



Europäisches Train-the-Trainer-Programm für Responder

Lektion 11

Begrenzte Räume

STUFE IV

Experte

Die in dieser Lektion enthaltenen Informationen richten sich an **Experten** und höher.

Dieses Thema ist **NUR** auf STUFE IV verfügbar

Diese Lektion ist Teil eines Schulungsmaterialpakets mit Materialien für die Stufen I - IV: Feuerwehrmann, Gruppenkommandant (-führer), Einsatzleiter und Experte. Bitte beachten Sie die Einleitung zur Lektion bezüglich der Kompetenzen und Lernerwartungen

Hinweis: Diese Materialien sind Eigentum des HyResponder-Konsortiums und sollten entsprechend gewürdigt werden. Die Ergebnisse von HyResponse wurden als Grundlage verwendet.



Haftungsausschluss

Trotz der Sorgfalt, die bei der Erstellung dieses Dokuments aufgewendet wurde, gilt folgender Haftungsausschluss: Die Informationen in diesem Dokument werden in der vorliegenden Form bereitgestellt, und es wird keine Garantie oder Gewährleistung dafür übernommen, dass die Informationen für einen bestimmten Zweck geeignet sind. Der Nutzer verwendet die Informationen auf eigenes Risiko und eigene Haftung.

Das Dokument gibt ausschließlich die Meinung der Autoren wieder. Das Gemeinsame Unternehmen FCH und die Europäische Union haften nicht für die Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen.

Danksagungen

Das Projekt wurde vom Gemeinsamen Unternehmen "Fuel Cells and Hydrogen 2" (JU) im Rahmen der Finanzhilfvereinbarung Nr. 875089 finanziert. Das Gemeinsame Unternehmen wird durch das Forschungs- und Innovationsprogramm "Horizon 2020" der Europäischen Union sowie durch das Vereinigte Königreich, Frankreich, Österreich, Belgien, Spanien, Deutschland, Italien, die Tschechische Republik, die Schweiz und Norwegen unterstützt.

Zusammenfassung

Diese Lektion gibt den Respondern einen Überblick über den Einsatz von Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnologien in geschlossenen Räumen, z. B. in Gebäuden, Parkhäusern und Tunneln. Es wird betont, dass die in den vorangegangenen Vorträgen behandelten Informationen alle anwendbar sind und daher hier nur zusätzliche neuere Forschungsergebnisse einbezogen werden. In dieser Lektion werden die spezifischen Gefahren im Zusammenhang mit Brennstoffzellen-Systemen in Innenräumen hervorgehoben. Er behandelt die wichtigen Themen der passiven und Zwangsbelüftung, gut belüftete und unterbelüftete Wasserstoffbrände, einschließlich zweier Selbstlöschungsregime, und externe Flammen. In dieser Lektion wird auch das für Wasserstoff spezifische Phänomen der Druckspitze erörtert.

Schlüsselwörter

Einschließung, Belüftung, Druckspitzenphänomen, Parkplätze, Tunnel, gut belüftete Brände, unterbelüftete Brände, selbstlöschende Flamme, externe Flamme.

Inhaltsübersicht

Zusammenfassung.....	3
Schlüsselwörter	3
1. Zielgruppe.....	5
1.1 Beschreibung der Rolle: Experte.....	5
1.2 Kompetenzniveau: Experte	5
1.3 Vorbildung: Experte	5
2. Einleitung und Ziele	6
3. Gefahren und damit verbundene Risiken bei der Verwendung von Wasserstoff in Gehäusen	6
4. Permeationslecks	11
5. Freisetzung und Ausbreitung von Wasserstoff in Innenräumen.....	12
6. Natürliche und Zwangsbelüftung	14
7. Druckspitzenphänomen.....	17
8. Parkplätze.....	23
9. Tunnel	26
9.1 Einfluss der Lüftungsgeschwindigkeit auf die Ausbreitung in Tunneln.....	26
9.2 Übergang von der Verpuffung zur Detonation (DDT) im Tunnel	28
10. Regime von Wasserstoffbränden in Innenräumen	30
10.1 Gut belüftete Brände.....	30
10.2 Unterbelüftete Brände.....	33
10.3 Selbstauslöschende Flammenart.....	34
10.4 Externer Flammenmodus.....	38
11. Nutzung des E-Labors.....	41
11.1 Passive Belüftung in einem Gehäuse mit einer Lüftungsöffnung: gleichmäßige Wasserstoffkonzentration	41
11.2 Druckspitzenphänomen bei nicht gezündeter Freisetzung	46
11.3 Druckspitzenphänomen bei gezündeter Freisetzung	53
Danksagung	59
Referenzen.....	60

1. Zielgruppe

Die in dieser Lektion enthaltenen Informationen sind auf die Ebene der Experten ausgerichtet. Die Rollenbeschreibung, das Kompetenzniveau und die Lernerwartungen, die auf der Ebene der Experten vorausgesetzt werden, werden im Folgenden beschrieben.

1.1 Beschreibung der Rolle: Experte

Experten unterstützen den Einsatzleiter mit Ratschlägen und durch die Leitung und Beaufsichtigung von technischen Einsätzen, die den Einsatz von Wissen, Fähigkeiten oder Ausrüstung in Bezug auf ein bestimmtes Risiko oder eine bestimmte Einsatzfähigkeit erfordern. Typische Vorfälle betreffen gefährliche Stoffe, Transportfahrzeuge, klimatische Ereignisse, strukturelle und andere bauliche Mängel sowie die Logistik von Notfallmaßnahmen.

1.2 Kompetenzniveau: Experte

Ein wissenschaftliches, technisches und empirisches Fundament im Fachgebiet mit der durch Erfahrung erweiterten Fähigkeit, diese Informationen und Kenntnisse in einer interpretierten und nützlichen Weise anzuwenden, um den Einsatzleiter und andere Ersthelfer unter der Leitung des Experten in die Lage zu versetzen, wirksam und sicher auf die Notfallsituation zu reagieren.

1.3 Vorbildung: Experte

EQR 5 - Umfassendes, spezialisiertes, faktisches und theoretisches Wissen in einem Einsatzbereich und ein Bewusstsein für die Grenzen dieses Wissens. Ein umfassendes Spektrum an kognitiven und praktischen Fähigkeiten, die erforderlich sind, um kreative Lösungen für abstrakte Probleme zu entwickeln. Ausübung von Management- und Aufsichtsfunktionen in Einsatzsituationen mit unvorhersehbaren Veränderungen; Überprüfung und Weiterentwicklung der eigenen Leistung und der Leistung anderer.

2. Einleitung und Ziele

Der Einsatz von Brennstoffzellen (FCH)-Technologien in engen Räumen ist mit einer höheren Wahrscheinlichkeit der Wasserstoffanreicherung verbunden. Aufgrund der zunehmenden Verbreitung dieser Technologien sind FCH-Anlagen nicht nur im Freien, sondern auch in Innenräumen zu finden. Beispiele hierfür sind: FC-Gabelstapler in Lagerhäusern; FC-Fahrzeuge in Parkhäusern, Tunneln und Garagen; Elektrolyseure und Brennstoffzellen für den Hausgebrauch usw. Bei einem Zwischenfall mit FCH-Anlagen in Innenräumen sind folgende Entwicklungen möglich: Die Bewohner können ein Gebäude/eine Anlage möglicherweise nicht verlassen; die Einsatzkräfte können ihre Aufgaben nicht erfüllen, ohne ihr eigenes Leben zu gefährden; die teilweise oder vollständige Zerstörung gefährdet das Leben sowohl der Einsatzkräfte als auch der Bevölkerung. Daher ist das Thema der sicheren Verwendung von Wasserstoff und Brennstoffzellen in geschlossenen Räumen für die Einsatzkräfte von großer Bedeutung. Während bei einer Wasserstofffreisetzung im Freien der Auftrieb ein natürlicher Sicherheitsfaktor ist, da er für eine schnelle Freisetzung/Dispersion sorgt, ist dies bei Freisetzungen in geschlossenen Räumen möglicherweise nicht der Fall. Eine schnelle Freisetzung von Wasserstoff in geschlossenen Räumen kann entweder zu einem Druckaufbau oder zu einer Druckakkumulation und damit zu schwerwiegenderen Folgen führen.

UU war einer der Partner in dem von der EU finanzierten Projekt Hyindoor "Pränormative Forschung zur sicheren Verwendung von Brennstoffzellen und Wasserstoffsystemen in Innenräumen" (www.hyindoor.eu). Die wichtigsten Ergebnisse dieses Projekts führten zu einem tieferen Verständnis der Phänomene im Zusammenhang mit den Freisetzungen aus Wasserstoffanlagen in Innenräumen und zu Leitlinien für die Verwendung von Wasserstoff in Innenräumen und in Tunneln [1, 14].

Am Ende dieser Lektion werden die Einsatzkräfte in der Lage sein:

- Die Hauptgefahren bei der Verwendung von Wasserstoff in Innenräumen zu erkennen,
- Passive und Zwangsbelüftung zu unterscheiden,
- Die wichtigsten Regelungen für Wasserstoffbrände in Gebäuden zu beschreiben,
- Die Auswirkungen einer Verpuffungsentlüftung zu verstehen,
- Das Phänomen der Druckspitzen zu erklären,
- Nomogramme verwenden, um die Möglichkeit eines Druckspitzenphänomens (PPP) zu bewerten.

3. Gefahren und damit verbundene Risiken bei der Verwendung von Wasserstoff in Gehäusen

Es gibt eine Reihe von Szenarien, bei denen FCH-Anwendungen in Gehäusen untergebracht sind (siehe Deliverable D1.1 von HyResponder [2]). Die Gesamtvolumina der Einhausungen

Lektion 11: Beengte Räume

können variieren, von einer kleinen Garage über eine kastenförmige Einhausung für eine stationäre Brennstoffzelle (FC) bis hin zu einer großen Lagerhalle. Auch die Wasserstofffreisetzungsraten können variieren, von einer Freisetzung mit geringem Massendurchsatz aus einer Zuleitung zu einer FC bis hin zu einer groß angelegten Freisetzung aus einem Hochdruckspeicher, z. B. einer Freisetzung aus dem TPRD eines in einer Wohngarage geparkten FC-Fahrzeugs. Bei Zwischenfällen oder Unfällen in FCH-Systemen, die sich in Gebäuden befinden, haben die Einsatzkräfte folgende Prioritäten: Rettung von Menschenleben, Schutz von Eigentum und der Umwelt. Die Kriterien für die Schädigung von Menschen und die Kriterien für die Beschädigung von Gebäuden werden in der entsprechenden Vorlesung ausführlich behandelt.

Zu den Gefahren im Zusammenhang mit einem Zwischenfall/Unfall in FCH-Anlagen in Innenräumen gehören:

- Sauerstoffmangel und anschließende Erstickung,
- Auswirkungen der hohen Temperatur und des Wärmestroms von Jet-Feuer,
- Kalte Verbrennungen durch verschütteten flüssigen Wasserstoff
- Auswirkungen von Überdruck,
- Verletzte und Tote,
- Struktureller Zusammenbruch,
- "Domino"-Effekte,
- Schädigung der Umwelt.

Diejenigen, die eine FCH-Installation in Innenräumen entwerfen/genehmigen/besitzen, sollten sorgfältig darauf achten, "Schäden an Infrastrukturen und Ausrüstungen zu reduzieren und die Unterbrechung des Geschäftsbetriebs zu minimieren, das Unternehmensimage zu wahren und direkte und indirekte finanzielle Verluste zu verringern" [3, 4]. Es sollte darauf geachtet werden, dass die eskalierenden Auswirkungen von Objekten, Ereignissen und Anordnungen auf Schäden sowie der Wert und die Bedeutung des Eigentums in und um eine Einrichtung vermieden werden" [3].

