

BAM – GGR 007 – Leitlinie zur Verwendung von Gusseisen mit Kugelgraphit für Transport- und Lagerbehälter für radioaktive Stoffe

Die Zustimmung der BAM zur Anwendung von Gusseisen mit Kugelgraphit als Werkstoff für die dichte Umschließung von Behältern für den Transport und die Lagerung von radioaktiven Stoffen im Sinne der Ziffer 6.4.7.5 ADR beruht auf dem Basisgutachten, das letztmalig im Amts- und Mitteilungsblatt der BAM im Jahre 1985 publiziert wurde. Den seitdem entwickelten und zugelassenen Bauarten liegen im Wesentlichen die in diesem Gutachten empfohlenen Auslegungs- und Bewertungskriterien zugrunde. Damit wurde bei einer Reihe von Bauarten die Grenze der bisher möglichen Werkstoffauslastung erreicht.

Unter Berücksichtigung der Erfahrungen der BAM bei der Prüfung der Bauarten und des heute erreichten Standes der Technik bei der Anwendung von Gusseisen mit Kugelgraphit wurden die Empfehlungen des Basisgutachtens überprüft. Diese Überprüfung lag aufgrund der angestrebten höheren Werkstoffauslastung auch im Interesse der behälterentwickelnden Unternehmen. Ergebnis der Überprüfung sind präzisierte Empfehlungen, die beim Nachweis der sprödebruchsicheren Auslegung der Behälterkomponenten aus Gusseisen mit Kugelgraphit insbesondere dann zu beachten sind, wenn unter den zu berücksichtigenden Prüfbedingungen Spannungsniveaus oberhalb der halben Streckgrenze des Werkstoffs auftreten.

Diese Empfehlungen hat die BAM in ihrer Eigenschaft als für die Bauartprüfung von Verpackungen für die Beförderung von radioaktiven Stoffen nach §6 (2) Nr. 18 GGVSE zuständige Behörde nach Anhörung der betroffenen Industrie erarbeitet, die mit Einverständnis des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) nachfolgend in einer Leitlinie veröffentlicht werden.

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Fachgruppe III.3 „Sicherheit von Transport- und Lagerbehältern“

BAM – GGR 007

Leitlinie zur Verwendung von Gusseisen mit Kugelgraphit für Transport- und Lagerbehälter für radioaktive Stoffe

Rev. 0

Juni 2002

Inhaltsverzeichnis

1	Vorbemerkungen	3
2	Zusammenfassung der bisherigen Entwicklung	4
3	Rechtsgrundlagen	7
3.1	Verkehrsrechtliche Vorschriften	7
3.2	Atomrechtliche Vorschriften	7
3.2.1	Atomrechtliche Vorschriften für die Beförderung radioaktiver Stoffe	7
3.2.2	Atomrechtliche Vorschriften für die Zwischen- und Endlagerung von radioaktiven Stoffen	8
4	Kriterien für die mechanische Behälterauslegung	10
4.1	Grundsätzliche Überlegungen	10
4.2	Bezug zur Auslegung von Druckbehältern	11
4.3	Auslegung gegen plastische Verformung	11
4.3.1	Normale Betriebsbeanspruchungen	11
4.3.2	Unfallbeanspruchungen	12
4.4	Bruchmechanische Auslegung	13
4.4.1	Geltungsbereich und Voraussetzungen	13
4.4.2	Bruchmechanischer Sicherheitsnachweis	13
4.4.3	Ermittlung der Beanspruchungen im Bauteil	15
4.4.4	Festlegung der Fehlergröße	17
4.4.5	Ermittlung bruchmechanischer Werkstoffkennwerte	18
4.4.6	Bruchmechanische Gewährleistungswerte	19
5	Anforderungen an die sicherheitstechnische Nachweisführung	21
6	Qualitätssichernde Maßnahmen bei der Herstellung	24
6.1	Werkstoffherstellung	24
6.1.1	Anforderungen an den Hersteller	24
6.1.2	Fertigung	25
6.1.3	Weiterentwicklungen	25
6.2	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung	25
6.3	Dokumentation	26
7	Zusammenfassung	27
8	Literatur und Unterlagen	28

1 Vorbemerkungen

Diese Leitlinie beschreibt grundsätzliche Gesichtspunkte, die bei der Verwendung von Gusseisen mit Kugelgraphit für Transport- und Lagerbehälter für radioaktive Stoffe Beachtung finden sollten.

Die Eigenschaften von Gusseisen mit Kugelgraphit sind in der Norm [1] für eine Reihe von Formen mit unterschiedlichen Werkstoffbezeichnungen festgelegt. Die Anforderungen an den bisher für Transport- und Lagerbehälter für radioaktive Stoffe verwendeten Werkstoff gehen jedoch über die Norm hinaus und werden daher in besonderen Werkstoffspezifikationen der jeweiligen Verwender festgelegt.

Ausgehend vom Basisgutachten [2] der BAM aus dem Jahre 1985, das bisher die primäre Grundlage für die Verwendung von Gusseisen mit Kugelgraphit für Transport- und Lagerbehälter für radioaktive Stoffe bildet, werden in dieser Leitlinie die Kriterien für die Auslegung dieser Behälter gegen Betriebs- und Unfallbeanspruchungen und die sich daraus ergebenden Anforderungen an den Nachweis der Sicherheiten gegen duktiles und sprödes Versagen von Behälterkomponenten beschrieben. Die Leitlinie berücksichtigt die Fortentwicklung des Werkstoffs sowie der Methoden zur Bewertung seines mechanischen Verhaltens in dem Zeitraum nach der Erstellung des Basisgutachtens. Inhalt dieser Leitlinie sind Empfehlungen, die bei der Fortentwicklung der im Rahmen verkehrsrechtlicher und atomrechtlicher Zulassungsverfahren für Transport- und Lagerbehälter anzuwendenden sicherheitstechnischen Nachweismethoden beachtet werden sollten.

Bestandteil der Leitlinie sind außerdem die sich aus dem Gegenstand der sicherheitstechnischen Nachweisführung ergebenden werkstoffspezifischen Anforderungen sowie die qualitätssichernden Maßnahmen für die Behälterherstellung bei der Verwendung von Gusseisen mit Kugelgraphit. Die diesbezüglichen Vorgaben der Leitlinie sollten bei der Erarbeitung und Revision von Werkstoffspezifikationen für Gusseisen mit Kugelgraphit berücksichtigt werden.

Diese Leitlinie wurde federführend erstellt von der Fachgruppe III.3 „Sicherheit von Transport- und Lagerbehältern“ unter fachlicher Beratung durch die Fachgruppen V.2 „Werkstoffmechanik“ und V.3 „Betriebsfestigkeit und Bauteilsicherheit“ der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung.

2 Zusammenfassung der bisherigen Entwicklung

Die Beförderung und Lagerung radioaktiver Stoffe aus Versuchs- und Leistungskernkraftwerken ist seit vielen Jahren Stand der Technik und erfolgt entsprechend den nationalen und internationalen Vorschriften des Verkehrsrechts auf der Basis der Empfehlungen der IAEA [3] sowie des deutschen Atomrechts [4, 5]. Die hierfür verwendeten Transport- und Lagerbehälter haben Schutzfunktionen im Hinblick auf die Verhinderung bzw. Begrenzung der Freisetzung von Radionukliden aus Versandstücken, auf die Abschirmung der Gamma- und Neutronenstrahlung sowie auf die Verhinderung nuklearer Kettenreaktionen unter Bedingungen zu erfüllen, die durch die mit den Behältern durchzuführenden mechanischen Prüfungen beschrieben werden.

Im Zusammenhang mit der in der Bundesrepublik Deutschland Mitte der 70er Jahre geführten Diskussion über das Entsorgungskonzept für Kernkraftwerke wurde als weitere Möglichkeit neben der Entsorgung von bestrahlten Brennelementen in ausländischen Wiederaufarbeitungsanlagen die mittelfristige trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente in Transportbehälterlagern entwickelt [6, 7]. Dieses Konzept wurde nach Prüfung und Beratung in den Gremien des Bundesinnen- bzw. des Bundesumweltministeriums Bestandteil des Entsorgungskonzeptes der Bundesregierung [8] und inzwischen durch die Inbetriebnahme der Transportbehälterzwischenlager in Jülich, Ahaus, Gorleben und Lubmin realisiert. Zukünftig wird die standortnahe Zwischenlagerung an den deutschen Kernkraftwerken an Bedeutung gewinnen. Die Zwischenlagerung der bestrahlten Brennelemente erfolgt dabei über einen Zeitraum von bis zu 40 Jahren in zahlreichen Behältern innerhalb eines Lagergebäudes, wobei die wesentlichen Schutzfunktionen (Dichtheit, Abschirmung, nukleare Sicherheit) von den Behältern übernommen werden, die hierzu keinerlei aktive Bauelemente benötigen, d. h. ein inhärent sicheres System bilden. Die Abfuhr der Nachzerfallswärme erfolgt ausschließlich über Wärmestrahlung und natürliche Konvektion. Für diese Behälter ist eine Mindestqualifikation als „Typ B – Versandstückmuster“ im Sinn des Verkehrsrechtes einzuhalten; weitere Anforderungen wie z. B. die Langzeiteignung aller Bauelemente und die permanente Überwachung der Dichtheit sind für die sichere Zwischenlagerung erforderlich [9].

Als zuständiger Behörde gemäß der Zulassungsrichtlinie des Bundesministers für Verkehr [10] für die Bauartprüfung zulassungspflichtiger Transportverpackungen für radioaktive Stoffe obliegt der BAM auch die Begutachtung der festigkeitsbestimmenden Eigenschaften der Brennelement-Transport- und Lagerbehälter aus Gusseisen mit Kugelgraphit. Die BAM war darüber hinaus auch von den nach Atomrecht für die Genehmigung der Verwendung der Behälter in kerntechnischen Anlagen zuständigen Behörden mit der Begutachtung dieser Behälter beauftragt. In diesen Funktionen hat die BAM zahlreiche Bauartprüfungen vorgenommen und dabei u. a. instrumentierte Versuche mit Modell- und Prototypbehältern sowie umfangreiche Werkstoffuntersuchungen durchgeführt, die in Versuchsberichten, Prüfungszeugnissen und Gutachten dokumentiert und bewertet wurden. Insbesondere fließen die Ergebnisse dieser Untersuchungen in die Festlegungen zur Qualitätssicherung während der Herstellung der Behälter, z. B. in Form von Werkstoffdaten- und Werkstoffprüfblättern, Fertigungs- und Prüffolgeplänen mit den dazugehörigen Arbeits- und Prüfvorschriften, ein. Dadurch wird sichergestellt, dass bei der Serienfertigung dieser Behälter die erforderlichen sicherheitsrelevanten Qualitätsmerkmale nachweislich eingehalten werden.

Erstmalig hat die BAM 1985 ihr Begutachtungskonzept als Basisgutachten zur Verwendung von Gusseisen mit Kugelgraphit für Transport- und Lagerbehälter veröffentlicht [2]. Nach diesem Konzept sind die höchstzulässige Beanspruchung und die Mindestwerkstoffduktilität zu begrenzen, damit es nicht, wie bei Überlastversuchen mit nicht spezifikationsgerechten Behältern [11, 12], zum Bruch kommen kann. Seit dieser Zeit hat sich die Verwendung von Transport- und Lagerbehältern aus Gusseisen mit Kugelgraphit national und international sehr stark ausgeweitet. Die BAM hat diese Entwicklung aktiv begleitet [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25] sowie 1987, 1990 und 1994 drei internationale Seminare veranstaltet [26, 27, 28], auf denen über die Ergebnisse deutscher und internationaler Entwicklungsarbeiten sowie über amtliche Validierungen von Behälterbauarten berichtet wurde. Ein weiterer internationaler Workshop zum Thema Gusseisen mit Kugelgraphit fand 1991 in den USA statt [29].

Die starke Internationalisierung der Verwendung von Gusseisen mit Kugelgraphit führte u. a. auch dazu, dass der die IAEA Regulations kommentierende Safety Guide (Advisory Material) [30] um einen Anhang ergänzt wurde, der Empfehlungen zum Sicherheitsnachweis für sprödebruchgefährdete Behälterbauteile enthält.

Die außerordentliche Verbreitung des Gusseisens mit Kugelgraphit als Behälterwerkstoff für Typ B - Versandstücke ist nicht zuletzt auch auf die Fortentwicklung der Gießtechnik und eine Verbesserung der sicherheitstechnisch relevanten Eigenschaften bei dickwandigen Gussstücken zurückzuführen. Insgesamt hat sich gegenüber dem Zeitpunkt der Veröffentlichung des Basisgutachtens [2] durch die BAM im Jahre 1985 die Fertigungssicherheit bei der Herstellung von Behältern aus Gusseisen mit Kugelgraphit deutlich verbessert. Dieses ist beispielsweise belegt in der Literaturstelle [31]. Darin sind die Werkstoffeigenschaften in den Fertigungszeiträumen von 1980 bis 1989 und von 1990 bis 1994 mit dem Ergebnis verglichen worden, dass sich insbesondere die Verformungseigenschaften des Werkstoffes wesentlich verbessert haben und über den gesamten zur Anwendung gelangenden Wanddickenbereich ein gleichmäßiges Niveau erreicht wird.

