



Berechnung von Transport - und Lagerbehältern für Brennelemente

Herausforderungen bei thermischen und thermo-mechanischen Simulationen

3D-Konstrukteurstag, Universität Bayreuth

17. September 2014

Christian Dinkel, M.Sc.

Dr.-Ing. Bernd Roith (ENSI)

Michael Frisch, M.Sc.

Prof. Dr.-Ing Frank Rieg

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD



Aufbau von Brennelementbehältern	3
Behälterschutzziele	4
Schutzziel Wärmeabfuhr	5
Thermische Simulationen	6
Thermo-mechanische Simulationen	12
Thermische Spaltbedingung	13
Wärmeübertragung im Gasspalt	16
Verifizierung der Spaltbedingung	17
Zusammenfassung und Ausblick	18

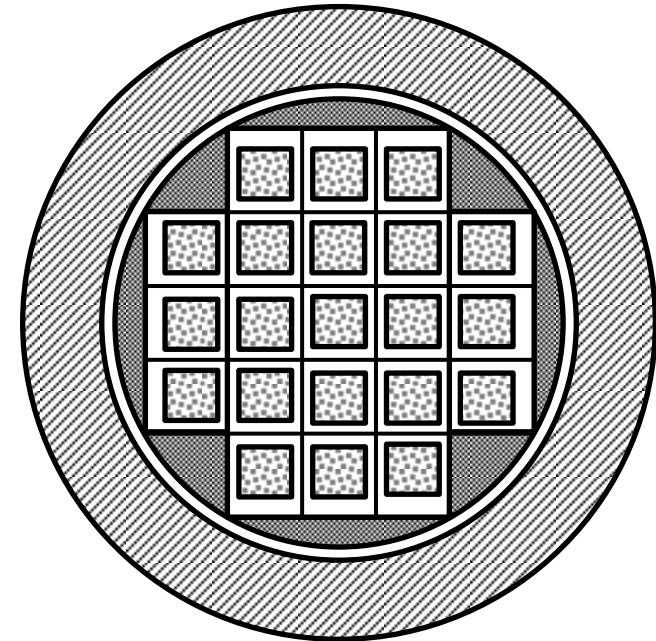
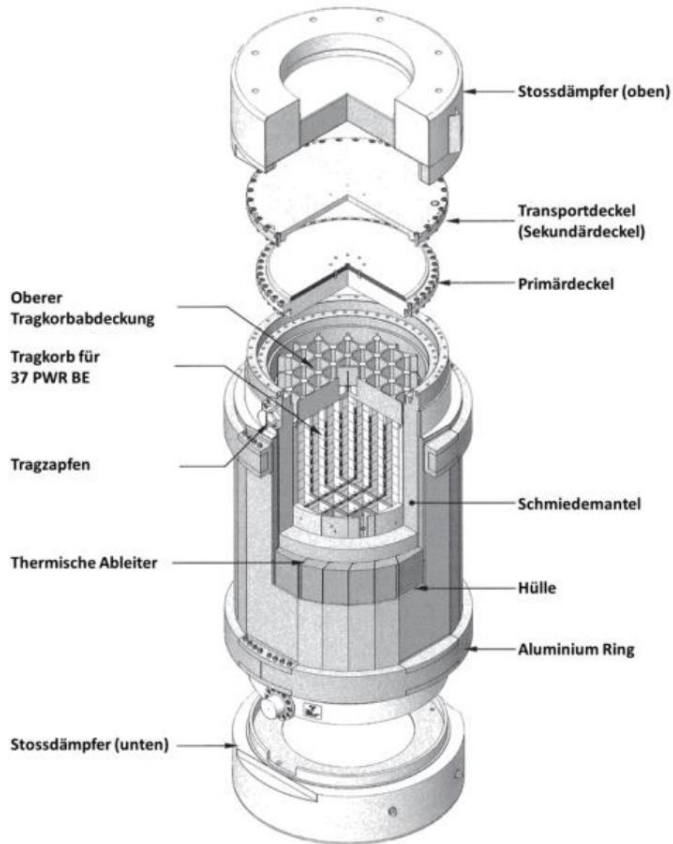
Aufbau von Brennelementbehältern

