

**Entwicklung einer anwendungsbezogenen Methodik der
Risikobeurteilung am Beispiel ausgewählter Szenarien des
Druckbehälterversagens von Erdgasfahrzeugen im
Straßenverkehr**



Von der Abteilung Sicherheitstechnik des Fachbereichs D der
Bergischen Universität Wuppertal
zur Erlangung des akademischen Grades

- Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) -
genehmigte Dissertation

von
Diplom-Ingenieur Christian Ganz

aus
Mülheim an der Ruhr

Gutachter:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Friederike Deuerler
Prof. Dr.-Ing. Volker Hageböling

Tag der mündlichen Prüfung:
28.08.2012

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20121115-091956-0

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3A468-20121115-091956-0>]

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Maschinenbau/Werkstofftechnik (ehemals Sicherheitstechnik/Materialkunde) an der Bergischen Universität Wuppertal.

Mein besonderer Dank gilt meiner Doktormutter Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. Friederike Deulerer für die Unterstützung während der letzten Jahre. Neben der Betreuung dieser Arbeit habe ich vor allem ihren respektvollen und lehrreichen Umgang bei der Arbeit in diesem Fachgebiet schätzen gelernt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Hageböling danke ich für die Übernahme des Koreferats. Seine weit über das übliche Maß hinaus gehende Hilfsbereitschaft trug im wesentlichen Maß zum Gelingen dieser Arbeit bei.

Weiterhin gilt mein Dank Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Bracke für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission sowie Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uli Barth für die Teilnahme an dieser.

Ebenfalls gilt mein Dank den Kollegen des Fachgebiet Maschinenbau/Werkstofftechnik. Besonders hervorzuheben ist hierbei Herr Dipl.-Phys.-Ing. Ingo Erdmann, dessen ständige und freundliche Hilfsbereitschaft und Kollegialität der letzten Jahre ich nicht missen möchte.

Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Georg W. Mair der Bundesanstalt für Materialprüfung und -forschung. Seinen Ideen und Anregungen sowie seiner steten fachlichen Betreuung ist ein Großteil dieser Arbeit geschuldet.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Freunden und Bekannten, die mir über die letzten Jahre zum Gelingen dieser Arbeit mit Rat und Tat zu Seite standen.

Nicht zuletzt danke ich meiner Familie, die mich über all die Jahre unterstützt hat. Meinen Eltern Ingrid und Erich Ganz gilt dieser Dank für die Möglichkeit, ein Studium zu bestreiten und den nötigen Rückhalt.

Kurzfassung

Im Zuge steigender Benzinpreise nimmt derzeit das Interesse an erdgasbetriebenen Kraftfahrzeugen seitens der Öffentlichkeit fortlaufend zu. Das zunehmende Interesse führt zu Diskussionen über die Vor- und Nachteile dieser Technologie, wobei die Erdgasspeicherung unter einem Betriebsdruck von 200 bar (CNG – Compressed Natural Gas) einen zentralen Punkt der Sicherheitsbedenken darstellt.

Die Anforderungen der Risikobeurteilung in Deutschland beruhen auf produktbezogenen Beschaffenheitsnormen, die in weiten Bereichen ein Indikator für das Maß an öffentlich-technischer Sicherheit darstellen. Mit Erfüllen dieser Anforderungen tritt die Vermutungswirkung in Kraft, dass der Regulierung der Risiken nach dem derzeitigen Stand der Technik Genüge getan wurde. Eine Wertigkeit des Risikos einer Technologie sowie die Akzeptanz der Gesellschaft werden mit dieser Methode nicht erfasst.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine praxisorientierte Methode entwickelt, das Risiko einer Technologie über seine Faktoren Eintrittswahrscheinlichkeit und Konsequenz zu bewerten und mittels objektiver Maßstäbe zu beurteilen. Zur Darstellung dieser Methode wird das Risiko des Druckbehälterversagens von Erdgasfahrzeugen für die Gesellschaft herangezogen, ermittelt und dargestellt.

Als Berechnungsgrundlage der Eintrittswahrscheinlichkeit dienen Daten des Statistischen Bundesamtes sowie des Kraftfahrt-Bundesamtes, wobei Faktoren wie Ortslage, Unfallart und Zulassungsdichte von CNG-Fahrzeugen eingebunden und so zu einer Eintrittswahrscheinlichkeit unter bestimmten definierten Bedingungen verknüpft werden.

Für die Darstellung der Konsequenz sind keine Quellen für Daten bekannt. Die Ermittlung der Konsequenzen erfolgt schließlich über die Verknüpfung und Korrelation verschiedener Informationen zu einer neuen Methodik der Konsequenzermittlung. Die so ermittelten Werte werden mit Werten der Personendichte kombiniert, um so eine Maßzahl des Risikos zu erhalten.

Die entwickelte Methode stellt mit Hilfe der Risikobeurteilung eine Alternative zu der in Deutschland angewandten Methodik dar. Aus den ermittelten Risikowerten einer Technologie lassen sich anwendungsbezogene Anforderungen an diese formulieren. So wird nicht nur die Sicherheit der Technologie festgelegt, sondern auch gesellschaftliche Akzeptanz berücksichtigt. Unter Zuhilfenahme der Wahrscheinlichkeitsrechnung bietet diese Methodik die Möglichkeit der Abkehr von einer produktspezifischen Beschaffenheitsnorm hin zu anwendungsbezogenen Anforderungen. Eine Einschränkung der Schutzzieleformulierung oder der öffentlich-technischen Sicherheit ist damit nicht zu befürchten.

Abstract

As the costs of petrol continues to increase, the public interest in alternative fuel also increase. This brings forth a discussion about the advantages and disadvantages of CNG-technology (Compressed Natural Gas). The central safety concern is the filling of pressure-vessels with natural gas under 200 bar operating pressure.

The German requirements on risk-assessment are based on product-related standards, which indicate the degree of technical safety. The fulfilment of these requirements leads to an assumption of conformity, and that the requirements have been achieved with use of the latest state of the art technology. This method neither covers the quality rating of risk nor the public acceptance of the technology.

Within the framework of this dissertation, a use-oriented method has been developed in order to analyse the risk of a technology via its criteria probability and consequence and to evaluate it by means of objective standards. As a demonstration of this method, the risk of pressure-vessel rupture of CNG-vehicles is analysed and evaluated.

Based on official data, the probability was calculated, whereby the parameters such as site and kind of road traffic accident were considered, as well as the number of CNG-vehicles. As there was no official data on consequences, these had to be calculated via linking several sources of information about consequences, to a new method of consequence evaluation. Combining probability and consequence with the number of affected persons generates an index of risk.

The newly developed method is an alternative to the current method of risk-assessment in Germany. Use-oriented requirements may be generated from the calculated risk-indices of a technology. In doing so the safety, as an inverse index of risk, of a technology is generated, as well as public acceptance. With the help of probability theory, this method is an alternative to generate use-oriented rather than a product-related standard, without reducing safety for the public.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	VII
1. Einleitung	1
1.1. Der Risikobegriff im rechtlichen Kontext	1
1.2. Problembeschreibung und Zielsetzung	3
2. Grundlagen der Risikobetrachtung	7
2.1. Unterschiedliche Darstellungsweisen des Risikos	8
2.2. Deterministische und Probabilistische Risikoanalyse	13
2.3. Risikobeurteilung in Deutschland	15
2.4. Kriterien der Risikoanalyse	18
2.5. Technische Risikobeurteilung im internationalen Vergleich	20
2.6. Problematik der deutschen Methodik der Risikoanalyse	23
2.7. Risikomanagement und Zielsetzung	24
3. Systembeschreibung	28
3.1. Druckbehälter	28
3.2. Anforderungen technischer Regelwerke	31
3.3. Physikalische Grundlagen der Explosion und Druckwellen	33
3.4. Aussagen der Systembeschreibung	37
4. Theoretische Grundlagen der Entwicklung einer Methodik der Risiko- beurteilung von Druckbehältern im Straßenverkehr	38
4.1. Konsequenzen	38
4.1.1. Konsequenzen des Druckbehälterberstens	41
4.1.2. Konsequenzerfassung	48
4.2. Eintrittswahrscheinlichkeit	49
4.2.1. Relative Häufigkeit und Eintrittswahrscheinlichkeit	49
4.2.2. Einflussfaktoren der Unfallwahrscheinlichkeit und -schwere	52
4.2.3. Vergleich der Unfallzahlen im europäischen Umfeld	58
4.3. Personendichte	59
4.3.1. Personendichte nach Bebauungsstruktur	60
4.3.2. Personendichte nach Tätigkeitsfeldern	61
4.4. Risikokriterium	61
5. Entwicklung der Methodik zur Durchführung der Risikoanalyse	63
5.1. Konsequenzen	63
5.1.1. Idealisierung - Korrelation der Fatalitätswahrscheinlichkeit als Folge des Spitzenüberdrucks zu den erzielten Werten der Druck- belastung	67

5.1.2.	Berechnung von Fatalitätswahrscheinlichkeiten und Darstellung der Konsequenzen mittels Risiko-Zonen	75
5.2.	Eintrittswahrscheinlichkeit	77
5.2.1.	Relative Häufigkeit der relevanten Unfallarten	77
5.2.2.	Faktoren der Druckbehälterschädigung durch Impact-Unfälle im Straßenverkehr	79
5.2.3.	Eintrittswahrscheinlichkeit der relevanten Unfallarten unter Zuhilfenahme der Poisson-Verteilung	87
5.3.	Einfluss der Personendichte	94
6.	Entwicklung von Methoden zur Bestimmung des Risikos	96
6.1.	Entwicklung eines Software-Prototypen	96
6.2.	Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung der Streubreite der Konsequenzen	99
6.3.	Parameterstudie zur Korrelation der Konsequenzen über das Behältervolumen und den Behälterinnendruck	104
7.	Risikobeurteilung am Beispiel ausgewählter Szenarien	108
7.1.	Wohngebiet - Stadtzentrum	110
7.2.	Außerstädtischer Bereich - Wohngebiete	111
7.3.	Weitere innerstädtische Szenarien	112
7.4.	Erkenntnisse aus den ausgewählten Szenarien	113
7.5.	Abgleich der angewandten Methodik mit einem LPG-Güterwaggonunfall	114
8.	Ergebnisse der Risikobeurteilung	116
9.	Erkenntnisse und Risikoregulierung	118
9.1.	Erkenntnisse der Methodik	118
9.2.	Erkenntnisse der Risikobeurteilung	119
9.3.	Risikoregulierung	120
10.	Schlussbetrachtung und Ausblick	122
10.1.	Zusammenfassung	122
10.2.	Weiterentwicklung	126
	Literaturverzeichnis	127
	Abbildungsverzeichnis	147
	Tabellenverzeichnis	149
A.	Anhang	151
A.1.	Heuristiken	151
A.2.	Alltagsrisiken	153
A.3.	Anforderungen an Druckbehälter nach ADR	154
A.4.	Vergleich des Modells des TNT-Äquivalents mit einem durchgeführten Versuch	157
A.5.	Statistik der Unfallarten	161
A.6.	Europäische Unfallzahlen	165
A.7.	Crash-Verhalten nach verschiedenen Regelwerken	169

A.8. Sonderfall: Pkw-Brand	173
A.9. Risikobeurteilung am Beispiel ausgewählter Szenarien für das Ereignis Brand	175
A.10. Korrelation der Konsequenzen zu Behältervolumen und -innendruck . . .	180
A.11. Technische und infrastrukturelle Möglichkeiten der Risikoregulierung . .	182

Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
A	m ²	Fläche
a	m	Abstand vom Mittelpunkt der Detonationsquelle
B	m	Breite der Fensterscheibe
E	J	Energie
e		Euler'sche Zahl
E(X)		Erwartungswert
H		Eintrittshäufigkeit des Schadensereignisses
K		Konsequenz, Schadensausmaß
k		Anzahl der Ereignisse
L	m	Länge der Fensterscheibe
m	kg	Masse
N		Anzahl betroffener Personen
n		Anzahl der Stichproben
n		Teilchenzahl in der allgemeinen Gasgleichung
P		Punkt des Grenzwerts im Diagramm
P	%	Wahrscheinlichkeit
p	bar	Druck
R		Risiko, Risikozahl als Maß für das Risiko,
R _m		Allgemeine Gaskonstante
r	m	Radius
S		Steigung
T	°C	Temperatur
V	m ³	Volumen
v	m/s	Geschwindigkeit
x		Punkt auf der jeweiligen Ordinate
y		Punkt auf der jeweiligen Ordinate
z	-	skaliertes Abstand

griechische Formel- zeichen	Einheit	Beschreibung
Δh_c	J/kg	spezifische Verbrennungsenthalpie
Δ	%	Änderung
η	-	Wirkfaktor
μ		Mittelwert
ϕ	Pers./km ²	Personendichte
π		Kreiszahl
ψ		betroffene Personenzahl innerhalb einer Risiko-Zone
ρ	kg/m ³	Dichte
$\sigma^2(X)$		Varianz
φ		anwesende Personenzahl innerhalb einer Risiko-Zone

Indizes	Einheit	Beschreibung
0		Umgebungsbedingungen
Beh		(Druck-)Behälter
d		Todesfall
Fatal		Fatalität
ges		Gesamt
Gesucht		gesuchter Wert
kin		kinetisch
n		Nummer der Stichprobe
real		Real
Referenz		Referenzwert
S0		Spitzenwert bei Umgebungsbedingungen
Spitze		Spitzenwert
TNT		Trinitrotoluol

Abkürzung	Beschreibung
AGW	Arbeitsplatzgrenzwert
ALARP	As Low As Reasonable Possible/Practicable – so gering wie vernünftiger Weise machbar/sinnvoll
CNG	Compressed Natural Gas – unter Druck gespeichertes Erdgas
F-N-Kurve	Frequency of occurrence, Number of death
IR	Individuelles Risiko
Kfz	Kraftfahrzeug
LPG	Liquefied Petroleum Gas
MAK	Maximale Arbeits-Konzentration
Pkw	Personenkraftwagen
RZ	Risiko-Zone
SR	Soziales Risiko
TRK	Technische Richtkonzentration

1. Einleitung

Mit der Zunahme an Anforderungen der Luftreinhaltung durch Abgase und Feinstaub von Kraftfahrzeugen in Stadtgebieten wird nach neuen Energieträgern und entsprechenden Speichertechnologien gesucht. Auf Grund der immer stärker steigenden Kosten von Rohöl und seinen Produkten ist auch der Endverbraucher neuen Technologien gegenüber nicht abgeneigt. Neben Benzin und Diesel haben sich unter Druck gespeichertes Erdgas (CNG – Compressed Natural Gas) und Autogas (LPG – Liquefied Petroleum Gas) als alternative Kraftstoffe etabliert. Erdgas, häufig als Nebenprodukt der Erdölförderung, ist in großen Mengen vorhanden und trotz seiner Kopplung an den Ölpreis um ein Vielfaches preisgünstiger als Erdöl. So haben nicht nur viele Verkehrsbetriebe (z.B. Berlin, Hannover, Mainz und Oldenburg) auf Erdgas umgestellt, auch waren im Jahr 2010 insgesamt 71.519 Erdgasfahrzeuge [KB11c] auf deutschen Straßen zugelassen.

Erdgas als Energieträger hat den Vorteil einer sauberen Verbrennung; gegenüber anderen fossilen Energieträgern verbrennt Erdgas unter Abgabe von bis zu 25 % weniger CO₂. Auf Grund seines gasförmigen Aggregatzustands verbrennt Erdgas nahezu ohne Rußentwicklung und darüber hinaus nahezu vollständig. Die Emission von Feinstaub und anderen schädlichen Verbrennungsprodukten des Energieträgers können auf diese Weise deutlich reduziert werden. Darüber hinaus ist die Emission der Motorengeräusche von Erdgasfahrzeugen geringer als bei herkömmlichen Motoren. [ASU05]

Der Nachteil der Druckgasspeicherung von Erdgas liegt in seiner gegenüber Benzin und Diesel geringeren Energiedichte und dem damit einhergehenden erhöhten Platzbedarf. Benzin und Diesel weisen eine Energiedichte von 8,6 bzw. 9,9 kWh/l auf, Erdgas von 13,25 kWh/kg [EM11]. Bei der Speicherung unter Betriebsdruck von 200 bar [MCS11] wird eine CNG-Energiedichte von 2,5 kWh/l erreicht [Mai95]. Da sich Behältervolumen und Betriebsdruck indirekt proportional zueinander verhalten, kann durch Erhöhung des Betriebsdrucks das Behältervolumen im gleichen Maße reduziert werden. Die Befürchtung ist jedoch, dass mit steigendem Betriebsdruck das Gefahrenpotential des Druckbehälters zunimmt und somit zur „Bombe“ im Fahrzeug wird. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik zeigt auf, dass sowohl das aktuell vorhandene Risiko durch Druckbehälter im Straßenverkehr akzeptabel ist als auch durch Erhöhung des Betriebsdrucks bei gleichzeitiger Reduzierung des Behältervolumens keine Zunahme des Risikos erfolgt.

1.1. Der Risikobegriff im rechtlichen Kontext

Das Risiko, welches aus der Nutzung von Technologien entsteht, ist nicht nur Untersuchungsgegenstand in der Technik selbst, sondern vielmehr auch in den Rechts- und Gesellschaftswissenschaften [Ren81; Row77]. Der rechtliche Aspekt des Risikos ist mit dem Begriff der Gefahr verknüpft. Unter einer Gefahr wird im rechtlichen Sinne „eine Sachlage verstanden, die bei ungehindertem Ablauf des objektiv zu erwartenden Geschehens

zu einem Schaden führt, wobei für den Schadenseintritt eine hinreichende Wahrscheinlichkeit verlangt wird und von einem Schaden erst gesprochen werden kann, wenn eine nicht unerhebliche Beeinträchtigung vorliegt“ [Bun; Arb09] [vgl. auch Wol07; HHW87]. Dem gegenüber bezeichnet die Gefährdung die Möglichkeit eines Schadens bzw. negativen Ereignisses, ohne dabei jedoch Anforderungen an dessen Wahrscheinlichkeit zu stellen. Das Risiko, ingenieurwissenschaftlich dargestellt als das Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und dem Ausmaß möglichen Schadens, stellt somit eine quantitative Größe zur Beschreibung der Gefahr dar. [Bun; Arb09; Wol07; HHW87; Bve78]

Die staatliche Verantwortung zur Beurteilung und Regulierung technischer Risiken lässt sich auf Artikel 2, Absatz 1 und 2 sowie Artikel 20a des Grundgesetzes [Gru10] zurückführen. Das in Artikel 2 Grundgesetz verbürgte Recht auf Leben und körperliche Unversehrtheit verpflichtet die staatlichen Organe zum hoheitlichen Schutz der Bevölkerung vor äußeren negativen Einflüssen [Wol07]. Hierunter zählen insbesondere rechtswidrige Eingriffe, aber auch Gefahren, die sich aus der zunehmenden Technisierung ergeben. Der in Artikel 20a Grundgesetz verankerte Schutz der natürlichen Lebensgrundlage verpflichtet die staatlichen Organe zu einer aktiven Umweltschutz- und Nachhaltigkeitspolitik. Im Bereich des technischen Sicherheitsrechts bedeutet dies den Schutz der Bevölkerung vor Gesundheits- und anderen Lebensrisiken, die durch die Entwicklung und Anwendung technischer Produkte, Prozesse, Anlagen und Systeme entstehen [Wol07; SFK04].

Risiken selbst stellen an sich zwar noch keine Grundrechtsverletzung dar, allerdings machte das Bundesverfassungsgericht im Kalkar-Beschluss [Bve78] deutlich, dass jedem Risiko, und somit der Möglichkeit einer Gefahr, grundsätzlich eine zukünftige Grundrechtsgefährdung innewohnt und so ein Widerspruch zum Grundgesetz entstehen kann. Die staatliche Fürsorgepflicht geht demnach soweit, Regelungen vorzugeben, die Risiken regulieren sollen. Ziel dieser Regelungen ist das Erkennen, Analysieren, Bewerten, Beurteilen und Regulieren dieser Risiken, um so die Möglichkeit von Verletzungen des Grundgesetzes einzudämmen. Darüber hinaus müssen diese Regelungen alle möglichen ihrem Geltungsbereich innewohnenden Risiken berücksichtigen. Vor 1975 galt eine Technologie als sicher, sobald sie die behördlichen Genehmigungsverfahren erfolgreich passiert hatte, was der Heuristik des Institutionsvertrauens (vgl. Anhang A.1) entspricht. Ein Versagen der Technologie (Störfall, Unfall, etc.) wurde dann auf höhere Gewalt oder nicht vorhersehbare Ereignisse geschoben. [Har99] Mit dem Erstellen der ersten Risikoanalyse im Rasmussen-Bericht [KHMB77] hat sich die Erkenntnis durchgesetzt, dass keine Technologie absolut sicher ist; es ist immer ein bestimmtes Restrisiko vorhanden. Hierdurch ist es notwendig geworden, auch unwahrscheinliche Ereignisse oder solche, die als nicht kontrollierbar gelten (Erdbeben, Flut, etc.) in der Risikoanalyse zu berücksichtigen. Wo diese Fürsorgepflicht des Staates beginnt, ist abhängig von der Art der Risiken, ihren Auswirkungen und Konsequenzen sowie der Wahrscheinlichkeit des Eintretens. Je nach Art der entstehenden Konsequenzen und dem Ausmaß der Auswirkungen können bereits geringste Eintrittswahrscheinlichkeiten ausreichen, die Fürsorgepflicht des Staates konkret auszulösen [Wol07; Bve78] und so für die Sicherheit der Bevölkerung gegenüber menschlich geschaffenen Risiken Sorge zu tragen.

Der Begriff Sicherheit stellt somit im juristischen Sinne die Abwesenheit von Gefahr dar. Der entscheidende Punkt ist jedoch, dass absolute Sicherheit im Sinne eines Null-Risikos nicht zu erreichen ist [Wol07; HHW87; Har99]. Vielmehr wird versucht, durch Analyse und Regulierung der Risiken diese dem Ideal der Risikofreiheit anzunähern. Welchen Grad an Sicherheit eine Technologie aufweisen muss, um als ausreichend sicher zu gel-

ten, kann nicht allgemein festgelegt werden. Solange die Rechtsprechung die Entwicklung, Herstellung und Verwendung risikobehafteter Technologien nicht untersagt, sondern unter Einhaltung bestimmter Sicherheitsstandards zulässt, so definiert sie über diese Sicherheitsstandards gleichsam das verbleibende und als rechtlich akzeptabel anzusehende Risiko einer Technologie [Mar84; Mar82; Mar81]. Dieses rechtlich erlaubte Risiko wird Restrisiko genannt. Es wird dadurch definiert, dass ein aus ihm entstehender Schaden nach dem derzeitigen Stand der Erkenntnisse als ausgeschlossen gelten kann [Wol07]. Die Fürsorgepflicht des Staates liegt nunmehr darin, die den jeweiligen Technologien innewohnenden Restrisiken zu ermitteln und die Anwendung von Maßnahmen zu deren Regulierung durchzusetzen.

Diese Verpflichtung unterliegt wiederum einer Regulierung, die als Maßstab der praktischen Vernunft bezeichnet wird. Dieser fordert, nicht alle Risiken in ihrem Grundsatz zu unterbinden, sondern nur solche, die eine Schwelle des gesellschaftlich akzeptablen Risikos überschreiten. *„Ungewißheiten jenseits dieser Schwelle praktischer Vernunft sind unentrinnbar und insofern als sozialadäquate Lasten von allen Bürgern zu tragen.“* [Bve78] Das jenseits dieser Schwelle verbleibende Risiko wird als durch die Gesellschaft rechtlich hinnehmbares Restrisiko bezeichnet, welches mit den Vorteilen der Nutzung einer Technologie einhergeht [Wol07]. Ziel der rechtlichen Risikoregulierung ist es demnach, Grenzwerte des gesellschaftlich hinnehmbaren Restrisikos zu definieren und dafür Sorge zu tragen, dass die Einhaltung dieser Vorgaben erfolgt. Der Maßstab der praktischen Vernunft lässt insbesondere die Charakterisierung des Risikos durch die Methode der ingenieurwissenschaftlichen Risikobetrachtung zu, wohingegen die Betrachtung des Risikos unter sozialwissenschaftlichen Gesichtspunkten eher die Wahrnehmung von Risiken und ihr subjektives Empfinden berücksichtigt. Im Gegensatz zur theoretischen Vernunft, welche die Erkenntnis von Ideen praktiziert, ist die praktische Vernunft bemüht, auf Erkenntnissen beruhende und gleichzeitig praktisch erfüllbare Regulationsmechanismen zu entwickeln, wobei stets ein Restrisiko verbleibt. Nicht die absolute Schadensfreiheit wird gefordert, sondern der praktische Ausschluss möglicher Schadensfälle nach dem derzeitigen Erkenntnisstand von Wissenschaft und Technik. [Ver07b]

1.2. Problembeschreibung und Zielsetzung

Den Anforderungen an die Sicherheit einer Technologie steht die Tatsache entgegen, dass diese nach festen Vorgaben in Verbindung mit Sicherheitsfaktoren oder pauschalen Lebensdaueranforderungen ausgelegt werden; im Falle von Druckbehältern z. B. Wanddicke, Festigkeit und Berstdruck. Diese Anforderungen sind historisch gewachsen und ergeben sich im Falle von Druckbehältern aus der langen Tradition an Druckbehältervorschriften, ausgehend von den allgemeinen Bestimmungen für die Auslegung von Dampfkesseln 1871 über die deutschen Dampfkesselverordnungen [Dam11]. Auch die aktuellen Regelwerke [ECE08; ADR05; RL994; RL996; RL208; ADN06; GGV06; GGV09; RL199; Ort04; Dru99; RL8a; RL8b; RL8c] beziehen sich nicht auf die Konsequenzen und Besonderheiten der Druckbehälter im Versagensfall. Vielmehr stehen statische Vorgaben zu Sicherheitsfaktoren bzgl. Berstdruck, Lastwechselzahlen, usw. im Vordergrund. Im Kapitel 6.2.1.1.1 des ADR [ADR05] heißt es: *„Die Druckgefäße und deren Verschlüsse müssen so ausgelegt, bemessen, hergestellt, geprüft und ausgerüstet sein, dass sie allen Beanspruchungen, einschließlich Ermüdung, denen sie bei normalem Gebrauch und unter normalen Beförderungsbedingungen ausgesetzt sind, standhalten.“* Diese Aussage zeigt, dass weder

anwendungsbezogene Besonderheiten des Druckbehälters noch dessen Konsequenzen im Versagensfall Berücksichtigung finden. Aus diesem Grund wäre die Abkehr von der produktspezifischen Beschaffenheitsnorm hin zu anwendungsbezogenen Anforderungen sinnvoll, wobei eine Reduzierung der öffentlich-technischen Sicherheit ausgeschlossen werden muss. Hierzu müssen anwendungsbezogene zuverlässigkeitsorientierte Prüfmethode entwickelt werden, die die Sicherheit des Druckbehälters zu garantieren.

Die Begrifflichkeit des Risikos rückt bei der aktuellen deutschen Methodik in den Hintergrund. Werden die produktbezogenen Anforderungen erfüllt, so gilt eine Technologie in Deutschland als sicher, wobei unter Sicherheit die Abwesenheit von Gefahr verstanden wird. Es wird somit von einer Null-Risiko-Theorie, einem System der absoluten Sicherheit, ausgegangen, welches nicht zu erreichen ist [Wol07; HHW87; Har99]. Welches Risiko von einer Technologie ausgeht und ob dieses Risiko akzeptabel ist, wird mit dieser Methodik nicht erfasst. Ein weiterer Punkt ist die Tatsache, dass die Akzeptanz von Risiken nicht alleine an Werten festgemacht werden kann. Erst das Empfinden des Menschen gegenüber den Risiken einer Technologie lassen Risiken akzeptabel oder nicht akzeptabel werden. So ist zur Wahrung der öffentlichen Sicherheit nicht alleine die Tatsache ausschlaggebend, dass eine Technologie sicher ist, sondern vielmehr muss diese auch von der Öffentlichkeit akzeptiert werden.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer risikobasierten anwendungsorientierten Methodik, welche das Risiko einer Technologie auf Grund der von ihr zu erwartenden Konsequenzen beschreibt. In diesem Rahmen wird sich, zur Darstellung der Methodik, auf die Technologie Druckbehälter als Treibgasspeicher in Personenkraftwagen des Straßenverkehrs beschränkt. Auslösendes Ereignis des Risikos ist der Verkehrsunfall; andere Ereignisse (Fahrzeugbrand, Vandalismus, Materialfehler, etc.) bleiben unberücksichtigt. Da es sich bei dieser Methodik nicht, wie bei den bisherigen Regelungen, um produktbezogene Anforderungen handelt, sondern um eine konsequenzbasierte anwendungsbezogene Analyse, müssen im Vorfeld Grenzen der Betrachtung gezogen werden.

Geht man vom eingangs erwähnten Schreckensszenario der „fahrenden Bombe“ aus, so ergibt sich als logische Schlussfolgerung der Risikoanalyse die Betrachtung der Konsequenzen aus dem Versagen von CNG-Druckbehältern unter Abgabe von Überdruck an die Umgebung. Hierbei müssen das Bersten und Explodieren des Druckbehälters unterschieden werden. Kernpunkt der Untersuchungen in dieser Arbeit ist die Betrachtung des Druckbehälterzerknalls (Bersten) ohne anschließende Zündung des Energieträgers und somit unter Ausbleiben einer chemischen Explosion. Die Konsequenzen der anschließenden chemischen Explosion werden ansatzweise am Rande der einzelnen Kapitel beschrieben, da die Konsequenzen der Druckbehälterexplosion von vielen unterschiedlichen Faktoren determiniert werden und keine ausreichende statistische Grundlage dieser Ereignisse vorliegt. Darüber hinaus muss, um unterschiedliche Risiken vergleichbar zu machen, eine bestimmte Konsequenz gewählt werden, die wiederum allgemein akzeptierten Grenzwerten unterliegt. Im Zuge dieser Arbeit wird die Konsequenz Todesfall angesetzt, die aus den Auswirkungen der Druckwelle resultiert. Da nur punktuelle Daten der Fatalitätswahrscheinlichkeit durch Überdruck vorhanden waren, wird in einem weiteren Schritt die Fatalitätswahrscheinlichkeit durch primären und sekundären Trümmerflug infolge des Spontanversagens des Druckbehälters bestimmt. Diese Werte ergeben eine punktuelle Grenze, an der eine bestimmte Fatalitätswahrscheinlichkeit durch die unterschiedlichen Arten des Überdrucks vorhanden ist. Aus dem Zusammenhang dieser Werte lassen sich Bereiche, sogenannte Risiko-Zonen, erstellen, innerhalb derer eine bestimmte Fatalitätswahrschein-

lichkeit auf der gesamten Fläche der Risiko-Zone vorherrscht. In Kombination mit der anwesenden Personendichte, je nach Szenario, lässt sich die Anzahl der durch das Ereignis betroffenen Personen bestimmen.

Als zweiter Faktor zur Bestimmung des Risikos dient die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses, das zu den oben dargestellten Konsequenzen führt. Da die Furchtassoziation der „fahrenden Bombe“ sich in erster Linie auf das Explodieren des CNG-Druckbehälters infolge eines Verkehrsunfalls bezieht, wird die Eintrittswahrscheinlichkeit von Unfällen im Straßenverkehr ermittelt, die geeignet sind, einen Druckbehälterzerknall zu bewirken. Hierbei finden wiederum nur diejenigen Unfälle Berücksichtigung, die zu Personenschaden oder schwerwiegendem Sachschaden [Ver07a; Ver11b] führen. Auf Grund der Konstanz der Unfallzahlen der letzten Jahre kann von der relativen Häufigkeit vergangener Unfälle auf die zukünftige Eintrittswahrscheinlichkeit geschlossen werden. Weiterhin wird, auf Grund der Datenlage, unterstellt, dass sich alle Unfälle unter Beteiligung von Personenkraftwagen ereignen. Aus den statistischen Daten lassen sich Werte der Wahrscheinlichkeit für das Eintreten von Straßenverkehrsunfällen, die geeignet sind, zu einem Zerknall des Druckbehälters zu führen, generieren. Weiterhin wird bei dieser Methodik die Wahrscheinlichkeit der Druckbehälterschädigung infolge Unfall, in Anlehnung an [SAE11; Mai09], auf 1 % der relevanten Unfälle gesetzt. Zusätzlich wird das Verhältnis der Zulassungszahlen herkömmlich betriebener Personenkraftwagen zu denen mit CNG-Antrieb ermittelt. Unter Berücksichtigung der drei Faktoren

- Wahrscheinlichkeit eines relevanten Unfalls,
- Wahrscheinlichkeit der Druckbehälterschädigung bei relevantem Unfall und dem
- Verhältnis von erdgasbetriebenen Personenkraftwagen zu solchen mit herkömmlichen Antriebssystem

wird unter Zuhilfenahme der Poisson-Verteilung das personenbezogene Individuelle Risiko ermittelt, auf Grund der unterschiedlichen Arten der Druckwirkung eines berstenden CNG-Druckbehälters, ausgelöst durch einen Straßenverkehrsunfall, ums Leben zu kommen.

Die Anwendung der beschriebenen Methode wird an Hand ausgewählter Szenarien dargestellt. In diesem Schritt wird den ermittelten Radien der Risiko-Zonen eine szenariospezifische Personendichte zugeordnet, aus der sich die Höhe der Konsequenz ergibt. In Kombination mit den szenariospezifischen Werten der Eintrittswahrscheinlichkeit ergibt sich ein Risikowert, der auf Grundlage international angewandter Verfahren der semiprobabilistischen Risikobeurteilung beurteilt wird.

Durch diese Methode ergibt sich eine andere Blickweise auf die Beurteilung der Sicherheit von Druckbehältern. Diese Methode beurteilt das Risiko, und somit als reziproken Wert die Sicherheit, nicht über produktbezogene Prüfungen von Technologien und somit über den Ansatz, dass wenn produktbezogene Anforderungen erfüllt werden, von dieser Technologie kein Risiko ausgeht. Vielmehr wird mit dieser Methode das einer Technologie innewohnende Risiko ermittelt und an Hand akzeptierter Grenzwerte von Konsequenz und Wahrscheinlichkeit beurteilt. Hierdurch ergibt sich die Möglichkeit eine Technologie einer risikobasierten anwendungsorientierten Prüfung zu unterziehen und so Rückschlüsse auf die Sicherheit des Produkts zu ziehen. Die Vorgehensweise zeigt, dass diese Methodik geeignet ist, das Problem der Risikobetrachtung von Druckbehältern im Straßenverkehr zu bewerten. Auf Grundlage dieser Methodik lässt sich ebenfalls das Risiko durch Druckfreisetzung anderer Technologien bestimmen. Sie stellt somit eine alternative Möglichkeit dar,

das Risiko einer Technologie zu bestimmen und zu bewerten, und so Rückschlüsse auf die Auslegung dieser Technologie zu ziehen.

Der Vergleich der regelwerksbasierten produktbezogenen Methode mit der hier vorgestellten zeigt die Ähnlichkeit der Ergebnisse der Bewertung auf. Aus diesem Grund wird der Lösungsansatz der hier beschriebenen Methode als richtig angesehen, womit die Methode geeignet ist, das Problem der Risikobetrachtung von Druckbehältern im Straßenverkehr zu bewerten.

2. Grundlagen der Risikobetrachtung

Die historische Herkunft des Begriffs Risiko ist nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht eindeutig zurückverfolgbar. Nach [Dro89] wurde das deutsche Fremdwort Risiko im 16. Jahrhundert als kaufmännischer Terminus aus dem italienischen *risico*, *risco* (heute: *rischio*) entlehnt, dessen weitere Herkunft unsicher ist. Von diesem abgeleitet stammt auch das französische Wort *risque* für „Gefahr, Wagnis“ und das Verb *risquer* „in Gefahr bringen, aufs Spiel setzen, wagen“. In [Bro07] heißt es: „von älter italienisch *ris(i)co*, eigentlich >Klippe (die zu umschiffen ist)<“ und in [Klu02] wird aus dem spanischen Wort *risco* (Klippe) auf eine Gefahr für Schiffe geschlossen. In [Dud03] wird Risiko als ein „mit einem Vorhaben, Unternehmen o. Ä. verbundenes Wagnis“ bezeichnet. Die Entstehungsgeschichte des Begriffs Risiko wie wir ihn heute kennen, entstand aus dem Fernhandel italienischer Städte im Mittelalter. Der Fernhandel durch Seeverkehr war eine planbare wie unsichere Angelegenheit. Diese Unsicherheit wurde nicht als Gefahr benannt, also als Bedrohung aufgefasst, gegen die man nichts ausrichten konnte, sondern als Risiko bezeichnet. Der Kaufmann begab sich also nicht wissentlich in eine Gefahr und hoffte auf einen günstigen Ausgang, sondern stellte sich einer kalkulatorischen Herausforderung. Diese Herausforderung wurde als berechenbares Wagnis gesehen, dass sich nur dann negativ bemerkbar machte, wenn falsche Kalkulationen oder keine Vorsichtsmaßnahmen getroffen wurden. [Ver07b] Dies entspricht im Grunde genommen der heutigen Vorstellung von einem handlungsbedingten Risiko. Auf der einen Seite steht der Nutzen einer Handlung, auf der anderen die möglichen Konsequenzen durch Nichterreichen des Zielzustandes.

Der heutige Begriff des Risikos ist weithin geläufig. Dennoch lässt sich keine allgemeingültige Beschreibung dieses Begriffs definieren. Dies liegt zum einen an dessen vielseitiger Verwendbarkeit für verschiedene Fachdisziplinen, seien sie technischer, soziologischer, wirtschaftlicher oder auch anderer Natur, zum anderen an dem Standpunkt, von dem aus man ein Risiko betrachtet und definiert. Es wird von wirtschaftlichen Risiken gesprochen, von gesundheitlichen Risiken, von Misserfolgsrisiken, von Unfallrisiken und vielen mehr. In der Umgangssprache wird der Begriff Risiko sowohl für Gefahren, die negative Ereignisse auslösen können, an sich aber nicht beeinflussbar sind, wie z. B. Blitz, Erdbeben, gebraucht, als auch für Tätigkeiten, die zu negativen Ergebnissen führen können, wie z. B. Motorrad fahren, Extremsportarten, Wertpapierhandel. Darüber hinaus werden mittlerweile Objekte (Sachen, Dinge) und Subjekte (Personen, Personengruppen), die Gefahren erzeugen können oder ihnen ausgesetzt sind, als Risiken bezeichnet. Hierfür seien beispielhaft Kernkraftwerke, Feuerwerkskörper, Testflugzeuge, Demonstranten, Übergewichtige („Risikopatient“) genannt. [Hel91] Aus dieser Aussage lässt sich schon die erste Differenzierung des Risikos erkennen. Es kann grundsätzlich unterschieden werden zwischen

- Risiken natürlichen Ursprungs (Erdbeben, Blitzschlag, Flut), also solche, die als nicht beeinflussbar angenommen werden und

- durch den Menschen geschaffenen Risiken (Industrie, Technik), also solchen, die erst durch Eingriff des Menschen entstanden sind.

Im englischen Sprachgebrauch werden diese Risiken unter den Begriffen „natural hazards“ und „man made hazards“ geführt [Und84], wobei an dieser Stelle wieder zwischen den englischen Begriffen „hazard“ und „risk“ unterschieden werden muss.

Dies zeigt, dass der Begriff des Risikos eine Entwicklung seiner Bedeutung durchlaufen hat. Wurde der Begriff früher nur in bestimmten Wissenschafts- oder Themenbereichen gebraucht, so hat er heute Einzug in den allgemeinen Sprachgebrauch gehalten, was eine Sensibilisierung der mit diesem Begriff einhergehenden Problematik mit sich bringt, andererseits eine begriffliche Entwertung bewirkt und somit eine wissenschaftsfundierte Auseinandersetzung mit der Risikoproblematik erschwert.

Ein Großteil der in diesem Kapitel beschriebenen Inhalte wurde bereits im Vorfeld dieser Arbeit in [GD11c; GD11b; Gan11; GD11a; GD12a; GD12b; Gan12b; Gan12a; Gan12c] veröffentlicht, so dass an dieser Stelle nur eine Zusammenfassung des Themenbereichs erfolgt.

2.1. Unterschiedliche Darstellungsweisen des Risikos

Im Laufe der Zeit haben sich zwei Methoden etabliert, ein Risiko darzustellen. Die eine befasst sich mit der technisch objektiven Darstellung des Risikos auf Grundlage ingenieur- und naturwissenschaftlicher Grundlagen und hat das Ziel der vergleichenden Risikodarstellung mittels quantitativer Ergebnisse. Die andere stellt die Wertigkeit eines Risikos über seine durch die Gesellschaft erfahrene Akzeptanz dar und berücksichtigt subjektive Faktoren der Risikobeurteilung, wodurch die Wertigkeit von Risiken in Bezug auf die sie umgebende gesellschaftliche Situation ermittelt und bewertet wird.

Technischer Risikobegriff

Der technische Begriff des Risikos wird vielfach beschrieben und lässt sich nach [DIN87] in folgender Definition aussagen: „*Das Risiko, das mit einem bestimmten technischen Vorgang oder Zustand verbunden ist, wird zusammenfassend durch eine Wahrscheinlichkeitsaussage beschrieben, welche die zu erwartende Häufigkeit des Eintritts eines zum Schaden führenden Ereignisses und das beim Ereigniseintritt zu erwartende Schadensausmaß berücksichtigt.*“ Die hieraus abgeleitete Risikoformel ergibt sich zu:

$$R = H \cdot K \quad (2.1)$$

mit R = Risiko, Risikozahl als Maß für das Risiko, H = Eintrittshäufigkeit des Schadensereignisses und K = Konsequenz, Schadensausmaß.

Das Risiko dient somit als Kennzahl zur quantitativen Beschreibung der Gefahr. Nach dieser Begrifflichkeit wird das Risiko einer Technik über die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadensereignisses und der aus diesem resultierenden Höhe der Konsequenz definiert. Werte gleicher Risikozahl, $R = \text{const.}$, ergeben eine Risiko-Isolinie, d.h. eine Linie konstanten Risikos, die in einem Häufigkeit-Schaden-Diagramm eingetragen werden kann. Ist

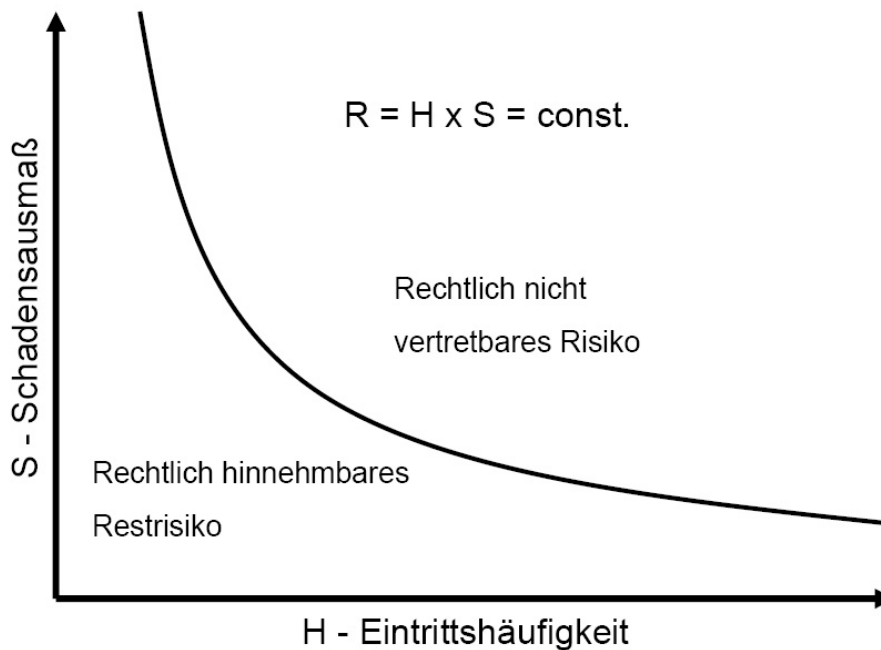


Abbildung 2.1.: Risiko-Isolinien

ein Wert eines rechtlich hinnehmbaren Risiko festgelegt, so trennt die Risiko-Isolinie den Bereich des rechtlich hinnehmbaren Restrisikos von dem des rechtlich nicht vertretbaren Risikos (vgl. Abbildung 2.1). Unterschiedliche Grenzwerte des rechtlich hinnehmbaren Restrisikos führen zu unterschiedlichen Ausprägungen der Risiko-Isolinie.

Dieses durch die Risiko-Isolinie dargestellte Grenzkrisiko stellt das größte gerade noch vertretbare Risiko einer Technologie unter Berücksichtigung der sicherheitstechnischen Anforderungen entsprechend dem Stand der Technik dar. Die Darstellungsweise ist dem Versuch geschuldet, Risiken objektiv darzustellen und so ein universelles Risikomaß zu generieren, mit dem unterschiedliche Risiken für die verschiedenen Fachdisziplinen verglichen werden können. Die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Risiken soll durch diesen Ansatz auf Basis von rationalen Erklärungen erfolgen. In dieser Darstellungsweise stehen die beiden Faktoren Eintrittshäufigkeit und Schadensausmaß quasi im Gleichgewicht zueinander; wird der eine Faktor erhöht, so muss der andere entsprechend sinken, wodurch sich das Risiko über diese beiden Faktoren regulieren lässt.

Eine andere Möglichkeit der Darstellung des Grenzkrisikos ist in Abbildung 2.2 gegeben. In dieser Darstellungsweise werden ebenfalls die zwei Bereiche des vertretbaren und des nicht vertretbaren Risikos definiert. Dem Bereich des nicht vertretbaren Risikos wird dabei die Notwendigkeit risikomindernder Maßnahmen zugeordnet, die das Risiko auf ein vertretbares Maß, das Restrisiko, reduzieren sollen. Dieser Darstellung nach lässt sich Sicherheit, als Gegenstück zu Gefahr, durch Einhaltung eines Grenzwertes erreichen. Dies bedeutet jedoch nicht, dass unterhalb des Grenzkrisikos keine Gefahr vorherrscht; die Höhe des Risikos wird hierdurch auf ein vertretbares Maß gesenkt. Nach [Kuh95] hat es sich als nicht sinnvoll herausgestellt, unterhalb eines Grenzkrisikos die komplette Abwesenheit von Gefahr zu unterstellen und somit vollkommene Sicherheit zu suggerieren. Unterhalb des Grenzkrisikos ist weiterhin eine Gefährdung vorhanden; die zugehörige Eintrittswahrscheinlichkeit ist als ausreichend gering anzusehen und somit kann das Risiko, als quantitative Größe zur Beschreibung dieser Gefahr, als vertretbar angenommen werden.

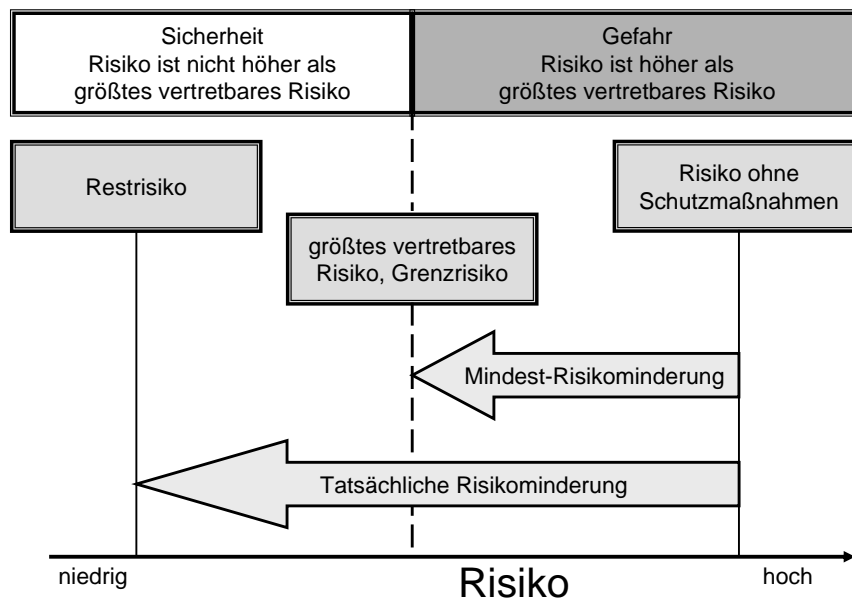


Abbildung 2.2.: Grenzrisiko in Anlehnung an [SFK04]

Als technisch sicher wird eine Technologie dann bezeichnet, sofern das Risiko, welches durch das Vorhandensein und die Nutzung besagter Technologie entsteht, nachweislich so beherrschbar ist, dass ein vorgegebenes Grenzzisiko nicht überschritten wird [Ver07b]. Die Umsetzung der Anforderungen wird im deutschen Rechtsraum nicht direkt vorgegeben. Rechtsverbindliche Regelwerke definieren Zielsetzungen oder Grenzwerte, deren Einhaltung gefordert wird. Wie diese Einhaltung erfolgen muss, wird dem Anwender offen gelassen, wobei allerdings eine Nachweispflicht besteht. Der Nachweis der technischen Sicherheit erfolgt im Allgemeinen über die „allgemein anerkannten Regeln der Technik“ bzw. den „Stand der Technik“.

Sozialwissenschaftlicher Risikobegriff

Die Akzeptanz von Risiken durch Einzelpersonen, Gruppen oder Gesellschaftsschichten lässt sich nicht einfach auf das Erfüllen von Grenzwerten reduzieren. Es handelt sich um einen gesellschaftspolitischen Prozess, in dem entschieden wird, welche der beinahe unendlich vielen potentiellen Gefahren als Gegenstand politischer Behandlung ausgewählt werden. Erst durch diese öffentliche Wahrnehmung wird die Gefahr gesellschaftlich zum Risiko erhoben, dass somit thematisier-, abgrenz- und schließlich kalkulierbar wird [Luh93; Now93]. Im Gegensatz zu technischen Risikoexperten nehmen Laien Risiken als ein komplexes, mehrdimensionales Phänomen wahr. Da Risiken keinen direkt perzipierbaren Reiz darstellen, weil für die Wahrnehmung von Risiken kein Sinnesorgan zur Verfügung steht, ist der Begriff der Risikowahrnehmung mehr auf den mentalen Prozess ausgerichtet als auf eine definitorische Bestimmung [Kah11]. Risiko ist ein Merkmal, das Objekte, Aktivitäten und Situationen auf Grund von Wahrnehmungs-, Lern- und Denkprozessen zugeschrieben wird [JS93b]. Insofern gibt es auch kein „objektives“ Risiko, das man „objektiv“ wahrnehmen könnte [JS93b]. Risiken ergeben sich aus dem sozialen Kommunikationsprozess und werden von dorther zum Risiko erhoben und festgesetzt [Now93]. In sozialwissenschaftlichen Begriffen ausgedrückt handelt es sich beim Risiko somit um ein Konstrukt [Zwi97; Kah11; Hil93; RZ97; Pla03; KK93].

Aufbauend auf der technischen Sicherheitsforschung beschäftigte sich der Ingenieur Chauncy Starr mit der Frage, unter welchen Bedingungen Menschen bereit sind, Risiken zu akzeptieren [Sta93; Sta69; Pla03]. Ziel war es, mathematisch formulierbare Gesetzmäßigkeiten zur gesellschaftlichen Akzeptanz von Risiken zu formulieren. So sollten die Beziehungen zwischen spezifischen technischen Entwicklungen und positiven sowie negativen gesellschaftlichen Werten quantitativ erfasst werden können, um so technische Entwicklungen bewusst dahingehend steuern und regeln zu können, dass maximaler sozialer Nutzen bei minimalen sozialen Kosten entstehen würde. Der Ansatz scheiterte zwar auf Grund vieler Zweifel an der Haltbarkeit der ersten postulierten Gesetze [FSL79], legt damit jedoch den Grundstein der Betrachtung von wahrgenommenen qualitativen Risikomerkmale. Diese qualitativen Risikomerkmale fanden schließlich unter dem Begriff Heuristiken Einzug in die sozialwissenschaftliche Risikoforschung. Als Heuristiken werden Methoden bezeichnet, mit der die Lösung eines Problems nicht systematisch durchgeführt und (selbst bei richtiger Anwendung) nicht unbedingt mit dem korrekten Ergebnis abgeschlossen wird, wie dies bei algorithmischen Methoden der Fall ist. Grundlage ist, dass Menschen nicht in einem strengen Sinne realitätsadäquat wahrnehmen, urteilen und handeln, sondern nach dem Bild, das sie sich über die subjektiv wahrgenommene Realität zurecht legen [Zwi97]. Zu diesen die subjektive Wahrnehmung von Risiken beeinflussenden Heuristiken gehören unter anderen das Katastrophenpotential, die Freiwilligkeit eingegangener Risiken, der Gewöhnungseffekt, die subjektive Kontrollierbarkeit eines Risikos und das Institutionsvertrauen. Eine weitergehende Erklärung zu diesen Heuristiken ist in Anhang A.1 gegeben.

Da die Beurteilung von Risiken nach diesem Ansatz auf Grund von subjektiven Wahrnehmungs- und Denkprozessen erfolgt, ist weder ein Vergleich unterschiedlicher Risiken gleicher Konsequenz, noch der Vergleich ein und desselben Risikos durch unterschiedliche Personengruppen (Ausbildung, Lebensstandard, Nationalität, etc.) möglich. Des Weiteren trägt das Risiko-Alltagsniveau, dem ein Mensch ausgesetzt ist, entscheidend zu seiner Akzeptanz gegenüber zusätzlichen Risiken bei. Das subjektive Risikoempfinden wächst demnach nicht proportional zum absoluten Anstieg des Risikos, sondern vielmehr zur relativen Änderung bezogen auf dieses Grundniveau. Je höher das Risiko-Alltagsniveau ist, desto stärker muss der Zuwachs des Risikos sein, um eine Unterschiedswahrnehmung zu bewirken [Fra89; ST95].

Eine allumfassende Beschreibung des Risikos lässt sich somit durch den sozialwissenschaftlichen Risikobegriff ebenso wenig erzielen, wie durch Anwendung des technischen Risikobegriffs. Der sozialwissenschaftliche Risikobegriff ist geeignet, in Einzelsituationen die Akzeptanz bestimmter Risiken durch ausgewählte Gruppen der Gesellschaft zu ermitteln. Der Kernpunkt dieser Ausführung liegt darin, den Leser für die Problematik der Risikoakzeptanz zu sensibilisieren; objektive Darstellungen und Beurteilungen von Risiken alleine sind kein Garant für die Akzeptanz durch die Gesellschaft. Sind Risiken nach technischen Gesichtspunkten ermittelt, gilt es diese im sozialwissenschaftlichen Kontext der Gesellschaft zu vermitteln.

Unabhängig von der Tatsache, ob ein Risiko unter den Gesichtspunkten des technischen oder sozialwissenschaftlichen Risikobegriffs beurteilt wird, ist immer eine Vorgabe notwendig, ab deren Erfüllen von einem akzeptablen Risiko gesprochen werden kann, d.h. es muss ein Bewertungsmaßstab festgelegt werden, der für alle vergleichbaren Risiken Gültigkeit besitzt. In der technischen Risikobeurteilung erfolgt diese Vorgabe in der Regel als Grenzwert, wobei die Regel gilt, Grenzwerte so hoch wie notwendig, aber so niedrig wie möglich festzusetzen [Ver07b]. Grenzwerte stellen eine Methode dar, Stoffe, Anla-

gen, Technologien, Ereignisse, usw. auf ein nach dem aktuellen Stand der Technik sicheres Maß zu reduzieren. Hierbei ist zu beachten, dass Grenzwerte einmal formuliert nicht dauerhafte Gültigkeit besitzen, sondern mit dem Fortschreiten neuer Erkenntnisse variieren können; ein Beispiel hierfür ist die Verschiebung der Grenzwerte für durch Schall verursachte Gehörschäden zu immer geringeren Werten [BGR04]. Grenzwerte lassen sich auf verschiedene Weise formulieren, wobei folgende, in Anlehnung an [FLS⁺81], exemplarisch dargestellt werden:

- stoffbezogene Grenzwerte (wie AGW (alt:MAK), TRK, Entzündlichkeit).
- Grenzwerte nach ökonomischen Gesichtspunkten: Kosten-Nutzen-Analyse, bei der der erfahrene Nutzen die Wertigkeit der möglichen Konsequenzen übertrifft.
- Vorgabe von direkten Möglichkeiten das Risiko zu verringern: stellt im Grunde eine präventive Methode dar, bei der das Risiko so klein als machbar gehalten werden soll, ohne Beachtung etwaiger Grenzwerte.
- politischer Prozess/Definition dessen, was als Risiko angesehen werden kann/muss.
- Umgehen des Risikos, indem man die Risikoquelle abschafft oder reduziert, ohne im Vorfeld auf das eigentliche Risiko eingegangen zu sein.
- Festlegen von Eintrittswahrscheinlichkeiten als Grenzwert für genau definierte Konsequenzen.

Hieraus wird bereits deutlich, dass sich Grenzwerte untereinander nicht zwingend vergleichen lassen. Sie dienen lediglich der Feststellung, ob eine Technologie unter Beachtung des betreffenden Grenzwertes akzeptabel ist.

Interessant ist, dass zwischen der Höhe der Grenzwerte und der Schwelle gesundheitlicher Toleranz mehrere Größenordnungen liegen können. Hierin liegt nun auch der Nachteil der Bewertung mit Grenzwerten: werden Grenzwerte überschritten, wird allgemein eine Gefahr unterstellt. Hieraus ging, insbesondere im sozialwissenschaftlichen Bereich, die Kritik an der Methode der Grenzwertvergabe hervor: Grenzwerte seien ein anderes Wort für Ahnungslosigkeit. Sie lassen den Ausstoß von Schadstoffen zu und legitimieren ihn in einem eben eingeschränkten Umfang. Wer den Ausstoß von Schadstoffen begrenzt, stimmt im gleichen Maße eben diesem maximalen Ausstoß zu; das, was jetzt noch erlaubt ist, ist per sozialer Definition auch erlaubt. [Bec93b; Bec87] Anders formuliert liest sich die Kritik an der Grenzwertvergabe folgendermaßen: *„Aus Gründen der Vorsorge müssen beispielsweise Grenzwerte etwa für Stoffkonzentrationen oder andere physikalische Größen festgesetzt werden, über deren Schädlichkeit nur Vermutungen bestehen. Man geht dann meist von einem sicheren Wert aus, der unter normalen Verhältnissen nachweislich unschädlich ist. Dieser sichere Wert wird dann für außergewöhnliche Situationen um eine oder mehrere Zehnerpotenzen korrigiert und das Resultat mangels weiterer Vergleichsmöglichkeit zum Grenzwert erklärt. Solche lediglich auf Opportunität bauenden Festlegungen stehen auf unsicherer Grundlage: Wer sie trifft, sollte hierzu legitimiert sein.“* [Hos92]

Unbestritten sind Grenzwerte keine über jeden Zweifel erhabene Methode, um Risiken abzuschätzen. Um jedoch bestimmte Risiken miteinander vergleichen zu können oder abzuschätzen, ob das Risiko einer Technologie akzeptabel ist oder nicht, stellt die Methode der Grenzwertvergabe eine hinreichend genaue und objektive Methode der Risikobewertung dar. Schon der in Kapitel 1 erläuterte Maßstab der praktischen Vernunft, der fordert, nicht

alle Risiken abzuwehren, sondern nur diejenigen, die eine bestimmte Schwelle überschreiten, ist ein weiterer Hinweis auf die gewünschte Anwendung dieses Bewertungsmaßstabs zur Regulierung von Risiken. Aus diesen Gründen erfolgt die Beurteilung der in dieser Arbeit betrachteten Risiken über Grenzwerte.

2.2. Deterministische und Probabilistische Risikoanalyse

Die sich durch die Zunahme der modernen Technologie ergebenden mannigfaltigen Gefahren erfordern eine allgemeingültige Beschreibung, Beurteilung und Regulierung mittels Ansätzen, die von der Gesellschaft akzeptiert und getragen werden. Die Ermittlung vertretbarer Risiken über subjektive Bewertungskriterien stellt für kleine Bereiche der Gesellschaft eine Möglichkeit der Risikobeurteilung dar, ist im breiten Kontext der Risikobeurteilung jedoch unzureichend. Zur Risikobeurteilung technischer Systeme haben sich zwei Methoden etabliert. Die Risikobeurteilung im klassischen Sinne, bei der aus Ereignissen der Vergangenheit auf zukünftige Ereignisse geschlossen wird, wird als deterministisch bezeichnet, während bei der probabilistischen Methode Risiken durch Ermittlung von Eintrittswahrscheinlichkeiten von Ereignissen und ihren dazu gehörigen Konsequenzen quantitativ ermittelt werden.

Die deterministische und probabilistische Risikoanalyse sind im Grunde Beschreibungen des selben Sachverhalts: Ziel ist die Beurteilung von Risiken technischer Systeme auf Grundlage verwertbarer Daten. Bei vollständiger Kenntnis der zu bewertenden Systeme sowie der statistischen Datenlage können deren Ergebnisse in die jeweils andere Methode überführt werden. So können die aus der Deterministik gewonnenen Annahmen probabilistisch überprüft werden oder Erkenntnisse der Probabilistik zu Vorgaben der Deterministik führen. [Wol07] Dennoch bestehen sowohl in der Art und Weise der Methodologie als auch bezüglich des rechtlichen Stellungswertes Unterschiede.

Die deterministische Vorgehensweise basiert auf Auslegungsanforderungen an das betreffende technische System. Grundlage hierbei ist, die Systeme so auszulegen, dass diese trotz nicht bestimmungsgemäßen Zustands (z. B. Versagen durch äußeren Einfluss) noch beherrscht werden können. [HHW87] Deterministisch bedeutet in diesem Zusammenhang, dass durch Anwendung von Sicherheitseinrichtungen, fußend auf Grenzwerten des Risikos, ein Systemversagen nach dem Ermessungsgrundsatzes des „gesunden Menschenverstandes“ ausgeschlossen werden kann [Wol07]. Der klassische Aspekt dieser Vorgehensweise ist die Anwendung eines Sicherheitsfaktors für das betreffende System. Dieser Sicherheitsfaktor ist definiert durch den Quotienten der Belastbarkeit des Systems zur auftretenden Belastung [Mai05; PM85]. Sinn des Sicherheitsfaktors ist es, die Streuung von auftretender Belastung wie auch Belastbarkeit des Systems zu berücksichtigen und so die Sicherheit vor Versagen einer Technologie zu garantieren. Da sich bei der Auslegung eines Systems weder dessen Belastbarkeit noch die real auftretenden Belastungen exakt vorhersagen lassen, entsteht bei dieser Vorgehensweise eine Unsicherheit, die man versucht durch Überdimensionierung bei der Auslegung des Systems auszugleichen. Der Sicherheitsfaktor sagt demnach aus, dass ein System mehr Belastung ertragen muss, als unter realen Bedingungen erfahren wird. Durch diese Art der Auslegung wird ein hohes Maß an (gefühlter) Sicherheit erreicht, wobei Risiken nicht generell ausgeschlossen werden können. Weiterhin können, in der Theorie, Belastungszustände auftreten, die bei der Auslegung des Systems

nicht berücksichtigt worden sind und so die Grenzen der maximalen Belastbarkeit überschreiten. Darüber hinaus können diese Grenzen durch andere Einflüsse abgesenkt werden. [HHW87] Werden die erforderlichen Sicherheitsfaktoren empirisch ermittelt, so steht oftmals nur eine begrenzte Anzahl an auswertbaren Daten zur Verfügung, beispielsweise durch Nachweisversuche oder aus in der Vergangenheit erfolgten Ereignissen. In beiden Fällen wird nur eine begrenzte Anzahl an Ereignissen zur Verfügung stehen, so dass sich die aus ihnen ergebende Zuverlässigkeit des Systems bzw. die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses ebenfalls limitieren; bei der Betrachtung eines bestimmten Ereignisses innerhalb der letzten hundert Jahre kann eben nur eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 1 zu 100 oder 10^{-2} angegeben werden [Mai05].

Bei der deterministischen Vorgehensweise handelt es sich um eine Sicherheitsbeurteilung, nicht aber um eine Risikobeurteilung. Sie soll gar nicht das von einer Technologie ausgehende Risiko bestimmen und bewerten, sondern für die sichere Auslegung einer Technologie unter einer endlichen Anzahl möglicher Störfälle sorgen. Diese Vorgehensweise stellt eine pragmatische und praktisch durchführbare Grundlage dar, mit der

- die Exekutive einen Weg aufzeigt, wie die Anforderungen an eine Technologie nachgewiesen werden können und
- der Ingenieur ausreichend klare Vorgaben zur Auslegung der Technologie erhält. [HHW87]

Bei den modernen, komplexen Technologien ist die deterministische Vorgehensweise jedoch nur bedingt einsetzbar. Hier lässt sich das Risiko einer Technologie oftmals nicht aus statistischen Beobachtungen ableiten, so dass eine probabilistische Vorgehensweise der Risikoanalyse notwendig wird. Ziel der probabilistischen Vorgehensweise ist die quantitative Ermittlung der Wahrscheinlichkeit von „negativen Ereignissen“ sowie deren Konsequenzen [Vri01; Neu09; Mai05; Mai06a; Mai06b; Wol07; HHW87; Aci03; Har99]. Grundlage hierfür ist die Erfassung einer repräsentativen Menge denkbarer Störfall- und Unfallabläufe und die Ermittlung ihrer Auswirkungen [HHW87]. Die probabilistische Risikoanalyse zeigt somit eine starke Verbindung zum technischen Risikobegriff auf: das Risiko wird definiert über die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses und dessen resultierende Konsequenzen. Im Gegensatz zur deterministischen wird bei der probabilistischen Vorgehensweise nicht nur auf bekannte Ereignisabläufe zurückgegriffen, sondern nach Möglichkeit das gesamte Spektrum an möglichen Schadensszenarien abgedeckt. Sie basiert somit auf einem möglichst detaillierten Modell der Versagensabläufe. Die für diese Abschätzung notwendigen Angaben können aus Betriebsunterlagen oder firmeninternen Statistiken, aus Literaturangaben oder Datenbanken, die auf Analysen früherer Unfälle basieren, sowie systematisch aus quantitativen Gefahrenfeldanalyse-Methoden, wie z. B. aus Fehlerbaumanalysen nach DIN 25424 [DIN81] oder Ereignisablaufanalysen nach DIN 2541 [DIN85], ermittelt werden [Aci03]. In den meisten Fällen ist es allerdings notwendig viele der verwendeten Daten zu schätzen [HHW87]. Wo statistisch gesicherte Daten fehlen, müssen Abschätzungen das Gebilde der Realität ausloten.

Um die Aussagen dieser Analyse beurteilen zu können, wurden im internationalen Umfeld Grenzwerte der Eintrittswahrscheinlichkeit für Ereignisse bestimmter Konsequenzen geschaffen (Näheres hierzu in Kapitel 2.5). Die probabilistische Vorgehensweise kann in die zwei Bereiche Zuverlässigkeitsanalyse und Risikoanalyse unterteilt werden [Neu09]. Die Zuverlässigkeitsanalyse ermittelt die Wahrscheinlichkeit für den Ausfall eines Systems, wobei die übliche Vorgehensweise durch die Methode der Fehlerbaumanalyse erfolgt. Die Risikoanalyse verknüpft die Zuverlässigkeitsanalyse mit der Höhe der Konsequenzen.

Durch Verknüpfen der Kernelemente beider Methoden ergibt sich eine semiprobabilistische Methode. Kernstück dieser Methode ist die Verknüpfung statistisch belegbarer Elemente mit probabilistischen Vorhersagen. [Lud07]

2.3. Risikobeurteilung in Deutschland

Vor dem 1975 in den USA erschienenen Rasmussen-Bericht [Ras76] erfolgte die Analyse technischer Risiken international deterministisch. Mit dem Erscheinen dieses Berichts, in dem das Risiko für die Allgemeinheit durch Kernkraft unter Zuhilfenahme probabilistischer und teilweise deterministischer Methoden untersucht worden ist, wandelte sich im internationalen Umfeld die Methode der Risikoanalyse hin zur probabilistischen Methode. Davor wurde die Sicherheitsfrage von Technologien an das Genehmigungsverfahren geknüpft, bei dem davon ausgegangen wurde, dass eine Technologie nur dann der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden dürfe, wenn, bestimmte Kriterien zu Grunde gelegt, sichergestellt war, dass diese Technologie auch sicher ist [Har99]. Im Umkehrschluss besagt dies, dass eine Technologie, die ein Genehmigungsverfahren erfolgreich passiert hat, auch sicher ist. Mit dem Erstellen dieser ersten allgemeinen Risikoanalyse hat sich die Erkenntnis durchgesetzt, dass eben keine Technologie absolut sicher ist. Es verbleibt immer ein gewisses Restrisiko und die Frage in wie weit die Öffentlichkeit bereit ist, dieses Restrisiko zu akzeptieren.

Wie in Kapitel 1 dargestellt verpflichtet das in Artikel 2 Grundgesetzes verbürgte Recht auf Leben und körperliche Unversehrtheit die staatlichen Organe zum hoheitlichen Schutz der Bevölkerung vor äußeren negativen Einflüssen. Im Kalkar-Urteil wird hierzu folgende Aussage getroffen: *„Will der Gesetzgeber die Möglichkeit künftiger Schäden durch die Errichtung oder den Betrieb einer Anlage oder durch ein technisches Verfahren abschätzen, ist er weitgehend auf Schlüsse aus der Beobachtung vergangener tatsächlicher Geschehnisse auf die relative Häufigkeit des Eintritts und den gleichartigen Verlauf gleichartiger Geschehnisse in der Zukunft angewiesen; fehlt eine hinreichende Erfahrungsgrundlage hierfür, muss er sich auf Schlüsse aus simulierten Verläufen beschränken. Erfahrungswissen dieser Art, selbst wenn es sich zur Form des naturwissenschaftlichen Gesetzes verdichtet hat, ist, solange menschliche Erfahrung nicht abgeschlossen ist, immer nur Annäherungswissen, das nicht volle Gewissheit vermittelt, sondern durch jede neue Erfahrung korrigierbar ist und sich insofern immer nur auf dem neuesten Stand unwiderlegten möglichen Irrtums befindet.“* [Bve78]

Hieraus zeigt sich bereits, unter welchen Gesichtspunkten die Methode der Risikoanalyse in Deutschland erfolgen soll:

1. Schlüsse auf Schäden (Konsequenzen) von Technologien sollen weitestgehend aus der Betrachtung vergangener tatsächlicher Geschehnisse erfolgen, wobei
2. deren relative Häufigkeit als Indikator für das Eintreten späterer Schäden dienen soll.
3. Ist diese Erfahrungsgrundlage nicht vorhanden, so sollen Rückschlüsse aus simulierten Verläufen gezogen werden, wobei
4. diese dann nur als Annäherungswissen behandelt werden.

In den meisten Fällen erfolgte dieser Beweis der Sicherheit durch Sicherheitsanalysen / -berichte, die ausreichende sicherheitsgerichtete Maßnahmen zur Verhinderung von Stör-

und Unfällen belegen sollen [SFK04], was der deterministischen Vorgehensweise entspricht. In diesen Einzelfallanalysen werden Vorkehrungen nach dem aktuellen Stand der Technik zur Risikoregulierung und deren Umsetzung beschrieben, die das verbleibende Restrisiko unterhalb eines nicht näher definierten Grenzwerts halten. Die Maßgabe besteht demnach darin, das zulässige vom unzulässigen Restrisiko durch diesen nicht näher definierten Grenzwert zu trennen. Die Durchführung dieser Maßnahmen erfolgt hierarchisch nach

- allgemeinen Vorschriften (Gesetze),
- speziellen Vorschriften (Verordnungen) und
- detaillierten Regelungen (Technische Regelwerke, Normen) [Tag06] .

Mit Einhaltung der für eine bestimmte Technologie gegebenen einschlägigen Vorschriften und Regelungen tritt die Vermutungswirkung in Kraft, dass der Regulierung der Risiken nach dem derzeitigen Stand der Technik Genüge getan wurde. Die Umsetzung der in den Regelwerken geforderten Maßstäbe erfolgt in Deutschland in der gängigen Praxis durch Versuche und ist somit eindeutig deterministisch ausgerichtet [Mai06b]. Die in diesen Regelwerken zur Beschaffenheit und Prüfung von technischen Systemen festgelegten Anforderungen sind in weiten Bereichen ein Indikator für das Maß an öffentlich-technischer Sicherheit. Die empirische Ermittlung dieser weitestgehend deterministischen Vorgaben erfolgte historisch gesehen auf der Annahme, dass gewünschte Ereignisse so oft und unerwünschte Ereignisse so selten wie möglich stattfinden sollen. [Mai05] Es wurde also aus der relativen Häufigkeit vergangener tatsächlicher Geschehnisse auf die Eintrittswahrscheinlichkeit zukünftiger Ereignisse geschlossen und so das Maß an Sicherheit definiert.

Die sicherheitstechnische Festlegung in Deutschland basiert darauf, dass keine quantitative Erfassung des Grenzzrisikos erfolgt, sondern diese durch Anforderungen erfüllt wird. Die öffentlichen Organe gehen dabei davon aus, dass das Risiko einer Technologie hinreichend gering ist, sofern ausreichend sicherheitstechnische Festlegungen getroffen wurden. Das verbleibende Restrisiko wird als so unwahrscheinlich angenommen, dass es „vernünftigerweise ausgeschlossen“ werden kann und so als akzeptabel oder zulässig gilt. Diese Vorgehensweise beruht auf der Tatsache, dass der Gesetzgeber zwar Schutzziele zur Einhaltung der geforderten Sicherheit in Form verbindlicher Festlegungen formulieren könnte, es allerdings vorzieht dies zu Gunsten der freien Wählbarkeit des Auslegungs- und Ermessensspielraums hinsichtlich der Risikoanalyse zu unterlassen [SFK04].

Eine häufig angewandte und durch verschiedene Normen gedeckte Methode ist die Risiko-bewertung mit Risikomatrizen, bei denen das Schadensausmaß und dessen Wahrscheinlichkeit gegeneinander aufgetragen werden. Zur Abgrenzung werden in diesen Matrizen die drei Bereiche „Risiko nicht tragbar“, „Handlungsbedarf“ und „Risiko tragbar“ genutzt. Abbildung 2.3 und die dazugehörige Tabelle 2.1 zeigen beispielhaft eine solche Risikomatrix.

Ein Problem dieser Methode ist, dass weder Schadensausmaß noch die Häufigkeit genau benannt werden. Im Einzelfall wird dies zwar nachgeholt, allerdings hat sich durch diese ungenaue Formulierung eine Vielzahl an Werten ergeben. Es wird demnach für den Einzelfall im Vorfeld festgelegt, welche Risiken (Todesfall, Verletzung, Sachschaden, Umweltschäden, etc.) in welche Kategorie eingeordnet werden und welchen Wert der Häufigkeit man bereit ist für den Einzelfall der untersuchten Technologie hinzunehmen. Drei Nachteile sind dieser Methode besonders anzulasten:

1. Es erfolgt keine klare Abgrenzung der Konsequenzen und daher auch
2. keine klare Abgrenzung der tolerierten Eintrittshäufigkeiten.
3. Dadurch ist ein Vergleich mit anderen Technologien bzw. deren Risikoanalyse nicht möglich.

Weitere Ausführungen zur Erstellung und Anwendung von Risikomatrizen findet sich in [Sud03; SFK04; Moc01; DIN05; DIN94].

		Häufigkeit					
		I	II	III	IV	V	VI
Schadensausmaß	A						
	B						
	C						
	D						
	E						
	F						

Abbildung 2.3.: Risikomatrix

Tabelle 2.1.: Faktoren der Risikomatrix

Schadensausmaß		Häufigkeit	
A	katastrophaler Schaden	I	unwahrscheinlich
B	kritischer Schaden	II	sehr selten
C	großer Schaden	III	selten
D	Schaden	IV	gelegentlich
E	kleiner Schaden	V	häufig
F	Vernachlässigbarer Schaden	VI	sehr häufig

Ein großes Problem dieser Vorgehensweise liegt in der seit vielen Jahren angestrebten internationalen Harmonisierung von Technologien. Da die Anforderungen meistens historisch gewachsen sind, ergaben sich eine Vielzahl unterschiedlicher Anforderungen und Schutzziele. Als Zielsetzung der probabilistischen Risikoanalyse kann vermerkt werden, eine möglichst allgemeingültige Beschreibung und Beurteilung von technischen Risiken zu erhalten. Eine Möglichkeit ist es, die von einer Technologie ausgehenden Gefahren und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten im Vorfeld zu ermitteln und Maßnahmen zu deren Vermeidung zu treffen. Als Beispiel hierfür kann die Seveso II Richtlinie [RL9] aufgeführt

werden, in der in Artikel 9, Abs. (1), b gefordert wird, „*dass die Gefahren schwerer Unfälle ermittelt und alle erforderlichen Maßnahmen zur Verhütung derartiger Unfälle und Begrenzung der Folgen für Mensch und Umwelt ergriffen wurden.*“

Im Gegensatz zum internationalen Umfeld mangelt es in Deutschland an rechtlichen Vorgaben von Risikogrenzwerten, so dass eine vergleichbare normative Basis zur Ermittlung von Risikowerten und deren Vergleich durch Risiko-Grenzwerte nicht möglich ist.

2.4. Kriterien der Risikoanalyse

Die Kriterien der deutschen Risikobewertung leiten sich gewöhnlich aus qualitativen Risikoanalysen her. Während bei qualitativen Risikoanalysen versucht wird, das Risiko soweit als möglich zu erkennen, einzugrenzen und zu minimieren, werden bei quantitativen Risikoanalysen Grenzwerte gesetzt. Diese Grenzwerte unterliegen Risikokriterien, nach denen unterschiedliche Risiken quantitativ vergleichbar gemacht werden können. Als ein Kriterium haben sich im europäischen Raum, insbesondere in den Niederlanden und in Großbritannien, die Begriffe des Individuellen und des Sozialen Risikos etabliert. Für diese beiden Grenzwerte gilt, dass sie im klassischen Sinne kein Risiko bewerten, sondern die akzeptierten, tolerablen und nicht akzeptierten Eintrittswahrscheinlichkeiten für einzelne Ereignisse mit definierten Konsequenzen darstellen.

Das individuelle Risiko (IR) wird in der Literatur durch verschiedene Quellen unterschiedlich definiert (vgl. [Bot00; Boh98; TAW85; VAsC08; KFGH02; VK03]). Als Kernaussage des IR lässt sich ein einzelnes Ereignis formulieren, das geeignet ist, zu mindestens einem Todesfall zu führen. Insofern wird das IR nicht charakteristisch auf eine Person, sondern auf einen Ort, eine Anlage oder Technologie bezogen. Diese Formulierung ist in so weit nachzuvollziehen, als dass sich das IR direkt auf den Auslöser der Gefährdung bezieht. Kernpunkt der Darstellung ist die Festlegung einer Konsequenz. Das betrachtete Ereignis bleibt unberücksichtigt der tatsächlichen Anwesenheit von Personen. Entscheidend ist die Darstellung, dass die Auswirkungen des Ereignisses ausreichend wären, als Konsequenz zu mindestens einem Todesfall zu führen.

Das Soziale Risiko (SR) wird, ebenso wie das IR, in der Literatur unterschiedlich beschrieben. Nach [Trb08] beschreibt das SR die Wahrscheinlichkeit der Betroffenheit einer signifikanten Anzahl an Personen mit einer definierten Konsequenz durch ein einzelnes Ereignis. Diese Formulierung zeigt bereits auf, dass die Höhe der Eintrittswahrscheinlichkeit eines einzelnen Ereignisses und die Anzahl der durch dieses Ereignis betroffenen Personen die zwei bestimmenden Faktoren des SR sind. Dies bedeutet allerdings auch, dass ein SR nur dann vorhanden ist, wenn auch Personen betroffen sind [Bot00]. Wenn also keine Personen, die durch das Ereignis betroffen werden könnten, im Bereich der Gefährdung sind, so ist kein SR vorhanden, wohingegen das IR ausgehend von der Technologie durchaus hoch sein kann. Der Zusammenhang zwischen Individuellem und Sozialem Risiko ergibt sich durch die Anwesenheit von Personen. Das IR beschreibt Grenzlinien um eine Gefahrenquelle innerhalb derer ein Ereignis zu tödlichen Konsequenzen führt. [JGV03] Diese Grenzlinien geben in Abhängigkeit vom Abstand zur Gefahrenquelle an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Ereignis mit bestimmten Konsequenzen für anwesende Personen pro Jahr eintritt.

