

# Explosionsverhalten von Wasserstoff - Betrachtungen zum Explosionsbereich und zur Zündenergie



Arbeitspapier, Februar 2025

Dr. Dana Meißner, Institut für Sicherheitstechnik / Schiffssicherheit e.V.

## 1. Hintergrund

Im Zusammenhang mit dem Einsatz verschiedener alternativer Kraftstoffe (z. B. LNG, LPG, Wasserstoff, Ammoniak) rücken Fragen zum Brand- und Explosionsschutz von Anlagen, die diese Kraftstoffe lagern, transportieren oder verarbeiten, vermehrt in den Fokus.

Es gilt also zu klären, in welchen Mischungsverhältnissen mit Luft ein Gas entzündet werden kann, wie der folgende Prozess der Verbrennung abläuft und zu welchen Schäden er führen kann. Dementsprechend müssen angepasste Schutzmaßnahmen ergriffen werden. Dabei werden im allgemeinen Maßnahmen zum Brandschutz und zum Explosionsschutz voneinander unterschieden. Daraus ergibt sich die Frage, wie ein Brand in Abgrenzung zu einer Explosion definiert ist.

## 2. Begriffsbestimmungen Explosion/Brand

Bei näherer Beschäftigung mit den Begriffen Brand, Explosion, explosionsfähiges Gemisch, explosionsfähige Atmosphäre, Explosionsbereich und Explosionsgrenzen trifft man derzeit auf unkonkrete und widersprüchliche Begriffsbestimmungen, Übersetzungsfehler, inkonsequente Bezeichnungen und synonyme Verwendungen von Begriffen, die aber nicht dasselbe bedeuten.

Die Norm ISO 8421-1[1] unterscheidet zwischen Explosion und Brand:

*Explosion: Abrupt oxidation or decomposition reaction producing an increase in temperature, pressure or in both simultaneously.*

*Fire: 1) Process of combustion characterized by the emission of heat accompanied by smoke or flame or both. 2) Combustion spreading uncontrolled in time and space.*

Eine Explosion unterscheidet sich also von einem Brand vor allem durch den Begriff „abrupt“, also plötzlich. Die meisten Regelwerke zum Explosionsschutz in Deutschland verwenden die Definitionen in Anlehnung an die ISO 8421-1. So definiert z.B. die TRGS-720 [2] wie folgt:

*Die Explosion im Sinne dieser Technischen Regel ist eine plötzliche Oxidationsreaktion mit Anstieg der Temperatur, des Druckes oder beidem gleichzeitig.*

Mit dieser Begrifflichkeit ist jedoch auch ein einfaches Brandereignis beschreibbar – es sei denn, man definiert das Wort „plötzlich“ genauer, allerdings:

*In Rechtsprechung und Literatur hat sich bisher keine einheitliche Interpretation des Merkmals der Plötzlichkeit durchgesetzt. [3]*

Hinzu kommt, dass auch das Ausbrechen eines Brandes in der Regel ein plötzliches Ereignis ist und auch hier ein „plötzlicher“ Anstieg von Temperatur und Druck stattfindet.

Die DGUV Information 213-106 [4] formuliert die Sache etwas umfangreicher:

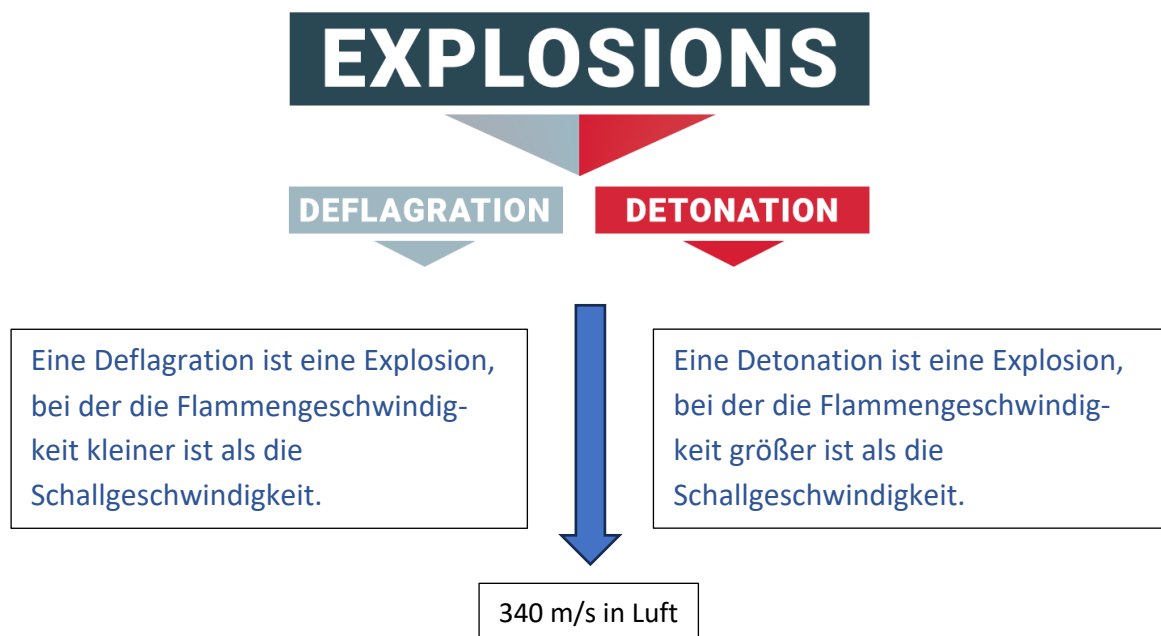
*Damit sich eine Explosion ereignen kann, müssen folgende Bedingungen gleichzeitig erfüllt sein:*

- *Vorhandensein brennbarer Stoffe. Sie können als Gase, Nebel, aus Flüssigkeiten entstandene Dämpfe oder Stäube vorliegen.*
- *Vorhandensein eines Oxidationsmittels, z. B. Sauerstoff in Luft.*

- *Gemischbildung durch feine Verteilung der brennbaren Stoffe im Oxidationsmittel innerhalb eines durch die Explosionsgrenzen definierten Konzentrationsbereiches*
  - *Wirksamkeit einer Zündquelle*
- Ist eine der Bedingungen nicht erfüllt, kann es nicht zu einer Explosion kommen. Bei fehlender Gemischbildung kann jedoch ein Brand entstehen.*

Hier erfolgt scheinbar eine Trennung zwischen Explosion und Brand, da sich eine Explosion nur in den Gemischen innerhalb der Explosionsgrenzen entwickeln kann. Die Definition der Explosionsgrenzen im gleichen Dokument verwischt diese Trennung jedoch wieder.

Die amerikanische National Fire Protection Association NFPA unterscheidet nicht zwischen Brand und Explosion, sondern unterteilt den Begriff der Explosion in Deflagration und Detonation [5]. Dabei ist eine Deflagration eine Explosion, bei der die Flammengeschwindigkeit kleiner ist als die Schallgeschwindigkeit. Bei einer Detonation ist sie größer.



Nach dieser Definition ist jeder Brand eine Deflagration, da keine minimale Flammengeschwindigkeit definiert ist. Da jede Deflagration eine Explosion ist, ist auch jeder Brand eine Explosion.

### 3. Explosionsgrenzen

Nach der Definition der NFPA beschreibt die untere Explosionsgrenze demnach die untere Deflagrationsgrenze, also das Mischungsverhältnis, ab der sich eine Flamme mit messbarer Geschwindigkeit ausbreiten kann. Diese Geschwindigkeit kann jedoch sehr klein sein.

In der europäischen und deutschen Sicherheitsliteratur und in Regularien wird dieser Parameter jedoch sehr oft undifferenziert verwendet, worauf auch in verschiedener Fachliteratur hingewiesen wird: *Einige Normen führen die sogenannte „Explosionsgrenze“ falsch ein. Dies geschieht trotz der Tatsache, dass es einen erheblichen Unterschied zwischen der „Entflammbarkeitsgrenze“, die für Deflagrationen relevant ist, und der „Detonationsgrenze“ geben kann.[6]*

Auch die Definition der Explosionsgrenzen wird für die gängigen deutschen Vorschriften in Anlehnung an die Definition aus der ISO 8421-1 [1] verwendet. Bereits in diesem ISO-Standard erfolgt jedoch die Vermischung der Begriffe brennbar (flammable) und explosiv (explosive):

### **1.30 flammable (explosive) limits**

*1.30.1 Lower Flammable Limit LFL: Minimum concentration of vapour-to-air below which propagation of a flame will not occur in the presence of an ignition source.*

*1.30.2 Upper Flammable Limit UFL: Maximum vapour-to-air concentration above which propagation of a flame will not occur.*