Explosionszeichnung und schematische Darstellung

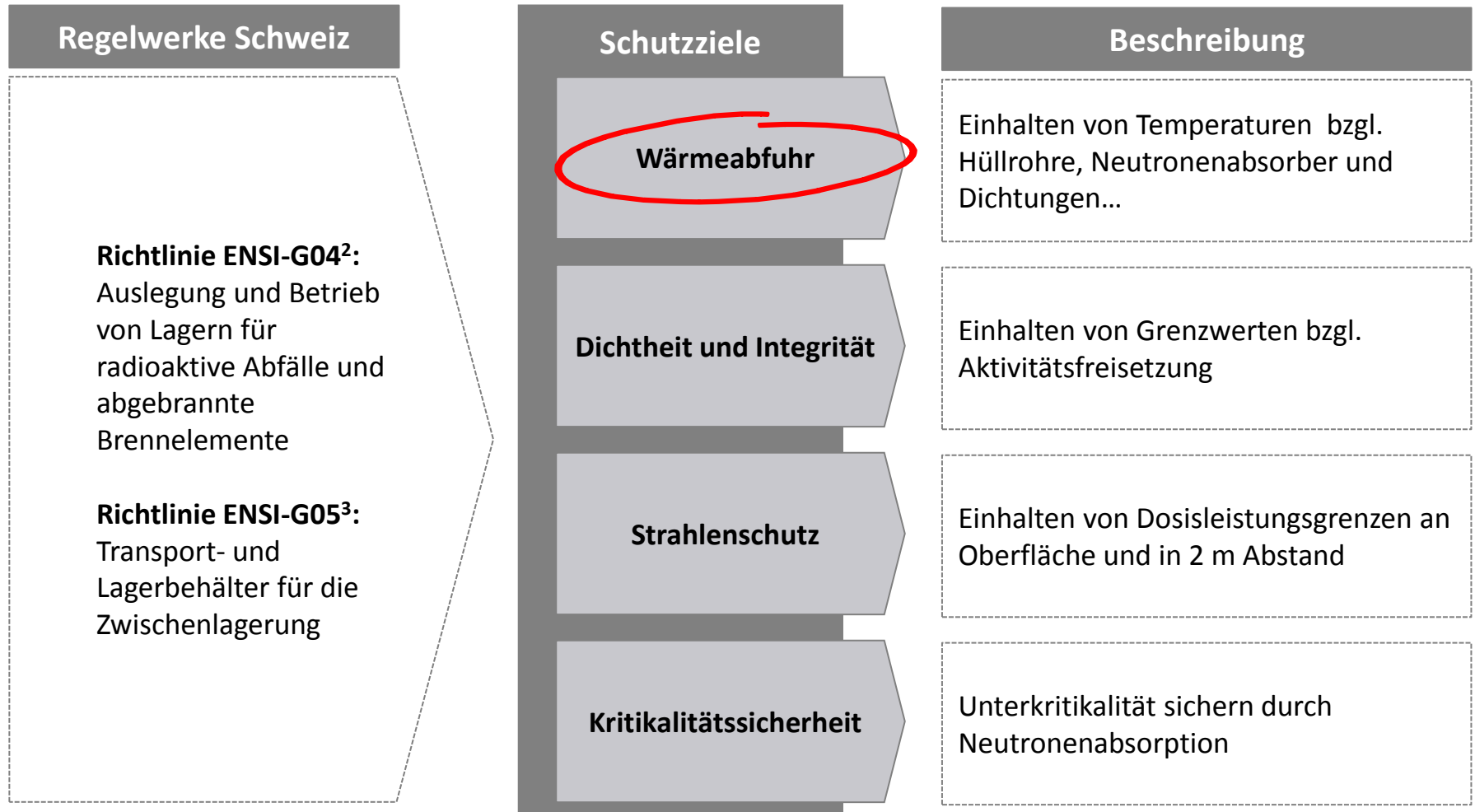


Aufbau Transport- und Lagerbehälter¹

Schematische Darstellung



1) Bild: Fa. TN International. www.areva.com [1]



2) Richtlinie ENSI-G04 [2]

3) Richtlinie ENSI-G05 [3]