Zahlreiche internationale Forschungsprogramme zur weitergehenden Erfassung der Sicherheitsreserven von Behältern aus Gusseisen mit Kugelgraphit, insbesondere in Japan [32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40], in den USA [41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56] und in Deutschland [57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65] hatten zum einen die Charakterisierung des Werkstoffes in der jeweiligen Erzeugnisform mit den für einen Sicherheitsnachweis und eine qualitätsgesicherte Fertigung notwendigen Eigenschaften zum Ziel, zum anderen beinhalteten sie auch Behälterversuche mit extremen mechanischen Beanspruchungen, die über die bereits schwere Unfälle abdeckenden Prüfanforderungen der IAEA Regulations hinausgingen. Speziell erwähnt seien hier:

- 9 m-Fallversuche von CRIEPI, Japan, mit dem Original eines den großen deutschen CASTOR V-Behältern sehr ähnlichen Brennelement-Behälters bei -40 °C, u. a. mit einem künstlichen rissartigen Fehler kritischer Größe [36, 39] auf ein unnachgiebiges Fundament;
- 9 m-Fallversuche der SANDIA National Laboratories, USA, und ein kritischer 18 m-Fallversuch mit einem tiefkalten MOSAIK-Behälter mit künstlichem rissartigem Fehler auf ein Stahlrollenaufleger auf einem unnachgiebigen Fundament [49, 50];

- Fallversuche der BAM aus bis zu 14 m Höhe mit einem CASTOR VHLW-Behälter mit großem künstlichem Fehler auf ein Stahlrollenaufleger auf einem unnachgiebigen Fundament [57, 59, 61];
- Fallversuche der BAM aus bis zu 9 m Höhe mit einem dickwandigen Rohr aus Gusseisen mit Kugelgraphit (entsprechend einem 1:2,5-Modell eines großen zylindrischen CASTOR V-Behälters), versehen mit einem künstlichen rissartigen Fehler, auf ein Stahlrollenaufleger auf einem unnachgiebigen Fundament [57, 58];
- 9 m-Fallversuch der BAM mit einem CASTOR-MTR-Behälter bei -40 °C mit künstlichem rissartigem Fehler auf ein unnachgiebiges Fundament [14, 58];
- Fallversuch der BAM mit einem tiefkalten Gusscontainer Typ VI mit 5 künstlichen rissartigen Fehlern und außerordentlich hohen Biegespannungen auf ein repräsentatives Endlagerfundament [62];
- Fallversuche der GNS mit MOSAIK-Behältern aus 800 m Höhe auf eine Betonpiste [66].

Aufgrund der mit den o. g. Untersuchungen demonstrierten Fähigkeit von Behältern aus Gusseisen mit Kugelgraphit, auch härtesten Prüfungen ohne Bruchversagen standzuhalten, wurde offensichtlich, dass derartige Behälter unter korrekter Berücksichtigung insbesondere der bruchmechanischen Aspekte höheren Beanspruchungen ausgesetzt werden können als den im BAM-Basisgutachten [2] von 1985 genannten Maximalspannungen in einer Höhe von 50 % der 0,2 % - Dehngrenze. Voraussetzung für die Zulässigkeit derartiger höherer Maximalspannungen bei Transport- und Lagerbehältern ist jedoch die Einbeziehung eines werkstoffspezifischen bruchmechanischen Sicherheitsnachweises unter Beachtung der in dieser Leitlinie aufgeführten Empfehlungen.

3 Rechtsgrundlagen

3.1 Verkehrsrechtliche Vorschriften

Die nationalen und internationalen Vorschriften, die bei der Auslegung und Qualitätssicherung von Behältern für den Transport von radioaktiven Stoffen mit Straßenfahrzeugen, Eisenbahnen, See- und Binnenschiffen sowie Flugzeugen zu beachten sind, basieren übereinstimmend auf den Empfehlungen der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEA) für die Beförderung radioaktiver Stoffe [3]. Danach ist grundsätzlich kein Werkstoff von einer Verwendung für diese Behälter ausgeschlossen. Für den jeweiligen Verwendungsfall (Behältertyp) ist jedoch der Nachweis zu führen, dass ausreichende Sicherheiten gegen duktiles und sprödes Versagen gewährleistet sind. Solche Nachweise sind für unfallsichere Typ B – Behälter unter Beachtung der in den Nummern 655, 656, 657, 660 und 682 der IAEA Regulations [3] im einzelnen festgelegten Kriterien für die Prüfungen bzw. Prüfscenarien vorzulegen, die (z. T. in Abhängigkeit vom Behälterinhalt) in den Nummern 726, 727, 729 und 730 – 733 dieser Empfehlungen vorgeschrieben werden.

Die derzeit verbindliche Ausgabe der Empfehlungen der IAEA (TS-R-1 [3]) enthält mit Ausnahme einiger allgemeiner Anforderungen anrechnerisch geführte Sicherheitsnachweise keine konkreten Empfehlungen für anzuwendende Berechnungsmethoden. Dies gilt für Festigkeitsnachweise im allgemeinen ebenso wie für die Nachweise zur Sprödbrechtsicherheit von Bauteilen. Der Entwurf für den Safety Guide [30] zu den Regulations [3] enthält im Appendix VI jedoch relativ detaillierte Vorstellungen über Grundlagen, Randbedingungen und Formbruchmechanischer Nachweisführungen einschließlich der dabei zu berücksichtigenden Sicherheitsfaktoren (vgl. auch [67]). Diese Empfehlungen sollten nach Auffassung der BAM bei bruchmechanischen Nachweisführungen grundsätzlich beachtet werden.

Zusätzlich besteht auch die Möglichkeit, dass bei der Festlegung von Kriterien für die Bewertung des Bruchverhaltens von Werkstoffen und die damit verbundene Auswahl von Analyseverfahren ebenso wie bei der Quantifizierung von Sicherheitsfaktoren eigene Wege gegangen werden können. Voraussetzung ist jedoch, dass die schließlich angewendete Methodik in allen Schritten nachvollziehbar dargestellt und ausreichend verifiziert ist. Insofern berücksichtigen die mit dieser Leitlinie gegebenen Empfehlungen der BAM den Entwurf des Safety Guide TS-G-1.1 [30] und stellen eine weitergehende Präzisierung des vorhandenen Spielraums dar.

3.2 Atomrechtliche Vorschriften

3.2.1 Atomrechtliche Vorschriften für die Beförderung radioaktiver Stoffe

Das Atomgesetz (AtG) [4] und die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) [5] regeln u. a. die Genehmigungspflicht der Beförderung von Kernbrennstoffen bzw. sonstigen radioaktiven Stoffen oder kernbrennstoffhaltigen Abfällen. § 4 Abs. 2 Nr. 3 AtG (bzw. § 18 Abs. 1 Nr. 3 StrlSchV) fordern als Genehmigungsvoraussetzung u. a., dass

„... die Kernbrennstoffe (bzw. die sonstigen radioaktiven Stoffe) unter Beachtung der für den jeweiligen Verkehrsträger geltenden Rechtsvorschriften über

die Beförderung gefährlicher Güter befördert werden oder, soweit solche Vorschriften fehlen, auf andere Weise die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Beförderung der Kernbrennstoffe (bzw. der sonstigen radioaktiven Stoffe) getroffen ist.“

Soweit das Verkehrsrecht also die Beförderung von Kernbrennstoffen bzw. sonstiger radioaktiver Stoffe regelt, sind folglich alternativ zu führende Nachweise entbehrlich. Das gilt unter Würdigung der in den verkehrsrechtlichen Vorschriften detailliert festgelegten Auslegungskriterien und Nachweismethoden für den Eignungsnachweis der Typ B-Verpackungen als unfallsichere Umschließungen.

3.2.2 Atomrechtliche Vorschriften für die Zwischen- und Endlagerung von radioaktiven Stoffen

Die Rechtsgrundlage für die Zwischenlagerung von Kernbrennstoffen, wie z. B. bestrahlten Brennelementen in externen Transportbehälterzwischenlagern (TBL), ist § 6 des Atomgesetzes (AtG) [4], nach dem die Aufbewahrung von Kernbrennstoffen außerhalb der staatlichen Verwahrung der Genehmigung bedarf. Auf dieser Grundlage wurden seit 1983 die Aufbewahrungsgenehmigungen für die TBL in Gorleben und Ahaus durch das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (vormals die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB) erteilt. Als eine der Genehmigungsvoraussetzungen wird im AtG § 6 Abs. 2 Nr. 2 gefordert, dass

„... die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Aufbewahrung der Kernbrennstoffe getroffen ist.“

Die Rechtsgrundlage für die Endlagerung radioaktiver Abfälle ist § 9a Abs. 3 des Atomgesetzes, nach dem der Bund Anlagen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle einzurichten hat. Für das zugehörige Planfeststellungsverfahren wird in § 9b Abs. 4 AtG unter Verweis auf § 7 Abs. 2 Nr. 3 AtG u. a. auch hier gefordert, dass

„... die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb der Anlage getroffen ist.“

Wesentliche Voraussetzung für den Eignungsnachweis als Lagerbehälter ist in der Regel die verkehrsrechtliche Qualifikation der Behälter, damit sie auch problemfrei an- oder abtransportiert werden können. Für den Eignungsnachweis als Lagerbehälter sind die Auswirkungen der lagerspezifischen Störfall-Ereignisse maßgebend. Unter sinngemäßer Anwendung der BMI-Störfall-Leitlinien für Kernkraftwerke mit Druckwasserreaktoren werden alle Störfall-Ereignisse untersucht, die das Lager selbst oder die aufbewahrten Kernbrennstoffe bzw. radioaktiven Stoffe beeinträchtigen könnten. Hierbei wird zwischen Auslegungsstörfällen (z. B. Behälterabsturz vom Kran einer Lagerhalle) und auslegungsüberschreitenden Ereignissen (z. B. Flugzeugabsturz) unterschieden. Bedeutsam ist die Tatsache, dass die mechanischen Belastungen der zu unterstellenden Handhabungsstörfälle in einem Zwischen- oder Endlager nicht immer durch die verkehrsrechtlichen Prüfanforderungen abgedeckt werden. Dies gilt auch für die thermischen Einwirkungen von außen (z. B. Kerosinbrand nach Flugzeugabsturz oder untertägiges Brandszenarium) sowie die mechanischen Einwirkungen auf den Behälterkörper, die aus einem Flugzeugabsturz resultieren.

Zusätzliche Anforderungen für Lagerbehälter ergeben sich u. U. auch aus der Zeitdauer des Lagerbetriebes und der damit verbundenen Notwendigkeit der Gewährleistung des langfristigen dichten Einschlusses des radioaktiven Inhalts sowie der Abschirmungs- und Wärmeabfuhrfunktionen.

Eine technische Regel zur Festlegung von Anforderungen an Zwischen- und Endlager sowie insbesondere spezieller Anforderungen an die Lagerbehälter existiert zur Zeit nicht. Allerdings ist z. B. das Konzept der Behälterlager für die Brennelement-Zwischenlagerung von den Beratungsgremien des damaligen Bundesinnenministeriums (Reaktorsicherheitskommission (RSK) und Strahlenschutzkommission) eingehend beraten und befürwortet worden [68]. In jüngster Zeit wurde die RSK wieder mit der Angelegenheit befasst. Daraus entstanden die „Sicherheitstechnischen Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente in Behältern“ [69].

4 Kriterien für die mechanische Behälterauslegung

4.1 Grundsätzliche Überlegungen

Während für Betriebsbelastungen, seien sie quasistatisch, dynamisch oder auch zyklisch, quantifizierte Anforderungen an einzuhaltende Grenzwerte für Spannungen, Dehnungen und davon abhängende Belastungen, an Sicherheitsbeiwerte und Mindestduktilitäten in allgemein anerkannten Regeln der Technik festgelegt sind, ist dies für Unfallbelastungen *nicht* der Fall. Bei konventionellen Bauteilen werden Unfallbelastungen nicht explizit in die Auslegung einbezogen und dementsprechend ergeben sich in der Regel auch keine über die betrieblichen Anforderungen hinausgehenden Anforderungen an den Werkstoff.

Die Übertragung von Anforderungen an Sicherheitsbeiwerte und die Werkstoffmindestduktilität aus bestehenden Regelwerken für konventionelle Bauteile auf die Auslegung der Transport- und Lagerbehälter unter Unfallbeanspruchungen ist deshalb nicht möglich bzw. würde zu einer konservativen Auslegung führen. Sie würde nicht der Tatsache Rechnung tragen, dass das Auftreten einer den Typ B – Prüfbedingungen entsprechenden Unfallbelastung einerseits nur mit extrem kleiner Wahrscheinlichkeit zu erwarten ist und andererseits demgegenüber die Betriebsbeanspruchungen der Behälter unbedeutend sind.

Um dennoch auch für die maßgebenden Unfallbeanspruchungen hinreichende Sicherheit gegen Versagen infolge mechanischer Beanspruchung zu gewährleisten ohne auf Auslegungsvorschriften für betriebliche Beanspruchungen zurückzugreifen, bedarf es daher adäquater Sicherheitsnachweise. Diese sind dadurch gekennzeichnet, dass unter Berücksichtigung aller Unsicherheiten bei den Lastannahmen, bei der Beanspruchungsanalyse und den maßgebenden Werkstoffeigenschaften eine Beeinträchtigung der Sicherheitsfunktionen der Behälterkomponenten hinreichend sicher ausgeschlossen werden kann.

Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Durchführung von Belastungsversuchen mit Prototypbehältern im Originalmaßstab unter den hinsichtlich des zu erwartenden Schadens ungünstigsten Unfallbedingungen, sodass die für derartige Gussbehälter repräsentative, vollständige Matrix der Werkstoffeigenschaften mit den höchsten Beanspruchungen verknüpft wird. Die Ergebnisse der Belastungs- bzw. Fallversuche, insbesondere die ermittelten festigkeitsrelevanten Messwerte (Beschleunigungen, Dehnungen) und die nach dem Versuch durchgeführten Dichtheitsprüfungen, lassen somit eindeutige Schlussfolgerungen darüber zu, inwieweit die konstruktive Gestaltung und die Werkstoffeigenschaften ausreichen, um die Integrität und Dichtheit der geprüften Behälterbauart unter Unfallbelastungen zu gewährleisten.

Die Durchführung von Belastungsversuchen mit Modellbehältern ist grundsätzlich ebenfalls möglich, jedoch sind hierbei die Modellgesetzmäßigkeiten hinsichtlich aller relevanten Parameter wie z. B. Geometrie des Behälters, Beanspruchungsbedingungen und Werkstoffeigenschaften einschließlich deren Abhängigkeit von der Wanddicke zu berücksichtigen und die Versuchsergebnisse dementsprechend zu interpretieren (vgl. [3, 30]).

Der Sicherheitsnachweis ist ebenfalls möglich unter Bezugnahme auf die Ergebnisse erfolgreicher Versuche mit bauartähnlichen Behältern in Kombination mit geeigneten und konservativen Berechnungsverfahren und Übertragbarkeitsanalysen. Dazu ge-

hört auch die Untersuchung des Einflusses der Werkstoffeigenschaften des Serienmusters auf die Übertragbarkeit von Versuchsergebnissen. Hierbei können insbesondere Erkenntnisse aus Versuchen mit Prototypbehältern und aus Forschungsprogrammen Berücksichtigung finden.

4.2 Bezug zur Auslegung von Druckbehältern

Entsprechend der Umsetzung der Empfehlungen der IAEA in deutsches Recht sind Innendrucke in Transportbehältern zulässig, die dazu führen, dass einzelne Behälterbauarten auch der Druckgeräterichtlinie [70] unterliegen können. In Anbetracht der Ähnlichkeit von Druckbehältern mit Transport- und Lagerbehältern und infolge der tatsächlich möglichen Belastung dieser Behälter durch Innendruck läge es deshalb nahe, die für den Druckbehälterbereich festgelegten Werkstoffanforderungen und Auslegungsprinzipien [71, 72] zu übernehmen. Dieses ist jedoch aus den im Abschnitt 4.1 genannten Gründen nicht angebracht, da die maßgeblichen Belastungsbedingungen bei Transport- und Lagerbehältern nicht aus betrieblichen, sondern aus Unfallbeanspruchungen resultieren. Unter Punkt 3.19 der Druckgeräterichtlinie [70] ist daher der Ausschluss der dem Verkehrsrecht unterliegenden Versandstücke erfolgt. Andererseits werden natürlich eine Reihe von Verfahren oder Materialien nach dem Stand der Technik qualifiziert, die den Verfahrensweisen, die die Druckgeräte-richtlinie beinhaltet, sehr ähnlich sind.

4.3 Auslegung gegen plastische Verformung

4.3.1 Normale Betriebsbeanspruchungen

Die Auslegung technischer Bauteile erfolgt nach dem üblichen ingenieurmäßigen Vorgehen durch die Abgrenzung der unter normalen Transport- und Lagerbedingungen auftretenden Spannungen gegenüber den „zulässigen Spannungen“, die als Bruchteile der Fließspannung (z. B. der 0,2 % - Dehngrenze) bzw. der Zugfestigkeit festgelegt werden. Damit wird ausgeschlossen, dass unzulässige plastische Verformungen (Fließen) und letztlich plastisches Versagen eintreten. Normale Transportbedingungen sind durch die Beanspruchungen charakterisiert, die sich unter den gemäß den IAEA Regulations [3] in den Nummern 606-608 und 612 zu berücksichtigenden Einwirkungen und bei Prüfungen gemäß den Nummern 719-724 dieser Empfehlungen ergeben. Betriebliche Beanspruchungen unter Lagerbedingungen resultieren aus den anlagenspezifischen Handhabungsvorgängen der Behälter und sind i. d. R. durch die Transportbedingungen abgedeckt.

Die jeweiligen Quotienten aus Fließspannung $R_{p0,2}$ oder Zugfestigkeit R_m und maximaler zulässiger Spannung σ im Betrieb sind als Sicherheiten S definiert:

$$S_F = \frac{R_{p0,2}}{\sigma} \quad \text{bzw.} \quad S_B = \frac{R_m}{\sigma} \quad (1)$$

Sie dürfen Grenzwerte, die die jeweiligen Erfordernisse berücksichtigen und in Regelwerken, Richtlinien u. a. festgelegt sind, nicht unterschreiten.

Die Sicherheitsbeiwerte sollen alle denkbaren Abweichungen, die aus den Lastannahmen, den Berechnungsverfahren, infolge von Dimensionsabweichungen (Maßtoleranzen) und Inhomogenitäten der Werkstoffqualität resultieren, konservativ abdecken. Die technischen Regelwerke im Maschinen- und Apparatebau setzen den erforderlichen Sicherheitsbeiwert allgemein um so höher an, je geringer die Duktilität des verwendeten Werkstoffes ist (z. B. [73, 74]). Auch allgemeine ingenieurwissenschaftliche Überlegungen folgen diesem Prinzip [75, 76, 77, 78, 79, 80, 81]. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, dass ein Versagen durch Verformungsbruch bei geringer Werkstoffduktilität auch schon bei geringer örtlicher Plastifizierung möglich ist. Lokale Spannungsspitzen in Verbindung mit örtlicher Plastifizierung sind bei realen technischen Konstruktionen durch konstruktiv oder fertigungstechnisch bedingte und oft nur schwer erfassbare Unstetigkeiten sowie aufgrund von Werkstoffinhomogenitäten nahezu immer gegeben.

Plastische Verformungen bei Transport- und Lagerbehältern können grundsätzlich deren Dichtheit und Integrität gefährden. Eine mögliche Gefährdung der Dichtheit ergibt sich in erster Linie durch bleibende Verformungen im Bereich des Deckeldichtsystems. Eine mögliche Gefährdung der Behälterintegrität ergibt sich durch plastische Deformationen der Behälterstruktur bis hin zum Bruch.

In der Regel sind die aus den betrieblichen Bedingungen resultierenden mechanischen Beanspruchungen der Bauteile von Transport- und Lagerbehältern derart niedrig, dass die Spannungen weit unterhalb der Streckgrenze des Werkstoffs bleiben. Damit ist für betriebliche Belastungen die Einhaltung von Sicherheitsmargen gegen plastische Deformationen entsprechend technischen Regelwerken des Maschinen- und Apparatebaus ohne Probleme möglich.

4.3.2 Unfallbeanspruchungen

Auf die auslegungsbestimmenden Unfallbeanspruchungen der Transport- und Lagerbehälter ist die Übertragung der für die Bewertung betriebsbedingter Belastungen üblichen Verfahrensweise weder sinnvoll noch möglich; vgl. hierzu Abschnitt 4.1. Vielmehr ist in diesem Fall auf der Basis einer detaillierten Spannungsanalyse und/oder mittels Fallversuchen der Nachweis zu führen, dass die auftretenden Verformungen der Behälterstruktur weder die Dichtsysteme in ihrer Wirksamkeit beeinträchtigen noch die Behälterintegrität durch Bruch gefährden. Es ist zu beachten, dass Sicherheitsbeiwerte zu verwenden sind, die nachweislich für Unfallbeanspruchungen gelten und mögliche Ungenauigkeiten bei Lastannahmen, bei der Behälterausführung und bei Berechnungs- und Versuchsergebnissen sowie Abweichungen in der Werkstoffqualität berücksichtigen. Grundsätzlich können unter Einbeziehung der o. g. Sicherheitsbeiwerte bei Auslegung gegen unzulässige Verformungen lokale Spannungen bis zur Streckgrenze des Werkstoffs zulässig sein. Darüber hinaus gehende Beanspruchungen sind nur zulässig, wenn in jedem Einzelfall der zweifelsfreie Nachweis erbracht wird, dass durch auftretende plastische Deformationen unter Berücksichtigung des umgebenden Spannungsfeldes im Bauteil und der spezifizierten Werkstoffqualität weder Dichtheit noch Integrität des Behälters gefährdet sind.

4.4 Bruchmechanische Auslegung

4.4.1 Geltungsbereich und Voraussetzungen

Das bisher angewendete sicherheitstechnische Konzept [2, 82] für Transport- und Lagerbehälter aus Gusseisen mit Kugelgraphit ist beim Vorliegen quasistatischer Beanspruchungsbedingungen und einer maximalen Spannung bis zur halben 0,2 % - Dehngrenze des Werkstoffs einsetzbar. Durch die Begrenzung der maximalen Spannungen, die Festlegung spezifischer Mindestanforderungen an die Werkstoffqualität bezüglich des Gefügezustandes und der mechanisch-technologischen Materialeigenschaften hinsichtlich Duktilität und Festigkeit sowie Anforderungen an die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung zum Ausschluss rissartiger Fehler kritischer Größe wird ein bruchmechanisches Versagen des Behälters ausgeschlossen. Auf der Grundlage von detaillierten Fertigungs- und Prüffolgeplänen sowie Werkstoffspezifikationen wird ein unterer, statistisch abgesicherter bruchmechanischer Werkstoffkennwert garantiert, der am Serienbehälter im einzelnen nicht mehr nachgewiesen werden muss.

Sind die o. g. Voraussetzungen zur Anwendung dieses Sicherheitskonzeptes für eine Behälterbauart nicht erfüllt, dann ist ein umfassender bruchmechanischer Sicherheitsnachweis erforderlich. Dieser Nachweis kann durch Berechnungen oder im Behälterfallversuch geführt werden (siehe Abschnitt 5). Dabei sollten die bruchmechanischen Bewertungsverfahren gemäß den Empfehlungen der IAEA angewendet werden [30]. Diese basieren auf dem Prinzip des Ausschlusses der Rissinitiierung und folglich auch des stabilen bzw. instabilen Risswachstums bei Vorhandensein eines rissartigen Fehlers. Die allgemeine Vorgehensweise für den bruchmechanischen Sicherheitsnachweis wird im folgenden beschrieben.

4.4.2 Bruchmechanischer Sicherheitsnachweis

Bei der bruchmechanischen Sicherheitsanalyse sind die Methoden der linear-elastischen Bruchmechanik (LEBM) anzuwenden, falls die plastischen Verformungen auf den Bereich der durch die LEBM definierten Prozesszone beschränkt bleiben. Werden die Grenzen der linear-elastischen Bruchmechanik infolge eines elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens nicht eingehalten, ist der bruchmechanische Sicherheitsnachweis unter Verwendung von Kennwerten der elastisch-plastischen Bruchmechanik (EPBM) durchzuführen.

Im Rahmen der Sicherheitsanalyse ist die Belastungsgeschwindigkeit aus der ermittelten Behälterbeanspruchung abzuleiten und in den bruchmechanischen Analysen zu berücksichtigen. Zur Abgrenzung zwischen einer Nachweisführung für quasistatische oder dynamische Beanspruchungsbedingungen und damit auch der Verwendung entsprechender statischer bzw. dynamischer Werkstoffkennwerte und Beanspruchungskenngrößen ist nach derzeitigem Kenntnisstand bei Dehngeschwindigkeiten $\dot{\epsilon} \geq 0,1 \text{ s}^{-1}$ im als fehlerfrei unterstellten Behälterkörper von dynamischen Beanspruchungsbedingungen auszugehen.