Bereits in der Überschrift wird brennbar und explosiv synonym verwendet, obwohl in der Begriffsbestimmung zuvor ein Unterschied zwischen Explosion und Brand vorgenommen wurde. Die Definition der unteren bzw. oberen Entflammbarkeitsgrenzen wird daher in den Regelwerken gleich den Explosionsgrenzen gesetzt und ist im Deutschen wie folgt übersetzt [2], [4]:

*Explosionsgrenzen sind Grenzen des Explosionsbereiches. Die untere Explosionsgrenze (UEG) bzw. die obere Explosionsgrenze (OEG) sind die untere bzw. obere Konzentrationsgrenze (Stoffmengenanteil) eines brennbaren Stoffes in einem Gemisch von Gasen, Dämpfen, Nebeln oder Stäuben mit Luft (oder einem anderen Oxidationsmittel), in dem sich nach dem Zünden eine von der Zündquelle unabhängige Flamme gerade nicht mehr selbstständig fortpflanzen kann.*

Das Kriterium ist also, bei welchen Mischungsverhältnissen sich eine Flamme von der Zündquelle ablösen kann und selbstständig durch ein gasgefülltes Volumen bis zu dessen Grenzen fortsetzen kann. In dieser Definition fehlt der sonst getroffene Unterschied „plötzlich“ für die Abgrenzung zwischen Brand und Explosion. Die Definition sagt nichts über die Geschwindigkeit der Flammenfront und beschreibt daher nur die Bedingungen der selbstständig ablaufenden Brennbarkeit an sich. Dennoch werden diese Grenzen in der Regel als Explosionsgrenzen bezeichnet. Wenn man, wie die NFPA dies tut, jeden Brand als Explosion betrachtet, dann wäre diese Bezeichnungsweise korrekt, allerdings mit der Konsequenz, dass es keinen Unterschied zwischen Brandschutz und Explosionsschutz geben kann.

#### 4. Bestimmungsmethoden von Explosionsgrenzen

Es gibt verschiedene genormte Methoden zur Bestimmung der Explosionsgrenzen [7]. Alle beruhen auf dem Grundprinzip der Zündung eines Gasgemisches in einem begrenzten Volumen und der Beobachtung der Flammenwanderung zu den Volumengrenzen. In Europa wird in der Regel die Methode gemäß EN 1839 [8] genutzt, in Amerika geht man nach ASTM E-681 [9] vor. Die folgende Tabelle fasst die Eckdaten der Versuchsmethode zusammen:

| Methoden     | Testvolumen   | Zündung                            | Kriterium Brennbarkeit  |
|--------------|---|------------------------------------|---|
| ASTM E-681   | vertikales Rohr, Durchmesser 2 – 8 cm, Länge 1 – 1,5 m bzw. runder geschlossener Behälter 5 dm <sup>3</sup> | Funken                             | Sichtbare Flammenfortpflanzung vom unteren bis zum oberen Ende des Rohrs bzw. dreidimensionale Ausbreitung der Flamme bis zu den Behältergrenzen                            |
|              |   |                                    | <b>Kriterium Explosion</b>  |
| EN 1839 tube | vertikales Rohr 8 cm x 30 cm  | Hochspannungsfunken oder Glühdraht | Ablösung der Flamme von der Zündquelle und eigenständige Fortpflanzung im Volumen über eine Strecke von mindestens 10 cm, Druckanstieg um 5 % bezogen auf den Ausgangsdruck |
| EN 1839 bomb | runder geschlossener Behälter $V \geq 5 \text{ dm}^3$   | E = 10–20 J                        |   |

**Tabelle 1:** Eckdaten für die in den Testmethoden eingesetzten Randbedingungen. Bereits in den Beschreibungen wird als Erfolgskriterium einmal von Brennbarkeit und einmal von Explosion gesprochen, obwohl sachlich das gleiche gemeint ist.