Im Falle einer Freisetzung, ob groß oder klein, kann es zu einer Reihe möglicher Phänomene kommen. Dazu können gehören:

- Ungezündete Wasserstofffreisetzung. Bei einer solchen Freisetzung in Innenräumen sind u. a. folgende Punkte zu berücksichtigen: Bewertung der Größe der brennbaren Hülle; Bestimmung der Höhe des potenziellen Überdrucks (ohne Zündung); Bewertung des Verhältnisses zwischen der Lüftungsrate und der Freisetzung.
- Entzündete Freisetzung. Wenn die Freisetzung mit der Bildung eines Stichflammenfeuers entzündet wird, sollte eine Reihe von Aspekten berücksichtigt werden, wie z. B.: die

Lektion 11: Beengte Räume

Wärmeübertragung auf die Umgebung; die Dauerhaftigkeit eines Feuers (d. h. gibt es eine ausreichende Menge an Sauerstoff, um es zu unterstützen, oder wird es erlöschen); die Beziehung zwischen der Belüftung und dem Brandverhalten; die Möglichkeit der Wiederentfachung des Feuers.

- Explosion: Hier sollte man sich folgende Fragen stellen: Wenn sich eine nicht gezündete Freisetzung ansammelt und anschließend entzündet, was entweder zu einer Deflagration oder Detonation führt, welche Folgen hat das? Wie ist das Verhältnis zwischen Entlüftung und Deflagrationsüberdruck?

Wasserstoff neigt zu Leckagen, und das kann in Innenräumen zu einem Problem werden. Offensichtlich kann die Ansammlung von Wasserstoff in Gehäusen zur Bildung eines entflammaren Gemischs mit der Luft (oder Sauerstoff) führen. Darüber hinaus gibt es weitere Probleme im Zusammenhang mit unerwünschten Freisetzungen, wie z. B. das Druckspitzenphänomen (PPP) und die Auswirkungen der Sauerstoffverarmung. Eine angemessene Belüftung kann diese Auswirkungen abmildern. Wird ein Wasserstoffleck entzündet, breitet sich das Feuer (Stichflamme oder Rauchfahne) innerhalb eines Gehäuses aus und wächst. Neben der Flamme und den damit verbundenen Gefahren, wie Temperatur und Wärmestrom, bilden sich heiße gasförmige Verbrennungsprodukte, die ebenfalls eine Gefahr darstellen können. Wenn diese gasförmigen Produkte aufsteigen, kann sich eine heiße Gasschicht unter der Decke der Kabine bilden. Die Art der Brandentwicklung hängt von der Art der Verbrennung, der Wechselwirkung mit der Umgebung und dem Zugang zu Sauerstoff ab [5]. Je nach Größe und Lage des Lecks kann die Flamme selbst auf die Konstruktionselemente des Schaltschranks übergreifen.

Sicherheitsrelevante Phänomene und potenzielle Folgen im Zusammenhang mit Zwischenfällen/Unfällen in Innenräumen, an denen FCH-Systeme beteiligt sind, werden in dem in Abbildung 1 dargestellten Diagramm zusammengefasst.

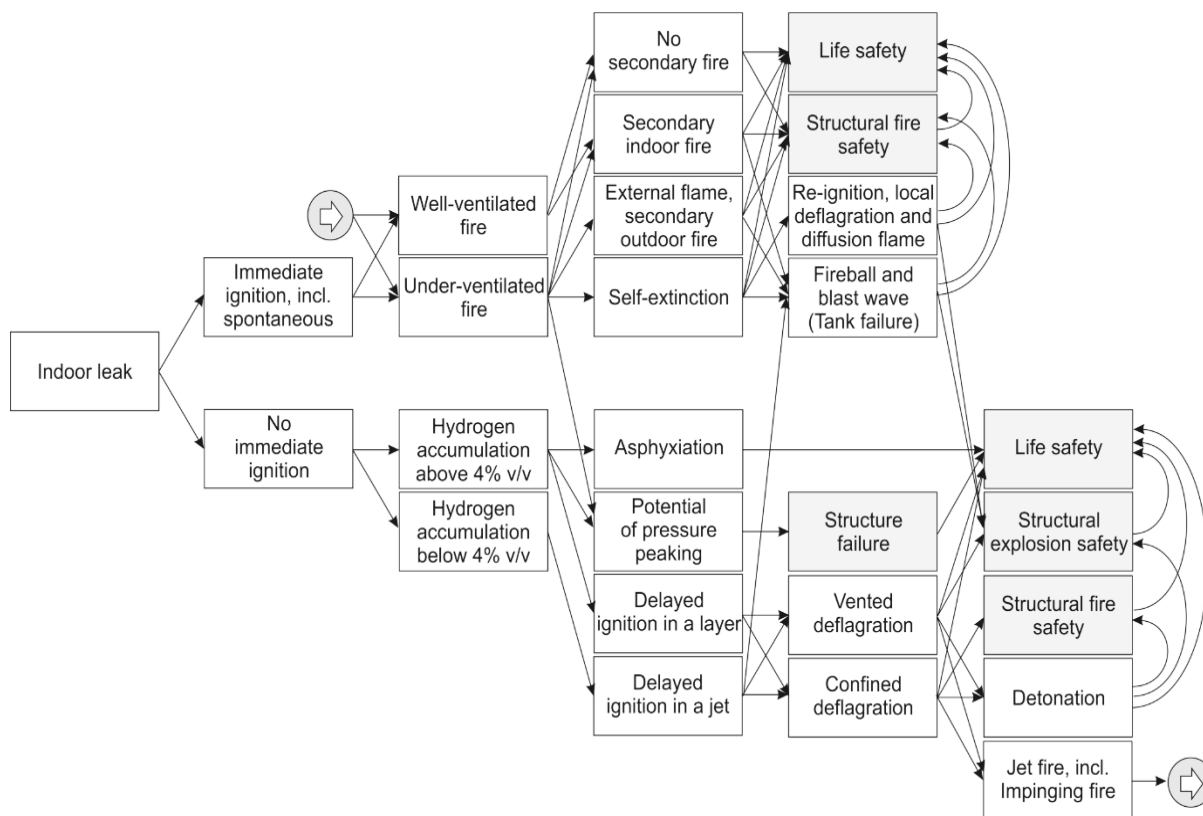


Abbildung 1. Sicherheitsrelevante Phänomene und Folgen. Die weißen Kästchen entsprechen den Wasserstoffphänomenen, die grauen Kästchen den Folgen [4].

Wie in Abbildung 1 dargestellt, sind nach einem Wasserstoffleck in geschlossenen Räumen zwei Optionen möglich: keine sofortige Entzündung (unterer Zweig des Diagramms) und sofortige Entzündung einschließlich Selbstentzündung (oberer Zweig des Diagramms). Die Entzündung eines Wasserstofflecks kann durch ein offenes Feuer, eine heiße Oberfläche, einen elektrischen oder mechanischen Funken und andere Faktoren sowie durch das wasserstoffspezifische Phänomen der *Selbstentzündung* (in luftgefüllten Rohrleitungen) durch den so genannten Diffusionsmechanismus verursacht werden [6].

Wenn das Leck sofort entzündet wird, kann sich ein Feuer auf zwei Arten entwickeln: *gut belüftet* und *unterbelüftet*. Ein *gut belüftetes Feuer* ist durch eine relativ geringe Wasserstofffreisetzungsrates und eine vollständige Verbrennung des Wasserstoffs innerhalb des Gehäuses gekennzeichnet. Zu den mit einem gut belüfteten Brand verbundenen Gefahren gehören:

- direkte Einwirkung der Flamme und des Stroms heißer Verbrennungsprodukte,
- Strahlung aus der heißen Schicht, die sich unter der Decke gebildet hat,
- heiße feste Oberflächen wie z. B. Dächer, strukturelles Versagen von tragenden Bauteilen durch direkte Flammeneinwirkung usw.

Ein Anstieg der Wasserstofffreisetzungsrates kann zum Übergang zu einem *Brand mit Unterbelüftung* führen, wenn der Sauerstoff schneller verbraucht wird, als er durch die

Lektion 11: Beengte Räume

Belüftung wieder zugeführt werden kann. Dies wiederum kann zu zwei Unterzuständen führen: zu *einer externen Flamme* in den Lüftungsöffnungen (ohne Verbrennung im Inneren des Gehäuses) und zum vollständigen *Erlöschen* des Feuers innerhalb des Gehäuses. Die zusätzlichen Maßnahmen, die von den Respondern nach dem Selbsterlöschen des Feuers, z. B. in einem FC-Behälter, verlangt werden, um sicherzustellen, dass sich der Wasserstoff in dem Gehäuse, in dem der FC untergebracht ist, nicht oberhalb der Gefahrgrenze ansammelt.

Beide Arten von Bränden können zur Entzündung brennbarer Materialien im Inneren des Gehäuses führen, wodurch ein *sekundärer Innenraumbrand* entsteht. Das Feuer brennt also weiter, auch wenn die Wasserstofffreisetzung z. B. durch Schließen der Sicherheitsventile gestoppt wird, und es können zusätzliche Gefahren, wie die Freisetzung giftiger Dämpfe, entstehen. Der unterbelüftete Brand ist durch eine relativ hohe Wasserstofffreisetzungsraten gekennzeichnet. Daher besteht die Gefahr von PPP, die die strukturelle Integrität des Gehäuses gefährden [6, 7]. Es ist erwähnenswert, dass sowohl nicht gezündete als auch gezündete Freisetzungen einen gefährlichen Überdruck aufgrund von PPP erzeugen können. Die Berechnung des Überdrucks aufgrund von PPP unterscheidet sich jedoch bei einer nicht gezündeten Freisetzung und einem Jet-Feuer. Das unterbelüftete Feuer kann auch zu einer externen Flamme führen, d. h. zu einem *sekundären Feuer im Freien*.

Wenn beide Arten von Bränden sowie Sekundärbrände nicht gelöscht werden und weiter brennen, kann dies zu einem katastrophalen Versagen von Lagertanks in Innenräumen führen, was eine rasche Energiefreisetzung mit anschließender Entzündung großer Wasserstoffmengen zur Folge hat und einen *Feuerball* und eine *Druckwelle* erzeugt. Externe Flammen und sekundäre Brände im Freien können auch zum Versagen von Wasserstoffspeichern im Freien führen. Daher sollten Maßnahmen ergriffen werden, um dies zu verhindern, z. B. indem externe Wasserstoffspeicher in einem gewissen Abstand zu den Lüftungsöffnungen des Gehäuses aufgestellt werden.

Das selbstverlöschende, unterbelüftete Feuer kann sich wieder entzünden, wenn frische Luft in das Gehäuse eindringt. Dies kann zu einer *lokalen Verpuffung* und einer Diffusionsflamme in den Bereichen führen, die Wasserstoff oberhalb der unteren Entzündungsgrenze (UEG), d. h. 4 Vol.-%, enthalten. Alle Arten von Bränden bergen Gefahren für die *Sicherheit von Menschenleben* (direkte thermische Schäden durch die Flamme, thermische Strahlungsschäden, Überdruck durch das PPP und Toxizität der Verbrennungsprodukte, die durch Sekundärbrände entstehen) und *für den baulichen Brandschutz* (Schwächung der strukturellen Integrität und möglicher Einsturz des Gehäuses durch lang anhaltende Brände) [4].