Die Bewertung der Bruchsicherheit erfolgt durch einen Vergleich von bruchmechanischen Beanspruchungsparametern und den die Widerstandsfähigkeit gegen Riss-einleitung charakterisierenden bruchmechanischen Werkstoffkennwerten. Das Ver-

sagen durch spröden Bruch wird vermieden, wenn der Spannungsintensitätsfaktor K_{appl} , der die Beanspruchung des Risses bzw. Fehlers im Bauteil kennzeichnet, kleiner als der entsprechende Werkstoffkennwert K_{mat} ist. Entsprechend wird das Versagen durch duktilen Bruch dadurch ausgeschlossen, dass der Wert des J -Integrals J_{appl} auf der Beanspruchungsseite kleiner als der entsprechende Risswiderstand J_{mat} des Materials ist:

$$K_{appl} < K_{mat} \quad \text{bzw.} \quad J_{appl} < J_{mat} \quad (2)$$

Für Mode I – Rissbelastung gilt demnach bei statischer Beanspruchung mit den statischen Beanspruchungsparametern ($K_{I,appl}$, $J_{I,appl}$) und statischen Werkstoffkennwerten (K_{Ic} , J_i)

$$K_{I,appl} \leq \frac{K_{Ic}}{S} \quad \text{bzw.} \quad J_{I,appl} \leq \frac{J_i}{S} \quad (3)$$

sowie bei dynamischer Beanspruchung mit den dynamischen Beanspruchungsparametern ($K_{I,appl}^d$, $J_{I,appl}^d$) und dynamischen Werkstoffkennwerten (K_{Id} , J_{id})

$$K_{I,appl}^d \leq \frac{K_{Id}}{S} \quad \text{bzw.} \quad J_{I,appl}^d \leq \frac{J_{id}}{S} \quad (4)$$

Der Beanspruchungsparameter muss dabei eine obere Grenze darstellen durch die Berücksichtigung der ungünstigsten Fehlergeometrie und -orientierung, der maximalen Spannung und Rissgröße sowie der Belastungsgeschwindigkeit (vgl. hierzu Abschnitt 4.4.3). Eine wesentliche Voraussetzung zur Führung des bruchmechanischen Sicherheitsnachweises ist demnach eine detaillierte Spannungsanalyse. Die Einbeziehung der Fehlerart und -größe bedingt Vorgaben zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung des Bauteils, um Fehler kritischer Größe in allen geometrischen Bereichen sicher aufzufinden (vgl. Abschnitt 4.4.4). Zusätzlich ist zur Erfassung von Ungenauigkeiten und Unsicherheiten bei der Spannungsanalyse, der zerstörungsfreien Prüfung und der bruchmechanischen Modellbetrachtungen ein geeigneter Sicherheitsfaktor für den Beanspruchungsparameter zu berücksichtigen, dessen Wert im einzelnen zu begründen ist.

Diese Voraussetzungen sind bei der Festlegung der Sicherheitsbeiwerte S in den Gln. (3) und (4) zu berücksichtigen. Für den Nachweis der Sicherheit gegen Sprödbbruch bei statischer Mode I – Belastung leitet sich z. B. daraus mit

$$K_{I,appl} = Y \sigma \sqrt{\pi a} \quad \text{und} \quad a = a_{zP} \quad (5)$$

die Forderung

$$K_{Ic} \geq S_K \cdot Y \cdot S_\sigma \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot S_{zP} a_{zP}} \quad (6)$$

ab. In den Gln. (5) und (6) bedeuten

- σ die für die bruchmechanische Bewertung maßgebliche Spannung,
 $a_{z/P}$ die Größe des bruchmechanisch zu bewertenden Fehlers, dessen Existenz durch die zerstörungsfreie Prüfung sicher auszuschließen ist,
 Y eine vom Berechnungsverfahren abhängige Funktion,
 S_σ der Sicherheitsfaktor für die berechnete Spannung ($S_\sigma > 1$),
 $S_{z/P}$ der Sicherheitsfaktor für die zerstörungsfreie Prüfung ($S_{z/P} > 1$) und
 S_K der Sicherheitsfaktor, der sowohl Unsicherheiten bei der Bestimmung der Bruchzähigkeit (K_{Ic}) des Werkstoffs als auch bei der rechnerischen Bestimmung des Spannungsintensitätsfaktors ($K_{I,appl}$) einschließt, die nicht durch S_σ und $S_{z/P}$ berücksichtigt werden ($S_K \geq 1$).

Formal beträgt der in Gl. (3) für das Berechnungsverfahren zu berücksichtigende Sicherheitsbeiwert S damit:

$$S = S_K S_\sigma \sqrt{S_{z/P}} \quad (7)$$

Als Werkstoffkennwert (im Beispiel K_{Ic}) muss eine untere Grenze unter Berücksichtigung der Vorgaben der Werkstoffspezifikation sowie des Einflusses der Beanspruchungsgeschwindigkeit, der Temperatur und der Wanddicke des Behälters festgelegt werden. Zur Ermittlung dieses Kennwertes ist von einer hinreichend großen, statistisch abgesicherten Datenbasis auszugehen, die Werkstoffuntersuchungen bei der höchsten abzudeckenden Beanspruchungsgeschwindigkeit in Kombination mit der geringsten Einsatztemperatur einschließen. Alternativ kann der Werkstoffkennwert bei Beachtung der skizzierten Randbedingungen auch für den Einzelfall ermittelt werden. Die Werkstoffeigenschaften der verwendeten Proben müssen die Werkstoffeigenschaften in den Bauteilen der späteren Serienmuster sicher abdecken. Die Ermittlung zulässiger bruchmechanischer Werkstoffkennwerte wird im Abschnitt 4.4.5 erläutert.

4.4.3 Ermittlung der Beanspruchungen im Bauteil

Im bruchmechanischen Sicherheitsnachweis für eine Behälterbauart ist die Einhaltung der Bruchsicherheitskriterien, Gln. (3) bzw. (4), an allen sicherheitsrelevanten Stellen der Behälterkonstruktion und zu jedem Zeitpunkt zu zeigen. Der zur sicherheitstechnischen Beurteilung eines Risses im Behälter heranzuziehende Wert des Spannungsintensitätsfaktors bzw. des J -Integrals ist sowohl bei quasistatischer als auch dynamischer äußerer Belastung aus dem zeitlichen und örtlichen Maximum entlang der angenommenen Rissfront zu bilden:

$$K_{I,appl} = \max\{K_{I,appl}(Ort, Zeit)\} \quad J_{I,appl} = \max\{J_{I,appl}(Ort, Zeit)\} \quad (8)$$

bzw.

$$K_{I,appl}^d = \max\{K_{I,appl}^d(Ort, Zeit)\} \quad J_{I,appl}^d = \max\{J_{I,appl}^d(Ort, Zeit)\} \quad (9)$$

Die rechnerische bruchmechanische Analyse eines Behälters mit eingebrachter Risskonfiguration erfolgt durch Simulation der mechanischen Prüfungen, denen der Behälter gemäß den Anforderungen der Vorschriften unterzogen werden muss (i. a. Falltests [3]). Dabei sind die am höchsten bruchmechanisch beanspruchten Stellen des Behälters zu identifizieren und zu bewerten. In erster Linie sind das die Stellen mit den höchsten Spannungen im als fehlerfrei angenommenen Behälter, die jedoch bei den einzelnen mechanischen Prüfungen an unterschiedlichen Stellen im Behälterkörper liegen können. Da der Ort der höchsten Spannung nicht notwendigerweise der Ort höchster bruchmechanischer Beanspruchung ist, sind Orte mit geringeren Spannungen erforderlichenfalls in die Untersuchung einzubeziehen. Die Berechnungsergebnisse, wie Verschiebungen, Verzerrungen, Verzerrungsgeschwindigkeiten und Spannungen, sind ausführlich (bei dynamischen Berechnungen unter Berücksichtigung ihres zeitlichen Verlaufes) darzustellen und zu diskutieren. Die Wahl der bruchmechanisch zu untersuchenden Stellen im Behälter ist eingehend zu begründen. Die Berechnung der Rissbeanspruchung an diesen Stellen kann entweder

- a) mittels einer Analyse des gesamten Behälters mit eingebrachter Risskonfiguration oder
- b) durch Herauslösen der Risskonfiguration einschließlich einer Umgebung, welcher die Verschiebungen und Kräfte als Randbedingungen aus den Ergebnissen der Berechnung des intakten Behälters aufzuprägen sind,

durchgeführt werden. Bei der Wahl der Rissgröße sind die Vorgaben im Abschnitt 4.4.4 zu beachten.

Die Methode a) ist sowohl für statische als auch dynamische Analysen geeignet. Bei statischen Problemstellungen kann für die numerische Berechnung des Spannungsintensitätsfaktors bzw. des J -Integrals oftmals auf entsprechende Möglichkeiten vorhandener Finite - Elemente (FE) - Programme zurückgegriffen werden. Bei der Berücksichtigung von Massenkräften ist diese Möglichkeit in Standard-FE-Programmen häufig nicht vorhanden. Dazu ist beispielsweise jedoch ein generell einsetzbarer Postprozessor verfügbar [83]. Die Konvergenz der ermittelten Spannungsintensitätsfaktoren K_{appl} bzw. der J -Integralwerte J_{appl} ist nachzuweisen, bei Berechnung des J -Integrals durch die Verwendung unterschiedlicher Integrationsgebiete.

Die Methode b) ist nur für quasistatische Rissbeanspruchungen zulässig, d. h., wenn der Einfluss von Massenkräften auf das Spannungsfeld in der Umgebung der Risspitze vernachlässigbar ist. Zur Analyse der Risskonfiguration durch deren Herauslösen und das Aufbringen der Last aus der globalen Berechnung ist die Verwendung von Tabellenwerken zur Ermittlung der Spannungsintensitätsfaktoren K_{appl} erlaubt (z. B. [84]). Grundsätzlich ist bei der Verwendung solcher Lösungsansätze deren Gültigkeit auch unter den vorliegenden Randbedingungen nachzuweisen.

Die Anwendbarkeit statischer bruchmechanischer Lösungen aus Formelsammlungen für Behälterabsturzzenarien wurde von der BAM an einem speziellen Fall nachgewiesen [85, 86], bei dem der Riss trotz zeitabhängiger, sich aber hinreichend langsam ändernder äußerer Belastung quasistatisches Verhalten zeigte. Es ist zu betonen, dass eine pauschale Verallgemeinerung dieser Ergebnisse auf andere, für statische Lastfälle begründete Formeln und vor allem andere Randbedingungen unzu-

lässig ist. Auf die gezeigte Weise lässt sich jedoch die Gültigkeit solcher Ansätze für Behälterabsturzszenarioszenarien überprüfen.

Es ist hervorzuheben, dass bruchmechanische Lösungen auf der Grundlage einzelner rissartiger Fehler in einfachen Bauteilgeometrien (wie in [87, 88, 89]) häufig in der Rissöffnungsart Mode I (d. h. Öffnen der Rissufer unter Normalspannung während die Scherspannung entlang der Rissufer verschwindet) nicht generell auf die Gegebenheiten realer Behälterkonstruktionen übertragen werden können, da z. B. in Ecken- und Kantenbereichen von komplizierteren Beanspruchungssituationen auszugehen ist. Hierfür ist eine eingehende Verifizierung der zugrunde gelegten Spannungszustände, der Anwendbarkeit des vorgesehenen Rissmodells und eventueller konservativer Abschätzungen notwendig, die ggf. durch die Berechnung dynamischer Spannungsintensitätsfaktoren bzw. J -Integralwerte in diesen geometrisch komplizierten Behälterbereichen zu begründen sind.

Im allgemeinen ist von einer „mixed-mode“-Beanspruchung auszugehen und diese zu diskutieren. Das Nichtbeachten zusätzlicher K_{II} -Beanspruchungen, d. h. einer ebenen Scherbelastung in Rissausbreitungsrichtung zusätzlich zum Öffnen der Rissufer unter Normalspannung, kann zu einer Unterschätzung der Bruchgefährdung führen. Eine zusätzliche K_{II} -Beanspruchung kann u. a. auch als Folge des Vorhandenseins mehrerer Risse mit unterschiedlicher Richtung auftreten, wobei in diesem Beispiel eine Unterschätzung der Bruchgefährdung bis zu 20 % möglich ist [90]. Es gibt für „mixed-mode“-Beanspruchungen keine standardisierten Prüfmethoden, sodass verwendete Prüfergebnisse (auch für Mode II, Mode III bzw. deren Kombinationen) entsprechend nachvollziehbar sein müssen.

Die Eignung der eingesetzten Berechnungsmodelle, Berechnungsverfahren und Programmsysteme für die Untersuchung der dynamischen Prozesse beim Behälteraufprall sowie die Qualifikation der mit den Arbeiten betrauten Mitarbeiter sind nachzuweisen. Bei der Erstellung numerisch geführter Sicherheitsnachweise ist die BAM-Richtlinie [91] zu beachten.

4.4.4 Festlegung der Fehlergröße

Die Festlegung von zulässigen bzw. relevanten Werkstofffehlergrößen im Bauteil erfolgt im Zusammenhang mit den durchzuführenden zerstörungsfreien Prüfungen (s. Abschnitt 6) in entsprechenden Prüfvorschriften. Die registrierpflichtigen Anzeigen und Nachweisgrenzen sind darin in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie (z. B. der Wanddicke) zu spezifizieren.

Der bei der bruchmechanischen Auslegung zugrunde zu legende Werkstofffehler ist so groß zu wählen, dass die Existenz eines Fehlers dieser Größe durch das gewählte Verfahren für die zerstörungsfreie Prüfung ausgeschlossen wird. Die daraus abgeleitete, in die bruchmechanische Bewertung eingehende Rissgröße muss den auszuschließenden Werkstofffehler in konservativer Weise abdecken. Die Genauigkeit des Verfahrens für die zerstörungsfreie Prüfung ist mit einem Sicherheitsfaktor zu bewerten.