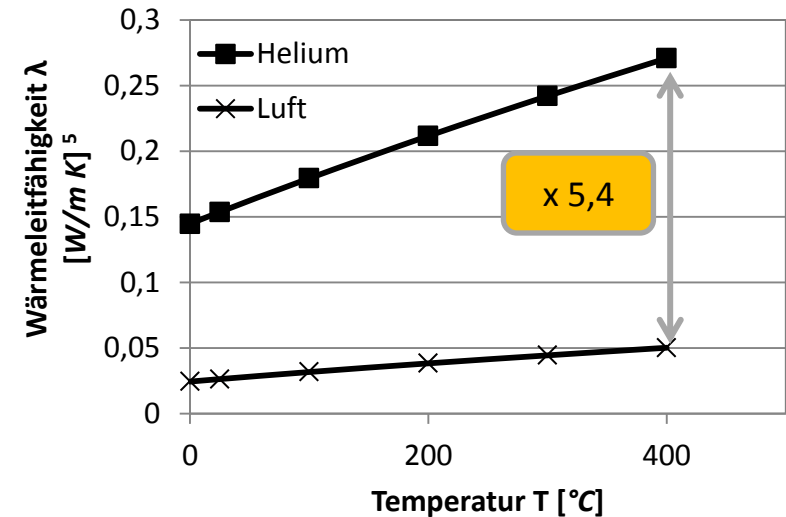


Anforderungen ENSI-G05⁴

- Begrenzung der Temperatur im Lagergut und in Behälterwerkstoffen
- Nachweisführung:
 - Max. Hüllrohrtemperatur bei Brennelementen
 - An der Innenoberfläche und Außenoberfläche des Behälters
 - An der Innen- und Außenseite des Moderatormaterials
 - An den Hauptdichtungen der Behälterabschlüsse
- Begrenzung der Temperatur an Behälteroberflächen und in Gebäudeteilen des Zwischenlagers
 - Grenztemperatur 120 °C an Behälteroberflächen
 - Grenztemperatur 100 °C an Gebäudeteilen, die in Kontakt mit Behälter stehen
 - Oder entsprechend eines weiterführenden Nachweises

Umsetzung durch Design

- Einsatz von Materialien mit Kombination aus hoher Festigkeit und hoher Wärmeleitfähigkeit
- Kühlrippen an Behälteraußenseite zur Vergrößerung der Wärmeübertragungsfläche
- Einsatz von Helium als Füllgas



4) ENSI-G05 [3]

5) VDI Wärmetlas [4]

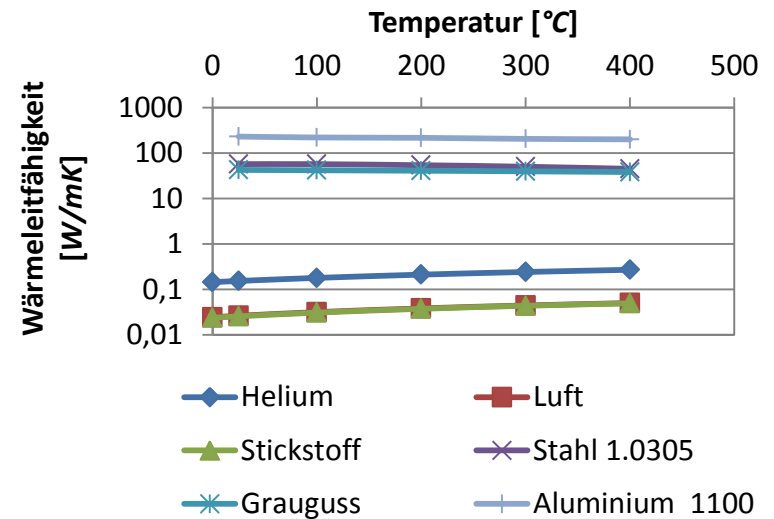


Modellbildung⁶

- Große Unterschiede bzgl. Wärmeleitfähigkeit von Metallen und Gasen
- Dünne metallische Körper können großen Einfluss haben

Beschreibung⁷

- Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit von Metallen und Gasen



6) Koch [5]
7) VDI Wärmeatlas [4]

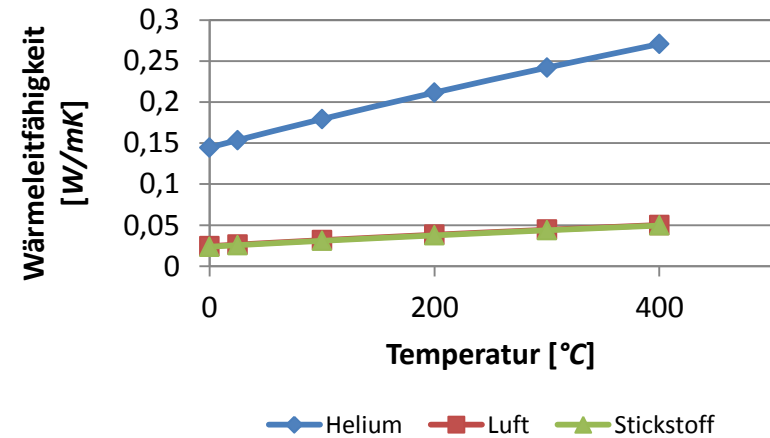


Modellbildung⁷

- Große Unterschiede bzgl. Wärmeleitfähigkeit von Metallen und Gasen
- Dünne metallische Körper können großen Einfluss haben
- Wärmeleitfähigkeit ggf. temperaturabhängig definieren

Beschreibung⁸

- Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit von Gasen



7) Koch [5]

8) VDI Wärmeatlas [4]