Die ASTM weist auf Ihrer Seite auf Folgendes hin [9]:

*Die untere Entflammbarkeitsgrenze (LFL) und die obere Entflammbarkeitsgrenze (UFL) werden manchmal als untere Explosionsgrenze (LEL) bzw. obere Explosionsgrenze (UEL) bezeichnet. Da die Begriffe LEL und UEL jedoch auch verwendet werden, um andere Konzentrationen als die in dieser Prüfmethode definierten Grenzwerte zu bezeichnen, müssen die Definitionen genau geprüft werden, wenn LEL- und UEL-Werte angegeben oder verwendet werden.*

Es wird also auf den Unterschied zwischen Entflammbarkeitsgrenzen und Explosionsgrenzen hingewiesen, ohne den Unterschied zu erklären und im Widerspruch zur Herangehensweise der NFPA. Interessant bei der EN 1839 ist, dass als Kriterium für eine Explosion ein Druckanstieg um 5 % in Bezug auf den Ausgangsdruck aufgenommen wurde. Man hat allerdings bei der Durchführung festgestellt, dass dieser Wert auch dann häufig überschritten wird, wenn das andere Kriterium, nämlich die selbstständige Flammenfortpflanzung nicht ausreichend erfolgte [10]. Es ist zu erwarten, dass auch Verbrennungsprozesse im Testvolumen – in welcher Ausdehnung und Dauer auch immer – zu einer Wärmefreisetzung und damit zu einem Druckanstieg führen. Da auch hier kein Zeitraum für den Druckanstieg definiert ist, ist das Kriterium nicht geeignet, um zwischen Brand und Explosion zu unterscheiden.

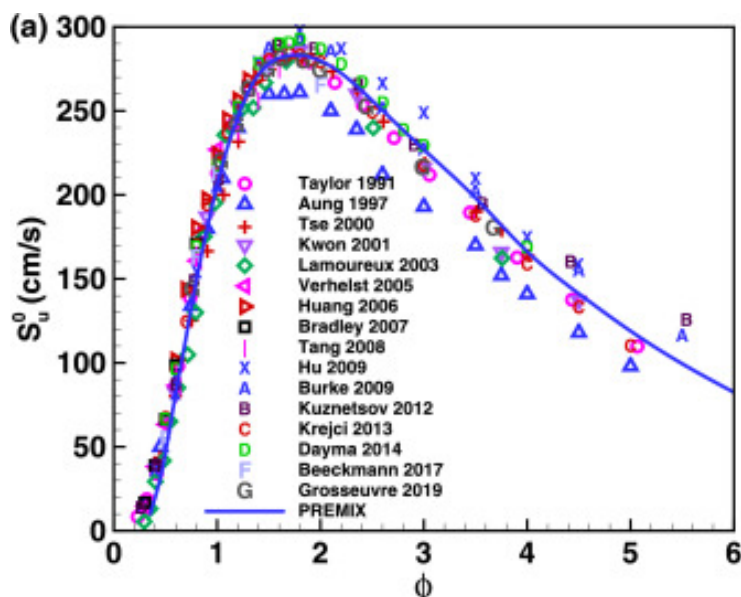
#### 5. Detonationsgrenzen

Auch die Definition einer Detonation ist schwammig. In den meisten Fällen wird sie mit der Fortpflanzung der Verbrennungsreaktion oberhalb der Schallgeschwindigkeit verknüpft [11], wobei nicht ganz klar ist, welche Schallgeschwindigkeit gemeint ist – die von Luft oder die des detonierenden Gasgemisches? Gelegentlich findet man die Angabe einer konkreten Fortpflanzungsgeschwindigkeit

von 600 m/s [12] oder 1000 m/s [13] als Abgrenzung zwischen Deflagration und Detonation. Unklar bleibt auch, was sich eigentlich „fortpflanzt“ – die Definitionen verwenden die Flammengeschwindigkeit (flame speed) [5] oder die Verbrennungsgeschwindigkeit (burning velocity) oder die Druckwelle (shock wave) [14].

Andere Definitionen beruhen auf der Unterscheidung des Zündmechanismus für das unverbrannte Gemisch vor der Flammenfront: Für eine Deflagration wird die Zündung infolge der Erwärmung durch das bereits brennende Gemisch postuliert, während die Detonation sich stoßwelleninduziert fortpflanzt – die notwendige Zündtemperatur wird also durch einen starken Verdichtungsstoß erzeugt [14], [15]. Diese Definitionsweise lässt – allerdings nur für sich entzündende Gase! – die These zu, dass es im Freien keine Detonation von Gasen geben kann, da ein derartiger Druckaufbau ohne ein Umschließungsvolumen nicht möglich ist. Für flüssige/feste Explosivstoffe trifft das nicht zu, u. a. da der Grundmechanismus der Explosion bei diesen Stoffen in der Regel auf einer Zersetzungsreaktion und nicht auf einer oxidativen Verbrennung beruht.

