Bauforschung

Konstruktionsregeln für Tragstrukturen unter Druckeinwirkungen infolge von Gasexplosionen im Hochbau

T 3104

Fraunhofer IRB Verlag

T 3104

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2006, ISBN 3-8167-7030-4

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.IRBbuch.de

Forschungsbericht des
Instituts für Massivbau der
Technische Universität Darmstadt

Konstruktionsregeln für Tragstrukturen unter Druckeinwirkungen infolge von Gasexplosionen im Hochbau

- ABSCHLUSSBERICHT -

Im Auftrag des
Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner
Dr.-Ing. Holger Schmidt
Dipl.-Ing. Simon Glowienka

Darmstadt, im Juli 2005

Kurzzusammenfassung des Abschlussberichtes

Der vorliegende Forschungsbericht beschäftigt sich mit der Problematik von Gasexplosionen im Hochbau. Neben der Entwicklung eines Bemessungsansatzes auf stochastischer Basis werden konstruktive Regeln erarbeitet, um das Risiko eines Einsturzes von Gebäuden oder tragenden Gebäudeteilen infolge einer internen Gasexplosion zu reduzieren.
Mit dem in dieser Arbeit entwickelten Bemessungsansatz lässt sich eine statische Ersatzdruckbeanspruchung in Abhängigkeit des Druckentlastungskoeffizienten A_v/V (Fläche der Druckentlastungsfläche/ Raumvolumen) bestimmen. Die durchgeführten Vergleichsrechnungen haben gezeigt, dass bei üblichen Wandelementen die Eigenfrequenz der Bauteile weit genug von der Erregerfrequenz der Explosionseinwirkung entfernt liegt, so dass man von einer quasi-statischen Beanspruchung ausgehen kann. Die resultierenden Bemessungswerte erfüllen die Anforderungen an die Tragwerkszuverlässigkeit gemäß DIN 1055-100 (2001), unter Berücksichtigung der geringen Auftretenswahrscheinlichkeit eines Gasexplosionsereignisses. Hierbei ist festzustellen, dass der eigne Ansatz zu höheren Ersatzdruckbeanspruchungen führt, als der derzeit gültige normative Vorschlag in DIN 1055-9 (2003). Diese Diskrepanzen konnten als Ursache einer unzulänglich gewählten Raumgeometrie sowie eines unzulänglich gewählten Zündortes bei der empirischen Bestimmung der normativen Bemessungsgleichung identifiziert werden.

Es lässt sich feststellen, dass die Intensität der Druckeinwirkung infolge von internen druckentlasteten Gasexplosionen von einer Vielzahl von Parametern abhängig ist, deren Einflussgrößen teilweise komplexen gegenseitigen Abhängigkeiten unterliegen. Im Rahmen von weiterführenden numerischen Analysen und entsprechenden Großversuchen - vor allem hinsichtlich praxisbezogener Turbulenzintensitäten – müssen die Eingangsgrößen weiter vertieft werden, um deren Einflüsse auf den resultierenden Explosionsdruck realitätsnah berücksichtigen zu können.

Aufbauend auf den in dieser Forschungsarbeit gewonnen Erkenntnissen konnten bereits konstruktive Regeln zur Reduzierung des Gasexplosionsdrucks sowie zur Erhöhung der Tragfähigkeit von unbewehrten Mauerwerkswänden abgeleitet werden. Der Explosionsinnendruck lässt sich durch eine quadratische Grundrissfläche und möglichst große Fensterflächen sowie durch die Vermeidung von Turbulenzen signifikant senken. Zur Steigerung der Tragfähigkeit von Wänden ist es wichtig, einen mehrachsigen Lastabtrag durch eine entsprechende Anordnung von z.B. aussteifenden Stahlbetonstützen im Abstand der Wandhöhe zu ermöglichen. Zusätzlich sollten Stahlbetondecken über eine obere und untere durchgängige Bewehrungslage verfügen und in den betroffenen Wandbereichen parallel in Wandrichtung zusätzlich verstärkt werden.

Summary of the research project

The present research project deals with the problem of gas explosions in buildings. Besides the development of a design proposal for the explosion pressure based on probabilistic analysis, rules for the construction of buildings are suggested. With the aid of these rules, the probability of a structure failure can be decrease in the case of a gas explosion in buildings.

With the new design proposal it is possible to calculate an equivalent load for the gas explosion effect in dependence of the ratio Av/V (area of the pressure release panel/volume of the room considered). Based on the accomplished computer analysis it is assumed that for standard wall constructions the explosion effect can be assumed to be a static load, because the natural frequency does not reach the excitation frequency. The new proposal does fulfill the limit values of the probability of failure of structures considering the little probability of occurrence of a gas explosion. It is shown, that the design values for explosion loads according to DIN 1055-100 are smaller than the values calculated with the new approach. That means DIN 1055-100 does not lead to sufficient safe designs in some cases.

It can be stated that the intensity of the explosion pressure caused by gas explosions depends on diverse parameters whose influence is difficult to specify. Additionally it has to be considered that in some cases these parameters are depending on each other. Most of all the influence of turbulences concerning the resulting pressure has to be analyzed by experiments to get realistic results.

Using the results of the computer analysis the following rules of construction can be formulated to reduce the resulting explosion pressure and to strengthen affected structural elements: The resulting pressure in a room can be reduced by choosing a quadratic floor plan and large windows. Turbulences resulting from furniture etc. should be avoided. Most of all masonry walls without reinforcement are imperiled. The load bearing capacity of these walls can be increased significantly by activating a multiaxial load transmission. This can be archived by planning bracing reinforced (concrete) columns in distance of the wall's height. Reinforced concrete slabs should provide reinforcement on the top and the bottom which should be raised on the top of the slab in the area of the affected wall.

Bref résumé du rapport final

Le présent rapport de travaux de recherches s'oriente sur la problématique des explosions de réseaux de gaz dans les bâtiments. En plus du développement d'une approche de dimensionnement basée sur un concept stochastique, différentes régles constructives basées sur des simulations sur ordinateurs ont été proposées afin de minimiser le risque d'écroulement des bâtiments ou de leurs structures porteuses suite à des explosions des réseaux internes de gaz qui y sont dimensionnés.

Cette nouvelle approche de dimensionnement permet la determination d'une nouvelle charge de compression statique en fonction du rapport A_v/V (surface d'échappement/ volume). Les analyses ont montré que pour des murs habituels, la fréquence propre reste assez éloignée de la fréquence exitatrice de sorte qu'on puisse parler d'un effort quasi statique. L'utilisation de ces valeurs de dimensionnement résultantes montrent que les valeurs limites de fiabilité du plan de sustention conformément aux normes allemandes du DIN 1055-100 (2001), sous considération d'une probabilité d'occurrence d'un phénomène d'explosion de réseau de gaz donné, restent en vigueur. Par contre les résultats observés sont largement supérieurs aux valeurs de dimensionnement proposées par les normes allemandes du DIN 1055-9 (2003).

On peut en déduire que l'intensité de la compression reste dépendante, par suite de chuttes de pression intérieurs à l'explosion elle même, a un grand nombre de paramètres. Ces paramètres s'inter-influencent et sont très difficiles à être estimés individuellement. Dans le cadre d'une poursuite des analyses numériques et des expériences correspondantes - surtout en ce qui concerne la détermination des phénomènes de turbulence – la connaissance de ces paramètres doit être approfondie et leurs influences sur la pression d'explosion résultante appréhendées de manière plus précise pour pouvoir être intégrées dans un concept de dimensionnement plus affiné.

A partir des premiers résultats issuent de l'analyse sur ordinateur on peut déduire les règles constructives suivantes, ceci aussi bien pour l'abaissement de la pression d'explosion que pour l'augmentation de la charge admissible des murs non renforcés. La pression d'explosion interne peut être réduite au moyen d'un plan carré, de grandes fenêtres ou encore par la dimunition des phénomènes de turbulence à l'aide de meubles etc. L'augmentation de la charge admissible des murs peut être abordée grâce à un amortisseur de charge multiaxiale en disposant par exemple un appuis de béton armé s'orientant sur la hauteur du mur. Les appuis en béton armé doivent disposer de ferraillage transversal (en haut et en bas) et ce feraillage doit être renforcé parallèlement aux murs sur les zones murales concernées. Pour une réduction du risque d'explosion au niveau le plus bas, il est recommandé de procéder à l'installation de détecteurs de gaz dans toutes les pièces disposant de réseau de distribution de gaz.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1
1.1 Notwendigkeit des Forschungsvorhabens 1
1.2 Ziel und Zweck des Forschungsvorhabens 2

2 Ausgangssituation und Stand der Technik 3
2.1 Einführung 3
2.2 Zusammensetzung von Erdgas 4
2.3 Gasexplosionen in Wohngebäuden 5
2.3.1 Entwicklungstendenzen 5
2.3.2 Schadens- und Unfallstatistik 6
2.3.3 Normative Regelungen 8
2.4 Konstruktive Regelungen 11
2.4.1 DIN 1045 11
2.4.2 DIN V ENV 1992 11
2.4.3 DIN 1045-1 12
2.4.4 DIN 1053-1 13
2.4.5 British Standard 13
2.4.6 Ehemalige DDR-Norm 13
2.5 Zusammenfassende Darstellung 14

3 Tragwerkszuverlässigkeit und Sicherheitskonzept 16
3.1 Einführung 16
3.2 Mathematische Formulierung des Zuverlässigkeitsproblems 16
3.3 Klassifizierung zuverlässigkeitstheoretischer Methoden 19

4 Grundlagen der Explosionstheorie 20
4.1 Einführung 20
4.2 Explosionsgrenzen 21
4.3 Entzündung 22
4.4 Druckentwicklung in geschlossenen Behältern 23
4.4.1 Allgemeines 23
4.4.2 Maximaler Explosionsdruck 24
4.4.3 Maximale Druckanstiegsrate 26
4.4.4 Einfluss von Turbulenzen 31
4.5 Druckentlastete Deflagrationen 32
4.5.1 Allgemeines 32
4.5.2 Idealisierte Phasen der Druckentlastung 32

5 Untersuchungen zur Schadensbegrenzung bei Gasexplosionen im Hochbau 35
5.1 Vorbemerkungen 35
5.2 Statischer Ersatzdruck 37
5.3 Stochastische Verteilung der Ersatzdruckbelastung 46
5.3.1 Grundlagen der numerischen Simulation 46
5.3.2 Definition der Randbedingungen 48
5.3.3 Statistische Momente 54
5.4 Bestimmung des Bemessungswertes des Gasexplosionsdruckes 61
5.5 Zusammenfassende Darstellung 65

6 Konstruktionsregeln für Tragstrukturen 68
6.1 Vorbemerkungen 68
6.2 Regeln zur Senkung des auftretenden Explosionsdruckes 68
6.3 Regeln zur Steigerung der Belastbarkeit von Tragstrukturen 70
6.4 Anordnung von gefährdeten Räumen im Gebäude 74

7 Zusammenfassung und Ausblick 75

8 Literaturverzeichnis 79

9 ANHANG 82
9.1 Anhang 1: Beispiele von Schadensfällen 82
9.1.1 Explosion in einem Einfamilienhaus 82
9.1.2 Propangasexplosion in einem Reihenhaus 84
9.1.3 Explosion in einem Mehrfamilienhaus 86
9.1.4 Explosion in dem Gebäude Ronan Point 90

1 Einleitung

1.1 Notwendigkeit des Forschungsvorhabens

Das in der neuen Normengeneration verwendete semiprobabilistische Sicherheitskonzept baut auf dem Konzept der sogenannten Teilsicherheitsfaktoren auf, die eine vorgegebene Überlebenswahrscheinlichkeit sicherstellen sollen. Hierdurch wird die Vergleichbarkeit der vorhandenen Zuverlässigkeit von Baukonstruktionen für unterschiedliche Last- und Widerstandsszenarien ermöglicht. Um geringere Auftretenswahrscheinlichkeiten zu erfassen, wird darüber hinaus bei der rechnerischen Umsetzung des Bemessungsproblems in gewöhnliche und außergewöhnliche Bemessungssituationen unterschieden. Durch die gewöhnliche Bemessungssituation soll das Eintreten einer unerwarteten Überbelastung eines Konstruktionselements mit unerwartet geringer Tragfähigkeit mit einer bestimmten Zuverlässigkeit ausgeschlossen werden. Obwohl diese Bemessungssituation nachweisbar seltener auftritt als die außergewöhnliche Bemessungssituation, wird die gewöhnliche Bemessungssituation der Tragfähigkeitsbemessung im Regelfall zugrunde gelegt.

Aufgrund der Akkumulation von Schadensfällen infolge Gasexplosionen (z.B. Trullingen [02.11.2004], Reinheim [20.08.2001], Eisenhüttenstadt [12.02.2001], Frankfurt [14.01.2001], Bremen [20.11.2000], Thedinghausen [24.07.2000]) erlangt die Forderung nach einer gezielten Bemessung gegen derartig außergewöhnliche Einwirkungen einen immer höheren Stellenwert. Die Auswirkungen solcher Ereignisse haben oftmals katastrophale Folgen und führen nicht selten zu einer Totalzerstörung der Bausubstanz sowie zu dem Verlust von Menschenleben durch den sekundären Gebäudeeinsturz. Die Anzahl der Gasunfälle wird sich auch in Zukunft nicht reduzieren lassen, da der Mensch die häufigste Unfallursache darstellt und der Erdgasanteil als ökologisch hochwertiger Energieträger zunehmen wird.

Durch eine gezielte Bemessung der Gebäude für den Lastfall Explosion hätten die in den vergangenen Jahren entstandenen Schäden deutlich reduziert werden können. Der in dem informativen Anhang der DIN 1055-9 (2003) erstmals vorgeschlagene Bemessungsansatz für die Ermittlung der anzusetzenden Druckwirkungen bei Gasexplosionen in Räumen mit Ausblasöffnungen liefert hierfür jedoch keine zufriedenstellende Lösung, da dieser Vorschlag nur an einer Versuchsreihe mit geringem Umfang kalibriert wurde und darüber hinaus wichtige Einflussgrößen für den entstehenden Explosionsdruck nicht berücksichtigt [CEN (1997)]. Die immer wieder eintretenden Schadensfälle infolge von Gasexplosionen zeigen die Unerfahren-

heit bei der Dimensionierung von Bauwerken für diese Art von Einwirkungen und machen deutlich, dass ein ausgeglichenes Zuverlässigkeitsniveau bei derartigen Bemessungssituationen derzeit nicht erreicht werden kann.

1.2 Ziel und Zweck des Forschungsvorhabens

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, Konstruktionsregeln zur Schadensbegrenzung bei internen Gasexplosionen im Hochbau zu entwickeln. Durch die neuartigen Regelungen kann eine Steigerung der Standsicherheit der Tragstruktur bei derart außergewöhnlichen Einwirkungen erreicht werden, wodurch die Ergebnisse dieser Arbeit eine zentrale Rolle bei zukünftigen Neuplanungen einnehmen werden.

Ein ausgeglichenes Zuverlässigkeitsniveau – verbunden mit einer Reduzierung des Risikos derartiger Schadensfälle – kann nur erreicht werden, wenn die maßgebenden Einflussparameter für den anzusetzenden Explosionsdruck in einer normativ umsetzbaren Ersatzdruckbelastung Berücksichtigung finden. Mit Hilfe dieses Forschungsvorhabens werden statische Ersatzlasten zur Beschreibung der in einem Gebäuderaum maximal auftretenden Explosionsdrücke in Abhängigkeit der entsprechenden Randbedingungen (z.B. Gemischkonzentration, Raumgeometrie, Anteil der Entlüftungsflächen, Berstmaterial, etc.) ermittelt werden, die maßgebend zu dem Schutz von Baustruktur und Menschenleben beitragen werden. Lokale Schädigungen des Tragsystems können hierbei in Kauf genommen werden, die Gesamtstruktur muss dem Explosionsereignis jedoch standhalten können. Der Baupraxis wird ein Verfahren zur Verfügung gestellt, welches eine Steigerung der Sicherheit für Baustruktur und Menschenleben ermöglicht. Darüber hinaus können die Ergebnisse in die europäischen Normenwerke einfließen.

Das Forschungsvorhaben verfolgt das generelle Ziel, die wesentlichen Problemstellungen zur Beurteilung der Auswirkungen von außergewöhnlichen Einwirkungen wissenschaftlich zu durchdringen und kann daher als Grundlage für weiterführende Forschungen dienen. Diesbezüglich können auch auf diesem Gebiet wichtige neue Erkenntnisse erwartet werden.

Das Forschungsvorhaben dient der Festlegung von Lastannahmen sowie des erforderlichen Zuverlässigkeitsniveaus in den technischen Regelwerken und erfüllt somit die von dem Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) geforderten Kriterien für die Auswahl von Forschungsvorhaben im bauaufsichtlichen Bereich.

2 Ausgangssituation und Stand der Technik

2.1 Einführung

In vielen Bereichen des häuslichen Wohnens wird die kontrollierte Verbrennung von Gas in Verbindung mit einem geeigneten Oxidationsmittel zur Erzeugung von Wärmeenergie verwendet. Diese Art der Energieerzeugung birgt das Risiko, dass unkontrolliert ausströmendes Gas mit der Umgebungsluft ein explosives Gemisch bilden und durch eine Energiequelle entzündet werden kann. Dieser Vorgang führt unter bestimmten Randbedingungen zu einer heftigen Explosion, die eine schnelle und unkontrollierte Freisetzung von Energie bedeutet. Verbunden mit einem solchen Explosionsereignis ist ein gewaltiger Druckanstieg, dem gewöhnlich dimensionierte Bauwerke nicht ohne Schaden widerstehen können.

Die Problematik der Schadensbegrenzung bei außergewöhnlichen Einwirkungen infolge von Explosionen kann historisch bis in die sechziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts zurückverfolgt werden. Eine Gasexplosion in einem mehrgeschossigen Fertigteilhochhaus führte damals zu einem progressiven Einsturz eines Großteils des Gebäudekomplexes und löste dadurch eine Diskussionswelle aus, die bis zu dem heutigen Tag angehalten hat. Eine Vielzahl unterschiedlicher Fachgremien beschäftigten sich seitdem mit der Thematik der Gasexplosion in Wohngebäuden, allerdings konnte eine einheitliche und wissenschaftlich abgesicherte Regelung bisher noch nicht in die Normen des Bauwesens aufgenommen werden.

Insbesondere in der heutigen Zeit, in der das Sicherheitsbedürfnis der Bevölkerung immer mehr zunimmt, ist die Brisanz dieser Thematik aktueller als jemals zuvor. In einer Schadens- und Unfallstatistik Gas werden statistische Daten über Erdgasexplosionen in Wohngebäuden von der deutschen Vereinigung des Gas- und Wasserfaches erfasst. Die Daten werden den Anforderungen dieser Forschungsarbeit entsprechend aufbereitet und geben einen guten Überblick über die Schadenshäufigkeit der vergangenen Jahre. Aufbauend auf einer Entwicklungstendenz der ESSO Energieprognose können mit Hilfe eines prognostizierten Gasverbrauches Schlussfolgerungen für zukünftige Entwicklungen gezogen werden.

2.2 Zusammensetzung von Erdgas

Erdgas ist eine Zusammensetzung von Kohlenwasserstoffen und Inertgasen (Tabelle 1). Mit einem Anteil von bis zu *99 Mol-%* ist Methan *(CH_4)* der Hauptbestandteil von Erdgas. Methan ist eine Kohlenwasserstoffverbindung und besteht aus einem Kohlenstoffatom und vier Wasserstoffatomen. Außer Methan sind in Erdgas Ethan *(C_2H_6)*, Propan *(C_3H_8)*, Butan *(C_4H_{10})* und Pentan *(C_5H_{12})* enthalten. In Abhängigkeit von der Qualität des Erdgases können zusätzlich Stickstoff *(N_2)* und Kohlenstoffdioxid *(CO_2)* in unterschiedlicher Konzentration enthalten sein. Aufgrund der unterschiedlichen Stoffanteile sind die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Erdgas keine eindeutig festlegbaren Größen, weshalb in Tabelle 2: lediglich Bandbreiten angegeben werden. Erdgas ist ein leicht entzündliches Gemisch und in seinem Ausgangszustand geruchsfrei. Aus Sicherheitsgründen wird ein geruchsintensiver Stoff beigemischt *(odoriert)*, wodurch unplanmäßig freigesetztes Gas bereits in kleinsten Mengen erkannt werden kann.

Gasart	Formel	Mol-%	Mass-%
Methan	CH_4	80-99	70-98
Ethan	C_2H_6	<12	<18
Propan	C_3H_8	<4	<8
Butan	C_4H_{10}	<1	<3
Pentan	C_5H_{12}	<0,5	<2
Stickstoff	N_2	<15	<25
Kohlenstoffdioxid	CO_2	<5	<15

Tabelle 1: Zusammensetzung von Erdgas [24]

Zustand	gasförmig
Siedepunkt	-195°C bis -155°C
Mindestzündenergie	0,2 mJ
Dichte (0°C)	0,7 kg/m³ bis 1,0 kg/m³
Brennwert $H_{S,n}$	8,4 kWh/m³ bis 13,1 kWh/m³
Anschlussdruck	18 mbar bis 24 mbar

Tabelle 2: Physikalisch- chemische Eigenschaften von Erdgas [24] [25]

2.3 Gasexplosionen in Wohngebäuden

2.3.1 Entwicklungstendenzen

Erdgas gilt derzeit aufgrund der geringen Schwefeldioxid- und Kohlendioxid-Emissionen bei der Verbrennung als der umweltfreundlichste fossile Brennstoff und hat sich aus diesem Grund aus einer Nischenposition zu dem meistgenutzten Brennstoff bei der Wohnraumbeheizung entwickelt. Im Hinblick auf die fokussierte Reduzierung des Kohlendioxid-Ausstoßes wird diese Art der Wärmeerzeugung nach Sprenger (2002) auch in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen. Bild 1 gibt einen guten Überblick über die bisherigen und die prognostizierten Entwicklungen des Gasverbrauches in Deutschland.

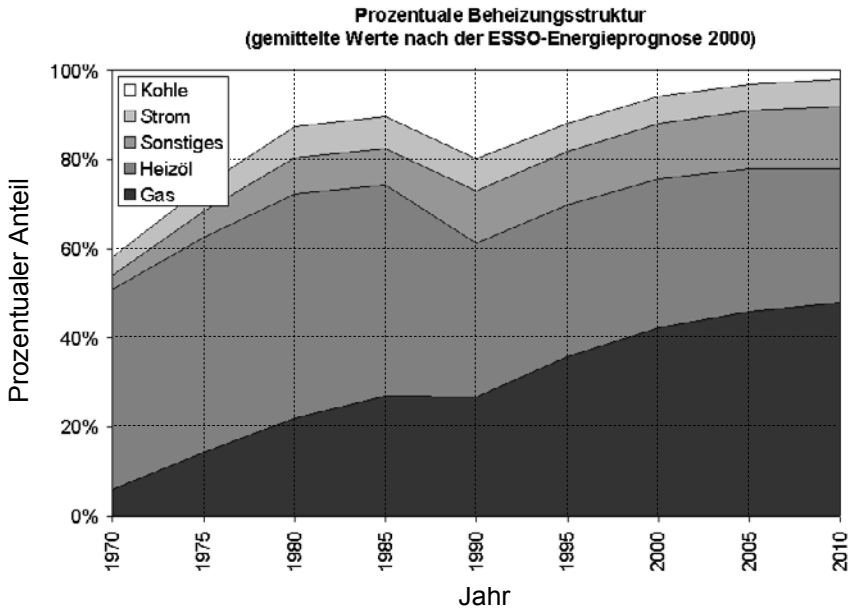


Bild 1: Prognose des Gasverbrauchs in Deutschland [Sprenger (2002)]

Zu der Gasversorgung eines Haushaltes zählen der Hausanschluss mit der Hauptabsperreinrichtung und die Innenleitungen. In einem Gebäude mit mehreren Wohneinheiten muss zwischen der klassischen und der zentralen Versorgung unterschieden werden. Die klassische Lösung ist die Installation, bei der die Gasleitungen bis in die einzelnen Wohneinheiten gelegt werden, während bei der zentralen Versorgung alle Wohnungen über eine gemeinsame Heizungsanlage versorgt werden. Zur Ermittlung der in Deutschland vorhandenen Gasanschlüsse wurde von der *Prognos AG* eine Untersuchung durchgeführt, nach der in Deutschland derzeit in circa 13,8 Millionen Wohneinheiten Gas zur Wärmeerzeugung verwendet wird. Davon werden 13,1 Millionen Wohneinheiten von ungefähr 5,1 Millionen zentralen Heizungsanla-

gen versorgt, während bei circa 0,7 Millionen Wohneinheiten die Gasversorgung über separate Gaseinzelheizungen erfolgt. Einen detaillierten Überblick über die Anzahl der in Deutschland vorhandenen Wohneinheiten mit Gasanschluss sowie die Anzahl der Gasanschlüsse liefert Tabelle 3.

Wohnungstyp	**Installationstyp**	**Wohneinheiten**	**Anschlüsse**
1-2 Familienhaus	Gaseinzelheizung	280.000	280.000
	Zentralheizung	5.220.000	3.700.000
Mehrfamilienhaus	Gaseinzelheizung	460.000	460.000
	Zentralheizung	7.840.000	1.350.000

Tabelle 3: Wohnungen in Deutschland mit Gasanschluss [Quelle: Prognos AG]

2.3.2 Schadens- und Unfallstatistik

Von der deutschen Vereinigung des *Gas- und Wasserfaches e.V.* wurden die seit Anfang des Jahres 1981 aufgetretenen Erdgasexplosionen in Wohngebäuden in einer unveröffentlichten *Schadens- und Unfallstatistik Gas* erfasst. Zu diesem Zweck erhielten die örtlichen Gasversorgungsunternehmen die Aufforderung, sämtliche Unfälle in ihrem Versorgungsbereich unmittelbar anzuzeigen. Aufgrund dieser direkten Schadenserfassung liefert die *Schadens- und Unfallstatistik Gas* eine geeignete Datenbasis zur Beurteilung der Auftretenswahrscheinlichkeit von Gasexplosionen in Wohngebäuden. In der nachfolgenden Auswertung werden ausschließlich Fälle berücksichtigt, die ihre Ursache hinter den Hauptabsperreinrichtungen hatten und somit in dem Verantwortungsbereich der Kundenanlagen zu finden sind.
Die in der *Schadens- und Unfallstatistik Gas* berücksichtigten Schadensfälle werden einzelnen Ursachenkategorien zugeordnet. Als Ursachen für Unfälle an den Kundenanlagen kommen technische Mängel, Installationsfehler, Bedienungsfehler, Veränderungen der Gasanlage sowie vorsätzliches Handeln in Betracht. Der Gruppe *Technische Mängel* werden Unfälle zugeordnet, die in einem direkten technischen Zusammenhang mit den Leitungsanlagen oder den Gasgeräten stehen. Diese Unfälle können zum Beispiel durch Verstopfungen der Abgaswege, funktionsuntüchtige Abgasklappen sowie eine fehlende Abstimmung von Gasfeuerstätte und Schornstein ausgelöst worden sein. Darüber hinaus werden dieser Gruppe auch werkstoffspezifische und konstruktionsbedingte Ursachen zugeordnet. In der Gruppe *Installations-*

fehler werden Unfälle aufgeführt, die auf nicht fachgerecht ausgeführte Arbeiten zurückgeführt werden können. Unter dem Begriff *Be-dienungsfehler* sind im Folgenden Unfälle zu verstehen, die aufgrund unterlassener Wartungsarbeiten sowie einer unsachgemäßen Nutzung der Gasgeräte entstanden sind. Die Gruppe *Veränderungen der Gasanlage* berücksichtigt Unfälle, die durch Arbeiten von nicht autorisierten Personen verursacht worden sind, während mit Vorsatz herbeigeführte Eingriffe in die Gasanlage der Gruppe *Vorsätzliche Eingriffe* zugeordnet werden.

Aus Gründen des Datenschutzes erfolgt in dieser Arbeit keine detaillierte Darstellung der in der *Schadens- und Unfallstatistik Gas* erfassten Explosionsunfälle. Allerdings sind in Bild 2 die relativen Häufigkeiten der einzelnen Schadensgruppen grafisch dargestellt.

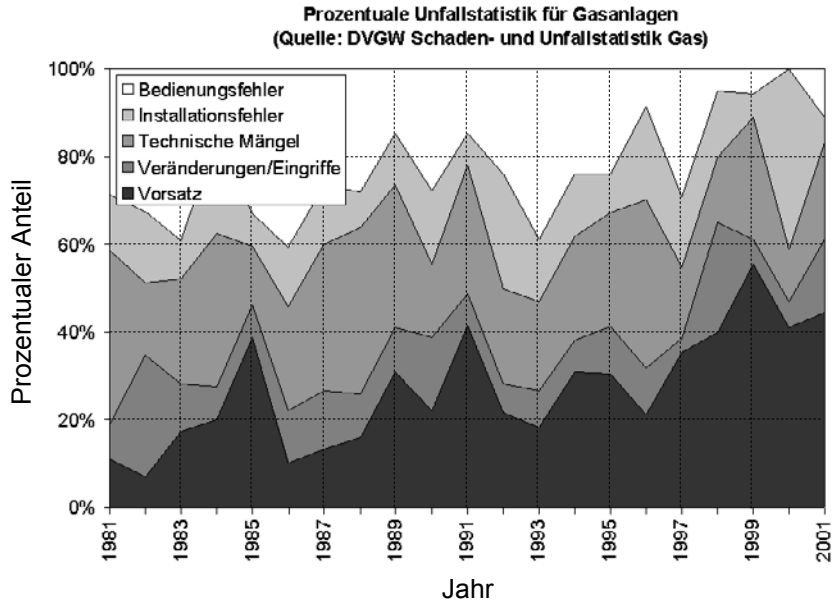


Bild 2: Prozentuale Unfallstatistik für Gasanlagen

Trotz des stark schwankenden Katastrophenschadens ist erkennbar, dass in den vergangenen Jahren eine deutliche Abnahme der durch Bedienungs- und Installationsfehler ausgelösten Explosionsunfälle zu verzeichnen war. Technische Mängel traten in den vergangenen Jahren ebenfalls nur noch vermindert auf, während der Anteil der durch Veränderungen oder Eingriffe in die Gasanlage ausgelösten Unfälle in den vergangenen Jahren nahezu unverändert geblieben ist. Ungeachtet dieser allgemein rückläufigen Tendenz ist die deutliche Zunahme der durch vorsätzliche Eingriffe in die Gasanlage verursachten Explosionsunfälle erkennbar. Auf der Basis der *Schadens- und Unfallstatistik Gas* sowie der von der *Prognos AG* durchge-

führten Untersuchung zur Ermittlung der in Deutschland vorhandenen Gasanschlüsse kann für Deutschland eine mittlere Auftretensrate von 42,5 Explosionsereignissen pro Jahr angegeben werden.

2.3.3 Normative Regelungen

Mit der Lastnorm DIN 1055-9 (2003) wird in Deutschland erstmals ein Bemessungsansatz für Gasexplosionen in Räumen zur Verfügung stehen. Das dort angegebene Nachweisformat wurde aus dem entsprechenden Eurocode DIN V ENV 1991-2-7 (2000) übernommen. Das Berechnungsmodell wurde empirisch auf der Basis von insgesamt 34 Großversuchen entwickelt, die von dem Institut *TNO for Building Materials and Building Structures* in Holland durchgeführt wurden. Eine detaillierte Darstellung dieser Versuchsreihe kann Dragosavic (1973) entnommen werden.

Der Nachweis für den Lastfall Gasexplosion ist nach DIN 1055-9 (2003) nur auf eine gesonderte Veranlassung durch den Bauherrn und in Abstimmung mit der zuständigen Behörde vorzunehmen. Bei gering einzustufenden Schädigungsfolgen sind keine besonderen Nachweise zu führen. Besteht dagegen die Gefahr für Personenschäden oder hohe wirtschaftliche Verluste, sind die tragenden Elemente eines Bauwerkes mit Hilfe von statischen Ersatzlastmodellen zu bemessen.