Wird ein Wasserstoffleck nicht sofort nach der Freisetzung gezündet, würde es zu einer allmählichen Wasserstoffanreicherung innerhalb des Gehäuses führen. Eine Freisetzung mit einer hohen Durchflussrate, die die Belüftungskapazität übersteigt, kann zu einer Wasserstoffkonzentration oberhalb der UEG führen, was die Möglichkeit einer *verzögerten Zündung in einer Schicht* und deren Deflagration schafft. Darüber hinaus kann eine Freisetzung

Lektion 11: Beengte Räume

mit hohem Durchsatz zu Erstickung und PPP führen. Obwohl Wasserstoff nicht giftig/toxisch ist, unterstützt er den Stoffwechsel nicht. Wie bei allen anderen Gasen (mit Ausnahme von Sauerstoff) besteht die Gefahr des Erstickens vor allem in geschlossenen Räumen infolge der Sauerstoffverarmung [8]. Die Freisetzung von Wasserstoff mit einer geringeren Rate, die nicht zur Anreicherung von Wasserstoff über 4 Vol.-% in einer Schicht führt, kann immer noch zu einer *verzögerten Zündung in einem Strahl* führen. Beide Arten der Spätzündung können zu einer Deflagration des Wasserstoff-Luft-Gemischs mit Überdruck führen, die möglicherweise die Umschließung zerstören kann. Die Entschärfung von Explosionen durch Deflagrationsentlüftung ist eine weit verbreitete Technik. Wenn das Gehäuse mit Entlüftungsöffnungen ausgestattet ist, die einen Abbau des Deflagrationsüberdrucks ermöglichen, kann es zu einer *entlüfteten Deflagration* kommen. Eine *eingeschlossene Deflagration* unterscheidet sich von der entlüfteten Deflagration durch das Fehlen signifikanter Öffnungen, die in die Atmosphäre führen und somit einen Druckabbau in der Umschließung verhindern. Die Druckspitze in einem geschlossenen Behälter für ein stöchiometrisches Wasserstoff-Luft-Gemisch kann anfangs bei NTP bis zu 815 kPa erreichen [9], was jedes zivile Bauwerk zerstören würde (das im Allgemeinen einem Überdruck von etwa 10-20 kPa standhalten kann).

In einigen Fällen kann eine Deflagration zu einem Übergang in eine *Detonation* führen. Aufgrund der höheren Flammenausbreitungsgeschwindigkeit und des höheren Überdrucks stellen Detonationen im Vergleich zu Deflagrationen eine größere Gefahr dar. Sowohl die Deflagration als auch die Detonation stellen aufgrund der Druck- und thermischen Auswirkungen eine Gefahr für *das Leben* dar. Sie stellen auch eine Gefahr für die *strukturelle Explosionssicherheit* dar, die im schlimmsten Fall zum Einsturz des Gehäuses führt. Schließlich können die beiden bereits erwähnten verzögerten Zündungen mit Jet-Feuern in Verbindung gebracht werden, einschließlich der Auswirkungen des *Feuers auf* die Wände und/oder die Decke des Gehäuses. Ist das Jet-Feuer erst einmal entstanden, kann es entweder in einem gut belüfteten oder in einem unterbelüfteten Bereich brennen, und die nachfolgenden Phänomene und Sicherheitsfolgen würden dem Muster folgen, das im oberen Zweig des Diagramms (Abbildung 1) angegeben ist und einer sofortigen Entzündung entspricht, wie durch den Pfeil (☺) in einem Kreispiktogramm dargestellt.

4. Permeationslecks

Die Permeation von Wasserstoff durch Lagertanks wird nicht als Problem für die Einsatzkräfte angesehen. Der Vollständigkeit halber werden diese Phänomene jedoch in Lektion 3 - Wasserstoffspeicherung, Lektion 4 - Kompatibilität von Wasserstoff mit verschiedenen Materialien und Lektion 6 - Ungezündete Wasserstofffreisetzungen im Freien und ihre Eindämmung beschrieben.

5. Freisetzung und Ausbreitung von Wasserstoff in Innenräumen

Wasserstoff-Energieanwendungen erfordern häufig, dass die Systeme in Innenräumen eingesetzt werden, z. B. Flurförderzeuge für den Materialtransport in einem Lagerhaus, Brennstoffzellen in einem Raum oder Wasserstoff, der in einem Gasschrank gespeichert und verteilt wird. Es kann auch notwendig oder wünschenswert sein, einige Bauteile/Ausrüstungen von Wasserstoffsystemen aus Sicherheitsgründen in Innenräumen oder im Freien unterzubringen, um sie vom Endnutzer und der Öffentlichkeit abzuschirmen.

Die Verwendung von Wasserstoff in geschlossenen Räumen erfordert eine detaillierte Bewertung der Gefahren und der damit verbundenen Risiken, einschließlich möglicher Maßnahmen zur Risikovermeidung und -minderung. Die Freisetzung von Wasserstoff kann zur Ansammlung von Wasserstoff und zur Bildung eines entflammaren Wasserstoff-Luft-Gemischs führen, was möglicherweise zu Stichflammen führen kann.

Die Wissenslücken in den folgenden vier Hauptthemen wurden durch das HyIndoor-Projekt geschlossen (<https://hydrogeneurope.eu/project/hyindoor>).

- Wasserstofffreisetzung innerhalb eines geschlossenen oder halbgeschlossenen Raums;
- Wasserstoff-Luft-Deflagration in Innenräumen;
- Strahlenfeuer und nicht entlüftetes Feuer;
- Wasserstoffdetektion für beengte Räume.

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in Sicherheitsrichtlinien nach dem neuesten Stand der Technik umgesetzt, einschließlich spezifischer technischer Hilfsmittel zur Unterstützung ihrer Umsetzung. Es wurden Empfehlungen für Entwicklungen formuliert, die im Rahmen von Vorschriften, Kodizes und Normen auf europäischer und internationaler Ebene erforderlich sind, um die sichere Einführung von Brennstoffzellen und Wasserstoff auf den ersten Märkten zu unterstützen.

Es gibt drei allgemeine Sicherheitsziele für jedes Sicherheitssystem, einschließlich der Verwendung von Wasserstoffsystemen in Innenräumen: Lebenssicherheit, Schutz von Eigentum und Umweltschutz. In erster Linie sollte die Sicherheit von Menschenleben, z. B. von Arbeitern, Kunden und der allgemeinen Öffentlichkeit, berücksichtigt werden. Zu den Zielen der Lebenssicherheit gehören unter anderem [3]:

- Die Insassen sind in der Lage, das Gebäude/die Einrichtung in angemessener Zeit zu verlassen, oder die Folgen für die Insassen sind akzeptabel gering;
- Die Ersthelfer sind in der Lage, in angemessener Sicherheit zu arbeiten;
- Einsturz oder Trümmer gefährden Umstehende, Ersthelfer und andere Personen, die sich in der Nähe der Anlage aufhalten, nicht.

Zu den allgemeinen Sicherheitsregeln, Strategien und Empfehlungen für die Gestaltung und Nutzung von Wasserstoffinfrastrukturen gehören:

Lektion 11: Beengte Räume

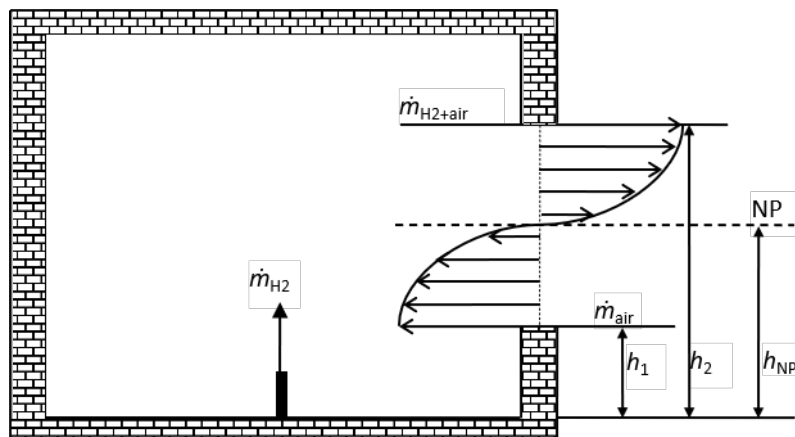
- Überlegen Sie, ob es wirklich notwendig ist, das Wasserstoffsystem in einem Raum/einem Gehäuse unterzubringen, oder ob es ins Freie verlegt werden kann, wo ein versehentliches Leck aufgrund der besseren Belüftung weniger wahrscheinlich zu einer Ansammlung von Wasserstoff in entflammbaren Konzentrationen führen würde;
- Verringerung des Durchmessers der Wasserstoffversorgungsleitung und des Betriebsdrucks auf das Minimum, das erforderlich ist, um die technischen Anforderungen an den Massendurchsatz zu erfüllen. Wenn eine Verringerung des Rohrdurchmessers nicht möglich oder nicht erwünscht ist, sind Durchflussbegrenzer zu verwenden;
- Minimierung des Betriebsdrucks von Wasserstoff, wann immer dies möglich ist;
- Ausrichtung der Wasserstoffinfrastruktur so, dass der Strahl vor dem Auftreffen auf benachbarte Hindernisse abklingt, um die Bildung von Schichten mit brennbarer Wasserstoffkonzentration zu verhindern;
- Identifizierung und, soweit möglich, Verringerung der Anzahl und Trennung potenzieller Zündquellen;
- Verwendung von Lagertanks mit hoher Feuerwiderstandsfähigkeit, um zumindest ausreichend Zeit für die Evakuierung von Personen zu gewährleisten;
- Minimierung des Wasserstoffinventars, um die Bildung eines entflammbaren Gemischs in einem geschlossenen Raum auch nach vollständiger Freisetzung und Dispersion des Wasserstoffs zu verhindern bzw. unter eine Menge zu begrenzen, die im Falle einer Deflagration zu strukturellen Schäden an Geräten und Gebäuden mit geringer Festigkeit führt;
- Bewertung der deterministischen Trennungsabstände vor der quantitativen Risikobewertung (QRA). Deterministische Trennungsabstände können für nicht entzündete Freisetzungen und für gut belüftete Jet-brände anhand veröffentlichter und validierter Nomogramme berechnet werden;
- Erwägen Sie die bevorzugte Verwendung von Seitenlüftern gegenüber Dachlüftern, um die passive Belüftung und die vertikale gegenüber der horizontalen Belüftung der gleichen Fläche zu verbessern;
- Ziehen Sie die Verwendung mehrerer Lüftungsöffnungen gegenüber einer einzigen Lüftungsöffnung mit der gleichen Fläche in Betracht, wobei der Höhenunterschied zwischen den Öffnungen so groß wie möglich sein sollte und die Öffnungen auf allen Seiten des Gebäudes angeordnet sein sollten, um die windunterstützte Lüftung unabhängig von der Richtung zu verbessern;
- Ziehen Sie den Ausschluss von Lüftungsrohren und -kanälen so weit wie möglich in Betracht.

Die Leitlinien und Minderungsstrategien für die Anwendung von Wasserstoff in Innenräumen finden sich im Ergebnisbericht des HyIndoor-Projekts (<https://hal-cea.archives-ouvertes.fr/cea-02429488>).

6. Natürliche und Zwangsbelüftung

Die Belüftung kann *natürlich/passiv* oder *erzwungen/mechanisch/aktiv* sein. Die natürliche Belüftung ist eine bevorzugte Option, da sie billig und zuverlässig ist, nicht von einer Energiequelle abhängt und immer in Betrieb ist. Die natürliche Belüftung wird durch permanente Lüftungsöffnungen gewährleistet. Der Standort dieser Entlüftungsöffnungen ist wichtig und sollte einen maximalen Luftstrom und die Verteilung des entflammaren Gases gewährleisten. Bei Wasserstoff wird eine Kombination aus oberen und unteren Entlüftungsöffnungen empfohlen. Wenn dies nachgewiesen werden kann, sollte eine natürliche Belüftung zugelassen werden, um die gesamte erforderliche Belüftung und Zusatzluft zu gewährleisten.

Die neutrale Ebene (NP) ist eine horizontale Ebene, in der der Druck innerhalb und außerhalb des Gehäuses gleich ist. Unterhalb der NP tritt Luft in die Kabine ein und oberhalb der NP verlässt das leichtere Wasserstoff-Luft-Gemisch die Kabine. Bei natürlicher Belüftung befindet sich die NP auf halber Lüftungshöhe (Abbildung 2a). Bei passiver Belüftung der Kabine mit Freisetzung von Gas, das leichter als Luft ist, befindet sich die NP auf oder unterhalb der halben Höhe der Entlüftungsöffnung für stationäre Bedingungen, wie in Abbildung 2b dargestellt.