In der Tat gibt es bisher offensichtlich keine experimentellen Nachweise von Detonationen freigesetzter Gase. Diese These wird gestützt durch die Tatsache, dass die laminare Flammengeschwindigkeit von Wasserstoff maximal bei etwa 3 m/s liegt (Abbildung 1) – weit entfernt von der Schallgeschwindigkeit in Luft (ca. 340 m/s) und noch weiter entfernt von der Schallgeschwindigkeit in einem stöchiometrischen Wasserstoff-Luft-Gemisch (975 m/s).

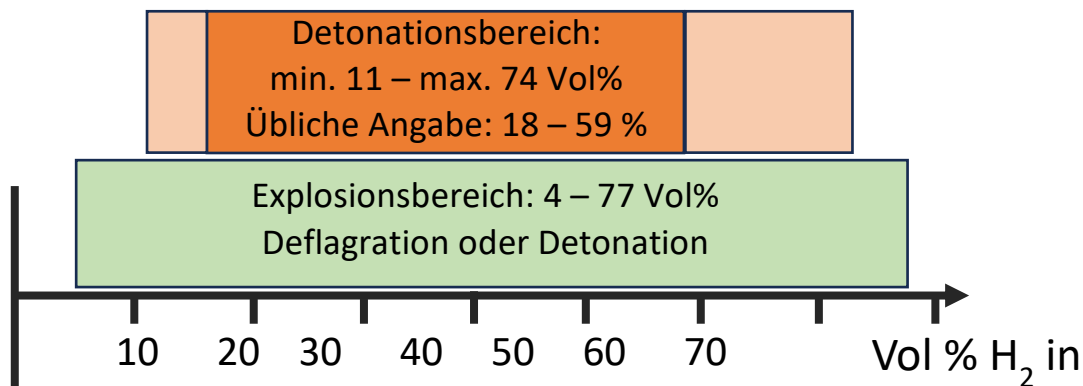


**Abbildung 1: Bestimmung der laminaren Flammgeschwindigkeit von Wasserstoff [aus: [15]]**

Auch turbulente Flammgeschwindigkeiten von Wasserstoff sind „nur“ bis etwa 10-mal größer als die laminare und erreichen damit nicht die Schallgeschwindigkeit. Da Wasserstoff die höchste laminare Flammgeschwindigkeit aller Gase besitzt, kann die Aussage, dass es keine Detonation von Gasen im Freien gibt, generell für Gase angenommen werden.

Für eine Detonation ist also ein Umschließungsvolumen notwendig. Die Größe und Form dieses Volumens haben erheblichen Einfluss auf die mögliche Entstehung einer Detonation. Da die Detonation selbst nicht eindeutig definiert ist und der Übergang von einer Deflagration zu einer Detonation geometrieabhängig sowie fließend ist, ist die Definition des Begriffs der Detonationsgrenzen kaum möglich. Eindeutig ist jedoch, dass der Detonationsbereich innerhalb des oben erläuterten Explosionsbereiches liegen muss (Abbildung 2). Für Wasserstoff wird in verschiedensten Regelwerken und Sicherheitsdatenblättern ein Explosionsbereich von ca. 4 – 77 Vol%

angegeben. Die Angaben für den Detonationsbereich bewegen sich, je nach Versuchsbedingungen, zwischen minimal 11 und maximal 74 Vol% [16], [17], [18].



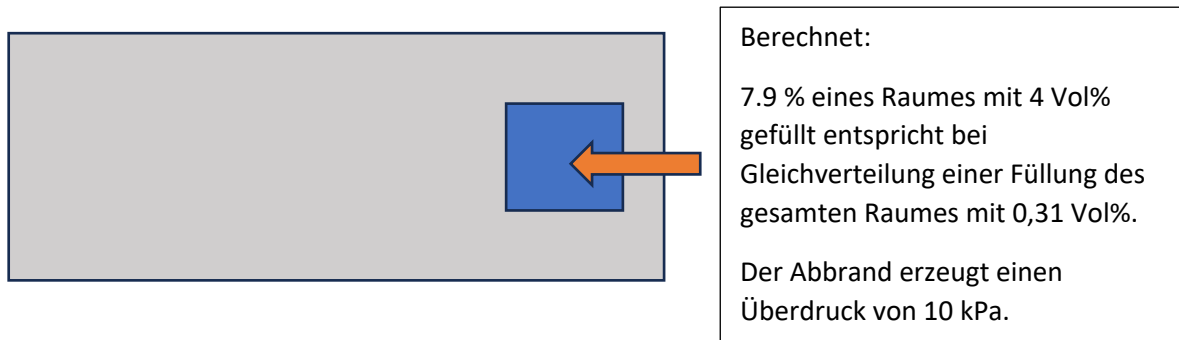
**Abbildung 2: Explosionsbereich und Detonationsbereich von Wasserstoff**