Bei Gebäuden mit einem vorhandenen oder geplanten Erdgasanschluss sind alle vitalen Tragelemente einschließlich deren Verbindungen so zu bemessen, dass sie einem außergewöhnlichen statischen Druck von p_d=*20 kN/m²* aus allen Richtungen widerstehen können. Hierbei subsumiert der Begriff *vital* solche Tragelemente, die bei Wegfall ihrer Tragfähigkeit einen Einsturz beziehungsweise größere Personen- oder Sachschäden zur Folge haben. Alle übrigen tragenden Bauteile sind einschließlich ihrer zugehörigen Verbindungen so zu bemessen, dass sie den Auswirkungen eines einaxial wirkenden, statischen Ersatzdruckes der folgenden Größe widerstehen können:

$$p_d = 3 + \frac{p_v}{2} + \frac{0,04}{(A_v / V)^2} \geq (3 + p_v) \qquad [\text{kN/m}^2] \tag{1}$$

mit

p_v Ansprechdruck der Druckentlastungsfläche in *[kN/m²]*

A_v Größe der Druckentlastungsfläche in *[m²]*

V Raumvolumen < *1000* in *[m³]*

Das Verhältnis von der Größe der Druckentlastungsfläche zu dem Raumvolumen muss die nachfolgende Bedingung erfüllen:

$$0,05 \cdot m^{-1} \leq \frac{A_v}{V} \leq 0,15 \cdot m^{-1} \tag{2}$$

Der statische Ersatzdruck nach Gleichung (1) darf als gleichzeitig auf alle Begrenzungsflächen des Raumes wirkend angesetzt werden. Sind in einem Raum mehrere Druckentlastungsflächen vorhanden, so dürfen ihre Einzelflächen $A_{v,i}$ zu einer Gesamtfläche A_v zusammengefasst und die Bemessung mit dem größten Wert des Ansprechdruckes $max(p_{v,i})$ durchgeführt werden.

In Bild 3 ist die anzusetzende statische Ersatzdruckbelastung in Abhängigkeit von dem Verhältnis der Druckentlastungsfläche zu dem Raumvolumen A_V/V für unterschiedliche Ansprechdrücke p_v der Druckentlastungsfläche dargestellt. Auf der Abszisse ergibt sich entsprechend der Begrenzung des Druckentlastungskoeffizienten nach Gleichung (2) lediglich ein Wertebereich von *0,05* bis *0,15* m^{-1}. Die maximal anzusetzende statische Ersatzdruckbelastung entsteht bei der jeweils kleinsten Druckentlastungsfläche $A_V = 0,05 \cdot V$ entsprechend Gleichung (1). Mit zunehmendem Druckentlastungskoeffizienten erfolgt eine exponentielle Abnahme der anzusetzenden statischen Ersatzdruckbelastung, bis die untere Begrenzung aus Gleichung (1) den Explosionsdruck auf eine minimal anzusetzende Belastung begrenzt.

Bild 3 verdeutlicht, dass die Ersatzdruckbelastung durch die Anordnung von großen Entlastungsflächen mit einem geringen Ansprechdruck deutlich reduziert werden kann. Die statischen Berstdrücke für Fensterscheiben liegen nach Bauer (1992) zwischen *4* und *8 kN/m²*. Bei der Dimensionierung von Fenstern und anderen Tageslichtöffnungen wird nach DIN 5034-4 (1994) eine Mindestfenstergröße von *1/10* der Grundrissfläche des Raumes gefordert. Diese Regelung führt bei üblichen Geschosshöhen zu einem Druckentlastungskoeffizienten von $A_V/V \approx 0,05$, der einer anzusetzenden maximalen Ersatzdruckbelastung von *21* bis *23 kN/m²* entspricht. Der Ersatzdruck kann bei einem Berstdruck der Druckentlastungsfläche von $p_v = 8$ *kN/m²* ab einem Druckentlastungskoeffizienten von *0,10* m^{-1} auf *11 kN/m²* und bei einem

Berstdruck der Druckentlastungsfläche von p_v=*4 kN/m²* ab einem Druckentlastungskoeffizienten von *0,14 m^{-1}* auf *7 kN/m²* reduziert werden.

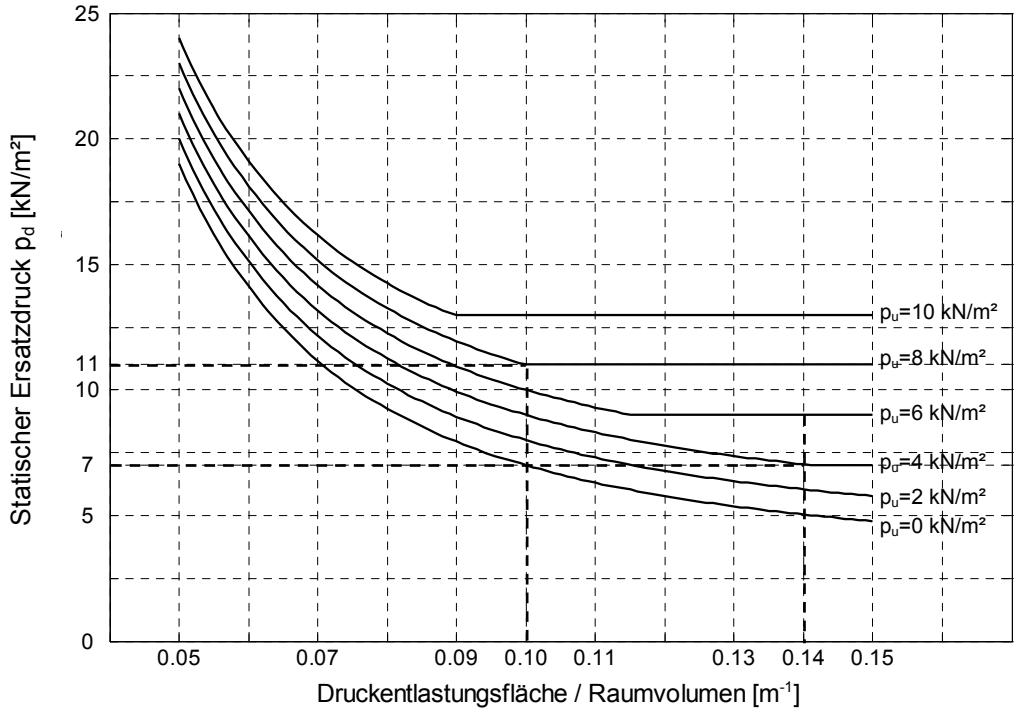


Bild 3: Statischer Ersatzdruck der Explosionsbelastung nach DIN 1055-9 (2003)

2.4 Konstruktive Regelungen

2.4.1 DIN 1045

In DIN 1045 (1988) wird in Absatz 19.8.6 zur Schadensbegrenzung bei außergewöhnlichen Einwirkungen der Anschluss von Wandtafeln an Deckenscheiben geregelt. An dieser Stelle wird gefordert, dass alle tragenden und aussteifenden Außenwandtafeln an ihrem oberen Rand, bei Hochhäusern auch an ihrem unteren Rand, mit den anschließenden Deckenscheiben aus Fertigteilen oder Ortbeton durch Bewehrung oder andere Stahlteile zu verbinden sind. Als Hochhäuser im Sinne der Norm werden Gebäude bezeichnet, bei denen der Fußboden mindestens eines Aufenthaltsraumes mehr als *22 Meter* über der Geländeoberfläche liegt. Die geforderten konstruktiven Verbindungen sind auf eine horizontal wirkende Zugkraft von 7 kN/m unter Einhaltung der zulässigen Spannungen der Verbindung zu bemessen und zu verankern, wobei der horizontale Abstand dieser Verbindungen nicht mehr als 2 Meter betragen darf. Die Einhaltung einer zulässigen Spannung der Stahlverbindungselemente wird durch die Division der Streckgrenze der Stahlverbindungen durch einen Sicherheitsbeiwert erreicht. Bei einem mittleren Sicherheitsbeiwert von γ=1,5 nach DIN 18800 (1990) Teil 1 (3.81) ergibt sich somit eine von dem Sicherheitsformat unabhängige Zugkraft von *10,5 kN/m*.

2.4.2 DIN V ENV 1992

In DIN V ENV 1992-1-1 (1991) wird unter *Absatz 2.1 P(2)* gefordert, dass ein Tragwerk so ausgebildet sein muss, dass es durch ein Ereignis wie eine Explosion oder eine andere außergewöhnliche Einwirkung nicht in einem Ausmaß geschädigt wird, das in keinem Verhältnis zu der Schadensursache steht. Zur Sicherstellung dieser Eigenschaft wird in *Absatz 5.5* die Anordnung von Ringankern gefordert. Die Ringanker sollten derart ausgebildet und bemessen sein, dass sie den Beanspruchungen der maßgebenden außergewöhnlichen Lasten widerstehen können und darüber hinaus in der Lage sind, einen Lastableitungspfad um einen geschädigten Bereich sicherzustellen.
In der für vorgefertigte Bauteile und Tragwerke gültigen DIN V ENV 1992-1-3 (1994) werden die konstruktiven Regelungen für Hochbauten in Ortbetonbauweise nach DIN V ENV 1992-1-1 (1991) deutlich verschärft. Neben der Anordnung von Ringankern wird in DIN V ENV 1992-1-1 (1991) der Einbau von Zugankern gefordert, um einen örtlichen Schaden in-

folge einer außergewöhnlichen Einwirkung zu begrenzen sowie im Falle eines örtlichen Schadens alternative Lastpfade zu ermöglichen. Unter *5.5.2 P(111)* bis *P(115)* ist die Dimensionierung von Zugankern an Stützen und Wänden geregelt. Demnach sind Randstützen und Außenwände in jeder Decken- und Dachebene horizontal zu verankern. Die Zuganker sollen dabei eine Zugkraft von $F_{tie} = 20\ kN/m$ aufnehmen können. Zuganker in dem Bereich von Stützen brauchen dabei den Wert von $F_{tie} = 150\ kN$ nicht zu überschreiten. Insbesondere im Hinblick auf die maximal aufzunehmende Zugkraft bei Stützen herrschen an dieser Stelle Unstimmigkeiten, da nach Steinle & Hahn (1999) der entsprechende Abschnitt aus FIP (1988) übernommen wurde und in diesem Bericht diese Werte als Mindestwerte definiert wurden. In Großtafelbauten ab fünf Stockwerken müssen zusätzlich vertikale Zuganker angeordnet werden, um den Einsturz einer Decke im Fall eines außergewöhnlichen Ausfalls der darunter liegenden Stütze oder Wand zu verhindern. Die Zuganker müssen in dem Grenzzustand der Tragfähigkeit mindestens den Bemessungswert der Einwirkung der über der ausfallenden Wand oder Stütze liegenden Decke aufnehmen können. Weiterhin muss bei einem außergewöhnlichen Ausfall einer Stütze oder einer Wand ein geeigneter alternativer Kraftfluss vorgesehen werden.

2.4.3 DIN 1045-1

In DIN 1045-1 (2001) werden unter *Absatz 13.12.4* erneut modifizierte Werte für die horizontalen Stützen- und Wandzuganker gefordert. Die Zuganker zur konstruktiven Sicherung der Wandelemente sollen eine horizontal wirkende Zugkraft von $F_{Ed} = 10\ kN/m$ aufnehmen können. Für Stützen gilt der Maximalwert von $F_{Ed} = 150\ kN$. Wie die Indizes zeigen, sind die Kräfte bereits als Bemessungswerte angegeben. Der Teilsicherheitsbeiwert für außergewöhnliche Einwirkungen im Hochbau wird nach DIN 1055-100 (2001) mit γ_A=1,0 festgelegt. Unter Berücksichtigung des Sicherheitsbeiwertes für Betonstahl bei außergewöhnlichen Bemessungssituationen von γ_S=1,0 ergibt sich ein gegenüber DIN 1045 (1988) vergleichbarer Wert von *10,0 kN/m*. In Analogie zu DIN 1045 (1988) wird in DIN 1045-1 (2001) gefordert, dass die Außenwandtafeln an ihrem oberen Rand und nur bei Hochhäusern auch an ihrem unteren Rand mit den anschließenden Deckenscheiben aus Fertigteilen oder Ortbeton durch Bewehrung oder andere Stahlteile zu verbinden sind.

2.4.4 DIN 1053-1

In der für den Mauerwerksbau gültigen DIN 1053-1 (1996) sind keine Zuganker für Mauerwerkanschlüsse an Decken zur Schadensbegrenzung bei außergewöhnlichen Einwirkungen vorgesehen. Der Anschluss darf über Haftung und Reibung erfolgen, wenn die Massivdecke mindestens 10 cm auf der Außenwand aufliegt und die Haupt- bzw. Querbewehrung der Deckenelemente mindestens bis zur halben Wanddicke an die Außenseite der Wand geführt wird.

2.4.5 British Standard

In dem BS-CP 110-1972 ist festgeschrieben, dass bei jedem Gebäude mit mehr als 5 Stockwerken die Möglichkeit eines progressiven Einsturzes bei der Wahl einer geeigneten Tragkonstruktion zu berücksichtigen ist. Entsprechend der Theorie des alternativen Lastpfades müssen Gebäude so konstruiert sein, dass diese bei dem statischen Ausfall eines tragenden Bauteils nicht einstürzen und bei einer lokalen Schädigung nur die unmittelbar benachbarten Stockwerke in Mitleidenschaft gezogen werden. Alle neu zu errichtenden Gebäude müssen einem Explosionsdruck von bis zu fünf Pfund pro Quadratzoll (≈35 kN/m²), bereits bestehende Gebäude einem Widerstand von 2,5 Pfund pro Quadratzoll (≈17 kN/m²) wiederstehen können. In den Vereinigten Staaten von Amerika wird mit der Problematik des progressiven Kollapses in vergleichbarer Weise verfahren.

2.4.6 Ehemalige DDR-Norm

In der StBA Vorschrift 58/85 ist die Zulässigkeit verschiedener Bauweisen bei entsprechenden Explosionswiderstandsklassen (EWKL) geregelt. Die Explosionswiderstandsklasse EWKL 20 entspricht dabei einer zu erwarteten Druckbeanspruchung der raumabschließenden Bauteile von 20 kN/m^2.
In Tabelle 4 sind die zulässigen Bauweisen für explosionsgefährdete Gebäude dargestellt, bei denen eine erhöhte Gefahr von Gas- und/oder Staubexplosionen besteht. Es ist deutlich zu erkennen, dass dem Mauerwerksbau der geringste Tragwiderstand gegen derartige Einwirkungen angerechnet werden darf. In explosionsgefährdeten Gebäuden der *EWKL 20* sind

Mauerwerkswände bis maximal drei Geschossen und nur ab einer Wanddicke von *36,5 cm* mit Aussteifungen und Verankerungen in der Decke zulässig. Stahlbetonskelettbauten in Fertigeilbauweise sind bei *EWKL 20* ohne Einschränkungen und bei *EWKL 30* bis maximal ein Geschoss zulässig. Die monolithische Stahlbetonbauweise ist bis zu der Explosionswiderstandsklasse *EWKL 50* ohne Einschränkungen zulässig.

Bauweise	EWKL 50	EWKL 30	EWKL 20
Monolithischer Stahlbetonbau	zulässig	zulässig	zulässig
Stahlbetonskelettbau in Fertigteilbauweise		eingeschossig zulässig	zulässig
Mauerwerksbau[1)] d>365 mm			bis zu drei Geschossen zulässig
[1)] Mit Aussteifungen nach TGL 112-0880 und Verankerung der Decken im Mauerwerk			

Tabelle 4: Zulässige Bauweisen für explosionsgefährdete Gebäude [StBA Vorschrift 58/85]

2.5 Zusammenfassende Darstellung

Zur Schadensbegrenzung bei außergewöhnlichen Einwirkungen infolge von Gasexplosionen stehen keine wissenschaftlich abgesicherten Bemessungsregeln zur Verfügung. In den Normen des Bauwesens werden derzeit lediglich konstruktive Maßnahmen gefordert, die aufgrund des ungenügenden Kenntnisstandes auf diesem Gebiet nicht einheitlich festgelegt wurden.

Die in Kapitel 2.4 dargestellten konstruktiven Forderungen gelten generell für die Schadensbegrenzung bei außergewöhnlichen Einwirkungen. Für den in diesem Forschungsvorhaben zu berücksichtigenden Explosionslastfall kann unterstellt werden, dass die geforderten Tragwiderstände einer zugrunde gelegten Explosionsbelastung gleichgesetzt werden können. In Tabelle 5 sind die diesbezüglich ermittelten Ersatzdruckbelastungen der untersuchten Normen einander gegenübergestellt. Die Widerstandswerte von DIN 1045 (1988), DIN 1045-1 (2001) und DIN V ENV 1992-1-3 (1994) werden in den Normfassungen pro laufendem Fassadenmeter angegeben und wurden zur besseren Vergleichbarkeit mit einer angenommenen Geschosshöhe von *2,5 m* auf die Einheit *[kN/m²]* umgerechnet. Zusätzlich zu den dargestellten kon-

struktiven Forderungen werden die Regelungen der DIN 1055-9 (2003) zu dem Vergleich herangezogen.

Normfassung	**Bemerkung**	**Druckbeanspruchung**
DIN 1045-1 (2001)	Geschosshöhe 2,50 m	8,0 kN/m²
DIN 1045 (1988)	Geschosshöhe 2,50 m	8,4 kN/m²
DIN V ENV 1-3 (1994)	Geschosshöhe 2,50 m	16,0 kN/m²
BS-CP 110 (1972)	bestehende Gebäude	17,0 kN/m²
DIN 1055-9 (2003)	vitale Tragelemente	20,0 kN/m²
DIN 1055-9 (2003)	sonstige Tragelemente	7,0 - 23,0 kN/m²*
BS-CP 110 (1972)	Neubauten	35,0 kN/m²
* p_v = 4,0 bis 8,0 KN/m² und $0{,}05 m^{-1} \leq A_v/V \leq 0{,}15 m^{-1}$		

Tabelle 5: Konstruktive Anforderungen verschiedener Normfassungen

Die Bandbreite der geforderten Widerstandsgrößen von 7 bis 35 kN/m² macht den unzureichenden Kenntnisstand bei der Festlegung von Ersatzlasten deutlich. Auf der Grundlage der in Kapitel 2.3.3 dargestellten Bemessungsgleichung erscheint die Festlegung des BS-CP 110-1972 für neu zu errichtende Gebäude mit 35 kN/m² als zu konservativ. Demgegenüber liegen die Anforderungen der DIN 1045 (1988) sowie der DIN 1045-1 (2001) mit nahe dem Minimalwert, der sich nach der Bemessungsgleichung in DIN 1055-9 (2003) nur mit den jeweils maximal möglichen Druckentlastungsöffnungen ergibt. Diese konstruktiven Forderungen liegen somit für die meisten Anwendungsfälle deutlich auf der unsicheren Seite. Die übrigen Forderungen der untersuchten Normen liegen zwischen den errechneten Minimal- und Maximalwerten der Bemessungsgleichung. Diesbezüglich ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich die geringeren Ersatzdruckbeanspruchungen der Bemessungsgleichung nur bei dem Ansatz von sehr großen Druckentlastungsöffnungen ergeben können, so dass auch hier einige Regelungen unsichere Ergebnisse liefern. Der Vergleich der rechnerischen Explosionsdruckbelastungen nach DIN 1055-9 (2003) mit den konstruktiven Forderungen belegt, dass einige Unstimmigkeiten hinsichtlich einer adäquaten normativen Umsetzung bestehen und insbesondere die deutsche Norm keine einheitliche Regelung zur Verfügung stellt.

3 Tragwerkszuverlässigkeit und Sicherheitskonzept

3.1 Einführung

Mit jeder Errichtung eines Bauwerkes entstehen Gefahren für die Menschen, die sich in unmittelbarer Umgebung des Bauwerkes befinden. Als Ursache für dieses Gefahrenpotential können Schadensfälle als Folge der unvermeidbaren Unsicherheiten der Belastungs- und der Festigkeitsgrößen angesehen werden. Die Aufgabe einer Zuverlässigkeitsanalyse ist es, eine Aussage über die Größe und das Ausmaß dieser Unsicherheiten zu treffen und diese in geeigneter Weise auf ein unbedenkliches Maß zu begrenzen.
Damit die konstruktiven Regelungen dem in der Norm geforderten Zuverlässigkeitsniveau gerecht werden können ist es notwendig, die zufallsbedingten Unsicherheiten der Explosionsdruckbeanspruchung mit Hilfe eines geeigneten statistischen Modells zu erfassen. Die Berücksichtigung zufallsbedingter Unsicherheiten postuliert, dass bei einem Ereignis mehrere Ergebnisse möglich sind. Unter der begründeten Annahme, dass es sich um zufällige Variationen handelt, werden die Ereignisse als Zufallsvariable definiert. Mit Hilfe der statistischen Modelle und Verfahren stehen die Grundlagen für die Berechnung der Tragwerkszuverlässigkeit im Rahmen einer Zuverlässigkeitsanalyse zur Verfügung.

3.2 Mathematische Formulierung des Zuverlässigkeitsproblems

Die Zuverlässigkeit eines Tragwerks oder Tragwerkteils wird im Allgemeinen als Komplement zu der Versagenswahrscheinlichkeit p_f definiert. Wobei der Begriff *Versagen* äquivalent den Verlust der Gebrauchstauglichkeit oder auch der Tragfähigkeit bezeichnen kann. Bezüglich dieser Kriterien befindet sich das Tragwerk entweder in einem sicheren Zustand oder versagt. Die Frage, welchen dieser Zustände ein Tragwerk für eine bestimmte Realisation der beteiligten Basisvariablen annimmt, wird durch die Auswertung der problemspezifischen Grenzzustandsfunktionen beantwortet:

$$Z=g(RE,)=R-E \tag{3}$$

In dieser Formulierung bezeichnet die Zufallsvariable E die Beanspruchung *(**E**inwirkung)* und R die Beanspruchbarkeit bzw. den Widerstand *(**R**esistance)*. Ist der Sicherheitsabstand Z für eine bestimmte Realisierung r_i und e_i größer Null, befindet sich das Tragwerk in einem siche-

ren Zustand. Ist der Wert kleiner Null, liegt Versagen vor. Die Grenze zwischen dem sicheren und dem Versagensbereich wird als Grenzzustandsfunktion bezeichnet und ist definiert durch *g(R,E) = 0*. Die gesuchte Versagenswahrscheinlichkeit p_f ergibt sich aus dem Faltungsintegral:

$$p_f = P(R - E < 0) = F_Z(z = 0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{s} f_{RE}(r,e)\, dr\, de = \int_{-\infty}^{+\infty} f_E(e) F_R(e)\, de \tag{4}$$

und entspricht dem Volumen unter der gemeinsamen Verteilungsdichte $f_{RE}(r,e)$ in dem Versagensbereich $R - E < 0$ (vgl. Bild 19).

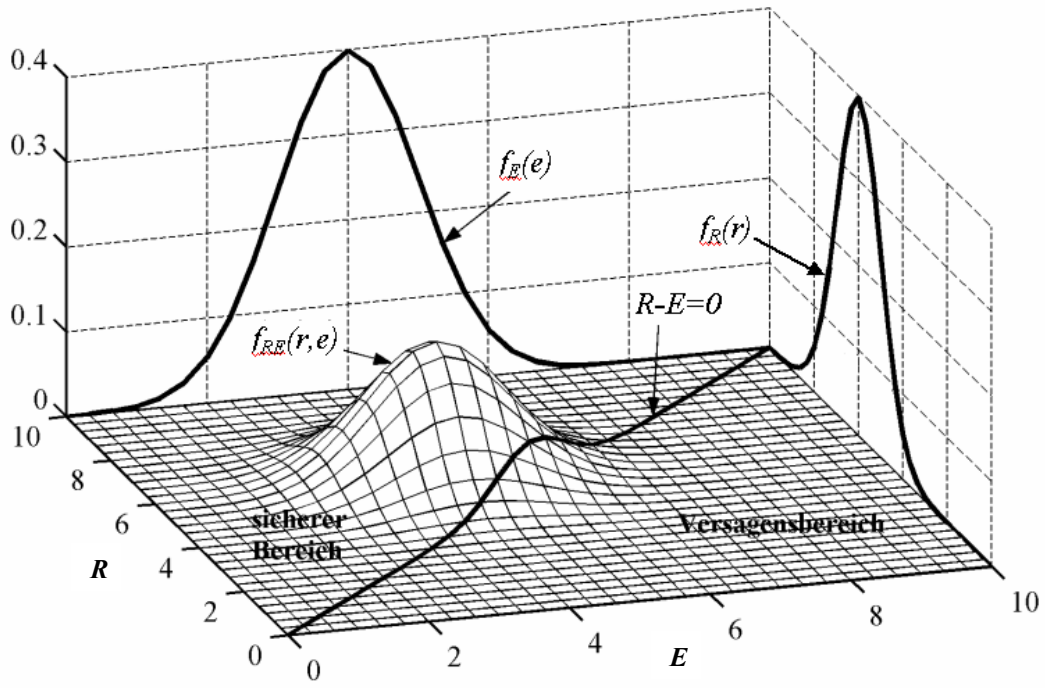


Bild 4: Darstellung der gemeinsamen Verteilungsdichten f_{RS}, der Randverteilungsdichten f_R und f_S, der Grenzzustandsfunktion *R-E=0* sowie des Versagensbereichs

Anhand des *R–E*–Modells kann ein weiteres, im konstruktiven Ingenieurbau weit verbreitetes Sicherheitsmaß, der sogenannte „Sicherheitsindex“ abgeleitet werden. Hierfür muss die Grenzzustandsfunktion $R - E = 0$ in den Standardnormalraum transformiert werden:

$$\widetilde{R} = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R} \qquad und \qquad \widetilde{E} = \frac{E - \mu_E}{\sigma_E} \tag{5}$$

Einsetzen in Gl. (3) und Umformen in die Hessesche Normalform liefert:

$$-\frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2+\sigma_E^2}}\widetilde{R}+\frac{\sigma_E}{\sqrt{\sigma_R^2+\sigma_E^2}}\widetilde{E}-\frac{\mu_R-\mu_E}{\sqrt{\sigma_R^2+\sigma_E^2}}=0 \tag{6}$$

Hieraus erhält man den kürzesten Abstand der Grenzzustandsgeraden zum Ursprung des Standardnormalraums, den sogenannten Sicherheitsindex β:

$$\beta=\frac{\mu_R-\mu_E}{\sqrt{\sigma_R^2+\sigma_E^2}}=\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}=-\Phi^{-1}(p_f)=\Phi^{-1}(1-p_f) \tag{7}$$

Hierin bezeichnet Φ die Standardnormalverteilung. Die Vorfaktoren in Gl. (6) entsprechen dabei dem Richtungskosinus der Normalen auf die Grenzzustandsgerade und werden als Sensitivitäts- oder Wichtungsfaktoren α bezeichnet. Sie geben Aufschluss darüber, in welchem Maße eine bestimmte Basisvariable zur Versagenswahrscheinlichkeit beiträgt:

$$\alpha_R=\frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2+\sigma_E^2}} \quad und \quad \alpha_E=\frac{\sigma_E}{\sqrt{\sigma_R^2+\sigma_E^2}} \tag{8}$$

Der Lotfußpunkt auf der Grenzzustandsgeraden wird als Bemessungspunkt bezeichnet. Er ist derjenige Versagenspunkt mit der größten Wahrscheinlichkeitsdichte. Seine Koordinaten im Originalraum der Basisvariablen erhält man durch Rücktransformation:

$$\begin{aligned} R_d &= \mu_R-\alpha_R\,\beta\,\sigma_R=R_k/\gamma_R \\ E_d &= \mu_S+\alpha_E\,\beta\,\sigma_E=E_k\cdot\gamma_F \end{aligned} \tag{9}$$

Bei bekannten Wichtungsfaktoren α_R und α_E lassen sich die Teilsicherheitsbeiwerte γ_R und γ_F derart kalibrieren, dass ein bestimmter Zielsicherheitsindex β_{Target} bzw. eine bestimmte Versagenswahrscheinlichkeit p_f gewährleistet ist.

3.3 Klassifizierung zuverlässigkeitstheoretischer Methoden

Die verschiedenen Methoden zur Lösung des fundamentalen Zuverlässigkeitsproblems werden je nach Grad ihrer Komplexität bzw. der vorgenommenen Vereinfachungen bestimmten Ebenen zugeordnet (vgl. Tabelle 6). Auf der niedrigsten und zugleich einfachsten Ebene 1 befindet sich das Teilsicherheitskonzept, welches der modernen Normengeneration des konstruktiven Ingenieurbaus zugrunde liegt. Die zugehörigen Teilsicherheitsfaktoren werden dabei durch probabilistische Kalibrierung an bestehenden Normen hergeleitet.

Zu den Methoden der 2. Ebene gehören probabilistische Näherungsverfahren. Die Vereinfachungen im Vergleich zu probabilistisch exakten Verfahren liegen beispielsweise bei der Momentenmethode (*FOSM*) in der alleinigen Berücksichtigung von Mittelwert und Varianz der Zufallsvariablen und einer linearen Approximation der Grenzzustandsfläche. Im Rahmen der Zuverlässigkeitstheorie erster (*FORM*) bzw. zweiter Ordnung (*SORM*) finden alle Verteilungstypen Berücksichtigung, jedoch wird die Grenzzustandsfunktion ebenfalls durch eine Hyperfläche erster bzw. zweiter Ordnung angenähert. Verfahren der Ebene 1 und 2 liefern demnach immer eine Näherungslösung und daher spricht man auch nur von einer operativen Versagenswahrscheinlichkeit. Dennoch lassen sich in vielen Fällen hinreichend genaue Ergebnisse erzielen.

Die Ebene 3 enthält die in probabilistischer Hinsicht exakten Verfahren, das heißt es werden keine Näherungen im stochastischen Modell vorgenommen. Hierzu gehören die numerische Integration und die stochastischen Simulationsverfahren. Da es sich hierbei um numerische Methoden handelt, ist das Ergebnis insgesamt wiederum eine Näherung.

	Ebene	Methode	Wahrscheinlichkeitsverteilung	Grenzzustandsfunktion	Ergebnis
1	semi-probabilistisch	Kalibrierung mit Hilfe der Ebene 2, 3	nicht verwendet	i.A. linear	Teilsicherheitsfaktoren
2	probabilistische Näherungsverfahren	FOSM	ausschließlich Normalverteilung	lineare Approximation	„Operative“ Versagenswahrscheinlichkeit
		FORM, SORM	alle Typen	lineare/ quadratische Approximation	
3	probabilistisch exakte Verfahren	numer. Integration Monte Carlo Methode	alle Typen	Beliebig	Versagenswahrscheinlichkeit

Tabelle 6: Klassifizierung zuverlässigkeitstheoretischer Methoden

4 Grundlagen der Explosionstheorie

4.1 Einführung

Bei Unter dem Begriff *Gas* wird ein Aggregatzustand der Materie verstanden, in dem die Materie infolge der freien Bewegung der Moleküle keine bestimmte Gestalt hat, sondern jeden Raum, in den sie gebracht wird, ausfüllt [Höchst (1997)]. Im Folgenden wird mit dem Begriff *Gas* ein brennbares Gas bezeichnet, dessen Moleküle mit denen der Luft vollständig mischbar sind. Eine *Explosion* beschreibt eine sehr schnell ablaufende Reaktion, in der große Mengen an Energie freigesetzt werden. Durch den Reaktionsablauf kommt es schlagartig zu einer lokalen Energieansammlung, die durch Hitzeentwicklung und Druckwellen abgebaut wird [Kinney & Graham (1985)].

