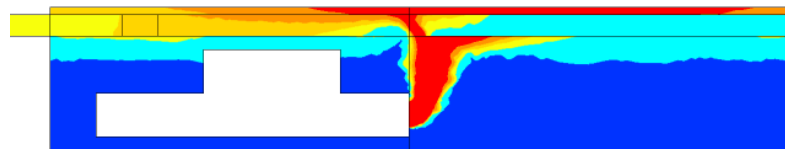


BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Besonderheiten und Risiken bei alternativ angetriebenen Fahrzeugen



von

D. Schelb und T. Jordan

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Forschungsstelle für Brandschutztechnik

159

STÄNDIGE KONFERENZ DER INNENMINISTER UND -SENATOREN DER LÄN-
DER, ARBEITSKREIS V, AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHR-ANGELEGENHEI-
TEN, KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG

Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Forschungsbericht Nr. 159

**Besonderheiten und Risiken bei alternativ
angetriebenen Fahrzeugen**

von
D. Schelb und T. Jordan

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Forschungsstelle für Brandschutztechnik

Karlsruhe

2020, korrigiert am 21.12.2022

FA.Nr. 2/2009

Berichtskennblatt

Nummer des Berichtes: 159	Titel des Berichtes: Besonderheiten und Risiken bei alternativ angetriebenen Fahrzeugen	ISSN: 0170-0060	
Autoren Dr. rer.-nat. Dietmar Schelb Leiter der Forschungsstelle f. Brandschutztechnik am KIT Dr.-Ing. Thomas Jordan, IKET Leiter Wasserstoffgruppe Institut für Kern- und Energietechnik am KIT		durchführende Institution: Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Hertzstrasse 16, D-76187 Karlsruhe	
Nummer des Auftrages:		Auftraggebende Institution:	
Abschlussdatum: 7.12.2020		Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung	
Kurzfassung: Von alternativ angetriebenen Fahrzeugen geht ein Gefahrenpotential durch ihre jeweiligen Energiespeicher aus, welches gegenüber den herkömmlichen Energieträgern Benzin und Dieselmotorkraftstoff weit vielfältiger ist. Im folgenden Bericht wird eine Übersicht über gasbetriebene und elektrische Alternativantriebe gegeben und deren spezifischen Risiken und Besonderheiten hinsichtlich des Brand- bzw. Unfallgeschehens werden aufgezeigt.			
Schlagwörter: CNG, LPG, Wasserstoff, Erdgas, Methan, BLEVE, Li-Ionen-Batterie, Zündfähiges Gemisch, vorgemischte Flamme, Diffusionsflamme, Untere/Obere Explosionsgrenze, Explosion, Verpuffung, Deflagration, Detonation, Pedelec, E-Bike, Hybridfahrzeug, Elektrofahrzeug, Druckbehälter, TPRD, PRV			

INHALTSVERZEICHNIS

1.	EINLEITUNG	7
2.	EINIGE GRUNDLAGEN DER VERBRENNUNG	9
2.1.	Luftzahl	9
2.2.	Zündfähiges Gemisch	9
2.3.	UEG (Untere Explosionsgrenze = Zündgrenze)	9
2.4.	OEG (Obere Explosionsgrenze = Zündgrenze)	10
2.5.	Flammen	11
2.5.1.	Laminare Diffusionsflammen	12
2.5.2.	Turbulente Diffusionsflammen	13
2.5.3.	Vorgemischte laminare Flammen	15
2.5.4.	Vorgemischte turbulente Flammen	15
2.5.5.	Adiabate Flammentemperatur	15
2.6.	Stich- bzw. Strahlflammen (<i>jet flames</i>)	15
2.7.	Flammengeschwindigkeit	20
2.8.	Turbulente Flammengeschwindigkeit	21
2.9.	Gasexplosionen	21
2.9.1.	„Verpuffung“	21
2.9.2.	Deflagration	21
2.9.3.	Detonation	22
2.10.	BLEVE (boiling liquid expanding vapor explosion)	23
3.	AUSWIRKUNG EINER EXPLOSION	24
3.1.	Druckwellen (engl. shockwaves)	24
3.2.	Wirkung bei der Verbrennung explosibler Gasmischungen	25
3.3.	Beispiele	26

3.3.1.	Gasexplosion im Freien	26
3.3.2.	Gasexplosionen in geschlossenen oder teilverbauten Räumen	28
3.3.3.	Beispiele für entstehende Drücke	28
4.	DIE DIVERSEN ENERGietRÄGER DER ALTERNATIVANTRIEBE	34
4.1.	„Die Herkömmlichen“: Benzin / Diesel	35
4.2.	Erdgas (engl. „natural gas“)	35
4.2.1.	CNG (compressed natural gas)	36
4.2.2.	LNG (liquefied natural gas)	36
4.3.	LPG (liquefied petroleum gas)	36
4.4.	Wasserstoff H ₂	37
4.4.1.	CH ₂ (compressed H ₂)	37
4.4.2.	LH ₂ (liquefied H ₂)	37
4.4.3.	H ₂ in Metallhydrid	37
4.5.	Li-Ionen-Batterie in E-Fahrzeugen	38
4.6.	Super-, UltraCaps	38
4.7.	Druckluftspeicher	39
5.	DIE DIVERSEN FAHRZEUGVARIANTEN MIT ALTERNATIVANTRIEB	40
5.1.	Gasbetriebene PKW	40
5.1.1.	Pkw mit Verbrennungsmotor	40
5.1.2.	Pkw mit Wasserstoff-Brennstoffzelle	41
5.2.	Elektrisch betriebene Fahrzeuge	41
6.	KRAFTSTOFF-, DRUCKTANKS UND BATTERIEGEHÄUSE	43
6.1.	Kraftstofftanks für Diesel und Benzin	43
6.2.	Drucktanks für komprimierte Gase	43
	<u>Sicherheitseinrichtung Überdruckventil PRV</u>	44

_____	Sicherheitseinrichtung Druckentlastungsventil TPRD	44
6.3.	Tank für LPG	45
6.4.	Batteriegehäuse	45
7.	KRITISCHE SITUATIONEN FÜR DIE JEWELIGEN ENERGIESPEICHER UND MÖGLICHE FOLGEN	46
7.1.	Druckbehälter mit CNG oder H ₂	46
7.1.1.	Äußerer Brand und kontrolliertes Abblasen durch TPRD	46
7.1.2.	Äußerer Brand und Bersten des Tanks mit Entzündung	48
7.1.3.	Mechanische Beschädigung	50
7.1.3.1.	Bersten ohne Zündung	50
7.1.3.2.	Bersten mit sofortiger Zündung	52
7.1.3.3.	Bersten mit verzögerter Zündung	53
7.1.4.	Kleine Lecks, Korrosionsschäden	53
7.2.	LPG-Tank	59
7.2.1.	Äußerer Brand und kontrolliertes Abblasen	59
7.2.2.	Äußerer Brand und Bersten des Tanks - BLEVE	59
7.2.3.	Mechanische Beschädigung	63
7.2.3.1.	Bersten ohne Zündung	63
7.2.3.2.	Bersten mit sofortiger Zündung	63
7.2.3.3.	Bersten mit verzögerter Zündung	63
7.2.4.	Leckage	64
7.2.5.	Zum Vergleich: Szenarien bei Benzin/Diesel	65
7.2.6.	Li-Ionen Batterie	65
7.2.7.	Bestandteile der Ablagerungen	67
7.3.	Überschwemmung in TG	68
7.4.	Defekte Elektrik/Elektronik E-Fahrzeuge	68

7.4.1.	Schnellladestation (bis 1000V) überlädt	68
7.4.2.	Kabeltrommel bis 230V	69
7.4.3.	E-Bikes, Pedelecs und sonstiges	69
8.	ALLGEMEINES ZUM PKW-BRAND – NICHT NUR IN TIEFGARAGEN	70
8.1.	Rauchgase	70
8.2.	Brandlast und Wärmefreisetzungsrate	70
9.	ZUSAMMENFASSUNG	72
10.	ANHANG: AUFGABE UND STRUKTUR DES IKET	74
11.	LITERATURVERZEICHNIS	76

1. Einleitung

Von alternativ angetriebenen Fahrzeugen geht ein Gefahrenpotential durch ihre jeweiligen Energiespeicher aus, welches gegenüber den herkömmlichen Energieträgern Benzin und Dieselkraftstoff weit vielfältiger ist. Im folgenden Bericht wird eine Übersicht über gasbetriebene und elektrische Alternativantriebe gegeben und deren spezifischen Risiken und Besonderheiten hinsichtlich des Brand- bzw. Unfallgeschehens aufgezeigt, wobei der Schwerpunkt bei Fahrzeugen mit Druckgas- und Flüssigkeitsbehältern liegt.

Bei Unfällen bzw. Bränden von gasbetriebenen Fahrzeugen kann sich austretendes Gas entzünden. Hier werden die verschiedenen Szenarien betrachtet:

1. Der Gastank birst und das Gas entzündet sich unmittelbar. Hier können sich kurzzeitig Brände mit sehr hoher Intensität bilden.
2. Der Gastank birst. Das Gas strömt aus, durchmischt sich mit der umgebenden Luft, so dass sich eine explosionsfähige Atmosphäre bildet, und zündet dann zeitverzögert. Eine Explosion einer Gaswolke im Freien unterscheidet sich wesentlich gegenüber einem Szenario in einer Tiefgarage oder teilverbauten Räumen, wie z.B. Tunnels.
3. Der Gastank bläst bei einem Brand durch ein temperaturabhängiges Ventil kontrolliert ab. Hier liegt die Bandbreite zwischen kaum merklicher Zunahme der Brandintensität bis hin zu unvermittelt erscheinenden langen Stichflammen.
4. Ein Behälter bzw. das Leistungssystem sind undicht und Gas strömt kontinuierlich aus. Hier wurden die räumlichen und zeitlichen Konzentrationen von ausströmenden Gasen in einer Tiefgarage um ein Fahrzeug mittels numerischer Strömungssimulation (CFD) berechnet. Hierbei zeigte sich, dass austretendes Erdgas oder Wasserstoff sich weiträumig unter der Decke als zündfähiges Gemisch anreichern können, und dass die Lüftungsanlage zeitweise mit ex-fähigem Gemisch geflutet sein kann.
5. Ausgelaufenes Flüssiggas kann sich am Boden sammeln und z.B. in einer Tiefgarage eine große Fläche mit zündfähigem Gemisch fluten.

6. Bei Drucktanks besteht allgemein eine Gefahr im Nahbereich durch das Bersten, auch ohne Entzündung des Inhaltes.
7. Bei Hybrid- und Elektrofahrzeugen weisen die Li-Ionen-Batterien ein besonderes Brandverhalten auf, ebenso können Brände von E-Fahrzeugen atypisch zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen verlaufen.

2. EINIGE GRUNDLAGEN DER VERBRENNUNG

In diesem Kapitel werden Begriffe und Zusammenhänge erläutert, die im folgenden Bericht für das tiefere Verständnis relevant sind - die Grundlagen sind ausführlich in Fachbüchern (z.B. in /1/, /2/) zu finden. Der eilige Leser kann zu Kapitel 3 weiterblättern.

2.1. Luftzahl

Die Luftzahl λ eines brennbaren Gemisches bezieht sich auf die zur stöchiometrischen Verbrennung nötige Menge Luft. Bei $\lambda=1$ steht genauso viel Sauerstoff zur Verfügung wie zur vollständigen Verbrennung benötigt wird. $\lambda>1$ ist ein Überangebot an Sauerstoff (magere Verbrennung), $\lambda<1$ bedeutet Sauerstoffmangel (fette Verbrennung).

2.2. Zündfähiges Gemisch

Die Verbrennung (genauer: die Reaktion des gasförmigen Brennstoffes mit dem Oxidator) findet nur innerhalb brennstoffabhängiger Grenzen des Mischungsverhältnisses statt. Im folgenden Bericht werden ausschließlich Verbrennungsvorgänge beschrieben, wie sie in Luft bei gewöhnlichem Atmosphärendruck ablaufen.

2.3. UEG (Untere Explosionsgrenze = Zündgrenze)

Die UEG ist die Mindestkonzentration an Brennstoff in der Luft, bei der die Verbrennung noch selbständig stattfinden kann. Bei der UEG liegt die maximale Luftzahl vor.

Anm. der Verfasser: Der Begriff Explosionsgrenze ist irreführend, da i.d.R. Brennstoff-Luft-Gemische im Bereich der UEG relativ langsam verbrennen und keine explosionsartige Wirkung haben. Die Werte werden tatsächlich in standardisierten Experimenten bei Bedingungen ermittelt, die sich deutlich von Unfallbedingungen unterscheiden. Eine wirklich explosive Mischung, z.B. von Wasserstoff und Luft, ist erst

mit einem volumetrischen Mischungsanteil von Wasserstoff deutlich über 10% zu erwarten, obwohl die UEG bei 4% liegt /2/.

Bei einer laminaren Diffusionsflamme (s. Kap. 2.5.1.) kann der räumliche Bereich, in dem das Gemisch zündfähig ist und in dem die Verbrennung (an der Flamme sichtbar) stattfindet sehr klein sein.

2.4. OEG (Obere Explosionsgrenze = Zündgrenze)

Analog zur UEG liegt hier die geringste Luftzahl vor. Durch Vermischungsprozesse mit der Luft kann jedes Gemisch, das oberhalb der OEG liegt, zündfähig werden. Ein Gemisch unterhalb der UEG hingegen nicht, weil Gasgemische sich nicht entmischen.

Beispiel: Ein Raum sei homogen mit 1% Methan in 99% Luft gefüllt, so dass die Methankonzentration unterhalb der UEG liegt. Auch wenn Methan leichter als Luft ist, wird sich selbst nach langer Zeit das Methan nicht unter der Decke ansammeln. Gasgemische entmischen sich nicht!

In Tabelle 1 sind für einige Brennstoffe die Werte für die UEG und OEG angegeben.

	UEG in Vol.-%	OEG in Vol.-%
Methan	4,4	17
Wasserstoff	4	77
Butan	1,4	9,4
Propan	1,7	10,8
Benzin (gasförmig)	0,6	8
Diesel (gasförmig)	0,6	6,5

Tab. 1: Explosionsgrenzen einiger ausgewählter Stoffe in Luft, z.B. /3/,/4/

2.5. Flammen

Die (in der Regel sichtbare) Flamme ist die Reaktionszone, in der durch Diffusion von Radikalen und Wärmeleitung eine Oxidationsreaktion aufrechterhalten wird.

Gasförmige Brennstoffe, wie z.B. Methan, Wasserstoff und Benzindämpfe, können vor der Zündung bzw. Verbrennung bereits mit Luft vermischt sein. Dann handelt es sich um vorgemischte Flammen, z.B. beim Löt- oder Schweißbrenner.

Diffusionsflammen entstehen, wenn die Verbrennung stattfindet, während die brennbaren Gase in Luft einströmen, z.B. bei einem Gasfeuerzeug, einer Kerzenflamme, einem Holzfeuer oder einem Lachenbrand, wobei die Zündung gleichzeitig mit der Freisetzung der brennbaren Gase von staten geht. Die Reaktionszone der Verbrennung (=Flammenfront) beschränkt sich auf den Bereich zwischen Brennstoff und Luft. Nur in dem Bereich, in dem die Gemische zündfähige Konzentrationen (größer UEG und kleiner OEG) bilden, findet die Verbrennung statt. Bei den hier aufgeführten Diffusionsflammen sind die Flammen ortsfest.

Beispiel: Ein Liter Benzin wird in einem geschlossenen Raum (Zimmer) in eine 1m² große Wanne eingefüllt. Wird das Benzin sofort entzündet, kann sich kein Benzin-Luft-Gemisch in nennenswerter Menge ausbilden, und es entsteht eine ca. zwei Meter hohe, ortsfeste turbulente Diffusionsflamme mit einer Wärmefreisetzungsrate von gut einem Megawatt für etwa eine halbe Minute. Wird hingegen erst nach einigen Minuten oder gar Stunden gezündet, hat der Benzindampf mit der Luft i.d.R. ein ex-fähiges Gemisch gebildet und es kommt beim Zünden zu einer Explosion (Deflagration). Hierbei verläuft die turbulente Flammenfront mit zunehmender Geschwindigkeit durch das brennbare Gemisch. Ebenso verhält es sich mit Gasexplosionen in Häusern: Würde das ausströmende Gas im Bereich des Lecks sofort gezündet, käme es wahrscheinlich „nur“ zum Vollbrand des Gebäudes, sofern nicht eingegriffen wird. Strömt hingegen das Gas längere Zeit aus, kommt es i.d.R. bei Zündung zur Explosion (Deflagration mit Drücken bis knapp 10bar) mit entsprechenden Auswirkungen auf das Gebäude.

Im Folgenden sind die vier Flammenarten nochmals beschrieben:

2.5.1. Laminare Diffusionsflammen

Der gasförmige Brennstoff strömt und/oder diffundiert in die Verbrennungsluft. Im räumlich schmalen Bereich, in dem die Konzentration zwischen UEG und OEG liegt, liegt die Flammenfront.

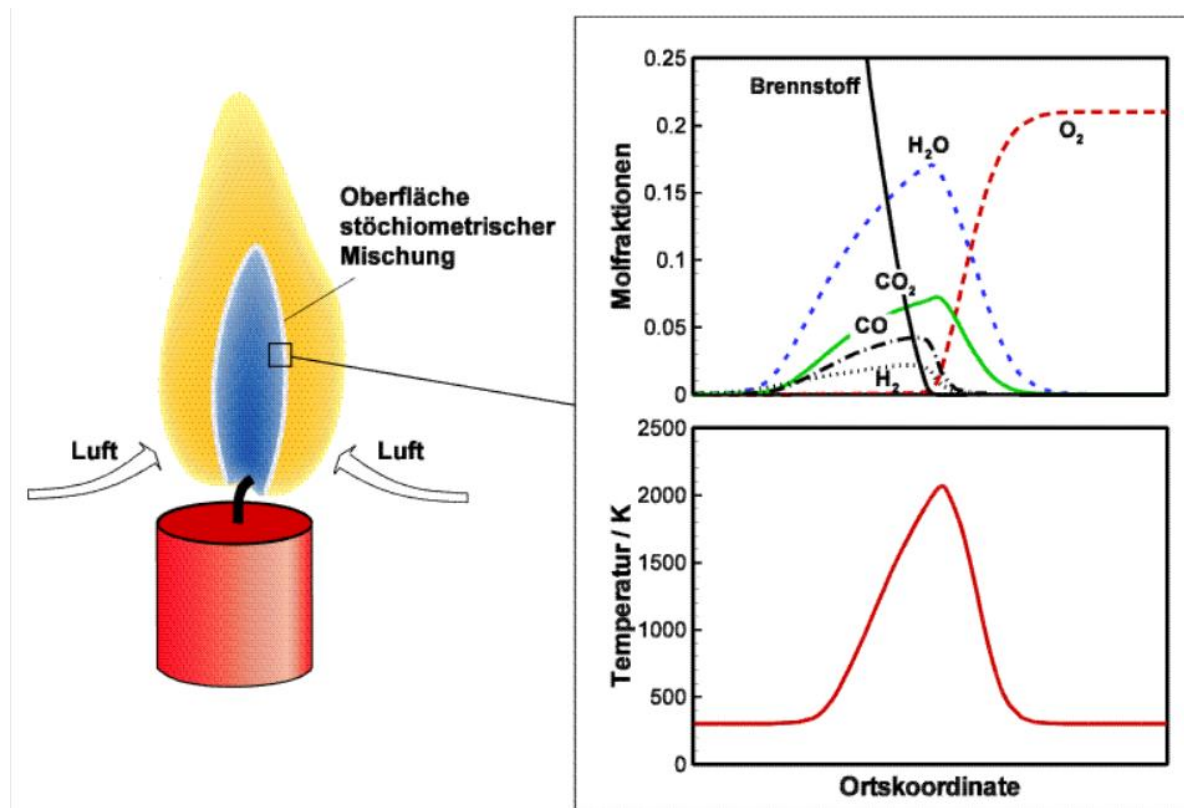


Abb.1: Kerzenflamme mit Konzentrationen der für die Verbrennung relevanten Gase und Temperaturen. Ortskoordinate 0 = Zentrum der (angenommenen) rotationssymmetrischen Flamme /5/

Eine der bekanntesten Erscheinungsformen der laminaren Diffusionsflamme ist die Kerzenflamme. Die Wärmeabgabe der Flamme lässt das Paraffin (Kerzenwachs) zunächst schmelzen und schließlich am Docht der Kerze verdampfen. Das gasförmige Paraffin kann dann in die umgebende Luft diffundieren. Die Verbrennung findet in guter Näherung am Ort der stöchiometrischen Mischung statt, wodurch sich eine Flammenfrontfläche ausbildet, in deren unmittelbarer Umgebung Brennstoff und Sauerstoff vollständig verbraucht werden. Die beiden Reaktionspartner werden kontinuierlich durch

Diffusion und Konvektion nachgeliefert, während die Reaktionsprodukte von der Flammenfläche weg in das Innere der Flamme und in die Umgebung transportiert werden. Die obige Abbildung zeigt schematisch die Temperatur- und Konzentrationsverläufe in der Nähe der Flammenfront. Das typische gelbe Leuchten der Flamme resultiert von der Strahlung, die von mikroskopisch kleinen Rußpartikeln emittiert werden. Diese werden im fetten Bereich der Flamme gebildet und anschließend durch die Fläche Stöchiometrischer Mischung in den mageren Bereich der Flamme transportiert, wo sie unter sauerstoffreichen Bedingungen wieder verbrennen. Das bekannte Rußen von Kerzenflammen tritt auf, wenn die Verweilzeit der Rußpartikel im Bereich hoher Temperaturen und ausreichend hoher Sauerstoffkonzentrationen zu kurz ist, um sie wieder vollständig zu verbrennen. Die Mischung von Brennstoff und Sauerstoff ist der langsamste Teilvorgang der Verbrennung und somit der geschwindigkeitsbestimmende Schritt. /5/

2.5.2.

