

BAM Bundesanstalt für
Materialforschung und -prüfung

Forschungsbericht 203

Sicherheitsniveaus von Transporttanks für Gefahrgut

Dipl.-Ing. Jörg Ludwig und
Dr.-Ing. Bernd Schulz-Forberg



Berlin 1994

Aufgaben der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung ist als Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministers für Wirtschaft das technisch-wissenschaftliche Staatsinstitut der Bundesrepublik Deutschland für Materialtechnologien, Chemische Analytik und Sicherheitstechnik. Dieser Komplex stellt in allen Industrieländern einen technologischen Schlüsselbereich dar, da Materialien als Konstruktions- und Funktionswerkstoffe die Grundlage der gesamten Technik bilden. Die Materialforschung, die zuverlässige, normengerechte Prüfung und chemische Analyse sowie die sicherheitstechnische Beurteilung von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen sind wesentliche Voraussetzungen für eine leistungs- und wettbewerbsfähige Wirtschaft im Hinblick auf die Anforderungen an Qualität und Zuverlässigkeit technischer Produkte, Umweltschutzanforderungen und die Notwendigkeit der sparsamen Verwendung von Rohstoffen und Energie.

Die Bundesanstalt hat die Aufgabe, die Entwicklung der deutschen Wirtschaft zu fördern, indem sie Werkstoff- und Materialforschung betreibt, die Materialprüfung sowie die chemische Analytik und Sicherheitstechnik stetig weiterentwickelt.

In diesem Rahmen bestehen folgende Arbeitsschwerpunkte:

1. Technisch-wissenschaftliche Grundlagen des Materialwesens, der Sicherheitstechnik und der chemischen Analytik einschließlich zugehöriger Referenzmaterialien und -verfahren

2. Materialsicherung einschließlich Qualitätssicherung, Materialschutz, Recycling
3. Öffentliche technische Sicherheit
4. Technologien im Umwelt- und Gesundheitsschutz
5. Technologien in der Energiesicherung
6. Technologie- und Wissenstransfer

Ihre Arbeiten gliedern sich in:

- A Forschung und Entwicklung, besonders auf denjenigen Gebieten, die der Leistungssteigerung der Wirtschaft, der Sicherheitstechnik sowie der Schaffung und Erhaltung volkswirtschaftlicher Werte dienen,
- B Prüfung und Untersuchung von Stoffen und technischen Produkten auf der Basis von Gesetzen, Verordnungen oder technischen Regeln,
- C Beratung und Information von Bundesministerien sowie Durchführung von Aufgaben, die ihr von diesen im Einvernehmen mit dem Bundesministerium für Wirtschaft übertragen werden, Durchführung von Aufträgen aus der Wirtschaft, Beratung und Information von Wirtschafts- und Verbraucherorganisationen sowie Mitwirkung in nationalen und internationalen Gremien und Normenausschüssen und bei der Technischen Zusammenarbeit mit Entwicklungsländern.

Die Ergebnisse ihrer und fremder wissenschaftlicher Arbeiten hat die Bundesanstalt zu sammeln, zu ordnen und der Allgemeinheit zugänglich und nutzbar zu machen.

Forschungsbericht 203

Sicherheitsniveaus von Transporttanks für Gefahrgut

Dipl.-Ing. Jörg Ludwig und
Dr.-Ing. Bernd Schulz-Forberg

Danksagung

Die Verfasser danken den Herren Dr. Jänicke und Übscher sowie den Herren Dr. Brandes, Limberger, Preuß und ihren Mitarbeitern für die wohlwollende Unterstützung bei der Durchführung der Versuche zur Ermittlung spezifischen bzw. globalen Arbeitsaufnahmevermögens. Den Herren Dr. Günther und Ulrich sei gedankt für vielfältige Anregungen, kritische Begleitung und permanente Diskussionsbereitschaft zum sachlichen Teil ebenso wie Frau Becker und Herrn Rehfeldt für ihre geduldige Hilfe beim formalen Werdegang des vorliegenden Berichtes.

Herausgegeben von der

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin
☒ 12200 Berlin
Telefon (0 30) 81 04-0
Telefax (0 30) 8 11 20 29

Copyright © 1994 by Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Herstellung und Verlag:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Am Alten Hafen 113-115 · D-27568 Bremerhaven
☒ Postfach 10 11 10 · D-27511 Bremerhaven
Telefon (04 71) 4 60 93-95
Telefax (04 71) 4 27 65

Zusammenfassung

Zunächst werden die Verhältnisse, denen Transporttanks für gefährliche Güter während des Normalbetriebes und bei geringfügig darüber hinausgehenden Beanspruchungen ausgesetzt sein können und die in den einschlägigen verkehrsrechtlichen Vorschriften wie z. B. ADR erfaßt sich, beschrieben. Anschließend wird auf die Parameter unfallbedingten Tankversagens eingegangen. Ausgehend von der hieraus ableitbaren Feststellung, daß augenscheinlich starke Unterschiede bezüglich des Unfallverhaltens zwischen verschiedenen, vorschriftenkonformen Tanktypen zu verzeichnen sind, ergibt sich die Notwendigkeit der Bewertung des durch die einzelnen Tanktypen jeweils repräsentierten Sicherheitsniveaus. Diese vergleichende Risikobewertung kann detailliert und quantifiziert auf der Grundlage analytischer und experimenteller Unfallsimulationen durchgeführt werden. Art und Durchführung der Simulationen werden beschrieben und eine Methode, hieraus die für einen Vergleich der Sicherheitsniveaus verschiedener Tanktypen erforderlichen Elemente und ihre Kenngrößen zu gewinnen, angegeben. Schließlich werden für ausgewählte Beispiele von Transporttanks Sicherheitsniveaus ermittelt und daraus resultierend mögliche Folgewirkungen für die Fortentwicklung tankbezogener verkehrsrechtlicher Vorschriften aufgezeigt.

Summary

First it will be pointed out which are the conditions, transport tanks for dangerous goods are or may be exposed during normal service and incidents according to requirements being included in codes of practice respectively regulations like ADR. Further some annotations on the environments that transport tanks for dangerous goods can be expected to experience in transportation accidents will be made. Differences between a vast number of tank types and their accidental behaviour – their ability to withstand accidental loadings – have to be stated. Relevant characteristics have to be realized analytically and/or experimentally – detailed and quantified – to reach a safety level assessment of various tank types. Therefore experimental simulations have been carried out, leading to the realization of safety levels for various tank types and their comparability. At last it will be demonstrated, that tank types comparable according to relevant regulations are not necessarily comparable regarding safety level assessment based on experimental simulation, which may lead to the necessity to develop further tank related regulations for the transport of dangerous goods.

Inhalt	Seite
Vorbemerkung	7
1. Anforderungen an Tanks	7
1.1 Allgemeine Bauvorschriften und zulässige Werkstoffausnutzung	7
1.2 Werkstoffkennwerte metallischer Werkstoffe und die Anwendung der 3. Wurzel-Formel	9
1.3 Betrachtungen zu betrieblichen Beanspruchungen	10
2. Einflußgrößen auf das unfallbedingte Tankversagen	10
2.1 Tankarten	10
2.2 Beanspruchungsarten	11
3. Simulation unfallbedingter Einwirkungen von außen und Schaffung von Vergleichsgrößen	12
3.1 Spezifisches Arbeitsaufnahmevermögen als Versagensgrenze von Tankwänden	13
3.1.1 Ermittlung des spezifischen Arbeitsaufnahmevermögens auf analytischer Basis	13
3.1.2 Ergebnisse experimenteller Ermittlungen des spezifischen Arbeitsaufnahmevermögens	13
3.2 Stanzkraft	14
3.2.1 Stanzkraft (Durchstoßkraft) auf analytischer Basis	14
3.2.2 Stanzkraft (Durchstoßkraft) auf experimenteller Basis	15
3.3 Globales Arbeitsaufnahmevermögen von Tankstrukturen	15
3.4 Definition von Vergleichsgrößen	16
4. Elemente zur Darstellung von Sicherheitsniveaus von Transporttanks für Gefahrgut	18
4.1 Definition der Elemente und ihrer Kenngrößen	18
4.2 Die einzelnen Elemente und ihre Kenngrößen	19
4.2.1 Spezifisches Arbeitsaufnahmevermögen	19
4.2.1.1 Grundsätzliches	19
4.2.1.2 Berücksichtigung zusätzlicher Schutzmaßnahmen	20
4.2.2 Globales Arbeitsaufnahmevermögen	21
4.2.3 Drucktechnische Ausstattung	21
4.2.4 Tankkammervolumen	22
4.3 Diskussion der Kenngrößen f_1 bis f_4	22
5. Wichtung der Elemente und ihrer Kenngrößen und daraus abgeleitete Sicherheitsniveaus von Transporttanks	23
5.1 Wichtung der Elemente und ihrer Kenngrößen	23
5.2 Sicherheitsniveaus von Transporttanks	24
5.3 Diskussion der Ergebnisse	24
5.4 Anwendungsbeispiel: Tanks nach § 7a Abs. 2 Nr. 2 GGVS	26
6. Abschließende Bemerkungen	27
7. Literatur	28
Anhang 1: Ergebnisse ergänzender Versuche zur Ermittlung des spezifischen Arbeitsaufnahmevermögens an Probelplatten unterschiedlicher Dicke aus verschiedenen Werkstoffen	29
Anhang 2: Ergebnisse der in der BAM durchgeführten Versuche zur Ermittlung des globalen Arbeitsaufnahmevermögens an Tankabschnitten unterschiedlicher Konstruktionsweise	35
Anhang 3: Safety Levels of Tanks for the Transport of Dangerous Goods	41

Vorbemerkung

Auf seiner 18. Sitzung hat der Ausschuß Tank/Technik (ATT) des Gefahrgut-Verkehrs-Beirates als beratendes Gremium des Bundesministeriums für Verkehr beschlossen, einen Arbeitskreis zur Behandlung der tanktechnischen Fragen im Zusammenhang mit den §§ 7/7a der GGVS (Verlagerung der Beförderung besonders gefährlicher Güter – „Listengüter“ – und entzündbarer flüssiger Stoffe von der Straße auf die Schiene oder Wasserstraße bzw. Fahrwegbestimmung) eingesetzt.

Dieser Arbeitskreis (bestehend aus den Mitgliedern Herrn Dr. Böhm, Herrn Busch, Herrn Fath, Herrn

Kröger, Herrn Kuhn, Herrn Ludwig, Herrn Dr. Mönner, Herrn Dr. Schulz-Forberg und Herrn Dr. Triebel) hat die von den Autoren wesentlich getragenen Gedanken kritisch begleitet. Von ersten Gedankenansätzen über die Ausformung bis hin zur Vorlage dieses Berichtes trägt der Arbeitskreis des ATT die hier entwickelten Gedanken voll inhaltlich mit.

Auch der ATT hat auf seiner 20. und abschließend auf der 21. Sitzung den Ansatz für tragfähig erklärt und ihn dem Bundesministerium für Verkehr im nationalen wie im internationalen Rechtsnormenbereich empfohlen.

1 Anforderungen an Tanks

Die Beförderung gefährlicher Güter findet unter Bedingungen statt, die im wesentlichen in den Gefahrgutverordnungen Straße, Eisenbahn und See bzw. den Anlagen und Anhängen dazu beschrieben sind. In den Abschnitten der erwähnten Vorschriften, die dem Tanktransport gefährlicher Güter gewidmet sind (z. B. der Anhang B.1a der Anlage B zur Gefahrgutverordnung Straße /1/) sind u. a. Bestimmungen zum Bau von Tanks niedergelegt.

1.1 Allgemeine Bauvorschriften und zulässige Werkstoffausnutzung

Nach diesen Bestimmungen sind Tanks aus geeigneten metallischen Werkstoffen herzustellen, die trennbruchsicher und unempfindlich gegen Spannungsrißkorrosion zu sein haben. Für geschweißte Tanks darf überdies nur ein Werkstoff verwendet werden, dessen Schweißbarkeit einwandfrei feststeht und für den ein ausreichender Wert der Kerbschlagarbeit besonders in Schweißnähten und Wärmeeinflußzonen gewährleistet werden kann. Der Werkstoff von Gefahrguttanks, der mit dem Tankinhalt in Berührung kommt, darf mit dem Inhalt weder gefährlich reagieren noch gefährliche Stoffe erzeugen oder durch den Inhalt merklich geschwächt werden.

Gefahrguttanks müssen ferner so beschaffen sein, daß sie ohne Verlust ihres Inhaltes unter normalen Beförderungsbedingungen bestimmten statischen und dynamischen Beanspruchungen standhalten. Weitere Anforderungen müssen erfüllt werden:

So muß beim Prüfdruck die Spannung σ an der am stärksten beanspruchten Stelle des Tanks kleiner oder gleich den nachstehend im Verhältnis zu den Werkstoffen festgesetzten Grenzen sein.

- a) Für alle Metalle und Legierungen muß die Spannung σ beim Prüfdruck unter dem kleineren der Werte liegen, der sich aus folgenden Gleichungen ergibt:

$$\sigma \leq 0,75 R_c \text{ oder } \sigma \leq 0,50 R_m .$$

Dabei bedeuten:

R_c = Streckgrenze oder 0,2 %-Dehngrenze oder für austenitische Stähle 1 %-Dehngrenze

R_m = Mindestwert der Zugfestigkeit

Bei geschweißten Tanks aus Stahl darf das Verhältnis R_c/R_m nicht größer sein als 0,85.

Die Mindestwerte aus den Werkstoffnormen dürfen bei der Verwendung von austenitischen Stählen um bis zu 15 % überschritten werden.

Für den Festigkeitsnachweis beim Prüfdruck eines Tanks sind als Werkstoffkennwerte also im wesentlichen die Streckgrenze R_c bzw. die Zugfestigkeit R_m unter Berücksichtigung entsprechender Sicherheitsbeiwerte festgelegt, und zwar mit $\sigma_{zul} \leq 0,75 R_c$ für ein Streckgrenzenverhältnis $R_c/R_m \leq 0,66$ oder $\sigma_{zul} \leq 0,5 R_m$ für ein Streckgrenzenverhältnis darüber. Die Bruchdehnung A darf hierbei bei Feinkornbaustählen nicht weniger als 16 %, bei anderen Stählen nicht weniger als 20 % und bei Aluminiumlegierungen nicht weniger als 12 % betragen.

- b) Die Tanks einschließlich ihrer Befestigungseinrichtungen müssen ferner bei der höchstzulässigen Masse der Füllung folgende Kräfte aufnehmen können:

- 2fache Gesamtmasse in Fahrtrichtung;
- 1fache Gesamtmasse horizontal seitwärts zur Fahrtrichtung;

- 1fache Gesamtmasse vertikal aufwärts und
- 2fache Gesamtmasse vertikal abwärts.

Unter Wirkung jeder dieser Beanspruchungen darf die Spannung an dem am stärksten beanspruchten Punkt des Tanks und seiner Befestigungseinrichtungen den wie vorstehend festgelegten Wert σ nicht übersteigen.

- c) Die Mindestwanddicke e des zylindrischen Teils des Tanks sowie der Böden und Deckel muß mindestens der Dicke entsprechen, die sich nach folgender Formel ergibt.

$$e = \frac{P \cdot D}{20 \cdot \sigma \cdot \lambda} \quad (1)$$

wobei

- P = Berechnungsdruck in bar,
- D = innerer Durchmesser des Tanks in mm,
- σ = zulässige Spannung in N/mm²
- λ = Koeffizient, 1 oder weniger als 1, welcher der Schweißnahtgüte Rechnung trägt,

bedeutet.

In keinem Fall darf die Dicke aber geringer sein als die in den folgenden Absätzen aufgeführten Werte.

- d) Die Wände, Böden und Deckel von Tanks mit einem Durchmesser von nicht mehr als 1,80 m müssen eine Dicke von mindestens 5 mm haben, wenn sie aus Baustahl bestehen, oder eine gleichwertige Dicke, wenn sie aus einem anderen Metall hergestellt sind. Ist der Durchmesser größer als 1,80 m, ist die Dicke für Tanks aus Baustahl auf 6 mm oder eine gleichwertige Dicke bei Verwendung eines anderen Metalls zu erhöhen. Welches Metall auch verwendet wird, die Mindestdicke der Tankwände darf nie weniger als 3 mm betragen. Unter gleichwertiger Dicke versteht man diejenige, die durch die nachstehende Formel bestimmt wird:

$$e_1 = e_o \cdot \sqrt[3]{\frac{Rm_o \cdot A_o}{Rm_1 \cdot A_1}} \quad (2)$$

- e) Wenn Tanks einen Schutz gegen Beschädigung durch seitliches Anfahren oder Überschlagen aufweisen, kann zugelassen werden, daß diese Mindestwanddicken im Verhältnis zu diesem Schutz verringert werden; für Tanks mit einem Durchmesser von nicht mehr als 1,80 m dürfen diese Dicken jedoch nicht weniger als 3 mm bei Verwendung von Baustahl oder eine gleichwertige Dicke bei Verwendung anderer Metalle betragen. Für Tanks mit einem Durchmesser von mehr als 1,80 m ist diese Dicke bei Verwendung von Baustahl auf 4 mm zu erhöhen oder auf eine gleichwertige Dicke bei Verwendung eines anderen Metalls. Unter gleichwertiger Dicke versteht man die-

jenige, die durch die in Absatz d) angegebene Formel bestimmt wird.

- f) Ferner wird festgelegt, daß ein Schutz gegen Beschädigungen im Sinne des Absatzes e) vorliegt, wenn bestimmte oder diesen gleichzusetzende Maßnahmen ergriffen worden sind. Für Tanks zur Beförderung anderer als pulverförmiger oder körniger Stoffe sind als Beispiele ausreichender Maßnahmen folgende aufgeführt:

1. Bei Tanks mit kreisrundem oder elliptischem Querschnitt mit einem Krümmungsradius von höchstens 2 m, wenn der Tank mit Verstärkungsteilen ausgerüstet ist, die aus Trennwänden, Schwallwänden, äußeren oder inneren Verstärkungsringen bestehen, die so angebracht sind, daß sie zumindest einer der folgenden Bestimmungen entsprechen:

- Abstand zwischen zwei benachbarten Verstärkungsteilen: $\leq 1,75$ m;
- Rauminhalt zwischen zwei Trennwänden oder Schwallwänden: ≤ 7500 l.

Der senkrechte Querschnitt eines Ringes mit dem Teil der dazugehörigen Tankwand muß ein Widerstandsmoment von mindestens 10 cm³ aufweisen.

Die äußeren Ringe dürfen keine hervorspringenden Kanten mit einem kleineren Radius als 2,5 mm aufweisen. Die Dicke der Trennwände und der Schwallwände darf in keinem Fall geringer sein als die des Tanks.

Es handelt sich hierbei um sogenannte „Transversalelemente“.

2. Bei Tanks, die als Doppelwandtanks mit Vakuumisolierung gebaut sind, wenn die Summe der Dicken der metallischen Außenwand und der des Tanks der nach Abschnitt d) festgelegten Wanddicke entspricht und die Dicke der Tankwand selbst die in Abschnitt e) festgelegte Mindestwanddicke nicht unterschreitet.
3. Bei Tanks, die als Doppelwandtank mit einer Feststoffzwischenwand von mindestens 50 mm Dicke gebaut sind, wenn die Außenwand eine Dicke von mindestens 0,5 mm hat, wenn sie aus Baustahl und von mindestens 2 mm, wenn sie aus glasfaserverstärktem Kunststoff besteht. Als Feststoffzwischenwand kann Hartschaum verwendet werden (mit einem Schlagabsorptionsvermögen wie beispielsweise Polyurethanhartschaum).
4. Bei Tanks mit einer anderen Form als unter 1. aufgeführt, wie insbesondere Koffertanks, wenn sie rundum in der Mitte ihrer Höhe über mindestens 30 % ihrer Höhe mit einem zusätzlichen Schutz versehen sind, der so bemessen ist, daß er ein spezifisches Arbeitsaufnahmevermögen aufweist, das mindestens jenem einer Wand aus Baustahl mit einer Dicke von

5 mm (für einen Tankdurchmesser von höchstens 1,80 m) oder von 6 mm (für einen Tankdurchmesser über 1,80 m) gleichwertig ist. Der zusätzliche Schutz muß außen am Tank dauerhaft angebracht sein.

Es handelt sich hierbei um die sogenannte „Bauchbinde“, die als Schutzmaßnahme bei Tankfahrzeugen für Mineralölprodukte, die ganz überwiegend aus Aluminiumlegierungen hergestellt sind und werden, Verwendung findet.

Diese Forderung gilt ohne Nachweis als erfüllt, wenn der Tank in dem zu verstärkenden Bereich die Mindestwanddicke nach Absatz d) erreicht; die Verstärkung muß aus dem gleichen Werkstoff wie der Tank bestehen und geschweißt sein.

Das erwähnte spezifische Aufnahmevermögen ist entsprechend den Vorgaben der Technischen Richtlinien Festverbundene Tanks und Aufsetztanks TRTF 001 „Zusätzlicher Schutz für wanddickenreduzierte Tanks“ festgelegt bzw. zu ermitteln /2/. Die Ermittlung des spezifischen Arbeitsaufnahmevermögens erfolgt in einem in den TRTF 001 beschriebenen Tiefungsversuch. Im wesentlichen wird auf die dort angegebene Weise die Widerstandsfähigkeit einer Tankwand gegen punktförmige Belastung von außen festgestellt.

Die vorstehend aufgeführten Anforderungen sind im Anhang B.1a des ADR unter den Randnummern 211 120 ff. enthalten.

1.2 Werkstoffkennwerte metallischer Werkstoffe und die Anwendung der 3. Wurzel-Formel

Bei einem Vergleich der Eignung verschiedener Werkstoffe und ihrer Sicherheitsreserven ist zunächst eine Betrachtung ihrer mechanischen Kennwerte und hier besonders von R_e , R_m , A (Bruchdehnung) und R_e/R_m sinnvoll. Für den Vergleich wurden drei Werkstoffe ausgewählt, die beim Bau von Transporttanks weite Verbreitung gefunden haben:

Tabelle 1:
Werkstoffkennwerte verschiedener im Tankbau verwendeter Werkstoffe

Werkstoff	R_e [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	A [%]	R_e/R_m [-]
Aluminium (AlMg 4,5Mn W 28)	125	275	17	0,45
Baustahl (St 37-2)	235	340	24	0,69
Austenitischer Stahl (X6 CrNiMoTi 17122)	270	540	43	0,50

Die beispielhaft ausgewählten Werkstoffe haben alle ein relativ niedriges Streckgrenzenverhältnis. Bemerkenswert ist jedoch, daß der austenitische Stahl auffallend hohe Werte für Zugfestigkeit und Bruchdehnung aufweist, womit günstiges Bruchverhalten einhergeht.

Die vorstehend aufgeführten Zahlenangaben für die Werkstoffkennwerte sind, wie alle nachfolgenden, DIN-Normen entnommen.

Im Absatz d) des vorhergehenden Abschnittes wurde die Mindestwanddicke für Wände, Böden und Deckel von Tanks, die aus Baustahl bestehen, zu 5 bzw. 6 mm angegeben, je nachdem, ob sie einen Durchmesser bis 1,8 m oder darüber aufweisen. Für Tanks, die einen Schutz gegen Beschädigungen entsprechend Absatz e) haben, verringern sich diese Werte auf 3 bzw. 4 mm. Bei Verwendung eines anderen Metalls als Baustahl ist die gleichwertige Dicke nach der in den genannten Absätzen aufgeführten sogenannten „3. Wurzel-Formel“ (2) zu ermitteln. Die Anwendung dieser Umrechnungsformel führt bei den neben Baustählen hauptsächlich verwendeten Tankwerkstoffen austenitischer Stahl (z. B. Werkstoff Nr. 1.4571) und Aluminiumlegierung (üblicherweise Al Mg 4,5 W 28) zu folgenden Mindestwanddicken bzw. gleichwertigen Dicken:

Tabelle 2:
Gleichwertige Wanddicken nach Gefahrgutverordnungen

Wanddicke [mm]		
Baustahl (St 37-2)	austenitischer Stahl (1.4571)	Aluminiumlegierung (AlMg 4,5 Mn W 28)
3	2,3	3,9
4	3,0	5,2
5	3,8	6,5
6	4,5	7,8

Die Anwendung der vorschriftenkonformen 3. Wurzel-Formel führt also zu der Aussage, daß beispielsweise ein 7,8 mm-Aluminiumtank dieselbe Sicherheit (auch gegen Einwirkungen von außen) gewährleistet bzw. gewährleisten sollte, wie ein 6 mm-Baustahltank – der per Definition genügende Sicherheit repräsentierende Basistank – oder ein 4,5 mm Austenittank.

Des weiteren wird nach Vorschriftenlage davon ausgegangen, daß ein Tank, der lediglich über 30 % seiner Höhe die geforderte Mindestwanddicke aufweist gegenüber einem Tank, der diese Mindestwanddicke rundum hat oder in bestimmter Weise transversal verstärkt ist, als sicherheitstechnisch vergleichbar angesehen werden kann (s. Abschnitt 1.1, f), Nr. 1 bzw. Nr. 4).

1.3 Betrachtungen zu betrieblichen Beanspruchungen

Die Dimensionierung von Tanks erfolgt mit einer aus der Belastung des normalen Betriebes (Gas- oder Flüssigkeitsdruck, Eigengewicht, Temperatur) ableitbaren Nennspannung σ_N und der vom Werkstoff bestimmten zulässigen Spannung in der Form

$$\sigma_N \leq \sigma_{zul} = \frac{\text{Werkstoffkennwert}}{\text{Sicherheitsbeiwert}} \quad (3)$$

Die Nennspannung kann auf der Basis der Elastizitätstheorie berechnet werden. Im Tank- bzw. Behälterbau – mit den dabei anzunehmenden geometrischen und konstruktiven Voraussetzungen – ist in aller Regel ein analytischer Nachweis bei Anwendung der Behältergrundgleichung:

$$\sigma_N = \frac{F}{e} \pm \frac{6M}{e^2} \quad (4)$$

mit F, M als allgemeiner Bezeichnung für die an der Schale wirkenden, auf eine Längeneinheit bezogenen Kräfte und Momente, eine ausreichende und abgesicherte Methode /3/.

Werden nach Maßgabe der beschriebenen Bedingungen die hier zu beurteilenden Werkstoffe und Wanddicken (s. Bilder 1 und 2) zunächst unter alleiniger Berücksichtigung des Membranspannungszustandes vergleichend betrachtet, ist festzustellen, daß den bei verringerter (erhöhter) Wanddicke ansteigenden (fallenden) Nennspan-

nungen entsprechend höhere (niedrigere) Festigkeitswerte gegenüberstehen, so daß σ_{zul} größenordnungsmäßig in etwa gleich bleibt.