Die Auftretenswahrscheinlichkeit von Explosionen ist im Allgemeinen sehr gering. In Wohngebäuden ist die Explosion eines Gas-Luft-Gemisches der häufigste Fall, da das Gas zur häuslichen Wärmegewinnung verwendet wird. Andere Möglichkeiten für das Entstehen einer Explosion, wie zum Beispiel die unsachgemäße Lagerung explosionsfähiger Ausgangsstoffe, werden nicht untersucht. Gegenstand der folgenden Untersuchungen sind Gasexplosionen, bei denen die Ausbreitung der Reaktionsfront durch Wärme- und Stofftransportvorgänge aus der Reaktionszone in das Frischgemisch erfolgt. Derartige Explosionen werden mit dem Begriff *Deflagrationen* bezeichnet.

Die Theorie der Gasexplosionen verlangt ein grundlegendes Verständnis über den Verbrennungsprozess eines Gas-Luft-Gemisches. Damit der Vorgang einer Explosion ablaufen kann, muss das Gas mit einem geeigneten Oxidationspartner ein ausreichend verteiltes und zündfähiges Gemisch in einer bestimmten Konzentration bilden. Als Oxidationspartner können reiner Sauerstoff, aber auch der in der Luft vorhandene Sauerstoff, dienen. Im Rahmen dieser Untersuchungen wird ausschließlich der in der Luft vorhandene Sauerstoff als Oxidationspartner berücksichtigt. Sobald sich ein zündfähiges Gas-Luft-Gemisch gebildet hat, kann der Verbrennungsvorgang durch eine Zündquelle mit einem ausreichenden Energiegehalt initiiert werden.

Nachdem die Grundlagen der Explosionsentstehung dargestellt worden sind, wird die aus dem Verbrennungsvorgang resultierende Druckentwicklung in einem geschlossenen, adiabaten Behälter untersucht. Hierbei wird vorausgesetzt, dass der Behälter ausreichend stark dimensioniert ist, um dem entstehenden Explosionsdruck widerstehen zu können. Der Enddruck, der in diesem Behälter durch deflagrativen Abbrand erreicht werden kann, ist lediglich von dem

Ausgangszustand des Gemisches (Druck p_0, Temperatur T_0) sowie von dessen Gemischzusammensetzung abhängig. Im Rahmen dieser Unersuchungen werden nur die üblichen Umgebungsbedingungen unter Raumtemperatur *(20°C)* und atmosphärischen Druckverhältnissen *(1,0 bar)* berücksichtigt.

Nachdem der Ablauf einer Gasexplosion in einem geschlossenen Behälter diskutiert worden ist, werden die Darstellungen auf druckentlastete Gasexplosionen erweitert. Durch die gezielte Anordnung von Druckentlastungsflächen als Sollbruchstellen an dem Gehäuse explosionsgefährdeter Einrichtungen sollen in dem Moment des Anlaufens einer Explosion Öffnungen zur Ableitung von Verbrennungsprodukten und noch unverbranntem Gasgemisch freigegeben werden. Durch diese Maßnahme kann der Explosionsdruck derart begrenzt werden, dass die Einrichtung nicht über ihren Auslegungsdruck hinaus beansprucht wird. Der sich hierbei einstellende Druck-Zeit-Verlauf und die daraus abzuleitenden Explosionskenngrößen sind das Ergebnis einer Vielzahl von Einflussparametern. Die theoretischen Grundlagen für die Druckentwicklung von druckentlasteten Gasexplosionen sowie ihre Abhängigkeit von dem Verbrennungszustand werden dargestellt und erläutert.

4.2 Explosionsgrenzen

Damit die Verbrennung eines Gas-Luft-Gemisches ablaufen kann, müssen einige Randbedingungen erfüllt sein. Außer einem brennbaren Gas muss zusätzlich Luft als Oxidationspartner sowie eine Zündung mit einem ausreichenden Energiegehalt vorhanden sein. Zusätzlich muss die Konzentration des Gas-Luft-Gemisches in einem bestimmten Grenzbereich liegen. Ein explosionsfähiges Gas-Luft-Gemisch ist ein Gemisch von Gasen, dessen Flammenfront sich nach einer Initialentzündung weiter fortpflanzt, ohne dass hierfür weitere Energie bereitgestellt werden muss. Die Explosionsgrenzen schließen das Konzentrationsgebiet des Brenngases in der Mischung mit Luft ein, innerhalb dessen mittels einer Zündquelle eine sich selbständig fortpflanzende Reaktion eingeleitet werden kann. Außerhalb dieser Grenzen ist eine Explosion nicht möglich. Bei der unteren Explosionsgrenze *(UEG)* ist der Brenngasanteil zu gering, um eine fortschreitende Verbrennung aufrecht zu erhalten. Bei der oberen Explosionsgrenze *(OEG)* steht nicht genügend Sauerstoff für die Verbrennung zur Verfügung. Die Explosionsgrenzen sind in gewissem Maße abhängig von dem Energiegehalt der Initialzündung, dem Vordruck sowie der Ausgangstemperatur des Gemisches und somit keine konstanten

Werte. Mit einem zunehmenden Energiegehalt der Initialzündung, einem größeren Vordruck sowie höheren Ausgangstemperaturen des Gemisches lassen sich die Explosionsgrenzen erweitern. In der Praxis ist es üblich, die Explosionsgrenzen bei einer Raumtemperatur von *20°C*, einem Umgebungsdruck von *1,013 bar* sowie einem Energiegehalt der Initialzündung von *10 J* zu bestimmen [Bartknecht (1978)]. In Tabelle 7 sind die Explosionsgrenzen für einige als repräsentativ anzusehende Brenngase dargestellt.

Brennbarer Stoff		**UEG [Vol %]**	**OEG [Vol %]**
Methan	CH_4	4,0	17,0
Ethan	C_2H_6	2,5	15,0
Propan	C_3H_8	2,1	10,0
Butan	C_4H_{10}	1,8	8,5
Pentan	C_5H_{12}	1,5	7,8

Tabelle 7: Explosionsgrenzen verschiedener Brenngase in Luft [Bartknecht (1993)] (T_0=*20°C*, p_0=*1,013 bar*, *E=10J*)

4.3 Entzündung

Infolge der Erwärmung eines Gas-Luft-Gemisches beginnen chemische Reaktionen abzulaufen. Da diese Reaktionen exotherm also wärmeabgebend sind, neigt die Mischung dazu, sich zu erwärmen und somit den chemischen Ablauf zu beschleunigen. Zu dem Zeitpunkt, an dem die Rate der Selbsterhitzung die Rate der Hitzeabgabe übersteigt, entzündet sich die Mischung selbständig. Dieses Phänomen wird mit dem Begriff der *Selbstentzündung* bezeichnet und dient zur Einschätzung der Reaktionsfähigkeit eines Gemisches.

Außer durch eine Erwärmung kann die Entzündung auch durch den in der Praxis typischeren Fall der örtlichen Einleitung einer Verbrennungsreaktion, durch einen Funken oder eine ähnliche Energiequelle ausgelöst werden. Die zündwilligste Gemischkonzentration liegt in dem Bereich der stöchiometrischen Gemischzusammensetzung, wobei genau so viel Sauerstoff vorhanden ist wie für die vollständige Verbrennung der Ausgangsstoffe benötigt wird. Ausgehend von dem stöchiometrischen Mischungsverhältnis kann die selbständige Flammenfortpflanzung durch eine Steigerung der Zündenergie auf weitere Konzentrations-bereiche ausge-

dehnt werden. In Tabelle 8 sind die Selbstentzündungstemperaturen sowie die für eine Initialzündung minimal erforderlichen Zündenergien verschiedener Brenngase in Luft dargestellt.

Brennbarer Stoff		**Selbstentzündungstemperatur [K]**	**Mindestzündenergie [mJ]**
Methan	CH_4	810	0,30
Ethan	C_2H_6	790	0,25
Propan	C_3H_8	720	0,25
Butan	C_4H_{10}	680	0,25
Pentan	C_5H_{12}	530	0,25

Tabelle 8: Selbstentzündungstemperatur und Mindestzündenergie verschiedener Brenngase in Luft [Bartknecht (1993)]

4.4 Druckentwicklung in geschlossenen Behältern

4.4.1 Allgemeines

Im Folgenden wird zunächst die Druckentwicklung in einem vollständig geschlossenen Behälter behandelt, dessen Struktur dem maximal entstehenden Explosionsdruck ohne Schaden widerstehen kann. Der Behälter sei vollständig mit einem explosiven Methan-Luft-Gemisch gefüllt, der Verbrennungsvorgang wird durch eine lokale Initialzündung in der Behältermitte eingeleitet.

In einem derart abgeschlossenen System ist der Druckanstieg die Konsequenz des Verbrennungsprozesses. Die vollständige Verbrennung von Methan in Luft kann durch folgende chemische Gleichung beschrieben werden:

$$CH_4 + 2(O_2 + 3,76 \cdot N_2) \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 2(3,76N_2) + Energie \tag{10}$$

Die chemischen Produkte einer kompletten Verbrennung von Kohlenwasserstoffen sind hauptsächlich Kohlendioxid und Wasserdampf. Der Verbrennungsprozess führt zu einem Temperaturanstieg aufgrund der Umwandlung der chemisch gebundenen Energie in Wärme. Da die Ausdehnung der erwärmten und somit weniger dichten Verbrennungsprodukte durch

den Raum begrenzt wird, steigt der Druck in dem Behälter an. Solange es möglich ist, breitet sich die Reaktionszone der Flamme von dem Ort der Entzündung annähernd sphärisch aus. Die Zeit, die von der Entzündung bis zu dem Abklingen der Reaktion vergeht, ist bei einer internen Explosion relativ lang und kann in einem Bereich von einigen Sekunden liegen. In Bild 5 sind ein typischer Druck-Zeit-Verlauf einer Explosion in einem geschlossenen Behälter sowie die Ausbreitung der Flammenfront während des Verbrennungsvorganges dargestellt.

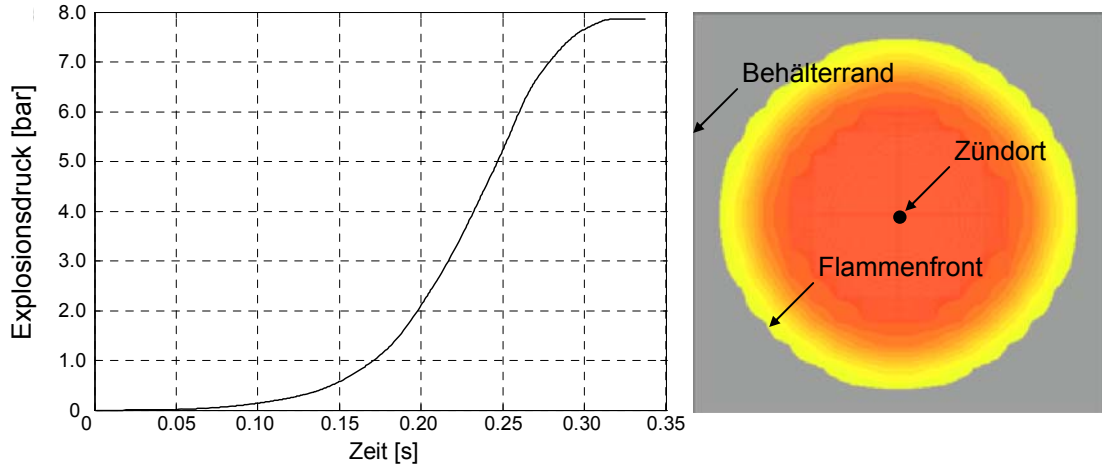


Bild 5: Typischer Druck-Zeit-Verlauf einer Explosion und sphärische Ausbreitung der Flammenfront in einem geschlossenen Behälter

4.4.2 Maximaler Explosionsdruck

Der maximale Explosionsdruck p_{max} eines Gas-Luft-Gemisches ist der bei einer Explosion in optimaler Konzentration auftretende höchste Druck in einem geschlossenen Behälter. In Bild 6 sind der Explosionsbereich von Methan sowie der jeweils zugehörige Explosionsdruck dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Explosionsdruck in dem Bereich der stöchiometrischen Gemischzusammensetzung von *9,5 Vol.%* einen ausgeprägten Maximalwert bei ungefähr *10 Vol.%* aufweist und zu den Explosionsgrenzen hin abnimmt. Der maximale Explosionsdruck ist zusätzlich von dem Energiegehalt des Gas-Luft-Gemisches und somit von der Gasart abhängig. Die Menge von Wärme pro Volumeneinheit, die bei einer vollständigen Verbrennung freigesetzt wird, ist eine Maßzahl für den Energiegehalt und wird als *Brennwert* bezeichnet. In dem Bereich des stöchiometrischen Mischungsverhältnisses ist der Energiegehalt der meisten Kohlenwasserstoffgase nach Bartknecht (1993) nahezu identisch. Aus diesem Grund er-

reichen die meisten Kohlenwasserstoffe bei Verbrennungsprozessen in geschlossenen Behältern in diesem Bereich ähnliche Maximalwerte. Polithier (1998) weist darauf hin, dass der maximale Explosionsdruck für herkömmliche Brenngase im Allgemeinen zwischen *7* und *8 bar* liegt und im Wesentlichen unabhängig von dem Raumvolumen und der Raumgeometrie ist. In Tabelle 9 ist der maximale Explosionsdruck verschiedener als relevant einzustufender Brenngase dargestellt.

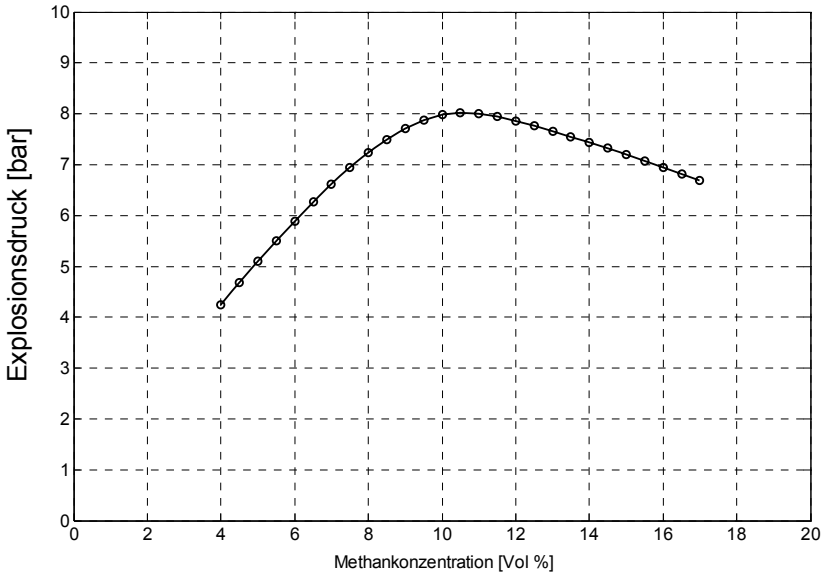


Bild 6: Explosionsgrenzen und maximaler Explosionsdruck von Methan in Luft (T_0=20°C, p_0=1,0 *bar*)

Brennbarer Stoff		**p_{max} [bar]**
Methan	CH_4	8,0
Ethan	C_2H_6	8,1
Propan	C_3H_8	8,2
Butan	C_4H_{10}	8,2
Pentan	C_5H_{12}	8,3

Tabelle 9: Maximaler Explosionsdruck verschiedener Brenngase [Kinney & Graham (1985)]

4.4.3 Maximale Druckanstiegsrate

Die Geschwindigkeit, mit der sich die Flammenfront durch das Gas-Luft-Gemisch fortpflanzt, bestimmt die Rate, mit der verbranntes Gas produziert und somit der Druck aufgebaut wird. In der Praxis wird zwischen der Flammengeschwindigkeit und der Verbrennungsgeschwindigkeit unterschieden. Während einer Verbrennung erfährt die Flammenfront durch die Ausdehnung des von der Flammenfront eingeschlossenen Reaktionsgemisches eine zusätzliche Beschleunigung. Die Geschwindigkeit, mit der die Reaktionszone in Bezug zu einem fixen Punkt durch das Gemisch wandert, wird Flammengeschwindigkeit genannt. Mit dem Begriff Verbrennungsgeschwindigkeit wird die Geschwindigkeit bezeichnet, mit der sich die Flammenfront relativ zu dem unverbrannten Gemisch vor der Flammenfront fortbewegt. Die Flammengeschwindigkeit ist immer größer als die Verbrennungsgeschwindigkeit.
Der maximale zeitliche Druckanstieg $(dp/dt)_{max}$ ist der größte Wert für das Verhältnis zwischen Druck und Zeit, der bei einer Gasexplosion in einem geschlossenen Behälter auftreten kann. Der maximale zeitliche Druckanstieg ist definiert als der Anstieg der Tangente in dem Wendepunkt des aufsteigenden Astes des Druck-Zeit-Verlaufes einer Explosion und ist nach Baker & Tang (1991) ebenfalls in der Nähe der stöchiometrischen Gemischzusammensetzung am höchsten. Obgleich die Größe des maximalen Explosionsdruckes für die meisten Kohlenwasserstoffgase in geschlossenen Behältern ähnliche Werte liefert, ändert sich mit der Gasart der maximale zeitliche Druckanstieg, da die Verbrennungsgeschwindigkeit und somit die Flammengeschwindigkeit zwischen den Gasen variiert. Die maximale laminare Verbrennungsgeschwindigkeit ist für unterschiedliche Gas-Luft-Gemische in Tabelle 10 für eine Temperatur von *20° C* und einen atmosphärischen Umgebungsdruck von *1,013 bar* dargestellt.
Bei einem definierten Gas-Luft-Gemisch ist der Druck-Zeit-Verlauf einer Explosion von der Größe der Flammenoberfläche abhängig. Die Flammenoberfläche entspricht der Reaktionszone und bestimmt maßgeblich die Geschwindigkeit, mit der die Verbrennung abläuft und der Druck in dem Behälter aufgebaut wird. Aus diesem Grund ist der zeitliche Druckanstieg im Gegensatz zu dem maximalen Explosionsdruck von dem Behältervolumen, der Behältergeometrie und dem Ort der Entzündung abhängig. In Bild 7 ist die Entwicklung der Flammenfront für unterschiedliche Behältervolumina und unterschiedliche Behältergeometrien zu unterschiedlichen Zeitpunkten dargestellt. Alle Behälter sind vollständig mit einem Gas-Luft-Gemisch gefüllt, die lokale Zündung des Verbrennungsvorganges erfolgt in der Behältermitte.

Insbesondere zu den Zeitpunkten *t=0,50* Sekunden und *t=0,65* Sekunden wird deutlich, dass die Verbrennungsgeschwindigkeit nahezu unabhängig von dem Behältervolumen ist. Aus diesem Grund nimmt mit kleiner werdendem Behältervolumen unter sonst identischen Bedingungen der prozentuale Anteil zwischen Verbrennungsprodukt und unverbranntem Gas-Luft-Gemisch zu. Aus den in Bild 23 dargestellten Druck-Zeit-Verläufen ist zu erkennen, dass sich bei Gasexplosionen in Behältern unterschiedlicher Größe zwar der gleiche maximale Explosionsdruck einstellt, die Reaktionsgeschwindigkeit der Explosion jedoch mit zunehmendem Behältervolumen abnimmt.

Aus Bild 7 wird weiterhin deutlich, dass die Form und dadurch die Größe der Flammenfront von der Behältergeometrie abhängig ist. Eine Vergrößerung der Flammenfront führt zu einem schneller ablaufenden Verbrennungsprozess. Sobald die sphärische Flammenfront eine Behälterwand erreicht, reduziert sich die zeitliche Zunahme der Flammenoberfläche. Aus diesem Grund ist bei kubischen Behältern die Flammenfläche stets größer als bei länglichen Behältern mit gleichem Volumen. In Bild 24 ist der Einfluss unterschiedlicher Behältergeometrien auf den Druck-Zeit-Verlauf einer Gasexplosion in einem geschlossenen Behälter dargestellt. Es wird deutlich, dass die Reaktionsgeschwindigkeit der Explosion bei länglichen Behältern geringer ist als bei kubischen Behältern.

Die bisherigen Ausführungen gingen davon aus, dass das Gas-Luft-Gemisch in der Behältermitte gezündet wird. Eine Zündortverlagerung an den Behälterrand wirkt sich ebenfalls auf die Größe der Flammenfront und dadurch auch auf den Druck-Zeit-Verlauf der Explosion aus. Bild 10 zeigt die Entwicklung der Flammenfront für unterschiedliche Zündorte in einem kubischen Behälter. Der Verbrennungsvorgang wird jeweils durch eine Zündung in der Behältermitte, eine Zündung an dem Behälterrand und eine Zündung in einer Behälterecke eingeleitet. Der Einfluss des Zündortes auf den Druck-Zeit-Verlauf ist in Bild 11 dargestellt. Aufgrund der Größe der Flammenfläche ist der zeitliche Druckanstieg am größten, wenn das Gemisch in der Raummitte entzündet wird. Bei einer Zündortverlagerung an den Behälterrand reduziert sich die Größe der Flammenoberfläche und dadurch auch die Verbrennungsgeschwindigkeit.

Brennbarer Stoff		**laminare Verbrennungs-geschwindigkeit [m/s]**
Methan	CH_4	0,38
Ethan	C_2H_6	0,45
Propan	C_3H_8	0,42
Butan	C_4H_{10}	0,42
Pentan	C_5H_{12}	0,46

Tabelle 10: Maximale laminare Verbrennungsgeschwindigkeit verschiedener Brenngase (T0=20°C, p0=1,013 bar) [Kinney & Graham (1985)]

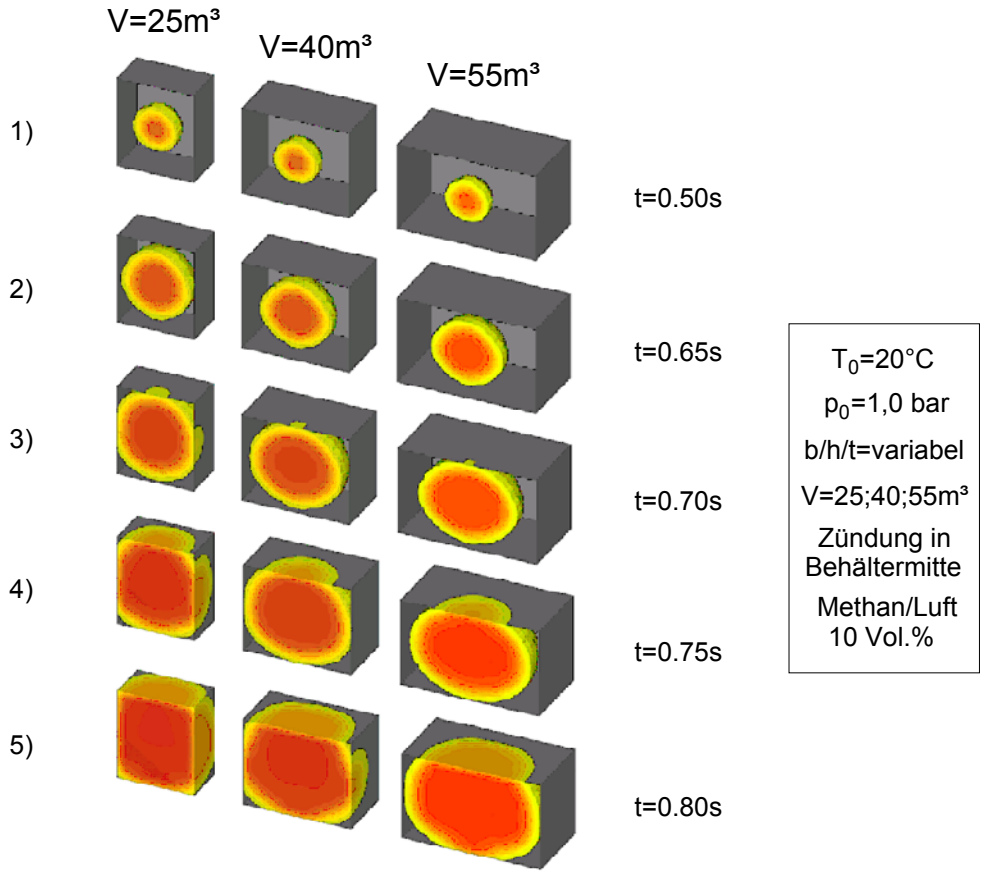


Bild 7: Einfluss des Behältervolumens und der Behältergeometrie auf die Größe der Flammenfront

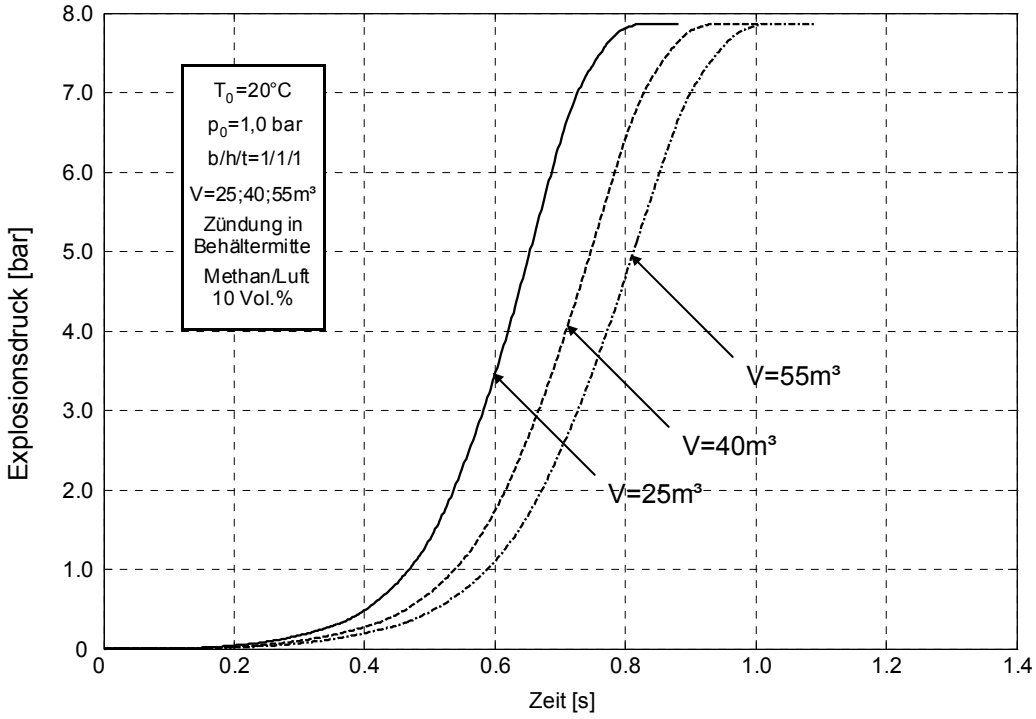


Bild 8: Einfluss des Behältervolumens auf die Druckentwicklung einer Gasexplosion

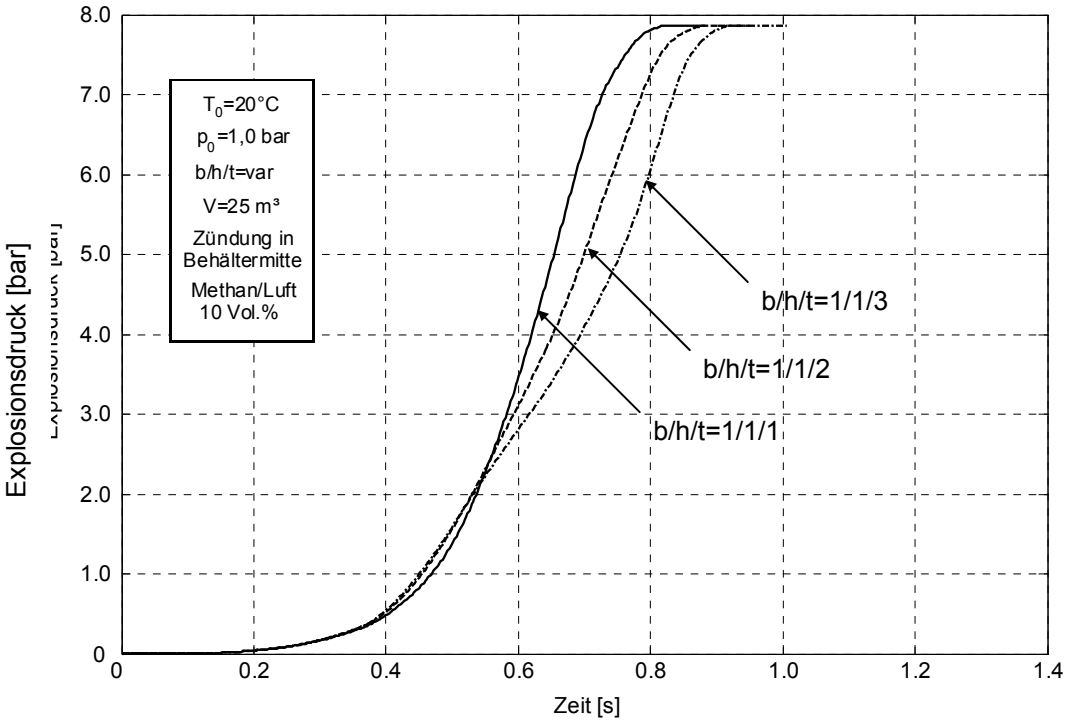


Bild 9: Einfluss der Behältergeometrie auf die Druckentwicklung einer Gasexplosion

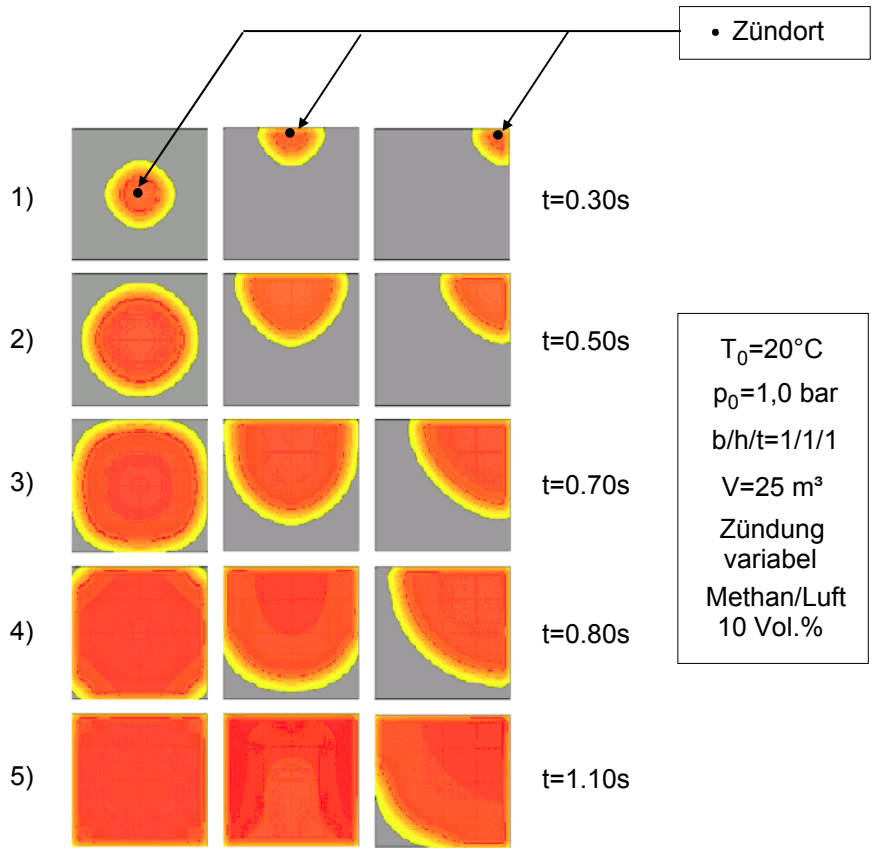


Bild 10: Einfluss des Zündortes auf die Größe der Flammenfront

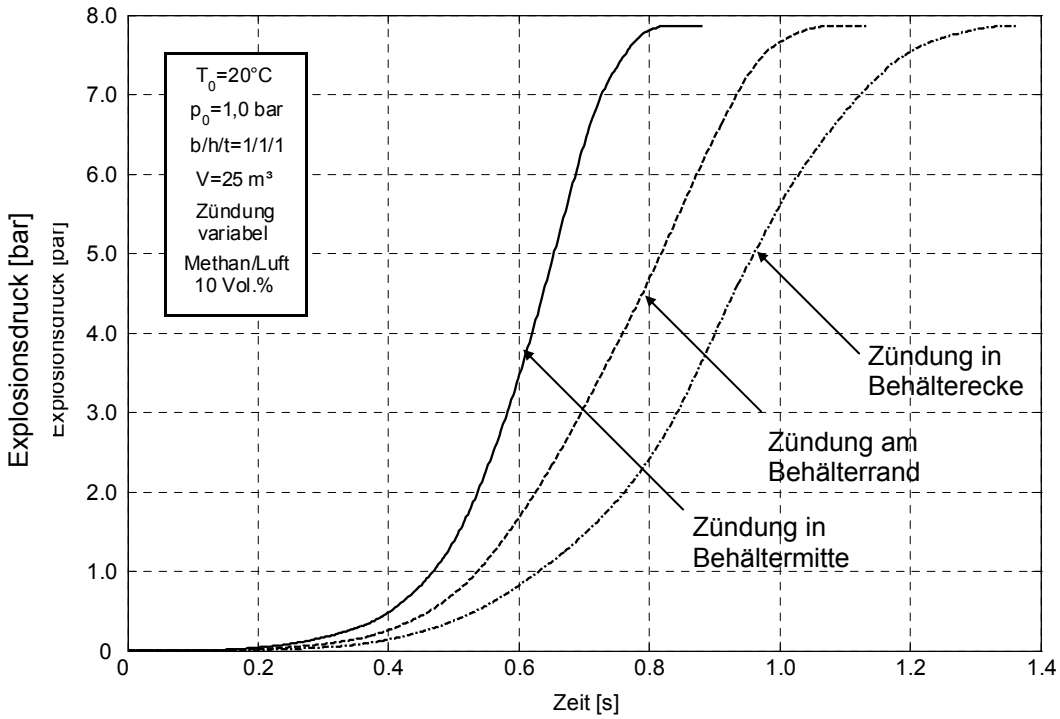


Bild 11: Einfluss des Zündortes auf die Druckentwicklung einer Gasexplosion

4.4.4 Einfluss von Turbulenzen

Bei den bisherigen Ausführungen wurde vorausgesetzt, dass sich das explosionsfähige Gas-Luft-Gemisch bei der Einleitung des Verbrennungsvorganges in einem ruhenden Zustand befindet. Durch Ventilation oder durch Hindernisse in dem Behälter kann das Gemisch in einen turbulenten Zustand versetzt werden. Durch die Turbulenzen vergrößert sich die Flammenfront und dadurch auch die Reaktionszone. Bartknecht (1993) stellt dar, dass die Reaktionszone in solchen Fällen nur annähernd kugelförmig und die Flammenfront stark verzerrt ist. Aus Bild 12 wird deutlich, dass gegenüber den in einem ruhenden Zustand entzündeten Gemisch die Druckanstiegsrate durch die induzierten Turbulenzen deutlich ansteigt. Dies ist dadurch zu begründen, dass das noch unverbrannte Brenngas infolge der zufälligen Verwirbelungen schneller mit der Flamme in Berührung kommt als bei einer laminaren Ausbreitung. Hierdurch werden Verbrennungsgeschwindigkeiten erreicht, die über denen einer laminaren Verbrennung liegen. Der maximale Explosionsdruck ist von diesem Einfluss bei Explosionen in geschlossenen Behältern weniger betroffen.