Turbulente Diffusionsflammen



Abb. 2: Zwei Aufnahmen eines Benzin-Lachenbrandes im zeitlichen Abstand von 1s. Rechts ist eine abgelöste Flamme zu sehen. Dort verbrennt hauptsächlich noch CO, aber nicht vollständig, obwohl Luftüberschuss vorhanden ist. Die Flammenfront ist nicht eben und ortsfest wie bei der Kerze, sondern unregelmäßig. Quelle: /7/

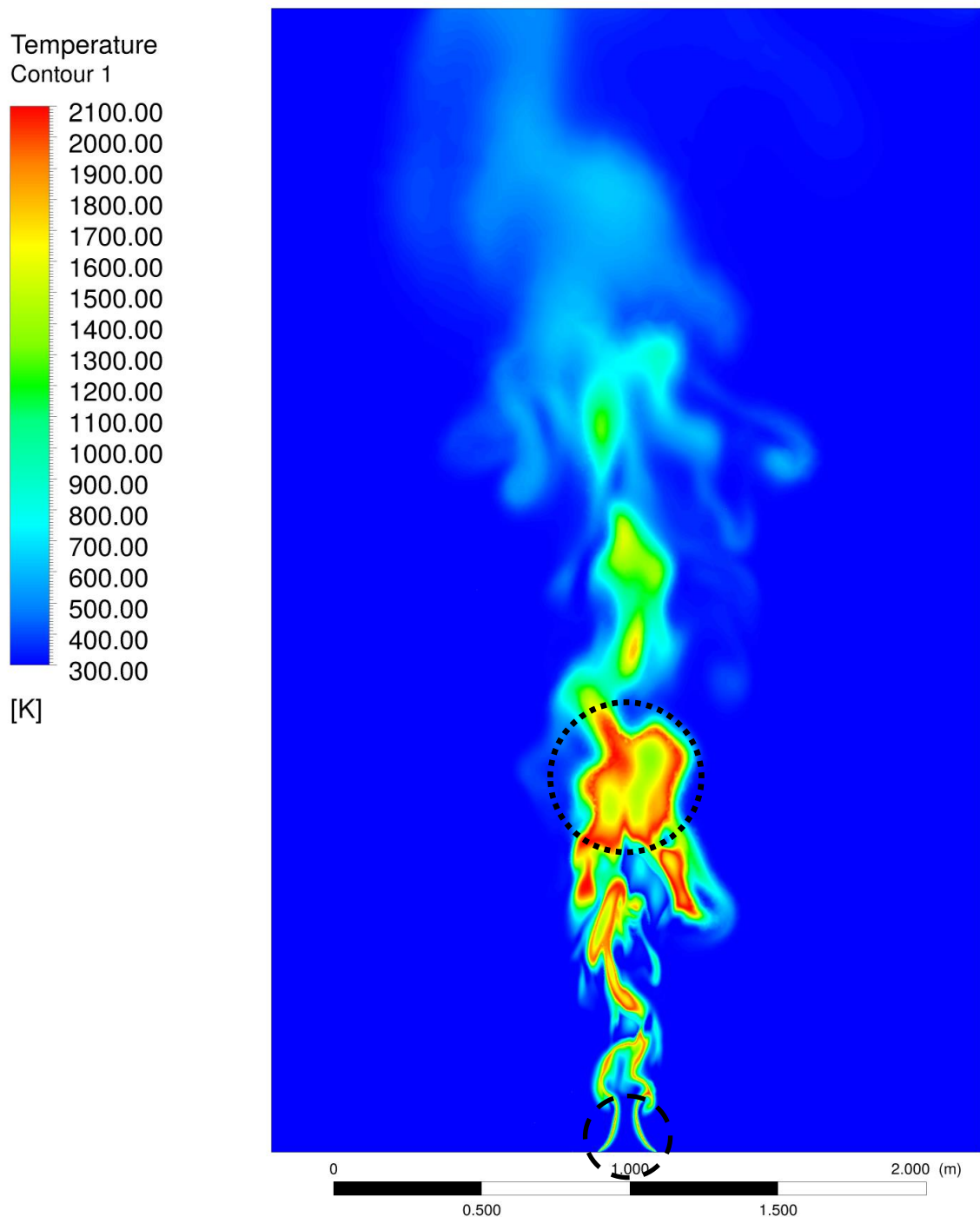


Abb. 3: Längsschnitt der Temperaturen durch eine turbulente 100kW-Methanflamme zu einem willkürlich gewählten Zeitpunkt (transiente CFD-Simulation mit LES-Turbulenzmodell mit Ansys CFX) [8]. Das Methan strömt diffus aus einem Kiesbettbrenner aus (s. gestrichelter Kreis unten). Anfangs findet die Verbrennung nur am Rand statt, dann wird die Flamme weiter oberhalb turbulent und es bilden sich unregelmäßige Bereiche, in denen die Verbrennung stattfindet (gelb-rot mit den höchsten Temperaturen). Der gepunktete Kreis umrandet eine kurzzeitig abgelöste Flamme, ähnlich wie in Abb. 2 rechts.

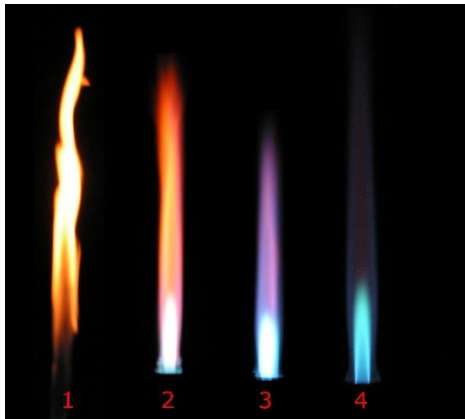
2.5.3.**Vorgemischte laminare Flammen**

Abb. 4: Bunsenbrennerflammen mit unterschiedlicher Luftzufuhr, von links (keine Luftzufuhr) nach rechts steigend. Flamme 1 ist eine reine Diffusionsflamme und rußt, die Flammen 2 bis 4 sind unterschiedlich stark vorgemischt /5/

2.5.4.**Vorgemischte turbulente Flammen**

Sie sind bei einer Gasexplosion im häuslichen Bereich oder bei technischen Brennern vorzufinden. Bei einer Explosion treten keine ortsfesten Flammen auf, sondern eine sich ausbreitende reaktionsfront. Kurz nach Zündung der Explosion breitet sich die (laminare) Reaktionsfront (=Flamme) annähernd kugelförmig aus. Nach kurzer Zeit geht die laminare Flamme in eine turbulente über. Jetzt breitet sich die Reaktionsfront unregelmäßig in allen Richtungen aus und die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Reaktionsfront nimmt zu (Deflagration).

2.5.5.**Adiabate Flammentemperatur**

Die nur theoretisch zu erreichende Maximaltemperatur von Flammen, wenn sie keine Wärme in Form von Strahlung oder Wärmetransport abgeben würden.

2.6. Stich- bzw. Strahlflammen (*jet flames*)

Wenn gasförmiger Brennstoff ungehindert in Luft einströmt, bilden sich Stichflammen. Die Strömungsgeschwindigkeit des gasförmigen Brennstoffs nimmt mit zunehmendem

Abstand von der Auslassöffnung ab und es findet eine Durchmischung mit der umgebenden Luft statt. Zündet der Brennstoff nicht, werden Einströmung und Durchmischung als Freistrahл bezeichnet.

Im Rahmen des EU-Projektes HyTunnel /6/ werden am KIT Wasserstoff-Freistrahlen vermessen und mittels CFD (Ansys CFX) simuliert, um bei Schadensfällen mit Wasserstoffdruckbehältern die Flammenlängen abschätzen zu können.

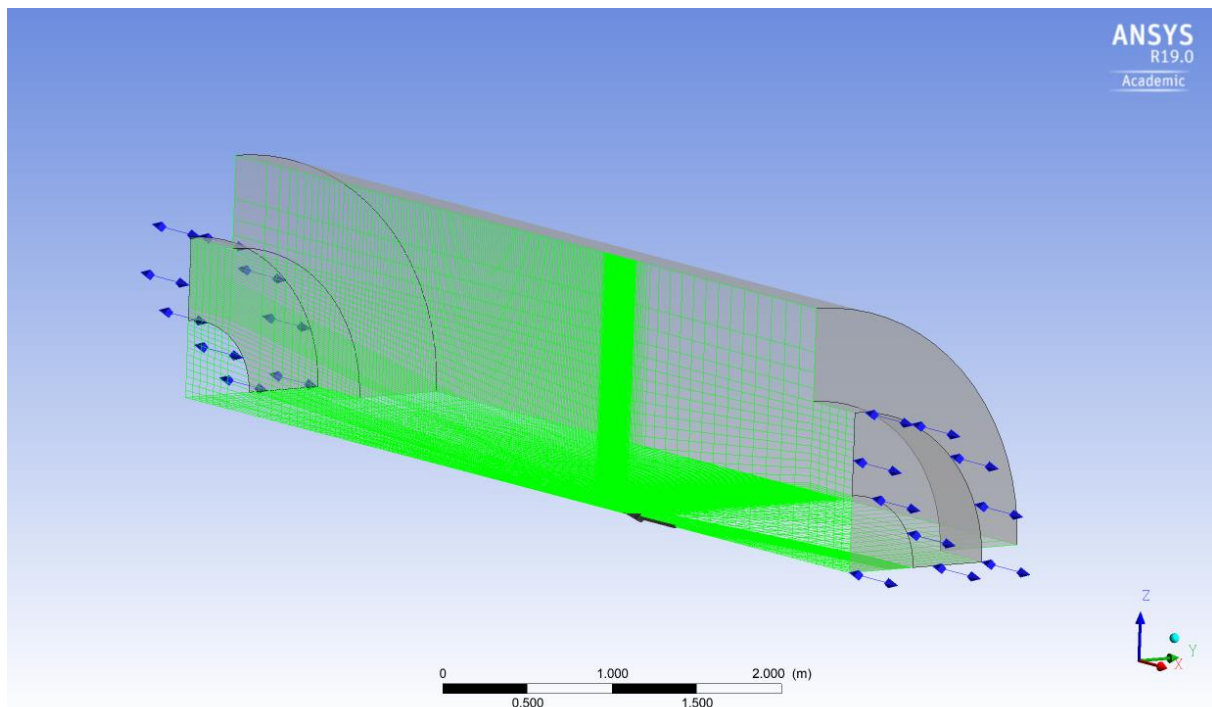


Abb. 5: Geometrie und Ansicht des Gitters für die Berechnung von ausströmendem Wasserstoff (Teilprojekt im HyTunnel Gesamtprojekt). Aus Röhrchen mit 1 bzw. 4mm Innendurchmesser strömen zwischen 1 und 5gr H_2 pro Sekunde in die umgebende Luft ein. Das Röhrchen (s. Pfeil in der Abbildung) ist im Innern eines 6,8m langen Volumens positioniert. Damit sich im Behälter kein zündfähiges Gemisch ansammelt, wird an den Behälteröffnungen ein Ventilator positioniert, der eine mittlere Geschwindigkeit in Längsrichtung (=Ausströmrichtung) der Düse von 1,5m/s erzeugt. Es wurde nur ein Viertel der Geometrie vernetzt und berechnet, weil symmetrische Bedingungen vorliegen /9/

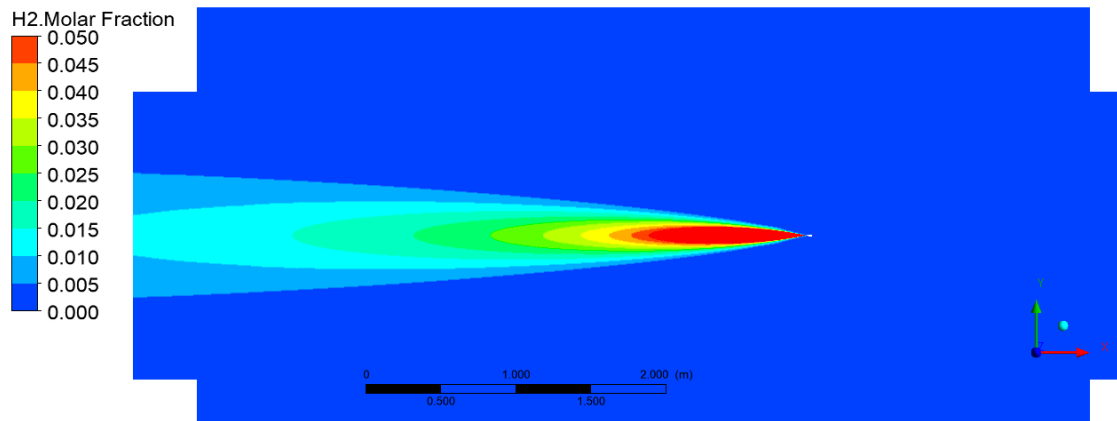


Abb. 6: Mischungsverhältnis von Wasserstoff in umgebender Luft bei 1mm Düsendurchmesser und 1gr H₂ pro Sekunde. Die Zündgrenze von H₂ liegt oberhalb von 4% = 0,04, d.h. nur im orangenen und roten Bereich ist das Gasgemisch zündfähig. Ab einer Entfernung von ca. 1,5m von der Düse (in Strömungsrichtung) ist das Gemisch so weit verdünnt, dass es nicht mehr zündfähig ist [9]. Die Strahlflamme hätte eine Länge von etwa 1,5m.

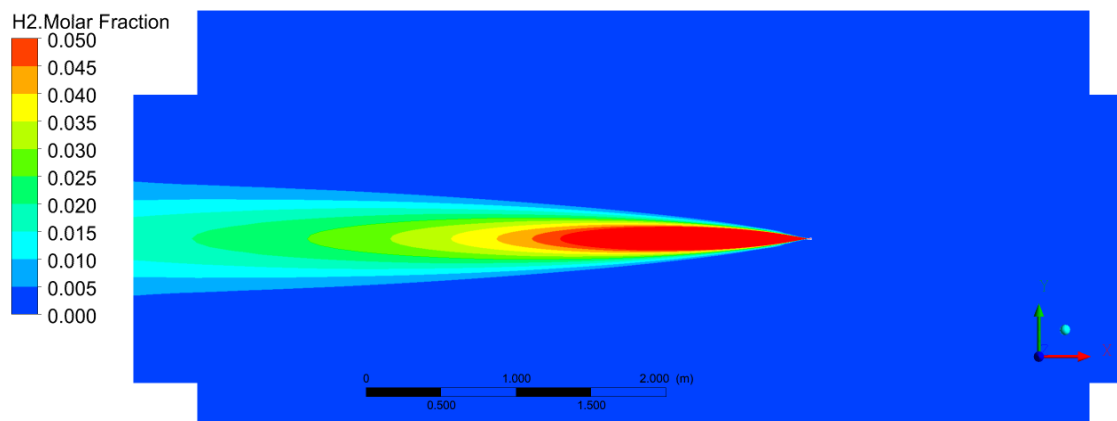


Abb. 7: Mischungsverhältnis von Wasserstoff in umgebender Luft bei 4mm Düsendurchmesser und 1gr H₂ pro Sekunde. Ab einer Entfernung von ca. 2m von der Düse ist das Gemisch so weit verdünnt, dass es nicht mehr zündfähig ist [9]. Die Strahlflamme hätte eine Länge von etwa 2m.

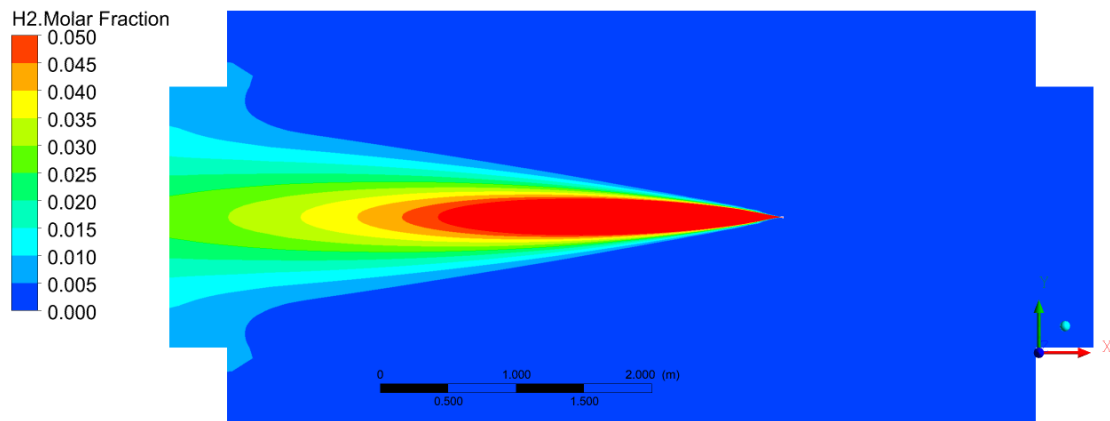


Abb. 8: Mischungsverhältnis (Molarenbruch: z.B. 0,03=3%) von Wasserstoff in umgebender Luft bei 4mm Düsendurchmesser und 5gr H_2 pro Sekunde. Ab einer Entfernung von ca. 3m von der Düse ist das Gemisch so weit verdünnt (<4%), dass es nicht mehr zündfähig ist /9/. Die Strahlflamme hätte eine Länge von etwa 3m.