Die Gefahr einer Detonation im Freien erscheint insbesondere für Wasserstoff auch deshalb unrelevant, da eine freigesetzte Wasserstoffmenge nur zu etwa 10 % tatsächlich verbrennt, da die Diffusions- und Verteilungsgeschwindigkeit von Wasserstoff größer ist als die Flammgeschwindigkeit. Die Verdünnung einer Wasserstoffwolke unter die notwendige Entflammbarkeitsgrenze erfolgt also offensichtlich so schnell, dass die Verbrennung „nicht hinterherkommt“ [16], [19]. Für Freiluftbrände von Kohlenwasserstoffgasen werden daher höhere Schäden erwartet als für Wasserstoff, da diese langsamere Diffusionsgeschwindigkeiten aufweisen. So breitet sich Wasserstoff in Luft ca. drei Mal schneller aus als Methan [20]. Für die im HyMeAS-Projekt betrachteten neuen Anwendungsszenarien von Wasserstoff ergibt sich die Frage, ob diese Fakten auch auf den Einsatz von tiefkaltem Wasserstoff übertragbar sind. Die tiefen Temperaturen werden die Dichte des Wasserstoffgases deutlich beeinflussen, zudem ist zu erwarten, dass Sauerstoff (Siedepunkt  $-183\text{ °C}$ ) auf einer Lache von flüssigem Wasserstoff ( $-253\text{ °C}$ ) auskondensiert und somit ggf. bei einer Wiederverdampfung ein sauerstoffangereichertes Gemisch und somit eine erhöhte Brandgefahr entstehen könnte. Aktuelle Experimente mit freigesetztem flüssigem Wasserstoff befassen sich bereits mit diesen Fragestellungen [21].

## 6. Sicherheit in geschlossenen Räumen

Wenn im Freien (unconfined) davon ausgegangen werden kann, dass sich der Wasserstoff so schnell verteilt, dass nur ein Bruchteil der freigewordenen Menge verbrennt, wäre es ein Ansatz für geeignete Sicherheitsmaßnahmen herauszufinden, ab wann eine Wasserstoff-Verbrennung als „quasi-im Freien“ (nearly unconfined) betrachtet werden kann. Ein Ansatz in dieser Richtung beruht auf der Annahme, dass bis zu einem Explosionsdruck von maximal 10 kPa in einem Umschließungsvolumen keine nennenswerten Schäden (wie z.B. Bruch von Fensterscheiben) auftreten [22]. Es wurde berechnet, dass ein Volumen mit 0,31 Vol% Wasserstoff gefüllt sein muss, um einen solchen Druck bei einer Verbrennung zu erzeugen. Dieser Wert liegt deutlich unter der unteren Explosionsgrenze von Wasserstoff, so dass auf den ersten Blick eine solche Verbrennung gar nicht möglich ist. Die Angabe ist jedoch als gleichverteilter Durchschnittswert für das gesamte Volumen zu betrachten. Wenn im gleichgroßen Volumen ein Anteil von 7,9 % mit 4 % Wasserstoff gefüllt sind, so könnte in dieser Raumzelle sehr wohl eine lokale Explosion stattfinden und einen Druck von 10 kPa erzeugen [23]. Auf das gesamte Volumen bezogen wurde der sich ergebende Durchschnittswert von 0,31 Vol% als „Upper