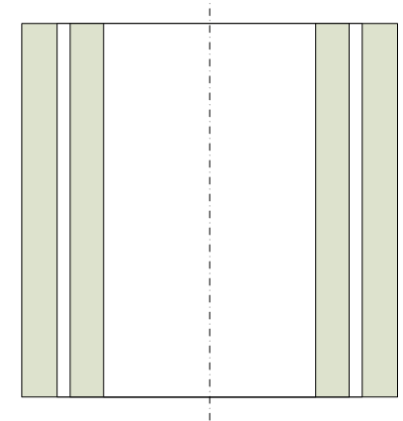
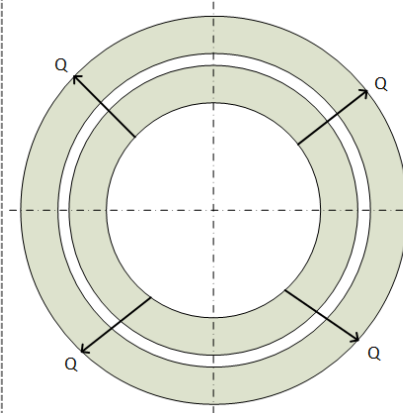


Modellbildung⁹

- Große Unterschiede bzgl. Wärmeleitfähigkeit von Metallen und Gasen
- Dünne metallische Körper können großen Einfluss haben
- Wärmeleitfähigkeit ggf. temperaturabhängig definieren
- Gase und Nichtmetalle können ggf. vernachlässigt werden, wenn sie nicht als Barriere wirken



Beschreibung



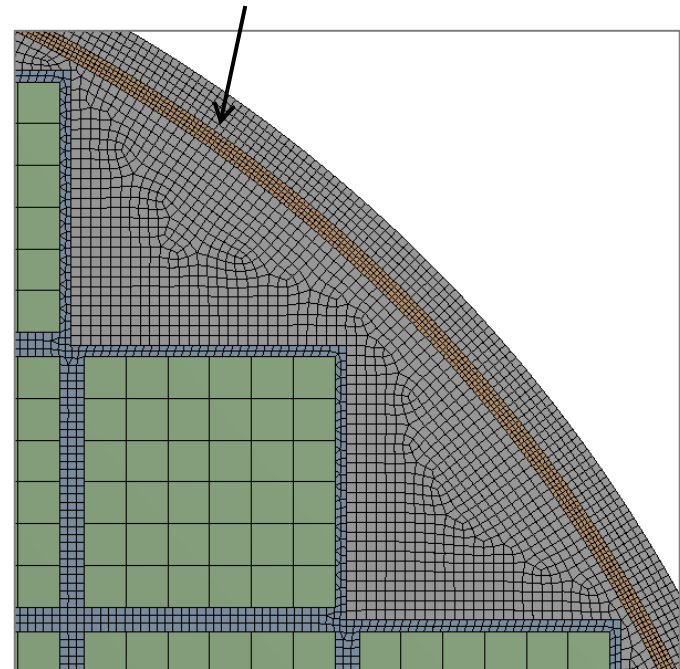


Modellbildung¹⁰

- Große Unterschiede bzgl. Wärmeleitfähigkeit von Metallen und Gasen
- Dünne metallische Körper können großen Einfluss haben
- Wärmeleitfähigkeit ggf. temperaturabhängig definieren
- Gase und Nichtmetalle können ggf. vernachlässigt werden, wenn sie nicht als Barriere wirken
- Gase auch als Solid-Elemente modellierbar

Beschreibung

- Vernetzter Gasspalt aus Solid-Elementen (braun)



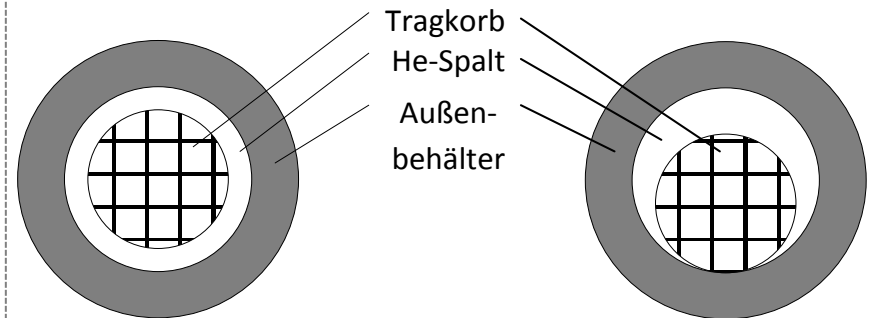
¹⁰) Koch [5]



Modellbildung¹¹

- Große Unterschiede bzgl. Wärmeleitfähigkeit von Metallen und Gasen
- Dünne metallische Körper können großen Einfluss haben
- Wärmeleitfähigkeit ggf. temperaturabhängig definieren
- Gase und Nichtmetalle können ggf. vernachlässigt werden, wenn sie nicht als Barriere wirken
- Gase auch als Solid-Elemente modellierbar
- Kontaktstellen können großen Einfluss haben
- Vernetzungsschwierigkeiten durch dünne Strukturen