4.4.5 Ermittlung bruchmechanischer Werkstoffkennwerte

Die Bruchzähigkeit duktiler Gusseisenwerkstoffe wird vom Gefügezustand, den Beanspruchungsgrößen Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit sowie von der Geometrie des Bauteiles bzw. der Probe und einer daraus resultierenden Dehnungsbehinderung beeinflusst [31, 56, 92, 93, 94]. In Abhängigkeit vom Zähigkeitsverhalten, das aus dem Komplex dieser Beanspruchungsbedingungen resultiert, müssen bei der Ermittlung der Werkstoffkennwerte die entsprechenden Bruchmechanikkonzepte angewendet werden. Während das J -Integral-Konzept sowohl im Gültigkeitsbereich der linear-elastischen Bruchmechanik als auch der Fließbruchmechanik einsetzbar ist, gilt das Spannungsintensitätsfaktor-Konzept (oder K -Konzept) nur im Bereich des linear-elastischen Werkstoffverhaltens. Beide Konzepte sind durch die Beziehungen

$$K_J = \sqrt{\frac{J E}{1 - \nu^2}} \quad (10)$$

für den ebenen Verzerrungszustand und

$$K_J = \sqrt{J E} \quad (11)$$

für den ebenen Spannungszustand unter Verwendung des Elastizitätsmoduls E und der Poisson-Zahl ν miteinander verknüpft.

Im Gegensatz zur uneingeschränkt zulässigen Umrechnung von Bruchzähigkeitswerten K in J -Integralwerte ist die Umrechnung von Kennwerten des J -Integral-Konzeptes in Bruchzähigkeiten K_J nur bis zu geringer Plastifizierung im Rissspitzenbereich (Kleinbereichsfließen) statthaft. Anderenfalls können bei Anwendung der Gleichungen (10) bzw. (11) auf Gusseisen mit Kugelgraphit auch nichtkonservative Ergebnisse resultieren, in deren Folge eine Überschätzung tolerierbarer Spannungen bzw. Fehlergrößen möglich ist [95].

Bruchmechanische Kennwerte bei dynamischer Beanspruchung werden in Analogie zur statischen Beanspruchung unter Berücksichtigung der Vorgaben in ASTM E 399 [96] (linear-elastisch) sowie ESIS P2 [97] und ASTM E 1820 [98] (elastisch-plastisch) ermittelt. Quasistatische Beanspruchungsbedingungen werden dabei für Dehngeschwindigkeiten $\dot{\epsilon} < 0,1 \text{ s}^{-1}$ definiert. In Abhängigkeit von der für den jeweils vorliegenden Nachweisfall relevanten Beanspruchungsgeschwindigkeit müssen dementsprechend statische oder dynamische bruchmechanische Werkstoffkennwerte ermittelt und verwendet werden, wobei insbesondere im dynamischen Beanspruchungsfall die Anwendung zuverlässiger messtechnischer Verfahren zur Erfassung der Last, der Verschiebung in der Lastangriffslinie und zur Detektion der Rissinitiierung vorauszusetzen ist.

Im Gültigkeitsbereich des K -Konzeptes der linear-elastischen Bruchmechanik setzt die Bestimmung der statischen Bruchzähigkeit K_{Ic} bzw. der dynamischen Bruchzähigkeit K_{Id} nach ASTM E 399 [96] die Prüfung von ausreichend großen Proben voraus, die in der Praxis einen erhöhten Prüfaufwand darstellen. An kleineren Proben können im allgemeinen nur elastisch-plastische Zähigkeitskennwerte bestimmt wer-

den wie der werkstoffspezifische Risseinleitungswiderstand nach dem J -Integral-Konzept auf der Grundlage der Prüfstandards ESIS P2 [97] bzw. ASTM E 1820 [98].

Im Rahmen der Behälterbegutachtung erfolgt die Ermittlung von Werkstoffkennwerten im allgemeinen an kleinen Bruchmechanikproben, die aufgrund ihrer geringen Probengröße und des elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens von Gusseisen mit Kugelgraphit die Anwendung des J -Integral-Konzeptes mit Aufnahme der Risswiderstandskurve ($J - \Delta a$ bzw. $J_d - \Delta a$) und die Festlegung von statischen bzw. dynamischen Risseinleitungszähigkeiten gemäß ESIS P2 (J_i bzw. J_{id}) und ASTM E 1820 (J_{Ic} bzw. J_{Id}) erfordern.

Bei Anwendung des J -Integral-Konzeptes für die Kennwertermittlung ist eine Umrechnung in entsprechende K -Werte gemäß der Gln. (10) und (11) nicht erforderlich, falls die Berechnung der bruchmechanischen Beanspruchung für den Sicherheitsnachweis rissbehafteter Bauteile mit der FE-Methode unter Berücksichtigung des beanspruchungsabhängigen Festigkeits- und Verformungsverhaltens ebenfalls auf der Basis des J -Integral-Konzeptes erfolgt (vgl. Abschnitt 4.4.3).

4.4.6 Bruchmechanische Gewährleistungswerte

Im Ergebnis umfangreicher Werkstoffuntersuchungen im Rahmen der Behälterbegutachtung durch die BAM sowie in Forschungsarbeiten [59] gilt für Werkstoffe, die dem Basisgutachten [2] genügen, bei der niedrigsten Auslegungstemperatur von -40 °C der statische Werkstoffkennwert $K_{Ic} = 50\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ als abgesichert.

Im Vergleich zur bruchmechanischen Charakterisierung von Behälterwerkstoffen bei statischer Beanspruchung liegen für das komplexe Beanspruchungsverhalten unter dynamischen Beanspruchungsbedingungen (Dehngeschwindigkeit $\dot{\varepsilon} \geq 0,1\text{ s}^{-1}$) nur bruchmechanische Analysen vor, die den Zusammenhang von Werkstoffqualität und bruchmechanischen Kennwerten für Kleinproben umfassen [31, 56, 93, 94, 99]. Während unter statischer Beanspruchung bei Prüftemperaturen bis ca. -70 °C bei Einhaltung der Festlegungen des bisherigen Basisgutachtens [2] keine signifikante Verringerung der Bruchzähigkeit zu verzeichnen ist, wird bei dynamischer Beanspruchung im Temperaturbereich von etwa -20 °C bis -40 °C das Übergangsgebiet der Bruchzähigkeit durchlaufen. Infolge des im Übergangsgebiet wechselnden Bruchmodus vom Duktil- zum Spaltbruch können die dynamischen Rissinitiierungswerte von Gusseisen mit Kugelgraphit auf sehr niedrige Beträge abfallen. Im Bereich der Tieflagenzähigkeit werden K_{Id} -Werte unterhalb $50\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ bis hinab zu $30\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ erhalten [53, 100, 101, 102, 103].

Bei der BAM wurden werkstoff- und bruchmechanische Untersuchungen an aus den Wänden von Behältern entnommenen Biegeproben zur Ermittlung von dynamischen bruchmechanischen Werkstoffkennwerten auch für Großproben durchgeführt [104]. In diesen Stoßbiegeversuchen beträgt die Beanspruchungsrate $\dot{K} \approx 10^4\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}/\text{s}$. Dabei liegt für den untersuchten Gusseisenwerkstoff mit mittleren Perlitgehalten von bis zu 20 % der Übergangsbereich bei Temperaturen von -40 °C bis 22 °C . In diesen Untersuchungen wurde bei -40 °C ein Mindestwert der Bruchzähigkeit von $50\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ für die wanddickenbezogenen Großproben auch unter dynamischer Beanspruchung ermittelt.

Aufgrund der wenigen verfügbaren Werkstoffkennwerte für Großproben kann dieser Wert jedoch nicht bei einem bruchmechanischen Sicherheitsnachweis für dynamische Beanspruchungsbedingungen ($\dot{\epsilon} \geq 0,1 \text{ s}^{-1}$) herangezogen werden, sofern er nicht durch weitere Untersuchungen gestützt wird. Ausgehend vom derzeitigen Untersuchungsstand im Tieftemperaturbereich von -50 °C bis 0 °C und unter Berücksichtigung der dreifachen Standardabweichung als zusätzliche Absicherung des kleinsten Einzelwertes der Bruchzähigkeit aus Versuchen mit Kleinproben ist für die niedrigste Auslegungstemperatur von -40 °C ein möglicher, für die Auslegung belastbarer Wert für die dynamische Bruchzähigkeit oberhalb von $30 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ zu erwarten [104].

5 Anforderungen an die sicherheitstechnische Nachweisführung

Behälter aus Gusseisen mit Kugelgraphit müssen unter Beachtung der verkehrs- und atomrechtlichen Anforderungen die Einhaltung der Schutzziele Dichtheit, Abschirmung und Unterkritikalität sowohl bei betrieblichen Gegebenheiten als auch insbesondere unter Unfallbedingungen gewährleisten. Diese Schutzziele werden in erster Linie bei Unfallbedingungen durch plastische Verformungen oder durch Bruch gefährdet. Der Sicherheitsnachweis für eine Behälterbauart unter Einbeziehung des jeweils verwendeten Werkstoffes lässt sich im Einklang mit den Empfehlungen der IAEA [3] durch vier unterschiedliche Methoden bzw. deren Kombination erbringen:

- Behälterversuche mit Prototypen
- Behälterversuche mit Modellen
- Bezug zu bereits erbrachten Sicherheitsnachweisen (Analogiebetrachtungen)
- Berechnung

Schließlich ist durch geeignete qualitätssichernde Maßnahmen die Einhaltung der dem Sicherheitsnachweis zugrunde gelegten Randbedingungen für alle Behälter der späteren Serienfertigung zu gewährleisten (vgl. hierzu Abschnitt 6).

Mit jedem Sicherheitsnachweis ist zu zeigen, dass es unter den ungünstigsten Beanspruchungsbedingungen an keiner Stelle des Behälters zu einer Gefährdung der Komponenten der dichten Umschließung und der Abschirmung durch plastische Deformationen (d. h., insbesondere nicht zu einer unzulässigen Erhöhung der Leckageraten der Deckeldichtsysteme) oder zu einer Gefährdung der Integrität durch Bruch kommen kann. Voraussetzung für derartige Nachweise ist eine detaillierte Beanspruchungsanalyse aller Komponenten des Behälters, die sowohl experimentell mittels instrumentierter Behälterversuche als auch mittels analytischer bzw. numerischer Berechnungsverfahren (z. B. Methode der finiten Elemente) oder in geeigneter Kombination dieser Verfahren erbracht werden kann. Letzteres ist insbesondere zur Verifizierung benutzter Berechnungsmodelle von Bedeutung.

Der experimentelle Sicherheitsnachweis durch Fallversuche mit Prototypbehältern liefert unter direkter Anwendung der zu erfüllenden Kriterien eine unmittelbare Aussage zur Bauteilsicherheit bei der tiefsten Einsatztemperatur und ist werkstoffmechanisch als direkter Vergleich von Beanspruchungs- und Eigenschaftskennwerten zu verstehen. Zur bruchmechanischen Nachweisführung (vgl. Abschnitt 4.4) sind die maßgebenden Werkstofffehler in den Prototypbehälter zusätzlich einzuarbeiten. Die Konservativität der gewählten Versuchsparameter, hier insbesondere hinsichtlich der abdeckenden rissartigen Fehler, ist nachzuweisen.

Grundsätzlich können auch mit maßstäblich verkleinerten Behältermodellen oder Bauteilversuchen realistische Aussagen über die Beanspruchungen unter IAEA-Prüfbedingungen gewonnen werden. Formal werden mit den Empfehlungen im IAEA Safety Guide [30] zu den IAEA Regulations [3] auch die notwendigen Grundlagen für die Ermittlung der Beanspruchungen aus Modellversuchen bereit gestellt. In der Realität zeigt sich aber, dass oft weitergehende Betrachtungen erforderlich sind, u. a., weil eine realitätsnahe Modellierung aller Einflussgrößen (Abmessungen, Werkstoffe, Inhalt, Aufprallfundament) nicht immer möglich ist oder nicht in jedem Fall nur

formalen (maßstabsproportionalen) Kriterien unterliegt (wie z. B. die Abmessungen eines Stoßdämpfers aufgrund der nichtlinearen Verformungseigenschaften oder einer Strukturlänge des Materials, das Verhalten von Dichtsystemen mit Metalldichtungen usw.).

Sinngemäß, aber in verstärktem Maße, treffen diese Feststellungen auch bei der Übertragung von Versuchsergebnissen auf bauartähnliche Behälter zu. Neben den dabei ebenfalls notwendigen Umrechnungen von Messwerten unter Berücksichtigung von unterschiedlichen Abmessungen der beiden Bauarten müssen ggf. Unterschiede bewertet werden, die einen erheblichen Einfluss auf die Beanspruchungen bei bestimmten Fallpositionen haben. Dazu gehören beispielsweise bei horizontalen Fallpositionen neben der Stoßdämpfergeometrie und dem Fundamentaufbau die Auslegung der Tragzapfen (Anordnung, Form, Werkstoff) und ihr Zusammenwirken mit dem Stoßdämpfer, aber auch auf den ersten Blick unwesentlich erscheinende Unterschiede in der Geometrie (Radien von Hohlkehlen usw.). In jedem Fall ist bei der Bewertung der Ähnlichkeit von Bauarten unter Zuhilfenahme von Ähnlichkeitskriterien auch der Einfluss von Detailunterschieden sorgfältig zu berücksichtigen. Eine Anwendung der im Safety Guide [30] festgelegten Ähnlichkeitsbeziehungen ist nur unter diesen Bedingungen zulässig.

