

01.10.2025

BAM-Gefahrgutregeln (BAM-GGR)

BAM-GGR 008

Leitlinie für numerisch geführte Sicherheitsnachweise im
Rahmen der Bauartprüfung von Behältern für den Transport
von radioaktiven Stoffen

Revision 1



Lizenz: CC BY-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.de>)

Verantwortlich für die Erstellung:

Fachbereich 3.3 „Sicherheit von Transportbehältern“

Dr.-Ing. Jens Sterthaus

T: +49 30 8104-8369

jens.sterthaus@bam.de

Funktions-E-Mailadresse: ram@bam.de

Inhaltsverzeichnis

1	Rahmenbedingungen	5
1.1	Geltungsbereich	5
1.2	Zweck	5
1.3	Rechtliche Grundlagen	5
1.4	Grundlagen für numerische Simulationen	5
2	Modelle für numerische Sicherheitsnachweise	5
2.1	Allgemeines	5
2.2	Bestandteile des Modells	6
2.3	Materialmodelle und Materialdaten	6
2.4	Verifikation und Validierung	6
3	Verifikation und Validierung	7
3.1	Verifikation	7
3.1.1	Numerische Verifikation	8
3.1.2	Konvergenzanalyse	8
3.2	Validierung	8
3.2.1	Parameterstudien, Sensitivitätsuntersuchungen und Validierung der Modelldaten	9
3.2.2	Experimente zur Validierung	9
3.2.3	Weitere Bestandteile der Validierung	9
3.3	Verifikation und Validierung im Arbeitsablauf der Simulation	10
4	Anforderungen an numerische Sicherheitsnachweise	10
4.1	Vollständigkeit	10
4.2	Verwendete Software	11
4.2.1	Dokumentation	11
4.2.2	Programmeignung, Zuverlässigkeit und Qualitätssicherung	11
4.3	Datenumfang	11
4.3.1	Eingabedaten	11
4.3.2	Maßgebliche Ergebnisse	12
4.3.3	Sonstige Ergebnisse	12
4.4	Darstellung der Ergebnisdaten	12
4.4.1	Datenaufbereitung	12
4.4.2	Grafische Darstellung	12
4.4.3	Tabellarische Darstellung	12
4.4.4	Darstellung sonstiger Ergebnisse	13
4.5	Beurteilung der Berechnungsergebnisse	13

4.6	Personalqualifikation	13
4.7	Verantwortlichkeiten	13
	Literaturverzeichnis	14
Anhang	Hinweise zur Modellierung	16
	Motivation	16
	Energieabsorbierende Materialien	16
	Dornaufprall	16
	Deckelsystem und Dichtungen	17
	Anschlagpunkte, insbesondere Tragzapfen	17
	Inhalt	17

1 Rahmenbedingungen

1.1 Geltungsbereich

Diese Leitlinie gilt im Verantwortungsbereich der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in ihrer Zuständigkeit für gefahrgutrechtliche Bauartprüfungen und ist bei der Erstellung von Sicherheitsnachweisen für Behälterbauarten für den Transport von radioaktiven Stoffen, die teilweise oder ganz auf numerischen Berechnungen beruhen, zu berücksichtigen. In den dafür eingesetzten Berechnungsprogrammen werden mechanische und thermische Analysen des Verhaltens der Behälterbauteile unter Prüfanforderungen vorwiegend mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) erstellt. Die Richtlinie gilt sinngemäß auch für andere numerische Verfahren, wie die Finite-Differenzen-Methode (FDM) oder die Randelementmethode (*boundary element method*, BEM), sowie die Finite-Volumen-Methode (FVM), wie sie z. B. in vielen Programmen für die numerische Strömungsmechanik (*computational fluid dynamics*, CFD) eingesetzt wird.

1.2 Zweck

Die Leitlinie dient der Unterstützung der Qualitätssicherung bei der Erstellung, Kontrolle und Beurteilung von Sicherheitsnachweisen, die auf einer numerischen Analyse von Problemstellungen basieren, welche zum Prüf- und Begutachtungsumfang von Behälterbauarten für den Transport radioaktiver Stoffe gehören. Sie soll insbesondere die Grundlage für die korrekte Durchführung der numerischen Analysen nach dem Stand der Technik bilden und die Prüfbarkeit des numerischen Sicherheitsnachweises unterstützen. Ihre Anwendung soll die Nachvollziehbarkeit des Berechnungsganges und der den Berechnungen zugrundeliegenden Voraussetzungen und Annahmen gewährleisten.

1.3 Rechtliche Grundlagen

Die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Auslegung von Behälterbauarten für den Transport von radioaktiven Stoffen basieren auf den Empfehlungen der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO): Regulations for the Safe Transport, Advisory Material und Package Design Safety Report [1, 2, 3]. Darin sind diejenigen Prüfbedingungen definiert, unter denen Sicherheitsnachweise im Rahmen der gefahrgutrechtlichen Verfahren für die Zulassung von Behälterbauarten [4] zu führen sind.

1.4 Grundlagen für numerische Simulationen

Bezüglich der Grundlagen der für Simulationen im Anwendungsbereich Mechanik und Thermik verwendeten numerischen Lösungsverfahren, insbesondere der FEM, und der Begriffsbestimmung wird auf [5, 6, 7, 8] verwiesen. Zur Erläuterung und Begriffsbestimmung hinsichtlich der Verifikation und Validierung (*verification and validation*, VnV) sei auf die Darstellung des Konzepts und des Standards nach ASME [9, 10], des Standards und der Richtlinien nach NAFEMS [11, 12] und die einschlägige Fachliteratur [13] verwiesen.

2 Modelle für numerische Sicherheitsnachweise

2.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt werden die grundlegenden Aspekte und Bestandteile von numerischen Sicherheitsnachweisen für Behälterbauarten für den Transport von radioaktiven Stoffen beschrieben. Hinweise zu der Modellierung von einzelnen Teilen¹ dieser Behälter werden im Anhang gegeben. Die Anforderungen an numerische Sicherheitsnachweise befinden sich im Kapitel 4.

¹ In diesem Dokument wird die Hierarchie System, Teilsystem, Baugruppe, Unterbaugruppe und Bauteil (*system, sub-system, assembly, sub-assembly and component*) verwendet. Ein „Teil“ soll in diesem Dokument ein beliebiges Element der Hierarchie sein.