Beschreibung

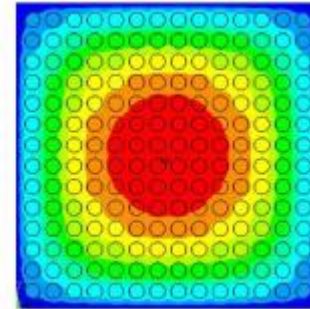


11) Koch [5]



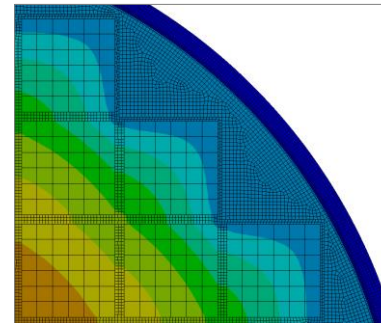
1. Ziel

Temperatur der Hüllrohre
der Brennelemente



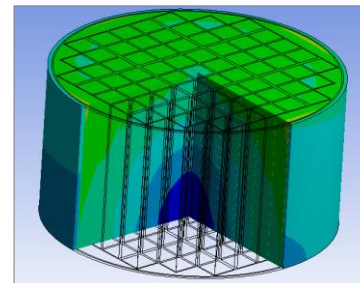
2. Ziel

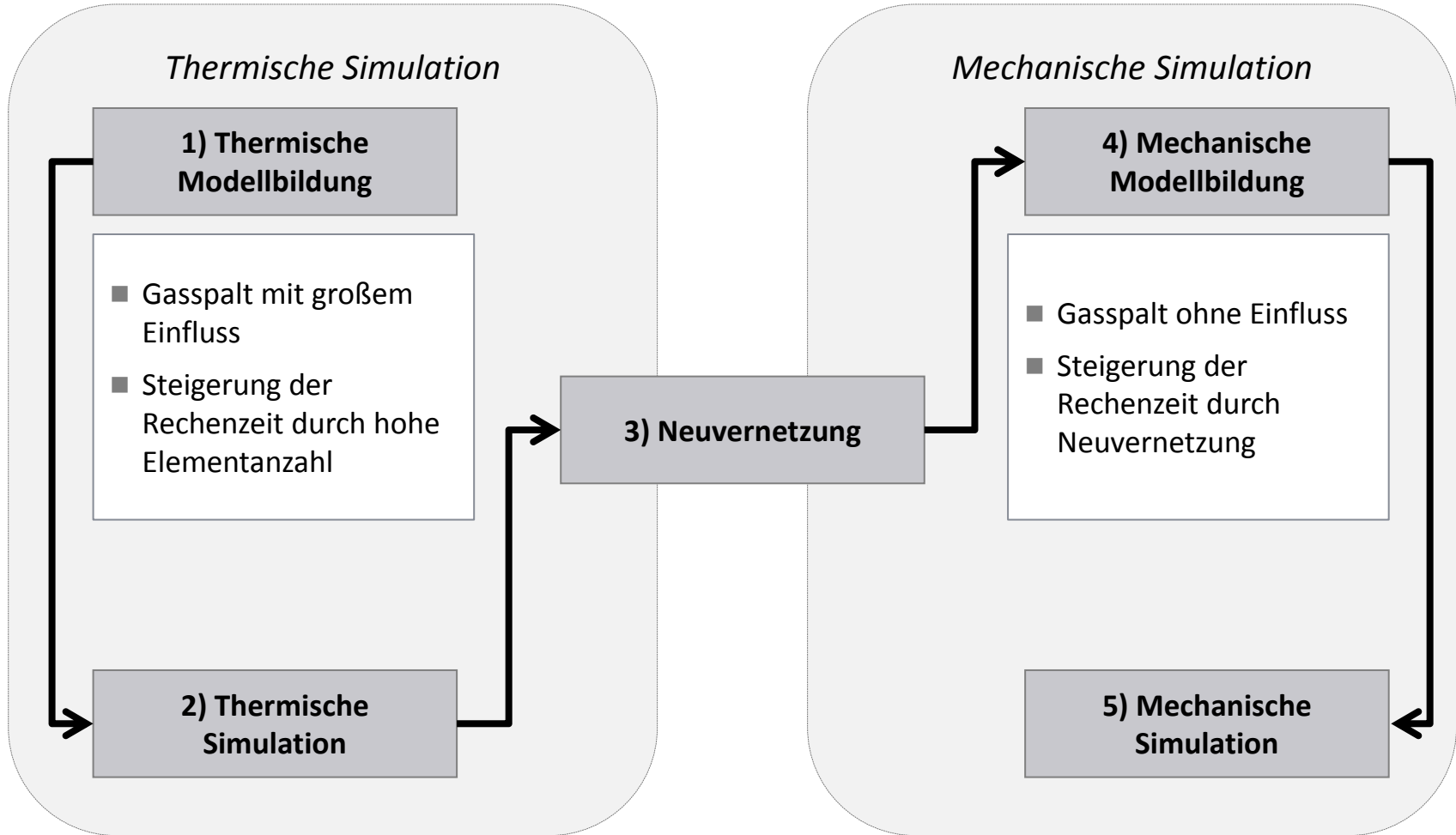
Temperaturverteilung im
Behälterinneren



3. Ziel

Äußere Wärmeabfuhr
und
Oberflächentemperatur





Thermische Spaltbedingung

Kombiniertes Modell



Ziel

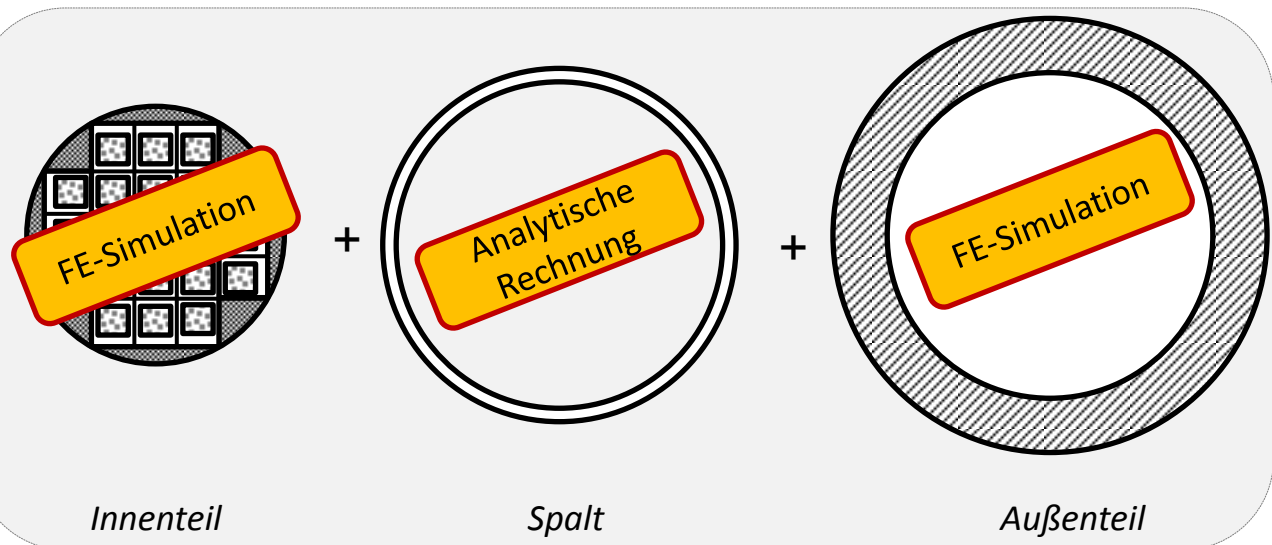
Erzeugung eines gemeinsam nutzbaren Modells für thermische und thermo-mechanische Berechnung ohne neuerliche Vernetzung