(a)

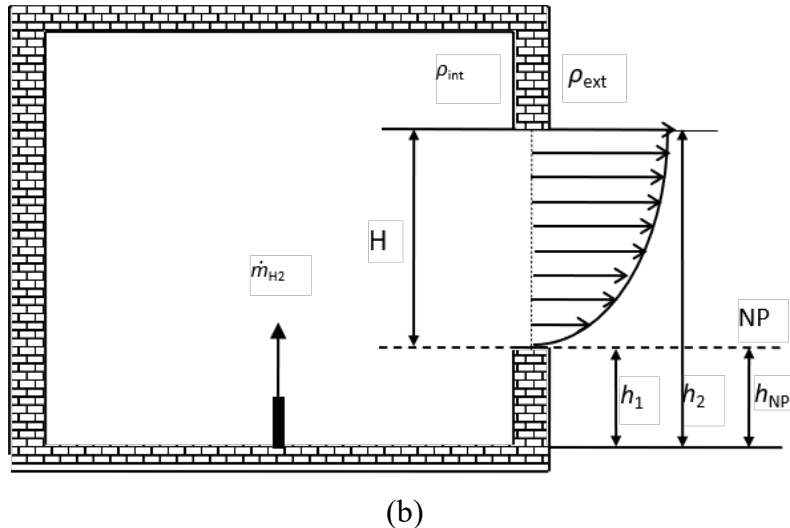


Abbildung 2. Strömungsgeschwindigkeit durch den Schlot bei natürlicher (a) und passiver (b) Belüftung.

Die Gleichungen für die natürliche Belüftung werden unter der Annahme abgeleitet, dass die Strömung in und aus dem Raum gleich ist. Bei der passiven Lüftung kann der NP für Gase, die leichter als Luft sind, überall unter der Hälfte der Lüftungshöhe liegen.

Die maximale Wasserstoffkonzentration in der Kabine mit einer Entlüftungsöffnung kann unter der Annahme eines anhaltenden Lecks mit der folgenden Gleichung berechnet werden [10]:

$$X = f(X) \cdot \left[\frac{Q_0}{C_D A (g' H)^{1/2}} \right]^{2/3} \quad (1)$$

wobei X der Wasserstoff-Volumenanteil, Q_0 die Freisetzungsrate (m^3/s), C_D der Abflusskoeffizient, A die Entlüftungsfläche (m^2), H die Entlüftungshöhe (m), g die reduzierte Schwerkraft (m/s^2), $g' = g(\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{H}_2}) / \rho_{\text{air}}$ und die Dichte der Luft bzw. des Wasserstoffs (kg/m^3 ρ_{H_2} sind und $f(X)$ die Funktion gleich ist:

$$f(X) = \left(\frac{9}{8} \right)^{1/3} \cdot \left\{ \left[1 - X \left(1 - \frac{\rho_{\text{H}_2}}{\rho_{\text{air}}} \right) \right]^{1/3} + (1 - X)^{2/3} \right\} \quad (2)$$

Gleichung (1) wird unter der Annahme abgeleitet, dass:

- der Abgabedurchsatz bleibt konstant,
- Das Gasgemisch ist in der gesamten Kabine gleichmäßig verteilt, d. h. die Wasserstoffkonzentration ist nicht von der Position innerhalb der Kabine abhängig.

Ein Vergleich mit Experimenten hatte jedoch gezeigt, dass die Gleichung (1) zur Vorhersage der maximalen Wasserstoffkonzentration bei wasserstoffbildenden Schichten verwendet

Lektion 11: Beengte Räume

werden kann [10], d. h. sie kann als konservativ angesehen werden. Auf der Grundlage der Gleichungen (1) und (2) wurde ein Nomogramm für die Berechnung der Größe (Höhe und Breite) einer Entlüftungsöffnung im Falle eines gleichmäßigen Gemischs in der Kabine mit einer einzigen Entlüftungsöffnung entwickelt [10] (Abbildung 3). Es ist zu beachten, dass, obwohl in der Praxis Wasserstoff-Luft-Gemische auch in einem Gehäuse mit einer Entlüftungsöffnung Schichten bilden können, die Gleichungen und das Nomogramm in Abbildung 3 Ergebnisse liefern, die nahe an den maximalen Konzentrationswerten liegen, d. h. es ist konservativ und kann auf ungleichmäßige Gemische angewendet werden. Das Nomogramm kann zur Berechnung der maximalen Wasserstoffkonzentration im stationären Zustand verwendet werden, wenn Höhe und Breite einer Entlüftungsöffnung sowie die Freisetzungsrate bekannt sind. Das Nomogramm gilt sowohl für gleichförmige als auch für ungleichförmige Gemische in einem Gehäuse mit einer Entlüftungsöffnung. Das Verfahren zur Berechnung der Wasserstoffkonzentration (rote Pfeile) ist wie folgt:

1. Wählen Sie den Massendurchsatz des Wasserstofflecks auf der vertikalen Achse des unteren Feldes des Nomogramms und projizieren Sie ihn horizontal bis zum Schnittpunkt mit einer der diagonalen Linien, die den verschiedenen Entlüftungshöhen entsprechen. Das Nomogramm in Abbildung 3 enthält 15 solcher Linien, die praktisch alle möglichen Entlüftungshöhen von 0,5 mm bis 10 m abdecken.
2. Ziehen Sie vom Schnittpunkt aus eine vertikale Linie nach oben, bis sie eine der diagonalen Linien im rechten oberen Feld des Nomogramms schneidet, die den verschiedenen Schlotbreiten entsprechen. Das Nomogramm in Abbildung 3 enthält 15 solcher Linien, die Entlüftungsöffnungen im Bereich zwischen 0,5 mm und 10 m abdecken.
3. Ziehen Sie vom Schnittpunkt aus eine horizontale Linie nach links bis zum Schnittpunkt mit der Funktionskurve im linken oberen Feld des Nomogramms.
4. Ziehen Sie eine vertikale Linie vom Schnittpunkt zur horizontalen Achse der linken oberen Tafel. Der Wert auf der horizontalen Achse entspricht der Wasserstoffkonzentration in Vol.-%.

Das Nomogramm in Abbildung 3 kann auch für die umgekehrte Bewertung verwendet werden, d. h. für die Berechnung der Entlüftungsgröße, die erforderlich ist, um sicherzustellen, dass die Konzentration bei der gegebenen Wasserstofffreisetzungsraten einen bestimmten Wert nicht überschreitet (blaue Pfeile in Abbildung 3). In diesem Fall erfolgt die Berechnung in umgekehrter Reihenfolge, beginnend mit dem gewünschten Konzentrationswert (siehe Beispiel mit 2 Vol.-% Gemisch in Abbildung 3). Wenn man die Abmessungen der Entlüftungsöffnung ermitteln will, die einen Wasserstoffvolumenanteil unter einem bestimmten Wert, z. B. unter 2 Vol.-% (blaue Pfeile), liefert, beginnt man mit dem gewünschten Volumenprozentwert auf der horizontalen Achse des oberen linken Feldes und zieht eine vertikale Linie bis zum Schnittpunkt mit der Funktionskurve in diesem Feld. Von

Lektion 11: Beengte Räume

diesem Schnittpunkt aus kann man eine horizontale Linie nach rechts zum oberen rechten Feld ziehen, die die Kurven der Entlüftungsbreite kreuzt. Als Nächstes wählt man im unteren linken Feld des Nomogramms den Auslösemassendurchsatz (z. B. 0,2 g/s) und zieht eine horizontale Linie nach rechts durch das untere rechte Feld, die durch die Entlüftungshöhenkurven verläuft. Es ist nun möglich, die Abmessungen der Entlüftung zu bestimmen, die für die Umschließung erforderlich ist, um eine Wasserstoffkonzentration von höchstens 2 Vol.-% bei einer bestimmten Wasserstofffreisetzung zu erreichen. In dem in Abbildung 3 gezeigten Beispiel sollte die Kabine mit einer Entlüftungsöffnung von 1 m Höhe und 1 m Breite ausgestattet werden, um die Wasserstoffkonzentration bei der gegebenen Freisetzungsrate von 0,2 g/s unter 2 Volumenprozent zu halten.

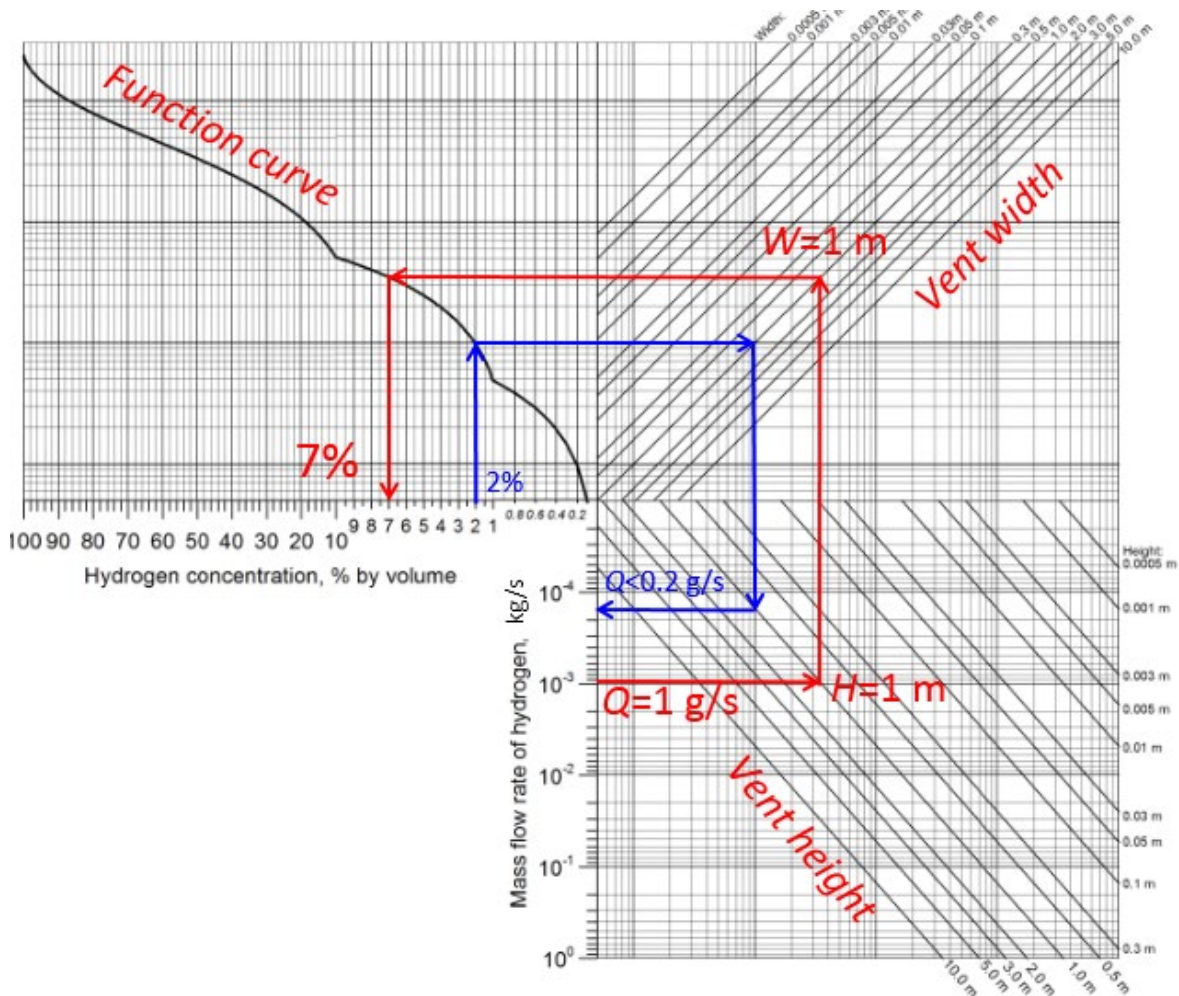


Abbildung 3. Technisches Nomogramm zur Berechnung des Höchstwerts der stationären Wasserstoffkonzentration im Gehäuse mit einer Entlüftung (Abflusskoeffizient $C=0,6$).