Das Soziale Risiko ist somit die Verknüpfung des Individuellen Risikos mit der Anzahl der betroffenen Personen (vgl. Abbildung 2.4). Die Beurteilung des SR kann dabei mittels

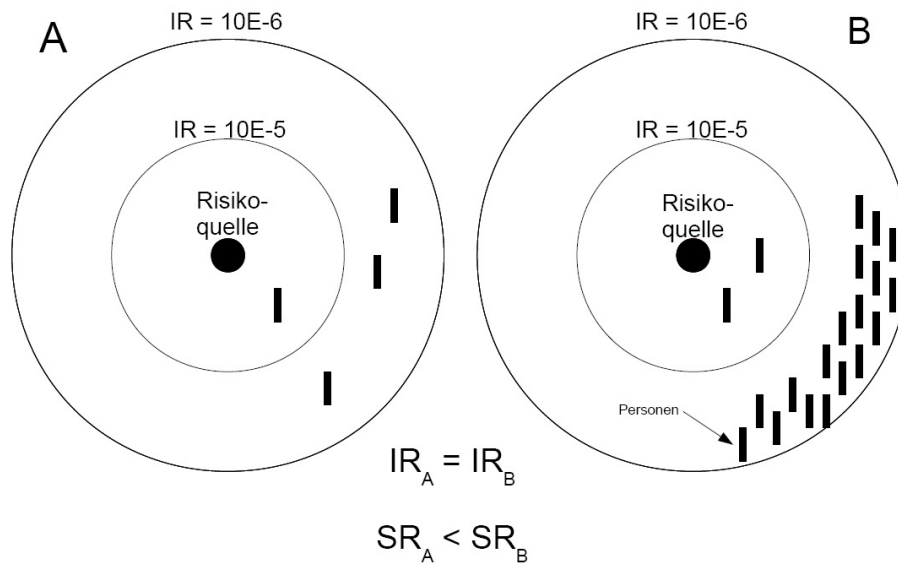


Abbildung 2.4.: Vergleich von Individuellem und Sozialem Risiko (in Anlehnung an [SGV96])

F-N-Kurven¹ erfolgen. Diese stellen in Abhängigkeit von der Anzahl betroffener Personen die Grenze der akzeptierten Eintrittswahrscheinlichkeit dar (vgl. Kapitel 2.5).

Die Berechnung des Individuellen Risikos erfolgt auf Grundlage der natürlichen Mortalitäts- bzw. Sterberate. Diese wird gewählt, da sie für die Industrieländer nahezu identisch und somit vergleichbar ist und da sie sich über die Zeit nur langsam verändert [VHH95], wobei diese Änderung über die Zeit die zivilisatorische Leistung der Technik widerspiegelt [Kuh95]. Es wird davon ausgegangen, dass diese die geringste Wahrscheinlichkeit ausdrückt innerhalb eines festgelegten Zeitraums (in der Regel ein Jahr) eines natürlichen Todes zu sterben, wobei im allgemeinen Todesfälle durch Unfälle und angeborene Krankheiten nicht mit einfließen [Kuh95]. Je nach Quelle variiert der Wert der natürlichen Sterberate. So wird für die Niederlande die geringste natürliche Sterberate für die Altersgruppe der 10 bis 14 Jährigen mit $1 \cdot 10^{-4}$ angegeben [ZDK⁺03]. Der geringste Wert der natürlichen Sterberate wird für Großbritannien für die Altersgruppe der 5 bis 14 Jährigen mit $2 \cdot 10^{-4}$ [EIG01] bzw. mit $1,45 \cdot 10^{-4}$ für Jungen und $1,15 \cdot 10^{-4}$ für Mädchen [JGV03; HSE01; HIP08a] angegeben. Eine Graphik aus [ZDK⁺03] weist auf die geringste natürliche Sterberate für die Altersgruppe der 10 bis 15 Jährigen von etwa $5 \cdot 10^{-4}$ hin. Die natürliche Sterberate in Deutschland wird mit $2 \cdot 10^{-4}$ festgelegt [Kuh95]. Unter Zugrundlegung, dass das Individuelle Risiko, durch ein einzelnes Ereignis fatale Konsequenzen zu erleiden, 1 % der natürlichen Sterbewahrscheinlichkeit nicht übersteigen darf und wird diese mit 10^{-4} angesetzt, so ergibt sich für das Individuelle Risiko ein Wert von 10^{-6} [ZDK⁺03]. Diese Eintrittswahrscheinlichkeit von 10^{-6} pro Jahr wird als Grenzwert angesehen, unterhalb derer ein einzelnes Ereignis, dessen Auswirkungen eine tödliche Konsequenz für etwaige Personen hätte, als allgemein akzeptiert gilt. Der oben erläuterte Grenzwert von 10^{-6} stellt somit den Ankerpunkt des Sozialen Risikos für eine Person dar. Mit zunehmender Anzahl betroffener Personen verschiebt sich die Grenze des allgemein akzeptierten Risikos zu geringeren Werten der Eintrittswahrscheinlichkeit.

¹F - Frequency of occurrence, N - Numbers of death

2.5. Technische Risikobeurteilung im internationalen Vergleich

Der Diskussionsprozess in Großbritannien um die Ausweitung der Kernenergie in den frühen achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts führte letztendlich zur Formulierung des ALARP-Prinzips² durch die britische Health and Safety Executive [SFK04]. Diesem Ansatz liegt die Unterstellung zu Grunde, dass eine Technologie, die einen gewissen gesellschaftlichen Nutzen erbringt, auch ein vertretbares Maß an gesellschaftlichem Risiko mit sich bringen kann.

Das ALARP-Prinzip (auch ALARA³) beruht auf den Annahmen, dass sich Konsequenzen bei bestimmten Eintrittswahrscheinlichkeiten in die Bereiche Allgemein akzeptabel, ALARP und Nicht Akzeptabel einordnen lassen und dass die Eintrittswahrscheinlichkeit mit Zunahme der Konsequenzen sinken muss. ALARP bedeutet, dass in diesem Bereich eine Reduzierung des Risikos soweit erfolgen muss, wie es technisch und wirtschaftlich machbar und sinnvoll ist. Das Prinzip des ALARP-Modells ist die Darstellung des Individuellen Risikos einer Technologie in Abhängigkeit von der Anzahl betroffener Personen. Beim ALARP-Modell wird dementsprechend das soziale Risiko einer Technologie bewertet. Eine graphische Zusammenfassung des ALARP-Prinzips zeigt Abbildung 2.5.

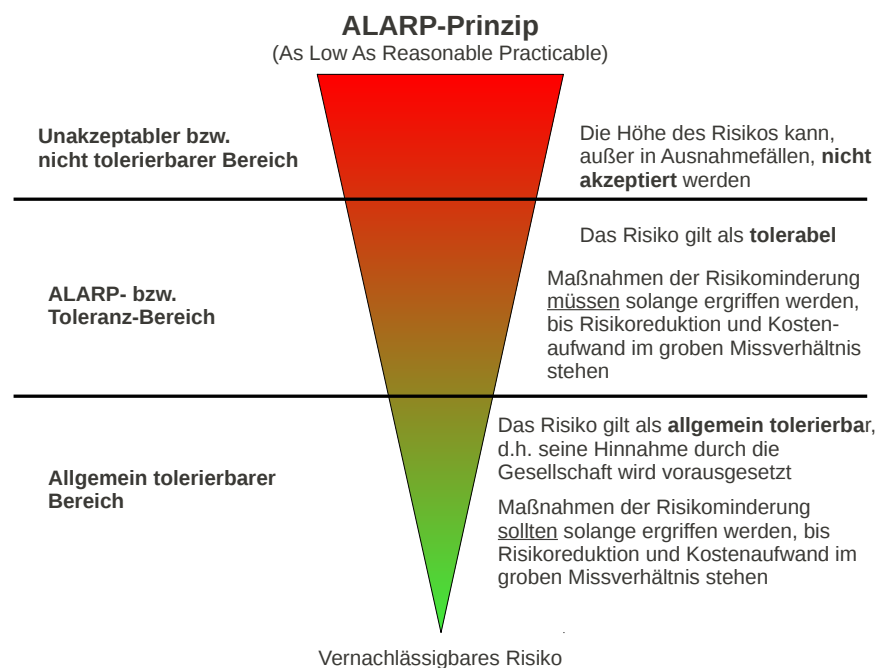


Abbildung 2.5.: Das ALARP-Prinzip

Die Darstellung des ALARP-Modells erfolgt durch so genannte F-N-Kurven⁴ [Bot00; ZDK⁺03; JGV03; VK03; Gia97]. Diese stellen die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses als doppellogarithmische Funktion über die Anzahl der Todesfälle durch dieses Ereignis dar. Abbildung 2.6 zeigt eine F-N-Kurve mit zwei Risiko-Isolinien. Die Akzeptanzlinie trennt den Bereich des nicht akzeptablen Risikos vom ALARP-Bereich, während

²ALARP: As Low As Reasonable Possible/Practicable – so gering wie vernünftiger Weise machbar/sinnvoll

³ALARA: As Low As Reasonable Achievable - so gering wie vernünftiger Weise erreichbar

⁴F - Frequency of occurrence, N – Numbers of death

die Unerheblichkeitslinie diesen vom Bereich der Allgemeinen Akzeptanz trennt. Die hier dargestellte Kurve weist einen Aversionsfaktor von -2 auf, d. h. bei einer Zunahme/Abnahme der maximal zulässigen Todesfälle um den Faktor X muss/kann die maximal hingegenommene Eintrittswahrscheinlichkeit um den Faktor X^2 sinken/steigen. Dieser Aversionsfaktor berücksichtigt die menschliche Furchtassoziation gegenüber Risiken mit hoher Konsequenz. [GD11b; Gan11]

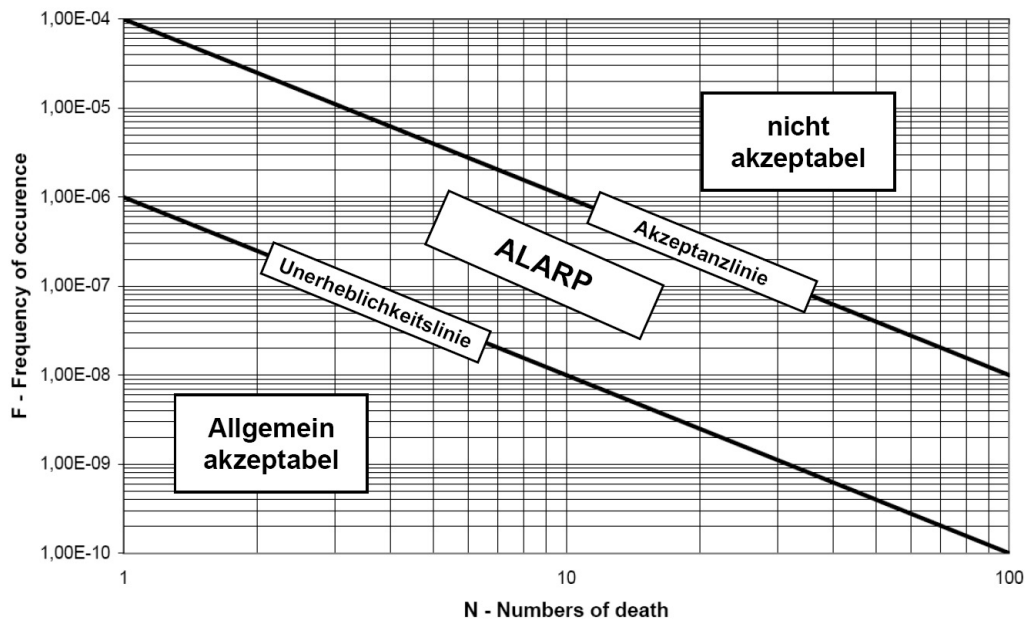


Abbildung 2.6.: F-N-Kurve mit Aversionsfaktor -2

Niederlande

In den Niederlanden wurden Risikogrenzwerte vom Kabinett festgelegt, die dann vom Parlament gebilligt wurden [SFK04]. Diese orientieren sich am Individuellen Risiko, welches von Technologien auf die Öffentlichkeit ausgeht und für eine Person bei 10^{-4} liegt. Aus den dargelegten Werten des Individuellen Risikos wird in [Trb08] ein Ankerpunkt des Sozialen Risikos von 10^{-5} für ein einzelnes Ereignis mit 10 Todesfällen generiert, unterhalb dessen ein Risiko als allgemein akzeptabel gilt. Dem Ankerpunkt bei einer Wahrscheinlichkeit von 10^{-5} bei 10 Todesfällen wird ein Aversionsfaktor mit der Steigung „-2“ zugeordnet. Dieser Aversionsfaktor berücksichtigt die Einstellung des Menschen gegenüber katastrophalen Ereignissen. In den Niederlanden werden diese Werte strikt eingehalten. Risikowerte zwischen dem tolerablen und dem nicht akzeptablen Bereich unterliegen zwar dem ALARP-Prinzip; die Reduzierung des Risikos soweit als sinnvoll möglich wird allerdings nicht gefordert [Trb08].

Großbritannien

In Großbritannien werden sowohl das Individuelle als auch das Soziale Risiko herangezogen, um zu beurteilen, ob die von einer Technologie ausgehende Gefährdung tolerabel ist. Das Individuelle Risiko einer Anlage beläuft sich auf 10^{-3} für die an dieser Anlage Beschäftigten und auf 10^{-4} für die Gesellschaft [KFGH02; HSE01; Trb08; HSE07]. Oberhalb dieses Grenzwertes gilt ein Risiko als unakzeptabel. Der Aversionsfaktor beläuft sich auf „-1“ [JGV03; HSE01]. Auf die Vorgabe eines Grenzwertes zum allgemein akzeptablen Bereich wird verzichtet; als richtungweisend kann ein um drei Dekaden (10^{-3}) tieferer Wert angenommen werden [HSE01]. Der Verzicht auf die Vorgabe eines akzeptablen Bereiches folgt der Philosophie, dass alle (industriellen) Risiken ständig dem ALARP-Prinzip

unterliegen. Es soll kein Wert vorgegeben werden, ab dem ein Soziales Risiko als akzeptabel gilt, sondern vielmehr sollen alle Risiken im Rahmen der Möglichkeiten so weit wie vernünftiger Weise machbar reduziert werden.

Schweiz

In der Schweiz führte die gesellschaftliche Diskussion um die Kernenergie zur flächendeckenden Einführung quantitativer Methoden der Risikoanalyse. Mit dieser Vorgehensweise wurde gleichermaßen versucht unterschiedliche Konsequenzen eines Ereignisses vergleichend darzustellen. Gegenüber den Methoden aus den Niederlanden und Großbritannien wurden hier weitere Konsequenzen in die Beurteilung des Risikos mit aufgenommen. Betrachtet werden bei diesem Vorgehen die Risiken, die sich aus einer Technologie auf den Menschen, auf die Umwelt und auf Sachgüter ergeben [BUW96]. Bezogen auf die Konsequenz Todesfälle zeigt sich, dass die Schweiz Maßstäbe ansetzt, die mit denen der Niederlande identisch sind, wobei bei Ereignissen mit weniger als 10 Todesfällen von keiner schweren Schädigung ausgegangen wird und somit keine zusätzlichen Maßnahmen ergriffen werden müssen.

Dänemark

In Dänemark wird der Grenzwert des unakzeptablen Risikos auf 10^{-2} festgelegt mit der Grenze zum allgemein akzeptablen Bereich bei 10^{-4} bezogen auf eine Person. Der Aversionsfaktor beträgt „-2“ [Dui09].

Tabelle 2.2.: Grenzwerte technischer Risiken im internationalen Vergleich

Land	Ankerpunkt für einen Todesfall	Grenzwert zur allg. Akzeptabilität bezogen auf den Ankerpunkt	Aversionsfaktor
Niederlande	10^{-3}	10^{-5}	-2
Großbritannien	10^{-3}	(10^{-6})	-1
Schweiz	10^{-3} (10^{-5} bei 10 Todesfällen)	10^{-5} (10^{-7} bei 10 Todesfällen)	-2
Dänemark	10^{-2}	10^{-4}	-2

Ergebnisse des internationalen Vergleichs

Die Betrachtung der Risikoanalysen im internationalen Vergleich zeigt den Gebrauch quantitativer Methoden auf. Während in Deutschland der Schutz von Rechtsgütern vor Schaden durch äußere Einwirkung in erster Linie durch Zulassungsverfahren und wiederkehrende Prüfungen erreicht wird, erfolgt die Erfüllung dieses Schutzziels international zunehmend durch Festlegung von Risikogrenzwerten und die Kopplung an quantitative Methoden.

Durch diese Methode lassen sich Risiken unterschiedlicher Technologien bezogen auf genau definierte Konsequenzen vergleichen. Im Bereich der menschlichen Todesfallkonsequenzen orientieren sich die entsprechenden Länder zur Festlegung der gesellschaftlich hinnehmbaren und allgemein akzeptablen Risiken an Risiken des alltäglichen Lebens. Dieses Alltags-Risikoniveau bildet somit den ersten Orientierungspunkt zur Festlegung eines Grenzwertes technischer Risiken. Tabelle 2.2 zeigt die Ankerpunkte für den ALARP-Bereich begrenzende Risiken der oben betrachteten Nationen, sowie deren Aversionsfaktoren.

ren gegenüber schwerwiegenden Konsequenzen. Abbildung 2.7 zeigt beispielhaft die F-N-Kurven der Niederlande, Großbritanniens und Dänemarks.

Risikogrenzwerte aus dem Bereich des täglichen Lebens sind in [Gan12b] beschrieben und im Anhang A.2 Tabelle A.1 zusammengefasst.

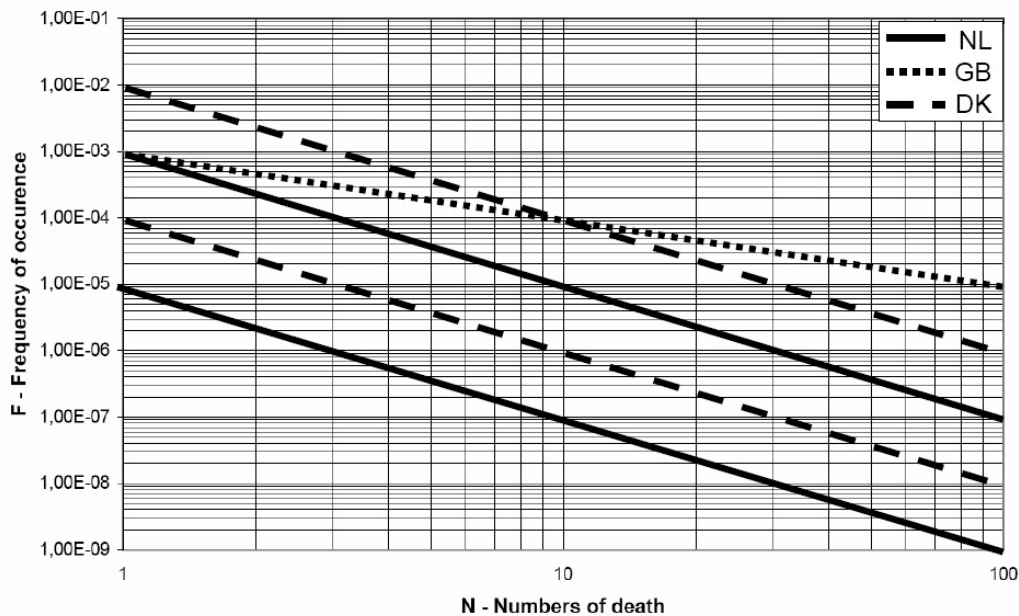


Abbildung 2.7.: F-N-Kurven im internationalen Vergleich

2.6. Problematik der deutschen Methodik der Risikoanalyse

Die Unzulänglichkeiten der deutschen Methodik der Risikoanalyse wurden bereits in den Kapiteln 1.2 und 2.3 dargestellt. Kernpunkt ist die Zugrundlegung einer produktspezifischen Beschaffenheitsnorm zur Festbeschreibung der Sicherheit einer Technologie. Diese erfolgen nach festen Vorgaben in Verbindung mit Sicherheitsfaktoren oder über Lebensdaueranforderungen. Die Sicherheit der Technologie wird dabei über Vermutungswirkung bei Einhaltung der Anforderungen erreicht, dass der Regulierung nach dem derzeitigen Stand der Technik Genüge getan wurde. Diese Methodik entspricht somit im weitesten Sinne einer Zuverlässigkeitsanalyse des Systems gegen Funktionsversagen. Mögliche sich aus einem Dennoch-Versagen ergebende Konsequenzen werden bei dieser Methodik nicht berücksichtigt. Es wird demnach ein Sicherheits- oder invers Risikowert angegeben, der im eigentlichen Sinne nicht existiert. Gegeben ist ein Wert der Zuverlässigkeit des Systems, ohne Angabe der potentiellen Konsequenzen. Es wird somit von einer „Null-Risiko“-Theorie, einem System der absoluten Sicherheit, ausgegangen, welches nicht zu erreichen ist [Wol07; HHW87; Har99]. Welches Risiko von einer Technologie ausgeht und ob dieses Risiko akzeptabel ist, wird mit dieser Methodik nicht erfasst.

Ein Problem dieser Methodik liegt in der geringen Vergleichbarkeit der so ermittelten Risiken. Durch die Festlegung produktspezifischer Beschaffenheitsnormen ist die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Risiken nur selten gegeben. Eine sich daraus ergebende Konsequenz

ist die Problematik der Harmonisierung von Technologien, z. B. im europäischen Raum. Ohne die Festlegung allgemein gültiger Kriterien ist ein Vergleich unterschiedlicher Risiken nicht möglich. Eine Unzulänglichkeit liegt in der Tatsache, dass die Zuverlässigkeit der Funktionalität bewertet wird. Diese Methode ist zwar legitim und durchaus ausreichend, dennoch unterbleibt die Analyse und Bewertung der mit einer Technologie einhergehenden Gefahren. Durch systematische Analyse der Konsequenzen können anwendungsbezogenen Schwachpunkte einer Technologie erkannt und bewertet und so Rückschlüsse auf deren Risiko gezogen werden. Somit ergäbe sich die Option der konsequenzregulierenden Risiko- und Technologieoptimierung. Aus diesem Grund erscheint die Abkehr von der produkt-spezifischen Beschaffenheitsnorm hin zu anwendungsbezogenen Anforderungen sinnvoll, wobei keine Reduzierung des bestehenden Sicherheitsniveaus erfolgen darf.

2.7. Risikomanagement und Zielsetzung

Der Prozess des Risikomanagements ist die Betrachtung des gesamten das Risiko betreffenden Systems. Nach [DIN02] gehören zu diesem insbesondere die Definition des Geltungsbereichs sowie der Abgrenzung der Aktivität, die Festlegung von Zielen und die Darstellung der Ergebnisse. Kernstück des Prozesses ist die Verknüpfung der Elemente Risikobeurteilung, -regulierung und -akzeptanz. Ausgehend von der Analyse des Risikos und deren Bewertung erfolgt die Darstellung der Ergebnisse in der Risikobeurteilung. Diese erfolgt über den Vergleich des ermittelten Risikoniveaus mit festgelegten Kriterien der Risikoakzeptanz. Darauf aufbauend erfolgt die Regulierung der Risiken, indem Maßnahmen formuliert werden, um zu hohe Risiken auf ein sicheres Maß zu senken. Ausgehend von der Regulierung kann somit eine neue Beurteilung des Risikos erfolgen, mit dem Ziel eine bessere Beurteilung zu erreichen. Die Maßnahmen der Risikoregulierung sollten insbesondere geeignet sein eine Akzeptanz des betreffenden Risikos durch die Gesellschaft zu erhalten. Daher ist über den gesamten Verlauf des Risikomanagementprozesses eine möglichst transparente und nachvollziehbare Risikokommunikation mit der Gesellschaft zu gewährleisten [SFK04]. Auf diese Weise kann die Glaubwürdigkeit des Prozesses und die daraus resultierende Bestimmung und öffentliche Diskussion von Risiken und Maßnahmen zu deren Regulierung enorm verbessert werden. Aus dem Element der Risikoakzeptanz können wiederum Rückschlüsse auf mögliche Maßnahmen der Regulierung gezogen und der Prozess quasi „von unten“ beeinflusst werden. Zu beachten ist, dass aus den Rückschlüssen aus Risikoregulierung und -akzeptanz weder eine Verschlechterung des eigentlichen Standes der Risikobeurteilung resultieren noch eine Auslegung des Risikomanagementprozesses rein auf die gesellschaftliche Akzeptanz unter Vernachlässigung technischer Gesichtspunkte erfolgen darf. Abbildung 2.8 verdeutlicht den Prozess des Risikomanagements.

Weitere Ausführungen zum Risikomanagementprozess sowie unterschiedliche Modelle der Risikoabschätzung finden sich in [SFK04; Wol07; HHW87; Ker79; DIN02; DIN01b; 12B80]. Die Beschreibung der einzelnen Schritte und klare Festlegung, welches Maß in diesen gefordert wird, macht die Methode in Anlehnung an die alte Störfall-Verordnung [12B80] zum für diese Arbeit geeigneten Modell. Um diese Methode der vorliegenden Arbeit anzupassen, werden einige Änderungen in ihrer Struktur und ihrem Ablauf vorgenommen, die im Folgenden beschrieben werden.

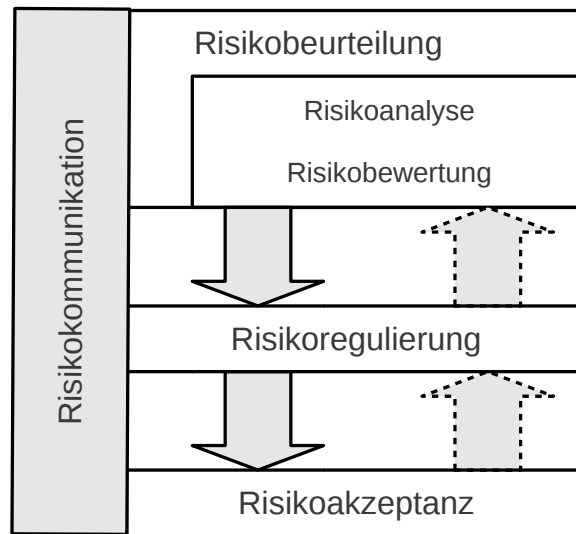


Abbildung 2.8.: Risikomanagementprozess (in Anlehnung an [SFK-GS-41])

Schritt 1: Zielvereinbarung

Das Betrachtungsziel der Arbeit wird definiert. Methoden der Risikobeurteilung und Eingangsgrößen sowie der Mangel an diesen werden benannt.

Schritt 2: Systembeschreibung

Alle relevanten Informationen über die Technologie Druckbehälter sowie ihre Einsatzbedingungen im Fahrzeugbau werden zusammengestellt. Die Versagensarten von Druckbehältern sowie die physikalischen Grundlagen von Explosionen und Druckwellen werden beschrieben und Anforderungen der Regelwerke an Druckbehälter im Fahrzeugbau werden dargestellt.

Schritt 3: Festlegen der zu bewertenden Konsequenz

Der Einfluss der Auswirkungen auf die Höhe des Risikos wird dargestellt. Die Unvergleichbarkeit unterschiedlicher Konsequenzarten wird erläutert und eine für die Arbeit repräsentative Konsequenz wird ausgewählt.

Schritt 4: Ermitteln der zu bewertenden Konsequenz

Die Bedingungen, unter denen die in Schritt 3 festgelegte Konsequenz erfolgt, werden ermittelt. Die unterschiedlichen Möglichkeiten, die zum Eintreten der Konsequenz führen können, werden beschrieben und bewertet.

Schritt 5: Ermittlung von Auslösern der Konsequenz

Ereignisse, die zum Eintreten der Konsequenz führen können, werden aufgelistet und beschrieben. Eine für diese Arbeit repräsentative Anzahl auslösender Ereignisse wird ausgewählt und bewertet.

Schritt 6: Ermitteln der Betroffenheit von der Konsequenz

Die Verknüpfung von Gefährdung über die Anwesenheit von Personen zum Risiko wird dargestellt. In Abhängigkeit vom örtlichen Auftreten des Ereignisses werden Personendichten definiert, die von der Konsequenz des Druckbehälterversagens betroffen werden können.

Schritt 7: Festlegen eines Risikokriteriums

Ein Risikokriterium wird festgelegt, an Hand dessen die spätere Beurteilung der ermittelten Risiken erfolgt.

Schritt 8: Festlegen von Grenzwerten der zu bewertenden Konsequenz

Aufbauend auf Schritt 4 werden Grenzwerte der Konsequenzen definiert, bis zu denen das Eintreten der festgelegten Konsequenz mit hinreichend genauer Wahrscheinlichkeit erfolgen wird. Dies erfolgt insbesondere über die Ermittlung von Wahrscheinlichkeiten der Konsequenz und Zuordnung dieser in Zonen unterschiedlichen Risikos.

Schritt 9: Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Auslösern der Konsequenz

Ermittlung der relativen Häufigkeit der in Schritt 5 dargestellten konsequenzauslösenden Ereignisse an Hand statistischer Daten. Erstellen von Wahrscheinlichkeiten der Ereignisse aus den Werten der relativen Häufigkeit.

Schritt 10: Ermittlung des Individuellen Risikos

Ermittlung des Individuellen Risikos relevanter Behälterunfälle bezogen auf die statistische Personendichte in Deutschland. Die Ermittlung erfolgt unter Zuhilfenahme begrenzender Faktoren sowie der Poissonverteilung.

Schritt 11: Darstellen des Sozialen Risikos / Risikoerfassung

Das Individuelle Risiko der Risiko-Zonen aus Schritt 10 wird über die Korrelation mit der Personendichte zum Sozialen Risiko erhoben. Dies erfolgt mittels der in Schritt 6 ermittelten Personendichte an Hand ausgewählter Szenarien. Mit diesem Schritt wird die Erfassung des Risikos abgeschlossen.

Schritt 12: Risikobeurteilung

Beurteilung des Risikos an Hand des in Schritt 7 gewählten Risikokriteriums. Darstellung der Höhe des betrachteten Risikos und daraus folgend Schlussfolgerungen zur allgemeinen Akzeptanz.

Schritt 13: Risikosteuernde Maßnahmen

Maßnahmen der Risikoregulierung werden vorgestellt. Zu ihnen zählen insbesondere die Einflussnahme auf die Konsequenz sowie die Eintrittswahrscheinlichkeit, die aus technischen oder infrastrukturellen Möglichkeiten resultieren.

Bei der Methodik dieser Arbeit handelt es sich demnach um eine semiprobabilistische Vorgehensweise der Risikobeurteilung (vgl. Kapitel 2.2). Bei der semiprobabilistischen Risikoanalyse werden statistisch verwertbare Daten mit probabilistischen Methoden der Vorhersage verknüpft. In dieser Arbeit erfolgt die Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Straßenverkehrsunfällen, die geeignet sind, zu einem Druckbehälterversagen zu führen auf statistischer Grundlage. Die Vorhersage der Konsequenzen dagegen bedient sich probabilistischer Methoden.

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer risikobasierten anwendungsbezogenen Methodik der Risikobeurteilung. Im Gegensatz zur aktuell in Deutschland angewandten Methode, wonach eine Technologie auf Grund produktbezogener Anforderungen beurteilt wird, wird hier eine Alternative geschaffen, die Sicherheit der Gesellschaft vor einer Technologie an Hand des von dieser emittierten Risikos zu beurteilen. Diese neu entwickelte Methode bietet die Möglichkeit, durch einheitliche Risikoanalyse und -bewertung auch unterschiedliche Technologien bezüglich ihres öffentlich-technischen Risikos vergleichen zu können. Zu diesem Zweck wird in dieser Arbeit das Risiko von Druckbehältern im Straßenverkehr ermittelt und beurteilt.

Die Risikobeurteilung erfolgt durch Analyse des Risikos und seiner Bewertung. Konsequenzen des Druckbehälterversagens und die Wahrscheinlichkeit des Versagens an Hand empirischer Erfahrungswerte und statistischer Auswertungen werden ermittelt. Die Beurteilung erfolgt dabei auf Grundlage von Grenzwerten, die auf dem allgemeinen Mortalitätsrisiko aufbauen.

3. Systembeschreibung

Die Systembeschreibung beschränkt sich auf die Komponenten Druckbehälter und deren regeltechnische Anforderungen sowie die Darstellung der physikalischen Grundlagen von Explosionen. Das in dieser Arbeit betrachtete System bezieht sich ausschließlich auf die Komponente Druckbehälter, nicht aber auf die zusätzlichen im Kraftfahrzeug verbauten Komponenten des gesamten Treibgasspeichersystems. Anwendungsbezogene Komponenten, wie Druckminderer, Verbindungen, usw. werden in dieser Arbeit ebenso wenig berücksichtigt wie Komponenten der Sicherheit, z. B. Überdruckventile. Eine alle Komponenten berücksichtigende Risikoanalyse würde den Rahmen dieser Arbeit bei Weitem übersteigen.

3.1. Druckbehälter

Bei den Druckbehältern werden vier Typen unterschieden [ECE08]:

- CNG I : Metall,
- CNG II : Metallinnenbehälter, mit matrixgebeteter Endlosfaser verstärkt (in Richtung des Umfangs umwickelt),
- CNG III : Metallinnenbehälter, mit matrixgebeteter Endlosfaser verstärkt (vollständig umwickelt),
- CNG IV : nichtmetallischer Innenbehälter mit matrixgebeteter Endlosfaser (Vollverbundkonstruktion),

Schematische Abbildungen der unterschiedlichen CNG-Typen sind in Abbildungen 3.1 dargestellt.

CNG-Typ I

Dieser Speichertyp weist eine reine Metallkonstruktion auf, welche nach [ADR05] nur aus Kohlenstoffstahl, legiertem Stahl, Nickel oder Nickellegierungen sowie Aluminium und dessen Legierungen bestehen darf. Die Sicherstellung der Permeabilität als auch die Lastaufnahme erfolgt durch den Metallliner.

CNG-Typ II

Da Druckbehälter quer zur auftretenden Innenspannung versagen und die Spannung in Querrichtung zur Längsachse nach der Kesselformel [Fis99] dem Doppelten der Spannung in Längsrichtung entspricht, werden Armierungen eingesetzt, um die auftretenden Lasten aufzunehmen. Der CNG-Typ II weist neben dem metallischen Liner eine Armierung in Umfangsrichtung auf, die zusätzlich zum Liner zur Lastaufnahme bestimmt ist.

CNG-Typ III

Bei diesem CNG-Typ wird der Hauptteil der Last durch die Fasern der Armierung aufge-

nommen, die aus diesem Grund den kompletten Zylinder umgibt. Der Liner besitzt weiterhin eine Resttragfähigkeit, wobei dessen Hauptanliegen die Sicherstellung der Permeabilität ist.

CNG-Typ IV

Bei diesem auch Voll-Composite genannten Druckbehälter besteht der Liner aus einem Polymerwerkstoff, dessen Aufgabe die Sicherstellung der Permeabilität ist, und einer Armierung, welche den kompletten Behälter umgibt. Die auftretende Last wird ausschließlich von den Fasern der Armierung aufgenommen.

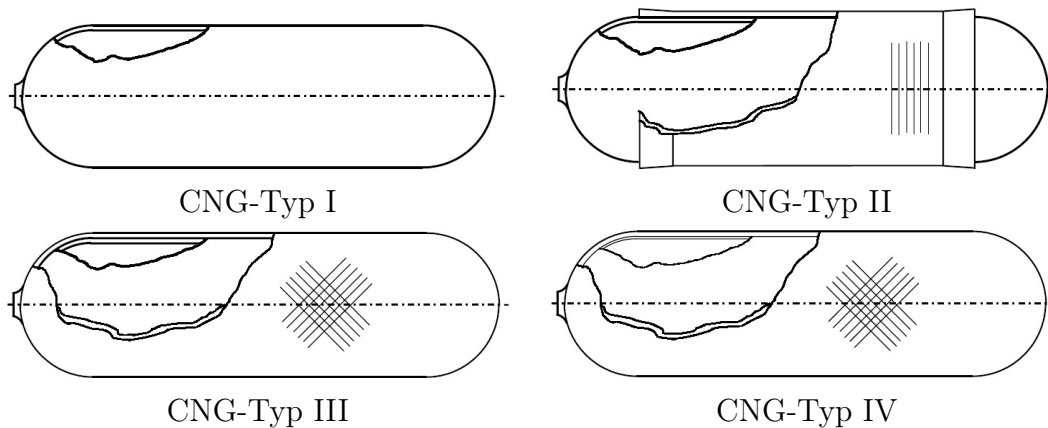


Abbildung 3.1.: CNG-Typen I - IV [MNBH03]

Als Versagensarten von Druckbehältern lassen sich die zwei folgenden Phänomene beschreiben (vgl. [Mai95]):

- Leckage-vor-Bersten
- Bersten des Druckbehälters
 - ohne anschließende chemische Reaktion
 - mit anschließender chemischer Reaktion.

Beim Leckage-vor-Bersten-Versagen handelt es sich um ein kontinuierliches Ausströmen des gespeicherten Mediums durch einen Riss in der Behälterwandung ohne Aufbau eines Überdrucks. Diese Art der Schädigung soll im weiteren Verlauf der Arbeit nicht berücksichtigt werden, da die Möglichkeit von Personenschäden durch diese Versagensart zwar nicht gänzlich auszuschließen ist, jedoch als sehr gering betrachtet werden kann.

Bei der Versagensart des Behälterberstens ohne anschließende chemische Reaktion handelt es sich um das plötzliche Aufreißen der Behälterwandung, wodurch das unter Druck gespeicherte Medium schlagartig freigesetzt wird. Hiermit verbunden ist ein an die Umgebung abgegebener Überdruck, der von verschiedenen Faktoren bestimmt wird:

- Behältervolumen
- Behälterinnendruck
- Abstand zum Druckbehälter
- verschiedene Umgebungseinflüsse (Reflexion, Luftdruck, etc.).

Die Konsequenzen des Behälterberstens ergeben sich aus dem resultierenden Überdruck und seinen direkten und indirekten Auswirkungen auf Personen. Das Behälterbersten ohne anschließende chemische Reaktion kann mit dem Zerknall eines unter Überdruck stehenden Reifens verglichen werden [KG85]. Wird die gespeicherte Energie schlagartig und komplett entlassen, so ist der Effekt derjenige einer kleinen Explosion (vgl. Kapitel 3.3).

Für die Versagensart Behälterbersten mit anschließender chemischer Reaktion sind zwei Voraussetzungen notwendig:

- Der Behälter muss durch inneren Überdruck oder äußere Einwirkung aufreißen bzw. bersten.
- Es müssen eine ausreichende Zündquelle und ein Oxidationsmittel vorhanden sein.

Es ist eine Vielzahl unterschiedlicher Szenarien denkbar, die zu einem Aufreißen/Bersten des Druckbehälters führen können. Im Rahmen dieser Arbeit werden allerdings ausschließlich die aus einem Verkehrsunfall resultierenden Möglichkeiten in die Risikoanalyse mit einbezogen.

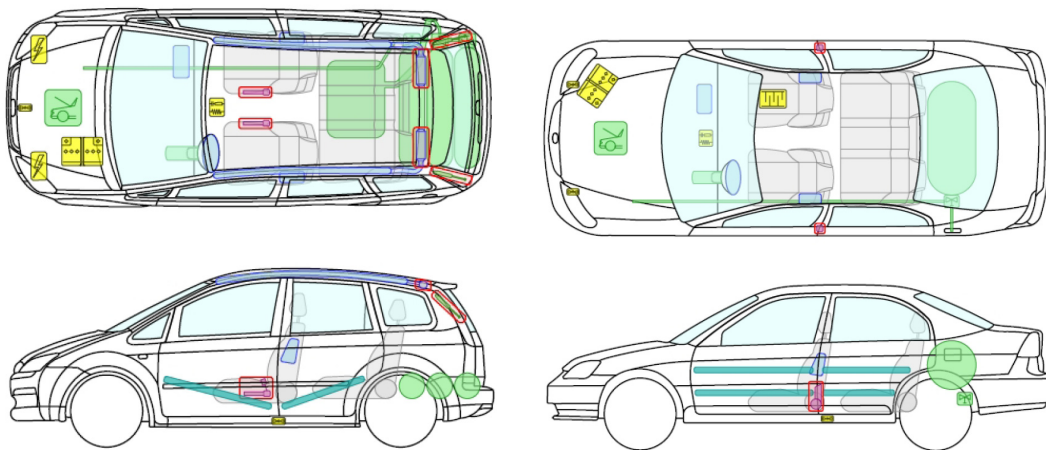


Abbildung 3.2.: Anbringung der Druckbehälter bei einem Ford Focus und einem nachgerüsteten Honda Civic [Mod10]

Im Pkw-Bau werden in der Regel Druckbehälter des CNG-Typs I gebraucht. Dies ist in erster Linie auf den geringeren Preis gegenüber Teil- oder Voll-Composite-Behältern begründet, womit deutlich wird, dass die Gewichtsreduktion durch diese Behälter im Bereich privat betriebener Fahrzeuge eine untergeordnete Rolle spielt. Die Anbringung des oder der Druckbehälter variiert je nach Hersteller und Modell, jedoch können einige Aussagen getroffen werden, die in der Vielzahl der Fälle zutreffen. Serienmodelle verfügen häufig über mehrere meist unterschiedlich große Druckbehälter, deren Anbringung nahezu ausschließlich im hinteren Teil des Fahrzeugs erfolgt, häufig Unterflur auf Höhe der Rückbank oder hinter dieser. Fahrzeuge mit nachgerüstetem Erdgasantrieb verfügen selten über mehr als einen Druckbehälter, der in der Regel im Kofferraum untergebracht ist. Abbildung 3.2 zeigt die beispielhafte Anbringung von Druckbehältern in Serienmodellen bei einem Ford Focus mit drei Druckbehältern im Kofferraum hinter der Fahrzeugachse und einem nachgerüsteten Honda Civic mit einem Druckbehälter hinter der Rückbank über der Fahrzeugachse. Der Vorteil der Serienmodelle liegt in folgenden Punkten:

- Die Verteilung auf mehrere Druckbehälter bewirkt eine bessere Verteilung des Gewichts.

- Die Anbringung Unterflur mittels Bändern oder in eigenem Käfig reduziert die Belastung der Behälter bei Heckunfällen.
- Durch die Verteilung des Speichervolumens auf mehrere Druckbehälter werden im Schadensfall geringere Auswirkungen erreicht.

3.2. Anforderungen technischer Regelwerke

Bei der Betrachtung der Rechtsgrundlagen für Erdgas in Druckbehältern müssen zwei unterschiedliche Rechtsgebiete unterschieden werden.

1. Das große und historisch gewachsene Rechtsgebiet des Gefahrguttransports geht auf das Abkommen des ADR [ADR05] zurück und wird in Anhang A.3 ausführlich behandelt.
2. Das zweite Rechtsgebiet betrifft den Druckbehälter als spezielles Bauteil von Kraftfahrzeugen, in deren Antriebssystem komprimiertes Erdgas (CNG) verwendet wird, und somit unter die Regelung ECE-R 110 [ECE08] fällt.

Grundlage der Anwendbarkeit der ECE-R 110 [ECE08] ist das „Übereinkommen über die Annahme einheitlicher technischer Vorschriften für Radfahrzeuge, Ausrüstungsgegenstände und Teile, die in Radfahrzeuge(n) eingebaut und/oder verwendet werden können, und die Bedingungen für die gegenseitige Anerkennung von Genehmigungen, die nach diesen Vorschriften erteilt wurden“ [BGB58] der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (Economic Commission for Europe, ECE). Diesem Übereinkommen gehören zur Zeit 47 Staaten sowie die Europäische Gemeinschaft als Vertragspartner an. Es ermöglicht insbesondere den Erlass einheitlicher technischer Vorschriften durch die Vertragspartner, vor allem für Kraftfahrzeuge sowie deren gegenseitige Anerkennung und Zulassung. Zu den von der Europäischen Gemeinschaft angenommenen Regelungen und Änderungen von Regelungen, die dann auch in Deutschland gelten, bedarf es gemäß Artikel 300 Absatz 7 EG-Vertrag vom 2. Oktober 1997 in Verbindung mit Artikel 1 Absatz 4 (bei neuen Regelungen) und Artikel 1 Absatz 7 (bei bestehenden Regelungen) des geänderten Übereinkommens von 1958 keines zusätzlichen Rechtsaktes, mit dem diese Regelungen bzw. Änderungen von Regelungen in innerstaatliches, d. h. in deutsches Recht übernommen werden. In diesen Fällen erfolgt eine Bekanntmachung einer deutschsprachigen Fassung im Verkehrsblatt (VkBl.), dem Amtsblatt des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. [BMV11] Die ECE-Regelungen gelten somit auch für den deutschen Rechtsraum, wobei die Regelungen für den Einbau, die Ausführung und die Reparatur unter den § 41a der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) [StV09] fallen.

Der Nachweis der an Druckbehälter gestellten Anforderungen wird durch Prüfungen gewährleistet. Der Umfang der Prüfung wird durch die Zielvereinbarung des Verfahrens, dem der Druckbehälter unterzogen wird, geregelt. So werden

- Zulassungsverfahren (Konformitätsverfahren),
- Neubewertung der Konformität vorhandener Druckbehälter und
- wiederkehrende Prüfungen

unterschieden. Bei diesen Verfahren lassen sich wiederum unterschiedliche Arten der Prüfungen unterscheiden, die sowohl durch ihren Umfang als auch durch die Anzahl der zu prüfenden Druckbehälter bestimmt wird. Bei diesen Arten lassen sich unterscheiden:

- Bauartprüfung,
- Losprüfung,
- Prüfungen an jedem Druckbehälter.

Bauartprüfungen müssen bei jeder neuen Konstruktion an fertig gestellten Gasflaschen durchgeführt werden, die für die normale Produktion repräsentativ und mit der vorgeschriebenen Kennzeichnung versehen sind [DIN01a]. Losprüfungen beschränken sich auf die stichprobenartige Auswahl von Produkten einer Produktionsserie und müssen ebenfalls repräsentativ für diese sein. Prüfungen an jedem Druckbehälter einer Produktionsserie sind immer zerstörungsfrei.

Die Richtlinie 1999/36/EG [RL199] verweist bezüglich aller drei oben genannten Verfahren auf die Rahmenrichtlinien 94/55/EG und 96/49/EG [RL994; RL996], welche durch die Rahmenrichtlinie 2008/68/EG [RL208] ersetzt wurden. Die Ortsdruck-Verordnung [Ort04] verweist bezüglich Konformitätsbewertung und wiederkehrenden Prüfungen auf die Richtlinie 1999/36/EG und somit weiter auf die Rahmenrichtlinie 2008/68/EG und bezüglich der Neubewertung der Konformität direkt auf die Rahmenrichtlinie 94/55/EG (neu 2008/68/EG). Diese verweist ihrerseits bei den genannten Verfahren auf das ADR [ADR05]. Bei der ECE-R 110 [ECE08] handelt es sich um eine eigenständige Regelung, wobei die Anforderungen der DIN EN ISO 11439 [DIN01a] nahezu deckungsgleich mit diesen sind und auf eine Vielzahl weiterer technischer Normen verweisen.

Mit dem Erfüllen der Anforderungen dieser Prüfungen wird, ganz nach der deterministischen Vorgehensweise, die Integrität und Sicherheit des Druckbehälters angenommen. Anwendungsbezogene Funktionalität und Sicherheit des Druckbehälters werden nach diesen Anforderungen und Prüfverfahren über deterministische Nachweisverfahren erbracht. Hierbei wird angenommen, dass die gestellten Anforderungen sowohl das gesamte Spektrum der systeminhärenten Versagensmöglichkeiten als auch das der äußeren Einwirkungen abdeckt. Aus historischer Sicht werden Grenzwerte für deterministisch ermittelbare Anforderungen (Mindestwanddicke, Mindestberstdruck, etc.) abgeleitet und von deren Erfüllung auf die Gewährleistung der rechtlichen Vorgaben geschlossen.

Nicht im gesetzlichen Rahmen vorgegeben sind dem gegenüber Grenzwerte für die aus dem möglichen Versagen eines Druckbehälters resultierenden Konsequenzen sowie die Höhe der dazugehörigen Eintrittswahrscheinlichkeiten. Ziel der Untersuchungen dieser Arbeit ist es, eben diese Auswirkungen aus dem Versagen von Druckbehältern im Straßenverkehr zu ermitteln und auf Grund von deren Eintrittswahrscheinlichkeiten das von diesen ausgehende Risiko für die Gesellschaft zu beurteilen. Die Beurteilung der Höhe des Risikos erfolgt dabei in Anlehnung an sogenannte F-N-Kurven, wie sie insbesondere in den Niederlanden und Großbritannien gebraucht werden (vgl. Kapitel 2.5).

3.3. Physikalische Grundlagen der Explosion und Druckwellen

Bei einem Brand handelt es sich um die selbstständige, fortlaufende Reaktion eines Brennstoffes mit einem Oxidationsmittel (in der Regel der Sauerstoff der Luft) unter Einwirkung einer ausreichenden Zündquelle zur Initialzündung. Dabei pyrolysiert der Brennstoff durch die Wärme der Zündquelle, d. h. der feste Brennstoff geht ohne Verweilen in der Flüssigphase in den gasförmigen Zustand über. Befinden sich Brenngas und Reduktionsmittel in einem stöchiometrischen Verhältnis, erfolgt die Zündung des Brenngas-Oxidationsmittel-Gemisches. Produziert dieses Gemisch bei der Verbrennung wiederum genügend Energie, um die Verbrennung aufrecht zu erhalten, so kann der Vorgang ohne weitere äußere Zuführung von Energie ablaufen. Befinden sich Brenngas und Oxidationsmittel im vorgemischten Zustand und im stöchiometrischen Verhältnis, so erfolgt bei Zuführung ausreichender Energie eine Explosion. Emmons fasste diese drei Faktoren sowie ihr Verhältnis zueinander in einem Tetraeder zusammen (vgl. Abbildung 3.3).

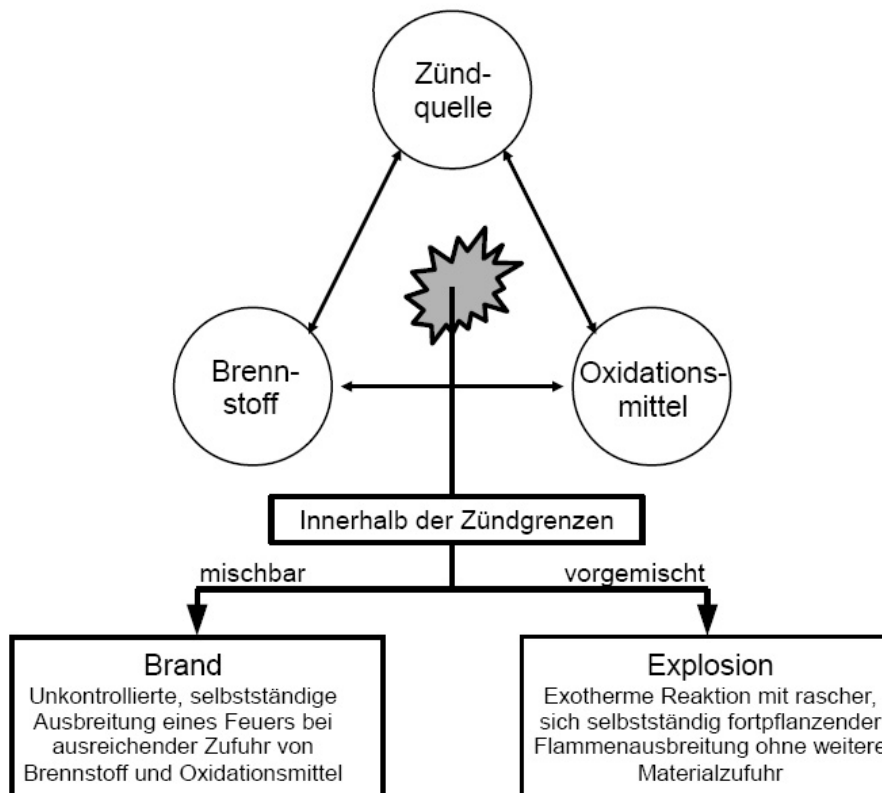


Abbildung 3.3.: Zündungstetraeder nach Emmons (in Anlehnung an [Poh89])

Bei einer Explosion handelt es sich um eine plötzliche, schlagartige Abgabe von Energie [KG85; Lee80; Zal03]. Während bei einer Verbrennung die Energiefreisetzung auf einen volumenmäßig kleinen Bereich beschränkt ist und über einen längeren Zeitraum erfolgt, so erfolgt diese bei der Explosion in sehr kurzer Zeit und bei einem relativ großen Volumen. Dabei kann die freigesetzte Energie nicht ohne weitere Auswirkungen durch die Umgebung aufgenommen werden; dies führt zu Verdichtungserscheinungen im umgebenden Medium unter Druck- und Wärmeerscheinungen. [Som98] Die Energiefreisetzung an die Umgebung ist dabei so rasch, dass eine Druckwelle mit endlicher Amplitude entsteht

[KRS⁺00]. Diese Druckwelle stellt ein Gebiet komprimierter und erwärmter Luft dar, welches sich vom Zentrum der Explosion sphärisch ausbreitet und dabei schrittweise seine Energie von einer Luftschicht zur nächsten überträgt und somit zu einer Fortpflanzung der Explosionsdruckwelle vom Zentrum führt. Diese Komprimierung der Luft führt zu einem Anstieg des Luftdrucks, der einige Größenordnungen über dem des atmosphärischen Luftdrucks liegt. Da sich die Druckwelle bei ungestörter Fortpflanzung sphärisch ausbreitet, verteilt sich die Druckenergie mit zunehmendem Abstand von der Explosionsquelle auf ein immer größeres Luftvolumen, was zu einem allmählichen Absinken der Höhe der Druckwelle führt. Durch die Trägheit der bewegten Luftmassen und der expansiven Abkühlung entsteht an der Rückseite der Druckwellenfront ein Gebiet negativen Drucks, also einem, der geringer ausfällt als der umgebende Luftdruck. [Som98]. Diese negative Phase wird bei Untersuchungen zu den Auswirkungen der Druckwelle meistens ignoriert, da Druckamplitude und Impuls der positiven Phase wesentlich größer ausfallen [DOE81]. Der Druck der negativen Phase unterschreitet den Umgebungsdruck normalerweise um nicht mehr als etwa 0,275 bar [Lee80].

Die bei der Explosion freigesetzte Energie ist von zentraler Bedeutung. Die Höhe der Auswirkungen einer Explosion lassen sich direkt über die Menge der freigesetzten Energie wiedergeben, die in Joule angegeben werden kann und somit ein objektives Maß der Bewertung vorgibt. [KG85; Lee80; Zal03] Die freiwerdende Energie setzt sich aus den beiden Komponenten

- Höhe der Druckwellenfront (Druckamplitude) und deren
- Impuls

zusammen. Der Impuls ist dabei der zeitliche Druckanstieg. Dieser ist ein Maß für die Flammengeschwindigkeit und somit die Heftigkeit der Explosion und ist definiert als der Anstieg der Tangente im Wendepunkt der Steigung der Druck-Zeit-Kurve und rechnerisch darstellbar als Quotient aus Druck- und Zeitdifferenz der Tangente [Bar78]. Die Faktoren Druckamplitude und Impuls werden als Maßstab zur Bestimmung der Explosion herangezogen. Aus diesem Grund wurde versucht die Explosionswirkung über die Energie zu beschreiben. Basis dieses Ansatzes ist das Ähnlichkeitsgesetz von Crane und Becker, nach dem sich die Radien zweier gleicher Druckamplituden verhalten, wie die dritte Wurzel der von der zugehörigen Explosion freigesetzten Energie [KRS⁺00].

Bei den Explosionen lassen sich zwei grundlegende Mechanismen des Reaktionsablaufes unterscheiden:

1. Detonation

Bei der Detonation handelt es sich um eine Druckwelle, deren Front sich mit Überschallgeschwindigkeit bewegt. Die Detonation weist eine hohe Amplitude und einen hohen Impuls auf.

2. Deflagration

Bei der Deflagration handelt es sich um eine Druckwelle, deren Front sich mit einigen m/s bis zu etwa 100 m/s ausbreitet [Som98]. Die Deflagration weist im Gegensatz zur Detonation eine wesentlich geringere Steigung in der Druck-Zeit-Kurve und somit geringere Werte für Druckamplitude und Impuls auf.

Die Unterschiede von Druckamplitude und Impuls von Detonationen und Deflagrationen zeigt Abbildung 3.4 auf.

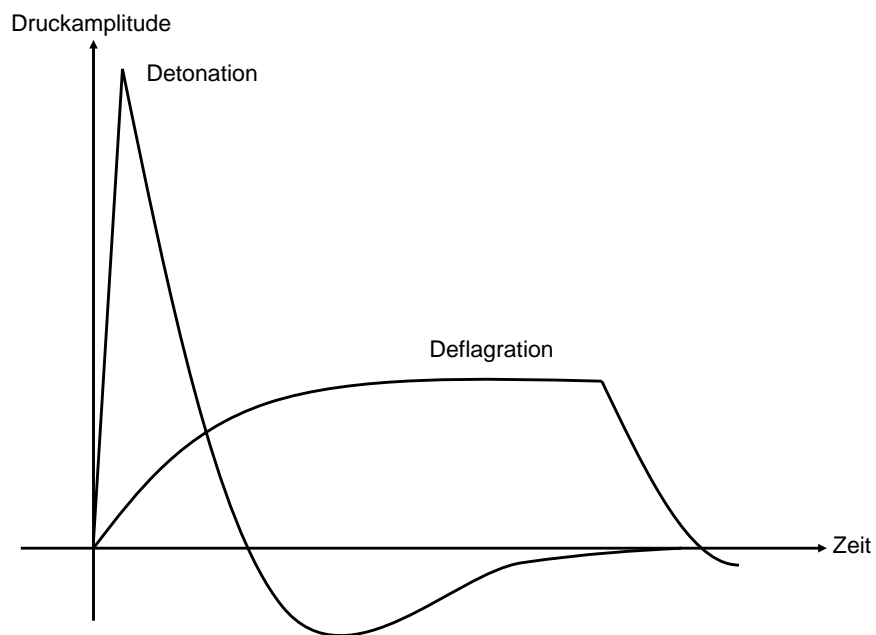


Abbildung 3.4.: Typische Druck-Zeit-Ablauf von Detonationen und Deflagrationen

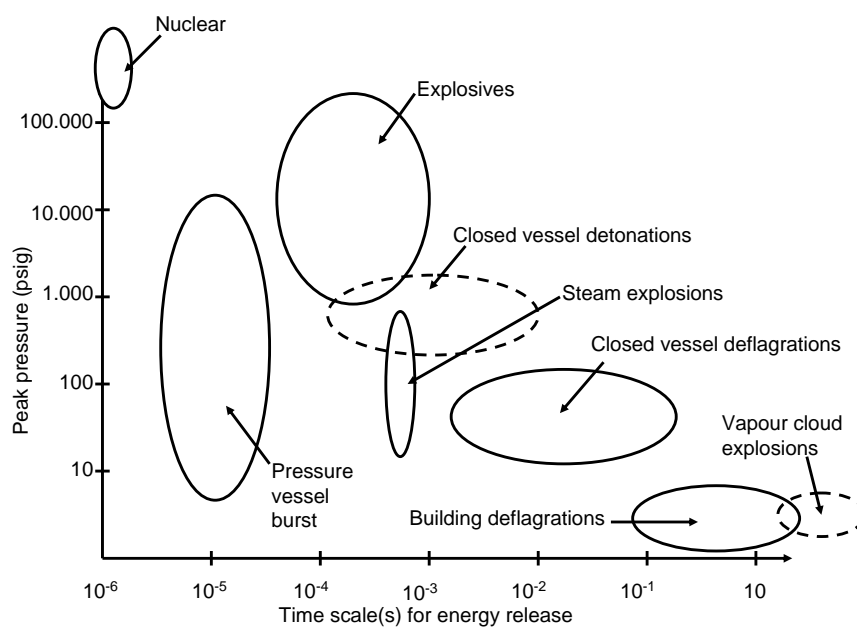


Abbildung 3.5.: Druckamplitude und Impuls unterschiedlicher Explosionen [Zal03]

Die beiden Komponenten Druckamplitude und Impuls bilden somit ein Maß zur Bewertung der Zerstörungswirkung der Explosion. Abbildung 3.5 zeigt exemplarisch die Werte der Druckamplitude und des dazugehörigen Impulses unterschiedlicher Explosionen. Nichts desto weniger wird in der Realität bei Abschätzungen der Auswirkungen von Druckwellen weniger der Impuls als vielmehr die Druckamplitude, im folgenden Spitzenüberdruck genannt, berücksichtigt [KRS⁺00; Som98; Zal03]. Das ist darauf zurückzuführen, dass mit zunehmendem Abstand von der Explosionsquelle der Einfluss des Impulses gegenüber dem Spitzenüberdruck immer geringer ausfällt [Zal03]. Dabei ist immer zu beachten, dass es sich hierbei um eine konservative Schätzung handelt, weil mit kürzer werdender Einwirkdauer der Druckwelle höhere Drücke für die gleiche Wirkung erforderlich sind [KRS⁺00], und die Abschätzung im Nahbereich der Explosion ungenauer wird, da dort ebenfalls der dynamische Überdruck zu berücksichtigen ist [Som98].

Durch die Reflexion von Druckwellen können sich Drücke ergeben, die einen sehr viel höheren Betrag des Spitzenüberdrucks der ankommenden Druckwelle ausmachen.

Detonationsdruckwellen werden an Hindernissen nach den Gesetzen der Gasdynamik reflektiert, wodurch sich Drücke ergeben können, die dem zwei- bis achtfachen (bei Explosivstoffen noch mehr) des ankommenden Spitzenüberdrucks entsprechen. Dies gilt für das senkrechte Auftreffen von Druckwellen auf eine unendlich ausgedehnte starre Wand; bei endlichen Hindernissen kommt es zum Umfließen, welches den Druckverlauf beeinflusst und die quantitative Berechnung erschwert. [Som98]

Dieses Umfließen eines endlichen Hindernisses begründet die Ungenauigkeit bei der Abschätzung von Deflagrationsdruckwellen. Die Deflagrationsdruckwelle weist an der Front einen langsamen Druckanstieg auf, der dazu führt, dass auch der Reflexionsdruck langsam aufgebaut wird. Reicht diese Zeit aus, um zu einem Umfließen des Hindernisses zu führen, so wird zum einen der Reflexionsdruck gemindert, zum anderen die Berechnung erschwert. [Som98]

Nach [KG85; Lee80] ist das Bersten eines unter Druck stehenden Autoreifens einer kleinen Explosion gleich zu setzen. Dies liegt an der oben beschriebenen, schlagartigen Freisetzung der unter Druck gespeicherten Energie an die Umgebung. Ein berstender Druckbehälter gibt seine unter Druck gespeicherte Energie über den Zeitraum frei, den es bedarf, um den Druckbehälter genügend aufzureißen, was typischerweise einem Wert von etwa 10 μs entspricht [Zal03]. Auf Grund der im Vergleich zu chemischen Reaktionen geringen Menge an freiwerdender Energie ist bei dieser Art der Explosion von einer Deflagration auszugehen. Bei der anschließenden chemischen Reaktion des austretenden Gases handelt es sich im entfernten Sinne um eine Gaswolkenexplosion. Nach [Som98] kann davon ausgegangen werden, dass gesättigte Kohlenwasserstoffe, wie Methan und somit auch Erdgas, deflagrativ reagieren. Bei der Betrachtung der Auswirkungen von Druckwellen durch Versagen von Druckbehältern wird ausschließlich die Höhe des Spitzenüberdrucks berücksichtigt. Betrachtungen im Nahfeld werden durch diese Vorgehensweise zwar ungenau, dafür allerdings konservativ betrachtet. Da die Druckbehälter deflagrativ versagen, können Reflexionen an Hindernissen nicht berücksichtigt werden.

3.4. Aussagen der Systembeschreibung

Aus der Systembeschreibung lassen sich sowohl einige für den weiteren Verlauf der Arbeit wichtige Kernaussagen ziehen als auch Einschränkungen des Betrachtungsraums dieser Arbeit festlegen.

1. Bei den in dieser Arbeit betrachteten Druckbehältern handelt es sich um CNG-Typ I, da diese vornehmlich im Kraftfahrzeugbau von Personenkraftwagen verwendet werden (vgl. Kapitel 3.1).
2. Das Bersten des Druckbehälters mit und ohne anschließende chemische Reaktion bildet den Betrachtungsgegenstand der Versagensarten (vgl. Kapitel 3.1).
3. Die im deutschen und europäischen Rechtsraum gestellten Anforderungen sind ausnahmslos deterministischer Art. Durch Erfüllen der gestellten Anforderungen wird die Sicherheit des Systems Druckbehälter als gewährleistet angesehen (vgl. Kapitel 3.2). In dieser Arbeit werden probabilistische Methoden bemüht, um Wahrscheinlichkeiten besagter Versagensarten und deren Konsequenzen quantitativ darzustellen. Ziel hiervon ist abzuschätzen, ob und wie weit das Risiko von Druckbehältern im Straßenverkehr für die Gesellschaft als akzeptabel zu bewerten ist.
4. Die betrachtete Versagensart weist eine deflagrativ verlaufende Druckwellenfront auf (vgl. Kapitel 3.3).
5. Zur Bewertung der durch die Druckwellenfront entstehenden Auswirkungen wird ausschließlich der Spitzenüberdruck (Druckamplitude) berücksichtigt, da der Einfluss des Impulses mit zunehmendem Abstand zur Explosionsquelle geringer wird. Die damit erzielte Abschätzung ist konservativer Natur, im Fernfeld der Explosionsquelle jedoch hinreichend genau (vgl. Kapitel 3.3).
6. Beim Druckbehälterbersten ohne anschließende Reaktion handelt es sich um die schlagartigen Freisetzung der unter Druck gespeicherten Energie an die Umgebung. Da bei diesem Ereignis keine nennenswerte Zunahme der Temperatur (im Vergleich zur Explosion) erfolgt, werden die Auswirkungen des Unterdrucks nicht berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.3).
7. Da die Druckbehälter deflagrativ versagen, können Reflexionen an Hindernissen nicht berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 3.3).

4. Theoretische Grundlagen der Entwicklung einer Methodik der Risikobeurteilung von Druckbehältern im Straßenverkehr

Die vorangegangenen Kapitel zeigen die Komplexität der Risikobetrachtung, unterschiedliche Modelle der Risikoanalyse sowie die Grenzen des in dieser Arbeit betrachteten Systems der Druckbehälter im Fahrzeugbau. Um die Aussagen und Ergebnisse der Risikoanalyse richtig deuten und beurteilen zu können, ist es notwendig, den Rahmen der Betrachtung genau zu definieren. Nach der klassischen Methode der Risikoanalyse (vgl. Kapitel 2.1) wird das Risiko über seine Konsequenzen und die Wahrscheinlichkeit seines Eintretens definiert. In dieser Arbeit wird der Begriff der Konsequenz erweitert. Es wird in Anlehnung an das Individuelle Risiko (vgl. Kapitel 2.4) eine Konsequenz definiert, ohne Berücksichtigung des Ausmaßes. Über die Verknüpfung der Konsequenz mit der von ihr betroffenen Personenzahl wird das Ausmaß der Konsequenz formuliert. Im Folgenden werden diese das Risiko darstellenden Faktoren Konsequenz, Eintrittswahrscheinlichkeit und betroffene Personenzahl beschrieben und auf deren Besonderheiten eingegangen. Da die Vielzahl der Parameter, die diese Faktoren begründen, den Rahmen dieser Arbeit übersteigen würde, wird eine Auswahl an betrachteten Parametern getroffen und diese begründet. Im Anschluss wird ein Risikokriterium definiert, mit dem die Beurteilung des Risikos erfolgt. Die ersten drei Unterkapitel stecken somit den Rahmen der Risikoanalyse ab, die dem Ansatz der technischen Risikobeschreibung entspricht. Das letzte Unterkapitel beschreibt die Bewertungsgrundlage und schließt somit den Rahmen zur Risikobeurteilung.

4.1. Konsequenzen

Um das Risiko CNG-betriebener Fahrzeuge im Straßenverkehr zu beurteilen, werden im Folgenden die Konsequenzen des Druckbehälterversagens analysiert. Der Vergleich möglicher Konsequenzen stellt bereits ein Hindernis dar: In wieweit sind unterschiedliche Konsequenzen miteinander vergleichbar? Wie viel monetärer Schaden ist mit einem Menschenleben vergleichbar? Welchen monetären Gegenwert hat eine irreversible oder reversible Verletzung? Wie können unterschiedliche Verletzungen miteinander verglichen werden? Wie verhält es sich mit Umweltschäden?

Das Bundesamt für Umwelt der Schweiz hat zu dieser Fragestellung in [BUW96] Werte vorgegeben, um unterschiedliche Risiken miteinander vergleichen zu können. Mit diesen

Werten sollen Todesopfer mit der Verschmutzung von ober- und unterirdischen Gewässern, Böden und allgemeinen Sachschäden verglichen werden können (vgl. Abbildung 4.1). Hintergrund dieser vergleichenden Darstellung unterschiedlicher Risiken war nicht der Wunsch, unterschiedliche Risiken einheitlich zu analysieren und zu beurteilen, sondern viel mehr ein wirtschaftspolitischer Aspekt. Die bisher unabhängig agierenden Kantone der Schweiz standen in direkter Konkurrenz um die Anwerbung von Technologien und somit Arbeitsplätzen [Spa10]. Durch die Vergleichbarkeit von Risiken wurde eine allgemeingültige Grundlage der Risikobeurteilung geschaffen.

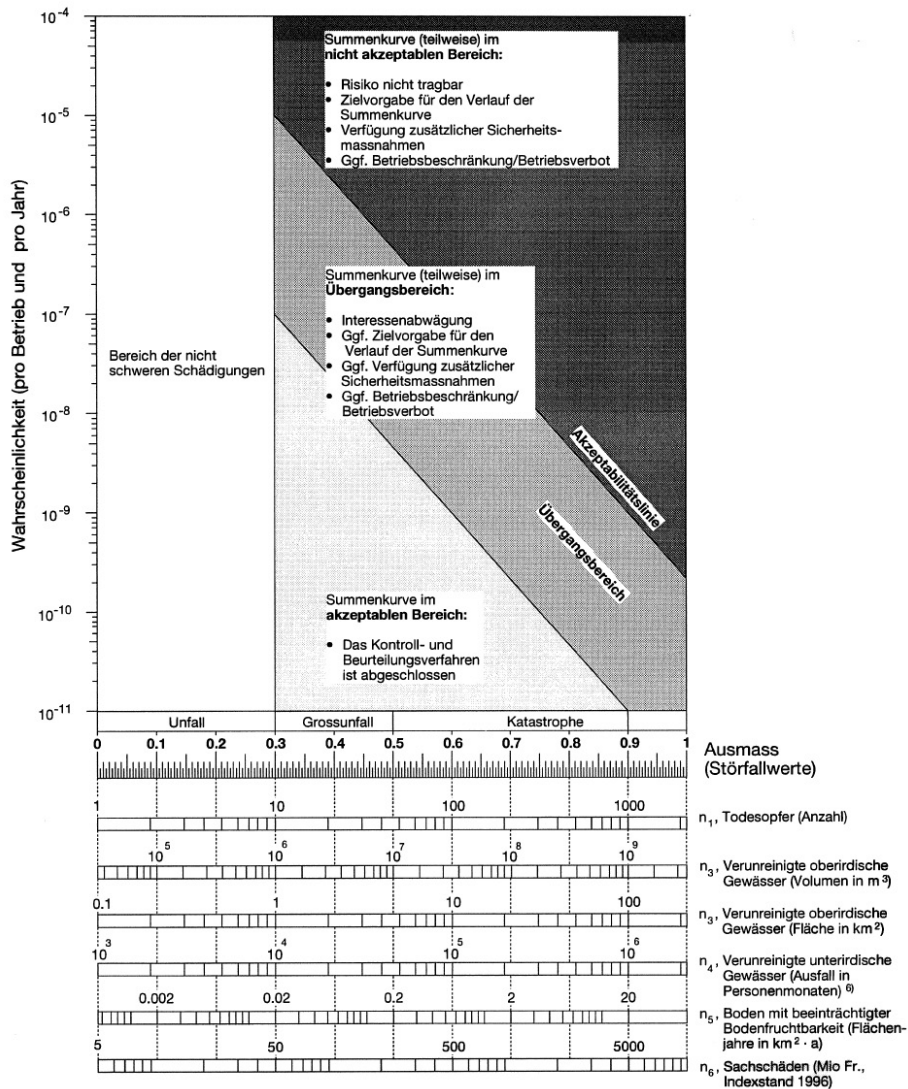


Abbildung 4.1.: Eintrittswahrscheinlichkeit-Konsequenz-Diagramm zur Beurteilung des Risikos [BUW96]

In Deutschland spielt die vergleichende Risikobewertung dagegen bislang kaum eine Rolle, weder im Bereich der Risikoabschätzung und -beurteilung noch im Bereich des Risikomanagements. Die Gründe des nicht Anwendens vergleichender Risikobewertungen sind vielfältig, lassen sich jedoch oftmals auf die Tatsache zurückführen, dass Risiken unterschiedlicher Regulationsbereiche nicht gemeinsam betrachtet werden. Ein Nachteil liegt allerdings darin begründet, dass somit in manchen Bereichen Risiken hingegenommen werden, die in anderen Bereichen nicht toleriert werden [SWH⁺03].

Eine vergleichende Aussage des Risikos von erdgasbetriebenen zu herkömmlich betriebenen Kraftfahrzeugen ist somit nur möglich, sofern alle möglichen Konsequenzen beurteilt und miteinander verglichen werden. Dies würde jedoch den Rahmen der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchung bei Weitem übersteigen.

Eine anschauliche Methode, unterschiedliche technische Risiken miteinander zu vergleichen, ist diese in Fälle gleicher Konsequenzen aufzuteilen und im Hinblick auf ihre Eintrittswahrscheinlichkeit zu betrachten. Da die Sicherheit von Personen bei allen Risikobeurteilungen immer im Vordergrund stehen sollte, empfiehlt es sich an dieser Stelle, als Konsequenz den Todesfall von Personen anzusetzen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines einzelnen Ereignisses einer ortsungebundenen Anlage pro Jahr, ab der die Konsequenz mindestens ein Todesfall wäre, stellt das Individuelle Risiko (vgl. Bot00; Boh98; TAW85; VAsC08; KFGH02; VK03) dar. Ob Personen anwesend sind oder nicht, spielt bei der Bewertung des Individuellen Risikos keine Rolle; entscheidend ist die Darstellung, dass die Konsequenz eines Ereignisses ausreichend wäre, mindestens eine Person zu töten. Die Anzahl der durch das Ereignis betroffenen Personen ist die Verbindung des Individuellen zum Sozialen Risiko.

Um die Vielzahl möglicher Versagensereignisse von Druckbehältern im Straßenverkehr vergleichbar darzustellen, ist es notwendig eine Konsequenz vorzugeben, an Hand derer das Risiko der untersuchten Versagensart dargestellt und verglichen werden kann. Die Konsequenzen aus der Versagensart Leckage-vor-Bersten eines Druckbehälters werden hauptsächlich durch die stoffinhärenten Eigenschaften des Füllguts beschrieben und sind somit für die Bewertung des von Druckbehältern ausgehenden Risikos von geringer Bedeutung. Die Konsequenzen aus einem Behälterbersten, die in dieser Arbeit ermittelt werden, ergeben sich in direkter und indirekter Weise durch den beim Aufreißen des Behälters an die Umgebung abgegebenen Druck. Direkte Konsequenzen für den Menschen ergeben sich aus der Wirkung des Überdrucks auf den Menschen sowie aus den Bruchstücken des versagenden Druckbehälters. Indirekte Konsequenzen ergeben sich aus durch die Druckwelle beschleunigte Trümmer- und Wurfstücke.

Um über das Risiko bzw. die Gefahr von Druckbehältern eine Aussage treffen zu können und letztlich Konsequenzklassen und -radien definieren zu können, müssen den Werten des Überdrucks Auswirkungen auf Mensch und Umgebung zugeordnet werden. Bei der Risikobeurteilung von Druckbehältern im Straßenverkehr sollten insbesondere zwei Arten von Konsequenzen unterschieden werden: solche, die sich direkt auf den Menschen auswirken und solche, die über ihre Auswirkungen auf Gebäude, Anlagen, die Umgebung, usw. einen indirekten Einfluss auf den Menschen ausüben. An Hand der direkt auf den Menschen einwirkenden Konsequenzen lassen sich Radien bestimmen, in denen mit letalen Folgen, schwerwiegenden oder leichten sowie keinen Verletzungen zu rechnen ist. Es lassen sich demnach verschiedene Konsequenzklassen sowie Radien um den Explosionsmittelpunkt definieren, in denen diese wirken. Die Auswirkungen dieser Konsequenzen auf umliegende Strukturen bieten wiederum die Möglichkeit zu Personenschäden zu führen, allerdings können diese nicht so genau angegeben werden, wie dies bei den direkt auf den Menschen einwirkenden Konsequenzen der Fall ist. Für die indirekten Konsequenzen sind zur Zeit allerdings keine Werte vorhanden. Werte des Überdrucks, die zu sekundärem Trümmerflug führen, sind vorhanden, jedoch keine Aussagen, inwieweit diese Trümmerstücke zu den betrachteten Konsequenzen führen. Als Beispiel hierfür soll der Spitzenüberdruck von 0,01 bar angeführt werden: die direkt auf den Menschen einwirkende Konsequenz wäre das Umwerfen von Personen, eine Konsequenz, bei der letale Folgen zwar nicht generell aus-

zuschließen sind, mit großer Wahrscheinlichkeit jedoch eher mit leichten Verletzungen gerechnet werden kann. Bei den Gebäudeschäden wäre für diese Druckspitze die Zerstörung von etwa 10 % der betroffenen Fensterscheiben zu nennen, eine Konsequenz, die sicherlich zu letalen Personenschäden führen kann, deren Eintrittswahrscheinlichkeit sich allerdings nur annähernd abschätzen lässt. In diesem speziellen Fall kann kaum abgeschätzt werden, welche der Fensterscheiben zu den 10 % gehören, die zerstört werden, ob und wie viele Personen sich genau in der Reichweite der Trümmerstücke eben dieser Fensterscheiben aufhalten und ob die kinetische Energie der Trümmerstücke ausreichend ist, grundsätzlich zu einer Verletzung der Personen zu führen. Ein Ziel dieser Arbeit liegt somit in der Ermittlung der Höhe von Überdrücken, bei denen durch sekundären Trümmerflug die betrachtete Konsequenz mit einer hinlänglichen Wahrscheinlichkeit erreicht wird.

4.1.1. Konsequenzen des Druckbehälterberstens

Das Ausmaß einer Explosion wird durch die freiwerdende Menge der Energie beschrieben, die im allgemeinen in Joule ausgedrückt wird. Die beim Bersten eines unter Druck stehenden Behältnisses an die Umgebung freigesetzte Energie in Form einer Druckwelle ist nur ein Teileffekt dieser gesamten Energiemenge. Für die Betrachtung der Auswirkungen durch den Spitzenüberdruck darf eben nur diejenige Energiemenge herangezogen werden, die in Form von Druck an die Umgebung freigegeben wird (vgl. [KG85]). Um Aussagen über die Effekte des Drucks machen zu können, müssen den Werten des Spitzenüberdrucks Auswirkungen auf umliegende Strukturen zugeordnet werden. Aus ihnen kann abgeleitet werden, welcher Schaden an Gebäuden, Infrastruktur und somit direkt wie indirekt dem Menschen entstehen.