Umsetzung

Kombination aus analytischen und simulativen Verfahren zur Substitution des wichtigsten Gasspalts auf Grundlage von Z88 durch Erzeugung einer *thermischen Spaltbedingung*



Ergebnis



Thermische Spaltbedingung

Konzept und Etablierung



Konzeptidee: Getrennte FE-Simulation durch thermische Spaltbedingung

1 Lösung Innenbehälter

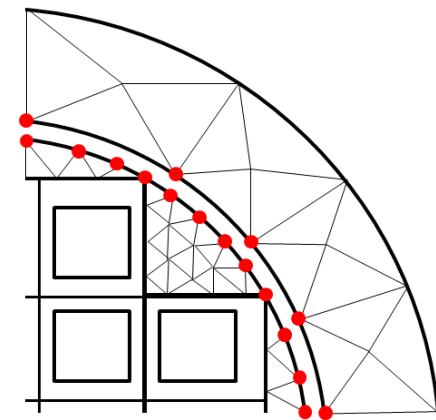
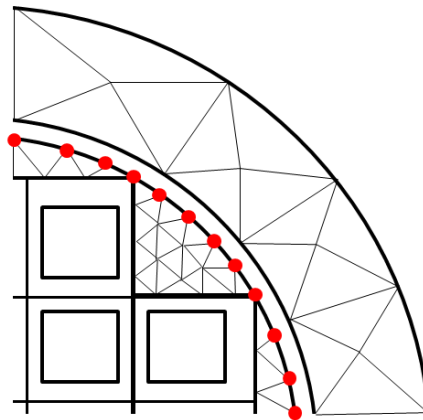
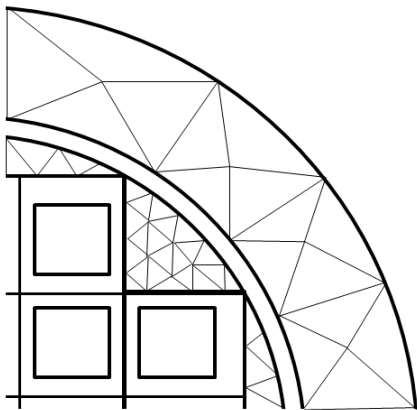
- Thermische FE-Analyse des Innenbehälters
- Außenbehälter existiert in dieser Simulation nicht