2.2 Bestandteile des Modells

Die gewählte Form der Modellbildung und die für die numerische Lösung, z. B. mittels der FEM, darüber hinaus benötigten Lösungsparameter sind zu beschreiben und zu begründen. Die nachfolgend angegebenen Aspekte sind darzustellen:

- geometrischer Vergleich mit der Realität (Übersichtsskizzen inkl. der vorgenommenen Vereinfachungen der Bauteilgeometrien und Verweise auf die anzuwendenden technischen Zeichnungen),
- berücksichtigte Maße (Nominalmaß, Nominalmaß inklusive Toleranz oder tatsächliches Maß),
- gewählte Elementtypen,
- Diskretisierung der Gesamtstruktur und wichtiger Teilbereiche (ggf. in verschiedenen Perspektiven),
- Materialmodelle und -daten (s. auch Abschnitt 2.3),
- möglichst grafische Darstellung der Randbedingungen, Kontaktbedingungen und Zwangsbedingungen zwischen Knoten,
- Lastannahmen (z. B. gewählte Fallorientierung, Lasteinleitung, Wärmequellen) und
- Anfangs- Rand-, Übergangs- und Kontaktbedingungen (inkl. Beschreibung der verwendeten Kontaktformulierung und ihrer Parameter).

2.3 Materialmodelle und Materialdaten

Die verwendeten Materialdaten und deren Abhängigkeit von signifikanten Einflussgrößen sind grafisch bzw. in tabellarischer Form anzugeben. Die Eignung der verwendeten Materialmodelle für die zu lösende Aufgabenstellung ist zu begründen.

Sind für sicherheitsrelevante Teile (z. B. Behälterkörper, Deckel, Schrauben, Dichtungen, Abschirmmaterialien) oder für Teile, die die Ergebnisse numerischer Analysen stark beeinflussen (z. B. Stoßdämpfer oder andere stoßabsorbierende Teile bei mechanischen Analysen), keine ausreichend abgesicherten Daten für deren Modellierung verfügbar, so sind separate experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung der Materialdaten durchzuführen. Alternativ kann durch Parameterstudien bzw. Sensitivitätsuntersuchungen belegt werden, dass die gewählten Materialdaten zu abdeckenden Ergebnissen bzgl. des angestrebten Nachweisziels führen, s. hierzu auch Abschnitt 3.2.1. Jedoch ergibt sich allein aus der Wahl extremer Eingangsparameter nicht zwangsläufig ein abdeckendes (sog. konservatives) Berechnungsergebnis, da sich bei Verwendung solcher Eingangsparameter das Berechnungsergebnis auch qualitativ ändern kann, was auszuschließen ist.

2.4 Verifikation und Validierung

Die numerische Simulation hat eine wichtige Bedeutung für die Sicherheitsnachweise bei der Begutachtung von Behälterbauarten für den Transport radioaktiver Stoffe. Durch den Einsatz aktueller Simulationsmethoden können komplexe Phänomene und Prozesse modelliert und analysiert werden, die auf experimentellem Wege kaum zugänglich und nur schwer messbar sind. Numerische Simulationen ermöglichen es, vielfältige Fragestellungen, hier insbesondere in der Mechanik, Thermik und Strömungsmechanik, zu untersuchen. Dabei sind die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Simulationsergebnissen von zentraler Bedeutung, um stichhaltige Schlussfolgerungen zu ziehen und fundierte Entscheidungen zu treffen. Die Verifikation und Validierung sind zwei grundlegende Methoden, die in der numerischen Simulation eingesetzt werden, um diese Genauigkeit und Zuverlässigkeit sicherzustellen.

Obwohl Verifikation und Validierung eng miteinander verbunden sind, unterscheiden sie sich in ihren Hauptzielen und dem Umfang ihrer Anwendung. Während die Verifikation darauf abzielt, die korrekte Implementierung des numerischen Modells zu bestätigen und die Übereinstimmung mit der mathematischen Beschreibung sicherzustellen, konzentriert sich die Validierung auf die Beurteilung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Simulationsergebnisse im Vergleich zu experimentellen Ergebnissen.

Die Verifikation ist im Wesentlichen ein interner Prozess ohne Bezug auf experimentelle Daten, der darauf abzielt, die Fehlerfreiheit des Modells sicherzustellen und dessen Verhalten unter idealisierten Bedingungen² zu prüfen. Die Validierung hingegen erfordert einen externen Vergleich der Modellergebnisse mit experimentellen Daten oder Beobachtungen aus der realen Welt.

Das Vorgehen und die Ergebnisse sowohl der Verifikation als auch die der Validierung sollten nachvollziehbar dokumentiert werden, s. dazu insbesondere Standards und Richtlinien nach NAFEMS [11, 12].

Die einzelnen Aspekte des Verifikations- und Validierungsprozesses werden im Kapitel 3 beschrieben.

3 Verifikation und Validierung

3.1 Verifikation

Die Verifikation ist ein entscheidender Schritt in der numerischen Simulation³ und bezieht sich auf den Prozess, bei dem die Implementierung eines numerischen Modells überprüft wird, um sicherzustellen, dass es den zugrundeliegenden mathematischen Gleichungen und Lösungsmethoden entspricht bzw. die richtigen mathematischen Konzepte und Algorithmen verwendet [10]. Dies wird erreicht, indem die Ergebnisse der numerischen Berechnung mit analytischen Lösungen verglichen werden, um die Übereinstimmung zu überprüfen. Das Hauptziel der Verifikation besteht darin, Fehler in der Implementierung aufzudecken, aber nicht darin, die Genauigkeit des Modells bezüglich seines realen Verhaltens zu bewerten. Dabei soll sichergestellt werden, dass das Modell unter idealisierten Bedingungen konsistente und physikalisch plausible Ergebnisse (z. B. Energiebilanzen) liefert. Ergänzt wird der Standard [10] durch die Darstellung des Konzepts [9]; diese Unterlage enthält detaillierte Verifikationsrichtlinien für die numerische Simulation.