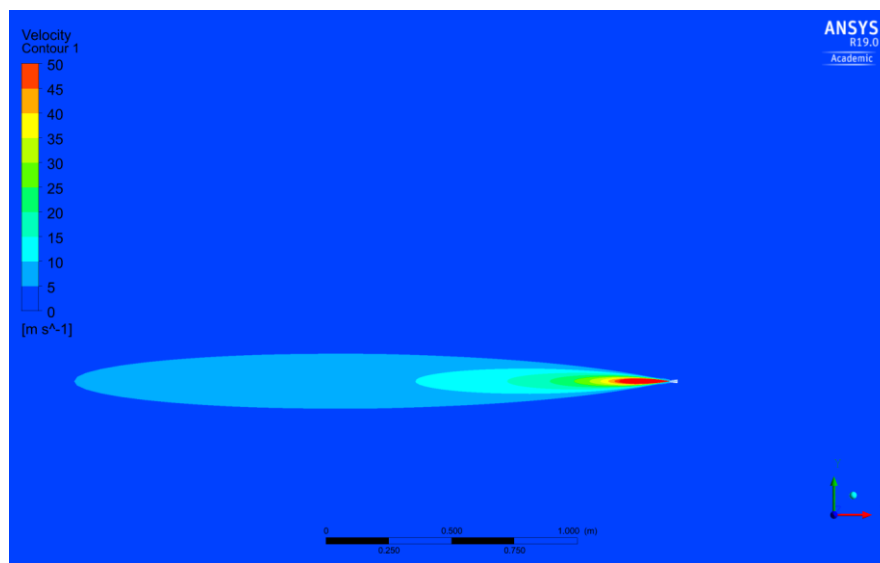


Abb. 9: Geschwindigkeit des Freistrahls aus der 1mm-Düse bei 1gr H_2 pro Sek (Längenskala im Bild: 1m. In einem Meter Entfernung liegt sie bereits unter 10ms^{-1} /9/

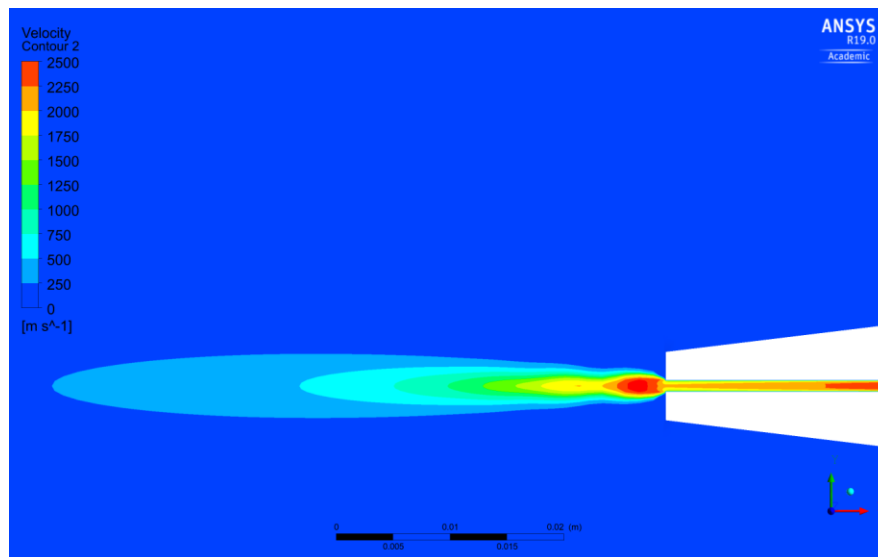


Abb. 10: Geschwindigkeit des Freistrahls im Nahfeld (s. Längenskala im Bild: 20mm) der 1mm-Düse bei 1gr H₂ pro Sek. Die max. (Überschall-)Geschwindigkeit beträgt unmittelbar nach der Düse rund 2600ms⁻¹. Nach weniger als 50mm ist die Strömung wieder auf Unterschall verlangsamt /9/.

Je größer das Leck, desto höher der Massenstrom, und desto weiter reicht das zündfähige Gemisch. Die Simulationen mit weit höheren Massenströmen sind zum Zeitpunkt dieser Berichtserstellung noch nicht durchgeführt worden. Es ist bei realistischen höheren Massenströmen bei Öffnen des TPRD mit Strahlflammen von deutlich mehr als 3m Länge zu rechnen. Auch verläuft die Verdünnung durch angesaugte Luft in einen breiteren Strahl aus großem Leck bei gleichem Massenstrom langsamer als bei einem schnellen Strahl aus einem kleinen Leck. Dafür muss aber der Druck im Behälter mit dem kleinen Leck viel höher sein als im Behälter mit dem großen Leck, damit der Massenstrom in beiden Fällen gleich ist.

Bei einem schnellen Ausströmen kann sich H₂ so sehr mit Luft durchmischen, dass es im Abstand von einigen Metern vom Leck bereits so weit verdünnt ist, dass es nicht mehr zündfähig ist. Wichtig: Ist Gas einmal verdünnt, wird es sich nicht mehr anreichern (z.B. durch Auftriebskräfte). Es besteht allerdings die Möglichkeit, dass das ausströmende Gas sich nicht mit reiner Luft vermischt, sondern mit bereits mit dem Gas vermischter Luft (durch Rezirkulation des ausströmenden Gases, wenn es auf ein Hindernis oder den Boden trifft). Dann reichert sich die Konzentration kontinu-

ierlich an und es kann sich in einem kurzen Zeitraum ein Gemisch mit großer Ausdehnung bilden, das quasi schlagartig von knapp unterhalb der UEG zu knapp oberhalb der UEG umschlägt.

Methan und LPG werden sich beim Ausströmen hinsichtlich der Durchmischung mit Luft ähnlich verhalten.

2.7. Flammengeschwindigkeit

Die Flammengeschwindigkeit (auch: Verbrennungsgeschwindigkeit oder laminare Flammengeschwindigkeit) ist die Komponente der Geschwindigkeit, mit der sich das unverbrannte, zündfähige Gemisch normal zur Flammenfläche bewegt /1/.

Bei einer Flamme, die durch ein zündfähiges Gemisch läuft, ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenfront gleich der Flammengeschwindigkeit. Sie beträgt typischerweise 0,4 bis knapp 3ms^{-1} . Bei einer ortsfesten Flamme, z.B. beim Bunsenbrenner, ist die Strömungsgeschwindigkeit des Gemisches genau gleich der Flammengeschwindigkeit. Da die Ausströmung als Freistrahл erfolgt, nimmt die Geschwindigkeit mit zunehmendem Abstand ab. Ist die Ausströmgeschwindigkeit zu gering, wandert die Flamme ins Innere des Brenners entgegen der Strömungsgeschwindigkeit. Bei vorgemischten Flammen könnte die Flamme dann im Innern des Brenners das exfähige Gemisch zünden. Um dies zu verhindern sind Flammensperren eingebaut. Ist die Ausströmgeschwindigkeit zu hoch, hebt die Flamme ab. Bei zu hohen Geschwindigkeiten kann die Flamme erlöschen, weil die Konzentration die UEG unterschreitet bevor die Strömungsgeschwindigkeit gleich der Flammengeschwindigkeit wird.

Methan	H ₂	Benzin(dampf)	Propan	Butan
ca. $0,4\text{ms}^{-1}$	ca. 3ms^{-1}	ca. $0,5\text{ms}^{-1}$	ca. $0,5\text{ms}^{-1}$	ca. $0,5\text{ms}^{-1}$

Tab. 2: Maximale laminare Flammengeschwindigkeiten bei Raumtemperatur und 1013mbar /1/. Die Flammengeschwindigkeit hängt von der Luftzahl ab.

2.8. Turbulente Flammengeschwindigkeit

Die turbulente Flammengeschwindigkeit kann je nach Turbulenzgrad bei günstigen Mischungsverhältnissen bis zum 15-fachen der laminaren Flammengeschwindigkeit betragen /10/. Die laminaren und turbulenten Flammengeschwindigkeiten sind druckabhängig. Hier tiefer einzusteigen würde den Rahmen sprengen, daher sei auf die Fachliteratur verwiesen.

2.9. Gasexplosionen

Bei Gasen definieren die untere und obere Explosionsgrenze die Zündgrenzen, innerhalb derer sich eine stabile Verbrennung ergibt. Innerhalb der UEG und OEG gibt es einen Bereich, in dem die Verbrennung schneller vonstattengeht und damit eine Druckwirkung von der Verbrennung ausgeht. Dann spricht man von einer Gasexplosion. Die Explosionen verlaufen hierbei in der Regel mit Unterschallgeschwindigkeit als Deflagration ab und erreichen nur in Ausnahmefällen, mit entsprechend kritischen Mischungsverhältnissen und bei geometrischer Verbauung, Überschallgeschwindigkeit. Letztere Gasexplosion bezeichnet man als Detonation.

2.9.1. „Verpuffung“

Umgangssprachlicher Begriff für eine schwache Deflagration. Allgemein ein durch Verbrennung erzeugter moderater Druckanstieg mit vernehmbarem Geräusch, aber ohne typischen Knall.

2.9.2. Deflagration

Die Geschwindigkeit der nicht ortsfesten Flamme (=Reaktionsfront) ist kleiner als die lokale Schallgeschwindigkeit, die Reaktionszone in der Flamme wird durch Diffusion von Radikalen und Wärmeleitung aufrechterhalten.

Beispiel: Entzünden einer bereits teilweise verdampften Benzinlache, typische Gasexplosion in Gebäuden.

2.9.3. Detonation

Einer Detonation geht stets eine Deflagration voraus. Die Deflagration erzeugt einen zunehmenden Druck, der ausreicht, allein durch die Verdichtung des ex-fähigen Gemisches in der Reaktionsfront die Temperatur bis zum Erreichen der Zündtemperatur anzuheben. Beim Ottomotor tritt dieser Effekt unerwünscht als Klopfen auf.

Die Reaktionszone in der Flamme breitet sich mit Schall- oder Überschallgeschwindigkeit aus und wird durch die Druckwelle selbst aufrechterhalten.

Beispiel: Sprengstoffe oder H_2 -Luft Gemische innerhalb enger Zündgrenzen.

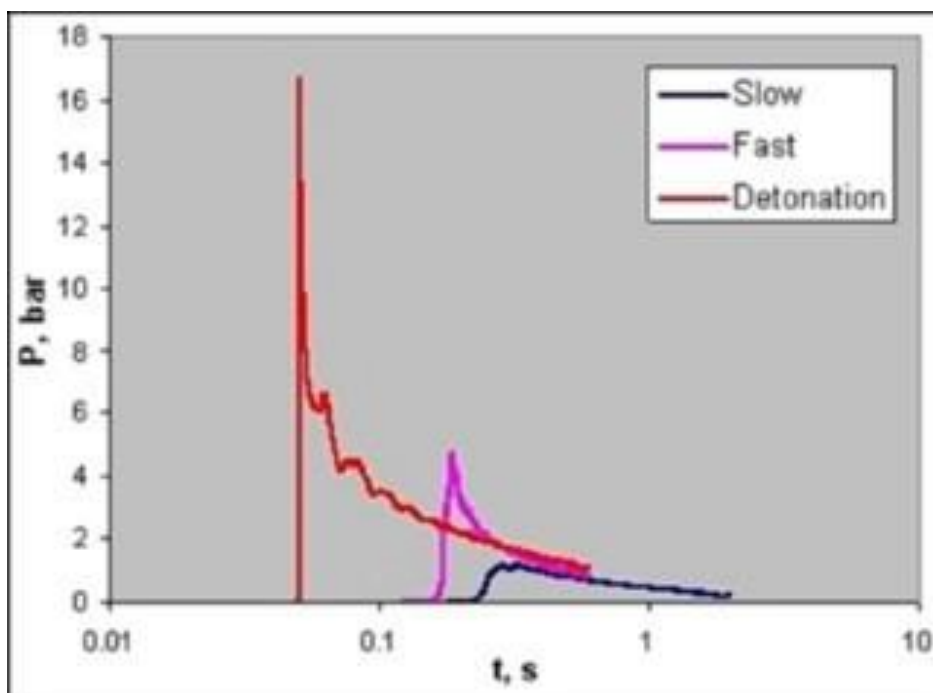


Abb.11: Messsignal eines Druckaufnehmers bei langsamer und schneller Deflagration sowie bei Detonation von Wasserstoff in Luft. Die Zeitskala ist logarithmisch aufgetragen. /11/

Der maximale Druck bei einer Detonation ist höher als bei einer Deflagration, aber die Druckspitzen (50% vom Maximaldruck) sind zeitlich kürzer (ca. 10ms) als bei einer Deflagration (250-1000ms).

2.10. BLEVE (boiling liquid expanding vapor explosion)

Wenn eine brennbare Flüssigkeit (unter Überdruck) über der Siedetemperatur bei Umgebungsbedingungen vorliegt, droht bei plötzlicher Druckabnahme - z.B. durch Öffnen bzw. Bersten des Druckbehälters - ein BLEVE. Hierbei verdampft ein Teil der überhitzten Flüssigkeit schlagartig und der Dampf vermischt sich mit der Umgebungsluft, so dass sich ein großes Volumen eines zündfähigen Gemisches mit der Luft ausbildet. Ist der Druckbehälter aufgrund äußerer Beflammung geborsten, entzündet sich das Gemisch sofort.

Beispiel: Ein Behälter mit 130°C heißem Wasser birst. Im Innern herrscht dabei ein Druck von 2,7bar, das 130°C heiße Wasser verdampft nur zu einem geringen Teil. Da die Verdampfungsenthalpie von Wasser 2,26MJ/kg [4] beträgt, dem Wasser aber nur $30K \cdot 4,19kJ/kg = 125kJ/kg$ zur Erwärmung von 100 auf 130°C zugeführt wurden, verdampfen nur etwa 5% des Wassers sofort, das restliche Wasser kühlt durch die Verdampfung auf 100°C ab. Damit das Wasser zu 100% zu verdampft, müsste es (bei hohem Druck) über 600°C heiß sein.

3. Auswirkung einer Explosion

3.1. Druckwellen (engl. shockwaves)

Schwache Druckwellen breiten sich mit Schallgeschwindigkeit aus, starke hingegen, die bei heftigen Deflagrationen oder Detonationen entstehen, breiten sich mit noch höherer Geschwindigkeit aus

Die Schallgeschwindigkeit beträgt in Luft bei 20°C rund 340ms^{-1} . Sie steigt bei zunehmender Temperatur mit der Wurzel der Temperatur an, d.h. bei einer Vervierfachung der Temperatur (in °K gemessen) verdoppelt sich die Schallgeschwindigkeit.

Ein typischer Überschallknall eines Flugzeuges (in großer Höhe fliegend) erzeugt einen Überdruck von einigen wenigen Millibar am Boden – dabei wackelt vielleicht ein Fenster, und der Knall ist schmerzhaft laut. Bei einer Deflagration oder gar Detonation ist die Druckwelle rund 1000mal stärker.

Druckwellen (wenn sie von einer annähernd punktförmigen Quelle ausgehen) schwächen sich im Freien mit dem Quadrat der Entfernung ab - z.B. in 200m Entfernung ist der Druck nur noch ein Viertel so hoch wie in 100m Entfernung.

In einem leeren teilverbauten Raum wie z.B. einer Tiefgarage kann sich der Druck nicht kugelförmig dreidimensional, sondern nur zylinderförmig zweidimensional ausbreiten. Hier nimmt die Stärke (in erster Näherung) linear mit der Entfernung ab.

In einem leeren Tunnel mit glatten Wänden würde sich eine eindimensional ausbreitende Druckwelle praktisch nicht abschwächen. In der Regel sind zwar in jeder Tiefgarage oder jedem Tunnel Einbauten und Fahrzeuge vorhanden, die die Druckausbreitung abschwächen - allerdings ist nicht zu erwarten, dass die Abschwächung relevant ist.

Druckwellen können sich überlagern (z.B. durch Reflexion an Wänden) – im ungünstigsten Fall sind dadurch lokal höhere Spitzendrücke anzutreffen.

3.2. Wirkung bei der Verbrennung explosibler Gasmischungen

Bei einer Deflagration eines Erdgas-Luft-Gemisches entstehen bis zu 8,2bar /4/. Dies führt bei Personen zu letalen Verletzungen.

Die Druckeinwirkung auf Wände und Decken kann diese zum Bersten bringen. Zum Vergleich: Eine Druckerhöhung von 1 bar bewirkt eine Kraft, der 10 Tonnen pro Quadratmeter entsprechen.

Durch die Druckwelle werden Bruchstücke oder Gegenstände auf hohe Geschwindigkeit beschleunigt. Diese können zu schweren Verletzungen bei Personen führen.

Spitzenüberdruck (bar)	Konsequenz
Direkte Personenschäden	
0,003=3mbar	Sehr lauter Knall
0,01=10mbar	Personen werden umgeworfen
0,3=300mbar	Beschädigung des Trommelfells
0,85=850mbar	Untere Grenze für Lungenschäden
2,05	Untere Letalitätsgrenze
Glasscheiben, Gebäudeschäden	
0,01	Zerstörung 10% Fensterscheiben
0,05	Zerstörung 75% Fensterscheiben
0,2	Zerstörung gemauerter Wände
0,6	Zerstörung mehrgeschossiger Gebäude

Tab. 2. Auswirkung von Drücken auf Personen und Gebäude. Auswahl aus /12/, /13/

/Anmerkung zu Einheiten: Die SI-Einheit für den Druck ist das Pascal, das einem Newton pro Quadratmeter entspricht. Der mittlere Atmosphärendruck ist 760mm Quecksilbersäule (alt und kaum mehr benutzt) oder 1013mb (alte gebräuchliche Einheit, auch als mbar statt mb abgekürzt). Es ist unpraktisch, den Atmosphärendruck mit 101300Pa anzugeben, stattdessen wird 1013hPa (Hektopascal=mb) benutzt. Ebenfalls unübersichtlich ist es, z.B. den Reifendruck eines PKW mit z.B. 250000Pa

anzugeben - aber ob es besser ist, stattdessen SI-konform 250kPa statt der gewohnten 2,5bar zu benutzen, bleibt dem Leser überlassen. Im Bericht werden zur besseren Lesbarkeit die nicht-wissenschaftlichen Einheiten bar und mbar verwendet/.

3.3. Beispiele

3.3.1. Gasexplosion im Freien

Eine große Menge brennbaren Gases tritt aus, z.B. aufgrund eines großen Lecks in einer Gasleitung. Entzündet sich die Gaswolke („Feuerball“), entsteht lediglich ein geringer Überdruck, der keinen ernsthaften Schaden anrichtet. Die Hitzeeinwirkung kann natürlich beträchtlich hoch sein.

Messungen /14/ künstlich erzeugter Gaswolken im Freien, bei denen bis zu 1000kg Methan stöchiometrisch mit Luft vermischt wurde (Volumen rund 13000m³), zeigten einen maximal entstehenden Überdruck von lediglich 25mbar, die Flammengeschwindigkeit lag unter 10m/s.

Allgemein ist zu erwarten, dass eine Zündung einer Gaswolke im Freien wesentlich unkritischer hinsichtlich des Druckaufbaus ist, weil sich der Druck (genauer das expandierende Gasvolumen) in 5 von 6 Richtungen (nicht nach unten) abbauen kann. Trotzdem kann eine Gaswolkenexplosion im Freien extrem kritisch werden, wie sich in Buncefield 2005 (s.u.) zeigte. Es ist schwierig, eine Mindestmenge an Brennstoff zu benennen, ab der eine Explosion im Freien kritisch ist. Da bei den Messungen in /14/ bis zu 1000kg Methan verbrannt wurden und sich dabei nur ein unkritischer Überdruck bildete, ist zu erwarten, dass von den viel geringeren Mengen Gas, die im PKW-Druckbehälter bevorratet sind, bei der Explosion im Freien keine direkte Gefahr durch den Überdruck ausgeht, sondern „nur“ durch herumfliegende Bruchstücke und Hitzeeinwirkung.

2005 gab es in einer Raffinerie in Buncefield, GB, eine Explosion /15/, bei der sich rund 250.000 Liter Benzin über eine längere Zeit beim Überlaufen eines großen Rundtanks

am Boden mit der Luft bei ruhigen Atmosphärenbedingungen vermischte. Die Zündung löste eine Druckwelle mit mehreren Bar Stärke aus.



Abb. 12: Luftaufnahme der Raffinerie nach der Explosion /15/



Abb. 13. Auswirkung einer Druckwelle mit einer Stärke von ca. 5bar auf einen PKW.
/15/

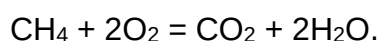
3.3.2. Gasexplosionen in geschlossenen oder teilverbauten Räumen

Ein hermetisch geschlossener Raum füllt sich komplett mit einer stöchiometrischen Erdgas-Luft-Mischung. Der maximale Druck (nur theoretisch erreichbar) bei Explosionen bzw. bei der Verbrennung lässt sich einfach aus dem idealen Gasgesetz (Gay-Lussac) und der maximalen Flammentemperatur abschätzen. Beträgt z.B. die maximale Flammentemperatur von Methan in Luft 1970°C [1], so kann sich ein Druck bei anfänglich 1bar von $(1970+273)K / 273K = 8,2\text{bar}$ (entsprechend 7,2bar Überdruck) bilden. Wasserstoff, LPG oder Benzin haben ähnliche adiabate Flammentemperaturen (+/-10%), so dass keine nennenswert andere theoretischen Maximaldrücke auftreten.

