

Sicherheit in Technik und Chemie



NUMERISCHE SIMULATION VON TRANSPORT- UND LAGERBEHÄLTERN FÜR RADIOAKTIVE STOFFE



Portfolio

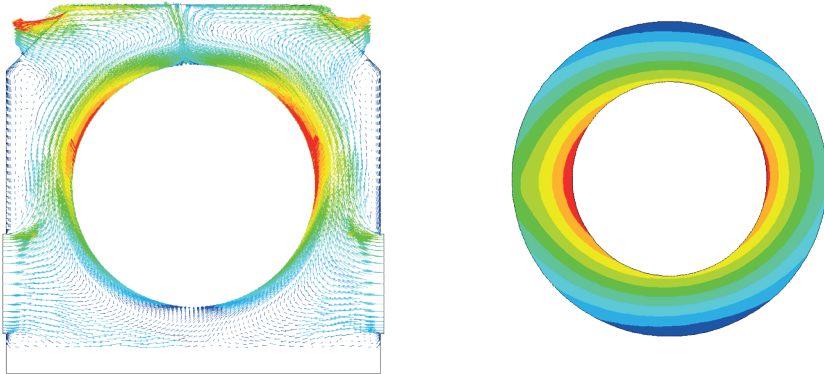
Das Aufgabenportfolio der BAM schließt gutachterliche und hoheitliche Tätigkeiten auf dem Gebiet der Sicherheitsbewertung von Behältern bzw. Umschließungen für Gefahrgüter ein. Die sicherheitstechnische Begutachtung von Transport- und Lagerbehältern für radioaktive Stoffe erfolgt unter Berücksichtigung nationaler und internationaler Regelwerke. Dabei kommt numerischen Verfahren wie der Finite-Elemente-Methode (FEM) und Computational-Fluid-Dynamics (CFD) eine große Bedeutung zu. Der Einsatz von Simulationswerkzeugen für Prüfungs- und Analyseaufgaben erfolgt dabei im Zusammenspiel mit einem ständigen Kompetenzausbau. Die Bearbeitung wissenschaftlicher Fragestellungen erlaubt die gezielte Weiterentwicklung der sicherheitstechnischen Bewertungsmethoden.

Die BAM setzt etablierte Programmpakete für FEM und CFD wie Abaqus, Ansys/Mechanical, Ansys/CFX, LS-Dyna, ANSA, MSC Patran einschließlich C- und Fortran-Compiler zur Erweiterung der Funktionalität, z. B. durch eigene Materialroutinen, ein. Für die Simulationen stehen individuell auf das numerische Lösungsverfahren zugeschnittene SMP-Workstations zur Verfügung. Bei Bedarf kann auf einen Computercluster zugegriffen werden.

Darüber hinaus verfügt die BAM über langjährige Erfahrung im Bereich der experimentellen Behälter- und Bauteilerprobung. Dies ermöglicht eine versuchstechnische Validierung numerischer Ergebnisse für mechanische und thermische Problemstellungen.

Die folgenden Seiten geben anhand ausgewählter Beispiele einen Einblick in die Simulationskompetenz der BAM.

Temperaturfeldberechnung und Umströmung eines Transportbehälters unter einer Schutzhaube



Transportbehälter für wärmeerzeugende radioaktive Stoffe werden in der Regel unter einer Schutzhaube transportiert. Die Wärme soll passiv, also ohne eine aktive Kühlmaßnahme, aus dem Behälter abgeführt werden. Analytische Berechnungsansätze für eine auftriebsinduzierte freie Konvektion um einen Zylinder, z. B. nach den Vorgaben des VDI, ergeben lediglich eine einheitliche Temperatur über den Umfang. Bei der hier gezeigten numerischen Lösung wird ein zylindrischer Behälter unter einer Transporthaube seitlich angeströmt. Zusätzlich wird eine Asymmetrie in Form einer geringeren einseitigen Zulufttemperatur, etwa durch Verschattung begründet, berücksichtigt. Die Strömung um einen Behälter wird mittels einer CFD-Analyse berechnet (linke Abbildung), um ein realistisches Temperaturfeld für den Behälter zu ermitteln (rechte Abbildung). Die Simulation mit Ansys/CFX beinhaltet u. a. die:

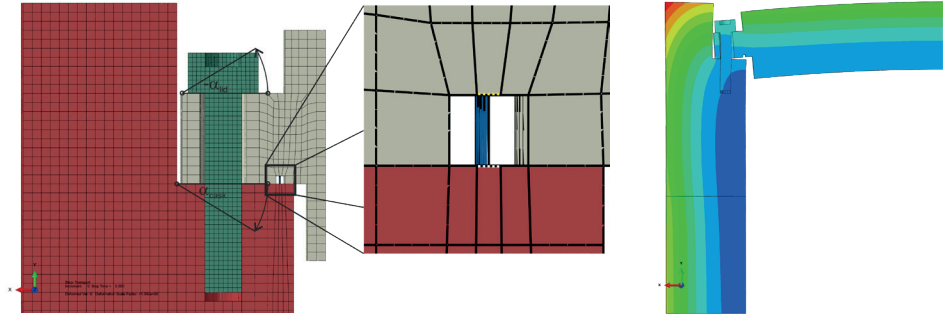
- Ermittlung der Druckverlustbeiwerte an der Ein- und Ausströmung,
- Wahl geeigneter Kennwerte für das strömende Medium, hier Luft,
- Wahl eines geeigneten Turbulenzmodells,
- Netzerstellung in Abhängigkeit des gewählten Turbulenzmodells und
- Anpassung diverser Relaxations- und Stabilisationsparameter zur Erzielung einer konvergenten Strömung.

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Claus W. Bletzer

✉ claus.bletzer@bam.de

Dichtheit von Behältern unter thermischer Beanspruchung



Die Regularien für Behälter zum Transport von Brennelementen und hochaktiven Abfällen erfordern die Sicherheitsbewertung gegenüber einem 30-minütigen umhüllenden Feuer von 800 °C. Die Verformungen des Deckelsystems und der Behälterwandungen aufgrund der thermischen Einwirkung kann die Funktion der dichten Umschließung beeinträchtigen. Die Dichtheit kann mittels impliziter, thermisch-mechanisch gekoppelter Simulation des Verschlusssystems während der Feuer- und Abkühlphase geprüft werden, es ergeben sich u. a. folgende Teilschritte:

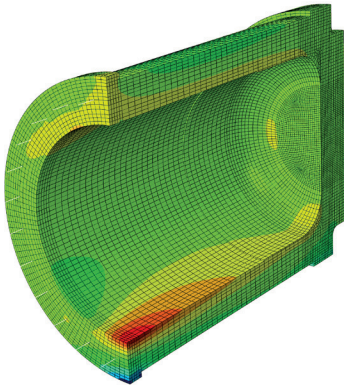
- experimentelles Bestimmen des Verhaltens der eingesetzten Metaldichtungen (bestehend aus Verpresskraft, Aufweitung und Leckagerate) und Aufarbeiten der Daten,
- Berechnen der Montagekonfiguration mit vorgespannten Schrauben und verpresster Dichtung (Ausschnitte der Geometrie linke Abbildung),
- thermische Simulation der Wärmestrahlung- und -leitung (rechte Abbildung), und schrittweises Übertragen der ermittelten Temperaturen auf das implizit berechnete mechanische Modell (Abaqus/Standard) und
- Bewertung der simulierten Aufweitung der Dichtung gegen die experimentell bestimmte zulässige Aufweitung.

