

Standortspezifische Bewertung von Explosionsdruckwellen unter Berücksichtigung der Besonderheiten von Erdgaswolken

Cihan Cantay

TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG
Große Bahnstraße 31, 22525 Hamburg, Germany
ccantay@tuev-nord.de

Frank Blömeling

TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG
Große Bahnstraße 31, 22525 Hamburg, Germany
fbloemeling@tuev-nord.de

ABSTRACT

Druckwellen aus chemischen Reaktionen sind für kerntechnische Anlagen als zivilisatorisch bedingte Einwirkungen von außen im Rahmen der Schadensvorsorge für den jeweiligen Standort zu betrachten.

Grundsätzlich haben die Entfernung der kerntechnischen Anlage zum Explosionszentrum und die explosionsfähige Masse den größten Einfluss auf den ankommenden Überdruck. Jedoch hängt bei Gaswolkenexplosionen der entstehende Spitzenüberdruck und somit auch der ankommende Überdruck von weiteren Randbedingungen, unter denen eine Zündung des explosionsfähigen Gasgemisches stattfindet, ab. In diesem Beitrag werden die phänomenologischen Unterschiede und die Einflussparameter dargestellt.

Des Weiteren wird diskutiert, welche Anforderungen sich aus dem kerntechnischen Regelwerk in Bezug auf die Einwirkungen von Explosionsdruckwellen ergeben. Dabei wird auf mögliche abdeckende und standortspezifische Nachweiswege eingegangen. Das Augenmerk liegt hierbei auf tiefkalt verflüssigtem Erdgas (LNG) und dessen Eigenschaften.

EINLEITUNG

DRUCKWELLEN AUS CHEMISCHEN REAKTIONEN

Durch Lecks oder Leitungsbrüche freigesetzte Gaswolken breiten sich in der Umgebung aus und vermischen sich mit der Umgebungsluft. Dabei werden ggf. Zündfähigkeitsgrenzen des Gas-Luft-Gemisches durchlaufen. Zwischen den Zündfähigkeitsgrenzen kann das Gas mit einer hinreichend starken Zündquelle gezündet werden. Die hierfür erforderliche Energie hängt vom jeweiligen Gas ab. Methan, das mit mindestens 87,2 mol.-% Hauptbestandteil von LNG ist, benötigt im Vergleich zu anderen Gasen eine relativ hohe Zündenergie.

Durch die Zündung findet eine chemische Reaktion (Verbrennung) statt, die innerhalb der Wolke in einer sich selbst erhaltenden Reaktion weiter läuft. Anhand der hierbei auftretenden Reaktionsgeschwindigkeit lassen sich zwei Arten von Explosionen unterscheiden. Bei einer *Detonation* ist die Geschwindigkeit der Reaktionsfront schneller als die Schallgeschwindigkeit in der explosionsfähigen Wolke, während sich die Reaktionsfront einer *Deflagration* langsamer als die Schallgeschwindigkeit in der Wolke ausbreitet. Die Unterscheidung ist wichtig, da die Überdrücke, die bei einer Detonation erreicht werden, wesentlich höher sind als die bei einer Deflagration.

Ob sich eine Detonation oder eine Deflagration ausbildet, hängt neben den Gaseigenschaften von weiteren Faktoren ab. Eine maßgebliche Rolle spielen hierbei, neben der anfänglichen Zündenergie, Begrenzungen, Hindernisse sowie die Turbulenz innerhalb der Gaswolke. Eine zu mehreren Seiten begrenzte Explosion (Verdämmung) führt zu höheren Drücken als eine Explosion im Freien. Hindernisse (Verblockungen) wiederum erhöhen die Turbulenz innerhalb der Wolke, was auch wieder einen verstärkenden Einfluss auf den entstehenden Spitzenüberdruck hat. Eine Beschleunigung der

Reaktionsfront innerhalb der Wolke kann ebenfalls den Übergang einer Deflagration in eine Detonation bewirken.

Außerhalb der Gaswolke setzt sich die Drucküberhöhung als Druckwelle fort. Trifft diese Druckwelle auf ein Hindernis wie eine Wand, wird sie abrupt gebremst, verdichtet und reflektiert. Dies führt zu einer Erhöhung des statischen Überdruckes, die zu berücksichtigen ist. Zudem übt auch das nachströmende Gas im Nachgang der reflektierten Druckwellenfront einen dynamischen Druck auf das Bauwerk aus, der bei der Bauwerksauslegung ebenfalls berücksichtigt werden muss.