3.3.3. Beispiele für entstehende Drücke

Voraussetzung zur Erreichung des maximalen Drucks ist die vollständige Flutung des geschlossenen Raumes mit dem homogenen Brennstoff-Luft-Gemisch und ein so schneller Abbrand, dass praktisch keine Wärme (konvektiv und per Strahlung) an die Umgebung abgegeben wird. Der Druck breitet sich mit Schallgeschwindigkeit im Raum aus. Außerdem müsste der Raum hermetisch dicht sein und dem Druck von mehreren bar standhalten. Dies ist im realen Brandfall unrealistisch und selbst unter Laborbedingungen schwer zu realisieren. Trotzdem können von diesen Grundlagen ausgehend realistische Szenarien abgeschätzt werden- zwar nicht quantitativ genau, aber ausreichend, um qualitative Unterschiede herauszuarbeiten.

/Beispiel: Ein 50 Liter Tank mit 300bar CNG wird undicht oder birst. Dabei werden $0,05\text{m}^3 \times 300\text{bar} \times 0,7\text{kg}/(\text{m}^3 \text{ bar}) = 10,5\text{kg} = 15\text{m}^3$ Methan freigesetzt. Für die stöchiometrische Verbrennung gemäß der Summenformel



benötigt Methan das doppelte Volumen Sauerstoff.

Luft enthält 21% Sauerstoff, also benötigt Methan das $2 \times 100/21 = 9,5$ -fache Volumen an Luft. Somit werden für die Verbrennung von 1m^3 Erdgas $9,5\text{m}^3$ Luft benötigt. In

einer typischen Tiefgarage mit einer Deckenhöhe von etwas über 2m könnten 15m^3 Methan vollständig in einem Volumen oberhalb einer Fläche entsprechend 6-7 Stellplätzen á ca. 11m^2 ($=142\text{m}^3$ Luft+ 15m^3 Methan) verbrennen .

Anmerkung: Die Abschätzungen der Volumenzunahme sind vereinfacht. Bei der Verbrennung entsteht z.B. auch Wasser, welches kondensiert, sowie Zwischenprodukte, weil die Verbrennung nicht so „glatt“ abläuft, wie in der Summenformel dargestellt. Es ist eine Abschätzung, die lediglich qualitativ richtige Ergebnisse liefert. Die Zahlenwerte sollen keine falsche Genauigkeit vermitteln, sondern es dem Leser ermöglichen, die Berechnungen auch rechnerisch nachvollziehen zu können.

Die kommenden Beispiele enthalten teilweise auch einige Vereinfachungen, so dass die Zahlenwerte um bis zu 20% von der korrekten Lösung abweichen. Um eine qualitative Aussage zu treffen und die Berechnungen einfacher nachvollziehbar zu gestalten, sind die Berechnungen aber geeignet. Wurden Vereinfachungen angenommen, sind diese gekennzeichnet.

Beispiel 1a: Theoretisches Szenario. Die 15m^3 Methan sind stöchiometrisch und homogen in einem geschlossenen Raum (157m^3 Raumvolumen) vermischt, so dass ein zündfähiges Volumen von 157m^3 (15m^3 Methan + 142m^3 Luft) vorliegt (z.B. Gasexplosion in Gebäude). Dann könnte sich bei einer Explosion ein Druck von max. 8,2bar aufbauen, wenn die Verbrennung so schnell abläuft, dass die max. Verbrennungstemperatur von 1970°C erreicht wird.

Beispiel 1b: Theoretisches Szenario. Die 15m^3 Methan sind stöchiometrisch und homogen vermischt, so dass wieder ein zündfähiges Volumen von 157m^3 vorliegt - allerdings in einem diesmal komplett offenen Raum. Dann würde sich beim Verbrennen das 157m^3 -Gasgemisch um das 8,2-fache $/(1970+273)\text{K} / 273\text{K})$ ausdehnen auf 1288m^3 . Der dabei entstehende Druck hängt jetzt von der Flammengeschwindigkeit (s. Kap. 2.7) ab, die wiederum für die Dauer der Verbrennung relevant ist. Dauert der Abbrand des Gemischs einige Sekunden, ist der Überdruck gering. Läuft die Verbrennung turbulent ab, kann die Verbrennung in wenigen Millisekunden ablaufen. Dann läuft die Verbrennung in Form einer Deflagration oder gar einer Detonation mit hohen Drücken (einige bar) in der Flammenfront ab.

In diesem Fall läuft eine Druckwelle mit Schallgeschwindigkeit durch den Raum, die für eine sehr kurze Zeit den hohen Druck auf Objekte ausübt.

2007 wurden Tests mit Wasserstoff in einem Versuchstunnel im Maßstab 1:5 durchgeführt. Ein zündfähiges Gemisch mit $35\text{m}^3 \text{H}_2$ und Luft erzeugte bei der Deflagration einen Überdruck von 1,5bar. Die Druckwelle schwächte sich beim Durchgang durch den Tunnel praktisch nicht ab. Ein 700bar-Druckbehälter mit 30l Inhalt enthält genug H_2 , um mehr als 100m^3 zündfähiges Gemisch bilden zu können. /6/, /16/

Im Falle einer Verbrennung im geschlossenen Raum in Beispiel 1a herrscht überall im Raum ein statischer Druck von 8,2bar.

Beispiel 2a: Theoretisches Szenario: 15m^3 Methan sind ungleichmäßig im selben geschlossenen Raumvolumen wie in Beispiel 1a verteilt, so dass diesmal keine homogene Mischung vorliegt. Das Methan verbrennt jetzt langsam innerhalb von angenommen 20 Sekunden, weil die Durchmischung des unverbrannten Methans mit Luft Zeit benötigt, bis es eine zündfähige Mischung bildet. Bei einem Abbrand von dabei 0,5kg Methan pro Sekunde ergibt sich eine Wärmefreisetzungsrate von 25MW, entsprechend etwa dem Vollbrand von 3 - 5 PKWs. Da per Strahlung und Wärmeleitung an die Umgebung Wärme abgeführt wird, beträgt die mittlere Verbrennungstemperatur nur etwa 1200°C . Statt einer Ausdehnung des Gases um den Faktor $((1970+273)\text{K})/273\text{K} = 8,2$ liegt sie jetzt nur noch bei $1473\text{K}/273\text{K}=5,4$. Damit würde sich „nur“ ein Druck von 5,4bar (=4,4bar Überdruck) bilden.

Beispiel 2b: Realistischeres Szenario: Wie Beispiel 2a, aber das Gas ist nicht-homogen in einem komplett offenen Raum verteilt, so dass wieder in Summe nach 20 Sekunden 15m^3 Methan = 157m^3 zündfähiges Volumen verbrennen. Es entsteht also ein zusätzliches Gasvolumen von $(5,4-1) \cdot 157\text{m}^3=691\text{m}^3$ oder knapp 35m^3 pro Sekunde.

Beispiel 2c: Realistischeres Szenario: Wie Beispiel 2b, aber das Methan verbrennt innerhalb von 20sec in einem großen, 2000m^3 fassenden Raum. Es entsteht wie zuvor ein zusätzliches Gasvolumen von 35m^3 pro Sekunde. Damit steigt der Druck in der Tiefgarage pro Sekunde um 17,5mbar bis auf 350mb nach 20Sekunden an. Danach

kühlt das Gas ab und der Druck nimmt ebenfalls im abgedichteten Raum ab (dass dieser einen Überdruck von 350mbar baulich aushält, sei jetzt ebenso wie die vollständige Dichtheit angenommen) /Anm.: Bei einem Überdruck von 350mb entstehen nicht 35m³ pro Sekunde, sondern 35/1,35 m³/

Beispiel 3a: Realistisches Szenario: Wie in Beispiel 2 verbrennt das Gas z.B. innerhalb von 20 Sekunden, wieder mit einer Wärmefreisetzungsrate von rund 25MW. Der Raum hat aber Öffnungen: z.B. eine einfache Tür mit 2m² Fläche. Diese ist offen und sie führt ins Freie oder in einen weiteren großen Raum. Es entsteht wieder ein zusätzliches Gasvolumen von 17,5m³/s, welches bei einem bestimmten Überdruck durch die Tür ausströmt mit knapp 9m/s: Dann herrscht ein Gleichgewicht zwischen Druckzunahme durch die Verbrennung und –abnahme durch das Ausströmen.

Der Druckverlustbeiwert ζ einer offenen Tür beträgt 1, Dichte Luft $\rho = 1,2 \text{ kgm}^{-3}$, offene Fläche der Tür = 2m². $\Delta p = \zeta \cdot \rho / 2 (9 \text{ m/s})^2 = 48 \text{ N/m}^2 (\text{Pa}) = \text{ca. } 0,5 \text{ mbar}$.

Es würde sich also lediglich ein Überdruck von rund 0,5mb bilden - unabhängig von der Größe der Tiefgarage!

Beispiel 3b Wie Beispiel 3a, aber statt einer Tür sind nur eine Lüftungsöffnung oder kleines Fenster mit 0,1m² offen, dann strömt das Gas im Gleichgewichtszustand mit $17,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} / 0,1 \text{ m}^2 = 175 \text{ ms}^{-1}$ aus. Der Überdruck beträgt dann $\zeta = 1 * 0,6 \text{ kg/m}^3 * 175^2 \text{ m}^2/\text{s}^2 = \text{Pa} = 18.375 \text{ Pa} = 185 \text{ mb}$! Dies entspricht einer Belastung auf die Wände von 1,85Tonnen/m².

Die Beispiele beziehen sich auf die Verbrennung von Erdgas. Qualitativ dasselbe gilt für H₂, Benzin oder LPG. Gute Durchmischung und geschlossene Volumen ergeben höchste Drücke. Je größer die Öffnungen, desto geringer der Überdruck.

Die quantitativen Unterschiede zwischen CNG, LPG, H₂ oder Benzin, das verdampft ist, liegen in erster Linie in der Zeit, in der die Gasgemische reagieren. Hierfür ist die Flammengeschwindigkeit eine wichtige Kenngröße: Je höher diese ist, umso schneller brennt ein Gasgemisch ab - und desto höher ist der entstehende Überdruck im realen Fall. Aber auch hier kann nicht allzu tief ins Thema eingestiegen werden. Denn die Flammenfront ähnelt hier nur im laminaren Nahbereich um die Zündstelle,

z.B. einer sich kugelförmig ausbreitenden Welle, da die Flamme schnell ins Turbulente umschlägt und die turbulente Flammengeschwindigkeit wird durch die turbulenz erzeugenden Objekte (geparkte Fahrzeuge, Tragpfeiler) erhöht.

Allgemein gilt bei „überschaubaren“ Mengen Gas, wie sie für einen Gasbehälter von Fahrzeugen typisch sind:

Im Freien ist die Gefährdung durch Druckeinwirkung (nicht jedoch durch Hitze- einwirkung!) gering, in teilverbauten oder geschlossenen Räumen hingegen können sich so hohe Drücke aufbauen, dass Gebäude zerstört werden.

Faktoren, die einen hohen Druck begünstigen, sind:

1. Menge des Brennstoffes. Je mehr Brennstoff, desto höher der max. Druck.
2. Qualität der Durchmischung des Brennstoffes mit der Luft. Je homogener die Durchmischung und je näher an der in der Regel unterstöchiometrischen Mischung der höchsten Flammengeschwindigkeit, desto heftiger und schneller läuft die Verbrennung bzw. Deflagration ab.
3. Diffusivität der Gase. Wenn eine längere Zeitspanne (mind. mehrere Minuten) zwischen Gasaustritt und Zündung liegt, begünstigt eine hohe molekulare Diffusivität die Durchmischung. Diese ist bei Wasserstoff am höchsten.
4. Die Spannweite zwischen UEG und OEG. Je größer diese, desto größer das zündfähige Volumen bei nicht-homogener Durchmischung. Die größte Spannweite weist Wasserstoff auf.
5. (Laminare) Flammengeschwindigkeit des Brennstoffes. LPG und Benzin weisen eine etwas geringere Flammengeschwindigkeit als Methan auf. Am höchsten ist sie bei Wasserstoff. Je höher die Flammengeschwindigkeit, desto schneller die Verbrennung. Je schneller die Verbrennung, desto eher wird sie ins Turbulente umschlagen, mit deutlich erhöhter Flammengeschwindigkeit.
6. Art und Anzahl turbulenz erzeugender Objekte im Bereich der Gaswolke. Je mehr Tragpfeiler, PKW oder sonst. Hindernisse, desto mehr wird die Turbulenz verstärkt und desto stärker kann die Deflagration verlaufen. Im Extremfall kann sich eine Detonation ausbilden.

Es ist für die Einsatzkräfte kaum möglich, in kurzer Zeit eine verlässliche Information über die oben genannten Faktoren zu erhalten. Was aber empfohlen werden kann:

Eine Zündung eines Gasgemisches kann auch bei teilweise offenen Räumen kritische Drücke bewirken. Die Gefahr hierfür ist bei Wasserstoff am höchsten.

Wenn es die Einsatzsituation zulässt, sollten in Räumen mit potentiell ex-fähigen Gasgemischen grundsätzlich Fenster und Türen geöffnet werden, um den potentiell entstehenden Überdruck so gering wie möglich zu halten!

4. Die diversen Energieträger der Alternativantriebe

Viele brennbare Gase sind in Reinform geruchsneutral. Aus Sicherheitsgründen werden sie mit Verbindungen wie z.B. schwefelhaltigem Mercaptan vermischt („odoriert“). Die Beimischung ist so hoch, dass bereits bei Mischungen unterhalb der UEG ein Geruch wahrzunehmen ist. Benzin und Diesel haben einen typischen Geruch, so dass keine zusätzliche Odorisierung nötig ist. Nachteilig ist die für Katalysatoren vergiftende Wirkung, weshalb z.B. Wasserstoff für Brennstoffzellen nicht odoriert wird /17/.

Um bei gleichwertigen Fahrzeugen eine ähnliche Reichweite zu erzielen, braucht es unterschiedliche Mengen an Brennstoff. So ist der Heizwert von Benzin, Diesel, LPG und Erdgas gewichtsbezogen sehr ähnlich zwischen 10 und 12,8 kWh/kg. Relevant ist aber die volumetrische Speicherdichte (Energiedichte), die die Größe des Tanks und damit den benötigten Bauraum vorgibt - daher das Bestreben der Autohersteller, die Gase bei maximal hohen Drücken zu speichern.

Brennstoff	Heizwert in kWh/kg	Dichte in kgm ⁻³	(Energiedichte) in %
Benzin	11,4	750	100
Diesel	11,9	830	115
LPG (ca. 10bar)	12,8	540	80
CNG (300bar)	10-11	240	30-33
H ₂ (700bar)	33,0	42 ¹	16¹
Li-Ionen-Batterie	ca. 0,15	ca. 1500	ca. 3

Tab. 3: Alle Angaben +-5% aus /3/, /18/. Die Angaben der Gesamtbatterie (Zellen plus Gehäuse und Verkabelung) beziehen sich auf die nutzbare elektr. Energiedichte

Bei der volumetrischen Energiedichte ist Diesel der Spitzenreiter mit 115% gegenüber der Vergleichsbasis von 100% bei Benzin. Bei LPG liegt sie 20% unterhalb von Benzin und CNG weist bei einem Speicherdruck von 300bar nur knapp ein Drittel der Energiedichte wie Benzin auf. Wasserstoff hat selbst bei 700bar nur 1/6¹ der Energiedichte von Benzin. Sei unterstellt, dass ein Verbrennungsmotor mit Benzin und Erdgas denselben Wirkungsgrad habe, so beträgt die Reichweite eines CNG Fahrzeuges nur ein Drittel eines Benzinfahrzeuges bei gleicher Tankgröße.

¹ korrigierte Werte gegenüber der ersten Fassung aus 2020

4.1. „Die Herkömmlichen“: Benzin / Diesel

Benzin und Dieselmotorkraftstoff werden bei Umgebungstemperatur und äußerem Luftdruck in Tanks gespeichert. Es sind flüssige Energieträger mit hoher Energiedichte.

Bei einer Leckage kann sich Benzin auf dem Boden in einer Lache sammeln, bevor es verdunstet. Die Dämpfe und zündfähigen Benzin-Luftmischungen breiten sich wegen der höheren Dichte bevorzugt am Boden aus. Da in einer Tiefgarage die Luft nie vollständig in Ruhe ist (Fahrzeugverkehr, Lüftung), kann sich in kurzer Zeit das durch Mischung mit Luft entstandene zündfähige Gemisch weit ausbreiten.

Diesel hat einen höheren Siedepunkt als Benzin /3/, /18/, daher kann es nur schwer entzündet werden und brennt auch nicht selbständig weiter wenn es z.B. in einer größeren Lache vorliegt.

4.2. Erdgas (engl. „natural gas“)

Erdgas besteht hauptsächlich aus Methan (CH_4). Der Methananteil variiert je nach Herkunft zwischen knapp 80% bei L-Gas und bis knapp über 99% bei H-Gas /19/. Daher können Heizwerte um mehr als 10% differieren. Erdgas kann in erster Näherung mit Methan gleichgesetzt werden.

Es hat etwas mehr als die halbe Dichte von Luft ($0,717 \text{ kgm}^{-3}$ vs $1,292 \text{ kgm}^{-3}$ bei 1013 hPa und 0°C) /19/, ist ungiftig und mit Geruchsstoffen versetzt (odorisiert) /17/. Es wird komprimiert bei Umgebungstemperatur (CNG, compressed natural gas) oder verflüssigt (LNG, liquefied natural gas) gespeichert.

Reines Erdgas und zündfähige Erdgas-Luftmischungen strömen auftriebsbedingt in Luft nach oben.

4.2.1. CNG (compressed natural gas)

Bei Umgebungstemperatur in Druckbehältern bis 300 bar gespeichertes Erdgas. Die Dichte beträgt bei 300bar ca. 220kg/m³

4.2.2. LNG (liquefied natural gas)

Bei ca. -160° C unter geringem Überdruck gespeichertes flüssiges Erdgas.

Im flüssigen Zustand beträgt die Dichte 450kgm⁻³. Diese entspricht der Dichte von CNG bei einem Speicherdruck von etwas über 600bar. LNG hat also etwa die doppelte Energiedichte wie CNG bei 300bar. Ein LNG-Tank muss aber thermisch gut isoliert sein, so dass der Platzbedarf eines LNG-Tanks größer ist als der eines CNG Tanks.

4.3. LPG (liquefied petroleum gas)

Flüssiges Gemisch aus Propan und Butan. Es ist schwerer als Luft und ist ebenfalls odorisiert. Es wird bei Umgebungstemperatur in Druckbehältern zwischen 5 und 15bar gespeichert. Gebräuchliche Bezeichnung „Auto-“, „Campinggas“. Der Siedepunkt von n-Butan liegt bei -0,5°C, der von Propan bei -42°C /3/. LPG siedet je nach Gemischzusammensetzung irgendwo dazwischen.

Bei einem Leck verhält sich LPG ähnlich wie Benzin, wobei es allerdings deutlich schneller verdampft:

Flüssiges LPG kann sich auf dem Boden in einer Lache sammeln, da es durch die Verdampfungsenergie bis unter den Siedepunkt abkühlt und noch eine gewisse Zeit lang flüssig bleibt, bevor es verdampft. Die Dämpfe und zündfähige LPG-Luftmischungen breiten sich wegen der höheren Dichte bevorzugt am Boden aus - hier verhält sich LPG ähnlich wie Benzin.

4.4. Wasserstoff H₂

Wasserstoff ist das leichteste Gas und ist weitgehend vergleichbar mit Erdgas. Das Gas verdünnt sich schnell und erfährt hohe Auftriebskräfte in Luft. Wasserstoff ist nicht toxisch und wird gegenwärtig nicht odorisiert.

4.4.1. CH₂ (compressed H₂)

An PKWs wird es in Druckbehältern bis zu 700bar gespeichert. In anderen Fahrzeugen, wie zum Beispiel Bussen, werden i.d.R. 350bar-Behälter verwendet

4.4.2. LH₂ (liquefied H₂)

Kryogener Wasserstoff LH₂ liegt erst unterhalb -253°C vor. Die Kühlsysteme für so niedrige Temperaturen sind teuer, weil günstige Stickstoffkühlung nur bis etwa -196°C reicht. Die Dichte von LH₂ beträgt 70,8kgm⁻³, was der Dichte von H₂ bei etwa 800bar (bei Raumtemperatur) entspricht /20/.