Der Spitzenüberdruck übt auf Menschen, Gebäude, Infrastruktur, usw. eine Belastung aus, die zu erheblichen Schäden führen kann. Zur Abschätzung von Konsequenzen muss ein Zusammenhang zwischen der Höhe des Spitzenüberdrucks und den bei diesem Wert möglichen Auswirkungen auf die unterschiedlichen Strukturen erstellt werden. Wie oben erläutert, sind nur gleichartige Konsequenzen vergleichbar; die Schwierigkeit liegt in der Tatsache, dass unterschiedliche Auswirkungen auf die verschiedenen Strukturen zu gleichen Konsequenzen führen können. So kann beispielsweise ein Überdruck, der nicht ausreicht einen Menschen direkt fatal zu verletzen, Teile einer Mauer zum Einsturz bringen und dieselbe Konsequenz auf indirektem Weg erreichen.

In der Literatur werden vielfach die senkrecht reflektierten Stoßdrücke angegeben. Im Gegensatz dazu werden in der auf [KKL09; KRS⁺00] basierenden Tabelle 4.1 die halben Werte der Quellen [KG85; UBA92; Pfö70; Sch54; Hai55; Gla62; Wal69; Whi68; RD68] angegeben, die in etwa der Druckspitze der ungestörten Stoßwelle in Ausbreitungsrichtung entsprechen. Explosionen, die knapp über der Erdoberfläche erfolgen, breiten sich in Form von halbkugelförmigen Explosionsdruckwellen aus, während die Explosionsdruckwellen von Explosionen im Raum sich kugelförmig ausbreiten und vom Boden reflektiert werden. Der übliche Weg, diese Reflexion der Explosionsdruckwelle zu berücksichtigen, ist es, den Wert der von dieser Druckwelle erzeugten Energie gegenüber den Energien von halbkugelförmigen Explosionsdruckwellen zu verdoppeln. [Zal03] Da es sich bei den durch ein Druckbehälterbersten ausgesandten Explosionsdruckwellen um solche aus einer bodennahen Explosion handelt, wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit auf diejenigen Werte zurückgegriffen, die denen der ungestörten Stoßwelle entsprechen.

Tabelle 4.1.: Konsequenzen von Spitzenüberdrücken – Sortiert nach Druckspitze (in Anlehnung an [KKL09; KRS⁺00])

Spitzenüberdruck (bar)	Konsequenz
0,0015	Unangenehme Knallwirkung tiefer Frequenz
0,002	Gelegentlicher Bruch großer unter Spannung stehender Scheiben
0,003	Glasbruch durch Schallwellen Sehr lauter Knall
0,005	Bruch kleiner unter Spannung stehender Scheiben Schäden an Fensterrahmen, Türen und Dächern
0,01	Personen werden umgeworfen Zerstörung 10 % Fensterscheiben
0,015	Druckbezogener Grenzwert für Schäden durch Spreng- und Wurfstücke
0,02	Geringe Schäden an Dächern
0,03	Zerstörung 50 % Fensterscheiben Erstes Auftreten von leichten Verletzungen durch Glassplitter
0,05	Zerstörung 75 % Fensterscheiben
0,06	Zerstörung der Dächer und Wände von Holzhäusern
0,075	Stahlblechplatten verbeult
0,095	Stahlrahmen von Skelettgebäuden leicht verformt
0,1	Beschädigung Fensterrahmen vollständige Zerstörung der Fensterscheiben
0,12	Leichte bis mittlere Schäden an Wohngebäuden
0,175	Untere Grenze Trommelfellriss
0,2	Zerstörung gemauerter Wände
0,215	Öltanks aufgerissen
0,3	Beschädigung des Trommelfells
0,35	Mittlere bis schwere Schäden an Wohngebäuden Zerstörung von Stahlbetonwänden
0,4	Nahezu vollständige Zerstörung üblicher Gebäude
0,46	Leere Eisenbahnwagen umgeworfen
0,5	Zerstörung mehrgeschossiger Gebäude Zerstörung 50er Mauerwerk
0,6	Beladene Güterwagen umgeworfen
0,75	Beladene Güterwagen zerstört 99 % Schäden an horizontal gelagerten Druckbehältern 99 % Schäden an chemischen Reaktoren und Wärmetauschern
0,85	Untere Grenze für Lungenschäden
1,85	Untere Grenze für schwere Lungenschäden
2,05	Untere Letalitätsgrenze

Tabelle 4.2.: Konsequenzen von Spitzenüberdrücken nach verschiedenen Literaturangaben

Konsequenz	Spitzenüberdruck (bar)	Literatur
Bruch Fensterglas	0,002	[KKL09; KRS ⁺ 00; KG85]
Schäden an Fensterrahmen, Türen und Dächern	0,005	[KKL09; KRS ⁺ 00]
Personen werden umgeworfen	0,01	[KKL09; KRS ⁺ 00]
Bruch 10 % Fensterglas	0,01	[KKL09; KRS ⁺ 00]
druckbezogener Grenzwert für Schäden durch Spreng- und Wurfstücke	0,015 0,015 - 0,025	[KKL09; KRS ⁺ 00] [KG85]
Bruch 50 % Fensterglas	0,03	[KKL09; KRS ⁺ 00]
Erstes Auftreten von leichten Verletzungen durch Glassplitter	0,03	[KKL09; KRS ⁺ 00]
Bruch 75 % Fensterglas	0,05	[KKL09; KRS ⁺ 00]
Bruch 100 % Fensterglas	0,1	[KKL09; KRS ⁺ 00]
Leichte bis mittlere Schäden an Wohngebäuden	0,12	[KKL09; KRS ⁺ 00]
Zerstörung gemauerter Wände	0,2	[KKL09; KRS ⁺ 00]
Nahezu vollständige Zerstörung üblicher Gebäude	0,4	[KKL09; KRS ⁺ 00]
Untere Grenze für Lungenschäden	0,85	[KKL09; KRS ⁺ 00]
Untere Grenze für ernste Lungenschäden	1,85	[KKL09; KRS ⁺ 00]
Untere Letalitätsgrenze	2,05 2,05 - 2,65	[KKL09; KRS ⁺ 00]
50 % Letalität	2,65 - 3,45 4,55	[Whi68] [RD68]
99 % Letalität	3,3 - 4,5 7	[Whi68] [RD68]

Weitere Werte für die Konsequenzen von Spitzenüberdrücken sind in [KG85; UBA92; Pfo70; Sch54; Hai55; Gla62; Wal69; Whi68; RD68] angegeben. Eine Auswahl derjenigen Werte, die für die Bewertung der Konsequenzen des Spitzenüberdrucks auf den Menschen interessant erscheinen, wird in Tabelle 4.2 vorgestellt. Zu beachten ist hier, dass in den Literaturangaben die senkrecht reflektierten Stoßdrücke angegeben werden. Um hier Deckungsgleichheit mit den Werten der Tabelle 4.1 zu erhalten wurden die Werte hier halbiert, um so in etwa dem Spitzenüberdruck der ungestörten Stoßwelle in Ausbreitungsrichtung zu entsprechen.

Die direkten Effekte auf den menschlichen Körper infolge einer Explosion resultieren aus der Einwirkung des Überdrucks auf den menschlichen Körper. Wegen der Kompressibilität entsteht Schaden am menschlichen Körper insbesondere dort, wo Unterschiede der Gewebedichte vorhanden sind oder in bzw. nahe Luft-/Gas-enthaltenden Organen [BFR68]. Diese werden durch den extern einwirkenden Überdruck zusammengepresst, wodurch sich der hydrostatische Druck in ihnen erhöht und somit zu Schäden am Blutkreislauf führt [Som98]. Aus diesem Grund sind die Effekte des Drucks auf die Lunge besonders wichtig zur Vorhersage der Mortalität [BFR68]. Schäden am Trommelfell resultieren dagegen

noch bei relativ geringen Werten des Überdrucks, führen in der Regel aber nicht zu fatalen Verletzungen.

Gegenüber unbelebten Strukturen ist der menschliche Organismus allerdings in der Lage, vergleichsweise hohen Werten des Spitzenüberdrucks stand zu halten [Som98]. Generell erhöht sich die Widerstandskraft gegenüber Druckschäden mit Vergrößerung des Lungenvolumens sowie mit zunehmenden Verhältnis des Lungenvolumens zur Körpermasse [BFR68]. Die Tabellen 4.1 und 4.2 zeigen diesen Sachverhalt auf. So werden nach Tabelle 4.1 ab einem Druck von 0,4 bar übliche Gebäude nahezu vollständig zerstört, die untere Grenze für Lungenschäden beim Menschen hingegen liegt bei 0,85 bar. Vergleicht man diese Tabellen hinsichtlich der Auswirkung auf den Menschen, so fallen insbesondere die folgenden Konsequenzen mit nahezu deckungsgleichem Überdruck auf:

untere Grenze für Trommelfellschäden beim Menschen:

- 0,175 bar nach [KKL09; KRS⁺00; Gla62; Whi68; RD68]

untere Grenze für Lungenschäden beim Menschen:

- 0,85 bar nach [KKL09; KRS⁺00]
- 0,85 – 1,1 bar nach [Whi68]

untere Grenze für ernste Lungenschäden beim Menschen:

- 1,85 bar nach [KKL09; KRS⁺00; Whi68]

untere Letalitätsgrenze für den Menschen:

- 2,05 bar nach [KKL09; KRS⁺00]
- 2,05 – 2,65 bar nach [Whi68]

Aus diesen Übereinstimmungen lässt sich ableiten, dass die weiteren Aussagen zu den Konsequenzen des Drucks auf den Menschen nach [Whi68] eine Fortführung der oben getroffenen Aussagen darstellen. [Whi68] definiert weiterhin eine

50 % Letalitätsgrenze für den Menschen bei

- 2,65 – 3,45 bar und eine

99 % Letalitätsgrenze für den Menschen bei

- 3,3 – 4,5 bar.

Wie in Kapitel 4.1 dargestellt, ist eine vergleichende Beurteilung unterschiedlicher Risiken nur unter unveränderten Randbedingungen möglich. Von den beiden das technische Risiko beschreibenden Faktoren Konsequenz und Eintrittswahrscheinlichkeit stellt erstgenannter die besser vergleichbaren unveränderlichen Randbedingungen dar. Diese Arbeit zeigt exemplarisch eine Methodik auf, das Risiko einer Technologie auf Grund einer unveränderlichen Konsequenz im Hinblick auf seine Eintrittswahrscheinlichkeit zu beurteilen. Im Folgenden werden Eintrittswahrscheinlichkeiten ermittelt, infolge der Auswirkungen eines Druckbehälterversagens im Straßenverkehr fatale Verletzungen zu erleiden.

Studien zeigen, dass der menschliche Körper wesentlich höheren Werten des Spitzenüberdrucks widerstehen kann als unbelebte Objekte. Die menschliche Physiologie erlaubt es,

vergleichsweise hohen Druckspitzen zu widerstehen [Iss03], wodurch die direkten Auswirkungen des Überdrucks auf den Menschen relativ gering ausfallen. Entscheidender sind indirekte Einwirkungen durch Trümmerflug, wie im Folgenden gezeigt wird.

Mehr noch als die direkten Konsequenzen des Überdrucks sind die unter dem Begriff Trümmerflug zusammengefassten Auswirkungen für einen Großteil der Konsequenzen auf den Menschen verantwortlich. Unter den Begriff Trümmerflug fallen alle Objekte, die durch Überdruck von ihrer Position gelöst und beschleunigt werden und so als Geschosse wirken. Hierbei wird zwischen primären und sekundären Trümmerstücken unterschieden.

Als primäre Trümmerstücke werden solche bezeichnet, die sich aus der Quelle des Überdrucks bilden, im Falle eines berstenden Druckbehälters also dessen Teile. Ihre Auswirkungen werden definiert durch ihre Anzahl, Masse, Form, Anfangsbeschleunigung, Anfangsgeschwindigkeit, Flugweite sowie ihre Verteilung, die im Rahmen dieser Arbeit nur auszugsweise beschrieben werden. Eine ausführliche Beschreibung des primären Trümmerflugs findet sich in [GD11c; GD11b; Gan11] sowie weiterführend zu den einzelnen Punkten in [BW92; Aci03; HR85; AIC89; BCW⁺83].

Zur Zeit existieren keine rechnerischen Methoden zur Abschätzung der Anzahl von Trümmerstücken aus berstenden Druckbehältern [BW92; Aci03]. Eine Möglichkeit zum Abschätzen entstehender Trümmerstücke stellt die Auswertung von Unfällen oder bewusst durchgeführten Versuchen dar. In [HR85] wurden 130 Unfälle mit zylindrischen, horizontal gelagerten Lager- und Transportbehältern ausgewertet. Im Resultat lag die Anzahl an Trümmerstücken bei durch Brand zum Versagen gebrachten Behältern zwischen 0 und 10 Teilen. Eine genauere Analyse von 29 Berstunfällen mit Brandeinwirkung sowie acht ohne zeigte ein Auftreten von 1 bis 4 Trümmerstücken (vgl. Abbildung 4.2). Dies führte in [HR85] zur konservativen Abschätzung der Anzahl von ein bis nicht mehr als vier Trümmerstücken. Die Annahme, dass jedes dieser Projektile auch zu fatalen Verletzungen führt, erhöht dementsprechend das Risiko.

In [HR85] wurde neben der Anzahl der Trümmerstücke aus einem Behälterbersten auch deren Verteilung untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die Verteilung der Trümmerstücke eines berstenden zylindrischen, horizontal gelagerten Druckbehälters nicht gleichmäßig erfolgt. Nach statistischer Auswertung fällt der Großteil der Trümmerstücke von jeweils 30 % in einem Winkel von 30° zur Längsachse des Druckbehälters zu jeder Seite an. In diesem einen Drittel ausmachenden Bereich (zusammen 120°) der Druckbehälterumgebung fallen demnach zusammen 60 % aller Trümmerstücke an. Die restlichen 40 % der Trümmerstücke verteilen sich zu gleichen Teilen auf die verbleibenden 240° parallel zur Längsachse des Druckbehälters (vgl. Abbildung 4.2).

Die Methoden zur Bestimmung der Masse, Anfangsgeschwindigkeit und Flugweite von Trümmerstücken sind nicht geeignet, das von einem CNG-Kraftfahrzeug ausgehende Risiko zu beschreiben. Alle diese Methoden sind mit Annahmen, Schätzwerten und Ungenauigkeiten verbunden. Was fehlt, ist eine Methode zur Berechnung der Geschwindigkeit des Trümmerstücks in einem bestimmten Abstand zum Druckbehälter (in Abhängigkeit seines Gewichts). Es kann davon ausgegangen werden, dass

- ab einer gewissen Geschwindigkeit alle Trümmerstücke (unabhängig ihrer Masse) fatale Konsequenzen bewirken (vergleichbar mit Geschossen) und
- unterhalb dieser Geschwindigkeit Masse und Geschwindigkeit des Trümmerstücks korrelieren müssen, also mit Abnahme der Masse eine Zunahme der Geschwindig-

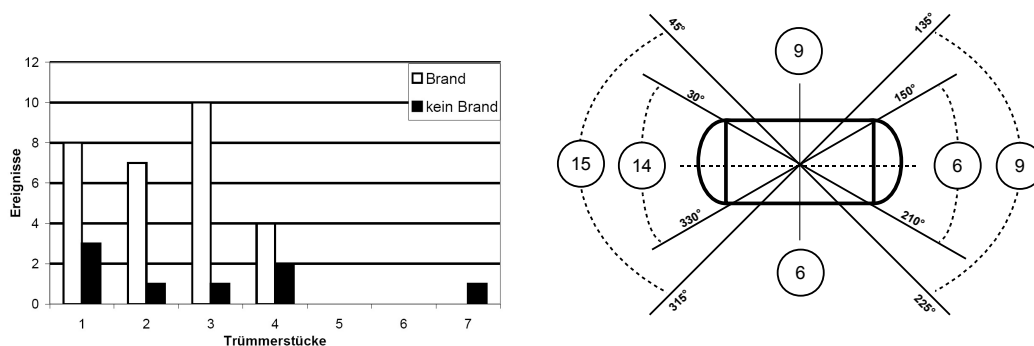


Abbildung 4.2.: Anzahl und Verteilung der Trümmerstücke nach dem Bersten zylindrischer, horizontal gelagerter Druckbehälter nach [HR85]

keit erfolgen muss bis zu einem Wert der Geschwindigkeit, ab dem von fatalen Konsequenzen nicht mehr ausgegangen werden kann.

Zur Analyse und Beurteilung des Risikos von Druckbehältern als Treibstoffspeicher im Straßenverkehr ist der primäre Trümmerflug nicht geeignet. Die Methoden zur Abschätzung der Konsequenzen des primären Trümmerflugs basieren auf der retrospektiven Analyse von Unfällen und sind in erster Linie zur Bestimmung von Einzelfallentscheidungen geeignet. Ihre Aussagen beziehen sich auf genau definierte Bedingungen an Druckbehälter und Versagenskriterien mit sehr engen Grenzen. Mit diesen Methoden lassen sich lediglich die oben genannten Aussagen darstellen. Aussagen, welche Geschwindigkeit ein Trümmerstück in einem bestimmten Abstand zur Expositionsquelle aufweist, sind mit diesen Methoden nicht möglich.

Aufschlussreicher wäre eine Methode, bei der neben der Anzahl und Verteilung von Trümmerstücken deren kinetische Energie über der Entfernung zum Druckbehälter in Abhängigkeit von dessen Innendruck und Volumen berechnet werden könnte. Insofern bleibt es bei der Aussage, dass durch ein Behälterbersten bis zu vier primäre Trümmerstücke entstehen, deren Flugweite vermutlich höher ist als jener Abstand zum Druckbehälter, in dem druckinduzierte Konsequenzen zu erwarten sind. [Gan11; Gan12a]

Als sekundärer Trümmerflug werden im allgemeinen Gegenstände bezeichnet, die durch eine Druckwelle von ihrem Aufenthaltsort aus geschossartig beschleunigt werden, wie z. B. Glassplitter aus Fenstern. Es wurde gezeigt, dass direkte Konsequenzen erst bei relativ hohem Überdruck zu erwarten sind. Dem gegenüber können bei wesentlich geringeren Werten des Spitzenüberdrucks Gegenstände beschleunigt werden und so als Konsequenz zu fatalen Verletzungen führen. Die häufigsten sekundären Trümmerstücke sind Fenstersplitter, umgeworfene Gegenstände sowie einstürzende Wände und Gebäude. Die Auswirkungen im Nahbereich der Druckausbreitungsquelle sind durch ihre Anzahl und Masse bestimmt. Bei den Effekten, welche in großen Abständen zur Ausbreitungsquelle noch messbare Konsequenzen hervorbringen, ist insbesondere die Zerstörung von Fensterscheiben zu nennen [Lee80]. Ihre Wirkung im Fernbereich kann allerdings nur wieder über die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens sowie ihrer durch den Druck entstehenden kinetischen Energie abgeschätzt werden. Bei der weitergehenden Analyse des Risikos durch sekundären Trümmerflug ist zu beachten, dass mögliche erreichbare Entfernungen alleine jedoch noch kein Ausmaß an Konsequenzen beschreiben; für die Bewertung des Ausmaßes ist die Größe der

betroffenen Fläche von Bedeutung, viel wichtiger jedoch sind die Bedingungen, welche auf dieser Fläche anzutreffen sind. Bedingungen, welche das Ausmaß einer Konsequenz auf eine bezogene Fläche beschreiben, sind unter anderem:

- die Personendichte,
- die Zeit des Eintritts. Die betroffene Personendichte erfährt starke Schwankungen in Abhängigkeit der Tages- bzw. Nachtzeit,
- das Vorhandensein von potentiellen sekundären Trümmerstücken,
- das Vorhandensein von potentiellen den Druck reduzierenden oder aufnehmenden Barrieren.

Die Tabellen 4.1 und 4.2 zeigen, dass Trümmerflug bis hin zu sehr kleinen Überdrücken möglich ist. Die Splitter von Fensterscheiben sind hierbei aus zwei Gründen besonders hervorzuheben:

1. Fensterscheiben gehen auf Grund ihrer hohen Sprödigkeit und der Tatsache, dass sie durch ihre Einspannung im Rahmen bereits unter Druck stehen, selbst bei niedrigsten Werten des Spitzenüberdrucks zu Bruch.
2. Fensterscheiben zersplittern in sehr viele, kleine und vor allem scharfkantige Fragmente. Die hohe Anzahl an Fragmenten führt dazu, dass in Ausbreitungsrichtung der Fragmente befindliche Personen nahezu immer durch die Auswirkungen der Fragmente betroffen werden. Die scharfkantigen Fragmente können selbst bei geringen Fluggeschwindigkeiten noch zu Schnittverletzungen führen.

In [HIP08b] werden Werte von Spitzenüberdrücken angegeben, die geeignet sind zur Fatalität des Menschen sowohl in Gebäuden, als auch im Freien zu führen. Angaben, ob sich diese Werte auf den reinen Druck oder ebenfalls auf durch Trümmerflug verursachte Schäden beziehen, werden nicht gemacht. Der Abgleich mit den Werten der Fatalitätswahrscheinlichkeit durch reine Druckeinwirkung zeigt, dass hier von der Fatalitätswahrscheinlichkeit auf Grund aller druckinduzierten Auswirkungen ausgegangen werden muss. Eine Auswahl der in [HIP08b] angegebenen Werte ist in Tabelle 4.3 dargestellt.

Tabelle 4.3.: Fatalitäts- und Verletzungswahrscheinlichkeiten nach [HIP08b]

Überdruck in bar	Sterbewahrscheinlichkeit in Prozent für Personen		Verletzungswahrscheinlichkeit in Prozent für Personen
	in Gebäuden	im Freien	
0,7	100	100	k. A.
0,35	50	15	k. A.
0,21	20	k. A.	k. A.
0,07	0	k. A.	10
0,035	0	k. A.	„sehr klein“ (1)

In [RCC99] werden ebenfalls drei Werte des Spitzenüberdrucks und der dazugehörigen Konsequenzen gegeben, ohne dabei eine Aussage zu treffen, ob es sich um Auswirkung des reinen Überdrucks handelt oder um Konsequenzen aus allen möglichen Einwirkungen

des Überdrucks. Die dort gegebenen Werte zeigen eine hohe Fatalitätswahrscheinlichkeit bei 0,6 bar auf, schwere Verletzungen gesunder Menschen bei 0,07 bar und eine Zone erhöhter Aufmerksamkeit ab einem Wert von 0,03 bar. Zu ergänzen sei hier, dass sich diese Werte auf Analysen zur Bewertung des Risikos in der Industrie beziehen, also auch Bereiche definieren, in denen keine Gefährdung besteht, aber eine erhöhte Aufmerksamkeit gefordert ist. Die Werte beider Literaturquellen korrelieren gut, so dass auf deren Grundlage die weitere Betrachtung der Auswirkungen des sekundären Trümmerflugs in dieser Arbeit vollzogen werden kann. Auf der einen Seite zeigen die Literaturquellen auf, dass Bereiche, in denen Fensterscheiben bereits zu Bruch gehen, kaum eine Rolle spielen. Auf der anderen Seite liegt der Wert einer 100 prozentigen Fatalitätsrate bereits bei 0,7 bar, also wesentlich unter den Werten, die durch reine Druckeinwirkung entstehen. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass die Werte der Glasbruchwahrscheinlichkeit alleine kein Maß zur Bestimmung der Fatalitätswahrscheinlichkeit des Menschen durch Trümmerflug darstellen, der Trümmerflug, insbesondere eben durch scharfkantige Glassplitter, allerdings die Grenzen der Fatalitätswahrscheinlichkeit hin zu geringerem Überdruck verschiebt.

4.1.2. Konsequenzfassung

Die Analyse von Risiken beginnt mit der Erfassung der Konsequenzen der betreffenden Technologie. Im Falle der in dieser Arbeit betrachteten Konsequenz der menschlichen Fatalität durch druckinduzierte Einwirkungen werden diese als Funktion des Abstandes zur Expositionsquelle angegeben. Auf diese Weise kann ein Gebiet definiert werden, in dem anwesende Personen betroffen sind.

Die spätere Beurteilung der Konsequenzen erfolgt über im Vorfeld festgelegte Risikokriterien. Aus diesem Grund ist es notwendig, Modelle anzuwenden, welche in der Lage sind, die Auswirkungen quantitativ zu erfassen und so die Konsequenzen unter vergleichbaren Maßstäben beurteilen zu können. Ziel dieses Kapitels ist es, ein Modell aus einer Vielzahl von Modellen aus der Fachliteratur zu ermitteln, welches sich den Bedürfnissen dieser Arbeit anpasst, quantitative Aussagen über den Wert des Spitzenüberdrucks aus einem spontanen Totalversagen von Druckbehältern zu liefern. Wesentliche Faktoren, die es bei diesen Modell zu berücksichtigen gilt, sind

- der Behälterinnendruck,
- das Behältervolumen,
- bei Explosionen stoffinhärente Eigenschaften.

Als Aussage wird durch diese Modelle der Wert des Spitzenüberdrucks in Abhängigkeit von der Entfernung zur Explosionsquelle erbracht. Diese Modelle dienen somit der Erfassung und Bereitstellung quantitativer Werte.

Eine Auswahl in Frage kommender Modelle sind das

- Modell des TNT-Massenäquivalents [KKL09; GD06; KRS⁺00; KG85; Som98],
- das TNO-Modell [KRS⁺00; Som98; BW92; Wie80] und die
- Multi-Energy-Methode der TNO [KRS⁺00; BW92; Ber85].

Eine ausführliche Beschreibung der Modelle ist in [Gan11; Gan12a] gegeben.

Da das Modell des TNT-Äquivalents als einziges der beschriebenen Modelle in der Lage ist, auf Grund von Behältervolumen, Behälterinnendruck und stoffinhärenter Faktoren Werte des Spitzenüberdrucks in Abhängigkeit vom Abstand zur Expositionsquelle zu generieren, sowie dabei sowohl das Bersten eines Druckbehälters ohne als auch mit anschließender chemischer Reaktion zu berücksichtigen, wird für die Weiterführung der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchung besagtes Modell zur Erfassung der druckinduzierten Konsequenzen zu Rate gezogen.

Die Validierung des Modells des TNT-Äquivalents ist in Anhang A.4 beschrieben.

4.2. Eintrittswahrscheinlichkeit

Nach der klassischen technischen Definition des Risikos (vgl. Kapitel 2.1) setzt sich ein Risiko aus der Wahrscheinlichkeit seines Eintretens und seiner Konsequenz zusammen. Die Ermittlung dieser Wahrscheinlichkeit kann dabei auf verschiedene Weisen erfolgen:

- retrospektive Betrachtung statistischer Daten
- Hochrechnen statistischer Daten bei geringer Datenlage
- Modellrechnungen.

Die Ermittlung aller Ereignisse, die zum Versagen eines Druckbehälters und den damit verbundenen Konsequenzen führen, würde den Rahmen dieser Arbeit bei Weitem übersteigen. Zur Präzisierung der vorgestellten Methodik wird im Folgenden ausschließlich die Eintrittswahrscheinlichkeit des Druckbehälterberstens infolge externer Einwirkungen durch Unfälle im Straßenverkehr untersucht. [Gan11; Gan12a]

4.2.1. Relative Häufigkeit und Eintrittswahrscheinlichkeit

Mit der Wahrscheinlichkeitsrechnung wurde eine mathematische Methode entwickelt die Möglichkeiten des Eintretens zufälliger Ereignisse zu berechnen. Die praktische Umsetzung dieser Methode weist jedoch einige Probleme auf:

1. Es liegen bei der Erfassung von Risiken beinahe stets unsichere Daten vor. Das bedeutet:
 - Es gibt für diese Daten keine repräsentativen und vertrauenswürdigen statistischen Erhebungen für eine frühere Periode und
 - es kann nicht vorausgesetzt werden, dass diese Daten in der Zukunft konstant (oder wenigstens annähernd gleich) bleiben.
2. In vielen Fällen liegen überhaupt nur Einzeldaten vor, über deren wiederholtes Auftreten gar keine Aussagen getroffen werden können.
3. Kopplungen von Ereignisabläufen treten völlig zufällig im Zeitablauf ein und sind statistisch nicht erfassbar. [Som98]

Daraus ergibt sich bezüglich der Risikoanalyse und -bewertung folgende Situation:

1. Die Bewertung der Eintrittsmöglichkeiten von Gefährdungseignissen ist auf der Grundlage der mathematischen Wahrscheinlichkeitstheorie in den meisten Fällen nicht möglich.
2. Eine subjektive Abschätzung der Eintrittsmöglichkeit der gefährlichen Ereignisse ist zwar prinzipiell durchführbar, erfordert aber kohärente widerspruchsfreie Schätzungen aller Ereignisse. Andernfalls ist die Vergleichbarkeit der Kennzahlen und eine Verknüpfung mit den Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung unmöglich. [Som98]

Eine andere Möglichkeit ergibt sich durch die Komplementärbeziehung von Risiko zu Sicherheit: Es wird postuliert, dass mit Zunahme der Sicherheit gleichermaßen das Risiko sinkt. So erscheint es möglich, über die Zuverlässigkeit technischer Systeme deren Sicherheit zu bestimmen. Diese Methode weist allerdings eine ähnliche Problematik wie die oben beschriebene mathematische Methode der Wahrscheinlichkeitsrechnung auf:

1. Aus der Zuverlässigkeit eines Systems lässt sich nicht zwangsläufig auf seine Sicherheit schließen. Das Versagen eines Systems bewirkt in erster Linie eine Beeinträchtigung seiner Funktionsfähigkeit. Ein nicht funktionsfähiges System stellt allerdings nicht zwangsläufig ein Sicherheitsrisiko dar. Viele technische Systeme sind nach dem Fail-Safe-Prinzip gebaut, nach dem ein System bei Verlust seiner Funktionsfähigkeit in einen sicheren Zustand fährt [PM85; Neu02].
2. Die Erfassung und Bewertung der Zuverlässigkeit technischer Systeme lässt keine eindeutigen Rückschlüsse auf deren Risiken zu. Auch absolut zuverlässige technische Systeme bergen Risiken in sich, die über die Erfassung der Zuverlässigkeit nicht berücksichtigt werden. [Som98]
3. Prinzipiell können nur zuverlässigkeitsbezogene Daten gewonnen werden, so dass die aus diesen Daten stammenden Aussagen nur die Zuverlässigkeit technischer Systeme bestimmen. [Som98]

In der Technik bedient man sich des Hilfsmittels der relativen Häufigkeit, in dem man die Häufigkeit bereits eingetretener Ereignisse auf einen bestimmten Zeitraum, in der Regel ein Jahr, bezieht. Diese relative Häufigkeit dient als Schätzwert der unbekannt Wahrscheinlichkeit, der mit einer Unsicherheit behaftet ist, welcher sich durch Angabe eines Vertrauensbereichs, in dem der zutreffende Wahrscheinlichkeitswert liegt, quantifizieren lässt [HHW87]. Hieraus wird bereits deutlich, dass das Problem dieser Methode in der retrospektiven Betrachtungsweise liegt. Aus den Häufigkeiten vergangener Ereignisse lässt sich nur bedingt auf die Wahrscheinlichkeit zukünftiger Ereignisse schließen, da sich deren Daten ständig ändern. Das eigentliche Problem liegt ferner in der Vorhersage zukünftiger Ereignisse mittels empirischer Wahrscheinlichkeitsangaben. Die Werte des Datenmaterials lassen an vielen Stellen nur subjektive statt objektive Bewertungsmöglichkeiten zu.

Eine Methodik, aus diesen Daten eine gute Näherung zukünftiger Ereignisse zu erhalten, ist über die Stabilität der relativen Häufigkeit gegeben. Diese macht sich bei langen Reihen von unabhängigen Wiederholungen ein und desselben Versuches in einer Weise bemerkbar, dass sich die ermittelten Zahlenwerte um einen bestimmten Zahlenwert gruppieren. Dieser Mittelwert ist zwar kein rechnerisch exakt ermittelter Wert, stellt aber eine gute Näherung des realen Wertes der Eintrittswahrscheinlichkeit dar. [Som98] Bei langen Reihen

mit annähernd konstanten Werten der Eintrittshäufigkeit kann also demnach von der relativen Häufigkeit vorangegangener Ereignisse auf eine zukünftige Eintrittswahrscheinlichkeit geschlossen werden. Dies wurde bereits im Kalkar-Urteil (vgl. Kapitel 2.3) gefordert. Dagegen spricht, dass diese Feststellung gerade nicht auf jene Ereignisse zutrifft, aus denen ein technisches Risiko berechnet werden soll [Som98]. Diese Komplexereignisse (z. B. Flugzeugabsturz, Störfall einer Chemieanlage) resultieren aus zufälligen Interaktionen von Einzelereignissen.

Es zeigt sich, dass im Falle der Häufigkeit von Verkehrsunfällen eine gewisse Konstanz vorliegt. Während die Zahl der Kfz-Zulassungen stetig gewachsen ist, sind die polizeilich erfassten Unfälle annähernd konstant geblieben und die Anzahl der Unfälle mit Personenschaden und fatalen Konsequenzen sogar rückläufig. Im Jahr 2011 kam es zu einem Anstieg der im Straßenverkehr getöteten Personen im Vergleich zum Vorjahr [Ver11a]. Der Blick in die statistische Reihe zeigt auf, dass kurzzeitige Zunahmen seit den siebziger Jahren immer wieder vorkamen, der sinkenden Tendenz der Verkehrstoten jedoch nie nachhaltig schaden. Es kann demnach davon ausgegangen werden, dass der Wert der relativen Häufigkeit der Unfallzahlen aus dem Jahr 2010 eine gute Näherung der zukünftigen Eintrittswahrscheinlichkeit von Straßenverkehrsunfällen darstellt.

Das bedeutet, je größer der betrachtete Zeitraum ist und je konstanter die Häufigkeit innerhalb der betrachteten Intervalle ausfällt, desto eher kann von einer konstanten Eintrittswahrscheinlichkeit der betrachteten Ereignisse in (naher) Zukunft ausgegangen werden. Die relative Häufigkeit beschreibt somit das Ableiten einer Eintrittswahrscheinlichkeit zukünftiger Ereignisse aus langen Reihen von statistisch erfassten und unabhängigen Ereignissen. Bei der relativen Häufigkeit handelt es sich zwar um einen Schätzwert, jedoch können Aussagen zur Höhe der Eintrittswahrscheinlichkeit als gute Näherung angesehen werden. [Gan11; Gan12a]

Für Deutschland lässt sich die Eintrittswahrscheinlichkeit von Unfällen im Straßenverkehr somit über die relative Häufigkeit bereits eingetretener Unfälle herstellen, da dafür ausreichend lange Datenreihen zur Verfügung stehen. Seit Beginn der 90er Jahre zeigt sich folgende Entwicklung [Ver07a; Ver11b], aus der sich Abbildung 4.3 erstellen lässt:

1. Die Zahl der zugelassenen Kraftfahrzeuge und Pkw ist beständig gestiegen.
2. Die Zahl der Straßenverkehrsunfälle ist nahezu konstant geblieben.
3. Die Zahl der Unfälle mit Personenschaden ist seit 2000 beständig gesunken.
4. Die Zahl der bei Straßenverkehrsunfällen Getöteten ist, mit Ausnahme 2011, beständig gesunken.

Die Statistiken nach [Ver07a; Ver11b] geben die absolute Häufigkeit von Verkehrsunfällen in Deutschland an. Bezogen auf einen zweiten Wert, die sogenannte Bezugsgröße, ergibt sich die relative Häufigkeit besagter Verkehrsunfälle [PM85]. Die Bezugsgröße richtet sich nach dem zu betrachtenden Bereich und kann ausgedrückt werden durch:

- Bevölkerungszahl,
- Kfz-Zulassungszahlen,
- gefahrene Kilometer,
- Anzahl passierender Kfz,

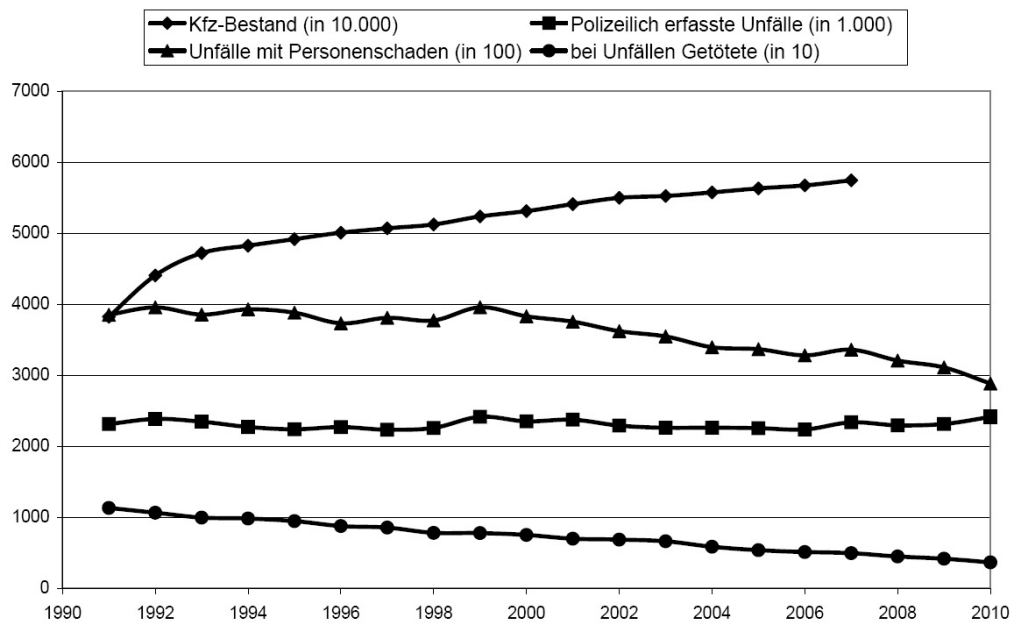


Abbildung 4.3.: Entwicklung der Zulassungszahlen und Verkehrsunfälle in Deutschland

- Aufenthaltsdauer im Straßenverkehr,
- andere (vgl. [Cha74; Lee11; Leg68]).

Da für diese Arbeit die Analyse des Risikos durch Druckbehälter im Straßenverkehr im Vordergrund steht, ist es sinnvoll als Bezugswert die Kfz-Zulassungszahlen zu setzen.

Am 31.12. 2009 lebten in Deutschland 81,802 Mio. Einwohner [Bev09; Sta10]. Dem gegenüber waren 50,184 Mio. Kraftfahrzeuge beim Kraftfahrt-Bundesamt am 01. Januar 2010 gemeldet, wovon 41,737 Mio. auf Personenkraftwagen entfielen [KB11b]. Damit ergab sich eine Quote von 510 Pkw je 1000 Einwohner. 2.411.271 Verkehrsunfälle wurden 2010 polizeilich erfasst, die sich aus 288.297 Unfällen mit Personenschaden sowie 2.122.974 Sachschadenfällen zusammensetzten [Ver11b]. Die Sachschadenfälle unterteilten sich wiederum in schwerwiegende Unfälle mit Sachschaden (92.107), sonstige Unfälle unter dem Einfluss berauschender Mittel (16.034) und übrige Sachschadenfälle (2.014.833) [Ver11b]. Von den Sachschadenfällen fanden nur diejenigen Eingang in die detaillierte Ausführung der vorliegenden Statistik, die als schwerwiegende Unfälle mit Sachschaden beurteilt wurden. Dem gegenüber beträgt der Anteil der übrigen Sachschadenfälle 95,6 % der Sachschadenfälle und 84,2 % der gesamten registrierten Unfälle. Für das hier behandelte Thema soll dies jedoch keinen Abbruch tun, da die Auswirkungen dieser Unfälle auf im verunfallten Kraftfahrzeug befindliche Druckbehälter nicht überschaubar und somit auch nicht aussagekräftig bewertbar sind. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass diese Unfälle keinen Einfluss auf das Versagen der Druckbehälter haben und somit für die hier durchgeführte Bewertung gegenstandslos sind. [Gan11]

4.2.2. Einflussfaktoren der Unfallwahrscheinlichkeit und -schwere

Die Beschädigung eines Druckbehälters als Resultat eines Verkehrsunfalls mit den daraus folgenden Konsequenzen ist im starken Maße abhängig vom Unfallhergang. Um das Ri-

siko von Druckbehältern im Straßenverkehr jedoch überschaubar zu halten, kann davon ausgegangen werden, dass bestimmte Unfallarten eine Beschädigung des Druckbehälters eher begünstigen als andere. Der Ort der Kraftübertragung sowie die Kollisionsenergie sind wesentliche Kriterien zur Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer Druckbehälter-schädigung infolge eines Verkehrsunfalls.

Ziel ist es, die Eintrittswahrscheinlichkeit der Schädigung von Druckbehältern in Kraftfahr-zeugen basierend auf Statistiken zur Unfallhäufigkeit und –art sowie Ortslage retrospektiv abzuschätzen. Hierbei ist zu beachten, dass 1) die statistischen Daten keine sichere Aussage über ein reales Unfallverhalten sowie die daraus resultierenden Konsequenzen und Wahr-scheinlichkeiten geben und 2) statistische Daten einer gewissen Fluktuation unterliegen und keine Garantie für sichere Vorhersagen darstellen. Aus gesicherten Statistiken langer Reihen können abgesicherte Vorhersagen getroffen werden, eine 100%ige Sicherheit dieser Vorhersage besteht jedoch nicht. [Gan11; Gan12a]

Die für diese Arbeit relevanten Unfälle sind solche mit Personenschaden oder schwerwie-gendem Sachschaden, da bei diesen eine Beschädigung und somit ein Versagen des Druck-behälters nicht ausgeschlossen werden kann. Diese Unfälle machen 15,8 % (Zahlenwert: 380 404 [Ver11b]) aller im Jahr 2010 polizeilich erfassten Unfälle aus. Bezogen auf die Zulassungszahl an Pkw würde dies etwa einen Unfall auf 110 zugelassene Pkw bedeuten.

Für die Abschätzung der Wahrscheinlichkeit einer Druckbehälterschädigung durch einen Verkehrsunfall ist der Bereich der Energieeinwirkung auf das betreffende Fahrzeug von großer Bedeutung. Der Bereich der Energieeinwirkung auf das Fahrzeug in Relation zum Ort der Behältermontage gibt Aufschluss darüber, ob durch die betreffende Unfallart der Druckbehälter generell geschädigt werden kann. Bei Serienmodellen von Personenkraftwa-gen befindet sich dieser oftmals Unterflur auf Höhe der Rücksitzbank, bei nachgerüsteten Kraftfahrzeugen meistens im Kofferraum (vgl. Abbildung 3.2).

An Hand dieser Tatsache lässt sich schließen, dass Energieeinwirkungen auf den hinteren Bereich des Kraftfahrzeuges besonders geeignet sind, eine Schädigung des Druckbehälters zu bewirken. Unfälle auf den hinteren Bereich sind daher für die Betrachtung des Risikos von Druckbehältern im Kraftfahrzeug besonders geeignet.

Das Statistische Bundessamt unterscheidet in [Ver07a; Ver11b] zehn verschiedene Unfall-arten, wobei im Folgenden diejenigen Unfallarten dargestellt werden, die grundsätzlich eine Schädigung des Druckbehälters zulassen. Eine Statistik der betrachteten Unfallarten findet sich in Anhang A.5.

Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das anfährt, anhält oder im ruhenden Verkehr steht

Diese Unfallart weist innerhalb von Ortschaften eine hohe Anzahl an Unfällen insgesamt sowie ein hohes Verhältnis von Personen- zu Sachschäden auf. Die insgesamt geringe An-zahl an Getöteten durch diese Unfallart weist wiederum auf eine geringe Energieeinwir-kung beim Unfall hin. Auf Grund der Beschreibung der Unfallart kann bei einem Unfall dieser Art von einer Kollision im seitlichen Bereich über die gesamte Länge des Fahr-zeuges oder einer Kollision auf den Heckbereich des Fahrzeuges ausgegangen werden. Ausgehend von der Überlegung, dass sich eine Vielzahl dieser Unfälle beim Ein- oder Ausparken ereignen, wird vermehrt die Fahrerseite des Fahrzeuges betroffen sein, was als Indikator für die relativ hohe Anzahl an Personenschäden gesehen werden kann. Bei den Personenschäden wird es sich in der Regel um leichtere Verletzungen, wie beispielsweise Schleudertraumata, handeln. Die geringe Anzahl an Getöteten bei Unfällen dieser Art mit

Personenschäden weist ebenfalls auf eher leichte Personenschäden hin. Dies ist durch eine geringe Energieeinwirkung und somit Kollisionsgeschwindigkeit zu begründen. Der Einfluss dieser Unfallart auf die Wahrscheinlichkeit einer Schädigung eines im Kraftfahrzeug befindlichen Druckbehälters kann bezüglich des Einwirkortes der Kollision als moderat angesehen werden.

Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das vorausfährt oder wartet

Hierbei handelt es sich um die klassischen Auffahrunfälle mit der Möglichkeit der Druckbehälterschädigung im Kofferraum des Fahrzeugs. Insgesamt tritt diese Unfallart häufig mit einem hohen Verhältnis an Personen- zu Sachschäden auf. Das Verhältnis von Getöteten je Unfall mit Personenschaden sinkt jedoch beträchtlich innerhalb von Ortschaften, was auf die geringere Kollisionsgeschwindigkeit zurück zu führen ist. Die Wahrscheinlichkeit der Druckbehälterschädigung steigt bei dieser Unfallart somit in Abhängigkeit von der vermuteten Kollisionsgeschwindigkeit.

Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das entgegenkommt

Bei der Betrachtung der Wahrscheinlichkeit einer Druckbehälterschädigung treten bei dieser Unfallart zwei sich gegensätzlich verhaltende Aspekte auf. Der Ort der einwirkenden Kollisionsenergie befindet sich im vorderen Bereich des Fahrzeuges und weist somit auf eine generell geringe Wahrscheinlichkeit der Druckbehälterschädigung hin. Die Kollisionsenergie, die mit Zunahme der Fahrgeschwindigkeiten exponentiell steigt, weist wiederum einen sehr hohen Wert auf. In Summe muss davon ausgegangen werden, dass die hohe Kollisionsenergie durch Verformung des Chassis aufgenommen wird und somit ein Energieeintrag auf den Druckbehälter nicht erfolgt.

Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das einbiegt oder kreuzt

Die Kollision lässt sich durch eine Frontalkollision des einen in die Seite des anderen Fahrzeuges darstellen. Welcher Längenbereich des seitlich getroffenen Fahrzeuges hierbei betroffen ist, lässt sich durch die gegebenen Werte der Statistik nicht ermitteln, wobei eben genau diese Aussage für die Betrachtung der Wahrscheinlichkeit einer Druckbehälterschädigung wichtig wären. Da sich eine klare Tendenz nicht finden lässt, muss von einer hohen Wahrscheinlichkeit der Druckbehälterschädigung ausgegangen werden. Die hohe Anzahl an Getöteten je 1000 Unfälle mit Personenschaden außerhalb von Ortschaften gegenüber derer innerorts weist auf die Zunahme der Geschwindigkeit und deren Einfluss auf die Konsequenz eines Verkehrsunfalls dieser Art hin. Insgesamt kann bei dieser Unfallart von einer mittleren bis hohen Kollisionsenergie innerhalb und einer hohen Kollisionsenergie außerhalb von Ortschaften ausgegangen werden.

Aufprall auf ein Hindernis auf der Fahrbahn

Der gesamte Ablauf dieser Unfallart sowie die mittlerweile sehr guten Sicherheitseinrichtungen insbesondere der vorne sitzenden Insassen lassen auf einen insgesamt glimpflichen Verlauf dieser Unfallart schließen. Bei Unfällen mit Personenschäden kann vermutet werden, dass diese durch unbewegliche Hindernisse (umgestürzte Bäume und Masten) erfolgen und so die gesamte Kollisionsenergie auf das betreffende Fahrzeug wirkt oder dass Teile der betroffenen Hindernisse durch die Windschutzscheibe in den Fahrinnenraum eindringen und so die hohen Personenschäden verursachen. Da die Hindernisse aller Wahrscheinlichkeit nach erst spät oder gar nicht erkannt werden, ist hier von einer hohen Kollisionsgeschwindigkeit und somit Aufprallenergie aus zu gehen. Insbesondere durch die frontale Energieeinwirkung auf das Fahrzeug ist bei dieser Unfallart von einer eher geringen Wahrscheinlichkeit der Druckbehälterschädigung aus zu gehen.

Abkommen von der Fahrbahn nach rechts/links

Diese Unfallart weist ein insgesamt kleines Verhältnis von Personen- zu Sachschaden auf, wobei die Anzahl der bei diesen Unfällen Getöteten einen hohen Wert annimmt. Wie bei einigen vorangegangenen Unfallarten lässt sich auch hier der Bereich der Krafteinwirkung auf das Fahrzeug nicht genau lokalisieren. In den meisten Fällen kann von einem frontalen Zusammenstoß mit einem Hindernis ausgegangen werden, was eine geringe Wahrscheinlichkeit der Schädigung des Druckbehälters widerspiegeln würde. Ein Drehen oder Überschlagen des Fahrzeuges beim Abkommen von der Fahrbahn, was zu einem erheblichen Zuwachs der Wahrscheinlichkeit der Druckbehälterschädigung führen würde, kann jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Die Ortslage, an der sich ein Unfall ereignet, bildet den zweiten Einflussfaktor der Unfallwahrscheinlichkeit und -schwere. Die auf das Kraftfahrzeug und somit eventuell auf den Druckbehälter einwirkende kinetische Energie der Kollision spielt eine entscheidende Rolle bei der Beurteilung, ob ein Unfall dazu führen kann den Behälter zu beschädigen. Diese kinetische Energie resultiert aus der Relativgeschwindigkeit der kollidierenden Fahrzeuge sowie deren Masse, wobei die Geschwindigkeit exponentiell einfließt: $E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$ (vgl. Abbildung 4.4), mit E = Energie [J], m = Masse [kg] und v = Geschwindigkeit [m/s].

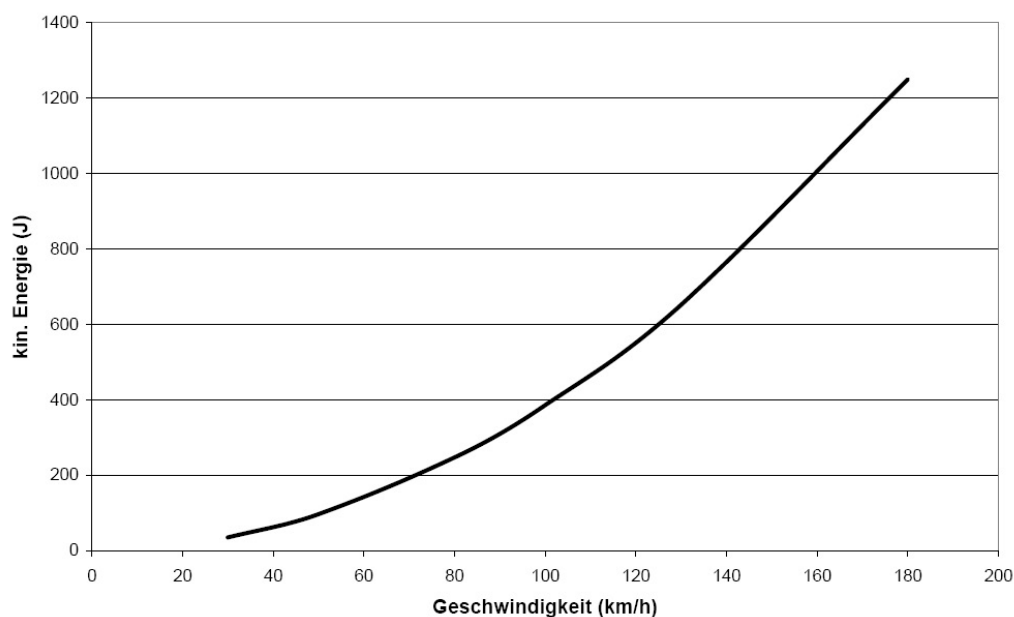


Abbildung 4.4.: Kinetische Energie im Verhältnis zur Geschwindigkeit (bezogen auf 1 kg Masse)

Die Geschwindigkeit ist somit der entscheidende Faktor der Analyse, ob überhaupt eine ausreichend hohe Wahrscheinlichkeit der Schädigung besteht. Die Erfahrung zeigt zwar, dass selbst niedrigste Geschwindigkeiten starke Beschädigungen nicht ausschließen, grundsätzlich kann jedoch festgehalten werden, dass mit Zunahme der Relativgeschwindigkeit der Fahrzeuge zueinander die kinetische Energie exponentiell steigt. Es kann somit postuliert werden, dass mit Zunahme der Relativgeschwindigkeit der kollidierenden Fahrzeuge die Wahrscheinlichkeit einer Schädigung des Druckbehälters ebenfalls exponentiell ansteigt. Die Relativgeschwindigkeit der kollidierenden Fahrzeuge hängt zum einen von ihrer Bewegungsrichtung zueinander, zum anderen von ihrer jeweils eigenen Grundgeschwindigkeit ab. Die Fahrgeschwindigkeit der Fahrzeuge kann natürlich stark variieren und im Nachhinein nur noch schwierig ermittelt werden, so dass sie im allgemeinen nicht poli-

zeilich erfasst wird und somit auch keinen Eingang in die amtliche Statistik findet. Die einzige Unterscheidungsmöglichkeit hinsichtlich der Geschwindigkeit ist die Differenzierung zwischen Unfällen auf Grund ihrer Ortslage innerhalb und außerhalb von Ortschaften. Es kann davon ausgegangen werden, dass innerhalb von Ortschaften die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf 50 km/h begrenzt ist, was eine Überschreitung natürlich nicht ausschließt. Stadtautobahnen bilden hier die Ausnahme, da sie in der Statistik unter der Rubrik Autobahnen und somit als außerorts geführt werden. Außerhalb von Ortschaften ist die Bandbreite der Geschwindigkeit bei Verunfallung wesentlich größer, wobei hier davon ausgegangen werden kann, dass die zulässige Höchstgeschwindigkeit zwischen 50-100 km/h liegt. Autobahnen werden in der Statistik immer als außerhalb von Ortschaften gewertet; die Geschwindigkeit bei Verunfallung auf Autobahnen kann nicht angegeben werden, es ist jedoch von Geschwindigkeiten größer 100 km/h aus zu gehen. Die folgenden Tabellen 4.5, 4.5 und 4.6 geben Auskunft über polizeilich registrierte Unfälle mit Personenschaden und mit schwerwiegendem Sachschaden.

Tabelle 4.4.: Unfälle mit Personenschaden und Sachschaden nach Ortslage

	Innerorts	Anteil %	Außerorts	Anteil %	Gesamt	Anteil %
Personenschaden	195.833	67,9	92.464	32,1	288.297	100
Sachschaden	51.388	55,8	40.719	44,2	92.107	100
Gesamt	247.221	65,0	133.183	35,0	380.404	100

Tabelle 4.5.: Unfälle innerhalb und außerhalb Ortschaften nach Personenschäden und Sachschäden

	Personenschaden	Anteil %	Sachschaden	Anteil %	Gesamt	Anteil %
Innerorts	195.833	79,2	51.388	20,8	247.221	100
Außerorts	92.464	69,4	40.719	30,6	133.183	100
Gesamt	288.297	75,8	92.107	24,2	380.404	100

Tabelle 4.6.: Personenschäden und Getötete innerhalb und außerhalb von Ortschaften

Unfälle mit Personenschaden	Gesamt	Anteil %	davon getötete	Anteil % an gesamt Getötete	Getötet je 1000 Unfälle
Innerhalb Ortschaften	195 833	67,9	983	29	5
Außerhalb Ortschaften	73 635	25,5	2030	60	28
Autobahnen	18 829	6,5	374	11	20

Tabelle 4.4 zeigt, dass Unfälle, die dazu geeignet sind eine Beschädigung eines Druckbehälters zu bedingen, innerhalb von Ortschaften einen Anteil von 65 % und außerhalb einen Anteil von 35 % aufweisen. Grundsätzlich ist somit die Wahrscheinlichkeit höher,

innerhalb einer Ortschaft in einen Unfall verwickelt zu sein, mit der daraus resultierenden niedrigeren Geschwindigkeit von bis zu 50 km/h. Tabelle 4.5 zeigt darüber hinaus, dass der Anteil an Unfällen mit Personenschäden, die allgemein als schwerwiegender beurteilt werden können als solche mit Sachschaden, innerhalb von Ortschaften bei 80 %, außerhalb von Ortschaften bei 70 %, also etwas geringer, ausfällt. Im Jahr 2010 wurden innerhalb von Ortschaften 983 Personen bei Verkehrsunfällen getötet, was einen Anteil von 29 % aller Getöteten ausmacht. Das Verhältnis von Getöteten je 1000 Unfälle zeigt jedoch, dass innerhalb von Ortschaften 5 Personen je 1000 Unfälle getötet werden, wohingegen die Zahl der Getöteten je 1000 Unfälle auf Autobahnen bei 20 und außerhalb von Ortschaften (ohne Autobahn) sogar bei 28 liegt. Die durch das Statistische Bundesamt getroffene Aussage, dass „Unfälle auf den Außerortsstraßen u. a. wegen der höheren Fahrgeschwindigkeiten schlimmere Folgen hatten“ [Ver11b], bestätigt die Annahme steigender Konsequenzen mit Zunahme der Geschwindigkeit. Tabelle 4.4 und 4.6 zeigen somit zwei wichtige Faktoren zur Betrachtung von Druckbehältern in Kraftfahrzeugen auf:

- Zwei Drittel aller Verkehrsunfälle, die zu einer Schädigung des Druckbehälters führen können (Personenschaden und schwerwiegender Sachschaden) ereignen sich innerhalb von Ortschaften.
- Das Verhältnis dieser Unfälle zu den dabei Getöteten zeigt die erhöhte Konsequenz von Unfällen außerorts oder auf Autobahnen. Dies ist der höheren Fahrgeschwindigkeit anzurechnen.

Der Vergleich erdgasbetriebener Fahrzeuge zu solchen mit herkömmlichem Antrieb stellt einen weiteren wichtigen möglichen Einflussfaktor der Unfallwahrscheinlichkeit und Unfallschwere dar. Die Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Druckbehälterberstens ist abhängig von der Anzahl sich im Betrieb befindlicher CNG-Fahrzeuge zur Anzahl der Gesamtzulassungen. Darüber hinaus ergibt sich die Reichweite des Spitzenüberdrucks und somit der resultierenden Konsequenz in Abhängigkeit vom Druckbehältervolumen. Aus einer Statistik des Kraftfahrt-Bundesamts geht hervor, dass am 01. Januar 2011 insgesamt 50.902.131 Kraftfahrzeuge in Deutschland zugelassen waren, davon 42.301.563 Personenkraftwagen [KB11a; Kfz11]. Weiterhin zeigen die Statistiken insgesamt 71.519 zugelassene erdgasbetriebene Personenkraftwagen [KB11c]. Hieraus lässt sich bereits die erste Feststellung ziehen: Der prozentuale Anteil an erdgasbetriebenen Personenkraftwagen beläuft sich im Januar 2011 auf 0,1425 % bezogen auf die Kfz-Zulassungszahlen und 0,1691 % bezogen auf die der Personenkraftwagen. Demnach wird nur einer von etwa 600 Personenkraftwagen mit Erdgas betrieben, wodurch die Wahrscheinlichkeit eines Straßenverkehrsunfalls mit einem erdgasbetriebenen Personenkraftwagen bereits limitiert wird. Bei diesen Werten handelt es sich allerdings um stark schwankende Werte, da der Anstieg der Zulassungen der CNG-Fahrzeugtechnik nicht proportional zu derjenigen der Gesamtzulassungen verläuft. Der ermittelte Wert der relativen Wahrscheinlichkeit bezieht sich somit immer auf einen bestimmten Stichtag und gibt die Änderungen während des Zeitraums zum nächsten Stichtag nicht wieder.

Aus einer unveröffentlichten Statistik des Kraftfahrt-Bundesamts [KB10] gehen die absoluten Zahlen der jeweiligen Modelle erdgasbetriebenen Personenkraftwagen hervor. Tabelle 4.7 zeigt die Top-Vier an unterschiedlichen Modellen erdgasbetriebener Personenkraftwagen mit ihren absoluten Werten und ihren relativen Werten bezogen auf die Anzahl von 68.515 zugelassenen Fahrzeugen im Jahr 2010.

Tabelle 4.7.: Erdgasbetriebene Personenkraftwagen und deren Zulassungszahlen

Modell	Zulassungen absolut	Zulassungen relativ ¹⁾ in %
Opel Zafira	15.348	22,4
VW Caddy	11.093	16,2
VW Touran	6.441	9,4
Opel Combo	5.778	8,4

¹⁾ Bezogen auf die Anzahl der Gesamtzulassungen erdgasbetriebener Pkw von 68.515

4.2.3. Vergleich der Unfallzahlen im europäischen Umfeld

Die vorangegangenen Kapitel zeigen eine Häufung der Unfallzahlen innerhalb von Ortschaften auf. Der Vergleich mit den Unfallzahlen aus dem europäischen Umfeld mit für Deutschland ermittelten Werten zeigt deren repräsentativen Charakter auf. Hierzu wurden Statistiken der UNECE [UNE11] herangezogen (vgl. Anhang A.6, Tabelle A.2).

Aus der Tabelle A.2 sowie Abbildung A.13 wird deutlich, dass die Unfallzahlen je 1000 Kraftfahrzeuge in Deutschland im europäischen Vergleich einen gehobenen Platz einnehmen, was durch die hohe Anzahl an zugelassenen Kraftfahrzeugen bezogen auf die Fläche Deutschlands zu erklären ist. Dies lässt zwei Aussagen zu:

1. Die statistischen Werte der Unfallzahlen in Deutschland lassen sich nicht ohne weiteres auf andere europäische Länder übertragen.
2. Die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrsunfalls, der geeignet ist einen Druckbehälter zu beschädigen, fällt im europäischen Umfeld eher geringer aus.

Kapitel 4.2.2 zeigte wesentliche Aussagen bezüglich des Unfallverhaltens auf:

1. Personenschäden weisen sowohl innerhalb von Ortschaften (80 %) als auch außerhalb (70 %) gegenüber dem reinen Sachschaden den größeren Anteil auf.
2. Bei der Gesamtzahl der Personenschäden entfällt der größere Anteil (68 %) auf den innerstädtischen Bereich, während sich außerhalb etwa 32% der Personenschadensunfälle ereignen.
3. Die Gesamtzahl der Sachschadensfälle teilt sich mit etwa 55 % innerhalb von Ortschaften zu 45 % außerhalb auf.

Hieraus wird deutlich, dass ein Großteil der für die Betrachtung dieser Arbeit relevanten Unfälle sich innerhalb von Ortschaften ereignet. Aus Tabelle A.2 sowie den Abbildungen A.13 bis A.19 in Anhang A.6 geht hervor, dass diese Aussage ebenfalls für das europäische Umfeld übernommen werden kann.

Bei den Unfallarten zeigt sich ein mit Deutschland vergleichbares Bild:

- Der Anteil an Unfällen, an denen nur ein Kraftfahrzeug beteiligt ist, weist innerstädtisch einen geringeren Wert als außerhalb auf.
- Dem gegenüber weist der Anteil an Unfällen mit mehr als einem Kraftfahrzeug einen höheren Anteil im Stadtgebiet auf.

- Unfälle, bei denen das Heck eines Fahrzeugs betroffen ist, ereignen sich häufiger in Städten als außerhalb.
- Einbiegeunfälle ereignen sich zu einem sehr hohen Anteil innerhalb von Städten.
- Frontalunfälle lassen sich nicht eindeutig einordnen.

All diese Aussagen zeigen auf, dass die für Deutschland ermittelten Werte für den europäischen Vergleich repräsentativ sind, auch wenn sich die Werte nicht eins zu eins übertragen lassen. Die in dieser Arbeit angewandte Methodik kann somit als zielführend und richtig für Risikoanalysen und -beurteilungen im europäischen Raum angewandt werden.

4.3. Personendichte

Die vorangegangenen Kapitel analysieren das Risiko auf Grundlage des technischen Risikobegriffs. Die Definition des Risikos wird in diesem Bericht durch den Faktor der betroffenen Personendichte erweitert, so dass es sich folgendermaßen darstellt: $R = H \cdot K \cdot N$. Erst über die Auswertung der Anzahl der durch ein Ereignis betroffenen Personen N lässt sich die Schwere eines Risikos beurteilen. Hierbei muss genau unterschieden werden zwischen der Anzahl der bei einem Ereignis anwesenden Personen und solchen, die durch dieses Ereignis auch wirklich betroffen sind.

Die Ermittlung der anwesenden Personendichte kann über zwei Methoden erfolgen (vgl. [Dra04]):

- Direkte Ermittlung über Datensätze der anwesenden Personen für festgelegte Bereiche (z. B. Volkszählung, Dichtewerte für Stadtteile, Arbeitnehmer je Firma bezogen auf Geländegröße, usw.) oder
- Indirekte Ermittlung der Personendichte auf Grund der Bau- und Tätigkeitsstruktur.

Die erste Methode stellt sicherlich den genaueren Weg dar, ist allerdings limitiert durch die Notwendigkeit brauchbarer Datensätze. Ist ein Gebiet bekannt, in welchem eine Risikobeurteilung erfolgen soll, so lassen sich diese Datensätze im Vorfeld erfassen und mit ihnen arbeiten. Im Falle der Entwicklung einer Methode, welche die Risikobeurteilung auf ein bestimmtes Ereignis bezieht, das sich an einem beliebigen Ort abspielen kann, erscheint diese Methode als zu aufwändig. Bei der zweiten Methode werden Bereiche nach Bebauungsdichte und Tätigkeitsfeldern definiert und ihnen Werte der Personendichte zugeschrieben. Auf diese Weise lässt sich an Hand der jeweiligen Umgebung zum Ereignis eine mittlere Personendichte abschätzen.

Beim Abschätzen der anwesenden Personendichte muss eine Balance gefunden werden zwischen der Exaktheit der angewandten Methode und deren Praktikabilität (vgl. [PWL87]). Auf Grund der universellen Einsetzbarkeit wird für die Beurteilung des Risikos durch Druckbehälter im Straßenverkehr die indirekte Methode ausgewählt und in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben. Die anwesende Personendichte ergibt in Abhängigkeit von der durch die Konsequenz beschriebenen Risiko-Zone die Anzahl betroffener Personen.

4.3.1. Personendichte nach Bebauungsstruktur

In [Can78] wird bebauten Gebieten ein generalisierter Wert von 4.000 Pers./km² zugeordnet, wobei dieser Wert im Anhang differenziert wird auf 5.000 Pers./km² in städtischen und 100 Pers./km² in außerstädtischen bebauten Gebieten. In [PWL87] werden zwei Methoden zur Abschätzung der Personendichte vorgegeben, die erste zur groben, die zweite zur genaueren Abschätzung: Die erste, grobe Methode entspricht im Grunde derjenigen aus [Can78], mit einer Personendichte von 4.000 Pers./km² in stark bebauten, 100 Pers./km² in dünn besiedelten und 0 Pers./km² in unbesiedelten Gebieten. Die zweite, genauere Methode richtet sich nach dem Abstand zum Ereignis:

- Abstand kleiner 400 m: Erfassung der Personendichte über Auswertung der Statistiken der Volkszählung
- Abstand zwischen 400 m und 1000 m: Einteilung in 3 besiedelte und 1 unbesiedeltes Gebiet:
 - dicht besiedelt: Wohnblöcke, Mehrfamilienhäuser, etc.: 15.000 Pers./km²
 - Vororte, einzeln stehende Häuser: 10.000 Pers./km²
 - weit entfernt stehende Häuser: 1.000 Pers./km²
 - unbesiedelt: 0 Pers./km²
- Abstand größer 1000 m: Werte der ersten Methode

Die angegebenen Werte beziehen sich ausschließlich auf die Bevölkerungsdichte (keine Durchreisenden, keine Arbeitsplätze, usw. in diesen Gebieten) bei Nacht. Der Wert der anwesenden Personendichte über 24 Stunden beträgt etwa 80 bis 85 %. Die zweite Methode ist im Abstand kleiner 400 m durch die Datenlage limitiert. Die Werte des Bereiches 400 m bis 1000 m sind anwendbar, jedoch nur als Näherung zu betrachten.

In [CPR92] wird die Personendichten bestimmter Typen von Bebauungsgebieten ermittelt und darauf aufbauend empfohlene Mittelwerte der Personendichte nach Typ des Bebauungsgebiets definiert. Die Werte werden in Tabelle 4.8 wiedergegeben.

Folgende Werte für besonders dicht besiedelte Stadtteile deutscher Städte finden sich in [Wik10]:

- Berlin Kreuzberg: 14.184 Pers./km²
- München Schwabing-West: 14.217 Pers./km²
- Hamburg Hoheluft-West: 18.214 Pers./km²

Vergleicht man diese Werte mit denen aus Tabelle 4.8, so fällt auf, dass der empfohlene Mittelwert für das Stadtzentrum mit 12.000 Pers./km² etwas gering ausfällt. Die durchschnittliche Personendichte der deutschen Bundesländer, die in etwa den Bereichen städtische Außenbereiche bis gelegentlicher Wohnbebauung entspricht, liegt bei 72 Pers./km² in Mecklenburg-Vorpommern bis 529 Pers./km² in Nordrhein-Westfalen. Die Werte der Tabelle 4.8 sind an dieser Stelle demnach hinlänglich exakt. [Gan11; Gan12a]

Tabelle 4.8.: Bevölkerungsdichte nach Wohngebietstypen [CPR92]

Wohngebietstyp	[Rij82]	[PWL87]	Süd-Holland	Apeldoorn	Dalfsen	Enschede	empfohlener-Mittelwert
Naturschutzgebiet (Wälder, Wasser Heide)	k.A.	0	0	0	0	k.A.	0
Städtische Außenbereiche (landwirtschaftlich)	k.A.	100	100	100	100	100	100
Gelegentliche Wohnbebauung	1.000	1.000	400	500	600	300	500
Ruhige Wohngegend (0 % Hochbau)	4.000	4.000	2.000	3.000	2.000	3.000	2.500
Belebte Wohngegend (25 % Hochbau)	8.000	k.A.	7.000	6.000	7.000	7.000	7.000
Stadtzentrum (85 % Hochbau)	12.000-25.000	10.000-15.000	13.000	k.A.	k.A.	11.000	12.000

4.3.2. Personendichte nach Tätigkeitsfeldern

In [CPR92] wird die Personendichte nach ausgewählten Berufs- und Tätigkeitsfeldern angegeben, wobei die Personendichte zur besseren Vergleichbarkeit der einzelnen Tätigkeitsfelder in die drei Kategorien gering (500 Pers./km²), mittel (4.000 Pers./km²) und hoch (8.000 Pers./km²) eingeteilt wird. Die ermittelten Personendichten sowie deren Wertung nach der Kategorie sind in Tabelle 4.9 wiedergegeben.

4.4. Risikokriterium

Die in Deutschland angewandte Methode der Risikobeurteilung wurde in Kapitel 2.3 dargestellt. Eine Möglichkeit Risiken auf Grund der Faktoren Konsequenz, Eintrittswahrscheinlichkeit und der Anzahl betroffener Personen zu beurteilen, ist die im europäischen Umfeld angewandte Methode der Beurteilung an Hand von F-N-Kurven (vgl. Kapitel 2.5).

In Anlehnung an die Anforderungen der Niederlande, nach denen seit Januar 2010 ein Risiko von 10⁻⁶ oder geringer als allgemein akzeptabel angesehen wird, wird für diese Arbeit eine dementsprechende F-N-Kurve als Grundlage der Risikobeurteilung definiert (vgl. Abbildung 2.6). Diese weist den Ankerpunkt der Unerheblichkeitslinie bei 10⁻⁶ und einen Aversionsfaktor von -2 auf. Die Akzeptanzlinie beginnt zwei Dekaden über der Unerheblichkeitslinie mit einem Ankerpunkt von 10⁻⁴. Bei Überschreitung der Akzeptanzlinie gilt ein Risiko als gesellschaftlich nicht akzeptabel; bei Unterschreitung der Unerheblichkeitslinie wird eine allgemeine Akzeptanz des Risikos durch die Gesellschaft vorausgesetzt. Der Bereich zwischen diesen beiden Grenzwerten wird mit ALARP (As Low As Reasonable

Tabelle 4.9.: Bevölkerungsdichte nach Tätigkeitsfeldern [CPR92]

Branche / Industriezweig	Personendichte (Pers./km ²)	Kategorie (Pers./km ²)
Ackerbau und Fischerei	300	Gering (500)
Mineralstoffgewinnung	300	Gering (500)
Öffentliche Versorgungsbetriebe	600	Gering (500)
Hotel- und Restaurantwesen	800	Gering (500)
Transport- und Lagergewerbe	1.500	Gering (500)
Übrige Dienstleistungen (Bildungswesen, Gesundheitswesen)	3.500	Mittel (4.000)
Handel	4.000	Mittel (4.000)
Industrie	4000	Mittel (4.000)
Bauindustrie und Montagegewerbe	7.500	Hoch (8.000)
Banken- und Versicherungswesen, Dienstleistungsgewerbe	8.000	Hoch (8.500)

Practicable) bezeichnet. Dies bedeutet, dass in diesem Bereich eine Reduzierung des Risikos soweit erfolgen muss, wie es technisch und wirtschaftlich machbar und sinnvoll ist (vgl. Kapitel 2.5).

Durch Anwendung dieses Risikokriteriums lassen sich mit dieser Methodik aus den Werten der Konsequenz und der dazugehörigen Eintrittswahrscheinlichkeit einer Technologie Risikowerte generieren, die

- eine objektive Aussage über die Höhe des Risikos geben und
- einen Grad der Risikoakzeptanz der betrachteten Technologie durch die Gesellschaft schaffen, wobei dieser plötzlichen Schwankungen unterliegen kann (so geschehen in der Atompolitik nach den Ereignissen in Fukushima im März 2011).

Das Risiko einer Technologie lässt sich mit dieser Methode als Summe seiner Teilereignisse darstellen. Hierdurch wird es möglich Technologien hinsichtlich ihres Risikos zu beurteilen und so ein Instrument zu schaffen, Anforderungen an diese auf Grund des ermittelten Risikos zu formulieren.

5. Entwicklung der Methodik zur Durchführung der Risikoanalyse

Im voran gegangenen Kapitel 4 wurden die Faktoren zur Darstellung des Risikos von Druckbehältern im Straßenverkehr beschrieben. Hierzu wurde eine Analyse der möglichen Auswirkungen vorgenommen, die zur Konsequenz Todesfall führen kann. Des Weiteren wurde die Eintrittswahrscheinlichkeit für diejenigen Straßenverkehrsunfälle, die zu einer Druckbehälterschädigung führen können, ermittelt und differenziert. Über die Verknüpfung des technischen Risikobegriffs (vgl. Kapitel 2.1) mit der Anzahl betroffener Personen, ergibt sich die Methodik der Risikobewertung in dieser Arbeit.

In dieser Arbeit werden Verfahren entwickelt, die drei Faktoren der Risikoanalyse berechnen und darstellen und somit das Risiko von Druckbehältern im Straßenverkehr in der neu entwickelten Methodik beschreiben und beurteilen zu können. Hierzu werden Konsequenz und Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses mit der betroffenen Personenanzahl verknüpft und so ein vergleichbarer Wert des Risikos generiert. Dieses Kapitel beschreibt die Entwicklung dieser Verfahren und deren Einbettung in die Methodik.

5.1. Konsequenzen

Wie in Kapitel 4.1 beschrieben sind Risiken nur dann vergleichbar, wenn die aus einem Ereignis resultierenden Konsequenzen identisch sind. Als für die im Sinne der Risikoanalyse zu beurteilende Konsequenz werden Auswirkungen betrachtet, die zu mindestens einem Todesfall führen; die tatsächliche Anwesenheit von Personen bleibt bei dieser Betrachtung unberücksichtigt.

Die direkten Konsequenzen des Druckbehälterberstens sind in Kapitel 4.1.1 dargestellt. Für die Konsequenzen aus dem reinen Einwirken des Spitzenüberdrucks können zwei Werte des Spitzenüberdrucks mit der dazugehörigen Fatalitätswahrscheinlichkeit angegeben werden:

- Fatalitätswahrscheinlichkeit von 50 % durch reine Druckeinwirkung bei 2,65 bar
- Fatalitätswahrscheinlichkeit von 99 % durch reine Druckeinwirkung bei 3,3 bar.

Die Konsequenzen aus primärem Trümmerflug können mit keiner ausreichenden Wahrscheinlichkeit angegeben werden. Nach [HR85] kann konservativ von einer Anzahl von bis zu vier Trümmerstücken aus einem Behälterbersten ausgegangen werden. Diese konservative Annahme erhöht dementsprechend das Risiko. Da eine genaue Angabe der aus den primären Trümmerstücken zu erwartenden Konsequenzen nicht möglich ist, wird dieser Faktor im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Bei den Aussagen zum Risiko des Druckbehälterberstens im Straßenverkehr sollte jedoch immer im Hinterkopf

behalten werden, dass durch den primären Trümmerflug bis zu vier geschossartige Trümmer emittiert werden, die zu einer zusätzlichen Erhöhung der berechneten Konsequenzen führen können.

Die indirekten Konsequenzen des Druckbehälterberstens ergeben sich, wie in Kapitel 4.1.1 dargestellt, in erster Linie durch geschossartig beschleunigte Splitter infolge Druckeinwirkung zerstörter Fensterscheiben. Werte der Glasbruchwahrscheinlichkeit sind Tabelle 5.1 zu entnehmen.

Tabelle 5.1.: Wahrscheinlichkeit der Zerstörung von Glasscheiben durch Überdruck nach [KKL09; KRS⁺00]

Druck (bar)	Zerstörung Fensterscheiben
0,01	10 %
0,03	50 %
0,05	75 %
0,1	100 %

Hier stellt sich die Frage: Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit der Fatalität des Menschen auf Grund zersplitternder Fensterscheiben? Kleinste Überdrücke reichen zwar aus, Fensterscheiben zersplittern zu lassen; reicht die kinetische Energie der Splitter denn auch aus, dem Menschen nennenswert zu schaden?

In der verfügbaren Fachliteratur, und somit durch Studien belegt, finden sich keine Korrelationen von der Höhe des Spitzenüberdrucks zu Wahrscheinlichkeiten menschlicher Fatalität durch indirekte Konsequenzen wie Glassplitter. Laut [Hau11] sind derzeit solche Werte nicht verfügbar. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit eine Methode zur Beschreibung der Fatalitätswahrscheinlichkeit durch sekundären Trümmerflug entwickelt, einzelne Werte aus der Literatur zu entnehmen, diese zu vergleichen und auf dieser Grundlage einen Bereich abzugrenzen, innerhalb dessen Schätzwerte der Fatalitätswahrscheinlichkeit auf den Spitzenüberdruck korreliert werden können. Ein Problem liegt jedoch in der Tatsache, dass kein ausreichendes Wissen über das Verhalten von Fensterscheiben gegenüber der Einwirkung von Druck vorhanden ist [Pri81]. Die Faktoren, welche die Wahrscheinlichkeit des Glasbruchs determinieren, lassen sich in die zwei Bereiche Eigenschaften des Fensters und Eigenschaften der Druckwelle einteilen. Die Eigenschaften des Fenster werden gegeben durch

- die Abmessung der Fensterscheibe,
- die Dicke des Fensterglases,
- die Art des Fensterglases (Normal-, Mehrfach-, Sicherheitsverglasung) sowie
- den Rahmentyp, also die durch den Rahmen auf das Fensterglas induzierten Spannungen.