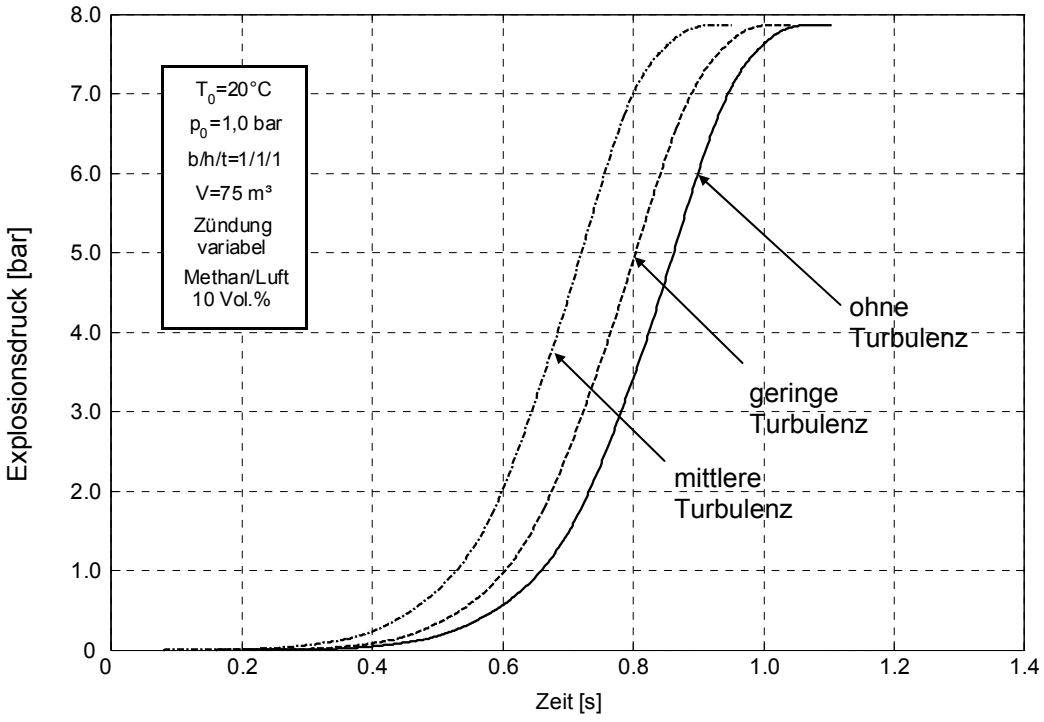


Bild 12: Einfluss von Turbulenzen auf die Druckentwicklung einer Gasexplosion

4.5 Druckentlastete Deflagrationen

4.5.1 Allgemeines

Der Begriff *Explosionsdruckentlastung* fasst alle Maßnahmen zusammen, die im Falle einer Explosion den ursprünglich geschlossenen Behälter in eine ungefährliche Richtung öffnen. Der maximale reduzierte Explosionsdruck p_{red} wird maßgeblich von der Größe und der Lage der Druckentlastungsfläche beeinflusst. Darüber hinaus haben die Parameter Raumvolumen, Raumgeometrie und Zündort bei druckentlasteten Deflagrationen einen unterschiedlicheren Einfluss auf den Druck-Zeit-Verlauf als bei Explosionen in geschlossenen Behältern.
Eine druckentlastete Explosion kann in drei Phasen unterteilt werden. In der ersten *Initialphase* ist die Druckentlastung noch nicht wirksam. In der zweiten *Öffnungsphase* wird die Druckentlastungsfläche zerstört und dadurch die Druckentlastungsöffnung freigegeben. In der dritten *Entlastungsphase* kann das bereits verbrannte oder noch unverbrannte Gas-Luft-Gemisch durch die Druckentlastungsöffnung entweichen. Zur ideali-sierten Darstellung der besonderen Zusammenhänge einer druckentlasteten Explosion wird im Folgenden ein kubischer Raum untersucht, der vollständig mit einem Gas-Luft-Gemisch gefüllt ist. Die Zündung des Verbrennungsvorganges erfolgt in der Mitte des Raumes. Die Druckentlastungsfläche ist zunächst verschlossen und besitzt im Verhältnis zu den Raumabmessungen einen großen Flächenanteil sowie einen niedrigen Berstdruck. Im Folgenden werden die drei Phasen einer druckentlasteten Deflagration dargestellt und erläutert.

4.5.2 Idealisierte Phasen der Druckentlastung

In Bild 13 sind eine idealisierte Darstellung des Druck-Zeit-Verlaufes sowie die Entwicklung der Flammenfront einer druckentlasteten Deflagration dargestellt. In der ersten *Initialphase* ist die Druckentlastungsfläche noch geschlossen. Es gelten die in Kapitel 4.4 beschriebenen Zusammenhänge für die Druckentwicklung in geschlossenen Behältern. Der zeitliche Druckanstieg ist in dieser Phase von der Verbrennungsgeschwindigkeit abhängig und somit von der Art und dem Mengenverhältnis des Gas-Luft-Gemisches. Damit der sich aufbauende Explosionsdruck gering gehalten werden kann, muss die Dauer der Initialphase, in der die Druckentlastungsfläche noch nicht geöffnet ist, minimiert werden. Dieses Ziel kann durch einen möglichst geringen Ansprechdruck der Druckentlastungsfläche erreicht werden.

In der zweiten *Öffnungsphase* stellt sich nach dem Freiwerden der Druckentlastungsfläche ein deutlicher Druckabfall ein. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass die Druckentlastungsfläche in Bezug zu den Raumabmessungen und den Zündbedingungen ausreichend dimensioniert ist. In diesem Fall ist der Übergang zwischen der geschlossenen Initialphase und der Öffnungsphase durch eine ausgeprägte Druckspitze gekennzeichnet. Besitzt die Druckentlastung eine nicht zu vernachlässigende Massenträgheit, dann ist für das vollständige Freiwerden der Druckentlastungsöffnung eine gewisse Zeit notwendig. Bis zu diesem Zeitpunkt kann sich der Druck mit einer reduzierten Rate weiter aufbauen. Zur Minimierung dieser ungünstigen Phase sollte die Masse der Druckentlastungsfläche so gering wie möglich sein. Im Folgenden sollen nur Fensterflächen als Berstelemente berücksichtigt werden, deren Massenträgheit nach Bauer (1992) durch das vollständige Zerspringen der Fensterscheiben vernachlässigt werden kann. Der Druck-Zeit-Verlauf der Öffnungsphase wird ebenfalls durch den Berstdruck der Druckentlastungsfläche beeinflusst. Bei einem geringen Berstdruck hat die Flammenfront in der frühen Öffnungsphase eine relativ geringe Oberfläche. Entsprechend dieser geringen Flammenfläche ist auch der zeitliche Druckanstieg gering und es stellt sich nach dem Öffnen der Druckentlastungsfläche eine deutliche Druckabnahme ein. Bei einem hohen Berstdruck der Druckentlastungsfläche hat sich die Flammenfläche zu dem Zeitpunkt der Öffnungsphase bereits relativ weit ausgebildet. In diesem Fall ist der zeitliche Druckanstieg bereits relativ hoch und demzufolge der durch das Freiwerden der Entlastungsfläche realisierbare Druckabfall gering.

In der dritten *Druckentlastungsphase* ist der Druck-Zeit-Verlauf von dem Verhältnis zwischen der Verbrennungsgeschwindigkeit und der Ausströmungsgeschwindigkeit abhängig. Unter dem Begriff der *Ausströmungsgeschwindigkeit* wird das Verbrennungsprodukt und das noch unverbrannte Gas-Luft-Gemisch subsumiert, das pro Zeiteinheit aus dem Raum entweicht. Sobald die Flammenfront die Druckentlastungsöffnung erreicht, beginnt das Ausströmen des bereits verbrannten Gases. Dies führt zu einem deutlichen Druckabfall, da das verbrannte Gas eine geringere Dichte besitzt und den Druckaufbau in dem Rauminnern maßgeblich beeinflusst. Der zeitliche Verlauf der Druckentlastungsphase ist hauptsächlich von der Größe und dem Berstdruck der Druckentlastungsfläche abhängig. Ist der Ansprechdruck der Druckentlastungsfläche so hoch, dass der Druckunterschied zwischen dem Innenraum und der Umgebung in der Öffnungsphase sehr groß ist, wird infolgedessen der Druck in dem Rauminnern rasant abnehmen. Die Bewegungsenergie des ausströmenden Gases kann dabei so groß sein, dass der Druck in dem Rauminnern kurzzeitig unter den atmosphärischen Druck abfällt. An-

schließend oszilliert der Druck um den Umgebungsdruck, die Amplitude der Oszillation reduziert sich mit der Zeit.

Durch ausreichend dimensionierte Druckentlastungsflächen kann der Explosionsdruck nahezu beliebig reduziert werden. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass sich die Form der Flammenfront nach dem Öffnen der Druckentlastung von der bis dahin kugelförmigen Form zu einer langgestreckten Form verändert. Infolge des ausströmenden Gases vergrößert sich die Flammenoberfläche, was zu einem erneuten Druckanstieg führen kann. Des Weiteren werden sich spätestens nach dem Öffnen der Druckentlastungsfläche Turbulenzen in dem Raum bilden, die ebenfalls zu einem Anstieg des Explosionsdruckes führen können. Solange die Verbrennungsgeschwindigkeit die Geschwindigkeit mit der Gas aus dem Raum ausströmen kann übersteigt, wird der Druck auch bei einer vollständig geöffneten Druckentlastungsfläche weiter zunehmen. Spätestens wenn die maximale Flammenoberfläche erreicht ist, wird der Druck-Zeit-Anstieg reduziert und der Druck ab diesem Zeitpunkt abfallen.

Flammeninstabilitäten infolge von Schalldruckwellen, die von der Wand reflektiert werden und auf die Flammenoberfläche treffen, können den Druckverlauf beeinflussen. Allerdings konnte bereits von Zalosh (1979) dargestellt werden, dass dieser Effekt nur bei Gasexplosionen in leeren Räumen auftritt. Da im Folgenden nur Räume untersucht werden, die einer gewöhnlichen Nutzung unterliegen und dementsprechend Mobiliar beinhalten, kann dieser Effekt vernachlässigt werden.

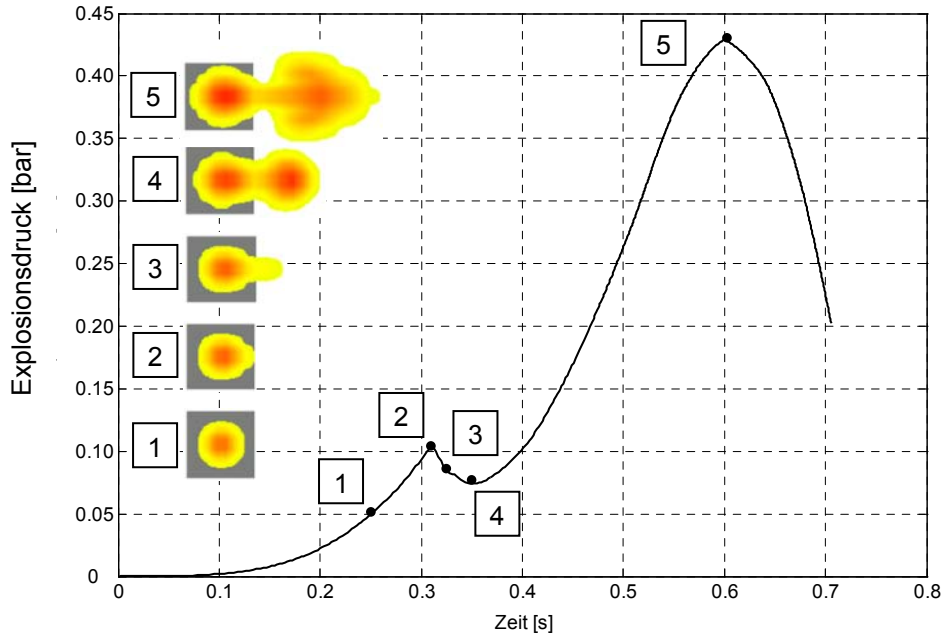


Bild 13: Idealisierter Verlauf einer druckentlasteten Deflagration

5 Untersuchungen zur Schadensbegrenzung bei Gasexplosionen im Hochbau

5.1 Vorbemerkungen

Der derzeitige Kenntnisstand auf dem Gebiet der Gasexplosionen ist für eine Sicherheitsanalyse nicht ausreichend. In dem Bereich des Bauwesens wurden zwar erste Versuche unternommen, die Auswirkungen von Gasexplosionen in Gebäuden auf ein unbedenkliches Maß zu begrenzen, allerdings stehen die für eine Zuverlässigkeitsanalyse erforderlichen statistischen Parameter eines derart außergewöhnlichen Lastfalles nicht zur Verfügung. Eine Gasexplosion in einem Gebäude verursacht eine zeitlich veränderliche Belastung auf die raumabschließenden Bauteile. Infolge einer dynamischen Analyse der belasteten Tragstruktur wird das Verhalten der Konstruktion bei der Einwirkung eines durch eine Explosion entstehenden Druck-Zeit-Verlaufes diskutiert. Aufbauend auf diesen Untersuchungen wird ein Vorschlag für eine statische Ersatzdruckbeanspruchung der zeitvarianten Belastung unterbreitet.
Der entstehende Explosionsdruck kann durch die Anordnung von Druckentlastungsflächen deutlich reduziert werden. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, die statische Ersatzdruckbelastung in Abhängigkeit von dem Raumvolumen und der Größe der Druckentlastungsfläche zu ermitteln. Mit Hilfe von numerischen Simulationsrechnungen wird der zufällige Charakter des entstehenden Explosionsdruckes erstmals in einer stochastischen Verteilung erfasst.
Die aus Gasexplosionen in geschlossenen Behältern resultierenden Druckbeanspruchungen können theoretisch Werte bis zu *8 bar* erreichen. Bereits bei einem Bruchteil dieser Beanspruchungen erreichen herkömmlich dimensionierte Tragwerke ihre Grenztragfähigkeit und versagen. Allerdings treten die maximalen Explosionsdrücke derart idealisierter Behälter unter tatsächlich vorhandenen Explosionsbedingungen in Gebäuden nicht auf. Die Explosionsbeanspruchungen druckentlasteter Gasexplosionen in Wohngebäuden liegen nach Bulson (1997) in den meisten Fällen unter *1 bar*.
Der Grund für diese deutlich geringere Beanspruchung ist, dass sich der Maximaldruck nur bei einer optimalen Gemischkonzentration sowie bei idealen Zünd- und Umgebungsbedingungen einstellen kann. Die Gemischkonzentration hängt von der Menge des unkontrolliert ausströmenden Gases, der Raumgröße und den Lüftungsverhältnissen ab. Des Weiteren besitzt jedes Gebäude natürliche Druckentlastungsflächen, aus denen die Explosionsgase entweichen können und somit den maximalen Explosionsdruck reduzieren. In dem Bereich des

Wohnungsbaus können Fenster, Türen und leichte Trennwände als Entlastungselemente fungieren, ohne die Tragfähigkeit der Baukonstruktion zu beeinflussen.
Der Ablauf einer druckentlasteten Explosion ist wesentlich komplexer als der einer Explosion in einem geschlossenen Behälter. Der sich aufbauende Druck ist abhängig von dem Verbrennungs- sowie von dem Entlastungsvorgang des Gas-Luft-Gemisches. Eine exakte Bestimmung der Druckentwicklung zukünftiger Explosionsereignisse ist nicht möglich, da aufgrund des zufälligen Charakters bestimmter Einflussparameter nicht alle Randbedingungen zu dem Zeitpunkt des Explosionsereignisses deterministisch festgelegt werden können. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens werden die Auswirkungen folgender Einflussparameter auf den Deflagrationsablauf eines druckentlasteten Raumes untersucht:

- Gasgemisch (stochastisch)
- Druckentlastung (deterministisch)
- Raumgeometrie (deterministisch)
- Zündort (stochastisch)
- Turbulenzen (stochastisch)

Der Ansprechdruck und die Größe der Druckentlastungsfläche sowie die Raumgeometrie können für die im Rahmen dieser Untersuchung erforderliche Genauigkeit als deterministische Parameter berücksichtigt werden. Allerdings ist eine genaue Aussage über die zu dem Zeitpunkt der Explosion vorhandene Gemischzusammensetzung, den Ort der Entzündung sowie die durch Hindernisse oder Lüftung induzierten Turbulenzen nicht möglich, weshalb diese Parameter als stochastische Größen berücksichtigt werden müssen.
Für die zu ermittelnde Ersatzdruckbeanspruchung ist die Berücksichtigung der stochastischen Einflussparameter von besonderer Bedeutung. Aufbauend auf umfangreichen Studien über den Einfluss der an der Druckentstehung beteiligten Parameter werden mit Hilfe numerischer Simulationsrechnungen Grenzbereiche definiert, deren Druckentwicklungen nur zu einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit unterschritten werden *(Best-Case-Szenario)* und nur zu einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit überschritten werden *(Worst-Case-Szenario)*. Durch diese Vorgehensweise wird es erstmals möglich, den entstehenden Explosionsdruck im Rahmen der derzeit zur Verfügung stehenden Möglichkeiten durch die Wahl geeigneter Fraktilwerte in einer stochastischen Verteilung zu erfassen. Alle Untersuchungen werden für eine Raumtemperatur von $T_0=20° C$ sowie einen Umgebungsdruck von $p_0=1,0 bar$ durchgeführt.

5.2 Statischer Ersatzdruck

Eine Gasexplosion in einem Gebäude verursacht eine zeitlich veränderliche Belastung auf die raumabschließenden Bauteile. Derartige Einwirkungen, die sich innerhalb einer kurzen Zeit verändern, werden im Allgemeinen als dynamische Einwirkungen bezeichnet. In dem Bereich des Bauwesens wird angestrebt, die dynamische Einwirkung zur Vereinfachung des Berechnungsaufwandes mittels statischer Ersatzlasten zu modellieren. Die statische Ersatzlast muss dabei einerseits die zeitliche Charakteristik der dynamischen Einwirkung und andererseits die Tragwerksreaktion ausreichend genau erfassen.
Die Tragwerksantwort unter einer zeitabhängigen Belastung kann vereinfacht durch ein Einmassenmodell beschrieben werden. Es wird dabei von der Konzentration der Masse des Tragelementes in dem Schwerpunkt des Elementes, von der Bewegungsfähigkeit des Elementes in nur eine Richtung und von dessen idealelastischem Verformungsverhalten ausgegangen. Die wesentlichsten Eigenschaften des in Bild 14 dargestellten Einmassenmodells können durch die Masse m, eine lineare Feder mit der Federsteifigkeit *k*, einen viskosen Dämpfer mit der Viskosität *c*, eine zeitabhängige Belastung *F(t)* sowie eine zeitabhängige Verschiebung *u(t)* beschrieben werden.

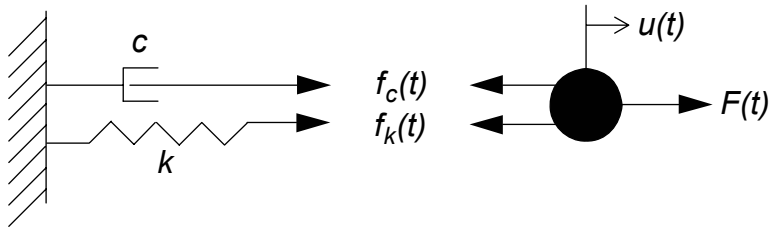


Bild 14: Idealisiertes Einmassenmodell

Die Summe aller auf die Masse einwirkenden Kräfte ist gleich der Masse multipliziert mit der Beschleunigung:

$$-f_k(t) - f_c(t) + F(t) = m \cdot \ddot{u}(t) \tag{11}$$

Hieraus ergibt sich die allgemeine Bewegungsgleichung des Einmassenmodells:

$$F(t) = m \cdot \ddot{u}(t) + c \cdot \dot{u}(t) + k \cdot u(t) \tag{12}$$

Es wird angenommen, dass die Masse, die Viskosität und die Federsteifigkeit konstant sind und somit eine lineare Differentialgleichung 2. Ordnung vorliegt. In diesem Fall gilt für die Belastung *F(t)* sowie die Verschiebung *u(t)* das Superpositionsprinzip. Zur Bestimmung der unbekannten Verschiebung *u(t)* sind die Anfangsbedingungen u_0 und $\dot{u}_0$ vorzugeben. Entsprechend der Annahme konstanter Systemparameter ist das Superpositionsprinzip auch für die Anfangsbedingungen u_0 und $\dot{u}_0$ gültig.

Zu Beginn soll die freie, ungedämpfte Schwingung betrachtet werden. Dem Einmassenmodell wird hierbei keine Belastung aufgezwungen, die Bewegung resultiert alleine aus den Anfangsbedingungen. In diesem Fall kann Gleichung 16 vereinfacht dargestellt werden:

$$0 = \ddot{u}(t) + \omega^2 \cdot u(t) \tag{13}$$

mit der Kreiseigenfrequenz:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{14}$$

Die Lösungen der Differentialgleichungen lauten:

$$u(t) = K_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) + K_2 \cdot \cos(\omega \cdot t) \tag{15}$$

$$\dot{u}(t) = K_1 \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) - K_2 \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t) \tag{16}$$

Die Integrationskonstanten *K1* und *K2* können mit Hilfe der Anfangsbedingungen:

$$u_0 = u(0) = K_2 \tag{17}$$

$$\dot{u}_0 = \dot{u}(0) = K_1 \cdot \omega \tag{18}$$

ermittelt werden. Die Lösung der freien, ungedämpften Schwingung kann somit durch folgende Gleichungen beschrieben werden:

$$u(t) = \frac{\dot{u}_0}{\omega} \cdot \sin(\omega \cdot t) + u_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) \tag{19}$$

$$\dot{u}(t) = \dot{u}_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) - u_0 \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t) \tag{20}$$

In Bild 15 ist die freie, ungedämpfte Schwingung eines Wandelementes exemplarisch dargestellt. Insgesamt liegt eine harmonisch periodische Schwingung vor. Die Wendepunkte sowie die Verschiebungsnullpunkte der Schwingungen liegen jeweils bei einem ganzen Vielfachen von $\pi/(2\omega)$. Ein bestimmter Systemzustand, gegeben durch eine Verschiebung und eine Geschwindigkeit zu einem beliebigen Zeitpunkt, stellt sich nach einer Zeit T erneut ein. Die Eigenschwingzeit T gibt somit an, wie viel Zeit ein unbelastetes und frei schwingendes System für einen vollständigen Schwingungsdurchlauf benötigt. Die Eigenschwingzeit kann durch folgende Gleichung bestimmt werden:

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega} \tag{21}$$

Neben der Eigenschwingzeit wird auch häufig deren reziproker Wert zur Charakterisierung des Schwingungsverhaltens von Systemen verwendet. Die Eigenfrequenz gibt an, wie viel vollständige Schwingungsdurchläufe in einer Zeiteinheit stattfinden und kann durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} \tag{22}$$

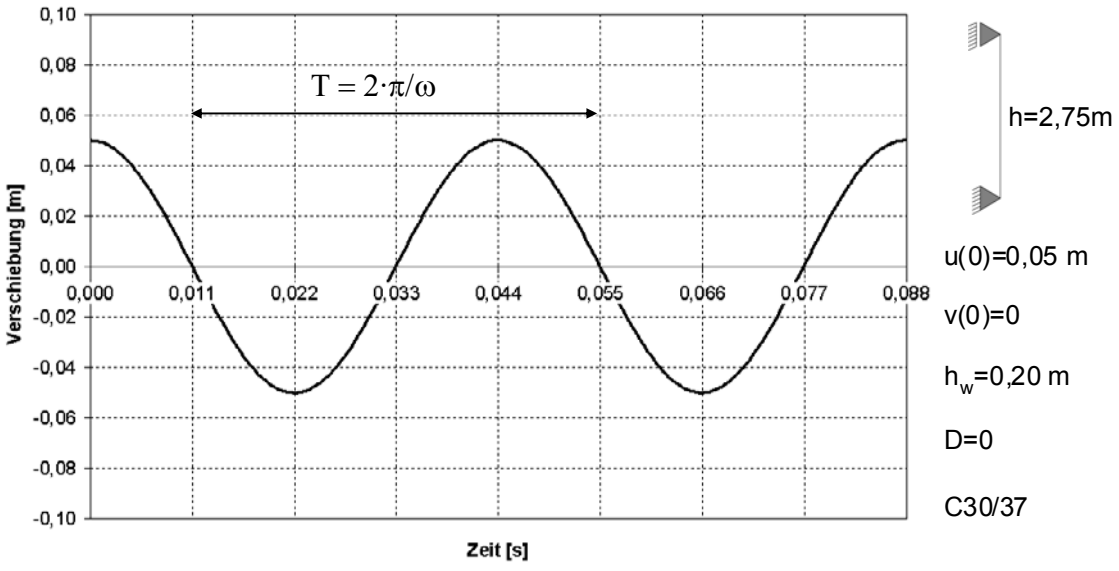


Bild 15: Freie und ungedämpfte Schwingung eines Wandelementes

Der idealisierte Fall der ungedämpften Schwingung liefert für praktische Anwendungsfälle keine realistischen Ergebnisse. Bei einer kurzzeitigen Einwirkung wird das System zunächst

in Schwingungen versetzt. Aufgrund der Energiedissipation wird diese Bewegungsenergie mit zunehmender Zeit abnehmen und das System schließlich vollständig zur Ruhe kommen. Dieses Phänomen wird durch den viskosen Dämpfer in dem Einmassenmodell berücksichtigt. Die freie, gedämpfte Schwingung kann entsprechend der allgemeinen Bewegungsgleichung des Einmassenmodells wie folgt beschrieben werden:

$$0 = \ddot{u}(t) + \frac{c}{m} \cdot \dot{u}(t) + \omega^2 \cdot u(t) \tag{23}$$

In Analogie zu der freien, ungedämpften Schwingung kann die Differentialgleichung mit Hilfe der Anfangsbedingungen $u_0 = u(0)$ und $\dot{u}_0 = \dot{u}(0)$ ermittelt werden:

$$u(t) = e^{-(\delta \cdot t)} \cdot \left(u_0 \cdot \cos(\psi \cdot t) + \frac{\dot{u}_0 + \delta \cdot u_0}{\psi} \cdot \sin(\psi \cdot t) \right) \tag{24}$$

Zur Charakterisierung der Dämpfungseigenschaften werden drei voneinander abhängige Parameter eingeführt.

Diese sind der dimensionslose Dämpfungsgrad:

$$D = \frac{c}{2 \cdot m \cdot \omega} \tag{25}$$

die gedämpfte Eigenkreisfrequenz:

$$\psi = \omega \cdot \sqrt{1 - D^2} \tag{26}$$

und der Dämpfungsparameter:

$$\delta = \omega \cdot D = \frac{c}{2 \cdot m} \tag{27}$$

Zwischen diesen Parametern besteht der Zusammenhang:

$$\omega = \sqrt{\psi^2 + \delta^2} \tag{28}$$

Bei der Wahl einer der genannten Parameter ist die Dämpfung des Systems vollständig beschrieben. Nach Müller & Keintzel (1984) ist der Dämpfungsgrad D in erster Linie von der Bauweise abhängig. Einen Überblick über verschiedene Dämpfungsgrade, die aus Versuchen ermittelt wurden, liefert Tabelle 11. In Bild 16 ist die freie gedämpfte Schwingung eines Wandelementes mit einem Dämpfungsgrad *D=0,02* im Vergleich zu der ungedämpften

Schwingung des gleichen Wandelementes dargestellt. Aus dem Bild wird deutlich, dass sich durch die geringe Dämpfung die Eigenschwingzeit und somit auch die Eigenfrequenz des Systems nur marginal verändert. Die geringe Dämpfung führt lediglich dazu, dass Energie dissipiert und die maximale Auslenkung mit jeder Schwingung reduziert wird, bis die Bewegung des Systems vollständig zum Stillstand gekommen ist.