Die Gleichung (4) beschreibt den Spannungszustand eines dünnwandigen Behälters vollständig. Es ist zu erkennen, daß die den Membranspannungszustand überlagernden Biegespannungen, entsprechend der gekennzeichneten Abhängigkeit von der Wanddicke, überproportional ansteigen. Sie sind jedoch auf sehr kleine Bereiche an geometrisch oder konstruktiv bedingten Störstellen bezogen und werden – sofern die Spannungsspitzen die Streckgrenze überschreiten – durch örtliches Fließen begrenzt. Dieses Merkmal ist um so günstiger zu beurteilen, je höher die Bruchdehnung A des Werkstoffes ist.

Hierauf, d. h. auf die sichere Abdeckung betrieblicher Beanspruchungen beziehen sich die Auslegungsregelungen (Bauvorschriften) der Rechtsverordnungen für Gefahrguttanks im wesentlichen.

Durch die Mindestwanddickenanforderungen zusätzlicher Art bzw. bestimmte Ersatzmaßnahmen hierfür (s. Abschnitt 1.1 d) und e)) wird das Auslegungsniveau dieser Tanks über das Vermögen, betriebliche Beanspruchungen sicher aufnehmen zu können, hinaus angehoben. Daher kann davon ausgegangen werden, daß von den beschriebenen Tanks auch bestimmte Beanspruchungen nichtbetrieblicher, also unfallbedingter Art aufgenommen werden können.

Hierbei basiert die vorliegende Betrachtung auf der vorläufigen Annahme, daß die entsprechend dimensionierten Tanks unterschiedlicher Wanddicke und Werkstoffeigenschaften ein zumindest in Grenzen vergleichbares Sicherheitsniveau bei den näher definierten, normalen Auslegungsbedingungen aufweisen.

Für weiterführende Aussagen bezüglich zusätzlicher Beanspruchungen, die durch Ereignisse während der Beförderung auftreten und Tanks bis zur Versagensgrenze belasten können, ist von dieser wesentlichen Voraussetzung auszugehen.

2 Einflußgrößen auf das unfallbedingte Tankversagen

Anforderungen, die an Gefahrgutumschließungen generell – also auch an Transporttanks – gestellt werden, decken per Definition üblicherweise das mit Beförderungsvorgängen im weitesten Sinne verbundene Unfallrisiko nicht oder nur teilweise ab. Bis auf wenige Ausnahmen – beispielsweise Umschließungen für bestimmte radioaktive Stoffe – sind Gefahrgutumschließungen also nicht unter allen denkbaren oder anzunehmenden Bedingungen als unfallsicher anzusehen. Anforderungen orientieren sich primär an betrieblichen Gegebenheiten wie

Transportbeanspruchungen, tatsächlich auftretenden Drücken und Temperaturen sowie korrosiver Wirkung der beförderten Stoffe.

2.1 Tankarten

In diesem Zusammenhang erfolgt der Tanktransport gefährlicher Güter in Abhängigkeit vom gewählten Verkehrsweg nach unterschiedlichen Umschließungsanforderungen allgemeiner und besonderer Art. Je nach Art

des Gefahrgutes bzw. dem einzelnen Gütern innewohnenden Gefährdungspotential werden Wanddickenreduzierungen zugelassen oder Wanddickenerhöhungen vorgeschrieben. Die Vorgehensweise für Wanddickenerhöhungen bei Tanktransporten im Land- also auch im Straßenverkehr beruht hierbei auf der Einführung von evtl. höheren fiktiven Berechnungsdrücken, die in Verbindung mit (1) zu größeren Wanddicken führen. Für flüssige Gefahrgüter „normalen“ oder minderen Gefährdungspotentials werden dagegen Wanddickenreduzierungen zugelassen, wenn ein zusätzlicher Tankschutz wie in Abschnitt 1.1 f) aufgeführt, vorgesehen wird. Bestimmte Gefahrgüter dürfen außerdem quasi „drucklos“ befördert werden, was größere Freiräume hinsichtlich der Gestaltung, insbesondere der Form von Tanks, aber auch der Werkstoffauswahl ermöglicht.

Vor diesem Hintergrund lassen sich also Gefahrguttanks und Tankarten beispielsweise wie folgt gruppieren:

Tabelle 3:
Tankarten im Sinne der Betrachtung

1.	Tanks je nach Funktion/Einsatzbereich
2.	Tanks je nach Wanddicke
2.1	Tanks mit Mindestwanddicke
2.2	Wanddickenreduzierte Tanks
3.	Tanks je nach strukturellem Schutz
3.1	Tanks ohne zusätzlichen Schutz
3.2	Tanks mit Rahmenwerken (Tankcontainer)
3.3	Tanks mit strukturellem Schutz
3.3.1	Tanks mit Transversalverstärkungen
3.3.2	Doppelwandtanks (Tanks mit Isolierungen)
3.3.3	Tanks mit Logitudinalschutz
3.3.4	Tanks mit Schutz durch Pritsche und Ladebordwände
3.4	Tanks je nach Druck
3.4.1	Drucktanks
3.4.2	Drucklose Tanks
3.5	Tanks je nach weiterer konstruktiver Gestaltung
3.5.1	Tanks je nach Werkstoff
3.5.2	Tanks je nach Form
3.5.3	Tanks je nach sonstiger Gestaltung

Ein Blick auf diese Tankarten macht deutlich, daß es sich bei verschiedenartigen „Tanks“ durchaus nicht um gleichartige bzw. hinsichtlich ihrer Schutzfunktion gegen eventuelle Gefahrgutfreisetzung vergleichbare Umschließungen handelt.

Hieraus ergibt sich, daß ausgehend von der Betrachtung der Beanspruchungen bei Betrieb und Unfall eine Bewertung von Tanks beispielsweise als Funktion von Werkstoff, Form und konstruktiver Gestaltung vorgenommen werden kann. Bei der Bewertung der konstruktiven Gestaltung sind die unterschiedlichen Möglichkeiten zu betrachten, die dem sicheren Einschluß von Gefahrgut dienen: Unmittelbarer Schutz über erweiterte konstruktive Maßnahmen wie doppelwandige Bauweise (Isolierung), Rahmenwerke bei Tankcontainern u. ä.

2.2 Beanspruchungsarten

Ausgehend von den wesentlichen Unfallarten wie

- Auffahren
- seitliches Anfahren
- Abkommen von der Fahrbahn
- Umstürzen/Überschlagen

sind daher die Beanspruchungsarten

- punktförmige Beanspruchung
- Aufprall auf ein gleichartiges Hindernis
- Aufprall auf eine großvolumige Masse

in bezug auf Gefahrguttanks zu betrachten.

Wesentliche Parameter für diese Beanspruchungen sind

- Energieniveau
- Energieeintrag
- Masseverteilung

deren Festlegung bzw. Ermittlung die Beschreibung der Leistungsfähigkeit von Gefahrguttanks in bezug auf unfallbedingte Einwirkungen von außen ermöglichen würde. Derzeit liegen hierzu jedoch nur ungenügende Erkenntnisse vor, insbesondere was die Dynamik von Unfallvorgängen betrifft. Es muß daher auf Erkenntnisse zurückgegriffen werden, die im wesentlichen aus quasistatischen Betrachtungen und Untersuchungen gewonnen werden können, was es gestattet, die Anzahl der unfallbedingten Beanspruchungsarten zu reduzieren auf:

- a) Lokal begrenzte Beanspruchungen durch dornartige Strukturen, wie sie beim Auffahren (z. B. auf Eisenbahnpuffer) oder Absturz (z. B. auf Hafenspinner) von Tanks praktisch vorkommen können;
- b) Globale Beanspruchungen durch Umkippen oder Auffahren auf weitgehend starre Hindernisse. Bei dünnwandigen großvolumigen Strukturen, wie sie Tanks darstellen, sind hierbei insbesondere die Merkmale der Stabilität zu beachten. Die Versagensgrenze ist dann üblicherweise eine kritische Belastung, aus der sich die zulässige Spannung ergibt. Diese ist im allgemeinen nicht aus Werkstoffkennwerten der Festigkeit (Streckgrenze, Zugfestigkeit) herzuleiten.

zu a) Dornbeanspruchungen

Als Modell zur Beschreibung des hierbei zu betrachtenden Beanspruchungsgeschehens dient folgendes Bild:

Eine, den Tankboden repräsentierende eingespannte Platte der Dicke e wird zentrisch durch ein Flächenlast entsprechend des Dorndurchmessers beansprucht.

Berechnungsverfahren zur Ermittlung des Spannungszustandes derartiger Belastungsfälle sind

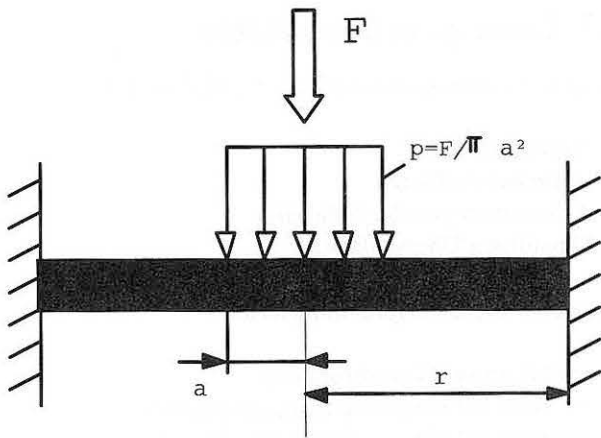


Bild 1:
Modell zur Beschreibung der Beanspruchungen bei Dornbelastungen

– auch unter Berücksichtigung nichtlinearen Verhaltens bei großen Durchbiegungen dünner Platten – weitgehend bekannt (s. z. B. /4/). Ebenso abgesichert ist die Anwendung der Plastizitätstheorie bei einachsigem Spannungszustand mit linear elastisch/idealplastischem Materialverhalten, als einfachster Erweiterung des Hookeschen Gesetzes.

Die Kenntnis des nichtlinearen Durchbiegungsverlaufes des im vorstehenden Bild dargestellten Belastungsfalles unter Einbeziehung bestimmter Fließbedingungen macht es möglich, vorliegende experimentelle Untersuchungen zu interpretieren.

Platten unterschiedlicher Dicke und Werkstoffe wurden in der BAM quasistatischen Dornversuchen gemäß vorstehendem Bild unterzogen.

Aus den Ergebnissen der Versuche ist die Aussage abzuleiten, daß ein hochduktiler Werkstoff auch bei geringerer Wanddicke für lokale Beanspruchungen durch dornähnliche Strukturen günstig zu beurteilen ist.

zu b) Globale Beanspruchungen

Beim Umkippen oder Auffahren auf großvolumige Hindernisse von Tanks ist anzunehmen, daß die gesamte Struktur in das Beanspruchungsgeschehen einzubeziehen ist. Als Modell zur Beschreibung sind zwei Fälle wesentlich, die einmal die Kräfteinleitung von den Böden (Auffahren) sowie über den zylindrischen Teil (Umkippen) als denkbare Beanspruchungen von außen beinhalten.

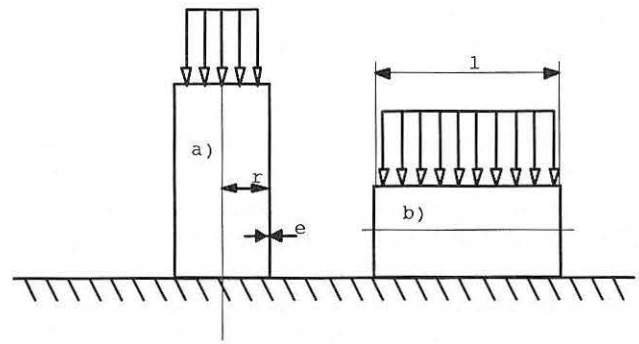


Bild 2:
Modell zur Beschreibung globaler Beanspruchung

- a) Einwirkung von den Stirnflächen
- b) Einwirkung über die Mantellinien

Wegen der bei Tanks vorliegenden geometrischen Bedingungen $e \ll r$ und L ist für diese Lastfälle vorauszusetzen, daß die Stabilität der Strukturen das Verhalten im Sinne des Versagens weitgehend bestimmt. Wenn die kritische Last an der Stabilitätsgrenze in erster Näherung als Versagensgrenze angesehen wird, sind Aussagen über den Einfluß unterschiedlicher Wanddicke und Werkstoffeigenschaften möglich.

Im Fall a) wird die Stabilität durch den zylindrischen Teil, im Fall b) durch die aufrecht stehenden Endböden bestimmt. Für beide sind die Stabilitätsgrenzen in Form einer kritischen Spannung σ_{kr} bekannt (s. /4/):

Fall a): $\sigma_{kr} \sim E, e$;

Fall b): $\sigma_{kr} \sim E, e^2$

mit $E = E$ -Modul des Werkstoffes.

Hierzu ist zu bemerken, daß die Angabe der kritischen Stabilitätsspannung als zulässige Spannung nur ein Anhaltspunkt für den Beginn eines Versagens sein kann. In der Realität sind nach Erreichen der Stabilitätsgrenze bis zum Bruch (Erreichen der Versagensgrenze) Werkstoffeigenschaften der plastischen Verformbarkeit nach wie vor zu betrachten. Bei Berücksichtigung dieser Gesamtzusammenhänge kann auch bei diesen Belastungsfällen nicht von einer überproportionalen Verminderung der Versagensgrenze ausgegangen werden, wie durch das quadratische Verhältnis der Wanddicken angezeigt wird.

3 Simulation unfallbedingter Einwirkungen von außen und Schaffung von Vergleichsgrößen

Wenn bestimmte Beanspruchungs- und Unfallarten wie Brände, Explosionen oder sich aus Dauerbeanspruchungen ergebende Versagensarten ausgeschlossen werden, kann eine Betrachtung des unfallbedingten Versagens von

Gefahrguttanks auf die Darstellung der Leistungsfähigkeit von Tanks gegenüber mechanischen Einwirkungen von außen begrenzt werden. Da in diesem Zusammenhang wiederum über dynamische, massebehaftete Vor-

gänge wenig, zumindest kein genügend nachvollziehbares Material vorliegt, werden hierzu die entsprechenden Ergebnisse des BMFT-Forschungsvorhabens THESEUS (Tanks mit höchst erreichbarer Sicherheit durch experimentelle Unfallsimulation), im Rahmen dessen die BAM das Arbeitspaket „Versagensgrenzen von Tanks“ betreut, abzuwarten sein. Mit der Veröffentlichung diesbezüglicher Ergebnisse, die mit einiger Wahrscheinlichkeit zu einer Modifikation der Aspekte bezüglich der Betrachtung der Gesamtsicherheit von Gefahrguttanks führen dürften, ist nicht vor Ende 1994 zu rechnen. Um dennoch zu einer evtl. vorläufigen Bewertung der Umschließungsqualität von Transporttanks für Gefahrgut zu gelangen, müssen derzeit mechanische Einwirkungen von außen daher auf quasistatische Vorgänge bzw. Simulationen reduziert werden.

Unter diesen Voraussetzungen lassen sich aus den in Abschnitt 2.2 enthaltenen Darlegungen zu lokalen und globalen Beanspruchungen von Tankschalen vereinfachte Prüf- und Untersuchungsverfahren herleiten, die zumindest zu einer vergleichenden Betrachtung der Leistungsfähigkeit von Tankwänden, Tankwandaufbauten und Tankstrukturen gegenüber mechanischen Einwirkungen von außen herangezogen werden können.

3.1 Spezifisches Arbeitsaufnahmevermögen als Versagensgrenze von Tankwänden

3.1.1 Ermittlung des spezifischen Arbeitsaufnahmevermögens auf analytischer Basis

Die Widerstandsfähigkeit (aufnehmbare Verformungsarbeit = elastische Energie) W eines Körpers mit dem Volumen $V = A \cdot s$ (A = Fläche, Querschnitt; s = Länge, Wanddicke; Weg) gegen aufgeprägte Verformungen sowohl von innen als auch von außen – Stabilitätsprobleme wie Knickung oder Beulung außer acht gelassen – ist nach /6/

$$\Delta W = V \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon \quad (5)$$

Das spezifische Arbeitsaufnahmevermögen beträgt somit

$$\Delta w = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon \quad (6)$$

Hierbei ist ϵ die Dehnung bzw. $d\epsilon$ die Dehnungsänderung des Körpers.

Auf eine Tankwand bezogen, ergibt sich bei ansonsten gleichen Randbedingungen - mit dem Aufreißen der Tankwand als Versagenskriterium - als spezifisches Arbeitsaufnahmevermögen (linear elastisches/idealplastisches Materialverhalten vorausgesetzt):

$$\Delta w \sim R_m \cdot A \quad (7)$$

mit A als Bruchdehnung des eingesetzten Tankwandmaterials. Auf Arbeiten, die diesen Zusammenhang bestätigen /7/, kann verwiesen werden.

Das Integral $\int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon$

läßt sich im Zerreißschaubild (Spannungs-Dehnungs-Diagramm) für verschiedene Werkstoffe als Fläche unter der Spannungs-Dehnungs-Kurve interpretieren (s. Bild 3). Es ist zu bemerken, daß das derart ermittelte spezifische

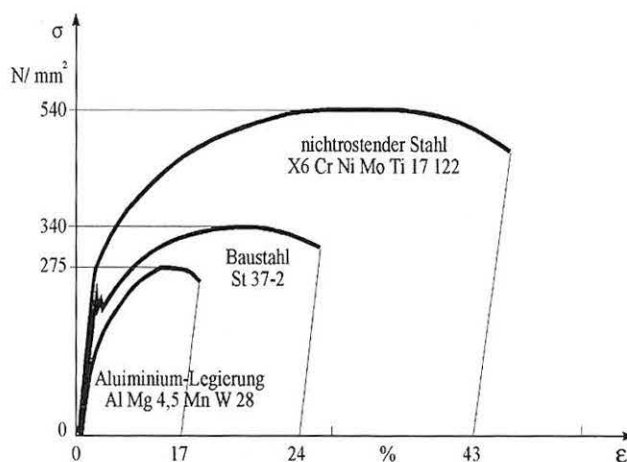


Bild 3: Spannungs-Dehnungs-Diagramm (schematisch) verschiedener metallischer Tankwerkstoffe

Arbeitsaufnahmevermögen von austenitischem Stahl (Aust) ein Mehrfaches des spezifischen Arbeitsaufnahmevermögens von Baustahl (St) oder einer häufig verwendeten Aluminiumlegierung (Al) beträgt.

$$\Delta w_{Al} : \Delta w_{St} : \Delta w_{Aust} = 0,6 : 1,0 : 2,8 \quad (8)$$

3.1.2 Ergebnisse experimenteller Ermittlungen des spezifischen Arbeitsaufnahmevermögens

Der vorstehend geschilderte Sachverhalt, daß nämlich das spezifische Arbeitsaufnahmevermögen von Tankwänden aus verschiedenen Werkstoffen der Gesetzmäßigkeit

$$\Delta w = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon \sim R_m \cdot A$$

mit guter Näherung folgt, ist durch in der BAM ausgeführte Versuche belegt. Das spezifische Arbeitsaufnahmevermögen wurde hierbei wie folgt ermittelt:

An ebenen Probeplatten, die dem Wandungsaufbau des Tanks entsprechen müssen, wurden mit einem zylindri-

schen Druckstempel aus Stahl (Durchmesser 150 mm, Eckradius an der Prüfseite 6 mm) Tiefungsversuche durchgeführt.

Die Probplatten wurden auf einer kreisförmigen Prüfvorrichtung mit einem lichten Durchmesser von 400 mm am ganzen Umfang so befestigt, daß die Tankaußenseite dem Stempel zugewandt war.

Die Krafteinleitung erfolgte senkrecht zu den Probplatten in Probenmitte.

Bei den Versuchen wurde die Kraft quasistatisch bis zum Anriß der Probplatten aufgebracht. Der Kraft-Weg-Verlauf wurde registriert und daraus die Arbeitsaufnahme ermittelt.

Dies ist möglich, da $\Delta W = V \cdot \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon$.

Mit $d\epsilon = \frac{ds}{s}$ folgt

$$\Delta W = \int_0^s A \sigma ds \quad (9)$$

Hieraus ergibt sich mit $\sigma = \frac{F}{A} = \left(\frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}} \right)$

$$\Delta W = \int_0^s F \cdot ds. \quad (10)$$

Das Arbeitsaufnahmevermögen ist also gleich der Fläche unter dem aufgenommenen Kraft-Weg-Verlauf.

Der verwendete Versuchsaufbau kann Bild 4 entnommen werden. Es ergeben sich in Abhängigkeit von Werkstoff und Wanddicke die in Tabelle 4 niedergelegten Werte für das Arbeitsaufnahmevermögen.

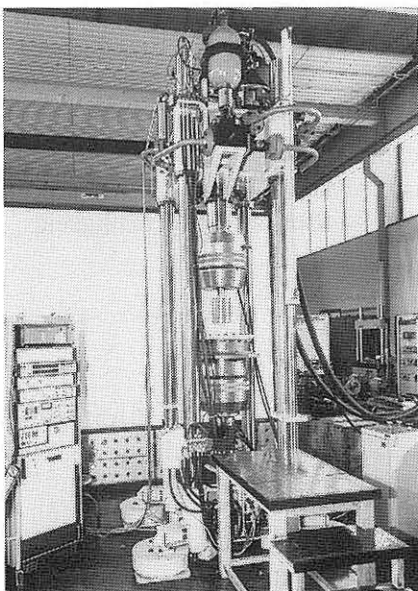


Bild 4:
Versuchseinrichtung zur Bestimmung des spezifischen Arbeitsaufnahmevermögens

Tabelle 4:
Arbeitsaufnahmevermögen aus Versuchen der BAM

Werkstoff	Wanddicke [mm]	Arbeitsaufnahmevermögen [kJ/m ²]
Aluminiumlegierung (AlMg 4,5 Mn W 28)	4,0	2,2
	5,0	6,9
	6,0	12,3
	7,0	7,3
	8,0	9,5
Baustahl (St 37-2)	3,0	10,3
	4,0	15,3
	5,0	18,6
	6,0	23,3
Austenitischer Stahl (X6CrNiMoTi 17122)	1,0	14,1
	1,5	21,4
	3,0	30,0
	3,5	32,5
	4,0	37,8

Die Vorgehensweise entspricht genau der, die in den in Abschnitt 1 erwähnten TRTF 001 /2/ beschrieben ist. Für die vorliegenden Betrachtungen wurden – soweit Probplatten überhaupt beschaffbar waren – einige ergänzende Untersuchungen nach der vorstehend beschriebenen Vorgehensweise durchgeführt. Die Ergebnisse sind diesem Bericht als Anhang 1 beigelegt. Obwohl, wie zu erwarten, Nichtlinearitäten zu verzeichnen sind, ist zumindest deutlich, daß auch das im Versuch ermittelte Arbeitsaufnahmevermögen austenitischer Stähle wenigstens um die im vorhergehenden Abschnitt angegebenen Verhältniszahlen höher ist, als das der anderen Werkstoffe.

3.2 Stanzkraft

3.2.1 Stanzkraft (Durchstoßkraft) auf analytischer Basis

Auch ein Vergleich der beim Versagen aufzubringenden Durchstoßkräfte führt zu einem den Austenit begünstigenden Ergebnis. Die Durchstoßkraft (Stanzkraft) – bezogen auf den beschriebenen Dornversuch ist der Schubspannungszustand anzunehmen – ist

$$F = A_s \cdot \frac{R_m}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

mit F = Stanzkraft
 A_s = Stanz-, Scherfläche

Ein Vergleich erforderlicher Durchstoßkräfte reduziert sich bei ansonsten gleichen Randbedingungen also auf den Vergleich der jeweiligen Zugfestigkeiten:

$$F \sim R_m \quad (12)$$

Daher folgt

$$F_{Al} : F_{st} : F_{Aust} = 0,8 : 1,0 : 1,6 \quad (13)$$

Aus den Durchstoßversuchen der BAM gewonnene Ergebnisse bestätigen die theoretische Betrachtung.

3.2.2 Stanzkraft (Durchstoßkraft) auf experimenteller Basis

Auf der Grundlage von Versuchen, die vom Oak Ridge National Laboratory, USA, durchgeführt wurden, konnte eine Formel entwickelt werden, mit deren Hilfe die äußere Schale von Stahl-Blei-Stahl-Umschließungen für radioaktive Stoffe bemessen werden kann /7/.

Der Ausdruck

$$e = k \cdot (m / R_m)^{0,7} \quad (14)$$

mit e = Wanddicke
 k = Konstante
 m = Brutto-Gesamtmasse der Umschließung
 R_m = Zugfestigkeit der äußeren Stahlwand

ermöglicht die Abschätzung der erforderlichen Wanddicke der genannten Außenbehälter, um den Beanspruchungen bei einem bestimmten Fallversuch widerstehen zu können /8,9/. Hierbei wird der Behälter aus 1 m Höhe auf einen Dorn bestimmter Abmessungen (s. Abschnitt 3.1.2) fallen gelassen; der Versuch gilt als bestanden, wenn kein unzulässiger Austritt der Inhaltsstoffe oder von Strahlung aus dem Behälter nachzuweisen ist.

Aus der o. a. Beziehung läßt sich der folgende Ausdruck für die Durchstoßkraft ableiten:

$$F \sim R_m^{0,7}, \quad (15)$$

unter der Voraussetzung, daß die sonstigen Parameter nicht verändert werden.

Anzumerken ist, daß der erwähnte Versuch zu dynamischen Beanspruchungen führt, insofern u. U. mit der in Abschnitt 3.1.2 beschriebenen quasistatischen Vorgehensweise nur bedingt vergleichbar ist. Außerdem gilt die Beziehung für Behälterschalen, die wesentlich dicker als übliche Tankwände von Gefahrguttanks sind und für die daher hinsichtlich ihres Auslegens eher bruchmechanische Voraussetzungen als membranspannungstheoretische Erwägungen Gültigkeit haben dürften.

Bis zum Vorliegen der Ergebnisse weiterführender Forschungsarbeiten erscheint es vertretbar, die o. a. Beziehungen die Stanzkraft betreffend bei der Diskussion von Möglichkeiten zur Simulation unfallbedingter Einwirkungen unberücksichtigt zu lassen.