Aufgrund der Komplexität realer Behälterkonstruktionen und der zu berücksichtigenden dynamischen Belastungssituationen eignen sich zur rechnerischen Beanspruchungsanalyse in erster Linie numerische Verfahren z. B. mit Lösungsansätzen auf der Grundlage der Methode der finiten Elemente (FEM). Allerdings müssen folgende grundlegende Anforderungen beim Einsatz derartiger Berechnungsverfahren beachtet werden [91]:

- Die Eignung der verwendeten Berechnungsprogramme für dynamische Berechnungen ist nachzuweisen.
- Die Qualifikation des Anwenders bezüglich der Programmnutzung und der Bearbeitung derartiger Problemstellungen ist nachzuweisen.
- Die Eignung der verwendeten Berechnungsmodelle hinsichtlich Diskretisierung, Randbedingungen, Kontaktdefinitionen usw. ist nachzuweisen.
- Es sind Werkstoffdaten zu verwenden, die nachweislich für die zu analysierenden Belastungsbedingungen (Temperatur, Spannungen, Dehngeschwindigkeiten, Änderungsgeschwindigkeiten der Spannungsintensitätsfaktoren usw.) gelten.
- Behälterregionen mit konstruktionsbedingten Spannungsüberhöhungen infolge einspringender Ecken oder Kanten sind ggf. mit einem feiner diskretisierten (Teil-)Modell gesondert zu betrachten und die Berechnungsergebnisse zu verifizieren.
- Die Eingabedaten und die Berechnungsergebnisse sind zu dokumentieren.
- Die Berechnungsergebnisse sind unter Berücksichtigung des Zeitverhaltens und der Angabe der Genauigkeit umfassend darzustellen und unter Zuhilfenahme geeigneter Plausibilitätsbetrachtungen zu bewerten.

Auf der Basis einer den o. g. Anforderungen genügenden rechnerischen Beanspruchungsanalyse können die geforderten Sicherheitsnachweise gegen plastische Ver-

formungen (bei bekanntem Spannungs-Dehnungsverhalten) und gegen Bruch (in Verbindung mit Risseinleitungskennwerten an geeigneten Riss- bzw. Fehler-Bauteil-Konfigurationen) unter den jeweiligen ungünstigsten Beanspruchungsbedingungen geführt werden (vgl. Abschnitt 4.3 und insbesondere 4.4). Eine quasistatische Betrachtungsweise ist zulässig, falls im Behälter ein quasistatischer Beanspruchungszustand nachgewiesen werden kann (Nachweis stationärer Spannungs- und Verschiebungsfelder). Wesentlich hierbei ist wiederum die in allen Einzelheiten gegebene Nachvollziehbarkeit der getroffenen Annahmen und die ausreichende Interpretation der Ergebnisse.

6 Qualitätssichernde Maßnahmen bei der Herstellung

Die Gewährleistung der sicherheitstechnisch notwendigen Werkstoffqualität bei der Herstellung im Rahmen der Serienfertigung von Transport- und Lagerbehältern aus Gusseisen mit Kugelgraphit dient dem Ausschluss des Versagens dieser Bauteile unter Betriebs- und Unfallbeanspruchungen. Dazu ist die Festlegung umfassender qualitätssichernder Maßnahmen erforderlich, welche im Rahmen dieser Leitlinie vorrangig die Werkstoffherstellung und die Werkstoffprüfung beinhalten.

Im Verlauf der Bauartprüfung eines Transport- und Lagerbehälters aus Gusseisen mit Kugelgraphit unter Anwendung dieser Leitlinie sind die sicherheitstechnisch maßgeblichen Werkstoffeigenschaften (z. B. Streckgrenze, Zugfestigkeit, Bruchdehnung, Bruchzähigkeitskennwerte, Gefügeeigenschaften) zu definieren und hierfür die notwendigen Mindestanforderungen (in Werkstoffspezifikationen, s. u.) festzulegen. Diese lassen sich im Falle eines analytisch-rechnerischen Sicherheitsnachweises i. d. R. explizit angeben, wohingegen bei experimentellen Sicherheitsnachweisen mittels eines Prüfmusters i. d. R. die Qualität dieses Prüfmusters die notwendigen Mindesteigenschaften repräsentiert. Hierzu sind alle sicherheitstechnisch kennzeichnenden Gütwerte am Prüfmuster zu ermitteln. Die im Vergleich zu den in den Werkstoffspezifikationen für die spätere Serie unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften des Prüfmusters sind bei der Interpretation der Versuchsergebnisse zu beachten und im Sicherheitsbericht zu bewerten.

Alle sicherheitstechnisch notwendigen Eigenschaften einer Behälterbauart müssen im Rahmen der Behälterserienfertigung nachweislich eingehalten werden und werden in den die Behälterbauart beschreibenden Unterlagen (z. B. Stücklisten) verbindlich festgelegt. Die sicherheitstechnisch notwendigen Eigenschaften der Bauteilwerkstoffe werden in entsprechenden Unterlagen, wie z. B. Werkstoffspezifikationen, detailliert festgelegt. Diese Unterlagen beinhalten u. a. die zu erreichenden Gütwerte wie z. B. Streckgrenze, Zugfestigkeit, Bruchdehnung, Bruchzähigkeitskennwerte, Gefügeeigenschaften, Elastizitätsmodul, Wärmeleitfähigkeit, ggf. in Abhängigkeit von der Beanspruchungsgeschwindigkeit und der Temperatur, um nur einige Beispiele zu nennen. Im Umfang dieser Unterlagen können aber je nach deren Strukturierung auch Vorgaben für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung enthalten sein.

6.1 Werkstoffherstellung

Bei der Herstellung der Serienmuster einer Behälterbauart muss gewährleistet sein, dass alle im Rahmen der Bauartprüfung mit der Stückliste festgelegten sicherheitstechnisch notwendigen Werkstoffeigenschaften auch unter Berücksichtigung der immer vorhandenen Fertigungsschwankungen eingehalten werden.

6.1.1 Anforderungen an den Hersteller

Der Hersteller einer Komponente aus Gusseisen mit Kugelgraphit hat aus o. g. Gründen ein Qualitätsmanagementsystem (QMS) nach dem Stand der Technik nachzuweisen, was sicherstellt, dass alle Abläufe im Rahmen der Herstellung der Komponenten nach verbindlichen Vorgaben erfolgen. In den zum QMS gehörigen Unterlagen sind alle Einflussparameter derart einzugrenzen, dass die in den Werk-

stoffunterlagen festgelegten Eigenschaften gewährleistet werden. Zusätzlich ist die Qualifikation des Personals sowie der zur Herstellung verwendeten Einrichtungen eine Voraussetzung, um den Nachweis der Fertigungssicherheit mit reproduzierbaren Ergebnissen jederzeit führen zu können. Weiterhin ist vor erstmaliger Verwendung des Werkstoffes für einen Behälter der Nachweis zu führen, dass das Gussstück aus Gusseisen mit Kugelgraphit die aus dieser Leitlinie abgeleiteten und in Werkstoffunterlagen (z. B. Werkstoffspezifikationen) festgelegten Eigenschaften mit der notwendigen Sicherheit erfüllt. Dabei ist auch nachzuweisen, dass die Orte für die Entnahme von Werkstoffproben bei der Serienfertigung so gewählt sind, dass die Werkstoffprüfung dieser Bereiche die ungünstigsten Gütwerte erwarten lässt.

Die Erfüllung dieser Voraussetzungen ist vor Aufnahme der Fertigung der BAM nachzuweisen.

6.1.2 Fertigung

Damit die Erzeugung der Werkstoffe unter reproduzierbaren Bedingungen abläuft, werden die der Fertigung zugrunde gelegten Maßnahmen vom Hersteller in Fertigungs- und Prüffolgeplänen (FPP) niedergelegt und der BAM zur Vorprüfung und Bestätigung vorgelegt. In diesen Plänen sind alle qualitätsbeeinflussenden Fertigungsschritte sowie die Prüfschritte zum Nachweis der erzielten Güte mit den dazu zu verwendenden Unterlagen niedergelegt. Ebenso sind die Prüfbeteiligung und die Art der Dokumentation des Prüfergebnisses dieser Unterlage zu entnehmen. Die Güte des Werkstoffes ist mit einem Zeugnis, wie in den Werkstoffunterlagen festgelegt, zu bestätigen.

6.1.3 Weiterentwicklungen

Bei Weiterentwicklungen oder wesentlichen Änderungen im QMS des Herstellers, des Fertigungsverfahrens oder der Werkstoffunterlagen veranlasst der Hersteller vor erster Anwendung die Ergänzungsbegutachtung durch die BAM.

6.2 Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung

Gemäß den Festlegungen in den Qualitätssicherungsprogrammen ist jedes Gussstück einer zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, bestehend aus

- visueller Kontrolle,
- Oberflächenrissprüfung,
- Ultraschallprüfung

oder anderen Verfahren, deren Eignung vor ihrem Einsatz der BAM nachzuweisen ist, zu unterziehen. Neben den allgemeinen qualitätssichernden Aspekten, die üblicherweise in die Vorgaben für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung einfließen, sind bei Spannungen oberhalb der Grenze des Basisgutachtens [2] auch die Belange der Bruchmechanik in Suche und Bewertung der Werkstofffehler mit einzubeziehen.

Eine erste visuelle Kontrolle sollte bereits am Rohguss erfolgen, im Interesse einer eindeutigen Aussage sollte die visuelle Prüfung aber vorzugsweise an mechanisch bearbeiteten Flächen durchgeführt werden.

Stellen der Lasteinleitung sowie Dichtflächen sind einer Oberflächenrissprüfung zu unterziehen. Die Oberflächen und die oberflächennahen Bereiche mit einer spannungsmäßigen Auslastung oberhalb der Grenze des Basisgutachtens [2] sollten einer Prüfung mit dem Magnetpulver-Verfahren oder einem Verfahren mit einer vergleichbaren Aussagefähigkeit unterzogen werden.

Für die volumetrische Prüfung der verschiedenen Bereiche der Komponenten aus Gusseisen mit Kugelgraphit ist die Ultraschallprüfung einzusetzen. Dabei ist jedes Volumenelement, auch der oberflächennahe Bereich, unter drei verschiedenen Einschallrichtungen zu untersuchen. Bereiche, deren spannungsmäßige Auslastung oberhalb der Grenze des Basisgutachtens [2] liegt, werden, abhängig von den Ergebnissen des bruchmechanischen Sicherheitsnachweises, gegebenenfalls mit einer abgesenkten Registrier- und Zulässigkeitsschwelle für Ungängen geprüft.

Für alle Verfahren der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung sind Prüfanweisungen zu erstellen und entsprechend der Weiterentwicklung des Standes der Technik fortzuschreiben. Vor ihrer ersten Anwendung und nach Änderungen bedürfen sie der Zustimmung der BAM.

6.3 Dokumentation

Alle Unterlagen, die im Zuge der Qualifikation des Herstellers sowie der laufenden Fertigung des Werkstoffes erstellt wurden, müssen während der Lebensdauer der Behälter aufbewahrt werden, um den Nachweis der Erfüllung der festgelegten Anforderungen jederzeit führen zu können.

Die Aufzeichnungen müssen leserlich sein und unter Bedingungen aufbewahrt werden, die eine Beeinträchtigung, Beschädigung oder ihren Verlust vermeiden. Sie sind so aufzubauen und in Ordnung zu halten, dass gesuchte Unterlagen leicht wiedergefunden werden können.

7 Zusammenfassung

Die Verwendung von Gusseisen mit Kugelgraphit für Transport- und Lagerbehälter für radioaktive Stoffe erfordert die Gewährleistung spezifischer Qualitätsmerkmale des Werkstoffes unter Einbeziehung der Fertigungsparameter.

Auslegungsbestimmend für derartige Behälter sind in erster Linie die definierten Unfallbeanspruchungen. Damit ist die Anwendung herkömmlicher Auslegungsrichtlinien für konventionelle Konstruktionen, die üblichen betrieblichen Beanspruchungen unterliegen, nicht angemessen. Die maßgebenden sicherheitstechnischen Anforderungen an die Eigenschaften des Behälterwerkstoffes leiten sich aus den Forderungen nach Gewährleistung des dichten Einschlusses des radioaktiven Inventars und der hinreichenden Abschirmung derartiger Behälter unter Betriebs- und Unfallbeanspruchungen ab. Diese Schutzziele sind aufgrund der mechanischen Beanspruchungen potentiell durch plastische Deformationen und Versagen durch spröden oder duktilen Bruch gefährdet.

Diese Leitlinie bildet die Grundlage für die Bewertung der Festigkeit von Transport- und Lagerbehältern für radioaktive Stoffe mit Bauteilen der dichten Umschließung und der Abschirmung aus Gusseisen mit Kugelgraphit. Ausgehend vom Basisgutachten [2] der BAM aus dem Jahre 1985 und unter Berücksichtigung der Fortentwicklung der technischen und wissenschaftlichen Methoden der Beanspruchungsanalysen, der bruchmechanischen Festigkeitsanalysen sowie der Fertigungs- und Prüftechnik werden Anforderungen an die sicherheitstechnische Nachweisführung und an die Festlegung diesbezüglich relevanter Werkstoffeigenschaften beschrieben, deren Einhaltung bei der Herstellung der Serienbehälter zu gewährleisten ist. Die Umsetzung dieser Vorgehensweise für die Behälterserienfertigung erfolgt auf der Grundlage eines geeigneten Qualitätsmanagementsystems des jeweiligen Herstellers, dessen Qualifikation zur Herstellung derartiger Gussstücke mit den geforderten Qualitätsmerkmalen immer nachgewiesen sein muss.