Bauweise	**elastischer Bereich**	**plastischer Bereich**
Stahlbeton	1-2 %	7 %
Spannbeton	0,8 %	5 %
Mauerwerk	1-2 %	7 %

Tabelle 11: Dämpfungsgrade verschiedener Bauweisen [Müller & Keintzel (1984)]

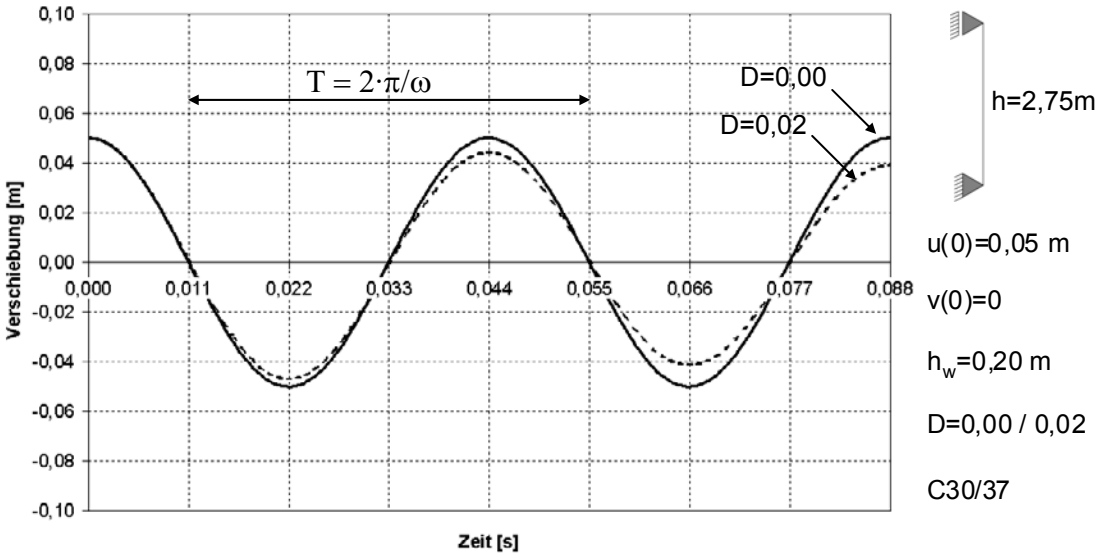


Bild 16: Freie Schwingung eines Wandelementes mit unterschiedlichem Dämpfungsgrad

Zur Beurteilung des dynamischen Verhaltens einer Struktur kann die Eigenschwingzeit beziehungsweise die Eigenfrequenz des Systems verwendet werden. Die Eigenschwingzeit eines Tragelementes ist abhängig von dem statischen System, den Bauteilabmessungen und dem verwendeten Material. Im Folgenden werden zunächst die Parameter hinsichtlich ihres Einflusses auf die Eigenschwingzeit untersucht. Im Anschluss hierzu wird für Stahlbetonwände ein Grenzbereich für typische Eigenschwingzeiten definiert.

Als statisches System wird ein Einfeldträger untersucht, dessen Einspannwirkung der Auflager zwischen einer frei drehbaren und einer fest eingespannten Lagerung liegt. Das statische System mit eingespannten Auflagern verhält sich steifer und führt somit zu einer größeren Federsteifigkeit *k*. Entsprechend Gleichung 18 erhöht sich hierdurch die Kreiseigenfrequenz ω und somit ist die Eigenschwingzeit *T* bei einem beidseitig eingespannten System geringer als bei einem frei drehbaren System. Eine Vergrößerung der Wandhöhe führt dazu, dass sich das System bei einer Belastung weicher verhält. Die Federsteifigkeit *k* ist dementsprechend geringer und die Eigenschwingzeit *T* nimmt mit größer werdender Bauteilhöhe zu. Eine Vergrößerung der Wanddicke führt zu einer Erhöhung der Biegesteifigkeit und dementsprechend zu einer größeren Kreiseigenfrequenz, die Eigenschwingzeit verringert sich.
Im Folgenden werden die Einflussparameter entsprechend vorab definierter Grenzbereiche derart festgelegt, dass Grenzwerte für die Eigenschwingzeiten typischer Wandelemente angegeben werden können. Die untersuchten Grenzbereiche sowie die minimalen und maximalen Eigenschwingzeiten sind Tabelle 12 zu entnehmen. Für typische Wandelemente liegt die Eigenschwingzeit in einem Bereich von *0,01* bis *0,06 Sekunden* und dementsprechend die Eigenfrequenz in einem Bereich von *17-100 Hertz*. Für besondere kure Wände (l= 2,30 m) aus Mauerwerk sind unter ungünstigen Bedingungen (hohe Festigkeit und geringe Masse und starre Einspannung) auch Eigenfrequenzen von ca. *200 Hertz* möglich. Diese hohen Werte sind jedoch eher Sonderfälle.

Parameter	**Grenzbereiche**	**T_{min}**	**T_{max}**
Einspannung	starr - frei drehbar	starr	frei drehbar
Rohdichte	25 kN/m³	25 kN/m²	25 kN/m³
Wandhöhe	2,50-2,75 m	2,50 m	2,75 m
Wanddicke	0,15-0,25 m	0,25 m	0,15 m
Dämpfungsgrad	0,01-0,07	0,01	0,07
Eigenschwingzeit	**0,01-0,06 s**	**0,01 s**	**0,06 s**
Eigenfrequenz	**17-100 Hz**	**100 Hz**	**17 Hz**

Tabelle 12: Abgrenzung des Schwingungsverhaltens typischer Wandelemente

Zur Charakterisierung des Schwingungsverhaltens von Systemen war es bisher ausreichend, die freie Schwingung mit Anfangsbedingungen zu betrachten. Damit eine Aussage über die

Tragwerksantwort unter einer zeitvarianten Belastung *F(t)* getroffen werden kann ist es notwendig, die Bewegungsgleichungen entsprechend zu erweitern. Die Belastung *F(t)* kann als eine Summe von aufeinanderfolgenden Impulsen angesehen werden. Dies geschieht, indem der Zeitbereich der Belastung in kleine Zeitintervalle Δt unterteilt und innerhalb der Intervalle die Belastung mit dem Wert $(F_i + F_{i+1}) / 2$ als konstant angenommen wird. Somit ist es möglich, von dem Ausgangszustand des Intervalls t_i den Endzustand des Intervalls t_{i+1} zu bestimmen. Die Verschiebung und die Geschwindigkeit am Ende des Intervalls können nach folgenden Gleichungen ermittelt werden:

$$u_{i+1} = e^{-(D \cdot \omega \cdot \Delta t)} \cdot \left[\left(u_i - \frac{F_i + F_{i+1}}{2 \cdot k} \right) \cdot \cos(\psi \cdot \Delta t) + \ldots \right.$$
$$\left. \ldots + \frac{1}{\psi} \left(\dot{u}_i + D \cdot \omega \cdot \left(\dot{u}_i - \frac{F_i + F_{i+1}}{2 \cdot k} \right) \right) \cdot \sin(\psi \cdot \Delta t) \right] + \frac{F_i + F_{i+1}}{2 \cdot k} \tag{29}$$

$$\dot{u}_{i+1} = e^{-(D \cdot \omega \cdot \Delta t)} \cdot \left[\dot{u}_i \cdot \cos(\psi \cdot \Delta t) - \frac{1}{\psi} (\omega^2 \cdot \left(u_i - \frac{F_i + F_{i+1}}{2 \cdot k} \right) + \ldots \right.$$
$$\left. \ldots + D \cdot \omega \cdot \dot{u}_i) \cdot \sin(\psi \cdot \Delta t) \right. \tag{30}$$

Die genaue Herleitung dieser Übergangsgleichungen kann Weber (2002) entnommen werden. Die Lösung strebt gegen das analytisch exakte Ergebnis, wenn das Zeitintervall Δt hinreichend diskretisiert wird.

Im Folgenden wird die dynamische Belastung durch einen Vergleich der dynamischen mit der statischen Tragwerksantwort in eine quasi-statische Belastung transformiert. Bei der Vernachlässigung aller zeitlichen Einflüsse vereinfacht sich Gleichung 16 zu:

$$F_{statisch} = k \cdot u_{statisch} \tag{31}$$

Als statische Lastgröße $F_{statisch}$ wird der Maximalwert der zeitlichen Belastung *max[F(t)]* gewählt. Das Verhältnis von dynamischer zu statischer Lösung kann dann als dynamischer Lastfaktor eingeführt werden:

$$DLF(t) = \frac{u(t)}{u_{statisch}} \tag{32}$$

Mit Hilfe des numerischen Simulationsprogrammes *FLACS* ist es möglich, den Druck-Zeit-Verlauf einer Explosion zu beliebigen Zeitpunkten zu bestimmen. Entsprechend der vorab dargestellten Vorgehensweise kann die zeitliche Belastung in kleine Intervalle diskretisiert

und die Übergangsbedingungen zwischen den Intervallen mit Hilfe von Gleichung 33 und Gleichung 34 formuliert werden. Auf diese Weise lässt sich der in Bild 17 dargestellte dynamische Lastfaktor für den zeitlichen Druckverlauf entsprechend Bild 13 für ein typisches Wandelement mit der Eigenschwingzeit *T=0,04* Sekunden ermitteln.

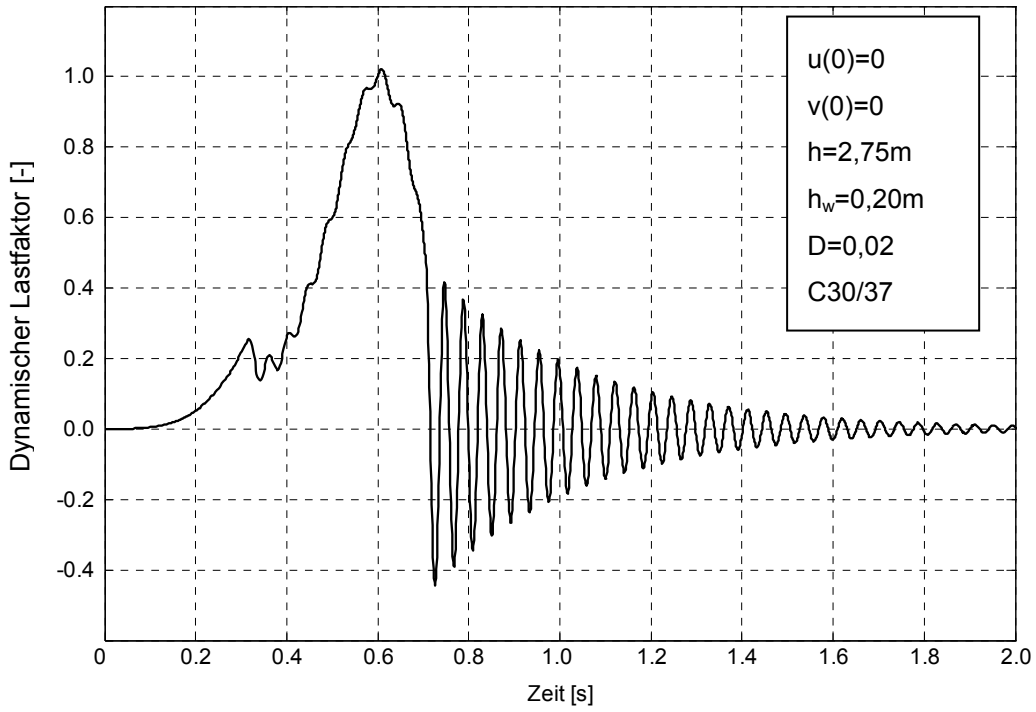


Bild 17: Dynamischer Lastfaktor einer Gasexplosion für eine Außenwand

Die Tragwerksantwort ist abhängig von dem Verhältnis zwischen der Belastungsdauer T_f und der Eigenschwingzeit des Tragwerks T. Damit eine allgemeingültige Aussage über die Tragwerksantwort bei einer internen Gasexplosion getroffen werden kann, ist es sinnvoll das Abstimmungsverhältnis η einzuführen:

$$\eta = \frac{T_f}{T} \tag{33}$$

Auf diese Weise ist es möglich, den dynamischen Lastfaktor für den typischen Lastverlauf einer internen Gasexplosion in Abhängigkeit von dem Verhältnis η zu bestimmen. In Bild 18 ist der dynamische Lastfaktor in Abhängigkeit von dem Abstimmungsverhältnis dargestellt. Der Verlauf entspricht in sehr guter Näherung der von Häußler-Combe (2003) angegebenen analytischen Lösung für eine dreieckförmige Belastung. In Abhängigkeit von dem Verhältnis der Explosionsdauer zu der Eigenschwingzeit des belasteten Bauteils können drei markante

Bereiche unterschieden werden. Ist die Dauer der Belastung deutlich geringer als die Eigenschwingzeit des belasteten Bauteiles *(η<0,6)*, wird der Druck größtenteils durch die Trägheit des Bauteils absorbiert. Das System reagiert auf die dynamische Belastung weniger stark als bei einer statischen Belastung mit entsprechender Lastgröße. Bei Lasteinwirkungsdauern in der Größenordnung der Eigenschwingzeit *(0,6<η<3,5)* entsteht aufgrund der dynamischen Einwirkung eine deutlich größere Tragwerksreaktion als bei einer zeitinvarianten Belastung. Bei längeren Lasteinwirkungsdauern *(η>6,0)* ergeben sich quasi-statische Verhältnisse mit der Annäherung des dynamischen Lastfaktors an den Wert *DLF=1*.

Die übliche Belastungsdauer einer druckentlasteten Deflagration liegt in einem Bereich von etwa *0,4* bis *1,0 Sekunde*. Dies ergibt unter Berücksichtigung der in Tabelle 12 dargestellten Eigenschwingzeiten typischer Wandelemente von *0,01* bis *0,06* Sekunden ein Abstimmungsverhältnis von $\eta \geq 7$ *bis* 6. Bei einer internen Gasexplosion handelt es sich somit um eine quasistatische Belastung, da die Belastungsdauer deutlich größer ist als die Eigenschwingzeit des belasteten Elementes. Der aus dem Explosionsdruckverlauf resultierende Maximaldruck kann in guter Näherung als statisch gleichwertige Ersatzlast angesetzt werden. Diese Aussage wird durch die Ausführungen von Astbury & West (1970) und Dragosavic (1973) bestätigt.

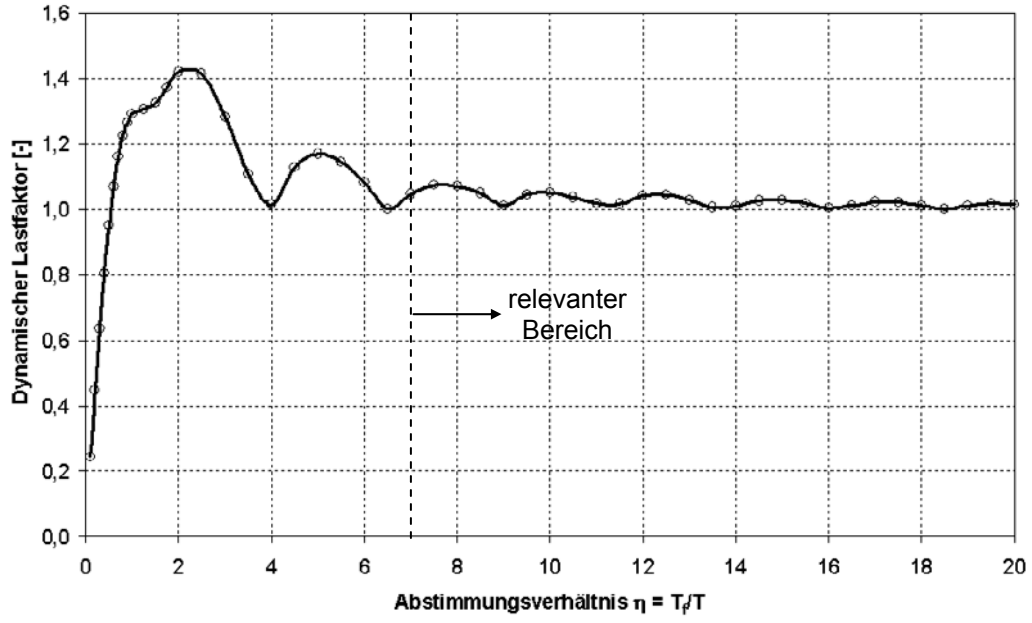


Bild 18: Dynamischer Lastfaktor in Abhängigkeit von dem Abstimmungsverhältnis

5.3 Stochastische Verteilung der Ersatzdruckbelastung

5.3.1 Grundlagen der numerischen Simulation

Die Computertechnologie hat in den letzten Jahren die Entwicklung moderner Anwendungsprogramme ermöglicht, mit deren Hilfe komplizierte Strömungsvorgänge simuliert werden können. Im Rahmen dieser Untersuchungen wird der Hydrocode *FLACS (FLame ACceleration Simulator)* zur Simulation des Verbrennungsvorganges druckentlasteter Gasexplosionen verwendet. Ein wesentlicher Unterschied zwischen klassischen Finite-Element-Programmen und Hydrocodes besteht in den verschiedenen Grundgleichungen und deren unterschiedlicher numerischer Behandlung. Hydrocodes sind in der Lage, die Navier-Stokes-Gleichungen für ein Strömungsfeld in komplexen Geometrien zu lösen und basieren somit auf der simultanen Lösung der Erhaltungsgleichung für Masse, Impuls und Energie, während Finite-Element-Programme auf der Lösung des Gleichgewichtes beruhen. Die numerischen Strömungssimulatoren sind gekoppelt mit Modulen zur Beschreibung der Verbrennungsgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der Turbulenzabhängigkeit der Verbrennung. Derartige Programme sind in der Lage, die Wechselwirkungen zwischen dem Strömungsfeld, der Turbulenz und der Verbrennungsgeschwindigkeit sowie die Interaktion zwischen Flamme, Druckentlastungsfläche und Hindernissen zu erfassen. Der in dieser Arbeit verwendete Hydrocode *FLACS* erlaubt keine Untersuchung der Auswirkungen in dem Bereich der Festkörpermechanik. Die Interaktion der Druckwelle mit der Struktur kann somit nicht berücksichtigt werden. Die Bauteile werden als starre Hindernisse modelliert. Aus den Simulationen können jedoch die Einwirkungen auf die Bauwerksteile ermittelt und für die Tragwerksantwort aufbereitet werden.
Die von dem Hydrocode *FLACS* verwendeten physikalischen Modelle zur Beschreibung der Strömungsvorgänge führen auf gekoppelte, nichtlineare, partielle Differentialgleichungssysteme, so dass im Allgemeinen keine geschlossenen analytischen Lösungen angegeben werden können. Das interessierende Strömungsgebiet wird deshalb diskretisiert, das heißt mit einem Rechennetz überzogen. Die kontinuierlich formulierten Differentialgleichungen können auf die diskreten Orte eines Rechengitters übertragen und numerisch gelöst werden. Damit die Differentialgleichungen auf einem Rechennetz in algebraische Gleichungen überführt werden können, stehen verschiedene Diskretisierungstechniken zur Verfügung. Bei dem von dem Hydrocode *FLACS* verwendeten Finite-Volumen-Verfahren wird jedem Knoten des Rechennetzes ein Bilanzelement zugeordnet. In diese Kontrollvolumina werden die zu lösenden Differentialgleichungen integriert und mit Hilfe der benachbarten Knotenwerte dis-

kretisiert. Da der exakte Lösungsverlauf nicht bekannt ist, sondern über Polynomansätze angenähert werden muss, verbleibt bei der Auswertung der Differentialgleichung mit Hilfe der so berechneten Lösung ein Residuum. Die Finite-Volumen-Methode verfolgt das Ziel, das Residuum im Mittel verschwinden zu lassen.

Der Verbrennungsvorgang wird mit Hilfe eines Flammenmodells modelliert, welches an ein zusätzliches Modell für die Ermittlung der Verbrennungsgeschwindigkeit als eine Funktion des Gasgemisches, der Temperatur, des Druckes und der Turbulenz in den Reaktionspartnern gekoppelt ist. Das verwendete Verbrennungsmodell basiert auf einer quasi-laminaren Verbrennung und einem additiven turbulenten Verbrennungskonzept. Die verwendeten Modelle basieren in erster Linie auf empirischen Formulierungen und wurden während der Programmentwicklung in umfangreichen Großversuchen verifiziert [Bjerketvedt & Wingerden (2000)].

Eine Näherungslösung mit Hilfe von Finiten Methoden strebt nur gegen die analytische Lösung des zugrundegelegten mathematischen Problems, wenn die Elementabmessungen und die Zeitschritte hinreichend genau diskretisiert werden. Da in dem vorliegenden Fall keine analytischen Lösungen ermittelt werden können, lässt sich der Fehler von dem exakten Ergebnis nur über hierarchische Netzfeinheitsstudien ermitteln. Das Netz muss derart diskretisiert werden, dass sich bei einer weiteren Verfeinerung die Systemantwort praktisch nicht mehr ändert. Gleichzeitig muss jedoch berücksichtigt werden, dass sich die Rechenzeit mit zunehmender Netzdiskretisierung erhöht. Es muss also möglichst ein Optimum zwischen Rechengenauigkeit und Rechenzeit gefunden werden.

Nach den Simulationen stehen die Systemcharakteristika an jedem Punkt des für die numerische Beschreibung definierten Gitternetzes zur Verfügung. Mit Hilfe einer grafischen Oberfläche lässt sich der Fortgang der Explosion durch Strömungsfelder, Verbrennungsfronten oder Druckverläufe visualisieren.

Die Leistungsfähigkeit verschiedener auf dem Markt befindlicher Programme wurde von Mercx (1995) untersucht. Hierbei konnten insbesondere für das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Programm sehr gute Übereinstimmungen zwischen berechneten und gemessenen Werten festgestellt werden. Im Rahmen einer vergleichenden Studie zwischen verschiedenen numerischen Simulationsprogrammen im Auftrag der British Gas (1999) wurde *FLACS* ebenfalls als fortschrittlichstes Programm zur Simulation von Gasexplosionen bewertet. Der Programmcode von *FLACS* berücksichtigt nach Bjerketvedt & Wingerden (2000) den aktuellen Kenntnisstand auf dem Gebiet der Explosionstheorie.

5.3.2 Definition der Randbedingungen

5.3.2.1 Gasgemisch

Auf die Parameter der Gaszusammensetzung und der Gasverteilung in dem Raumvolumen wurde bereits in Kapitel 4 hingewiesen. In der Realität strömt das Gas unplanmäßig aus und bildet mit der in dem Raum vorhandenen Luft ein Gemisch, dessen Konzentration und Verteilung von der Raumgröße, der Gasart, der Art des Ausströmens und den Lüftungsbedingungen abhängig ist.

Der Grad der Befüllung ist ein entscheidender Parameter für den entstehenden Explosionsdruck. In der Realität wird das Gas-Luft-Gemisch den Raum zu dem Zeitpunkt der Entzündung nur zu einer geringen Wahrscheinlichkeit vollständig ausfüllen. Allerdings kann bei einer druckentlasteten Gasexplosion der entstehende Explosionsdruck in einem teilweise gefüllten Raum nach Pappas (1983) ähnliche Maximalwerte erreichen wie in einem vollständig gefüllten Raum. Dies ist dadurch zu begründen, dass die Druckentwicklung einer druckentlasteten Explosion im Wesentlichen von der Größe der Flammenoberfläche abhängig ist und diese durch die Druckentlastung stark verzerrt wird. Die Flammenoberfläche in einem teilweise gefüllten Raum kann nach Cubbage & Marshall (1973) ähnliche Ausmaße erreichen wie die Flammenoberfläche eines im Ausgangszustand komplett gefüllten Raumes. Als ungünstigster Ausgangszustand werden im Folgenden nur Räume untersucht, die vollständig und homogen mit einem explosionsfähigen Gas-Luft-Gemisch gefüllt sind.

Bereits in Kapitel 2.2 wurde dargestellt, dass Methan *(CH_4)* mit einem Anteil von bis zu *99 Vol.%* der Hauptbestandteil von Erdgas ist und weitere Kohlenwasserstoffe wie Ethan *(C_2H_6)*, Propan *(C_3H_8)*, Butan *(C_4H_{10})* und Pentan *(C_5H_{12})* in unterschiedlicher Konzentration enthalten sein können. Aufgrund des dominierenden Anteils von Methan und den streuenden Anteilen der übrigen Kohlenwasserstoffe wird im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich Methan zur Modellierung des Verbrennungsprozesses verwendet. Diese Vorgehensweise liefert aufgrund des geringen Anteils der übrigen Kohlenwasserstoffe für die im Rahmen dieser Untersuchungen geforderte Genauigkeit gute Ergebnisse. Darüber hinaus wurden nach Bjerketvedt & Wingerden (2000) insbesondere für die mit Methan durchgeführten Simulationsrechnungen von FLACS umfangreiche Kalibrierungstests durchgeführt, weshalb mit einem Methangas-Luft-Gemisch realistische Simulationsergebnisse erzielt werden können.

In den grundlegenden Ausführungen zur Explosionsproblematik wurde erläutert, dass die Gemischkonzentration von Methan und Luft in einem Bereich von *4,0* bis *17,0 Vol.%* liegen

muss, damit eine sich selbständig fortpflanzende Verbrennung stattfinden kann. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass der maximale Explosionsdruck sowie die maximale Verbrennungsgeschwindigkeit eines Methan-Luft-Gemisches etwas oberhalb der stöchiometrischen Gemischzusammensetzung von *9,5 Vol.%* am größten sind. Der maximale Explosionsdruck sowie die maximalen Verbrennungsgeschwindigkeiten eines Methan-Luft-Gemisches konnten mit Hilfe der numerischen Simulationen bei einer Gemischkonzentration von ungefähr *10 Vol.%* ermittelt werden. Diese Kenngrößen werden durch die in Bartknecht (1978) und Kinney & Graham (1985) dargestellten Versuchsergebnisse bestätigt.
Aufgrund dieser Zusammenhänge wird als *Worst-Case-Szenario* ein Methangas-Luft-Gemisch mit einer Gemischkonzentration von *10 Vol.%* gewählt, das den Druckentlastungsraum vollständig ausfüllt.

5.3.2.2 Druckentlastung

Der Begriff *Explosionsdruckentlastung* umfasst im weiteren Sinne alle Maßnahmen, die dazu dienen, den ursprünglich geschlossenen Raum in eine ungefährliche Richtung zu öffnen. Diese konstruktive Schutzmaßnahme verhindert den Aufbau eines unzulässig hohen Explosionsdruckes in dem Raum durch die rechtzeitige Freigabe definierter Öffnungen. Der Druck-Zeit-Verlauf einer druckentlasteten Gasexplosion wird von der Größe sowie von dem Ansprechdruck und der Masse der Druckentlastungsfläche beeinflusst. In diesem Kapitel werden ausschließlich die Parameter für den Ansprechdruck und die Masse der Druckentlastungsfläche festgelegt. Die Größe der Druckentlastungsfläche wird bei der Ermittlung der statistischen Momente der Explosionsdruckbeanspruchung in Kapitel 5.3 berücksichtigt.
Die Druckentwicklung in dem Raum wird von dem Zeitpunkt bestimmt, ab dem der zunächst geschlossene Raum geöffnet wird und ist aus diesem Grund von dem Ansprechdruck der Druckentlastungsfläche abhängig. Bei einem geringen Ansprechdruck der Druckentlastungsfläche hat die Flammenfront in der frühen Öffnungsphase eine relativ geringe Oberfläche und es stellt sich nach dem Freiwerden einer im Verhältnis zu dem Raumvolumen großen Druckentlastungsfläche eine deutliche Druckabnahme in dem Raum ein. Dagegen hat sich die Reaktionszone der Flammenfront bei einem hohen Ansprechdruck der Druckentlastungsfläche in der Öffnungsphase bereits relativ weit ausgebildet und der Druckabfall durch das Freiwerden der Druckentlastungsfläche ist deutlich geringer. Der Einfluss des Ansprechdruckes bei ge-

ring dimensionierten Druckentlastungsflächen ist analog zu dem vorgenannten Fall, allerdings steigt der Explosionsdruck nach dem Freiwerden der Druckentlastungsfläche in den meisten Fällen weiter an.

In diesen Untersuchungen sollen Tür- und Fensterflächen als Druckentlastungselemente angesetzt werden. Der Ansprechdruck einer Tür wird im Wesentlichen durch die Befestigungstechnik an dem Türrahmen beeinflusst. Der Ansprechdruck einer Fensterfläche ist abhängig von der Glasart (Flachglas-Einzelscheiben, Isolierglas-Doppelverglasung, Einscheibensicherheitsglas), den Abmessungen (Flächenmaß, Seitenverhältnis), der Glasdicke und den Lagerungsbedingungen. In dem Bereich des üblichen Wohnungsbaues liegt der Ansprechdruck von Tür- und Fensterflächen nach Broeckmann & Schwing (1998) sowie Bjerketvedt & Wingerden (2000) in einem Bereich von *20-70 mbar* und nach Höppner & Lösch (1993) in einem Bereich von *22-66 mbar*. Der Ansprechdruck der Druckentlastungsfläche wird für das *Worst-Case-Szenario* einheitlich zu *70 mbar* festgelegt, da sich durch diese Festlegung für die im Wohnungsbau üblichen Verhältnisse die maximalen Druckbeanspruchungen auf die raumabschließenden Bauteile ergeben.

Bei dem Einsatz massenträger Elemente wird der Entlastungsquerschnitt verzögert freigegeben, wobei der zeitliche Druckabfall von der Massenträgheit der Druckentlastungselemente abhängig ist. Die in dieser Arbeit als Druckentlastungsfläche angesetzten Tür- und Fensterelemente besitzen eine relativ geringe Masse, weshalb in Anlehnung an Bauer (1992) und Dragosavic (1973) in guter Näherung von dem Grenzfall einer trägheitsfreien Entlastung ausgegangen werden kann. Der Entlastungsquerschnitt wird ab dem Erreichen des Ansprechdruckes sofort freigegeben.

5.3.2.3 Raumgeometrie

Der Einfluss der Raumgeometrie auf den entstehenden Explosionsdruck wurde bereits in Kapitel 4.4 diskutiert. Bei einer Explosion in einem geschlossenen Behälter konnte dargestellt werden, dass die Explosion in einem kubischen Behälter bei einer Zündung in der Behältermitte am heftigsten abläuft. Allerdings kann diese Aussage nicht allgemeingültig auf eine druckentlastete Explosion übertragen werden, da zusätzlich zu der Verbrennungsgeschwindigkeit die zeitliche Druckentlastung in dem Raum zu berücksichtigen ist. Die zeitliche Druckentlastung wird maßgeblich von der Rate bestimmt, mit der die Verbrennungsprodukte

aus dem Raum entweichen. Aus diesem Grund können sich längliche Behälter, bei denen die Druckentlastungsfläche an der Stirnseite eines Behälters angeordnet ist, ungünstiger auf den Druckentlastungsprozess auswirken als kubische Behälter mit gleichem Volumen und gleicher Größe der Druckentlastungsfläche.

Der Einfluss der Raumgeometrie und des Raumvolumens auf den Druckentlastungsvorgang wird bei der Ermittlung der statistischen Momente der Explosionsdruckbeanspruchung in Kapitel 5.3 berücksichtigt. Die in Bild 19 dargestellten Geometrien der Druckentlastungsräume werden derart festgelegt, dass sich für den Wohnungsbau übliche Abmessungen ergeben. Die Raumhöhe *H* wird bei allen Versuchen einheitlich zu *2,75 m* angesetzt. Die Grundseite *B* wird mit den Abmessungen *1,5 m*, *2,5 m* und *5,0 m* und die Seitenverhältnisse der Grundseiten *B:T* mit den Verhältnissen *1:1*, *1:2* und *1:3* berücksichtigt. Entsprechend diesen Randbedingungen werden die folgenden Untersuchungen mit den in Tabelle 13 dargestellten Abmessungen und Geometrien der Druckentlastungsräume durchgeführt.