3.3 Globales Arbeitsaufnahmevermögen von Tankstrukturen

Die Widerstandsfähigkeit – das globale Arbeitsaufnahmevermögen – eines Tanks oder Tankabschnitts, kurz, einer Tankstruktur, gegen großflächig von außen auf eine Tankstruktur einwirkende Belastung ist auf einfache Weise analytisch nicht mehr darstellbar. Daher ist man bei den realisierten Tankkonstruktionen auf eine experimentelle Vorgehensweise festgelegt. Um Tanks verschiedener Struktur, also Tanks, die mit verschiedenen Verstärkungselementen transversaler Art wie Trennwänden, Schwallwänden oder Verstärkungsringen ausgestattet sind, hinsichtlich ihrer unterschiedlichen Widerstandsfähigkeit gegen globale Einwirkungen von außen miteinander vergleichen zu können, wurde in der BAM ein geeignetes, neuartiges Untersuchungsverfahren entwickelt. Ziel der in der BAM durchgeführten Untersuchungen war zunächst, das globale Arbeitsaufnahmevermögen von Tankkonstruktionen mit bestimmten „transversalen Verstärkungen“ festzustellen und den Vergleich zu Tanks zu ziehen, die mit beispielhaften anerkannten Schutzmaßnahmen versehen sind, für die also besondere Nachweise ordnungsgemäß nicht oder nicht mehr geführt werden müssen.

Zur Durchführung der Untersuchungen wurden aus bekannten oder neu zu beurteilenden Tanks Prüfmuster – den vollständigen Tanks hinsichtlich ihres globalen Arbeitsaufnahmevermögens vollständig ähnliche Tankabschnitte – abgeleitet, die folgenden Randbedingungen genügen tragen mußten:

Die zu untersuchenden Tankabschnitte hatten eine Länge von 3 bzw. 4 m und waren entsprechend den realen, vollständigen Tanks mit einer entsprechenden Anzahl und Verteilung von transversalen Verstärkungselementen ausgestattet. Die Untersuchung der Tankabschnitte erfolgte mit einer stempelartigen Prüfvorrichtung mit den Abmessungen 3900 mm Länge und 430 mm Breite.

Die Untersuchungen wurden mit Hilfe einer Großprüfmaschine für Tragfähigkeitsuntersuchungen an großen Bauteilen durchgeführt.

Die Tanks wurden der Länge nach, jedoch auf der Seite liegend, auf der Spannfläche der Großprüfmaschine angeordnet. Die Tanks wurden nicht befestigt, sondern ihre Position lediglich mit Keilen gesichert, die zu Beginn der Belastung (wenn die Tanks durch die am Haupt der Prüfmaschine befestigte Prüfvorrichtung fixiert wurden) entfernt wurden. Mit der am Haupt der Prüfmaschine befestigten Prüfvorrichtung wurden Druckkräfte auf die Tanks aufgebracht. Die Krafteinleitung erfolgte senkrecht zu den seitlich liegenden Tanks und in Richtung der Tankachsen.

Auf diese Weise wurden die Tanks äquatorial belastet.

Die seitliche Lage der Tanks wurde gewählt, um einerseits den Einfluß evtl. vorhandener longitudinaler Schutz-

maßnahmen mitzuerfassen, zweitens die Belastung etwa durch unfallbedingtes Umschlagen eines Tanks besser simulieren und drittens die Position geringster Stabilität (Widerstandsmoment, Knicklast der Tankstruktur) betrachten zu können.

Bei den Versuchen wurde die Kraft quasistatisch bis zum Erreichen des max. Kolbenweges der Prüfmaschine aufgebracht. Der Kraft-Weg-Verlauf wurde registriert und daraus das globale Arbeitsaufnahmevermögen der Tankabschnitte ermittelt. Die Anordnung der Prüfmuster bzw. die Art der Versuchsdurchführung kann Bild 5 entnommen werden.

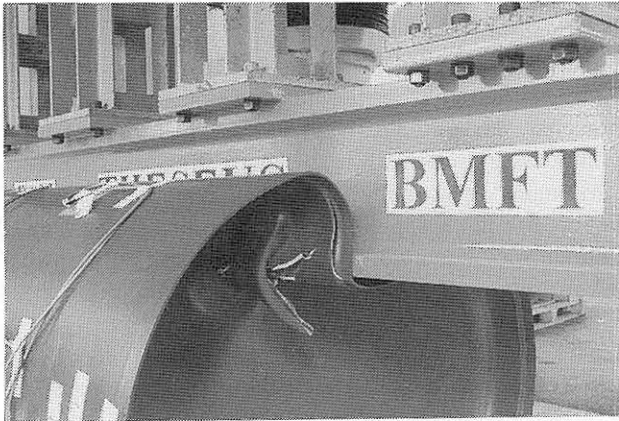


Bild 5:
Ermittlung des globalen Arbeitsaufnahmevermögens an einem Tankabschnitt

Durch die großflächige Verformung durch die Belastung mit der Prüfvorrichtung kommt es an der Lasteinleitungsfläche zu relativ starken plastischen Verformungen im Tankmantel und den vorhandenen Schwallwänden (transversale Verstärkungselemente). Anrisse der Tankmäntel konnte in keinem Fall beobachtet werden. Die der Lasteinleitungsfläche gegenüberliegenden Auflageflächen sind jeweils stark abgeflacht. Signifikante Unterschiede z. B. bei Vorsehen verschiedener Transversalelemente sind bezüglich der Verformungswege und -art äußerlich nicht feststellbar, ebenso wie ein Einfluß von longitudinalen Schutzmaßnahmen optisch nicht erfaßt werden konnte.

Deutliche Unterschiede bezüglich des Verhaltens der Prüfmuster gegenüber großflächig einwirkenden äußeren Lasten lassen sich jedoch den aufgezeichneten Kraft-Weg-Verläufen entnehmen, ein Beispiel hierfür ist in Bild 6 dargestellt.

Anlagenbedingt ist für den Vergleich von Tankabschnitten von einem Kraft-Weg-Verlauf bis zu einem Weg von 250 mm auszugehen. Das globale Arbeitsaufnahmevermögen der Prüflinge ergibt sich als Integral unter der aufgezeichneten Kurve.

Im Zuge dieser Untersuchungen wurden globale Arbeitsaufnahmevermögen zwischen 30 kNm bei Tanks ohne

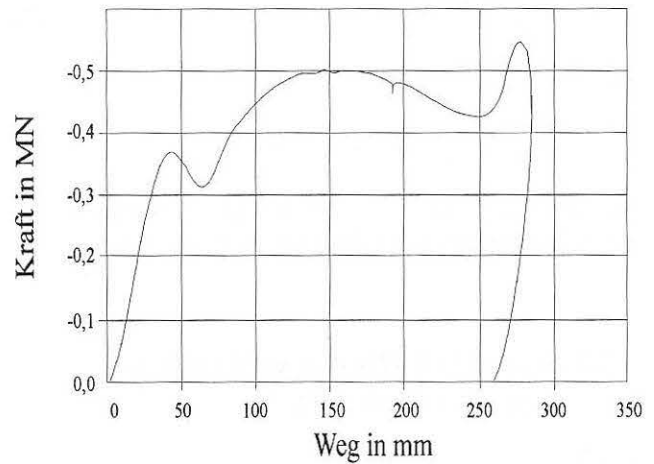


Bild 6:
Kraft-Weg-Diagramm zur Ermittlung globalen Arbeitsaufnahmevermögens

transversale Verstärkungselemente (nur mit Endböden ausgestattet) und 100 kNm bei Tanks, die zusätzlich mit bestimmten Transversalverstärkungen jeweils in rund 1 m Abstand längs des Tanks angeordnet, versehen waren, ermittelt.

Eine Zusammenstellung der Ergebnisse, der in der BAM durchgeführten Untersuchungen zum globalen Arbeitsaufnahmevermögen, ist dieser Darstellung als Anhang 2 beigefügt.

Auf dieser Grundlage und unter Einbeziehung weiterer konstruktiver und sonstiger Gegebenheiten konnte die Gleichwertigkeit transversaler Verstärkungen als Schutzmaßnahme auch bei Tanks, die nicht zylinder- oder ellipsenförmig sind, festgestellt werden (s. Abschnitt 1.1 f), was seinen Niederschlag außerdem in einer Neufassung der bereits erwähnten TRTF 001 /2/ fand.

Eine ausführlichere Diskussion der Anwendbarkeit und Aussagekraft der verschiedenen Kriterien zur Simulation der Einwirkungen von außen folgt in Abschnitt 4.

3.4 Definition von Vergleichsgrößen

In den vorhergehenden Abschnitten war dargelegt worden, daß Transporttanks nach verkehrsrechtlichen Vorschriften eine gewisse „Grundsicherheit“ repräsentieren müssen. Diese Grundsicherheit wird im wesentlichen als gegeben angenommen, wenn Tanks eine Mindestwanddicke von 5 bzw. 6 mm haben und aus Baustahl bestehen. Wenn Transporttanks aus anderen Metallen hergestellt werden, ergibt sich die erforderliche gleichwertige Wanddicke nach der erwähnten „3. Wurzel-Formel“ (2). Wanddickenreduzierungen sind nur möglich, wenn Tanks einen zusätzlichen Schutz aufweisen. Eine der möglichen Schutzmaßnahmen und der u. U. erforderliche Nachweis ihrer Qualifizierung mit Hilfe eines Dornversuches wurde beschrieben: Das spezifische Arbeitsaufnahmevermögen geschützter Tankwände (Tankteile) muß dem nicht-wanddickenreduzierter Tankwände entsprechen.

Experimentell gewonnene Erkenntnisse wurden analytisch ermittelten gegenübergestellt. Hierbei ergab sich, daß die Untersuchungsergebnisse zumindest im Bereich zu betrachtender realer Wanddicken einfacher Theorie mit genügender Übereinstimmung folgen.

Ausgehend von der Widerstandsfähigkeit eines Körpers gegen aufgeprägte Verformungen – auch als aufnehmbare bzw. (zunächst) elastische Verformungsarbeit zu bezeichnen –, die durch die Gesetzmäßigkeit in (5) beschrieben wird, wurde dargelegt, daß dieser Zusammenhang auch auf elasto-plastische Verformungen übertragbar ist. Die genannte Gesetzmäßigkeit führt dann zu dem Ausdruck

$$\Delta W \sim V \cdot R_m \cdot A \quad (16)$$

mit dem sich das spezifische Arbeitsaufnahmevermögen – die bei maximaler Verformung dissipierte Energie /7/ – auf Basis von Werkstoffkennwerten leicht darstellen läßt. Da bei Tanks aus verschiedenen Werkstoffen bis auf die Wanddicke e die sonstigen Abmessungen gleich sind, läßt sich der Ausdruck (16) weiter reduzieren zu

$$\Delta W \sim e \cdot R_m \cdot A \quad (17)$$

Auf diese Weise wird es möglich, die Versagensgrenzen realer Tanks ins Verhältnis zu setzen und u. U. Sicherheitsniveaus zu definieren, die ihrerseits Mindestanforderungen darstellen können.

Ähnlich läßt sich aus der Beziehung (2) der Ausdruck

$$\Delta W \sim e \cdot (R_m \cdot A)^{1/3} \quad (18)$$

ableiten. Für weitere vergleichende Betrachtungen und eine Diskussion der verschiedenen Ansätze ist es sinnvoll, die Proportionalitäten von (17) und (18) als bezogene Vergleichsgrößen einzuführen.

Das auf ein Oberflächenelement bezogene spezifische Arbeitsaufnahmevermögen ist ausgehend von (18) darstellbar als

$$W^* = e \cdot (R_m \cdot A)^{1/3} \quad (19)$$

wobei Grundlage hierfür die „3. Wurzel-Formel“ (2) ist.

Entsprechend kann das auf ein Oberflächenelement bezogene spezifische Arbeitsaufnahmevermögen ausgehend von (17) zu

$$W^{**} = e \cdot R_m \cdot A \quad (20)$$

definiert werden. Grundlage ist in diesem Fall die Beziehung (5).

Es läßt sich hierzu feststellen, daß sich die Gleichwertigkeitsbeziehung „3. Wurzel-Formel“ (2) lediglich auf betriebliche Eignungsvergleiche ansonsten gleichartiger

Tanks aus verschiedenen Werkstoffen beziehen kann, also nur äußerst eingeschränkte Hinweise auf die Versagensgrenzen von Tanks etwa bei Unfallbeanspruchungen liefert.

Bei gleichen Randbedingungen lassen sich auch hinsichtlich der Stanzkraft bezogene Größen ableiten. Unter der Voraussetzung stets gleicher Abmessungen des Eindringkörpers lassen sich aus der Beziehung (14) die bezogene Stanzkraft

$$F^* = e \cdot R_m^{0,7} \quad (21)$$

und aus der Beziehung (11) die bezogene Stanzkraft

$$F^{**} = e \cdot R_m \quad (22)$$

als Vergleichsgrößen zur Beurteilung der Fähigkeiten verschiedener Tankwände ableiten.

Hiernach wäre es von Vorteil, hoch- und höchstfeste Werkstoffe zu verwenden. Da jedoch höhere Festigkeitskennwerte in der Regel mit schlechteren bruchmechanischen Eigenschaften einhergehen und zu geringeren Wanddicken führen, erscheint es nach wie vor günstiger, als Kriterium für besseres Versagensverhalten vom Arbeitsaufnahmevermögen auszugehen:

Bei bestimmten Werkstoffen wie z. B. austenitischem Stahl ist eine genügend hohe Dehngrenze bzw. Zugfestigkeit gekoppelt mit ebenfalls hoher Bruchdehnung und günstigen sonstigen bruchmechanischen Eigenschaften.

Schematisch ist dieser Zusammenhang Bild 7 zu entnehmen, aus dem ersichtlich ist, daß Stanzkraft wohl das letztendliche Versagenskriterium ist, jedoch Tanks aus verformungsfähigeren Werkstoffen bis zum Erreichen des Versagenskriteriums höhere Energieeinträge bis zum Versagen des Tanks zu dissipieren in der Lage sind.

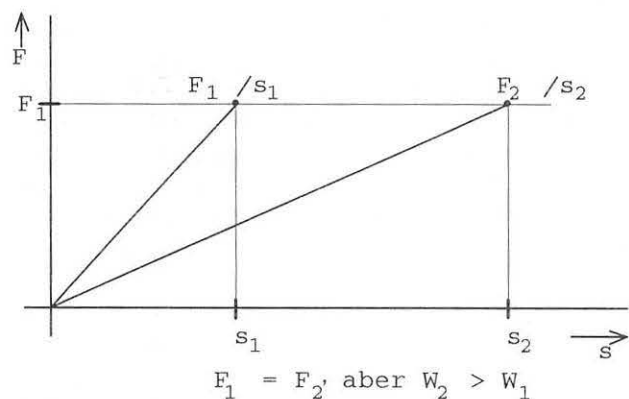


Bild 7:

Schematischer Vergleich zwischen Werkstoffen gleicher Stanzkraft F ($\hat{=}$ Festigkeit), jedoch unterschiedlicher Verformungseigenschaften ($\hat{=}$ Arbeitsaufnahmevermögen W)

In jedem Fall können auf diese Weise die Ergebnisse analytischer Betrachtung und experimenteller Simulation für vergleichende Betrachtungen verschiedener Tankarten

herangezogen werden, soweit Beanspruchungen lokaler Art betroffen sind.

Für Beanspruchungen globaler Art ergibt sich die ent-

sprechende Vergleichsmöglichkeit unmittelbar aus den Ergebnissen von Untersuchungen zur Ermittlung globalen Arbeitsaufnahmevermögens an verschiedenen Tankstrukturen.

4 Elemente zur Darstellung von Sicherheitsniveaus von Transporttanks für Gefahrgut

4.1 Definition der Elemente und ihrer Kenngrößen

Den Tankanhängen z. B. zur Rechtsvorschrift über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße können Sicherheitsanforderungen entnommen werden, die sich einerseits auf betriebliche Beanspruchungen beziehen, aber teilweise auch Beanspruchungen erfassen, die über das betriebliche Beanspruchungsniveau hinausgehen. Auf diese Weise wird ein bestimmtes Sicherheitsniveau in bezug auf die Widerstandsfähigkeit von Gefahrguttanks gegen Einwirkungen von außen im Sinne von Beanspruchungen allgemeiner, also auch unfallbedingter Art festgelegt. In Abhängigkeit vom Gefährdungspotential der zu befördernden gefährlichen Güter werden von diesem Niveau entweder Abschläge (i. a. durch Wanddickenreduzierungen) zugelassen oder Zuschläge (i. a. durch Wanddickenerhöhungen) gefordert /10/. Die bisherigen Sicherheitsanforderungen enthalten Hauptanforderungen bezüglich

- Berechnungsdruck
- Wanddicke
- Werkstoff
- Verstärkungen.

Durch die Festlegung geeigneter Werte für diese Elemente und Wertekombinationen lassen sich beliebig hohe Sicherheitsniveaus für Gefahrguttanks darstellen, wie dem Abschnitt 1.1 entnommen werden kann. Tanks zur Beförderung gefährlicher Güter sollen ihren Inhalt genügend sicher einschließen, das heißt, Gefahrgutfreisetzungen – ob betriebs- oder unfallbedingt – sollen weitgehend vermieden werden. Mit anderen Worten: Ein bestimmtes Freisetzungsrisiko soll abgedeckt werden. Risiko läßt sich definieren als Verknüpfung von Häufigkeit H des Auftretens eines Schadensereignisses (Eintrittswahrscheinlichkeit) und der Konsequenz K (Schadensausmaß), die aus dem Schadensereignis erwächst:

$$R = H * K \quad (23)$$

In bezug auf die Freisetzung von Gefahrgut aus Transporttanks (unter Vernachlässigung anderer Einflüsse auf das Beförderungsrisiko) lassen sich die o. a. Einflußgrößen der Tanksicherheit der Häufigkeit H zuordnen. Die Konsequenz K wird dagegen durch das mögliche Schadensausmaß bestimmt, das neben stofflicher Eigenschaften letztlich von der Menge des im Tank oder in einer Tankkammer befindlichen Gefahrgutes bzw. dessen Volumen abhängt.

Tabelle 5:
Einflußfaktoren auf das tankbezogene Risiko der Gefahrgutfreisetzung

$R = H * K$
H im wesentlichen bestimmt durch:
– Wanddicke
– Werkstoff
– Verstärkungen
– Berechnungsdruck (Gestaltung, Form)
K im wesentlichen bestimmt durch:
– Tankkammervolumen

Die in Tabelle 5 aufgeführten Einflußgrößen auf die Tanksicherheit geben einen Anhaltspunkt, auf welche Weise ein bestimmtes (jedoch nicht quantifiziertes und somit für den Vergleich verschiedener Tanks heranziehbares) Sicherheitsniveau erreicht werden kann. Damit ist also keine genügende Festlegung der Leistungsfähigkeit eines auf bestimmte Weise beschriebenen Tanks gegen Einwirkungen von außen verbunden. Erst die vergleichende und wenn möglich experimentell gestützte Vorgehensweise erlaubt es, die Sicherheitsniveaus verschiedener Tankkonstruktionen miteinander quantifiziert in Beziehung zu setzen. Hier bietet es sich an, auf die in Abschnitt 3 beschriebenen Möglichkeiten zurückzugreifen.

Die sich aus Wanddicke und Werkstoff ergebenden Einflüsse auf das Sicherheitsniveau eines Tanks lassen sich durch das in Abschnitt 3.1 und 3.2 definierte spezifische Arbeitsaufnahmevermögen darstellen und quantifizieren. Die mögliche Einflußgröße Stanzkraft wird aus Gründen, die in den Abschnitten 3.3 und 4.2 beschrieben sind, nicht als eigenständige Größe gewertet, ihre Betrachtung ist demzufolge entbehrlich. Der Einfluß von Verstärkungen ist im wesentlichen als globales Arbeitsaufnahmevermögen erfaßbar.

Die Einflußgröße Berechnungsdruck führt (über den unmittelbaren Einfluß auf die erforderliche Wanddicke eines Tanks, die in bezug auf Einwirkungen von außen genügend durch das spezifische Arbeitsaufnahmevermögen beschrieben wird) in aller Regel zu einer bestimmten Formgebung und ausrüstungsmäßigen Gestaltung des Tanks, die sicherheitstechnisch als günstig zu bezeichnen sind.

Auf diese Weise läßt sich das Sicherheitsniveau bzw. das Beförderungsrisiko, welches ein bestimmter Tank abzudecken in der Lage ist, wie folgt beschreiben:

Tabelle 6:

Elemente zur Beschreibung des Sicherheitsniveaus von Gefahrgut tanks

$R = H * K$ H im wesentlichen bestimmt durch: <ul style="list-style-type: none"> – spezifisches Arbeitsaufnahmevermögen der Tankwand – globales Arbeitsaufnahmevermögen der Tankstruktur – drucktechnische Auslegung des Tanks K im wesentlichen bestimmt durch: <ul style="list-style-type: none"> – Tankkammervolumen.

Diese Elemente sind untereinander nicht als gleichwertig anzusehen, so daß aus ihnen Kenngrößen entwickelt werden müssen, die die Beziehung der Elemente untereinander erfassbar machen.

Dem Inhalt von Tabelle 6 folgend, sollen folgende Kenngrößen definiert werden:

- f_1 : Kenngröße des Elementes „spezifisches Arbeitsaufnahmevermögen“
- f_2 : Kenngröße des Elementes „globales Arbeitsaufnahmevermögen“
- f_3 : Kenngröße des Elementes „drucktechnische Ausstattung“
- f_4 : Kenngröße des Elementes „Tankkammervolumen“

Auf diese Weise läßt sich die Beziehung (23) wie folgt umformulieren

$$R = H * K \sim f_1 + f_2 + f_3 \cdot f_4 = f_4 \cdot \sum_{i=1}^3 f_i \quad (24)$$

Tabelle 8:

Normierung des bezogenen spezifischen Arbeitsaufnahmevermögens zur Definition der Kenngröße f_1

Werkstoff	e [mm]	W' $e(R_m \cdot A)^{1/3}$	N.a.S.	W'' $e \cdot R_m \cdot A$	$f_1 =$ N.a.S.	F' $e \cdot R_m^{0,7}$	N.a.S.	F'' $e \cdot R_m$	N.a.S.
Al Mg 4,5 Mn (Al)	4,0	68	0,53	18700	0,31	204	0,55	1100	0,51
	5,2	88	0,68	24300	0,41	265	0,71	1430	0,66
	6,0	102	0,79	28100	0,47	306	0,82	1650	0,76
	6,5	111	0,86	30400	0,51	332	0,89	1788	0,83
	7,8	133	1,03	36500	0,61	398	1,07	2145	0,99
Baustahl (St)	3,0	65	0,50	30000	0,50	186	0,50	1080	0,50
	4,0	86	0,67	40000	0,67	248	0,67	1440	0,67
	4,6	99	0,77	46000	0,77	285	0,77	1656	0,77
	5,0	108	0,84	50000	0,83	310	0,83	1800	0,83
	6,0	129	1,00	60000	1,00	372	1,00	2160	1,00
Austenit 1.4571 (Au)	3,0	86	0,67	69600	1,16	246	0,66	1620	0,75
	3,5	100	0,78	81200	1,35	287	0,77	1890	0,88
	3,8	108	0,84	88200	1,47	312	0,84	2052	0,95
Feinkornstahl (StE 460)	4,5	128	0,99	104400	1,74	369	0,99	2430	1,13
	10,7	225	1,74	101900	1,70	899	2,42	5992	2,77

wenn als einfache Form der Verknüpfung von H und K die Multiplikation gewählt wird, wobei die ungewichtete Anwendung der Kenngrößen der Elemente als vorläufig anzusehen ist, da über die Bedeutung der Kenngrößen und ihr Verhältnis zueinander noch befunden werden muß.

4.2 Die einzelnen Elemente und ihre Kenngrößen

4.2.1 Spezifisches Arbeitsaufnahmevermögen

4.2.1.1 Grundsätzliches

Für einen Vergleich von Tanks aus verschiedenen Werkstoffen und unterschiedlicher Wanddicke können die in Abschnitt 3.4 hergeleiteten Vergleichsgrößen (19) und (20) herangezogen werden, soweit spezifisches Arbeitsaufnahmevermögen betrachtet wird. Der Vollständigkeit halber (und für den Beleg der Annahme, daß die Stanzkraft derzeit lediglich als sekundäres Element anzusehen ist) werden auch die Vergleichsgrößen (21) und (22) mitbetrachtet.

Tabelle 7:

Kennwerte der für den Tankbau relevanten Werkstoffe

Werkstoff	Rm [N/mm²]	A [%]
AlMg 4,5 Mn W 28 (Al)	275	17
Baustahl (St)	360 – 440	27
Austenit 1.4571 (Au)	540	43
Feinkornstahl StE 460 (FB)	560	17

Ermittelt man unter Verwendung der in Tabelle 7 aufgeführten Werkstoffkennwerte für verschiedene Werkstoffe und Wanddicken das jeweils bezogene spezifische Arbeitsaufnahmevermögen bzw. die bezogene Stanzkraft ergeben sich die in Tabelle 8 in den jeweiligen Spalten für

1. $W^* = e \cdot (R_m \cdot A)^{1/3}$ (19)
2. $W^{**} = e \cdot R_m \cdot A$ (20)
3. $F^* = e \cdot R_m^{0,7}$ (21)
4. $F^{**} = e \cdot R_m$ (22)

niedergelegten Vergleichswerte. Diese Vergleichswerte können zweckmäßigerweise auf den nach Verordnung definierten Vergleichstank aus Baustahl mit 6 mm Wanddicke bezogen werden.

Auf diese Weise wird eine Normierung auf den 6 mm-Baustahlstank (N.a.S.) erzielt. Das jeweilige auf den 6 mm-Baustahlstank normierte bezogene spezifische Arbeitsaufnahmevermögen könnte nun unmittelbar als Kenngröße f_1 verwendet werden.

Vegleicht man die auf gleiche Art normierten Ergebnisse von Durchstoßversuchen (s. Tabelle 9) mit den Kenngrößen in Tabelle 8, ist augenfällig, daß die auf Stahl normierten Werte für W^{**} diese Ergebnissen in guter Näherung folgen. Daher wird als Kenngröße für das spezifische Arbeitsaufnahmevermögen f_1 für weitere Betrachtungen von der Normierung für W^{**} ausgegangen.