ANFORDERUNGEN AUS DEM KERntechnischen REGELWERK

Die Auslegung kerntechnischer Anlagen gegen Druckwellen aus chemischen Reaktionen ist an unterschiedlichen Stellen im kerntechnischen Regelwerk verankert. Im Folgenden werden exemplarisch die Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (SiAnf) [1] und die ESK-Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Behältern [2] betrachtet. Außerdem wird die sog. BMI-Richtlinie [3] erläutert, da sie oftmals für abdeckende Nachweise herangezogen wird. Weitere Regelwerke, auf die im Folgenden jedoch nicht eingegangen wird, sind u. a. [4] und [5].

SICHERHEITSANFORDERUNGEN AN KERNKRAFTWERKE

Im Anhang 3 „Anforderungen an den Schutz gegen Einwirkungen von innen und außen sowie aus Notstandsfällen“ der SiAnf behandelt das Kapitel 4.2.2.2 „Anlagenexterne Explosion“. Darin heißt es u. a., dass durch geeignete Maßnahmen oder Einrichtungen sicherzustellen ist, dass zu unterstellende anlagenexterne Explosionen die Sicherheit der Anlage nicht unzulässig beeinträchtigen. Für die bauliche Auslegung ist der in der BMI-Richtlinie [3] angegebene Druckverlauf anzunehmen, sofern keine Hinweise auf höher zu erwartende Druckverläufe vorliegen.

Welche konkreten Hinweise dies sein können, wird nicht weiter spezifiziert. Dennoch ergibt sich hier bei Vorliegen begründeter (standortspezifischer) Hinweise bereits die Möglichkeit, vom Druckverlauf, der in der BMI-Richtlinie festgelegt ist, abzuweichen.

ESK-LEITLINIEN

Anforderungen bzgl. zivilisatorisch bedingter Einwirkungen von außen sind in den Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Behältern im Kapitel 9.2.2 festgelegt. Demzufolge richten sich die Lastannahmen unter Beachtung der Gegebenheiten des Standortes nach dem Stand von Wissenschaft und Technik. Dabei orientiert sich die Entscheidung, welche Ereignisse als Auslegungstörfälle zu bewerten sind und für welche nur Schutzmaßnahmen unter dem Gesichtspunkt der Minimierung der Schadensauswirkungen erforderlich sind, an der Eintrittshäufigkeit und den Auswirkungen der Ereignisse.

Gemäß den ESK-Leitlinien sind Druckwellen in der Regel auslegungsüberschreitende Ereignisse, bei denen ausgehend von den Lastannahmen der BMI-Richtlinie bzw. aus standortspezifischen Festlegungen und von den eingelagerten nuklidspezifischen Aktivitätsinventaren sowie deren Freisetzungverhalten Maßnahmen zur Schadensreduzierung zu betrachten sind. Dem Gesichtspunkt der Reduzierung der Schadensauswirkung ist dann genügt, wenn die unter realistischen Randbedingungen ermittelten radiologischen Auswirkungen einschneidende Maßnahmen des Katastrophenschutzes nicht erforderlich machen.

Zusammenfassend finden sich auch in den ESK-Leitlinien zwei Wege der Nachweisführung. Zum einen kann von den Lastannahmen der BMI-Richtlinie ausgegangen werden. Es ist jedoch auch zulässig, standortspezifische Festlegungen heranzuziehen. Beide Fälle stehen in Bezug zu auslegungsüberschreitenden Ereignissen, für die die ESK-Leitlinien sogar den Maßstab vorgeben, gemäß dem der Minimierung der Schadensauswirkungen genüge getan ist.

BMI-RICHTLINIE

Gemäß der BMI-Richtlinie besteht die Auslegung der Kernkraftwerke gegen Explosionsdruckwellen aus zwei Säulen. Zum einen schreibt die BMI-Richtlinie für die Auslegung der zu schützenden Gebäude und

Anlagenteile einen anzusetzenden Druckverlauf vor. Zum anderen ist ein Sicherheitsabstand vom Ort des Umgangs mit explosionsfähigen Stoffen einzuhalten. Nach der Berechnungsvorschrift zur Bestimmung des erforderlichen Abstands ergibt sich der erforderliche Abstand D aus der zugrunde zu legenden, explosionsfähigen Masse m durch folgende einfache Masse-Abstand-Beziehung:

$$D = 8 m^{\frac{1}{3}}$$

Die anzusetzende explosionsfähige Masse hängt vom Stoff selbst und von der Art der Lagerung bzw. Beförderung ab. Beispielsweise ist für tiefkalt verflüssigte Gase wie z. B. LNG, das zum Großteil aus Methan besteht, bei ortsfesten Anlagen 10 % des Inhalts des größten Einzeltanks anzusetzen.