Bild 19: Geometrie eines Druckentlastungsraumes

Raum	Höhe H	Breite B	Tiefe T	B:T	Volumen
G1	2,75 m	1,5 m	1,5 m	1:1	6,2 m³
G2	2,75 m	1,5 m	3,0 m	1:2	12,4 m³
G3	2,75 m	1,5 m	4,5 m	1:3	18,6 m³
G4	2,75 m	2,5 m	2,5 m	1:1	17,2 m³
G5	2,75 m	2,5 m	5,0 m	1:2	34,4 m³
G6	2,75 m	2,5 m	7,5 m	1:3	51,6 m³
G7	2,75 m	5,0 m	5,0 m	1:1	68,8 m³
G8	2,75 m	5,0 m	10,0 m	1:2	137,5 m³
G9	2,75 m	5,0 m	15,0 m	1:3	206,3 m³

Tabelle 13: Abmessungen der Druckentlastungsräume

5.3.2.4 Entzündung

Die Art und die Stärke der Initialzündung haben auf den maximalen Explosionsdruck sowie den maximalen zeitlichen Druckanstieg nach Bartknecht (1993) nur einen geringen Einfluss. Reimer (2002) macht darauf aufmerksam, dass für die im Wohnungsbau möglichen Fälle die Entzündung bereits durch einen Funken, eine offene Flamme, eine heiße Oberfläche oder durch elektrostatische Aufladung ausgelöst werden kann. Im Folgenden wird vorausgesetzt, dass eine geeignete lokale Energiequelle zur Einleitung einer sich selbständig fortpflanzenden Verbrennungsreaktion vorhanden ist, ohne auf die Art und die Stärke der Energiequelle näher einzugehen.

In vielen Fällen erreicht der Druck-Zeit-Verlauf sein Maximum zu dem Zeitpunkt, an dem die Flammenfront die größte Flammenoberfläche besitzt. Bei einer Entzündung in dem Zentrum eines Raumes ist die Flammenoberfläche in einem länglichen Raum ab dem ersten Kontakt mit einer Umfassungswand stets kleiner als in einem kubischen Raum mit gleichem Volumen. Dementsprechend wird der zeitliche Druckanstieg in dem länglichen Raum langsamer ablaufen als in dem kubischen Raum. Bereits in dem vorangegangenen Kapitel konnte dargestellt werden, dass die Druckentwicklung einer druckentlasteten Deflagration durch die Interaktion zwischen der Verbrennungsgeschwindigkeit und der Druckentlastungs-geschwindigkeit beeinflusst wird. In diesem Zusammenhang ist es von Bedeutung, zu welchem Zeitpunkt das bereits verbrannte Gas-Luft-Gemisch aus dem Raum entweichen kann, da dieses maßgeblich die Druckentwicklung in dem Raum beeinflusst.

In Bezug auf den Ort der Druckentlastungsfläche ist der Zündort ein wesentlicher Einflussfaktor für die Druckentwicklung, da sich der entstehende Explosionsdruck sensitiv auf eine Variation des Zündortes auswirkt. Bei einer Zündung in der Nähe der Druckentlastungsfläche kann das verbrannte Gas-Luft-Gemisch sofort aus dem Raum entweichen, so dass der in dem Raum entstehende Druckaufbau gering bleibt. Im Umkehrschluss führt eine Zündung möglichst weit von der Druckentlastungsfläche entfernt zu deutlich größeren Druckbeanspruchungen. Der ungünstigste Zündpunkt einer druckentlasteten Deflagration in einem länglichen Raum ist dann gegeben, wenn die Druckentlastungsfläche an der Stirnseite des Raumes angeordnet ist und der Zündpunkt in der von der Druckentlastungsfläche entfernten Hälfte des Raume liegt. Die genaue Lage des ungünstigsten Zündpunktes ergibt sich für die speziellen

Geometrien aus der Interaktion zwischen Verbrennungsgeschwindigkeit und Druckentlastungsgeschwindigkeit und wird bei der Ermittlung der statistischen Momente der Explosionsdruckbelastung in Kapitel 5.3 untersucht.

5.3.2.5 Turbulenzen

Turbulenzen können durch eine Verwirbelung des Gas-Luft-Gemisches oder durch Hindernisse in dem Raum entstehen. In den von Dragosavic (1973) dargestellten Versuchen, die Grundlage für die Bemessungsgleichungen in DIN 1055-9 (2003) waren, wurden die Turbulenzen durch einen leistungsstarken Ventilator erzeugt, der das Gemisch vor der Entzündung mehrere Minuten lang durchmischte. Ein derartiges Szenario ist für die im Wohnungsbau üblichen Verhältnisse nicht realistisch und es kann davon ausgegangen werden, dass eine natürliche Verwirbelung im Vergleich zu den durch Hindernisse in dem Raum erzeugten Turbulenzen vernachlässigbar gering ist. Aus diesem Grund wird bei den anstehenden Untersuchungen nur die Turbulenzerzeugung infolge von Hindernissen berücksichtigt.
Eine genaue Berücksichtigung der Turbulenzbildung zu dem Zeitpunkt der Explosion ist nicht möglich, da diese von dem Ausfüllungsgrad und von der Anordnung der in dem Raum vorhandenen Hindernisse abhängig ist. Aus diesem Grund ist es sinnvoller, die Turbulenzen mit einem fiktiven Hindernisbild zu erzeugen und die Ergebnisse hinsichtlich ihrer praktischen Bedeutung zu bewerten. Im Rahmen dieser Untersuchungen werden die in Tabelle 14 dargestellten Hindernisse für die Turbulenzerzeugung berücksichtigt. Als Hindernisse bei *Modell2* bis *Modell4* werden rechteckige Streben gewählt, da die Turbulenzbildung bei runden Hindernissen nach Bjerketvedt & Wingerden (2000) geringer ist als bei eckigen Hindernissen mit gleichem Ausfüllungsgrad. Damit die Ergebnisse hinsichtlich ihrer praktischen Bedeutung bewertet werden können, werden diese mit der Druckentwicklung bei dem hindernisfreien *Modell1* sowie mit dem *Modell5*, welches ein für den Wohnungsbau typisches Einrichtungsbild darstellt, verglichen.

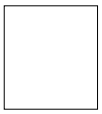
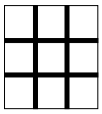
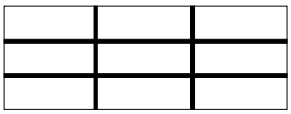
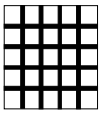
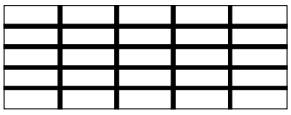
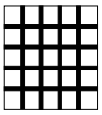
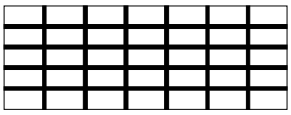
Bezeichnung	Ansicht	Seitenansicht
Modell1		
Modell2		
Modell3		
Modell4		
Modell5		

Tabelle 14: Hindernisse zur Erzeugung von Turbulenzen

5.3.3 Statistische Momente

5.3.3.1 Allgemeines Lastmodell

In diesem Kapitel wird der stochastische Charakter der Explosionsdruckbelastung in Form seiner ersten beiden statistischen Momente erfasst. Eine genaue Berücksichtigung der stochastischen Eigenschaften des Explosionsdruckes ist nur möglich, wenn ein geeignetes analytisches Modell zur Beschreibung des Druck-Zeit-Verlaufes einer Explosion existiert oder wenn stochastische Finite-Element-Programme verwendet werden können. Allerdings steht eine geschlossene analytische Lösung zur rechnerischen Bestimmung der Explosionsdruckbelastung unter Berücksichtigung sämtlicher für die stochastische Analyse relevanten Einflussfaktoren ebenso wenig zur Verfügung wie stochastische Finite-Element-Programme aus dem Bereich der Hydrocodes.

In dieser Arbeit wird der stochastische Charakter der Explosionsdruckbelastung aus Grenzbereichen entwickelt und die notwendigen Annahmen hinsichtlich der Eintretenswahrscheinlichkeit dieser Grenzbereiche durch Sensitivitätsstudien verifiziert. Die Grundlage für diesen Lösungsweg bildet die Annahme, dass sich der Explosionsdruck aus einer Vielzahl von unabhängigen Einflussgrößen mit stochastischem Charakter zusammensetzt. Entsprechend dieser Annahme kann in Anlehnung an den zentralen Grenzwertsatz der Statistik davon ausgegangen werden, dass die Streuungen der Explosions-druckbelastung in guter Näherung durch eine Normalverteilung approximiert werden können. Aufbauend auf den Darstellungen in Kapitel 5.3.2 wird ein *Worst-Case-Szenario* definiert, das nur zu einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit überschritten wird. Hinsichtlich des Gasgemisches sowie des Ansprechdruckes der Druckentlastungsfläche wurden die notwendigen Randbedingungen bereits definiert. Als ungünstigster Ausgangszustand werden Räume berücksichtigt, die vollständig und homogen mit einem explosionsfähigen Methangas-Luft-Gemisch mit einer Gemischkonzentration von *10 Vol.%* gefüllt sind. Der Ansprechdruck der Druckentlastungsfläche wird für das *Worst-Case-Szenario* einheitlich zu *70 mbar* festgelegt. Eine Aussage hinsichtlich der ungünstigsten Behältergeometrie in Verbindung mit dem ungünstigsten Zündpunkt konnte in Kapitel 5.3.2 nur tendenziell getroffen werden. Im Folgenden werden diese Parameter bei der Entwicklung einer analytischen Beziehung zur Modellierung des *Worst-Case-Szenarios* berücksichtigt.

In der Praxis wird bei der empirischen Ermittlung von Bemessungsgleichungen versucht, den Einfluss unterschiedlich großer Behältervolumen durch die Einführung eines Druckentlastungskoeffizienten zu eliminieren. Dieser Druckentlastungskoeffizient soll die Beziehung zwischen der Größe der Druckentlastungsfläche und dem Behältervolumen berücksichtigen und für gleich große Druckentlastungskoeffizienten den gleichen maximalen Explosionsdruck liefern. Allerdings führen unterschiedliche Randbedingungen bei der Versuchsdurchführung und hier insbesondere eine Variation der Behältergeometrie zu unterschiedlichen Definitionen des Druckentlastungskoeffizienten. In DIN 1055-9 (2003) wird das Verhältnis von der Größe der Druckentlastungsfläche zu dem Raumvolumen A_V/V als Druckentlastungs-koeffizient angegeben. Cubbage & Simmonds (1955) empfehlen, das Verhältnis der Wandfläche, in der die Druckentlastungsfläche angeordnet ist, zu der Größe der Druckentlastungsfläche A_W/A_V als Druckentlastungskoeffizient anzusetzen. Zalosh (1979) schlägt das Verhältnis $(A_V/V)^{2/3}$ als geeignete Näherung für den Druckentlastungskoeffizienten vor.

Als erster Schritt werden die in Kapitel 5.3.2.3 definierten Raumgeometrien in Verbindung mit dem Zündort hinsichtlich ihres Einflusses auf den maximalen Explosionsdruck in dem

Raum untersucht. Hierfür wird zunächst auf die Bildung von Turbulenzen in dem Raum verzichtet, da in erster Linie die Wahl des *Worst-Case-Raumes* in Verbindung mit einer geeigneten Wahl eines Druckentlastungskoeffizienten durchgeführt werden soll. In Bild 20 sind die aus den numerischen Simulationen resultierenden maximalen Druckbeanspruchungen dargestellt. Der Zündort wurde in jedem Raum solange variiert, bis sich die ungünstigste Zündposition in Form der maximalen Druckentwicklung ergab. Als allgemeine Tendenz kann festgestellt werden, dass sich bei den Räumen mit einem Seitenverhältnis von *B:T=1:3* höhere Druckbeanspruchungen ergeben als bei den Räumen mit einem Seitenverhältnis von *B:T=1:2*. Die Zündung muss in einem Bereich des von der Druckentlastungsfläche entferntesten Raumdrittels stattfinden, um zu der maximalen Druckbeanspruchung zu führen. Beide Feststellungen können mit der Interaktion zwischen der Verbrennungsgeschwindigkeit und der Druckentlastungsgeschwindigkeit begründet werden, auf die bereits in Kapitel 5.3.2 eingegangen wurde. Der maximale Explosionsdruck kann durch die Anordnung von Druckentlastungsflächen deutlich reduziert werden. Durch einen Vergleich verschiedener in der Praxis üblicher Druckentlastungskoeffizienten konnte festgestellt werden, dass die Simulationsergebnisse und somit die für den Wohnungsbau typischen maximalen Druckentwicklungen in guter Näherung durch den in DIN 1055-9 (2003) verwendeten Druckentlastungskoeffizienten A_V/V dargestellt werden können. Der Raum *G6* entsprechend Tabelle 13 führt trotz der Einführung des Druckentlastungskoeffizienten zu geringfügig höheren Beanspruchungen, weshalb dieser Raum im Folgenden als *Worst-Case-Raum* für die Bildung der Turbulenzen berücksichtigt wird.

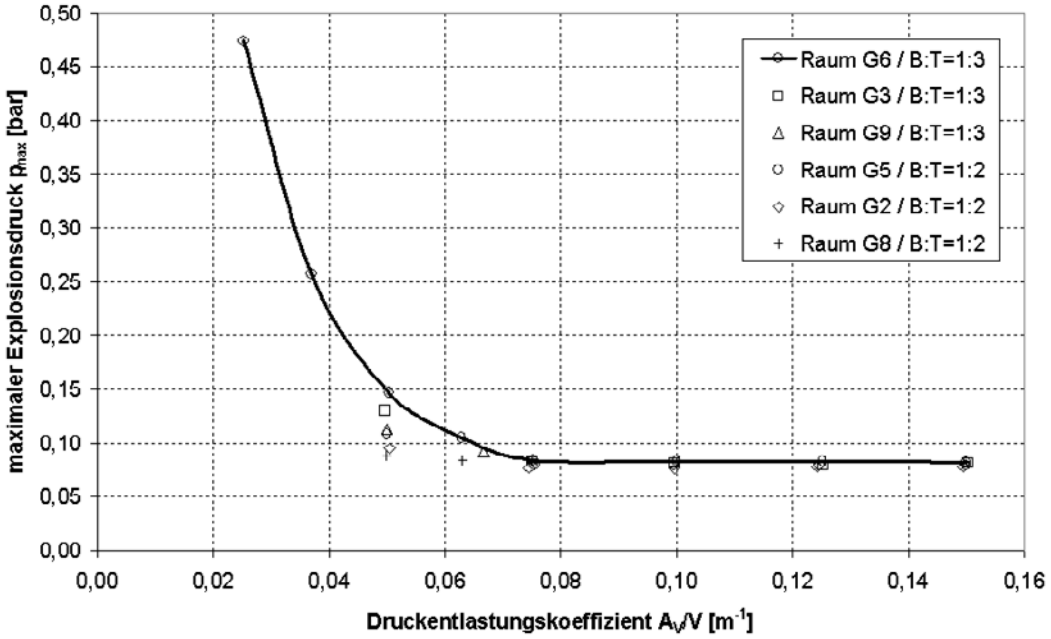


Bild 20: Einfluss der Druckentlastungsfläche auf den maximalen Explosionsdruck

Der Einfluss der Turbulenzen infolge der in Tabelle 14 definierten Hindernisse auf die Druckentwicklung ist in Bild 21 in Abhängigkeit von dem Druckentlastungskoeffizienten A_V/V dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Druckentwicklung infolge der additiven Turbulenzen im Vergleich zu einem hindernisfreien Raum um ein Vielfaches vergrößert wird. Allerdings wurde bereits in Kapitel 5.3.2.5 dargestellt, dass die für die Turbulenzerzeugung verwendeten fiktiven Hindernisse hinsichtlich ihrer praktischen Relevanz bewertet werden müssen. Das *Modell5*, das eine für den Wohnungsbau typische Einrichtung darstellt, erreicht im Vergleich zu dem hindernisfreien *Modell1* eine Drucksteigerung von 60-120 Prozent. Zalosh (1979) berichtet von entsprechenden Versuchen, bei denen die Druckentwicklung einer Methan-Luft-Explosion in einem leeren Raum durch Hindernisse um 75 Prozent gesteigert werden konnte. Aus diesem Vergleich wird deutlich, dass die durch das *Modell5* erzeugte Drucksteigerung infolge der Turbulenzbildung realistische Ergebnisse liefert. Rabbash (1969) gibt die durch Hindernisse in Form von üblichen Einrichtungsgegenständen in einem Raum maximal erreichbare Drucksteigerung mit 500 Prozent an. Diese Angabe entspricht in dem für den Wohnungsbau relevanten Druckentlastungsbereich von $A_V / V \geq 0{,}05$ m^{-1} der Druckentwicklung von *Modell2*, weshalb dieses für die Bildung des *Worst-Case-Szenarios* verwendet wird. Durch die zusätzliche Anordnung von Hindernissen wie bei *Modell3* und *Modell4* kann die Druckentwicklung zwar deutlich über die gewählte Beanspruchung hinaus ansteigen, aller-

dings liefern diese Modelle im Vergleich zu den für den Wohnungsbau typischen Gegebenheiten sowie zu den Versuchsergebnissen von Zalosh (1979) und Rabbash (1969) keine realistischen Ergebnisse.

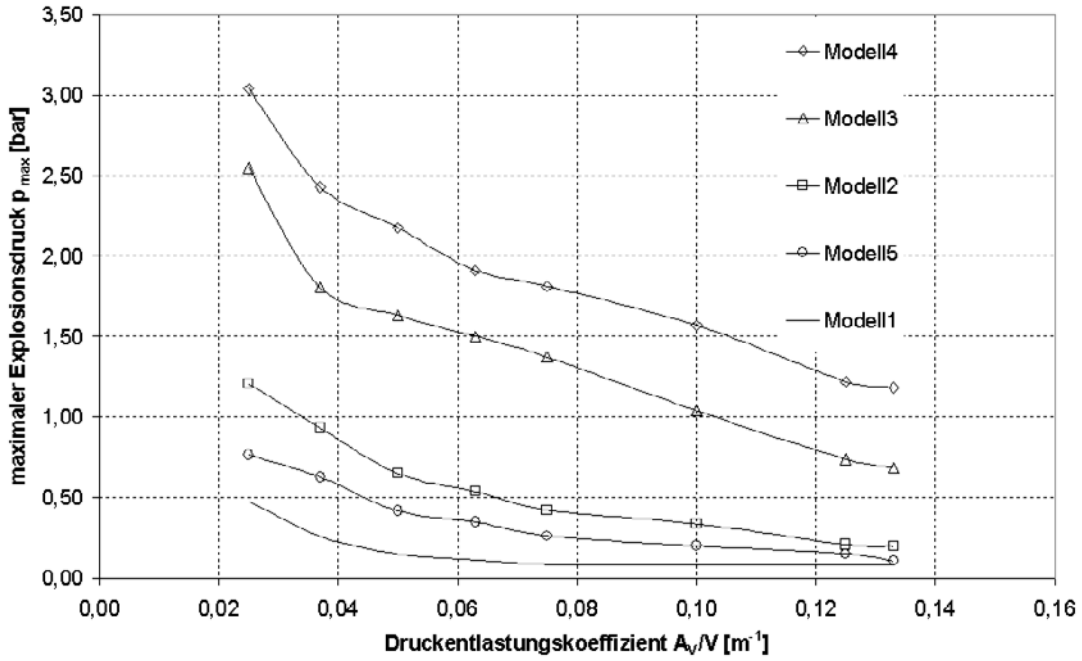


Bild 21: Einfluss der Turbulenzbildung auf die Druckentwicklung

Bei der Definition des *Best-Case-Szenarios* wird davon ausgegangen, dass der Verbrennungsprozess unter Randbedingungen abläuft, bei denen eine starke Druckentwicklung nicht möglich ist. Derartige Randbedingungen sind zum Beispiel eine Gemischzusammensetzung in dem Bereich der Explosionsgrenzen, eine Zündung in der Nähe der Druckentlastungsfläche sowie eine Druckentlastungsfläche mit einem sehr geringen Ansprechdruck. Für das *Best-Case-Szenario* wird im Folgenden die konservative Annahme getroffen, dass sich der Druck in dem Raum bis zu dem Ansprechdruck der Druckentlastungsfläche von *20 mbar* (vgl. Kapitel 5.3.2.2) aufbaut und nach dem Öffnen der Druckentlastungsfläche auf den Umgebungsdruck abfällt.

Im Folgenden werden aus den in Bild 22 dargestellten Grenzbereichen der Explosionsdruckbeanspruchungen die statistischen Momente abgeleitet. Die analytische Beziehung des *Worst-Case-Szenarios* wird mit Hilfe einer nichtlinearen Regressionsanalyse durch eine Minimierung der Residuen ermittelt. Da dieser Beziehung keine genaue Auftretenswahrscheinlichkeit zugeordnet werden kann, wird das *Worst-Case-Szenario* zunächst als *q%-Fraktil* der Explosionsdruckbeanspruchung eingeführt:

$$p_{EX,q\%} = \frac{0,024}{(A_V/V)^{1,10}} \quad [\text{bar}] \tag{34}$$

Der Erwartungswert wird ebenfalls mit Hilfe einer nichtlinearen Regressionsanalyse aus dem Mittelwert der Grenzbereiche berechnet und kann durch folgende analytische Beziehung dargestellt werden:

$$E(P_{EX}) = \frac{0,015}{(A_V/V)^{1,05}} \quad [\text{bar}] \tag{35}$$

Der Variationskoeffizient der Explosionsdruckbelastung kann in Abhängigkeit von dem Druckentlastungskoeffizienten A_V/V sowie von dem Fraktilenfaktor dargestellt werden:

$$V(P_{EX}) = \left(\frac{p_{EX,q\%}}{E(P_{EX})} - 1\right)/k = \left(\frac{1,6}{(A_V/V)^{0,05}} - 1\right)/k \quad [-] \tag{36}$$

Mithilfe von Gleichung 39 und Gleichung 40 ist es möglich, den Erwartungswert und die Varianz der Explosionsdruckbelastung in Abhängigkeit des Druckentlastungskoeffizienten sowie des Fraktilenfaktors zu bestimmen. Der stochastische Charakter der Explosionsdruckbeanspruchung ist bei einer geeigneten Wahl des Fraktilenfaktors vollständig beschrieben.
In Bild 22 sind zusätzlich zu dem eigenen Ansatz die Ersatzdruckbelastungen für eine Gasexplosion nach DIN 1055-9 (2003) dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass der Erwartungswert des eigene Ansatzes in allen Bereichen des Druckentlastungskoeffizienten zu höheren Explosionsdruckbeanspruchungen liefert als die Bemessungswerte genmäß DIN 1055-9 (2003). Dies ist dadurch zu begründen, dass die empirisch ermittelten Bemessungsgleichungen der Norm nach Dragosavic (1973) aus Versuchen in einem Behälter mit einem näherungsweise quadratischen Grundriss sowie einer Zündung in der Behältermitte ermittelt wurden. Aus den eigenen Untersuchungen konnte jedoch erkannt werden, dass sich durch längliche Behälter sowie eine Zündung an dem von der Druckentlastungsfläche entferntesten Raumdrittel deutlich größere Druckbeanspruchungen ergeben. Aufgrund des von Dragosavic (1973) gewählten Versuchsaufbaues liefern die Bemessungsgleichungen in DIN 1055-9 (2003) somit für Räume, die von einem quadratischen Grundriss abweichen, unsichere Ergebnisse. Der eigene Ansatz ist für alle für den Wohnungsbau typischen Randbedingungen gültig und ermöglicht es erstmals, den stochastischen Charakter der Explosionsdruckbeanspruchung vollständig zu beschreiben.

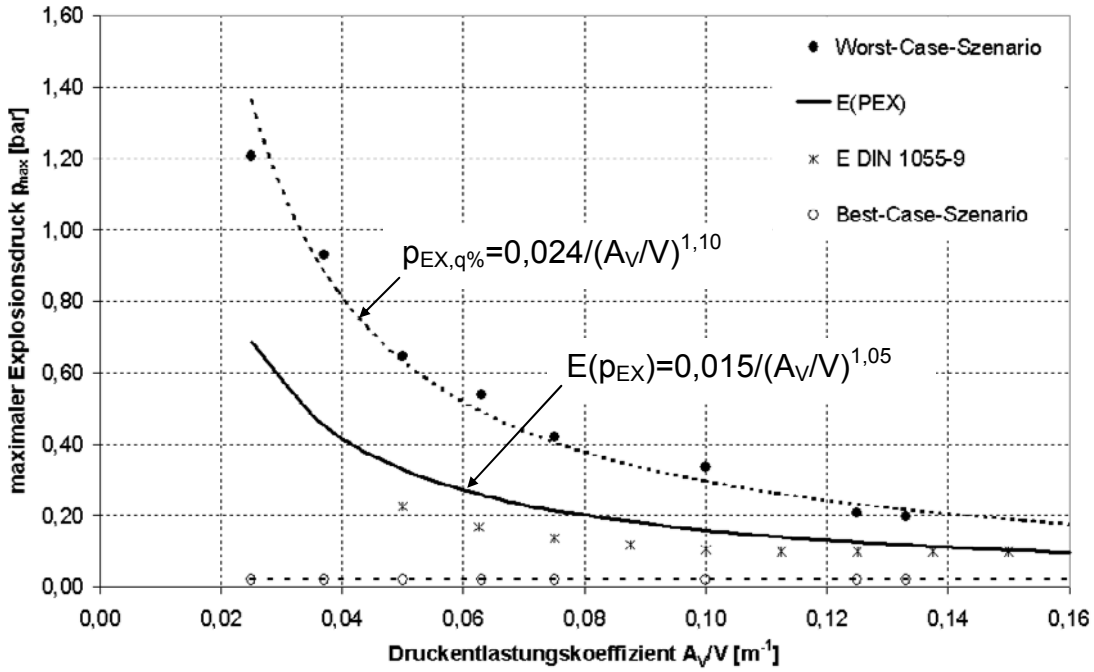


Bild 22: Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Explosionsdruckbelastung nach DIN 1055-9

5.3.3.2 Spezifiziertes Lastmodell

Der Variationskoeffizient und somit auch die Streuung der Explosionsdruckbelastung wurden in Kapitel 5.3.3.1 in Abhängigkeit von dem Fraktilenfaktor *k* angegeben, der die Festlegung einer als zulässig erachteten Auftretenswahrscheinlichkeit für das Worst-Case-Szenario ermöglicht. Das Worst-Case-Szenario setzt sich aus einer Vielzahl von Einflussparametern zusammen, die in ihrer ungünstigsten und somit zu dem maximalen Explosionsdruck führenden Konstellation berücksichtigt worden sind. Bei einer Abweichung des Zündortes, der Gemischkonzentration oder bei einem geringeren Anteil an Hindernissen in dem Raum reduziert sich der entstehende Explosionsdruck im Vergleich zu dieser Konstellation deutlich. Eine exakte Bestimmung der Auftretenswahrscheinlichkeit des Worst-Case-Szenarios ist nicht möglich, allerdings kann als untere Grenze zum Beispiel die Wahrscheinlichkeit angesetzt werden, dass die Entzündung an dem ungünstigsten Zündort stattfinden muss.
Anhand der numerischen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass sich der maximale Explosionsdruck ab einer Verlagerung des Zündortes um 10 cm bereits deutlich reduziert. Zur Bestimmung der Auftretenswahrscheinlichkeit des ungünstigsten Zündpunktes wird die Annahme getroffen, dass die Zündung in einem Volumen von *0,001 m³* zu einer identischen

Druckentwicklung führt. Dies bedeutet, dass der tatsächliche Zündpunkt in dem Raum mit den geringsten Abmessungen von *h=2,5 m*, *b=1,5 m* und *t=4,5 m (b:t=1:3)* nur mit einer Wahrscheinlichkeit von $6 \cdot 10^{-5}$ in dem Bereich des Worst-Case-Zündpunktes liegt, wobei diese Auftretenswahrscheinlichkeit einem Fraktilenfaktor von *k=3,85* entspricht. Im Folgenden wird der Fraktilenfaktor einheitlich mit der konservativen Abschätzung von *k=4,0* angesetzt.
Durch die Festlegung des Fraktilenfaktors ist der Variationskoeffizient der Explosionsdruckbelastung mit Hilfe von Gleichung 40 in Abhängigkeit von dem Druckentlastungskoeffizienten eindeutig beschrieben:

$$V(P_{EX}) = 0{,}4 / (A_V / V)^{0{,}05} - 0{,}25 \quad [-] \tag{37}$$

Entsprechend den für den Wohnungsbau üblichen Grenzbereichen des Druckentlastungskoeffizienten ergibt sich bei dem minimalen Druckentlastungskoeffizienten von $A_V/V=0{,}05\ m^{-1}$ ein Variationskoeffizient der Explosionsdruckbelastung von $V(P_{EX})=0{,}215$ und bei dem maximalen Druckentlastungskoeffizienten von $A_V/V=0{,}20\ m^{-1}$ ein Variationskoeffizient von $V(P_{EX})=0{,}184$.

5.4 Bestimmung des Bemessungswertes des Gasexplosionsdruckes

Infolge außergewöhnlicher Einwirkungen können an Gebäuden verheerende Schäden entstehen. Eine generelle Berücksichtigung der außergewöhnlichen Einwirkungen in der Tragwerksplanung würde jedoch zu überdimensionierten Tragwerken führen, weshalb die geringe Auftretenswahrscheinlichkeit derartiger Einwirkungen unter Beachtung wirtschaftlicher Faktoren zu berücksichtigen ist. Im Folgenden wird aufbauend auf den in Kapitel 2.3 vorgestellten Auftretenswahrscheinlichkeiten von Gasexplosionen in Wohngebäuden eine zulässige Versagenswahrscheinlichkeit für diesen außergewöhnlichen Lastfall abgeleitet. Damit kann dann der modifizierte Zuverlässigkeitsindex β bestimmt und letztlich der gesuchte Bemessungswert der Gasexplosionsdruckeinwirkung berechnet werden.
Der Lastfall Gasexplosion ist ein sehr selten auftretendes Ereignis und wird aufgrund seiner Auftretenswahrscheinlichkeit in die Kategorie der außergewöhnlichen Einwirkungen eingestuft. Aufbauend auf den statistischen Daten der *Deutschen Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V.* sowie der bereits in Kapitel 2.3 geschätzten Anzahl von Gasanschlüssen in

Deutschland kann die mittlere jährliche Auftretensrate eines Explosionsereignisses in einer Wohneinheit mit Gasanschluss angegeben werden:

$$P(EX) = 1{,}6 \cdot 10^{-5} \tag{38}$$

Rüsch & Rackwitz (1973) geben für die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Explosionsereignisses $1{,}0 \cdot 10^{-5}$ pro Jahr an. In Leyendecker & Ellingwood (1977) wird eine Auftretenswahrscheinlichkeit von $1{,}8 \cdot 10^{-5}$ vorgeschlagen. In dem Anhang von DIN V ENV 1991-2-7 (2000) wird für den Fall, dass eine Abschätzung der Konsequenz sowie der wirtschaftlichen Optimierung nicht möglich ist, eine Auftretenswahrscheinlichkeit von $1{,}0 \cdot 10^{-4}$ pro Jahr für das Auftreten einer außergewöhnlichen Einwirkung angesetzt.
Die zulässige Versagenswahrscheinlichkeit gemäß DIN 1055-100 für einen Bezugszeitraum von einem Jahr lautet:

$$p_f = 1{,}3 \cdot 10^{-6} \tag{39}$$

Unter Verwendung von Gleichung 42 und 43 erhält man mithilfe wahrscheinlichkeitstheoretischer Überlegungen die (bedingt) zulässige Versagenswahrscheinlichkeit eines Bauteils unter der Bedingung, dass ein Explosionsereignis im Bezugszeitraum (von einem Jahr) eintritt, zu:

$$P(V|EX) = \frac{P(V)}{P(EX)} = \frac{1{,}3 \cdot 10^{-6}}{1{,}6 \cdot 10^{-5}} = 8{,}125 \cdot 10^{-2} \tag{40}$$

Gemäß GruSiBau (1981) darf der modifizierte Zuverlässigkeitsindex β_{red}, unter Berücksichtigung der Auftretenswahrscheinlichkeit für außergewöhnliche Einwirkungen wie folgt berechnet werden:

$$\beta_{red} = \phi^{-1} \cdot \left(\frac{p_f}{p_b} \right) = \phi^{-1} \cdot \left(\frac{P(V)}{P(EX)} \right) = \phi^{-1} \cdot \left(8{,}125 \cdot 10^{-2} \right) \approx 1{,}40 \tag{41}$$

Gemäß DIN 1055-100 (2001) ist der Teilsicherheitsbeiwert für außergewöhnliche Einwirkungen zu 1,0, sodass der Bemessungswert des Explosionsdruckes wie folgt berechnet werden kann:

$$E_d = E_k \cdot 1{,}0 = \mu_E - \alpha_E \cdot \beta_{red} \cdot \sigma_E \tag{42}$$

Der Sensitivitätsfaktor α_E der Einwirkung darf gemäß V ENV 1991-2-7 (2000) bzw. DIN 1055-100 (2001) zu $\alpha_E = -0{,}7$ abgeschätzt werden. Diese Vereinfachung gilt streng genommen nur unter folgender Bedingung:

$$0{,}16 < \sigma_E/\sigma_R < 7{,}60 \qquad (43)$$

Im Regelfall wird das Grenzverhältnis der Streuungen eingehalten sein und die vereinfachte Annahme von $\alpha_E = -0{,}7$ auf der sicheren Seite liegen. Eine genaue zuverlässigkeitstheoretische Analyse zur Ermittlung des Sensitivitätsfaktors α bei Mauerwerksstrukturen übersteigt den Rahmen dieses Forschungsauftrages. Zur Bestimmung des Bemessungsdruckes wird daher die Zulässigkeit des Sensitivitätsfaktors von $\alpha_E = -0{,}7$ unterstellt. Der Bemessungswert des resultierenden Explosionsdruckes kann wie folgt berechnet werden:

$$E_d = E_k \cdot 1{,}0 = \mu_E + 0{,}7 \cdot 1{,}40 \cdot \sigma_E = \mu_E + 0{,}98 \cdot \sigma_E \qquad (44)$$

Durch einsetzen der Gleichungen 39 und 41 in Gleichung 48 kann man den gesuchten Bemessungswert des Explosionsdruckes einer internen druckentlasteten Gasexplosion berechnen:

$$E_d = \frac{0{,}015}{(A_v/V)^{1{,}05}} \cdot \left(1 + 0{,}98 \cdot \left(\frac{0{,}4}{(A_v/V)^{0{,}05}} - 0{,}25\right)\right) \geq E_{d,min} = 10\,\frac{kN}{m^2} \qquad (45)$$

Bild 23 stellt den Verlauf des Bemessungswertes der Explosionseinwirkung im Vergleich zum Ansatz der DIN 1055-9 (2003)dar.