2 Analytische Spaltbetrachtung

- Knotentemperaturen an Außenfläche des Innenbehälters sind bekannt
- Analytische Betrachtung der Wärmeübertragung im unvernetzten Spalt

3 Lösung Außenbehälter

- Ergebnisse aus 2 werden auf Innenseite des Außenbehälters aufgegeben
- Thermische FE-Analyse des Außenbehälters und Zusammenführung der thermischen Lösungen



Thermische Spaltbedingung

Konzept und Etablierung



Konzeptidee: Getrennte FE-Simulation

1 Lösung Innenbehälter

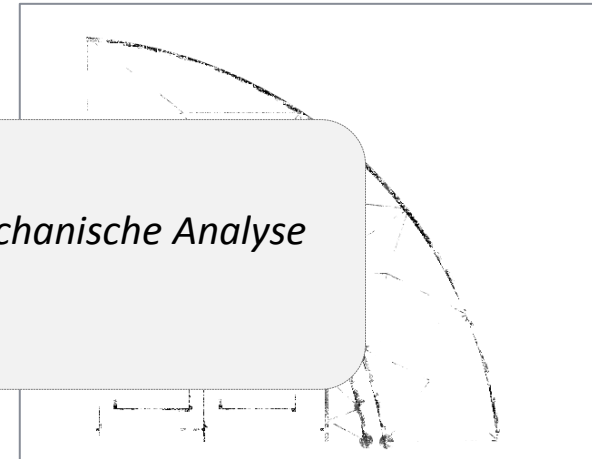
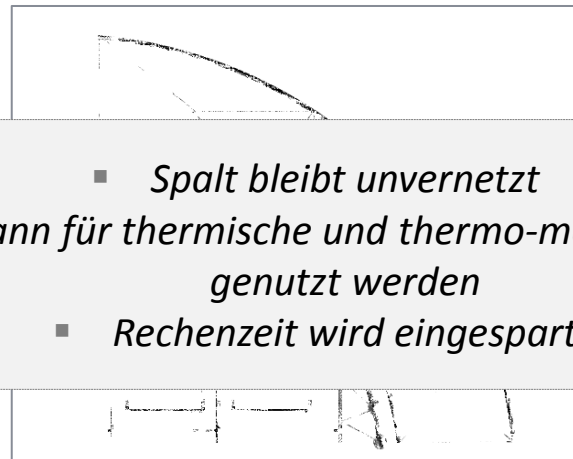
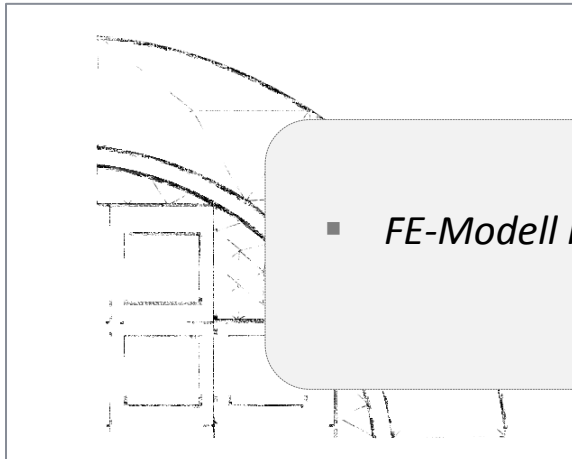
- Thermische FE-Analyse des Innenbehälters
- Außenbehälter existiert in dieser Simulation nicht

2 Analytische Spaltbetrachtung

- Knotentemperaturen an Außenfläche des Innenbehälters sind bekannt
- Analytische Betrachtung der Wärmeübertragung im unvernetztem Spalt

3 Lösung Außenbehälter

- Ergebnisse aus 2 werden auf Innenseite des Außenbehälters aufgegeben
- Thermische FE-Analyse des Außenbehälters und Zusammenführung der thermischen Lösungen



- *Spalt bleibt unvernetzt*
- *FE-Modell kann für thermische und thermo-mechanische Analyse genutzt werden*
- *Rechenzeit wird eingespart*

Wärmeübertragung im Gasspalt

Analytische Betrachtung



Wärmeübertragung im He-Spalt¹²



Konvektion

$$\dot{Q} = \alpha A (T_1 - T_2)$$

Wärmeleitung

$$\dot{Q} = \lambda 2\pi L \cdot \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_a/r_i)}$$