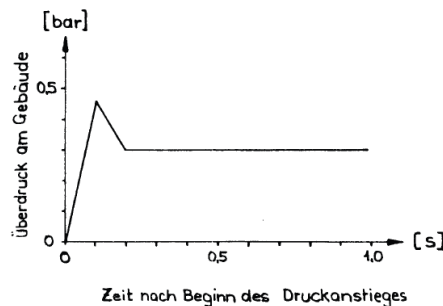


Abbildung 1: Druckverlauf gemäß BMI-Richtlinie [3]

Die Betrachtungen hinsichtlich des Schutzes von Kernkraftwerken vor äußeren Explosionsdruckwellen in der Phase der Einführung der BMI-Richtlinie [3] sind u. a. in [6], [7], [8] und [9] dokumentiert. Demzufolge ist der in der Abbildung 1 dargestellte Druckverlauf auf die Modellvorstellung einer Tankerkollision zurückzuführen, infolge derer Flüssiggas freigesetzt wird, auf der Wasseroberfläche verdampft, in Richtung des Kernkraftwerks driftet und unmittelbar am Kernkraftwerk gezündet wird. Da bei der Zündung einer Gaswolke im Freien im Allgemeinen eine deflagrative Verbrennung entsteht, sind demnach Deflagrationen bis zu einer gewissen Stärke durch die Auslegung nach dem Druckverlauf in Abbildung 1 abgedeckt, ohne dass ein Abstand hierfür kreditiert wird. Detonationen, wie sie z. B. bei festen Sprengstoffen entstehen, sind durch den Druckverlauf nicht abgedeckt. Damit auch diese abgedeckt sind, schreibt die BMI-Richtlinie zusätzlich einen Abstand zu Orten des Umgangs mit explosionsfähigen Stoffen vor.

Die BMI-Richtlinie lässt Abweichungen von der vorstehend skizzierten Vorgehensweise zu, wenn die Sicherheitsabstände, die sich aus der obigen Masse-Abstand-Beziehung ergeben, unterschritten werden. Geringere Sicherheitsabstände sind gemäß der BMI-Richtlinie zulässig, wenn

- das Kernkraftwerk bzgl. der Auslegung hinsichtlich seiner Festigkeit und induzierter Schwingungen soweit aufgerüstet ist, dass es entsprechend größeren Druckeinwirkungen standhalten kann, oder wenn
- sich die jeweiligen explosionsfähigen Stoffe in geringeren Abständen befinden müssen und für den Umgang mit diesen Stoffen geeignete primäre Sicherheitsmaßnahmen gegen das Auftreten eines druckwellenerzeugenden Störfalls oder Unfalls getroffen sind. Diesbezüglich ist nachzuweisen, dass nach den Maßstäben des in der Kerntechnik erforderlichen hohen Sicherheitsniveaus ausreichend Vorsorge gegen Schäden getroffen ist.

Der zweite Spiegelstrich zielt darauf ab, dass mit hoher Sicherheit Explosionsdruckwellen vermieden werden, während der erste Spiegelstrich auf eine spezifische Auslegung des Kernkraftwerks hinausläuft. Bei letzterem wird zwar suggeriert, dass die Lasten bei Unterschreitung der Sicherheitsabstände, die sich aus der Masse-Abstand-Beziehung ergeben, höher seien. Da es sich bei der Masse-Abstand-Beziehung jedoch um eine pauschale Bemessungsmethode, die eine Vielzahl von Stoffen abdecken soll, handelt, ist zunächst zu untersuchen, welche standortspezifischen Druckeinwirkungen sich tatsächlich ergeben. Auf welche Weise die standortspezifischen Druckeinwirkungen bestimmt werden können, ist nicht weiter ausgeführt.