Die Eigenschaften der auf das Fensterglas einwirkenden Druckwelle werden beschrieben durch

- die Druckamplitude (Spitzenüberdruck) sowie
- den Impuls (zeitlicher Druckanstieg). [Pri81]

Zur Bestimmung der Glasbruchwahrscheinlichkeit findet, wie bereits in Kapitel 3.3 beschrieben, in erster Linie der Spitzenüberdruck Anwendung, da der Impuls weniger aussagekräftig ist [Pri81] (vgl. auch [KRS⁺00; Som98; Zal03]). In [MHM77] wurde die Dicke des Fensterglases an dessen Widerstand gegenüber Druckeinwirkung korreliert (vgl. Abbildung 5.1).

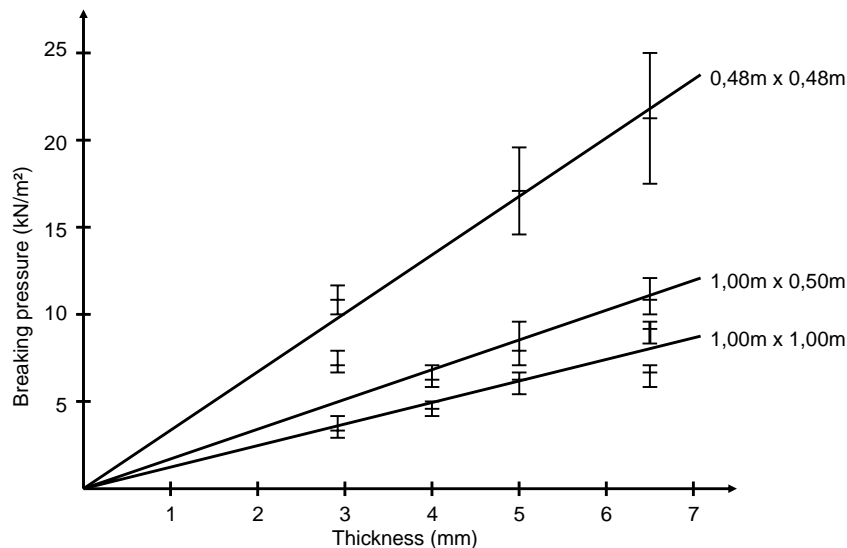


Abbildung 5.1.: Druck des Glasbruchs als Funktion der Dicke des Fensterglases [MHM77]

In [Pri81] wurden diese Ergebnisse um den so genannten Glas-Faktor erweitert. Der Glas-Faktor wird definiert als $\frac{L \cdot B}{2 \cdot (L+B)}$ wobei L die Länge der Fensterscheibe darstellt und B deren Breite. Der Glasfaktor stellt somit eine Kennzahl der Abmessung der Fensterscheibe dar. Die Abbildung 5.2 zeigt auf, dass mit Zunahme der Dicke des Fensterglases und/oder Abnahme des Glas-Faktors der Widerstand des Fensterglases gegenüber Druckeinwirkung steigt (vgl. auch [2nd79]).

In den verschiedenen Normen zur Charakterisierung von Fensterglas, bspw. DIN EN 12150-1 [DIN00], werden Werte der mechanischen Festigkeit angegeben. Da Glas ermüdet und im Laufe seiner Gebrauchsdauer äußere Fehler erfährt, liegt die reale Bruchfestigkeit bei einem Bruchteil des theoretischen Wertes [Pri81]. Es lassen sich somit also keine gesicherten Werte der Glasbruchwahrscheinlichkeit aus theoretischen Grundlagen bilden. Um Aussagen über das Glasbruchverhalten von Fensterscheiben erzielen zu können, ist die Wissenschaft auf Versuche oder die Auswertung von Schadensfällen angewiesen. Bei der Vielzahl an Einflussfaktoren zeigt sich, dass eine allgemein gültige Abschätzung der Glasbruchwahrscheinlichkeit durch Druckeinwirkung nicht möglich ist. Somit bleibt zur Zeit nur die oben beschriebene Möglichkeit, Einzelfälle zu untersuchen und aus diesen einen aussagekräftigen Bereich für Schätzwerte abzustecken.

Der erste Anhaltspunkt geht aus [Lee80] hervor. Danach können Glasscheiben noch in sehr großen Entfernungen vom Explosionsort zu Bruch gehen und so zu Personenschäden führen. Die dabei entstehenden Glassplitter besitzen allerdings nur noch geringe Energien. So wird weiter ausgeführt, dass selbst in Gebäuden, in denen Fensterscheiben durch Explosionsdruck zu Bruch gingen, nur sehr wenige Personen verletzt wurden. Bei einer

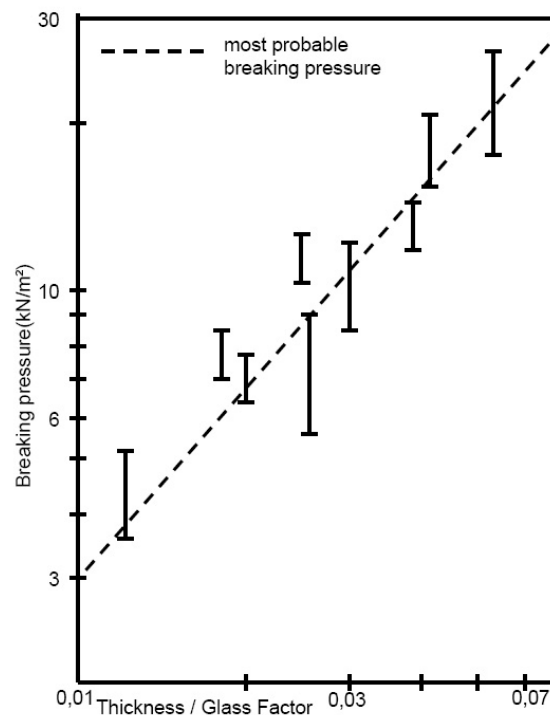


Abbildung 5.2.: Experimenteller Druck des Glasbruchs für Einfachverglasung [Pri81]

Glasbruchwahrscheinlichkeit von 50 % ist gleichfalls eine Wahrscheinlichkeit von 50 % gegeben, dass diese Fensterscheiben eben nicht zu Bruch gehen, woraus sich eine im Allgemeinen sehr geringe kinetische Energie der Splitter ableiten lässt. Im folgenden bezieht sich [Lee80] auf [MHM77; 2nd79], in denen Einfachverglasungen der Dicken $\frac{1}{4}$ Zoll (6 mm) und $\frac{1}{8}$ Zoll (3 mm) Spitzenüberdrücken von 0,02 bar, 0,035 bar und 0,04 bar mit einer Druckamplitude von 250 ms ausgesetzt wurden. Dabei sollte überprüft werden, ob a) nackte Haut, b) bekleidete Haut oder c) 1 cm weiches Gewebe durchstoßen werden. Nur einer von 90 Splittern (1,11 %, also in etwa 1 %) der dickeren Scheiben wies bei einem Spitzenüberdruck von 0,04 bar eine Wahrscheinlichkeit von 10 % auf, das 1 cm dicke weiche Gewebe zu durchstoßen. [Lee80; 2nd79] Das bedeutet, nur etwa 1 % aller entstehenden Splitter weisen überhaupt eine Wahrscheinlichkeit der Schädigung von 10 % auf. Die Wahrscheinlichkeit, bei einer Druckspitze von 0,04 bar durch Glassplitter verletzt zu werden liegt demnach bei 0,1 % oder 10^{-3} . Hierbei handelt es sich allerdings um eine allgemeine Verletzungswahrscheinlichkeit und nicht um die Wahrscheinlichkeit einer fatalen Verletzung infolge des Splitterflugs. Wird hier wiederum angenommen, etwa 10 % der entstehenden Verletzungen führen zum Todesfall, so ergibt sich eine Fatalitätswahrscheinlichkeit von 0,01 % durch Glassplitter bei einem Druck von 0,04 bar. Die Splitter geringeren Überdrucks wiesen noch nicht einmal eine Wahrscheinlichkeit von einem Prozent auf, Verletzungen zu bewirken. Somit kann für diese Arbeit eine untere Grenze der Fatalitätswahrscheinlichkeit durch Glassplitter von 0,01 % bei einem Spitzenüberdruck von 0,04 bar angenommen werden.

Für weitere Werte der Fatalitätswahrscheinlichkeit durch sekundären Trümmerflug muss auf Werte der Literatur zurückgegriffen werden. Diese Werte werden in Tabelle 5.2 aufgezeigt. Die Werte des Druck in [GD77; Sar83] wurden in pound per square inch (psi) angegeben; die Umrechnung erfolgt nach $1 \text{ psi} = 0,0689 \text{ bar}$. Ein psi kann somit mit etwa 0,07 bar angesetzt werden.

Tabelle 5.2.: Werte des Spitzenüberdrucks und deren Konsequenzen auf den Menschen

Spitzenüberdruck in bar	Fatalitätswahrscheinlichkeit in Prozent für Personen [HIP08b]		Auswirkungen auf den Menschen [GD77; Sar83]
	in Gebäuden	im Freien	
0,7	100	100	Die meisten Menschen werden getötet
0,35	50	15	Durchgängig Ver- letzungen, hohe Fatalitätstrate
0,21	20	k. A.	Häufig schwere Verlet- zungen, Todesfall mög- lich
0,14	k. A.	k. A.	Verletzungsgefahr durch Trümmer
0,07	0	k. A.	Leichte Verletzungen durch Trümmer mög- lich

Auf Grund dieser Aussagen kann von einer Fatalitätswahrscheinlichkeit von 100 % ab einem Wert des Spitzenüberdrucks von 0,7 bar ausgegangen werden. Auch zeigt sich hier bei einem Wert von 0,07 bar von [GD77; Sar83] die Übereinstimmung zu dem in [MHM77; 2nd79] ermittelten Wert des Drucks von 0,04 bar. Dem Wert des Spitzenüberdrucks von 0,07 bar wird in [HIP08b] eine Fatalitätswahrscheinlichkeit von 0,005 % zugeordnet. Dieser Wert weicht etwas von dem in [MHM77; 2nd79] empirisch ermittelten Wert ab, zeigt aber eine deutliche Tendenz zu sehr geringen Fatalitätswahrscheinlichkeiten im Bereich des Spitzenüberdrucks von 0,04 bis 0,07 bar. Als Grenzwerte der Fatalitätswahrscheinlichkeit durch sekundären Trümmerflug können somit folgenden Werte des Spitzenüberdrucks festgelegt werden:

- untere Grenze: Fatalitätswahrscheinlichkeit 0,01 % bei 0,04 bar
- obere Grenze: Fatalitätswahrscheinlichkeit 100 % bei 0,7 bar

5.1.1. Idealisierung - Korrelation der Fatalitätswahrscheinlichkeit als Folge des Spitzenüberdrucks zu den erzielten Werten der Druckbelastung

Um Aussagen über die Effekte des Drucks machen zu können, müssen den Werten des Spitzenüberdrucks Auswirkungen auf ihre Umgebung zugeordnet werden. Aus ihnen kann abgeleitet werden, welcher Schaden an Gebäuden, Infrastruktur und natürlich auch dem Menschen entstehen.

Wie im vorangegangenen Kapitel gezeigt, existieren in der Fachliteratur jedoch nur wenige Werte, die konkrete Aussagen über die Konsequenzen des Drucks geben. Durch die

Fachliteratur werden Grenzwerte gegeben, aus denen bestimmte Auswirkungen des Spitzenüberdrucks resultieren (vgl. Kapitel 4.1). Diesen Auswirkungen kann allerdings nicht immer bedingungslos eine daraus folgende Konsequenz zugeordnet werden. Wie in Kapitel 4.1 dargestellt, müssen z. B. Konsequenzen des sekundären Trümmerflugs aus den Auswirkungen auf Fensterglas beschrieben werden. Sind Grenzwerte für Konsequenzen direkt gegeben, wie im Falle der Konsequenzen durch direkte Druckeinwirkung, so werden durch diese allerdings nur punktuelle Grenzen gesetzt. Konsequenzen innerhalb dieser durch Grenzwerte beschriebenen Intervalle, oder jenseits dieser, werden nicht gegeben. Um Aussagen über die Höhe von Konsequenzen durch Druck machen zu können, ist es allerdings notwendig, Bereiche zu definieren, in denen bestimmte Höhen der Konsequenz erreicht werden. So konnte in Kapitel 4.1.1 die Grenze der Fatalitätswahrscheinlichkeit des Menschen durch Druck von 50 % bei 2,65 bar und von 99 % bei 3,30 bar festgelegt werden. Oberhalb von 3,30 bar ist demnach mit einer 100 %igen Fatalität zu rechnen, unterhalb 2,65 bar mit weniger als 50 %. Die Fatalitätswahrscheinlichkeit im Bereich zwischen diesen beiden Grenzwerten ist jedoch mit diesen Mitteln nicht zu bestimmen.

Die in dieser Arbeit angewandte Methode auch die Bereiche zwischen den Grenzwerten zu erfassen ist, an Hand weniger bekannter Grenzwerte die Wahrscheinlichkeit der dazwischen liegenden Bereiche zu idealisieren. In den meisten Fällen lässt sich eine Korrelation zwischen Überdruck und Konsequenz nachweisen. Diese Korrelation lässt sich in einem Überdruck-Konsequenz-Diagramm mittels einer Geraden darstellen und so auch Werte abschätzen, die in der Fachliteratur nicht angegeben sind. Zur Berechnung der Geraden sind zwei Punkte des Konsequenz-Druck-Verhaltens notwendig: $P_1(\frac{x_1}{y_1})$ und $P_2(\frac{x_2}{y_2})$, mit P = Punkt des Grenzwerts im Diagramm und x, y = Punkte auf der jeweiligen Ordinate. Mit der Zweipunkteform der Geradengleichung lässt sich nun die Steigung S der Geraden berechnen:

$$S = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (5.1)$$

Mit der Geradengleichung, aufgelöst nach den Werten für die x- oder y-Achse, erhält man folgende Gleichungen:

$$y_{ges} = y + S(x_{ges} - x) \quad (5.2)$$

$$P_{ges} = P_{100\%} + S(p_{ges} - p_{100\%}) \quad (5.3)$$

$$x_{ges} = x + \frac{(y_{ges} - y)}{S} \quad (5.4)$$

$$p_{ges} = p_{100\%} + \frac{P_{ges} - P_{100\%}}{S} \quad (5.5)$$

Mittels dieser Gleichungen lassen sich die einzelnen Punkte auf der Geraden bestimmen und so den Werten des Spitzenüberdrucks die Höhe der festgelegten Konsequenz zuordnen.

Die Abbildung 5.3 zeigt den Verlauf der Druckwerte über den Radius beim Bersten eines 30 Liter Druckbehälters ohne anschließende chemische Reaktion, berechnet mit dem Modell des TNT-Massenäquivalents (vgl. Kapitel 6.1). Aus dieser Abbildung wird deutlich,

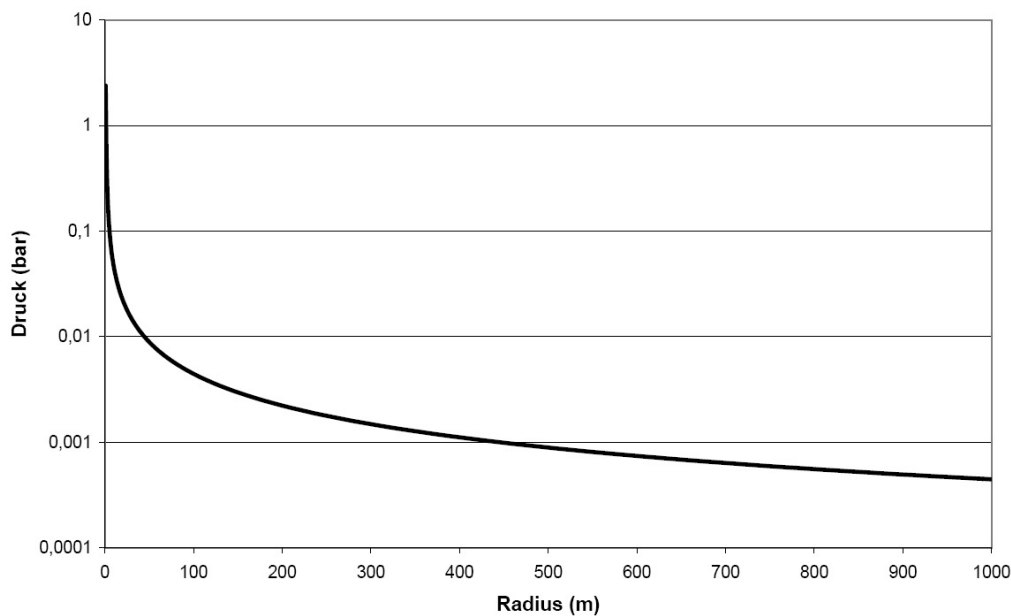


Abbildung 5.3.: Druckverlauf über den Radius bei einem Behältervolumen von 30 Litern, berechnet nach dem TNT-Äquivalenzmodell

dass der Verlauf des Spitzenüberdrucks über den Abstand zur Ausbreitungsquelle nicht linear verläuft, sondern exponentiell abfällt. Da die berechneten Konsequenzen linear zur Höhe des Spitzenüberdrucks korrelieren, bringt ein linearer Abfall des Spitzenüberdrucks ebenfalls eine lineare Verringerung der Konsequenzen mit sich. Bei der Annahme einer linearen Korrelation von Spitzenüberdruck zu Konsequenz führen die Werte der Konsequenzen zwischen den aus der Literatur festgelegten Werten demnach zu größeren Abständen von der Ausbreitungsquelle, als dies bei einem realistischen exponentiellen Ablauf der Fall ist. Dies führt wiederum zu einer leichten Überschätzung des realen Verhaltens. Diese Methode stellt somit eine konservative Abschätzung dar, bei der man sich durch die leichte Überproportionierung jedoch auf der sicheren Seite befindet. Die Abbildung 5.4 verdeutlicht diese Annahmen.

Wie oben bereits erwähnt, werden in der Fachliteratur nur Grenzwerte der Konsequenzen angegeben, die mitunter weit auseinander liegen. Die Höhen der Konsequenzen zwischen zwei dieser Grenzwerte sind weiterhin unbekannt. Durch die in dieser Arbeit vorgestellte Methodik der Idealisierung der Konsequenz über die Druckspitze lassen sich Mittelwerte der Konsequenzen über den Druckverlauf angeben.

Die Annahme einer Fatalitätswahrscheinlichkeit, die dem Mittelwert der zur Betrachtung stehenden Grenzwerte entspricht, stellt in doppelter Hinsicht eine konservative Abschätzung dar:

- Erstens führt die Annahme einer Linearität zwischen Druckspitze und Fatalitätswahrscheinlichkeit zu einer konservativen Abschätzung
- zweitens werden durch diese Linearität bei dem selben Überdruck größere Reichweiten erzielt als in der Realität (vgl. Abbildung 5.4). Diese Annahmen sind somit zwar ungenau, liegen allerdings durch diese Überschätzung auf der sicheren Seite.

Mit dieser Methode lässt sich nun der Wert der Fatalitätswahrscheinlichkeit innerhalb einer Risiko-Zone berechnen, der dem Mittelwert der oberen und unteren Grenzen entspricht.

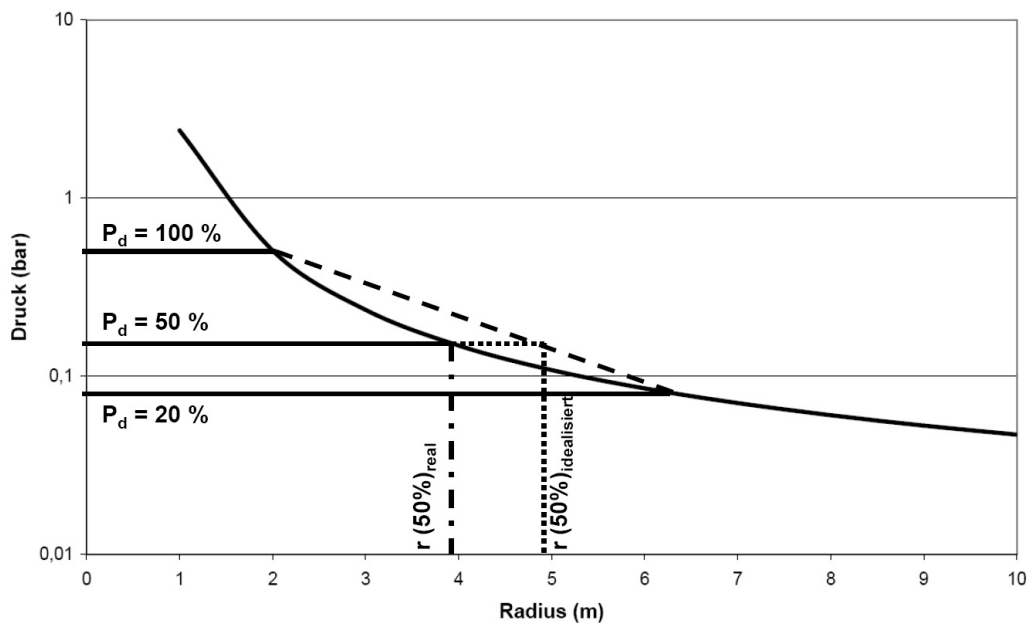


Abbildung 5.4.: Einfluss des linearen Verlaufs des Drucks zum Radius

Fatalitätswahrscheinlichkeit bei reinem Spitzenüberdruck

Werden für die Berechnung der Korrelation von Spitzenüberdruck zu Fatalität die zwei gerundeten Grenzwerte $P_{99\%} = (3,3|0,99)$ und $P_{50\%} = (2,7|0,5)$ nach Kapitel 4.1.1 zu Grunde gelegt, ergeben sich nach den Gleichungen 5.1 bis 5.5 folgende Werte:

- $S = 0,82$
- $P_{1\%} = (2,1|0,01)$
- $P_{0\%} = (2,09|0)$.

Die bei der Berechnung erzielte Aussage einer Sterbewahrscheinlichkeit von 1 % bei 2,1 bar deckt sich nahezu mit den Werten der unteren Letalitätsgrenze für den Menschen nach den Tabellen 4.1 und 4.2. Die Werte der Fatalitätswahrscheinlichkeit des Menschen in Korrelation zum Spitzenüberdruck sind in Tabelle 5.3 und graphisch in Abbildung 5.5 dargestellt. Die Berechnung erfolgt mittels der Gleichungen 5.2 und 5.5, die sich bezogen auf Punkt $P_{0\%} = (2,09|0)$ folgendermaßen darstellen lässt:

- $p_{ges} = p_{0\%} + \frac{P_{ges} - P_{0\%}}{S}$
- $p_{ges} = 2,09bar + \frac{P_{ges}}{0,82}$.

Fatalitätswahrscheinlichkeit bei Trümmerflug im Freien

Für die Betrachtung der idealisierten Werte der Fatalitätswahrscheinlichkeit durch sekundären Trümmerflug im Freien werden die Werte aus [HIP08b] herangezogen, welche in Tabelle 4.3 dargestellt und durch die Angaben des Kapitels 5.1 ergänzt werden. Diesen wird eine lineare Korrelation zwischen Konsequenz und Druck unterstellt und an Hand der gegebenen Grenzwerte eine Geradengleichung nach den Gleichungen 5.1 bis 5.5 erstellt. Zu Grunde gelegt werden die Werte des Spitzenüberdrucks der Fatalitätswahrscheinlichkeiten von 100 Prozent $P_{100\%} = (0,7|1,00)$ und $P_{15\%} = (0,35|0,15)$ (vgl. Tabelle 5.2). Somit ergibt sich nach Gleichung 5.1 eine Steigung $S = 2,43$ und ein Wert des Spitzenüberdrucks bei einer Fatalitätswahrscheinlichkeit von 0 % zu $P_{0\%} = (0,29|0)$ nach Gleichung 5.3.

Diese Werte eingesetzt in Gleichung 5.5 ergeben folgende Gleichung zur Berechnung des Spitzenüberdrucks bezogen auf die Fatalitätswahrscheinlichkeit: $p_{ges} = 0,29\text{bar} + \frac{P_{ges}}{2,43}$.

Die Werte des Spitzenüberdrucks in Bezug auf die Fatalitätswahrscheinlichkeit für sekundären Trümmerflug im Freien sind in Tabelle 5.4 gegeben und in Abbildung 5.6 graphisch dargestellt.

Fatalitätswahrscheinlichkeit bei Trümmerflug in Gebäuden

Die Betrachtung der idealisierten Werte der Fatalitätswahrscheinlichkeit durch sekundären Trümmerflug in Gebäuden entspricht den Aussagen zur Fatalitätswahrscheinlichkeit durch Trümmerflug im Freien. Zu Grunde gelegt werden die Werte des Spitzenüberdrucks der Fatalitätswahrscheinlichkeiten von 100 Prozent $P_{100\%} = (0,7|1,00)$ und 0,01 Prozent $P_{0,01\%} = (0,04|0,0001)$ (vgl. Tabelle 5.2). Nach der Eingangs beschriebenen Methode, ergeben sich die Steigung $S = 1,515$ und die Geradengleichung des gesuchten Spitzenüberdrucks bezogen auf den Wert der 100 %igen Fatalitätswahrscheinlichkeit zu $p_{ges} = 0,7\text{bar} + \frac{P_{ges}-1}{1,515}$. Die Abbildung 5.7 zeigt die Gerade der idealisierten Darstellung der Druckwerte bezogen auf die Fatalitätswahrscheinlichkeit sowie die Kurve derselben nach den Vorgaben aus [HIP08b].

Aus Abbildung 5.7 werden folgende Schlüsse ersichtlich:

1. In den Tabellen 4.1 und 4.2 wird der Grenzwert für Schäden durch Spreng- und Wurfstücke von 0,015 bar [KKL09; KRS⁺00] bzw. 0,015 – 0,025 bar [KG85] angegeben. Dieser Wert stellt den absoluten Grenzwert für Spreng- und Wurfstücke dar, unterhalb dessen mit Auswirkungen nicht mehr zu rechnen ist. Nach [MHM77; 2nd79] liegt bei einem Spitzenüberdruck von 0,04 bar der ermittelte Wert der Verletzungswahrscheinlichkeit bei 0,1 %, der Wert der Fatalitätswahrscheinlichkeit bei 0,01 %. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass es sich bei den in [MHM77; 2nd79] ermittelten Werten um den Glasbruch von Einfachverglasungen handelt, kann bei den heute üblichen Doppelverglasungen eher von einem höheren Wert des Spitzenüberdrucks bei gegebenen Wahrscheinlichkeiten ausgegangen werden. Die Grenzwerte für Spreng- und Wurfstücke von 0,015 – 0,025 bar nach [KKL09; KRS⁺00; KG85] können somit als überdimensioniert angesehen werden.
2. In [Cla72] wird dem Wert des Spitzenüberdrucks von 0,04 bar eine Wahrscheinlichkeit von 95 % zugeordnet, dass jenseits dieses Wertes keine ernstzunehmenden Schäden zu erwarten sind. Die verbleibenden 5 % geben dabei allerdings nur an, dass eine ernsthafte Schädigung möglich sei; deren Wahrscheinlichkeit oder Ausmaß wird jedoch nicht näher erläutert. Dieser Wert korreliert zwar gut mit dem oben beschriebenen Grenzwert für Spreng- und Wurfstücke, liegt allerdings wieder über dem nach [MHM77; 2nd79] ermittelten Wert der Fatalitätswahrscheinlichkeit von 0,01 % bei eben jenem Druckwert.
3. Trotz der Diskrepanz zwischen den in den Punkten 1. und 2. beschriebenen Grenzwerten der Literatur für Schädigungen durch sekundären Trümmerflug und dem nach [MHM77; 2nd79] ermittelten Grenzwert erscheint der zuletzt genannte aus folgenden Gründen als sinniger Grenzwert:
 - a) Aus den Versuchen nach [MHM77; 2nd79] geht eine Verletzungswahrscheinlichkeit von etwa 0,1 % bei 0,04 bar hervor. Geringere Druckwerte führten zu keinen Verletzungen.

- b) Bei den in [MHM77; 2nd79] durchgeführten Versuchen wurden Einfachverglasungen verwendet. Unter Annahme der heute üblichen Doppelverglasungen ist im Realfall mit höheren Werten des Spitzenüberdrucks zu rechnen, die eine Zerstörung der Fensterscheiben bedingen.

Diese beiden Aussagen sprechen für eine konservative Abschätzung, zeigen aber ebenfalls auf, dass die idealisierten Berechnungen mit erfassten Erfahrungswerten korrelieren und belassen die Betrachtung somit auf der sicheren Seite.

4. Im Kontrast zu den in den Punkten 1. und 2. beschriebenen Aussagen wird in [HIP08b] bei Unterschreiten eines Spitzenüberdrucks von 0,07 bar vom Ausbleiben fataler Konsequenzen ausgegangen. Nach der in diesem Kapitel beschriebenen Methode wird für diesen Spitzenüberdruck eine Wahrscheinlichkeit von 5 % fataler Konsequenzen berechnet. Auch diese Aussage weist auf die konservative Abschätzung der angewandten Methode hin.
5. Dem Wert des Überdrucks von 0,1 bar wird in [KKL09; KRS⁺00] eine Glasbruchwahrscheinlichkeit von 100 % zugeordnet. Nach Tabelle 5.5 ergibt sich für diesen Wert des Drucks eine nach den Gleichungen 5.2 und 5.5 errechnete Fatalitätswahrscheinlichkeit von 11 %. Dies würde bedeuten, dass bei einem Überdruck von 0,1 bar die kinetische Energie der Glassplitter ausreichend wäre 11 % der betroffenen Personen fatal zu verletzen. Auf Grund der in [Lee80; MHM77; 2nd79] getroffenen Aussagen erscheint dieser Wert durchaus realistisch.
6. Der Wert der 100 prozentigen Fatalitätswahrscheinlichkeit von 0,7 bar liegt weit unter dem unteren Grenzwert der Fatalitätswahrscheinlichkeit durch reine Druckeinwirkung von über 2 bar. Die Auswirkungen des sekundären Trümmerflugs werden somit weitreichend berücksichtigt.

Die Werte der Fatalitätswahrscheinlichkeit durch sekundären Trümmerflug liegen bei weitaus geringeren Drücken als die des reinen Spitzenüberdrucks. An Hand der in diesem Kapitel getroffenen Aussagen, basierend auf verschiedenen Literaturquellen, lässt sich die konservative Abschätzung der Fatalitätswahrscheinlichkeit durch Trümmerflug in Gebäuden nach Abbildung 5.7 graphisch und in Tabelle 5.5 rechnerisch darstellen.

Tabelle 5.3.: Fatalitätswahrscheinlichkeit des Menschen durch Überdruck

P_{Fatal}	p_{Spitze}	P_{Fatal}	p_{Spitze}	P_{Fatal}	p_{Spitze}
0,00	2,09	0,35	2,52	0,70	2,94
0,05	2,15	0,40	2,58	0,75	3,00
0,10	2,21	0,45	2,64	0,80	3,07
0,15	2,27	0,50	2,70	0,85	3,13
0,20	2,33	0,55	2,76	0,90	3,19
0,25	2,39	0,60	2,82	0,95	3,25
0,30	2,46	0,65	2,88	1,00	3,31

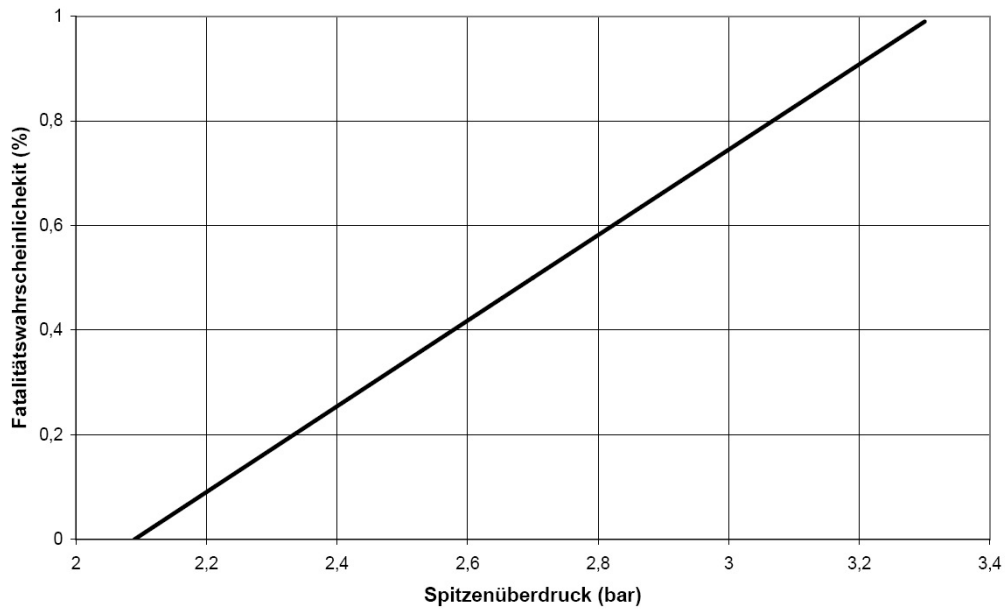


Abbildung 5.5.: Einfluss des linearen Verlaufs des Drucks zum Radius

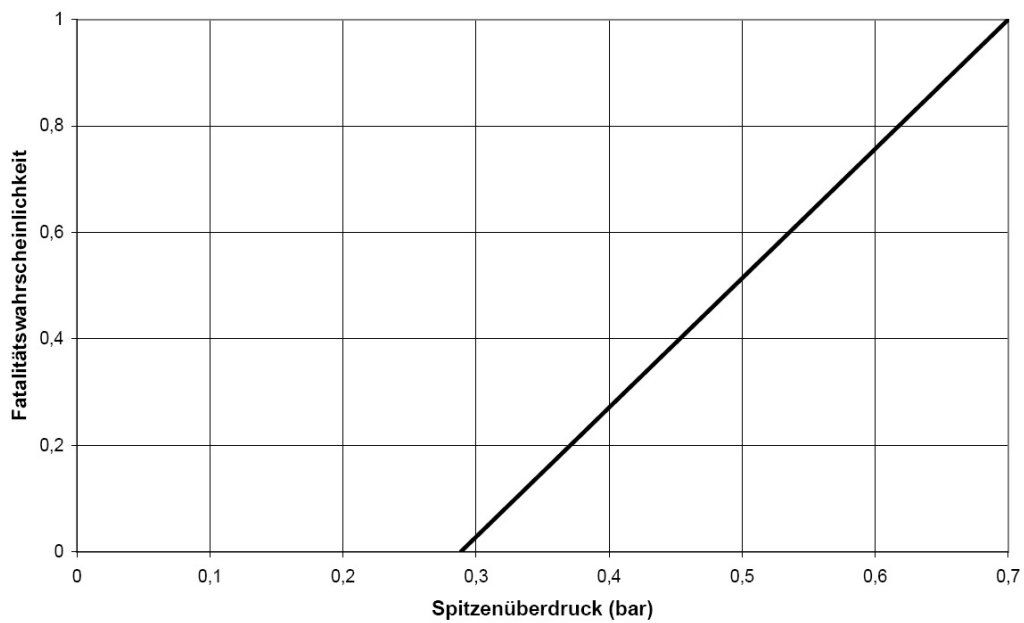


Abbildung 5.6.: Idealisierte Fatalitätswahrscheinlichkeit des Menschen durch sekundären Trümmerflug im Freien

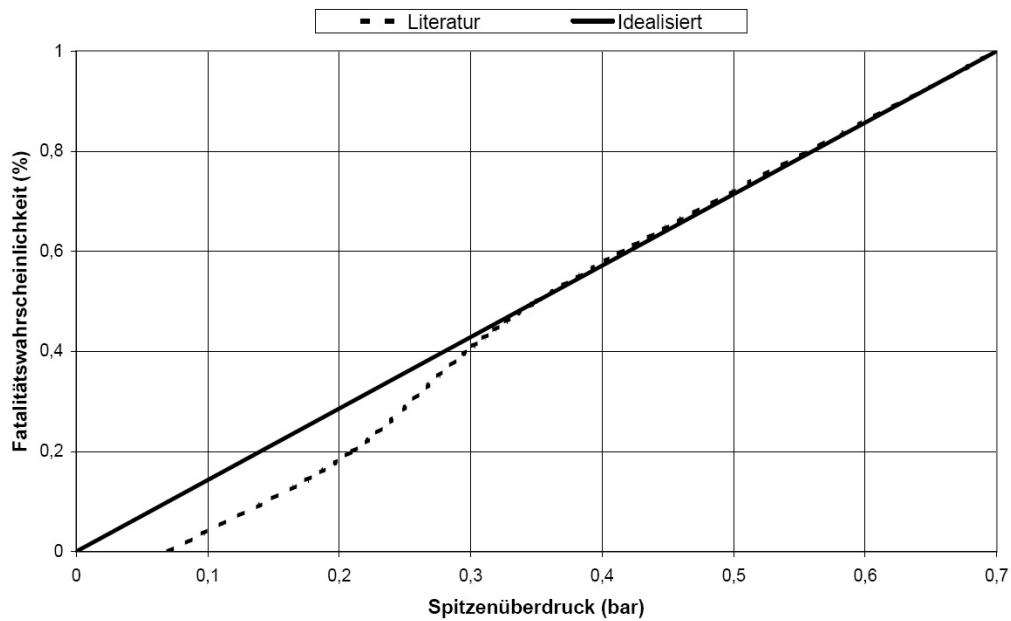


Abbildung 5.7.: Idealisierte Fatalitätswahrscheinlichkeit des Menschen durch sekundären Trümmerflug in Gebäuden und selbige nach [HIP08b]

Tabelle 5.4.: Idealisierte Fatalitätswahrscheinlichkeit des Menschen durch sekundären Trümmerflug im Freien

P_{Fatal}	p_{Spitze}	P_{Fatal}	p_{Spitze}	P_{Fatal}	p_{Spitze}
0,00	0,29	0,35	0,43	0,70	0,58
0,05	0,31	0,40	0,45	0,75	0,60
0,10	0,33	0,45	0,48	0,80	0,62
0,15	0,35	0,50	0,50	0,85	0,64
0,20	0,37	0,55	0,52	0,90	0,66
0,25	0,39	0,60	0,54	0,95	0,68
0,30	0,41	0,65	0,56	1,00	0,70

Tabelle 5.5.: Idealisierte Fatalitätswahrscheinlichkeit des Menschen durch sekundären Trümmerflug in Gebäuden

P_{Fatal}	p_{Spitze}	P_{Fatal}	p_{Spitze}	P_{Fatal}	p_{Spitze}
0,0001	0,04	0,35	0,27	0,70	0,50
0,05	0,07	0,40	0,30	0,75	0,53
0,10	0,11	0,45	0,34	0,80	0,57
0,15	0,14	0,50	0,37	0,85	0,60
0,20	0,17	0,55	0,40	0,90	0,63
0,25	0,20	0,60	0,44	0,95	0,67
0,30	0,24	0,65	0,47	1,00	0,70

5.1.2. Berechnung von Fatalitätswahrscheinlichkeiten und Darstellung der Konsequenzen mittels Risiko-Zonen

Die Korrelation von Druckwerten zu den daraus resultierenden Konsequenzen wurde im voran gegangenen Kapitel 5.1.1 dargestellt. Auf Grund dieser Idealisierung kann jedem Wert des Spitzenüberdrucks die zugehörige Fatalitätswahrscheinlichkeit zugeordnet werden. Da eine Risikobewertung, wie sie in dieser Arbeit vorgenommen wird, sinnvollerweise Bereiche gleichen Risikos bewerten soll, wird für diese Arbeit ein Modell entwickelt, Bereiche gleichen Risikos zu definieren und zu bewerten. Diese Bereiche werden im Folgenden Risiko-Zonen genannt. Mit der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Methode lassen sich idealisierte Grenzwerte der Fatalitätswahrscheinlichkeit angeben. Von diesen kann allerdings noch nicht auf die Fatalitätswahrscheinlichkeit innerhalb einer Risiko-Zone geschlossen werden, welche durch die obere und untere Grenze des Spitzenüberdrucks definiert ist. Wird hier weiterhin die lineare Korrelation zwischen Fatalitätswahrscheinlichkeit und Spitzenüberdruck zu Grunde gelegt, so kann der Mittelwert der Fatalitätswahrscheinlichkeit zweier Grenzwerte als Konsequenz der durch diese Grenzwerte beschriebenen Risiko-Zone angenommen werden. Mit dieser Methode lässt sich der Wert der Fatalitätswahrscheinlichkeit innerhalb einer Risiko-Zone darstellen, der dem Mittelwert der oberen und unteren Grenzen entspricht. Gibt die obere Grenze eine Fatalitätswahrscheinlichkeit von 100 % und die untere von 50 % an, so kann von einer mittleren Fatalitätswahrscheinlichkeit von 75 % innerhalb dieser Grenzen ausgegangen werden. Kernpunkt dieser Überlegung ist, dass die Anzahl an Personen, welche durch eine höhere Fatalitätswahrscheinlichkeit als dem Mittelwert betroffen sind, derjenigen entspricht, die durch eine Fatalitätswahrscheinlichkeit unterhalb des Mittelwertes weniger betroffen werden.

Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass mit geringer werdendem Spitzenüberdruck größere Radien und somit mehr Fläche erreicht werden, stellt sich heraus, dass in den Bereichen unterhalb des Mittelwertes mehr Personen anwesend sind als in dem Bereich oberhalb des Mittelwertes. Dies weist wiederum auf eine konservative Betrachtungsweise hin, die somit nicht exakt ist, allerdings auf der sicheren Seite liegt. Die in Kapitel 5.1.1 beschriebenen konservativen Eigenschaften der Darstellung der Fatalitätswahrscheinlichkeit durch Idealisierung gelten darüber hinaus, so dass es sich bei der Darstellung der mittleren Fatalitätswahrscheinlichkeit innerhalb der betrachteten Risiko-Zone um eine in mehrfacher Hinsicht konservative Methode handelt. Abbildung 5.8 zeigt am Beispiel der Grenzwerte für den sekundären Trümmerflug in Gebäuden das Prinzip, nach dem der Wert der idealisierten Fatalitätswahrscheinlichkeit innerhalb einer Risiko-Zone über den Mittelwert des oberen und unteren Grenzwertes generiert wird.

Bei den in diesem Kapitel befindlichen und auf Kapitel 5.1.1 basierenden Werten zu den Konsequenzen des sekundären Trümmerflugs (vgl. Tabelle 5.6) wurden Personenschäden durch einstürzende Gebäude(-teile) mit berücksichtigt. Diese Auswirkungen von denen des sekundären Trümmerflugs zu subtrahieren, ist zum einen auf Grund der Datenlage nicht möglich, zum anderen nicht notwendig, da einstürzende Gebäude(-teile) durchaus als Bestandteile des sekundären Trümmerflugs angesehen werden können. Die in diesem Kapitel getroffenen Aussagen zu Auswirkungen des sekundären Trümmerflugs in Gebäuden und im Freien beziehen alle Möglichkeiten der Schädigung des Menschen durch druckinduzierte Ereignisse mit ein. Die mit dieser Methode erzielten Werte der mittleren Fatalitätswahrscheinlichkeit innerhalb der Risiko-Zonen sind in Tabelle 5.6 wiedergegeben.

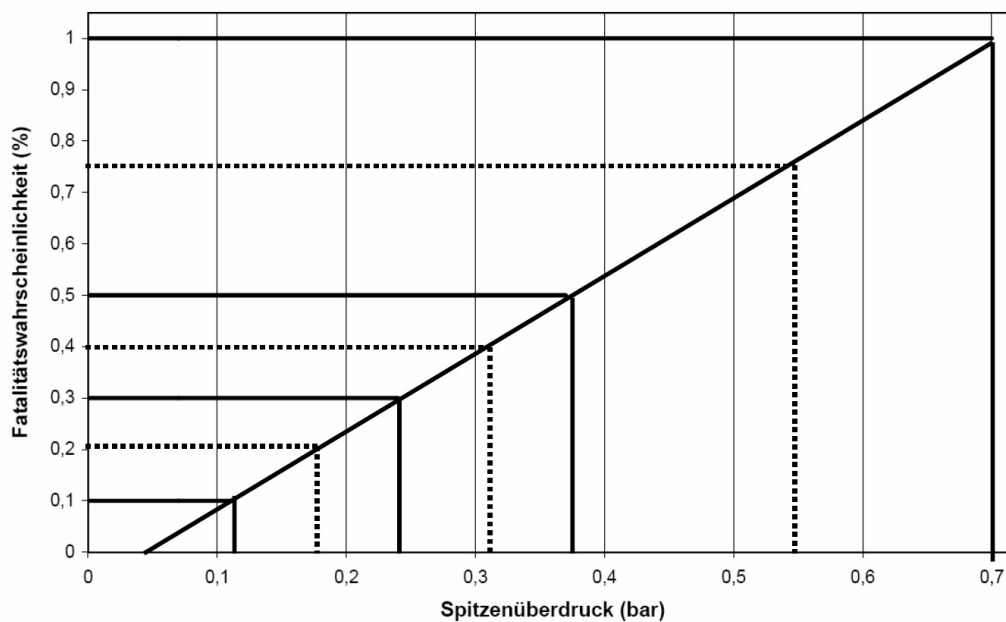


Abbildung 5.8.: Mittelwerte der idealisierten Fatalitätswahrscheinlichkeit für Personen in Gebäuden inkl. Trümmerflug

Tabelle 5.6.: Fatalitätswahrscheinlichkeit und Höhe des Spitzenüberdrucks der Risiko-Zonen

Risiko-Zone	Fatalitäts-wahrscheinlichkeit (%)	Überdruck (bar) für Personen bei		
		reiner Druckeinwirkung	Trümmerflug im Freien	Trümmerflug in Gebäuden
RZ ₁	100	> 3,31	> 0,70	> 0,70
RZ ₂	75	> 2,70	> 0,50	> 0,37
RZ ₃	40	> 2,46	> 0,41	> 0,24
RZ ₄	20	> 2,21	> 0,33	> 0,11
RZ ₅	5	> 2,09	> 0,29	> 0,04
	0	< 2,09	< 0,29	< 0,04

Die aus Tabelle 5.6 erhaltenen Werte werden zu Zonen gleichen Risikos zusammengefasst. Diese für die vorliegende Arbeit generierten Risiko-Zonen stellen die Konsequenzen von Druckbehälterversagen im Straßenverkehr dar und bieten die folgenden Vorteile:

1. Sie stellen die Bereiche des Risikos in einem berechenbaren Umkreis zur Risikoquelle bildlich dar,
2. sie legen den Grundstein für die spätere Betrachtung der Radian definierter Auswirkungen und
3. definieren somit die durch die Auswirkungen betroffene Fläche.

Aus den vorangegangenen Kapiteln haben sich drei unterschiedliche Arten von Auswirkungen auf den Menschen durch Druckbehälterversagen herausgebildet:

- direkte Druckeinwirkung,
- indirekte Druckeinwirkung (Trümmerflug) in Gebäuden und

- indirekte Druckeinwirkung (Trümmerflug) im Freien.

Die vergleichenden Werte der Höhe des Überdrucks dieser drei Auswirkungsarten bei jeweils gleichen Fatalitätswahrscheinlichkeiten sind Tabelle 5.6 zu entnehmen. Eine schematische Darstellung der Risiko-Zonen ist durch Abbildung 5.9 gegeben. Die Werte der Fatalitätswahrscheinlichkeit der Risiko-Zonen beziehen sich auf den Bereich der durch die Grenzwerte der betreffenden Risiko-Zone abgedeckten Fläche. Den Flächen der Risiko-Zonen werden somit Wahrscheinlichkeiten zugeordnet, dass Personen, welche sich in diesem Bereich befinden, fatale Konsequenzen erleiden. Die Werte der Fatalitätswahrscheinlichkeit der Risiko-Zonen gibt keine Auskunft über die prozentuale Anzahl aller durch ein Ereignis getöteten Personen.

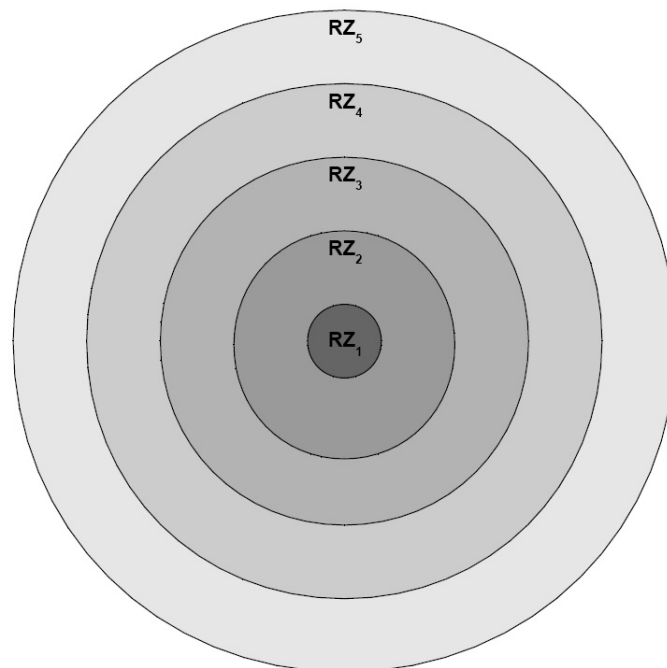


Abbildung 5.9.: Schematische Darstellung der Risiko-Zonen

5.2. Eintrittswahrscheinlichkeit

5.2.1. Relative Häufigkeit der relevanten Unfallarten

Wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben, kann bei langen statistischen Reihen aus den relativen Häufigkeiten auf die zukünftige Eintrittswahrscheinlichkeit geschlossen werden. Die relative Häufigkeit bezieht sich dabei immer auf einen Bezugswert, der den betrachteten Bereich dieser Häufigkeit beschreibt und eingrenzt. Als drei Bezugswerte werden für dieses Kapitel die Werte der

- polizeilich erfassten Unfälle,
- Pkw-Zulassungszahlen und der
- Kfz-Zulassungszahlen

gewählt. Die Werte der relativen Häufigkeiten der oben beschriebenen Unfallarten finden sich im Anhang A.5. Tabelle 5.7 zeigt die relativen Häufigkeiten von Straßenverkehrsunfällen im Jahr 2010 für alle in [Ver07a; Ver11b] aufgeführten Unfallarten. Statistische Daten zu Verkehrsunfällen im Jahr 2011 lagen zum Zeitpunkt des Entstehens dieser Arbeit noch nicht vor (vgl. Kapitel 4.2.1).

Tabelle 5.7.: Relative Häufigkeiten von Straßenverkehrsunfällen für alle in [Ver07a; Ver11b] aufgeführten Unfallarten im Jahr 2010

	Wert absolut	Relative Häufigkeit bezogen auf Pkw-Zulassungszahlen (41,737 Mill.)	Relative Häufigkeit bezogen auf Kfz-Zulassungszahlen (50,184 Mill.)	Relative Häufigkeit bezogen auf die Bevölkerungsdichte (81,802 Mill.)
innerhalb Ortschaften	247.221	$5,92 \cdot 10^{-3}$	$4,93 \cdot 10^{-3}$	$3,02 \cdot 10^{-3}$
außerhalb Ortschaften	133.183	$3,19 \cdot 10^{-3}$	$2,65 \cdot 10^{-3}$	$1,63 \cdot 10^{-3}$
Gesamt	380.404	$9,11 \cdot 10^{-3}$	$7,58 \cdot 10^{-3}$	$4,65 \cdot 10^{-3}$

Aus den Werten der polizeilich erfassten Unfälle lässt sich erkennen, dass sich zwei Drittel aller Straßenverkehrsunfälle innerhalb von Städten ereignen, während auf den außerstädtischen Bereich, inklusive der Autobahnen, etwa ein Drittel entfallen. Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit ist es jedoch notwendig einen Bezugswert zu wählen, welcher der Risikoanalyse angemessen ist. Da sich die Konsequenzen des Druckbehälterversagens nicht ausschließlich auf den Fahrzeughalter und andere motorisierte Verkehrsteilnehmer beschränken, sondern durch den Trümmerflug auch Personen betroffen werden können, die zum Unfallzeitpunkt nicht am Verkehrsgeschehen teilnehmen, bietet sich die Bevölkerungsdichte als Bezugswert am sinnvollsten an. Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit bedeutet dies, dass die Wahrscheinlichkeit ermittelt wird, bei dem Ereignis des infolge eines Verkehrsunfalls versagenden Druckbehälters anwesend zu sein.

Zur besseren Darstellung des Sachverhaltes erfolgt an dieser Stelle eine Erläuterung mit den Begriffen des Individuellen und des Sozialen Risikos. In Deutschland ereigneten sich 380.404 Unfälle mit Personenschaden und schwerwiegende Unfälle mit Sachschaden [Ver11b] im Jahr 2010. Wird für das ortsbezogene Individuelle Risiko der Ort Deutschland gewählt, so ergibt sich, unter Erschließung der Wahrscheinlichkeit aus der relativen Häufigkeit, eine Wahrscheinlichkeit von 380.404 der o.g. Unfälle. Das personenbezogene Individuelle Risiko bezieht sich dem gegenüber jedoch auf eine Bevölkerungszahl von 81.802.000 [Bev09; Sta10] und erbringt somit eine Wahrscheinlichkeit von $4,65 \cdot 10^{-3}$ je Person und Jahr, an einem der o.g. Unfälle beteiligt zu sein. Im gleichen Maße starb im Jahr 2010 eine Anzahl von 3648 Menschen bei 3397 Verkehrsunfällen [Ver11b]. Auf den Ort Deutschland bezogen ergibt sich ein ortsbezogenes Individuelles Risiko von 3648 Todesfällen pro Jahr; das personenbezogene Individuelle Risiko dagegen beläuft sich auf $4,45 \cdot 10^{-5}$ je Person und Jahr, ein Wert, der nach den in Kapitel 2.5 beschriebenen Maßstäben durchaus Akzeptanz genießt. Die Zahl der bei Verkehrsunfällen getöteten Personen ist im Jahr 2011 auf 3991 gestiegen [Ver11a], was zu einer Erhöhung des Individuellen Risikos auf $4,88 \cdot 10^{-5}$ führt. Da zum Zeitpunkt des Entstehens dieser Arbeit jedoch noch

keine Werte zu den anderen Unfallzahlen vorlagen, wird weiterhin der Wert des Jahres 2010 verwendet.

Die relative Häufigkeit von Unfällen, die grundsätzlich geeignet sind, einen Druckbehälter zu schädigen und so zu den in Kapitel 5.1 beschriebenen Konsequenzen zu führen, beläuft sich somit auf $4,65 \cdot 10^{-3}$. Wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben lässt sich dieser Wert ebenfalls als Eintrittswahrscheinlichkeit künftiger Jahre verwenden, womit sich eine personenbezogene Unfallrate von $4,65 \cdot 10^{-3}$ ergibt. Ausgehend von diesem Wert wird in den späteren Kapiteln die Risikobewertung erfolgen.

5.2.2. Faktoren der Druckbehälterschädigung durch Impact-Unfälle im Straßenverkehr

Wie in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt, fließen in die Abschätzung der Wahrscheinlichkeit der Beschädigung des Druckbehälters bei einem Verkehrsunfall verschiedene Faktoren ein. Diese können jedoch nur zum Teil auf Statistiken begründet werden, die anderen müssen über eine Rekonstruktion des Unfallgeschehens abgeschätzt werden. Hierbei wird zwischen statistisch gesicherten und ungesicherten Faktoren unterschieden. Bei den gesicherten Faktoren handelt es sich um solche, die direkt nachweisbar sind; im Falle dieser Arbeit also um die Statistik der polizeilich erfassten Verkehrsunfälle. Hierdurch kann retrospektiv auf die Häufigkeit von Unfallarten und deren Ortslage geschlossen werden. Diese Aussagen geben allerdings keine Auskunft über die Qualität der Unfälle, sondern rein über ihre statistische Quantität. Ungesicherte Faktoren sind solche, deren Werte sich nur abschätzen oder aus gesicherten Faktoren herleiten lassen. Die für die Risikoanalyse von Druckbehältern im Straßenverkehr wesentlichen ungesicherten Faktoren lassen sich durch die Kollisionsenergie und deren Ort der Krafteinwirkung beschreiben.

Kollisionsenergie

Der Wert der Kollisionsenergie entspricht dem Wert der beim Unfall übertragenen kinetischen Energie. Diese setzt sich aus der Masse des auffahrenden Fahrzeugs und der Relativgeschwindigkeit beider Fahrzeuge zusammen, wobei die Geschwindigkeit mit $E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ exponentiell einfließt (vgl. Abbildung 4.4). Die Statistiken liefern allerdings weder Aussagen zum Gewicht kollidierender Fahrzeuge, noch ist aus ihnen ersichtlich, welche Fahrzeugtypen (Pkw, Lkw, Kraftrad, etc.) an den Unfällen beteiligt waren, woraus sich das Gewicht der Fahrzeuge (wieder als ungesicherter Faktor) abschätzen ließe. Hierzu führt die Statistik nur aus, dass 64 % der Unfälle mit Personenschaden und 86 % mit schwerwiegendem Sachschaden unter Beteiligung eines Pkw erfolgten. Ob dieser der Unfallverursacher oder der Geschädigte ist, wird nicht genannt, ebensowenig ob es sich bei den Geschädigten um Fußgänger, Radfahrer oder andere handelt, also Verkehrsteilnehmer, die eine Beschädigung des Druckbehälters unwahrscheinlich erscheinen lassen. Auch auf die relativen Fahrgeschwindigkeiten der kollidierenden Fahrzeuge lassen sich aus der Statistik nur indirekt Rückschlüsse ziehen. So gibt die Ortslage Auskunft über zu vermutende Höchstgeschwindigkeiten und die Unfallart über die Relativbewegung der Fahrzeuge zueinander. Etwaige Bremsvorgänge können hierbei ebenfalls nicht berücksichtigt werden. Tabelle 5.8 gibt den Einfluss der Geschwindigkeit, bezogen auf eine Masse von einem Kilogramm, wieder. Zu beachten ist auch hierbei, dass die Werte der Höchstgeschwindigkeit für diese Arbeit sinnvoll gewählt wurden und wahrscheinlich eine gute Näherung, allerdings keinen gesicherten Wert, darstellen.

Tabelle 5.8.: Angenommene Geschwindigkeiten nach Ortslage und deren Einfluss auf die kinetische Energie

Geschwindigkeit (km/h)	Kinetische Energie in Joule (bezogen auf 1 kg)
30 (innerstädtisch langsam)	35
50 (innerstädtisch standard)	97
80 (außerstädtisch)	247
100 (außerstädtisch, Autobahn langsam)	386
130 (autobahn Richtgeschwindigkeit)	652
180 (Autobahn schnell)	1250

Die Geschwindigkeit beim Unfall zweier Fahrzeuge setzt sich jedoch aus der Grundgeschwindigkeit beider Fahrzeuge sowie deren Bewegungsrichtung zueinander und eventuellen Verzögerungsvorgängen zusammen. Während sich Verzögerungsvorgänge nicht ausreichend abschätzen lassen, kann von der Unfallart auf die Relativbewegung der kollidierenden Fahrzeuge zueinander geschlossen werden. Hier lassen sich drei Fälle unterscheiden:

1. die Fahrzeuge bewegen sich aufeinander zu: die Grundgeschwindigkeiten addieren sich
2. die Fahrzeuge bewegen sich in die selbe Richtung: unter Berücksichtigung eines nicht abschätzbaren Verzögerungsvorgangs wird die Kollisionsgeschwindigkeit wesentlich geringer ausfallen als die Grundgeschwindigkeit der Fahrzeuge
3. die Fahrzeuge kreuzen sich: hier kann, grob betrachtet, das geschädigte Fahrzeug als stehend betrachtet werden, während das schädigende Fahrzeug in dessen Seite fährt. Die Kollisionsgeschwindigkeit wird hier der Grundgeschwindigkeit abzüglich eines nicht abschätzbaren Verzögerungsvorgangs entsprechen.

Wie dieses Kapitel zeigt, ist der Wert der bei der Kollision übertragenen kinetischen Energie zwar wichtig zur Abschätzung der Wahrscheinlichkeit einer Druckbehälterschädigung durch einen Verkehrsunfall, allerdings kann dieser unsichere Faktor auf Grund der ungenauen Datenlage nicht ausreichend abgeschätzt werden. Bei der Risikoanalyse von Druckbehältern im Straßenverkehr kann daher zum jetzigen Zeitpunkt der Faktor Kollisionsenergie nicht berücksichtigt werden.

Kollisionsbereich

Der zweite ungesicherte Faktor ist der Bereich des Fahrzeuges, der durch den Unfall geschädigt wird. Dieser lässt sich grob in die Bereiche Front, Seiten (rechts und links) und Heck einteilen. Die verschiedenen Unfallarten geben indirekt darüber Aufschluss, auf welchen Bereich des Fahrzeuges die Kollisionsenergie einwirkt. Es ist also demnach möglich, dass Unfallarten auf Grund ihrer statistischen Häufigkeit, ihrer Schadensfälle, ihrer Unfalltoten und ihrer Kollisionsenergie eine hohe Unfall- und Schadenshäufigkeit aufweisen, im Hinblick auf die Betrachtung der Wahrscheinlichkeit der Schädigung des Druckbehälter aber weniger auffallend sind.

Um diesen zweiten ungesicherten Faktor näher beschreiben und bewerten zu können, muss etwas weiter ausgeholt werden. In der ECE Regelung Nr. 34 [ECE03] und dem amerikanischen FMVSS Standard No. 303 [FMV04b] werden Methoden zur Prüfung des Crash-Verhaltens von Fahrzeugen beschrieben. Die ECE Regelung Nr. 34 [ECE03] bezieht sich

auf Personenkraftwagen, die mit flüssigen Kraftstoffen betrieben werden, wobei mit flüssigen in diesem Falle die herkömmlichen Kraftstoffe Benzin und Diesel, nicht aber verflüssigte Gase gemeint sind. Ziel dieser Regelung ist die Schaffung von einheitlichen Bedingungen zur Verhütung von Brandgefahren bei diesen Fahrzeugen. In dieser Regelung werden drei Tests gefordert, die das Verhalten bei verschiedenen Unfallarten simulieren sollen: frontaler Aufprall auf ein Hindernis, Heck- und Seitenaufprall, wobei der Seitenaufprall durch die ECE Regelung 95 [ECE95] beschrieben wird. Diese Tests sind ursprünglich dazu gedacht, Todesfälle und Verletzungen durch aus Unfällen resultierenden Bränden zu reduzieren. Gleichwohl geben sie Auskunft über das geforderte Verhalten von Fahrzeugen bzw. deren Komponenten bei oder nach einem Unfall. Ziel dieser Tests ist es, eine maximale Leckrate zu gewährleisten, bei der davon ausgegangen werden kann, dass sie sich für die Insassen als unschädlich erweist. Ein Bersten des Druckbehälters sollte nach diesen Vorgaben somit ausgeschlossen werden können. Da sich der Druckbehälter im hinteren Bereich des Fahrzeuges befindet, kann der Test des Frontalaufpralls als gegenstandslos betrachtet werden. Das Verfahren der Heckaufprallprüfung soll die Bedingungen eines Heckaufpralls durch ein anderes Fahrzeug simulieren. Aus diesem Grund wurde für dieses Verfahren eine bewegliche Vorrichtung mit bestimmten einzuhaltenden Maßen gefordert. Die Aufprallgeschwindigkeit der Vorrichtung muss zwischen 35 und 38 km/h liegen, bei einer Masse von 1100 ± 20 kg. Hieraus ergibt sich eine kinetische Energie von 62,395 kJ. Das gleiche Prinzip gilt im Grunde genommen ebenfalls für die Seitenaufprallprüfung, wobei die Aufprallgeschwindigkeit 50 ± 1 km/h betragen muss, bei einer Masse von 950 ± 20 kg. Hieraus resultiert eine kinetische Energie von 97,336 kJ.

Darüber hinaus bezieht sich die ECE Regelung 67 [ECE06] auf LPG-betriebene Fahrzeuge und die ECE Regelung 110 [ECE08] auf solche mit CNG-Betrieb. Beide Regelungen stellen allerdings keine Anforderungen an das Unfallverhalten der Fahrzeuge oder Druckbehälter. Der amerikanische FMVSS Standard No. 303 [FMV04b] und der kanadische CMVSR Standard No. 301.2 [CMV04b] beschreiben Anforderungen an CNG-betriebene Fahrzeuge bezüglich ihres Verhaltens gegenüber Frontal-, Seiten- und Heckaufprall. Bei diesen Tests wird eine bewegliche Vorrichtung mit einem Gewicht von 1814 ± 23 kg verwendet. Die Aufprallgeschwindigkeit beträgt für den Heckaufprall 48 km/h und bringt somit eine kinetische Energie von 162,4 kJ ein; für den Seitenaufprall beträgt die Aufprallgeschwindigkeit 32 km/h und die kinetische Energie somit 72,177 kJ. Eine Zusammenstellung dieser Anforderungen ist in Anhang A.7 in Tabelle A.3 gegeben.

Die Anforderungen an mit flüssigen Kraftstoffen betriebene Fahrzeuge in den USA und Kanada entsprechen denen bei CNG-Fahrzeugen und werden in den Regelwerken FMVSS Standard No. 301 [FMV04a] und CMVSR Standard No. 301 [CMV04b] beschrieben; zusätzlich werden in diesen Regelwerken Anforderungen an den Überschlag des Fahrzeuges gestellt, die hier nicht weiter erläutert werden sollen. Darüber hinaus werden im CMVSR 301.1 [CMV04a] die selben Anforderungen an LPG-betriebene Fahrzeuge wie an CNG-betriebene gestellt.

Nach [DSA05] wurden aus diesen Vorgaben und nach statistischen Auswertungen die folgenden drei Aufprallarten mit den dazu gehörigen Werten ermittelt (vgl. Anhang A.7 Tabelle A.4):

- Heckaufprall zu 100 % mit einer kinetischen Energie von 160 kJ
- Heckaufprall zu 50 % mit einer kinetischen Energie von 160 kJ und
- Seitenaufprall mit einer kinetischen Energie von 150 kJ .

In [Mar07] wurden numerische Simulationen mit diesen Werten gefahren. Diese Simulationen zeigten, dass bei den drei unterschiedlichen Aufprallarten mit folgenden Verformungen des Fahrzeugchassis zu rechnen ist:

- Heckaufprall zu 100 %: 400 mm Verformung
- Heckaufprall zu 50 %: 490 mm Verformung
- Seitenaufprall: 150 mm Verformung (vgl. Anhang A.7, Tabelle A.5)

In [DSA05] wurden darüber hinaus aus zwei verschiedenen Datenbanken so genannte Spinnennetz-Diagramme wieder gegeben. Diese Spinnennetz-Diagramme eignen sich insbesondere dafür, Daten unterschiedlicher Datenreihen zu visualisieren und untereinander besser vergleichbar zu machen. Bei diesen Diagrammen wurden die folgenden drei Parameter miteinander verglichen:

- Häufigkeit des Eintretens
- absorbierte Aufprallenergie und
- Richtung des Aufpralls.

Die Richtung des Aufpralls ergibt sich durch die Unterteilungen des Diagramms; die Höhe der absorbierten Aufprallenergie wird in diesem Diagramm ebenfalls dargestellt. Die Häufigkeit des Eintretens ergibt sich aus dem angegebenen Perzentil. Die Diagramme zeigen die drei Perzentillinien P(10), P(50) und P(90) bezogen auf die Richtung und die Höhe der absorbierten Aufprallenergie. Ein durch ein Perzentil angegebener Wert wird sich zu einer durch den Wert des Perzentils gegebenen prozentualen Häufigkeit unterhalb dieses Wertes, und der Rest darüber befinden. Bei einem Perzentil von P(90) würden 90 % aller betrachteten Fahrzeuge einen durch dieses Perzentil wiedergegebenen oder geringeren Wert annehmen und 10 % aller Fahrzeuge einen Wert, der diesen übersteigt.

Auf Grundlage verschiedener Datenbanken wurden in [DSA05] Auswertungen in Form von Spinnennetz-Diagrammen vorgenommen, deren Ergebnisse im Folgenden kurz dargestellt werden. In der einen Datenbank wird das P(90)-Perzentil für die höchste kinetische Energie (160 kJ) im Frontbereich erreicht. Auf den Heckbereich wirken immerhin noch 140 kJ ein, während auf die für die Betrachtung der Druckbehälterschädigung relevanten Seitenbereiche 135° und 225° kinetische Energien von 135 kJ und 100 kJ aufweisen (vgl. Anhang A.7, Abbildung A.20). In der anderen Datenbank (vgl. Anhang A.7, Abbildung A.21) wird das P(90)-Perzentil für die höchste kinetische Energie von 70 kJ am Heckbereich rechts bei 150° (5 am) erreicht, während das Pendant auf der linken Seite bei 210° (7 am) dem gegenüber einen Wert von 50 kJ aufweist. Die Richtung dieser kinetischen Energie lässt jedoch mehr auf einen versetzten Heckaufprall als auf einen Seitenaufprall schließen. Der gesamte Frontbereich weist ansonsten kinetische Energien von 65 kJ auf. Der auf die Mittelachse treffende Heckbereich bei 180° (6 am) weist einen relativ geringen Wert der kinetischen Energie von etwa 35 kJ auf, ebenso wie der rechte Seitenbereich bei 120° (4 am). Den generell geringsten Wert liefert der linke Seitenbereich bei 240° (8 am) mit etwa 15 kJ.

Der Vergleich der beiden Diagramme führt zu den folgenden zwei Aussagen:

1. Die grobe Einteilung in die Bereiche Front, Seite und Heck zeigt eine deutliche Verteilung der Höhen der einwirkenden kinetischen Energie:

- die höchste kinetische Energie wird im Frontbereich erzielt,
- der für die Betrachtung der Druckbehälterschädigung relevante Seitenbereich am hinteren Teil des Fahrzeuges weist eine durchschnittlich eher geringe einwirkende kinetische Energie auf,
- der seitliche Heckbereich weist Höchstwerte auf, während der Heckbereich linear zur Fahrtrichtung einen sehr geringen Wert der einwirkenden kinetischen Energie aufweist.

Es kann demnach als gesichert angesehen werden, dass Frontalunfälle die höchste kinetische Energie einbringen. Auffahrunfälle bringen ebenfalls eine hohe kinetische Energie mit ein, auch wenn diese im Durchschnitt etwas geringer ausfällt, als bei Frontalunfällen. Seitenunfälle bringen eher eine geringe kinetische Energie ein, was den oben getroffenen Aussagen bezüglich der Aufprallgeschwindigkeit zwar zuwider läuft, dafür aber die Annahme bestätigt, dass Seitenunfälle weniger geeignet sind eine Schädigung des Druckbehälters zu bewirken.

2. Die Werte der einzelnen Perzentile weichen in den beiden Darstellungen stark voneinander ab. So liegt der Höchstwert des P(90)-Perzentils je nach Datenbank bei 160 bzw. 70 kJ. Dies ist auf die unterschiedliche Datenlage zurück zu führen. Die Daten der „CIDAUT accidentology database“ und dem „EES (Equivalent Energy of Speed) catalogue“ behandeln nur Unfälle, bei denen mindestens eine Person verletzt wurde. Die Daten der GIDAS (German In-Depth Accident Study) der BAST berücksichtigen darüber hinaus Unfälle mit Sachschaden. Die Aussage der GIDAS ist in soweit zu interpretieren, dass (bezogen auf das P(90)-Perzentil) 90 % aller Unfälle eine kinetische Energie unterhalb dieses Wertes aufweisen; eine Obergrenze ist hierbei nicht angegeben. Nach dieser Darstellung ist also davon auszugehen, dass bei 90 % der in dieser Arbeit betrachteten Unfälle (solche ab schwerwiegenden Sachschaden) mindesten die durch das P(90)-Perzentil der GIDAS wiedergegebenen Werte der kinetischen Energie erreicht werden.

Die Kernaussagen der drei Kollisionsbereiche Front, Seite und Heck lassen sich folgendermaßen formulieren:

Heck-/Auffahrunfälle

Heckunfälle bringen durchschnittlich eine hohe kinetische Energie ein. Aus den Abbildungen A.21 und A.20 wird deutlich, dass insbesondere Heckunfälle in einem Winkel von 150° und 210° zu hohen kinetischen Aufprallenergien führen, was in etwa der 50 %igen Abdeckung eines Heckaufpralls nach [Mar07] entspricht. Diese weist demzufolge auch die höchste Eindringtiefe von 490 mm auf (vgl. Anhang A.7, Tabelle A.5). Der Heckaufprall mit 100 %iger Abdeckung weist dem gegenüber eine wesentlich geringere kinetische Aufprallenergie auf als die 50 %ige Abdeckung. Dies spiegelt sich auch in der geringeren Eindringtiefe von 400 mm wider. Insgesamt kann festgehalten werden, dass Auffahrunfälle eine hohe kinetische Energie auf das voraus fahrende Fahrzeug einbringen, dadurch eine hohe Eindringtiefe bewirken und somit eine hohe Wahrscheinlichkeit der Druckbehälterschädigung vermuten lassen. Der Heckunfall ist somit besonders geeignet, eine Schädigung des Druckbehälters zu bewirken.

Seitenunfälle

Entgegen den Aussagen, die sich aus der Abschätzung der Kollisionsenergie ergeben, wozu Seitenunfälle eine relativ hohe Geschwindigkeit aufweisen und somit eigentlich auch

eine hohe kinetische Energie einbringen sollten, wird hier gezeigt, dass die auf ein Fahrzeug einwirkende kinetische Energie bei einem Seitenunfall eher gering ausfällt. Nach [Mar07] wird die einwirkende kinetische Energie zum einen an der Seite des Fahrzeuges absorbiert und in Verformungsenergie umgewandelt, zum anderen durch den Druckbehälter an die andere Seite des Fahrzeuges weitergeleitet, wo sie letztendlich absorbiert werden kann. Hierdurch wird die mit 150 mm sehr geringe Eindringtiefe erreicht. Es ist allerdings zu beachten, dass diese Aussage auf der Annahme begründet ist, dass die Stabilität des Druckbehälters größer als diejenige des Fahrzeuges ist [ADA11]. Beim Seitenunfall wird also eine geringe Eindringtiefe dadurch erreicht, dass kinetische Energie durch den Druckbehälter auf die umliegende Seite transferiert wird. Nach diesen Aussagen wirkt demnach definitiv Energie auf den Druckbehälter ein.

Frontalunfälle

Bei Frontalunfällen wird durchschnittlich die höchste kinetische Energie erreicht. Jedoch ist die Wahrscheinlichkeit einer direkten Schädigung des Druckbehälters durch den Unfall als sehr gering anzusehen, da dieser sich in den meisten Fällen im hinteren Bereich des Fahrzeuges (Kofferraum) oder etwa auf Höhe der Rückbank Unterflur befindet.

Es kann festgehalten werden, dass Heck- und Seitenkollisionen grundsätzlich geeignet sind, zu einem Versagen des Druckbehälters zu führen, während dies bei Frontalunfällen eher ausgeschlossen werden kann. Trotz all dieser Aussagen lässt sich jedoch kein gesicherter Wert formulieren, der als Wahrscheinlichkeitsgröße das Versagen eines Druckbehälters auf Grund der betreffenden Unfallart beschreibt. Um konkrete Aussagen über diesen ungesicherten Faktor machen zu können, müssen Daten ermittelt werden, ab welchen einwirkenden Energien welche Versagensszenarien am Druckbehälter resultieren. Für die vorliegende Arbeit bedeutete dies, dass die Wahrscheinlichkeit einer Druckbehälterschädigung infolge eines Verkehrsunfalls nicht abschließend angegeben werden kann. In dieser Arbeit müssen, auf Grundlage der gegebenen Fakten, möglichst realistische Annahmen getroffen werden.

Aufbauend auf den getroffenen Aussagen wird auf Abbildung 5.10 verwiesen. Diese zeigt Bereiche hoher Energieeinwirkung in den Seitenbereichen (90° zur Fahrzeugfront) sowie den seitlich versetzten Heckbereichen (150° zur Fahrzeugfront) des Fahrzeuges. Diese werden durch Straßenverkehrsunfälle besonders schwer getroffen. Aussagen über eine Wahrscheinlichkeit der Druckbehälterschädigung lassen sich hierdurch allerdings noch nicht ableiten.

Neuere Untersuchungen des Deformationsverhaltens von Kraftfahrzeugen werden in [SAE11] gegeben. Dort wurden vorhandene Daten ausgewertet und Simulationen bezüglich des Deformationsverhaltens gefahren. Abbildung 5.11 zeigt den Bereich der Druckbehälteranbringung im Fahrzeug sowie verschiedene Perzentile der Deformation durch Unfälle. Zum einen belegen die dort getroffenen Aussagen diejenigen aus Abbildung 5.10, wonach die Seitenbereiche und seitlichen Heckbereiche durch Unfälle am schwersten betroffen werden. Zum anderen geben sie Auskunft über die Wahrscheinlichkeit, dass ein Unfall geeignet ist, das Fahrzeug derart zu verformen, dass eine Schädigung der Druckbehälter ermöglicht wird. In 2 % der Unfälle fällt der seitliche Bereich in diesen Bereich der Verformung. In nur einem Prozent der Fälle konnte eine Deformation, die zu einer Schädigung des Druckbehälters führen kann, sowohl von der Seite als auch vom Heck nicht ausgeschlossen werden. Für diese Einschätzung sprechen ebenso die Daten aus [FDG⁺05].

Hieraus lassen sich zwei wichtige Aussagen für die weitere Betrachtung erschließen:

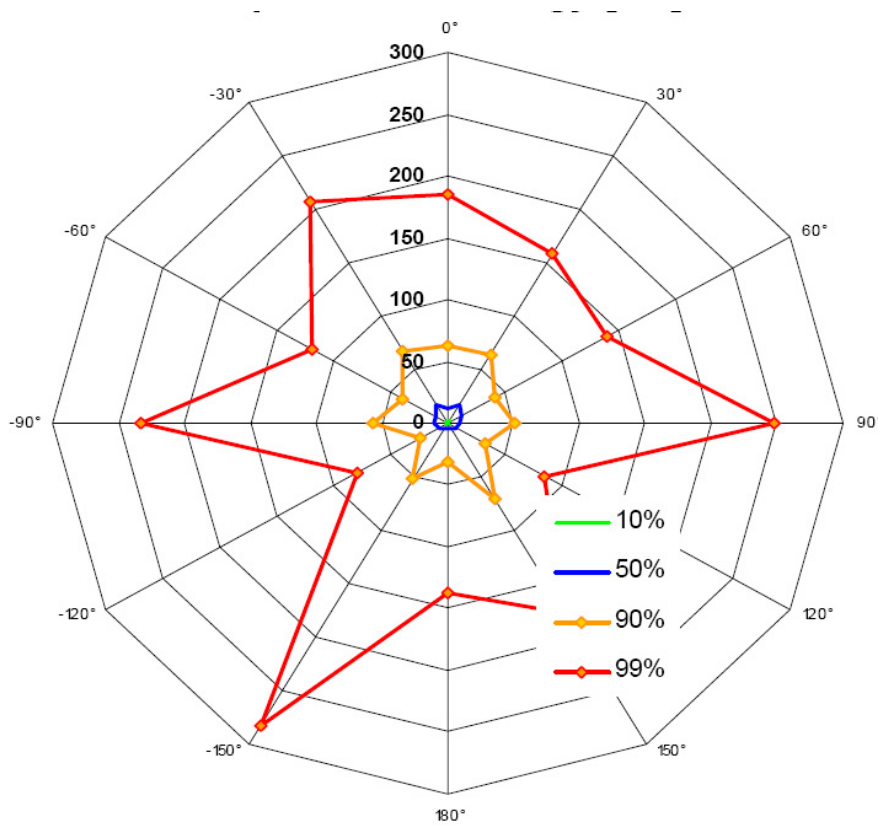


Abbildung 5.10.: Betroffene Bereiche der Energieeinwirkung und deren relative Häufigkeit bei Straßenverkehrsunfällen mit Personenschaden in Deutschland [MS07]

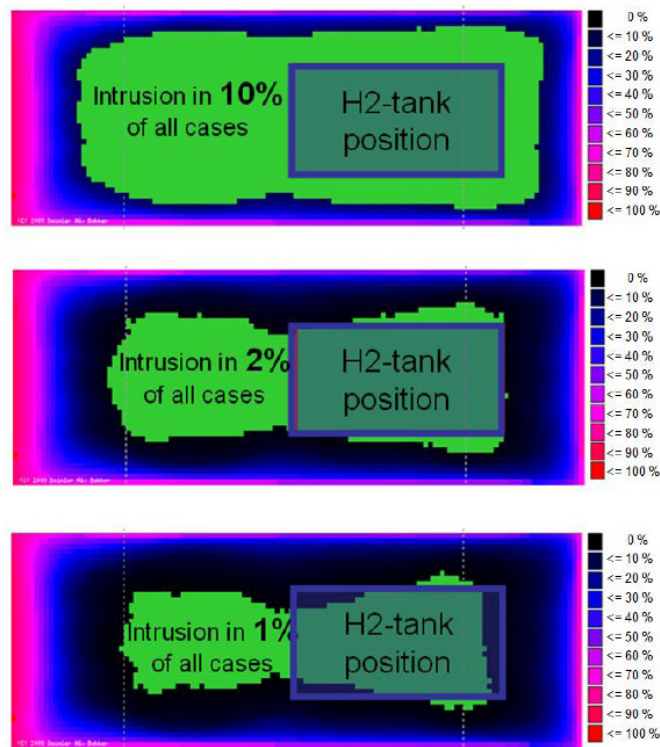


Abbildung 5.11.: Perzentile der Fahrzeugdeformation, die geeignet sind zu einer Druckbehälterschädigung zu führen [SAE11]

1. Die Seiten und (seitlichen) Heckbereiche stellen die durch Deformation infolge eines Unfalls am stärksten belasteten Bereiche eines Fahrzeugs dar. Seiten- und Heckunfälle sind demnach am ehesten geeignet, zu einer Schädigung des Druckbehälters und somit zu dessen Versagen zu führen.
2. Die relative Wahrscheinlichkeit der Druckbehälterschädigung liegt bei einem Prozent bezogen auf die Unfälle mit Personenschaden.