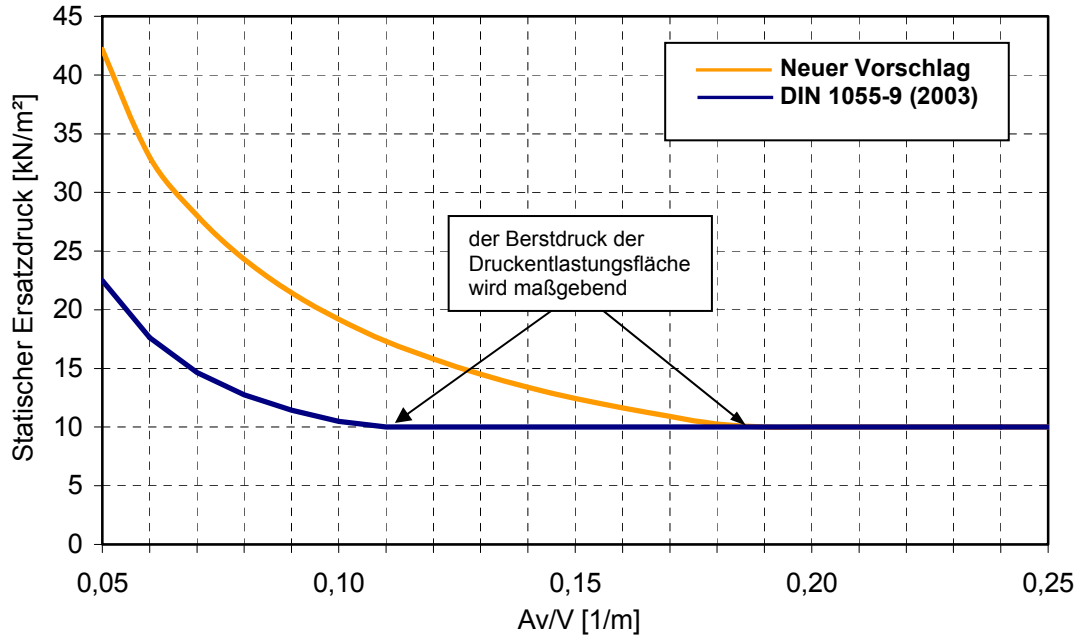


Bild 23: Bemessungswert des Explosionsdruckes einer internen druckentlasteten Gasexplosion **für α_E = - 0,7** im Vergleich zum Bemessungsvorschlag gemäß DIN 1055-9 (2003)

Der Bemessungswert der Druckeinwirkung gemäß Bild 23 wirkt gleichzeitig auf alle abschließenden Wände und Decken (bzw. Boden) des betrachteten Raumes. Dabei kann vereinfacht von einer gleichförmigen Lastverteilung ausgegangen werden. Des Weiteren muss ein Mindestdruck von ca. 10 kN/m², der beim Bersten der Druckentlastungsfläche entsteht, bei der Bemessung berücksichtigt werden.

Zur Bemessung eines Bauteils ist außerdem die Frage zu beantworten, welcher Teilsicherheitsbeiwert auf der Materialseite verwendet werden muss. Analog zur Bestimmung des Bemessungswertes der Einwirkung kann ein Ansatz für den Querschnittswiderstand formuliert werden, wenn man den Sensitivitätsfaktor α_R gemäß DIN 1055-100 (2001) zu $\alpha_R = 0{,}8$ annimmt, wobei die bereits erwähnte Einschränkung bezüglich des Verhältnisses der Streuungen von Einwirkung und Widerstand zu beachten ist. Es ergibt sich:

$$R_d = \mu_R - \alpha_R \cdot \beta_{red} \cdot \sigma_R \tag{46}$$

einsetzen der bekannten Parameter liefert:

$$R_d = \mu_R + 0{,}8 \cdot 1{,}40 \cdot \sigma_R = \mu_R + 1{,}12 \cdot \sigma_R \tag{47}$$

Der resultierende Fraktilenfaktor des Bemessungswertes, auf der Materialseite, ergibt sich zu 1,12. Da jedoch die charakteristischen Materialwerte zur Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit stets als 5% Fraktilwerte festgelegt sind, ist der resultierende Fraktilenfaktor von 1,645 (5% Fraktile) ausreichend, so dass kein zusätzlicher Sicherheitsbeiwert berücksichtigt werden muss. Die Bemessung für den Lastfall Gasexplosion darf somit unter den getroffenen Annahmen mit den charakteristischen Materialwerten durchgeführt werden.

5.5 Zusammenfassende Darstellung

Die Theorie der Gasexplosionen verlangt ein grundlegendes Verständnis über den Verbrennungsprozess eines Gas-Luft-Gemisches. Unter der Bedingung eines vollständig geschlossenen Raumes produzieren die meisten Gase in einem Gemisch mit Luft unter atmosphärischen Druckverhältnissen einen Maximaldruck von *8 bar*. Da die meisten Gebäude für eine derart hohe Beanspruchung nicht dimensioniert sind, muss die Druckentwicklung in dem Raum durch die Anordnung von Druckentlastungsflächen begrenzt werden. Diese Flächen bersten bereits bei einem deutlich geringeren Druck als die tragenden Bauelemente und ermöglichen daher eine planmäßige Begrenzung des Explosionsdruckes, so dass die tragenden Elemente nicht über ihre Tragfähigkeit hinaus beansprucht werden. Der sich bei einer druckentlasteten Gasexplosion einstellende Druck-Zeit-Verlauf und die daraus abzuleitenden Explosionskenngrößen sind das Ergebnis einer Vielzahl von Einflussgrößen. Die theoretischen Grundlagen für die Druckentwicklung von druckentlasteten Gasexplosionen sowie ihre Abhängigkeit von dem Verbrennungszustand wurden dargestellt und erläutert.

Eine Gasexplosion in einem Gebäude verursacht eine zeitlich veränderliche Belastung auf die raumabschließenden Bauteile. Im Bereich des Bauwesens wird angestrebt, die dynamische Einwirkung zur Vereinfachung des Berechnungsaufwandes mittels statischer Ersatzlasten zu modellieren. In Abhängigkeit von dem Verhältnis der Einwirkungsdauer zu der Eigenschwingzeit des belasteten Bauteils können drei markante Bereiche unterschieden werden. Ist die Dauer der Belastung deutlich geringer als die Eigenschwingzeit des belasteten Bauteiles, wird die Einwirkung größtenteils durch die Trägheit des Bauteils absorbiert. Das System reagiert auf die dynamische Belastung weniger stark als bei einer statischen Belastung mit entsprechender Lastgröße. Bei Lasteinwirkungsdauern in der Größenordnung der Eigenschwingzeit entsteht aufgrund der dynamischen Einwirkung eine deutlich größere Tragwerksreaktion als bei einer zeitinvarianten Belastung. Bei längeren Lasteinwirkungsdauern ergeben sich quasi-statische Verhältnisse mit der Annäherung des dynamischen Lastfaktors an den Wert DLF=1.

Mithilfe von Grenzwertbetrachtungen konnten die Eigenschwingzeiten typischer Wandelemente zu *0,01* bis *0,06 Sekunden* ermittelt werden. Die übliche Belastungsdauer einer druckentlasteten Deflagration liegt in einem Bereich von etwa *0,4* bis *1,0 Sekunden*. Im Fall einer internen Gasexplosion handelt es sich somit um eine quasistatische Belastung, da die Belas-

tungsdauer deutlich größer ist, als die Eigenschwingzeit des belasteten Elementes. Der aus dem Explosionsdruckverlauf resultierende Maximaldruck kann in guter Näherung als statisch gleichwertige Ersatzlast angesetzt werden.

Für die Festlegung einer geeigneten Ersatzdruckbeanspruchung ist neben den deterministischen Einflussgrößen die Berücksichtigung der stochastischen Einflussparameter der Explosionsdruckbeanspruchung von besonderer Bedeutung. In diesem Forschungsvorhaben wurde der Hydrocode *FLACS (FLame ACceleration Simulator)* zur Simulation des Verbrennungsvorganges druckentlasteter Gasexplosionen verwendet. Dieses Programm wurde im Rahmen einer vergleichenden Studie als fortschrittlichstes Programm zur Simulation von Gasexplosionen bewertet. Der Programmcode von *FLACS* berücksichtigt den aktuellen Kenntnisstand auf dem Gebiet der Explosionstheorie und liefert die realistischsten Ergebnisse der derzeit zur Verfügung stehenden Programme.

Aufbauend auf umfangreichen Studien über den Einfluss der an der Druckentstehung beteiligten Parameter wurden mit Hilfe numerischer Simulationsrechnungen Grenzbereiche definiert, deren Druckentwicklungen nur zu einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit unterschritten werden *(Best-Case-Szenario)* und nur zu einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit überschritten werden *(Worst-Case-Szenario)*. Aufbauend auf den explosionstheoretischen Grundlagen konnte als Randbedingung für das *Worst-Case-Szenario* festgelegt werden, dass der Raum vollständig mit einem Methan-Luft-Gemisch in einer Gemischkonzentration von *10 Vol.%* gefüllt sein muss, um die größten Druckbeanspruchungen zu erzielen. Darüber hinaus wurde der Ansprechdruck, der als Druckentlastungsfläche fungierenden Tür- und Fensterelemente, für den Wohnungsbau ungünstig mit *70 mbar* festgelegt. Der Einfluss der Raumgeometrie, des Zündortes sowie der Druckentlastungsfläche, wurde ebenfalls mithilfe numerischer Simulationsrechnungen untersucht. Hierbei stellte sich heraus, dass unter den für den Wohnungsbau typischen Randbedingungen (Raumhöhe kleiner 2,75 m) die größten Explosionsdruckbeanspruchungen bei Räumen mit einem Grundseitenverhältnis von *1:3* zu erwarten sind, wenn die Zündung in dem von der Druckentlastungsfläche entferntesten Raumdrittel erfolgt. Durch einen Vergleich verschiedener in der Praxis üblicher Druckentlastungskoeffizienten konnte festgestellt werden, dass die Simulationsergebnisse und somit die für den Wohnungsbau typischen Druckentwicklungen in guter Näherung durch den auch in DIN 1055-9 (2003) verwendeten Druckentlastungskoeffizienten A_V/V dargestellt werden können.

Der Einfluss von Turbulenzen wurde bei den numerischen Simulationen durch die zusätzliche Anordnung von Hindernissen in dem Druckentlastungsraum berücksichtigt. Hierbei konnte dargestellt werden, dass die Druckentwicklung infolge der aus den Hindernissen resultierenden Turbulenzen im Vergleich zu einem hindernisfreien Raum um ein Vielfaches ansteigt. Die für das *Worst-Case-Szenario* verwendete Anzahl und Anordnung der Hindernisse wurde derart festgelegt, dass sich für den Wohnungsbau typische Grenzbereiche ergaben.

Bei der Definition des *Best-Case-Szenarios* wurde vorausgesetzt, dass der Verbrennungsprozess unter Randbedingungen abläuft, die eine starke Druckentwicklung nicht ermöglichen. Für diesen Grenzfall wurde die Annahme getroffen, dass sich der Druck in dem Raum bis zu dem Ansprechdruck der Druckentlastungsfläche von *20 mbar* aufbaut und nach dem Öffnen der Druckentlastungsfläche auf den Umgebungsdruck abfällt.

Nachdem die Grenzbereiche der Explosionsdruckbeanspruchung festgelegt waren, konnten die statistischen Momente der Druckbeanspruchung ermittelt werden. Hierbei wurde vorausgesetzt, dass sich der Explosionsdruck aus einer Vielzahl von unabhängigen Einflussgrößen mit stochastischem Charakter zusammensetzt. Entsprechend dieser Annahme konnten die Streuungen der Explosionsdruckbelastung in Anlehnung an den zentralen Grenzwertsatz der Statistik als Normalverteilung approximiert und der Erwartungswert sowie die Varianz der Explosionsdruckbelastung in Abhängigkeit von dem Druckentlastungskoeffizienten und dem Fraktilenfaktor des *Worst-Case-Szenarios* ermittelt werden.

Mithilfe der berechneten statistischen Momente ist es möglich den Bemessungswert der Explosionsdruckbeanspruchung derart zu bestimmen, dass der Grenzwert der zulässigen Versagenswahrscheinlichkeit eingehalten wird. Dabei wurde die Versagenswahrscheinlichkeit (bzw. der Zuverlässigkeitsindex β) unter Berücksichtigung der Auftretenswahrscheinlichkeit dieses seltenen, außergewöhnlichen Ereignisses modifiziert. Mit der vereinfachten Annahme des Sensitivitätsfaktors α_E = -0,7 auf der Einwirkungsseite, wurde der Bemessungswert der Ersatzdruckbeanspruchung in Abhängigkeit des Koeffizienten A_v/V, unter Berücksichtigung der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Explosionsereignisses, berechnet.

6 Konstruktionsregeln für Tragstrukturen

6.1 Vorbemerkungen

Die Baubestimmungen haben die Aufgabe, die Berechnung von Bauwerken unter Beachtung von Wirtschaftlichkeitsanforderungen derart zu regeln, dass dem Sicherheitsbedürfnis der Bevölkerung entsprochen wird. Die Sicherheit von Bauwerken wird einerseits durch die Streuungen der in einem Bauwerk auftretenden und aufnehmbaren Beanspruchungen und andererseits durch menschliche Fehlhandlungen bei der Tragwerksplanung und der Bauausführung oder bei der Gebäudenutzung beeinflusst. Gefährdungen der Sicherheit infolge menschlichem Fehlverhalten oder Sabotage müssen durch wirksame Kontroll- und Überwachungsmaßnahmen auf ein unbedenkliches Maß begrenzt werden und sind daher nicht in dem normativ geforderten Sicherheitsniveau enthalten. Um ausströmendes Gas möglichst schnell zu identifizieren, sollten daher Gasmelder in Räumen mit Gasverbrauchern installiert werden, um der Gefahr einer Gasexplosion durch unkontrolliert austretendes Gas vorzubeugen.
Sollte es dennoch zu einem Explosionsereignis kommen, besteht die primäre Aufgabe darin, ein Kollabieren des Gesamttragwerkes zu vermeiden. Aufbauend auf den bisher durchgeführten Untersuchungen bezüglich der Explosionsdruckbelastung werden im Folgenden verschiede Möglichkeiten diskutiert, um ein Kollabieren der Gesamtstruktur unwahrscheinlich zu machen. Dabei sind zwei Gruppen von Regeln zu unterscheiden. Zum Einen werden Regeln formuliert, die zu einer Reduzierung des Explosionsdruckes führen und zum Anderen Regeln, welche den Explosionswiderstand tragender Bauteile steigern sollen.

6.2 Regeln zur Senkung des auftretenden Explosionsdruckes

Allgemeines

Der resultierende Explosionsdruck steigt in Abhängigkeit der Druckentlastungsfläche, der Raumgeometrie, Turbulenzintensität etc. rasch an und erreicht Werte, denen vor allem unbewehrte Mauerwerkskonstruktionen nur in seltenen Fällen widerstehen können. Daher besteht ein besonderes Gefahrenpotential im Bereich des Wohnungsbaus, speziell bei Einfamilienhäusern. Die meist gemauerten Wände werden in der Regel unbewehrt ausgeführt und verfügen oftmals nicht über eine ausreichende Wanddicke oder entsprechende Auflast, um einer Explosionseinwirkung widerstehen zu können. Deshalb sollte versucht werden, den resultierenden Druck möglichst gering zu halten, um ein Versagen tragender Bauteile zu vermeiden.

Druckentlastungsfläche:

Die Anordnung und Wirksamkeit von Druckentlastungsflächen (DEF), wie z.B. Fenstern, spielt eine wichtige Rolle bei der Reduzierung des resultierenden Explosionsinnendruckes. Eine Druckentlastungsfläche ist dann als wirksam zu bezeichnen, wenn der Explosionsdruck direkt nach außen in die Umgebung entweichen kann. Dies bedeutet, dass Drucklastungsflächen immer an der Gebäudeaußenhülle angeordnet sein müssen. Sind im betrachteten Raum mehrere Druckentlastungsflächen an Außenwänden vorhanden, dürfen diese beim Nachweis addiert werden. Ideal wirken Druckentlastungsflächen, wenn sie direkt in der Nähe des Zündpunktes angeordnet sind. Da jedoch die Festlegung des Zündpunktes in der Regel nicht möglich sein wird, sollten Druckentlastungsflächen am effektivsten in Wandmitte geplant werden, um der Druckwelle ein schnelles Entweichen in die (freie) Umgebung zu ermöglichen. Außerdem sollte stets versucht werden, die Druckentlastungsfläche an der längsten Außenwand des betroffenen Raumes zu planen, sofern hier ein Entweichen des Explosionsdruckes in die freie Umgebung möglich ist. Zusätzlich sollten Druckentlastungsflächen möglichst großzügig geplant werden, um den Explosionsdruck möglichst gering zu halten (siehe Kapitel 6.4)

Berstdruck der Druckentlastungsfläche:

Ein wichtiger Parameter einer Druckentlastungsfläche ist der Berstdruck. Dieser sollte möglichst gering sein. Bei einem Berstdruck von mehr als 7 kN/m², sollten spezielle Abreißkonstruktionen (welche bei einem Druck von kleiner 7 kN/m² versagen) in Fenstern oder Türen geplant werden, um ein Ansteigen der Druckeinwirkung über die in Bild 23 dargestellten Bemessungswerte zu vermeiden.

Raumgeometrie:

Der Explosionsdruck hängt signifikant von der vorhandenen Raumgeometrie ab, wobei sich die geringsten Drücke bei quadratischer Grundrissfläche ergeben. Im Vergleich zum Worst-Case Raum kann (bei sonst gleichen Randbedingungen) der Explosionsdruck in einem Raum mit quadratischer Grundrissfläche um bis zu 40 % reduziert werden. Deshalb sollten bei der Planung von gefährdeten Räumen quadratische Grundrissflächen anstrebt werden. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass bei Verwendung der Bemessungswerte nach Bild 23 die Geschosshöhe maximal 2,75 m betragen darf. Bei Räumen mit einem Seitenverhältnis größer als 1:3 übersteigt der Explosionsdruck die Werte gemäß Bild 23, weshalb solche Geometrien nicht geplant werden sollten.

Nichttragende Konstruktionen im Rauminneren:

Es ist zu beachten, dass nichttragende Innenwände, Innentüren oder ähnliches nicht, oder nur bedingt zur Druckentlastung geeignet sind. Dies rührt daher, dass der Explosionsdruck sowohl vom Zeitpunkt des Berstens der Druckentlastungsfläche als auch von der Geometrie des Raumes, der nach dem Versagen der Trennwand entsteht, abhängig ist. Des Weiteren resultieren durch das Versagen von Innenwänden Rückstoßeffekte und Turbulenzen, was ebenfalls mit einer Drucksteigerung einhergeht.

Nachbargebäude:

Rückstoßeffekte können auch durch Nachbargebäude entstehen, wobei ab einem Abstand von ca. 10 m zur Druckentlastungsfläche dieser Effekt, der zu einer signifikanten Drucksteigerung im Rauminneren führt, nach den bisherigen Erkenntnissen vernachlässigt werden kann. Auf diesem Gebiet sind jedoch noch umfangreiche Untersuchungen nötig, um diesbezüglich eine allgemeine Aussage treffen zu können. Die Auswirkungen auf die Tragfähigkeit der Nachbargebäude sind natürlich zu berücksichtigen, wobei auch hier Forschungsbedarf besteht um entsprechende Angaben machen zu können.

Turbulenzen:

Um gefährliche Turbulenzen im Rauminnern zu minimieren, sollten in einem gefährdeten Raum möglichst keine Gegenstände gelagert oder Möbel aufgestellt werden. Generell erzeugen eckige Körper bzw. Querschnitte höhere Turbulenzen als runde Formen. Des Weiteren sollte insbesondere auf die Planung von Stützen im Rauminneren verzichtet werden, da diese im Explosionsfall zu erheblichen Turbulenzen des Gas-Luftgemisches führen, was mit einer Steigerung des Explosionsinnendruckes einhergeht. Gleiches gilt auch für einspringende Wände im Innenraum. Aussteifungsstützen welche in raumabschließenden Wänden (siehe z. B. Bild 24) integriert sind, erzeugen natürlich keine zusätzlichen Turbulenzen, solange die auszusteifende Wand nicht versagt.

6.3 Regeln zur Steigerung der Belastbarkeit von Tragstrukturen

Kommt es zu einem internen Gasexplosionsereignis, wirken gemäß den Ausführungen in Kapitel 6.4 erhebliche Belastungen (gleichzeitig) auf alle umliegenden Bauteile im betreffenden Raum, wobei von einer gleichförmigen Lastverteilung ausgegangen werden kann. Neben der Reduzierung der Druckeinwirkung ist ein zentrales Anliegen der Tragwerksplanung, ein Kol-

labieren der gesamten Tragstruktur zu vermeiden. Dabei sind unbewehrte Mauerwerkskonstruktionen besonders gefährdet.

Tragverhalten von Mauerwerkswänden unter Explosionsdruckbeanspruchung:

Das Tragverhalten unbewehrter Mauerwerkswände unter horizontaler Explosionsdruckbeanspruchung wurde von Mayerhofer und Reichenbach (1986, 1992) intensiv analysiert. Es zeigt sich, dass die Tragfähigkeit von zweiseitig gehaltenen Mauerwerkswänden zutreffend mithilfe eines Bogenmodells beschrieben werden kann, wohingegen sich die Traglast mehrseitig gehaltener Wände nach der Bruchlinientheorie ergibt. Bei der Anwendung der Bruchlinientheorie im Mauerwerksbau, muss jedoch die Biegzugfestigkeit senkrecht und parallel zur Lagerfuge „sinnvoll gewählt“ werden, um die Traglast realistisch zu berechnen. Den Versuchen von Mayerhofer und Reichenbach liegen Biegzugfestigkeiten von ca. 1,5 N/mm² zugrunde, welche um ein vielfaches höher sind, als die charakteristischen Werte im aktuellen Entwurf des EC 6 (pR EN 1996-1-1:2004). Aufgrund dieser hohen Biegezugfestigkeit wurden in den Versuchen beachtliche aufnehmbare Drücke unbewehrter Mauerwerkswände gemessen. Die Gleichungen zur Bestimmung der Traglast unter verschiedenen Randbedingungen können der Arbeit von Mayerhofer und Reichenbach (1986) entnommen werden. Eine signifikante Steigerung der Tragfähigkeit von Mauerwerkswänden kann nach Mayrhofer (1992) durch eine bewehrte Putzschicht erreicht werden, wobei Klärungsbedarf hinsichtlich der Verbundwirkung zwischen Putz, Wand und Bewehrung besteht.

Anordnung Aussteifungsstützen:

Generell kann man sagen, dass mehrseitig gehaltene Wände über ein signifikant höheres Tragvermögen verfügen, als zweiseitig gehaltene Wände. Deshalb sollten bei langen Wänden die über eine einachsige Tragwirkung verfügen, Aussteifungsstützen im Abstand der Geschosshöhe vorgesehen werden (siehe Bild 24), um einen zweiachsigen Lastabtrag zu ermöglichen. Eine horizontale Bewehrung in den Wandfugen kann die Tragfähigkeit unbewehrter Mauerwerkswände in Verbindung mit Aussteifungsstützen zusätzlich steigern. Die Stützen müssen natürlich für die resultierende Einwirkung bemessen werden, wobei eine Reduzierung des Teilsicherheitsbeiwertes auf der Widerstandsseite auf γ_M =1,0 gemäß den Ausführungen in Kapitel 6.4 vorgenommen werden darf. Zusätzlich können Aussteifungsstützen in den Wänden derart bemessen und konstruiert werden, dass sie im Versagensfall der Wand den Sekundäreinsturz der Decke verhindern können. Allerdings muss die Decke für die entsprechende Punktlagerung bemessen werden, wobei auch hier der Teilsicherheitsbeiwert zu 1,0 gesetzt werden darf. Außerdem sollte die Bewehrung der Stützen in der Stahlbetondecke ver-

ankert werden, um einem Abheben der Decke entgegen zu wirken. Dabei sollte die Stützenbewehrung in die Decke abgebogen werden.

Stahlbetondecken:

Durch eine verstärkte „Randbewehrung“ der Decke im betroffenen Berich können Lasten aus den oberen Geschossen abgefangen werden. Deshalb sollte im Bereich von Wänden generell eine verstärkte Längsbewehrung über der Wand (parallel zur Wand) in der Decke vorgesehen werden. Diese Bewehrung kann zusätzlich zum Abtrag von Kräften aus Bogenschub (bei unbewehrten Mauerwerkswänden) beitragen, oder im Versagensfall zur Abfangung entsprechender Wandlasten auf der Decke dienen. Um ein Versagen der Decke infolge des Explosionsdruckes zu vermeiden sollte diese oben und unten durchgängig bewehrt werden, da i.d.R. der Explosionsdruck größer als das Deckengewicht ist.

Auflasten:

Bei zweiseitig gehalten Wänden muss sichergestellt werden, dass der Horizontalschub bei unbewehrten Mauerwerkswänden aufgenommen werden kann. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass durch die Explosion abhebende Kräfte auf die Decken einwirken, die zu einer Reduzierung der Wandnormalkraft führen. Ein Abheben der Decke und ein damit verbundener Entfall der horizontalen Halterung der Wände muss ebenfalls verhindert werden, sofern betroffene Wände tragend sind. Deshalb sollte angestrebt werden unbewehrte Mauerwerkswände, welche für die Gesamttragfähigkeit von entscheidender Bedeutung sind, mit einer möglichst hohen Auflast zu versehen, um eine entsprechende Vorspannung der Wand zu erzielen. Andererseits kann bei einem Raum mit länglicher Geometrie, wie in Bild 24 dargestellt, durchaus die kurze Wand (1) Versagen, ohne dass das gesamte Tragwerk kollabiert.

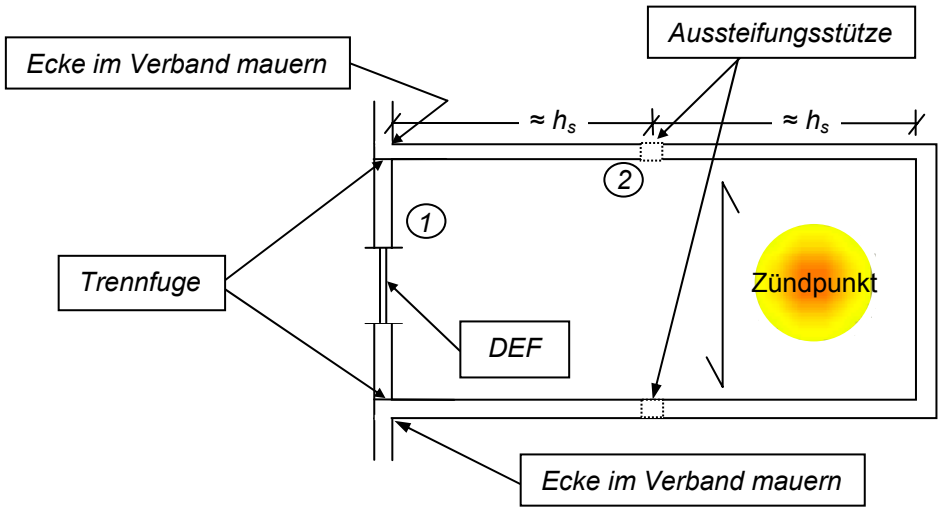


Bild 24: Exemplarischer Grundriss eines gefährdeten Raumes

Konstruktive Ausbildung der Anschlüsse von Mauerwerkswänden:

Kurze Außenwände (Bild 39 (1)) sollten nicht mit benachbarten Wänden verzahnt ausgeführt werden und somit nur am Wandkopf und Wandfuß durch die Deckenscheiben gehalten werden. Entsprechende Wände sollten mit Trennfugen (Bild 24) ausgeführt werden, um die Wahrscheinlichkeit zu steigern, dass zuerst Wand (1) und nicht Wand (2) versagt, da die kürzere Wand (1) für die Standsicherheit des Gebäudes i.d.R. eine untergeordnete Rolle spielt. Dies bedeutet jedoch keinesfalls, dass die Fläche der Wand (1) als Druckentlastungsfläche (DEF) bei der Bestimmung des Explosionsdruckes berücksichtigt werden darf, da sie einen erheblich höheren Berstdruck (größer 7 kN/m²) aufweist und über eine nicht zu vernachlässigende Massenträgheit verfügt. Dies kann zu höheren Innendrücken infolge von Rückstoßeffekten und Turbulenzen führen. Um die Tragfähigkeit der langen Wand (2) zusätzlich zu steigern, sollte eine wirksame Halterung durch Querwände hergestellt und Aussteifungsstützen mit der Wand verzahnt werden. Die Wandecken sollten daher im gemauerten Verband oder gleichwertig hergestellt werden.

Schubtragfähigkeit:

Ein weiterer Aspekt ist die Schubtragfähigkeit von Wänden oder Wandelementen. Bei kleineren Gebäuden wird die Auflast in der Regel nicht ausreichen, um den Querkraftabtrag über Reibung sicherzustellen, vor allem wenn mit vorgefertigten Wandelementen (z.B. aus Stahlbeton) gearbeitet wird. In diesem Fall muss die Anbindung der Wand an die Stahlbetondecken mittels Schubdornen oder Verschlaufungen erfolgen. Der statische Nachweis dieser Verbindung kann unter Verwendung des neuen Bemessungsansatzes erfolgen, wobei für die Berechnung wie bereits erwähnt wurde alle Teilsicherheitsbeiwerte zu 1,0 gesetzt werden dürfen.