BERECHNUNGSMETHODEN

Das Spektrum der Berechnungsmethoden für Druckwellen aus chemischen Reaktionen reicht von ingenieurmäßigen Methoden bis zu numerischen Strömungssimulationen (CFD-Simulationen). Erstere zeichnen sich durch einen verhältnismäßig geringen Berechnungsaufwand aus, sind aber eingeschränkt in ihrer Anwendbarkeit und Detailgenauigkeit. CFD-Simulationen sind in dieser Hinsicht deutlich weniger eingeschränkt, aber mit einem viel größeren Berechnungsaufwand verbunden. Außerdem besteht z. B. bei Simulationen, die auch die explosive Verbrennung simulieren, anhaltend Entwicklungs- bzw. Validierungsbedarf. Von daher sind ingenieurmäßige Berechnungsmethoden heutzutage Stand der Technik und sollen im Folgenden im Fokus stehen.

Stellvertretend für zwei unterschiedliche Ansätze werden hier die TNT-Äquivalent-Methode und die Multi-Energy-Methode (MEM) kurz vorgestellt. Für weitere Ansätze sei z. B. auf das Yellow Book [10], den Dechema-Leitfaden [11] oder das Handbuch [12] verwiesen.

TNT-ÄQUIVALENT-METHODE

Die Trinitrotoluol (TNT)-Äquivalent-Methode ist die am häufigsten verwendete Methode zur Ermittlung von Überdrücken aus Explosionsszenarien. Um für die Vielzahl an explosiven Stoffen und Stoffgemischen eine Bezugsgröße für die Wirkung zu erhalten, wurde das TNT-Äquivalent eingeführt. Hierbei wird die Masse des explosionsfähigen Stoffes in eine äquivalente TNT-Masse m_{TNT} umgerechnet und der entstehende Überdruck im massenskalierten Abstand aus einem Diagramm, das auf Basis empirisch ermittelter Druckverläufe von TNT-Detonationen erstellt wurde, abgelesen. Bei der Bewertung von Gaswolkenexplosionen mit der TNT-Äquivalent-Methode wird somit a priori unterstellt, dass der Abbrand einer Gaswolke einen identischen Überdruck erzeugt wie eine detonativ verlaufende TNT-Explosion. Zur Kompensation dieses Nachteils der TNT-Äquivalent-Methode hinsichtlich der Bewertung von Gaswolkenexplosionen gilt es eine Proportionalitätskonstante, den sogenannten Wirkfaktor, festzulegen. Die Wirkfaktoren aus beobachteten Gaswolkenexplosionen reichen von unter einem Prozent bis zu mehreren zehn Prozent. Grund hierfür ist, dass mehrere fallspezifische Parameter (z. B. Gastyp, Reaktionsfrontgeschwindigkeit, Verdämmung) den Wirkfaktor beeinflussen und je nach Anwendungsleitfaden berücksichtigt werden oder nicht.

MULTI-ENERGY-METHODE

Die Multi-Energy-Methode (MEM) wurde im Unterschied zur TNT-Äquivalent-Methode explizit für Gaswolkenexplosionen entwickelt und basiert auf Explosionsdruckkurven, die für bodennahe halbsphärische Gaswolken abgeleitet wurden. Des Weiteren beruht die MEM auf der Beobachtung, dass die Verbrennung einer Gaswolke nur in Bereichen, die von Wänden oder anderen Begrenzungen umschlossen oder zumindest teilweise begrenzt sind, zu einer Überdruckwelle führt. Nach allgemeiner Auffassung führt die MEM bei der Ermittlung der Überdrücke infolge von Gaswolkenexplosionen zu realistischeren Ergebnissen als die TNT-Äquivalent-Methode.

Ein maßgeblicher Bestandteil der MEM ist die Bestimmung des gedämmten bzw. von Hindernissen umgebenen Anteils des Volumens der Gaswolke. Dieser Anteil ist für den entstehenden Überdruck maßgeblich verantwortlich. Ein guter Leitfaden zur Bestimmung der gedämmten Gasvolumina ist in dem Handbuch [12] zu finden. Im Falle von mehreren Explosionsherden, die durch mehrere Zündquellen und gedämmte oder umschlossene Gaswolken innerhalb einer Industrieanlage entstehen, können diese je nach Entfernung zueinander zusammengefasst oder separat betrachtet werden.

Ein weiterer Bestandteil der Methode ist die Auswahl einer von zehn Explosionsklassen, die maßgeblich die Ausprägung der Druckwelle bestimmen, wodurch nicht a priori eine Detonation unterstellt wird. Hier kommt zum einen die Erfahrung des Anwenders zum Tragen, es gibt aber auch Leitfäden, die bei der Bestimmung der Explosionsklasse helfen [12].