7. Druckspitzenphänomen

Druckspitzen sind ein Phänomen, das bei sehr leichten Gasen (leichter als Luft) beobachtet wird und bei einer ausreichend hohen Wasserstofffreisetzungsrate zu einem Überdruck führen kann, der die strukturelle Festigkeitsgrenze eines Gehäuses oder eines Gebäudes überschreitet. Druckspitzen treten auf, wenn die Wasserstofffreisetzungsrate hoch genug ist, um eine

Lektion 11: Beengte Räume

vollständige Verdrängung der Luft aus der Umschließung zu bewirken, d. h. die Wasserstoffkonzentration in der Umschließung muss 100 Vol.-% erreichen.

Es ist bekannt, dass Wasserstoff in FC-Fahrzeugen üblicherweise als komprimiertes Gas in Tanks gespeichert wird, die mit thermisch aktivierten Druckentlastungsvorrichtungen (TPRD) gemäß der EU-Verordnung Nr. 406/2010 der Kommission [17] ausgestattet sind. Die Druckentlastungsvorrichtung ist am Kraftstofftank angebracht und beginnt mit der Freisetzung von Wasserstoff, wenn eine Temperatur von ca. 110° C erreicht wird, z. B. im Brandfall. Der TPRD kann eine schnelle Freisetzung von Wasserstoff gewährleisten, wenn ein großer Öffnungsdurchmesser verwendet wird, wodurch die Möglichkeit einer Tanksprengung bei zu langer Brandeinwirkung minimiert wird. Hohe Massendurchsätze von TPRDs sind für den Außenbereich wahrscheinlich "akzeptabel". Die Gefahren, die sich aus einer schnellen Freisetzung in Innenräumen ergeben, sind jedoch anders.

Betrachten wir ein hypothetisches Szenario mit einer Freisetzung aus einem typischen bordeigenen Wasserstoffspeicher mit 35 MPa durch eine Öffnung mit einem Durchmesser von 5,08 mm [18]. Es wird angenommen, dass die Freisetzung senkrecht nach oben in der Mitte, 0,5 m über dem Boden, einer kleinen Garage mit einer Größe von $L \times B \times H = 4,5 \times 2,6 \times 2,6$ m [19] und einem Volumen von 30,4 m³ mit einer einzigen Entlüftungsöffnung erfolgt, die flächenmäßig einem typischen Ziegelstein $L \times H = 25 \times 5$ cm entspricht und bündig mit der Decke abschließt. Es wird ein konservativer Ansatz gewählt, d. h. es wird ein konstanter Massendurchfluss von 0,39 kg/s (ohne Berücksichtigung eines Druckabfalls im Lagertank) nach der TPRD-Öffnung angesetzt. Damit wird ein Worst-Case-Szenario, d. h. ein hoher Massendurchsatz in einer kleinen Garage mit minimaler Entlüftung, berücksichtigt.

Die Anwendung mathematischer Modelle für die stationäre Unterschallfreisetzung (wenn der Wasserstoff das Gehäuse vollständig ausfüllt) führt zu vorhergesagten Überdruckwerten im Gehäuse zwischen 15 (aus der Bernoulli-Gleichung bei einer Geschwindigkeit von Null im Behälter) und 17,9 kPa (aus der Blendenströmungsgleichung für Unterschallströmung) für einen Abflusskoeffizienten C , der in beiden Fällen mit dem allgemein empfohlenen Wert $C=0,6$ angenommen wird [20]. Diese Schätzungen berücksichtigen jedoch nicht den anfänglichen Zustand der Einspritzung eines leichteren Gases (Wasserstoff) in ein schwereres Gas (Luft). Die vorhergesagte instationäre Druckbelastung in der belüfteten Kabine ist in Abbildung 4 dargestellt.

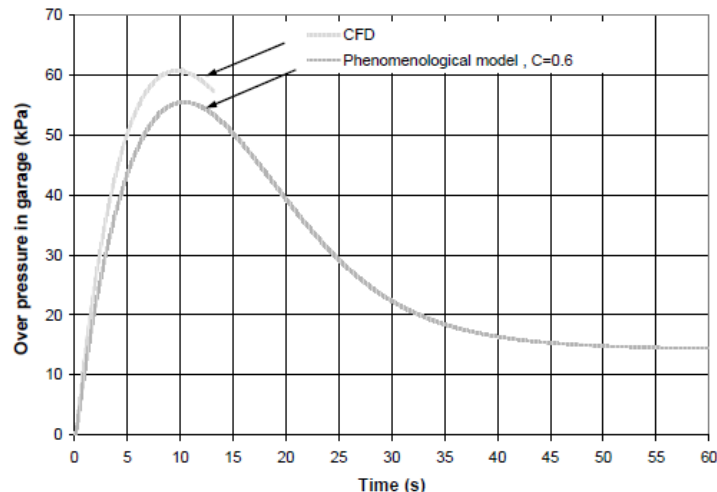


Abbildung 4. Vorhergesagter Überdruck in der Garage mit der Zeit, ein Vergleich zwischen CFD und einem phänomenologischen Modell [18].

Abbildung 4 veranschaulicht, wie der durch die Wasserstoffeinspritzung entstehende Überdruck innerhalb des Gehäuses für das gewählte Szenario innerhalb von nur 3 s einen Wert erreicht, der zur Zerstörung der Garage [9] führen kann. Wie aus Abbildung 4 hervorgeht, erreicht der Druck in der Garage für dieses Szenario einen Höchstwert von über 60 kPa, wenn die Garage nicht vorher zerstört wird. Danach fällt der Druck ab und tendiert zu einem stationären Wert, der wesentlich niedriger ist und dem entspricht, der durch die einfachen stationären Schätzungen vorhergesagt wurde. Auch hier ist zu beachten, dass es sich um ein Worst-Case-Szenario mit konstantem Massendurchsatz handelt. Daher dient die Fortsetzung eines konstanten Massendurchsatzes für 60 Sekunden in Abbildung 4 lediglich der Veranschaulichung, um den Zeitraum bis zum Erreichen des Fließgleichgewichts zu zeigen, wenn praktisch die gesamte Garage mit 100 Vol.-% Wasserstoff belegt ist. Es sollte auch beachtet werden, dass der maximale Druck in weniger als 10 s erreicht wird: In dieser Zeit würde die gesamte Garage zerstört werden, ohne die Folgen einer Zündung zu berücksichtigen.

Es ist zu beachten, dass der in der Garage erreichte Überdruck mit abnehmender Molekülmasse des in die Garage eingeleiteten Gases zunimmt, d. h. leichteres Gas wie Wasserstoff führt zu einem wesentlich höheren Druck als schwereres, z. B. Propan. Dies sollte bei der Konstruktion von TPRDs für den Einsatz mit Wasserstoff berücksichtigt werden, d. h. es sollte nicht davon ausgegangen werden, dass sich dieselbe Technologie, die z. B. für CNG verwendet wird, auch bei Wasserstoff so verhält.

Abbildung 5 zeigt die vorhergesagten Überdruckwerte in Abhängigkeit von der Zeit für eine Reihe von Gasen mit demselben Massendurchsatz (0,39 kg/s) in demselben garagenähnlichen Gehäuse (Volumen 30,4 m³, Entlüftung 0,0125 m²). Der Entladungskoeffizient C=0,6. Die Molekularmassen von Wasserstoff, Helium, Methan und Propan betragen 0,002, 0,004, 0,016 bzw. 0,044 kg/mol. Es ist klar, dass der Spitzenwert des Überdrucks mit zunehmender Molekülmasse des Gases abnimmt. Je höher die Molekülmasse des Gases ist, desto näher liegt

Lektion 11: Beengte Räume

der Maximaldruck an den mit einfachen Methoden vorhergesagten Werten für den stationären Zustand. Der Volumenstrom aus dem Gehäuse ist umgekehrt proportional zur Quadratwurzel aus der Dichte des aus dem Gehäuse entweichenden Gases. Daher ist zu Beginn des Prozesses, wenn die Dichte des Wasserstoff-Luft-Gemischs sehr hoch ist und nahe an der Dichte der Luft liegt, der konstante volumetrische Zufluss von reinem Wasserstoff wesentlich höher als der volumetrische Abfluss des schwereren Wasserstoff-Luft-Gemischs, was erklärt, warum der Überdruck für leichteres einströmendes Gas auf ein höheres Niveau ansteigt als für ein schwereres einströmendes Gas und die Druckdynamik eine charakteristische Spitze nur für Wasserstoff aufweist.

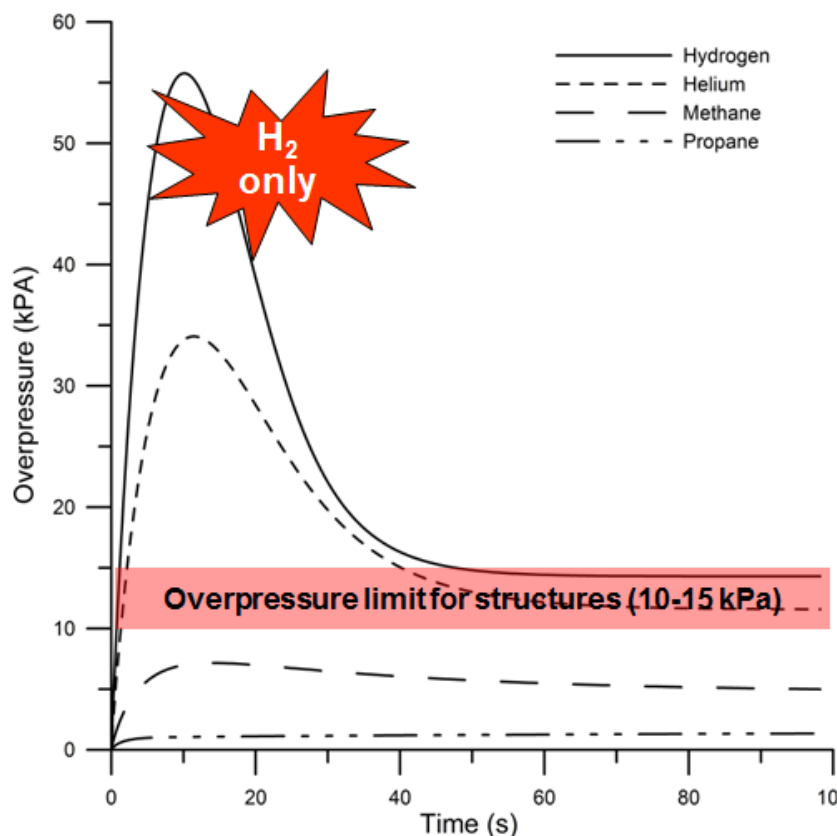


Abbildung 5. Vorausgesagte Überdruckwerte für Wasserstoff, Helium, Methan und Propan, die in einer Garage freigesetzt werden, im Verhältnis zur Zeit, Freisetzungsrate 0,39 kg/s [18].