4.4.3. H₂ in Metallhydrid

Eine besondere Variante der Speicherung bieten Metallhydride /21/. Dabei handelt es sich um Metall-Wasserstofflegierungen, die es ermöglichen, bei moderaten Drücken bis ca. 30bar Wasserstoff quasi wie in einem Schwamm gelöst zu speichern. Diese Technik ist risikoarm, weil bei Beschädigung oder Beflammung der Wasserstoff nur langsam entweicht. Allerdings ist das Speichergewicht bei gleicher Wasserstoffmenge um ein Vielfaches höher als bei den Tanks für komprimierten oder verflüssigten Wasserstoff, so dass diese Variante bei Fahrzeugen praktisch keine Rolle spielt (Stand im Jahr 2020).

4.5. Li-Ionen-Batterie in E-Fahrzeugen

Die in Fahrzeugen verwendeten Batterien (es sind korrekt ausgedrückt Akkus, aber im Sprachgebrauch hat sich Batterie durchgesetzt) bestehen praktisch ausschließlich aus NMC- und NCA-Zellen, da diese die höchste Energiedichte aufweisen. Sie bestehen im Wesentlichen aus der Kathode, die Lithium und weitere Metalle wie **Nickel**, **Mangan**, **Cobalt** und/oder **Aluminium** als Sauerstoffverbindungen (Oxide) enthält, der Anode, die i.d.R. Graphit enthält, und dem Elektrolyten, der aus brennbaren Komponenten sowie einem fluorhaltigen Leitsalz zusammengesetzt ist /22/, /23/, /24/.

Durch mechanische Deformation oder beim Ladeprozess nach einer schädlichen Tiefentladung können sich die Li-Ionen-Batterien selbst entzünden. Näheres hierzu z.B. in /22/, /23/, /24/.

Die Gefahr der Selbstentzündung steigt mit dem Ladezustand (SOC, state of charge). Je höher der SOC desto reaktionsfreudiger. Aus diesem Grund werden beschädigte Batterien – so noch möglich – entladen, um das Risiko einer Selbstentzündung zu minimieren. Eine PKW-Batterie wird im Normalbetrieb (gesteuert durch das Battery Management System, BMS) nicht vollständig entladen, sondern nur bis etwa 10-20% SOC, um Schäden durch Tiefentladung und um vorzeitige Alterung zu vermeiden. Die „leere“ Batterie eines PKW im Normalbetrieb verfügt also immer noch über etwa 10 -20% Restkapazität bei voller Spannung.

4.6. Super-, UltraCaps

Vereinzelte verfügen PKW /25/ über Systeme mit Kondensatoren als kurzzeitige Energiespeicher (SuperCap-Modul), z.B. beim Zweispannungsbordnetz (12V/48V) als Zwischenspeicher beim Rekuperieren. Kondensatoren vertragen sehr hohe Stromstärken, verfügen aber über eine geringe Energiedichte. Da häufig auftretende hohe Ladeströme beim Rekuperieren eine Batterie schneller altern lassen, wird das Supercap-Modul als Zwischenspeicher benutzt, um zeitverzögert die gespeicherte Energie an die Batterie mit moderaten Stromstärken zu übertragen. Ein anderer Einsatzzweck ist z. B. die Bereitstellung hoher Stromstärken für kurzzeitige Betätigung von Aktuatoren

mit hoher Leistung an der Radaufhängung, um während der Fahrt Schwankungen der Karosserie auszugleichen.

Eine besondere Brandgefahr geht von den Kondensatoren nicht aus, die Inhaltsstoffe sind allerdings giftig /24/ und tragen zur Schadstoffbelastung im Rauchgas bei.

4.7. Druckluftspeicher

Sie sind als zusätzlicher Energiespeicher immer wieder im Gespräch /27/, aber bis heute (Stand 2020) ist keine Serienapplikation bekannt. Mit einer der Gründe dürfte die geringe Energiedichte sein. Selbst ein 50 Liter Inhalt fassender Behälter mit Speicherdruck von 700bar enthält lediglich $0,05\text{m}^3 \cdot 7 \cdot 10^7 \text{ Nm}^{-2} = 3,5\text{MJ}$ (ca. 100ml Benzin)

Von dieser Art Speicher geht lediglich die Berstgefahr aus.

5. Die diversen Fahrzeugvarianten mit Alternativantrieb

Als Energieträger kommen folgende Gase zum Einsatz (In Deutschland, Stand 2018)

Bestandsbarometer Personenkraftwagen am 1. Januar 2018 nach ausgewählten Kraftstoffarten					
Kraftstoffart	Anzahl am 1. Januar 2018	Anteil in %	Anzahl am 1. Januar 2017	Anteil in %	Veränderung gegenüber dem 1. Januar 2017 in %
Benzin	30.451.268	65,5	29.978.635	65,5	+1,6
Diesel	15.225.296	32,8	15.089.392	32,9	+0,9
Flüssiggas	421.283	0,9	448.025	1,0	-6,0
Erdgas	75.459	0,2	77.187	0,2	-2,2
Hybrid	236.710	0,5	165.405	0,4	+43,1
darunter Plug-in	44.419	0,1	20.975	0,0	+111,8
Elektro	53.861	0,1	34.022	0,1	+58,3

Tab. 4. Verteilung der PKWs nach Kraftstoffarten /28/.

Häufigstes Gas ist LPG, CNG ist schon deutlich seltener anzutreffen und Wasserstoff ist z.Zt. (Stand 2020) noch ein Exot auf den Straßen.

5.1. Gasbetriebene PKW

Folgende Fahrzeuge können mit Gas betrieben werden:

5.1.1. Pkw mit Verbrennungsmotor

Hier muss der Gastank nicht zwingend zur Erstausrüstung gehören, sondern er kann nachgerüstet sein - in der Regel wird ein LPG-Tank nachgerüstet. Je nach Werkstatt und Hersteller des Tanksystems sind qualitative Unterschiede vorhanden. In der Regel verfügen gasbetriebene Verbrenner noch über einen kleineren Benzintank.

5.1.2.

Pkw mit Wasserstoff-Brennstoffzelle

In Europa (Stand 2019) noch sehr selten. Als Hauptenergieträger wird Wasserstoff in komprimierter Form CH_2 verwendet. Zusätzlich verfügt der PKW über eine Batterie mit mehreren Kilowattstunden Kapazität (häufig Li-Ionen-Batterie). Es ist zu erwarten, dass zukünftig der Anteil von wasserstoffgetriebenen Fahrzeugen mit Brennstoffzellentechnik steigen wird - in Japan sind Fahrzeuge von Toyota („Mirai“) serienreif.

Tiefgekühlte Gase wie z.B. LNG („liquefied natural gas“, Flüssig-Erdgas bei -162°C oder Wasserstoff bei -253°C) spielen bei den PKWs (Stand 2018) keine Rolle und dürften auch weiterhin keine spielen, weil bei Kryo-Tanks trotz bester Isolation bei längeren Standzeiten durch Abdampfen inakzeptable Verluste entstehen. Bei großen Fahrzeugen mit höherem Energiebedarf und vor allem mit regelmäßigem Einsatz, d.h. ohne nennenswerten Standzeiten, wie zum Beispiel LKW, Busse, Lokomotiven oder Schiffen, werden vereinzelt tiefgekühlte Gase verwendet.

5.2. Elektrisch betriebene Fahrzeuge

Bei reinen Elektro-PKW und LKW werden fast ausschließlich Li-Ionen-Batterien mit typischen Gewichten zwischen mehreren hundert Kilogramm beim PKW und bis über zwei Tonnen beim LKW eingebaut. Kapazitäten bei PKW liegen inzwischen (Anfang 2019) bei knapp über 100kWh bei einem Batteriegewicht von deutlich unter einer Tonne. Bei Hybridantrieben ist die Kapazität der Batterie deutlich geringer. Fahrzeuge mit Brennstoffzelle verfügen ebenfalls über kleinere Batterien, nebst Li-Ionen-Batterien kommen auch vom Brandverhalten her unkritische Nickel-Metallhydrid-Zellen zum Einsatz.

Den größten Anteil an E-Fahrzeugen haben elektrifizierte Zweiräder.

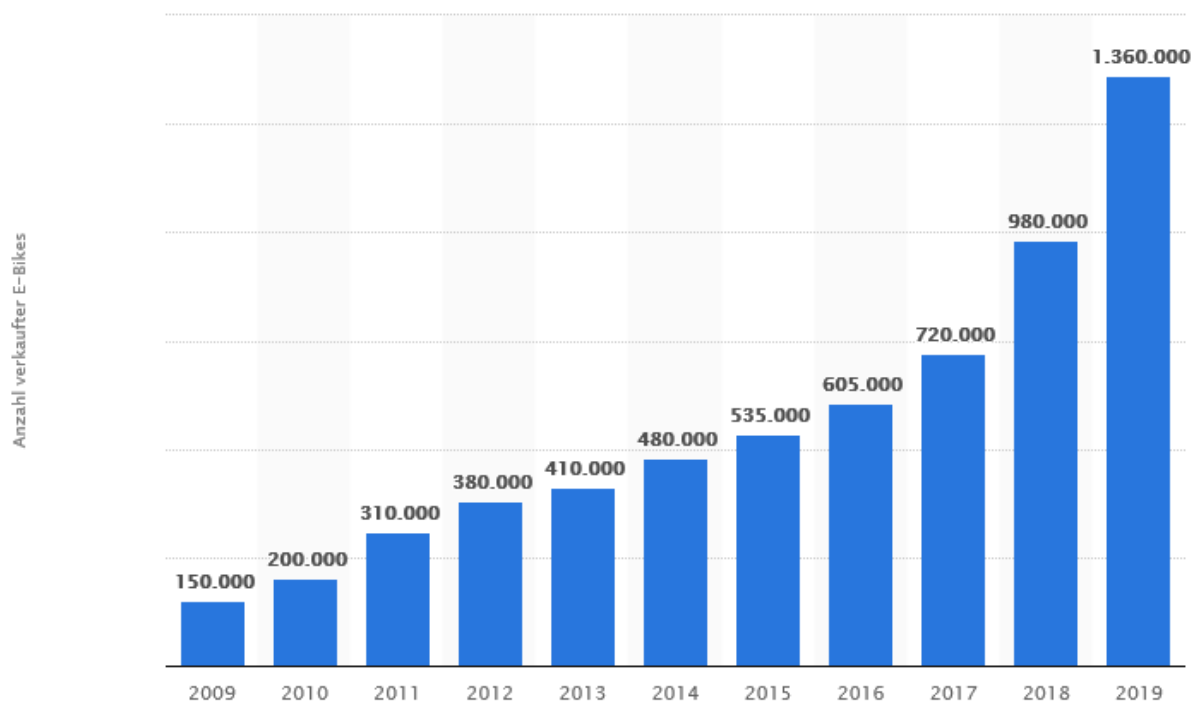


Abb.14: Anzahl verkaufter E-Bikes im Zeitraum 2009 -2019 /29/. In Deutschland (Stand Herbst 2020) gibt es mehr als 5 Mio. E-Fahrräder.

Die typischen Fahrradakkus haben (Stand 2020) einen Energieinhalt von 400 - 600 Wattstunden. Beim Brand entspricht die Wärmefreisetzung incl. Kunststoffgehäuse etwa der eines halben Liters Benzin – mehr als genug, um in der Nähe befindliche Brandlasten zu entzünden. Insbesondere beim Feuerwehreinsatz in Tiefgaragen und in Wohnungen sind die toxischen Rauchgase und Freisetzung schwermetallhaltiger Stäube zu berücksichtigen.

6. Kraftstoff-, Drucktanks und Batteriegehäuse

6.1. Kraftstofftanks für Diesel und Benzin

Die Kraftstofftanks bei PKWs bestehen mehrheitlich aus HDPE (high density polyethylen (/28/)) und sind daher brennbar. Ein durch ein Wannenfeuer von unten befeuerter Tank muss laut Norm /29/ insgesamt etwas über zwei Minuten dem Brand standhalten, d.h. es darf kein Kraftstoff austreten. Versuche bei der FFB zeigen, dass bei der Beflammung nach wenigen Minuten der Kunststofftank undicht wird, da auch bei Erlöschen des Wannenfeuers der Tank selbst brennt und Kunststoff dabei brennend abtropft.

6.2. Drucktanks für komprimierte Gase

Die Behälter werden in vier Typen unterteilt z.B. /32,33/:

Typ 1: Stahl. Für den mobilen Einsatz ist das hohe Gewicht von Nachteil, zur Zeit (Stand 2019) jedoch noch häufig anzutreffen bei CNG-PKWs. Farbe nicht vorgegeben. Typische Drücke bis zu 300 bar

Typ 2: Innen Stahl (Liner), umwickelt mit Glasfaser- oder CFK-Gewebe. Farbe gelb, Drücke bis **300 bar**.

Typ 3: Innen Aluminium oder Stahl, mit CFK umwickelt. Eingesetzt in CNG- und H₂-Fahrzeugen, zunehmend abgelöst durch Typ 4.

Typ 4: Innen Kunststoff, mit CFK umwickelt, evtl. noch eine äußere Schicht mit GFK. Leichteste Behälter. Drücke bis 700 bar. Der innere Kunststoffkörper hält ohne äußere Gewebeverstärkung nur geringen Drücken stand. Bei äußerer Beschädigung oder im Brandfall kein fehlertolerantes Verhalten. Wird z.B. mit einem am Fahrzeugboden liegenden Tank ein Hindernis überfahren, kann es im Innern nicht-sichtbare Brüche im CFK-Gewebe geben. Ist der Tank bei der Beschädigung nur teilgefüllt, liegt also nicht

der maximale Innendruck vor, so kann beim nächsten Tanken der durch die Beschädigung reduzierte Berstdruck überschritten werden. Bei Beflammung verbrennt die Harzmatrix und die Carbonfasern, so dass die Stabilität des Behälters abnimmt.

Beispiel: Ein zylindrischer Druckbehälter mit 1m Länge und 30cm Innendurchmesser wird bei 700 bar mit einer Kraft von $7 \cdot 10^7 \text{ Nm}^{-2} \cdot 0,3 \text{ m}^2 = 2,1 \cdot 10^7 \text{ N}$ (entsprechend 2100 Tonnen) in radialer Richtung auseinandergedrückt und in axialer Richtung mit rund 450 Tonnen. Diese Kräfte werden (in erster Näherung) von $2 \times 1 \text{ m} + 2 \times 0,3 \text{ m}$ Seitenlänge bzw. vom Umfang (0,93m) aufgenommen. Daher sind die Zugspannungen in radialer Richtung an der Längsseite des Zylinders mit rund $8 \times 10^6 \text{ N/m}$ höher als die in axialer Richtung in Höhe von rund $5 \times 10^6 \text{ N/m}$. Das Schadensbild beim Bersten ähnelt daher dem des aufgeplatzten Würstchens (s. auch Abb. 33, S. 62).

Sicherheitseinrichtung Überdruckventil PRV

(PRV = Pressure relief valve) öffnet bei Überschreiten eines maximalen Drucks.

Sicherheitseinrichtung Druckentlastungsventil TPRD

Bei einem Brand wird durch temperatur-aktivierte Entlastungsventile (TPRD, temperature pressure relief device) das Gas innerhalb weniger Minuten kontrolliert abgelassen. Da die Behälter bei Beflammung erhitzt werden, kann die Festigkeit bei Stahl und bei Composite-Werkstoffen durch den Abbrand der Harzmatrix und der Kohlefaser abnehmen. So braucht der Druck erst gar nicht durch die Temperaturerhöhung des Gases anzusteigen, um den Behälter zu überlasten. Das PRV springt nicht an, da der Druck nicht notwendigerweise ansteigt.

Bei Typ-1- oder älteren Behältern bestehen TPRDs noch aus Schmelzlot-Sicherungen; Stand der Technik sind heute (2020) Glasbruch-Sicherungen, wie sie z.B. von Sprinklern her bekannt sind. Diese lösen bei einer Temperatur von i.d.R. 110°C aus und öffnen einen Auslass zum Druckbehälter, üblicherweise eine Rohrleitung mit Innendurchmesser von 1 - 4 mm. Der Druckbehälter entleert sich innerhalb weniger Minuten.

Idalerweise verläuft die Druckentlastung durch das Ausblasen schneller als der Druckaufbau durch Temperaturzunahme, zumal das Gas wegen der Expansion abkühlt. Mit TPRD gibt es zwei Probleme: Verläuft die Beflammung des Druckbehälters erstens nicht gleichmäßig (wie im Zulassungstest gefordert), wird das TPRD nicht durch die Flamme aufgeheizt. Und zweitens sind Typ-4-Behälter brennbar- das Harz und CFK verbrennen und damit nimmt die Festigkeit unter Umständen schneller ab, als der Druck im Innern.

Spricht diese Sicherung nicht ausreichend oder zu spät an, so kann ein vollständig befüllter Typ-4-Behälter bei äußerer Beflammung bereits nach wenigen Minuten bersten. /34/

6.3. Tank für LPG

Diese Tanks bestehen i.d.R. wegen des relativ niedrigen Berstdruckes von 30 - 60bar aus dünnem Stahlblech und sind – da nachrüstbar – oft in den Reserveradmulden verbaut.

6.4. Batteriegehäuse

Batterien von E-PKW werden in den Zulassungstests ECE R100 vergleichbar dem ECE R34 /31/ dem gleichen Beflammungstest wie Kraftstofftanks unterworfen. Allerdings darf im Gegensatz zu den Beflammungstests an den Kraftstofftanks das Gehäuse nach der Beflammungsdauer von gut 2 Minuten nicht abgelöscht bzw. abgekühlt werden.

In der Regel sind die Batteriegehäuse aus Aluminiumguß oder (Edel-)Stahlblechen gefertigt. Seltene Ausnahmen sind z.B. bei extrem hochpreisigen Sportwagen anzutreffen, dort sind auch Gehäuse aus CFK hergestellt.

7. Kritische Situationen für die jeweiligen Energiespeicher und mögliche Folgen

7.1. Druckbehälter mit CNG oder H₂

Das Fahrzeug brennt. Mögliche Brandursachen können z.B. sein: Defekt in der Elektrik, überhitzte Abgasanlage, Brandstiftung, direkte Konsequenz eines Auffahrunfalls oder ein benachbartes brennendes Fahrzeug

Folgende Szenarien sind möglich:

7.1.1. Äußerer Brand und kontrolliertes Abblasen durch TPRD

Das Temperatur-aktivierte Sicherungsventil bläst kontrolliert ab, so dass beim PKW in wenigen Minuten der Tank vollständig und akustisch deutlich wahrnehmbar entleert wird.

Durch den externen Brand wird das austretende Gas gezündet. CNG brennt im Gegensatz zu H₂ in einer deutlich sichtbaren Flamme ab. Der Brand nimmt dadurch an Intensität zu.

H₂ bildet keine oder kaum sichtbare Flammen. Insbesondere bei Bränden in teilverbauten Räumen wie Tiefgaragen oder Tunnels, wo die Sichtweite nahezu Null ist, besteht hier eine schwer einzuschätzende Gefahrenlage.

Bei PKW mit kleineren Tanks, die am Unterboden des Fahrzeugs angebracht sind, kann das Abblasen unspektakulär ablaufen, indem lediglich das Brandgeschehen an Intensität zunimmt. Bei Bussen mit auf dem Dach befestigten großen Druckbehältern kann allerdings unvermittelt eine seitliche Stichflamme mit 15-20m Länge auftreten.

Am 29.Okt.2012 brannte ein Bus in Wassenaar, NL /35/. Wahrscheinlich bedingt durch einen Motorbrand geriet der Bus in Vollbrand. Die CNG – Behälter auf dem Dach bliesen unvermittelt über das TPRD ab. Die Ausbildung der Stichflamme mit einer Länge von rund 15m geschah innerhalb von 1s. Es gab weder eine wie auch immer geartete Vorwarnung, noch hätte es eine angemessene Reaktionszeit für die Einsatzkräfte gegeben sich aus dem Gefahrenbereich zu entfernen.