Für die weitere Betrachtung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Straßenverkehrsunfalls, der geeignet ist, zu einer Schädigung des Druckbehälters zu führen, werden ausschließlich Heck- und Seitenunfälle betrachtet. Diese stellen die einzigen Unfallarten dar, deren Eintrittswahrscheinlichkeit der Druckbehälterschädigung abgeschätzt werden kann. Ihnen wird nach oben beschriebenen Angaben eine Wahrscheinlichkeit von 1 % zugeordnet, einen Druckbehälter auf Grund eines Impacts so stark zu beschädigen, dass mit einem spontanen Versagen zu rechnen ist. Dieses Ergebnis bezieht sich laut [SAE11] auf Unfälle mit Personenschaden; da Personenschäden kein ausschließliches Prädikat für die Unfallschwere darstellen, wird in dieser Arbeit die oben genannte Eintrittswahrscheinlichkeit von 1 % ebenfalls auf Unfälle mit schwerwiegendem Sachschaden bezogen. Die Wahrscheinlichkeit der Druckbehälterschädigung durch andere Unfallarten liegt augenscheinlich bei geringeren Werten. Da diese allerdings nicht bestimmt werden können, werden sie bei der weiteren Betrachtung nicht berücksichtigt.

Die Wahrscheinlichkeit der Druckbehälterschädigung durch Brandeinwirkung ist in Anhang A.8 dargestellt.

Die Dichte an erdgasbetriebenen Personenkraftwagen wird in Kapitel 4.2.2 dargestellt. Dieser Einfluss ist zu beachten, da nur Unfälle mit erdgasbetriebenen Personenkraftwagen betrachtet werden; zwar werden auch andere Fahrzeuge mit Erdgas betrieben (insbesondere Busse und Lastkraftwagen), jedoch müssen für diese andere Unfallszenarien betrachtet werden, die den Rahmen dieser Arbeit übersteigen. Die Konsequenzen des Druckbehälterversagens anderer Fahrzeugklassen sind zwar mit den in den Kapiteln 4.1 und 5.1 beschriebenen Konsequenzen identisch, allerdings sind die Voraussetzungen des Eintretens dieser Konsequenzen grundlegend verschieden und werden somit in dieser Arbeit nicht weiter behandelt.

Nach Kapitel 4.2.1 und den Statistiken aus [KB11a; KB11c] waren am 01. Januar 2011 50,184 Mill. Kraftfahrzeuge zugelassen, davon 71.519 erdgasbetriebene Fahrzeuge. Hieraus ergibt sich ein Verhältnis von etwa 0,15 % an CNG-Fahrzeugen. Weiterhin wird unterstellt, dass die Beteiligung an Verkehrsunfällen von CNG-Fahrzeugen dem Verhältnis der Zulassungen entspricht. Die Wahrscheinlichkeit eines Unfalls mit einem erdgasbetriebenen Personenkraftwagen beläuft sich somit auf $1,5 \cdot 10^{-3}$ bezogen auf die Wahrscheinlichkeit eines Straßenverkehrsunfalls, der geeignet ist den Druckbehälter zu schädigen.

Eine weitere Größe, welche die Konsequenzen durch Druckbehälterversagen determiniert, ist das Volumen des verwendeten Druckbehälters. Volumen und Innendruck des Behälters bestimmen im Wesentlichen die Entfernung, bis zu der bestimmte Werte des Spitzenüberdrucks erreicht werden. Dieser Sachverhalt wird in Kapitel 6.2 näher erläutert.

5.2.3. Eintrittswahrscheinlichkeit der relevanten Unfallarten unter Zuhilfenahme der Poisson-Verteilung

Die Darstellung der Wahrscheinlichkeit durch das Bilden von Mittelwerten würde der Komplexität der Wahrscheinlichkeitsrechnung nicht gerecht werden. Vielmehr ist es sinnvoll, Vertrauensintervalle der Eintrittswahrscheinlichkeit zu berechnen, in denen mit einer bestimmten Mindest- und Maximalanzahl von Ereignissen zu rechnen ist. Eine Möglichkeit der Berechnung diskreter Verteilungsfunktionen ist die Binominalverteilung, die jedoch bei hoher Stichprobenanzahl n keine ausreichenden Ergebnisse liefert. Die Poisson-Verteilung eignet sich gut zur Approximation der Binominalverteilung und kann direkt aus dieser hergeleitet werden [MP03]. Der Erwartungswert $E(X)$ entspricht dem Mittelwert μ und ist definiert als

$$E(X) = \mu = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n k_i \quad (5.6)$$

mit k = Anzahl der Ereignisse je Stichprobe n . Die Varianz ergibt sich zu

$$\sigma^2(X) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n k_i^2 \quad (5.7)$$

Die Standardabweichung errechnet sich aus der positiven Quadratwurzel aus $\sigma^2(X)$ [MP03]. Der Mittelwert der Ereignisse μ ergibt sich aus dem Produkt der Höhe der Stichprobe n und der Wahrscheinlichkeit P zu

$$\mu = n \cdot P \quad (5.8)$$

Mit der Gleichung der Poisson-Verteilung

$$P(X = k) = \frac{\mu^k}{k!} \cdot e^{-\mu} \quad (5.9)$$

lässt sich über den Mittelwert μ die Eintrittswahrscheinlichkeit in Bezug auf die Höhe der eintretenden Ereignisse k berechnen und somit für unterschiedliche k die Dichtefunktion darstellen. Das Konfidenzintervall für den Erwartungswert $E(X)$ einer Poisson-Verteilung lässt sich nach [Sac06] folgendermaßen berechnen, hier als 95%-Konfidenzintervall geschrieben:

$$\frac{1}{2} \cdot \chi_{0,975;2\mu}^2 \leq E(X) \leq \frac{1}{2} \cdot \chi_{0,025;2(\mu+1)}^2 \quad (5.10)$$

Zu Grunde gelegt werden hierbei für χ^2 die Quantile der Chi-Quadrat-Verteilung (vgl. [Sac06; Pap11] und Tabelle 5.9).

Aus Kapitel 5.2.2 ergibt sich, dass nur diejenigen Unfallarten zu einer Schädigung des Druckbehälters führen können, die auf den Heck- oder Seitenbereich des Fahrzeugs einwirken. Als Heck- und Seitenunfälle wird das Zusammenstoßen mit einem Fahrzeug angesehen, dass

Tabelle 5.9.: Quantile der Chi-Quadrat-Verteilung [Pap11]

f	p									
	0,005	0,01	0,025	0,05	0,10	0,90	0,95	0,975	0,99	0,995
1	0,000	0,000	0,001	0,004	0,016	2,71	3,84	5,02	6,63	7,88
2	0,01	0,020	0,051	0,103	0,211	4,61	5,99	7,38	9,21	10,60
3	0,07	0,115	0,216	0,352	0,584	6,25	7,81	9,35	11,35	12,84
4	0,21	0,297	0,484	0,711	1,064	7,78	9,49	11,14	13,28	14,86
5	0,41	0,554	0,831	1,15	1,16	9,24	11,07	12,83	15,09	16,75
6	0,68	0,872	1,24	1,64	2,20	10,64	12,59	14,45	16,81	18,55
7	0,99	1,24	1,69	2,17	2,83	12,02	14,06	16,01	18,48	20,28
8	1,34	1,65	2,18	2,73	3,49	13,36	15,51	17,53	20,09	21,96
9	1,73	2,09	2,70	3,33	4,17	14,68	16,92	19,02	21,67	23,59
10	2,16	2,56	3,25	3,94	4,87	15,99	18,31	20,48	23,21	25,19
11	2,60	3,05	3,82	4,57	5,58	17,28	19,67	21,92	24,73	26,76
12	3,07	3,57	4,40	5,23	6,30	18,55	21,03	23,34	26,22	28,30
13	3,57	4,11	5,01	5,89	7,04	19,81	22,36	24,74	27,69	29,82
14	4,07	4,66	5,63	6,57	7,79	21,06	23,68	26,12	29,14	31,32
15	4,60	5,23	6,26	7,26	8,55	22,31	25,00	27,49	30,58	32,80
16	5,14	5,81	6,91	7,96	9,31	23,54	26,30	28,85	32,00	34,27
17	5,70	6,41	7,56	8,67	10,09	24,77	27,59	30,19	33,41	35,72
18	6,26	7,01	8,23	9,39	10,86	25,99	28,87	31,53	34,81	37,16
19	6,84	7,63	8,91	10,12	11,65	27,20	30,14	32,85	36,19	38,58
20	7,43	8,26	9,59	10,85	12,44	28,41	31,41	34,17	37,57	40,00
22	8,6	9,5	11,0	12,3	14,0	30,8	33,9	36,8	40,3	42,8
24	9,9	10,9	12,4	13,8	15,7	33,2	36,4	39,4	43,0	45,6
26	11,2	12,2	13,8	15,4	17,3	35,6	38,9	41,9	45,6	48,3
28	12,5	13,6	15,3	16,9	18,9	37,9	41,3	44,5	48,3	51,0
30	13,8	15,0	16,8	18,5	20,6	40,3	43,8	47,0	50,9	53,7
40	20,7	22,2	24,4	26,5	29,1	51,8	55,8	59,3	63,7	66,8
50	28,0	29,7	32,4	34,8	37,7	63,2	67,5	71,4	76,2	79,5
60	35,5	37,5	40,5	43,2	46,5	74,4	79,1	83,3	88,4	92,0
70	43,3	45,4	48,8	51,7	55,3	85,5	90,5	95,0	100,4	104,2
80	51,2	53,5	57,2	60,4	64,3	96,6	101,9	106,6	112,3	116,3
90	59,2	61,8	65,6	69,1	73,3	107,6	113,1	118,1	124,1	128,3
100	67,3	70,1	74,2	77,9	82,4	118,5	124,3	129,6	135,8	140,2

- anfährt, anhält oder im ruhenden Verkehr steht,
- vorausfährt oder wartet,
- einbiegt oder kreuzt.

Tabelle 5.10 zeigt die absoluten Werte der Heck-, Seiten- und Gesamtunfälle [Ver11b] sowie deren Eintrittswahrscheinlichkeit bezogen auf die Kfz-Dichte (50.184.419 im Jahr 2010 [Kfz11; KB11b]) auf.

In den folgenden Schritten wird das Individuelle Risiko ermittelt, durch die Auswirkungen eines versagenden Druckbehälters infolge eines Straßenverkehrsunfalls betroffen zu sein, wobei die Daten für das Jahr 2010 zu Grunde gelegt werden.

Unfälle auf allen Straßen

In diesem Abschnitt wird für alle Ortslagen das Individuelle Risiko ermittelt, durch die Auswirkungen eines versagenden Druckbehälters infolge eines Straßenverkehrsunfalls betroffen zu sein. Es wird somit nicht zwischen den unterschiedlichen Ortslagen unterschieden, woraus sich das Individuelle Risiko für den gesamten deutschen Straßenverkehrsraum ergibt.

Tabelle 5.10.: Absolutwerte und Eintrittswahrscheinlichkeit (bezogen auf die Bevölkerungsdichte von 81.802.000) von Verkehrsunfällen unter Berücksichtigung der Ortslage für 2010

		Heck- und Seitenunfälle		Alle Unfälle	
innerhalb	Ortschaften	141.749	$1,73 \cdot 10^{-3}$	247.221	$3,02 \cdot 10^{-3}$
außerhalb	Ortschaften	44.644	$5,46 \cdot 10^{-4}$	133.183	$1,63 \cdot 10^{-3}$
Gesamt		186.393	$2,28 \cdot 10^{-3}$	380.404	$4,65 \cdot 10^{-3}$

1) Ermitteln des personenbezogenen Individuellen Risikos

Das personenbezogene Individuelle Risiko, an einer der oben beschriebenen relevanten Unfallarten Heck- und Seitenunfall beteiligt zu sein, beläuft sich bei einer Bevölkerungszahl von 81.802.000 [Bev09; Sta10] auf $2,28 \cdot 10^{-3}$ (vgl. Tabelle 5.10).

2) Ermitteln der Betroffenheit von CNG-Fahrzeugen

Das Verhältnis der Zulassungszahlen von CNG-Fahrzeugen zur Anzahl der Gesamtzulassungen ergibt sich zu 0,15 % (vgl. Kapitel 5.2.2). Bei einer Anzahl von 186.393 relevanten Unfällen (vgl. Tabelle 5.10) ergibt sich somit ein Mittelwert μ der Häufigkeit von etwa 280 CNG-Unfällen pro Jahr. Eine Ermittlung der Konfidenzintervalle der Anzahl an CNG-Unfällen führt auf Grund des hohen Mittelwerts μ von 280 zu keinem befriedigenden Ergebnis. Der Blick in die Statistik zeigt auf, dass sich Unfälle mit Personenschaden überdurchschnittlich in den Monaten Juni bis September ereignen, während sich schwerwiegende Unfälle mit Sachschaden vorwiegend in den Monaten November bis Januar ereignen. Dennoch wird im Folgenden unterstellt, dass sich die Anzahl der relevanten Unfälle gleichmäßig über die 12 Monate des Jahres verteilen. Nach Aufteilung der Unfallzahlen auf die 12 Monate des Jahres kann mittels der Poisson-Verteilung die Wahrscheinlichkeit und die dazugehörige Anzahl an Unfällen je Monat ermittelt werden. Hierzu wird zuerst der Erwartungswert der Unfallzahlen nach Gleichung 5.6 je Monat ermittelt, der von den Werten der einzelnen Monate teilweise stark abweicht. Der Erwartungswert $E(X)$ ergibt sich zu 31.700 Unfälle je Monat mit einer Varianz von 32.339 und einer Standardabweichung von 180 Unfällen je Monat (vgl. Gleichungen 5.7).

Für die Durchführung dieser Arbeit sind allerdings nur die relevanten Unfälle, mit einer Zahl von 186.393 Unfällen pro Jahr, interessant. Da eine Aufteilung der Unfallarten über die Monate nicht vorliegt, können von diesen weder Varianz noch Standardabweichung berechnet werden. 186.393 relevante Unfälle ergeben einen Erwartungswert $E(X)$ von 15.533 Unfällen je Monat (vgl. Gleichung 5.6). Ausgehend von diesem Erwartungswert, der für den betreffenden Fall die Anzahl der Stichproben n darstellt, und der Annahme, dass sich der prozentuale Anteil der CNG-Zulassungsdichte von 0,15 % auch in der Unfallwahrscheinlichkeit widerspiegelt, ergibt sich ein Mittelwert μ nach Gleichung 5.8 von etwa 23 CNG-Unfällen je Monat. Die Dichtefunktion lässt sich nach Gleichung 5.9 berechnen und ist in Abbildung 5.12 dargestellt.

Das 95%-Konfidenzintervall berechnet sich nach Gleichung 5.10 unter Zuhilfenahme von Tabelle 5.9 zu $14,58 \leq E(X) \leq 34,51$ also gerundet etwa $15 \leq E(X) \leq 35$. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % werden je Monat 35 oder weniger Unfälle zu erwarten sein bzw. es liegt eine inverse Wahrscheinlichkeit von 5 % vor, dass mehr als 35 Unfälle je

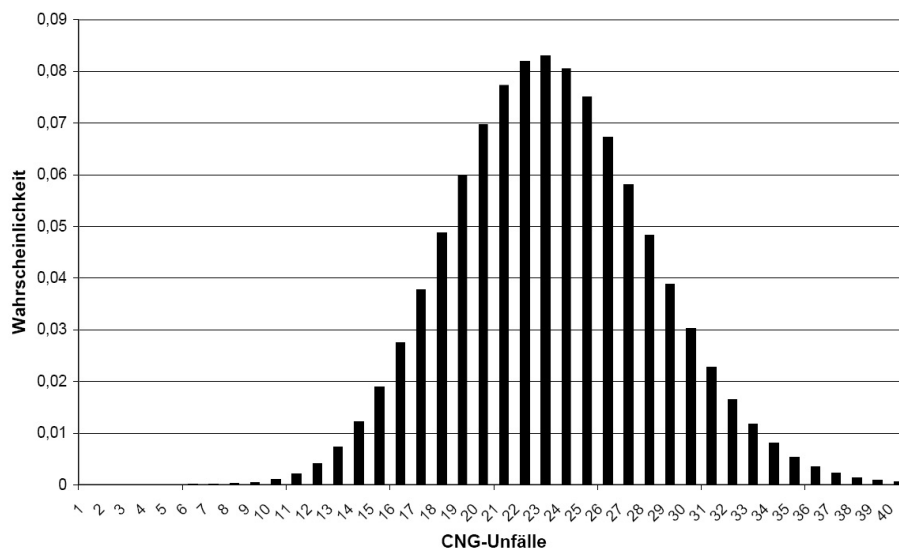


Abbildung 5.12.: Poisson-Verteilung von CNG-Unfällen je Monat für 2010

Monat auftreten. Bei 35 CNG-Unfällen je Monat ergibt sich eine Gesamtanzahl von 420 CNG-Unfällen je Jahr.

3) Ermitteln der Versagenshäufigkeit von CNG-Druckbehältern durch Verkehrsunfälle

Nach [SAE11] wird nur in 1 % der Unfälle der Bereich des Fahrzeugs betroffen sein, in welchem sich der Druckbehälter befindet. Das bedeutet zwar nicht auch gleich ein Versagen des Behälters, dennoch wird dieser Wert hier genutzt, die Wahrscheinlichkeit der Druckbehälterschädigung darzustellen. Mit einer Stichprobe n von 420 CNG-Unfällen und einer Wahrscheinlichkeit der Druckbehälterschädigung P von 1 % ergibt sich nach Gleichung 5.8 ein Mittelwert μ von 4 relevanten Unfällen pro Jahr. Die Dichtefunktion für $k = 1$ bis $k = 15$ Ereignisse wird nach Gleichung 5.9 berechnet und ist in Abbildung 5.13 dargestellt.

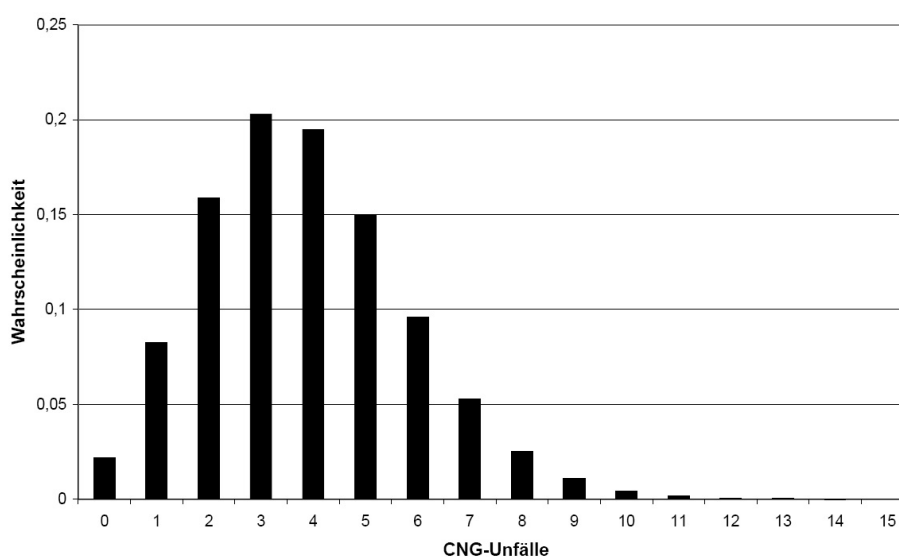


Abbildung 5.13.: Poisson-Verteilung für das Versagen von CNG-Druckbehältern für 2010

Das 95%-Konfidenzintervall berechnet sich nach Gleichung 5.10 unter Zuhilfenahme von Tabelle 5.9 zu $1,09 \leq E(X) \leq 10,24$ also gerundet etwa $1 \leq E(X) \leq 10$. Mit einer

Wahrscheinlichkeit von 95 % werden je Jahr 10 oder weniger Unfälle zu erwarten sein. Somit ergibt sich eine inverse Wahrscheinlichkeit von 5 %, dass mehr als 10 pro Jahr auftreten.

4) Bevölkerungsspezifisches Individuelles Risiko

Bei einer Bevölkerungszahl von 81.802.000 ergibt sich bei 10 zu erwartenden Schadensfällen an CNG-Druckbehältern im Straßenverkehr pro Jahr eine Wahrscheinlichkeit von $1,22 \cdot 10^{-7}$, von dem Ereignis des Behälterversagens betroffen zu sein.

Unfälle auf Straßen innerhalb von Ortschaften

In diesem Abschnitt wird für Straßen innerhalb von Ortschaften das Individuelle Risiko ermittelt, durch die Auswirkungen eines versagenden Druckbehälters infolge eines Straßenverkehrsunfalls betroffen zu sein. Die Unterscheidung von Straßen innerhalb und außerhalb von Ortschaften ist deshalb von Bedeutung, da zum einen unterschiedliche Personendichten vorliegen, welche die Höhe der Konsequenz beeinflussen, und zum anderen grundsätzlich verschiedene Unfallzahlen der beiden betrachteten Bereiche vorliegen.

1) Ermitteln des personenbezogenen Individuellen Risikos

Das personenbezogene Individuelle Risiko, an einer der oben beschriebenen relevanten Unfallarten Heck- und Seitenunfall beteiligt zu sein, beläuft sich bei einer Bevölkerungszahl von 81.802.000 [Bev09; Sta10] und einer Unfallhäufigkeit von 141.749 auf $1,73 \cdot 10^{-3}$ (vgl. Tabelle 5.10).

2) Ermitteln der Betroffenheit von CNG-Fahrzeugen

Das Verhältnis der Zulassungszahlen von CNG-Fahrzeugen zur Anzahl der Gesamtzulassungen ergibt sich zu 0,15 % (vgl. Kapitel 5.2.2). Bei einer Anzahl von 141.749 relevanten Unfällen innerhalb von Ortschaften (vgl. Tabelle 5.10) ergibt sich ein Mittelwert μ der Häufigkeit von etwa 212 CNG-Unfällen pro Jahr. Eine Ermittlung der Konfidenzintervalle der Anzahl an CNG-Unfällen führt, wie schon bei der Ermittlung der Unfälle auf allen Straßen, auf Grund des hohen Mittelwerts μ von 212 zu keinem befriedigenden Ergebnis. In Anlehnung an die Ermittlung der Unfälle auf allen Straßen wird eine gleichmäßige Verteilung der relevanten Unfälle über die 12 Monate des Jahres zu Grunde gelegt. Da eine Aufteilung der Unfallzahlen nach Ortslage über die Monate nicht vorliegt, können an dieser Stelle weder Varianz noch Standardabweichung berechnet werden. Der Erwartungswert $E(X)$ der Unfallhäufigkeit je Monat beträgt 11.812 bei jährlich 141.749 Unfällen. Ausgehend von diesem Erwartungswert, der für den betreffenden Fall die Anzahl der Stichproben n darstellt, und der Annahme, dass sich der prozentuale Anteil der CNG-Zulassungsdichte von 0,15 % auch in deren Unfallwahrscheinlichkeit widerspiegelt, ergibt sich ein Mittelwert μ nach Gleichung 5.8 von etwa 18 CNG-Unfällen je Monat. Berechnung und Darstellung der Dichtefunktion erfolgen analog zur oben beschriebenen Methode.

Das 95%-Konfidenzintervall berechnet sich nach Gleichung 5.10 unter Zuhilfenahme von Tabelle 5.9 zu $10,67 \leq E(X) \leq 29,67$ also gerundet etwa $11 \leq E(X) \leq 30$. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % werden je Monat 30 oder weniger Unfälle innerhalb von Ortschaften erfolgen. Bei 30 CNG-Unfällen je Monat ergibt sich eine Gesamtanzahl von 360 CNG-Unfällen je Jahr.

3) Ermitteln der Versagenhäufigkeit von CNG-Druckbehältern durch Verkehrsunfälle

Nach [SAE11] wird nur in 1 % der Unfälle der Bereich des Fahrzeugs betroffen sein, in welchem sich der Druckbehälter befindet. Das bedeutet zwar nicht gleichsam ein Versagen des Behälters, dennoch wird dieser Wert hier genutzt, die Wahrscheinlichkeit der Druckbehälterschädigung darzustellen. Mit einer Stichprobe n von 360 CNG-Unfällen und einer

Wahrscheinlichkeit der Druckbehälterschädigung P von 1 % ergibt sich nach Gleichung 5.8 ein Mittelwert μ von 4 relevanten Unfällen pro Jahr. Berechnung und Darstellung der Dichtefunktion erfolgen analog zur oben beschriebenen Methode.

Das 95%-Konfidenzintervall berechnet sich nach Gleichung 5.10 unter Zu Hilfenahme von Tabelle 5.9 zu $1,09 \leq E(X) \leq 10,24$ also gerundet etwa $1 \leq E(X) \leq 10$. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % werden je Jahr 10 oder weniger Unfälle zu erwarten sein. Somit ergibt sich eine inverse Wahrscheinlichkeit von 5 %, dass mehr als 10 pro Jahr auftreten.

4) Bevölkerungsspezifisches Individuelles Risiko

Bei einer Bevölkerungszahl von 81.802.000 ergibt sich bei maximal 10 zu erwartenden Schadensfällen an CNG-Druckbehältern im Straßenverkehr pro Jahr eine Wahrscheinlichkeit von $1,22 \cdot 10^{-7}$ von dem Ereignis des Behälterversagens betroffen zu sein.

Unfälle auf Straßen außerhalb von Ortschaften

In diesem Abschnitt wird für Straßen außerhalb von Ortschaften das Individuelle Risiko ermittelt, durch die Auswirkungen eines versagenden Druckbehälters infolge eines Straßenverkehrsunfalls betroffen zu sein. Die Unterscheidung von Straßen innerhalb und außerhalb von Ortschaften ist deshalb von Bedeutung, da zum einen unterschiedliche Personendichten vorliegen, welche die Höhe der Konsequenz beeinflussen und zum anderen grundsätzlich verschiedene Unfallzahlen der beiden betrachteten Bereiche vorliegen.

1) Ermitteln des personenbezogenen Individuellen Risikos

Das personenbezogene Individuelle Risiko, an einer der oben beschriebenen relevanten Unfallarten Heck- und Seitenunfall beteiligt zu sein, beläuft sich bei einer Bevölkerungszahl von 81.802.000 [Bev09; Sta10] und einer Unfallhäufigkeit von 44.644 auf $5,46 \cdot 10^{-4}$ (vgl. Tabelle 5.10).

2) Ermitteln der Betroffenheit von CNG-Fahrzeugen

Das Verhältnis der Zulassungszahlen von CNG-Fahrzeugen zur Anzahl der Gesamtzulassungen ergibt sich zu 0,15 % (vgl. Kapitel 5.2.2). Bei einer Anzahl von 44.644 relevanten Unfällen außerhalb von Ortschaften (vgl. Tabelle 5.10) ergibt sich somit ein Mittelwert μ der Häufigkeit von etwa 67 CNG-Unfällen pro Jahr. Eine Ermittlung der Konfidenzintervalle der Anzahl an CNG-Unfällen führt, wie schon bei der Ermittlung der Unfälle auf allen Straßen und innerhalb von Ortschaften, auf Grund des hohen Mittelwerts μ von 67 zu keinem befriedigenden Ergebnis. In Anlehnung an die Ermittlung der Unfälle auf allen Straßen wird eine gleichmäßige Verteilung der relevanten Unfälle über die 12 Monate des Jahres zu Grunde gelegt. Da eine Aufteilung der Unfallzahlen nach Ortslage über die Monate nicht vorliegt, können an dieser Stelle weder Varianz noch Standardabweichung berechnet werden. Der Erwartungswert $E(X)$ der Unfallhäufigkeit je Monat beträgt 3.720 bei jährlich 44.644 Unfällen. Wie in den beiden oben beschriebenen Fällen stellt auch an dieser Stellen der Erwartungswert $E(X)$ die Anzahl der Stichproben n dar. Unter Annahme der prozentualen CNG-Zulassungsdichte von 0,15 % ergibt sich ein Mittelwert μ nach Gleichung 5.8 von etwa 5 CNG-Unfällen je Monat. Berechnung und Darstellung der Dichtefunktion erfolgen analog zur oben beschriebenen Methode.

Das 95%-Konfidenzintervall berechnet sich nach Gleichung 5.10 unter Zu Hilfenahme von Tabelle 5.9 zu $1,63 \leq E(X) \leq 11,67$ also gerundet etwa $2 \leq E(X) \leq 12$. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % werden je Monat 12 oder weniger Unfälle innerhalb von Ortschaften erfolgen. Bei 12 CNG-Unfällen je Monat ergibt sich eine Gesamtanzahl von 144 CNG-Unfällen je Jahr.

3) Ermitteln der Versagenhäufigkeit von CNG-Druckbehältern durch Verkehrsunfälle
 Nach dem in den vorangegangenen Fällen beschriebenen System ergibt sich mit einer Stichprobe n von 144 CNG-Unfällen und einer Wahrscheinlichkeit der Druckbehälterschädigung P von 1 % nach Gleichung 5.8 ein Mittelwert μ von einem relevanten Unfällen pro Jahr. Für eine bessere Darstellung wird ein Mittelwert μ von 2 angenommen. Berechnung und Darstellung der Dichtefunktion erfolgen analog zur oben beschriebenen Methode.

Das 95%-Konfidenzintervall berechnet sich nach Gleichung 5.10 unter Zu Hilfenahme von Tabelle 5.9 zu $0,24 \leq E(X) \leq 7,23$ also gerundet etwa $0 \leq E(X) \leq 7$. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % werden je Jahr 7 oder weniger Unfälle zu erwarten sein. Somit ergibt sich eine inverse Wahrscheinlichkeit von 5 %, dass mehr als 7 pro Jahr auftreten.

4) Bevölkerungsspezifisches Individuelles Risiko

Bei einer Bevölkerungszahl von 81.802.000 ergibt sich bei maximal 7 zu erwartenden Schadensfällen an CNG-Druckbehältern im Straßenverkehr eine Wahrscheinlichkeit von $8,56 \cdot 10^{-8}$, von dem Ereignis des Behälterversagens betroffen zu sein.

Zusammenfassend lassen sich die Aussagen der Poisson-Verteilung in Tabelle 5.11 darstellen.

Tabelle 5.11.: Konfidenzintervalle der Poisson-Verteilung und bevölkerungsspezifisches Individuelles Risiko bei Unfällen unterschiedlicher Ortslage

	Gesamt	Innerorts	Außerorts
Konfidenzintervall relevanter Unfälle	$15 \leq E(X) \leq 35$	$11 \leq E(X) \leq 30$	$2 \leq E(X) \leq 12$
Konfidenzintervall relevanter Schädigung	$1 \leq E(X) \leq 10$	$1 \leq E(X) \leq 10$	$0 \leq E(X) \leq 7$
Individuelles Risiko	$1,22 \cdot 10^{-7}$	$1,22 \cdot 10^{-7}$	$8,56 \cdot 10^{-8}$

5.3. Einfluss der Personendichte

Die in den vorangegangenen Kapiteln ermittelten Konsequenzen geben das Maß der potentiellen Schädigung durch das Versagen von Druckbehältern an. Um Aussagen über die Höhe des Risikos eines Ereignisses zu erhalten muss die Konsequenz mit der Anzahl der durch die Konsequenz betroffenen Personen verknüpft werden. Erst durch diese Verknüpfung lässt sich zeigen, ob ein Risiko tragbar ist oder ob durch das Risiko untragbare Zustände entstehen. Kapitel 4.3 stellt die Personendichte nach ausgewählten Szenarien dar.

Aufgrund der vielseitigen Auswahl an Möglichkeiten der Abschätzung der Personendichte nach Bebauungsstruktur und Tätigkeitsfeldern wird an dieser Stelle die Methode der Abschätzung nach [CPR92] übernommen (vgl. Tabelle 5.12). Die hohen Werte der Personendichte einzelner Stadtteile können im Einzelfall angewandt werden, eignen sich jedoch nicht zur allgemeinen Darstellung von Personendichten nach Bebauungsgebieten. Ebenfalls nach [CPR92] wird tagsüber mit einer Anwesenheit von 80 % der Personen innerhalb von Wohngebäuden gerechnet, nachts mit 95 %. Die Anwesenheitswerte für Personen im Handel und Dienstleistungen orientieren sich an den Öffnungszeiten und können auf die Tagesstunden (6.00 bis 22.00 Uhr) beschränkt werden. Die Anwesenheit von Personen in Industriegebieten richtet sich nach der Art der Industrie und somit nach möglichen Schichtdiensten. Campingplätze sind vergleichbar mit Wohngebieten zu behandeln, die Anwesenheit von Personen an touristischen Orten richtet sich nach der Art der Attraktion und deren Öffnungszeiten. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit findet die prozentuale Aufteilung der Personendichte nach Tageszeiten keine Anwendung. Für die Risikobetrachtung wird eine vollständige Anwesenheit nach Tabelle 5.12 unterstellt.

Eine allgemeingültige Aussage zur Höhe des Risikos über die Personendichte lässt sich darüber nicht erreichen. Vielmehr müssen die Konsequenzen eines Straßenverkehrsunfalls im Einzelfall bezogen werden auf den Ort des Unfalls und somit auf die statistisch ermittelte Anzahl an betroffenen Personen. Dieser Schritt der Risikoanalyse wird in Kapitel 7 an Hand ausgewählter Szenarien beschrieben.

Tabelle 5.12.: Personendichte nach Wohngebietstypen und Tätigkeitsfelder [CPR92]

Wohngebietstyp		Personendichte (Pers./km ²)
Wohngebiet	Naturschutzgebiet	0
	Wohngegend	100
	Gelegentliche Wohnbebauung	500
	Ruhige Wohngegend	2.500
	Belebte Wohngegend	7.000
	Stadtzentrum	12.000
Handel und Dienstleistungen	Öffentliche Versorgungsbetriebe	600
	Bauindustrie und Montagegewerbe	7.500
	Handel	4.000
	Hotel- und Restaurantwesen	800
	Transport- und Lagergewerbe	1.500
	Banken- und Versicherungswesen, Dienstleistungsgewerbe	8.000
	Übrige Dienstleistungen (Bildungswesen, Gesundheitswesen)	3.500
Industriegebiet	Personendichte gering	500
	Personendichte mittel	4.000
	Personendichte hoch	8.000
Erholungsgebiet(nur während des Sommers)	Campingplatz	13.000
	Touristische Orte	20.000

6. Entwicklung von Methoden zur Bestimmung des Risikos

6.1. Entwicklung eines Software-Prototypen

Das vorangegangene Kapitel 5 erläutert die Grundbedingungen der Entwicklung einer neuen Methodik der Risikobewertung. Die dort gewonnenen Erkenntnisse werden in diesem Kapitel, unter Zuhilfenahme des Modells des TNT-Massenäquivalents (vgl. Kapitel 4.1.2), zu einem für diese Arbeit neu entwickelten Software-Prototypen zusammengefasst.

Das Modell des TNT-Massenäquivalents ist eine Maßeinheit, mit der die Auswirkung eines explosiven Stoffs mit der Wirkung des Sprengstoffes Trinitrotoluol verglichen wird [KKL09]. Es wurde auf Grund von semi-empirischen Formeln entwickelt und beschreibt die wichtigsten Kenngrößen des Überdruck-Zeit-Verlaufs der freien Luftstoßwelle [GD06].

Den ersten Schritt der Berechnung stellt die Ermittlung der äquivalente Masse an TNT dar. Diese Berechnung erfolgt im Modell getrennt für den reinen Druckbehälterzerknall und das Druckbehälterbersten mit anschließender chemischer Reaktion. Die äquivalente Masse an TNT m_{TNT} für den reinen Druckbehälterzerknall errechnet sich aus

$$m_{TNT} = 0,025 \cdot p_{Druck} \cdot V_{Beh} \quad (6.1)$$

mit p_{Druck} = Innendruck des Behälters [bar] und V_{Beh} = Volumen des Behälters [m³]. Die äquivalente Masse an TNT m_{TNT} für ein Druckbehälterbersten mit anschließender chemischer Reaktion errechnet sich aus

$$m_{TNT} = m_{Brenngas} \cdot \eta \cdot \frac{\Delta h_c(Brenngas)}{\Delta h_c(TNT)} \quad (6.2)$$

mit Δh_c = spezifische Verbrennungsenthalpie [J/kg] und η = Wirkfaktor [-]. Die Masse des Brenngases m berechnet sich für Standardbedingungen zu

$$m_{Brenngas} = \rho_{Brenngas} \cdot V_{Brenngas} \quad (6.3)$$

und bei Betriebsdruck für unter Druck gespeicherte Gase zu

$$m_{Brenngas} = \rho_{Brenngas} \cdot V_{Brenngas} \cdot P_{Betrieb} \quad (6.4)$$

mit ρ = Dichte [kg/m³], V = Volumen [m³] und P = Druck [bar].

Die spezifische Verbrennungsenthalpie von TNT beträgt $\Delta h_c(TNT) = 4500 \text{ kJ/kg}$. Der Wirkfaktor η berücksichtigt den Anteil des brennbaren Stoffes, der an dem Verbrennungsvorgang teilnimmt, da in der Regel nicht der gesamte Anteil der Masse an der Verbrennung beteiligt ist. Nach [KRS⁺00] werden in Tabelle 6.1 Werte für Wirkfaktoren verschiedener Stoffe angegeben. In Fällen, in dem der Wirkfaktor unbekannt ist, kann mit einem Mittelwert von $\eta = 0,05$ gerechnet werden [KRS⁺00]. Dieser Wert deckt sich mit dem Wert für reine Kohlenwasserstoffe nach [Som98], der in Tabelle 6.2 dargestellt ist. Da es sich bei dem zur Speicherung als Kraftstoff komprimierten Gases um Erdgas, und somit hauptsächlich um Methan handelt, kann der Wert des Wirkfaktors von $\eta = 0,05$ als angemessen angesehen werden.

Tabelle 6.1.: Wirkfaktoren verschiedener brennbarer Stoffe [KRS⁺00]

$\eta = 0,003$	$\eta = 0,006$	$\eta = 0,19$
Aceton	Cyclohexan	Acetylen
Butadien	Ethylen	Ethylenoxid
Propan	Propylenoxid	Hydrazin

Tabelle 6.2.: Wirkfaktoren verschiedener brennbarer Stoffe [Som98]

Stoff	Wirkfaktor η
reine Kohlenwasserstoffe	0,05
halogenierte Kohlenwasserstoffe	0,08
Kohlenwasserstoffe mit gebundenen Sauerstoff	0,15
Wasserstoff	0,25

Mit der äquivalenten Masse an TNT m_{TNT} berechnet sich in nächsten Schritt der skalierte Abstand über den Abstand vom Mittelpunkt der Detonationsquelle a :

$$z = \frac{\frac{a}{1m}}{\sqrt[3]{\frac{m_{TNT}}{1kg}}} \quad (6.5)$$

Über den skalierten Abstand z [-] vom Mittelpunkt der Detonationsquelle wird im nächsten Schritt der Spitzenüberdruck p_{S0} in Abhängigkeit von der Entfernung zur Expositionsquelle nach folgender Gleichung berechnet

$$p_{S0} = p_0 \frac{808[1 + (\frac{z}{4,5})^2]}{\sqrt{1 + (\frac{z}{0,048})^2} \sqrt{1 + (\frac{z}{0,32})^2} \sqrt{1 + (\frac{z}{1,35})^2}} \quad (6.6)$$

Hierbei ist p_0 der Umgebungsluftdruck von 1,01325 bar.

Ziel des Software-Prototypen ist es, die Radien der Risiko-Zonen zu berechnen, bis zu denen vorgegebene Werte des Spitzenüberdrucks, in Abhängigkeit von Druckbehältervolumen und -innendruck, erreicht werden. Sinnvoll wäre es demnach die Gleichungen 6.6 und 6.5 nach dem Radius um zu stellen, um so unter Vorgabe von Behälterinnendruck und

-volumen sowie dem gesuchten Spitzenüberdruck den erreichten Abstand von der Detonationsquelle zu erhalten, bis zu dem diese Werte erfüllt werden. Die Formeln des Modells der TNT-Massenäquivalenz basieren auf semi-empirischen Methoden; ein Umformen der Gleichung 6.6 nach dem skalierten Abstand z ergibt bereits eine Gleichung ohne eindeutige Zuordbarkeit des skalierten Abstands. Einsetzen von Gleichung 6.5 und Auflösen nach dem tatsächlich Radius verkompliziert die Gleichung nochmals, so dass keine eindeutige Beziehung vom tatsächlichen Radius zu den Faktoren Behälterinnendruck, -volumen und Spitzenüberdruck hergestellt werden kann.

Im Software-Prototypen werden die Spitzenüberdrücke in Abhängigkeit von der Entfernung rund um die Expositionsquelle berechnet. Diese Radien decken in Schritten von einem Millimeter den Bereich 0 m bis 1000 m ab. Die Werte des Spitzenüberdrucks der jeweiligen Risiko-Zonen (vgl. Tabelle 5.6) können somit exakten Werten der dazugehörigen Radien zugeordnet werden. Diese Radien determinieren den Bereich der Risiko-Zonen, in denen unterschiedliche Fatalitätswahrscheinlichkeiten der anwesenden Personen existieren (vgl. Kapitel 5.1.2).

Aus den Werten der Radien lassen sich die absoluten Flächen [m²] der Risiko-Zonen berechnen:

$$A(RZ_n)_{\text{absolut}} = \pi \cdot r_n^2 \quad (6.7)$$

Unter Berücksichtigung der jeweils innen liegenden Risiko-Zonen ergibt sich die durch die Druckeinwirkung beaufschlagte Fläche [m²] der Risiko-Zone zu

$$A(RZ_n) = A(RZ_n)_{\text{absolut}} - A(RZ_{n-1})_{\text{absolut}} \quad (6.8)$$

Wird in einem weiteren Schritt der beaufschlagten Fläche $A(RZ_n)$ [m²] der Risiko-Zone die Personendichte ϕ , je nach Ortslage und Tätigkeitsfeld (vgl. Tabelle 5.12), in Personen je km² zugeordnet, so ergibt sich nach folgender Formel die Anzahl der innerhalb der betrachteten Risiko-Zonen anwesenden Personen

$$\varphi(RZ_n) = \frac{\phi}{10^6 \cdot A(RZ_n)} \quad (6.9)$$

Kapitel 5.1.2 zeigte auf, dass innerhalb der Risiko-Zonen unterschiedliche Fatalitätswahrscheinlichkeiten der anwesenden Personen vorliegen. Die Anzahl der durch ein Ereignis betroffenen Personen unterscheidet sich demnach von der Anzahl anwesender Personen auf Grund dieser Fatalitätswahrscheinlichkeit. Beispielsweise beträgt die Fatalitätswahrscheinlichkeit in Risiko-Zone RZ₃ 40 %. Bei 20 in Risiko-Zone RZ₃ anwesenden Personen wären durch ein Ereignis 8 Personen von dem Ereignis betroffen. Die Anzahl der durch ein Ereignis je Risiko-Zone betroffenen Personen je Risiko-Zone $\psi(RZ_n)$ berechnet sich unter zu Hilfenahme der Fatalitätswahrscheinlichkeit der jeweiligen Risiko-Zonen nach Tabelle 5.12 zu

$$\psi(RZ_n) = \varphi(RZ_n) \cdot P_{\text{Fatal}}(RZ_n) \quad (6.10)$$

Die Addition der Anzahl betroffener Personen je Risiko-Zone $\psi(RZ_n)$ führt zur Gesamtzahl der durch ein Ereignis betroffenen Personen ψ .

Ein Problem der Berechnung der betroffenen Personen ψ liegt in einer Ungenauigkeit, die als Problem der kleinen Zahlen beschrieben werden kann. Selbst bei großen Werten der Personendichte ergeben sich rechnerisch so geringe Flächen der Risiko-Zonen, dass die Zahl der anwesenden Personen $\varphi(RZ_n)$, ganz zu schweigen von der Zahl der betroffenen Personen ψ , im unteren Dezimalbereich liegt. Mit dieser Methode lässt sich somit eine geringfügige berechnete Konsequenz nachweisen, reale Schadensfälle lassen sich hiermit allerdings nur abschätzen. Das Problem dieser Methode liegt vornehmlich in der Tatsache begründet, dass der Personendichte eine Normalverteilung unterstellt wird. Im Realfall werden sich die Personen innerhalb eines Gebiets jedoch nicht normal verteilen, sondern Schwerpunkte erhöhter Personendichte bilden. Diese Tatsache sowie eine Vielzahl an Einzelfallentscheidungen, wie

- erhöhtes oder geringes Aufkommen an Glasscheiben, die durch die Druckwellenfront zerstört werden können,
- Abstand der Personen zu Glasscheiben,
- direkte Konsequenzen des primären Trümmerflugs,
- Schutzeinrichtungen,
- Geometrie der betroffenen Fläche (die Druckwellenfront kann im Nahbereich der Explosion durch Bauwerke, usw. absorbiert werden, so dass darauf folgende Bereiche keiner Exposition mehr ausgesetzt sind),
- Widerstandsfähigkeit der einzelnen Personen

erschweren eine allgemeingültige Darstellung der Risikobewertung durch Druckbehälterversagen. Ungeachtet dieser Problematik lässt sich mit dieser Methode jedoch eine Tendenz aufzeigen, in wie weit mit Personenschäden durch Druckbehälterversagen zu rechnen ist.

Grundsätzlich können mit der Methodik des in dieser Arbeit entwickelten Software-Prototypen, unter Berücksichtigung der Eingangsparameter, die Konsequenzen des Druckbehälterversagens numerisch dargestellt werden. In Kombination mit der Eintrittswahrscheinlichkeit der zu den betrachteten Konsequenzen führenden Ereignisse ermöglicht der Software-Prototyp eine Bewertung des Risikos der Technologie Druckbehälter im Fahrzeugbau.

Ein Vergleich des Modells des TNT-Äquivalents mit einem durchgeführten Versuch ist in Anhang A.4 beschrieben. Für eine Validierung des Modells müsste allerdings eine belastbare Anzahl an Versuchen durchgeführt werden.

6.2. Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung der Streubreite der Konsequenzen

Im vorangegangenen Kapitel 6.1 wird die Methodik beschrieben, mit deren Hilfe sich die Konsequenzen des Druckbehälterversagens darstellen lassen. Da im Straßenverkehr Fahrzeuge mit Druckbehältern unterschiedlicher Volumina zugelassen sind, ergibt sich die Notwendigkeit der Betrachtung und Eingrenzung der im Betrieb befindlichen Druckbehälter.

Aus einer unveröffentlichten Statistik des Kraftfahrt-Bundesamts [KB10] gehen die absoluten Zahlen der jeweiligen Modelle erdgasbetriebener Personenkraftwagen hervor. Tabelle 4.7 zeigt die Top-Vier der unterschiedlichen Modelle erdgasbetriebener Personenkraftwagen mit ihren absoluten Werten und ihren relativen Werten bezogen auf die Anzahl von 68.515 zugelassenen CNG-Fahrzeugen im Jahr 2010.

Aus den Datenblättern der Hersteller ist in den meisten Fällen nur die Masse an Erdgas zu entnehmen, die in den Druckbehältern des Fahrzeugs gespeichert werden kann. Mittels des allgemeinen Gasgesetzes $p \cdot V = n \cdot R_m \cdot T$ kann der Bezug von Masse zu Volumen dargestellt werden. Unter der Annahme, dass $n =$ Teilchenzahl, $R_m =$ allgemeine Gaskonstante und Temperatur T einen konstanten Wert einnehmen, muss ebenfalls das Produkt $p \cdot V$ konstant sein, also $p \cdot V$ bei 1,013 bar Standardbedingung, dem Wert von $p \cdot V$ bei 200 bar Speicherung im Druckbehälter entsprechen:

$$p_{Standard} \cdot V_{Standard} = p_{gesucht} \cdot V_{gesucht} \quad (6.11)$$

$$V_{gesucht} = V_{Standard} \cdot \frac{p_{Standard}}{p_{gesucht}} \quad (6.12)$$

mit $p =$ Druck [bar] und $V =$ Volumen [m^3].

Unter Berücksichtigung des Bezugs Volumen zu Masse und Dichte $V = \frac{m}{\rho}$ kann das Volumen des Druckbehälters folgendermaßen berechnet werden:

$$V_{gesucht} = \frac{m_{Standard}(Gas)}{\rho_{Standard}(Gas)} \cdot \frac{p_{Standard}}{p_{gesucht}} \quad (6.13)$$

mit $m =$ Masse [kg] und $\rho =$ Dichte [kg/m^3].

Erdgas weist nach [DIN08] eine Dichte von $0,72 - 0,91 \text{ kg}/\text{m}^3$ auf, wobei die Dichte mit Zunahme der Qualität des Gases, von L- nach H-Gas, sinkt. Aus Tabelle 4.7 wird deutlich, dass die vier gebräuchlichsten Personenkraftwagen mit Erdgasantrieb zusammen auf einen Marktanteil von 56,4 % kommen. Diese Modelle werden dafür herangezogen, den Rahmen der betrachteten Volumina von Druckbehältern im Fahrzeugbau abzustecken. Unter der Annahme einer mittleren Dichte von $0,81 \text{ kg}/\text{m}^3$ ergeben sich für die vier in Kapitel 4.2.2 genannten Modelle folgende Volumina der Druckbehälter.

Opel Zafira

Nach [OSV10] sind im Opel Zafira vier Druckbehälter Unterflur verbaut, davon jeweils zwei vor und hinter der Hinterachse. Die Daten der Druckbehälter sind in Tabelle 6.3 wiedergeben.

Tabelle 6.3.: Daten der Druckbehälter im Opel Zafira

	Liter	Länge	Durchmesser	Wandstärke
in Fahrtrichtung vorne 1	32	965	228	4,4
in Fahrtrichtung vorne 2	29,5	900	228	4,4
in Fahrtrichtung hinten 1	29,5	820	244	4,8
in Fahrtrichtung hinten 2	31,5	860	244	4,8

Der durch Unfälle am wahrscheinlichsten betroffene Druckbehälter in Fahrtrichtung hinten 2 weist somit ein Volumen von 31,5 Litern auf. Um die Berechnung einfach zu gestalten und ein eventuelles Übertanken des Druckbehälters zu berücksichtigen, wird im Folgenden der Wert des Volumens für dieses Fahrzeug mit 35 Litern angesetzt. Abbildung 6.1 zeigt die Anbringung der Druckbehälter Unterflur bei einem Zafira 1.6 CNG ecoFLEX.

VW Caddy

Der VW Caddy weist nach [EM12] ein Tankvolumen von 26 kg Erdgas auf. Nach Gleichung 6.13 ergibt sich daraus ein Gesamtvolumen der Druckbehälter von 160 Litern. Abbildung 6.1 zeigt die Anbringung der Druckbehälter im Fahrzeug und dass es sich hier ebenfalls um vier annähernd gleich große Druckbehälter handelt. Es kann somit unterstellt werden, dass kein Druckbehälter wesentlich größer als 40 Liter ausfällt.

VW Touran

Der VW Touran weist nach [EM12] ein Tankvolumen von 18 bis 26 kg Erdgas und somit nach Gleichung 6.13 von 110 bis 160 Litern auf. Über die Anzahl der Druckbehälter kann an dieser Stelle nur spekuliert werden, da weder Angaben noch Bilder vorhanden sind. Da die Tankart in den Ausführungen in [erd12a] als Unterflur beschrieben wird, ist von mindestens zwei Druckbehältern auszugehen. Es kann somit unterstellt werden, dass kein Druckbehälter größer als 60 bis 80 Liter ausfällt.

Opel Combo

Nach [OSV10] sind im Opel Combo drei Druckbehälter Unterflur verbaut, davon einer vor und zwei hinter der Hinterachse. Die Daten der Druckbehälter sind in Tabelle 6.4 wiedergegeben. Der durch Unfälle am wahrscheinlichsten betroffene Druckbehälter in Fahrtrichtung hinten 2 weist somit ein Volumen von 45 Litern auf. Abbildung 6.1 zeigt die Unterfluranbringung der drei Druckbehälter beim Opel Combo.

Tabelle 6.4.: Daten der Druckbehälter im Opel Combo

	Liter	Länge	Durchmesser	Wandstärke
in Fahrtrichtung vorne	34,5	925	244	4,8
in Fahrtrichtung hinten 1	29	650	276	5,4
in Fahrtrichtung hinten 2	45	920	276	5,4



Abbildung 6.1.: Anbringung der Druckbehälter bei Opel Zafira, VW Caddy und Opel Combo [erd12a]

Auffallend ist die Ähnlichkeit der Volumina beim VW Caddy und Opel Combo, so dass diese in eine Kategorie, nämlich Druckbehältervolumen bis 45 Liter, gefasst werden können. Internetrecherchen zeigten beim Fiat Punto nur einen einzelnen Druckbehälter mit einem

Volumen von etwa 80 Litern [EM12; erd12b], was sich mit der oberen Annahme des VW Touran deckt. Durch diese Darstellungen lassen sich nun der obere und untere Grenzwert für die Volumen von Druckbehältern in Personenkraftwagen formulieren:

- unterer Grenzwert des Druckbehältervolumens nach Opel Zafira: 35 Liter
- oberer Grenzwert des Druckbehältervolumens nach VW Touran und Fiat Punto: 80 Liter.

Für die zwischen diesen Grenzwerten liegenden Volumina können

- 45 Liter Druckbehältervolumen nach VW Caddy und Opel Combo sowie
- 60 Liter Druckbehältervolumen nach VW Touran

angesetzt werden.

Nach [Cra26] lässt sich, für gleiche Sprengstoffe, das Verhältnis von Entfernung von der Ausbreitungsquelle bei gleicher Stoßwellenstärke zur Masse des Sprengstoffs durch folgende Gleichung darstellen:

$$\frac{r_2}{r_1} = \sqrt[3]{\frac{m_2}{m_1}} \quad (6.14)$$

Mit r = Radius [m] und m = Masse [kg]. Das bedeutet, die Entfernung von der Ereignisquelle, hier das Druckbehälterbersten, nimmt mit der dritten Wurzel der Masse respektive des Druckbehältervolumens und -innendrucks zu. Die Masse eines Stoffes ergibt sich aus dem Produkt seiner Dichte ρ und seines Volumens V . Die Dichte eines Stoffes wird darüber hinaus durch äußere Einflüsse, wie Temperatur oder Druck, determiniert. Ein kompressibler Stoff weist, bei konstantem Volumen und Temperatur, bei Änderung des Drucks eine Dichteänderung auf, die dem Verhältnis der Druckänderung entspricht. Bezogen auf einen atmosphärischen Druck von etwa einem bar (genauer Wert: 1013,25 mbar) entspricht die Dichteänderung somit dem Faktor der absoluten Druckänderung. Unter Annahme konstanter Temperatur lässt sich Gleichung 6.14 umschreiben zu

$$\frac{r_2}{r_1} = \sqrt[3]{\frac{\rho_2 \cdot V_2}{\rho_1 \cdot V_1}} \quad (6.15)$$

Werden nun ein Druckbehältervolumen sowie seine nach Kapitel 6.1 berechneten Werte von Druck und Radius der jeweiligen Risiko-Zonen als Standard gesetzt, so lassen sich die Radien der Risiko-Zonen für Druckbehälter gleichen Drucks bei unterschiedlichen Volumina über die folgende Gleichung korrelieren:

$$r_2 = r_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_2 \cdot V_2}{\rho_1 \cdot V_1}} \quad (6.16)$$

Je größer das Volumen eines Druckbehälter ausfällt, umso stärker sind die resultierenden Konsequenzen. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass bei der Berechnung des Spitzenüberdrucks mit dem Modell des TNT-Massenäquivalents der im Inneren des Druckbehälters gespeicherte Überdruck die Reichweiten des Spitzenüberdrucks ebenfalls mit bestimmt. Ein zur Hälfte gefüllter Druckbehälter des Volumens 100 Liter wird demnach

geringere Spitzenüberdrücke bei gleichen Entfernungen aufweisen, als ein voller Druckbehälter des Volumens 50 Liter. Dennoch lässt sich hier folgende Kernaussage formulieren: Die maximal erreichbare Höhe des Spitzenüberdrucks in einer bestimmten Entfernung von der Expositionsquelle wird sowohl durch das Volumen des Druckbehälters als auch durch die Höhe des Behälterinnendruckes bestimmt. Diese beiden Faktoren bestimmen die im Druckbehälter gespeicherte Energiemenge. Beim Behälterbersten mit anschließender chemischer Reaktion bestimmen Volumen und Innendruck die Masse des zur Verfügung stehenden Brennstoffs und somit ebenfalls die Reichweite der Konsequenzen. Die Größe des Druckbehältervolumens hat somit entscheidenden Einfluss auf die maximal möglichen Konsequenzen eines Druckbehälterberstens.

Wie oben dargestellt, liegt die Streubreite der im Straßenverkehr eingesetzten Druckbehälter bei einem Volumen von 35 bis 80 Litern. Für die Berechnung des Radius der Risiko-Zonen mit Hilfe des in Kapitel 6.1 beschriebenen Software-Prototypen wird ein CNG-Druckbehälter bei Betriebstemperatur mit einem Innendruck von 200 bar und einem Volumen von 35 Litern zu Grunde gelegt. Durch adiabatische Vorgänge bei der Betankung des Druckbehälters kann es zu einer Zunahme der Temperatur und somit zu einem Behälterinnendruck von bis zu 260 bar kommen. Dieser Sonderfall wird im Weiteren nicht beachtet. Nach dem in Kapitel 6.1 beschriebenen Vorgehen ergeben sich somit Werte der Radien der Risiko-Zonen im Abstand um die Expositionsquelle des versagenden Druckbehälters (vgl. Tabelle 6.5). Werden diese Werte nach Gleichung 6.16 auf einen Druckbehälter des Volumens 80 Liter bezogen, so ergeben sich die in Tabelle 6.6 dargestellten Werte der zu den Risiko-Zonen gehörenden Radien.

Tabelle 6.5.: Radien der Risiko-Zone für einen als Standard definierten 35-Liter-Druckbehälter bei 200 bar

Risiko-Zone	Konsequenzen des reinen Überdrucks		Konsequenzen des Trümmerflugs im Freien		Konsequenzen des Trümmerflugs in Gebäuden	
	p (bar)	r (m)	p (bar)	r (m)	p (bar)	r (m)
RZ 1	3,31	0,92	0,70	1,80	0,70	1,80
RZ 2	2,70	1,00	0,50	2,12	0,37	2,47
RZ 3	2,46	1,04	0,41	2,34	0,24	3,12
RZ 4	2,21	1,09	0,33	2,62	0,11	5,20
RZ 5	2,09	1,12	0,29	2,81	0,04	12,20

Aus diesem Kapitel ergeben sich zwei Kernaussagen:

1. Je größer das Volumen des Druckbehälters, desto größere Radien der Risiko-Zonen werden im Versagensfall erreicht (vgl. Abbildung 6.2). CNG-Fahrzeuge mit mehreren kleinen Druckbehältern weisen somit ein geringeres Konsequenzpotential auf, als solche mit wenigen Druckbehältern großen Volumens.
2. Die Vorgabe eines Standardvolumens des Druckbehälters und der bei diesem Volumen erreichten Radien der Risiko-Zonen ermöglicht über Gleichung 6.16 die Herleitung der Konsequenzradien der Risiko-Zonen von Druckbehältern anderer Volumina. Auf diese Weise lassen sich die Radien der Risiko-Zonen schnell und unkompliziert

berechnen, ohne dabei auf die langen Formelreihen des Software-Prototypen aus Kapitel 6.1 zurückgreifen zu müssen.

Tabelle 6.6.: Radien der Risiko-Zone für einen 80-Liter-Druckbehälter bei 200 bar

Risiko-Zone	Konsequenzen des reinen Überdrucks		Konsequenzen des Trümmerflugs im Freien		Konsequenzen des Trümmerflugs in Gebäuden	
	p (bar)	r (m)	p (bar)	r (m)	p (bar)	r (m)
RZ 1	3,31	1,21	0,70	2,37	0,70	2,37
RZ 2	2,70	1,32	0,50	2,79	0,37	3,25
RZ 3	2,46	1,37	0,41	3,08	0,24	4,11
RZ 4	2,21	1,44	0,33	3,45	0,11	6,85
RZ 5	2,09	1,48	0,29	3,70	0,04	16,07

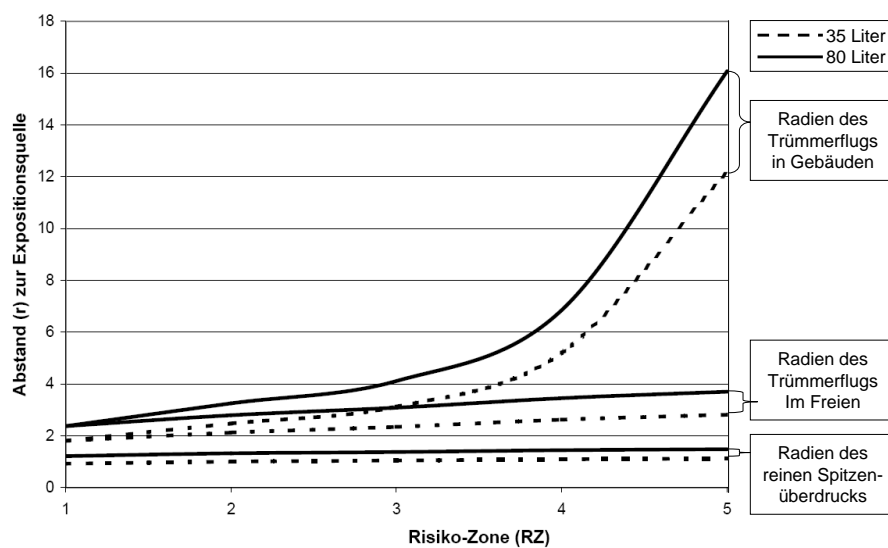


Abbildung 6.2.: Vergleich der Radien der Risiko-Zonen von Druckbehältern der Volumina 35 bis 80 Liter

6.3. Parameterstudie zur Korrelation der Konsequenzen über das Behältervolumen und den Behälterinnendruck

Die von einem Druckbehälter ausgehenden Konsequenzen werden, bei Druckbehälterbersten ohne anschließende chemische Reaktion, durch die Faktoren Behälterinnendruck und -volumen begrenzt (vgl. Kapitel 6.1). Dieses Kapitel zeigt die Korrelationen dieser beiden

Faktoren bei identischen Auswirkungen und somit Konsequenzen auf. Es wird das Verhältnis von Druck- oder Volumenänderung zur dadurch bedingten Änderung der Radien der Risiko-Zonen sowie der betroffenen Flächen und somit letztlich die Höhe der Konsequenz dargestellt.

Der Betriebsdruck von Druckbehältern beträgt 200 bar. Nach nationalen und internationalen Regelwerken (vgl. unter anderem [DIN01a; ECE08]) wird ein Prüfdruck von mindestens dem 1,5-fachen des Betriebsdrucks, also 300 bar, und ein berechneter Mindest-Berstdruck von 450 bar gefordert. Der tatsächliche Berstdruck muss mindestens den Anforderungen des berechneten Mindest-Berstdrucks genügen. Abweichend von der Nutzung von Erdgas als Kraftstoff kann ebenso Wasserstoff als gasförmiger Kraftstoff genutzt werden. Die Speicherung von Wasserstoff kann unter Druck oder als Flüssiggas erfolgen [SFK02; SS04]. Bei der Druckspeicherung von Wasserstoff werden Betriebsdrücke von bis zu 700 bar erzielt, was als Obergrenze des Parameters Druck angesehen werden kann.

Aus den kleinsten und größten für den Fahrzeugbau benutzten Druckbehältern (vgl. Kapitel 6.2) ergeben sich die ersten beiden Parameter des Volumens mit 35 und 80 Litern. Druckbehältervolumen von 165 Litern werden vorzugsweise zur Speicherung von Erdgas als Kraftstoff bei Bussen und Lastkraftwagen eingesetzt [MCS11]. Nach [SS04] werden zum Transport von unter Druck gespeichertem Wasserstoff entweder Flaschenbündel oder Röhrentrailer eingesetzt, wobei die Druckbehälter der Flaschenbündel nach [MCS11] ebenfalls ein Volumen von 165 Litern aufweisen. Die Druckbehälter der Röhrentrailer, sowohl für Erdgas als auch für Wasserstoff, weisen nach [SS04] ein Volumen von etwa 2400 Litern auf und bilden somit den oberen Grenzwert der Betrachtung. Darüber hinaus werden, ohne realen Bezug, die Behältergrößen 500 Liter und 1000 Liter in die Parameterstudie mit einbezogen. Es ergeben sich somit folgende Parameter:

- Druck: 200, 300, 450 und 700 bar
- Volumen: 35, 80, 165, 500, 1000 und 2400 Liter,

deren Auswertung in den Tabellen A.12 und A.13 in Anhang A.10 wiedergegeben ist. Die Berechnung der Werte erfolgt nach der in Kapitel 6.1 entwickelten Methode mittels der Gleichungen 6.1 bis 6.6.

Aus den berechneten Werten lässt sich folgender Bezug herausstellen:

Mit einer Verdoppelung entweder des Volumens oder des Drucks, erfolgt eine Vergrößerung der Radien der Risiko-Zonen um das 1,26-fache. Gleichung 6.15 bestätigt diese Beobachtung. Der Zuwachs der Fläche bei gleichen Voraussetzungen beträgt das 1,6-fache. Eine Reduzierung des Drucks / Volumens auf die Hälfte des Eingangswertes führt somit zu einer Reduzierung der Radien auf etwa 80 % und der Fläche auf 62,5 %. Dieses Ergebnis ist in Abbildung 6.3 graphisch dargestellt.

Aus der Graphik lassen sich die Zunahme des Radius und der Fläche der Risiko-Zonen in Korrelation zur Zunahme von Druck oder Volumen bezogen auf einen Referenzwert berechnen:

$$r_{Gesucht} = 1,0059 \left(\frac{x_{Gesucht}}{x_{Referenz}} \right)^{0,3302} \quad (6.17)$$

$$A_{Gesucht} = 1,0014 \left(\frac{x_{Gesucht}}{x_{Referenz}} \right)^{0,6777} \quad (6.18)$$

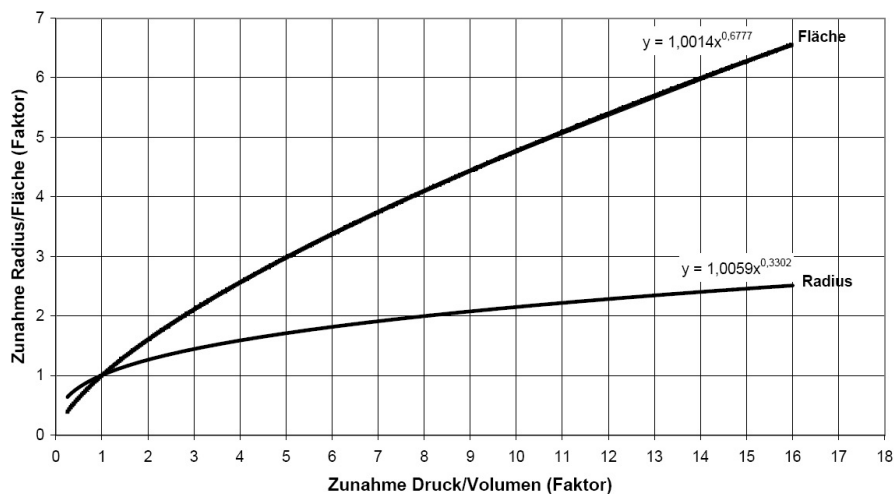


Abbildung 6.3.: Zunahme des Radius / der Fläche über der Zunahme von Druck / Volumen

Aus diesen Erkenntnissen können folgende Schlüsse gezogen werden:

1. Bei der Regulierung der Konsequenzradien sind Druckbehältervolumen und Druckbehälterinnendruck gleichwertig zu behandeln.
2. Die Annahme des worst-case-Szenarios, zur Bewertung des Risikos des Druckbehälterberstens bei einem Innendruck von 200 bar, ergibt eine gute Näherung der Konsequenzradien, da eine Abnahme des Innendrucks auf die Hälfte lediglich zu einer Reduktion der Konsequenzradien auf etwa 80 %, eine Abnahme auf ein Viertel zu einer Reduktion auf etwa 65 % führen würde.
3. Diese Reduzierung der Konsequenzradien auf 80 % und 65 % führt weiterhin zu einer Reduzierung der durch die Konsequenzen betroffenen Fläche auf 62,5 % und 40 % bezogen auf den Eingangswert.
4. Durch die exponentielle Korrelation fällt der Faktor der Konsequenzsteigerung wesentlich geringer aus als derjenige der Vergrößerung von Druck oder Volumen. Andererseits führt eine Verkleinerung von Druck oder Volumen zu einer verhältnismäßig geringen Reduzierung der Konsequenzen. Dies bedeutet auf der einen Seite, dass mit Erhöhung von Druck oder Volumen eines Druckbehälters die Konsequenzen nur leicht steigen, auf der anderen Seite, dass mit Reduzierung von Druck oder Volumen nur geringfügige Verminderungen der Konsequenzen erfolgen. Die Konsequenzen berücksichtigen in diesem Falle ausschließlich diejenigen durch den Überdruck der Druckwelle. Konsequenzen durch primäre Trümmerstücke, die durch einen höheren Innendruck einen höheren Anfangsimpuls erhalten und somit weitere Flugweiten erreichen könnten, bleiben unberücksichtigt. Verhältnis von Risikozunahme/-reduktion gegenüber Aufwandsabnahme/-zunahme (Platz, Gewicht, Einbau, Wartung, etc.) müssen im Einzelfall abgewogen werden.

Es wurde gezeigt, dass sich über eine Korrelation der beiden Parameter Innendruck und Volumen des Druckbehälters eine Veränderung der Konsequenzen erzielen lässt, die im Verhältnis zur Änderung der Parameter jedoch geringer ausfällt (vgl. Gleichungen 6.17 und 6.18). Dem gegenüber werden beim Reduzieren von Druck/Volumen und gleichzeitigen Vergrößern von Volumen/Druck identische Konsequenzen erzielt. Auf diese Weise ist es möglich, durch Erhöhen des maximalen Innendrucks das Volumen des Druckbehälters

zu reduzieren, ohne dabei eine Erhöhung der Konsequenzen zu erfahren. Ob sich auf diese Weise eine Optimierung des Druckbehälters erzielen lässt, ist jedoch fraglich. Die Energiedichte des unter Druck gespeicherten Gases weist in Abhängigkeit vom realen Druck eine regressive Kurve auf. Das bedeutet, dass die Energiedichte nicht linear mit dem Druck zunimmt. So würde nach [Mai07a] eine Erhöhung des Drucks von 200 auf 400 bar zu einer Erhöhung der Energiedichte von etwa 175 auf etwa 275 kg/m³ führen. Eine Verdoppelung des Drucks führt somit nicht auch gleichsam zu einer Verdoppelung der Energiedichte. Darüber hinaus wird nach den aktuellen deutschen Vorschriften (vgl. Kapitel 2.3 und 3.2) zur Bemessung der Druckbehältersicherheit eine Wanddicke in Abhängigkeit vom Innendruck gefordert. Andererseits führt eine Erhöhung des Behälterinnendrucks ebenfalls zu einer Erhöhung der Widerstandsfähigkeit des Druckbehälters gegen Impact- und Brandeinwirkung [Mai07b]. Somit würde auf der einen Seite eine Erhöhung des Betriebsdrucks und der Wanddicke bei gleichzeitiger Volumenreduzierung, zu einer Verschlechterung der Speicherkapazität und einer Zunahme des Werkstoffverbrauchs führen. Auf der anderen Seite ließe sich durch die Erhöhung der Widerstandsfähigkeit des Druckbehälters die Wahrscheinlichkeit des Druckbehälterversagens infolge Impact und Brand reduzieren. Der Druckbehälter kann demnach theoretisch den gegebenen Situationen angepasst werden, wobei die Zunahme an Sicherheit in diesem Fall durch Verlust an Speicherkapazität und zusätzlichem Materialaufwand erzielt wird.

Die Korrelation der prozentualen Veränderung von Innendruck zu Speichervolumen ist in den Gleichung 6.19 und 6.20 rechnerisch und in Abbildung 6.4 graphisch dargestellt:

$$\Delta V = \frac{1}{1 + \Delta p} - 1 \quad (6.19)$$

$$\Delta p = \frac{1}{1 + \Delta V} - 1 \quad (6.20)$$

mit ΔV = prozentuale Änderung des Volumens und Δp = prozentuale Änderung des Drucks.

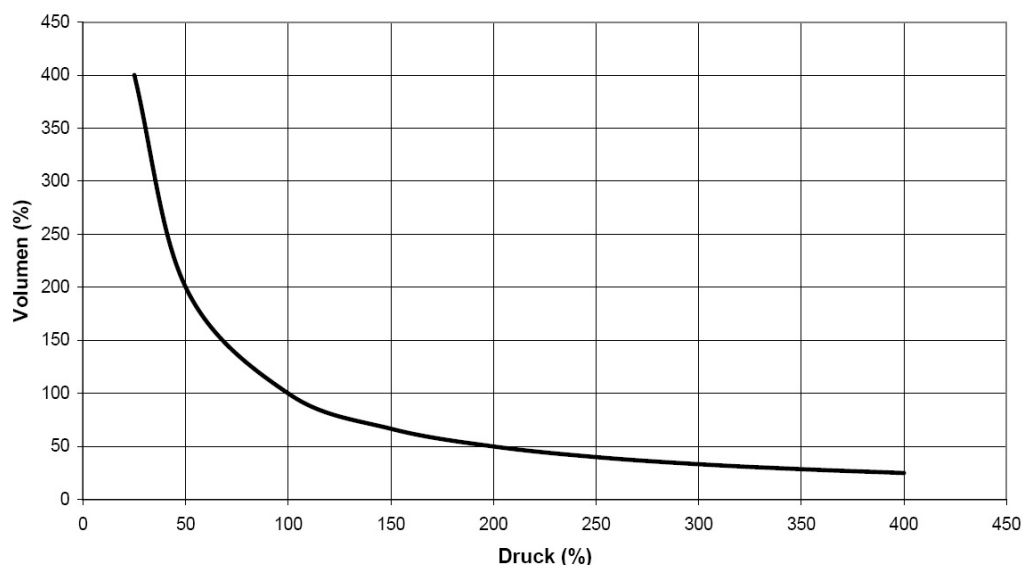


Abbildung 6.4.: Prozentuale Korrelation von Druck zu Volumen

7. Risikobeurteilung am Beispiel ausgewählter Szenarien

Wie bereits in den voran gegangenen Kapiteln erläutert, lässt sich das Risiko durch Druckbehälter im Straßenverkehr nicht pauschal darstellen. Vielmehr ist es notwendig unterschiedliche Szenarien zu betrachten und deren Risiken im Einzelfall darzustellen. Aus der Art des Szenarios lassen sich die beiden wesentlichen Faktoren

- Personendichte des betrachteten Szenarios und dessen
- personenbezogenes Individuelles Risiko auf Grund der Ortslage

schließen und somit ein Wert des Risikos bestimmen, der in der Darstellung durch F-N-Kurven Aufschluss über die Wertigkeit des Risikos gibt.

Die Konsequenzen des jeweiligen Szenarios ergeben sich aus den in Kapitel 5.1.2 ermittelten Risiko-Zonen (vgl. Tabelle 5.6). Die Werte der Radien der Risiko-Zonen für die vier Behältervolumina 35, 45, 60 und 80 Liter ergeben sich aus den in Kapitel 6.1 beschriebenen Gleichungen 6.1 bis 6.6.

Durch Zuordnung der Personendichte ϕ des Szenarios (vgl. Tabelle 5.12) auf die jeweiligen Flächen der Risiko-Zonen ergibt sich die Zahl der anwesenden Personen φ (vgl. Gleichung 6.9). Die Anzahl der innerhalb einer Risiko-Zone betroffenen Personen ψ ergibt sich aus dem Produkt der Anzahl anwesender Personen und der Fatalitätswahrscheinlichkeit P_{Fatal} innerhalb der Risiko-Zone (vgl. Gleichung 6.10). Die Anwesenheit von Personen auf Grund der Tageszeit (vgl. Kapitel 5.3) bleibt bei den hier getroffenen Aussagen außen vor. Zu berücksichtigen bleibt, dass durch den primären Trümmerflug, bei dem bis zu vier Trümmerstücke entstehen (vgl. Kapitel 4.1.1), Personen fatale Verletzungen zugeführt werden können. Da die Wahrscheinlichkeit einer fatalen Verletzung durch ein primäres Trümmerstück nicht abgeschätzt werden kann, entfällt die Betrachtung des primären Trümmerflugs an dieser Stelle.

Die Radien und daraus resultierenden Flächen der Risiko-Zonen sind bei Beibehaltung der Volumina von 35, 45, 60 und 80 Litern und des Innendrucks von 200 bar für die unterschiedlichen Szenarien identisch. Tabelle 7.1 zeigt die Gesamtradien und -flächen der Risiko-Zonen für das Behälterbersten ohne anschließende chemische Reaktion auf.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit des Ereignisses wird über den Ort des Szenarios bestimmt. So unterscheiden sich die Häufigkeiten von Unfällen nach der Ortslage. Weiterhin werden nach Kapitel 5.2.2 nur Seiten- und Heckunfälle berücksichtigt und diesen Unfällen eine Wahrscheinlichkeit von einem Prozent zugeordnet, das Ereignis Druckbehälterbersten ohne anschließende chemische Reaktion zu bewirken. Tabelle 5.10 zeigt die absoluten Werte der Heck-, Seiten- und Gesamtunfälle sowie deren Eintrittswahrscheinlichkeit bezogen auf die Bevölkerungsdichte auf. Als Heck- und Seitenunfälle wird das Zusammenstoßen mit einem Fahrzeug, dass

Tabelle 7.1.: Gesamtradien und -flächen der Risiko-Zonen bei Behälterbersten ohne anschließende chemische Reaktion bei 200 bar Innendruck

Auswirkungen bei...		V=35 l	V=45 l	V=60 l	V=80 l
...reinem Überdruck	r (m)	1,12	1,22	1,34	1,48
	A (m ²)	3,94	4,66	5,65	6,84
... Trümmerflug im Freien	r (m)	2,81	3,06	3,36	3,70
	A (m ²)	24,8	29,3	35,5	43,0
... Trümmerflug in Gebäuden	r (m)	12,20	13,27	14,60	16,07
	A (m ²)	467,6	552,9	669,8	811,4

- anfährt, anhält oder im ruhenden Verkehr steht,
- vorausfährt oder wartet,
- einbiegt oder kreuzt

angesehen. Darüber hinaus wird der Einfluss des Bestandes an erdgasbetriebenen Kraftfahrzeugen berücksichtigt, welcher für das Jahr 2011 ein Verhältnis von $1,5 \cdot 10^{-3}$ aufweist (vgl. Kapitel 5.2.2). Die Wahrscheinlichkeit des Ereigniseintritts ergibt sich somit aus der Unfallwahrscheinlichkeit multipliziert mit den beiden Faktoren Ortslage und CNG-Bestand. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass diese Faktoren nicht stabil sind, sondern sich mit der Zeit ändern und den jeweils aktuellen Bedingungen angepasst werden müssen. Die Wahrscheinlichkeit der relevanten Unfallarten auf Grund der Tageszeit (vgl. Kapitel 5.3) wird nicht berücksichtigt.