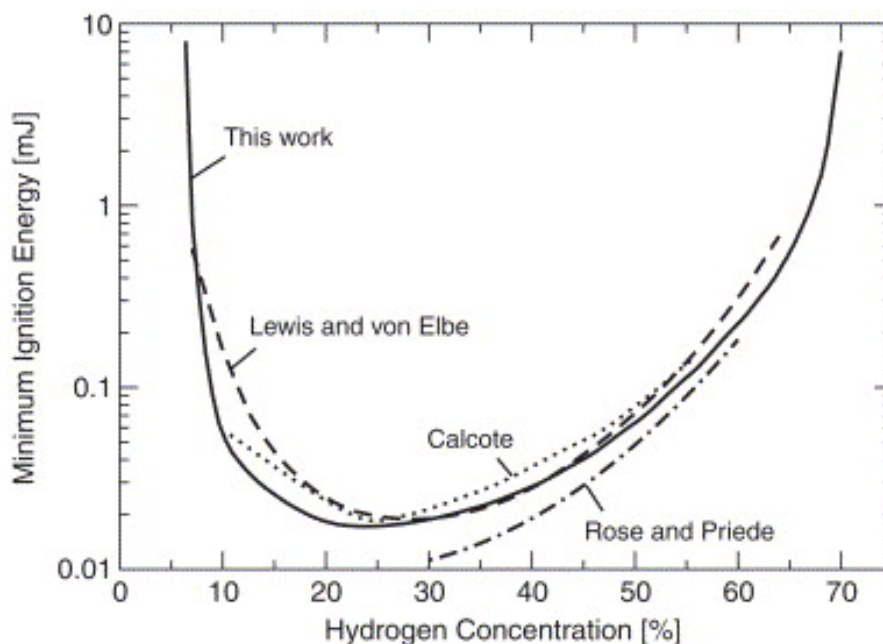
Hydrogen Safer Inventory Limit“ bezeichnet – also die Menge Wasserstoff die in einem Raum vorhanden sein kann und bei deren gesamter Verbrennung keine Schäden zu erwarten wären.



**Abbildung 3: Illustration der maximalen ungefährlichen Menge von Wasserstoff in einem geschlossenen Raum “Upper Hydrogen Safer Inventory Limit“**

## 7. Mindestzündenergie

Im Allgemeinen findet man für Wasserstoff die Angabe von 0,017–0,019 mJ für die Mindestzündenergie – also die Energie, die mindestens erforderlich ist, um ein zündfähiges Wasserstoff-Luft-Gemisch zu zünden. Die Mindestzündenergie für Wasserstoff ist damit besonders klein (vgl. z. B. zu Methan mit 0,28 mJ) und liegt unter der Wahrnehmungsgrenze des Menschen für einen elektrostatischen Entladefunken (0,25 mJ). Die Mindestzündenergie ist jedoch konzentrationsabhängig und bei stöchiometrischen Mischungsverhältnissen am kleinsten. Zu kleineren und höheren Konzentrationen steigt die Mindestzündenergie stark an (Abbildung 4). Für die Mindestzündenergie bei der unteren Explosionsgrenze von 4 % wurden keine Werte gefunden. In den Bestimmungsverfahren zur UEG (siehe Abschnitt 4) werden Zündenergien von 10 – 20 J genutzt – so dass man zumindest sagen kann, dass keine höheren als diese bereits hohen Energien nötig sind.



**Abbildung 4: Konzentrationsabhängigkeit der Mindestzündenergie von Wasserstoff (aus [24])**



## 8. Zusammenfassung

- Die Begriffe Brand und Explosion sind nicht klar definiert und nicht voneinander abgegrenzt. In der Praxis wird jedoch zwischen Brandschutz und Explosionsschutz unterschieden. In der Regel wird Explosionsschutz gefordert, wenn ein Stoff einen Explosionsbereich hat.
- Die „untere Explosionsgrenze“ beschreibt die untere Deflagrationsgrenze, heißt: ab dieser Konzentration erfolgt eine Fortpflanzung der Flamme weg von der Zündquelle. Das kann jedoch, auch im Fall von Wasserstoff, „nur“ eine langsame Verbrennung sein.
- Im Freien gibt es keine Detonationen durch Zündung von Wasserstoff.
- Im Freien ist die Verteilungsgeschwindigkeit von Wasserstoff höher als die Verbrennungsgeschwindigkeit.
- Wasserstoff kann in begrenzten Räumen Detonationen entwickeln.