Abb 15. CNG-Bus im Vollbrand. Wassenaar, NL 2012 /35/.



Abb. 16 CNG-Bus im Vollbrand. Aufnahme aus anderem Blickwinkel /35/.

7.1.2. Äußerer Brand und Bersten des Tanks mit Entzündung

Steigt der Druck im Tank z.B. aufgrund eines defekten TPRD schneller, als er entweichen kann, oder verbrennt der Tank durch die Beflammung (das Harz bei GFK und CFK und schwächt den Verbundwerkstoff, dann kann der Tank bersten. Nahe um den Tank kommt es zu hohen Druckbelastungen und zu starken Einwirkungen durch die Behälterfragmente. Es kann sich keine Vormischung mit Luft vor der Zündung bilden, es handelt sich um turbulente Diffusionsflammen.

Bildet sich stirnseitig eine Öffnung, dann beschleunigt der hohe Impuls des ausströmenden Gases den Behälter in dessen axialer Richtung. Da Druckbehälter i.d.R. quer zur Fahrtrichtung des Fahrzeuges befestigt sind (im PKW vor der Hinterachse und bei Bussen auf dem Dach), hat das wegfliegende Behälterfragment insbesondere bei Bussen quasi freie Flugbahn.

2003 kam es nachts in einem Busdepot in Saarbrücken zu einem Brand /36/. Dabei versagte bei einem CNG-Behälter (200bar, Typ 3) das Druckentlastungsventil (älteres

Modell mit Schmelzlot, heute nicht mehr gebräuchlich), der beschädigte Druckbehälter durchschlug eine Wand und kam in 25m Entfernung auf einem anderen Bus zum Stillstand. In den folgenden zwei Abbildungen sind Schadensbilder zu sehen.



Abb. 17: Durchtrittsöffnung in der Wand (roter Pfeil) /36/



Abb. 18: Landeplatz des Druckbehälterfragments /36/

Vertiefende und gut lesbare Informationen zu Tests mit CNG-Behältern sind z.B. in /37/ zu finden.

7.1.3. Mechanische Beschädigung

7.1.3.1. Bersten ohne Zündung

Bei Achern (Ortenaukreis, BaWü) barst am 24.12.2018 ein CNG-Tank eines Audi A3 g-tron während des Befüllens. Im Nachgang zu einem Bericht in der Regionalzeitung /38/ stellte sich ein Vorschaden des Tanks aufgrund eines Unfalls mit Heckschaden heraus.

Es befanden sich während des Tankens keine Personen im Fahrzeug. Der Fahrer, der das Fahrzeug betankte, wurde verletzt. An welcher Stelle genau er sich im Moment des Berstens befand, ist dem Autor nicht bekannt.

Das ausströmende Gas hat sich nicht entzündet und der zweite CNG-Tank war offensichtlich äußerlich beschädigt. Bei ihm verhinderte ein Sicherheitsventil das Ausströmen des Gases. Im Normalbetrieb tritt beim Betanken von Druckgasbehältern der höchste Druck auf. Da ein Tank auf einen Nenndruck von z.B. 300bar bei 20°C ausgelegt und dabei vollgetankt ist, muss aufgrund der Temperaturerhöhung beim Tanken (adiabate Verdichtung) der Nenndruck überschritten werden, wenn der Tank vollgetankt werden soll. Nach einer Abkühlung auf 20°C liegen dann 300bar an.



Abb. 19: Die beiden CNG-Tanks. Der Tank links im Bild blieb dicht. Bild mit freundlicher Genehmigung von Roland Spether /38/



Abb. 20: Beschädigtes Fahrzeug. Bild mit freundlicher Genehmigung von Roland Spether BNN /38/

Anmerkung: Anfang März 2020 hat VW bekanntgegeben, aus der CNG Antriebstechnik auszusteigen. /39/

7.1.3.2. **Bersten mit sofortiger Zündung**

Im März 2019 /40/ fuhr ein Bus in Stockholm mit auf dem Dach liegenden CNG-Drucktanks in eine zu niedrige Durchfahrt. Funkenbildung durch mechanische Reibung und die elektrische Anlagentechnik zündete das Erdgas sofort.



Abb. 21. Moment des Berstens des oder der Drucktanks /40/



Abb. 22: Unmittelbare Entzündung des austretenden Erdgases /40/

Das Ausmaß der Schäden ist dem Autor nicht bekannt

7.1.3.3.

Bersten mit verzögerter Zündung

Das Gas kann sich mit Luft durchmischen, so dass sich ein zündfähiges (=explosionsfähiges) Gemisch bilden kann. Eintreten kann dieser Fall z.B. beim Betanken, wenn dort der Druckbehälter birst, oder bei mechanischen Belastungen der Behälter von außen, also einem Verkehrsunfall. Im Freien ist die Explosion einer zündfähigen Gaswolke bei weitem weniger problematisch als in einem teilverbauten oder geschlossenen Raum.

In Tiefgaragen sind Tankstellen eher nicht anzutreffen und Verkehrsunfälle mit dieser massiven Schadenswirkung sind wegen der niedrigen Geschwindigkeiten praktisch ausgeschlossen. Im Tunnel hingegen ist ein Auffahrunfall (durch einen LKW) mit entsprechender mechanischer Beschädigung eine reale Bedrohung. Hier besteht auch das theoretisch höchste Gefährdungsszenario, ein Auffahrunfall im Tunnel, bei dem ein LKW auf einen PKW mit CNG- oder H₂-Tank auffährt, wobei der Druckbehälter birst. Das austretende Gas mischt sich mit der Luft und erst nach mehreren Sekunden gelangt zündfähiges Gemisch an heiße Teile (z.B. der Abgasanlage). Jetzt erfolgt die Zündung eines vorgemischten Gasgemisches in einem Raum, die eine Deflagration oder im Falle von Wasserstoff sogar eine Detonation zur Folge haben kann. Die dabei entstehende Druckwelle kann bei der Deflagration bereits mehrere Bar erreichen. Da in einem Tunnel eine Druckwelle praktisch nur durch querschnittsverengende Einbauten und durch darin befindliche Fahrzeuge abgeschwächt wird, aber nur unwesentlich durch zunehmende Entfernung vom Unfallgeschehen, muss ein extremes Schadensausmaß in Betracht gezogen werden.

7.1.4.

Kleine Lecks, Korrosionsschäden

Realversuche mit gasbetriebenen Fahrzeugen in Tiefgaragen mit leakagebedingtem Ausströmen brennbarer Gase sind schwierig zu realisieren und beinhalten ein hohes

Sicherheitsrisiko. Zwar könnte Erdgas z.B. durch eine unkritische Helium-Stickstoffmischung ersetzt werden - aber für Wasserstoff gibt es keine Ersatzgase, die unkritisch sind.

Modellversuche (z.B. mit einem Nachbau einer Tiefgarage im Maßstab 1:10) könnten bei akzeptablem Restrisiko mit Erdgas oder Wasserstoff durchgeführt werden – allerdings müsste die Versuchsanlage bei so niedrigen Temperaturen (erforderliche Gleichheit der Reynoldszahlen) betrieben werden, dass z.B. Flüssigstickstoff zur Kühlung nötig wäre. Hier wäre der Aufwand hoch. Hinzu kommt, dass es praktisch unmöglich ist, Druckgasarmaturen so zu verkleinern, dass ein Leck realitätsnah abgebildet werden kann, oder einen Drucktank maßstabsgetreu zu verkleinern, so dass dieser dasselbe Verhalten bei einer Beflammung wie der reale aufweist. Es ist daher einfacher, Strömungssimulationen durchzuführen. Diese können zwar selbst bei Verwendung qualitativ hochwertiger Software Fehler beinhalten. Bei den vorliegenden Berechnungen sind Annahmen für das Ausströmverhalten der Gase (Massenstrom und Geschwindigkeit) getroffen worden, die sicherlich von der Realität abweichen. Von daher sollten die quantitativen Angaben nur als ungefähre Angaben angesehen werden. Entscheidend ist aber, dass Tendenzen aufgezeigt werden. Es ist im ersten Schritt nicht relevant, ob die Absolutangaben 10, 25 oder 50% von der Realität abweichen. Wichtig ist, dass bestimmte Effekte qualitativ erkannt werden können. In einem zweiten, vertiefenden Verfahren werden diese Effekte quantitativ genauer untersucht werden können - mit einem erheblich höheren Aufwand.

Die Simulationen, die in den folgenden Kapiteln gezeigt werden, sind von M.Sc. F. Schicker /41/ parallel zu seiner eigentlichen Masterarbeit an der FFB bearbeitet worden. Es war die Aufgabe, erste Abschätzungen damit treffen zu können. Da die entscheidenden Randbedingungen, Ort und Abmessung des Lecks sowie der Massenstrom des ausströmenden Gases nur abgeschätzt werden konnten, wurden weitere Vereinfachungen getroffen, um den Aufwand in Grenzen zu halten. Durchgeführt wurden die Simulationen für eine Garage mit einer Grundfläche von 240 m² (ohne Zufahrten) und einer Höhe von 2 m. Vernetzt wurde mit ICEM Tetra, als Solver kam AnSYS CFX 18.1 zum Einsatz.

Die Simulationen sind nicht geeignet, um quantifizierbare Aussagen treffen zu können, wohl aber, um ein qualitatives Bild des Geschehens bei den einzelnen untersuchten Fällen zu bekommen.

Die Belüftung des Garagenmodells erfolgt über eine rechteckige Rohrleitung, die sich in drei Leitungsstränge mit je zwei Eintrittsflächen (rot markiert) aufteilt. Am Ende des Lüftungsrohrs wurde ein Massenstrom von 0,67 kg/s aus der Berechnungsdomäne heraus als Randbedingung definiert. Dies entspricht einem Volumenstrom von ca. 2.900 m³/h (Luftdichte 1,2 kg/m³) und damit der Anforderung von 12 m³/h pro Quadratmeter Garagenfläche, die die Muster-Garagenverordnung /40/ an maschinelle Belüftungsanlagen für Garagen stellt. Die Frischluftzufuhr erfolgt über eine Öffnung am nördlichen Ausgang der Garage (blau markiert), welche den Ausgang in die ruhende Außenatmosphäre darstellt. Ansonsten ist die Garage von Wänden umrandet.

Als wahrscheinliches *Worst-Case-Szenario* im Sinne der potentiellen Erzeugung eines zündfähigen Gemisches innerhalb der Abluftleitung wurde eine Platzierung der Austrittsstelle direkt unter einer der Eingangsöffnungen der Lüftung angenommen. Modelliert wurden die untersuchten Leckagen über eine Austrittsfläche am hinteren Ende des an der Westseite der Garage platzierten Auto-Modells.

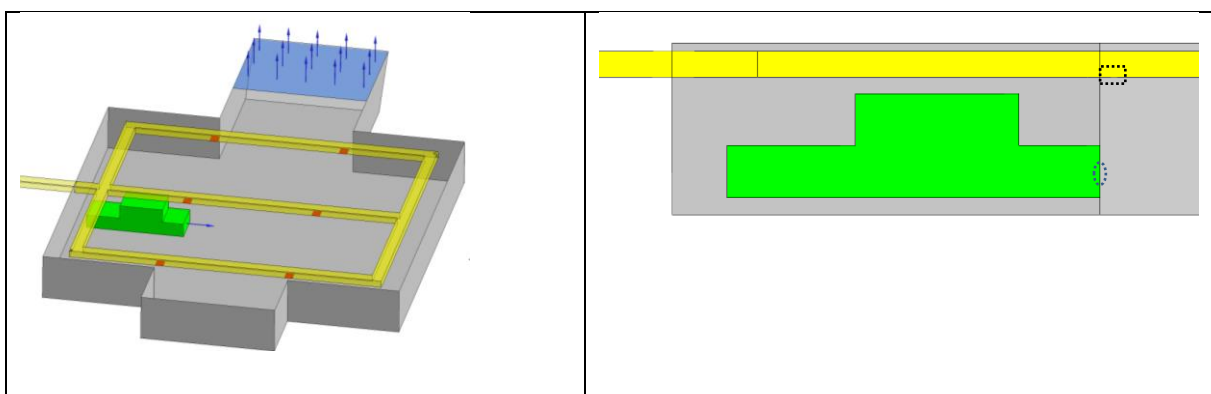


Abb. 23: Links Garagenmodell mit Lokalisation der Randbedingungen; Breite in x-Richtung: 16 m, Länge in y-Richtung: 15 m, Höhe: 2 m. Abbildung rechts: Längsschnitt durch das Fahrzeug unter einem Lüftungsrohr. Rechteckig gestrichelt die Position der Absaugöffnung im Lüftungsrohr, oval gestrichelt die Position des Ausströmens des Gases in das Rechengebiet.

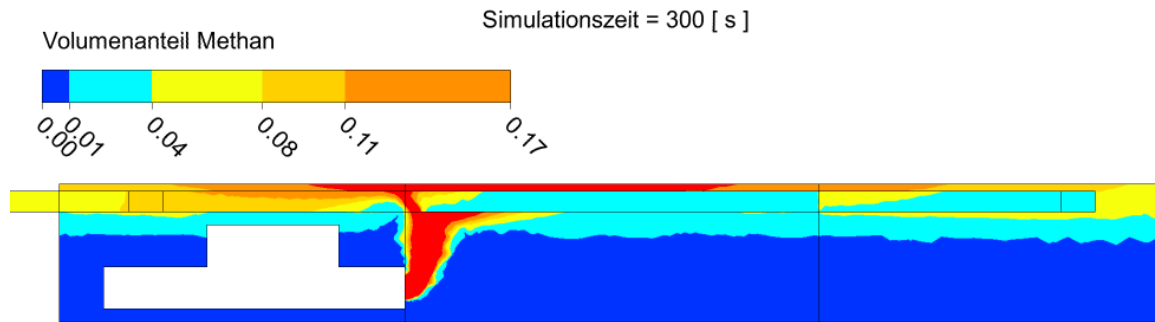


Abb. 24: Längsschnitt der Methanausbreitung nach 5 Minuten bei $\dot{m} = 50 \text{ g/s}$ und diffuser Ausströmung. Die zündfähigen Konzentrationen (UEG 4,4%, OEG 17%) sind gelb, hellorange und orange eingefärbt. Blau und hellblau liegen unterhalb der UEG und rot oberhalb der OEG.

Abb. 24 spiegelt den Fall wider, dass Methan konstant mit einem hohen mittleren Massenstrom von 50 Gramm pro Sekunde aus dem Druckbehälter ausströmt. Es strömt aus dem Fahrzeug anschließend diffus in die Tiefgarage, indem z.B. das Gas zwischen Kofferraum und Heckschürze oder unterhalb mit geringer Geschwindigkeit über eine große Fläche (ca. $0,1 \text{ m}^2$) ausströmt.

Hier befindet sich jetzt zündfähiges Gemisch in der Lüftungsanlage.

Selbstverständlich ist der Massenstrom ausströmenden Methans nicht zeitlich konstant, weil der Druck im Behälter abnimmt. Die Größe des diffusen Ausströmbereichs ist mangels besseren Wissens geschätzt, ebenso ist es unwahrscheinlich, dass eine Öffnung der Lüftungsanlage genau über dem Leck platziert ist. Die folgenden Abbildungen 25 und 26 zeigen die Konzentration wenige Millimeter unter der Decke. Erkennbar ist, dass mit Ausnahme der Zufahrt praktisch überall direkt unter der Decke ein zündfähiges Gemisch vorliegt. Somit ist die Positionierung des Fahrzeugs genau unter einer Absaugöffnung nicht notwendig, damit zündfähiges Gemisch abgesaugt wird. Das Gasgemisch ist in den Lüftungsrohren eingeschlossen, d.h. bei Zündung wird ein rascher Druckaufbau begünstigt. Eine Zündung in den Lüftungsrohren wird diese mit Sicherheit zerbersten mit der Gefahr herumfliegender großflächiger, scharfkantiger Metallbleche, und die Druckwelle kann sicherlich Hörschäden verursachen.

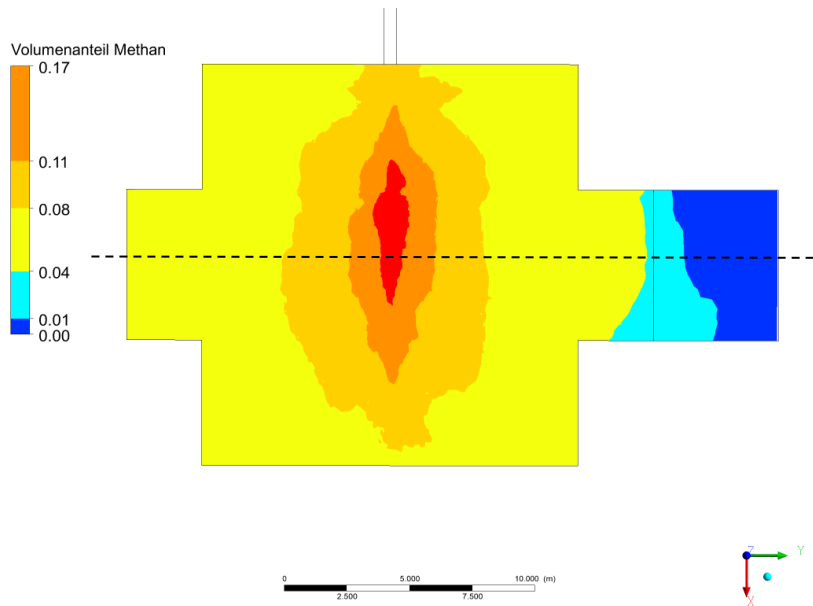


Abbildung 25: Methanausbreitung bei $\dot{m} = 50 \text{ g/s}$ und diffuser Ausströmung nach 5 Minuten (Ebene „Decke“). Die gestrichelte Linie bezeichnet die Ebene für die untere Abbildung 26

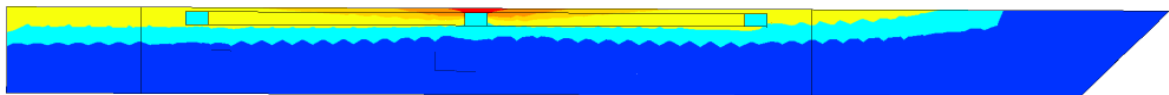


Abbildung 26: Längsschnitt der Methanausbreitung bei $\dot{m} = 50 \text{ g/s}$ und diffuser Ausströmung nach 5 Minuten

Im Freien wären diese Leckagen unproblematisch, aber in Tiefgaragen oder Tunnels sammelt sich das brennbare Gas unter der Decke oder in der Lüftungsanlage (in Tunnels mit Querlüftung).

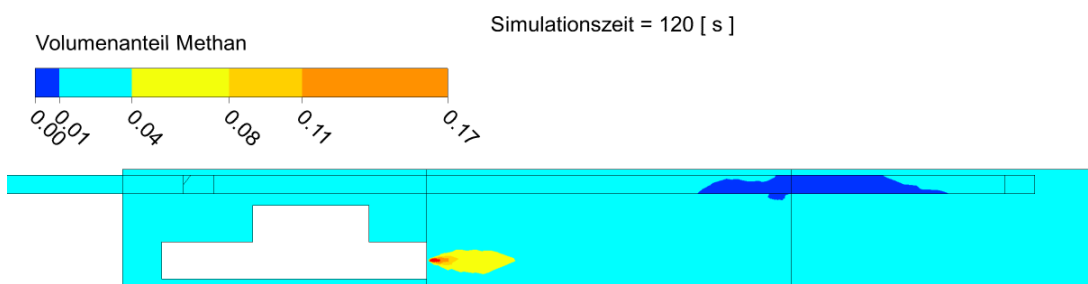


Abbildung 27: Längsschnitt der Methanausbreitung bei $\dot{m} = 50 \text{ g/s}$ und diffuser Ausströmung nach 2 Minuten

Zum Vergleich ist in Abb. 27 ein scharfes Ausströmen durch ein kleines Leck gezeigt. Aufgrund der hohen Ausströmgeschwindigkeit in horizontaler Richtung strömt das Gas nicht auftriebsgesteuert nach oben. Es findet eine großflächige Durchmischung mit der Luft in der Tiefgarage statt, da beim Ausströmen des Freistrahls mit Methan angereicherte Luft angesaugt wird. Somit kann sich die Konzentration kontinuierlich in einem großen räumlichen Bereich anreichern. Die Aussagekraft dieser Berechnung ist allerdings sehr eingeschränkt: Zum einen wird kaum ein Fall eintreten, bei dem das Leck am Heck bzw. der Außenkarosserie direkt ins Freie abblasen kann. Zum anderen ist die Größe des Lecks die entscheidende Einflussgröße für die Ausströmgeschwindigkeit des Methans.