Das Phänomen der Druckspitze tritt nur auf, wenn die Wasserstofffreisetzungsrate hoch genug ist, um die Luft bei anhaltendem Leck vollständig aus dem Gehäuse zu verdrängen. Bevor der durch PSM erzeugte Überdruck abgeschätzt werden kann, muss daher geprüft werden, ob die Freisetzungsrate ausreicht, um das Gehäuse bei einem anhaltenden Leck zu 100 % mit Wasserstoff zu füllen. Um dies zu überprüfen, kann das technische Nomogramm in Abbildung 6 verwendet werden [10]. Anhand des Nomogramms lassen sich die maximalen Abmessungen der Entlüftungsöffnung berechnen, die bei einer gegebenen gleichmäßigen Freisetzung schließlich zu einer Wasserstoffkonzentration von 100 Volumenprozent im Gehäuse führt. Um die maximalen Abmessungen der Entlüftungsöffnung zu ermitteln, wählt man die

Lektion 11: Beengte Räume

Wasserstofffreisetzungsrates auf der vertikalen Achse und zieht eine horizontale Linie bis zu ihrem Schnittpunkt mit einer der diagonalen Linien, die einer geeigneten Entlüftungsöffnung entsprechen. Ziehen Sie eine vertikale Linie vom Schnittpunkt mit der horizontalen Achse, um die erforderliche Entlüftungshöhe zu ermitteln. Alternativ kann das Nomogramm in Abbildung 6 verwendet werden, um die Mindestfreisetzungsrates für eine bekannte Entlüftungsgröße zu ermitteln, wenn eine Berechnung des PPP erforderlich ist. Ist die mit diesem Nomogramm ermittelte Freisetzungsrates niedriger als die tatsächliche Rate oder sind die tatsächlichen Entlüftungsabmessungen kleiner als die mit dem Nomogramm in Abbildung 6 ermittelten, wird eine Wasserstoffkonzentration von 100 Volumenprozent erreicht, und es kann zu KKP kommen; in diesem Fall sollte das Nomogramm für KKP (Abbildung 7) verwendet werden.

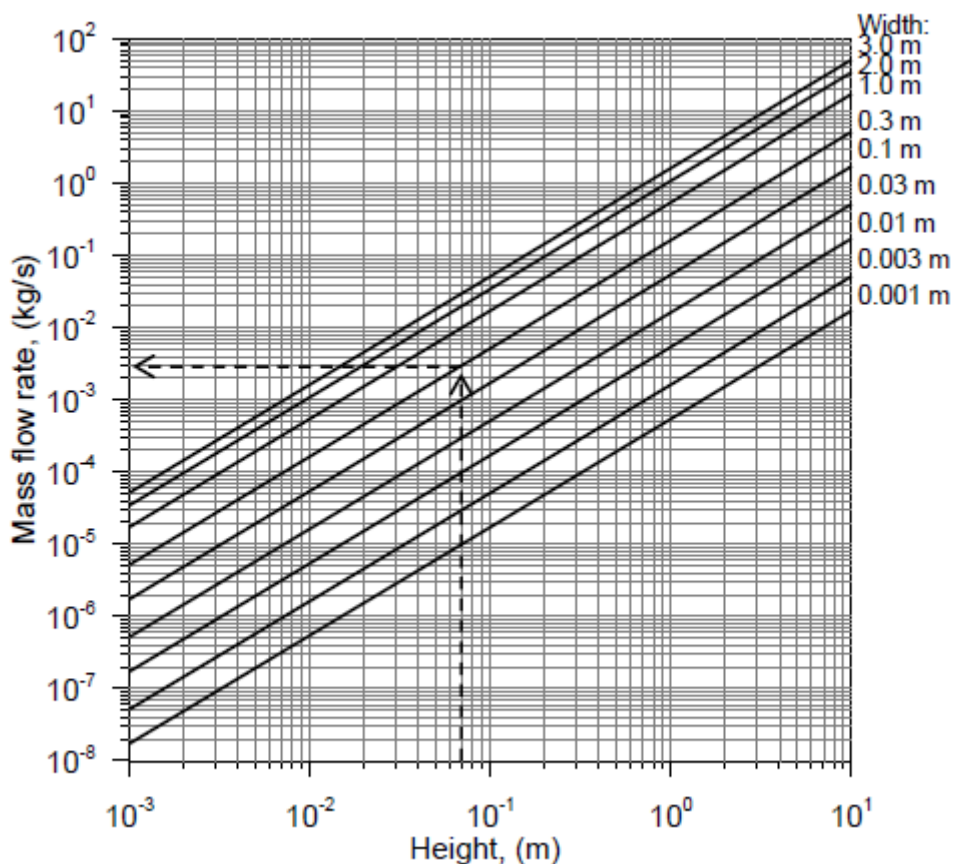


Abbildung 6. Nomogramm zur grafischen Auswertung des Wasserstoffleck-Massendurchsatzes in einem Gehäuse mit einer Entlüftungsöffnung, die zu einer Wasserstoffkonzentration von 100 Volumenprozent führt [10].

Abbildung 7 zeigt ein Nomogramm für die PPP-Bewertung, das die Berechnung der maximalen Überdruckspitze, die durch die Freisetzung von Wasserstoff mit hoher Geschwindigkeit entsteht, anhand des bekannten Massendurchsatzes und Leckdurchmessers ermöglicht. Um das Nomogramm in Abbildung 7 zu verwenden, gehen Sie wie folgt vor:

- Beginnen Sie mit der vertikalen Achse im unteren Teil des Diagramms und wählen Sie den Speicherdruck, lesen Sie horizontal bis zum Leckdurchmesser.

Lektion 11: Beengte Räume

- Lesen Sie senkrecht nach oben, um den Massendurchsatz des Lecks zu berechnen. Lesen Sie vom Massendurchsatz vertikal nach oben bis zum Schnittpunkt mit der Linie für den entsprechenden Entlüftungsbereich in der oberen Tafel weiter.
- Lesen Sie horizontal nach links bis zum Schnittpunkt mit der vertikalen Achse. Der Schnittpunkt gibt den maximalen Überdruck in der Kabine an.

Alternativ kann das Nomogramm in Abbildung 7 verwendet werden, um die Fläche der Entlüftung zu bestimmen, die erforderlich ist, um den Überdruck unter dem angegebenen Grenzwert zu halten. In diesem Fall befolgen Sie die ersten beiden Schritte und ziehen dann eine horizontale Linie von dem gewünschten Überdruckwert auf der vertikalen Achse des oberen Feldes des Diagramms. Die Kurve, die der Schnittpunktkurve im oberen Feld am nächsten liegt, entspricht der erforderlichen Entlüftungsfläche (wenn der Schnittpunkt zwischen zwei Kurven liegt, verwenden Sie die rechte, um einen konservativen Wert zu erhalten).

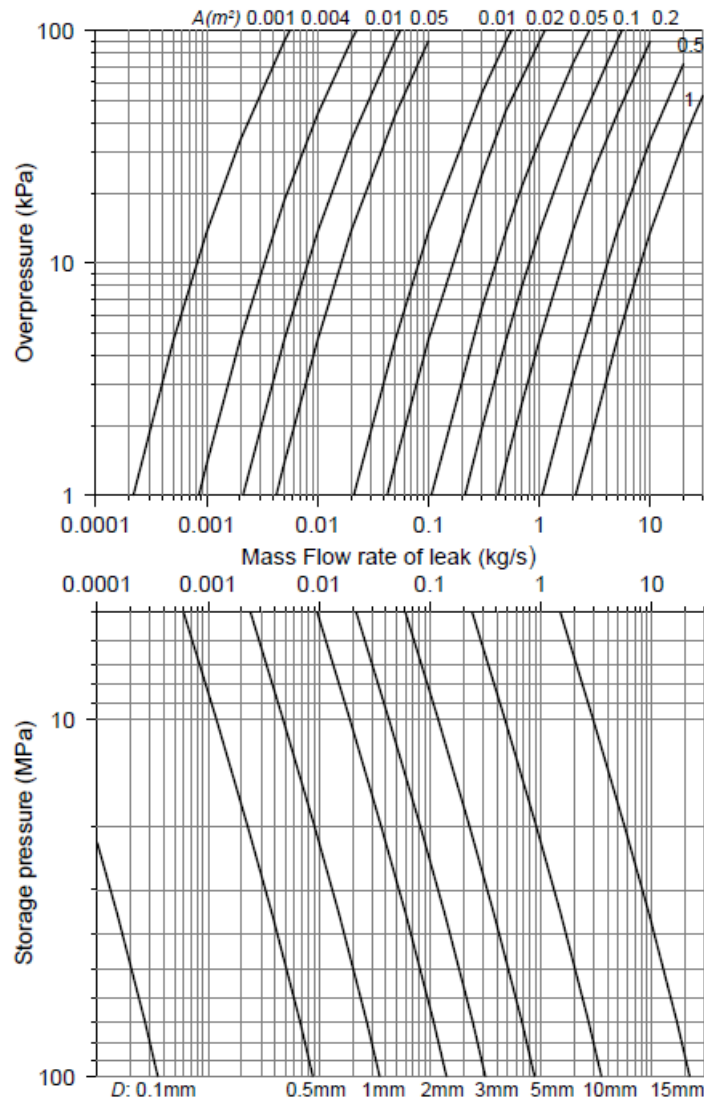


Abbildung 7. Druckspitzennomogramm für verschiedene Abgaberaten [4].

8. Parkplätze

Unterirdische, offene oder überdachte Parkplätze sind für die wachsende Zahl wasserstoffbetriebener Fahrzeuge, die weltweit im Einsatz sind, unerlässlich. Es ist wichtig, praktische Szenarien und Probleme zu berücksichtigen, die bei der täglichen Nutzung solcher Fahrzeuge auftreten können. Durch das Verständnis der Gefahren, die sich aus der Unterbringung von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen in beengten Umgebungen ergeben, können Schritte zur Verringerung der damit verbundenen Gefahren und Risiken durch eine inhärent sicherere Konstruktion unternommen werden. In den meisten Personenkraftwagen wird Wasserstoff in der Regel als komprimiertes Gas in Tanks gespeichert. Typische Speicherdrücke liegen im Bereich von 350 bis 700 bar. Der Wasserstoffvorrat hängt von der Größe des Fahrzeugs ab, und nach Angaben des US-Energieministeriums ist ein Wasserstoffspeicher von etwa 5-13 kg an Bord erforderlich, um eine Reichweite von mehr als 300 Meilen für die gesamte Plattform von leichten Nutzfahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb zu ermöglichen [26].

Druckentlastungsvorrichtungen (TPRD) sind in der Regel in Wasserstofftanks an Bord eingebaut und sorgen für eine rasche Freisetzung des Wasserstoffs, um die Möglichkeit eines katastrophalen Versagens des Tanks bei Feuereinwirkung zu minimieren. Im Falle einer unbeabsichtigten Wasserstofffreisetzung sind hohe Massenströme aus TPRDs im Freien wahrscheinlich akzeptabel, da der Auftrieb des Wasserstoffs eine Dispersion unterhalb der UEG begünstigt. Eine rasche Freisetzung in Innenräumen könnte jedoch die Akkumulation des Wasserstoffs und die Bildung eines entflammaren Wasserstoff-Luft-Gemischs begünstigen. Aus sicherheitstechnischer Sicht ergeben sich nach einer Freisetzung mit hoher Massenrate eine Reihe von Gefahren. Die Druckspitzenphänomene in einem Szenario eines typischen TPRD (Durchmesser von 5,08 mm) mit einer kleinen Entlüftungsöffnung wurden entdeckt und erklärt [27]. Es wurde festgestellt, dass bei einer konstanten Wasserstofffreisetzungsrate von 0,39 kg/s in einer 30,4 m³ großen Garage mit einer einzigen Entlüftungsöffnung von der Größe eines Ziegelsteins der Überdruck innerhalb von 2 s ein Niveau von 10-20 kPa erreichen kann, was je nach Art der Struktur und der Dauer des Impulses zu größeren Schäden und möglicherweise zum Einsturz führen kann. Im Falle einer Wasserstofffreisetzung führt der hohe Volumenstrom des Wasserstoffs also auch ohne Verbrennung zu erheblichen Überdrücken. Es wurde nachgewiesen, dass der Druck in der Garage bei 350 bar Speicherdruck einen Höchstwert von über 50 kPa und bei 700 bar einen Höchstwert von 100 kPa erreicht. Dieser Maximaldruck fällt dann ab und tendiert zu einem stationären Wert, der um eine Größenordnung niedriger ist und dem entspricht, der durch einfache stationäre Schätzungen vorhergesagt wurde [27].