Um das verifizierte Modell später wieder nutzen zu können, ist der Verifikationsprozess, auch als Teil der Antragsunterlagen, nachvollziehbar zu dokumentieren. Die Dokumentation sollte Gründe für die Wahl der angewandten Verifikationsmethoden und deren Grenzen, sowie deren Beschreibung inklusive der erzielten Ergebnisse enthalten [10].

Die Verifikation wird unterteilt in Verifikation des Programmcodes (*code verification*) und Konvergenzanalyse (*calculation verification*). Die Verifikation des Programmcodes besteht aus der numerischen Verifikation des Programmcodes und der Qualitätssicherung der Software (*Software Quality Engineering*) [10].

Wird, wie in den meisten Fällen, für die eingereichten Berechnungen kommerzielle Software verwendet, deren Quellcode dem Lizenznehmer nicht zugänglich ist, muss die Qualitätssicherung seitens des Softwareherstellers dokumentiert sein.

Werden diese numerischen Berechnungen im Rahmen der Antragsverfahren mit (kommerziellen) Programmen⁴ durchgeführt, werden diese Programme von der BAM hinsichtlich des Programmcodes als verifiziert und qualitätsgesichert erachtet, sofern der Softwarehersteller über eine zertifizierte Qualitätssicherung verfügt. Sollte seitens des Antragstellers ein quelloffener Programmcode verwendet werden, so obliegt die Qualitätssicherung und ihre Dokumentation dem Antragsteller.

² Wie sie z. B. durch *Method of Manufactured Solutions* geschaffen werden, s. auch Fußnote 5.

³ Zur Verifikation und Validierung mit dem Schwerpunkt CFD s. auch [13].

⁴ Als Beispiele seien hier ANSYS Mechanical, CALCULIX (unter GNU General Public License, GPL), Code_Aster (unter GPL), Comsol, LS-DYNA, PAM-CRASH, SIMULIA (vormals ABAQUS); ANSYS CFX, ANSYS Fluent und OpenFOAM (unter GPL) genannt. Prinzipiell ist die Verwendung quelloffener Codes, wie z. B. jener unter der GPL, für die Antragsverfahren zulässig, sofern ihre Verifikation gezeigt werden kann.

3.1.1 Numerische Verifikation

Die numerische Verifikation wird unterteilt in analytische Methoden, numerische Benchmarks (*numerical benchmark solutions*) sowie den Konsistenztest (*consistency test*). Wenn zu der zu betrachtenden numerischen Fragestellung ähnliche (semi)analytische Lösungen bekannt sind, sollten diese zu einem Abgleich herangezogen werden.

Die analytischen Methoden werden unterteilt in analytische Lösungen (*analytical solutions*) und der Methode zur Gewinnung analytischer Lösungen⁵ (*method of manufactured solutions*). Sie beinhalten den Vergleich von Lösungen, die durch das numerische Modell berechnet wurden, mit bekannten analytischen Lösungen. Dieser Vergleich ermöglicht es, Implementierungsfehler oder algorithmische Fehler zu erkennen und zu korrigieren. Die Verwendung analytischer Methoden ist effektiv für einfache und wohldefinierte Probleme [10].

Numerische Benchmarks verwenden numerische Lösungen als Vergleichsbasis. Die verwendete Referenz sollte eine bewertbare Genauigkeit haben.

Aus der zuvor genannten Unterteilung der numerischen Verifikation ist der Konsistenztest dem Anwender am ehesten praktisch zugänglich. Der Konsistenztest sollte die lokale und globale Bestätigung des Erhalts von Masse, Impuls und Energie enthalten. Des Weiteren kann die Konsistenz geometrischer Merkmale geprüft werden, so z. B. spezielle Symmetrieeigenschaften oder der Erhalt des Ergebnisses bei Änderung des Koordinatensystems.

3.1.2 Konvergenzanalyse

Die Konvergenzanalyse befasst sich mit der Untersuchung der Konvergenz des numerischen Modells. Dabei wird geprüft, ob die Lösungen sich mit zunehmender räumlicher oder zeitlicher Diskretisierung an eine glatte oder wohldefinierte Lösung annähern. Die Konvergenzanalyse hilft, die notwendige räumliche und zeitliche Diskretisierung zu bestimmen, um hinreichend genaue Ergebnisse zu erzielen und unterstützt somit die Wahl eines geeigneten numerischen Lösungsverfahrens [10].

Die Verwendung der A-Posteriori-Fehlerschätzung (*a posteriori error estimation*) ist in der Praxis zu empfehlen. Hierbei werden u. a. Berechnungen mit unterschiedlichen Netzfeinheiten (h-Methode) oder verschiedenen Ordnungen der Elementansätze (p-Methode) verwendet [10]. Details dazu sind in der Darstellung des Konzepts [9] zu finden.

3.2 Validierung

Im Gegensatz zur Verifikation bezieht sich die Validierung auf den Prozess, bei dem die Genauigkeit und Zuverlässigkeit eines numerischen Modells bewertet werden, indem die Simulationsergebnisse eines spezifischen Vorgangs oder einer Belastungskonfiguration mit experimentellen Daten verglichen werden [9].

Bei der Validierung einer numerischen Berechnung werden die Berechnungsergebnisse mit realen Beobachtungen verglichen. Hierbei wird zunächst der konkrete Anwendungsfall definiert, für den die rechnerischen Vorhersagen bestätigt werden sollen.

⁵ Bei dieser Methode wird ein geeigneter Ansatz, der keine sinnvolle physikalische Bedeutung haben muss, für die Funktion eines Feldes gewählt und in die Differentialgleichung eingesetzt und so z. B. bei einem mechanischen Problem die zugehörige Belastungsfunktion ermittelt. Das zu verifizierende Modell wird mit der ermittelten Belastungsfunktion und zugehörigen Randbedingungen gelöst und die Lösung für die Feldgrößen mit dem bekannten Ansatz verglichen.

Die Validierung schließt eine Quantifizierung der Unsicherheiten⁶ der Ergebnisse ein, die sich sowohl auf die Berechnung als auch auf die experimentellen Daten bezieht. Diese sogenannte Unsicherheitsanalyse umfasst die Betrachtung von Maßen, Materialien, Belastungen und Reaktionen. Sie kann ergänzende Experimente und Berechnungen erfordern, um die Vorhersagefähigkeit über den definierten Anwendungsbereich sicherzustellen.