Unter Zuhilfenahme der Poisson-Verteilung ergeben sich Perzentile von 95-97 % (Unterschiede, wegen Darstellung ganzer Zahlen der Unfälle) innerhalb derer mit einer maximalen Anzahl an CNG-Unfällen je Jahr gerechnet und deren Schädigung angegeben werden kann (vgl. Kapitel 5.2.3). Die sich daraus ergebende Anzahl von Druckbehälterunfällen im Straßenverkehr bezogen auf die Bevölkerungsdichte von 81.802.000 [Bev09; Sta10] liefert das personenbezogene Individuelle Risiko bei dem Ereignis des Druckbehälterberstens infolge eines Verkehrsunfalls anwesend zu sein (Tabelle 7.2).

Tabelle 7.2.: Personenbezogenes Individuelles Risiko bei dem Ereignis des Druckbehälterberstens infolge eines Verkehrsunfalls anwesend zu sein

Ortslage	Personenbezogenes Individuelles Risiko
innerhalb von Ortschaften	$1,22 \cdot 10^{-7}$
außerhalb von Ortschaften	$8,56 \cdot 10^{-8}$
auf allen Straßen	$1,22 \cdot 10^{-7}$

Der Risikowert ergibt sich schließlich aus der zu erwartenden Konsequenz sowie deren Eintrittswahrscheinlichkeit. Werden beide Werte in die Koordinaten einer F-N-Kurve eingetragen, lässt sich eine Aussage treffen, in welchen Bereich der Akzeptanz das jeweilige Risiko fällt. In Anlehnung an die allgemeine Sterblichkeitsrate von etwa 10^{-4} [ZDK⁺03] und der Tatsache, dass diese durch einzelne äußere Einwirkungen um nicht mehr als 1 % erhöht werden darf [ZDK⁺03], wird in dieser Arbeit der Grenzwert zum akzeptablen Bereich für eine Einzelperson bei 10^{-6} gesetzt. Der Grenzwert, ab dem ein Risiko als nicht

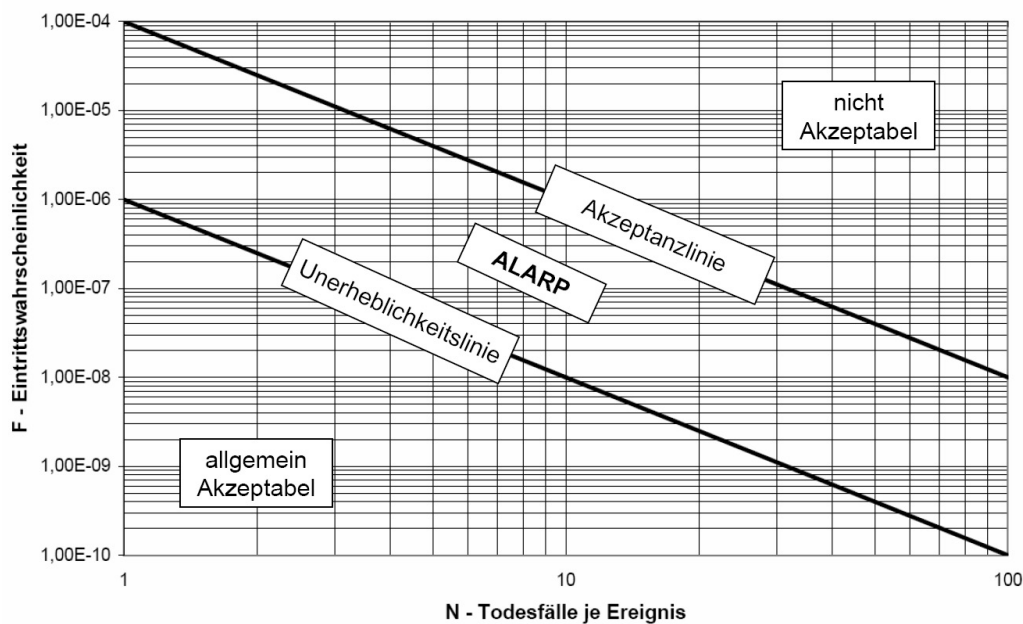


Abbildung 7.1.: F-N-Kurve der Risikoerfassung

mehr akzeptabel angesehen werden kann, wird in Anlehnung an Kapitel 2.5 zwei Dekaden höher bei 10^{-4} angesetzt. Als Aversionsfaktor wird nach dem Vorbild der Niederlande der Wert -2 festgelegt, der die Angst des Menschen vor Ereignissen mit hohem Katastrophentential berücksichtigt. Die Darstellung der F-N-Kurve ist in Abbildung 7.1 gegeben.

Die folgenden Kapitel bewerten das Risiko ausgewählter Szenarien bezüglich des Druckbehälterberstens ohne anschließende chemische Reaktion, also den reinen Druckbehälterzerknall. Eine Bewertung des Risikos der ausgewählten Szenarien für ein Druckbehälterbersten mit anschließender chemischer Reaktion findet sich in Anhang A.9.

7.1. Wohngebiet - Stadtzentrum

Dem Stadtzentrum wird auf Grund vieler eng zusammen liegender Wohnungen eine hohe Personendichte von $12.000 \text{ Pers./km}^2$ unterstellt (vgl. Tabelle 5.12). Die Ermittlung der Konsequenzwerte für einen unter einem inneren Überdruck von 200 bar stehenden Druckbehälter ergeben sich aus dem in Kapitel 6.1 dargestellten Vorgehen und sind in Tabelle 7.3 und Abbildung 7.2 dargestellt.

Das Stadtzentrum wird als innerhalb von Ortschaften gewertet. Nach Tabelle 7.2 ergibt sich somit ein personenbezogenes Individuelles Risiko, also die Wahrscheinlichkeit bei dem Ereignis anwesend zu sein, von $1,22 \cdot 10^{-7}$. Das Einsetzen der Konsequenzwerte für die unterschiedlichen Druckbehältervolumina sowie der dazugehörigen Eintrittswahrscheinlichkeit des personenbezogenen Individuellen Risikos in Abbildung 7.1 zeigt auf, dass das Risiko durch berstende Druckbehälter im Bereich der allgemeinen Akzeptanz liegt. Unter Berücksichtigung des primären Trümmerflugs (vgl. Kapitel 4.1.1) könnte die Fatalitätsrate auf bis zu fünf Personen ansteigen, wodurch der Risikowert in den ALARP-Bereich fallen würde. Auf Grundlage der Wahrscheinlichkeit von innerstädtischen Unfällen wäre grundsätzlich beim Behälterbersten eine Anzahl von weniger als 4 Personen als allgemein akzeptabel und weniger als 40 Personen im ALARP-Bereich zu sehen.

Tabelle 7.3.: Anwesende und betroffene Personenanzahl bei Behälterbersten im Stadtzentrum (12.000 Pers./km²)

Auswirkungen bei...		V=35 l	V=45 l	V=60 l	V=80 l
...reinem Überdruck	Personen _{anwesend}	0,05	0,06	0,07	0,08
	Personen _{betroffen}	0,04	0,05	0,06	0,07
... Trümmerflug im Freien	Personen _{anwesend}	0,30	0,35	0,43	0,52
	Personen _{betroffen}	0,18	0,22	0,26	0,32
... Trümmerflug in Gebäuden	Personen _{anwesend}	5,61	6,63	8,04	9,74
	Personen _{betroffen}	0,61	0,73	0,89	1,07

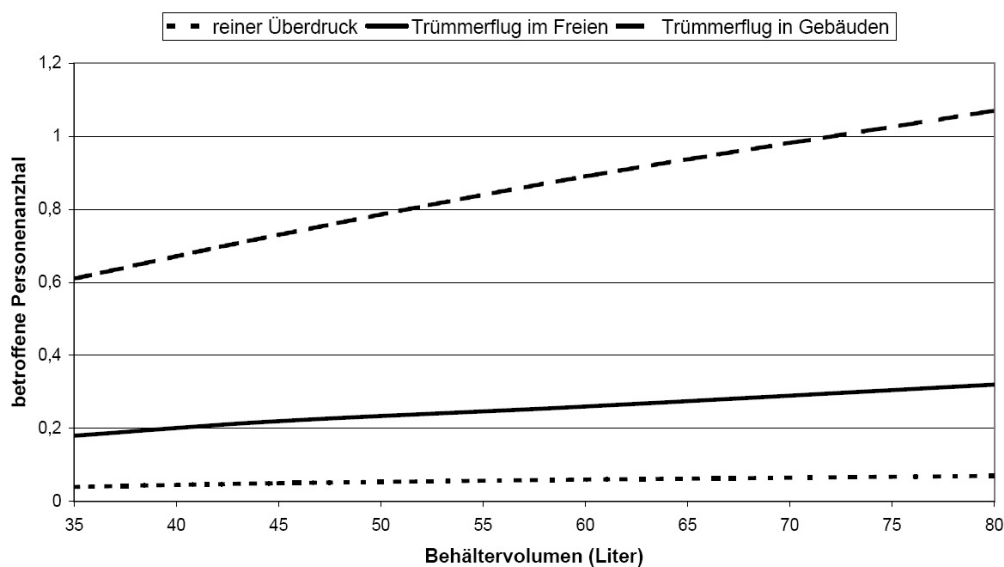


Abbildung 7.2.: Betroffene Personenanzahl bei Behälterbersten im Stadtzentrum

7.2. Außerstädtischer Bereich - Wohngebiete

Dem außerstädtischen Bereich kann statistisch die gelegentliche Wohnbebauung nach Tabelle 5.12 zugeordnet werden, wodurch sich eine Personendichte von 500 Pers./km² ergibt. Einzelne Schwerpunkte erhöhter Personendichten lassen sich so zwar nicht ausschließen, es kann allerdings von einer für die Darstellung des Risikos mittels Risikowert gesicherten Aussage ausgegangen werden. Die Ermittlung der Konsequenzwerte für einen unter einem inneren Überdruck von 200 bar stehenden Druckbehälter ergeben sich aus dem in Kapitel 6.1 dargestellten Vorgehen.

Die Anzahl der durch ein Behälterbersten betroffenen Personen fällt rechnerisch so gering aus, dass eine Darstellung der Werte mittels Tabelle oder Graphik keine Aussagekraft aufweist. Die höchste Anzahl betroffener Personen beim Bersten eines 80-Liter-Druckbehälters bei Trümmerflug in Gebäuden beläuft sich auf 0,05 Personen. Die rechnerische Darstellung der Konsequenz ist somit nicht möglich.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit für den außerstädtischen Bereich weist Unterschiede gegenüber derjenigen aus innerstädtischen Bereichen auf. Außerstädtische Wohngebiete werden als außerhalb von Ortschaften gewertet. Nach Tabelle 7.2 ergibt sich ein personenbezoge-

nes Individuelles Risiko, also die Wahrscheinlichkeit bei dem Ereignis anwesend zu sein, von $8,56 \cdot 10^{-8}$.

Risikowerte lassen sich auf Grund der rechnerisch nicht darstellbaren Werte betroffener Personen nicht angeben. Würden die zusammengehörigen Werte für Konsequenz und Eintrittswahrscheinlichkeit in das Diagramm der Abbildung 7.1 eingesetzt, so ergäben sich Risikowerte, die durchweg im Bereich der allgemeinen Akzeptanz zu finden wären. Ausnahmen hiervon bilden wieder punktuelle Schwerpunkte erhöhter Personendichte sowie die Berücksichtigung des primären Trümmerflugs mit bis zu vier Trümmerstücken (vgl. Kapitel 4.1.1). Auf Grundlage der Wahrscheinlichkeit von außerstädtischen Unfällen wäre beim Behälterbersten eine Anzahl von weniger als 7 Personen allgemein akzeptabel und weniger als 70 Personen im ALARP-Bereich zu sehen.

7.3. Weitere innerstädtische Szenarien

Der ruhigen Wohngegend wird eine Personendichte von 2.500 Pers./km² zugeordnet (vgl. Tabelle 5.12). Grund für diesen gegenüber dem Stadtzentrum geringen Wert ist die Bebauungslage mit weiter entfernt stehenden Häusern mit verhältnismäßig wenig Wohneinheiten. Diese erfüllt sich nach [CPR92] nachts zu 95 %, am Tage auf Grund von Abwesenheit von Personen (Arbeit, einkaufen, etc.) zu 80 %.

Dem Handel (4.000 Pers./km²) und Restaurants (800 Pers./km²) werden am Tag während der Öffnungszeiten eine Personendichte von 4.000 Pers./km² unterstellt (vgl. Tabelle 5.12). Zu den anwesenden Personen zählen als fester Wert die in den Geschäften beschäftigten Personen; als variabler Wert kommen die Geschäftskunden (einkaufen, Pause, etc.) hinzu, die den Großteil der Personendichte ausmachen und Schwerpunkte bilden können. Somit sind punktuelle Personendichten von mehr als rechnerisch 4.000 Pers./km² möglich. Weiterhin gilt zu beachten, dass sich diese Werte auf den Tag während der Öffnungszeiten beziehen; nachts wird demgegenüber nur ein Bruchteil dieser Personendichten erreicht.

Dem Dienstleistungsgewerbe wird nach [CPR92] während der Öffnungszeiten eine Personendichte von 8.000 Pers./km² zugeordnet (vgl. Tabelle 5.12). Bei den anwesenden Personen handelt es sich größtenteils um Beschäftigte der Branche, womit sich ein zeitlich stabiler Wert ergibt. Der verhältnismäßig hohe Wert der Personendichte ergibt sich durch die hohe Anzahl an Büros in meist mehrstöckigen Gebäuden. Außerhalb der Öffnungszeiten, also im gesamten Bereich der Nacht nach Kapitel 5.3, ist von einer Personendichte nahe Null auszugehen, wodurch ein Risikowert nicht berechenbar ist. Die für das Dienstleistungsgewerbe berechneten Risikowerte beziehen sich demnach nicht nur auf den Bereich „Tag“, sondern vielmehr auf die Arbeitszeiten.

Da das maximale Ausmaß der Konsequenz und somit des Risikos durch die Auswirkungen des sekundären Trümmerflugs erfolgt, werden in den folgenden Darstellungen (vgl. Tabelle 7.4 und Abbildung 7.3) auch nur diese Werte aufgeführt, anders als bei der Betrachtung von Stadtzentrum und außerstädtischen Wohngebieten.

Tabelle 7.4.: Anzahl der durch sekundären Trümmerflug betroffenen Personen bei unterschiedlichen innerstädtischen Szenarien

	V = 35 l	V = 45 l	V = 60 l	V = 80 l
Wohngegend	0,13	0,15	0,18	0,22
Einzelhandel	0,21	0,24	0,30	0,36
Bankenviertel	0,41	0,49	0,60	0,71

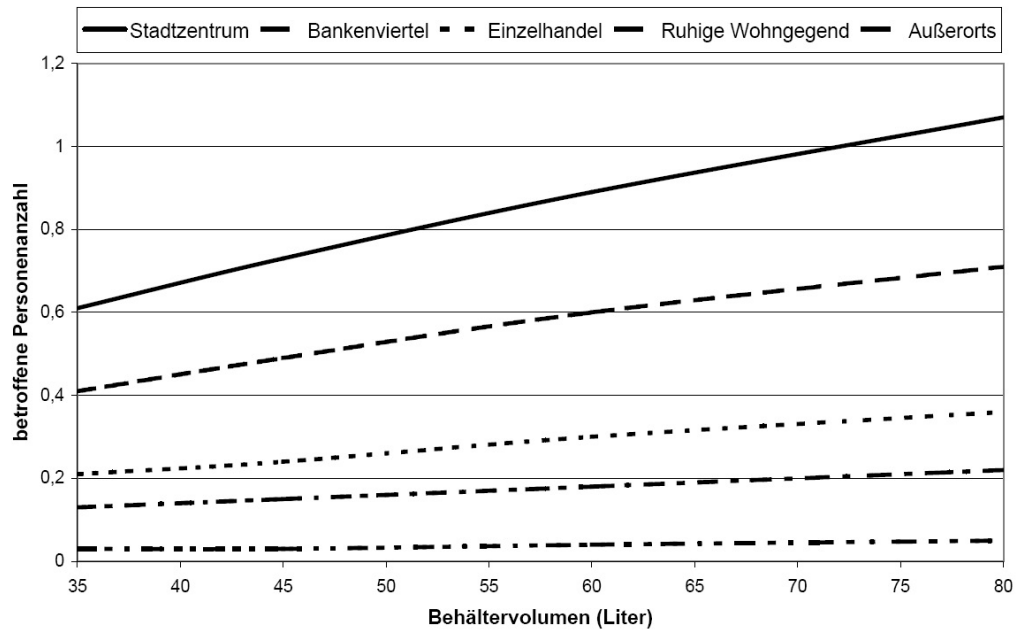


Abbildung 7.3.: Vergleich der durch sekundären Trümmerflug betroffenen Personen bei unterschiedlichen innerstädtischen Szenarien

7.4. Erkenntnisse aus den ausgewählten Szenarien

Aus der Risikobeurteilung am Beispiel ausgewählter Szenarien lässt sich die Erkenntnis ziehen, dass Straßenverkehrsunfälle innerhalb von Ortschaften unter Beteiligung von CNG-Fahrzeugen in doppelter Hinsicht risikoreicher sind als außerhalb von Ortschaften.

1. Innerhalb von Ortschaften ereignen sich statistisch mehr Unfälle, die geeignet sind zu einer Druckbehälterschädigung zu führen, als außerhalb. Die Wahrscheinlichkeit, als Faktor des Risikos, ist somit als höher einzustufen.
2. Werden statistische Verteilungen der Personendichte zu Grunde gelegt, so ist innerhalb von Ortschaften eine deutlich höhere Anzahl an Personen durch das Ereignis Druckbehälterversagen betroffen.

Zum aktuellen Stand geht nach der durchgeführten Risikoanalyse von Druckbehältern im Straßenverkehr kein unzulässiges Risiko aus.

7.5. Abgleich der angewandten Methodik mit einem LPG-Güterwaggonunfall

Als ein Beispiel der Risikobeurteilung mit Realitätsbezug wird die Explosion eines LPG-Güterwaggons (Liquefied Petroleum Gas) im italienischen Viareggio herangezogen. Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Szenarien handelt es sich hierbei um das Bersten mit anschließender chemischer Reaktion eines LPG-Druckbehälters. Die Formeln zur Berechnung dieses Ereignisses weichen von den bisher benutzten Formeln dementsprechend ab (vgl. Kapitel 6.1). Darüber hinaus handelt es sich bei diesem Szenario um einen wesentlich größeren Druckbehälter als bei den bisher betrachteten. Der Abgleich der in dieser Arbeit entwickelten Methode mit einem realen Unfall bot sich an dieser Stelle an, kann jedoch, auf Grund der geringen Stichprobenzahl, nicht als Validierung des Modells angesehen werden.

In der Nacht auf Dienstag, den 30. Juni 2009, entgleiste ein von La Spezia nach Pisa fahrender Güterzug mit 14 Waggons in der italienischen Stadt Viareggio in der Nähe des Bahnhofs. Einer der mit Flüssiggas gefüllten 30 m^3 Waggons explodierte kurz darauf. [Via09a; Via09c; Via09b] Die Fakten aus den Zeitungsberichten lassen sich folgendermaßen zusammentragen:

- Todesfälle: 13 – 18 Personen
- Schäden an Gebäuden im Umkreis von 300 m
- LPG-Kesselwagen mit $V = 30 \text{ m}^3$
- Unfall unmittelbar am Bahnhof im Stadtzentrum.

Im Anschluss müssen einige Annahmen bzgl. Druckbehälter, Flüssiggas und Umgebung getroffen werden:

- Keine Wohngebäude im nahen Umkreis. Wohngebäude im entfernten Umkreis mit einbeziehen, wodurch sich die Bewertung des Bahnhofs als Industriegebiet nach [CPR92] mit mittlerer Beschäftigung (4.000 Pers./km^2) vornehmen lässt.
- Keine baulichen Strukturen, die sekundären Trümmerflug bedingen, also in erster Linie Betrachten von Konsequenzen von Trümmerflug im Freien
- LPG = Propan-Butan-Gemisch
 - Wirkfaktor LPG $\eta = 0,003$ für Propan nach [KRS⁺00] (vgl. Tabelle 6.1)
 - Dichte $\rho = 540 \text{ kg/m}^3$ [wik11]
 - Speicherung bei 10 bar [wik11]
 - Heizwert 46.000 kJ/kg [wik11]. Unter Annahme eines um 10 % höheren Brennwertes (vgl. [DVF11]) ergibt sich ein Brennwert von etwa 50.500 kJ/kg .

Unter den oben getroffenen Annahmen ergeben sich nach den Gleichungen 6.2 bis 6.9 14 fatale Ereignisse bei Trümmerflug im Freien (vgl. Tabelle 7.5), was durch Aussagen der Zeitungsberichte bestätigt wird.

Die Auswertung von Gebäudeschäden erfolgt über die Berechnung des Spitzenüberdrucks nach den Gleichungen 6.2 bis 6.6 und Abgleich der Auswirkungen des Spitzenüberdrucks nach Tabelle 4.1. Hiernach ergeben sich die folgenden Gebäudeschäden:

Tabelle 7.5.: Berechnete Personenschäden durch einen 30 m³ LPG-Güterwaggon

Auswirkungen bei ...	Radius (m)	Fläche (m ²)	anwesende Personen	betroffene Personen
... reinem Überdruck	17	104	3,63	2,62
... Trümmerflug im Freien	41	5281	21,13	13,37
... Trümmerflug in Gebäuden	179	100660	402,64	44,33

- 0,02 bar: geringe Schäden an Dächern [KRS⁺00]: ca. 330 m
- 0,01 bar: 10 % Fensterscheiben zerstört [KRS⁺00]: ca. 660 m
- 0,005 bar: Schäden an Fensterrahmen und Türen [KRS⁺00]: mehr als 1000 m

Wird ein druckbezogener Wert von 0,02 bar als Grenze für Gebäude- und Strukturschäden angesetzt, so berechnet sich ein Radius von 330 m. Nach Zeitungsaussagen waren Schäden an Gebäuden im Umkreis von 300 m erreicht worden.

Der Vergleich der in dieser Arbeit entwickelten Methode mit einem realen Unfall liefert ein zufrieden stellendes Ergebnis. Für die Validierung dieses Modells bedarf es allerdings einer weitaus höheren Stichprobe.

8. Ergebnisse der Risikobeurteilung

Die in dieser Arbeit entwickelte und in den Kapiteln 5 bis 7 beschriebene Methodik berechnet Werte des Risikos spontan infolge eines Verkehrsunfalls versagender (berstender) Druckbehälter, die als Treibgasspeicher in Kraftfahrzeugen dienen. Grundlage der Berechnungen des Risikos sind die Parameter Konsequenz und Eintrittswahrscheinlichkeit nach dem technischen Risikobegriff (vgl. Kapitel 2.1), die in dieser Arbeit um den Parameter der betroffenen Personenzahl ergänzt werden. Die auf diese Weise ermittelten Risikowerte ermöglichen die Beurteilung des von der betrachteten Technologie ausgehenden Risikos und somit im erweiterten Sinne seiner technischen Sicherheit.

In den in Kapitel 5.2 durchgeführten Untersuchungen erfolgte die Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Ereigniseintritts aus der retrospektiven Betrachtung von Verkehrsunfällen, wobei nur diejenigen Unfallarten berücksichtigt wurden, die auf eine Schädigung des Druckbehälters schließen lassen. Andere Unfallarten, wie Unfälle mit Personen oder Abkommen von der Fahrbahn, wurden nicht berücksichtigt. Des Weiteren wurden nur Unfälle mit Personenschaden und schwerwiegendem Sachschaden in die Untersuchung einbezogen, da bei Unfällen geringerer Einstufung eine Schädigung des Druckbehälters ausgeschlossen werden kann. Neben den betrachteten Unfallzahlen wurde das Verhältnis der Zulassungen von CNG-Fahrzeugen zu solchen herkömmlichen Antriebs sowie die Versagenswahrscheinlichkeit des Druckbehälters durch externe Krafteinwirkung berücksichtigt (vgl. Kapitel 5.2.2). Diese Parameter wurden mittels Poissonverteilung als Vertrauensintervalle dargestellt, wodurch sich deren relative Häufigkeit als ein 95 % Perzentil ermitteln ließ (vgl. Kapitel 5.2.3). Aus diesen Ergebnissen konnte die Eintrittswahrscheinlichkeit von druckbehälterschädigenden Unfällen im Straßenverkehr ermittelt werden. Bezogen auf die Bevölkerungsdichte Deutschlands ergab sich ein bevölkerungsspezifisches Individuelles Risiko von $1,22 \cdot 10^{-7}$, bei dem Ereignis des Behälterversagens anwesend zu sein (vgl. Tabelle 7.2). Unter Berücksichtigung der Ortslage ergibt sich nach der gleichen Methodik für Unfälle innerhalb von Ortschaften ein Wert von $1,22 \cdot 10^{-7}$ und außerhalb von Ortschaften von $8,56 \cdot 10^{-8}$. Die Erhebung der Behältergrößen eingesetzter Druckbehälter zeigte ein Volumen von 35 bis 80 Litern auf (vgl. Kapitel 6.2). Die aus dem Ereignis der oben dargestellten Eintrittswahrscheinlichkeit resultierenden Risiko-Zonen berechnen sich somit innerhalb dieser Grenzen. Das Ausmaß der Konsequenzen innerhalb dieser Risiko-Zonen richtet sich weiterhin nach der Betroffenheit von anwesenden Personen (vgl. Kapitel 5.1.2 und 5.3). Die Anwesenheit von Personen wird über das statistische Mittel nach unterschiedlichen Szenarien ermittelt, wobei insbesondere zwischen Unfällen innerhalb und außerhalb von Städten unterschieden wurde (vgl. Kapitel 7). Die Betroffenheit von Personen ergibt sich aus deren Anwesenheit in den Risiko-Zonen und der für die betreffende Risiko-Zone charakteristischen Fatalitätswahrscheinlichkeit.

In Abhängigkeit von der Ortslage ergaben sich unterschiedliche Werte sowohl der Eintrittswahrscheinlichkeit relevanter Unfälle als auch der Anzahl betroffener Personen (vgl. Kapitel 7). Auf diese Weise konnten verschiedenen Szenarien Risikowerte zugeordnet werden, die das Risiko quantitativ beschreiben und somit eine objektive Aussage über dessen

Höhe geben. Die Beurteilung des Risikowertes erfolgte im weiteren Verlauf der Arbeit über den Abgleich mit F-N-Kurven nach dem ALARP-Modell (vgl. Kapitel 2.5 und 7). Bei diesem Modell werden Eintrittswahrscheinlichkeit und Konsequenz in Korrelation gesetzt und so einem Grad der technischen Risikoakzeptanz zugeordnet. Die Auswertungen des Kapitels 7 zeigen, dass auf Grund der geringen Druckbehältervolumina Risiko-Zonen kleiner Radien entstehen und die Anzahl betroffener Personen deshalb sehr gering ausfällt. In Kombination mit den Eintrittswahrscheinlichkeiten relevanter Unfälle ergaben sich Risikowerte, die unter den derzeitigen Betrachtungsgrenzen als größtenteils unbedenklich und nur in wenigen Fällen als akzeptabel aber verbesserungswürdig eingestuft wurden (vgl. Kapitel 7.4). Auf den Abgleich der ermittelten Risikowerte mit Werten anderer technischer Risiken sowie Alltagsrisiken wurde verzichtet, da deren Akzeptanz durch die Gesellschaft subjektive Bewertungsmaßstäbe zu Grunde liegen.

Alle im Rahmen der vorliegenden Arbeit notwendigerweise getroffenen Annahmen waren dem Grundsatz nach konservativ, d. h. zur sicheren Seite hin ausgelegt. Die Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit erfolgte dabei auf Grundlage der Unfallstatistiken des Statistischen Bundesamtes. Für die Bestimmung der Konsequenzen waren keine Werte durch die Fachliteratur vorhanden. Auf Grundlage der durch die Fachliteratur gegebenen Werte der Schädigung unbelebter Strukturen durch Druckeinwirkung wurde eine Methode entwickelt, die Konsequenzen durch sekundären Trümmerflug für den Menschen zu berechnen (vgl. Kapitel 5.1.1).

9. Erkenntnisse und Risikoregulierung

9.1. Erkenntnisse der Methodik

Die sicherheitstechnische Festlegung technischer Risiken in Deutschland basiert auf produktbezogenen Anforderungen, wobei keine quantitative Erfassung des Grenzzrisikos erfolgt. Sofern ausreichend viele dieser sicherheitstechnischen Festlegungen getroffen wurden, gehen die öffentlichen Organe von einem hinreichend geringen Risiko einer Technologie aus. Das verbleibende Restrisiko wird dann als so unwahrscheinlich angenommen, dass es „vernünftigerweise ausgeschlossen“ werden kann und so als akzeptabel oder zulässig gilt (vgl. Kapitel 2.3).

Diese in Deutschland angewandte Methodik entspricht somit einer produktbezogenen Bauart- und Eignungspüfung. Nach erfolgter Prüfung erhält ein Produkt seine Zulassung und gilt als technisch sicher und durch die Gesellschaft akzeptiert. Der Ansatz der in dieser Arbeit verfolgten Methodik ermittelt dagegen das von einer Technologie ausgehende Risiko für die Gesellschaft und stellt somit ein Werkzeug der anwendungs- und akzeptanzbezogenen Prüfung dar. Die Risikoanalyse und -bewertung erfolgt dabei über die Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit festgelegter Konsequenzen und deren Abgleich mit Grenzwerten des akzeptablen Risikos. Hintergrund ist das Aufzeigen einer alternativen Blickweise bezüglich der Beurteilungsmöglichkeiten von Risiken.

Der Vergleich der beiden Methoden zeigt, dass sich die Aussagen der durch den Gesetzgeber gestellten Anforderungen an technische Produkte und die daraus hervorgegangenen Anforderungen der Normen mit den Ergebnissen der in dieser Arbeit entwickelten Methodik decken: von der Technologie wird ein Risiko emittiert, das nach der produktbezogenen Methode als hinnehmbares Restrisiko und von der hier entwickelten Methode als allgemein akzeptables Risiko angesehen wird. Der Lösungsansatz dieser Methodik kann somit als richtig bewertet werden, weshalb diese Methodik als Alternative zu den bestehenden Methoden gezählt werden kann. Durch Anwendung dieser Methodik eröffnen sich für die Gestaltung von Anforderungen an technische Produkte neue Möglichkeiten:

- Anforderungen an technische Produkte können auf Grundlage ihres Anwendungsbereichs definiert werden, d. h.
 - die Sicherheit der Technologie wird für den betrachteten Anwendungsbereich erhöht.
 - Teilweise überzogene oder gar für den Anwendungsbereich überflüssige Anforderungen können hinterfragt werden.
 - Gleichfalls ist es möglich, durch diese Methodik Risiken zu lokalisieren, die durch die bisherigen Anforderungen nicht abgedeckt waren.

- Dadurch wird eine Abkehr von historisch gewachsenen Anforderungen einer das Design bestimmenden Beschaffenheitsnorm erreicht, ohne dabei eine Reduzierung der Sicherheit der Bevölkerung hinnehmen zu müssen.
- Durch die Anwendung dieser Methodik wird das Risiko bzw. die Sicherheit einer Technologie eindeutig dargestellt.
 - Ein Spielraum bzw. ein „Vortäuschen“ bzgl. der Sicherheit einer Technologie wird so unterbunden.
 - Die Risiken unterschiedlicher Technologien werden, unter Zugrundlegung identischer Eingangsbedingungen, vergleichbar.

9.2. Erkenntnisse der Risikobeurteilung

In Kapitel 7 wurde das Risiko durch das Bersten von Druckbehältern als Treibgasspeicher in Kraftfahrzeugen am Beispiel ausgewählter Szenarien aufgezeigt. Grundlegend für die Beurteilung ist die Annahme der Personendichten je Flächeneinheit nach unterschiedlichen Siedlungs- und Bebauungstypen. Bei dieser Art der Risikobetrachtung kann ausschließlich das arithmetische Mittel der Personendichte angegeben werden, wodurch die hier entwickelte Methodik eine Beurteilung des Risikos unter standardisierten Bedingungen vornimmt. Sofern Daten zur Verfügung stehen, ist darüber hinaus ebenfalls eine Risikobeurteilung von Einzelfällen möglich.

Die Auswertung der verschiedenen Szenarien in Kapitel 7 zeigt, dass das betrachtete Risiko in fast allen Bereichen unterhalb der Akzeptanzlinie und vielfach unterhalb der Unbedenklichkeitslinie liegt und somit ein akzeptables Risiko unterstellt wird. Zurückzuführen ist diese Tatsache auf zwei Punkte:

1. Die Personendichte verteilt sich nach dem arithmetischen Mittel, d. h. es wird eine gleiche Verteilungsdichte der Personen über die betroffene Fläche unterstellt. Bereiche hoher oder geringer Personendichte können innerhalb der betrachteten Fläche nicht unterschieden werden. Ansammlungen von Personen innerhalb der Risiko-Zonen können die Risikowerte zu ungünstigeren Positionen verschieben.
2. Die betrachteten Druckbehälter weisen ein Volumen von bis zu 80 Litern auf. Die beim spontanen Behälterbersten gebildeten Risiko-Zonen erreichen bei diesem Volumen Radien von maximal 16 Metern (vgl. Tabelle 7.1). Die Zahl der durchschnittlich in diesem Bereich anwesenden Personen ist bereits sehr gering, wobei die Zahl der betroffenen Personen durch die exponentielle Abnahme des Drucks über den Radius weiter reduziert wird (vgl. Kapitel 5.1.1). Die vom Druckbehälterbersten ausgehende Gefährdung ist somit als hoch einzustufen, wohingegen das Risiko desselben auf Grund seiner geringen Konsequenzen als allgemein akzeptabel eingestuft werden muss. Das im Verhältnis zu Tankfahrzeugen oder -waggons geringe Volumen der Druckbehälter bedingt dieses allgemein akzeptable Risiko.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit der entwickelten Methode ist die Risikobeurteilung von Druckbehältern zu Transportzwecken mit variierendem Füllgut. Ausgangspunkt hierfür war der Unfall eines 30 m³ LPG-Güterwaggons im italienischen Viareggio. Die Berechnungen nach Kapitel 7.5 zeigt eine deutliche Zunahme der Anzahl betroffener Personen, wobei über die Eintrittswahrscheinlichkeit eines solchen Ereignisses keine Aussagen

getroffen werden können. Auch wenn eine Validierung der Methode durch ein einzelnes Ereignis nicht möglich ist, zeigt die Berechnung eine gute Näherung der realen Ereignisse auf. Die von der Öffentlichkeit als „fahrende Bombe“ empfundene Bedrohung durch Druckbehälter resultiert in erster Linie aus den medienwirksamen Ereignissen dieser Art, bei denen große Druckbehälter (Tanks) zum Einsatz kommen. Die Konsequenzen, die sich aus dem Bersten von Druckbehältern bis 80 Liter Volumen ergeben sind, wie in dieser Arbeit gezeigt wurde, als gering zu betrachten.

9.3. Risikoregulierung

Die Regulierung des Risikos erfolgt über die selben Faktoren, nach welchen es sich in dieser Arbeit definiert: Konsequenz, Eintrittswahrscheinlichkeit und Anzahl betroffener Personen. Da sich die Anzahl der durch ein Behälterbersten betroffenen Personen nicht regulieren lässt, scheidet dieser Faktor als Möglichkeit der Risikoregulierung von vorne herein aus. Dies liegt an der Tatsache, dass sich keine Bereiche vorgeben lassen, in denen die Personenzahl aus Gründen des Individualverkehrs reglementiert wird.

Die Konsequenzen des Druckbehälterversagens ergeben sich, wie in Kapitel 4.1.1 ausführlich dargestellt, aus den drei Möglichkeiten

1. Konsequenzen aus Einwirkung des reinen Spitzenüberdrucks,
2. Konsequenzen des primären Trümmerflugs und
3. Konsequenzen des sekundären Trümmerflugs infolge des Spitzenüberdrucks,

wobei zwischen direkter und indirekter Einflussnahme auf die Konsequenzen unterschieden werden muss. Als Konsequenz wird nach Kapitel 4.1 ein einzelner Todesfall herangezogen. Die Bewertung der Konsequenz erfolgt über die von ihr betroffene Anzahl an Personen (vgl. Kapitel 5.3).

Die direkten Konsequenzen lassen sich in erster Linie durch die Höhe des Spitzenüberdrucks determinieren. In Abhängigkeit des Wertes des Spitzenüberdrucks ergeben sich hier die Radien der Risiko-Zone und somit die Anzahl potentiell betroffener Personen. Die Regulierung des Spitzenüberdrucks kann ausschließlich über den Behälterinnendruck und das Behältervolumen erfolgen. Als direkte Einflussnahme bleibt somit die Verminderung von Behälterinnendruck und/oder Behältervolumen.

Die Höhe der Eintrittswahrscheinlichkeit setzt sich aus zwei Bereichen von Wahrscheinlichkeiten zusammen:

1. Wahrscheinlichkeit eines Unfalls im Straßenverkehr, der grundsätzlich geeignet ist zu einer Schädigung des Druckbehälters zu führen und
2. Wahrscheinlichkeit der Schädigung des Druckbehälters durch diese Arten von Unfällen (vgl. Kapitel 5.2.2).

Auf die Unfallhäufigkeit und die daraus abgeleitete relative Wahrscheinlichkeit lässt sich, im Zuge dieser Arbeit, kein Einfluss nehmen. Es lassen sich jedoch Anforderungen an den Druckbehälter definieren, welche die Wahrscheinlichkeit der Schädigung des Behälters reduzieren oder zumindest reglementieren.

Im Folgenden werden einige Möglichkeiten der technischen und infrastrukturellen Risikoregulierung vorgestellt, die weder einen Anspruch auf Vollständigkeit noch Praktikabilität aufweisen. Eine detaillierte Beschreibung der Möglichkeiten der Risikoregulierung ist in Anhang A.11 gegeben.

- Reduzierung der Versagenswahrscheinlichkeit
- Ort und Ausrichtung des Druckbehälters
- Behälterinnendruck und -volumen
- Leerfahren der Druckbehälter
- Schutzeinrichtung der Druckbehälter
- Fahrverbote bei hoher Siedlungsdichte
- Kennzeichnung von CNG-Fahrzeugen
- Gebäudestruktur.

10. Schlussbetrachtung und Ausblick

10.1. Zusammenfassung

Wie in Kapitel 1.1 erläutert, lässt sich die staatliche Verantwortung zur Beurteilung und Regulierung technischer Risiken auf Artikel 2 Absatz 1 und 2 sowie Artikel 20a des Grundgesetzes [Gru10] zurückführen, was für die Betrachtung des technischen Sicherheitsrechts den Schutz der Bevölkerung vor Gesundheits- und anderen Lebensrisiken durch technische Systeme bedeutet.

Der aktuelle Stand der die Sicherheit bestimmenden Anforderungen eines Druckbehälters im Fahrzeugbau erfolgt in Deutschland durch die STVZO [StV09]. Diese Anforderungen an erdgasbetriebene Kraftfahrzeuge sind in der ECE-R 110 [ECE08] geregelt, die auf der DIN EN ISO 11 439 [DIN01a] aufbaut. Alle dort aufgeführten Anforderungen basieren auf der Gewährleistung der Integrität des technischen Systems. Es werden produktbezogene Anforderungen definiert, welche weder die Besonderheiten des jeweiligen Einsatzgebiets des Druckbehälters im vollen Umfang berücksichtigen noch das letztendlich von diesem emittierte Risiko.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Methode zu entwickeln, welche das Risiko einer Technologie auf Grundlage umfangreicher Berücksichtigung ihres Anwendungsbereichs beurteilt. Dafür wurde das Risiko von Druckbehältern im Straßenverkehr auf Grund der von ihnen zu erwartenden Konsequenzen beschrieben, wobei exemplarische Szenarien ausgewählt wurden. Auslösendes Ereignis des Risikos ist dabei der Verkehrsunfall; andere Ereignisse (Fahrzeugbrand, Vandalismus, Materialfehler, etc.) bleiben unberücksichtigt. Es wurde eine Methode entwickelt, das Risiko einer Technologie über eine konsequenzbasierte anwendungsbezogene Risikoanalyse zu ermitteln. Über den Abgleich des ermittelten Risikowertes mit Werten des Grenzsrisikos kann festgestellt werden, welches Maß an Risiko von der betrachteten Technologie ausgeht. Im Gegensatz zu produktbezogenen Anforderungen weist diese Methode eine Technologie, in Ermangelung allgemein akzeptierter technischer Grenzwerte, nicht als „sicher“ aus, sondern gibt einen Wert des Risikos als quantitative Kennzahl der Gefährdung an. Somit wird zum einen das verbleibende Restrisiko deutlich, zum anderen können auf dieser Grundlage Risiken unterschiedlicher Technologien miteinander verglichen werden, sofern sie sich identischer Eingangsparameter (Art der Konsequenz, Personendichte) bedienen.

Die in Deutschland übliche Praxis der produktbezogenen Anforderungen (vgl. Kapitel 2.3) verfolgt das Ziel des Ausschaltens des Risikos einer Technologie durch die Vorgabe von Grenzwerten. Durch Einhalten dieser Grenzwerte, die meistens historisch gewachsen sind und nicht mehr zwingend dem aktuellen Stand der Technik entsprechen müssen, gilt eine

Technologie pauschal als „sicher“, wobei keine Aussage über das Risiko oder das verbleibende Restrisiko der Technologie erfolgt. Risiken werden zwar nicht explizit ausgeschlossen, dennoch erfolgt durch diese Anforderungen keine Aussage über die Höhe des Risikos.

Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik zeigt eine Möglichkeit auf, die Sicherheit einer Technologie über die Beurteilung ihres Risikos zu definieren. Hierzu mussten im Vorfeld einige Besonderheiten des risikobasierten Ansatzes erläutert werden:

- Das subjektiv durch die Bevölkerung wahrgenommene Risiko richtet sich nicht nach Stoff- oder Materialgrenzwerten. Vielmehr erfährt das Risiko seine Höhe über das Ausmaß seiner Konsequenzen, wobei die Empfindung der Konsequenzen wiederum vom gegebenen Grundrisiko der betroffenen Personengruppe abhängig ist (vgl. Kapitel 2.4).
- Es wird unterschieden zwischen dem von einer Technologie ausgehenden Individuellen Risiko, also der Eintrittswahrscheinlichkeit einer definierten Konsequenz ohne Berücksichtigung der Anwesenheit von Personen, und dem für die Öffentlichkeit entstehenden Sozialen Risiko, welches den Wert des Risikos an seinem Ausmaß der Konsequenz beurteilt.
- Auch bei dieser Methode der Sicherheitsbeurteilung sind Grenzwerte notwendig, um die Höhe des Risikos zu beurteilen. Hierzu wurde die natürliche Mortalitätsrate zu Grunde gelegt, da diese allgemein akzeptiert wird. Aufbauend auf die Vorgehensweise der Niederlande (vgl. Kapitel 2.5) wurde in dieser Arbeit ein Grenzwert des Individuellen Risikos gesetzt, der um zwei Dekaden geringer ausfällt als die natürliche Mortalitätsrate. Risiken, die diesen Wert übersteigen, werden als zu hoch eingestuft und müssen nach dem ALARP-Prinzip reguliert werden. Das Soziale Risiko findet dadurch Beachtung, dass Konsequenzen höheren Ausmaßes geringere Eintrittswahrscheinlichkeiten auferlegt werden. Zwar wurden nach dieser neu entwickelten Methode wieder „willkürlich“ Grenzwerte gesetzt, die Ergebnisse der Methode liefern allerdings brauchbare Werte des Risikos, welche durch diese Grenzwerte erst beurteilt werden. Durch Ändern der Grenzwerte ließe sich das neue Risiko umgehend an diesen Werten ablesen.

Auf Grundlage des technischen Risikobegriffs (vgl. Kapitel 2.1) wurden in dieser Arbeit die Faktoren Konsequenz und Eintrittswahrscheinlichkeit zur Beschreibung des Risikos zu Grunde gelegt und in Anlehnung an die Vorgehensweise der Risikobeurteilung verschiedener Länder (vgl. Kapitel 2.5) um den Faktor der Anzahl betroffener Personen erweitert (vgl. Kapitel 4.3). Grundgedanke dieses Ansatzes ist es, dass ein Versagen einer Technologie trotz aller Vorgaben und Anforderungen nie mit vollständiger Sicherheit ausgeschlossen werden kann. Der Versagensfall ist statistisch gesehen nur eine Frage der Zeit und soweit als allgemein akzeptabel anzusehen, wie ein akzeptiertes Grenzzisiko nicht überschritten wird. Da nur Risiken identischer Konsequenzen miteinander verglichen werden können, wurde in Anlehnung an die Bestimmung des Individuellen Risikos der einzelne direkte Todesfall als Konsequenz herangezogen (vgl. Kapitel 4.1).

Die Konsequenzen des Druckbehälterversagens, hervorgerufen durch Impact auf den Behälter infolge eines Verkehrsunfalls, ergaben sich nach Kapitel 4.1.1 durch die Druckeinwirkung auf den Menschen sowie durch primären und sekundären Trümmerflug. Die Literatur lieferte Werte der Fatalitätswahrscheinlichkeit des Menschen durch Einwirkung von Überdruck. Dem gegenüber waren für beide Arten des Trümmerflugs keine Werte der Fatalitätswahrscheinlichkeit vorhanden.

Recherchen ergaben, dass beim primären Trümmerflug maximal vier Trümmerstücke entstehen, die „raketen- oder frisbeeartig“ fortgeschleudert werden (vgl. Kapitel 4.1.1). Da diese Auswirkungen nicht allgemeingültig verwendet werden können, wurden die Konsequenzen des primären Trümmerflugs bei der Darstellung des Risikowerts nicht berücksichtigt, allerdings auf diese hingewiesen.

Werte des sekundären Trümmerflugs waren durch die Fachliteratur nicht vorhanden und wurden in dieser Arbeit auf Grund der Wahrscheinlichkeit des Fensterbruchs generiert und auf diese beschränkt (vgl. Kapitel 5.1). Hierbei wurde angenommen, dass mit Abnahme des Überdrucks nicht nur eine Abnahme der Glasbruchwahrscheinlichkeit erfolgt, sondern gleichfalls die kinetische Energie der entstehenden Glassplitter sinkt. Recherchen ergaben Verletzungswahrscheinlichkeiten von dem menschlichen Gewebe vergleichbaren Gewebe durch Glassplitter bei bestimmten Werten des Überdrucks. Aufbauend auf diesen Grundlagen konnten theoretische Werte der Fatalitätswahrscheinlichkeit infolge Glasbruch durch Überdruck generiert werden. Im weiteren Verlauf wurden die Werte der Fatalitätswahrscheinlichkeit infolge Glasbruch durch Überdruck auf die Bereiche innerhalb und außerhalb von Gebäuden unterschieden. Hintergrund hiervon ist, dass die durch den Überdruck beschleunigten Glassplitter sich in Druckausbreitungsrichtung bewegen werden. Aus diesem Grund besteht innerhalb von Gebäuden eine wesentlich höhere Fatalitätswahrscheinlichkeit als außerhalb. Ein nicht berücksichtigter Sonderfall sind durch Überdruck zu Bruch gehende und dann von hohen Gebäuden in die Tiefe fallende Glassplitter. Eine Druckwellenfront weist kurz nach ihrer Spitze einen Bereich mit Unterdruck auf, der in manchen Fällen geeignet ist, Trümmerstücke wie durch einen Sog kurzzeitig gegen die Ausbreitungsrichtung der Druckwellenfront zu bewegen. Somit ist es möglich, dass Glassplitter durch den Überdruck entstehen, dann aber durch den Unterdruck aus einem Gebäude hinaus gesogen werden, wo sie durch die Schwerkraft zu Boden fallen und auf diese Weise Personen verletzen oder töten können.

In einem weiteren Schritt der in dieser Arbeit entwickelten Methodik wurden diese nur punktuell vorhandenen Werte der Fatalitätswahrscheinlichkeit idealisiert, so dass über eine mathematische Funktion jedem Wert des Überdrucks der dazugehörige Wert der Fatalitätswahrscheinlichkeit zugeordnet werden konnte (vgl. Kapitel 5.1.1). Durch das Setzen von Grenzwerten des Überdrucks wurden in Kapitel 5.1.2 Risiko-Zonen geschaffen, in denen bestimmte Fatalitätswahrscheinlichkeiten vorherrschen.

Ein großer Unterschied bei der Betrachtung möglicher Konsequenzen ergibt sich abhängig vom Ort, an welchem sich der Unfall ereignet. So wurde in dieser Arbeit generell zwischen Unfällen innerhalb und außerhalb von Ortschaften aus folgenden Gründen unterschieden.

- Abhängig vom Ort des Szenarios ergibt sich eine unterschiedliche Anzahl von anwesenden Personen. Über die in den mit unterschiedlichen Fatalitätswahrscheinlichkeiten behafteten Risiko-Zonen anwesenden Personen ergibt sich somit die Anzahl der durch das Ereignis Druckbehälterversagen betroffenen Personen.
- In Abhängigkeit vom Ort des Szenarios ergeben sich unterschiedliche Eintrittswahrscheinlichkeiten von Verkehrsunfällen, die geeignet sind, zu einer Druckbehälter-schädigung zu führen.

In Kapitel 5.2.1 ließen sich, an Hand von Unfalldaten des Statistischen Bundesamtes, Werte der Unfallwahrscheinlichkeit der als für diese Arbeit relevant eingestuften Unfälle erzielen. Weiterhin wurde das Verhältnis der Zulassungszahlen von erdgasbetriebenen Kraftfahrzeugen zu der Zahl der Gesamtzulassungen hergestellt (vgl. Kapitel 5.2.2). Hieraus ließ sich

ableiten, dass das Verhältnis der an relevanten Verkehrsunfällen beteiligten erdgasbetriebenen Kraftfahrzeuge einen vergleichbaren Wert annehmen wird. Auf diese Wahrscheinlichkeiten aufbauend, wurde die Wahrscheinlichkeit der Schädigung des Druckbehälters durch einen äußeren Einfluss betrachtet. Hier war durch die Literatur ein Wert von einem Prozent Druckbehälterschädigung durch Impact-Unfälle gegeben. Mit Hilfe der Poisson-Verteilung wurde in Kapitel 5.2.3 ein 95 %-Perzentil berechnet, welches Auskunft über die Anzahl der an den betrachteten Unfällen beteiligten CNG-Fahrzeuge liefert. Da die CNG-Zulassungsdichte ein zeitlich schwankender Wert ist, sollte dieser für die Betrachtung neuer Zeiträume aktualisiert werden. Unter Zuhilfenahme der Poisson-Verteilung wurde abermals ein 95 %-Perzentil berechnet, welches Auskunft über die Anzahl der bei relevanten Unfällen beschädigten Druckbehälter liefert.

Bezogen auf die Bevölkerungsdichte Deutschlands wurde mit dieser Methodik das Individuelle Risiko ermittelt, beim Versagen eines Druckbehälters in einem erdgasbetriebenen Kraftfahrzeug anwesend zu sein (vgl. Tabelle 7.2, Kapitel 7).

Durch Kombination des Individuellen Risikos mit der Dichte anwesender Personen wurde in Kapitel 7, in Abhängigkeit vom Ort des Szenarios, das Soziale Risiko des Druckbehälterversagens in erdgasbetriebenen Kraftfahrzeugen ermittelt.

Dieser kombinierte Wert aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Konsequenz des Druckbehälterversagens in erdgasbetriebenen Kraftfahrzeugen im Straßenverkehr wurde zur Beurteilung in eine F-N-Kurve eingesetzt (vgl. Abbildung 7.1, Kapitel 7). Diese gibt in Abhängigkeit der beiden Faktoren Grenzwerte an, ab denen Risiken gesellschaftlich akzeptabel oder unakzeptabel sind oder sich in einem dazwischenliegenden Bereich befinden, in dem das Risiko zwar akzeptabel ist, aber so weit wie unter dem Aspekt der Maßhaltigkeit möglich reduziert werden muss.

Der Vergleich der regelwerksbasierten produktbezogenen Methode mit der hier vorgestellten anwendungsbezogenen und risikobasierten Methode zeigt die Ähnlichkeit der Ergebnisse der Beurteilung auf. Aus diesem Grund wird der Lösungsansatz der hier entwickelten Methode als richtig angesehen, womit sich eine alternative Möglichkeit der Risikoanalyse und -bewertung von Druckbehältern im Straßenverkehr ergibt. Die ermittelten Konsequenzen geben eine rechnerische, auf Statistiken basierende Auskunft über die Höhe des durchschnittlich zu erwartenden Sozialen Risikos. Wie bei allen auf Statistiken basierenden Berechnungen können einzelne Ereignisse, deren Konsequenzen weit über den berechneten Durchschnittswerten liegen, nicht ausgeschlossen werden. Diese einzelnen Ereignisse führen dazu, dass Technologien, deren Soziales Risiko nach objektiven Maßstäben als allgemein akzeptabel gewertet wird, über Medienberichte in den Fokus der Öffentlichkeit gelangen und dort eine subjektive Beurteilung erfahren.

Abschließend kann gesagt werden, dass das Risiko von in dieser Arbeit betrachteten Druckbehältern der Größen 35 bis 80 Liter für alle gewählten Szenarien als akzeptabel bewertet werden kann (vgl. Kapitel 7.4).

Darüber hinaus kann die Sicherheit des Druckbehälters theoretisch optimiert werden (vgl. Kapitel 6.3). Bei der Erhöhung des Behälterinnendrucks um 50 % und gleichzeitiger Reduzierung des Behältervolumens um 30 % bleibt die Reichweite der Konsequenzen identisch. Da mit Zunahme des Innendrucks gleichfalls die Widerstandsfähigkeit des Druckbehälters gegenüber Impacteinwirkung steigt [Mai07b], erfolgt auf diese Weise eine Reduzierung des Risikos durch Verringerung der Eintrittswahrscheinlichkeit des Druckbehälterversagens. Allerdings werden nach aktuellem Stand der Anforderungen an Druckbehälter

Wanddicken in Abhängigkeit vom Behälterinnendruck gefordert, wodurch eine, auf das Volumen des Behälters bezogene, Erhöhung des Gewichts erfolgt. Die Erhöhung der Sicherheit von Druckbehältern geht demnach mit einer Verschlechterung des Gewichts und der Tankreichweite einher. Positive wie negative Aspekte dieser Zusammenhänge müssen im Einzelfall abgewogen werden.

10.2. Weiterentwicklung

Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik schafft eine Möglichkeit der anwendungsbezogenen Risikobeurteilung technischer Systeme. Die Weiterentwicklung dieser Methodik bezieht sich auf die beiden Faktoren der Risikobeurteilung, die Konsequenz und die Eintrittswahrscheinlichkeit.

Bei der Konsequenz steht insbesondere die bisher nicht durch Versuche überprüfte Datenlage zu Konsequenzen durch sekundären Trümmerflug im Vordergrund. Diese Datenlage ließe sich durch aufwendige Versuchsreihen verifizieren. Ziel dieser Versuche müsste es sein, die Auswirkungen von Glassplittern auf den Menschen zu untersuchen. Hierzu könnten Druckwellen auf genau definierte Fensterscheiben abgegeben werden, wobei der Druck an der Fensterscheibe durch Druckaufnehmer gemessen wird. Hierdurch könnten sich zum einen die aus der Literatur entnommenen Werte der Glasbruchwahrscheinlichkeit verifizieren lassen, zum anderen könnten auf diese Weise die Auswirkungen des Glasbruchs auf dem menschlichen Gewebe ähnlichen Materialien untersucht werden. Somit ließen sich Verletzungs- oder Fatalitätswahrscheinlichkeiten des Menschen durch Glassplitterflug infolge des Überdrucks generieren. Als dem menschlichen Gewebe ähnliches Material könnten Gelatine oder Glycerinseife nach [KCRT08] verwendet werden, wobei die Wirkung der Splitter nach den dort beschriebenen Methoden ermittelt werden kann. Des Weiteren bietet es sich an, die kinetische Energie von primären Trümmerstücken in Abhängigkeit zum Abstand vom Druckbehälter zu ermitteln. So könnten in Abhängigkeit von der im Druckbehälter gespeicherten Energiemenge (gegeben aus Behälterinnendruck und -volumen), Abstände vom Druckbehälter ermittelt werden, in denen eine bestimmte Fatalitätswahrscheinlichkeit durch primäre Trümmerstücke vorliegt.

Aus dieser Arbeit wird deutlich, dass die Art der Datenerfassung bezüglich der Risikobeurteilung von Druckbehältern im Straßenverkehr erweitert werden müsste. Die Perzentile der auf das Chassis bei einem Unfall einwirkenden Energien sind bekannt. Nicht bekannt z. B. sind die Perzentile der einwirkenden Energie auf den Druckbehälter bei diesen Unfällen. Sofern diese ermittelt werden könnten, wäre es möglich, den Druckbehälter in Prüfungen mit eben diesen einwirkenden Kräften zu belasten, um so, über eine lange Reihe von Tests, seine Versagenswahrscheinlichkeit bezüglich dieser Energien zu erhalten. Umgekehrt wären Testreihen möglich, welche Perzentile der Druckbehälterschädigung bei einwirkenden Energien angeben. Der Vergleich dieser Werte mit den real auf den Druckbehälter einwirkenden Energien würde ebenfalls zu Werten der Versagenswahrscheinlichkeit durch Unfälle führen.

Akzeptanz technischer Systeme lässt sich nicht erzwingen. Mit der in dieser Arbeit entwickelten Methodik können Grenzwerte der gesellschaftlichen Akzeptanz auf technische Systeme übertragen werden. Die letztendliche Akzeptanz eines technischen Systems kann allerdings erst durch entsprechende Risikokommunikation gewährleistet werden.

Literaturverzeichnis

- [12B80] *Zwölfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Störfall-Verordnung) - 12. BImSchV.* (BGBl. I S. 772), 27. Juni 1980
- [2nd79] *Second Report.* Advisory Committee on Major Hazards, Crown copyright, 1979. – ISBN 0 11 883299 9
- [Aci03] ACIKALIN, Hatice A.: *Dynamische Simulation thermisch initiiertes Domino-Effekte*, Fakultät III - Prozesswissenschaften der Technischen Universität Berlin, Diss., 2003
- [ADA11] ADAC Crash-Test: Crash Erdgasauto, www.adac.de, Letzter Zugriff: 22.06.2011; 12:24 Uhr
- [ADN06] *European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Inland Waterways ADN.* ECE/TRANS/190 (Vol. 1) , ISBN 92-1-139118-0 , UNITED NATIONS , New York and Geneva, 2006. – ISBN 92-1-139118-0
- [ADR05] *Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Strasse (ADR).* Abgeschlossen in Genf am 30. September 1957. Von der Bundesversammlung genehmigt am 4. Dezember 1969. Schweizerische Ratifikationsurkunde hinterlegt am 20. Juni 1972. In Kraft getreten für die Schweiz am 20. Juli 1972. Anhänge A und B geändert am 29. Januar 1968, 26. Oktober 1970 und 30. Dezember 1971 (Stand am 8. März 2005), 2005
- [AIC89] *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis.* Centre for Chemical Process Safety (CCPS), AIChE, New York, 1989
- [Arb09] *Arbeitsschutzgesetz vom 7. August 1996 (BGBl. I S. 1246), das zuletzt durch Artikel 15 Absatz 89 des Gesetzes vom 5. Februar 2009 (BGBl. I S. 160) geändert worden ist.* 2009
- [ASU05] *Erdgas für Haus und Auto - Vorteile für die Umwelt.* Informationsbroschüre der ASUE - Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. , Bismarckstraße 16 , 67655 Kaiserslautern, 2005
- [Bar78] BARTKNECHT, Wolfgang: *Explosionen - Ablauf und Schutzmaßnahmen.* Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1978. – ISBN 3-540-08675-7
- [BCW⁺83] BAKER, W. ; COX, P. ; WESTINE, P. ; KULESZ, J. ; STREHLOW, R.: *Explosion Hazards and Evaluation.* In: *Fundamental Studies in Engineering* 5 (1983)

- [Bec87] BECK, Ulrich: *Risikogesellschaft - Auf dem Weg in eine andere Moderne*. Erste Auflage. Suhrkamp Verlag, Frankfurt am Main, 1987
- [Bec93a] BECHMANN, Gotthard: Einleitung: Risiko - ein neues Forschungsfeld? In: BECHMANN, Gotthard (Hrsg.): *Risiko und Gesellschaft. Grundlagen und Ergebnisse interdisziplinärer Risikoforschung*. Westdeutscher Verlag GmbH, Opladen, 1993
- [Bec93b] BECK, Ulrich: Politische Wissenstheorie der Risikogesellschaft. In: BECHMANN, Gotthard (Hrsg.): *Risiko und Gesellschaft. Grundlagen und Ergebnisse interdisziplinärer Risikoforschung*. Westdeutscher Verlag GmbH, Opladen, 1993
- [Ber85] BERG, A. C. d.: The Multi-Energy-Method - A framework for vapour cloud explosion blast prediction. In: *Journal of Hazardous Materials* 12 (1985)
- [Bev09] *Bevölkerungsstand Deutschland am 31.12.2009*. Statistik des Statistischen Bundesamtes. <http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Navigation/Statistiken/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/Bevoelkerungsstand.psml>. Version: 2009. – letzter Zugriff: 20.07.2011, 16.45 Uhr
- [BFR68] BOWEN, I. G. ; FLETCHER, E. R. ; RICHMOND, D. R.: Estimate of Man's Tolerance to the Direct Effects of Air Blast / Headquarters Defense Atomic Support Agency, Washington D.C. 20305, Lovelace Foundation for Medical Education and Research, Albuquerque, New Mexico 87108. 1968. – Forschungsbericht
- [BGB58] *Übereinkommen über die Annahme einheitlicher Bedingungen für die Genehmigung der Ausrüstungsgegenstände und Teile von Kraftfahrzeugen (Motorfahrzeugen) und über die gegenseitige Anerkennung der Genehmigung vom 20. März 1958 (BGBl. 1965 II S. 858)*. 20. März 1958
- [BGR04] *BGR 194 - Einsatz von Gehörschutz*. Berufsgenossenschaftliche Regeln für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit (BGR) [bisherige ZH 1/705] vom April 1998 , Aktualisierte Nachdruckfassung, Oktober 2004
- [BM05] BJERKETVEDT, D. ; MJAAVATTEN, A.: A hydrogen air explosion in a process plant: a case history. In: *5th International Conference on Hydrogen Safety*, 2005
- [BMV11] *Internationale Harmonisierung der technischen Vorschriften für Kraftfahrzeuge*. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2011. – www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB-LA/internationale-harmonisierung-der-technischen-vorschriften-fuer-kraftfahrzeuge.html
- [Boh98] BOHNENBLUST, H.: Risk-based decision making in the transportation sector. In: JORISSEN, R.E. (Hrsg.) ; STALLEN, P.J.M. (Hrsg.): *Quantified Societal Risk and Policy Making*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1998
- [Bot00] BOTTELBERGHS, P.H.: Risk analysis and safety policy developments in The Netherlands. In: *Journal of Hazardous Materials* 71 (2000), S. 59–84

- [Bra07] AUFSICHTS- UND DIENSTLEISTUNGSDIREKTION , REFERAT 22 BRAND- UND KATASTROPHENSCHUTZ: Ereignisse zur Brandbekämpfung und Hilfeleistung sowie Einsätze der Feuerwehren in Rheinland-Pfalz , Jahresstatistik 2006. 2007. – Forschungsbericht
- [Bra10a] MINISTERIUM DES INNERN DES LANDES BRANDENBURG: Brand- und Katastrophenschutz, Jahresbericht 2009. 2010. – Forschungsbericht. – Henning-von-Tresckow-Straße 9-13, 14467 Potsdam
- [Bra10b] REFERAT 44 - BRANDSCHUTZ, INNENMINISTERIUM FREISTAAT THÜRINGEN: Einsätze im Brandschutz, in der Allgemeinen Hilfe und im Katastrophenschutz , Jahresbericht 2009. 2010. – Forschungsbericht
- [Bra10c] MINISTERIUM FÜR INNERES UND KOMMUNALES DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN: Gefahrenabwehr in Nordrhein-Westfalen, Jahresbericht 2009. 2010. – Forschungsbericht. – Haroldstraße 5 , 40213 Düsseldorf
- [Bro07] *Brockhaus - Die Enzyklopädie: in 30 Bänden. 21., neu bearbeitete Auflage.* F.A. Brockhaus AG, Leipzig, Mannheim, 2007
- [Bun] *Bundestag-Drucksache 13/3540*
- [BUW96] *Beurteilungskriterien I zur Störfallverordnung StFV - Richtlinien für Betriebe mit Stoffen, Erzeugnissen oder Sonderabfällen.* Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Bern, 1996
- [Bve78] *BverfGE 49, 89 - Kalkar I.* Bundesverfassungsgericht, 2BvL8/77, 8. August 1978
- [BW92] BOSCH, C.J.H. van d. (Hrsg.) ; WETERINGS, R.A.P.M. (Hrsg.): *Methods for the calculation of physical effects.* 2nd Edition. The Hague : Report CPR 14E from the Committee for the Prevention of Disasters, Ministry of Social Affairs, 1992
- [Can78] HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE, CANVEY; HM STATIONARY OFFICE, LONDON: An Investigation of Potential Hazards from Operations in the Canvey Island / Thurrok Area. 1978. – Forschungsbericht
- [CH07] CADWALLADER, Lee C. ; HERRING, J. S.: *Hydrogen and Gaseous Fuel Safety and Toxicity.* P.O. Box 1625 MS 3860, Idaho Falls, ID 83415-3860 : Idaho National Laboratory, 2007. – Lee.Cadwallader@inl.gov
- [Cha74] CHAPMAN, R.: Use and Abuse of Accident Rates. In: *Surveyor* 16 (1974)
- [Cla72] CLANCEY, J.: Diagnostic features of explosion damage. In: *6th Int. Meeting of Forensic Sciences, Edinburgh, 1972*
- [CMV04a] *Canada Motor Vehicle Safety Regulation Standard No. 301.1: LPG Fuel system integrity.* Transport Canada. www.tc.gc.ca. Version: 28 February 2004
- [CMV04b] *Canada Motor Vehicle Safety Regulation Standard No. 301.2: CNG Fuel system integrity.* Transport Canada. www.tc.gc.ca. Version: 28 February 2004

- [CNG11a] *ÖAMTC Crast-Test: Erdgasauto im Crashtest*. <http://www.oeamtc.at/?id=2500%2C1112757%2C%2C>. Version: 2011. – Letzter Zugriff: 22.06.2011; 13:21 Uhr
- [CNG11b] *CNG - Fahren mit Erdgas*. Fachverband der Gas- und Wärmeversorgungsunternehmen. <http://www.erdgasautos.at/presse/55/>. Version: 2011. – Letzter Zugriff: 22.06.2011; 13:00 Uhr
- [CPR92] *Methods for the determination of possible damage*. 1st Edition. The Hague : Report CPR 16E from the Committee for the Prevention of Disasters, Ministry of Social Affairs, 1992
- [Cra26] CRANZ, C.: *Lehrbuch der Ballistik, Zweiter Band - Innere Ballistik*. Verlag Julius Springer, Berlin, 1926
- [Dam11] *Die Entwicklung der Rechtsgrundlagen für die Bauvorschriften von Druckbehältern und Dampfkesseln*. http://www.druckgeraete-online.de/seiten/recht2_1.htm. Version: 2011
- [DIN81] *DIN 25424: Fehlerbaumanalyse*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Beuth-Verlag GmbH, 1981
- [DIN85] *DIN 2541: Ereignisbaumanalyse, Verfahren, graphische Symbole und Auswertung*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Beuth-Verlag GmbH, 1985
- [DIN87] *DIN VDE 31000 - 2: Allgemeine Leitsätze für das sicherheitsgerechte Gestalten technischer Erzeugnisse; Begriffe der Sicherheitstechnik; Grundbegriffe*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Beuth-Verlag GmbH, Dezember 1987
- [DIN94] *DIN V 19250: Leittechnik; Grundlegende Sicherheitsbetrachtungen für MSR-Schutzeinrichtungen*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Beuth-Verlag GmbH, Mai 1994
- [DIN97] *DIN 51 857: Gasförmige Brennstoffe und sonstige Gase - Berechnung von Brennwert, Heizwert, Dichte, relativer Dichte und Wobbeindex von Gasen und Gasgemischen*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Beuth-Verlag GmbH, März 1997
- [DIN00] *DIN EN 12150-1: Glas im Bauwesen -Thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheibensicherheitsglas - Teil 1: Definition und Beschreibung*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Beuth-Verlag GmbH, November 2000
- [DIN01a] *DIN EN ISO 11439: Gasflaschen - Gasflaschen zur Mitführung von verdichtetem Erdgas als Treibstoff für Kraftfahrzeuge (ISO 11439:2000) Deutsche Fassung EN ISO 11439:2000*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Beuth-Verlag GmbH, Juni 2001
- [DIN01b] *DIN ISO 31000 Entwurf: Risikomanagement - Grundsätze und Leitlinien*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Beuth-Verlag GmbH, Januar 2001

- [DIN02] *DIN IEC 62 198: Risikomanagement für Projekte - Anwendungsleitfaden*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Beuth-Verlag GmbH, September 2002
- [DIN05] *DIN EN 61511 (VDE 0810): Funktionale Sicherheit - Sicherheitstechnische Systeme für die Prozessindustrie*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Beuth-Verlag GmbH, Mai 2005
- [DIN08] *DIN 51 624: Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge - Erdgas - Anforderungen und Prüfverfahren*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Beuth-Verlag GmbH, Februar 2008
- [Dit96] DITLEVSEN, Ove: Risk Acceptance Criteria and/or Decision Optimization, 1996. – Reprint of keynote paper presented at 15th IABSE Congress in Copenhagen: Structural Engineering in consideration of Economy, Environment and Energy
- [DOE81] US DEP. OF ENERGY, ALBUQUERQUE OPERATIONS OFFICE, AMARILLO AREA OFFICE: A Manual for the prediction of blast and fragment loadings on structures, Rep. No. DOE/TIC-11268. Amarillo, Texas, August 1981. – Forschungsbericht
- [Dra04] *Guidance on the Duty of Accountability for Societal Risk (Draft)*. Ministry for Home Affairs, Ministry for Housing, Spatial Planning and the Environment, August 2004. – Internet version
- [Dro89] DROSDOWSKI, G. (Hrsg.): *Duden - Etymologie: Herkunftswörterbuch der deutschen Sprache*. 2. Auflage. Dudenverlag, Mannheim, 1989
- [Dru99] *Verordnung über Druckbehälter, Druckgasbehälter und Füllanlagen (Druckbehälterverordnung - DruckbehV)*. Bundesgesetzblatt Jahrgang 1999 Teil I Nr. 1436, ausgegeben zu Bonn, 23. Juni 1999
- [DSA05] *Deliverable D SA 3 SP SAR: Real world accidents and current protocols as load cases for the FEM evaluation of the crash safety requirements*. 14. November 2005. – Project No.: 502667, Project acronym: STORHY, Project title: Hydrogen Storage Systems for Automotive Application - unveröffentlicht
- [Dud03] *Duden - Deutsches Universalwörterbuch A-Z*. 5., überarbeitete Auflage. Dudenverlag, Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich, 2003
- [Dui09] DUIJM, Nijs J.: Acceptance criteria in Denmark and the EU / Danmarks Tekniske Universitet Institut for Planlægning Innovation og Ledelse, Danish Ministry of the Environment, Environmental Protection Agency. 2009. – Forschungsbericht. – Environmental Project No. 1269 2009 Miljøprojekt
- [DVF11] DVFG - Deutscher Verband Flüssiggas e. V., <http://www.dvfg.de/de/glossar/h.html/heizwert>, letzter Zugriff: 28.06.2011; 16:12 Uhr

- [ECE95] *ECE Regelung Nr. 95: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeuge hinsichtlich des Schutzes der Insassen bei einem Seitenaufprall (einschließlich einer Korrektur; zurückzuführen auf die Verwahrermitteilung C.N.213.1995.TREATIES-42)*. 6. Juli 1995
- [ECE03] *ECE Regelung Nr. 34: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der Verhütung von Brandgefahren*. www.unece.org. Version: 31. Oktober 2003
- [ECE06] *ECE Regelung Nr. 67: Einheitliche Bedingungen über die: I. Genehmigung zur speziellen Ausrüstung von Kraftfahrzeugen, in deren Antriebssystem verflüssigte Gase verwendet werden II. Genehmigung eines Fahrzeugs, das mit der speziellen Ausrüstung für die Verwendung von verflüssigten Gasen in einem Antriebssystem ausgestattet ist, in Bezug auf den Einbau dieser Ausrüstung*. 18. Januar 2006
- [ECE08] *Regelung Nr. 110 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) - Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung: I. Der speziellen Bauteile von Kraftfahrzeugen, in deren Antriebssystem komprimiertes Erdgas (CNG) verwendet wird II. Von Fahrzeugen hinsichtlich des Einbaus spezieller Bauteile eines genehmigten Typs für die Verwendung von komprimiertem Erdgas (CNG) in ihrem Antriebssystem*. 14. März 2008
- [EIG01] *Determination of Safety Distances*. European Industrial Gases Association, IGC Doc 75/01/E/rev. <http://www.eiga.org>. Version: 2001
- [EM11] ERDGAS-MOBIL: *Internetbeitrag*. <http://www.erdgas-mobil.de/privatkunden/guenstig/>. Version: 2011
- [EM12] <http://www.erdgas-mobil.de/>
- [EOGCK09] ERDGAS OBERÖSTERREICH GMBH & CO KG, OÖ. Ferngas A.: *Nichts leichter als günstig fahren. Erdgas als Kraftstoff*. <http://www.erdgasautos.at/presse/55/>. Version: Februar 2009. – Letzter Zugriff: 22.06.2011; 13:30 Uhr
- [Erd11] ERDGASDRIVE: *Sparsam. Sicher. Sauber. Alle Infos über Erdgas als Kraftstoff*. www.erdgasdrive.at. Version: 2011. – Letzter Zugriff: 22.06.2011; 13:00 Uhr
- [erd12a] <http://www.erdgas-fahren.de/>
- [erd12b] <http://www.erdgasfahren.ch/kaufen/erdgas-fahrzeuge/uebersicht-personenwagen/>
- [FD08] FELGENTREFF, Carsten ; DOMBROWSKY, Wolf R.: *Hazard-, Risiko- und Katastrophenforschung*. In: FELGENTREFF, Carsten (Hrsg.) ; GLADE, Thomas (Hrsg.): *Naturrisiken und Sozialkatastrophen*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008. – ISBN 978-3-8274-1571-4
- [FDG⁺05] FÜRST, S. ; DUB, M. ; GRUBER, M. ; LECHNER, W. ; MÜLLER, C.: *Safety of hydrogen-fueled motor vehicles with IC engines*. In: *5th International Conference on Hydrogen Safety, 2005*

- [Fis99] FISCHER, K.-F.: *Taschenbuch der Technischen Formeln*. Fachbuchverlag Leipzig, 1999
- [FLS⁺81] FISCHHOFF, Baruch ; LICHTENSTEIN, Sarah ; SLOVIC, Paul ; DERBY, Stephen L. ; KENNEY, Ralph L.: *Acceptable Risk*. Cambridge University Press, 1981
- [FMV04a] *Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 301: Fuel system integrity*. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). www.fmcsa.dot.gov. Version: 19 August 2004
- [FMV04b] *Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 303: Fuel system integrity of compressed natural gas vehicle*. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). www.fmcsa.dot.gov. Version: 19 August 2004
- [Fra89] FRANCK, Eberhard: Risikobewertung in Technik und Gesellschaft. In: HOSEMANN, Gerhard (Hrsg.): *Risiko in der Industriegesellschaft: Analysen, Vorsorge und Akzeptanz*. Universitätsbund Erlangen-Nürnberg e.V, Erlangen, 1989
- [FSL79] FISCHHOFF, Baruch ; SLOVIC, Paul ; LICHTENSTEIN, Sarah: Which Risks Are Acceptable? In: *Environment* Vol. 21 (1979)
- [Gan11] GANZ, Christian: *Die Risikoanalyse mittels Konsequenz und Eintrittswahrscheinlichkeit - Methodik am Beispiel des Druckbehälterversagens im Erdgasfahrzeug*. Anlage zum Beitrag Ganz/Deuerler - Die Risikoanalyse mittels Konsequenz und Eintrittswahrscheinlichkeit, Technische Sicherheit November/Dezember 2011, Dezember 2011
- [Gan12a] GANZ, Christian: *Die Risikoanalyse mittels Konsequenz und Eintrittswahrscheinlichkeit - Methodik am Beispiel des Druckbehälterversagens im Erdgasfahrzeug*. Bibliothek der Bergischen Universität Wuppertal, 01. März 2012. – URN (NBN): [urn:nbn:de:hbz:468-20120301-143051-0](http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:468-20120301-143051-0)
- [Gan12b] GANZ, Christian: *Risikoanalysen - Vergleich der Methodik in Deutschland zum internationalen Umfeld*. Anlage zum Beitrag Ganz/Deuerler - Andere Länder, andere Sitten, Gefährliche Ladung 02/12, 01 2012
- [Gan12c] GANZ, Christian: *Risikoanalysen im internationalen Vergleich*. Bibliothek der Bergischen Universität Wuppertal, 01. März 2012. – URN (NBN): [urn:nbn:de:hbz:468-20120301-143325-2](http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:468-20120301-143325-2)
- [GD77] GLASSTONE, S. ; DOLAN, P. J.: *The effects of nuclear weapons / U.S. Department of Defense and the Energy Research and Development Administration*. 1977 (3rd Edition). – Forschungsbericht
- [GD06] GEBBEKEN, Norbert ; DÖGE, Thorsten: Vom Explosionsszenario zur Bemessungslast. In: *Der Prüflingenieur* (Oktober 2006), S. 42–52
- [GD11a] GANZ, Christian ; DEUERLER, Friederike: Andere Länder, andere Sitten (I.). In: *Gefährliche Ladung* 12 (2011), S. 18–23