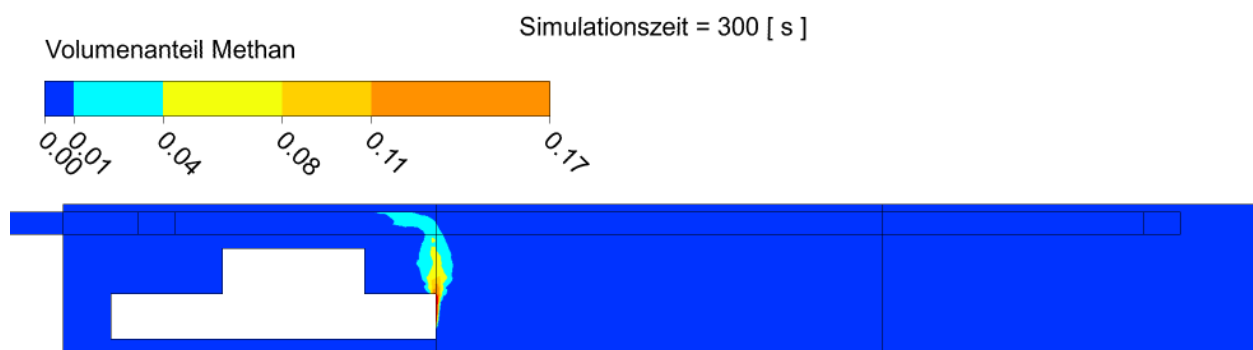


Abbildung 28: Methanausbreitung bei $\dot{m} = 1 \text{ g/s}$ und diffuser Ausströmung

In Abbildung 28 ist die Konzentration bei geringem diffusen Ausströmen zu sehen. Hierbei zeigt sich, dass das Methan aufgrund der geringen Horizontalgeschwindigkeit wegen der Auftriebskraft praktisch senkrecht nach oben strömt. Da das Fahrzeug direkt unter der Lüftung steht, befände sich weder in der Tiefgarage noch in der Lüftungsanlage ein zündfähiges Gemisch (mit Ausnahme des Nahbereichs der diffusen Öffnung am Heck).

Anders als bei CNG ist bei H_2 wegen der fehlenden Odorisierung das ausgetretene Gas nicht zu riechen. Leckagen machen sich jedoch akustisch durch ein Zischen bemerkbar. Die meisten H_2 -Fahrzeuge verfügen zumindest über einen zumeist sehr sensiblen H_2 -Sensor und über empfindliche Kontrollen der Speicherdrücke, so dass selbst

kleinere Leckagen erkannt werden können. Ein derart defektes Fahrzeug sollte vom Fahrer natürlich nicht in einem geschlossenen Raum abgestellt werden.

7.2. LPG-Tank

7.2.1. Äußerer Brand und kontrolliertes Abblasen

Ähnlich wie bei Druckbehältern s. 7.1.1.1.

7.2.2. Äußerer Brand und Bersten des Tanks - BLEVE

Im Folgenden wird das zeitliche Unfallgeschehen (Bologna 2018) beschrieben:

Ein Tankwagen mit LPG steht im Vollbrand, der Tank mit LPG heizt sich auf. Der Berstdruck des Tanks mit einigen Kubikmetern Inhalt liegt bei über 40bar. Das Flüssiggas wird erhitzt, falls der Tank nicht durch die äußere Beflammung geschwächt wird. Je wärmer das Flüssiggas, desto höher der prozentuale Anteil, der beim Bersten sofort verdampft. Da die Fahrzeuge brennen, entzündet sich der Dampf sofort.

Bilder aus einer Überwachungskamera bei einem Unfall mit LPG (Bologna, Italien, 6. Aug. 2018) /43/.



Abb. 29: Aufprall des mit LPG beladenen Tanklasters auf ein Stauende. Die Flammen stammen wahrscheinlich von ausgelaufenem Kraftstoff /43/

/



Abb. 30: Brandszenario kurz vor der BLEVE /43/



Abb. 31: BLEVE. Der weisse Dampf besteht aus einer Mischung von feinverteiltem flüssigem und gasförmigen LPG. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des expandierenden LPG ist höher als die Flammengeschwindigkeit /43/



Abb. 32: BLEVE. Das LPG brennt jetzt vollständig /43/

Im Gegensatz zu dem Unfall in Tarragona (s. S. 63) verteilt sich das leichtere, weil aufgeheizte Gas nicht am Boden, sondern bildet einen Feuerball, weil es auch sofort

durch den LKW Brand entzündet wurde. Die Auswirkungen auf die Fläche sind weit geringer als in Tarragona.

Im Freien baut sich kein zerstörerischer Druck durch die Deflagration auf.



Abb. 33: Der geborstene Tank. Zum Größenvergleich rechts der AdF /43/

Der Druck ist nur im Nahfeld relevant – die Hochstraße wurde dadurch zerstört.



Abb. 34: Die zerstörte Hochstraße /43/

7.2.3. Mechanische Beschädigung

7.2.3.1. Bersten ohne Zündung

Aufgrund des geringen Betriebsdrucks von unter 10bar und eines Berstdrucks von 40bar sind die direkten Auswirkungen im Nahfeld des Tanks moderater als bei einem 300bar-Behälter mit CNG oder gar einem 700bar- Behälter mit H₂.

7.2.3.2. Bersten mit sofortiger Zündung

Es ist hier eine ähnliche Auswirkung wie bei dem zuvor geschilderten Unfall in Kap. 7.2.2 zu erwarten.

7.2.3.3. Bersten mit verzögerter Zündung

Bersten eines mit Propen beladenen Tanks bei Umgebungstemperaturen, z.B. durch Unfall.

Das Propan und die Umgebung haben eine Temperatur von 20°C, der Siedepunkt von Propan liegt bei -48°C. Beim plötzlichen Bersten des Druckbehälters verdampft etwa ein Drittel sofort, der Rest verteilt sich als Flüssigkeit auf dem Boden und verdampft dann ebenfalls rasch. Der Dampf ist kalt und schwerer als Luft und breitet sich bevorzugt am Boden aus. Eine Entzündung des Gases erst mehrere Sekunden nach Bersten des Tanks setzt rasch eine große Fläche in Vollbrand.

Beispiel: In Tarragona, Spanien, kam 1978 ein Tanklaster mit flüssigem Propan (ähnlich LPG) neben einem Campingplatz von der Straße ab und stürzte um /44/. Dabei barst der Tank und das schwere Gas/Flüssiggasgemisch verteilte sich großflächig am Boden. Zur Zündung kam es durch offenes Feuer. Im Gegensatz zu einem sofort entzündeten Gas, welches eine lokal abgegrenzte, sehr hohe Flamme (Feuerball) erzeugt, war der großflächige bodennahe Brand in Tarragona verheerend.

7.2.4.

Leckage

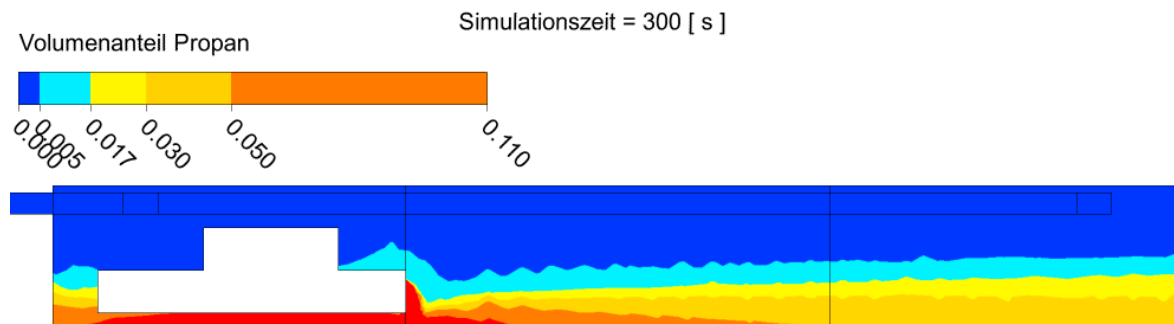


Abb. 35: Konzentration von Propan, das mit 50g/s diffus ausströmt (analog zu Abb. 24 auf Seite 26).

Die Ausbreitung bei einem Massenstrom von 50 g/s zeigt hier im Modellfall, dass sich in der gesamten Garage ein zündfähiges Gemisch in Bodennähe einstellt.

Erkennbar ist auch, dass in beiden Fällen die Konzentration in der Lüftung sehr niedrig bleibt. In der betrachteten Situation kam es nicht zu einer Ausweitung des Gefahrenbereichs über die Lüftungsanlage. Einschränkend ist hier zu bemerken, dass in der Simulation keine zusätzlichen Luftbewegungen außer der Abluftabsaugung berücksichtigt wurden. Im Realfall auftretende Strömungen, zum Beispiel durch die natürliche Ventilation der Garage oder durch Bewegungen innerhalb der Garage, könnten zu einer stärkeren Durchmischung führen, so dass das Gas sich auch unter der Decke in größeren Konzentrationen ansammeln könnte.

Die Ansammlung des Gases in einem „See“ am Boden der Garage führt auch dazu, dass nach vollständiger Entleerung des Tanks die Gefahr durch die explosionsfähige Atmosphäre möglicherweise deutlich länger bestehen bleibt als bei der Ausströmung von CNG. Während das Methangas nach Ende der Ausströmung von der Lüftung gut aus der Garage entfernt werden kann, da es sich unter der Decke im Bereich der Lüftungsleitungen sammelt und/oder über die Zu- und Abfahrten der Garage nach draußen strömt, verbleibt das Propangas in der Garage und sinkt gegebenenfalls auf tiefere Ebenen der Garage ab.

7.2.5. Zum Vergleich: Szenarien bei Benzin/Diesel

PKW-Kraftstofftanks. Bei einer Beflammung von unten fängt der Kunststoff Feuer und tropft brennend ab (/45/). Nach wenigen Minuten läuft der Kraftstoff aus und es kommt zu einem Lachenbrand. Hierbei nimmt der Brand an Intensität stark zu, es ist aber nicht mit einer Explosion oder hohen Drücken zu rechnen.

7.2.6. Li-Ionen Batterie

Die Batterie brennt, die Stichflammen können dabei ohne weiteres einige Meter lang sein. Der Brand ist mit Wasser zu kontrollieren, aber nicht nachhaltig zu löschen. Eine Batterie kann sich über Tage immer wieder von alleine entzünden, wenn sie nicht kontinuierlich mit Wasser beaufschlagt wird.

Beim Brand („Thermal Runaway“) der Batterie werden relevante Mengen an Fluorwasserstoff und giftige Schwermetallstäube emittiert /46/, /47/,/48/, /49/. Moderne Elektro-PKW, deren Batterie im Unterboden verbaut ist, verfügen über Venting(=Ausblas)-Öffnungen im Batteriegehäuse, z.B. unterhalb der B-Säule. Im Brandfall können seitlich Stichflammen mit einer Länge von ein bis zwei Metern austreten. Das Löschen einer äußerlich nur gering beschädigten Batterie ist schwierig, da das Wasser nicht an die Zellen gelangt, die es zu kühlen gilt.

Invasive Maßnahmen durch Einführen einer wasserverteilenden Vorrichtung in das Innere der Batterie sollten vom Anwender wohldurchdacht sein: Zwar sind die elektrischen Leitungen galvanisch getrennt („Minus“ liegt nicht auf Masse wie beim 12V-Netz), aber eine Batterie brennt in der Regel bei einem Unfall erst dann, wenn sie mechanisch beschädigt, d.h. verformt, ist. Ob dann noch gewährleistet ist, dass beide HV-Leitungen isoliert sind, oder dass eine davon möglicherweise Kontakt mit der Karosserie hat, ist offen. Die Entscheidung, einen wasserbefüllten Stahlkörper in die Batterie mit dem hohen Risiko einzuführen, dabei eine spannungsführende Leitung oder Kupferschiene zu treffen und somit einen 800V-Stromschlag auszulösen, sollte daher sorgfältig abgewogen werden.

Ein beschädigtes E-Fahrzeug, bei dem mit dem Durchgehen der Batterie gerechnet werden muss, kann in einem mit Wasser gefüllten Behälter gelagert werden. Somit ist sichergestellt, dass beim Batteriebrand die Ausbreitung verhindert wird und das Abgas im Wasserbad von dem kritischen Fluorwasserstoff und den Stäuben gefiltert wird.

Tests bei der FFB im Oktober 2020 zeigten, dass bei einer (kontrolliert) beschädigten Batterie zuerst 40min lang Elektrolytdämpfe (weißer Rauch) austraten. Die messtechnische Überwachung der Batterie zeigte eine kontinuierliche Zunahme der Temperaturen im Innern der Batterie. Nach 40min entzündete sich der nach unten austretende Elektrolytdampf – es gab nach unten gerichtete Stichflammen, die optisch und akustisch Ähnlichkeiten mit dem Abgasstrahl eines Düsentriebwerks hatten. Da die Batterie heiß wurde, verdampften bzw. pyrolysierten Kunststoffe im Innenraum des PKWs (insbesondere in der Nähe der Batterie), und die Karosserie fing an zu brennen. Nach kurzer Zeit (ca. 1Minute) kam es zur Durchzündung der Pyrolysegase im Innenraum, welche so laut war, dass Personen in der Nähe einen Hörschaden erlitten hätten. Nur aufgrund der Tatsache, dass das Fenster der Fahrerseite geöffnet war, flogen keine Scheiben heraus.

Falls der Einsatz eines Wasserbehälters nicht möglich ist (z.B. in einer Tiefgarage oder einem Parkhaus), kann eine spezielle Decke über das Fahrzeug gelegt werden. Diese Decke sollte ein Absorbermaterial enthalten, und sie sollte natürlich aus nicht-brennbaren Materialien bestehen, (s. z.B. /51/) /. Damit kann zum einen die Brandausbreitung auf benachbarte PKW verhindert werden, aber auch die Rauchausbreitung wird entschärft, da insbesondere der Fluorwasserstoff zurückgehalten wird.

Diese wiederaufladbaren Batterien enthalten kein metallisches Lithium, daher ist weder Metallbrandpulver als Löschmittel sinnvoll noch besteht eine besondere Reaktionsfreudigkeit beim Kontakt mit Wasser.

Bei der FFB werden regelmäßig Beflammungstests mit Li-Ionenbatterien durchgeführt. Gelegentlich besteht die eine oder andere Pkw-Batterie diesen Test nicht, und es kommt zum unerwünschten „thermal runaway“, wobei teils unverbrannte Inhaltstoffe der Batterien wie Graphit und Metalle in Form von Staub freigesetzt werden. Die Ablagerungen an den Wänden und Decke der Prüfkammer und auf dem Boden wurden

2020 labortechnisch von der Dekra und die Emissionen beim „thermal runaway“ vom TÜV SÜD /52/ untersucht.

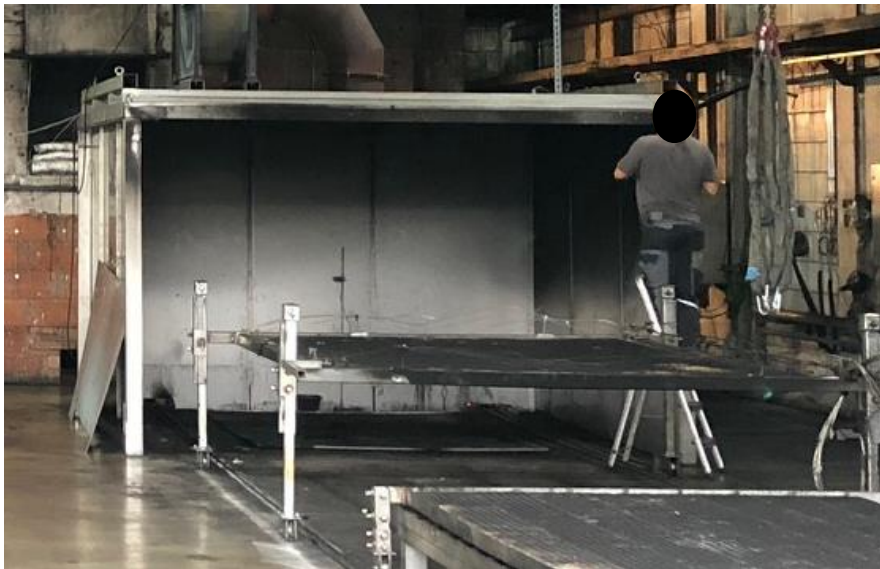


Abb. 36: Prüfkammer der FFB mit Absaugung zur Rauchgasreinigungsanlage

7.2.7. Bestandteile der Ablagerungen

Untersuchungen 2020 /53/ ergaben beim thermal runaway von NMC-Zellen folgende Ergebnisse der untersuchten Komponenten nach Gewicht:

	Benz(o)pyren [ppm (mass)]	Fluorid [% (mass)]	Nickel [% (mass)]	Cobalt [% (mass)]
Seitenwände	0,02	15,8	5,8	1,9
Decke	0,3	11,3	3,2	1
Boden	5,3	1	22	2,9

Tab. .

Das Benz(o)pyren ist an den schweren Rußteilchen, die wie Aktivkohle wirken, angelagert. Schwerkraftbedingt reichern sich die großen Rußteilchen oder –flocken am Boden an. Benzpyren entsteht wahrscheinlich hauptsächlich bei der Verbrennung des Benzins im Poolfeuer bei der Batteriebeflammung und ist nicht als kritische Komponente beim Batteriebrand anzusehen.

7.3. Überschwemmung in TG

Hier besteht ausschließlich für Elektrofahrzeuge das Risiko, dass Wasser in die Batterie eindringt und Kurzschlüsse hervorruft. Nach Trockenlegung der TG sollte mit dem E-Fahrzeug wie mit einem durch Crash beschädigten Fahrzeug verfahren werden.

7.4. Defekte Elektrik/Elektronik E-Fahrzeuge

7.4.1. Schnellladestation (bis 1000V) überlädt

Elektro-PKWs verfügen über ein elektronisches Kontrollsystem (BMS; *battery management system*) ihrer Batterie, welches u.a. eine Überladung oder Überhitzung durch zu hohe Ladeströme der Batterie verhindert bzw. ausschließt, dass vorbeschädigte Zellen geladen werden. Eine schwer zu vermeidende Fehlerquelle hingegen ist allerdings, dass Zellen mit einem internen Defekt verbaut wurden. Diese internen Defekte werden weder von der Qualitätssicherung des Herstellers noch vom BMS erkannt, so dass beim wiederholten Laden und Entladen der Zelle dieser Defekt (interner Kurzschluss durch Dendritenbildung) größer wird und dazu führen kann, dass sich die Zelle entzünden kann.

Wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass defekte Zellen von der Qualitätssicherung nicht erkannt werden, dürfte nicht nur dem Verfasser nicht bekannt sein. Zum heutigen Zeitpunkt besteht jedoch sicherlich keine hohe Wahrscheinlichkeit.

Eine Batterie mit internem minimalem Kurzschluss wird am ehesten dann in Brand geraten, wenn sie einen hohen Ladezustand (SOC) innehat, welcher naturgemäß am Ende des Ladeprozesses am höchsten ist. Daher ist die Wahrscheinlichkeit am höchsten, dass ein ruhendes E-Fahrzeug während des Ladens in Brand gerät.

7.4.2.**Kabeltrommel bis 230V**

Bei nicht geeigneten elektrischen Leitungen (zu dünne Querschnitte oder Restkabel auf der Trommel) geht wegen der dauerhaft hohen Ladeströme (13-16Amp) eine erhöhte Brandgefahr von den Leitungen aus, nicht aber von der Batterie.