Tabelle 9:
Normierung der Ergebnisse von Durchstoßversuchen zur Ermittlung des spezifischen Arbeitsaufnahmevermögens

Werkstoff	e [mm]	$W_{\text{spez.}}$ [kNm]	N.a.S. (aus Versuchen)	N.a.S. (aus Tab. 8)
Al Mg 4,5 Mn (Al)	4,0	4	0,18	0,31
	5,2	7	0,32	
	6,0			
	6,5			
	7,8	12	0,55	0,61
Baustahl (St)	3,0	10	0,45	0,50
	4,0			
	4,6			
	5,0	17	0,77	0,83
	6,0	22	1,00	1,00
Austenit 1.4571 (Au)	3,0	28	1,27	1,16
	3,5	32	1,45	1,35
	3,8			
	4,5			
Feinkornstahl (StE 460)	10,7			

4.2.1.2 Berücksichtigung zusätzlicher Schutzmaßnahmen

a) Vollisolierung

Als wesentliche zusätzliche Schutzmaßnahme ist die Vollisolierung zu betrachten. Ganz gleich, ob als Vakuumisolierung (Wanddicke des Innentanks plus Wanddicke

des Außenmantels gleich Vollwanddicke nach Abschnitt 1.1 d) und 1.1 f)2.) oder Feststoffisolierung (s. Abschnitt 1.1.f)3.) gestaltet, die Vollisolierung bietet nach Untersuchungen der BAM und bei einer wenn auch unsystematischen Betrachtung des Unfallgeschehens vollwertigen Schutz gegen lokale Einwirkungen von außen. Diese Aussage ist auf das Basismaterial des Tanks zu beziehen. Mit anderen Worten

- 5,2 mm Al + Isolierung $\hat{=}$ 7,8 mm Al
- 4,0 mm St + Isolierung $\hat{=}$ 6,0 mm St
- 3,0 mm Au + Isolierung $\hat{=}$ 4,5 mm Au

Ein vollisolierter, wanddickenreduzierter Tank entspricht also hinsichtlich punktueller Belastungen von außen einem nicht wanddickenreduzierten Tank (unter Zugrundelegung gleichen Basismaterials) vollständig.

b) Longitudinalschutz („Bauchbinde“)

Hierbei ist die Schutzmaßnahme nach Abschnitt 1.1 f) 4. angesprochen. Die „Bauchbinde“ schützt den Tank äquatorial auf 30 % der projizierten Höhe des Tanks rundum, wobei die durch sie gebildete Verstärkung zusammen mit der wanddickenreduzierten Basistankwand den Fähigkeiten des nicht wanddickenreduzierten Tankes entsprechen muß, d. h. das spezifische Arbeitsaufnahmevermögen im verstärkten Bereich des Tankes hat dem der nicht-wanddickenreduzierten Tanks zu entsprechen. Diese Aussage bezieht sich auf das jeweilige Basismaterial der Tankschale (Aluminium oder Stahl). Mit anderen Worten: Die Breite B der Bauchbinde entspricht 30 % der projizierten Höhe H des Tanks ($B = 0,3 \cdot H$).

Durch Anbringen bzw. Vorsehen der Bauchbinde wird bezogen auf die Seiten- und die Endbödenflächen der wanddickenreduzierte Tank um das 0,3fache der Verstärkung (Bauchbinde) insgesamt aufgerüstet. Da dies die Flächen sind, die gegenüber lokalen (punktuellen) Beanspruchungen überwiegend belastet werden, erscheint diese Betrachtungsweise zulässig. Die erläuterte Vorgehensweise und die letztlich erzielte (fiktive) Gesamtwanddicke $e_{\text{ges.}}$ sind Tabelle 10 zu entnehmen.

Tabelle 10:
Durch Longitudinalverstärkungen erzeugte fiktive Gesamtwanddicken

Werkstoff	e [mm]	Δe [mm]	$0,3 \cdot \Delta e$ [mm]	$e_{\text{ges.}}$ [mm]
Al	5,2	2,6	0,8	6,0
St	4,0	2,0	0,6	4,6
Au	3,0	1,5	0,45	3,45

Die hier als $e_{\text{ges.}}$ bezeichnete Wanddicke kann nunmehr als Wanddicke zur Bestimmung von f_1 , der Kenngröße des Elementes „spezifisches Arbeitsaufnahmevermögen“, herangezogen werden (s. Abschnitt 4.2.1.1 und dort Tabelle 8).

c) Verstärkung der Endböden (Doppelböden)

Auf ähnliche Weise wie vorstehend geschildert läßt sich auch der günstige Einfluß von zur Gänze, auf Vollwanddicke verstärkten Endböden abschätzen. Da bei Unfällen mit Gefahrgutfreisetzen, die auf punktuelle Belastungen der Tankschale zurückzuführen sind, nach hiesiger Erkenntnis wenigstens 50 % der Unfälle (insbesondere die schweren) durch Einwirkungen auf die Endböden entstehen, kann davon ausgegangen werden, daß eine Verstärkung der Endböden wanddickenreduzierter Tanks auf die nominelle Vollwanddicke so wirkt, als ob 50 % der projizierten, also in aller Regel überhaupt nur belasteten Fläche, betroffen wäre. Durch Vorsehen von nicht-wanddickenreduzierten Endböden oder Doppelböden wird ein an sich wanddickenreduzierter Tank demzufolge um das 0,5fache der Verstärkung (fiktiv) aufgerüstet. Diese Vorgehensweise und die damit erzielten (fiktiven) Gesamtwanddicken $e_{ges.}$ können bezogen auf den jeweiligen Basiswerkstoff Tabelle 11 entnommen werden.

Tabelle 11:

Durch verstärkte oder doppelt ausgeführte Endböden erzeugte fiktive Gesamtwanddicken

Werkstoff	e [mm]	Δe [mm]	$0,5 \cdot \Delta e$ [mm]	$e_{ges.}$ [mm]
Al	5,2	2,6	1,3	6,5
St	4,0	2,0	1,0	5,0
Au	3,0	1,5	0,75	3,75

Auch in diesem Fall kann die als $e_{ges.}$ bezeichnete Wanddicke nunmehr als Wanddicke zur Bestimmung von f_1 herangezogen werden.

4.2.2 Globales Arbeitsaufnahmevermögen

Globales Arbeitsaufnahmevermögen läßt sich auf analytischem Wege nicht in gleicher Weise wie spezifisches Arbeitsaufnahmevermögen beschreiben. Bei der Definition globalen Arbeitsaufnahmevermögens ist man also auf experimentelle Darstellungen angewiesen (s. Abschnitt 3.3). Betrachtet man einige wesentliche Tankarten und deren Fähigkeit, großflächig einwirkenden Beanspruchungen von außen widerstehen zu können, d. h. ermittelt man für diese Tankarten das globale Arbeitsauf-

Tabelle 12:

Normierung des globalen Arbeitsaufnahmevermögens zur Definition der Kenngröße f_2

Nr.	Tankart	W_{glob} [kNm]	N.a.F
1	ohne Kammereinteilung, nur Endböden	30	0,4
2	„Normaltank“ (Kammergröße 7500 l)	40	0,6
3	„Franzosen-tank“	70	1,0
4	Tank besonderer Bauart	100	1,4

nahmevermögen, gelangt man zu der in Tabelle 12 dargestellten Übersicht.

Tankart Nr. 1 ist im Grunde der nach Rechtsvorschrift vorgegebene Basistank, unabhängig davon, ob diese Tankart auf diese Weise konstruktiv gestaltet werden kann oder nicht.

Tankart Nr. 2 gibt den für Mineralölprodukttransporte üblichen und vorgeschriebenen (kofferförmigen) Tank, der in Kammern von nicht mehr als 7500 l Rauminhalt zu unterteilen ist, an; daher wurde dieser Tank als „Normaltank“ bezeichnet.

Tankart Nr. 3 entspricht dem Tank, der mit einer Schutzmaßnahme nach Abschnitt 1.1.f)1. (Transversalelemente) versehen wurde. Da diese Schutzart aufgrund eines französischen Vorschlages in die internationale Vorschriften eingeführt worden ist, wird er hier als (zylindrischer) „Franzosen-tank“ benannt. Außerdem wurde in die Betrachtung eine Tankart aufgenommen, die durch das Vorsehen einer gegenüber dem „Franzosen-tank“ erhöhten Anzahl von Transversalelementen besonderer Formgebung gekennzeichnet ist.

Es ist ersichtlich, daß die verschiedenen Tankarten gegenüber globalen Einwirkungen von außen unterschiedliche Widerstandsfähigkeit aufweisen, und zwar unabhängig von ihrer Basiswanddicke und vorhandenem Longitudinalschutz.

Um hier ebenfalls eine Kenngröße des Elementes „globales Arbeitsaufnahmevermögen“ definieren zu können, wurde hinsichtlich ermittelten globalen Arbeitsaufnahmevermögens W_{glob} auf den „Franzosen-tank“ normiert (N.a.F.), da dieser hinsichtlich transversaler Verstärkungen die in die Rechtsvorschriften eingeführte leistungsfähigste Variante darstellt. Die derart gewonnenen Werte werden des weiteren also als Kenngröße des Elements f_2 betrachtet.

4.2.3 Drucktechnische Ausstattung

Es kann als belegt vorausgesetzt werden, daß die Leistungsfähigkeit von Tanks nicht allein vom Nachweis genügend großen spezifischen und globalen Arbeitsaufnahmevermögens abhängt, auch ihre weitergehende Ausstattung hat Einfluß auf die Gesamtsicherheit. Hier spielt die drucktechnische Gestaltung eine große Rolle, da hiervon die Gestaltung und Fähigkeit aller Einzelteile des Tanks (beispielsweise von Ausrüstungsteilen, Flanschen, Deckeln und deren Befestigungen) betroffen ist. Die Auslegungsgröße „Druck“ hat überdies starken Einfluß auf die spannungsgünstige Gestaltung und damit die Form von Tanks.

a) Drucktechnische Gestaltung

Wie vorstehend erwähnt, werden die Details der Tankauslegung und -gestaltung davon beeinflusst, ob betriebs- und/oder prüfbedingt Druckführung eines Tanks vorauszusetzen ist oder nicht. Durch die sich mittlerweile langsam vollziehende Umstellung der Befüllung und Entlee-

rung ehemals „druckloser“ Tanks auf Untenbefüllung und -entleerung im geschlossenen System sind Ausstattungsdetails zunehmend in gewissem Maß als druckfester anzusehen. Insbesondere die Schwachstelle Dom/Domdeckel, die bei vielen Unfällen als auslösender Faktor für Gefahrgutfreisetzungen wirkt, sei hier angesprochen; Verbesserungen an dieser Stelle haben nachhaltige Wirkung. Dieser Aspekt ist bei der Bemessung der Kenngröße f_3 zu berücksichtigen.

b) Druckbedingte Tankform

Wenn Betriebs- und/oder Prüfdrücke den Druck, der durch die auf den Tankboden wirkende Flüssigkeitssäule, aber auch sonstige Schwallwirkung repräsentiert wird, übersteigen, ergibt sich, wenn nicht hoher konstruktiver Aufwand betrieben werden soll, physikalisch bedingt die Zylinderform als optimale Gestaltungsweise. Die zylindrische Gestaltung bietet in mehrfacher Hinsicht Vorteile:

- Gegenüber der Beanspruchung durch formaggressive Teile (punktförmige Belastung) erscheint der Zylinder günstiger gestaltet als der („drucklos“ verwendete) übliche Koffertank, da zumindest teilweise der Auftreffwinkel eines entsprechenden Teiles günstiger und der Weg bis zum Auftreffen auf die Tankwand in Abhängigkeit vom Tankradius größer ist.
- Bei großen Verformungen, die wegen der damit verbundenen Volumenverkleinerung zum Auftreten von Flüssigkeitsdruck führen können, ist die gleichmäßig spannungsgünstige Form eines Zylindertanks vorteilhaft. Auf die in diesem Zusammenhang zu vermutende zusätzlich auftretende Abhängigkeit von besseren Werkstoffeigenschaften – also günstigerer Werkstoffauswahl – soll derzeit wegen der schlechten Einschätzbarkeit des Sachverhaltes verzichtet werden.

c) Bemessung der Kenngröße f_3

Bei der Bemessung dieser Kenngröße besteht die Schwierigkeit, daß weder auf analytische noch experimentelle Anhaltswerte zurückgegriffen werden kann. Daher wird

$$f_3 = 1$$

gesetzt, wobei sich f_3 aus Teilkenngößen für die drucktechnische Gestaltung des Tanks und der baulichen Ausrüstung

$$F_{3druck} = 0,5$$

und für die Form des Tanks

$$F_{3form} = 0,5$$

additiv zusammensetzen sollte.

Mit anderen Worten: Bei Vorhandensein nur eines Elementes (drucktechnische Gestaltung oder zylindrische Form) ist

$$f_3 = 0,5$$

bei Vorhandensein beider Elemente bemißt sich f_3 zu

$$f_3 = 1,0$$

4.2.4 Tankkammervolumen

Hier bietet sich folgende Vorgehensweise an: Das Tankkammervolumen der größten Tankkammer – u. U. das Tankvolumen bei nicht unterteilten Tanks – wird zum Tankkammervolumen des in Abschnitt 4.2.2 bezeichneten Normaltanks in Höhe von $V_N = 7500$ l in Beziehung gesetzt. Es erfolgt also eine Normierung auf das „Normalvolumen“ (N.a. V_N). Wegen der volumetrischen Abhängigkeiten bei evtl. Gefahrgutfreisetzungen erscheint es statthaft, die Kenngröße des Elementes Tankkammervolumen entsprechend Tabelle 13 umzuformulieren:

Tabelle 13:
Normierung des Tankkammervolumens zur Definition der Kenngröße f_4

V [l]	V N. a. V_N	$f_4 =$ $\sqrt[3]{\text{N. a. } V_N}$
30000	0,25	0,6
15000	0,5	0,8
7500	1,0	1,0
3750	2,0	1,3

N. a. V_N = Normierung auf V_N mit $V_N = 7500$ l

4.3 Diskussion der Kenngrößen f_1 bis f_4

Die Ergebnisse aus Abschnitt 4.2 lassen sich zusammenfassend wie folgt darstellen:

$$\begin{aligned} f_1: & 0,4 \dots\dots\dots 1,7 \\ f_2: & 0,4 \dots\dots\dots 1,4 \\ f_3: & 0 \text{ oder } 0,5 \text{ oder } 1,0 \\ f_4: & 0,6 \dots\dots\dots 1,3 \end{aligned}$$

Dies macht die Beschreibung realer Tanks zur Beförderung überwiegend flüssiger gefährlicher Güter in Form von Kennwerten von Elementen möglich, die zur Beschreibung der Gesamtsicherheit derartiger Tanks herangezogen werden können bzw. erforderlich sind. Als Gesamtsicherheit wird hierbei das Vermögen eines Tanks angesehen, ein noch näher zu bestimmendes relatives Risiko gegen die unfallbedingte Freisetzung von Gefahrgut abdecken zu können. Hierzu ist es erforderlich, die Kenngrößen hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Gesamtsicherheit zu wichten, die Gesamtsicherheit der Tankarten (entsprechend dem o. a. relativen Risiko) zu ermitteln und ein Grenzkrisiko zu definieren, welches ein Gefahrguttank unter allen Umständen abdecken können sollte.

5. Wichtung der Elemente und ihrer Kenngrößen und daraus abgeleitete Sicherheitsniveaus von Transporttanks

5.1 Wichtung der Elemente und ihrer Kenngrößen

Es ist offensichtlich, daß die Elemente spezifisches Arbeitsaufnahmevermögen, globales Arbeitsaufnahmevermögen und drucktechnische Ausstattung von unterschiedlicher Bedeutung für die Gesamtsicherheit von Transporttanks sind. Eine einfache Gleichsetzung von

$$R_f = H \cdot K = (f_1 + f_2 + f_3) \cdot f_4 = f_4 \cdot \sum_{i=1}^3 f_i \quad (25)$$

in der die auf Basisverhältnisse bezogenen Kenngrößen f_1 bis f_4 ungewichtet angewendet werden, beschreibt Tanks, die seltener unfallauffällig sind, unzureichend.

Mit anderen Worten: Aus den Darlegungen zu den verschiedenen Abschnitten geht zumindest qualitativ hervor, daß günstige Werkstoffauswahl gepaart mit entsprechender Wanddickenabmessung oder integralem Schutz (Element spezifisches Arbeitsaufnahmevermögen) für die Gesamtsicherheit von Tanks von größerer Bedeutung ist, als das Vorsehen (zusätzlicher) struktureller transversaler Schutzmaßnahmen (Element globales Arbeitsaufnahmevermögen). Durch das Anbringen eines Übermaßes an transversalem Schutz in Form von Schwall-, Trennwänden und Verstärkungsringen könnte sich dessen Wirksamkeit bezogen auf die Gesamtsicherheit von Tanks sogar nachteilig auswirken, da durch derartigen Schutz die Verformbarkeit der Tankwand in der Umgebung derartiger Teile geometrisch behindert wird, und ansonsten evtl. gute Verformungseigenschaften (Bruchverhalten) des Tankwandwerkstoffes nicht ausgenutzt werden können.

Es wird also als gesichert angenommen, daß eine Steigerung bzw. Anhebung des spezifischen Arbeitsaufnahmevermögens in jedem Fall sicherheitstechnisch erwünscht ist und eine nachhaltigere Auswirkung auf die Gesamttanksicherheit von Tanks hat als eine Steigerung bzw. Anhebung des globalen Arbeitsaufnahmevermögens, was über ein bestimmtes Maß hinausgehend negative Rückwirkungen auf die Gesamtsicherheit hat.

Hieraus folgt, daß für die Kenngröße f_1 lediglich ein unterer Grenzwert, für die Kenngröße f_2 dagegen sowohl ein unterer als auch ein oberer Grenzwert festgelegt werden könnte. Da sich anforderungsbedingt eine andere, ungünstigere Werkstoff-/Wanddickenauswahl als in den verschiedenen Abschnitten dargestellt, nicht ergeben dürfte und andererseits betriebsbedingt immer ein Minimum strukturellen Schutzes vorzusehen ist, kann auf die weitergehende Diskussion von Untergrenzen zu f_1 und f_2 verzichtet werden, nicht jedoch auf die Festlegung einer Obergrenze für f_2 , die bis zum Vorliegen weiterer Er-

kennnisse dem in Tabelle 14 angegebenen Größtwert $f_2 = 1,4$ entsprechen sollte.

Entsprechend den Ausführungen zur qualitativen Abstufung der Kenngrößen f_1 und f_2 bleibt zur Kenngröße f_3 , die drucktechnische Ausstattung von Tanks erfassend, festzustellen, daß f_3 wiederum geringergewichtig als f_2 anzunehmen ist, da der Einfluß der drucktechnischen Ausstattung nur punktuell wirkend festzustellen ist und evtl. ableitbare Formgebung geringen Einfluß auf die Gesamtsicherheit der Transporttanks haben dürfte. Diesen Ausführungen folgend ergibt sich also, daß die Gewichte c_i der Kenngrößen f_i sich wie folgt verhalten sollten:

$$c_1 > c_2 > c_3 \quad (26)$$

Die Kenngröße f_4 als Faktor bedarf keiner Wichtung, da durch sie keine gewichtsmäßige Verschiebung des Sicherheitsniveaus erfolgen kann.

Wenn man nun als gewichtete Kenngrößen $g_i = c_i \cdot f_i$ einführt, läßt sich aus der Beziehung (25) folgender Ausdruck gewinnen:

$$\begin{aligned} R_g &= H \cdot K = (c_1 \cdot f_1 + c_2 \cdot f_2 + c_3 \cdot f_3 + c_4 \cdot f_4) \\ &= (g_1 + g_2 + g_3 + g_4) = g_4 \sum_{i=1}^3 g_i \quad (27) \end{aligned}$$

wobei $g_4 = f_4$ (da $c_4 = 1$) ist.

Zur Abstufung der Kenngrößen und der Darstellung der grundsätzlichen Anwendbarkeit des vorgestellten Modells wird eingedenk vorangegangener Erläuterungen unter Berücksichtigung von (26) für die Gewichte der Kenngrößen folgendes festgelegt:

$$\begin{aligned} c_1 &= 4, \\ c_2 &= 2, \\ c_3 &= 1, \end{aligned}$$

so daß sich die Gleichung (27) zu

$$R_g = 4 f_1 + 2 f_2 + f_3 + f_4 = g_4 \cdot \sum_{i=1}^3 g_i \quad (28)$$

ergibt.

Unter Berücksichtigung der Werte von f_1 aus Tabelle 8, f_2 aus Tabelle 12, f_3 aus Abschnitt 4.2.3 c) und f_4 aus

Tabelle 13 ergibt sich dann für jede Tankart eine Kennzahl für das durch sie repräsentierte Sicherheitsniveau, wobei eine normierte Risikozahl (Division der „Kennzahl“ durch „Anzahl“ der Gewichte, im Beispiel also 7) den Vergleich des Sicherheitsniveaus verschiedener Tankbauarten gestattet:

$$R_N = \frac{R_g}{\sum_{i=1}^3 c_i} \quad (29)$$

5.2 Sicherheitsniveaus von Transporttanks

Auf die vorstehend beschriebene Weise wurden 19 reale oder nach Vorschriftenlage mögliche Tankarten hinsichtlich ihres Sicherheitsniveaus beschrieben bzw. bewertet. Die Ergebnisse dieser Beschreibung können Tabelle 14 entnommen werden.

Zur Ermittlung der Kenngröße f_1 des Elementes „spezifisches Arbeitsaufnahmevermögen“ (gleichzeitig der Beschreibung der Tankart dienend) wurden die im Abschnitt 4.2.1 aufgeführten Tankcharakteristika berücksichtigt:

Eigenschaft	Kurzzeichen in Tabelle 14
Wanddicke	...mm
Werkstoff	Al, St, Au
Longitudinalschutz („Bauchbinde“)	Bb
Doppelboden	Db
Vollisolierung (= Vollwanddicke)	-

Zur Ermittlung der Kenngröße f_2 des Elementes „globales Arbeitsaufnahmevermögen“ wurden die im Abschnitt 4.2.2 aufgeführten Tankcharakteristika berücksichtigt:

Eigenschaft	Kurzzeichen in Tabelle 14
Ohne Kammereinteilung	0
Normaltank	N
Franzosen-tank	F
Tanks bes. Bauart	T

Zur Ermittlung der Kenngröße f_3 des Elementes „drucktechnische Ausstattung“ wurden die in Abschnitt 4.2.3 aufgeführten Tankcharakteristika berücksichtigt:

Eigenschaft	Kurzzeichen in Tabelle 14
Drucktechnische Gestaltung	DG
Tankform (Koffer, Zylinder)	K, Z

Zur Ermittlung der Kenngröße f_4 des Elementes „Tankkammervolumen“ wurden die in Abschnitt 4.2.4 aufgeführten Tankcharakteristika berücksichtigt:

Eigenschaften (Tankkammervolumen) Kurzzeichen in Tabelle 14

30.000 l	30
15.000 l	15
7.500 l	7,5

Die unter Berücksichtigung der vorstehend aufgeführten Tankcharakteristika gebildeten Kenngrößen f_1 bis f_4 , die unter Einbeziehung der in Abschnitt 5.1 entwickelten Gewichte c_1 bis c_4 gebildeten gewichteten Kenngrößen g_1 bis g_4 , die Risikozahlen (Sicherheitsniveaus) R_f und R_g sowie das normierte Sicherheitsniveau R_N für jede der betrachteten Tankarten kann Tabelle 14 entnommen werden.

Durch Festlegung eines Grenzwertes bzw. Grenzkennwertes G läßt sich ein Sicherheitsniveau definieren, das ein Tank mindestens aufweisen sollte, um per Definition genügende Sicherheit bei der Beförderung von Gefahrgut in Tanks zu bieten:

$$R_N \geq G \quad (30)$$

Mit der Vorgabe mehr oder weniger großer Werte für den Grenzkennwert lassen sich demzufolge zusätzlich stoffliche Gefährdungspotentiale unterschiedlicher Höhe abdecken.

5.3 Diskussion der Ergebnisse

Aus Tabelle 14 ergibt sich, daß optimale Tankarten hohe Werte für die Kennzahlen R_f und R_g für das durch sie repräsentierte Sicherheitsniveau bzw. für die normierte Risikozahl R_N aufweisen sollten.

Ein hoher Wert z. B. $R_N = 1$ ist aber bei den der Betrachtung zugrundegelegten Gesichtspunkten nur zu erzielen, wenn sowohl spezifisches und globales Arbeitsaufnahmevermögen sowie drucktechnische Ausstattung jeweils hohe Werte in bezug auf ihre Kenngrößen f_1 bis f_3 haben, wohingegen sich bezüglich des Tankkammervolumens eine geringe Größe, damit ein hoher Wert für die Kenngröße f_4 , positiv auswirkt.

Daraus folgt, daß eine optimale Tankart also nicht einseitig auf bestimmte Eigenschaften hin ausgelegt werden kann. Alle Einflußgrößen auf die Tanksicherheit (s. Tabelle 5) müssen entsprechend berücksichtigt werden.

Wenn dagegen ein von $R_N = 1$ deutlich nach unten abweichendes Sicherheitsniveau zugelassen wird - beispielsweise für Tanks zur Beförderung von gefährlichen Gütern geringeren Gefährdungspotentials - besteht die Möglichkeit, Defizite bei einem Element der Tanksicherheit durch Zuschläge bei einem anderen auszugleichen. Von dieser Möglichkeit wurde im Rahmen eines Gutachtens der BAM bereits Gebrauch gemacht: Der

Tabelle 14:
Risiko­zahlen und normierte Sicherheitsniveaus für verschiedene Tankarten

Nr.	Tankart	f_1	f_2	f_3	f_4	R_f	g_1	g_2	g_3	g_4	R_g	R_N
1	5,2 mm Al Bb, N, K, 7,5	0,5	0,6	0,0	1,0	1,1	2,0	1,2	0,0	1,0	3,2	0,46
2	5,2 mm Al F, Z, 7,5	0,4	1,0	0,5	1,0	1,9	1,6	2,0	0,5	1,0	4,1	0,59
3	5,2 mm Al Bb, N, K, DG, 7,5	0,5	0,6	0,5	1,0	1,6	2,0	1,2	0,5	1,0	3,7	0,53
4	5,2 mm Al Db, T, K, 7,5	0,5	1,4	0,0	1,0	1,9	2,0	2,8	0,0	1,0	4,8	0,69
5	5,2 mm Al Db, T, K, DG, 7,5	0,5	1,4	0,5	1,0	2,4	2,0	2,8	0,5	1,0	5,3	0,76
6	5,2 mm Al Db, T, Z, DG, 7,5	0,5	1,4	1,0	1,0	2,9	2,0	2,8	1,0	1,0	5,8	0,83
7	7,8 mm Al F, Z, DG, 7,5	0,6	1,0	1,0	1,0	2,6	2,4	2,0	1,0	1,0	5,4	0,77
8	4 mm St Bb, N, K, 7,5	0,8	0,6	0,0	1,0	1,4	3,2	1,2	0,0	1,0	4,4	0,63
9	4 mm St F, Z, 7,5	0,7	1,0	0,5	1,0	2,2	2,8	2,0	0,5	1,0	5,3	0,76
10	4 mm St Bb, N, K, DG, 7,5	0,8	0,6	0,5	1,0	1,9	3,2	1,2	0,5	1,0	4,9	0,70
11	4 mm St Db, F, Z, DG, 7,5	0,8	1,0	1,0	1,0	2,8	3,2	2,0	1,0	1,0	6,2	0,89
12	6 mm St O, Z, DG, 30	1,0	0,4	1,0	0,6	1,4	4,0	0,8	1,0	0,6	3,5	0,50
13	6 mm St O, Z, DG, 15	1,0	0,4	1,0	0,8	1,9	4,0	0,8	1,0	0,8	4,6	0,66
14	6 mm St N, Z, DG, 7,5	1,0	0,6	1,0	1,0	2,6	4,0	1,2	1,0	1,0	6,2	0,89
15	3 mm Au O, Z, DG, 15	1,2	0,4	1,0	0,8	2,1	4,8	0,8	1,0	0,8	5,3	0,76
16	3 mm Au N, Z, DG, 7,5	1,2	0,6	1,0	1,0	2,8	4,8	1,2	1,0	1,0	7,0	1,00
17	4,5 mm Au O, Z, DG, 30	1,7	0,4	1,0	0,6	1,9	6,8	0,8	1,0	0,6	5,2	0,74
18	4,5 mm Au O, Z, DG, 15	1,7	0,4	1,0	0,8	2,5	6,8	0,8	1,0	0,8	6,9	0,99
19	4,5 mm Au N, Z, DG, 7,5	1,7	0,6	1,0	1,0	3,3	6,8	1,2	1,0	1,0	9,0	1,29

Fortfall der nach Rechtsvorschrift erforderlichen Longitudinalschützes („Bauchbinde“) bei wanddickenreduzierten Koffertanks - entsprechend einer Schwächung des spezifischen Arbeitsaufnahmevermögens - konnte durch deutliche Zuschläge beim Transversalschutz - entsprechend einer Zunahme des globalen Arbeitsaufnahmevermögens - in Verbindung mit dem vorsehen von Doppelendböden ausgeglichen werden /11/. Bei dieser Beurteilung wurde davon ausgegangen, daß eine Verdopplung des globalen Arbeitsaufnahmevermögens als Richtwert festgelegt werden sollte; entsprechend wurde das Ver-

hältnis der Gewichte c_1 und c_2 im Rahmen der vorliegenden Betrachtung gewählt.