## Literatur

- [1] ISO 8421-1 *Fire protection; Vocabulary; Part 1: General terms and phenomena of fire*  
<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8421:-1:ed-1:v1:en>
- [2] TRGS 720: *Gefährliche explosionsfähige Gemische – Allgemeines*, Juli **2020**  
file:///C:/Users/DanaMei%C3%9Fner/Downloads/TRGS-720-2.pdf
- [3] [https://www.haufe.de/recht/deutsches-anwalt-office-premium/3-unfall-i-ploetzlichkeit\\_idesk\\_PI17574\\_HI2871786.html](https://www.haufe.de/recht/deutsches-anwalt-office-premium/3-unfall-i-ploetzlichkeit_idesk_PI17574_HI2871786.html)
- [4] DGUV Information 213-106: *Explosionsschutzdokument*, Juni **2021**  
<https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/3360>
- [5] <https://www.nfpa.org/news-blogs-and-articles/blogs/2023/03/27/explosions-vs-deflagrations-vs-detonations>
- [6] V. Molkov: *Fundamentals of Hydrogen*, Safety Engineering II, bookboon.com, 2012
- [7] J.R. Rowley; J.-E. Bruce Black: *Proper Application of Flammability limit data in consequence studies*, Symposium Series, Nr. 158, **2012**, <https://www.icheme.org/media/9189/paper58-hazards-23.pdf>
- [8] Projekt SAFEKINEX: *Safe and efficient hydrocarbon oxidation processes by kinetics and explosion expertise, Deliverable 8: Report on the experimentally determined explosion limits, explosion pressures and rates of explosion pressure rise – Part 1: Methane, Hydrogen and Propylene*, BAM **2006**
- [9] <https://www.astm.org/e0681-09r15.html>, letzter Aufruf am 11.02.2025
- [10] Projekt SAFEKINEX: *Safe and efficient hydrocarbon oxidation processes by kinetics and explosion expertise, Deliverable 9: Report on the experimentally determined explosion limits, explosion pressures and rates of explosion pressure rise – Part 2: Ethane, ethylen, propane- n-butane, ammonia and carbon monoxide*, BAM **2006**
- [11] BGRCI: *Grundlagen\_zum\_Explosionsschutz\_Teil\_1\_V\_2-1.pdf*
- [12] I. Sutton: *“Deflagrations and Detonations”* in *Process Risk and Reliability Management (Second Edition)*, 2015, <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/detonation>
- [13] <https://www.chem-page.de/publikationen/geschichte-der-sprengstoffe/2-wie-unterscheiden-sich-deflagration-detonation-und-explosion.html>
- [14] H. A. Elasrag, J. Hoke, B. Rankin S. A. Schumaker: *A Local criterion for distinguishing detonation and deflagration for pressure gain combustion*, Center for Turbulence Research, Proceedings of the Summer Program **2022**; [https://web.stanford.edu/group/ctr/ctrsp22/iv04\\_Elasrag.pdf](https://web.stanford.edu/group/ctr/ctrsp22/iv04_Elasrag.pdf)
- [15] Wang Han et. al. *A review of laminar flame speeds of hydrogen and syngas measured from propagating spherical flames*, *Applications in Energy and Combustion Science (Vol1-4)*, **2020**  
<https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2020.100008>
- [16] <https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2021/04/Lecture-2-slides.pdf>
- [17] D. W. Stamps, W. B. Benedick, S. R. Tieszen: *Hydrogen-Air-Diluent Detonation Study for Nuclear Reactor Safety Analyses*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, **1991**
- [18] BRHS, Chapter I: *Hydrogen Fundamentals*, **2006**;  
[http://hysafe.net/download/1040/BRHS\\_Chap1\\_Fundamentals-version%201\\_0\\_1.pdf](http://hysafe.net/download/1040/BRHS_Chap1_Fundamentals-version%201_0_1.pdf);
- [19] <https://h2tools.org/faq/hydrogen-diffusion>
- [20] H. Ax: *Experimentelle Untersuchung magerer laminarer Niederdruckflammen mit periodisch variierender Gemischzusammensetzung*; DLR, VT-Forschungsbericht **2013-01**, 2013,  
[https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/3947/1/Dissertation\\_Ax.pdf](https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/3947/1/Dissertation_Ax.pdf)
- [21] F. Tamburini et.al.: *Exploring experimental tests concerning liquid hydrogen releases*, *Process Safety and Environmental Protection (Vol 192)* 2024, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.11.014>
- [22] [https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2023/03/L10\\_HyResponder\\_Level4\\_DE.pdf](https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2023/03/L10_HyResponder_Level4_DE.pdf)
- [23] D. Makarov et.al.: *Deflagrations of localised homogeneous and inhomogeneous hydrogen-air mixtures in enclosures*, *International Journal of Hydrogen Energy Vol 42 (11)*, **2017**  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.223>
- [24] R. Ono et.al. *Minimum ignition energy of hydrogen–air mixture: Effects of humidity and spark duration*, *Journal of Electrostatics*, Volume 65, Issue 2, February **2007**