Ansprechpartner

Dr.-Ing. Jens Sterthaus

✉ jens.sterthaus@bam.de

Numerische Analysen von Fallversuchen mit Lagerbehältern ohne Stoßdämpfer auf harte Untergründe



Lagerbehälter für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung für das Endlager KONRAD haben gemäß den dafür geltenden Endlagerungsbedingungen Fallversuche ohne Stoßdämpfer auf eine Betonplatte bestimmter Güte zu überstehen (rechte Abbildung). Die linke Abbildung zeigt die mittels FE-Analyse ermittelte Spannungsverteilung in einem zylindrischen Gussbehälter zum Zeitpunkt der maximalen Beanspruchung nach einem Fall aus 0,8 m Höhe. Der Deckel ist zur übersichtlicheren Darstellung ausgeblendet. Den numerischen Analysen kommen in derartigen Szenarien folgende Aufgaben zu:

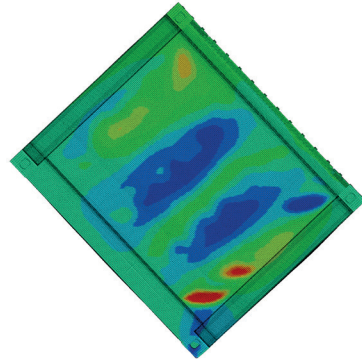
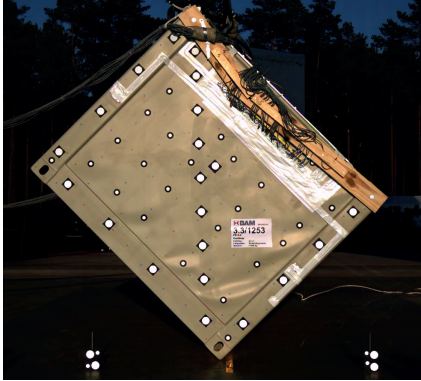
- Parameterstudien im Vorfeld eines Fallversuchsprogramms zur Ermittlung abdeckender Fallpositionen und Randbedingungen,
- versuchsbegleitende Bewertung der Beanspruchungen an für die Messtechnik unzugänglichen Stellen,
- Untersuchung des ungestörten Spannungszustandes zur Ermittlung von Größe und Position rissartiger Werkstofffehler für experimentelle bruchmechanische Sicherheitsnachweise und
- Simulation als Alternative zum Fallversuch bei hinreichend gut validierten FE-Modellen.

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Mike Weber

✉ mike.weber@bam.de

Beanspruchungsanalyse zur Fallprüfung an Stahlblechcontainern für das Endlager Konrad



Stahlblechcontainer für das Endlager Konrad müssen über allgemeine Grundanforderungen hinaus auch mechanischen Betriebs- und Störfallbelastungen standhalten. Diesbezüglich stellen experimentelle Fallversuche einen zentralen Bestandteil der Bauartprüfung entsprechender Behältertypen dar. Die numerische Simulation mittels der FEM stellt eine effiziente und flexible Alternative dar, sofern die verwendeten Modelle hinreichend verifiziert und validiert sind. Dazu zählen folgende Teilaspekte:

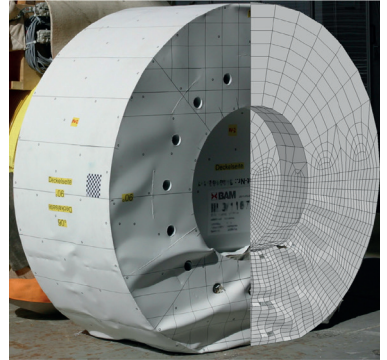
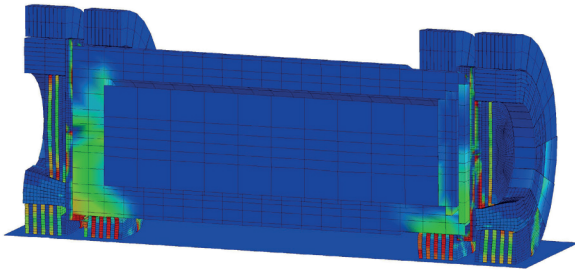
- Bestimmung dehnratenabhängiger Werkstoffeigenschaften anhand repräsentativer Versuche bei Variation der Belastungsgeschwindigkeit,
- Entwicklung eines FE-Modells zur realistischen Wiedergabe der kinematischen Eigenschaften und mechanischen Beanspruchungen der dünnwandigen Struktur im dynamischen Lastfall,
- Ermittlung ungünstigster Aufprallorientierungen hinsichtlich maximaler Beanspruchungen bzw. Verformungen und
- Verifizierung der numerischen Modellbildung anhand ausgewählter Fallversuche mit umfangreich instrumentierten Referenzbehältern.