Die beschriebene Betrachtungsweise bietet ferner die Möglichkeit, für Tanks zur Beförderung von gefährlichen Gütern höheren Gefährdungspotentials oder zur Anhebung des Sicherheitsniveaus von Gefahrgut­tanks generell, höhere normierte Sicherheitsniveaus R_N festzulegen ($R_N > 1$), was unmittelbar zur Definition höherwertiger Tanktechnik führt, ohne zu große Einengungen der konstruktiven Gestaltung von Gefahrgut­tanks mit sich zu bringen.

5.4 Anwendungsbeispiel: Tanks nach § 7a Abs. 2 Nr. 2 GGVS

In Abschnitt 5.3 war dargelegt worden, daß bei Tanks zur Beförderung gefährlicher Güter geringeren Gefährdungspotentials gegebenenfalls ein von $R_N = 1$ nach un-

ten abweichendes Sicherheitsniveau festgelegt bzw. zugelassen werden könnte. In diesem Fall besteht – wie erwähnt – die Möglichkeit, Defizite in bestimmtem Rahmen bei einem Element der Tanksicherheit durch Zuschläge bei einem anderen auszugleichen. Hiervon kann beispielsweise auch im Falle der (sinngemäßen) Anwen-

Tabelle 15:
Bewertung von Tankarten bei Vorgabe eines Grenzkennwertes

Nr.	Tankart	f_1	f_2	f_3	f_4	R_f	g_1	g_2	g_3	g_4	R_g	R_N
I. Basistanks entsprechend § 7a Abs. 2 Nr. 2 GGVS:												
12	6 mm St O, Z, DG, 30	1,0	0,4	1,0	0,6	1,4	4,0	0,8	1,0	0,6	3,5	0,50
13	6 mm St O, Z, DG, 15	1,0	0,4	1,0	0,8	1,9	4,0	0,8	1,0	0,8	4,6	0,66
14	6 mm St N, Z, DG, 7,5	1,0	0,6	1,0	1,0	2,6	4,0	1,2	1,0	1,0	6,2	0,89
II. Beispiele für nicht von § 7a zu befreiende Tanks ($R_N < G = 0,75$):												
1	5,2 mm Al Bb, N, K, 7,5	0,5	0,6	0,0	1,0	1,1	2,0	1,2	0,0	1,0	3,2	0,46
2	5,2 mm A F, Z, 7,5	0,4	1,0	0,5	1,0	1,9	1,6	2,0	0,5	1,0	4,1	0,59
3	5,2 mm Al Bb, N, K, DG, 7,5	0,5	0,6	0,5	1,0	1,6	2,0	1,2	0,5	1,0	3,7	0,53
4	5,2 mm Al Db, T, K, 7,5	0,5	1,4	0,0	1,0	1,9	2,0	2,8	0,0	1,0	4,8	0,69
8	4 mm St Bb, N, K, 7,5	0,8	0,6	0,0	1,0	1,4	3,2	1,2	0,0	1,0	4,4	0,63
10	4 mm St Bb, N, K, DG, 7,5	0,8	0,6	0,5	1,0	1,9	3,2	1,2	0,5	1,0	4,9	0,70
III. Beispiele für von § 7a zu befreiende Tanks ($R_N \geq G = 0,75$):												
5	5,2 mm Al Db, T, K, DG, 7,5	0,5	1,4	0,5	1,0	2,4	2,0	2,8	0,5	1,0	5,3	0,76
6	5,2 mm Al Db, T, Z, DG, 7,5	0,5	1,4	1,0	1,0	2,9	2,0	2,8	1,0	1,0	5,8	0,83
7	7,8 mm Al F, Z, DG, 7,5	0,6	1,0	1,0	1,0	2,6	2,4	2,0	1,0	1,0	5,4	0,77
9	4 mm St F, Z, 7,5	0,7	1,0	0,5	1,0	2,2	2,8	2,0	0,5	1,0	5,3	0,76
11	4 mm St Db, F, Z, DG, 7,5	0,8	1,0	1,0	1,0	2,8	3,2	2,0	1,0	1,0	6,2	0,89
15	3 mm Au O, Z, DG, 15	1,2	0,4	1,0	0,8	2,1	4,8	0,8	1,0	0,8	5,3	0,76
16	3 mm Au N, Z, DG, 7,5	1,2	0,6	1,0	1,0	2,8	4,8	1,2	1,0	1,0	7,0	1,00
17	4,5 mm Au O, Z, DG, 30	1,7	0,4	1,0	0,6	1,9	6,8	0,8	1,0	0,6	5,2	0,74
18	4,5 mm Au O, Z, DG, 15	1,7	0,4	1,0	0,8	2,5	6,8	0,8	1,0	0,8	6,9	0,99
19	4,5 mm Au N, Z, DG, 7,5	1,7	0,6	1,0	1,0	3,3	6,8	1,2	1,0	1,0	9,0	1,29

dung der in § 7a GGVS enthaltenen Bestimmungen Gebrauch gemacht werden.

Nach § 7a Abs. 1 sind die Vorschriften des § 7 Abs. 2 bis 7 - es handelt sich hierbei um die sogenannte Fahrwegbestimmung und ihre nähere Ausgestaltung - auf die Beförderung bestimmter entzündbarer flüssiger Stoffe der Klasse 3 ebenfalls anzuwenden, es sei denn, die Beförderung dieser Stoffe erfolgt beispielsweise in nicht wanddickenreduzierten zylindrischen Tanks, die nach einem Berechnungsdruck von 4 bar Überdruck bemessen sind (§ 7a Abs. 2 Nr. 2).

Dies stellt eine sicherheitstechnische Anforderung dar, die mit einer starken Einengung konstruktiver Gestaltungsmöglichkeiten einhergeht, ohne daß dies sicherheitstechnisch - sofern man den Ausführungen in den vorhergehenden Abschnitten folgt - zwingend erforderlich wäre.

Zur Verdeutlichung sei auf Tabelle 14 hingewiesen. Beispiel Nr. 12 in Tabelle 14 gibt genau den „schwächsten“ der in § 7a Abs. 2 Nr. 2 beschriebenen (nicht unter die Regelungen der Fahrwegbestimmung fallenden) Basistanks wieder. Für diesen Basistank wurde dem Zuge der Darstellung folgend ein Sicherheitsniveau von $R_N = 0,50$ ermittelt.

Wenn dieses Beispiel eines Tanks den Bestimmungen des § 7 Abs. 2 bis 7 (also der Fahrwegbestimmung) nicht unterliegt, müßte entsprechendes für alle anderen Tankbeispiele ebenfalls gelten, für die ein normiertes Sicherheitsniveau von $R_N = 0,5$ oder mehr ermittelt wurde.

6 Abschließende Bemerkungen

Ausgehend von den Anforderungen nach Rechtsverordnung kann aufgezeigt werden, welchen Beanspruchungen bzw. Beanspruchungsarten Gefahrguttanks ausgesetzt sind oder sein können. Da Gefahrguttanks sich in eine Vielzahl unterschiedlicher Tankarten gliedern, ergibt sich zwangsläufig, daß Unterschiede im Hinblick auf die Widerstandsfähigkeit insbesondere gegen unfallbedingte Einwirkungen von außen bestehen. Um die erwähnten Tankarten bezüglich ihrer Widerstandsfähigkeit, d. h. ihres Sicherheitsniveaus, quantifiziert bewerten zu können, ist es erforderlich, Tanks hinsichtlich ihrer relevanten Eigenschaften analytisch und/oder experimentell zu erfassen. Dies kann mit Hilfe von Simulationen unfallbedingter Einwirkungen von außen geschehen, deren Ergebnisse zur Schaffung von Vergleichsgrößen für Tankarten herangezogen werden können. Aus den Anforderungen nach Rechtsvorschrift lassen sich die tanktechnischen Hauptanforderungen zur Beschreibung von Tankarten ableiten. Mit Hilfe der durch Simulationen geschaffenen Vergleichsgrößen lassen sich diese Hauptanforderungen in Elemente zur Beschreibung der Sicherheitsniveaus bzw. Kenngrößen hierzu umwandeln.

Um bestimmte Unsicherheiten der Betrachtung aufzufangen (z. B. zukünftiges Einbeziehen der Ergebnisse laufender Forschungsvorhaben zur stärkeren Quantifizierung des hier angewandten Verfahrens) wird vorgeschlagen, sicherheitstechnische Gleichwertigkeit gegenüber dem Basistank (Beispiel Nr. 12 in Tabelle 14) in jedem Falle dann anzunehmen, wenn das normierte Sicherheitsniveau von Vergleichstanks wenigstens 50 % über dem des schwächsten Basistanks liegt, also

$$R_N \geq G = 0,75$$

ist (mit G als Grenzrisikokennwert gemäß Abschnitt 5,2). Hierbei könnten geringfügige Abweichungen (z. B. $R_N = 0,74$ oder $= 0,73$) wegen der derzeit bestehenden quantitativen Ungenauigkeiten zulässig bleiben.

Tabelle 15 – eine Modifizierung der Tabelle 14 – enthält die zusammengefaßte Darstellung der vorstehenden Ausführungen. Abschließend sei angemerkt, daß es sich bei den mit Nr. 1 bis 19 bezeichneten Tankarten in den Tabellen 14 und 15 lediglich um eine Auswahl von realistischen Beispielen für mögliche Tankausführungen handelt. Jede weitere Tankausführung kann entsprechend der geschilderten Vorgehensweise erfaßt und je nach Größe des zugrundegelegten Grenzrisikokennwertes (hier: $G = 0,75$) sicherheitstechnisch positiv oder negativ bewertet werden. Auf diese Weise wird auf angehobenem Niveau ($R_N = 0,5$ wird aus den genannten Gründen auf $R_N = 0,75$ erhöht) sicherheitstechnische Gleichwertigkeit bei größtmöglicher konstruktiver Gestaltungsfreiheit verwirklicht.

Mit Hilfe der Kenngrößen der Elemente wird die Beschreibung realer Tanks für die Beförderung gefährlicher Güter in bezug auf deren jeweilige Gesamtsicherheit möglich. Als Gesamtsicherheit wird hierbei das Vermögen von Tanks bezeichnet, Einwirkungen von außen in bestimmter Höhe widerstehen zu können. Hierzu ist es erforderlich, die Kenngrößen der Elemente auf zunächst nur plausible Weise hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Gesamtsicherheit von Gefahrguttanks zu wichten. Kriterien für evtl. objektivere Wichtungen werden erst nach Vorliegen der Ergebnisse derzeit noch nicht abgeschlossener Vorhaben gefunden bzw. entwickelt werden können.

Auf der beschriebenen Grundlage wird es aber immerhin möglich, das Risiko, welches eine bestimmte Tankart gegenüber Einwirkungen von außen abzudecken in der Lage ist, abzuschätzen, also das Sicherheitsniveau einer Tankart quantifiziert darzustellen und für Vergleichszwecke zu nutzen. Des weiteren lassen sich anhand festzulegender oder zu vereinbarender Mindestsicherheitsniveaus tanktechnische Optimierungen in die

Wege leiten, also auch „höherwertige Tanktechnik“ installieren.

Um den vorstehenden Bericht besser in den internationalen Rechtsnormenbereich einführen zu können, ist eine englische Kurzübersetzung als Anhang 3 beigefügt.

Abschließend sei erwähnt, daß die vorgestellte Methode grundsätzlich ebenfalls dazu dienen kann, weitere Aspekte, die das Gesamtsystem „Gefahrgutbeförderung“ beeinflussen wie z. B. Fahrzeugtechnik, Betriebsweise usw., zu berücksichtigen. Auf frühere Darstellungen zu diesem Gesamtkomplex kann verwiesen werden /12/.

7. Literatur

- /1/ Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf Straßen (Gefahrgutverordnung Straße – GGVS) in der Fassung der Bekanntmachung vom 13. November 1990 (BGBl. I S. 2453) zuletzt geändert durch die 4. Straßen-Gefahrgutänderungsverordnung vom 13. April 1993 (BGBl. I S. 448)
- /2/ Technische Richtlinien festverbundene Tanks und Aufsetztanks TRTF 001 „Zusätzlicher Schutz für wanddickenreduzierte Tanks“ (VkB1. 1993, S. 645)
- /3/ S. Schwaigerer
Festigkeitsberechnung im Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau
4. Auflage, Springer-Verlag,
Berlin–Heidelberg–New York– Tokyo, 1983
- /4/ Timoshenko, S.
Theory of Elastic Stability.
Mc Graw Hill Book Company, New York, 1952
- /5/ Ludwig, J. und B. Schulz-Forberg
Der Beitrag der BAM im Rahmen des Vorhabens „Theseus“.
Vortragsmanuskript, Berlin, 1989,
unveröffentlicht
- /6/ Gerthsen, C. et al.
Physik.
Springer-Verlag,
Berlin–Heidelberg–New York, 1982
- /7/ Reckling, K.-A.
Beitrag der Elasto- und Plastomechanik zur Untersuchung von Schiffskollisionen.
Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, Bd. 70, Springer-Verlag, Berlin 1976, S. 443 – 464
- /8/ Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (1985 Edition).
3rd Edition, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1990
- /9/ Sakamoto, J. et al.
An Experimental Study on Puncture Resistance of Spent Fuel Shipping Casks by Drop Impact Tests. Proceedings of the 4th Int. Symposium PATRAM, USA, Sept. 1974
- /10/ Ludwig, J. und A. Ulrich
Das stofforientierte Risiko beim Transport gefährlicher Güter.
Technische Überwachung, Bd. 33 (1992), Nr. 2, S. 57-59
- /11/ Gutachten „Globales Arbeitsaufnahmevermögen von Transporttanks“.
BAM, November 1989, unveröffentlicht
- /12/ Droste, B., Ludwig, J. und B. Schulz-Forberg
Höherwertige Transporttechnik und ihre Konsequenzen für die Beförderung gefährlicher Güter.
BAM, Forschungsbericht 173, Berlin, 1990

Anhang 1

Ergebnisse ergänzender Versuche zur Ermittlung des spezifischen Arbeitsaufnahmevermögens an Probeplatten unterschiedlicher Dicke aus verschiedenen Werkstoffen

Durchstoßversuche

22.11.-24.11.1993

Versuchs-Nr. 9.2 93 62 - 9.2 93 73

Versuchs-Nr.	Prüfling [kN]	F_{max} [mm]	s_{Fmax} [kNm]	A [kNm]	$A_{Mittelwert}$
9.2 93 62	4 mm St 37-2	478,78	68,81	14,77	15,32
9.2 93 63	4 mm St 37-2	483,58	70,16	15,45	
9.2 93 64	4 mm St 37-2	488,45	70,33	15,75	
9.2 93 65	4 mm Au	870,68	97,50	38,25	37,79
9.2 93 66	4 mm Au	863,09	94,77	37,14	
9.2 93 67	4 mm Au	854,24	97,08	37,98	
9.2 93 68	7 mm Al	405,40	54,50	9,89	9,55
9.2 93 69	7 mm Al	400,50	55,45	9,61	
9.2 93 70	7 mm Al	475,99	44,15	9,14	
9.2 93 71	6 mm Al	333,02	52,05	7,34	7,31
9.2 93 72	6 mm Al	329,79	51,94	7,29	
9.2 93 73	6 mm Al	334,25	51,36	7,29	

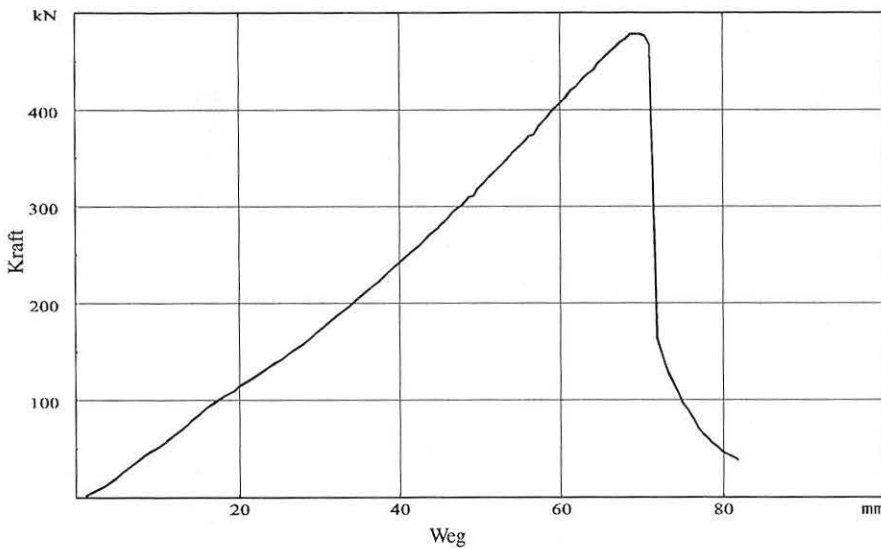


Bild 1:
 Versuchsnummer: 9362
 Versuchsobjekt: St 37-2 4mm
 Arbeitsaufnahmevermögen:
 14,77 kNm
 F_{max} : 478,78 kN
 $s_{(Fmax)}$: 68,81 mm

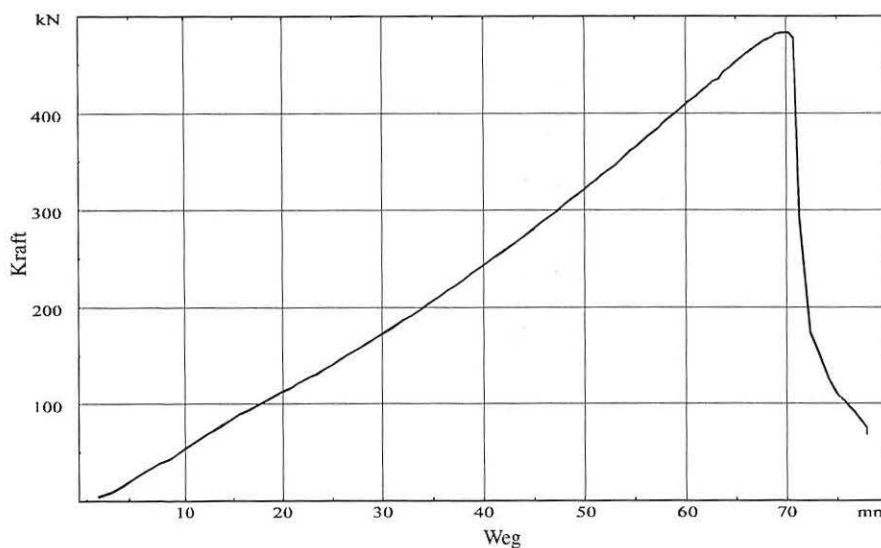


Bild 2:
 Versuchsnummer: 9363
 Versuchsobjekt: St 37 4mm
 Arbeitsaufnahmevermögen:
 15,45 kNm
 F_{max} : 483,58 kN
 $s_{(Fmax)}$: 70,16 mm

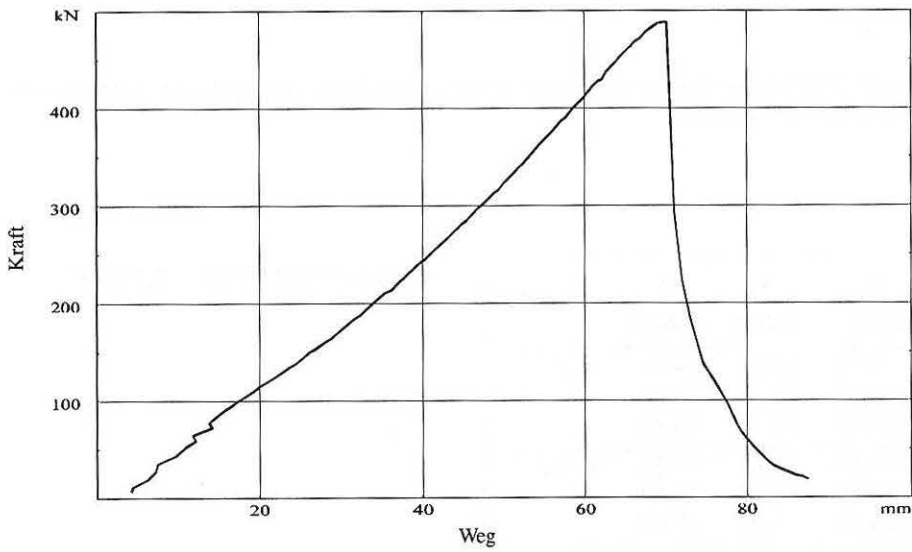


Bild 3:
 Versuchsnummer: 9364
 Versuchsobjekt: St 37 4mm
 Arbeitsaufnahmevermögen:
 15,75 kNm
 F_{max} : 488,45 kN
 $s_{(Fmax)}$: 70,33 mm

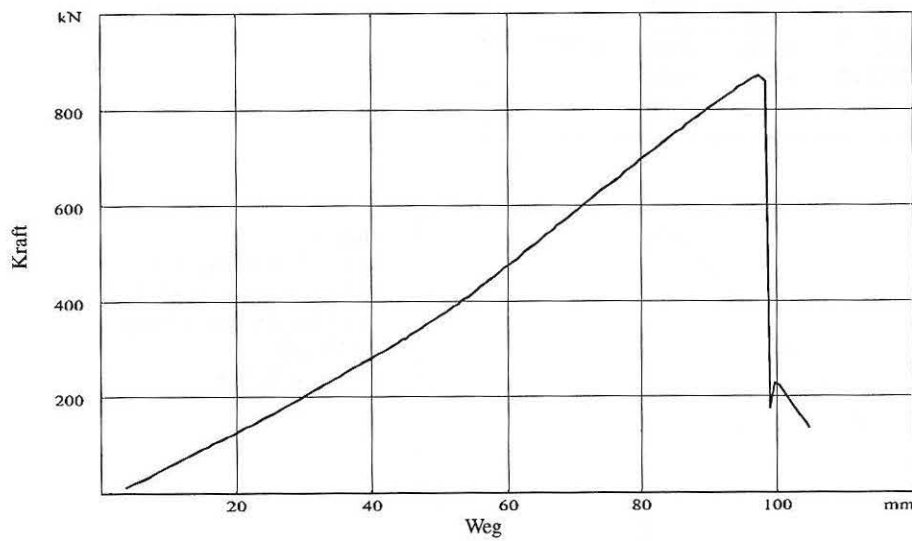


Bild 4:
 Versuchsnummer: 9365
 Versuchsobjekt: 4mm Au
 Arbeitsaufnahmevermögen:
 38,25 kNm
 F_{max} : 870,68 kN
 $s_{(Fmax)}$: 97,50 mm

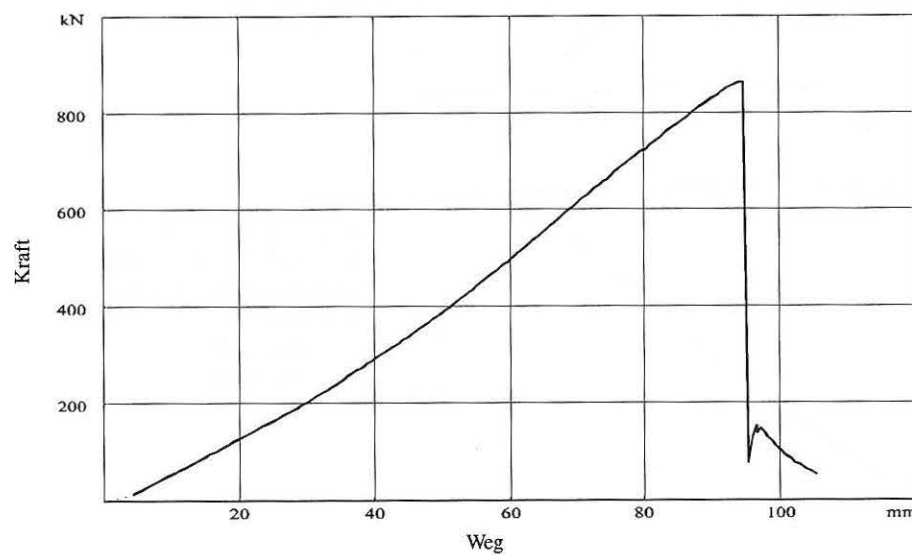


Bild 5:
 Versuchsnummer: 9366
 Versuchsobjekt: 4mm Au
 Arbeitsaufnahmevermögen:
 37,14 kNm
 F_{max} : 863,09 kN
 $s_{(Fmax)}$: 94,77 mm

