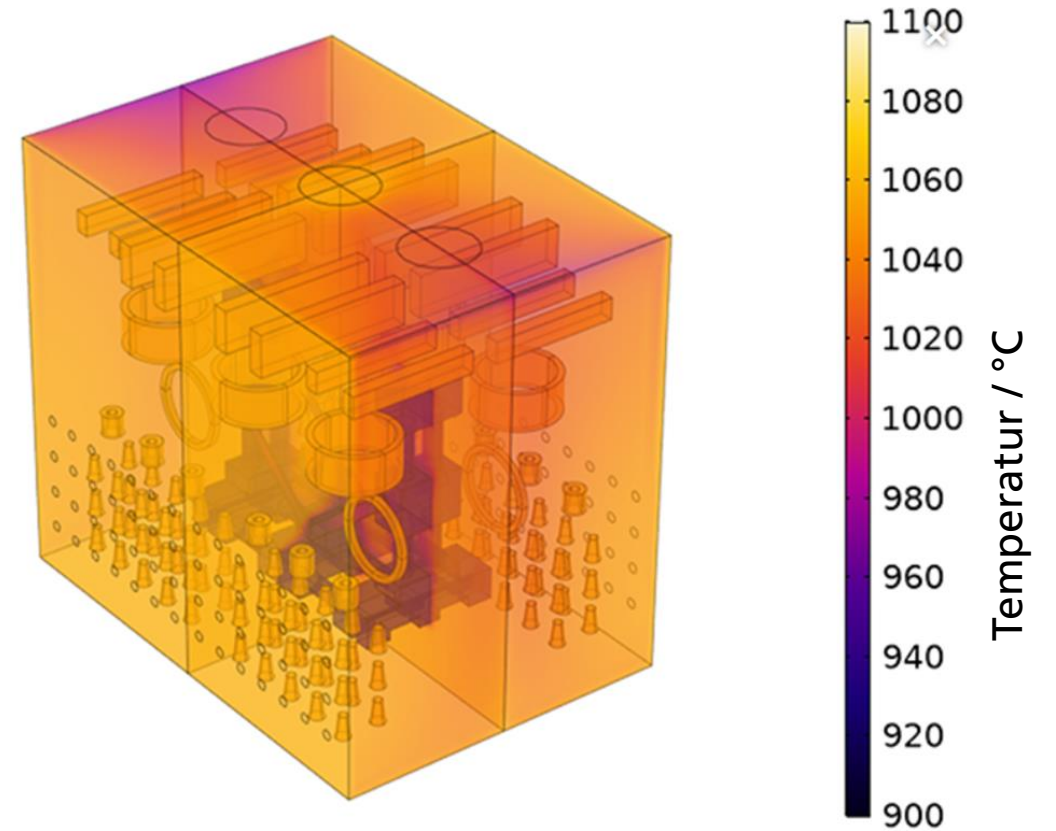
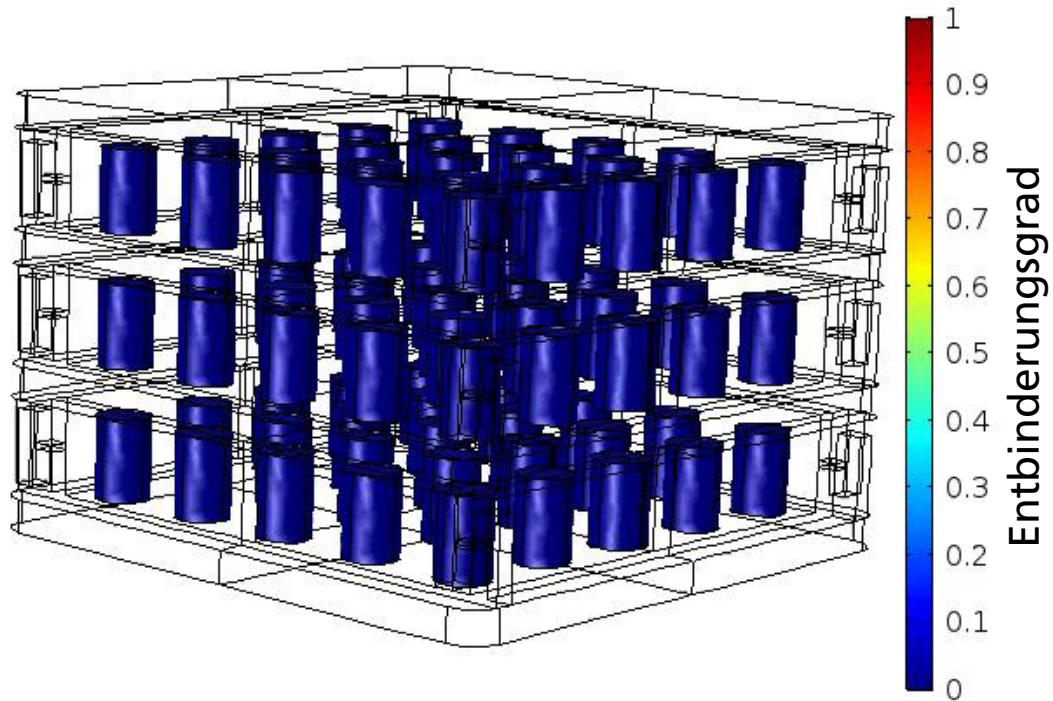
Ground Choosing areas, that are in contact with a solid underground (eg. kiln furniture)