Wärmestrahlung

$$\dot{Q} = C_{12}A(T_1^4 - T_2^4)$$

Kennwert

$$\lambda_{LK} = Nu \cdot \lambda$$

Kennwert

$$\lambda_{Strahlung} = 4LC_{12}T_m^3$$

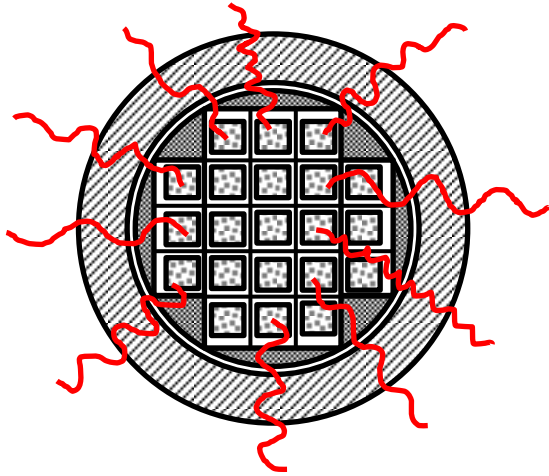
$$\dot{Q}_{Ges} = \frac{A(\lambda_{Strahlung} + \lambda_{LK})}{L(T_1 - T_2)}$$

¹²) VDI Wärmeatlas [4]



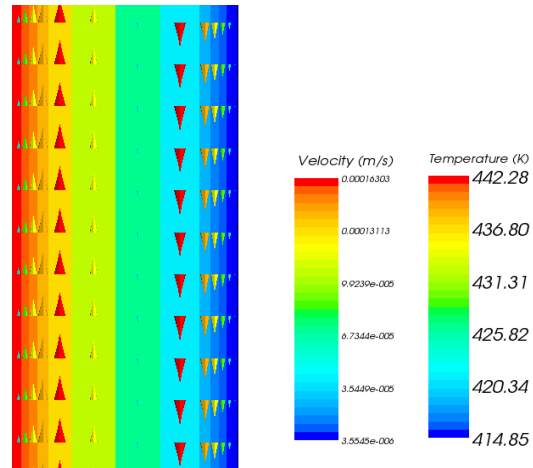
Analytische Rechnungen

- Berechnung der Wärmeübertragung nach VDI-Wärmeatlas¹³



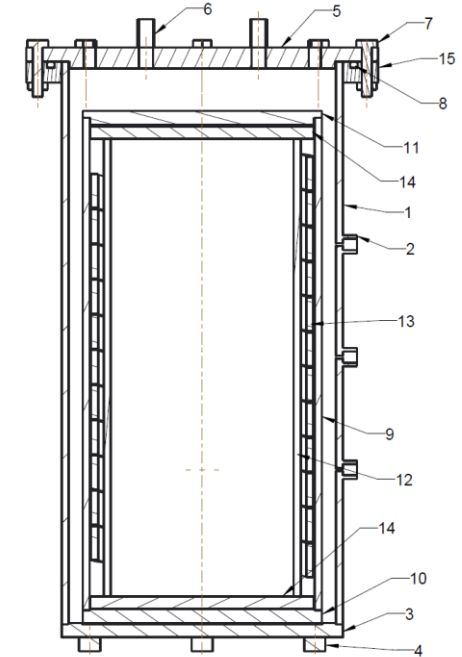
CFD-Simulationen

- Untersuchung der Strömungsgeschwindigkeiten etwaiger Konvektionsströmungen



Versuchsaufbau

- Verifizierung durch eigene Messergebnisse





Zusammenfassung

- Brennelementbehälter können thermisch und thermo-mechanisch simuliert werden
- Simulationen aufgrund von Gasspalten mit kleinen Abmessungen oft sehr aufwendig
- Verknüpfung von analytischer Rechnung und Simulation auf Basis von Z88 zur Einsparung von Rechenzeit und zur Vereinfachung der Simulation



Ausblick

- Ausarbeitung der thermischen Spaltbedingung
- Verknüpfung der inneren und äußeren FE-Simulation
- Erarbeitung eines Konvektionsolvers für Z88Aurora





Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Bitte stellen Sie nun Ihre Fragen...





- [1] Bild: Fa. TN International. www.aveva.com

- [2] Schweizer Eidgenossenschaft: Auslegung und Betrieb von Lagern für radioaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente. Richtlinie ENSI-G04. 2010

- [3] Schweizer Eidgenossenschaft: Transport- und Lagerbehälter für die Zwischenlagerung. Richtlinie ENSI-G05. 2008

- [4] Verein Deutscher Ingenieure: VDI Wärmeatlas. 11. Auflage. Springer Verlag. Berlin Heidelberg. 2013.

- [5] Koch, F.: FEA in der Sicherheitstechnik. Universität Bayreuth. Bayreuth. 2014.