Die ergänzenden Experimente sollten unter Berücksichtigung der Zielsetzung so geplant werden, dass sie eine für das Nachweisziel ausreichende Güte des numerischen Modells absichern.

Für den Validierungsprozess werden Genauigkeitsanforderungen definiert, die den konkreten Anwendungsfall und die Nachweisziele berücksichtigen. Werden diese Genauigkeitsanforderungen eingehalten, kann das Modell für den definierten Anwendungsfall als validiert angesehen werden [10].

3.2.1 Parameterstudien, Sensitivitätsuntersuchungen und Validierung der Modelldaten

Sensitivitätsuntersuchungen⁷, z. B. in Form von Parameterstudien, dienen dazu, die Abhängigkeit der Ausgabegrößen des Modells von den Eingangsgrößen und ggf. den internen Parametern, wie z. B. Einstellungen zum Kontaktalgorithmus u. Ä., zu ermitteln. Dieses kann sowohl qualitativ oder quantitativ als auch qualitativ und quantitativ erfolgen. Die sensitiven Parameter der Eingangsdaten sollten mit hinreichender Genauigkeit ermittelt werden. Zusätzlich lassen sich Positionen und Messgrößen (zumeist Weggrößen bzw. Dehnungen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Kräfte und Temperaturen) des Validierungsexperimentes bestimmen, die hinsichtlich des Simulationsmodells von besonderer Bedeutung sein sollten. Da das Validierungsexperiment diesen postulierten Zusammenhang zwischen Ausgabegrößen und Eingangsgrößen nicht zwangsläufig bestätigen muss, handelt es sich hierbei um einen iterativen Prozess in dem das Simulationsmodell entsprechend angepasst werden muss, z. B. durch Wahl eines geeigneteren Materialmodells oder einer detailreicheren Modellierung von Verbindungen. Diese Form der Vorausberechnung (*pre-test calculations*) verknüpft den Verifikationsprozess mit der Validierung [14].

3.2.2 Experimente zur Validierung

Das Ziel der Validierungsexperimente ist es, die für die Validierung des verifizierten numerischen Modells erforderlichen experimentellen Daten zu gewinnen. Das Validierungsexperiment sollte so aufgebaut werden, dass alle für das Nachweisziel relevanten Anfangs- und Randbedingungen, Materialeigenschaften und äußeren Kräfte berücksichtigt werden. Diese Größen sollten so genau und vollständig wie möglich festgelegt werden. Gleichzeitig sollten aufgebrachte Belastungen, relevante Reaktionsgrößen und Änderungen der Randbedingungen während des Experiments aufgezeichnet werden. Des Weiteren sollten die Unsicherheiten der einzelnen Messungen dokumentiert werden [10].

3.2.3 Weitere Bestandteile der Validierung

Weitere Bestandteile der Validierung sind die Quantifizierung der experimentellen Unsicherheiten, die Bewertung der Genauigkeit und die Dokumentation.

⁶ Hierbei ist insbesondere auch der Einfluss verwendeter Filter als auch Filtern ähnlichen Effekten sowohl bei experimentellen Untersuchungen als auch bei der Simulation zu berücksichtigen bzw. die verwendeten Filter müssen aufeinander abgestimmt werden.

⁷ Die Sensitivitätsuntersuchung stellt bei einem nichtlinearen Simulationsmodell in den meisten Fällen die einzige Möglichkeit dar, einen behaupteten abdeckenden Zusammenhang zwischen gewählten Eingabedaten und zu minimierenden bzw. zu maximierenden Ausgabegrößen (und damit die sog. Konservativität des Simulationsergebnisses) zu belegen.

Die Ergebnisse der Validierungsexperimente sind aufgrund von Messungen, Toleranzen (z. B. Abmessungen und Materialeigenschaften) und Abweichungen im Aufbau und der Randbedingungen des Experiments mit Unsicherheiten behaftet. Für eine angemessene Beurteilung der Simulationsergebnisse müssen diese Unsicherheiten quantifiziert und dokumentiert werden.

Im Anschluss an die Quantifizierung kommt die Analyse der Übereinstimmung zwischen den Simulationsergebnissen und den Messergebnissen sowie die Bewertung der Genauigkeit des Berechnungsmodells in Bezug auf die beabsichtigte Verwendung des Modells. Die Bewertung der Modellgenauigkeit erfolgt für jedes Bauteil, Unterbaugruppe, Baugruppe und jedes Teilsystem, für das Validierungsdaten vorhanden bzw. messbar sind.

Die Dokumentation soll zeigen, ob und wie genau das Modell die Validierungsexperimente abbildet, und belegen, dass das Modell vorhersagefähig für den geplanten Verwendungszweck ist. Die Dokumentation des gesamten Validierungsprozesses ist verpflichtender Bestandteil der Antragsunterlagen und sollte gemeinsam mit den Modellen eingereicht werden.

3.3 Verifikation und Validierung im Arbeitsablauf der Simulation

Die Integration von Verifikation und Validierung in den Simulationsprozess geht über die reine Bewertung der Simulationsergebnisse hinaus. Das Ergebnis aus dem Verifikations- und Validierungsprozess kann dazu beitragen, das Modell zu verbessern und zu optimieren. Die Identifizierung von Implementierungsfehlern und die Analyse der Abweichungen zwischen den Simulationsergebnissen und den experimentellen Daten ermöglichen es, das Modell zu verfeinern und seine Vorhersagefähigkeit zu erhöhen.

Darüber hinaus bietet die Quantifizierung der Unsicherheit Einblicke in die Sensitivität des Modells gegenüber verschiedenen Parametern und Annahmen. Dies ermöglicht es, die kritischen Faktoren zu identifizieren, die das Verhalten des Modells beeinflussen, und gezielte Verbesserungen vorzunehmen, um die Genauigkeit der Vorhersagen zu steigern.

Die Integration von Verifikation und Validierung in den Simulationsprozess ermöglicht eine kontinuierliche Verbesserung der Simulationsmodelle und trägt dazu bei, verlässliche und den realen Bedingungen gerecht werdende Simulationsergebnisse zu erzielen.