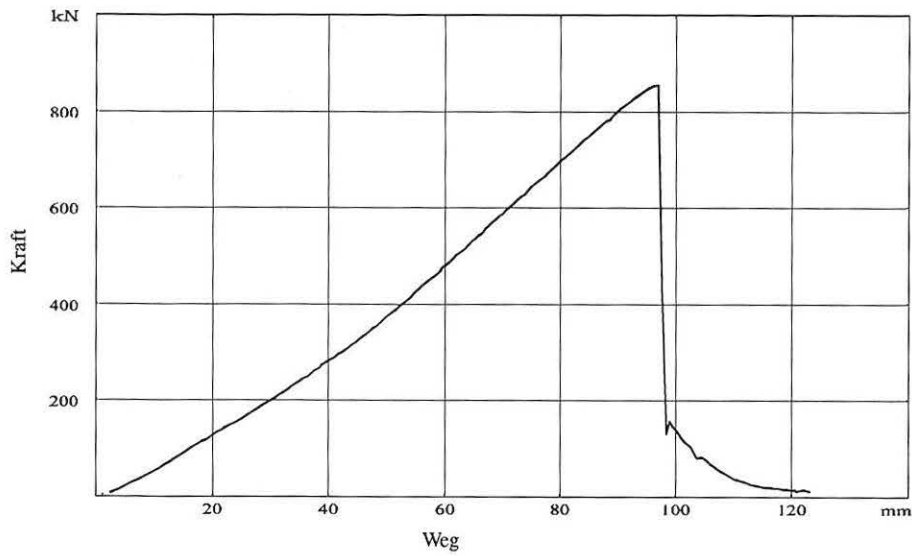


Bild 6:
 Versuchsnummer: 9367
 Versuchsobjekt: 4mm Au
 Arbeitsaufnahmevermögen:
 37,98 kNm
 F_{max} : 854,24 kNm
 $s_{(Fmax)}$: 97,08 mm

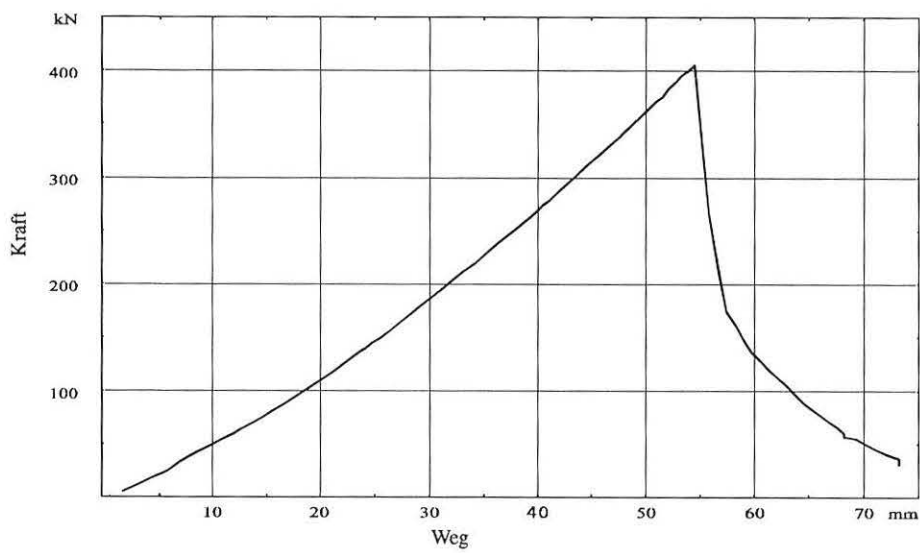


Bild 7:
 Versuchsnummer: 9368
 Versuchsobjekt: AI 7 mm
 Arbeitsaufnahmevermögen:
 9,89 kNm
 F_{max} : 405,40 kN
 $s_{(Fmax)}$: 54,50 mm

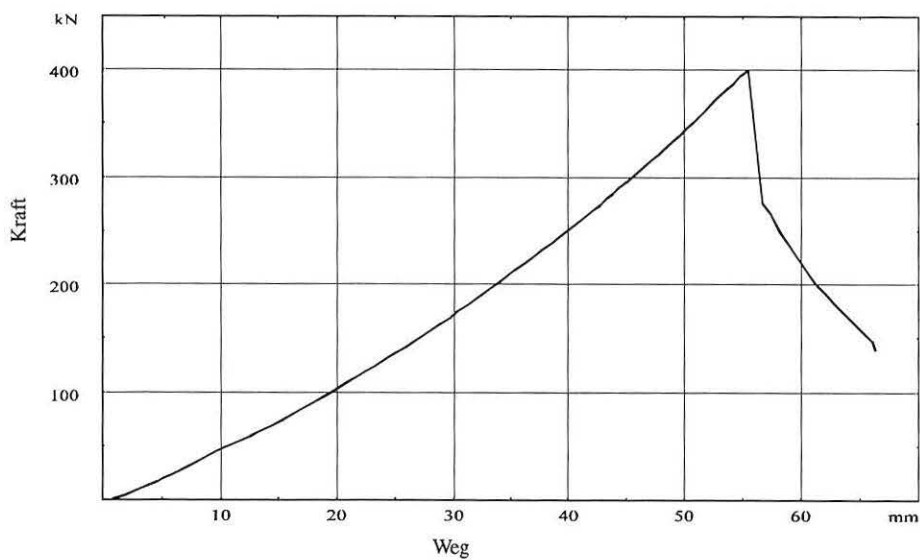


Bild 8:
 Versuchsnummer: 9369
 Versuchsobjekt: AI 7 mm
 Arbeitsaufnahmevermögen:
 9,61 kNm
 F_{max} : 400,50 kNm
 $s_{(Fmax)}$: 55,45 mm

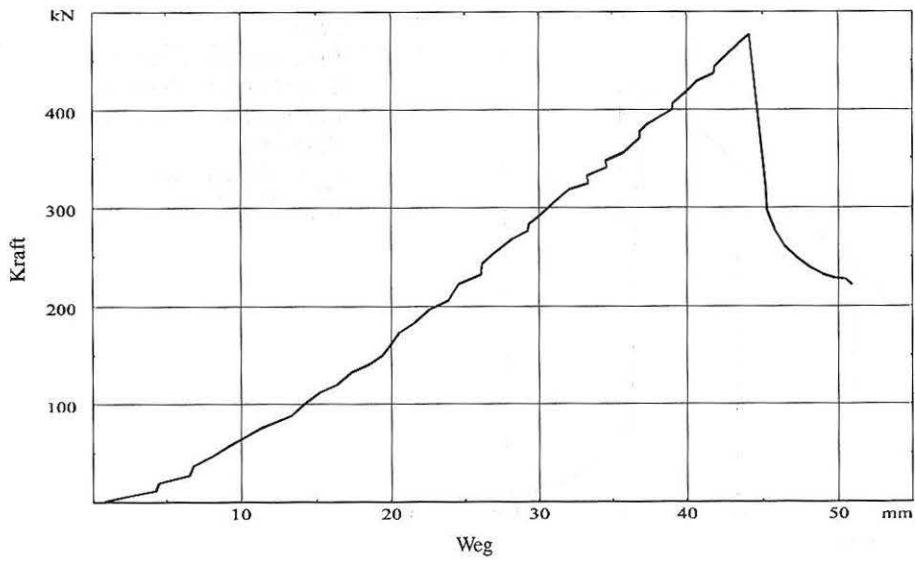


Bild 9:
 Versuchsnummer: 9370
 Versuchsobjekt: AI 7 mm
 Arbeitsaufnahmevermögen:
 9,14 kNm
 F_{max} : 475,99 kN
 $s_{(Fmax)}$: 44,15 mm

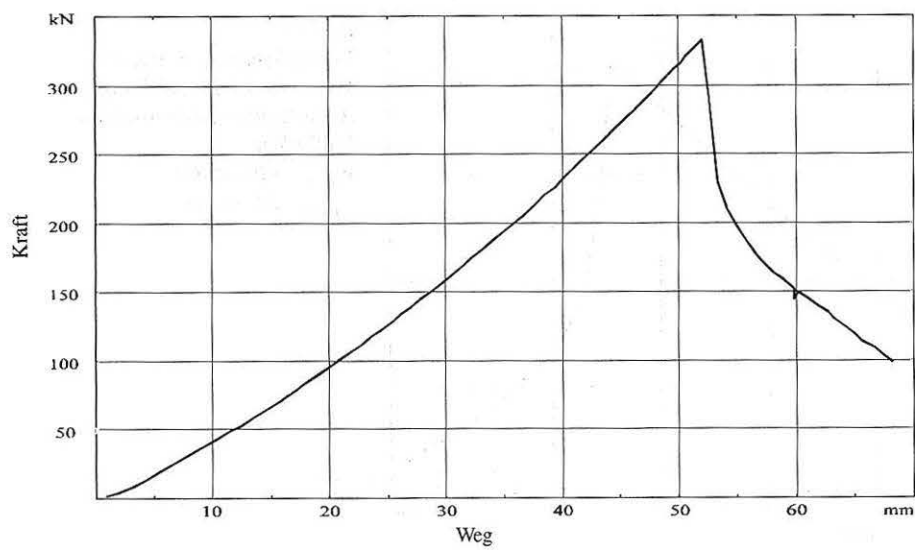


Bild 10:
 Versuchsnummer: 9371
 Versuchsobjekt: AI 6 mm
 Arbeitsaufnahmevermögen:
 7,34 kNm
 F_{max} : 333,02 kN
 $s_{(Fmax)}$: 52,05 mm

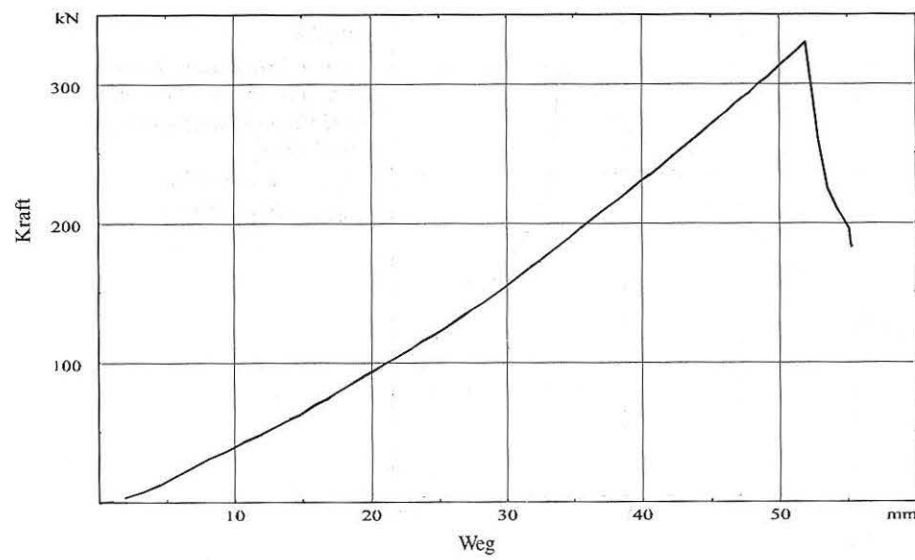


Bild 11:
 Versuchsnummer: 9372
 Versuchsobjekt: AI 6 mm
 Arbeitsaufnahmevermögen:
 7,29 kNm
 F_{max} : 329,79 kN
 $s_{(Fmax)}$: 51,94 mm

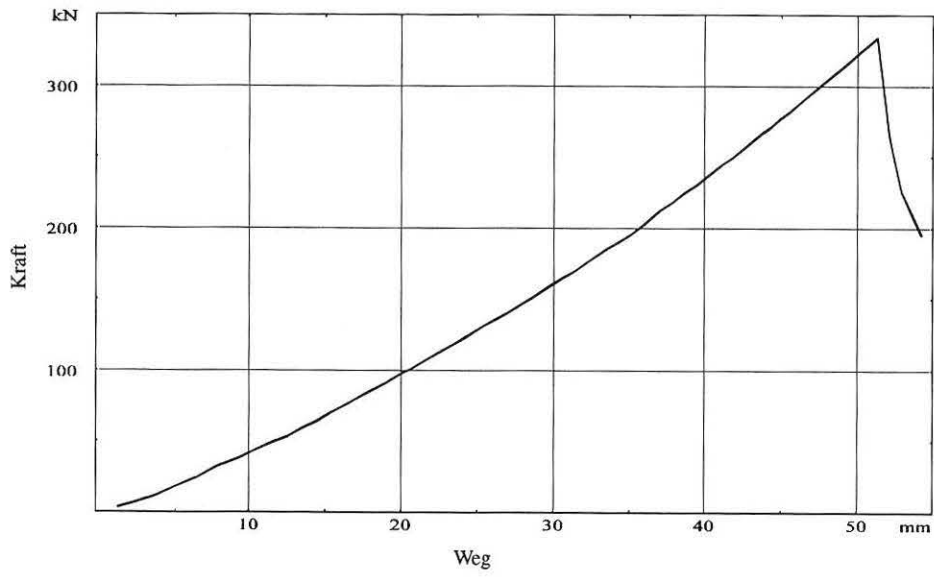


Bild 12:
Versuchsnummer: 9373
Versuchsobjekt: Al 6 mm
Arbeitsaufnahmevermögen:
7,29 kNm
 F_{max} : 334,25 kNm
 $s_{(Fmax)}$: 51,36 mm

Anhang 2

Ergebnisse der in der BAM durchgeführten Versuche zur Ermittlung des globalen Arbeitsaufnahmevermögens an Tankabschnitten unterschiedlicher Konstruktionsweise

Normierung und Quantifizierung globalen Arbeitsaufnahmevermögen (A) von Tanks zur Beförderung gefährlicher Güter

Tabellarische Zusammenfassung von Versuchsergebnissen der BAM

Tank-Nr. (Bild-Nr.)	Wanddicke [mm]	Werkstoff [kNm]	A 250 mm	Merkmale
1	5,2	AlMg 4,5 Mn	39	Tank in Kofferform mit äquatorialer „Bauchbinde“ und 2 Trennböden, die eine Kammer von 7500 l bilden (entsprechend Rn 211 127 (5) b) 4.). Länge: 3000 mm, Höhe: 2361 mm.
2	5,2	AlMg 4,5 Mn	102	Tank in Kofferform ohne „Bauchbinde“ mit insgesamt 4 Schwallwänden (Doppel-S-Böden/über die Länge verteilt (entsprechend Rn 211 127 (5)). Länge: 3000 mm, Höhe: 2361 mm.
3	6,0	St 37-2	30	Zylindrischer Tank ohne Einbauten mit ebenen Endböden (entsprechend Rn 211 127 (3)). Länge: 6000 mm, Ø 2140.
4	5,2	AlMg 4,5 Mn	57	Tank in Kofferform mit Endboden als Doppelboden. Versuch zur Ermittlung des A des Endbodens als Anfahrerschutz! Ergebnis für anzustellende Betrachtung irrelevant!
5	7,7	AlMg 4,5 Mn	22	Zylindrischer Tank ohne Einbauten mit ebenen Endböden (entsprechend Rn 211 127 (3)). Länge: 6000 mm, Ø 2140.
6	7,7	AlMg 4,5 Mn	18	Koffertank ohne Einbauten mit ebenen Endböden (entsprechend Rn 211 127 (3)). Länge: 6000 mm, Höhe: 2361 mm.
7	6,0	St 37-2	22	Koffertank ohne Einbauten mit ebenen Endböden (entsprechend Rn 211 127 (3)). Länge: 6000 mm, Höhe: 2361 mm.
8	5,2	AlMg 4,5 Mn	71	Zylindrischer Tank mit ebenen Endböden und zwei Trennwänden (entsprechend Rn 211 127 (5) b) 1.). Länge: 5190 mm, Ø 2380.
9	5,2	AlMg 4,5 Mn	33	Zylindrischer Tank mit ebenen Endböden und zwei Stützringen (entsprechend Rn 211 127 (5) b) 1.). Länge: 5190 mm, Ø 2380.
10	4,3	St 37-2	65	Zylindrischer Tank mit ebenen Endböden und zwei Stützringen (entsprechend Rn 211 127 (5) b) 1.). Länge: 5190 mm, Ø 2380.