Time step Variable





Hochskalierung auf Industrieofen: Brennstapel → Gesamtofen



© Fraunhofer-Zentrum HTL
Temperaturausbildung im Kammerofen

Gefördert durch:

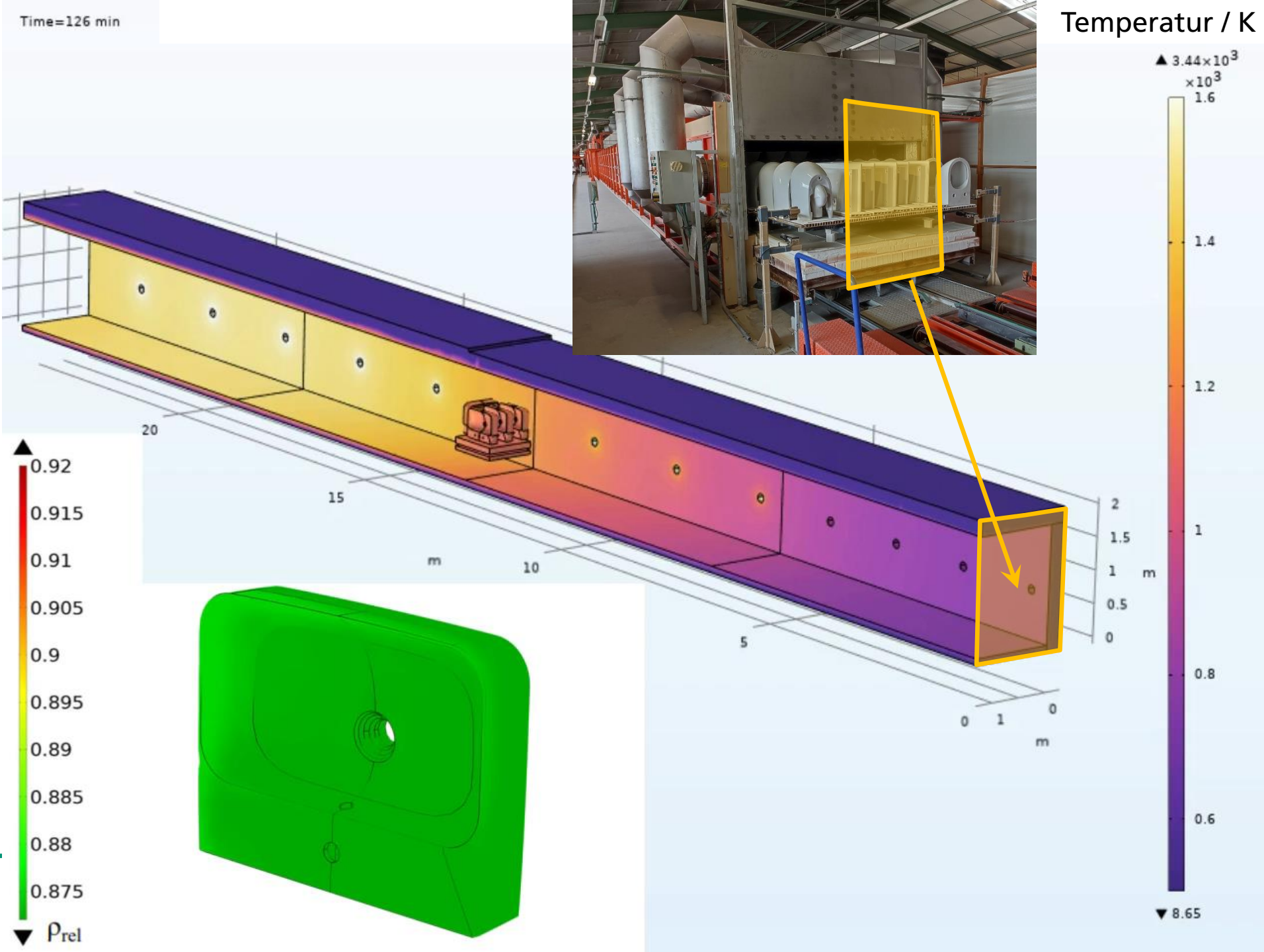


aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Verbundprojekt FAVORIT

Beispiel für
bewegtes
Brenngut:

Kopplung eines
Thermoprozess-
Zwillings an
Industrieofen-
Modell
(Tunnelofen-
Abschnitt)



Beispiel Verbundprojekt HTPgeox (2020 – 2024)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

■ HTPgeox:

Energieeffiziente **Hoch**temperaturprozesse für große und **geometrisch komplexe** Bauteile

■ Projektpartner:

- Villeroy & Boch AG



- Keramischer OFENBAU GmbH



- Meprovision GmbH & Co KG

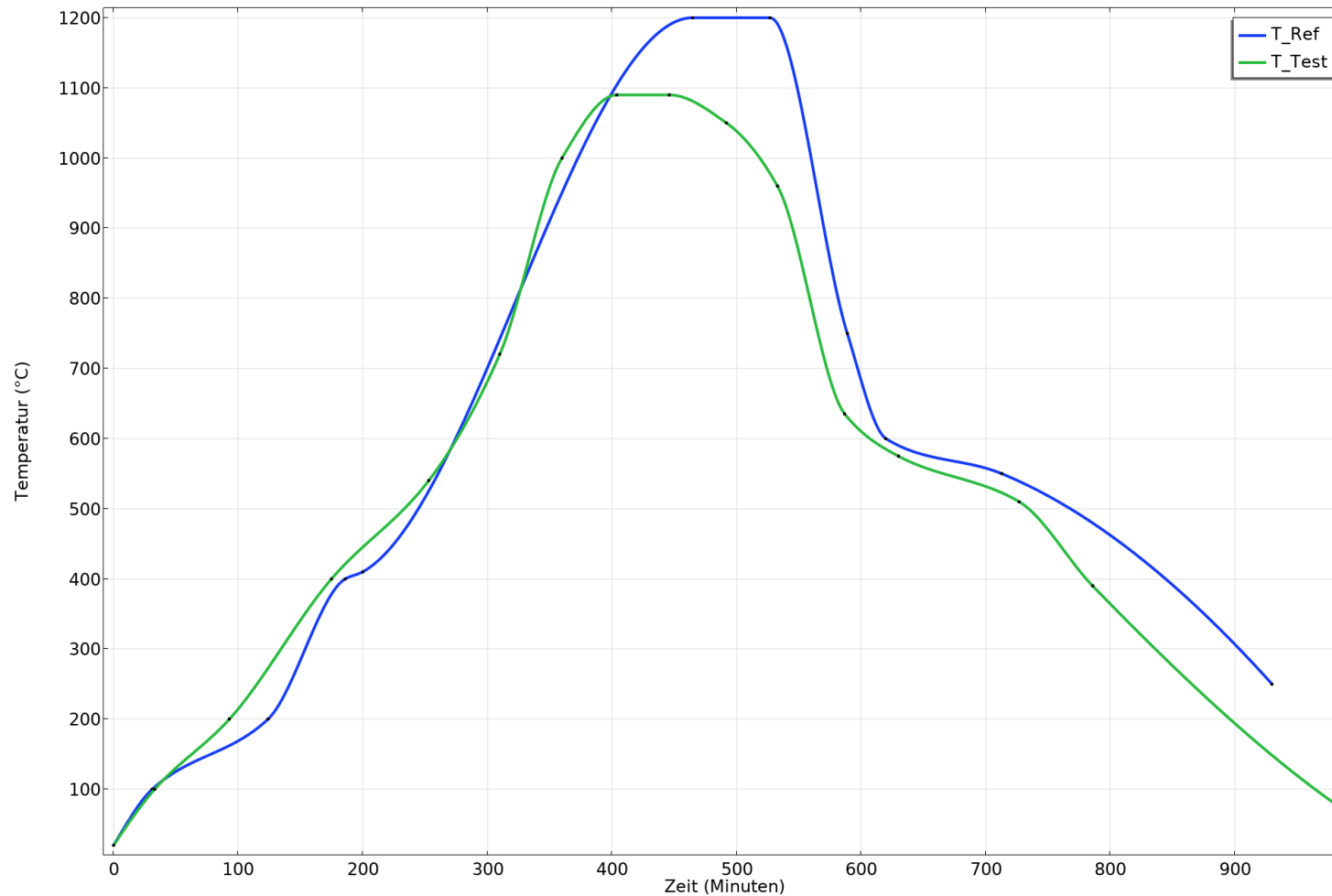


- Fraunhofer ISC, Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau HTL

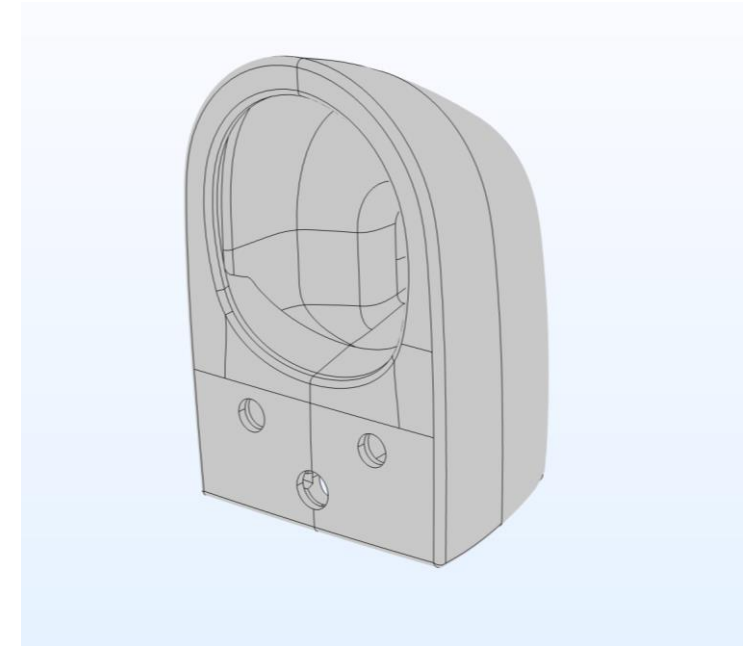


Validierung Thermoprozessmodell am Beispiel Sanitärkeramik

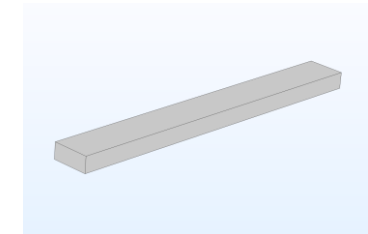
Referenztemperaturprofil T_{Ref} und „falsches“
Vergleichsprofil T_{Test} für zu niedrige Enddichte