In der Praxis wird in den zu begutachtenden Simulationen kein validiertes Modell im Sinne der o. g. VnV-Standards erreicht. Vielmehr werden die für die Vorausberechnung der Experimente zur Validierung verwendeten Modelle „kalibriert“, da ihre Abweichungen z. T. zu groß sind; sie werden an die Ergebnisse der Experimente angepasst. Das ist ein für die Validierung zulässiger Schritt, zieht aber im strengen Sinne wieder ein weiteres unabhängiges Experiment nach sich, bis die hinreichende Übereinstimmung zwischen Modell und Experiment erreicht ist. Aus Kosten- und Zeitgründen ist die Validierung als iterativer Vorgang oft nicht möglich, weswegen die Abweichungen der kalibrierten Modelle gegenüber den bestehenden Experimenten für die Ermittlung der Sicherheiten bei der Bewertung der Simulationsergebnisse zu berücksichtigen sind. Daraus ergeben sich enge Grenzen für die Verwendbarkeit kalibrierter Modelle ausschließlich für den Einsatzzweck, für den sie validiert wurden.

Im Rahmen der Prüftätigkeit erstellt die BAM ggf. eigene Modelle für den gesamten Behälter, stoßdämpfende Bauteile und Fundament oder Baugruppen mit besonderer Relevanz. Diese Modelle werden in der Regel mit einer anderen Software als der vom Antragsteller verwendeten berechnet, um die Eignung von Modellierung und Software möglichst unabhängig vom Vorgehen des Antragstellers beurteilen zu können.

4 Anforderungen an numerische Sicherheitsnachweise

4.1 Vollständigkeit

Der numerische Sicherheitsnachweis ist vollständig, wenn der zur Dokumentation und Prüfung vorzulegende Bericht sowie die zugehörigen Unterlagen alle für die Kontrolle des Nachweises wesentlichen

Angaben in nachvollziehbarer Form enthalten. Insbesondere muss der Sicherheitsnachweis die Anforderungen der Rechtsgrundlagen (s. Abschnitt 1.3) hinsichtlich der nachzuweisenden Ergebnisse erfüllen. Der Bericht hat die hier im Überblick zusammengestellten und in den nachfolgenden Unterabschnitten genauer erläuterten Anforderungen hinsichtlich:

- Angaben zur verwendeten Software (Abschnitt 4.2),
- aller notwendigen Bestandteile des numerischen Sicherheitsnachweises (Kapitel 2),
- Umfang und Darstellung der Eingabedaten (Abschnitt 4.3),
- Umfang und Darstellung der Ergebnisse (Abschnitt 4.4),
- Beurteilung der Berechnungsergebnisse (Abschnitt 4.5),
- Referenzen, Literaturhinweise und Quellenangaben (s. Literaturverzeichnis) sowie
- der eindeutigen Verwendung von Begriffen im Kontext der Verifizierung und Validierung

zu erfüllen.

4.2 Verwendete Software

4.2.1 Dokumentation

Die Dokumentation der verwendeten Version des jeweils eingesetzten Programmes ist zu benennen (z. B. Literaturverweis) und auf Verlangen der BAM zur Verfügung zu stellen.

4.2.2 Programmeignung, Zuverlässigkeit und Qualitätssicherung

Der Nachweis der prinzipiellen Programmeignung kann u. a. durch den Rückgriff auf öffentlich zugängliche Publikationen erfolgen. Für den Nachweis der Anwendbarkeit und der Zuverlässigkeit des Programmsystems siehe Abschnitt 3.1. Grundsätzlich ist eine vom Softwarehersteller aktiv gepflegte Programmversion zu verwenden.

Die verwendete Software muss bedingt durch Änderungen des Quelltextes (infolge Verbesserungen oder Einführung neuer Merkmale) und durch die nötige Anpassung an neue Hardware und Betriebssysteme einem ständigen Kontrollprozess unterliegen. Dies leisten i. A. die kommerziellen Anbieter der Software. Arbeitet der Softwareanbieter nicht nach einem akkreditierten Qualitätssicherungssystem oder wird vom Antragsteller eine im Quelltext vorliegende, eigene oder fremde Software eingesetzt, so sind qualitätssichernde Maßnahmen z. B. in Anlehnung an die Richtlinien nach NAFEMS [12] durchzuführen und zu dokumentieren. Dies gilt sowohl für die verwendete Software für die eigentliche Berechnung als auch für Pre- und Postprocessing⁸. Qualitätssichernde Maßnahmen des Programmanbieters entbinden den Anwender nicht von seiner Sorgfaltspflicht in dem Sinne, dass bei neuen Programmversionen oder sonstigen Änderungen der Softwareumgebung die Plausibilität der Berechnungsergebnisse durch den Vergleich mit einzelnen früheren Berechnungen und damit die Eignung und Genauigkeit für den konkreten Einsatz jeweils neu zu überprüfen ist.

4.3 Datenumfang

4.3.1 Eingabedaten

Die in numerisch geführten Sicherheitsnachweisen zu dokumentierenden Eingabegrößen müssen diejenigen Daten vollständig umfassen, die für eine unabhängige Reproduktion der FE-Berechnung notwendig sind. Im Falle der Verwendung eines Preprozessors ist neben der Eingabedatei für das FE-Berechnungsprogramm die entsprechende Datei zum Modell im nativen Format des Preprozessors zur Prüfung einzureichen. Diese Dateien sind vom Antragsteller auf einem geeigneten Medium zu speichern und als unverzichtbarer Teil der eingereichten Unterlagen aufzubewahren.

⁸ Software für die Geometrieaufbereitung, Netzgenerierung und die Auswertung und grafische Aufbereitung der Berechnungsergebnisse.

Eine hinreichende Beschreibung des Aufbaus der Eingabe-Datei ist beizufügen, so dass eine Kontrolle der Eingabedaten jederzeit auch unabhängig vom verwendeten FE-Berechnungsprogramm möglich ist.

4.3.2 Maßgebliche Ergebnisse

Die maßgeblichen Ergebnisse bilden die Basis für die abschließende sicherheitstechnische Bewertung der Ergebnisse der Analyse. Die Auswahl der maßgeblichen physikalischen Größen (z. B. bestimmte Spannungskomponenten oder Vergleichsspannungen, Beschleunigungsverläufe, Bauteiltemperaturen bzw. -verläufe usw.) ist zu begründen.