- [GD11b] GANZ, Christian ; DEUERLER, Friederike: Die Risikoanalyse mittels Konsequenz und Eintrittswahrscheinlichkeit - Methodik am Beispiel des Druckbehälterversagens - Teil 2: Eintrittswahrscheinlichkeit. In: *Technische Sicherheit* (November/Dezember 2011), S. 49–53
- [GD11c] GANZ, Christian ; DEUERLER, Friederike: Die Risikoanalyse mittels Konsequenz und Eintrittswahrscheinlichkeit - Methodik am Beispiel des Druckbehälterversagens - Teil 1: Konsequenz. In: *Technische Sicherheit* (Oktober 2011), S. 53–58
- [GD12a] GANZ, Christian ; DEUERLER, Friederike: Andere Länder, andere Sitten (II.). In: *Gefährliche Ladung* 01 (2012), S. 30–32
- [GD12b] GANZ, Christian ; DEUERLER, Friederike: Andere Länder, andere Sitten (III.). In: *Gefährliche Ladung* 02 (2012), S. 26–27
- [GGV06] *Gefahrgutverordnung Straße und Eisenbahn in der Fassung der Bekanntmachung vom 24. November 2006 (BGBl. I S. 2683)*. (BGBl. I Nr. 55 vom 6.12.2006, S. 2683; 17.06.2009, S. 1389 09 aufgehoben) Gl.-Nr.: 9241-23-25, ausgegeben zu Bonn, 06. Dezember 2006
- [GGV09] *Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, mit Eisenbahnen und auf Binnengewässern Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt - GGVSEB vom 17. Juni 2009*. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2009 Teil I Nr. 33, ausgegeben zu Bonn, 24. Juni 2009
- [Gia97] GIAMPIERO, Beroggi E.: Risk Assessment in the Netherlands. In: *discussion paper, No. 91* (1997), November. – ISBN 3 - 932013 - 14 - X , ISSN 0945 - 9553
- [Gla62] GLASSTONE: *The effect of nuclear weapons*. US Atomic Energy Commission, Washington, 1962
- [Gru10] *Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland in der im Bundesgesetzblatt Teil III, Gliederungsnummer 100-1, veröffentlichten bereinigten Fassung, das zuletzt durch das Gesetz vom 21. Juli 2010 (BGBl. I S. 944) geändert worden ist*. 2010
- [Hai55] HAID, A.: Fernwirkungen von Detonationen. In: *Explosivstoffe* (1955), S. 139
- [Har99] HARTWIG, Sylvius: *Die Risikoanalyse als Hilfe für Sicherheitsentscheidungen - gezeigt am Beispiel schwerer Gase und des Chlorstoffzyklus*. Erich Schmidt Verlag GmbH & Co., Berlin, 1999. – ISBN 3 503 04827 8
- [Hau11] HAUPTMANN, Ulrich: *mündliche Aussage beim 71. Sicherheitswissenschaftliches Kolloquium, Bergische Universität Wuppertal*. 10. Mai 2011
- [Hei02] HEILMAN, Klaus: *Das Risiko der Sicherheit*. Stuttgart : Hirzel Verlag, 2002. – ISBN 3-7776-1148-4

- [Hel91] HELTEN, Elmar: Die Erfassung und Messung des Risikos. In: GROSSE (Hrsg.) ; MÜLLER (Hrsg.): *Versicherungszyklopädie Band 2 - Versicherungsbetriebslehre*. Gabler Wiesbaden, 1991
- [HHW87] HAUPTMANN, U. ; HERTTRICH, M. ; WERNER, W.: *Technische Risiken - Ermittlung und Beurteilung*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1987. – ISBN 3-540-18185-7
- [Hil93] HILLER, Petra: *Der Zeitkonflikt in der Risikogesellschaft : Risiko und Zeitorientierung in rechtsförmigen Verwaltungsentscheidungen*. Duncker und Humblot, Berlin, 1993
- [HIP08a] STATE OF NEW SOUTH WALES THROUGH THE DEPARTMENT OF PLANNING: Hazardous Industry Planning Advisory Paper No 10, Land Use Safety Planning (Consultation Draft). 23-33 Bridge Street, Sydney NSW Australia 2000, Juli 2008. – Forschungsbericht
- [HIP08b] STATE OF NEW SOUTH WALES THROUGH THE DEPARTMENT OF PLANNING: Hazardous Industry Planning Advisory Paper No 4 , Risk Criteria for Land Use Safety Planning (Consultation Draft). 23-33 Bridge Street, Sydney NSW Australia 2000, Juli 2008. – Forschungsbericht. – ISBN 978 0 7347 5249 9
- [Hos92] HOSEMANN, Gerhard: Methodisches Konzept technischer Sicherheit. In: LINDACKERS, Karl H. (Hrsg.): *Sicherheitsaspekte technischer Standards - Ein europäischer Vergleich am Beispiel druckführender Behältnisse*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1992
- [HR85] HOLDEN, P. L. ; REEVES, A. B.: Fragment hazards from pressurized liquefied gas vessels. In: *The assessment and control of major hazards*, European Federation of Chemical Engineering, EFCE Publication Series No. 42, The Institution of Chemical Engineers, 1985. – ISBN 0 85295 189 2
- [HSE01] HSE: *Reducing Risks, Protecting People*. Health & Safety Executive, Crown copyright, 2001. – ISBN 0 7176 2151 0
- [HSE07] HSE: *Proposals for revised policies to address societal risk around onshore non-nuclear major hazard installations*. Health & Safety Executive, Crown copyright, 2007
- [Iss03] UK OFFSHORE OPERATORS ASSOCIATION LIMITED: Fire and explosion guidance - Part 1: Avoidance and mitigation of explosions, ISSUE 1. October 2003. – Forschungsbericht
- [JGV03] JONKMANN, S.N. ; GELDER, P.H.A.J.M. van ; VRIJLING, J.K.: An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage. In: *Journal of Hazardous Materials A99* (2003), S. 1–30
- [JS93a] JUNGERMANN, Helmut ; SLOVIC, Paul: Charakteristika individueller Risikowahrnehmung. In: KROHN, Wolfgang (Hrsg.): *Risikante Technologien - Reflexion und Regulation*. Erste Auflage. Suhrkamp Verlag, Frankfurt am Main, 1993

- [JS93b] JUNGERMANN, Helmut ; SLOVIC, Paul: Die Psychologie der Kognition und Evaluation von Risiko. In: BECHMANN, Gotthard (Hrsg.): *Risiko und Gesellschaft. Grundlagen und Ergebnisse interdisziplinärer Risikoforschung*. Westdeutscher Verlag GmbH, Opladen, 1993
- [Kah11] KAHL, Anke: *Risikowahrnehmung und -kommunikation im Gesundheits- und Arbeitsschutz: Eine soziologische Betrachtung*. Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften, 2011. – Habilitationsschrift, Technische Universität Dresden, Fakultät für Maschinenwesen, Institut für technische Logistik & Arbeitssysteme; ISBN: 978-3-8381-2434-6
- [KB10] KRAFTFAHRT-BUNDESAMT: *Zulassungszahlen CNG-Kfz*. Januar 2010. – unveröffentlichte Statistik des Kraftfahrt-Bundesamts
- [KB11a] KRAFTFAHRT-BUNDESAMT: *Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern am 1. Januar 2011 nach Bundesländern und Fahrzeugklassen absolut*. http://www.kba.de/cln_015/nn_191172/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/FahrzeugklassenAufbauarten/2011__b__fzkl__eckdaten__absolut.html. Version: 2011. – letzter Zugriff: 28. April 2011, 15.15 Uhr
- [KB11b] KRAFTFAHRT-BUNDESAMT: *Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern in den Jahren 1955 bis 2011 nach Fahrzeugklassen*. http://www.kba.de/cln_030/nn_191172/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/FahrzeugklassenAufbauarten/b__fzkl__zeitreihe.html. Version: 2011. – letzter Zugriff: 02. August 2011, 11.25 Uhr
- [KB11c] KRAFTFAHRT-BUNDESAMT: *Bestand an Personenkraftwagen am 1. Januar 2011 nach Bundesländern und Kraftstoffarten absolut*. http://www.kba.de/cln_015/nn_269000/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/EmissionenKraftstoffe/2011__b__emi__eckdaten__absolut.html. Version: 2011. – letzter Zugriff: 02. August 2010, 11.40 Uhr
- [KCRT08] KNEUBUEHL, Beat P. ; COUPLAND, Robin M. ; ROTHSCILD, Markus A. ; THALI, Michael J. ; KNEUBUEHL, Beat P. (Hrsg.): *Wundballistik - Grundlagen und Anwendungen*. 3., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Springer Medizin Verlag, Heidelberg, 2008. – ISBN 978-540-79008-2
- [Ker79] *Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke - Eine Untersuchung zu dem durch Störfälle in Kernkraftwerken verursachten Risiko - Hauptband*. 2., unveränderte Auflage. Verlag TÜV Rheinland, 1979. – ISBN 3-921059-67-4
- [KFGH02] KAUER, Robert ; FABBRI, Luciano ; GIRIBONE, Remy ; HEERINGS, Jan: Risk Acceptance Criteria and Regulatory Aspects. In: *OMMI* Vol. 1 Issue (Dezember 2002)
- [Kfz11] *Kraftfahrzeuge und Schienenbestand*. Statistik des Statistischen Bundesamtes. <http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Statistiken/Verkehr/VerkehrsmittelbestandInfrastruktur/Tabellen/Content75/Fahrzeugbestand,templateId=renderPrint.psml>. Version: 2011. – letzter Zugriff: 21.06.2011; 14:52 Uhr

- [KG85] KINNEY, Gilbert F. ; GRAHAM, Kenneth J.: *Explosive Shocks in Air*. Second Edition. Springer, Berlin Heidelberg New York Tokyo, 1985
- [KHMB77] KENDALL, H.W. ; HUBBARD, R.B. ; MINOR, G.C. ; BRYAN, W.M.: The Risks of Nuclear Power Reactors: a Review of the NRC Reactor Safety Study WASH-1400 / Union of Concerned Scientists, Cambridge. 1977. – Forschungsbericht
- [KK93] KROHN, Wolfgang ; KRÜCKEN, Georg: Risiko als Konstruktion und Wirklichkeit. Eine Einführung in die sozialwissenschaftliche Risikoforschung. In: KROHN, Wolfgang (Hrsg.) ; KRÜCKEN, Georg (Hrsg.): *Risikante Technologien - Reflexion und Regulation*. Erste Auflage. Suhrkamp Verlag, Frankfurt am Main, 1993
- [KKL09] KONERSMANN, Rainer ; KÜHL, Christiane ; LUDWIG, Jörg: Zu den Risiken des Transports flüssiger und gasförmiger Energieträger in Pipelines - Forschungsbericht 285 / BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. Unter den Eichen 87, 12205 Berlin, 2009. – Forschungsbericht. – ISBN 978-3-9812354-7-0
- [Klu02] KLUGE, Friedrich: *Etymologisches Wörterbuch der deutschen Sprache*. 24., durchges. und erw. Auflage. de Gruyter, Berlin, 2002
- [Kol93] KOLLERT, Roland: Systematische Unterbewertung von Katastrophenrisiken - Zur Anwendung des Risikobegriffs in nuklearen Risikoanalysen. In: BECHMANN, Gotthard (Hrsg.): *Risiko und Gesellschaft. Grundlagen und Ergebnisse interdisziplinärer Risikoforschung*. Opladen : Westdeutscher Verlag GmbH, 1993
- [Krö00] KRÖGER, Wolfgang: Handhabung technischer Risiken - eine fortwährende Herausforderung. In: *Magazin der Uni Zürich* 3 / 2000 (2000), November. – Bulletin der ETH Zürich Nr. 279
- [KRS⁺00] KAISER, W. ; ROGAZEWSKI, P. ; SCHINDLER, M. ; ACIKALIN, A. ; LAMBERT, M. ; STEINBACH, J.: Ermittlung und Berechnung von Störfallverwaltungsvorschrift - Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 297 48 428, Band 2 / Umweltbundesamt. Februar 2000. – Forschungsbericht
- [Kuh95] KUHLMANN, Albert: *Einführung in die Sicherheitswissenschaft*. 2. völlig überarbeitete Auflage. Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, 1995
- [Lee80] LEES, Frank P.: *Loss Prevention in the Process Industries - Hazard Identification, Assessment and Control, Volume 1*. Butterworth & Co (Publishers) Ltd, 1980
- [Lee11] LEEMING, J.: Road Accidents: The Heart of the Matter. In: *Highway Engineer* 22 ((1975) 11), S. 7 – 11
- [Leg68] LEGAT, W.: Kraftfahrzeugleistungen und Unfallrisiken. In: *ZVS* 14 (1968), S. 223 – 233
- [Lin82] LINDACKERS, Karl H.: Risiken in der Kerntechnik. In: HOSEMANN, Gerhard (Hrsg.): *Risiko - Schnittstelle zwischen Recht und Technik*. Vorträge d. VDE/VDI-Tagung in Seeheim, 18. - 19. Mai 1982. – ISBN 3-8007-1285-7

- [Lud07] LUDWIG, Jörg: *Einheitliche Abdeckung äquivalenter Risiken bei Lagerung und Transport gefährlicher Güter*. Vortrag im Rahmen des Kooperationsvertrages der Abteilung Sicherheitstechnik des Fachbereiches D der Bergischen Universität Wuppertal mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Juni 2007
- [Luh91] LUHMANN, Niklas: *Soziologie des Risikos*. Walter de Gruyter & Co, Berlin, New York, 1991
- [Luh93] LUHMANN, Niklas: Die Moral des Risikos und das Risiko der Moral. In: BECHMANN, Gotthard (Hrsg.): *Risiko und Gesellschaft. Grundlagen und Ergebnisse interdisziplinärer Risikoforschung*. Westdeutscher Verlag GmbH, Opladen, 1993
- [Mai95] MAIR, Georg W.: *Zuverlässigkeitsrestringierte Optimierung faserteilmierter Hybridbehälter unter Betriebslast am Beispiel eines CrMo4-Stahlbehälters mit Carbonfaserarmierung als Erdgasspeicher im Nahverkehrsbus*, Technische Universität Berlin, Diss., 1995
- [Mai05] MAIR, Georg W.: Die probabilistische Bauteilbetrachtung am Beispiel des Treibgasspeichers im Kfz - Teil 1: Ein Werkzeug für die Risikosteuerung. In: *Technische Überwachung* Bd. 46, Nr. 11/12 (November) (2005), S. 42–46
- [Mai06a] MAIR, Georg W.: Die probabilistische Bauteilbetrachtung am Beispiel des Treibgasspeichers im Kfz - Teil 2: Drei gute Gründe dafür. In: *Technische Überwachung* Bd. 47, Nr. 1/2 (Januar) (2006), S. 39–43
- [Mai06b] MAIR, Georg W.: Die probabilistische Bauteilbetrachtung am Beispiel des Treibgasspeichers im Kfz - Teil 3: Erste Schritte in der Normung. In: *Technische Überwachung* Bd. 47, Nr. 3 (März) (2006), S. 39–46
- [Mai07a] MAIR, Georg W.: Ansatz zur modularen Prüfung des Verhaltens von Composite-Flaschen und thermisch aktivierten Druckentlastungseinrichtungen (TPRD) im Brandfall - Teil 1. In: *Technische Überwachung* Bd.48 (2007) Nr.3 - März (2007), S. 38 – 43
- [Mai07b] MAIR, Georg W.: *Die modulare Brandprüfung von Composite-Flaschen als Voraussetzung für den probabilistischen Ansatz*. Vortrag im Rahmen der Kooperationsvereinbarung der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Abteilung III, und dem Fachbereich D, Abteilung Sicherheitstechnik, der Bergischen Universität Wuppertal, 14. Juni 2007
- [Mai08a] MAIR, Georg W.: *Fatigue Testing and its Operational Relevance*. Vortrag: 5th Annual Meeting 2008 in Paris, Preparation of HyComb, 5th June 2008
- [Mai08b] MAIR, Georg W.: *Generals on a Probabilistic Approach*. Vortrag: 5th Annual Meeting 2008 in Paris, Workshop on International RCS: Gaps and Adaptations, 3rd June 2008
- [Mai09] MAIR, Georg W.: Neue Aspekte des Risikomanagements von Fahrzeugen mit Gasantrieb. In: *VDI-Wissensforum Tagungsband 2009*, 2009. – 7. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit in Berlin

- [Mar81] MARBURGER, Peter: Das Technische Risiko als Rechtsproblem. In: RECHTSPOLITIK, Gesellschaft für (Hrsg.): *Bitburger Gespräche, Jahrbuch*. 1981. – ISBN 3-406-086411
- [Mar82] MARBURGER, Peter: Rechtliche Bedeutung sicherheitstechnischer Normen. In: HOSEMANN, Gerhard (Hrsg.): *Risiko - Schnittstelle zwischen Recht und Technik*. Vorträge d. VDE/VDI-Tagung in Seeheim, 18.-19. Mai 1982. – ISBN 3-8007-1285-7
- [Mar84] MARBURGER, Peter: Technische Risiken aus rechtlicher Sicht. In: LANGE, Siegfried (Hrsg.): *Ermittlung und Bewertung industrieller Risiken*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1984. – ISBN 3-540-13056-X
- [Mar07] MARÍN, M. D.: *Deliverable D SA 8 SP SAR: Determination of optimal survival configuration, function of several load cases*. 12. Februar 2007. – Project No.: 502667, Project acronym: STORHY, Project title: Hydrogen Storage Systems for Automotive Application - unveröffentlicht
- [MCS11] *CNG-Behälter - High-Tech für Speicherung, Transport und Antrieb*. Broschüre MCS International GmbH, Karlstrasse 23-25, 46535 Dinslaken, 2011
- [MHM77] MARSHALL, M. R. ; HARRIS, R.J. ; MOPPETT, D. J.: The response of glass windows to explosion pressure. In: *Chemical Process Hazards* 6 (1977), S. 83 – 97
- [Mül07] MÜLLER, Sebastian: *Ansatz zur Brandprüfung von thermisch aktivierten Druckentlastungseinrichtungen (PRD) an Druckgasspeichern zur Verwendung in Treibgasfahrzeugen*, Bergische Universität Wuppertal, Sicherheitstechnik / Materialkunde, Diplomarbeit, 11. Januar 2007
- [MNBH03] MAIR, G. ; NOVAK, P. ; BOHSE, J. ; HEINRICH, T.-R.: Fortentwicklung von fahrzeugbezogenen CNG- Spezialtechnologien und Prüfverfahren / Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. Berlin, 2003. – Abschlussbericht, Teilprojekt 1 im Forschungsvorhaben Vh 3217 - CNG, UFO-Plan des BMU - FKZ 200 45 146
- [Moc01] MOCK, Ralf: Moderne Methoden der Risikobewertung komplexer Systeme. In: *DISP* 144 (1/2001) (2001). – ETH Zürich, ORL-Institut
- [Mod10] *Moditech Rescue Solutions*. http://www.moditech.com/rescue/index3.php?action=procedure_alternative&page=issues. Version: 2010. – letzter Zugriff: 03.November 2010, 14:58 Uhr
- [MOW05] MITSUISHI, Hiroyuki ; OSHINO, Koichi ; WATANABE, Shogo: Dynamic crush test on hydrogen pressurized cylinder. In: *5th International Conference on Hydrogen Safety*, 2005
- [MP03] MEYNA, Arno ; PAULI, Bernhard: *Taschenbuch der Zuverlässigkeit und Sicherheitstechnik*. Carl Hanser Verlag München Wien, 2003. – ISBN 3-446-21594-8

- [MS07] MAIR, Georg W. ; SCHULZ, Michael: *Deliverable D SA 17 SP SAR: Determination of optimal survival configuration, function of several load cases*. 12. Februar 2007. – Project No.: 502667, Project acronym: STORHY, Project title: Hydrogen Storage Systems for Automotive Application - unveröffentlicht
- [Neu02] NEUDÖRFER, Alfred: *Konstruieren sicherheitsgerechter Produkte: Methoden und systematische Lösungssammlungen zur EG-Maschinenrichtlinie*. 2. Auflage. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2002. – ISBN 3-540-42480-6
- [Neu09] NEUMANN, Martin: *Untersuchung des Verhaltens stoßdämpfender Bauteile von Transportbehältern für radioaktive Stoffe in Bauartprüfung und Risikoanalyse*. Berlin, BAM-Dissertationsreihe, Band 45, Diss., 2009
- [Now93] NOWITZKI, Klaus-Dieter: Konzepte zur Risiko-Abschätzung und -Bewertung. In: BECHMANN, Gotthard (Hrsg.): *Risiko und Gesellschaft. Grundlagen und Ergebnisse interdisziplinärer Risikoforschung*. Westdeutscher Verlag GmbH, Opladen, 1993
- [Ort04] *Verordnung über ortsbewegliche Druckgeräte (OrtsDruckV)*. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2004 Teil I Nr. 73, ausgegeben zu Bonn, 28. Dezember 2004
- [OSV10] Korrespondenz mit OSV, Opel Special Vehicles GmbH, IPC54-16, D-65423 Rüsselsheim
- [Pap11] PAPULA, Lothar: *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Band 3*. 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. Vieweg und Teubner Verlag, 2011
- [Per87] PERROW, Charles: *Normale Katastrophen - Die unvermeidbaren Risiken der Großtechnik*. Campus Verlag, 1987
- [Pfü70] PFÖRTNER, H.: *Diskussion des Sicherheitsabstandes*. Bericht der Jahrestagung 1970 des Institutes für Chemie der Treib- und Explosivstoffe (ICT), Karlsruhe, S.243, 1970
- [Pil80] PILZ, Volker: Risikoermittlung und Sicherheitsanalysen in der chemischen Industrie. In: *Chem.-Ing.-Tech.* 52 (1980) Nr. 9 (1980), S. 703–711
- [Pil82] PILZ, Volker: Erkennung, Bewertung und Beherrschung von Risiken in der Chemie-Produktion. In: HOSEMANN, Gerhard (Hrsg.): *Risiko - Schnittstelle zwischen Recht und Technik*. Vorträge d. VDE/VDI-Tagung in Seeheim, 18.-19. Mai 1982. – ISBN 3-8007-1285-7
- [Pil84] PILZ, Volker: Planung, Entwicklung und Betrieb sicherer Produktionsverfahren in der chemischen Technik. In: LANGE, Siegfried (Hrsg.): *Ermittlung und Bewertung industrieller Risiken*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1984. – ISBN 3-540-13056-X
- [Pla03] PLAPP, Susanne T.: *Wahrnehmung von Risiken aus Naturkatastrophen - Eine empirische Untersuchung in sechs gefährdeten Gebieten Süd- und Westdeutschlands*, Universität Fridericiana zu Karlsruhe, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Diss., Juni 2003

- [PM85] PETERS, Olaf H. ; MEYNA, Arno: *Handbuch der Sicherheitstechnik - Band 1: Sicherheitstechnischer Anlagen, Komponenten und Systeme*. Carl Hansen Verlag München Wien, 1985
- [Poh89] POHL, Klaus D.: *Der Kraftfahrzeugbrand*. DAT Deutsche Automobil Treuhand GmbH, 1989
- [Pra06] U.S. CHEMICAL SAFETY AND HAZARD INVESTIGATION BOARD ; OFFICE OF CONGRESSIONAL, PUBLIC, AND BOARD AFFAIRS ; WASHINGTON, DC: Fire at Praxair St. Louis - Dangers of propylene cylinders in high temperature ; CSB No. 2005-05-B. June 2006. – Forschungsbericht
- [Pri81] PRITCHARD, D. K.: Breakage of glass windows by explosions. In: *Journal of Occupational Accidents* 3 (1981), S. 69 – 85. – Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam
- [PWL87] PETTS, J. I. ; WITHERS, R. M. J. ; LEES., F. P.: The assessment of major hazards: the density and other characteristics of the exposed population around a hazard source. In: *Journal of Hazardous Materials* 14 (1987), S. 337–363. – Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam
- [Ras76] IRS-S-13, INSTITUT FÜR REAKTORSICHERHEIT DER TECHNISCHEN ÜBERWACHUNGS-VEREINE E. V.: Der Rasmussen-Bericht WASH-1400 (NUREG 75/014) - Übersetzung der Kurzfassung. Köln, Februar 1976. – Forschungsbericht
- [RCC99] ROMANO, A. ; CORTESI, F. ; CORTESI, A.: Safety management in a construction site inside a major hazard plant. In: SCHUELLER, G. I. (Hrsg.) ; KAFKA, P. (Hrsg.): *Safety and Reliability*. A.A. Balkema, Rotterdam, 1999
- [RD68] RICHMOND, D. R. ; DAMON, E. G.: *The relationship between selected blast-wave parameters and the response of mammals exposed to air blast*. Ann. New York Acad. Sci., S.I03, 1968
- [Ren81] RENN, Ortwin: Wahrnehmung und Akzeptanz technischer Risiken, Band I - Zur Theorie der Risikoakzeptanz - Forschungsansätze und Modelle / Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich - Nr. 97, Bd. I, Zentralkbibliothek der Kernforschungsanlage Jülich GmbH, 5710 Jülich. 1981. – Forschungsbericht
- [Rij82] RIJMOND PUBLIC AUTHORITY, REIDEL, DORDRECHT: Risk Analysis of Six Potentially Hazardous Industrial Objects in the Rijnmond Area, A Pilot Study. 1982. – Forschungsbericht
- [RL199] *Richtlinie 1999/36/EG des Rates vom 29. April 1999 über ortsbewegliche Druckgeräte*. Rat der Europäischen Union, Amtsblatt der europäischen Gemeinschaft Nr. L 138/20, 01.06. 1999
- [RL208] *Richtlinie 2008/68/EG des Rates vom 24. September 2008 über die Beförderung gefährlicher Güter im Binnenland*. Amtsblatt der europäischen Gemeinschaft, 30.09. 2008

- [RL8a] *Richtlinie 84/525/EWG des Rates vom 17. September 1984 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über nahtlose Gasflaschen aus Stahl.* Amtsblatt der europäischen Gemeinschaft Nr. L 300/1, 19.11.1984,
- [RL8b] *Richtlinie 84/526/EWG des Rates vom 17. September 1984 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über nahtlose Gasflaschen aus unlegiertem Aluminium und Aluminiumlegierungen.* Amtsblatt der europäischen Gemeinschaft Nr. L 300/20, 19.11.1984,
- [RL8c] *Richtlinie 84/527/EWG des Rates vom 17. September 1984 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über geschweißte Gasflaschen aus unlegiertem Stahl.* Amtsblatt der europäischen Gemeinschaft Nr. L 300/48, 19.11.1984,
- [RL9] *Richtlinie 96/82/EG des Rates zur Beherrschung der Gefahren bei schweren Unfällen mit gefährlichen Stoffen.* Vom 09. Dezember 1996 (ABl. EG Nr. L 10 S. 13) zuletzt geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 22. Oktober 2008 (ABl. L 311, S. 1) in Kraft getreten am 11. Dezember 2008,
- [RL994] *Richtlinie 94/55/EG des Rates vom 21. November 1994 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für den Gefahrguttransport auf der Straße.* Rat der Europäischen Union, Amtsblatt der europäischen Gemeinschaft Nr. L 319/7, 12.12. 1994
- [RL996] *Richtlinie 96/49/EG des Rates vom 23. Juli 1996 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für die Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter.* Rat der Europäischen Union, Amtsblatt der europäischen Gemeinschaft Nr. L 235/25, 17.09. 1996
- [Roe11] *Thieme RÖMPP Online.* Georg Thieme Verlag. <http://www.roempp.com>. Version: 2011. – Dokumentkennung RD-05-11503, Aufnahme in den Datenbestand: März 2002
- [Row77] ROWE, William D.: *An Anatomy Of Risk.* John Wiley & Sons, New York, London, Sydney, Toronto, 1977
- [RZ97] RENN, Ortwin ; ZWICK, Michael M.: *Risiko- und Technikakzeptanz.* Springer-Verlag, Berlin, 1997
- [Sac06] SACHS, Lothar: *Angewandte Statistik.* 12. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006
- [SAE11] *Analysis of Fuel Cell Vehicles Equipped with Compressed Hydrogen Storage Systems from a Road Accident Safety Perspective.* 2011. – SAE International 11B-0132 / 2011-01-0545
- [Sar83] SARTORI, L.: The effects of nuclear weapons. In: *Physics Today* März (1983), S. 32 – 41
- [Sch54] SCHARDIN, H.: Wirkungen von Spreng- und Atombomben auf Bauwerke. In: *Ziviler Luftschutz* (1954), S. 283

- [Sch83] SCHARIOTH, Joachim: Der Umgang der Gesellschaft mit technischen Risiken. In: BRAUN, Wolfgang (Hrsg.): *Probabilistische Risikoanalyse*. 3. GfS-Seminar, Sicherheitswissenschaftliche Monographien Band 4, 1983
- [Sch91] SCHNEIDER, Thomas: Zur Charakterisierung von Risiken. In: SCHNEIDER, J. (Hrsg.): *Risiko und Sicherheit technischer Systeme - Auf der Suche nach neuen Ansätzen*. Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin, 1991
- [SFK02] STÖRFALL-KOMMISSION BEIM BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT: Bericht : Anwendung der Wasserstoff-Technologie - Eine Bestandsaufnahme des Arbeitskreises Wasserstofftechnologie. 2002. – Forschungsbericht
- [SFK04] STÖRFALL-KOMMISSION BEIM BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT: Bericht Risikomanagement im Rahmen der Störfall-Verordnung des Arbeitskreises Technische Systeme, Risiko und Verständigungsprozesse, SFK-GS-41. 2004. – Forschungsbericht
- [SGV96] STALLEN, P.J.M. ; GEERTS, R. ; VRIJLING, H.K.: Three conceptions of quantified societal risk. In: *Risk Anal.* 16(5) (1996)
- [Som98] SOMMERFELD, Henry: *Brand- und Explosionsschutz als Bestandteile des Risiko-Managements*. Stuttgart: Kohlhammer GmbH, 1998
- [Spa10] SPANGENBERGER, Helmut: *Risikoanalysen - Theorie und Praxis der qualitativen und quantitativen Risikoanalyse, erläutert an Beispielen aus der Praxis*. Vortrag Sicherheitswissenschaftliches Kolloquium der Universität Wuppertal, 06. Juli 2010
- [SS04] SCHINDLER, Jörg ; SCHMIDT, Patrick: Brennstoffzellen- und Wasserstoff-Technologien als wirtschaftliche Chance für Hamburg - Studie im Auftrag der Freien und Hansestadt Hamburg / Behörde für Umwelt und Gesundheit, Endbericht / L-B-Systemtechnik GmbH. 85521 Ottobrunn, Januar 2004. – Forschungsbericht
- [ST95] SOKOLOWSKA, J. ; TZYSKA, T.: Perception and Acceptance of Technological and Environmental Risks: Why are Poor Countries Less Concerned? In: *Risk Analysis* 15 (1995), S. 733–743
- [Sta69] STARR, Chauncey: Social Benefit Versus Technological Risk: What Is Our Society Willing to Pay for Safety? In: *Science* 165 (1969), S. 1232–1238
- [Sta93] STARR, Chauncey: Sozialer Nutzen versus technisches Risik. In: BECHMANN, Gotthard (Hrsg.): *Risiko und Gesellschaft. Grundlagen und Ergebnisse interdisziplinärer Risikoforschung*. Westdeutscher Verlag GmbH, Opladen, 1993
- [Sta10] STATISTISCHES BUNDESAMT, Wiesbaden (Hrsg.): *Statistische Jahrbuch 2010 - Für die Bundesrepublik Deutschland mit Internationalen Übersichten*. 2010
- [Ste11] *Natürlich unterwegs - Erdgas als Kraftstoff*. Steirische Gas-Wärme GmbH. <http://www.erdgasautos.at/presse/55/>. Version: 2011. – Letzter Zugriff: 22.06.2011; 13:00 Uhr

- [Sto89] STOLL, Wolfgang: *Risikoängste in unserer Chancengesellschaft*. Postfach 10 11 10, 2850 Bremerhaven 1 : Wirtschaftsverlag NW GmbH, Verlag für neue Wissenschaft, 1989. – Gesellschaft für Sicherheitswissenschaft (GfS)
- [StV09] *Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 28. September 1988 (BGBl. I S. 1793), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 21. April 2009 (BGBl. I S. 872) geändert worden ist*. 2009
- [SU02] SLABY, Martin ; URBAN, Dieter: *Risikoakzeptanz als individuelle Entscheidung - Zur Integration der Risikoanalyse in die nutzentheoretische Entscheidungs- und Einstellungsforschung*. 70174 Stuttgart : Schriftenreihe des Instituts für Sozialwissenschaften der Universität Stuttgart No. 1/2002, Abteilung für Soziologie I, 2002
- [Sud03] SUDDLE, S. I.: A logarithmic approach for individual risk: the safety-index. In: BEDFORD (Hrsg.) ; GELDER van (Hrsg.): *Safety and Reliability*. Swets & Zeitlinger, 2003. – ISBN 90 5809 551 7
- [SWH⁺03] SCHÜTZ, H. ; WIEDEMANN, P. ; HENNINGS, W. ; MERTENS, J. ; CLAUBERG, M.: *Vergleichende Risikobewertung - Konzepte, Probleme und Anwendungsmöglichkeiten*. Abschlussbericht zum BfS-Projekt StSch 4217 Risikobewertung und Risikomanagement: Ausarbeitung von Konzepten eines integrierten und vergleichenden Risikoansatzes / Forschungszentrum Jülich GmbH, Programmgruppe Mensch, Umwelt, Technik(MUT). Dezember 2003. – Forschungsbericht
- [Tag06] Tagungsband Fachgespräch Raum- und Flächenplanung bei Pipelines. Veranstaltung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, 2006
- [TAW85] *Some considerations of an acceptable level of risk in The Netherlands*. TAW, Technical Advisory Committee on Water Defences, 1985
- [TES11] *TES Technische Sicherheit - Gefahrgutumschließungen, Punkt 1.4: Rechtsgrundlage für das Befüllen*. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. http://www.tes.bam.de/de/umschliessungen/druckgefaesse_druckgeraete/fragen_antworten/index.htm. Version: 2011. – Letzter Zugriff: 24.02.2011, 15:31 Uhr
- [Trb08] TRBOJEVIC, V. M.: Another look at risk and structural reliability criteria. In: *Structural Safety* doi:10.1016/j.strusafe.2008.06.019 (2008)
- [UBA92] BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND -PRÜFUNG (BAM), BERLIN: Forschungsbericht 104 09 211 , UBA-FB 92-026 Mustersicherheitsanalyse nach §7 StörfallV für eine Sprengstofffabrik. 1992. – Forschungsbericht
- [Und84] UNDEUTSCH, Udo: Stand der psychologischen Forschung zur Risikoakzeptanz. In: *Risikoakzeptanz - Mensch und Technik im Straßenverkehr; Sicherheitswissenschaftliche Monographien Band 6*. Gesellschaft für Sicherheitswissenschaft, Bergische Universität-Gesamthochschule Wuppertal, 1984. – ISSN 0722-6181 - Band 6

- [UNE11] UNECE: *UNECE Statistical Database*. United Nations Economic Commission for Europe. <http://w3.unece.org/pxweb/>. Version: 2011
- [VAsC08] VANEM, Erik ; ANTAO, Pedro ; ÖSTVIK, Ivan ; COMAS, Francisco Del C.: Analysing the risk of LNG carrier operations. In: *Reliability Engineering and System Safety* 93 (2008), S. 1328–1344
- [Ver07a] STATISTISCHES BUNDESAMT, Wiesbaden (Hrsg.): *Fachserie 8, Reihe 7 - Verkehr - Verkehrsunfälle 2007*. 30. Oktober 2007. – 2008
- [Ver07b] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (Hrsg.): *Qualitätsmerkmale Technische Sicherheit - Eine Denkschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*. Postfach 10 11 39, 40002 Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2007
- [Ver09] STATISTISCHES BUNDESAMT, Wiesbaden (Hrsg.): *Fachserie 8, Reihe 7 - Verkehr - Verkehrsunfälle 2009*. 15. Juli 2009. – 2010
- [Ver11a] *Entwicklung der Zahl der im Straßenverkehr Getöteten 1953 bis 2011, Vorläufiges Ergebnis*. Wiesbaden : Statistisches Bundesamt, 2011
- [Ver11b] STATISTISCHES BUNDESAMT, Wiesbaden (Hrsg.): *Fachserie 8, Reihe 7 - Verkehr - Verkehrsunfälle 2010*. 2011
- [VGO05] VRIJLING, J.K. ; GELDER, P.H.A.J.M. van ; OUWERKERK, S.J.: Criteria for acceptable risk in the Netherlands. In: *Infrastructure Risk Management Processes: Natural, Accidental, and Deliberate Hazards* ASCE (2005)
- [VHH95] VRIJLING, J.K. ; HENGEL, W. V. ; HOUBEN, R. J.: A framework for risk evaluation. In: *Journal of Hazardous Materials* 43 (1995), S. 245–261
- [Via09a] Feuerinferno nach Zugunglück in Italien - viele Tote. In: *Die Welt* (2009), 30. Juni
- [Via09b] Italien - Viele Tote nach Tankwaggon-Explosion in Toskana. In: *Spiegel online* (2009), 30. Jun
- [Via09c] Zugunglück in Italien - Vor dem Inferno ein Aufprall. In: *FAZ* (2009), 30. Juni
- [VK03] VASSALOS, D. ; KONOVESSIS, D.: An implementation of a life-cycle risk-based design for safety methodology. In: BEDFORD (Hrsg.) ; GELDER van (Hrsg.): *Safety and Reliability*. Swets & Zeitlinger, 2003. – ISBN 90 5809 551
- [Vri01] VRIJLING, J.K.: Probabilistic design of water defense systems in The Netherlands. In: *Reliability Engineering and System Safety* 74 (2001), S. 337–344
- [Wal69] WALTER, F. E.: *Estimating production and repair effort in blast-damaged petroleum refineries*. Stanford Res. Inst., SR 1 Proj. No. 6300-620, 1969
- [Whi68] WHITE, C. S.: *The scope of blast and shock biology and problem areas in relating physical and biological parameters*. Ann. New York Acad. Sci., S.89, 1968

- [Wie80] WIEKEMA, B. J.: Vapour cloud explosion model. In: *Journal of Hazardous Materials* 3 (1980), S. 221–232. – Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam
- [Wik10] *Wikipedia: Bevölkerungsdichte*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Bev%C3%B6lkerungsdichte>. Version: 2010. – letzter Zugriff: 13. April 2010
- [wik11] <http://de.wikipedia.org/wiki/Autogas> letzter Zugriff: 28.06.2011; 16:09 Uhr
- [Wol07] WOLTER, Axel: *Neue rechtliche und technische Ansätze bei der Beurteilung von Chemieanlagen bzw. Betriebsbereichen i. S. d. Störfall-Verordnung im Rahmen der Bauleitplanung - Typisierende Betrachtung mit Hilfe von Elementen der Risikobewertung*, Bergische Universität Wuppertal, Diss., Februar 2007
- [Zal03] ZALOSH, Robert: Explosions. In: *Fire Protection Handbook*. Quincy, Mass.: National Fire Protection Association, 2003
- [ZDK⁺03] ZANTING, Jeroen ; DUINKERKEN, Johan ; KUIK, Robert ; BOLT, Rein ; JAGER, Eric: Introduction of an easy-to-use risk assessment tool for natural gas transmission pipelines. In: BEDFORD (Hrsg.) ; GELDER van (Hrsg.): *Safety and Reliability*. Swets & Zeitlinger, 2003. – ISBN 90 5809 551 7
- [ZR01] ZWICK, Michael M. ; RENN, Ortwin: *Wahrnehmung und Bewertung von Risiken - Ergebnisse des Risikosurvey Baden-Württemberg 2001*. Akademie für Technikfolgeabschätzung in Baden-Württemberg, 2001. – ISBN 3-934629-56-3, ISSN 0945-9553
- [Zwi97] ZWICK, Michael M.: Risiken - Wahrnehmung, Bewertung, Akzeptanz. In: BORCHERD, G. (Hrsg.): *Strahlenschutz. Wissenschaftliche Grundlagen, Rechtliche Regelungen, Praktische Anwendungen*. 1997. – 5. Aufl., Berlin: Band 1, B6 1-20

Abbildungsverzeichnis

2.1. Risiko-Isolinien	9
2.2. Grenzkrisiko in Anlehnung an [SFK04]	10
2.3. Risikomatrix	17
2.4. Vergleich von Individuellem und Sozialem Risiko (in Anlehnung an [SGV96])	19
2.5. Das ALARP-Prinzip	20
2.6. F-N-Kurve mit Aversionsfaktor -2	21
2.7. F-N-Kurven im internationalen Vergleich	23
2.8. Risikomanagementprozess (in Anlehnung an [SFK-GS-41])	25
3.1. CNG-Typen I - IV [MNBH03]	29
3.2. Anbringung der Druckbehälter bei einem Ford Focus und einem nachgerüsteten Honda Civic [Mod10]	30
3.3. Zündungstetraeder nach Emmons (in Anlehnung an [Poh89])	33
3.4. Typische Druck-Zeit-Ablauf von Detonationen und Deflagrationen	35
3.5. Druckamplitude und Impuls unterschiedlicher Explosionen [Zal03]	35
4.1. Eintrittswahrscheinlichkeit-Konsequenz-Diagramm zur Beurteilung des Risikos [BUW96]	39
4.2. Anzahl und Verteilung der Trümmerstücke nach dem Bersten zylindrischer, horizontal gelagerter Druckbehälter nach [HR85]	46
4.3. Entwicklung der Zulassungszahlen und Verkehrsunfälle in Deutschland	52
4.4. Kinetische Energie im Verhältnis zur Geschwindigkeit (bezogen auf 1 kg Masse)	55
5.1. Druck des Glasbruchs als Funktion der Dicke des Fensterglases [MHM77]	65
5.2. Experimenteller Druck des Glasbruchs für Einfachverglasung [Pri81]	66
5.3. Druckverlauf über den Radius bei einem Behältervolumen von 30 Litern, berechnet nach dem TNT-Äquivalenzmodell	69
5.4. Einfluss des linearen Verlaufs des Drucks zum Radius	70
5.5. Einfluss des linearen Verlaufs des Drucks zum Radius	73
5.6. Idealierte Fatalitätswahrscheinlichkeit des Menschen durch sekundären Trümmerflug im Freien	73
5.7. Idealierte Fatalitätswahrscheinlichkeit des Menschen durch sekundären Trümmerflug in Gebäuden und selbige nach [HIP08b]	74
5.8. Mittelwerte der idealisierten Fatalitätswahrscheinlichkeit für Personen in Gebäuden inkl. Trümmerflug	76
5.9. Schematische Darstellung der Risiko-Zonen	77
5.10. Betroffene Bereiche der Energieeinwirkung und deren relative Häufigkeit bei Straßenverkehrsunfällen mit Personenschaden in Deutschland [MS07]	85
5.11. Perzentile der Fahrzeugdeformation, die geeignet sind zu einer Druckbehälterschädigung zu führen [SAE11]	85

5.12. Poisson-Verteilung von CNG-Unfällen je Monat für 2010	90
5.13. Poisson-Verteilung für das Versagen von CNG-Druckbehältern für 2010 .	90
6.1. Anbringung der Druckbehälter bei Opel Zafira, VW Caddy und Opel Com- bo [erd12a]	101
6.2. Vergleich der Radien der Risiko-Zonen von Druckbehältern der Volumina 35 bis 80 Liter	104
6.3. Zunahme des Radius / der Fläche über der Zunahme von Druck / Volumen	106
6.4. Prozentuale Korrelation von Druck zu Volumen	107
7.1. F-N-Kurve der Risikoerfassung	110
7.2. Betroffene Personenanzahl bei Behälterbersten im Stadtzentrum	111
7.3. Vergleich der durch sekundären Trümmerflug betroffenen Personen bei un- terschiedlichen innerstädtischen Szenarien	113
A.1. Policy Factor der Freiwilligkeit nach [Vri01]	152
A.2. Zusammenhang von ADR zu nationalem Recht	156
A.3. Versuchsaufbau zum Impact-Verhalten von Druckbehältern nach [MOW05]	158
A.4. Spitzenüberdruck in Abhängigkeit zur Entfernung der Explosionsquelle [MOW05]	159
A.5. Berechnete Spitzenüberdrücke über den Radius	160
A.6. Prozentualer Anteil der verschiedenen Unfallarten	161
A.7. Anteile an Unfällen mit Personen- bzw. Sachschaden – Innerstädtisch . .	162
A.8. Anteile an Unfällen mit Personen- bzw. Sachschaden – Außerstädtisch . .	162
A.9. Anteile an Unfällen mit Personen- bzw. Sachschaden – Gesamt	163
A.10. Anzahl der bei Unfällen mit Personenschaden getöteten Personen je 1000 Unfälle	163
A.11. Verhältnis der Unfälle mit Personen- zu denen mit Sachschaden	164
A.12. Verhältnis der Unfallarten bezogen auf die Pkw-Dichte	164
A.13. Unfälle je 1000 Kraftfahrzeuge	166
A.14. Vergleich der Unfallzahlen innerhalb und außerhalb von Ortschaften . . .	166
A.15. Unfallzahlen innerhalb von Ortschaften mit nur einem Kraftfahrzeug . . .	167
A.16. Unfallzahlen innerhalb von Ortschaften mit mehreren Kraftfahrzeugen . .	167
A.17. Einbiegeunfälle innerhalb von Ortschaften	167
A.18. Frontalunfälle innerhalb von Ortschaften	168
A.19. Heckunfälle innerhalb von Ortschaften	168
A.20. Spinnennetz-Diagramm (CIDAUT und EES Datenbank) [DSA05]	170
A.21. Spinnennetz-Diagramm (GIDAS Datenbank) [DSA05]	170
A.22. Vergleich der durch sekundären Trümmerflug betroffenen Personen bei unterschiedlichen innerstädtischen Szenarien bei Druckbehälterversagen durch Brand	177

Tabellenverzeichnis

2.1.	Faktoren der Risikomatrix	17
2.2.	Grenzwerte technischer Risiken im internationalen Vergleich	22
4.1.	Konsequenzen von Spitzenüberdrücken – Sortiert nach Druckspitze (in Anlehnung an [KKL09; KRS ⁺ 00])	42
4.2.	Konsequenzen von Spitzenüberdrücken nach verschiedenen Literaturangaben	43
4.3.	Fatalitäts- und Verletzungswahrscheinlichkeiten nach [HIP08b]	47
4.4.	Unfälle mit Personenschaden und Sachschaden nach Ortslage	56
4.5.	Unfälle innerhalb und außerhalb Ortschaften nach Personenschäden und Sachschäden	56
4.6.	Personenschäden und Getötete innerhalb und außerhalb von Ortschaften .	56
4.7.	Erdgasbetriebene Personenkraftwagen und deren Zulassungszahlen	58
4.8.	Bevölkerungsdichte nach Wohngebietstypen [CPR92]	61
4.9.	Bevölkerungsdichte nach Tätigkeitsfeldern [CPR92]	62
5.1.	Wahrscheinlichkeit der Zerstörung von Glasscheiben durch Überdruck nach [KKL09; KRS ⁺ 00]	64
5.2.	Werte des Spitzenüberdrucks und deren Konsequenzen auf den Menschen	67
5.3.	Fatalitätswahrscheinlichkeit des Menschen durch Überdruck	72
5.4.	Idealisierte Fatalitätswahrscheinlichkeit des Menschen durch sekundären Trümmerflug im Freien	74
5.5.	Idealisierte Fatalitätswahrscheinlichkeit des Menschen durch sekundären Trümmerflug in Gebäuden	74
5.6.	Fatalitätswahrscheinlichkeit und Höhe des Spitzenüberdrucks der Risiko-Zonen	76
5.7.	Relative Häufigkeiten von Straßenverkehrsunfällen für alle in [Ver07a; Ver11b] aufgeführten Unfallarten im Jahr 2010	78
5.8.	Angenommene Geschwindigkeiten nach Ortslage und deren Einfluss auf die kinetische Energie	80
5.9.	Quantile der Chi-Quadrat-Verteilung [Pap11]	88
5.10.	Absolutwerte und Eintrittswahrscheinlichkeit von Verkehrsunfällen unter Berücksichtigung der Ortslage für 2010	89
5.11.	Konfidenzintervalle der Poisson-Verteilung und bevölkerungsspezifisches Individuelles Risiko bei Unfällen unterschiedlicher Ortslage	93
5.12.	Personendichte nach Wohngebietstypen und Tätigkeitsfelder [CPR92] . .	95
6.1.	Wirkfaktoren verschiedener brennbarer Stoffe [KRS ⁺ 00]	97
6.2.	Wirkfaktoren verschiedener brennbarer Stoffe [Som98]	97
6.3.	Daten der Druckbehälter im Opel Zafira	100
6.4.	Daten der Druckbehälter im Opel Combo	101
6.5.	Radien der Risiko-Zone für einen als Standard definierten 35-Liter-Druckbehälter bei 200 bar	103

6.6.	Radien der Risiko-Zone für einen 80-Liter-Druckbehälter bei 200 bar . . .	104
7.1.	Gesamtradien und -flächen der Risiko-Zonen bei Behälterbersten ohne anschließende chemische Reaktion bei 200 bar Innendruck	109
7.2.	Personenbezogenes Individuelles Risiko bei dem Ereignis des Druckbehälterberstens infolge eines Verkehrsunfalls anwesend zu sein	109
7.3.	Anwesende und betroffene Personenanzahl bei Behälterbersten im Stadtzentrum (12.000 Pers./km ²)	111
7.4.	Anzahl der durch sekundären Trümmerflug betroffenen Personen bei unterschiedlichen innerstädtischen Szenarien	113
7.5.	Berechnete Personenschäden durch einen 30 m ³ LPG-Güterwaggon . . .	115
A.1.	Risiken des alltäglichen Lebens	153
A.2.	Europäische Unfallzahlen im Vergleich	165
A.3.	Anforderungen an das Crash-Verhalten nach verschiedenen Regelwerken	169
A.4.	Kinetische Energien bei verschiedenen Unfallarten zur Simulation des Crash-Verhaltens nach [Mar07]	171
A.5.	Verformung und Eindringtiefe nach [Mar07]	172
A.6.	Relative Häufigkeit von Fahrzeugbränden im Jahr 2009 ausgewählter Bundesländer	173
A.7.	Anwesende und betroffene Personenanzahl bei Behälterbersten mit anschließender chemischer Reaktion im Stadtzentrum (12.000 Pers./km ²) . .	176
A.8.	Anwesende und betroffene Personenanzahl bei Behälterbersten mit anschließender chemischer Reaktion in ruhiger Wohngegend (2.500 Pers./km ²)	176
A.9.	Anwesende und betroffene Personenanzahl bei Behälterbersten mit anschließender chemischer Reaktion im Einzelhandel und Restaurants (4.000 Pers./km ²)	176
A.10.	Anwesende und betroffene Personenanzahl bei Behälterbersten mit anschließender chemischer Reaktion im Banken und Versicherungswesen (8.000 Pers./km ²)	177
A.11.	Gesamtradien und -flächen der Risiko-Zonen bei Behälterbersten ohne anschließende chemische Reaktion bei 260 bar Innendruck	178
A.12.	Änderung von Radius und Fläche der Konsequenzen über der Zunahme des Drucks bei konstantem Volumen	180
A.13.	Änderung von Radius und Fläche der Konsequenzen über der Zunahme des Volumens bei konstantem Druck	181

A. Anhang

A.1. Heuristiken

Katastrophenpotential

Der technische Risikobegriff stellt das Risiko über die Multiplikation der Eintrittswahrscheinlichkeit und der Konsequenz dar. Dementsprechend kann der technische Risikobegriff nicht zwischen seltenen Ereignissen hoher Konsequenzen und der Summe häufiger Ereignisse niedriger Konsequenzen unterscheiden. Psychologisch aber ist dieser Unterschied wichtig. [JS93a] In der Risikowahrnehmung der Bevölkerung spielt es offensichtlich eine Rolle, ob eine bestimmte Anzahl Menschen N bei einem einzelnen Ereignis ums Leben kommt oder jeweils eine Person bei N Ereignissen [JS93b]. Das Risiko einer Technologie wird subjektiv umso höher eingeschätzt, je höher die im Schadensfall zu erwartenden Konsequenzen ausfallen, unabhängig von der tatsächlichen Höhe der Eintrittswahrscheinlichkeit [SU02; JS93b; Bec93a; Zwi97; Kah11; Luh91; JS93a; Dit96; Und84; Sch83; Sch91; VGO05]. Darüber hinaus wird ein solches Risiko höher bewertet als eine gleichwertige Summe vieler Einzelereignisse mit geringeren Konsequenzen bei gleichzeitig höherer Eintrittswahrscheinlichkeit. Der Signalwert des einzelnen Ereignisses steigt [Sto89]. Eine mögliche Erklärung für diesen Sachverhalt stellt der sogenannte Gewöhnungseffekt dar. Je gleichförmiger und konstanter Konsequenzen erfahren werden und je eher katastrophale Konsequenzen ausgeschlossen werden können, desto eher wird das Ausmaß der Summe all dieser Konsequenzen unterschätzt [Kah11]. Situationen, die gleichförmig und konstant auftreten und deren Konsequenzen bekannt sind, werden in der Regel durch den Menschen normalisiert [Sto89; Luh91].

Freiwilligkeit

Die Feststellung, ob ein Risiko freiwillig eingegangen oder einem von außen auferlegt wird, spielt bei der subjektiven Beurteilung von Risiken eine entscheidende Rolle. Es lässt sich feststellen, dass freiwillig eingegangene Risiken weniger kritisch gesehen und folglich eher akzeptiert werden als unfreiwillig auferlegte [JS93b; Bec93a; Zwi97; Kah11; JS93a; Sta93; Sta69; Und84; FD08; Sch83; ZR01]. Nach Starr [Sta93; Sta69] werden die Konsequenzen freiwillig eingegangener Risiken mit einer bis zu 1000 mal höheren Eintrittswahrscheinlichkeit akzeptiert, als unfreiwillig auferlegte. Vrijling [VHH95; Vri01; VGO05] hat hierzu einen sogenannten „Policy Factor“ entwickelt, der der Freiwilligkeit des Eingehens eines Risikos einen Zahlenwert zuordnet (vgl. Abbildung A.1).

Gewöhnungseffekt

Je gleichförmiger und konstanter Konsequenzen erfahren werden und je eher katastrophale Konsequenzen ausgeschlossen werden können, desto eher wird das Ausmaß der Summe all dieser Konsequenzen unterschätzt [Kah11]. Situationen, die gleichförmig und konstant auftreten und deren Konsequenzen bekannt sind, werden in der Regel durch den Menschen normalisiert [Sto89; Luh91].

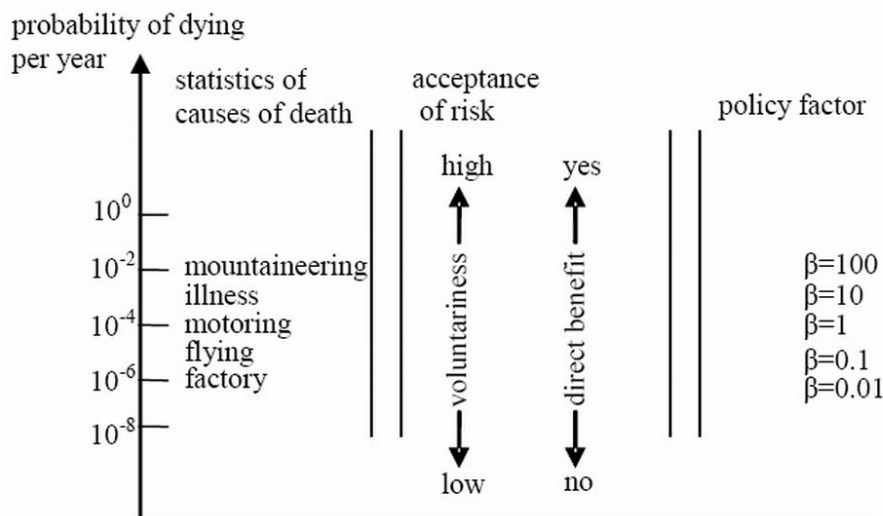


Abbildung A.1.: Policy Factor der Freiwilligkeit nach [Vri01]

Kontrollierbarkeit

Die Heuristik der Kontrollierbarkeit ist eng verknüpft mit der der Freiwilligkeit. Freiwillig eingegangenen Risiken wird in der Regel ein gewisses Maß an Kontrolle desjenigen eingeräumt, der das Risiko eingeht. Durch diese Verknüpfung und den Glauben ein Risiko beherrschbar zu gestalten, werden als kontrollierbar empfundene Risiken ebenfalls weniger kritisch gesehen und weisen dementsprechend einen höheren Grad an gesellschaftlicher Akzeptanz auf [SU02; JS93b; Bec93a; Zwi97; Kah11; Per87; JS93a; Sta93; Sta69; Und84; Sch83; ZR01].

Institutionsvertrauen

Als letzte Heuristik soll die des Institutionsvertrauens dargestellt werden. Risiken, die durch anerkannte Institutionen oder gesetzliche Regelungen reguliert werden, weisen einen erhöhten Grad an Akzeptanz auf [Kah11; ZR01]. Dies stellt einen wichtigen Punkt bei der Regulierung von technischen Risiken zur Erlangung der Akzeptanz durch die Öffentlichkeit dar, der allerdings stark mit der Kommunikation des Risikos verknüpft ist. In Deutschland werden im Grunde alle Technologien durch anerkannte Institutionen vor dem Inverkehrbringen geprüft. Weist eine Technologie den Prüfstempel einer anerkannten Institution auf, so wird diese in den meisten Fällen als sicher betrachtet; ein gutes Beispiel des Institutionsvertrauens ist die „TÜV-Plakette“ der Hauptuntersuchung beim Kraftfahrzeug. In der Öffentlichkeit scheint allerdings der Glaube zu herrschen, dass bestimmte Aspekte des Risikos bei derartigen Prüfungen nicht berücksichtigt werden, wodurch sich die Furchtassoziation vor einer Technologie begründen lässt. Würde die Öffentlichkeit die genauen Ergebnisse der Untersuchungen kennen, die ihr in der Regel nicht vorenthalten werden, so würden wahrscheinlich viele Technologien, die heute mit gemischten Gefühlen betrachtet werden, mehr oder sogar vollständig akzeptiert werden. Hier wird deutlich, dass alles technisch Machbare nicht ausreichend ist, sofern die Kommunikation des Risikos durch Unbekanntheit über besagtes Risiko geprägt ist.

A.2. Alltagsrisiken

Tabelle A.1.: Risiken des alltäglichen Lebens

Wahrscheinlichkeit	Fatales Ereignis	Quelle
$2,00 \cdot 10^{-9}$	Unfälle mit Kernreaktoren (100 Anlagen)	[Kol93]
$5,35 - 6,70 \cdot 10^{-8}$	Blitzschlag	[HSE01; Krö00]
$1,00 \cdot 10^{-7}$	Dammüberflutung, radioaktive Freisetzung aus KKW	[Krö00]
$0,40 \cdot 10^{-6}$	Tornados, Hurrikans (jeweils)	[Kol93]
$0,50 \cdot 10^{-6}$	Blitzschlag	[Kol93]
$0,70 \cdot 10^{-6}$	Fatales Ereignis durch Gas (Brand, Explosion, CO-Vergiftung)	[HSE01]
$3,00 \cdot 10^{-6}$	Fallende Objekte	[HIP08b; HIP08a]
$4,00 \cdot 10^{-6}$	Bergtour	[Krö00]
$6,25 \cdot 10^{-6}$	Fallende Objekte, Elektrischer Schlag (jeweils)	[Kol93]
$6,75 \cdot 10^{-6}$	Bahnreise	[Krö00]
$1,00 \cdot 10^{-5}$	Flugreise, Schusswaffen, Brand (jeweils)	[HIP08b; HIP08a; Krö00; Kol93]
$3,00 \cdot 10^{-5}$	Bahnreise	[HIP08b; HIP08a]
$3,30 \cdot 10^{-5}$	Ertrinken	[Kol93]
$4,00 \cdot 10^{-5}$	Brände und Verbrühungen	[Kol93]
$5,00 \cdot 10^{-5}$	Schwimmen	[HIP08b; HIP08a]
$6,00 \cdot 10^{-5}$	Stürze	[HIP08b; HIP08a]
$1,00 \cdot 10^{-4}$	Stürze	[Kol93]
$1,10 \cdot 10^{-4}$	Heimunfälle	[HIP08b; HIP08a]
$1,45 - 2,50 \cdot 10^{-4}$	Kraftfahrzeug	[HIP08b; HIP08a; Kol93]
$2,46 - 6,25 \cdot 10^{-4}$	Sämtliche Unfälle	[HSE01; Krö00; Kol93]
$1,00 \cdot 10^{-3}$	Alkohol	[HIP08b; HIP08a]
$1,80 - 2,70 \cdot 10^{-3}$	Krebs	[HSE01; HIP08b; HIP08a; Krö00]
$5,00 \cdot 10^{-3}$	Rauchen	[HIP08b; HIP08a]

Weitere Werte von Alltagsrisiken finden sich in [Pil80; Pil82; Lin82; Hei02; Pil84].

A.3. Anforderungen an Druckbehälter nach ADR

Der Transport von Gefahrgut ist nach ADR [ADR05] grundsätzlich verboten, aber durch die Erfüllung bestimmter Anforderungsmerkmale mit einem Erlaubnisvorbehalt versehen [Mai06a].

Beim ADR [ADR05] (Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route) handelt es sich um das Europäische Übereinkommen über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße. Obwohl dem Namen nach ein europäisches Abkommen, beschränkt sich das ADR nicht ausschließlich auf den europäischen Raum, bzw. den der EU, sondern kann durchaus auch von anderen Staaten getragen werden. Das Bestreben des ADR ist die Erhöhung der Sicherheit bei der Beförderung gefährlicher Güter im internationalen Straßenverkehr, durch einheitliche Vorschriften der Mitgliedsländer. Das Pendant zum ADR für den Schienenverkehr ist das RID (Reglement concernant le transport International ferroviaire de marchandises Dangereuses), die Ordnung über die internationale Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter, auf das im weiteren nicht eingegangen wird. Das ADR stellt ein Basisregelwerk über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße dar. Es enthält Vorschriften insbesondere für die Klassifizierung, Verpackung, Kennzeichnung und Dokumentation gefährlicher Güter, für den Umgang während der Beförderung und für die verwendeten Fahrzeuge. Die eigentlichen Vorschriften des ADR werden in seinen Anhängen spezifiziert, wobei im Anhang A „Vorschriften über die gefährlichen Stoffe und Gegenstände“ und im Anhang B „Vorschriften über die Beförderungsmittel und die Beförderung“ gegeben sind. Das ADR wird alle zwei Jahre aktualisiert und somit an neue wissenschaftliche Erkenntnisse angepasst. Die aktuelle Fassung ist vom 01. Januar 2011. Die verpflichtende Umsetzung des ADR erfolgte europaweit durch die Rahmenrichtlinie 94/55/EG [RL994], die des RID durch die Rahmenrichtlinie 96/49/EG [RL996]. Diese wurden wiederum 2008 zur Rahmenrichtlinie 2008/68/EG [RL208] zusammengefasst, die neben den Aspekten der Gefahrgutbeförderung zu Land durch ADR/RID auch die der Beförderung in Binnengewässern durch das ADN [ADN06] berücksichtigt. Mit Inkrafttreten dieser Rahmenrichtlinie mussten die Vorschriften des ADR somit in nationales Recht umgesetzt werden und die Anwendung des ADR wurde auf den innerstaatlichen Verkehr ausgedehnt. Die nationale Umsetzung der Richtlinien 2008/68/EG erfolgte in Deutschland durch die „Gefahrgutverordnung Straße und Eisenbahn – GGVSE“ [GGV06], die im Jahr 2009 durch die „Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt – GGVSEB“ [GGV09] ersetzt wurde. Zu den Gründen das ADR durch eine Rahmenrichtlinie national verpflichtend einzuführen, gehörte zum Zeitpunkt des Erscheinens die Tatsache, dass der innerstaatliche und vor allem der grenzüberschreitende Gefahrgutverkehr auf der Straße erheblich zugenommen hatte. In den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union bestanden zu diesem Zeitpunkt keine einheitlichen gemeinschaftlichen Regelungen, die das gesamte Spektrum der Bestimmungen umfassten und zur Gewährleistung eines sicheren Gefahrgutverkehrs notwendig sind, wobei die einzelstaatlichen Vorschriften Unterschiede aufwiesen. Diese nationalen Unterschiede in den Vorschriften führten zu Beeinträchtigungen bei Verkehrsdienstleistungen sowie beim freien Verkehr von Fahrzeugen und Transportausrüstungen. Die Überlegung bestand nun darin, diese Hindernisse durch Schaffung von einheitlichen Bedingungen für den gemeinschaftlichen Verkehr zu beseitigen.

Dieses Ziel wurde schließlich in der Richtlinie 1999/36/EG (TPED) [RL199] umgesetzt, in der der freie Warenverkehr auf Basis internationaler Verträge zum sicheren Verkehr geregelt wird. Zu diesem Zeitpunkt verlangte jeder Mitgliedsstaat der EU für alle ortsbe-

weglichen Druckgeräte, die in seinem Hoheitsgebiet verwendet werden sollten, eine Zulassung und Prüfung durch eine von den Landesbehörden zugelassenen Stellen. Dieses System der Mehrfachzulassungen für ortsbewegliche Druckgeräte, die im Verlauf ihres Beförderungsvorganges in mehr als nur einem Mitgliedstaat verwendet werden sollten, führte zur Behinderung von Beförderungsleistungen innerhalb der EU. Ziel dieser Richtlinie war es, den Verkehr ortsbeweglicher Druckgeräte zu harmonisieren. Die gegenseitige Anerkennung der durch die von den national zuständigen Stellen getätigten Zulassungen sollte diese Hindernisse für das freie Angebot von Verkehrsdienstleistungen beseitigen. Wesentlicher Bestandteil ist dabei die gegenseitige Anerkennung der Bewertungsverfahren zur Neubewertung der Konformität und Verfahren für die wiederkehrenden Prüfungen. Um den Ermessensspielraum der einzelnen nationalen Staaten zu beseitigen, musste demnach eindeutig festgelegt werden, welche Verfahren anzuwenden sind. Das ADR und somit auch die Rahmenrichtlinie 2008/68/EG geben unter anderem Anforderungen für den Bau und Sicherheitsvorschriften für Druckgeräte wieder. In Artikel 3 Abschnitt 1 der RL 1999/36/EG heißt es *„Neue Gefäße und Tanks müssen die einschlägigen Vorschriften der Richtlinien 94/55/EG und 96/49/EG (Anm.: neu 2008/68/EG) erfüllen. Die Einhaltung dieser Vorschriften durch diese ortsbeweglichen Druckgeräte wird von einer benannten Stelle festgestellt und ausschließlich durch die Konformitätsverfahren gemäß Anhang IV Teil I und Anhang V nachgewiesen.“* Anhang V gibt Auskunft darüber, welche Module nach Anhang IV auf den jeweiligen Druckbehälter angewandt werden müssen. In Anhang IV werden Module erläutert, die zur Neubewertung von Druckgeräten, je nach Zuordnung durch Anhang V, erfüllt werden müssen. Diese Module geben allerdings keine technische Anforderungen wieder, weshalb davon auszugehen ist, dass die nicht genauer spezifizierten technischen Anforderungen dieser Richtlinie durch die Anforderungen der Rahmenrichtlinie 94/55/EG und 96/49/EG als erfüllt angesehen werden können. Die Teile II (über Verfahren für die Neubewertung der Konformität) und III (über Verfahren für die wiederkehrenden Prüfungen) des Anhangs IV beziehen sich direkt auf die in den Rahmenrichtlinien 94/55/EG und 96/49/EG beschriebenen einschlägigen Anforderungen und somit auf Anforderungen des ADR.

Die nationale Umsetzung der Richtlinie 1999/36/EG erfolgte in Deutschland durch die Verordnung über ortsbewegliche Druckgeräte (OrtsDruckV) [Ort04]. Nach dieser Verordnung müssen neue Gefäße, Tanks, Ventile und sonstige Ausrüstungsteile mit unmittelbarer Sicherheitsfunktion für das ortsbewegliche Druckgerät den anwendbaren Europäischen Normen oder Richtlinien entsprechen, die in Abschnitt 6.2.2 oder Unterabschnitt 6.8.2.6 des ADR/RID aufgeführt sind. Vorhandene Druckgeräte dürfen nach dieser Verordnung nur dann weiter verwendet werden, *„wenn die Einhaltung der Vorgaben der GGVSE (seit 2009 GGVSEB) in Verbindung mit den darin jeweils festgelegten Fassungen des ADR/RID von einer zugelassenen Stelle nach dem Verfahren zur Neubewertung der Konformität gemäß Anhang IV Teil II der Richtlinie 1999/36/EG festgestellt wurde“* [Ort04]. Bei der GGVSEB wiederum handelt es sich, wie oben beschrieben, um die nationale Umsetzung der europäischen Rahmenrichtlinie 2008/68/EG und seiner technischen Anhänge, die wiederum die europäische Ausgabe des ADR darstellt. Eine Ausnahme dieser Regelungen stellen die vorhandenen ortsbeweglichen Druckgeräte dar, die nach den Richtlinien 84/525/EWG, 84/526/EWG und 84/527/EWG [RL8a; RL8b; RL8c] bewertet und in Verkehr gebracht wurden. Mit diesen harmonisierten Regelungen gab es die Möglichkeit, für Druckgeräte mit einer deutschen Zulassung auch eine Transporterlaubnis für die restlichen ADR-Staaten zu erhalten. Die Verbindungen von ADR/RID bis hin zum nationalen Recht sind in Abbildung A.2 dargestellt.

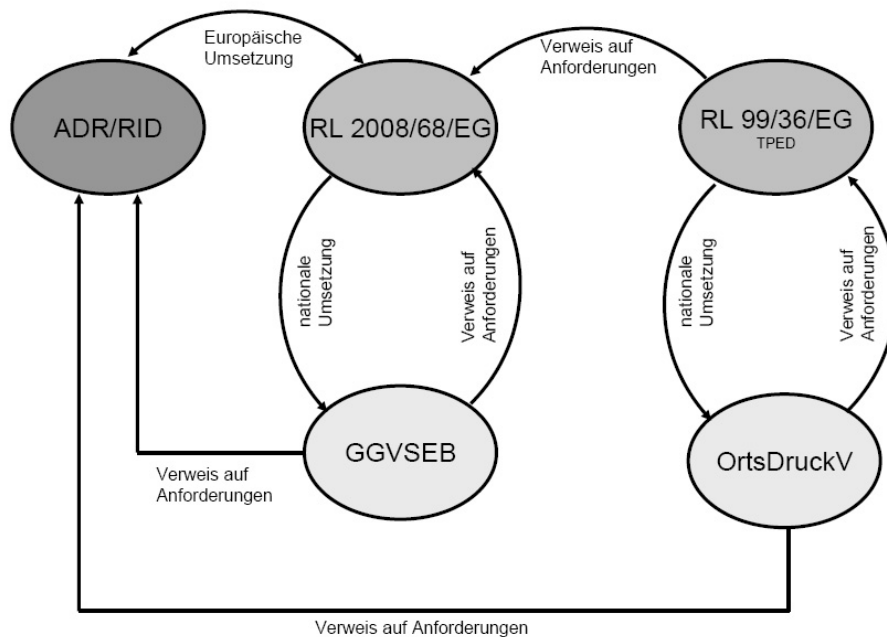


Abbildung A.2.: Zusammenhang von ADR zu nationalem Recht

Für die Neuzulassung von Druckbehältern in Deutschland bedeutet dies, dass sie seit dem 01. Juli 2003 nur noch nach der Richtlinie 1999/36/EG auf der Basis des ADR zertifiziert werden können. Die Möglichkeit der nationalen Zulassung verschwand mit dem Rückziehen der Druckbehälterverordnung [Dru99] Ende 2002. [TES11] Nach derzeitigem Recht werden für in Gebrauch befindliche Druckgeräte fünf Möglichkeiten der deutschen Zulassung (Zertifizierung) unterschieden:

1. Zulassung nach Druckgasverordnung bzw. Druckbehälterverordnung (national, bis Ende 2002),
2. Zertifizierung nach Richtlinie 1999/36/EG (EU-weit, seit 2001),
3. reine ADR/RID-Zulassung (ADR/RID-Mitgliedsstaaten),
4. UN-Zulassung (ADR/RID, IMO-Mitgliedsstaaten, weltweit; seit 2003) und
5. IMDG-Code-Zulassung ohne UN-Anforderungen oder andere harmonisierte Beschaffenheitsanforderungen (ADR/RID, IMO-Mitgliedsstaaten; weltweit). [TES11]

Dieses Vorgehen zeigt deutlich auf, in wie weit die Anforderungen an Druckbehälter durch die Regelungen des ADR/RID gefasst sind:

Die im ADR geforderten Kriterien zur Gewährleistung der Sicherheit von Druckbehältern basieren auf der Erfüllung von technischen Normen. Die an Druckbehälter gestellten Anforderungen sind in Kapitel 6.2 des ADR wiedergegeben, wobei der Bezug zu den anzuwendenden Normen in Kapitel 6.2.2 erfolgt. Wie auch im deutschen Recht ist hier keine ausschließliche Konformitätsbewertung der Druckbehälter auf Grund von Normen gegeben; vielmehr wird unterstellt, dass nach diesem System ausgelegte, gebaute und geprüfte Druckbehälter den Anforderungen des ADR entsprechen.

A.4. Vergleich des Modells des TNT-Äquivalents mit einem durchgeführten Versuch

Da das Modell des TNT-Äquivalents als einziges der beschriebenen Modelle in der Lage ist, auf Grund von Behältervolumen, Behälterinnendruck und stoffinheränter Faktoren Werte des Spitzenüberdrucks in Abhängigkeit vom Abstand zur Expositionsquelle zu generieren, sowie dabei sowohl das reine Bersten eines Druckbehälters ohne anschließende chemische Reaktion als auch das Bersten eines Druckbehälters mit anschließender chemischer Reaktion zu berücksichtigen, wird für die Bearbeitung der im Rahmen dieser Arbeit gestellten Fragen eben dieses Modell zur Erfassung der druckinduzierten Konsequenzen zu Rate gezogen. Die Validierung erfolgt dabei auf Grundlage dokumentierter Unfälle.

In [KKL09] wird die Explosion einer Propangasleitung am 09. Dezember 1970 im US-Bundesstaat Missouri aufgegriffen. Der Untersuchungsbericht dieses Unfalls (NTSB-PAR-72-1) gab an, dass durch ein Leck in der Pipeline insgesamt 765 barrel = 61.330 kg Propan ausgetreten waren. Unter der Annahme, dass sich 24 Minuten nach Leckagebeginn die gesamte Masse Brennstoff entzündete ergibt sich mit einer spezifischen Verbrennungsenthalpie von 46 kJ/kg für Propan sowie dem Wirkungsfaktor $\eta = 0,003$ nach Tabelle 6.1 ein TNT-Massenäquivalent von 1.880 kg. Dokumentiert wurden folgende Konsequenzen in Abhängigkeit vom Radius zur Expositionsquelle:

- 800 m: Druckwelle reißt Personen um;
- 3200 m: schwere und leichte Bauwerksschäden und Glasbruch;
- 3200 – 11200 m: leichte Bauwerksschäden und Glasbruch.

Nach [Gan11] ergeben sich somit skalierte Abstände von

- $z_{800} = 64,8$
- $z_{3200} = 259,3$
- $z_{11200} = 907,5$

und somit folgende Spitzenüberdrücke

- $p_{800} \approx 0,013$ bar
- $p_{3200} \approx 0,003$ bar
- $p_{11200} \approx 0,001$ bar

Ein Vergleich dieser Werte mit den in den Tabellen 4.1 bis 4.2 gegebenen Werten zu den Auswirkungen des Spitzenüberdrucks zeigt, dass die Werte der Konsequenzerfassung mittels des TNT-Äquivalents eine durchaus akzeptable Darstellung liefern. Die Darstellung kann nur eine grobe Näherung der realen Ereignisse wiedergeben; externe Einflüsse wie Bebauungen, Windrichtung, Reflexion und viele mehr können bei diesem Modell nicht mit berücksichtigt werden. Dennoch lässt sich an Hand dieses Modells die Gaswolkenexplosion eines brennbaren Stoffes in erster Näherung gut abschätzen. Weitere Daten zur Validierung von Gaswolkenexplosionen mittels des TNT-Äquivalents finden sich in [BM05; Pra06].

Auch für die Auswirkungen des Behälterberstens ohne chemische Reaktion empfiehlt es sich, eine Validierung dieses Modells mit durch Unfälle oder Versuche erfassten Werten vor

zu nehmen. Die in [MOW05] durchgeführten Versuche eignen sich auf Grund ihrer guten Dokumentation gut für dieses Anliegen. In [MOW05] wird das Verhalten von Druckbehältern zur Wasserstoffspeicherung bei direkter externer Krafteinwirkung untersucht. Ansatz dieser Untersuchungen war die Überlegung eines Worst-Case-Szenarios bei der Kollision mit einem treibgasbetriebenen Kraftfahrzeug. Da Druckbehälter den aktuellen Stand der Technik in Bezug auf die Speicherung von Gasen als Treibstoff für Kraftfahrzeuge darstellen, wurden in diesen Untersuchungen die Auswirkungen von direkten externen Krafteinwirkungen auf eben jene Druckbehälter untersucht. Von den im Vorfeld gestellten Fragen stehen hier insbesondere die des Verhaltens des Druckbehälters bei Krafteinwirkung und den daraus resultierenden Auswirkungen auf die Umgebung im Vordergrund. Bei den Versuchen wurden Druckbehälter zur Speicherung von Wasserstoff mit einem Innendruck von 350 bzw. 700 bar in axialer und lateraler Richtung durch ein fallendes Gewicht gewaltsam belastet. Bei den Versuchen wurde ein Gewicht mit einer Masse von 2500 kg aus einer Höhe von 2 m auf den Druckbehälter fallen gelassen. Die Energie der Krafteinwirkung ergibt sich aus der Formel zur Berechnung der potentiellen Energie eines Gegenstandes $E_{pot} = mgh$ zu 49.000 kJ. Dies würde in etwa dem Aufprall eines 1t schweren Fahrzeuges mit einer Geschwindigkeit von 36 km/h entsprechen. Hierbei sollte allerdings im Hinterkopf behalten werden, dass bei den durchgeführten Versuchen die externe Kraft direkt auf den Druckbehälter einwirkt, während bei einem Verkehrsunfall bereits ein unbekannter Anteil der einwirkenden Energie durch das Chassis aufgenommen wird. Darüber hinaus wurde ein maximaler Verformungsgrad durch die Anbringung von Stoppern realisiert, so dass die einwirkende Energie je nach Einstellung eine maximale Verformung von 50, 100 und 138 mm bewirken konnte. Bis auf einen Versuch war die Richtung der Krafteinwirkung auf den Druckbehälter axial; bei der gegenwärtig gängigen Anbringung rechtwinklig zur Fahrzeugachse würde dies demnach eine Krafteinwirkung auf die Seite des Fahrzeuges bedeuten. Der Aufbau der Versuche ist in Abbildung A.3 wieder gegeben.

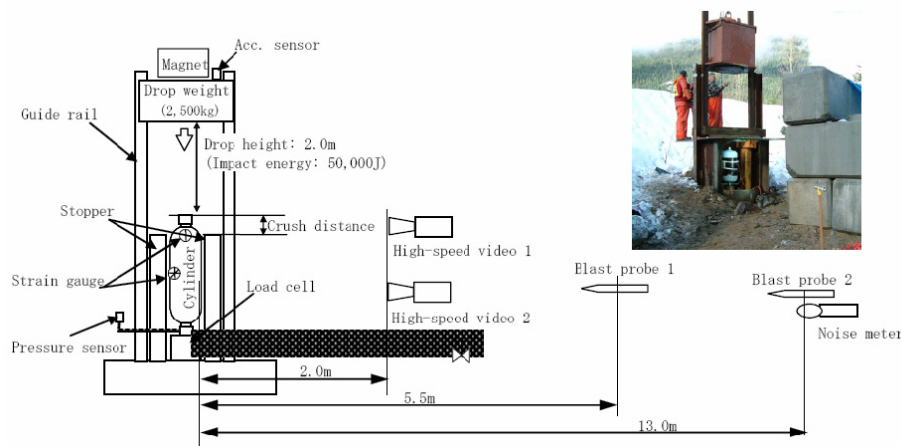


Abbildung A.3.: Versuchsaufbau zum Impact-Verhalten von Druckbehältern nach [MOW05]

Für die spätere Bewertung der Wahrscheinlichkeiten von Druckbehälterversagen und deren Konsequenzen lassen sich aus MOW05 einige Tatsachen ableiten.