Der freie bzw. ungedämmte Anteil der Gaswolke wird einer geringeren Explosionsklasse zugeordnet und der aus ihr resultierende Druckverlauf wird zu dem Druckverlauf der gedämmten Gaswolkenexplosion addiert [10]. Ein konservativer Ansatz ist es, die für die gesamte Gaswolke die höchste zuvor bestimmte Explosionsklasse zu unterstellen.

In Abhängigkeit von der gewählten Explosionsklasse und einem dimensionslosen Abstand ergeben sich die dimensionslosen, statischen und dynamischen Überdrücke aus den Kurvenscharen in der Abbildung 2.

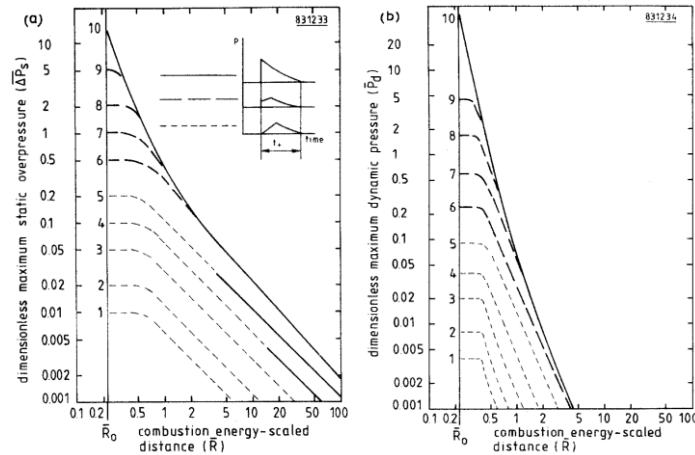


Abbildung 2: skalierte statische und dynamische Überdrücke in Abhängigkeit der Explosionsklasse [13]

In den dimensionslosen Abstand geht u. a. die im betrachteten Volumen enthaltene Zündenergie ein. Darüber hinaus liefert die MEM auch Informationen über die Form der Druckkurve und die Dauer der Überdruckphase.

BESONDERHEITEN VON ERDGASWOLKEN

SCHWERGASWOLKEN

Methan hat bei Normbedingungen eine geringere Dichte als Luft. Eine Erdgaswolke, die hauptsächlich aus Methan besteht, würde demnach am Leakageort austreten und in der Luft aufsteigen. Anders ist die Situation bei tiefkalt verflüssigtem Erdgas. Tritt dieses aus, verdampft es und es bildet sich eine Erdgaswolke, die schwerer ist als Luft, eine sogenannte Schwergaswolke. Schwergaswolken erreichen eine maximale Höhe, nach der die vertikale Komponente des Austrittsimpulses auf null gesunken ist, und strömen aufgrund der Schwerkraft wieder zurück in Richtung des Bodens [11]. In der Abbildung 3 ist die Ausbreitung einer Schwergaswolke schematisch dargestellt. Gemäß [14] breiten sich Schwergaswolken am Boden ähnlich wie eine Flüssigkeit aus.

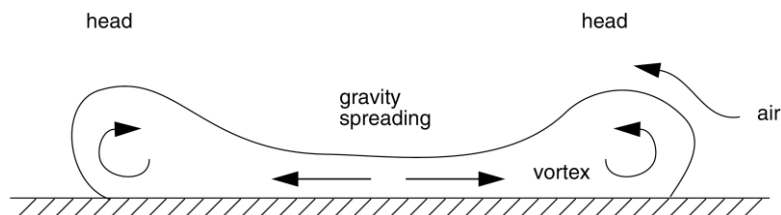


Abbildung 3: Ausbreitung einer Schwergaswolke [10]

EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

Experimentelle Ergebnisse [15], [16] und [17] zeigen, dass Methan/Luft-Wolken im Freien (ohne Hindernisse/Verdämmung) laminar oder deflagrativ mit geringer Druckentwicklung abbrennen. Bei Untersuchungen von flachen Methan/Luft-Wolken sind unter Variation von Hindernisanordnungen und zusätzlichem Turbulenzeintrag nur moderate Überdrücke entstanden [15], [17]. Die Detonation einer großen, freien Erdgaswolke im Freien konnte bei experimentellen Versuchen bisher nicht eingeleitet wer-

den. Gemäß dem Yellow Book [10] benötigt eine stöchiometrische Methan/Luft-Wolke in freier Umgebung für eine detonative Zündung eine Zündenergie von 230 MJ. Da dieser Wert für die Zündenergie in den experimentellen Ergebnissen bisher nicht erreicht wurde, ist die Möglichkeit einer Detonation bei einer standortspezifischen Betrachtung weiterhin zu bewerten.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Auslegung nach dem Druckverlauf in der Abbildung 1 und die Einhaltung des Sicherheitsabstands gemäß der Masse-Abstand-Beziehung aus der BMI-Richtlinie stellen einen konservativen Schutz von kerntechnischen Einrichtungen gegen Explosionsdruckwellen dar. Jedoch können nach dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik mit ingenieurmäßigen Methoden wie z. B. der Multi-Energy-Methode Lasteinwirkungen bestimmt werden, die auch geringer ausfallen können, als die Auslegung nach der BMI-Richtlinie es voraussetzt. Diese Vorgehensweise steht in keinem Widerspruch zum kerntechnischen Regelwerk und bietet die Möglichkeit, Bewertungen für kerntechnische Einrichtungen hinsichtlich von Explosionsdruckwellen standortspezifisch durchzuführen. Auf diese Weise lassen sich insbesondere stoffspezifische Eigenschaften, wie beispielsweise die von tiefkalt verflüssigtem Erdgas, berücksichtigen.

REFERENZEN

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke, vom 03.11.2015 (BAnz AT 30.03.2015 B2)
- [2] Entsorgungskommission ESK, Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Behältern, vom 10.06.2013
- [3] Bundesminister des Innern, Richtlinie für den Schutz von Kernkraftwerken gegen Druckwellen aus chemischen Reaktionen durch Auslegung der Kernkraftwerke hinsichtlich ihrer Festigkeit und induzierter Schwingungen sowie durch Sicherheitsabstände, vom 13.09.1976 (BAnz 1976, Nr. 179)
- [4] Entsorgungskommission ESK, Leitlinien zur Stilllegung der kerntechnischen Anlagen, vom 05.11.2020
- [5] Entsorgungskommission ESK, Leitlinien für die Zwischenlagerung von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, vom 09.12.2021
- [6] Institut für Reaktorsicherheit der Technischen Überwachungs-Vereine e. V., Tagungsbericht – Schutz von Kernkraftwerken gegen äussere Einwirkungen – Flugzeugabsturz, Druckwellen, Erdbeben -, 10. IRS-Fachgespräch in Köln 30. und 31.10.1974, IRS-T-27 (April 1975)
- [7] Batelle-Institut e.V. Frankfurt, Studie über die Druckwellenentstehung und –ausbreitung bei Gasexplosionen, Mai 1973
- [8] Batelle-Institut e.V. Frankfurt, Auslegung von Kernkraftwerken gegenüber äußeren Gasedetonationen, Mai 1973
- [9] Batelle-Institut e.V. Frankfurt, Statusbericht über die denkbare äußere Druckbelastung von Kernkraftwerken durch Gasexplosionen, 1977, BF-R-62.968-1
- [10] TNO, Methods for the calculation of Physical Effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases), Yellow Book, CPR 14E 3rd Edition rev.2 2015
- [11] DECHEMA, Auswirkungsbetrachtungen bei störungsbedingten Stoff- und Energiefreisetzungen in der Prozessindustrie, ISBN 978-3-899746-156-74
- [12] American Institute of Chemical Engineers, Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure Vessel Burst, BLEVE and Flash Fire Hazards, 2nd Edition 2010, ISBN 978-0-470-25147-8
- [13] A.C. van den Berg, The Multi-Energy Method – A framework for vapour cloud explosion blast prediction, 1985
- [14] Gordon Milne, Explosion & Gas Release from LNG Carriers
- [15] H. Pfortner u. H. Schneider, Die Verbrennung großer freigesetzter Gaswolken am Beispiel Erdgas, ISSN 0342-1953, von 1989
- [16] H. Pfortner u. H. Schneider, Gasexplosionen und deren Wirkung auf die Umgebung, von 1979
- [17] H. Pfortner u. H. Schneider, Experimental Investigations into the Deflagration of Flat, Premixed Hydrocarbon/Air Gas Clouds, von 1988