4.3.3 Sonstige Ergebnisse

Die sonstigen Ergebnisse (z. B. Verformungsbilder, Spannungsverteilungen, Energiebilanzen, Wärmestrom- und Temperaturfelder) der durchgeführten Berechnungen sind darzustellen, um einfache Plausibilitätskontrollen zu ermöglichen.

4.4 Darstellung der Ergebnisdaten

Die zur Gewinnung und Aufbereitung der Daten verwendeten Skripte sind Teil der eingereichten Unterlage und ggf. zu erläutern.

4.4.1 Datenaufbereitung

Die Ergebnisdaten sind derart darzustellen, dass alle für die Bearbeitung der jeweiligen Aufgabenstellung wesentlichen Gesichtspunkte (Dokumentation, Diskussion und Prüfbarkeit des gewählten FE-Modells, Bewertung und ggf. Verifikation und Validierung der Berechnungsergebnisse) in übersichtlicher und nachvollziehbarer Form vorliegen. Die Zuordnung der im Nachweisbericht beschriebenen Eingabedaten zur Eingabedatei des Berechnungsprogramms muss nachvollziehbar und eindeutig sein.

4.4.2 Grafische Darstellung

Die Darstellung der Berechnungsergebnisse sollte bevorzugt in grafischer Form erfolgen. Die hinreichend genaue Auflösung und Ablesbarkeit müssen hierbei gewährleistet sein.

Ausgehend von der globalen Darstellung bestimmter Temperatur-, Spannungs- oder Verschiebungsfelder in der Gesamtstruktur bzw. größeren Teilstrukturen sind die Detailergebnisse für die besonders kritischen und damit für die Auslegung relevanten Bereiche der Struktur darzustellen. Diese Detailergebnisse (wie z. B. lokale Spannungen, Dehnungen und Temperaturen) sind jeweils als Funktion des Ortes bzw. als Funktion der Zeit darzustellen. Bei der Simulation von transienten Vorgängen, wie z. B. Behälter-Fallversuchen oder Erhitzungsprüfungen, ist die Berechnung bis zu einem Zeitpunkt durchzuführen, bei dem unzweifelhaft die Extremwerte der jeweiligen sicherheitstechnischen Parameter (Spannungen, Verformungen, Temperaturen o. Ä.) erreicht wurden.

Typische grafische Darstellungen beinhalten z. B.:

- geometrische Ausgangskonfigurationen,
- unter Belastung verformte Strukturen,
- Spannungs- oder Temperaturzustände für ausgewählte Strukturbereiche und
- zeitabhängige Verläufe von Verschiebungen und Spannungen.

4.4.3 Tabellarische Darstellung

Die für die sicherheitstechnischen Bewertungen verwendeten Ergebnisse sind zusammen mit den entsprechenden zulässigen Grenzwerten in Tabellen übersichtlich darzustellen.

4.4.4 Darstellung sonstiger Ergebnisse

Dargestellt werden sollten z. B.:

- grafische Darstellungen von FE-Netzen in stark verformten Bereichen (z. B. Bereiche, die im Kontakt stehen, Verformung der stoßdämpfenden Bauteile und Penetration des Behälters in nachgiebigem Untergrund),
- Weg-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungs-Zeitverläufe von Masseschwerpunkten oder Temperatur-Zeitverläufe ausgewählter Teilstrukturen (Deckel, Behälterkörper, Dichtungen, Inhalt, Moderator, usw.),
- Energiebilanzen (Aufschlüsselung der Teilenergien⁹ für das Gesamtmodell bzw. für ausgewählte Teilsysteme) oder Wärmestromfelder und ggf. vom Programm berechnete Wärmeübergangszahlen und
- Masse-Zeitverlauf bzw. Massezuwachs-Zeitverlauf, falls Massenskalierung zur Beschränkung der Zeitschrittweite verwendet wurde.

4.5 Beurteilung der Berechnungsergebnisse

Die Ergebnisse der Berechnungen sind im Sinne der dem Sicherheitsbericht zugrundeliegenden Regelwerke bzw. ersatzweise anerkannter Bewertungskonzepte zu bewerten. Die für die Bewertung der Ergebnisse und für den Vergleich mit zulässigen Materialbeanspruchungen zu beachtenden Regeln leiten sich aus den spezifischen Anforderungen an die Spannungs- und Temperaturbewertung in Verbindung mit dem jeweiligen Behälterbauteil und -werkstoff ab. Hinsichtlich der mechanischen Bewertung und Materialkennwerte sind z. B. das IAEA-TECDOC-717 [15], die Gefahrgutregeln 007 [16] und 012 [17] der BAM, die KTA-Regeln 3905 [18] und 3201.2 [19] sowie die FKM-Richtlinien [20, 21] zu beachten.

4.6 Personalqualifikation

Eine korrekte Anwendung der FE-Methode im Sinne dieser Leitlinie erfordert neben einer adäquaten technisch-wissenschaftlichen Grundqualifikation in den Bereichen IT, Numerik und Ingenieurwissenschaften einschlägige Erfahrungen im Lösen ähnlich gelagerter technischer Aufgabenstellungen mittels numerischer Lösungsverfahren. Die im Standard nach NAFEMS [11], „7.2 Competence“ genannten Vorgaben werden von der BAM als geeignete Anforderungen für die nachzuweisende Qualifikation betrachtet.

4.7 Verantwortlichkeiten

Wurde der numerische Sicherheitsnachweis von einem Dritten (Ersteller) durchgeführt, so ist der Auftraggeber verpflichtet, auf die Einhaltung dieser Leitlinie durch den Dritten zu achten. Dies schließt auch die Beibringung der oben genannten Nachweise zur verwendeten Software und Personalqualifikation mit ein. Weiterhin trägt er die fachliche Verantwortung für die Vollständigkeit und Richtigkeit des numerischen Sicherheitsnachweises, weil der Auftraggeber u. a. durch Vorgaben bei der Auftragserteilung maßgeblich den Analyseaufwand mitbestimmt und sein eigenes Qualitätsmanagementsystem ihn zur Kontrolle der Fremdleistung verpflichtet.