Die obige Analyse deutet darauf hin, dass der "typische" TPRD-Durchmesser von 5,08 mm in geschlossenen Räumen, z. B. in Parkhäusern mit begrenzter Belüftung, möglicherweise nicht "sicher" ist. Daher wurde die Druckdynamik in garagenähnlichen Räumen untersucht, um den optimalen TPRD-Durchmesser auf der Grundlage der Theorie der unterexpandierten Strahlen

Lektion 11: Beengte Räume

und eines Blowdown-Modells in Ulster [28] zu ermitteln. In einer Studie wurde die Beziehung zwischen dem TPRD-Durchmesser, den Luftwechseln pro Stunde (ACH) und dem Volumen der Freisetzungen in Umschließungen mit einer einzigen Entlüftung aus Bordtanks von 1, 5 und 13 kg bei 350 und 700 bar untersucht. Der "sichere" Durchmesser wurde als derjenige TPRD-Durchmesser bestimmt, der im Falle eines Lecks in einer Garage nicht zu einem Überdruck von mehr als 20 kPa führen würde. Der dynamische Druckanstieg, der bei der Freisetzung von Wasserstoff innerhalb eines belüfteten Gehäuses einzigartig ist, sollte bei der Durchführung von Wasserstoffsicherheitstechniken für den Innenbereich berücksichtigt werden. Die Untersuchung der Druckdynamik für 5 kg Wasserstoff in einem 350-bar-Tank in einer 30 m³ großen Garage mit einem ACH-Wert von 0,18 ergab, dass die Verringerung des TPRD-Durchmessers von 5 auf 0,55 mm die Druckspitzenphänomene in der Garage wirksam vermeiden kann. Es war klar, dass die derzeitige Anordnung der TPRDs, die nicht feuerbeständig ist, zu einer inakzeptablen Leistung der Systeme in geschlossenen Räumen führt, wenn die TPRDs auch bei einer nicht gezündeten Freisetzung aktiviert werden. So stellt die vereinfachte "Umgestaltung" der TPRDs zum Schutz der Garagenstruktur vor dem Einsturz kaum realisierbare Anforderungen an die Feuerbeständigkeit von bis zu mehreren Stunden. Weitere Forschungsarbeiten sind erforderlich, um Sicherheitsstrategien und technische Lösungen für das Problem der Feuerbeständigkeit von Lagertanks an Bord und der Anforderungen an die TPRD-Leistung zu entwickeln.

Kürzlich wurde in UU [29] die Freisetzung von nicht entzündetem Wasserstoff bei der Lagerung von Fahrzeugen an Bord eines natürlich belüfteten überdachten Parkplatzes untersucht. Diese neue Studie präsentiert Ergebnisse, die für Fahrzeughersteller, Standardentwicklungsorganisationen (SDOs) und die gebaute Umwelt im Allgemeinen relevant sind. Das entwickelte numerische Modell wurde anhand von experimentellen Daten des KIT (Deutschland) über einen auftreffenden Heliumstrahl validiert, und es wurde eine gute numerische und experimentelle Übereinstimmung innerhalb eines akzeptablen technischen Fehlers erzielt. Die Simulationen wurden für ein Parkhaus mit den Abmessungen 30 × 28,6 × 2,6 m gemäß der britischen Norm BS 7346-7:2013 durchgeführt. Es wurden elf Freisetzungsfälle aus einem 700-bar-Speicher betrachtet, darunter vier nach oben gerichtete Freisetzungen aus einem Rohr 0,5 m über dem Boden sowie eine nach oben und sechs nach unten gerichtete Freisetzungen. Wie erwartet, führte eine Freisetzung mit konstantem Massendurchsatz zu einer größeren brennbaren Menge innerhalb des Parkplatzes im Vergleich zu einer Abblasung durch denselben TPRD-Durchmesser. Der kleinere Durchmesser von 0,5 mm führte zu einer wesentlich kleineren brennbaren Dose als bei größeren Durchmessern von TPRDs, z. B. 2 und 3,34 mm. Bei "typischen" TPRD-Durchmessern in Einschluss-Szenarien ist die Druckspitze nicht von Belang, wenn die Belüftung ausreichend ist.

Lektion 11: Beengte Räume

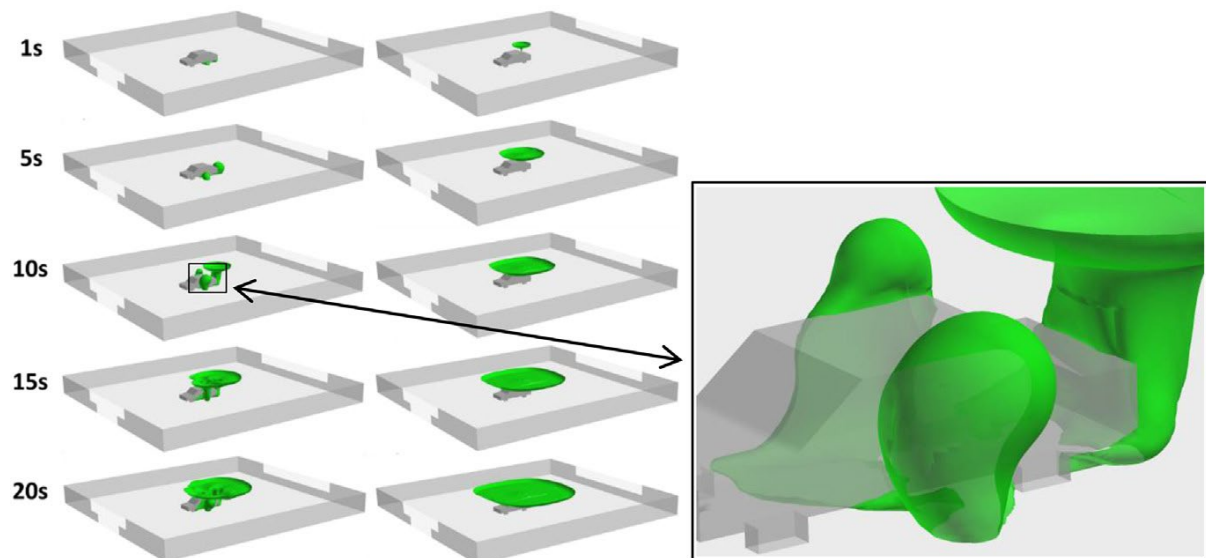


Abbildung 8 Iso-Oberfläche mit 1 % Wasserstoff-Molanteil für die Freisetzung aus 700 bar durch einen TPRD-Durchmesser von 0,5 mm für die Freisetzung nach unten (links) und nach oben (rechts) [29].

Als eine der Neuerungen dieser Arbeit wurden die Abwärts- und Aufwärtsfreisetzungen aus einem 700-bar-Speicher durch eine 0,5-mm-TPRD verglichen. Wie in Abbildung 8 dargestellt, wurde festgestellt, dass die nach unten gerichtete Freisetzung zu einer größeren brennbaren Hülle in der Nähe des Fahrzeugs führte. Die durchschnittliche Wasserstoffkonzentration innerhalb der entzündbaren Hülle war jedoch niedriger als bei der Freisetzung nach oben. Im Gegensatz dazu führte die Freisetzung nach oben zu einer großen entflammaren Hülle unter der Decke, aber nicht um die Kabine herum. Sowohl die Abwärts- als auch die Aufwärtsfreisetzung von 700 bar durch einen Durchmesser von 0,5 mm in einem überdachten Parkhaus kann als eine sichere Wahl angesehen werden, wenn sie mit einer geeigneten Tankkonstruktion gekoppelt ist, die eine begrenzte entzündliche Hülle erzeugt, die sich schnell ausbreitet. Um die Auswirkungen der Ausrichtung der Wasserstofffreisetzung zu verstehen, wurden insbesondere drei verschiedene Abwärtsfreisetzungswinkel (0° , 30° und 45°) verglichen. Wie in Abbildung 9 zu sehen ist, bildet sich bei einer geraden Freisetzung nach unten ein entflammbares Wasserstofffeld um das Fahrzeug herum, wenn auch nur für kurze Zeit, was jedoch für die Ersthelfer ein Problem darstellen kann, um im Falle einer Entzündung zu den Fahrzeuginsassen zu gelangen. Bei einer Freisetzung in einem Winkel von 30° und 45° nach hinten wird das brennbare Gas von der Fahrzeugumgebung weggedrückt, so dass es für die Insassen sicherer ist, zu entkommen. Diese Faktoren sollten bei der Konstruktion von TPRDs für die Speicherung an Bord von Wasserstofffahrzeugen berücksichtigt werden.

Lektion 11: Beengte Räume

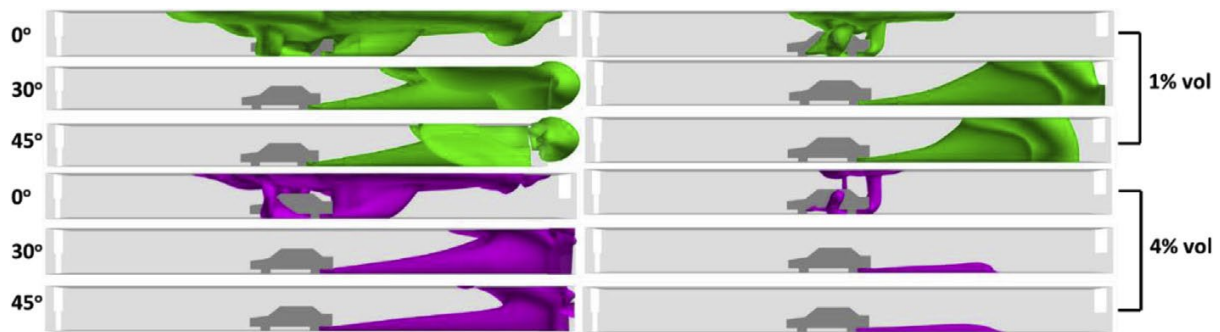


Abbildung 9: Iso-Oberflächen-Diagramme von 1 % und 4 % vol Wasserstoff-Molanteil für 2 mm TPRD-Durchmesser (links) im Vergleich zu 0,5 mm Durchmesser (rechts) für verschiedene Freisetzungsrichtungen bei 20 s Fließzeit.

Weitere Analysen der Gefahren und der damit verbundenen Risiken, die für den Einsatz von FCH-Fahrzeugen in unterirdischen Verkehrssystemen relevant sind, finden sich im Projekt HyTunnel-CS (<https://hytunnel.net/>), insbesondere im Deliverable D3.1 - Detailed research programme on hydrogen fires in confined structures (https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/12/HyTunnel-CS_D3.1_Detailed-research-programme-on-hydrogen-fires-in-confined-structures.pdf).

9. Tunnel

Der Einsatz von FCH-Fahrzeugen oder die Beförderung von komprimiertem gasförmigem Wasserstoff (CGH₂) und kryogenem Flüssigwasserstoff (LH₂) in Tunneln und ähnlichen engen Räumen stellt neue Herausforderungen an den Schutz von Menschenleben, Eigentum und Umwelt bei einem akzeptablen Risikoniveau. Mehrere Studien haben gezeigt, dass eine Enge oder ein Stau schwerwiegendere Folgen haben kann als Unfälle in der freien Atmosphäre. Eine kritische Analyse der Gefahren und der damit verbundenen Risiken, die für den Einsatz von FCH-Fahrzeugen in unterirdischen Verkehrssystemen relevant sind, wurde im Rahmen des Projekts HyTunnel-CS (https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/09/HyTunnel-CS_D1.2_Risks-and-Hazards.pdf) durchgeführt (Deliverable 1.2).

Einschlägiges Grundlagenwissen zu Wasserstofffreisetzung, Brand und Explosion wurde bereits vermittelt, z. B. Belüftung (Abschnitt 5 in dieser Vorlesung), Druckspitzenphänomene (Abschnitt 6 in dieser Lektion), Wasserstoffstrahlfreisetzung (Lektion 9 - Trennung von Wasserstoffflammen und Brandbekämpfung) und Wasserstoffexplosion (Lektion 10 - Umgang mit Wasserstoffexplosionen). Auf einige weitere Besonderheiten bei Tunneln soll gesondert eingegangen werden.