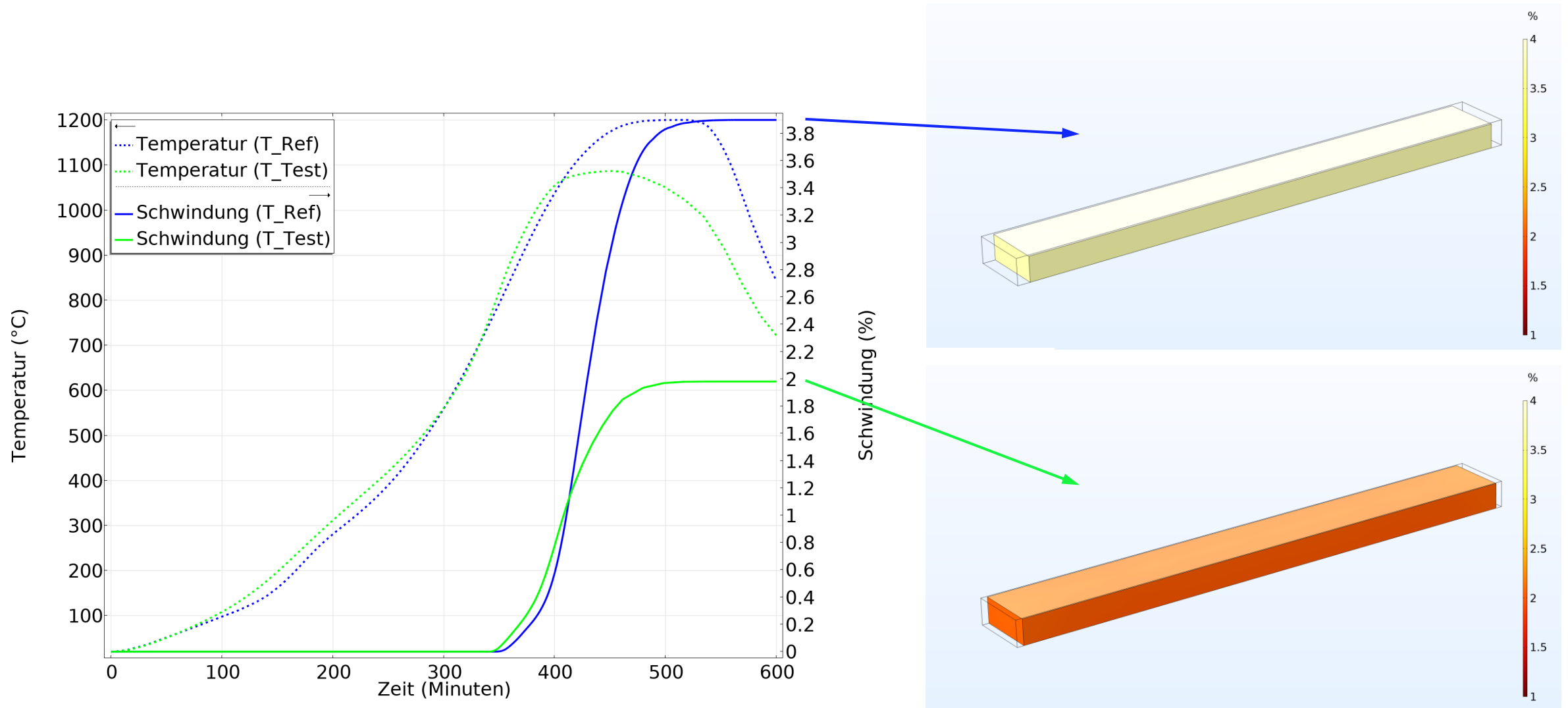
WC (Villeroy & Boch)



Einfaches Kalibrierobjekt
(Schwindungs-/Deformationsleiste)