7.4.3.**E-Bikes, Pedelecs und sonstiges**

Im Gegensatz zu PKWs sind hier Batterien anzutreffen, bei denen qualitative Abstriche z. B. bei dem BMS durchaus anzutreffen sind. Hinzu kommt, dass manches Gerät eine lange Zeit nicht benutzt wird und die Batterie tiefentladen und somit vorgeschädigt sein kann. Weiterhin können Batterien bei Nicht-Einhaltung der Gebrauchsanweisung zu hohen (in der direkten Sonne) bzw. zu niedrigen Temperaturen (Fahrrad im Drahtverhau im Freien) ausgesetzt worden sein. Auch hier gilt: Das Brandrisiko ist am Ende des Ladeprozesses am höchsten. Daher besteht bei Ladestationen generell ein gegenüber einem „normalen“ Stellplatz erhöhtes Brandrisiko.

Die Ladestation sollte sich daher zumindest nicht in unmittelbarer Nähe bzw. in direkter Verbindung zum Treppenraum befinden und weiterhin sollten sich Brandlasten in einem sicheren Abstand befinden.

Der Heizwert eines Pedelecs (Akku plus Kunststoffteile) entspricht etwa 1- 2 Liter Benzin. Statt aufwändiger baulicher Maßnahmen wie z.B. Wände mit F30 oder F60 Klassifizierung als Abtrennung können bei einer überschaubaren Anzahl von Ladeplätzen auch Gipskarton-Ständerwände oder Porenbetonwände eine geeignete Schutzmaßnahme darstellen.

8. Allgemeines zum PKW-Brand – nicht nur in Tiefgaragen

8.1. Rauchgase

Wenn ein PKW brennt, entstehen nebst dichtem Rauch auch toxische Rauchgase. Untersuchungen /46/, /47/, /48/ haben gezeigt, dass unabhängig von der Antriebsart des Fahrzeuges die Rauchgase u.a. halogenhaltige Verbindungen enthalten, welche beim Brand z.B. aus den Kunststoffen, dem Kältemittel der Klimaanlage, den Elektronikbauteilen und der Batterie gebildet werden.

Insbesondere die entstehenden Fluorverbindungen wie HF (Fluorwasserstoff) sind kritisch, weil sie über die Haut inkorporiert werden können. ***Bei der Bekämpfung eines jeden PKW- oder Li-Ionen-Batterie- Brandes ist atemluftunabhängige PSA zwingend erforderlich, wenn sich der AdF nicht einer gesundheitsgefährdenden Schadstoffbelastung aussetzen soll. Gleichmaßen wichtig ist die nach Einsatzende zu berücksichtigende Einsatzhygiene (Schwarz-Weiß-Trennung).***

8.2. Brandlast und Wärmefreisetzungsrate

Bei PKW vergleichbarer Größe ist die Brandlast im großen und ganzen unabhängig von der Antriebsart /46/, /48/.

So ergaben Tests mit je zwei PKWs gleichen Typs (Klein- bis Mittelklassewagen mit Massen zwischen 1100 und 1500kg), die jeweils als E- Fahrzeug und mit konventionellem Antrieb ausgerüstet waren, einen Heizwert (=Brandlast) zwischen 6300 und 10000 MJ. Da ein Liter Benzin einen Heizwert von rund 30MJ aufweist, entspricht die Brandlast eines PKW der genannten Größen rund 200 bis 300 Liter Benzin oder Diesel. Fahrzeuge dieser Größe verfügen i.d.R. über Kraftstofftanks mit einem Fassungsvermögen zwischen 30 und 60 Liter. Gasbetriebene Fahrzeuge haben einen Gasvorrat mit ähnlichem Heizwert an Bord. Die Batterie eines E-Fahrzeuges dieser Größenordnung wiegt bis zu mehreren 100 Kilogramm. Aufgrund der brennbaren Bestandteile einer Li-Ionenbatterie (insbesondere der Elektrolyt) entspricht der Heizwert von 100 kg Batterie dem von 5 bis 20 Litern Benzin.

Unabhängig von der Antriebsart liegt der Anteil des (vollen) Energiespeichers am Gesamtheizwert des Fahrzeuges bei 15 bis 25%. Den größten Beitrag liefern die Kunststoffe: Reifen, Karosserieteile, Innenverkleidung, Polster, Teile der Elektrik etc.

Die normative Brandlast kann also unabhängig von der Antriebsart als gleich betrachtet werden. Der Wärmeeintrag auf die (tragenden) Gebäudeteile und die damit verbundene mögliche Beschädigung der Struktur hängt aber vom Brandverlauf ab: Ein kurz anhaltender, starker Brand mit hoher Wärmefreisetzungsrate schädigt bei Beton möglicherweise nur die Oberfläche, weil wegen der geringen Temperaturleitfähigkeit des Betons das Innere nicht kritisch aufgeheizt wird. Ein freiliegender Stahlträger mit hoher Wärme- und Temperaturleitfähigkeit hingegen kann bei einem kurzen, heftigen Brand heißer werden als bei einem moderaten, länger anhaltenden Brand mit niedrigeren Rauchgastemperaturen, bei dem die Stahltemperaturen im unkritischen Bereich bleiben.

Im Jahre 2012 durchgeführte Messungen in Frankreich /48/ hinsichtlich der Wärmefreisetzungsraten und Temperaturen ergaben ebenfalls keine relevanten Unterschiede bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen gegenüber E-Fahrzeugen mit Li-Ionen-batterie. Zwar waren bei den Versuchen die Batterien damals wesentlich kleiner als bei den heutigen Fahrzeugen, aber entscheidend ist der hohe Gewichtsanteil an Kunststoffen im Fahrzeug.

9. Zusammenfassung

Alternativ angetriebene Fahrzeuge können ein vielseitiges, teils nur schwer vorhersehbares Verhalten im Falle eines Unfalles oder Brandes an den Tag legen.

Ein Druckbehälter birst nicht ohne äußere Einwirkung. Auslöser sind Füllvorgänge, mechanische Einwirkungen (z.B. Auffahrunfall) oder äußere Beflammung.

1. Von Druckgasbehältern, die bis zu 700bar Betriebsdruck aufweisen, geht eine Gefahr auch ohne Brand bzw. ohne Zündung nach dem Bersten durch Splitterwirkung und hohe Drücke im Nahbereich aus.
2. Es ist bei einem Brand, bei dem der Druckbehälter beflammt wird, möglich, dass es zum Behälterversagen mit sofortiger Durchzündung kommt. Ob LPG, CNG oder H₂ beteiligt sind, ist dann letztendlich egal.
3. Druckgasbehälter sind mit Sicherungseinrichtungen ausgestattet, die im Brandfall durch ein temperatúrausgelöstes Ventil Gas abblasen um den Innendruck zu senken. Die dabei entstehenden Stichflammen können erhebliche Ausmaße annehmen.
4. Beflammte Druckbehälter, insbesondere solche, die aus CFK bestehen, können trotz aktivierten Druckentlastungsventils bersten, weil die Struktur aus CFK-Fasern und Harz abbrennt und damit eine Strukturschwächung einhergeht. Nur wenn die temperatúrausgelöste Druckentlastungsvorrichtung (TPRD) früh genug öffnet, birst der Tank nicht.
5. Die Verläufe einer Gasexplosion im Freien gegenüber in geschlossenen oder teilverbauten Räumen sind unterschiedlich. In geschlossenen oder teilverbauten Räumen können aufgrund der entstehenden hohen Drücke Gefahr für Personen und für die Bausubstanz auftreten, im Freien hingegen sind die Gaswolkenexplosionen aufgrund des begrenzten Brennstoffgehaltes vom Druckverlauf her eher als unkritisch anzusehen.
6. Die theoretisch maximale Schadenswirkung hat ein Verkehrsunfall im Tunnel, bei dem ein 700 bar H₂-Druckgasbehälter durch mechanische Einwirkung birst. Der ausströmende Wasserstoff könnte sich mit der Luft vermischen und dann verzögert z.B. an heißen Motorkomponenten gezündet werden. In diesem Fall

ist eine Deflagration (evtl. sogar eine Detonation) des H₂-Luftgemisches möglich. In einem Tunnel – gleich welcher Länge - könnte die rasch durchlaufende Druckwelle selbst noch an den Portalen kritische Stärke haben.

7. In Tiefgaragen können sich bei undichten Druckbehältern in Fahrzeugen zündfähige Methan- und Wasserstoff-Luftgemische an der Decke ansammeln. Ein Gaswarngerät würde bei Messung in typischer Körperhöhe nicht anschlagen.
8. Die Lüftungsanlage in einer Tiefgarage kann bei undichten Druckbehältern in Fahrzeugen für einige Minuten lang mit ex-fähigem Gemisch geflutet sein. Zündet das Gemisch z.B. durch einen nicht ex-geschützten Ventilator, können die Lüftungsrohre bersten. Dabei besteht die Gefahr herumfliegender Metallbleche und Personen in der Nähe drohen mindestens Gehörschäden durch die Druckwelle.
9. Fahrzeuge mit Li-Ionen-Batterien können aufgrund des nicht vorhersehbaren Brandverhaltens der Batterie auch längere Zeit nach einem Unfall noch anfangen zu brennen.
10. Ist eine Li-Ionen Batterie im Fahrzeug beschädigt, muss sie nicht zwangsweise sofort brennen. Sie kann sich aber aufheizen und bis zu rund einer Stunde lang nur Elektrolytdämpfe absondern. Dabei wird die Batterie so heiß, dass Kunststoffe im Fahrzeuginnenraum in Nähe der Batterie pyrolysieren und brennbare Gase freisetzen, die sich mit der Luft im Fahrgastraum durchmischt. Dabei kann es zu einer Durchzündung kommen, bei der Personen Gehörschäden drohen und Scheiben oder Türen aufbrechen oder splittern können.

10. Anhang: Aufgabe und Struktur des IKET

IKET: Institut für Kern- und Energietechnik am KIT



Abb. 37: Testbehälter H110 (horizontal 110m³) und V60 (vertikal 60m³) des Wasserstoffversuchszentrum HYKA

Am IKET werden Grundlagenuntersuchungen zur Verteilung und Verbrennung von Brenngasen, insbesondere Wasserstoff durchgeführt. Dazu werden Simulationen mit den eigenen CFD Tools GASFLOW (großräumliche Verteilung von Gasen in komplexen Räumen und unfalltypischen Umständen) und COM3D (Modellierung von reaktiven Strömungen, d.h. Deflagrationen und Detonationen) durchgeführt und typische Szenarien wie auch Validierungsdaten experimentell untersucht bzw. erfasst.



Abb 38. Links: Grosses Explosionsrohr zur Bestimmung von grundlegenden Stoffdaten; rechts: Detonationsexperiment in der grossen Testzelle TC160

Die Wasserstoffversuchsanlage HYKA verfügt über

- *Testräume mit bis 220 m³ und 160 bar statisch*
- *Laserlabor und spezielle Messtechniken für schnelle Verbrennungen (bis Detonationen)*
- *Explosionssichere Ventilation*
- *Spezielle Messtechniken und erfahrene Betriebsmannschaft*

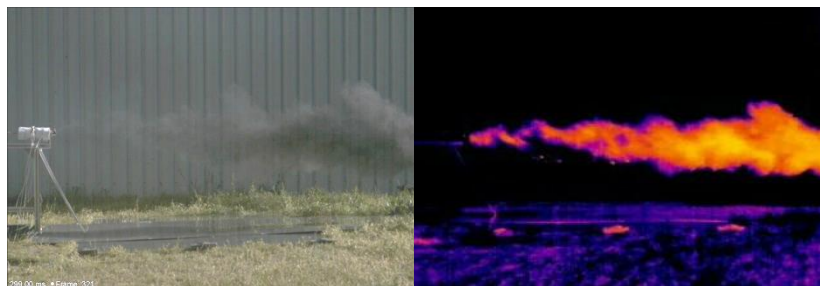


Abb 39: Experimentelle Untersuchung vom Zündverhalten durch einen Unfall freigesetzter Wasserstoff-Festkörperspeicher

11. Literaturverzeichnis

- /1/ J. Warnatz, U. Maas, R.W. Dibble: *Verbrennung*, 3. Auflage. Springer Verlag ISBN 3-540-42128-9, **2001**
- /2/ Zarzalis **ANGEWANDTE VERBRENNUNGSTECHNIK**/ Prof. Dr.-Ing. N. Vorlesung EBI VBT am KIT
- /3/ GESTIS <http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/>
- /4/ BAM, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 2539. <https://www.bgetem.de/redaktion/arbeits-sicherheit-gesundheitsschutz/dokumente-und-dateien/brancheninformationen/energie-und-wasserwirtschaft/gasversorgung/abschlussbericht-zum-forschungsvorhaben-2539-sicherheitstechnische-eigenschaften-von-erdgas-wasserstoff-gemischen> **2016**
- /5/ http://vbt.ebi.kit.edu/index.pl/Haupt_Menu_none/themen/turbvorm/flammentypen.html
- /6/ https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/09/HyTunnel-CS_D1.2_Risks-and-Hazards.pdf, **2019**
- /7/ FFB-interne Aufnahmen **2015**
- /8/ Dinkov, I., FFB, eigene Berechnungen, **2018-2019**
- /9/ D. Schelb, T. Jordan. noch nicht veröffentlichte Ergebnisse www.hytunnel.net, **2020**.
- /10/ Peters, N. *Turbulent Combustion*, Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-66082-2, **2000**
- /11/ Jordan, T.: Versuche an der KIT- eignen Versuchsanlage HYKA
- /12/ Konersmann, R.; Kühl, C.; Ludwig, J: Zu den Risiken des Transports flüssiger und gasförmiger Energieträger in Pipelines - Forschungsbericht 285 / BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung.. – Forschungsbericht. – ISBN 978-3-9812354-7-0, **2009**
- /13/ Kaiser, W. ; Rogazewski, P. ; Schindler, M. ; Acikalin, A. ; Lambert, M.; Steinbach, J.: Ermittlung und Berechnung von Störfallverwaltungsvorschrift - Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 297 48 428, Band 2 / Umweltbundesamt. Forschungsbericht **2000**
- /14/ Pfortner, H., Schneider, H.: Die Verbrennung großer freigesetzter Gaswolken am Beispiel Erdgas. FhG-Berichte, 2/89, S. 58-61, **1989**
- /15/ **Buncefield Explosion Mechanism 2009** <https://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr718.pdf> **Research report 718**

-
- /16/ Groethe, M., Merilo, E., Colton, J., Chiba, S., Sato, Y., and Iwabuchi, H. (2007) Large-scale hydrogen deflagrations and detonations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 2125-2133. **2007**
- /17/ M. Goschin, H. Kuhrmann und R. Rawe: Schwefelreduzierte Odorierung durch Odoriermittelgemische. *Zeitschrift GWF-Gas/Erdgas* 144 (**2003**) Nr.10
- /18/ <https://www.chemie.de/lexikon/>
- /19/ <https://www.dvgw.de/themen/gas/gase-und-gasbeschaffenheit/>
- /20/ https://www.linde-gas.at/de/images/1007_rechnen_sie_mit_wasserstoff_v110_tcm550-169419.pdf
- /21/ <https://www.ifam.fraunhofer.de/de/Institutsprofil/Standorte/Dresden/Wasserstofftechnologie/hydride/anwendungen-von-metallhydriden.html>
- /22/ https://www.batterien.fraunhofer.de/content/dam/batterien/de/documents/Allianz_Batterie_Zellformate_Studie.pdf
- /23/ Kompendium Li-Ionen Batterien <https://shop.vde.com/de/kompendium-li-ionen-batterien>, **2015**
- /24/ J. Kunkelmann Untersuchung des Brandverhaltens von Lithium-Ionen- und Lithium-Metall-Batterien in verschiedenen Anwendungen und Ableitung einsatztaktischer Empfehlungen IMK Forschungsbericht 175, **2015**,
- /25/ <https://www.auto-motor-und-sport.de/news/i-elloop-im-neuen-mazda-6-ungewoehnliches-rekuperationssystem>
- /26/ https://www.maxwell.com/images/documents/Safety_Datasheet_3000389_DE_1.pdf
- /27/ <https://www.auto-motor-und-sport.de/news/druckluft-hybridantrieb-sprit-sparen-mit-druckluft/> **2014**
- /28/ www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Ueberblick/2018_b_barometer.html?nn=1133288
- /29/ ZIV. "Absatz Von E-bikes In Deutschland Von 2009 Bis 2019." Statista, Statista GmbH. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/152721/umfrage/absatz-von-e-bikes-in-deutschland/> **2020**
- /30/ Mündl. Mitteilung TÜV Rheinland 2019
- /31/ ECE R34 Norm. www.unece.org
- /32/ <https://www.nproxx.com/de/different-types-of-pressure-vessel/>
- /33/ <https://emcel.com/de/wasserstoffdruckbehaelter/>

- /34/ Hupp, N., Stahl, U., Kunze, K., Wilde, P., Sinske, H., Hinrichen, O., Influence of fire intensity, fire impuigement are and internal pressure on the fire resistance of composite pressure vessels for the storage of hydrogen in automobil applications. *Fire Safety Journal* 104, **2019**
- /35/ <https://www.youtube.com/watch?v=1sA2niSwYS8>. Suchbegriffe regio15.nl cng bus. Busbrand in Wassenaar, NL, 29. Okt 2012
- /36/ Lionel Perrette, Helmut K. Wiedemann. CNG buses fire safety. Learnings from recent accidents in France and Germany. Society of automative engineerworld Congress **2007**, Apr 2007, Detroit, United States. pp.NC. xx
- /37/ Tschirschwitz et al. Hazards from failure of CNG automotive cylinders in fire <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.12.026> **2018**
- /38/ bnn1/ Online-Version der Badischen Neuesten Nachrichten. <https://bnn.de/lokales/achern/fragen-nach-explosion-eines-erdgasautos>, 2018
- /39/ <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/volkswagen-vw-nimmt-abschied-vom-erdgas/25593434.html?ticket=ST-691770-RvBbE-PoSake3lHdZ7MRO-ap4>
- /40/ Quelle <https://www.ctif.org/news/cng-propelled-buss-exploded-central-stockholm-reason-unknown>
- /41/ Schicker, F.: Bearbeitung während seiner Masterarbeit an der FFB. Universität Heidelberg, Fakultät für Physik und Astronomie, 2018. Z.Zt. in Ausbildung zum Höheren Dienst der Feuerwehr
- /42/ Muster-Garagenverordnung (M-GarVO), Fassung Mai 1993
- /43/ <https://www.youtube.com/watch?v=OPthZO0fCLg> Suchbegriffe LPG Tanker Bologna 2018
- /44/ <https://www.feuerwehrmagazin.de/nachrichten/news/die-groessten-ungluecke-mit-tanklastzuegen-71873>
- /45/ Beflammungstests an der FFB **2016-2020**
- /46/ Versuche an der FFB **2019-2020**
- /47/ B. Truchot et al. An experimental evaluation of toxic gas emissions from vehicle fires. *Fire Safety Journal* 97, pp. 111-118, **2018**
- /48/ A. Lecocq et al. Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an ICE vehicle. 2. *Int. Conference on Fires In Vehicles - FIVE 2012*. SP Tech. Research Inst. of Sweden- Boras pp. 183-194, **2012**
- /49/ Gehandler, Jonatan, et al. *Risks Associated with Alternative Fuels in Road Tunnels and Underground Garages*. SP Technical Research Institute of Sweden, **2017**.

-
- /50/ https://plus.empa.ch/images/2020-08-17_Brandversuch-Elektro-auto/AGT_2018_006_EMob_RiskMin_Undergr_Infrastr_Final_Report_V1.0.pdf **2020**
- /51/ <https://www.planex-gmbh.de/products/lithium-ionen-brandschutzdecke/>.
Entwicklung im Rahmen eines von der AiF geförderten Forschungsprojekts
(ZIM-KOOP) **2019**
- /52/ Intern beauftragte Messungen. Durchgeführt von Dekra Automobil GmbH
2020
- /53/ Intern beauftragte Messungen. Durchgeführt von Tüv Süd Industrie Service
GmbH **2020**

Hinweis

Die bisher veröffentlichten Forschungsberichte können auf den Homepages der

**Forschungsstelle für Brandschutztechnik
am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**

<https://www.ffb.kit.edu>

und des

Instituts für Brand und Katastrophenschutz Heyrothsberge

<https://ibk-heyrothsberge.sachsen-anhalt.de/forschung-idf/publikationen/>

eingesehen werden.