⁹ Insbesondere auch künstliche Energien, die z. B. infolge der Verwendung eines Kontaktpaares vom Typ *penalty* oder von finiten Elementansätzen mit *hourglass control* entstehen können. Die Teilenergien sind relativ zu geeigneten Größen darzustellen, z. B. der Gesamtenergie oder äußeren Arbeit.

Literaturverzeichnis

- 1 International Atomic Energy Agency (IAEA): Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material; 2018 Edition; Specific Safety Requirements No. SSR-6 (Rev. 1); Vienna 2018; https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1798_web.pdf
- 2 International Atomic Energy Agency (IAEA): Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (2018 Edition); IAEA Safety Standards Series No. SSG-26 (Rev. 1); Vienna 2022; https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1953_web.pdf
- 3 International Atomic Energy Agency (IAEA): Format and Content of the Package Design Safety Report for the Transport of Radioactive Material; Specific Safety Guide No. SSG-66; Vienna 2022; https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1980_web.pdf
- 4 Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Richtlinie für das Verfahren der Bauart-Zulassung von Versandstücken zur Beförderung radioaktiver Stoffe, von radioaktiven Stoffen in besonderer Form, von gering dispergierbaren radioaktiven Stoffen und von freigestellten spaltbaren Stoffen - R 003 - in der Fassung vom 10. Juli 2025 (VkB. 2025, S. 389)
- 5 O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, J. Z. Zhu: The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals (Seventh Edition); Butterworth-Heinemann; 2013
- 6 T. Belytschko, W. K. Liu, B. Moran, K. Elkhodary; Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures, 2nd Edition; Wiley, 2014
- 7 P. Wriggers; Nonlinear Finite Element Methods; Springer Berlin, Heidelberg; 2008
- 8 R. De Borst, M. A. Crisfield, J. J. C. Remmers, C. V. Verhoosel: Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures, 2nd Edition; John Wiley & Sons Inc; 2012
- 9 ASME V&V 10.1-2012: An Illustration of the Concepts of Verification and Validation in Computational Solid Mechanics; 16th April 2012; The American Society of Mechanical Engineers, New York, 2012
- 10 ASME V&V 10-2019 [Revision of ASME V&V 10-2006 (R2016)]: Standard for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics; 6th March 2020; The American Society of Mechanical Engineers, New York, 2020
- 11 J. Smith: NAFEMS Engineering Simulation Quality Management Standard; 30th April 2020; NAFEMS SGMWG, U.K. 2020
- 12 J. Smith: NAFEMS Engineering Simulation Quality Management Guidelines; 30th April 2020; NAFEMS SGMWG, U.K. 2020
- 13 W. L. Oberkampf, T. G. Trucano: Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics; Progress in Aerospace Sciences 38 (2002) 209–272
- 14 B. H. Thacker et al: Concepts of Model Verification and Validation; Report LA-14167-MS, Los Alamos National Laboratory, 2004
- 15 International Atomic Energy Agency (IAEA): IAEA-TECDOC-717, Guidelines for safe design of shipping packages against brittle fracture, IAEA, Wien, 1993
- 16 BAM-GGR 007: Leitlinie zur Verwendung von Gusseisen mit Kugelgraphit für Transport- und Lagerbehälter für radioaktive Stoffe, Rev. 0, Berlin, Juni 2002
- 17 BAM-GGR 012: Leitlinie zur Berechnung der Deckelsysteme und Lastanschlagsysteme von Transportbehältern für radioaktive Stoffe, Berlin, 2020-12

- 18 KTA 3905: Lastanschlagpunkte an Lasten in Kernkraftwerken; Fassung 2020-12; https://www.kta-gs.de/d/regeln/3900/3905_r_2020_12.pdf
- 19 Kerntechnischen Ausschuss (KTA): Sicherheitstechnische Regel des Kerntechnischen Ausschuss (KTA), KTA 3201.2 -Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren-, Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung, Fassung 2017-11; https://www.kta-gs.de/d/regeln/3200/3201_2_r_2017_11.pdf
- 20 Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. (FKM): FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“, 7. Auflage, VDMA Verlag, Frankfurt, 2020
- 21 Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. (FKM): FKM-Richtlinie „Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis“, 4. Auflage, VDMA Verlag, Frankfurt, 2018
- 22 LS-DYNA Aerospace Working Group: Modeling Guidelines Document, Version 22-1; June 20, 2022, Modeling Guidelines Document Example Input Decks; <https://awg.ansys.com/MGD>
- 23 R. H. J. Peerlings: Enhanced damage modelling for fracture and fatigue; Technische Universiteit Eindhoven; 1999
- 24 M. Jirásek, S. Rolshoven: Comparison of integral-type nonlocal plasticity models for strain-softening materials; International Journal of Engineering Science 41 (2003) 1553–1602
- 25 U. Zencker, M. Weber and F. Wille: Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material, 2011, Vol 22, No 2; Finite element mesh design of a cylindrical cask under puncture drop test conditions; W. S. Maney & Son Ltd
- 26 M. Weber, V. Ballheimer, F. Wille, U. Zencker: Numerical Approach to Determine the Correct Puncture Bar Length for the IAEA Puncture Bar Drop Test; Proceedings of the ASME Pressure Vessels & Piping Conference, PVP2018
- 27 K. Linnemann, V. Ballheimer, J. Sterthaus, F. Wille: Methodological Aspects for Numerical Analysis of Lid Systems for SNF and HLW Transport Packages; Proceedings of the ASME Pressure Vessels & Piping Conference, PVP2014
- 28 J. Sterthaus, V. Ballheimer, C. Bletzer, K. Linnemann, M. Nehrig, F. Wille: Numerical Approach for Containment Assessment of Transport Packages Under Regulatory Thermal Test Conditions; Proceedings of the ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Division Conference; PVP2014
- 29 J. Sterthaus, V. Ballheimer, C. Kuschke, F. Wille: Numerical Analysis of Bolted Trunnion Systems of Packages for Radioactive Materials; Proceedings of the ASME 2012 Pressure Vessels & Piping Division Conference; PVP2012

Anhang Hinweise zur Modellierung

Motivation

In den nachfolgenden Abschnitten werden besondere Hinweise für die Modellierung von ausgewählten Teilen der Behälterbauarten für den Transport von radioaktiven Stoffen gegeben. Die Aufzählung erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit und die dargestellte Modellierung ist nicht notwendigerweise die Einzige, die dem Stand der Technik genügt. Modellierungshinweise speziell für LS-DYNA finden sich z. B. auch in den Empfehlungen [22].