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Christian Keller

✉ christian.keller@bam.de

Simulation des mechanischen Verhaltens holzgefüllter stoßdämpfender Bauteile unter Unfallbelastungen



Holzgefüllte, stoßdämpfende Bauteile von Transportbehältern für radioaktive Stoffe sind in der Lage, bei schweren mechanischen Unfallsituationen kinetische Energie in Formänderungsenergie umzuwandeln und schützen damit die Komponenten der dichten Umschließung. Durch große Verformungswege werden die maximal auf den Behälterkörper, die Deckel und das Inventar wirkenden Kräfte deutlich verringert. Hierfür wurde ein phänomenologisches Materialmodell für den expliziten FE-Solver LS-DYNA entwickelt. Dieses basiert auf einem Ersatzkontinuum, für das die Evolution der Fließfläche über die Mehrachsigkeit gesteuert wird. Der Simulationsprozess beinhaltet u. a.:

- experimentelle Ermittlung von dehnratenabhängigen Fließkurven für das Holz unter großen Deformationen und verschiedenen Mehrachsigkeitsbedingungen,
- Übertragung der ermittelten Fließkurven auf das Materialmodell,
- flexibel anpassbarer skriptgesteuerter Stoßdämpfermodellaufbau,
- Ermittlung der Verzögerungs-Zeit-Verläufe sowie der Beanspruchung der Komponenten der dichten Umschließung und
- Vergleich mit Ergebnissen von Fallversuchen mit Modellbehältern in Originalgröße.

Ansprechpartner

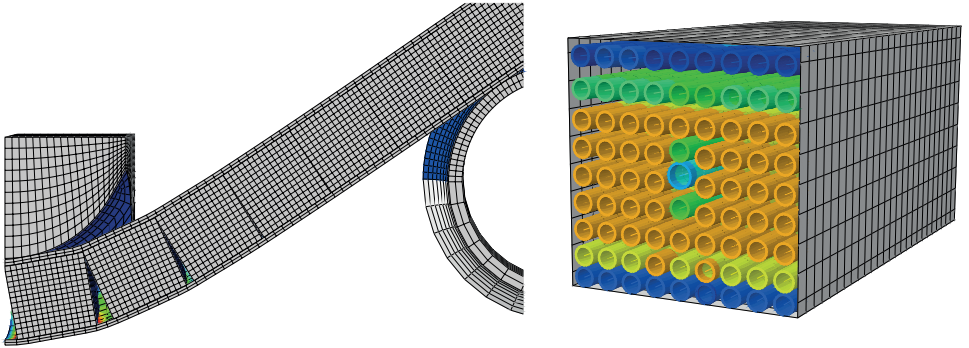
Dr.-Ing. Martin Neumann

✉ martin.neumann@bam.de

Dr.-Ing. Thorsten Schönfelder

✉ thorsten.schoenfelder@bam.de

Bewertung des mechanischen Verhaltens abgebrannter Brennelemente unter Transportunfallbeanspruchungen



Das mechanische Verhalten abgebrannter Brennelemente ist ein wichtiger Eingangsparameter für die Prüfung der Kritikalitätssicherheit von Behältern unter hypothetisch zu unterstellenden Unfallbelastungen. Die in den Regelwerken geforderten Testbedingungen können zu erheblichen Belastungen auf das Brennelement führen. Die numerische Analyse beinhaltet folgende Aspekte:

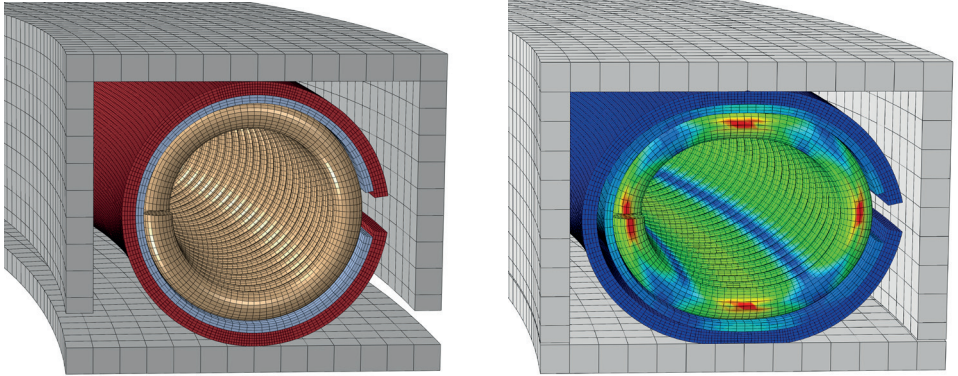
- Ermittlung der Materialeigenschaften abgebrannter Brennstäbe mittels eines Optimierungsverfahrens auf Basis experimenteller Biegeversuche in der heißen Zelle (linke Abbildung),
- dynamische Berechnung eines Brennelementsegments unter Unfallbedingungen mit Abaqus/Explicit (rechte Abbildung),
- flexibel anpassbarer skriptgesteuerter Modellaufbau,
- Ansatz einer experimentell durch einen Fallversuch ermittelten Verzögerungsbelastung und
- Bewertung der Beanspruchung der einzelnen Brennstäbe und Identifikation der maßgebenden Belastungen.

Ansprechpartner

Dr.-Ing. Konrad Linnemann

✉ konrad.linnemann@bam.de

3D-Modellierung von Metaldichtungen



Langzeitbeständige Metaldichtungen sind wesentliche Komponenten verschraubter Deckeldichtsysteme von Transport- und Lagerbehältern zur Realisierung des dichten Ein- schlusses radioaktiver Stoffe. Zur Gewährleistung der Sicherheit müssen Metaldichtungen auch extremen Belastungen wie z. B. Stoßbelastungen und Feuer bei Unfällen sowie für sehr lange Betriebszeiträume von mehreren Jahrzehnten standhalten. Eine geeignete Modellierung von Metaldichtungen mit der FEM ist daher eine notwendige Voraussetzung für verlässliche numerisch geführte Sicherheitsnachweise und berücksichtigt:

- Modellierung einer detailliert aufgebauten Metaldichtung mit Volumenelementen in Abaqus,
- Verifizierung des Modells durch experimentelle Untersuchungen,
- Einbettung des validierten Dichtungsmodells in das Verschlussystem des Behälters im vorgespannten Zustand,
- Ermittlung der Beanspruchung bei verschiedenen Belastungszuständen wie z. B. durch Fallversuch, Feuer oder Alterung bei langzeitiger Lagerung und anschließendem Transport und
- durch die detaillierte Modellierung ein besseres Verständnis des zeitabhängigen Verhaltens der Metaldichtung.

Ansprechpartner

Dr.-Ing. Linan Qiao

✉ linan.qiao@bam.de

Bundesanstalt für Materialforschung
und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87
12205 Berlin

Ansprechpartner für Behältersimulationen

Dr.-Ing. Frank Wille

☎ Telefon: +49 30 8104-1330

✉ AF-KTE@bam.de

🌐 www.bam.de