- Je größer der maximale Verformungsgrad, desto häufiger tritt ein Behälterbersten ein.
- Bei einem Betriebsdruck von 700 bar versagen die Behälter durch Leckage, während die gleichen Modelle bei 350 bar in zwei von drei Fällen durch Bersten versa-

gen. Ein höherer Betriebsdruck scheint hier demnach einem katastrophalen Versagen entgegen zu wirken

- Typ 3a versagt häufiger katastrophal als die anderen Druckbehälterttypen. Vermutlich resultiert diese Tatsachen aus dem großen Verhältnis von Länge zu Durchmesser dieses Druckbehälterttypen, was durch die Quelle allerdings nicht verifiziert wird.

Zur Validierung des TNT-Äquivalenzmodells bezüglich der Berechnung des Spitzenüberdrucks beim Bersten eines Druckbehälters ohne anschließende chemische Reaktion soll der Test T 2 ausgewählt werden. Hierbei handelt es sich um einem Metall-Composite Druckbehälter mit einer Länge von 960 mm, einem Durchmesser von 280 mm (berechnetes Volumen etwa 60 Liter) und einem Innendruck von 350 bar. Der Druckbehälter wird nach oben beschriebener Versuchsanordnung mit einem maximalen Verformungsgrad von 88 mm belastet, was letztendlich zum Bersten des Druckbehälters führt. Im Abstand von 5,5 m und 13 m wurde jeweils der Spitzenüberdruck des berstenden Behälters gemessen, der in Abbildung A.4 gezeigt wird und sich folgendermaßen darstellt:

- Spitzenüberdruck in 5,5 m Entfernung: etwa 0,16 bar
- Spitzenüberdruck in 13 m Entfernung: etwa 0,06 bar

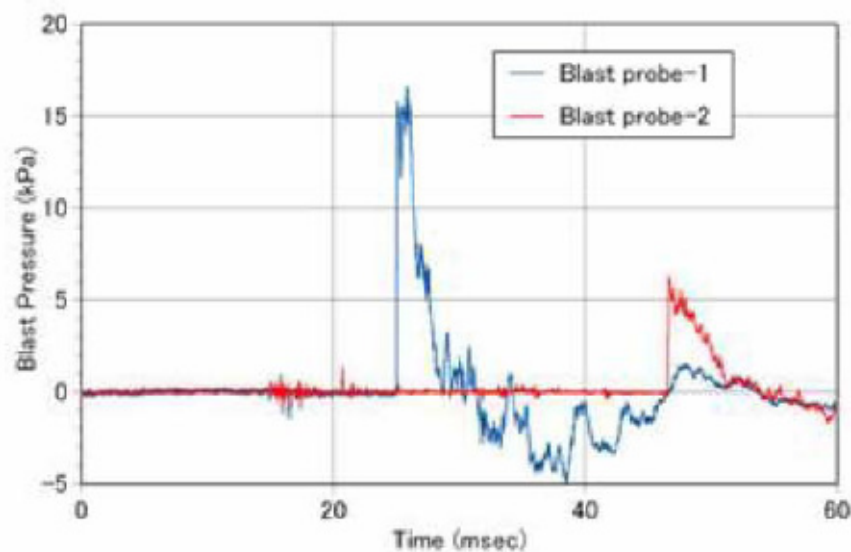


Abbildung A.4.: Spitzenüberdruck in Abhängigkeit zur Entfernung der Explosionsquelle [MOW05]

Die Berechnung des Spitzenüberdrucks mit dem Modell des TNT-Massenäquivalents ergibt sich folgendermaßen:

1. Berechnen der äquivalenten Masse TNT:

$$m_{TNT} = 0,025 \cdot 350\text{bar} \cdot 0,06\text{m}^3 = 0,45\text{kg}$$

2. Berechnen des skalierten Abstandes für die Radien 5,5 m und 13 m:

$$z_{5,5} = 7,18\text{m}$$

$$z_{13} = 17,00\text{m}$$

3. Berechnen des Spitzenüberdrucks für die Radien 5,5 m und 13 m:

$$z_{5,5} = 0,1597\text{bar}$$

$$z_{13} = 0,0527\text{bar}$$

Die Kurve der nach dem TNT-Äquivalenzmodell berechneten Spitzenüberdrücke ist in Abbildung A.5 wiedergegeben. Die nach dem Modell des TNT-Massenäquivalents berechneten Werte des Spitzenüberdrucks für berstende Druckbehälter ohne anschließende chemische Reaktion stimmen an dieser Stelle gut mit den erfassten Versuchsdaten aus [MOW05] überein. Es ist somit davon auszugehen, dass die Berechnung von Spitzenüberdrücken berstender Druckbehälter mit diesem Modell eine gute Näherung des realen Verlaufs darstellt.

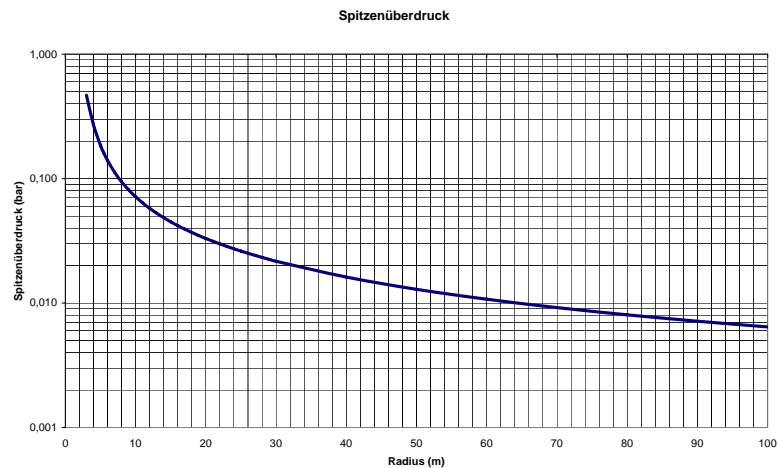


Abbildung A.5.: Berechnete Spitzenüberdrücke über den Radius

Eine ausführliche Beschreibung der Berechnung der Werte nach dem Modell des TNT-Massenäquivalents sind in [Gan11] gegeben.

A.5. Statistik der Unfallarten

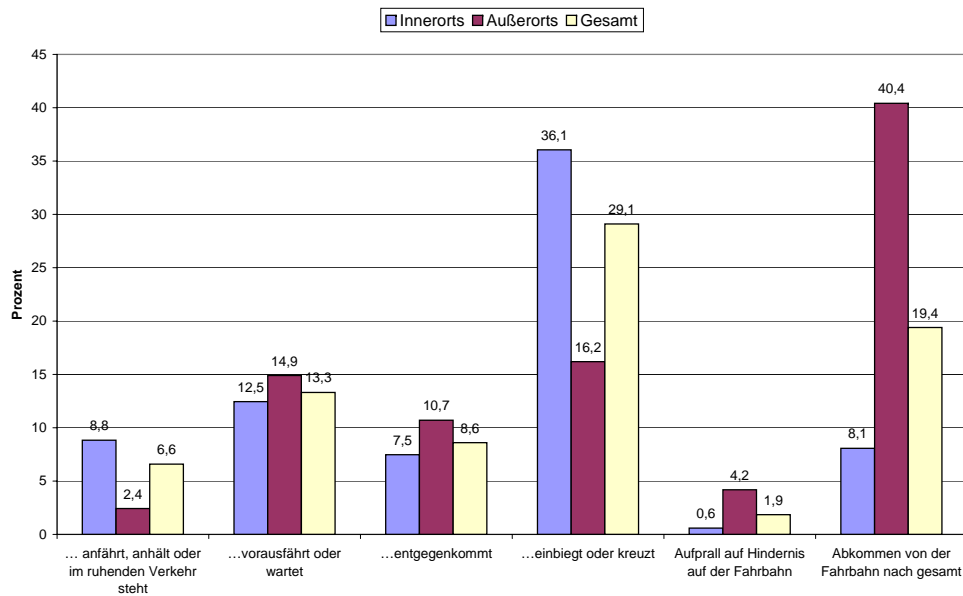


Abbildung A.6.: Prozentualer Anteil der verschiedenen Unfallarten

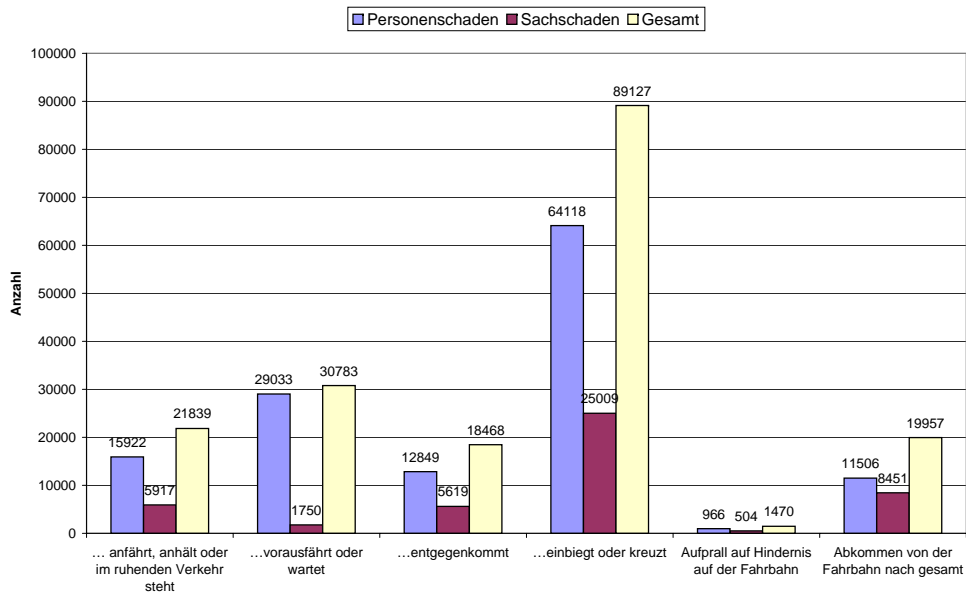


Abbildung A.7.: Anteile an Unfällen mit Personen- bzw. Sachschaden – Innerstädtisch

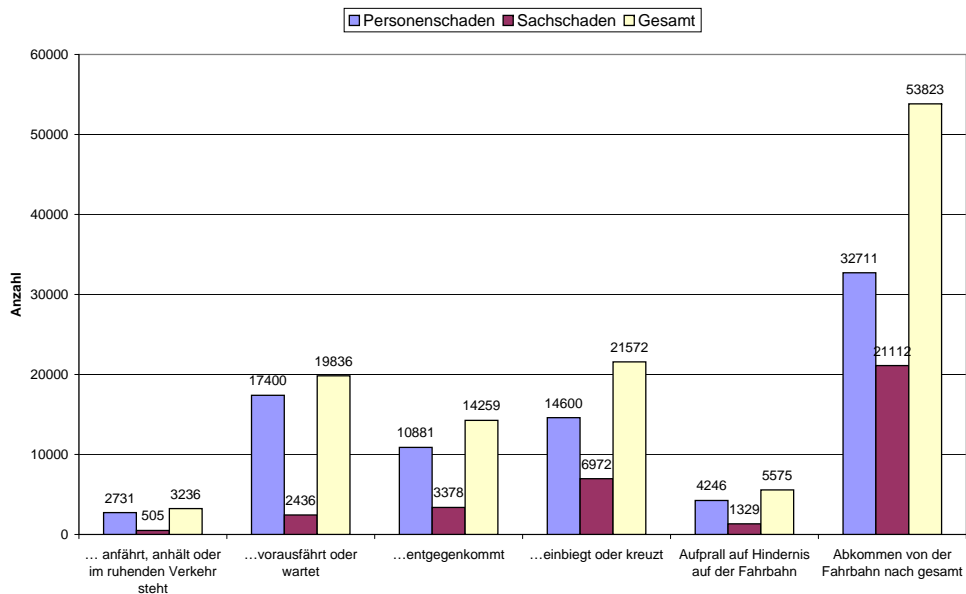


Abbildung A.8.: Anteile an Unfällen mit Personen- bzw. Sachschaden – Außerstädtisch

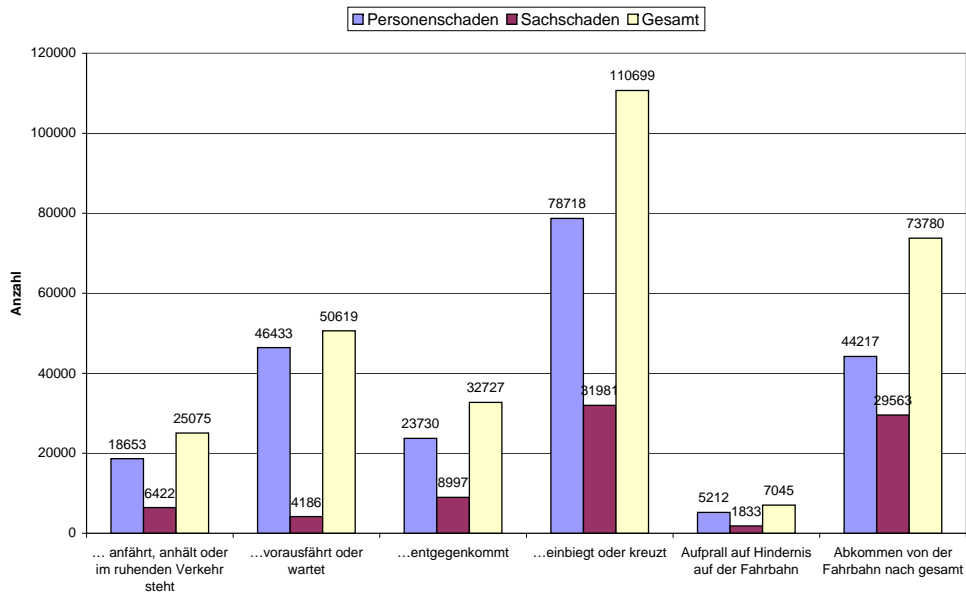


Abbildung A.9.: Anteile an Unfällen mit Personen- bzw. Sachschaden – Gesamt

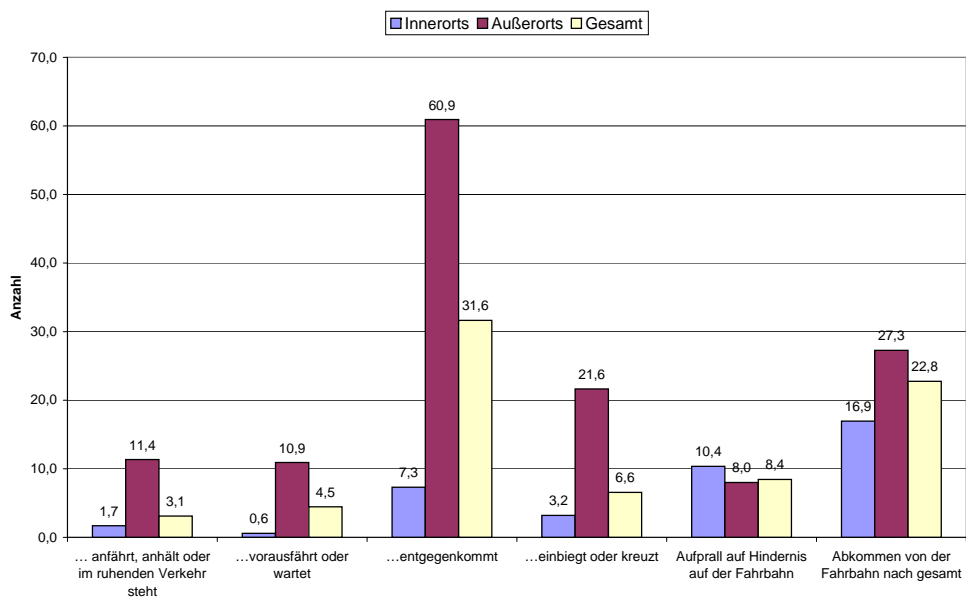


Abbildung A.10.: Anzahl der bei Unfällen mit Personenschaden getöteten Personen je 1000 Unfälle

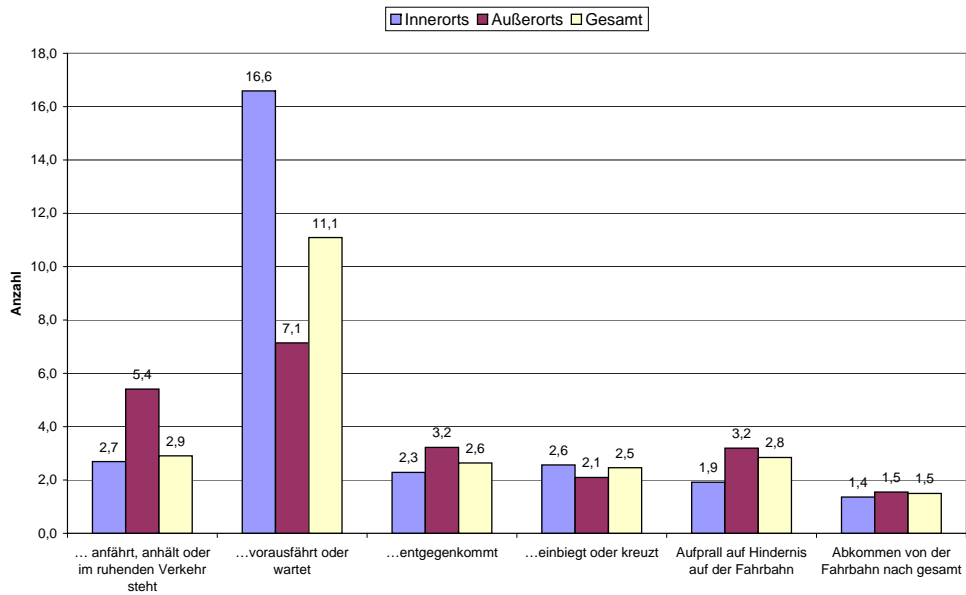


Abbildung A.11.: Verhältnis der Unfälle mit Personen- zu denen mit Sachschaden

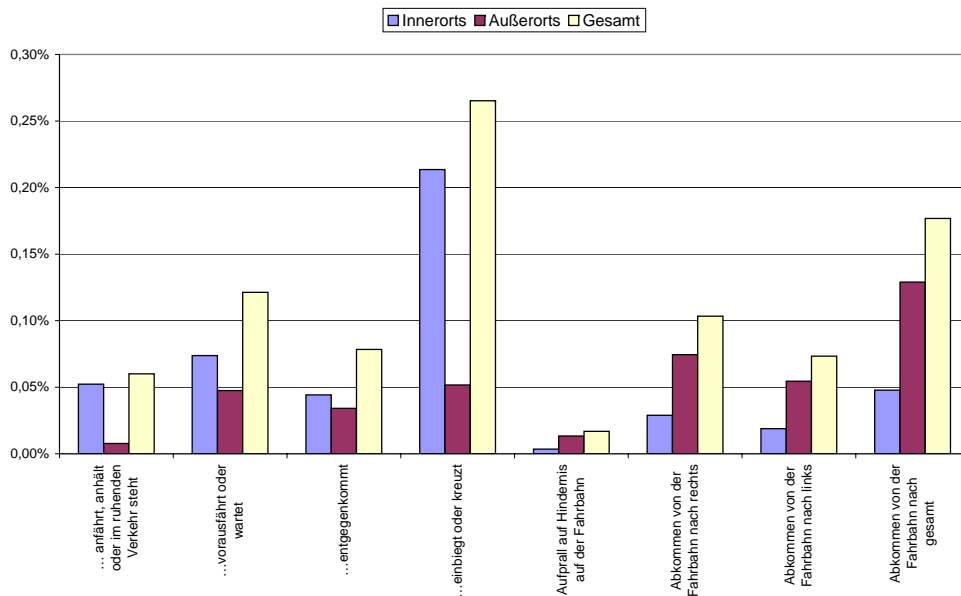


Abbildung A.12.: Verhältnis der Unfallarten bezogen auf die Pkw-Dichte

A.6. Europäische Unfallzahlen

Tabelle A.2.: Europäische Unfallzahlen im Vergleich

Anteile	A	B	DK	F	D	IRL
Innerorts (%)	65,79	61,23	59,30	75,50	73,84	50,04
Außerorts (%)	34,21	38,77	40,70	24,50	26,16	49,96
Unfälle je 1000 Kfz	9,21	9,07	2,07	k.A.	7,52	3,03
Innerorts: Unfall mit nur einem Kfz (%)	k.A.	k.A.	37,93	40,46	41,41	28,97
Innerorts: Unfall mit mehreren Kfz (%)	k.A.	k.A.	62,45	69,46	68,76	54,95
Innerorts: Heckunfall (%)	k.A.	k.A.	52,73	98,28	60,52	58,86
Innerorts: Einbiegeunfall (%)	k.A.	k.A.	69,54	77,12	78,67	62,65
Innerorts: Frontalunfall (%)	k.A.	k.A.	35,32	54,67	46,46	38,5
Anteile	I	NL	P	E	CH	GB
Innerorts (%)	81,43	69,70	75,21	52,02	71,83	75,61
Außerorts (%)	18,57	30,30	24,79	47,98	28,17	24,39
Unfälle je 1000 Kfz	6,09	k.A.	k.A.	4,48	5,03	4,49
Innerorts: Unfall mit nur einem Kfz (%)	47,36	41,5	44,68	23,75	49,57	43,96
Innerorts: Unfall mit mehreren Kfz (%)	69,21	61,71	68,81	61,8	61,41	64,84
Innerorts: Heckunfall (%)	65,31	44,57	57,11	45,38	63,59	k.A.
Innerorts: Einbiegeunfall (%)	82,82	70,76	72,91	68,21	80,45	k.A.
Innerorts: Frontalunfall (%)	67,94	54,88	71,85	35,1	63,4	k.A.

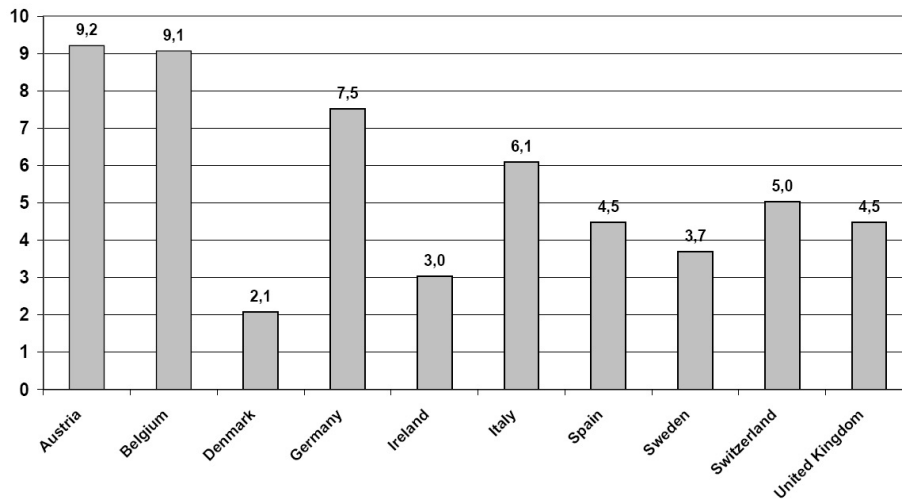


Abbildung A.13.: Unfälle je 1000 Kraftfahrzeuge

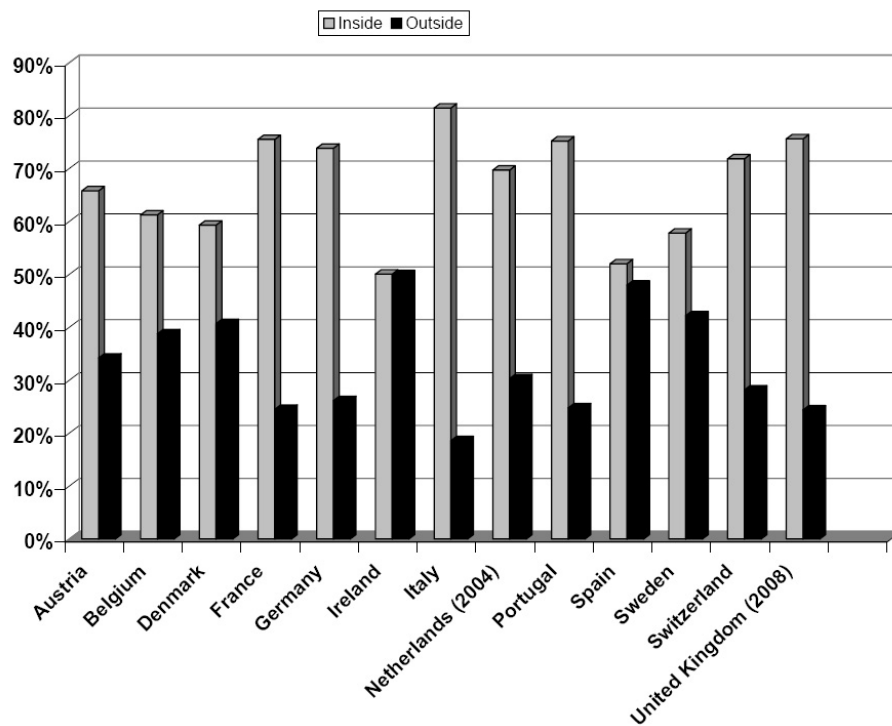


Abbildung A.14.: Vergleich der Unfallzahlen innerhalb und außerhalb von Ortschaften

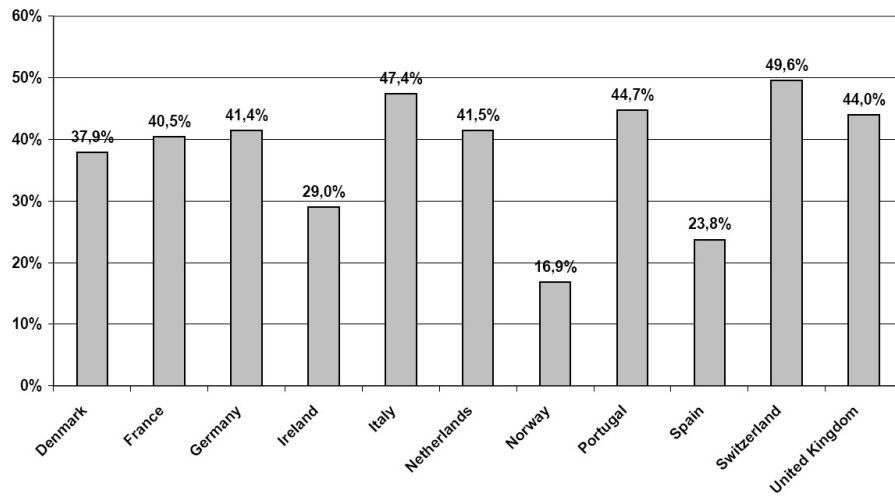


Abbildung A.15.: Unfallzahlen innerhalb von Ortschaften mit nur einem Kraftfahrzeug

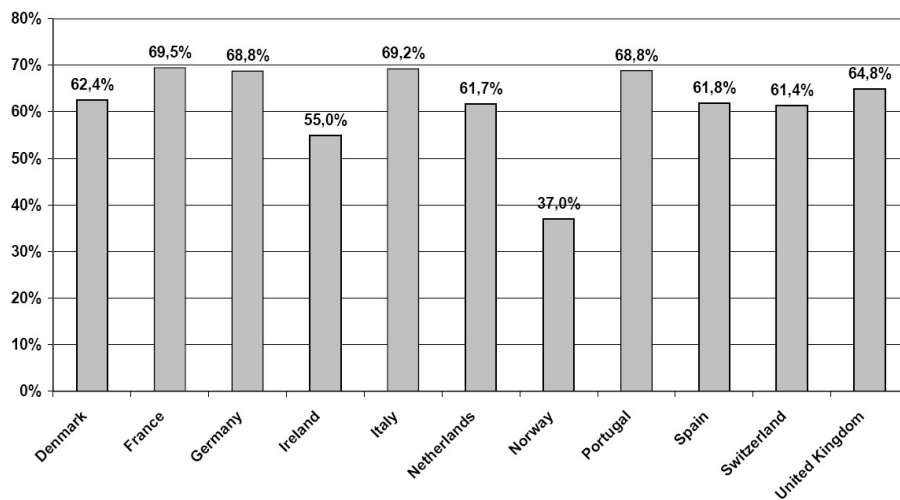


Abbildung A.16.: Unfallzahlen innerhalb von Ortschaften mit mehreren Kraftfahrzeugen

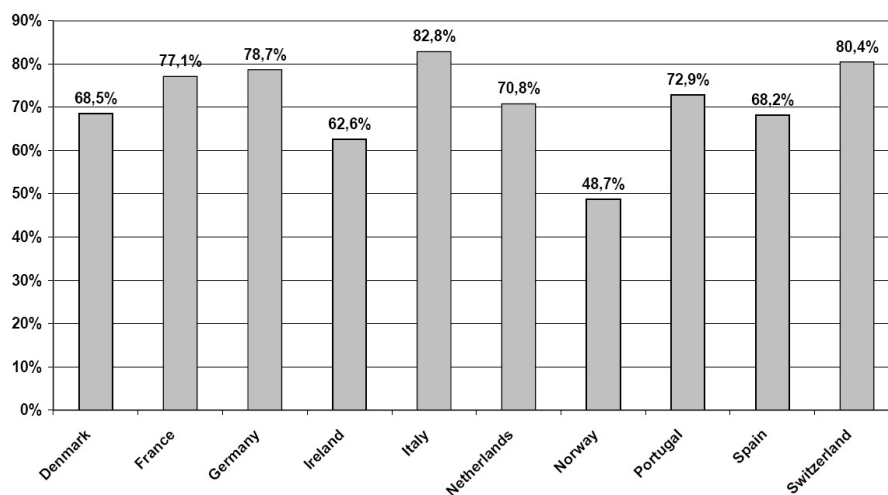


Abbildung A.17.: Einbiegeunfälle innerhalb von Ortschaften

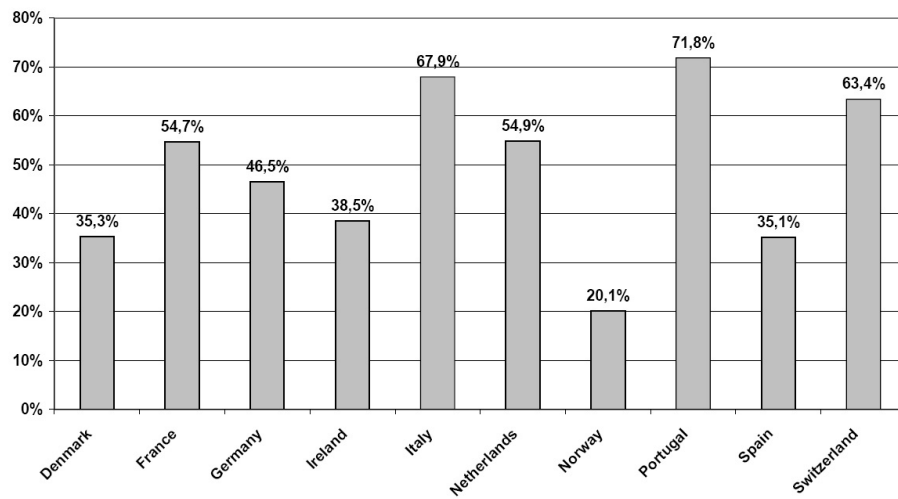


Abbildung A.18.: Frontalunfälle innerhalb von Ortschaften

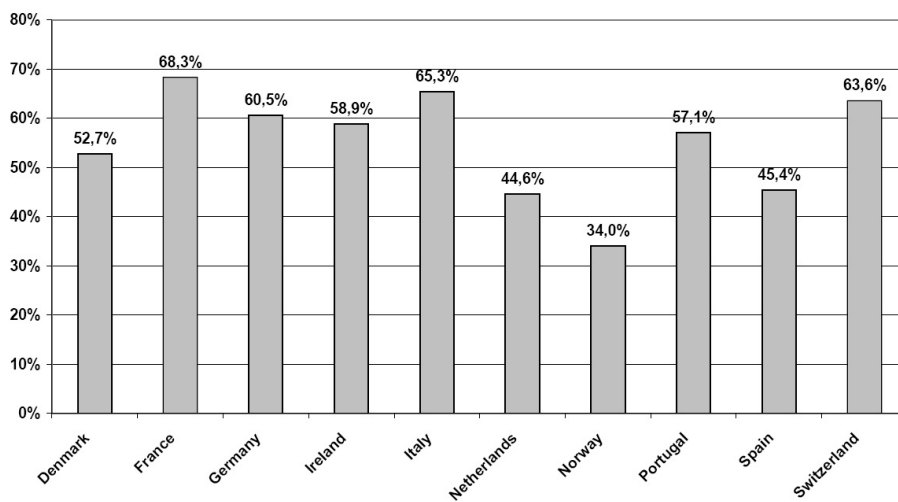


Abbildung A.19.: Heckunfälle innerhalb von Ortschaften

A.7. Crash-Verhalten nach verschiedenen Regelwerken

Tabelle A.3.: Anforderungen an das Crash-Verhalten nach verschiedenen Regelwerken

EU: ECE R-34 [ECE03] - Anforderungen an flüssige Kraftstoffe		
Test	Anforderungen	eingebraachte Energie
Frontal	48,3 - 53,1 km/h auf feste Barriere	108,8 m ² /s ² mal Masse
Seite	50 ± 1 km/h durch def. bewegliche Barriere mit 950 ± 20 kg	97,336 kJ
Heck	35 - 38 km/h durch def. bewegliche Barriere mit 1100 ± 20 kg	62,395 kJ
US: FMVSS 303 [FMV04b] - Anforderungen an CNG		
Test	Anforderungen	eingebraachte Energie
Frontal	48,3 km/h auf feste Barriere	88,8 m ² /s ² mal Masse
Seite	32 ± 1 km/h durch def. bewegliche Barriere mit 1814 ± 23 kg	72,177 kJ
Heck	48 km/h durch def. bewegliche Barriere mit 1814 ± 23 kg	162,4 kJ
CAN: CMVSR 301.2 [CMV04b] - Anforderungen an CNG		
Test	Anforderungen	eingebraachte Energie
Frontal	48,3 km/h auf feste Barriere	88,8 m ² /s ² mal Masse
Seite	32 ± 1 km/h durch def. bewegliche Barriere mit 1814 ± 23 kg	72,177 kJ
Heck	48 km/h durch def. bewegliche Barriere mit 1814 ± 23 kg	162,4 kJ

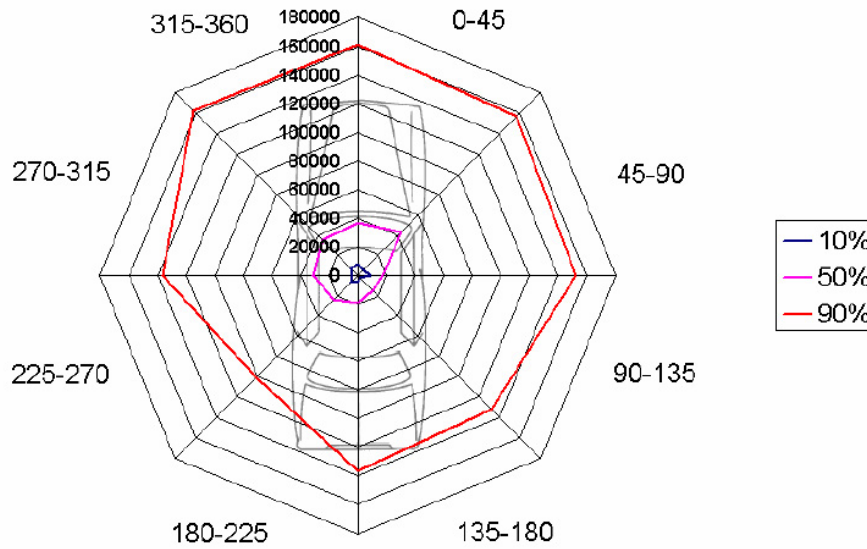


Abbildung A.20.: Spinnennetz-Diagramm (CIDAUT und EES Datenbank) [DSA05]

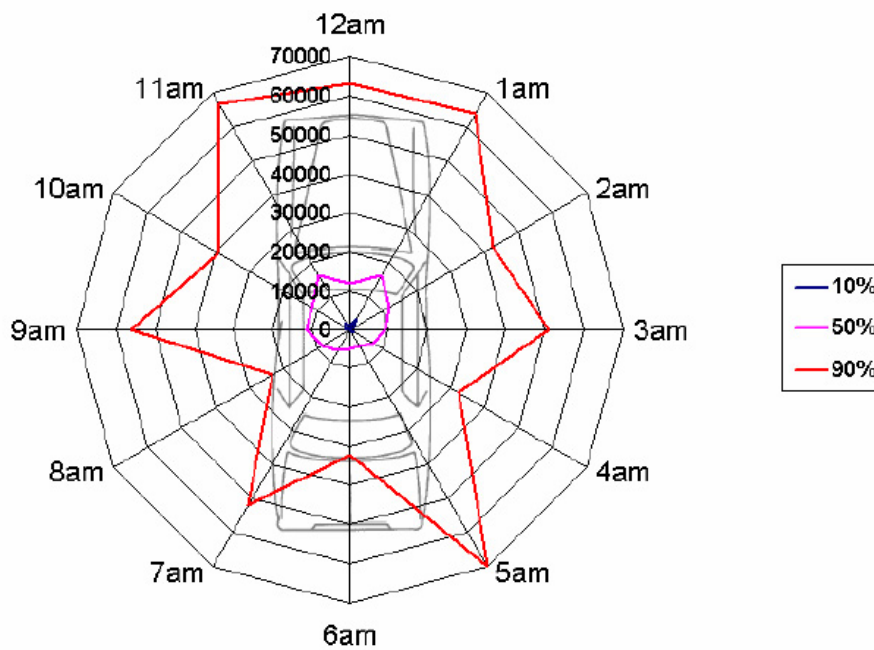


Abbildung A.21.: Spinnennetz-Diagramm (GIDAS Datenbank) [DSA05]

Tabelle A.4.: Kinetische Energien bei verschiedenen Unfallarten zur Simulation des Crash-Verhaltens nach [Mar07]

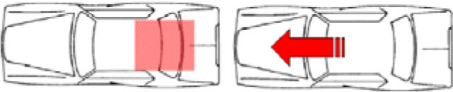
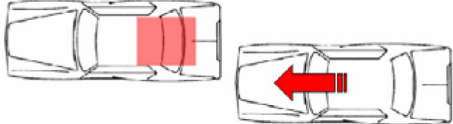
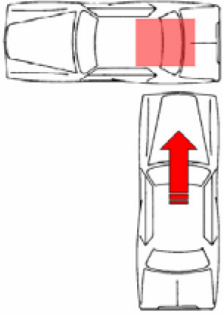
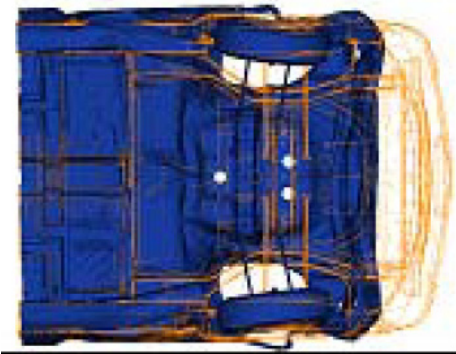

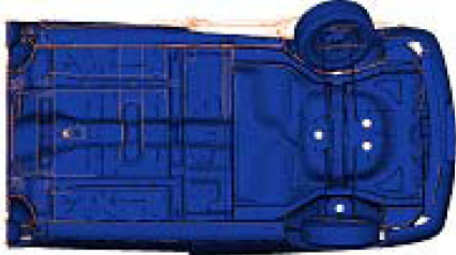
Aufprallkonfiguration	Energie (kJ)		v (km/h)	m (kg)
	Min.	Max.		
Heckaufprall 100 % 	50	160	57	1300
Heckaufprall 50 % 	50	160	57	1300
Seitenaufprall 	50	150	55	1300

Tabelle A.5.: Verformung und Eindringtiefe nach [Mar07]

Aufprallkonfiguration	Deformation	Maximale Eindringtiefe
Heckaufprall 100 %		400 mm
Heckaufprall 50 %		490 mm
Seitenaufprall		150 mm

A.8. Sonderfall: Pkw-Brand

Kapitel 5.2.2 beschreibt die Wahrscheinlichkeit der Druckbehälterschädigung durch externe Krafteinwirkung. In diesem Anhang wird die Wahrscheinlichkeit aufgezeigt, dass ein Druckbehälter in Folge eines Brandes berstend versagt. Hierbei erfolgt eine Beschränkung auf den Fahrzeugbrand des CNG-Fahrzeugs. Ein externer Brand, der geeignet ist, den Druckbehälter zum Bersten zu bringen, wäre ebenfalls ausreichend, im Vorfeld das betreffende Fahrzeug in Brand zu setzen. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel die Wahrscheinlichkeiten eines Fahrzeugbrands betrachtet. Die Jahresberichte einzelner Bundesländer geben Aufschluss über die Anzahl der Einsätze der Feuerwehr zu Kraftfahrzeugbränden. Bezogen auf die Unfallzahlen der betreffenden Bundesländer ergeben sich daraus relative Häufigkeiten für Fahrzeugbrände infolge von Straßenverkehrsunfällen. Tabelle A.6 zeigt exemplarisch für vier Bundesländer die Anzahl an Fahrzeugbränden, Unfälle mit Personenschaden und Sachschaden sowie die sich daraus ergebenden relativen Häufigkeiten.

Tabelle A.6.: Relative Häufigkeit von Fahrzeugbränden im Jahr 2009 ausgewählter Bundesländer

Bundesland	Einsätze Feuerwehr zu Fahrzeugbränden	Verkehrsunfälle [Ver09]	Relative Häufigkeit
Brandenburg	639 [Bra10a]	82.889	0,8 %
Nordrhein-Westfalen	3.956 [Bra10c]	561.749	0,7 %
Rheinland-Pfalz	1.526 [Bra07] (2006)	125.074	1,2 %
Thüringen	343 (222 Pkw) [Bra10b]	57.220	0,6 % (Pkw 0,4 %)

Die Anzahl der Straßenverkehrsunfälle unterliegt einer gewissen Konstanz (vgl. Kapitel 4.2.1); während die Zahl der Zulassungen beständig zunimmt, ist die Zahl der Unfälle tendenziell rückläufig. Die Zahl der Fahrzeugbrände lässt sich nur für [Bra10c; Bra10b] bis 2003 nachvollziehen; auch hier zeigt die Tendenz ein konstantes Auftreten von Fahrzeugbränden auf. Somit kann aus der relativen Häufigkeit auf eine Eintrittswahrscheinlichkeit zukünftiger Ereignisse geschlossen werden. Durchschnittlich kann von einer Wahrscheinlichkeit von nicht mehr als 1,0 % für Brände von Kraftfahrzeugen infolge von Verkehrsunfällen gerechnet werden. Zu beachten ist hier, dass nicht jeder Fahrzeugbrand aus einem Unfall hervorgehen muss. Fremdzündung, Zündung durch defekte Motortechnik oder elektrische Leitungen sowie Brandstiftung fließen hier zu einem nicht näher zu beziffernden Anteil mit ein. Da diese Ereignisse nichtsdestoweniger zum Bersten des Druckbehälters führen können, werden sie in die weiteren Berechnungen mit einbezogen.

Um die Wahrscheinlichkeit des Druckbehälterberstens mit anschließender chemischer Reaktion in Folge eines Brandfalls auf ein Minimum zu reduzieren, müssen die Druckbehälter nach internationalen Regelungen [ECE08] sowie nahezu deckungsgleichen nationalen Regelungen [DIN01a] mit für den Belastungsfall bemessenen Druckentlastungseinrichtungen (PRD – Pressure Relieve Device) ausgestattet sein. Untersuchungen zum Ansprechverhalten von unterschiedlichen thermisch aktivierten Druckentlastungseinrichtungen (TPRD)

sowie deren Massenstrom [Mül07] zeigen theoretisch, dass die TRPDs Glasfass und Lineare Thermosicherungen im Brandfall für die rechtzeitige Entleerung des Druckbehälters auf ein unkritisches Druckniveau sorgen können. TPRD-Schmelzlot weist auf Grund seines geringeren Massenstroms darauf hin, dass der Versagensfall in der zur Verfügung stehenden Zeit nicht verhindert werden kann. Crash-Tests des ADAC [ADA11] und ÖAMTC [CNG11a] mit einem Opel Zafira haben gezeigt, dass bei Heck- und Seitenunfällen mit Erdgasfahrzeugen keine Schädigungen der Druckbehälter zu erwarten sind. Ein anschließend gelegter Fahrzeugbrand führte zum Vollbrand des Fahrzeuges, wobei das im Druckbehälter gespeicherte Erdgas über die Druckentlastungseinrichtungen entweichen konnte. Ein Bersten der Druckbehälter oder Versagen der Sicherheitseinrichtungen blieb aus. Nach Aussagen verschiedener Quellen ist die Gefahr der Entstehung eines Brandes geringer als bei Fahrzeugen mit herkömmlichem Antrieb [CNG11b; Ste11; Erd11; CNG11a; EOGCK09]. All diese Aussagen geben allerdings keine Auskunft über die tatsächliche Wahrscheinlichkeit des Druckbehälterberstens mit anschließender chemischer Reaktion infolge von Brandeinwirkung. Da zu diesem Thema zum Zeitpunkt des Entstehens dieser Arbeit keine konkreten Aussagen bestanden, wurde dieser Faktor beim weiteren Vorgehen nicht berücksichtigt. Die getroffenen Aussagen zur Wahrscheinlichkeit des Behälterberstens durch einen Fahrzeugbrand beziehen sich lediglich auf die Unfallwahrscheinlichkeit sowie die Wahrscheinlichkeit des Fahrzeugbrands. Die Wahrscheinlichkeit des tatsächlichen Versagens bleibt außen vor. Zur realitätsgetreuen Darstellung der Wahrscheinlichkeit des Druckbehälterversagens durch einen Fahrzeugbrand müssen diese Wahrscheinlichkeiten in separaten Studien ermittelt und mit den Wahrscheinlichkeiten dieser Arbeit verknüpft werden.

A.9. Risikobeurteilung am Beispiel ausgewählter Szenarien für das Ereignis Brand

Die Darstellung der Risikobeurteilung am Beispiel ausgewählter Szenarien für das Ereignis Brand erfolgt nach dem gleichen Schema wie in Kapitel 7 mit zwei Einschränkungen.

Die Wahrscheinlichkeit eines Druckbehälterversagens infolge Brandeinwirkung ergibt sich aus der Summe aller Straßenverkehrsunfälle und somit nach Tabelle 5.7 zu $4,9 \cdot 10^{-3}$ innerhalb und $2,7 \cdot 10^{-3}$ außerhalb von Ortschaften. Unter Berücksichtigung der Fahrzeugbrandwahrscheinlichkeit nach Unfällen (vgl. Anhang A.8) von einem Prozent und des Verhältnisses der Zulassungszahlen von CNG-Fahrzeugen zu solchen herkömmlichen Antriebs von 0,15 % (vgl. Kapitel 4.2.2) ergeben sich folgende Eintrittswahrscheinlichkeiten:

- Innerhalb von Ortschaften: $7,35 \cdot 10^{-8}$
- Außerhalb von Ortschaften: $4,05 \cdot 10^{-8}$

Bei Erdgas handelt es sich allerdings um ein Produkt, welches Schwankungen unterliegt und dessen Werte somit als Vertrauensintervalle wieder gegeben werden müssen. Darüber hinaus waren einige Daten für Erdgas zum Zeitpunkt des Entstehens dieser Arbeit nicht verfügbar, so dass für diese Daten auf den Hauptbestandteil Methan zurück gegriffen werden musste. Erdgas weist nach [DIN08] eine Dichte von $0,72 - 0,91 \text{ kg/m}^3$ und einen Heizwert von $39-46 \text{ MJ/kg}$ für L-Gas und $>46 \text{ MJ/kg}$ für H-Gas auf. Methan weist dem gegenüber nach [Roe11] eine Dichte von $0,72 \text{ kg/m}^3$ und einen Heizwert von $50,03 \text{ MJ/kg}$ nach [DIN97] (vgl. auch [CH07]) auf. Da Methan den Hauptenergieträger im Erdgas darstellt, weist eine Dichte des Erdgases von $0,72 \text{ kg/m}^3$ auf einen Anteil von 100 % Methan und somit H-Gas hin, während mit Abnahme des Methananteils der Energiegehalt im Erdgas sinkt und schließlich bei einer Dichte des Erdgases von $0,92$ auf einen Anteil von etwa 80 % Methan schließen lässt. Der Brennwert von Erdgas liegt nach [DIN97] bei $55,52 \text{ MJ/kg}$ und nach [CH07] bei $50,02$ bis $55,53 \text{ MJ/kg}$. Der Wirkfaktor von Erdgas kann nach Tabelle 6.2 für reine Kohlenwasserstoffe mit $\eta = 0,05$ angesetzt werden. Somit ergibt sich für die Berechnung der Konsequenzradian durch Behälterbersten mit anschließender chemischer Reaktion für einen mit Erdgas ($\eta = 0,05$) gefüllten Druckbehälter folgendes Vertrauensintervall:

Oberer Grenzwert: H-Gas

Für die Berechnung des Vertrauensintervalls besteht H-Gas zu 100 % aus dem Brenngas Methan. Somit ergibt sich für den oberen Grenzwert eine Gasdichte von $0,72 \text{ kg/m}^3$ und ein Brennwert von 55 MJ/kg .

Unterer Grenzwert: L-Gas

L-Gas weist für die weiteren Berechnungen einen Methangasanteil von 80 % auf; die übrigen 20 % werden durch andere Gase abgedeckt, die allerdings keinen Beitrag zur Verbrennungsenergie liefern. Methan weist weiterhin eine Dichte von $0,72 \text{ kg/m}^3$ und einen Brennwert von 55 MJ/kg auf, allerdings werden bei der Berechnung der Masse an brennbaren Gas nur 80 % berücksichtigt, wodurch sich ein geringerer Wert des TNT-Massenäquivalents ergibt.

Die nach Kapitel 6.1 berechnete Anzahl der durch ein einzelnes Ereignis betroffenen Personen ist in den nachfolgenden Tabellen angegeben.

Tabelle A.7.: Anwesende und betroffene Personenanzahl bei Behälterbersten mit anschließender chemischer Reaktion im Stadtzentrum (12.000 Pers./km²)

Auswirkungen bei...		V=35 l	V=45 l	V=60 l	V=80 l
...reinem Überdruck	Personen _{anwesend}	0,28 - 0,32	0,33 - 0,38	0,40 - 0,46	0,48 - 0,55
	Personen _{betroffen}	0,23 - 0,26	0,27 - 0,31	0,32 - 0,37	0,39 - 0,45
... Trümmerflug im Freien	Personen _{anwesend}	1,74 - 2,02	2,06 - 2,38	2,50 - 2,89	3,02 - 3,50
	Personen _{betroffen}	1,07 - 1,26	1,28 - 1,48	1,56 - 1,80	1,88 - 2,18
... Trümmerflug in Gebäuden	Personen _{anwesend}	33 - 38	39 - 45	47 - 54	57 - 66
	Personen _{betroffen}	3,63 - 4,19	4,29 - 4,95	5,19 - 6,00	6,29 - 7,27

Tabelle A.8.: Anwesende und betroffene Personenanzahl bei Behälterbersten mit anschließender chemischer Reaktion in ruhiger Wohngegend (2.500 Pers./km²)

Auswirkungen bei...		V=35 l	V=45 l	V=60 l	V=80 l
...reinem Überdruck	Personen _{anwesend}	0,06 - 0,07	0,07 - 0,08	0,08 - 0,10	0,10 - 0,12
	Personen _{betroffen}	0,05	0,06	0,07 - 0,08	0,08 - 0,09
... Trümmerflug im Freien	Personen _{anwesend}	0,36 - 0,42	0,43 - 0,5	0,52 - 0,60	0,63 - 0,73
	Personen _{betroffen}	0,23 - 0,26	0,27 - 0,31	0,32 - 0,37	0,39 - 0,45
... Trümmerflug in Gebäuden	Personen _{anwesend}	6,84 - 7,91	8,09 - 9,35	9,80 - 11,3	11,9 - 13,7
	Personen _{betroffen}	0,78 - 0,87	0,93 - 1,03	1,12 - 1,24	1,36 - 1,51

Tabelle A.9.: Anwesende und betroffene Personenanzahl bei Behälterbersten mit anschließender chemischer Reaktion im Einzelhandel und Restaurants (4.000 Pers./km²)

Auswirkungen bei...		V=35 l	V=45 l	V=60 l	V=80 l
...reinem Überdruck	Personen _{anwesend}	0,09 - 0,11	0,11 - 0,13	0,13 - 0,15	0,16 - 0,18
	Personen _{betroffen}	0,08 - 0,09	0,09 - 0,10	0,11 - 0,12	0,13 - 0,15
... Trümmerflug im Freien	Personen _{anwesend}	0,58 - 0,67	0,69 - 0,79	0,83 - 0,96	1,01 - 1,17
	Personen _{betroffen}	0,36 - 0,42	0,43 - 0,50	0,52 - 0,60	0,63 - 0,73
... Trümmerflug in Gebäuden	Personen _{anwesend}	11,0 - 12,7	13,0 - 15,0	15,7 - 18,2	19,0 - 22,0
	Personen _{betroffen}	1,25 - 1,40	1,48 - 1,65	1,80 - 2,00	2,18 - 2,42

Wie schon in Kapitel 7 ist eine rechnerische Auswertung der Anzahl betroffener Personen für Gebiete außerhalb von Ortschaften auf Grund der geringen Personendichte und somit betroffenen Personenzahl nicht möglich.

Beim Behälterbersten mit anschließender chemischer Reaktion ergeben sich auf Grund stoffinhärenter Faktoren Streuwerte der betroffenen Personenanzahl. Da bei der Risikobewertung der schwerste anzunehmende Unfall angenommen werden muss, wird für die folgende Darstellung der Risikowerte die Anzahl betroffener Personen infolge sekundären Trümmerflugs in Gebäuden durch einen Druckbehälter des Volumens 80 Liter zu Grunde gelegt.

Im Mittel werden im Stadtzentrum 7,27 Personen betroffen sein. Bei einer Unfallwahr-

Tabelle A.10.: Anwesende und betroffene Personenanzahl bei Behälterbersten mit anschließender chemischer Reaktion im Banken und Versicherungswesen (8.000 Pers./km²)

Auswirkungen bei...		V=35 l	V=45l	V=60 l	V=80 l
...reinem Überdruck	Personen _{anwesend}	0,18 – 0,21	0,22 – 0,25	0,26 – 0,30	0,32 – 0,37
	Personen _{betroffen}	0,15 – 0,17	0,18 – 0,21	0,21 – 0,25	0,26 – 0,30
... Trümmerflug im Freien	Personen _{anwesend}	1,16 – 1,34	1,37 – 1,59	1,66 – 1,92	2,02 – 2,33
	Personen _{betroffen}	0,72 – 0,84	0,85 – 0,99	1,04 – 1,20	1,25 – 1,45
... Trümmerflug in Gebäuden	Personen _{anwesend}	21,9 – 25,3	25,9 – 29,9	31,4 – 36,2	38,0 – 43,9
	Personen _{betroffen}	2,51 – 2,79	2,96 – 3,30	3,59 – 4,00	4,35 – 4,84

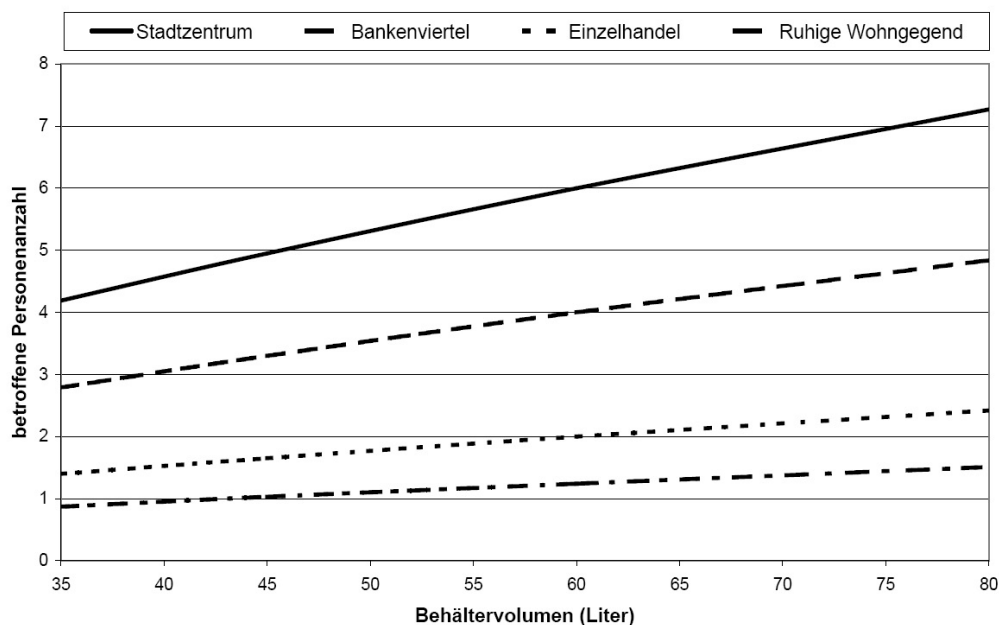


Abbildung A.22.: Vergleich der durch sekundären Trümmerflug betroffenen Personen bei unterschiedlichen innerstädtischen Szenarien bei Druckbehälterversagen durch Brand

scheinlichkeit von $7,35 \cdot 10^{-8}$ liegt der Risikowert nach Abbildung 7.1 somit im ALARP-Bereich.

Bei einer Unfallwahrscheinlichkeit von $7,35 \cdot 10^{-8}$ liegt die ruhige Wohngegend mit im Mittel 1,5 Personen ebenso im Bereich der allgemeinen Akzeptanz, wie der Einzelhandel mit im Mittel 2,4 betroffenen Personen.

Bei gleicher Wahrscheinlichkeit liegt das Bankengewerbe mit im Mittel 4,8 betroffenen Personen an der Grenze der Bereiche allgemeinen Akzeptanz und ALARP.

Unter Berücksichtigung der Auswirkungen des primären Trümmerflugs mit bis zu vier Trümmerstücken und der daraus folgenden Anhebung der Konsequenzen liegen alle betrachteten Szenarien im ALARP-Bereich.

Sonderfall: Tankstelle

Beim Betanken des Druckbehälters ergeben sich durch adiabatische Vorgänge Behälterinnendrucke von bis zu 260 bar. Beim Behälterbersten mit anschließender chemischer Reaktion weist dies keine Änderungen der berechneten Ergebnisse auf, da die erzielten Radien

der Risiko-Zonen von der Masse des brennbaren Gases abhängig sind, welche sich durch den adiabatischen Vorgang nicht ändert. Beim Druckbehälterbersten ohne anschließende chemische Reaktion ist die Höhe des erzielten Spitzenüberdrucks (unter anderem) abhängig vom Behälterinnendruck. Mit Zunahme des Innendrucks vergrößern sich ebenfalls die Radien der Risiko-Zonen (vgl. Tabelle A.11) und somit die erreichten Risikowerte.

Tabelle A.11.: Gesamtradien und -flächen der Risiko-Zonen bei Behälterbersten ohne anschließende chemische Reaktion bei 260 bar Innendruck

Auswirkungen bei...		V=35 l	V=45 l	V=60 l	V=80 l
...reinem Überdruck	r (m)	1,22	1,33	1,46	1,61
	A (m ²)	4,68	5,53	6,70	8,11
... Trümmerflug im Freien	r (m)	3,041	3,34	3,67	4,04
	A (m ²)	29,6	35,0	42,4	51,4
... Trümmerflug in Gebäuden	r (m)	13,32	14,48	15,94	17,55
	A (m ²)	557,4	659,1	798,4	967,2

Die Konsequenz ergibt sich durch die Anzahl betroffener Personen. Unabhängig von dem der Tankstelle zugeteilten Gebiet umfasst der größte Radius der Risiko-Zonen einen Bereich von unter 20 Metern und bleibt somit auf dem Gelände der Tankstelle. Die durch ein hier beschriebenes Ereignis betroffenen Personen müssen sich somit alle auf dem Gelände der Tankstelle befinden, wodurch eine rechnerische Zuordnung zu den Zahlen der Personendichte nach Tabelle 5.12 nicht möglich ist. Bei der Betrachtung des Trümmerflugs in Gebäuden wird neben dem Fahrer des Fahrzeugs der Tankstellenwart betroffen sein, wobei die Fatalitätswahrscheinlichkeit je nach Abstand zum Fahrzeug zwischen 5 bis 40 %, in Ausnahmefällen bis zu 75 %, schwankt. Über die Anzahl zusätzlich anwesender Personen kann keine statistische Aussage gemacht werden.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit des Behälterversagens unterliegt in diesem Falle nicht den Eintrittswahrscheinlichkeiten durch Unfälle, sondern vielmehr dem Versagen des Behälters infolge Lastwechsel. In den einschlägigen Normen und Gesetzestexten [DIN01a; ECE08] wird eine bestimmte Anzahl an Lastwechselzyklen gefordert, die ein Druckbehälter ohne oder mit genau definierten Schädigungen überstehen muss. Diese Vorgabe gibt jedoch keinen direkten Wert der Eintrittswahrscheinlichkeit an; so wird ein Druckbehälter, für den 10.000 Lastwechsel gefordert sind, nicht mit einer Wahrscheinlichkeit von 10^{-4} versagen. Vielmehr lässt sich über die Anzahl der Versuche eine Streubreite ermitteln, mit der für eine gewisse Anzahl an Lastwechselzyklen von einer bestimmten Überlebenswahrscheinlichkeit des Druckbehälters gerechnet wird [Mai05; Mai06a; Mai06b; Mai08b; Mai08a]. Bis sich konkrete Werte der Eintrittswahrscheinlichkeit des Druckbehälterversagens durch Lastwechselzyklen ergeben, wird diese Berechnung hinten an gestellt.

Auf Grund des Fehlens eines verlässlichen Wertes der Eintrittswahrscheinlichkeit lässt sich für dieses Szenario kein Risikowert festlegen. Zwei Punkte können jedoch bereits an dieser Stelle festgehalten werden:

1. Die Konsequenzen dieses Szenarios lassen sich nicht hinreichend genau abschätzen. Auf Grund des Abstandes zu bewohnten oder gewerblich genutzten Gebieten und Gebäuden ist von grundsätzlich geringeren Konsequenzen als in Wohn- oder Gewerbegebieten auszugehen.

2. Die Wahrscheinlichkeit des Druckbehälterversagens infolge von Lastwechselzyklen spielt im Zusammenhang dieser Arbeit eine untergeordnete Rolle. Da das Versagen infolge von Lastwechselzyklen ebenfalls bei jedem der anderen in dieser Arbeit beschriebenen Szenario auftreten kann, kann seine alleinige Betrachtung an dieser Stelle als vernachlässigbar angesehen werden.

A.10. Korrelation der Konsequenzen zu Behältervolumen und -innendruck

Tabelle A.12.: Änderung von Radius und Fläche der Konsequenzen über der Zunahme des Drucks bei konstantem Volumen

	Konsequenz bei ...					
	... reinem Überdruck		... Trümmerflug im Freien		... Trümmerflug in Gebäuden	
	r (m)	A (m ²)	r (m)	A (m ²)	r (m)	A (m ²)
35 Liter						
200 bar	1,12	3,9	2,81	24,8	12,2	467,6
300 bar	1,12	5,1	3,22	32,6	13,96	612,2
450 bar	1,46	6,7	3,68	42,5	16,0	802,2
700 bar	1,70	9,1	4,27	57,3	18,5	1077,5
80 Liter						
200 bar	1,48	6,9	3,70	43,0	16,1	811,3
300 bar	1,69	9,0	4,24	56,5	18,4	1062,5
450 bar	1,92	11,6	4,85	73,9	21,1	1392,0
700 bar	2,24	15,8	5,62	99,2	24,4	1870,4
165 Liter						
200 bar	2,72	23,2	6,82	146,1	29,6	2752,5
300 bar	3,11	30,4	7,81	191,6	33,9	3604,0
450 bar	3,54	39,4	8,93	250,5	38,8	4722,2
700 bar	4,12	53,3	10,4	337,2	44,9	6344,8
1000 Liter						
200 bar	3,42	36,7	8,59	231,8	37,3	4370,9
300 bar	3,91	48,0	9,84	304,2	42,7	5722,7
450 bar	4,46	62,5	11,3	397,6	48,9	7496,8
700 bar	5,20	84,9	13,1	535,0	56,6	10071,4
2400 Liter						
200 bar	4,58	65,9	11,5	415,5	49,9	7835,1
300 bar	5,24	86,3	13,2	545,7	57,1	10257,2
450 bar	5,98	112,3	15,1	712,5	65,4	13441,2
700 bar	6,96	152,2	17,5	959,9	75,8	18050,4

Tabelle A.13.: Änderung von Radius und Fläche der Konsequenzen über der Zunahme des Volumens bei konstantem Druck

	Konsequenz bei ...					
	... reinem Überdruck		... Trümmerflug im Freien		... Trümmerflug in Gebäuden	
	r (m)	A (m ²)	r (m)	A (m ²)	r (m)	A (m ²)
200 bar						
35 l	1,47	3,9	3,69	24,8	16,0	467,6
80 l	1,94	6,9	4,86	43,0	21,1	811,3
165 l	1,88	11,1	4,71	69,7	20,5	1315,1
500 l	2,72	23,2	6,82	146,1	29,6	2752,5
1000 l	3,42	36,7	8,59	231,8	37,3	4370,9
2400 l	4,58	65,9	11,5	415,5	49,9	7835,1
300 bar						
35 l	1,28	5,1	3,22	32,6	14,0	612,2
80 l	1,69	9,0	4,24	56,5	18,4	1062,5
165 l	2,15	14,5	5,40	91,6	23,4	1721,7
500 l	3,11	30,4	7,81	191,6	33,9	3604,0
1000 l	3,91	48,0	9,84	304,2	42,7	5722,7
2400 l	5,24	86,3	13,2	545,7	57,1	10257,2
450 bar						
35 l	1,46	6,7	3,68	42,5	16,0	802,2
80 l	1,92	11,6	4,85	73,9	21,1	1392,0
165 l	2,45	18,9	6,17	119,6	25,8	2089,5
500 l	3,54	39,4	8,93	250,5	38,8	4722,2
1000 l	4,46	62,5	11,3	397,6	48,9	7496,8
2400 l	5,98	112,3	15,1	712,5	65,4	13441,2
700 bar						
35 l	1,70	9,1	4,27	57,3	18,5	1077,5
80 l	2,24	15,8	5,62	99,2	24,4	1870,4
165 l	2,85	25,5	7,16	161,1	31,1	3028,8
500 l	4,12	53,3	10,4	337,2	44,9	6344,8
1000 l	5,20	84,9	13,1	535,0	56,6	10071,4
2400 l	6,96	152,2	17,5	959,9	75,8	18050,4

A.11. Technische und infrastrukturelle Möglichkeiten der Risikoregulierung

1. Reduzierung der Versagenswahrscheinlichkeit

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass das Risiko innerhalb von Ortschaften einen wesentlich höheren Wert einnimmt als außerhalb. Neben der Personendichte ist der wesentliche Punkt der Unterscheidung zwischen inner- und außerstädtischen Unfällen die maximale Geschwindigkeit zum Unfallzeitpunkt. Wird innerhalb von Städten von einer Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h ausgegangen, so lässt sich unter Berücksichtigung der eingebrachten Masse die auf das Unfallfahrzeug wirkende kinetische Energie ermitteln (vgl. Kapitel 4.2.2 und 5.2.2). Hieraus ergeben sich wiederum zwei Möglichkeiten der Risikoregulierung:

- Das gesamte Fahrzeug muss in einer Zulassungsprüfung einer Prüfung unterzogen werden, die Heck- und Seitenaufprall darstellt. Bei Einwirken der oben ermittelten kinetischen Energie darf keine Schädigung des Druckbehälters auftreten. Dieses System wird bereits durch die amerikanische FMVSS 303 [FMV04b] und die kanadische CMVSR 301.2 [CMV04b] gefordert. Dem steht allerdings ein hoher Prüf- und Kostenaufwand gegenüber.
- Unter der Annahme, dass ein nicht akzeptables Risiko von Druckbehältern erst ab einer bestimmten anwesenden Personendichte erfolgt, können diesem Bereiche zugeordnet werden. Aus diesen Bereichen (z. B. Stadtzentrum) lassen sich eventuell wiederum Geschwindigkeiten der Fahrzeuge und somit die Höhe der auf den Druckbehälter einwirkenden Energie eingrenzen. Kann durch Prüfungen sichergestellt werden, dass der Druckbehälter diesen Energien standhält, so wird das Risiko für das betrachtete Szenario deutlich reduziert. Bei den Anforderungen der Prüfung würde es sich zwar wieder um produktbezogene Anforderungen handeln, deren Ermittlung allerdings aus einem Prozess technischer Risikobeurteilungen hervor gegangen sind.

Mit dieser Methode ließe sich die Wahrscheinlichkeit von Unfällen im Stadtgebiet, die geeignet sind zu einem Spontanversagen des Druckbehälters zu führen, regulieren. Unfälle mit überhöhter Geschwindigkeit sowie Unfälle durch Fahrzeuge höherer Massen sind von dieser Betrachtung ausgenommen. Ein weiterer Faktor ist die Erhöhung der durchschnittlichen Fahrzeugmasse über die Zeit; die Erfahrung zeigt, dass sich trotz der beliebten Leichtbauweise die Fahrzeugmasse durch Einbau von immer mehr Technik und Einrichtungen der Sicherheit und Bequemlichkeit ständig erhöht. An dieser Stelle kann somit kein Grenzwert formuliert werden, der über die Jahre Bestand hat. Die Ermittlung der statistisch zu Grunde gelegten Werte müsste in diesem Falle im Jahresrhythmus erfolgen, wobei bereits im Verkehr befindliche Kraftfahrzeuge nicht berücksichtigt werden können.

2. Ort und Ausrichtung des Druckbehälters

Eine weitere Möglichkeit, die Wahrscheinlichkeit der Druckbehälterschädigung durch Unfälle zu regulieren, sind der Ort der Anbringung des Druckbehälters im Fahrzeug sowie dessen Ausrichtung. Die Arbeit zeigte, dass insbesondere Heck- und Seitenunfälle zu einer Schädigung des Druckbehälters führen. In [DSA05; MS07] wird die Höhe der auf ein Fahrzeug einwirkenden kinetischen Energie über der Richtung der Einwirkung dargestellt. [Mar07] zeigt die mittels Simulationen berechneten Verformungen und Eindringtiefen bei verschiedenen Unfallkonstellationen, während in [SAE11] bereits die Wahrscheinlichkeit des Eindringens in den Bereich der Druckbehälteranbringung dargestellt ist (vgl. Kapitel

5.2.2). Hieraus wird ersichtlich, dass die Bereiche der geringsten Deformation sich um die Fahrzeugachsen gruppieren. Da sich auf Höhe der Vorderachse im Regelfall der Motor befindet, bleibt somit als günstigster Punkt der Druckbehälteranbringung der Bereich der Hinterachse. Hier zeigen die Auswertungen aus [Mar07], dass die Anbringung der Druckbehälter rechtwinklig zur Fahrzeuglängsachse die besten Eigenschaften aufweist, da im Falle des Heckunfalls eine große Knautschzone besteht und beim Seitenunfall ein Großteil der kinetischen Energie, die durch das Chassis nicht aufgenommen wird, über die Achse an die andere Fahrzeugseite transferiert wird. Ohne den Einfluss weiterer Maßnahmen lässt sich über den Ort der Anbringung des Druckbehälters somit keine weitere Reduzierung des Risikos durch Druckbehälter im Straßenverkehr erzielen. Als Maßnahmen können genannt werden:

- Erhöhen des Energieaufnahmevermögens des Chassis.
- Einbringung von den Druckbehälter umgebenden Komponenten zur Aufnahme der kinetischen Energie oder zur Transferierung derselben.
- Nutzen von Knautschzonen
- eventuelles Reduzieren des Druckbehältervolumens auf eine Größe, welche die Grenzen des definierten Sicherheitsraums nicht überschreitet.

3. Behälterinnendruck und -volumen

Behälterinnendruck und -volumen korrelieren zueinander, so dass durch Reduzierung des Einen eine Erhöhung des Anderen ohne Zunahme des Risikowertes erfolgen kann. Durch die exponentielle Korrelation fällt der Faktor der Konsequenzsteigerung wesentlich geringer aus als derjenige der Vergrößerung von Druck oder Volumen. Andererseits führt eine Verkleinerung von Druck oder Volumen zu einer verhältnismäßig geringen Reduzierung der Konsequenzen. Dies bedeutet auf der einen Seite, dass mit Erhöhung von Druck oder Volumen eines Druckbehälters die Konsequenzen nur leicht steigen, auf der anderen Seite, dass mit Reduzierung von Druck oder Volumen nur geringfügige Verminderungen der Konsequenzen erfolgen. Das Verhältnis von Risikozunahme/-reduktion gegenüber der Aufwandsabnahme/-zunahme (Platz, Gewicht, Einbau, Wartung, etc.) müssen im Einzelfall abgewogen werden. Beispielsweise würde die Erhöhung des Innendrucks von 200 auf 300 bar zu einem um etwa 30 % verkleinerten Druckbehälter führen, ohne den Wert des Risikos dabei zu beeinflussen. Allgemein lassen sich durch die Reduzierung des Druckbehältervolumens bei gleichzeitigem Erhöhen des Innendrucks, ohne Verlust an Speicherkapazität oder Zunahmen der Konsequenzen, folgende Vorteile erzielen:

- Einsparen von Gewicht
- Durch die kleineren Abmessungen können (theoretisch) mehr Druckbehälter im Fahrzeug verbaut werden, was zu einer Erhöhung des Tankvolumens und somit zu größeren Reichweiten des Fahrzeugs je Tankfüllung führt.
- Durch die kleineren Abmessungen der Druckbehälter kann die Platzierung sicherheitstechnisch optimiert werden. Es wäre somit mehr Platz für Knautschzonen oder energieaufnehmende Einrichtungen vorhanden.

Eine Verringerung des Druckbehältervolumens bei konstantem Druck würde sowohl zu einer Verringerung des Tankvolumens als auch des Risikowertes führen. Ein Behälter kleinen Volumens weist bei gleichem Druck einen geringeren Risikowert als ein Druckbehälter größeren Volumens auf. Die Verwendung mehrerer kleiner Druckbehälter anstelle weniger

großer würde somit zu einer Reduzierung des Risikowertes führen. Durch diese Maßnahme würde allerdings das Gewicht des Fahrzeugs um den nicht unerheblichen Anteil der zusätzlichen Druckbehälter steigen, weshalb diese Möglichkeit aller Wahrscheinlichkeit nach keine weitere Beachtung finden wird.

4. Leerfahren der Druckbehälter

Wie in den vorherigen Punkten beschrieben, erhöhen sich die Radien der Risiko-Zonen mit Zunahme von Behälterinnendruck und -volumen. Durch Verwendung mehrerer kleiner Behälter anstelle weniger großer könnte das Risiko bereits reduziert werden. Durch eine darüber hinausgehende ungleichmäßige Entleerung der Druckbehälter im Fahrbetrieb könnte zusätzlich die Eintrittswahrscheinlichkeit der Behälterschädigung vermindert werden. Beim Betrieb mehrerer Druckbehälter sind diejenigen hinter der Hinterachse angebrachten Behälter durch Auffahrunfälle stärker gefährdet als die vor dieser angebrachten. Bei ungleichmäßiger Entleerung von zuerst diesen Behältern im Betrieb würde gegenüber gleichmäßiger Entleerung aller verwendeten Druckbehälter eine Reduzierung des Gesamtrisikos erfolgen.

5. Schutzeinrichtung der Druckbehälter

Eine Einhausung des Druckbehälters könnte zwei mögliche Aufgaben erfüllen:

1. Barrierewirkung vor externen Einwirkungen zur Reduzierung der Schädigungswahrscheinlichkeit
2. Absorption eines Teils des emittierenden Überdrucks zur Reduzierung der Ausmaße der Risiko-Zonen

Beide Möglichkeiten wären nicht nur mit einem zusätzlichen finanziellen Aufwand, sondern ebenfalls mit einer Zunahme des Fahrzeuggewichts verbunden.

Eine weitere Möglichkeit der Schutzeinrichtung wäre eine V- oder hufeisenförmige Schutzeinrichtung unterhalb des Druckbehälters, so dass der beim Bersten entstehende Druck über Reflexion nach (schräg) oben an die Umgebung abgegeben wird. Auf diese Weise kann der an die Umgebung abgeleitete Überdruck in seiner Richtung kontrolliert werden und so das Ausmaß der Konsequenz gesteuert werden. Durch diese Methode ist es möglich, die Auswirkungen des Überdrucks auf unbelebte Gegenstände, welche als sekundäre Trümmerstücke fungieren können, auf Bereiche oberhalb der Expositionsquelle zu beschränken. Des Weiteren reduziert sich durch die Winkelstellung der Druckwellenfront der in einem bestimmten Abstand erreichte Spitzenüberdruck.

6. Fahrverbote bei hoher Siedlungsdichte

Ähnlich den Umweltzonen könnten Fahrverbote für Fahrzeuge mit unter Druck gespeichertem Treibmittel erlassen werden. Bereiche hoher Siedlungsdichte können auf diese Weise von den Konsequenzen des Druckbehälterberstens verschont werden. Hierüber lässt sich die anwesende/betroffene Personendichte und somit letztlich das Risiko steuern. Auf der anderen Seite würde diese Maßnahme eine umweltfreundliche und relativ „sichere“ Technologie in ein schlechteres Licht rücken, als es real der Fall ist. Durch derartige Maßnahmen wird die Furchtassoziation des Menschen vor der „fahrenden Bombe“ subjektiv bestätigt, weshalb diese Methode nur in Ausnahmefällen Anwendung finden sollte.

7. Kennzeichnung von CNG-Fahrzeugen

Die Kennzeichnung von CNG-Fahrzeugen ist in der Vergangenheit vielfach erfolgt. Ähnlich der Kennzeichnung „Baby on Board“ lässt diese Kennzeichnung auf ein besonders

umsichtiges Fahrverhalten anderer Verkehrsteilnehmer hoffen. Auf diese Weise kann es möglich sein, die Anzahl an Auffahrunfällen zu verringern, und so die Wahrscheinlichkeit des Druckbehälterberstens zu reduzieren. Eine quantitative Aussage über den Erfolg dieser Maßnahme lässt sich nicht erzielen.

8. Gebäudestruktur

Die Konsequenzen durch sekundären Trümmerflug werden nicht ausschließlich durch die Anzahl anwesender Personen, sondern ebenfalls durch die vorhandene Gebäudestruktur beeinflusst. Über die Anzahl der Gebäude wird die potentielle Anwesenheit von Glasscheiben bestimmt, welche die Grundlage der Berechnung der Konsequenzen durch sekundären Trümmerflug bildet. Bei hoher Personendichte und gleichzeitiger geringer Anzahl an Gebäuden (z. B. große Plätze, Campingplatz, bestimmte touristische Orte) resultiert eine verminderte Konsequenz und somit ein geringeres Risiko. Die Art des Gebäudes bestimmt das Vorhandensein von Glasscheiben und determiniert somit die mögliche Konsequenz. Massiv gemauerte Gebäude mit wenig Verglasung, als Beispiel genannt, würden somit zwei Wirkungen erzielen:

- Wenig Verglasung führt zu wenig sekundärem Trümmerflug und somit zu geringen Konsequenzen und folglich Risiko.
- Massive Gebäude sind in der Lage, den auf sie treffenden Druck aufzunehmen, ohne Schaden zu nehmen, der zu fatalen Konsequenzen für den Menschen führen kann. Durch die Absorption der Druckwellenfront werden Konsequenzen durch sekundären Trümmerflug „im Windschatten“ des Gebäudes vermieden und somit das Risiko reduziert.