Energieabsorbierende Materialien

Stoßdämpfende Bauteile werden im Wesentlichen aus Materialien gebaut, die den überwiegenden Anteil der kinetischen Energie absorbieren können, um Belastungen der Behälterteile bei den Prüfbedingungen zu reduzieren. In einem Kraft-bleibende Verformung-Diagramm weisen diese Materialien typischerweise ein „Plateau“ und bzw. oder einen Abfall, also eine Entfestigung, auf.

Um Lokalisierungseffekte infolge einer Entfestigung zu vermeiden, sollten nur nichtlokale Materialmodelle, solche mit anderen geeigneten Ansätzen (*gradient-enhanced model* bzw. *higher-order continua*) [23] oder Materialmodelle mit Regularisierung verwendet werden [24].

Das rein phänomenologische Beschreiben eines entfestigenden Verhaltens direkt über die Spannungs-Dehnungs-Beziehung in einem klassischen (elastisch-)plastischen Materialmodell ohne Regularisierung ist zu vermeiden und bedarf einer gesonderten Nachweisführung über die Verwendbarkeit des Ergebnisses.

Sollte sich die Beschreibung des Verhaltens des stoßdämpfenden Bauteils direkt auf Bauteilversuche beziehen und nicht auf ein Materialmodell, dessen Parameter aus den Bauteilversuchen identifiziert wurden, so ist dieses in der Modellierung geeignet zu berücksichtigen. Die Verwendung phänomenologischer Daten aus den Bauteilversuchen als Materialdaten ist zu vermeiden.

Dornaufprall

Für die Modellierung des Dornaufpralls ist sowohl die ausreichend feine Vernetzung der in Kontakt tretenden Bauteile als auch der zu bewertenden Stellen notwendig. Der Einfluss der Elementkantenlängen auf die zu ermittelnde Spannung ist in einer Konvergenzstudie darzustellen, s. auch z. B. [25].

Beim Dornaufprall hat die Reibung zwischen den Kontaktflächen einen erheblichen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse, ggf. nicht nur quantitativ, sondern auch qualitativ. Daher ist der zu verwendende, physikalisch möglichst korrekte Reibbeiwert über einen Abgleich der berechneten mit der nach einem adäquaten Fallversuch gemessenen Aufweitung bzw. Tonnenbildung (*barrel shaping*) des Dorns an der Kontaktstelle zu ermitteln. Alternativ kann der Einfluss der Reibbeiwerte innerhalb einer von der Literatur abgedeckten Bandbreite auf die berechneten Beanspruchungen, insbesondere im Kontaktbereich, im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse bestimmt werden.

Gemäß den IAEA-Regularien [1] ergibt sich die Forderung, die Dornlänge so anzupassen, dass die Schädigung des Versandstücks maximiert wird. Ein iteratives Vorgehen zur Ermittlung dieser Geometrie ist in [26] dargestellt.

Deckelsystem und Dichtungen

Beispiele für die Modellierung von Bauteilen des Deckelsystems und ausgewählte Lastfälle sind in [27] beschrieben. Die Bewertungsgrundlagen für die Deckel und Schrauben sind in [17] dargestellt. Die Modellierung der Deckelschrauben hängt von der erwarteten Beanspruchung ab.¹⁰ Die Vorspannung ist vorzugsweise durch Vorspannelemente aufzubringen. So ist beispielsweise ein Vorspannen durch fiktive Temperaturen zu vermeiden.

Das Verhalten von Dichtungen des Deckelsystems sollte unter Verwendung von speziellen Dichtungselementen, wie z. B. *gasket elements* in SIMULIA, abgebildet werden, sofern Aussagen zum Deckeldichtsystem gemacht werden sollen. Mit diesen Elementen kann sowohl das Verformungsverhalten bei Assemblierung, initialer Verpressung, späterer Entlastung als auch die Temperaturabhängigkeit abgebildet werden, s. auch [28]. Eine Modellierung mit (1D-)Federelementen, die direkt mit den Knoten von Volumenelementen gekoppelt sind, ist zu vermeiden.

Anschlagpunkte, insbesondere Tragzapfen

Die Modellierung von Lastanschlagnpunkten, die Lasteinleitung, die Bewertung der Beanspruchung des Lastanschlagnpunktes und dessen Schrauben sind in [29] dargestellt. Die Bewertungsgrundlagen befinden sich in der BAM-GGR 012 [17].

Inhalt

Wenn der Inhalt des Behälters (z.B. Tragkorb mit Brennelementen oder Kokillen mit hochradioaktivem Abfall aus der Wiederaufarbeitung) unter Berücksichtigung des Nachweiszieles im FE-Modell nicht in maximal möglicher Detaillierungstiefe, sondern vereinfacht als Lastschal oder Lastzylinder abgebildet wird, so ist darauf zu achten, dass der Behälter oder Behälterbereiche dabei nicht in unzulässiger Weise ausgesteift bzw. verstärkt und die Kinematik des Versandstücks vor bzw. nach dem Aufprall nicht unzulässig beeinflusst werden. Ein für den Nachweis der mechanischen Integrität relevanter behälterinterner und üblicherweise verzögerter Aufprall des Inhalts auf das Deckelsystem oder andere Behälterbereiche ist in Betracht zu ziehen und ggf. zu untersuchen. Dabei sind die konstruktiv bedingten Spalte im Behälterschacht, die Massen und die Steifigkeitseigenschaften der Stoßpartner sowie die Kontaktbereiche geeignet zu berücksichtigen.

¹⁰ Bei reiner Zugbeanspruchung kann die Verwendung von Stab-Elementen (*bar*) ausreichend sein, wenn die lokalen Beanspruchungen im Bereich der Auflageflächen nicht Gegenstand der Betrachtung sind, z. B. durch eine Spider-Modellierung (*spider bolt model*) für Schraubenverbindungen mit Mutter. Falls zusätzlich eine Biegebeanspruchung auftreten kann, ist dem Rechnung zu tragen.