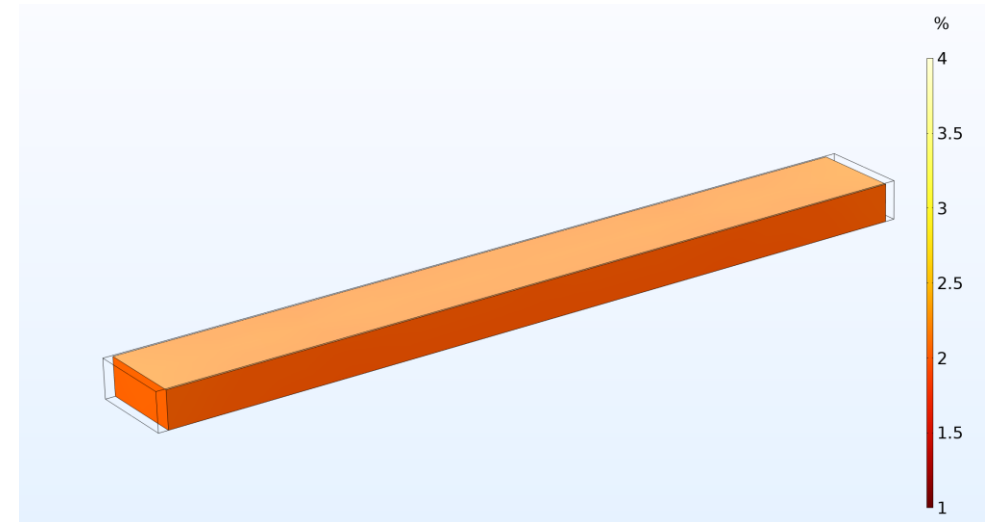
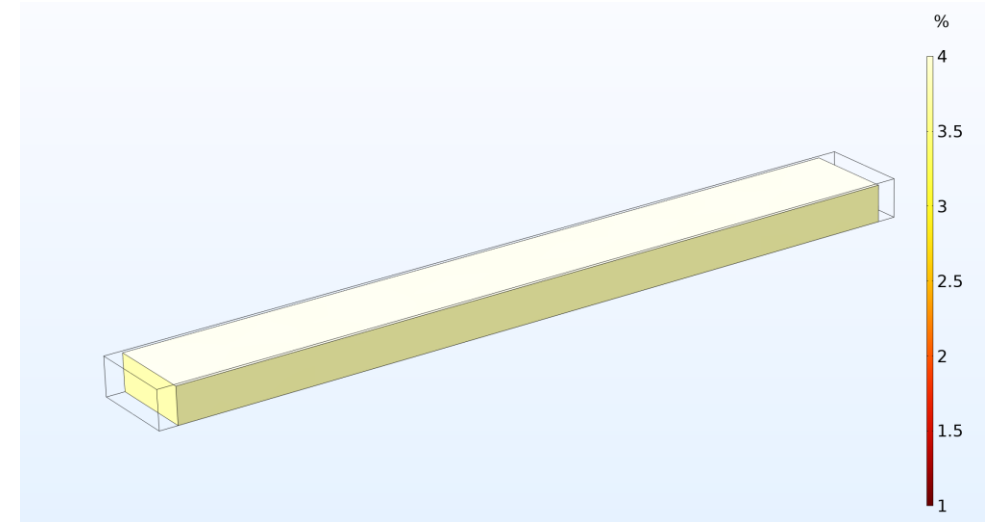
Validierung Thermoprozessmodell am Beispiel Sanitärkeramik



Validierung Thermoprozessmodell am Beispiel Sanitärkeramik

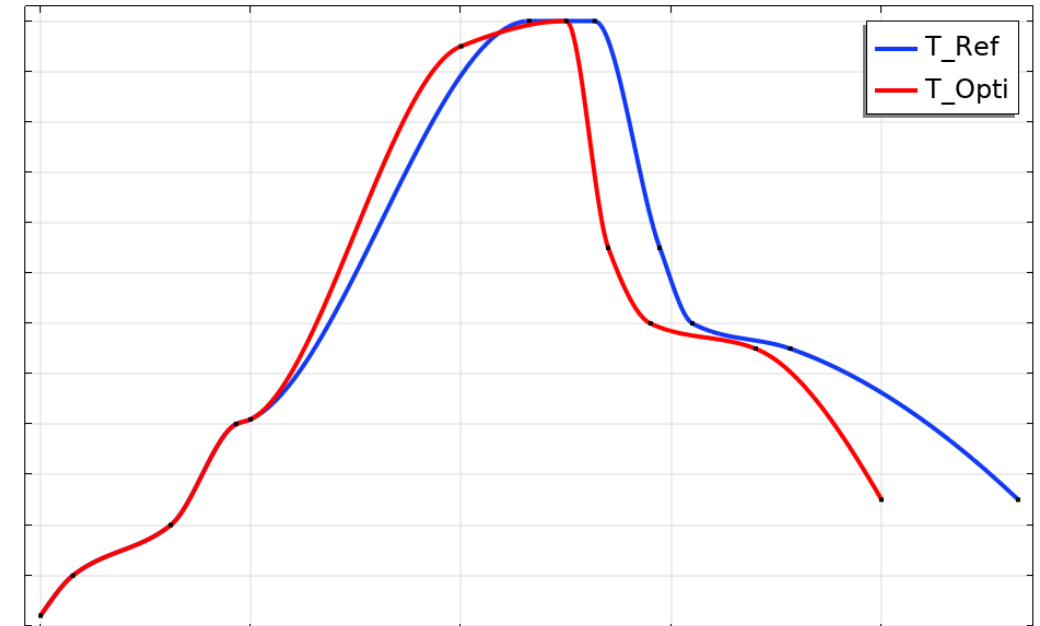
	Messung	Simulation	Relative Abweichung
Schwindungsstäbchen 1; Referenzkurve (T_ref)	3,27 %	3,77 %	-13 %
Schwindungsstäbchen 2; Referenzkurve (T_ref)	3,87 %	3,77 %	+3%
Schwindungsstäbchen 3; Testkurve (T_Test)	1,7 %	2,03 %	-15 %