8 Literatur und Unterlagen

- [1] DIN EN 1563: Gießereiwesen - Gußeisen mit Kugelgraphit, Berlin, August 1997
- [2] Wieser, K. E., Droste, B., Helms, R., Ziebs, J. und Hemptenmacher, J.: Gußeisen mit Kugelgraphit als Werkstoff für Transport- und Lagerbehälter bestrahlter Brennelemente, Amts- und Mitteilungsblatt BAM 15 (1985) Nr. 1, S. 4-18
- [3] International Atomic Energy Agency (IAEA): Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, 1996 Edition (Revised), Regulations No. TS-R-1 (ST-1, Revised), IAEA, Vienna, 2000
- [4] Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz - AtG) vom 23. Dezember 1959 (BGBl. I S. 814), Neufassung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), zuletzt geändert durch Gesetz vom 22. April 2002 (BGBl. I S. 1351);
<http://jurcom5.juris.de/bundesrecht/atg/gesamt.pdf>
- [5] Verordnung für die Umsetzung von EURATOM-Richtlinien zum Strahlenschutz vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714) - Artikel 1: Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV);
<http://www.bmu.de/download/dateien/strahlenschutzvo.pdf>
- [6] Deutsche Gesellschaft für Wiederaufbereitung von Kernbrennstoffen mbH (DWK) und Brennelementlager Gorleben GmbH (BLG): Beschreibung des Brennelementlagers und des Zwischenlagers für schwachaktive Abfälle in Gorleben, Juli 1982
- [7] Malmström, H., Schröder, G., Klöpper, H. and Lührmann, A.: 1500 t - U Spent Fuel Element Storage Plant Ahaus, Proceedings of PATRAM 80, Vol. II, Berlin, November 1980, pp. 955-960
- [8] Beschluß der Regierungschefs von Bund und Ländern zur Entsorgung der Kernkraftwerke vom 28. September 1979, BAnz. Nr. 58 vom 22. März 1980
- [9] Droste, B., Hübner, H. W. and Probst, U.: Qualification and Certification Criteria of Casks for the Intermediate Dry Storage of Spent Fuel in the Federal Republic of Germany, Proceedings of PATRAM 83, Vol. I, New Orleans, May 1983, pp. 224-230
- [10] Richtlinien für das Verfahren der Bauartzulassung von Versandstücken zur Beförderung radioaktiver Stoffe – R003 –, Verkehrsblatt (Amtlicher Teil), Heft 4 (1991), S. 231
- [11] Hemptenmacher, J.: Mechanische Eigenschaften und Qualitätssicherung bei der Herstellung von Gußeisen mit Kugelgraphit für schwere Transport- und Lagerbehälter, Amts- und Mitteilungsblatt BAM 14 (1984) Nr. 3, S. 224-230
- [12] Frenz, H.: GNS Cask Overload Tests, Summary of the International Ductile Iron Progress Meeting, Appendix N, U. S. Department of Energy, Arlington, Virginia, USA, Nov. 20-21, 1991
- [13] Schulz-Forberg, B.: Das Zulassungsverfahren für Transportbehälter für radioaktive Stoffe, DVM-Seminar „Behälter aus Sphäroguß für radioaktive Stoffe“, Berlin, Juni 1987, S. 47-53

- [14] Wieser, K. E. und Droste, B.: Die Prüfung und Begutachtung von Behältern aus Sphäroguß, DVM-Seminar „Behälter aus Sphäroguß für radioaktive Stoffe“, Berlin, Juni 1987, S. 55-66
- [15] Helms, R. und Ziebs, J.: Ergebnisse der Werkstoffprüfung an Behältern aus GGG 40 in den Jahren 1981 – 1987, DVM-Seminar „Behälter aus Sphäroguß für radioaktive Stoffe“, Berlin, Juni 1987, S. 67-86
- [16] Wüstenberg, H., Schulz, E. und Erhard, A.: Die zerstörungsfreie Prüfung von Kugelgraphitguß-Transportbehältern, DVM-Seminar „Behälter aus Sphäroguß für radioaktive Stoffe“, Berlin, Juni 1987, S. 87-105
- [17] Droste, B. und Rödel, R.: Qualitätssichernde Maßnahmen für Brennelement-Transport- und Lagerbehälter, DVM-Seminar „Behälter aus Sphäroguß für radioaktive Stoffe“, Berlin, Juni 1987, S. 107-120
- [18] Aurich, D., Helms, R. und Wieser, K. E.: Das sicherheitstechnische Konzept der BAM für Sphäroguß-Behälter, DVM-Seminar „Behälter aus Sphäroguß für radioaktive Stoffe“, Berlin, Juni 1987, S. 121-137
- [19] Zeisler, P., Droste, B. and Rödel, R.: Current Approval Status and Test Procedures for Large Type B Packages in Germany, RAMTRANS 8 (1997) No. 1, pp. 53-62
- [20] Wieser, K. E., Aurich, D. and Wüstenberg, H.: The Status of Ductile Cast Iron Shipping and Storage Containers in the Federal Republic of Germany, Proceedings of PATRAM 89, Vol. II, Washington D. C., June 1989, pp. 701-711
- [21] Schulz-Forberg, B. und Wieser, B.: Sicherheit von Gefahrguttransporten / Transportbehälterlager (Teil 1), Technische Überwachung (TÜ), Bd. 28 (1987) Nr. 2, S. 82-85
- [22] Günther, B., Kühn, H.-D. und Schulz, E.: Sicherheit von Gefahrguttransporten/ Transportbehälterlager (Teil 2), Technische Überwachung (TÜ), Bd. 28 (1987) Nr. 3, S. 126-130
- [23] Droste, B. und Kowalewsky, H.: Sicherheit bei der Gefahrgutlagerung / Transportbehälterlager (Teil 3), Technische Überwachung (TÜ), Bd. 28 (1987) Nr. 4, S. 167-172
- [24] Schulz-Forberg, B. und Kraus, W.: Transport- und Lagerbehälter für radioaktive Stoffe - Übereinstimmung mit den Sicherheitsanforderungen, Schadenprisma 1/1990, S. 13-20
- [25] Völzke, H., Rödel, R., Zeisler, P. and Droste, B.: Considerations of the Competent Authority Concerning the Assessment of a Brittle Fracture Safe Ductile Cast Iron (DCI) Cask Design, RAMTRANS 6 (1995) Nos. 2-3, pp. 121-126
- [26] Deutscher Verband für Materialprüfung e.V. (DVM): Behälter aus Sphäroguß für radioaktive Stoffe, Seminar der BAM, Berlin, Juni 1987
- [27] Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM): Seminar on Design Rules and Acceptance Criteria for Ductile Cast Iron Containers, Berlin, Oktober 1990
- [28] Droste, B. and Sorenson, K. (Hrsg.): Brittle Fracture Safety Assessment, Proceedings of the Second Technical Seminar on Brittle Fracture Safety Assessment of Ductile Cast Iron Containers for Shipping and Storage of Radioactive Materials held at Krefeld, Germany, October 27-28, 1994. International

- Journal of Radioactive Materials Transport (RAMTRANS), Vol. 6, Nos. 2-3 (1995)
- [29] U.S. Department of Energy: Summary of the International Ductile Iron Progress Meeting, Arlington, Virginia, USA, Nov. 20-21, 1991
 - [30] International Atomic Energy Agency (IAEA): Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, Draft Safe Transport IAEA Safety Guide TS-G-1.1 (ST-2), IAEA, Vienna, February 2002
 - [31] Rehmer, B., Kühn, H., Weidlich, S. and Frenz, H.: BAM Production Control Programme for Containers for Transport and Storage of Nuclear Materials, RAMTRANS 6 (1995) Nos. 2-3, pp. 205-209
 - [32] Saegusa, T.: Research on Ductile Cast Iron in Japan, DVM-Seminar „Behälter aus Sphäroguß für radioaktive Stoffe“, Berlin, Juni 1987, S. 267-284
 - [33] Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI): Research on Quality Assurance of Ductile Cast Iron Casks, CRIEPI-Report EL 87001, April 1988
 - [34] Urabe, N. and Harada, Y.: Fracture Toughness of Heavy Section Ductile Iron Castings and Safety Assessment of Cast Casks, Proceedings of PATRAM 89, Vol. II, Washington D. C., June 1989, pp. 743-752
 - [35] Kusakawa, T., Kishi, T., Ohtsubo, H., Shiomi, S., Takaku, H., Ito, C. and Saegusa, T.: Full-Scale Tests and Evaluation for Quality Assurance of Ductile Cast Iron Casks, Proceedings of PATRAM 89, Vol. II, Washington D. C., June 1989, pp. 712-719
 - [36] Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI): Integrity of Cast-Iron Cask Against Free Drop Test; Part II: Investigation of Brittle Failure by Drop Test, CRIEPI-Report EU 88005, June 1989; Part III: Verification of Brittle Failure Design Criterion, CRIEPI-Report EU 90003, June 1990
 - [37] Kosaki, A., Ito, C., Arai, T. and Saegusa, T.: Brittle Fracture Tests at Low Temperature for Transport Cask Materials, Proceedings of PATRAM 92, Vol. III, Yokohama, September 1992, pp. 1105-1112
 - [38] Urabe, N. and Furuta, K.: Is Ductile Cast Iron Ductile at -40 °C ?, Proceedings of PATRAM 92, Vol. III, Yokohama, September 1992, pp. 1189-1196
 - [39] Shirai, R., Ito, C., Aria, T. and Saegusa, T.: Integrity of Cast-Iron Cask Against Free Drop Test - Verification of Brittle Failure Design Criterion, RAMTRANS 4 (1993) No. 1, pp. 5-13
 - [40] Arai, T., Saegusa, T., Yagawa, G., Urabe, N. and Nickell, R. E.: Determination of Lower-Bound Fracture Toughness for Heavy-Section Ductile Cast Iron (DCI) and Estimation by Small Specimen Tests, ASTM STP 1207 (24th National Symposium on Fracture Mechanics), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994, pp. 355-368
 - [41] Schwartz, M. W. and Boyce, L.: Ductile and Brittle Failure Design Criteria for Nodular Cast Iron Spent-fuel Shipping Containers, Lawrence Livermore National Laboratory, Report Ucl-53046, 1983
 - [42] Electric Power Research Institute (EPRI): Draft Specification for Ferritic Ductile Iron Castings for Nuclear Materials Transport Containers Suitable for Low Temperature Service, Washington, June 1986

- [43] Sorenson K. B. and Salzbrenner, R. J.: A Fracture Mechanics Approach to Spent Nuclear Fuel Transportation Cask Design, Proceedings of PATRAM 86, Vol. II, Davos, June 1986, pp. 709-718
- [44] Nickell, R., Yukawa, S. and McConnell, P.: Relevance to the Application of Ductile Iron for Use in Spent Fuel Packages, DVM-Seminar „Behälter aus Sphäroguß für radioaktive Stoffe“, Berlin, Juni 1987, S. 11-28
- [45] Sorenson, K. B.: Material Specification for Ductile Cast Iron in the United States, DVM-Seminar „Behälter aus Sphäroguß für radioaktive Stoffe“, Berlin, Juni 1987, S. 29-35
- [46] Falci, F. P.: Department of Energy (DOE) Program – Interest in Ductile Cast Iron, DVM-Seminar „Behälter aus Sphäroguß für radioaktive Stoffe“, Berlin, Juni 1987, S. 37-38
- [47] Sorenson, K. B.: A Design Approach for Qualifying the Use of Ductile Cast Iron Spent Fuel Shipping Casks in the USA, DVM-Seminar „Behälter aus Sphäroguß für radioaktive Stoffe“, Berlin, Juni 1987, S. 259-266
- [48] Salzbrenner, R. J. and Sorenson, K. B.: Dynamic Fracture Toughness Measurements of Ferritic Ductile Cast Iron, Proceedings of PATRAM 89, Vol. II, Washington D. C., June 1989, pp. 728-735
- [49] Sorenson, K. B.: MOSAIK Drop Tests and Video, Summary of the International Ductile Iron Progress Meeting, Appendix N, U. S. Department of Energy, Arlington, Virginia, USA, Nov. 20-21, 1991
- [50] Sorenson, K. B., Salzbrenner, R. J., Wellman, G. and Bobbe, J.: Results of the Sandia National Laboratories MOSAIK Cask Drop Test Program, Proceedings of PATRAM 92, Vol. III, Yokohama, September 1992, pp. 1181-1188
- [51] Golliher, K. G., Witt, C. R. and Wieser, K. E.: Report on the Joint USA - Germany Drop Test Program for a Vitrified High Level Waste Cask, Proceedings of PATRAM 92, Vol. III, Yokohama, September 1992, pp. 1123-1129
- [52] Salzbrenner, R. J., Crenshaw, T. B. and Sorenson, K. B.: Mechanical Properties Used for the Qualification of Transport Casks: Prototype Development and Extension to Serial Production, Proceedings of PATRAM 92, Vol. III, Yokohama, September 1992, pp. 1206-1213
- [53] Salzbrenner, R. J. and Crenshaw, T. B.: Effects of Sample Size and Loading Rate on the Transition Behavior of a Ductile Iron (DI) Alloy, ASTM STP 1189 (23rd National Symposium on Fracture Mechanics, College Station, Texas, June 18-20, 1991), ASTM, Philadelphia, 1993, pp. 840-857
- [54] McConnell, P. and Sorenson, K. B.: Sandia National Laboratories Cask Drop Test Programme: A Demonstration of Fracture Mechanics Principles for the Prevention of Brittle Fracture, RAMTRANS 6 (1995) Nos. 2-3, pp. 159-164
- [55] Burger, C. S., Eifert, E. J. and Heger, A. S.: Comparison of Structural Integrity of Ductile Iron and Lead-Shielded Stainless Steel Casks for Transportation and Storage of High-Level Waste, Proceedings of PATRAM 95, Vol. III, Las Vegas, December 1995, pp. 1364-1371
- [56] Smith, J. A., Salzbrenner, D., Sorenson, K. and McConnell, P.: Fracture Mechanics Based Design for Radioactive Material Transport Packagings – Historical Review, Sandia Report SAND-98-0764, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, 1998