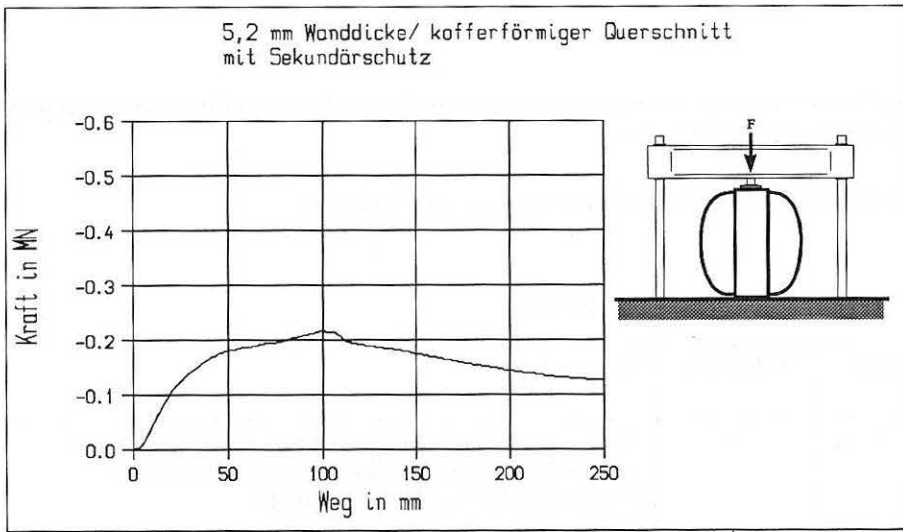


Bild 1:
Belastungsversuche an Tanks
Tank 1: AlMg 4,5 Mn

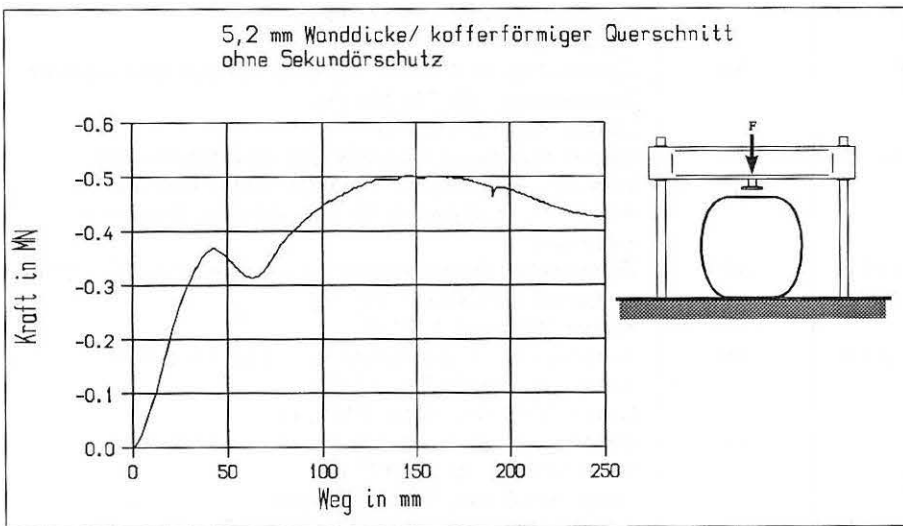


Bild 2:
Belastungsversuche an Tanks
Tank 2: AlMg 4,5 Mn

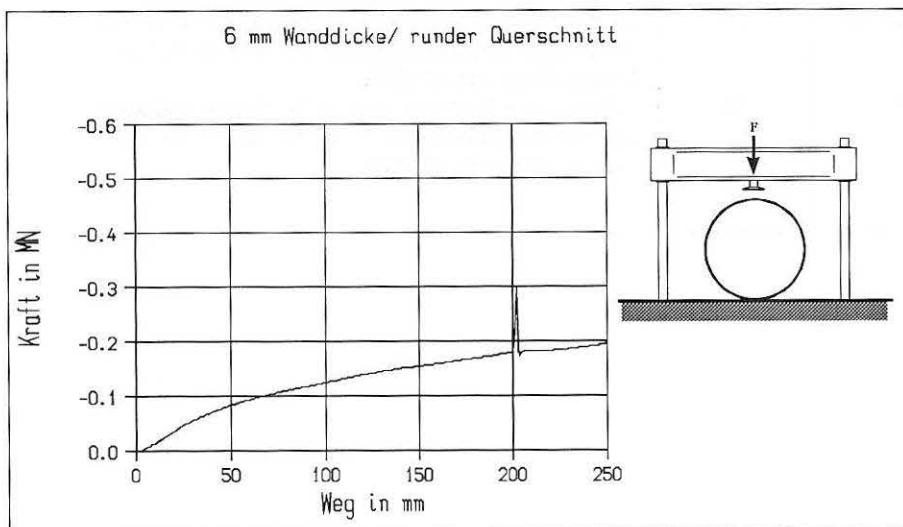


Bild 3:
Belastungsversuche an Tanks
Tank 3: St 37-2

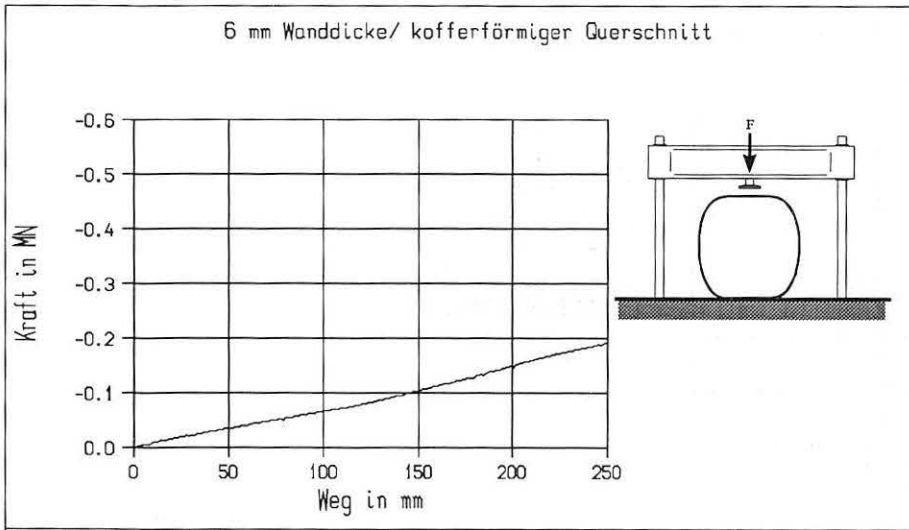


Bild 4:
Belastungsversuche an Tanks
Tank 4: St 37-2

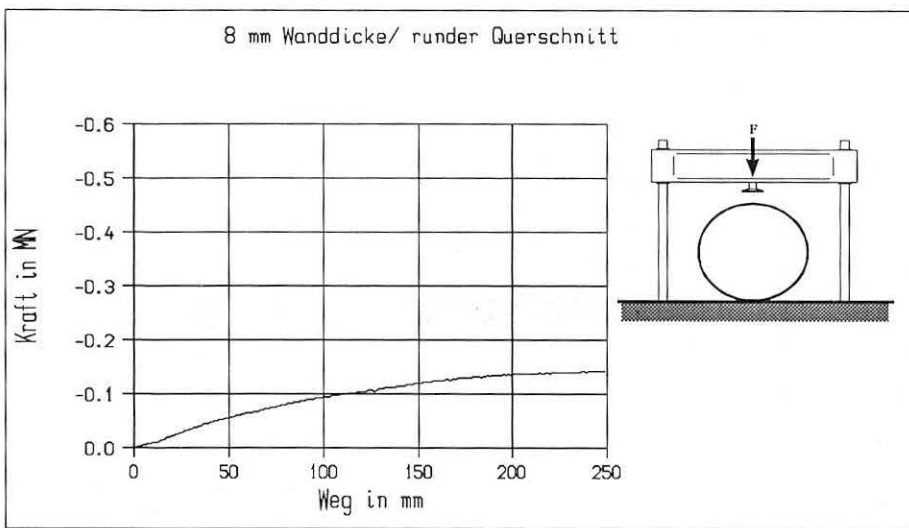


Bild 5:
Belastungsversuche an Tanks
Tank 5: AlMg 4,5 Mn

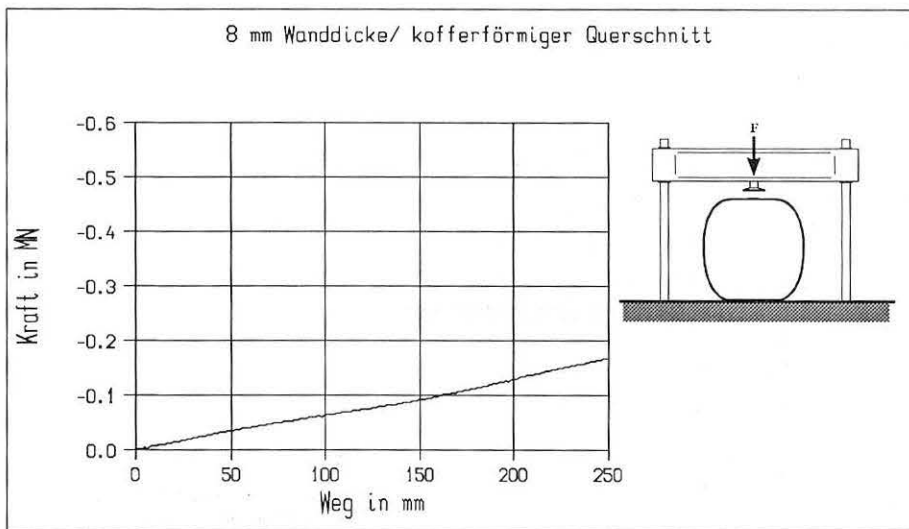


Bild 6:
Belastungsversuche an Tanks
Tank 6: AlMg 4,5 Mn

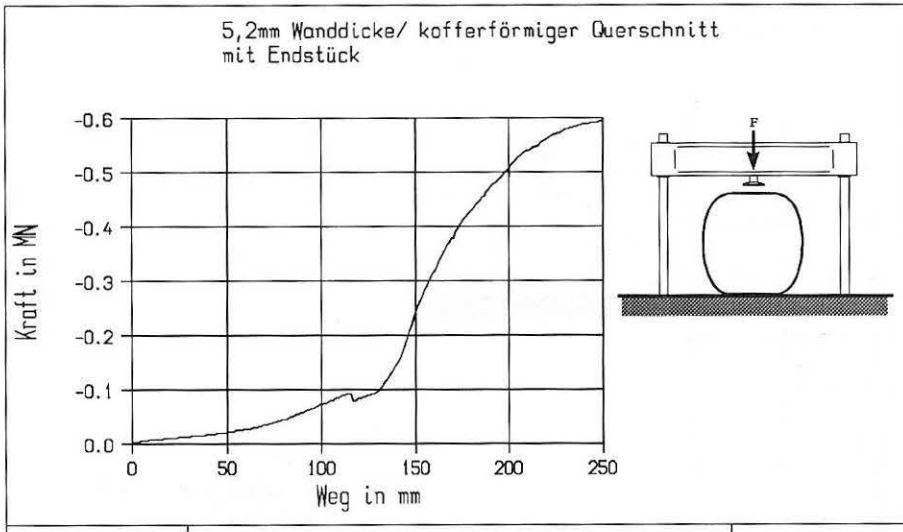


Bild 7:
Belastungsversuche an Tanks
Tank 7: AlMg 4,5 Mn

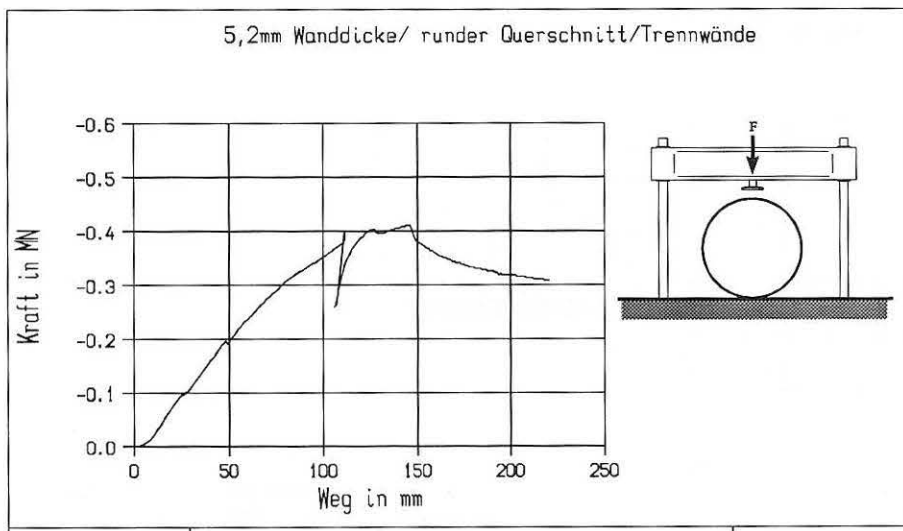


Bild 8:
Belastungsversuche an Tanks
Tank 8: AlMg 4,5 Mn

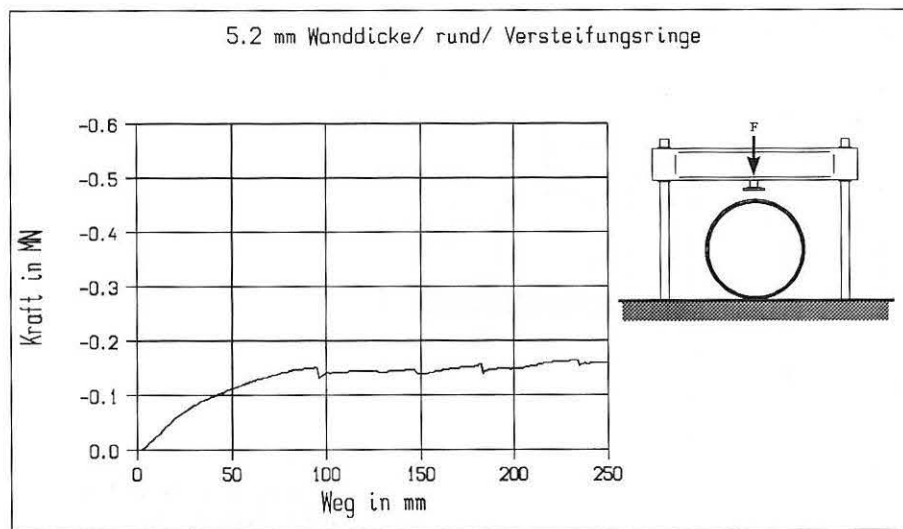


Bild 9:
Belastungsversuche an Tanks
Tank 9: AlMg 4,5 Mn

4,3 mm Wanddicke/ rund/ Versteifungsringe

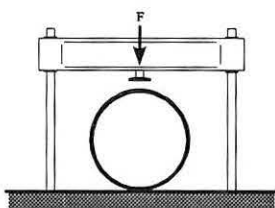
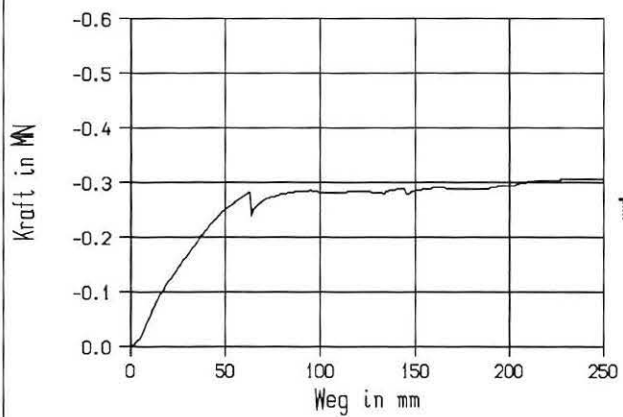


Bild 10:
Belastungsversuche an Tanks
Tank 10: St 37-2

Anhang 3

Safety Levels of Tanks for the Transport of Dangerous Goods

Contents

1.	Introduction	42
2.	Codes of practice and their theoretically basis	42
3.	Release of contents – risk parameters	43
4.	Simulation of accidents	44
5.	The developing of safety levels	45
6.	Conclusion	47
7.	References	47

1 Introduction

The tanks transport of dangerous goods normally is carried out in tank-railcars, tank-vehicles and portable tanks (tank-containers). It is one of the tasks of the tanks of these transport means to ensure the safe containment of the transport goods. The kind of design, construction and manufacture is essentially important to prevent the

contents of the tanks from getting released /1, 2/. The choice of the tank material depends on the properties of the substances to be transported and the resistance capability against service stresses and certain external impact stresses e.g.

2 Codes of practice and their theoretically basis

The resistance against service (transport) stresses will be ensured first of all by application of the well-known pressure vessel formula.

$$e = \frac{P_{bar} \cdot D}{20 \cdot \sigma \cdot \lambda} \text{ mm}$$

with e = minimum wall thickness in mm
 P_{bar} = calculation pressure in bar
 D = internal diameter of the shell in mm
 σ = permissible stress in N/mm²
 λ = coefficient due to welds

This formula leads in general to a satisfactory high value for the wall thickness, but only against stresses caused by internal pressure. Normally the highest value regarding the internal pressure is equal the test pressure (as the highest value for service conditions).

The resistance against transport stresses and, additionally, certain external impacts will be ensured by requiring a minimum wall thickness of 5 mm respectively 6 mm mild steel depending on the tank's diameter. Higher pressures or greater hazards, however, may require even a higher value for the minimum wall thickness, but for most of the dangerous liquids being transported the mentioned values will be sufficient.

Other metals than mild steel may be chosen, too, if a special equivalent wall thickness formula will be applied:

$$e_1 = \sqrt[3]{\frac{R_{m0} \cdot A_0}{R_{m1} \cdot A_1}} \cdot e_0 = \frac{21,4 \cdot e_0}{\sqrt[3]{R_{m1} \cdot A_1}}$$

with e = minimum wall thickness
 R_m = minimum tensile strength of the metal
 A = minimum elongation of the metal at fracture under tensile stress

index 0 = reference metal Mild Steel
 index 1 = any other metal chosen

Most of the other metals to be chosen are aluminium alloys or austenitic steels. For each of them an example has been calculated.

Minimum wall thickness of tanks with a diameter exceeding 1,80 m

e = 6 mm (Mild Steel)

resp.

e = 4,5 mm (Austenitic Steel)

e = 7,8 mm (Aluminium Alloy)

Minimum wall thickness may be reduced up to 2 mm mild steel, if additional protection against some kind of damages is provided.

Minimum wall thickness of tanks with a diameter not more than 1,80 m

e = 4 mm (Mild Steel)

resp.

e = 3 mm (Austenitic Steel)

e = 5,2 mm (Aluminium Alloy)

but additional protection is needed

As protective measures a catalogue of different measures apply, e.g. a complete insulation of certain properties, encasing the whole tank; the area-applied protection over 30 % of the tank height in the equatorial zone (the so called „belly belt“) or lateral stiffening elements like partitions, baffles or stiffening rings. No matter, a look at the pressure vessel formula or the equivalent wall thickness formula shows that both are derivations of the basic vessel formula for service conditions, for which only the laws of elastic theory are regarded /3/.

Dimensioning of tanks under service conditions

$$\sigma_N \leq \sigma_P = \frac{K}{S}$$

Determination of the nominal stress for tanks

$$\sigma_N = \frac{F}{e} \pm \frac{6M}{e^2}$$

with σ_N = nominal stress
 σ_P = permissible stress
 K = characteristic value of the material
 S = safety coefficient
 e = wall thickness
 F = force
 M = bending moment

But, if there are happening damages and accidents plastic deformation will be taken into account.

As a first approach the formula for specific energy absorption may be taken (applicable for plastic deformation, too, as it could be easily shown).

The formula for specific energy absorption

$$\Delta W = V \cdot \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon$$

leads to a normalized specific energy absorption

$$W^* = e \cdot R_m \cdot A$$

to describe damages like penetration of tank walls /4, 5/. It is remarkable, that the formulas for specific energy absorption and equivalent wall thickness are not comparable at all:

$$e \cdot R_m \cdot A \neq e \cdot \sqrt[3]{R_m \cdot A}$$

This gives a first indication, that codes of practice, basic theories and - as will be shown - test and research results are not in good accordance, in fact.

3 Release of contents – risk parameters

Having a look at the effects of the release of contents from tanks, the risk to public of such an event can be defined as the combination (or multiplication) of two factors:

$$R = P * C$$

R = risk to public
 P = probability of an accident
 C = consequences of release

Looking at the regulations for transport tanks there will be the possibility of deriving the following:

$$R = P * C$$

P essentially determined by
 – wall thickness
 – material
 – reinforcements, additional protection
 – calculation pressure (design, shape)
 C essentially determined by
 – capacity of the tank

if only the tank as one part of the system „transportation of dangerous goods“ will be regarded.

Tanks are designed, constructed and manufactured in

many different ways. So, it will be necessary to compare different tanks regarding their capability to withstand not only service but also accidental stresses. It is needed to develop a better method to compare the safety levels of different tank types if we look at their accidental behaviour, than it has been given by the regulations concerning the requirements for wall thickness in combination with the equivalent wall thickness formula.

The road which leads into the right direction, perhaps, may be described as follows:

It is necessary to simulate accidental stresses to derive the factors which describe numerical the capability of tanks to withstand these stresses and give a comparative figure regarding the safety level of each tank type. In brief, there are three significant types of mechanical accidents, at least, which has to be regarded. First, we will find a lot of accidents in which the tank shell will be penetrated by shape-aggressive parts, second, we will find some kind of impacts, in which the shell will be damaged by deforming a greater area of the tank surface. Additionally we will find accidents in which the equipment fails, specially by non-pressurized tanks for gasoline, e.g.

The BAM has carried out several tests concerning simulation of penetration and impact, quasi-statically and dynamically, too. For now it is possible to report about the results of quasi-static testing.

4 Simulation of accidents

Penetration stresses (specific energy absorption capacity) have been verified as follows /6/:

Plane sample plates corresponding to the actual construction of a tank wall have been submitted to deep-drawing tests by means of a cylindrical pressure stamp.

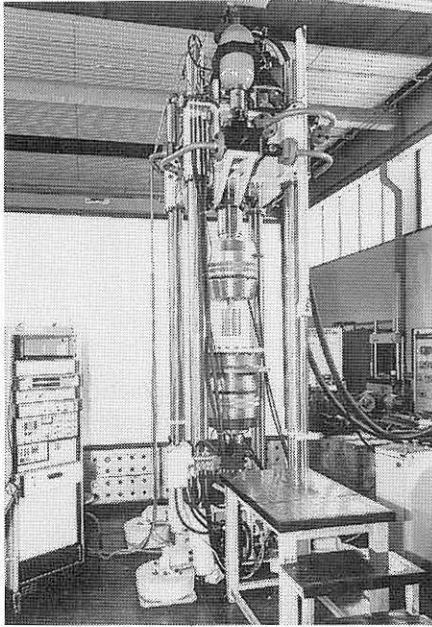


Fig. 1:
Test equipment for the determination of the specific energy absorption capacity

The sample plates have been circumferentially fixed to a circular test equipment, so that the tank wall was directly exposed to the stamp.

During the tests, the work load was applied quasi-statically until the sample plate started to crack. The force-displacement-curve was monitored and served to determinate the specific energy absorption capacity for the energy absorption capacity is equal the area below the monitored force-displacement-curve, see fig. 2.

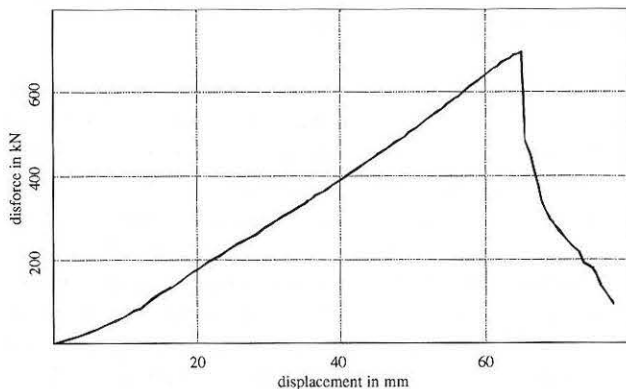


Fig. 2:
Force-displacement-curve, schematically; determination of the specific energy absorption capacity

Table 1 shows the monitored data for the specific energy absorption capacity in relationship to material and wall thickness

Table 1:

Energy absorption capacities according to BAM-testings

Metal	e [mm]	$W_{spec.}$ [kJNm]	N.f.St.
Al Mg 4,5 Mn (Al)	4,0	4	0,18
	5,2	7	0,32
	6,0		
	6,5		
	7,8	12	0,55
Mild Steel (St)	3,0	10	0,45
	4,0		
	4,6		
	5,0	17	0,77
	6,0	22	1,00
Austenitic Steel 1.4571 (Au)	3,0	28	1,27
	3,5	32	1,45
	3,8		
	4,5		

Impacts (global energy absorption capacities) have been verified in the following manner /7/:

Tank samples corresponding to the actual structure of a tank have been submitted to pressure-tool tests by means of a planiform tool. The tank samples have been slightly fixed on a special test equipment, so that the equatorial area of the tank sample was directly exposed to the pressure tool. As before, during the test the work load was applied quasi-statically until the possibilities of the test equipment reached its limitations.

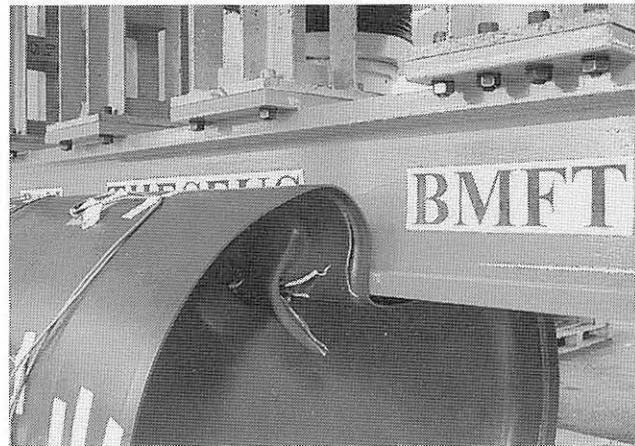


Fig. 3:
Test equipment for the determination of the global energy absorption capacity

Again, the force-displacement-curve was monitored to determine the global energy absorption capacity of the tank structure to be regarded.

The test equipment is shown in Fig. 3, while an example of the monitored force-displacement-curve is shown in Fig. 4

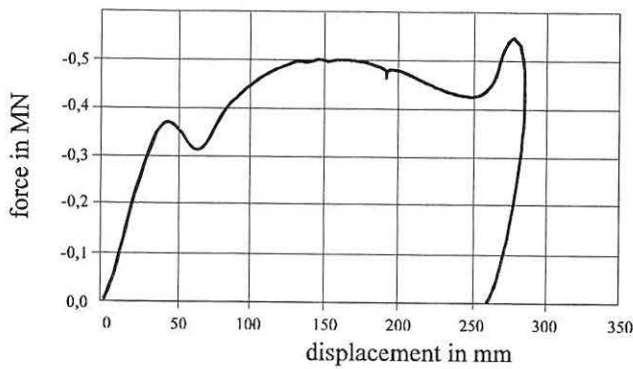


Fig. 4:
Force-displacement-curve, schematically; Determination of the global energy absorption capacity

Without discussion of parameters (e.g. dynamic loads a.s.o., which will be taken into consideration during further research projects) it should be stated, that specific

and global energy absorption capacities may be taken as basic elements to describe the main factors of tank type related safety levels. Therefore the parameters described before (wall thickness, metal chosen, reinforcements, calculation pressure) may be changed into the following

$$R = P * C$$

P essentially determined by

- specific energy absorption of the tank wall
- global energy absorption of the tank structure
- pressure design of the tank

C essentially determined by

- capacity of the tank

Next the factors (f_1 to f_4) for these parameters have to be defined and a suitable combination for the correct description of different safety levels should be found.

5 The developing of safety levels

Following the thoughts described in the sections before it can be continued as follows:

If the formula for the normalized specific energy absorption capacity will be taken and applied for several metal/wall thickness combinations there will be received the values in the third column of table 2. For the 6 mm mild steel tank has to be regarded as the basis tank for the transport of dangerous goods on a sufficient safety level, the values for $w^* = e \cdot R_m \cdot A$ will be scaled (normalized) by setting the 6 mm mild steel tank equal 1.

It can be stated that this procedure could not be wrong totally, at all, because the values for the scaled (normalized) specific energy absorption are in good accordance to the scaled test results for the specific energy

absorption capacity described in table 1. So it will be possible to regard the values in the fourth column of table 2 as the applicable values for the factor f_1 (which stands for the specific energy absorption capacity) and different tanks will be comparable if we look at the so-defined criteria only.

Nearly the same procedure can be taken for developing a criteria to define the factor f_2 (which stands for the global energy absorption capacity). In table 3 the values for the test results coming from the testing of complete tank structures are to be found. If a special kind of tank - fitted with a special arrangement of reinforcements, the so called „french solution“ - will be taken as the basis tank structure, it is possible to normalize the values for

Table 2:
Specific energy absorption capacity (determined analytically)

Metal	e	W*	f ₁ =
	[mm]	e · R _m · A	N.f.St.
Al Mg 4,5 Mn (Al)	4,0	18700	0,31
	5,2	24300	0,41
	6,0	28100	0,47
	6,5	30400	0,51
	7,8	36500	0,61
Mild Steel (St)	3,0	30000	0,50
	4,0	40000	0,67
	4,6	46000	0,77
	5,0	50000	0,83
	6,0	60000	1,00
Austenitic Steel 1.4571 (Au)	3,0	69600	1,16
	3,5	81200	1,35
	3,8	88200	1,47
	4,5	104400	1,74

Table 3:
Global energy absorption capacity (determined experimentally)

No.	Tank Type [kNm]	W _{glob.}	f ₂ = N.f.F
1	No partition, ends only	30	0,4
2	Normal tanks		
	chamber capacity 7'500 l	40	0,6
3	French solution (F)	70	1,0
4	tanks with special transversal reinforcement	100	1,4

global energy absorption capacity and to reach the factor f_2 , which makes different tank structures comparable.

Because pressure design is of some importance regarding the needed shape of a tank on one hand (cylindrical shape for some safety reasons seems to be better than box or elliptical shape) and the characteristics of the used equip-

ment on the other hand, there should be introduced a factor f_3 equal 1 (or 0), whether pressure design has been applied or not.

Last but not least a factor f_4 (which stands for the consequences (magnitude) of the release of dangerous liquids if an accident happens) has to be defined. In table 4 the derivation of the factor f_4 is shown.

Table 4:
Consequences of release - factor derivation

V [l]	N.f.V _n	$f_4 = \sqrt[3]{N \cdot f \cdot V_n}$
30'000	0,25	0,6
15'000	0,5	0,8
V _n = 7'500	1,0	1,0
3'500	2,0	1,3

Because of the different importance of the factors concerning tank safety, each of the factors has to be weighted. As a first approach f_1 is of most, f_2 of second and f_3 of less importance, so the relationship between the factors may be set to 4 : 2 : 1. The procedure to define

safety levels (= risks to public) can be shown as follows:

$$R_f = P \cdot C = (f_1 + f_2 + f_3) \cdot f_4 = f_4 \cdot \sum_{i=1}^3 f_i$$

$$\text{with } w_i = c_i \cdot f_i \quad (i = 1 \text{ to } 4)$$

$$R_w = P \cdot C = (w_1 + w_2 + w_3) \cdot w_4 = w_4 \cdot \sum_{i=1}^3 w_i$$

This is a very simplified description of the method developed because many (component) parameters have to be taken into account. All this in mind there is the possibility to achieve values for the safety levels of tanks consisting/made of different metals, structures, equipment and tank/chamber capacities. The procedure can be found in table 5. Mainly interesting are the last two columns. If a normalization (scaling) for the values of R_w (something like „weighted risk assessment“) has been carried out ($R_N = R_w/7$; 7 = number of weights) there is derived the column for R_N . The values for R_N are describing the different safety levels for different tank types, finally. On this basis a better comparison between different tank types will be possible than it is possible only by application of the equivalent wall thickness formula.

Table 5:
Risk factors and safety levels of different tank types

No.	Tank Type	f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	R _f	w ₁	w ₂	w ₃	w ₄	R _w	R _N
1	5,2 mm Al Bb, N, B, 7,5	0,5	0,6	0,0	1,0	1,1	2,0	1,2	0,0	1,0	3,2	0,46
2	5,2 mm Al De, T, C, Pd, 7,5	0,5	1,4	1,0	1,0	2,9	2,0	2,8	1,0	1,0	5,8	0,83
3	7,8 mm Al F, C, Pd, 7,5	0,6	1,0	1,0	1,0	2,6	2,4	2,0	1,0	1,0	5,4	0,77
4	4 mm St Bb, N, B, 7,5	0,8	0,6	0,0	1,0	1,4	3,2	1,2	0,0	1,0	4,4	0,63
5	4 mm St De, F, C, Pd, 7,5	0,8	1,0	1,0	1,0	2,8	3,2	2,0	1,0	1,0	6,2	0,89
6	6 mm St O, 30	1,0	0,4	0,0	0,6	0,8	4,0	0,8	1,0	0,6	3,5	0,50
7	6 mm St N, C, Pd, 7,5	1,0	0,6	1,0	1,0	2,6	4,0	1,2	1,0	1,0	6,2	0,89
8	3 mm Au N, C, Pd, 7,5	1,2	0,6	1,0	1,0	2,8	4,8	1,2	1,0	1,0	7,0	1,00
9	4,5 mm Au O, C, Pd, 15	1,7	0,4	1,0	0,8	2,5	6,8	0,8	1,0	0,6	6,9	0,99

- | | | | |
|----|--------------------------|---------|-----------------------------------|
| Bb | Belly belt | T | Special transversal reinforcement |
| De | Double ends | Pd | Pressure design |
| O | No partitions, ends only | B | Box shape |
| N | Normal tank | C | Cylindrical shape |
| F | French solution | 7,5 ... | Tank capacity |

6 Conclusion

Table 5 shows that optimized tank types will have higher values for the characteristic numbers R_f and R_w and for the safety levels represented by them respectively for the normalized characteristic number R_N .

A high value for R_N ($R_N = 1$, e.g.) can be reached only, if specific and global energy absorption capacities as well as pressure design concerning each of their parameter factors f_1 to f_3 will have high values, too. Tank or chamber capacity should be small to reach a high value for the parameter factor f_4 .

From this it follows that no tank type can be regarded as optimized, if only one or two of the factors have been taken into account. All parameters concerning tank safety have to be mentioned more or less. If a safety level less than 1 is permitted – looking at tanks for the transport of dangerous goods representing lower hazards, e.g. – it

will be possible to equalize deficits concerning one of the risk factors by improving another. Examples have been realized already (Cancelling of the „belly belt“ under some circumstances can be equalized by improving additional transversal protection, see table 3).

Reflections on this subject further may lead to the definition of higher safety levels ($R_N > 1$) for tanks for the transport of dangerous goods representing higher hazards as well as to improve higher safety levels for other safety reasons (regarding accident rates a.s.o.). So boundary lines may be defined, which describes minimum safety levels for different purposes (safety levels depending on the hazardous properties of the dangerous goods being transported). The method may help to introduce tanks of desirable or needed high quality without restriction concerning design, construction and manufacture like it has to be stated up to now.