Skelettbauweise:

Eine effektive Bauweise gegen Gasexplosionseinwirkungen stellen Skelettkonstruktionen dar, weil Mauerwerk hier nur als ausfachender nicht tragender Baustoff eingesetzt wird. Die Ausfachungsflächen versagen bei einer erhöhten Druckeinwirklungen, so dass der Explosionsdruck in die Umgebung entweichen kann. Die Berücksichtigung dieser Flächen als Druckentlastungsflächen ist jedoch, wie bereits erwähnt wurde nicht zulässig. Allerdings kann man davon ausgehen, dass die tragende Skelettkonstruktion infolge der Explosionseinwirkung weitestgehend unbeschädigt beleibt und somit der Lastabtrag im Gebäude sichergestellt ist.

6.4 Anordnung von gefährdeten Räumen im Gebäude

Hohe Innendrücke bei Gasexplosionen können signifikant durch entsprechend große Druckentlastungsöffnungen in Räumen verhindert werden. In einem Gebäude sind Räume mit Gasverbrauchern, wie z. B. Heizungen, Gasöfen oder Gasherden besonders gefährdet, wobei erwähnt werden sollte, dass auch durch eine Leckage einer Gasleitung ein explosives Gas-Luftgemisch in einem Raum entstehen kann. Daher sollte angestrebt werden, in Räumen mit Gasverbrauchern große Fensterflächen (Druckentlastungsöffnungen) zu planen. Aus diesem Grunde sind Kellerräume ungeeignet, da hier in der Regel nur kleine Fensteröffnungen möglich sind und das Versagen einer Kellerinnenwand zum Einsturz des Gebäudes führen kann.

Die Installation von Gasheizungen z.B. im Bereich von Dachgeschossen erscheint hingegen sinnvoll, wenn sicher gestellt ist, dass der Explosionsdruck durch das Dach (Abheben) entweichen kann. Bei der konstruktiven Ausbildung des Daches sollte beachtet werden, dass ein Abheben der entsprechenden Dachfläche möglich ist, um ein lokales Versagen zu fördern, ohne dass die gesamte Tragstruktur kollabiert. Daher sollten Pfetten, Sparren und ähnliches im betroffenen Bereich als Einfeldsysteme konstruiert werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Forschungsbericht beschäftigt sich mit der Problematik von Gasexplosionen im Hochbau. Neben der Entwicklung eines Bemessungsansatzes auf stochastischer Basis werden, aufbauend auf umfangreichen Computersimulationen, konstruktive Regeln erarbeitet, um das Risiko eines Einsturzes von Gebäuden oder tragenden Gebäudeteilen infolge einer internen Gasexplosion zu minimieren.

Ausgangssituation des Forschungsvorhabens ist die Häufung von Schadensfällen aufgrund von Gasexplosionen im Hochbau und die unzureichende Behandlung dieser Problematik in den derzeit gültigen nationalen Normen. Es zeigt sich, dass der Bemessungsansatz gemäß DIN 1055-9 nur in besonderen Fällen hinreichend bemessene Tragwerke liefert, da dieser Ansatz auf empirischer Basis anhand weniger Versuche mit beschränkten Randbedingungen ermittelt wurde. Des Weiteren bieten die in DIN 1045-1 beschriebenen konstruktiven Regeln dem Tragwerksplaner nur eine unzureichende Hilfestellung und sind zudem kaum nachvollziehbar. Die enormen Abweichungen in der anzusetzenden statischen Ersatzdruckbelastung, in unterschiedlichen nationalen und internationalen Normen, unterstreicht die unzureichende Erforschung dieses außergewöhnlichen Lastfalls.

Gasexplosionen kann man aufgrund der geringen Geschwindigkeit der Druckwelle, im Vergleich zu einer Detonation, als Deflagration bezeichnen. Der resultierende Explosionsdruck, der gleichzeitig auf alle umfassenden Wände wirkt, ist von einer Vielzahl von Parametern abhängig, die im Rahmen des Forschungsauftrags mithilfe numerischer Berechnungen analysiert werden. Der Maximaldruck von ca. 8 bar (800 kN/m²) in geschlossenen Räumen, lässt sich vor allem durch Planung von Druckentlastungsflächen, durch die der Explosionsdruck in die freie Umgebung entweichen kann, reduzieren. Fenster stellen dabei die wichtigste Form von Druckentlastungsflächen dar. Anhand der durchgeführten Untersuchungen und Literaturauswertungen zeigt sich, dass Gegenstände und andere Hindernisse erhebliche Turbulenzen des Gas-Luftgemisches erzeugen, was zur einer Vervielfachung des Explosionsdruckes im Rauminneren - im Vergleich zu einem turbulenzfreien Raum - führt. Einen signifikanten Einfluss hat auch die Lage des Zündpunktes in Abhängigkeit des Abstandes zur Druckentlastungsfläche.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wird aufbauend auf den durchgeführten Analysen ein neuartiger Bemessungsansatz entwickelt, mit dem sich eine statische Ersatzdruckbeanspruchung in Abhängigkeit des Verhältnisses A_v/V (Fläche der Druckentlastungsfläche/ Raumvolumen) bestimmen lässt. Es zeigt sich, dass bei üblichen Wandelementen die Eigenfrequenz weit genug von der Erregerfrequenz der Explosionseinwirkung entfernt liegt, so dass man von einer quasistatischen Beanspruchung ausgehen kann.

Zur Bestimmung des Bemessungsansatzes wird ein Worst Case Szenario definiert, in dem sich eine maximale Druckentwicklung ergibt, welche nur mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit überschritten wird. Zusätzlich wird ein Best Case Szenario für eine minimale Druckeinwirkung definiert, welche nur mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit unterschritten wird. Mithilfe dieser Grenzbereiche werden die statistischen Momente der Explosionsdruckbeanspruchung auf stochastischer Basis berechnet, wobei als Verteilungsfunktion eine Normalverteilung gewählt wird, da sich der resultierende Druck aus einer Vielzahl von Parametern ergibt. Mit diesen Informationen wird, unter Berücksichtigung der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Explosionsereignisses, der Bemessungswert der Ersatzdruckbeanspruchung bestimmt, wobei sich für diesen Lastfall der Zuverlässigkeitsindex β zu 1,40 ergibt. Unter der vereinfachten Annahme des Sensitivitätsfaktors $\alpha_E = -0{,}7$ auf der Einwirkungsseite wird letztlich der Bemessungswert der Explosionsdruckbeanspruchung bestimmt. Die resultierenden Werte sind erwartungsgemäß deutlich höher als die Bemessungswerte nach DIN 1055-9 (2003).

Aufbauend auf den durchgeführten Analysen werden in Kapitel 7 konstruktive Regeln erarbeitet. Dabei handelt es sich um Regeln zur Reduzierung des Explosionsdruckes im Rauminneren und zur Anordnung von Gasverbrauchern im Gebäude. Außerdem werden dem Tragwerksplaner konstruktive Hilfestellungen zur Steigerung des Bauteilwiderstandes von Gebäuden bereitgestellt. Generell sollte dabei angestrebt werden, die Entwicklung eines stöchiometrischen Gas-Luft-Gemisches in einem Gebäude durch den Einsatz von Gasmeldern zu verhindern. Tabelle 15 stellt die wichtigsten Parameter und ihre Auswirkungen auf den resultierenden Explosionsdruck zusammen.

Randbedingung	günstig	ungünstig
Einsatz von Gasmeldern	in gefährdeten Räumen	-
Raumgeometrie	quadratisch	länglich
Druckentlastungsfläche	$A_v/V \geq 0{,}2$ bis $0{,}15$	$A_v/V \leq 0{,}05$
Anordnung der DEF	in Wandmitte (vor allem bei langen Außenwänden)	in weiter Entfernung vom Grundrissmittelpunkt (z.B. in Raumecken)
Trennwände	i.d.R. vermeiden	Trennwände mit hoher Masse und hohem Berstdruck
Berstdruck	≤ 7 kN/m²	≥ 7 kN/m²
Turbulenzen	leerer Raum ohne Stützen im Raum oder einspringende Wände etc.	starke Möblierung, Stützen im Rauminneren
Abstand zum Nachbargebäude	> 10 Meter	< 10 Meter

Tabelle 15: Zusammenstellung der wichtigsten Einflüsse auf den Explosionsdruck

Insbesondere unbewehrte Mauerwerkskonstruktionen sind bei Gasexplosionen gefährdet, da sie über eine relativ geringe Biegetragfähigkeit, vor allem bei niedrigen Auflasten, verfügen. Durch Aktivierung eines mehrachsigen Lastabtrages mithilfe entsprechender Aussteifungsstützen kann die Tragfähigkeit solcher Wände jedoch signifikant gesteigert werden. Decken sollten eine durchgehende obere und unter Bewehrung aufweisen, die im Bereich von Wänden zur Abfangung von entsprechenden Lasten aus oberen Geschossen und zur Aufnahme von Bogenschubkräften bei einachsig gespannten Mauerwerkswänden, verstärkt werden sollte. Tabelle 16 stellt Möglichkeiten zur Steigerung der Traglast von Bauelementen zusammen.

Randbedingung	günstig	ungünstig
Lagerung von Mauerwerkswänden	4-seitig	2-seitig
Tragfähigkeit unbewehrter Mauerwerkswände	hohe Auflast	Geringe Auflast bei tragenden Wänden
Ausbildung der Wandhalterungen	siehe Bild 24	
Aussteifungsstützen	im Abstand der Raumhöhe	-
Stahlbetondecken	1. Bewehrung durchgängig oben und unten 2. Bewehrung über gefährdeten Wänden verstärken	nur untere Bewehrung
Schubtragfähigkeit	hohe Auflast, konstruktive Anbindung an die Decke	Fertigteile ohne Schubverbindungsmittel
Anordnung von Gasverbrauchern	im Dachgeschoss	im Keller

Tabelle 16: Zusammenstellung von Möglichkeiten zur signifikanten Steigerung der Traglast

Die Intensität der Druckeinwirkung infolge von internen druckentlasteten Gasexplosionen ist von einer Vielzahl von Parametern abhängig. Diese Parameter sollten noch genauer im Bemessungsansatz berücksichtigt werden, um die Druckeinwirkung in Abhängigkeit der vorhandenen Randbedingungen in einem betroffenen Raum noch exakter berechnen zu können. Dazu müssen jedoch weiterführende numerische Analysen durchgeführt werden, um darauf aufbauend ein Bemessungskonzept, welches die wichtigsten Parameter variable berücksichtigt, entwickeln zu können. Außerdem sollten Großversuche durchgeführt werden um den Einfluss von Turbulenzen unter realen Randbedingungen genauer bestimmen zu können und eine Verifikation des Bemessungskonzeptes zu ermöglichen.

8 Literaturverzeichnis

Baker, W. E. & Tang, M. J. (1991): Gas, Dust and Hybrid Explosions, Elsevier, Amsterdam.

Bartknecht W. (1978): Explosionen - Ablauf und Schutzmaßnahmen, Springer Verlag, Berlin.

Bartknecht W. (1993): Explosionsschutz, Grundlagen und Anwendung, Springer Verlag, Berlin.

Bauer, U. (1992): Untersuchung des Verhaltens von Flachglasscheiben als Berstelemente zur Druckentlastung von Gebäuden bei interner Gasexplosionsbelastung, Dissertation, Leipzig.

Bjerketvedt, D. & Wingerden, K. (2000): Gas Explosion Handbook, Christian Michelsen Research, Norwegen.

British Gas (1999): Review of the applicability of predictive methods to gas explosions in offshore modules, Offshore Technology Report OHT 89312, Department of Energy.

Broeckmann, B. & Schwing, S. (1998): Druckentlastung von Gasexplosionen, Technische Überwachung, Bd. 39, Nr. 5, S. 24-29.

Bulson P.S. (1997): Explosive loading of engineering structures, E & FN Spon, Cornwall.

BS-CP-110 (1972): Code of practice for the structural use of concrete. Design, materials and workmanship, Berkshire, UK.

CEN (1997): Background document to ENV 1991-2-7: Accidental actions due to impact and explosions, November

Cubbage, P. A. & Marshall, M. R. (1973): Pressures Generated by Explosions of Gas-Air Mixtures in Vented Enclosures, Gas Engineers Communication, Vol. 926.

Cubbage, P. A. & Simmonds, W. A. (1955): An Investigation of Explosion Reliefs for Industrial Drying Ovens, Top Reliefs in Box Ovens, Institute of Gas Engineering.

DIN 1045 (1988): Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.

DIN 1045-1 (2001): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 1: Bemessung und Konstruktion, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.

DIN 1053-1 (1996): Mauerwerk, Teil 1: Berechnung und Ausführung, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.

DIN 1055-9 (2003): Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 9: Außergewöhnliche Einwirkungen, Deutsches Institut für Normung, Berlin.

DIN 1055-100 (2001): Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.

DIN 5034-4 (1994): Tageslicht in Innenräumen - Teil 4: Vereinfachte Bestimmung von Mindestfenstergrößen für Wohnräume, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.

DIN 18800 (1990): Stahlbauten, Teil1: Bemessung und Konstruktion, Deutsches Institut für Normung, Berlin.

DIN V ENV 1992-1-1 (1991): Eurocode 2: Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Teil 1-1: Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau, Europäisches Komitee für Normung.

DIN V ENV 1992-1-3 (1994): Eurocode 2: Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Teil 1-3: Vorgefertigte Bauteile und Tragwerke, Europäisches Komitee für Normung.

DIN V ENV 1991-2-7 (2000): Eurocode 1: Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 2-7: Einwirkungen auf Tragwerke, Außergewöhnliche Einwirkungen, Europäisches Komitee für Normung.

Dragosavic, M. (1973): Structural measures against natural-gas explosions in high-rise blocks of flats, Heron, Vol. 19, Delft.

Griffiths, H. & Pugsley, A. (1968): Report of the Inquiry into the Collapse of Flats at Ronan Point, Her Majesty's Stationery Office, London.

GruSiBau (1981): Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für baulichen Anlagen, Deutsches Institut für Normung Berlin.

FIP (1988): Precast prestressed hollow core floors, Thomas Telford Verlag, London.

Häußler-Combe, U. (2003): Praktische Baudynamik, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Karlsruhe.

Höchst, S. (1997): Untersuchungen zur Druckentlastung großer Behälter beim deflagrativen Abbrand von Brenngas/Luft-Gemischen, Dissertation, Karlsruhe.

Höppner, K. & Lösch, F. (1993): Explosionsdruckentlastung von Räumen und Druckbelastbarkeit von Bauwerksteilen, Technische Überwachung, Bd. 34, Nr. 11, S. 456-460.

Kinney, G. F. & Graham K. J. (1985): Explosive Shocks in Air, Springer Verlag, Berlin.

Leyendecker E. V. & Ellingwood B. R. (1977): Design Methods for Reducing the Risk of Progressive Collapse in Buildings, NBS Building Science Series, Washington.

Mayrhofer (1992): Gemauerte Wände mit Bewehrung unter Druckstoßbelastung, Dissertation, Karlsruhe.

Mayrhofer, Reichenbach (1986): Dynamisches Tragverhalten von Mauerwerk bei horizontaler Belastung, Ernst Mach Institut Freiburg i. Br.

Mercx, W. (1995): Modelling and experimental research into gas explosions, Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Volume 1, Elsevier Science.

Pappas, J. A. (1983): Venting of large-scale volumes, Proceedings from the Control and Prevention of Gas Explosons, Oyez/IBC.

Polithier K. (1998): Vorbeugender Brand- und Explosionsschutz: Methoden-Mittel-Maßnahmen, Kohlhammer, Stuttgart.

pR EN 1996-1-1:2004 (2004): Eurocode 6 : Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten, Entwurf 2004, Europäisches Komitee für Normung

Rabbash, D. J. (1969): Design of an Explosion Relief System for a Building Handling Fuel Gases, I. Chem. Engineer Symposium Series, Ausgabe 49.

Reimer, B. (2002): Brand- und Explosionsschutz, Fachbereich Ingenieurwissenschaften, Lehrstuhl Sicherheitstechnik, Martin-Luther-Universität, Halle-Wittenberg.

Staatliche Bauaufsicht (StBA) (1985): Vorschrift 58/85 Nr. 6: Bautechnischer Explosionsschutz, Leipzig.

Sprenger (2002): Entwicklungstendenzen bei der Gasverbrennungstechnik, Technik am Bau, Ausgabe 1/2002.

Steinle, A. & Hahn, V. (1999): Bauen mit Betonfertigteilen im Hochbau, Ernst & Sohn Verlag, Berlin.

Wearne, P. (2000): Collapse, When Buildings Fall Down, TV Books, L.L.C, New York.

Weber, B. (2002): Tragwerksdynamik, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Schweiz.

Zalosh, R. G. (1979): Gas Explosion Tests in Room-Size Vented Enclosures, Loss Prevention, Volume 13.

9 ANHANG

9.1 Anhang 1: Beispiele von Schadensfällen

9.1.1 Explosion in einem Einfamilienhaus

In dem vorliegenden Fall handelt es sich um eine Gasexplosion, die in der Küche eines Einfamilienhauses ausgelöst wurde. Ein Warmwasserbereiter hatte durch die Verharzung eines Federbolzens (Bild A2) die Gasexplosion verursacht. Durch die Verharzung des Federbolzen konnte das Gas unkontrolliert austreten und sich mit der Umgebungsluft zu einem explosiven Gas-Luft-Gemisch verbinden. Entzündet wurde die Explosion durch eine offene Flamme. Auf Bild 1 sind deutlich die verrußten Umrisse zu erkennen, wo ursprünglich der Warmwasserbereiter gestanden hatte. Durch die Hitzeentwicklung wurden Plastikteile in der näheren Umgebung geschmolzen. Die Ruß- und Hitzespuren in der Küche unterstreichen den Entstehungsort der Explosion. Die Bilder A3 und A4 zeigen die Auswirkungen der Gasexplosion sowohl auf eine gemauerte Innen- als auch auf eine gemauerte Außenwand. In beiden Fällen ist deutlich erkennbar, dass große Teile der Wände völlig herausgedrückt wurden und die übriggebliebenen Wandfragmente mit großen Rissen übersät sind. Auch die Gebäudeaußenwand ist mit Rissen versehen und Teile der Wand sind herausgedrückt worden (Bild A5). Das Gebäude befindet sich ohne die zusätzliche Absicherung der Sprießen in einem stark einsturzgefährdeten Zustand. Obwohl es sich um starke Beschädigungen an der Bausubstanz handelt, reicht die strukturelle Redundanz des Gebäudetragwerkes in diesem Schadensfall aus, um ein Gesamtversagen des Gebäudes zu verhindern.

Bild A1: Explosionsort

Bild A2: Explosionsursache: Verharzter Federbolzen

Bild A3: Äußere Mauerwerkswand nach der Explosion

Bild A4: Innere Mauerwerkswand nach der Explosion

Bild A5: Zerstörte Außenwand mit starker Rissbildung

9.1.2 Propangasexplosion in einem Reihenhaus

In einem zweigeschossigen Reihenhaus mit Flachdach kam es durch eine im Kellergeschoss gelagerte Butan/Propan Gasflasche zu einer Explosion. Unweit von dem Explosionsort wurden eine stabile Zwischentür zu einem kleinen Arbeitsraum beschädigt und die Glasscheiben der Fenster dieses Raumes zerstört. Im Erdgeschoss war die Glasscheibe des Küchenfensters zerstört, das Wohnzimmerfenster war hingegen aus der Verankerung gedrückt worden, ohne zu zerbersten. Im Obergeschoss wiesen alle Zimmer circa 2 bis 5 cm starke Risse in den Ecken zwischen den Wand- und Deckenelementen auf. Entsprechend diesem Rissverlauf ist zu erkennen, dass die Deckenelemente infolge der Druckentwicklung kurzzeitig angehoben wur-

den. Die Fenster waren auch in diesem Fall aus den Halterungen gedrückt. Die Untersuchung der Brand- und Explosionsursachenforschung ergab aufgrund der Zerstörungen am Inventar und am Gebäude sowie der Druck- und Hitzespuren, dass im eingelagerten Abstellraum unter der Kellertreppe eine Explosion stattgefunden hatte. Durch ein undichtes Ventil an einer Butan/Propan-Gasflasche konnte Gas aus der Flasche ausströmen und mit der Luft ein explosives Gemisch bilden. Die Zündung erfolgte durch die Funkenbildung einer Bohrmaschine. Bemerkenswert ist das auf Bild A6 und A7 zu erkennende kurzzeitige Abheben der Decke bei intakten Fensterscheiben und herausgedrücktem Fensterrahmen. Auf Bild A8 ist die intakte Vorderseite des Gebäudes mit dem herausgedrückten Fenstersturz und der herausgedrückten Zwischenstütze zu erkennen. Um eine Prognose über den entstandenen Explosionsdruck treffen zu können, ist es notwendig geeignete Annahmen für den Dachaufbau sowie den Wand-Decken Anschluss zu treffen. Der Ansprechdruck der Stahlbetondecke ergibt sich bei Vernachlässigung einer Anschlussbewehrung zu:

Eigengewicht Stahlbetondecke	6,25 kN/m²
Dachabdeckung	0,25 kN/m²
Dachabdichtung mit 5cm Kiesschüttung	1,00 kN/m²
Gesamtgewicht	7,50 kN/m²

Demzufolge müsste mindestens ein Druck in der Größenordnung von 75 mbar vorhanden gewesen sein, um die Decke anzuheben. Der Druckbereich in dem Fensterscheiben bersten liegt nach Bauer (1992) bei 75 mbar – 125 mbar. Ein Abheben der Deckenelemente bei intakten Fensterscheiben ist somit unter bestimmten Randbedingungen möglich.

Bild A6: Angehobene Decke im Badbereich

Bild A7: Angehobene Decke im Wohnbereich

Bild A8: Intakte Außenwand mit herausgedrücktem Fenstersturz

9.1.3 Explosion in einem Mehrfamilienhaus

Die Explosion in dem betroffenen Mehrfamilienhaus entstand durch ein Warmwasseraufbereitungssystem im Badezimmer einer Erdgeschosswohnung. Am stärksten waren Bad- und Schlafzimmer der Erdgeschosswohnung durch die Explosion betroffen. Die gemauerte Wand zwischen den beiden Räumen wurde völlig zerstört (Bild A9-A11). Die Gebäudeaußenwand des Badezimmers zeigt ebenfalls deutliche Auswirkungen einer starken Druckeinwirkung (Bild A12). Die Umfassungswände des Badezimmers wurden durch die Druckbelastung herausgedrückt. Die Untersuchungskommission bemerkte bei ihren Untersuchungen, dass keine Brandspuren in den Räumen zu erkennen waren. Sofern in dem Badezimmer ein zündfähiges

Gas- oder Dampf-Luft-Gemisch umgesetzt worden wäre, hätten sich zwangsläufig mindestens oberflächlich Hitzespuren an leicht brennbaren Materialen infolge der Einwirkung der bei der Gemischumsetzung auftretenden Flammenfront ausprägen müssen. Das Fehlen entsprechender Spuren berechtig daher im Umkehrschluss dazu, das Explosionsereignis nicht als Umsetzung eines Gas- oder Dampf-Luft-Gemisches zu bewerten. Es zeigte sich bei der weiteren Untersuchung, dass ein Wasservorratsbehälter mit einem Volumen von 80 Liter und einem zulässigen Betriebsüberdruck von 0 bar - also ein druckloses Warmwasserbereitungssystem - Ursache der Explosion gewesen war. Die Kupferummantelung des Vorratsbehälters wurde völlig aufgefaltet (Bild A13). Diese Spuren belegten eindrucksvoll, dass es innerhalb des Vorratsbehälters des Wasserspeichers zu einem außerordentlich hohem Druckanstieg gekommen sein musste, der letztlich zum Aufreißen des Kupferbehälters und zur Auffaltung des Kupfermantels und der Geräteverkleidung führte.

Im vorliegenden Fall wurde in dem Warmwasseraufbereitungssystem eine Mischbatterie ohne einen offenen Auslauf installiert, wodurch der an sich drucklose Wasserspeicher ständig unter Wasserleitungsdruck gehalten wurde. Aus ähnlichen Fällen ist seitens der Gerätehersteller bekannt, dass auch drucklose Wasserspeicher dem statischen Wasserdruck kurzzeitig widerstehen können. Bei der Aufheizung allerdings entstehen durch die Ausdehnungen des Wassers Drücke, denen diese Geräte nicht widerstehen können. Ein Thermostat, welches die Aufheizdauer regelt, wird unter diesen Druckbedingungen nach einer gewissen Zeit derart belastet, dass es ausfällt. In diesem Fall kommt es zu einer nicht geregelten, kontinuierlichen Aufheizung und somit zwangsläufig zu einer weiteren Ausdehnung des Wassers, was solange weiter geschieht, bis der Wasserspeicher explodiert. Aus Testergebnissen resultiert die Erkenntnis, dass dies bei ungefähr 6 bar geschieht. Mit dem Zerplatzten des Behälters kommt es zu einem Siedeverzug. Wasser siedet unter normalen Druckverhältnissen bei einer Temperatur von 100° C. Je höher der Druck ist, desto höher muss die Temperatur sein, um das Wasser zum Sieden zu bringen. Durch die Aufheizung von Wasser über 100 °C in einem Druckgefäß können in diesem große Energiemengen gespeichert sein. Bei einem plötzlichen Druckausgleich werden diese Mengen frei, was dazu führt, dass ein gewisser Teil des Wassers schlagartig verdampft. Wenn Wasser aus seinem Aggregatzustand in den gasförmigen Zustand übergeht, vergrößert sich sein Volumen um das circa 1700fache. Ein Siedeverzug kann also durchaus in seinen Folgen mit einer Explosion eines Gas-Luft-Gemisches verglichen werden. Aufgrund der beschriebenen Feststellungen sind die an dem Gebäude und dem Inventar vorgefundenen Schäden infolge eines explosionsartig wirkenden Druckaufbaus in der Raumatmosphäre ent-

standen. Gleichwohl handelt es sich dabei nicht um eine Explosion im chemischen Sinne sondern um einen Siedeverzug.

Die Wand zwischen Badezimmer und Schlafzimmer war eine leichte unbewehrte Mauerwand aus Betonblock bzw. Schlackebetonblocksteinen. Nach Mayrhofer (1992) versagen derartige Wände bei Drücken zwischen 0,14 bar und 0,2 bar. Die Außenwand hingegen ist deutlich stärker ausgebildet und dürfte einem größeren Druck standgehalten haben. Hier wurde jedoch nur der Fenstersturz aus der Verankerung gedrückt. Der Explosionsdruck dürfte in dem vorliegenden Fall unter 0,3 bar gelegen haben.

Bild A9: Explosionsort: Badezimmer

Bild A10: Zerstörte Zwischenwand

Bild A11: Schlafzimmer mit Schutt der Zwischenwand

Bild A12: Gebäudeaußenwand des Badezimmers

Bild A13: Zerstörtes Warmwasseraufbereitungssystem

9.1.4 Explosion in dem Gebäude Ronan Point

Am 16. Mai 1968 führte eine Gasexplosion in dem 18. Obergeschoss des 22stöckigen Fertigteilhochhauses Ronan Point in London zu einem Ausfall einer tragenden Außenwand und dadurch zu einem progressiven Einsturz der gesamten Südostecke des Wohngebäudes (Bild A14). Das explosive Gas-Luft-Gemisch hatte sich aufgrund eines defekten Gasanschlusses gebildet und wurde durch menschliches Fehlverhalten mit einem Streichholz entzündet. Die mit der Aufklärung der Katastrophe beauftragte Kommission stellte in einem Gutachten fest, dass durch die Explosion ein Druck von 20 bis 60 kN/m² auf die raumabschließenden Bauteile gewirkt haben musste [Wearne (2000)].

Bild A14: Ronan Point Gebäude

Die Wand-Decken-Verbindungen des Gebäudes wurden nach dem in Bild A15 dargestellten Larsen-Nielsen-System hergestellt, welches 1948 in Dänemark entwickelt und bauaufsichtlich zugelassen wurde. Bei diesem Verbindungssystem werden die Deckenelemente nur zu einem geringen Teil auf den Wandelementen direkt aufgelagert, eine kraftschlüssige Verbindung soll durch zusätzliche Stahlverbindungen gewährleistet werden. Der Nachteil dieses Systems ist, dass eine auf den Verbindungspunkt einwirkende Beanspruchung aufgrund der geringen Auflagefläche der Deckenelemente nahezu vollständig durch die Stahlverbindungen aufgenommen werden muss. Kohäsions- und Reibungskräfte zwischen den Fertigteilelementen können nicht ausreichend aktiviert werden. Anhand einer nachträglich durchgeführten Schadensanalyse konnte festgestellt werden, dass die Stahlverbindungen des Ronan Point Gebäudes aufgrund von Maßungenauigkeiten nicht passgenau ausgeführt werden konnten und somit erhebliche Ausführungsmängel aufwiesen. Die aufnehmbare Horizontalbelastung der Wand-Decken-Verbindungen wurde nach Griffiths & Pugsley (1968) zu einer mittleren Belastbarkeit der raumabschließenden Bauteile von lediglich 2,0 kN/m² ermittelt.

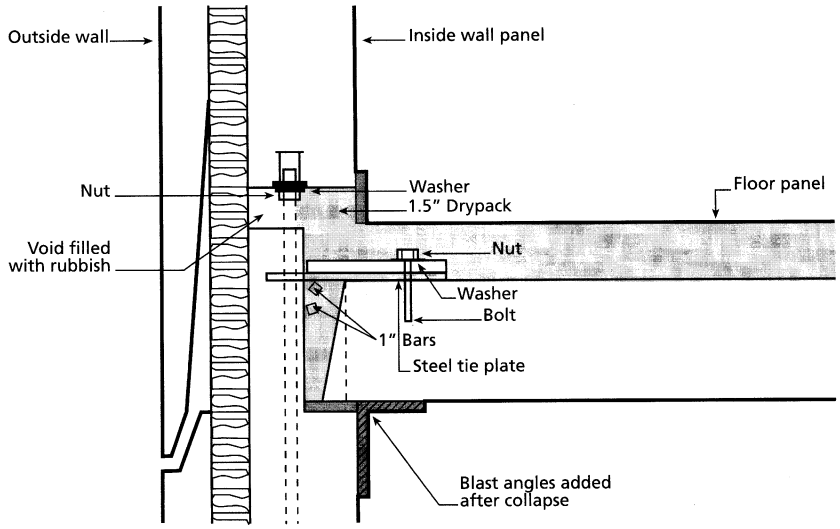


Bild A15: Verbindungspunkt des Larsen-Nielsen-Systems [Wearne (2000)]

Nach dem Einsturz des Ronan Point Gebäudes wurde von der Fachöffentlichkeit mit aller Deutlichkeit auf das Konzept der strukturellen Redundanz hingewiesen. Der Schadensfall führte zu Änderungen und Ergänzungen der britischen Gebäuderegelungen von 1970, die als Grundlage für den British Standard BS-CP 110-1972 dienten. Die diesbezüglich wichtigsten Neuerungen waren, dass seit diesem Ereignis jedes Gebäude mit mehr als 5 Stockwerken so zu konstruieren ist, dass es bei einem Ausfall eines tragenden Bauteils nicht zu einem Gesamtversagen des Bauwerkes kommt und bei einer lokalen Schädigung nur die unmittelbar benachbarten Stockwerke in Mitleidenschaft gezogen werden. Alle neu zu errichtenden Gebäude müssen nach Wearne (2000) einem Explosionsdruck von ungefähr 35 kN/m² und bereits bestehende Gebäude einem Explosionsdruck von ungefähr 17 kN/m² standhalten können.