- [57] Droste, B. , Gogolin, B., Völzke, H., Quercetti, T. and Günther, B.: Extended Drop Tests of DCI Casks with Artificial Flaws Demonstrating the Existing Safety Margins, RAMTRANS 6 (1995) Nos. 2-3, pp. 177-182
- [58] Sorenson, K. und Günther, B.: Deutsch-Amerikanische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Behältertechnologie für radioaktive Stoffe:
 - Zusammenfassender Abschlußbericht
 - Fachband 2: Status of Ductile Cast Iron Cask Technology in the Federal Republic of Germany
 - Fachband 3: Werkstoffuntersuchungen an Transport- und Lagerbehältern aus GGG40 in den Jahren 1981-1987
 - Fachband 4: Verhalten fehlerbehafteter Behälterkörper aus Sphäroguß unter Stoßbelastungen bei FallversuchenBAM-Vorhaben Nr. 01502, gefördert vom Bundesminister für Forschung und Technologie (BMBF), Förderkennzeichen KWA 3502/5, Dezember 1987
- [59] Völzke, H., Jeschenz, I., Wieser, K., Frenz, H., Ziebs, J. und Rehmer, B.: Sphäroguß als Werkstoff für Behälter zur Beförderung, Zwischen- und Endlagerung radioaktiver Stoffe. Untersuchung zu alternativen Eignungsnachweisen:
 - Zusammenfassender Abschlußbericht
 - Fachband 1: Technische Grundlagen und vorlaufende Rechnungen
 - Fachband 2: Fallversuche mit einem Prototypbehälter
 - Fachband 3: Werkstoffuntersuchungen
 - Fachband 4: Begutachtungskonzept
 - Versuchsbericht Nr. 1507/I: Instrumentierte Fallversuche mit dem Transport- und Lagerbehälter für verglaste radioaktive Stoffe CASTOR VHLW
 - Versuchsbericht Nr. 1507/II: Instrumentierte Fallversuche mit dem Transport- und Lagerbehälter für verglaste radioaktive Stoffe CASTOR VHLW mit künstlichem FehlerBAM-Vorhaben Nr. 01507, gefördert vom Bundesminister für Forschung und Technologie (BMBF), Förderkennzeichen KWA 79052, 1993
- [60] Günther, B. and Frenz, H.: Ductile Cast Iron (DCI) - Progress on Research Activities on Fracture Mechanics, Proceedings of PATRAM 89, Vol. II, Washington D. C., June 1989, pp. 736-742
- [61] Wieser, K. E., Frenz, H. and Gogolin, B.: Extended Drop Testing with Pre-cracked DCI-Casks and Evaluations on Safety Against Brittle Fracture, Proceedings of PATRAM 92, Vol. III, Yokohama, September 1992, pp. 1197-1205
- [62] Völzke, H., Droste, B., Wieser, G. and Gogolin, B.: Extended Brittle Fracture Safety Demonstrations of Cubic Ductile Cast Iron Containers, Proceedings of PATRAM 95, Vol. III, Las Vegas, December 1995, pp. 1356-1363
- [63] Frenz, H.: Eigenschaften von ferritischem und ferritisch-perlitischem Gußeisen mit Kugelgraphit unter besonderer Beachtung des Bruchverhaltens, Dissertation, TU Berlin, 1991
- [64] Rehmer, B.: Bruchmechanische Bewertung ferritischer Gußeisenwerkstoffe mit Kugel- und Vermiculargraphit in Abhängigkeit von Beanspruchungsgeschwindigkeit und -temperatur, Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 1993
- [65] Baer, W.: Bruchmechanische Bewertung ferritischer Gußeisenwerkstoffe sowie artgleicher Schweißverbindungen bei statischer Beanspruchung, Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 1996

- [66] Janberg, K.: Ductile Iron Cask Development in Germany, Summary of the International Ductile Iron Progress Meeting, Appendix S, U. S. Department of Energy, Arlington, Virginia, USA, Nov. 20-21, 1991
- [67] International Atomic Energy Agency (IAEA): Guidelines for Safe Design of Shipping Packages Against Brittle Fracture, IAEA-TECDOC-717, Vienna, August 1993
- [68] Empfehlung der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) vom 23.03.1983: Brennelementzwischenlager (Transportbehälterlager) Ahaus und Gorleben, BAnz. Nr. 106 vom 10.06.1983
- [69] Reaktorsicherheitskommission (RSK): Sicherheitstechnische Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente in Behältern, gebilligt in der 339. RSK-Sitzung am 5. April 2001;
<http://www.rskonline.de/Download/Leitlinien/LEITLINIEN050401.pdf>
- [70] Richtlinie 97/23/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 29. Mai 1997 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Druckgeräte, Abl. Nr. L 181 vom 9.7.1997 S. 1; ber. Abl. Nr. L 265 vom 27.9.1997
- [71] Schwartz, M. W. and Langland, R. T.: Protection Against Failure by Brittle Fracture in Ferritic Steel Shipping Containers, Proceedings of PATRAM 83, Vol. I, New Orleans, May 1983, pp. 91-99
- [72] Schwartz, M. W. und Boyce, L.: Design Criteria for Nodular Cast Iron Shipping Containers, Proceedings of PATRAM 83, Vol. I, New Orleans, May 1983, pp. 132-139
- [73] Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter (AD): AD-Merkblatt W3/2: Gusseisenwerkstoffe; Gusseisen mit Kugelgraphit, unlegiert und niedriglegiert, Köln, Oktober 2000
- [74] Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter (AD): AD-Merkblatt B0: Berechnung von Druckbehältern, Köln, Oktober 2000
- [75] Filonenko-Boroditsch, N. M.: Festigkeitslehre, Bd. I, 4. Aufl., Verlag Technik, Berlin, 1960
- [76] Pahl, B. und Beitz, W.: Konstruktionslehre, 4. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, 1997
- [77] Wellinger, K. und Dietmann, H.: Festigkeitsberechnungen, Alfred Körner Verlag, Stuttgart, 1969, S. 70
- [78] Czichos, H. (Hrsg.): Hütte. Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften, 31. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, 2000
- [79] Beitz, W. und Grote, K.-H.: Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, 20. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, 2001
- [80] Tochtermann, W. und Bodenstein, F.: Konstruktionselemente des Maschinenbaus, Teil I, 9. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, 1979
- [81] Hähnel, B.: Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“, konstruieren + gießen 21 (1996) Nr. 3, S. 30-38

- [82] Aurich, D., Helms, R. und Wieser, K.: Das sicherheitstechnische Konzept der BAM für Sphärogußbehälter, Amts- und Mitteilungsblatt BAM 17 (1987) Nr. 4, S. 657-663
- [83] Reimers, P. und Radners, H.: JINFEM Postprozessor zur Berechnung des J-Integrals, Handbuch zur Version 6.3, IWIS-Ingenieurbüro für wissenschaftliche Software GmbH, Berlin, 1996
- [84] Murakami, Y.: Stress Intensity Factors Handbook, Pergamon Press, 1990
- [85] Zencker, U., Völzke, H. und Droste, B.: Entwicklung von Beurteilungsmethoden für Transport- und Lagerbehälter mit erhöhten metallischen Reststoffanteilen, BMBF-Forschungsvorhaben 02 S 7584, Abschlußbericht, BAM, Berlin, 1998
- [86] Zencker, U., Zeisler, P., Droste, B.: Dynamic Fracture Mechanics Assessments for Cubic Ductile Cast Iron Containers, RAMTRANS 11 (2000) Nos. 1-2, pp. 113-118
- [87] American Society of Mechanical Engineers (ASME): Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, Division 1 – Appendices, Appendix A: Analysis of Flaws, New York, 2001
- [88] Kerntechnischer Ausschuss (KTA): Sicherheitstechnische Regel des KTA, Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren; Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung, KTA 3201.2, Fassung 6/96, BAnz. Nr. 216a vom 19.11.1996, ber. BAnz. Nr. 129 vom 13.07.2000;
http://www.kta-gs.de/deutsch/regeln/3200/3201_2.pdf
- [89] Newman, J. C. and Raju, I. S.: An Empirical Stress-Intensity Factor Equation for the Surface Crack, Engng. Frac. Mech. 15 (1981) Nos. 1-2, pp. 185-192
- [90] Blumenauer, H. und Pusch, G.: Technische Bruchmechanik, 3. Aufl., Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1993
- [91] Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM): Richtlinie für numerisch geführte Sicherheitsnachweise im Rahmen der Bauartprüfung von Transport- und Lagerbehältern für radioaktive Stoffe, Fassung vom 22.3.2002, BAM, Berlin
- [92] Frenz, H., Rehmer, B., Salzbrenner, R. J. and McConnell, P.: Effect of Sample Size and Loading Rate on the Fracture Toughness of Ductile Cast Iron, Proc. Intern. Conf. on Mechanical Behaviour of Ductile Cast Iron and other Cast Metals, Kitakyushi, Japan, 1993
- [93] Pusch, G., Udoh, A. und Rose, K.: Einfluß von Temperatur und Beanspruchungsgeschwindigkeit auf die mechanischen Eigenschaften von GGG-40, konstruieren + gießen 22 (1997) Nr. 1, S. 12-16
- [94] Pusch, G., Udoh, A. und Baer, W.: Ermittlung fließbruchmechanischer Kennwerte für ferritisches GGG-40 und seine Schweißverbindungen bei dynamischer Beanspruchung, DFG-Forschungsprojekt Pu 104/3 im Schwerpunktprogramm „Fließbruchmechanik“, Abschlußbericht, TU Bergakademie Freiberg, 1997
- [95] Kussmaul, K., Silcher, H. and Eisele, U.: On the Use of Elastic-Plastic Material Characteristics for Linear-Elastic Component Assessments, RAMTRANS 6 (1995) Nos. 2-3, pp. 165-169

- [96] ASTM E 399-90 (Reapproved 1997), Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials. In: Annual Book of ASTM Standards, Section 3, Vol. 03.01, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, 2001
- [97] ESIS P2, Procedure for Determining the Fracture Behaviour of Materials, European Integrity Society, Delft, 1992
- [98] ASTM E 1820-99a, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. In: Annual Book of ASTM Standards, Section 3, Vol. 03.01, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, 2001
- [99] Udoh, A.: Ermittlung fließbruchmechanischer Kennwerte für ferritisches GGG-40 und seine Schweißverbindung bei dynamischer Beanspruchung, Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 1997
- [100] McKinney, K. E., Bradley, W. L. and Gerhardt, P. C.: An Evaluation of the Toughness of Ductile Iron vs Cast Steel Using Modified Charpy Test Specimens, AFS Transactions 122 (1984), pp. 239-250
- [101] McConnell, P. and Sheckard, B.: Fracture Toughness Characterization of a Ductile Iron Spent Fuel Cask, Report, EPRI Research Project 2717-2, Fracture Control Corp., Goleta, California, June 1986
- [102] Mochizuki, S. and Matsushita, H.: Physical Properties of Nodular Cast Iron for Shipping Containers and Safety Analysis by Fracture Mechanics, Nuclear Engineering and Design 94 (1986), pp. 309-316
- [103] McConnell, P.: Dynamic Fracture Toughness of Ductile Iron. In: Rapid Load Fracture Testing, ASTM STP 1130, R. Chona and W. R. Corwin (Eds.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1991, pp. 104-117
- [104] Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung: Ermittlung von bruchmechanischen Werkstoffkennwerten von Gußeisen mit Kugelgraphit bei dynamischer Beanspruchung, Unveröffentlichter Zwischenbericht zum BAM-Projekt 0207-V-0220 „Erarbeitung eines Begutachtungskonzeptes für den Einsatz von Gußeisen mit Kugelgraphit für Transport- und Lagerbehälter unter Berücksichtigung erhöhter Beanspruchungsgeschwindigkeiten“, BAM-V.31, Berlin, 28. Februar 2000