→ Modellvorhersagen treffen innerhalb der experimentellen Streuung sehr gut zu



Einsparpotenzial optimierte Brennkurve

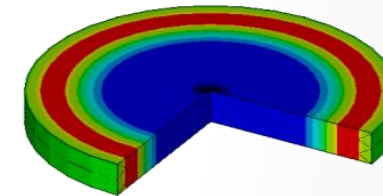
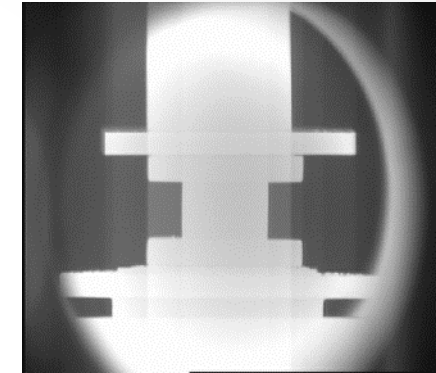
- Auf Basis des validierten Modells wurden optimierte, unter Beibehaltung der Produktqualität energiesparende Temperaturzyklen entwickelt
- Einsparpotenzial für einen Tunnelofen (bei Villeroy & Boch AG im Werk Mettlach) bei Umsetzung der optimierten Brennkurven:
750 – 1.500 MWh / Jahr
- Im Rahmen von HTPgeox wurden weitere Einsparpotenziale durch Digitalisierung erarbeitet, unter anderem durch
 - Detailanalysen von Ofendaten
 - Automatische optische Erkennung von Bauteilfehlern vor dem Ofeneintritt



Älteres, umgesetztes Beispiel für Prozessoptimierung – Projekt ENITEC: Optimierung der Brennkurve von Hochspannungsisolatoren

Vorgehensweise

- In-situ-Messung von Sinterkinetik, Kriecheigenschaften und Wärmeleitfähigkeit, Dehydratisierung und Phasenumwandlungen
- FE-Berechnung der Spannungen während des Erwärmungsprozesses
- Optimierung der Brennkurve



Ergebnis

- Verkürzung der Brenndauer um mehr als 40%
- Isolatoren (Durchmesser ca. 0,3 m, Höhe 2 m) zeigten keinen Festigkeitsabfall !
- Erhebliche Einsparungen bei den Brennkosten

Großbrand bei Lapp Insulators in Wunsiedel am 10.09.2024



Zusammenfassung

- Digitalisierung ist die Zukunft – auch bei Thermoprozessen
- Methodik des HTL: material-zentrierter, auf In-Situ Messdaten basierender Ansatz für die prädiktive Prozessmodellierung
- Finite-Elemente-Modelle für (beliebige) Produktgeometrie
 - Sintern: Vorhersage von Schrumpfung & Formverzug unter Last
 - Entbinderung: Innendruck, thermische Gradienten und Spannungen
 - ähnliche Modelle für andere Prozesse (Trocknung, Schmelzinfiltration ...)
- Prozessoptimierung (z.B. der Energieeffizienz) am Computer inkl. Brennstapel und Ofen
- → benutzerspezifische Apps zur individuellen Thermoprozessoptimierung

Ausblick / in Entwicklung:

- automatische Prozessoptimierung
- Reduzierte Modelle für Ofensteuerung

Herzlicher Dank an alle Projektpartner sowie an die Fördergeber:

- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
- Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

■ **Dr. Gerhard Seifert**

Fraunhofer-Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau HTL

Gottlieb-Keim-Straße 62

95448 Bayreuth

Tel. +49 921 78510-350

E-Mail: gerhard.seifert@isc.fraunhofer.de



**Vielen Dank für Ihr
Interesse!**