7 References

- /1/ European Agreement concerning the international carriage of dangerous goods by road (ADR). United Nations, New York, 1990
- /2/ International Maritime Dangerous Goods Code IMO, London, 1990
- /3/ S. Schwaigerer
Festigkeitsberechnung im Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau
4th Ed., Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo, 1983
- /4/ Gerthsen, C. et al.
Physik
Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1982
- /5/ Reckling, K.-A.
Beitrag der Elasto- und Plastomechanik zur Untersuchung von Schiffskollisionen.
Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, Vol. 70,
Springer-Verlag, Berlin, 1976, pp. 443 - 464
- /6/ Expertise „Beurteilung eines zusätzlichen Schutzes für wanddickenreduzierte Tanks gemäß TRTF 001“
BAM, Mai 1988, unpublished
- /7/ Expertise „Globales Arbeitsaufnahmevermögen von Transporttanks“
BAM, November 1989, unpublished
- /8/ Ludwig, J. and B. Schulz-Forberg
„Sicherheitsniveaus von Transporttanks für Gefahrgut (Rev. 0)“
BAM, August 1993, unpublished

Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/1968

Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft

Nr. 2/1970 (vergriffen)

G. Andreas
Zum Problem des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitern

Nr. 3/1970

J. Ziebs
Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungsseilen als Beispiel für Verbundbauteile

Nr. 4/1970 (vergriffen)

A. Burmester
Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit - Grundlagen und Vergütungsverfahren

Nr. 5/1971

N. Steiner
Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken

Nr. 6/1971

P. Schneider
Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen

Nr. 7/1971

H.-J. Petrowitz
Chromatographie und chemische Konstitution - Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie

Nr. 8/1971

H. Veith
Zum Spannungs-Drehungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung

Nr. 9/1971

K.-H. Möller
Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen

Nr. 10/1972

D. Aurich, E. Martin
Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode

Nr. 11/1972

H.-J. Krause
Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden

Nr. 12/1972

H. Feuerberg
Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren

Nr. 13/1972

K.-H. Habig, K. Kirschke, W.-W. Maennig, H. Tischer
Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und $2 \cdot 10^{-7}$ Torr

Nr. 14/1972

E. Fischer
Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz

Nr. 15/1972

H. Pohl
Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse

Nr. 16/1972

E. Knublauch
Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadenfeuer

Nr. 17/1972

P. Reimers
Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen

Nr. 18/1973

W. Struck
Das Sprödbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches

Nr. 19/1973

K. Kaffanke, H. Czichos
Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen

Nr. 20/1973

R. Rudolphi
Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden

Nr. 21/1973

D. Kläffke, W. Maennig
Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung

Nr. 22/1973

R. Rudolphi, E. Knublauch
Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen

Nr. 23/1973

W. Ruske
Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin. Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen

Nr. 24/1973

J. Stanke, E. Klement, R. Rudolphi
Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung

Nr. 25/1973

E. Knublauch
Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen

Nr. 26/1974

P. Jost, P. Reimers, P. Weise
Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM - Eigenschaften und erste Anwendungen

Nr. 27/1974

H. Wüstenberg
Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall

Nr. 28/1974

H. Heinrich
Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern

Nr. 29/1974

P. Schneider
Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem Idealisotropen porösen Material mit starrem Skelet für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall

Nr. 30/1974 (vergriffen)

H. Czichos, G. Salomon
The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology

Nr. 31/1975

G. Fuhrmann
Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung

Nr. 32/1975

R. Rudolphi, B. Böttcher
Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen

Nr. 33/1975

A. Wagner, G. Kieper, R. Rudolphi
Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nicht-stationären Meßverfahrens

Nr. 34/1976 (vergriffen)

H.-J. Deppe
Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoff

Nr. 35/1976

E. Limberger
Der Widerstand von Platten, die als Bepflanzungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper - Vorschlag für ein Prüfverfahren -

Nr. 36/1976 (vergriffen)

J. Hundt
Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles

Nr. 37/1976

W. Struck
Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen - Vorschlag für ein Prüfverfahren -

Nr. 38/1976

K.-H. Habig
Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionitriertem Stahl 42 CrMo 4

Nr. 39/1976

K. Kirschke, G. Kempf
Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit Nicht-Newtonischem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Schwerbeanspruchung

Nr. 40/1976

H. Hantsche
Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren

Nr. 41/1976

B. Böttcher
Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten

Nr. 42/1976

S. Dietlen
Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft

Nr. 43/1976

W. Struck
Das Sprödbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches

Nr. 44/1976

W. Matthees
Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms "Stab-Werk"

- Nr. 45/1976
W. Paatsch
Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten
- Nr. 46/1977 (vergriffen)
G. Schickert, H. Winkler
Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung
Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses
- Nr. 47/1977
A. Plank
Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen
- Nr. 48/1977
U. Holzlöhner
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn
- Nr. 49/1977
G. Wittig
Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung
- Nr. 50/1978 (vergriffen)
N. Czaika, N. Mayer, C. Amberg, G. Magiers, G. Andreae, W. Markowski
Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und Überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern
- Nr. 51/1978
J. Sickfeld
Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen
- Nr. 52/1978
A. Tomov
Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung
- Nr. 53/1978
R.-G. Rohrmann, R. Rudolphi
Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge
- Nr. 54/1978
H. Sander
Magnetisches Verhalten dünner Eisen-schichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung
- Nr. 55/1978
D. Klaffke
Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristalle polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung
- Nr. 56/1979
W. Brünner, C. Langlie
Stabilität von Sandwichbauteilen
- Nr. 57/1979
M. Stadthaus
Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung
Investigations on Inspection-Media for Magnetic Particle-Testing
- Nr. 58/1979
W. Struck
Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau
- Nr. 59/1979
G. Plauk
Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl
- Nr. 60/1979
H. Spreckelmeyer, R. Helms, J. Ziebs
Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken
- Nr. 61/1979
K. Richter
Beschreibung von Problemen der höheren Farbmetrik mit Hilfe des Gegenfarbensystems
- Nr. 62/1979
W. Gerisch, G. Becker
Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle
- Nr. 63/1979
E. Behrend, J. Ludwig
Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase
- Nr. 64/1980
W. Rücker
Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung
- Nr. 65/1980
P. Schmidt, D. Aurich, R. Helms, H. Veith, J. Ziebs
Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte
- Nr. 66/1980
M. Hattwig
Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung
- Nr. 67/1980
W. Matthees
Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung
- Nr. 68/1980
D. Petersohn
Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik. Entwicklung eines vollezentrischen Präzisions-Goniometers
- Nr. 69/1980
F. Buchhardt, P. Brandl
Untersuchungen zur Integrität den Liners von Reaktorsicherheitschillen (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise
- Nr. 70/1980 (vergriffen)
G. Schickert
Schwellenwerte beim Betondruckversuch
- Nr. 71/1980
W. Matthees, G. Magiera
Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen
- Nr. 72/1980
R. Rudolphi
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen
- Nr. 73/1980
P. Wegener
Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen
- Nr. 74/1980
R. Rudolphi, R. Müller
ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz
- Nr. 75/1980
H.-J. Heinrich
Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen
- Nr. 76/1980
D. Klaffke, W.-W. Maennig
Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop
- Nr. 77/1981
M. Gierloff, M. Mautzsch
Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen
- Nr. 78/1981
W. Rücker
Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund
- Nr. 79/1981
V. Neumann
Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflußten Kaltrißneigung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch
- Nr. 80/1981
A. Plank, W. Struck, M. Tzschätzsch
Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten
- Nr. 81/1981
J. Schmidt
Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik
- Nr. 82/1982
R. Helms, H.-J. Kühn, S. Ledworuski
Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches
Assezzement of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test
- Nr. 83/1982
H. Czichos, P. Feinle
Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen
- Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen -
- Nr. 84/1982
R. Müller, R. Rudolphi
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)
- Nr. 85/ISBN 3-88314-231 -X/1982
H. Czichos
Technische Materialforschung und -prüfung - Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm "Basic Technological Research" Materials Research and Testing - Development Trends and Outline Proposals for a Community Programme "Basic Technological Research" -
- Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/1982
K. Niesel, P. Schimmelwitz
Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale
- Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/1982
B. Isecke, W. Stichel
Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren

- Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/1983
A. Erhard
Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall
- Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/1983
D. Conrad, S. Dietlen
Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid
- Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/1983
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**
- Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/1983
M. Weber
Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz
- Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/1983
L. Auersch
Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden
- Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/1983
P. Städt
Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen
- Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/1983
Xian-Quan Dong
Untersuchungen der Störschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen
- Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/1983
M. Römer
Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten
- Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/1983
H. Eifler
Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken
- Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/1983
G. Fuhrmann, W. Schwarz
Typische Bruchflächenbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung
- Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/1983
E. Schnabel
**Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschenwaren
- Stretch- und Erholungsvermögen -**
- Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/1983
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**
- Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/1984
G. Klamrowski, P. Neustupny
Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand
- Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/1984
P. Reimers, J. Goebbels, H. Heidt, P. Weise, K. Wilding
Röntgen- und Gammastrahlen-Computer-Tomographie
- Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/1984
G. Magiers
Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens auf Druckspannungsmessung in Beton
- Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/1984
D. Schnitger
Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien
- Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/1984
M. Gierloff
Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen
- Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/1984
B. Schulz-Forberg
Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen
- Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/1984
J. Lehnert
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last
- Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/1984
W. Stichel, J. Ehreke
Korrosion von Stahlradiatoren
- Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/1984
L. Auersch
Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen - Ergebnisse von Modellrechnungen
- Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/1985
M. Omar
Zur Wirkung der Schrumpfbehinderung auf den Schweißspannungszustand und das Spröbruchverhalten von unterpulvergeschweißten Blechen aus St E 460 N
- Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/1985
H. Walde, B. Kropp
Wasserstoff als Energieträger
- Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/1985
K. Ziegler
Über den Einfluß der Initiierung auf die detonative Umsetzung von Anđex-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte
- Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/1985
W. Lützow
Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen
- Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/1985
R. Helms, H. Henke, G. Oelrich, T. Saito
Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungskorrosion von Offshore-Konstruktionen
- Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/1985
P. Rose, P. Raabe, W. Daum, A. Szameit
Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen
- Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/1985
K. Richter
Farbempfindungsmerkmal Elementaruntton und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld
- Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/1985
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi, A. Wagner
Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik
- Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/1985
H. Czichos, G. Sievers
**MaterialsTechnologies and Techno-Economic Development
A Study for the German Foundation for International Development (Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung)**
- Nr. 118/ISBN 3-88314-469-X/1985
H. Treumann, H. Andre, E. Blossfeld, N. Pfeil, M.-M. Zindler
Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung - Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen
- Nr. 119/ISBN 3-88314-472-X/1985
J. Herter, K. Brandes, E. Limberger
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil 1
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part 1**
- Nr. 120/ISBN 3-88314-514-9/1986
A. Hecht
Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung
- Nr. 121/ISBN 3-88314-530-0/1986
P. Feinle, K.-H. Habig
Versagenskriterien von Stahlgleitpaarungen unter Mischreibungsbedingungen; Einflüsse von Stahlzusammensetzung und Wärmebehandlung
- Nr. 122/ISBN 3-88314-521-1/1986
J. Mischke
**Entsorgung kerntechnischer Anlagen
Sonderkolloquium der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) am 10. 12. 1985 mit Beiträgen von B. Schulz-Forberg, K. E. Wieser und B. Droste**
- Nr. 123/ISBN 3-88314-531-9/1986
D. Rennoch
Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der beim thermischen Zerfall organisch-chemischer Baustoffe entstehenden Brandgase
- Nr. 124/ISBN 3-88314-538-6/1986
H.-M. Thomas
Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung
- Nr. 125/ISBN 3-88314-540-8/1986 (vergriffen)
B. Droste, U. Probst
Untersuchungen zur Wirksamkeit der Brandschutzisolierung von Flüssiggas-Lagertanks
- Nr. 126/ISBN 3-88314-547-5/1986
W. Stichel
Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen
- Nr. 127/ISBN 3-88314-564-5/1986 (vergriffen)
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil 1
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part 1**
- Nr. 128/ISBN 3-88314-568-8/1986 (vergriffen)
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil 11
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part 11**
- Nr. 129/ISBN 3-88314-569-6/1980 (vergriffen)
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter, K. Berner
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load
Zugversuche an Betonstahl mit erhöhter Dehngeschwindigkeit
Reinforcing Steel Tension Tests with high strain rates**

Nr. 130/ISBN 3-88314-570-X/1986

W. Struck

Einfache Abschätzung der Durchbiegung und der Energieaufnahme von Trägern aus duktilem Material

Nr. 131/ISBN 3-88314-585-8/1986

E. Limberger, K. Brandes, J. Herter

Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil 11
Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part 11

Nr. 132/ISBN 3-88314-595-5/1987

Chr. Herold, F.-U. Vogdt

Ermittlung der Ursachen von Schäden an bituminösen Dachabdichtungen unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Beanspruchungen

Nr. 133/ISBN 3-88314-609-9/1987 (vergriffen)

M. Woydt, K.-H. Habig

Technisch-physikalische Grundlagen zum tribologischen Verhalten keramischer Werkstoffe

Nr. 134/ISBN 3-88314-615-3/1987

G. Andreas, G. Niessen

Über den Kernstrahlungseinfluß auf Dehnungsmeßstreifen

Nr. 135/ISBN 3-88314-618-8/1987

J. Ludwig, W.-D. Mischke, A. Ulrich

Untersuchungen über das Verhalten von Tankcontainern für unter Druck verflüssigte Gase bei Fallbeanspruchungen

Nr. 136/ISBN 3-88314-636-6/1987

H.-J. Deppe, K. Schmidt

Untersuchung zur Beurteilung von Brett-schichtverleimungen für den Holzbau

Nr. 137/ISBN 3-88314-637-4/1987

D. Aurich

Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte auf der Grundlage von Forschungsergebnissen auf dem Gebiete der Komponentensicherheit

Nr. 138/ISBN 3-88314-635-8/1987

M. Dogurike, F. Buchhardt

Zur geowissenschaftlichen Einordnung des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland und einer sicheren Auslegung technischer Systeme gegen den Lastfall Erdbeben

Nr. 139/ISBN 3-88314-658-7/1987

J. Olschewski, S.-P. Scholz

Numerische Untersuchung zum Verhalten des Hochtemperaturwerkstoffes Nimonic PE 16 unter monotoner und zyklischer Belastung bei Verwendung verschiedener plastischer und viskoplastischer Materialmodelle

Nr. 140/ISBN 3-88314-643-9/1987

K. Brandes, E. Limberger, J. Herter

Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members

Nr. 141/ISBN 3-88314-694-3/1987

F. Buchhardt, W. Matthees, G. Magiera, F. Mathiak
Zum Einfluß des Sicherheits- und Auslegungserdbebens auf die Bemessung von Kernkraftwerken

Nr. 142/ISBN 3-88314-695-1/1987

H. Treumann, G. Krüger, N. Pfeil,

S. von Zahn-Ullmann

Sicherheitstechnische Kenndaten und Gefährzahlen binärer Mischungen aus oxidierenden und verbrennlichen Substanzen

Nr. 143/ISBN 3-88314-701-X/1987

K. Brandes, E. Limberger, J. Herter

Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively

Loaded Reinforced Concrete Members

Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen bei Stoßbelastung
Experimental and numerical Investigations concerning Load Bearing Behaviour of Reinforced Concrete Members under Impact Load

Nr. 144/ISBN 3-88314-702-8/1987

F. Buchhardt, G. Magiera, W. Matthees, M. Weber, J. Altes

Nichtlineare dynamische Berechnungen zum Penetrationsverhalten des AVR- Reaktor-gebäudes

Nr. 145/ISBN 3-88314-711-7/1987

U. Holzöhner

Untersuchung selbstähnlicher Systeme zur Bestimmung von Materialeigenschaften von Reibungsböden

Nr. 146/ISBN 3-88314 714-1/1987

W. Schon, M. Mallon

Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wasserberieselungseinrichtungen als Brandschutzmaßnahme für Flüssiggas-Lagertanks

Nr. 147/ISBN 3-88314-720-6/1987

H.-D. Kleinschrodt

Lösung dynamischer Biege- und Torsionsprobleme von Stabsystemen aus dünnwandigen elastischen Stäben mit offenem Querschnitt mittels frequenzabhängiger Ansatzfunktionen

Nr. 148/ISBN 3-88314-774-5/1988

W. Müller

Theoretische Untersuchung von Variationsprinzipien für elastoplastisches Materialverhalten sowie Entwicklung und numerische Erprobung von Finite-Element-Verfahren für den ebenen Spannungszustand

Nr. 149/ISBN 3-88314-775-3/1988

U. Holzöhner

Bestimmung baugrunderdynamischer Kenngrößen aus der Untersuchung von Bodenproben

Nr. 150/ISBN 3-88314-776-1/1988

M. Weber

VG3D Zeichenprogramm für vektorgraphische Darstellung dreidimensionaler Strukturen

Nr. 151/ISBN 3-88314-785-0/1988

L. Auersch-Saworski

Wechselwirkung starrer und flexibler Strukturen mit dem Baugrund insbesondere bei Anregung durch Bodenerschütterungen

Nr. 152/ISBN 3-88314-796-6/1988

G. Plauk, G. Kretschmarin, R.-G. Rohrmann
Untersuchung des baulichen Zustandes und der Tragfähigkeit vorgespannter Riegel von Verkehrszeichenbrücken der Berliner Stadtautobahn

Nr. 153/ISBN 3-88314-797-4/1988

H. Sander, W.-W. Maennig

Magnetisches Verhalten von Eisenproben bei mechanischer Wechselbeanspruchung

Nr. 154/ISBN 3-88314-822-9/1988

K. Breitkreutz, P.-J. Uttech, K. Haedecke

Druckgesinterte Stähle als zertifiziertes Referenzmaterial für die Spektrometrie

Nr. 155/ISBN 3-88314-825-3/1988

L. Auersch

Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrserschütterungen: Theoretische Untersuchungen und Messungen am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental

Nr. 156/ISBN 3-88314-887-3/1989

G. Klamrowski, P. Neustupny, H.-J. Deppe,

K. Schmidt, J. Hundt

Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Faserzementen

Nr. 157/ISBN 3-88314-888-1/1989

E. Limberger, K. Brandes

Versuche zum Verhalten von Stahlbetonbalken mit Übergreifungsstößen der Zugbewehrung unter stoßartiger Belastung

Nr. 158/ISBN 3-88314-889-X/1989

R. Wäsche, K.-H. Habig

Physikalisch-chemische Grundlagen der Feststoffschmierung - Literaturübersicht

Nr. 159/ISBN 3-88314-890-3/1989

R. Müller, R. Rudolphi

Berechnung des Wärmedurchlaßwiderstandes und der Temperaturverteilung im Querschnitt von Hausschornsteinen nach DIN 18160, Teil 6

Nr. 160/ISBN 3-88314-917-9/1989

W. Matthees

Entwicklung eines Makroelementes durch Kondensation am Beispiel der Lastfälle Flugzeugabsturz und Erdbeben bei Boden-Bauwerk-Wechselwirkung mit biegeweichen Fundamenten

Nr. 161/ISBN 3-88314-920-9/1989

G. Mellmann, M. Maultzsch

Untersuchung zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Flachglas für bauliche Anlagen

Nr. 162/ISBN 3-88314-921-7/1989

W. Brünner

Untersuchungen zur Tragfähigkeit großer Glasscheiben

Nr. 163/ISBN 3-88314-922-5/1989

W. Brünner, G. Mellmann, W. Struck

Biegefestigkeit und Tragfähigkeit von Scheiben aus Flachglas für bauliche Anlagen

Nr. 164/ISBN 3-88314-934-9/1989

R. Helms, B. Jaenicke, H. Wolter, C.-P. Bork

Zur Schwingfestigkeit großer geschweißter Stahlträger

Nr. 165/ISBN 3-88314-935-7/1989

P. Gobel, L. Meckel, W. Schiller

Untersuchung zur Erarbeitung von Kennwerten bei Einrichtungsmaterialien (Holzwerkstoffen, Möbeln und Textilien) hinsichtlich der Formaldehyd-Emission - Teil B: Textilien

Nr. 166/ISBN 3-88314-936-5/1989

K. Breitkreutz

Modelle für Stereologische Analysen

Nr. 167/ISBN 3-88314-937-3/1989

A. Mitakidis, W. Rucker

Erschütterungsausbreitung im elastischen Halbraum bei transienten Belastungsvorgängen

Nr. 168/ISBN 3-88314-958-6/1990

F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi

Numerische Untersuchung geometriebedingter Wärmebrücken (Winkel und Ecken) unter Einsatz hochauflösender Farbgraphik bei Berücksichtigung der Tauwasserproblematik und des Mindestluftwechsels

Nr. 169/ISBN 3-88314-959-4/1990

Chr. Kohl, W. Rucker

Integration der Untergrunddynamik in das Programmsystem MEDYNA, dargestellt am Beispiel des Intercity Experimental (ICE)

Nr. 170/ISBN 3-88314-960-8/1990

P. Studt, W. Kerner, Tin Win

Untersuchung der mikrobiologischen Schädigung wassergemischter Kühlschmierstoffe mit dem Ziel der Verbesserung der Arbeitshygiene, der Minderung der Geruchsbelastung und der Menge zu entsorgender Emulsionen

Nr. 171/ISBN 3-88314-997-7/1990

F. Buchhardt

Ein Operator zur Koppelung beliebig benachbarter dynamischer Systeme am Beispiel der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung

- Nr. 172/ISBN 3-88314-998-5/1990
J. Vielhaber, G. Plauk
Grenztragfähigkeit großer Verbundprofilstützen
- Nr. 173/ISBN 3-88314-999-3/1990
B. Droste, J. Ludwig, B. Schulz-Forberg
Höherwertige Transporttechnik und ihre Konsequenzen für die Beförderung gefährlicher Güter
- Nr. 174/ISBN 3-88429-021-8/1990
D. Aurich
Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte
- Nr. 175/ISBN 3-88429-022-6/1990
W. Brocks, D. Klingbeil, J. Olschewski
Lösung der HRR-Feld-Gleichungen der elastisch-plastischen Bruchmechanik
- Nr. 176/ISBN 3-88429-035-6/1990
W. Matthees, G. Magiera
Iterative Dekonvolution der seismischen Basiserregung für den Zeitraum
- Nr. 177/ISBN 3-89429-090-0/1991
G. Schickert, M. Krause, H. Wiggnerhauser
Studie zur Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren bei Ingenieurbauwerken
- Nr. 178/ISBN 3-89429-429-9/1991
G. Andraea, J. Knapp, G. Niessen
Entwicklung und Untersuchung eines kapazitiven Hochtemperatur-Dehnungsaufnehmers für Einsatztemperaturen bis ca. 1000 °C
- Nr. 179 / ISBN 3-89429-100-1/1991
H. Eifler
Die Drehfähigkeit plastischer Gelenke in Stahlbeton-Plattenbalken, bewehrt mit naturhartem Betonstahl BSt 500 S im Bereich negativer Biegemomente
- Nr. 180/ISBN 3-89429-101-X/1991
E. Klement, G. Wieser
Zur numerischen Übertragbarkeit von Prüfungsergebnissen an Hausschornsteinen auf Schornsteine mit anderen lichten Querschnitten
- Nr. 181/ISBN 3-89429-105-2/1991
H. Czichos, R. Helms, J. Lexow
Industrial and Materials Technologies Research and Development Trends and Needs
- Nr. 182/ISBN 3-89429-145-1/1992
M. Weber
Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten im Bereich geometriebedingter Wärmebrücken
- Nr. 183/ISBN 3-89429-163-X/1992
F. Buchardt
Zur Dekonvolution im Zeitbereich
- Nr. 184/ISBN 3-89429-164-8/1992
M. Maultzsch, W. Stichel, E.- M. Vater
Feldversuche zur Einwirkung von Auftaumitteln auf Verkehrsbauwerke (im Rahmen des Großversuchs "Umweltfreundlicheres Streusalz")
- Nr. 185/ISBN 3-89429-165-6/1992
Renate Müller
Ein numerisches Verfahren zur simultanen Bestimmung thermischer Stoffeigenschaften oder Größen aus Versuchen Anwendung auf das Heißdraht-Parallelverfahren und auf Versuche an Hausschornsteinen
- Nr. 186/ISBN 3-89429-211-3/1992
B. Löffelbein, M. Woydt, K. -H. Habig
Reibungs- und Verschleißuntersuchungen an Gleitpaarungen aus Ingenieurkeramischen Werkstoffen in wässrigen Lösungen
- Nr. 187/ISBN 3-89429-216-4/1992
Th. Schneider, E. Santner
Mikrotribologie: Stand der Forschung und Anwendungsmöglichkeiten. Literaturübersicht
- Nr. 188/ISBN 3-89429-243-1/1992
K. Mallwitz
Verfahren zur Vorausermittlung der Setzung von Fundamenten auf geständerten Strecken infolge zyklischer Beanspruchung
- Nr. 189/ISBN 3-89429-244-X/1992
W. Matthees, G. Magiera
Impedanzeigenschaften von Finiten Elementen Modellen bei Integration im Zeitraum
- Nr. 190/ISBN 3-89429-245-8/1992
G. Zachariev
Untersuchung des Versagens thermoplastischer Kunststoffe im Kurzzeit-Zugversuch und Retardations-Zugversuch
- Nr. 191/ISBN 3-89429-246-6/1992
H.- M. Bock, S. Erbay, J. With
Kritische Stahltemperatur als charakteristischer Kennwert für die Feuerwiderstandsdauer von Bauwerkssystemen aus Stahl
- Nr. 192/ISBN 3-89429-329-2/1993
D. Aurich
Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte; Lokales Rißwachstum, Ermittlung des Rißwiderstandsverhaltens aus der Kerbschlagarbeit
- Nr. 193/3-89429-291-1/1993
W. Gerisch, Th. Fritz, S. Steinborn
Statistical Consulting in the Frame of VAMAS. The Role of the Technical Working Arfea/Advisory Group. Statistical Techniques for Interlaboratory Studies and Related Projects (VAMAS Report No. 13)
- Nr. 194/ISBN 3-89429-330-6/1993
U. Krause
Ein Beitrag zur mathematischen Modellierung des Ablaufs von Explosionen
- Nr. 195/ISBN 3-89429-331-4/1993
U. Schmidtchen, G. Würsig
Lagerung und Seetransport großer Mengen flüssigen Wasserstoffs am Beispiel des "Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Projekts. Überblick über die in Deutschland anzuwendenden Gesetze, Verordnungen und technischen Regeln
- Nr. 196/ISBN 3-89429-362-4/1993
D. Lietze
Untersuchungen über das Anlaufen von Detonationen im Innern geschlossener Systeme
- Nr. 197/ISBN 3-89429-400-0/1993
A. Skopp
Tribologisches Verhalten von Siliziumnitridwerkstoffen bei Festkörpergleitreibung zwischen 22 °C und 1000 °C
- Nr. 198/ISBN 3-89429-421-3/1994
St. Meretz
Ein Beitrag zur Mikromechanik der Interphase in polymeren Faserverbundwerkstoffen
- Nr. 199/ISBN 3-89429-422-1/1994
W. F. Rücker, S. Said
Erschütterungsübertragung zwischen U-Bahntunneln und dicht benachbarten Gebäuden
- Nr. 200/ISBN 3-89429-423-X/1994
D. Arndt, K. Borchardt, P. Croy, E. Geyer, J. Henschen, C. Maierhofer, M. Niedack-Nad, M. Rudolph, D. Schaurich, F. Weise, H. Wiggerhauser
Anwendung und Kombination zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Bestimmung der Mauerwerksfeuchte im Deutschen Dom
- Nr. 201/ISBN 3-89429-475-2/1994
U. Holzlöhner, H. August, T. Meggyes, M. Brune
Deponieabdichtungssysteme; Statusbericht
- Nr. 202/ISBN 3-89429-481-7/1994
J. Schmidt
Über eine Verteilungsfunktion mit Parametern für Median, Spannweite, Schiefe und Wölbung; Konzept und Anwendung
- Nr. 203/ISBN 3-89429-483-3/1994
B. Schulz-Forberg, J. Ludwig
Sicherheitsniveaus von Transporttanks für Gefahrgut

**Bundesanstalt für
Materialforschung und -prüfung (BAM)**

**Federal Institute for
Material Research and Testing**

**Institut Fédéral pour la
Recherche et l'Essai des Matériaux**

Unter den Eichen 87
D-12205 Berlin
☒ D-12200 Berlin

Telefon (0 30) 81 04-0
Telefax (0 30) 8 11 20 29
Telex 1 83 261 bamb d

- **Berichte**
- **Gutachten**
- **Zulassungen**
- **Zertifikate**
- **Tagungspapiere**
- **Prüfungszeugnisse**
- **Prüfstellenanerkennungen**