9.1 Einfluss der Lüftungsgeschwindigkeit auf die Ausbreitung in Tunneln

Passive Belüftung ist in Tunneln in der Regel aufgrund des Kolbeneffekts, der durch fahrende Fahrzeuge ausgelöst wird, oder aufgrund der meteorologischen Bedingungen, z. B. des Druckunterschieds über den Portalen, gegeben. Eine aktive Belüftung ist ebenfalls sehr

Lektion 11: Beengte Räume

wahrscheinlich, insbesondere in langen Tunneln, um die Schadstoffe der Fahrzeugabgase oder den Rauch im Brandfall zu entfernen.

Die Belüftung hat großen Einfluss auf die Ausbreitung gefährlicher Gase. Der genaue Standort der Fahrzeuge und die Geometrie des Tunnels können wichtig sein, da sie das erzeugte Strömungsfeld beeinflussen. Die Belüftung kann sowohl positive als auch negative Auswirkungen auf die Wasserstoffausbreitung haben.

Die positiven Aspekte sind:

- es kann die Wasserstoffkonzentration verdünnen und die Größe der entflammenden Wolke minimieren;
- er kann eine unbegrenzte Menge Wasserstoff durch seine Portale und Schächte sicher aus dem Tunnel transportieren, wenn die Wasserstoffkonzentration unter der UEG liegt.

Die negativen Aspekte sind:

- ein brennbarer Stoff kann sich weiter von der Freisetzung entfernen;
- Die Turbulenzen können durch die Belüftung hervorgerufen werden, was die Verbrennungsrate und damit den Überdruck im Falle einer Zündung erhöhen kann.

Bei der Längslüftung ist eine Mindestluftgeschwindigkeit erforderlich, um das gefährliche Gas und den Rauch zu entfernen. Wasserstoff verhält sich aufgrund seines hohen Auftriebs ähnlich wie Brandrauch. Für Brände in Tunneln wurde die kritische Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Wärmefreisetzungsrate untersucht, und der Wert der Lüftungsgeschwindigkeit von 3,5 m/s scheint für die meisten Tunnelbrände ausreichend zu sein, um den "Rückschichteffekt" zu verhindern, auch bei Großbränden mit mehr als 100 MW (https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/09/HyTunnel-CS_D1.1-Effectiveness-of-conventional-safety-measures-.pdf).

Die Belüftung eines Tunnels wirkt sich im Allgemeinen positiv auf die Verdünnung des Wasserstoffs und die sichere Entfernung des Wasserstoffs aus, so dass die Bereiche mit einer Wasserstoffkonzentration von unter 4 % Vol (UEG) fallen. Unter bestimmten Bedingungen kann die Belüftung jedoch die entflammende Wolke transportieren und weiter ausdehnen, was zu einer Bewegung der entflammenden Wolke in Richtung anderer Fahrzeuge oder entlang von Lüftungskanälen und -schächten führt. Daher müssen weitere experimentelle Studien durchgeführt werden, um die optimale Lüftungsgeschwindigkeit in diesem Szenario zu untersuchen und die Grundlage für allgemeinere universelle Empfehlungen zur Wirksamkeit der Lüftung in Tunneln zu schaffen. Außerdem muss die Auswirkung eines Tunnelgefälles auf die Strömung und Ausbreitung von Wasserstoff in die künftige Forschung einbezogen werden. Die europäische Richtlinie 2004/54/EG sieht für neu gebaute Längstunnel ein maximales Gefälle von 5 % vor. Darüber hinaus besagt die Richtlinie, dass bei einem Gefälle von über 3 % zusätzliche Maßnahmen zur Erhöhung des Sicherheitsniveaus erforderlich sind.

9.2 Übergang von der Verpuffung zur Detonation (DDT) im Tunnel

Die DDT-Phänomene wurden in Lektion 10 ausführlich diskutiert, wobei die DDT-Kriterien hauptsächlich für geschlossene Geometrien mit gleichmäßiger Konzentration von Wasserstoff in Oxidationsmitteln (Luft oder Sauerstoff) entwickelt wurden. Durch ein Wasserstoffleck oder eine unbeabsichtigte Wasserstofffreisetzung aus einem Hochdrucktank in einem Tunnel kann sich jedoch ein ungleichmäßiges, z. B. geschichtetes Wasserstoff-Luft-Gemisch vorzugsweise im Deckenbereich eines Tunnelbauwerks bilden.

Es wurden mehrere Experimente und numerische Simulationen zur Verbrennung und Detonation in einer halbdünnen Schicht aus einem Wasserstoff-Luft-Gemisch durchgeführt, wie sie für ein Unfallszenario in einer Tunnelgeometrie typisch sind. Experimente zur Wasserstoffverbrennung in einer dünnen, halbverfeinerten Schicht wurden im Inneren des Sicherheitsbehälters mit einem Volumen von 100 m^3 durchgeführt [22]. Das Zylindervolumen hat einen Innendurchmesser von 3,5 m und eine Länge von 12 m. Eine Wandstärke von 80 mm ermöglicht die Durchführung von Detonationsexperimenten direkt im Inneren des Volumens. Im Inneren des Sicherheitsbehälters wurde ein rechteckiger Kasten mit einer Abmessung von $9 \times 3 \times 0,6 \text{ m}$ installiert, wie in Abbildung 10 dargestellt. Hinsichtlich der Geometrie und der Abmessungen ist diese Versuchsanordnung sehr gut geeignet, um einen Wasserstoffunfall in einer Tunnelumgebung experimentell zu simulieren.

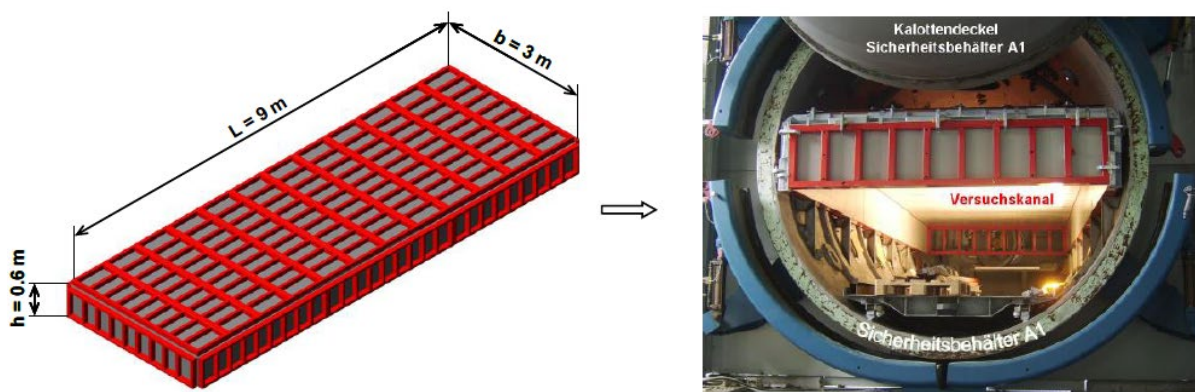


Abbildung 10 Hauptabmessungen der Flachsichtbox (links) und der im Sicherheitsbehälter installierten Dünnschichtbox (rechts) [22].

Die experimentellen Daten über den charakteristischen Druck und die Flammgeschwindigkeiten für einheitliche Zusammensetzungen deuten darauf hin, dass die Schwelle zwischen dem langsamen und dem schnellen Flammenregime in halboffenen Kanälen die Schallgeschwindigkeit des Reaktanten ist, während sie in geschlossenen Kanälen die Schallgeschwindigkeit der Produkte ist [23]. Je höher die Wasserstoffkonzentration oder je reaktionsfreudiger das Gemisch ist, desto höher ist die Schallgeschwindigkeit, wenn die dünnere Schicht (Dicke h) aufgebracht wird. Das Expansionsverhältnis ist ein kritischer Indikator für das Potenzial zur Flammenbeschleunigung [23, 24]. In Abbildung 11 sind die experimentellen Daten des Expansionsverhältnisses σ in Abhängigkeit von der

Lektion 11: Beengte Räume

dimensionslosen Entlüftungsfläche (definiert als das Verhältnis zwischen der Schichtdicke h und dem Abstand zwischen den Hindernissen für die halbdurchlässige Schicht s) zusammengefasst. Es wurde ein linearer Zusammenhang zwischen dem kritischen Ausdehnungsverhältnis σ^* für die schnelle Flammenausbreitung in einer ebenen Schicht und dem Kehrwert der Schichtdicke $1/h$ bzw. des Abstands zwischen den Hindernissen s abgeleitet. Für gleichförmige Gemische erfolgt die Detonation bei unterschiedlichen Wasserstoffkonzentrationen in Abhängigkeit von der Schichtdicke, z. B. 27 % für $h = 0,15$ m, 23% für $h = 0,3$ m und 21% für $h = 0,6$ m. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine dünnere Schicht mehr reaktives Gemisch zur Detonation benötigt als eine dickere Schicht. Da die Energieverluste und die Reaktivität des Gemisches wechselseitig mit der Schichtdicke h und der Breite der Detonationszelle korreliert sind λ , kann davon ausgegangen werden, dass das dimensionslose Verhältnis der Schichtdicke zur Breite der Detonationszelle eine Konstante für die kritischen Detonationsbedingungen ist.

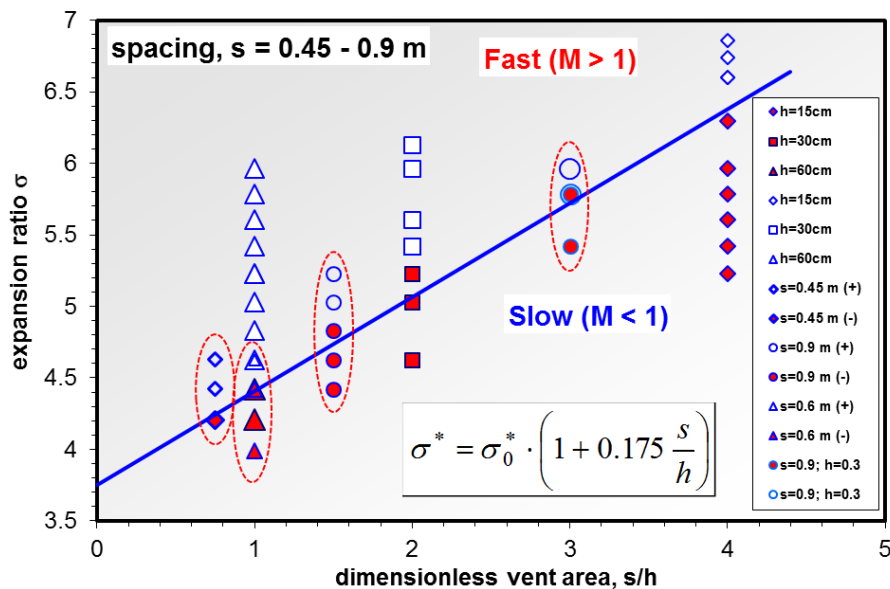


Abbildung 11 Kritische Bedingungen für eine effektive Flammenbeschleunigung als Funktion des Expansionsverhältnisses gegenüber der dimensionslosen Schlotfläche: Schallflamme und Detonationen (offene Punkte), Unterschallflamme (durchgezogene Punkte) [22].

Abbildung 12 bestätigt, dass die dimensionslose Schichtdicke für die kritischen Bedingungen für das Einsetzen der Detonation fast gleich ist, $h/\lambda = 13-14$, für drei untersuchte Schichtdicken von 15 bis 60 mm [22]. Dieser Wert stimmt gut mit früheren Experimenten überein, die in kleinerem Maßstab durchgeführt wurden, $h/\lambda = 7-15$ [23].

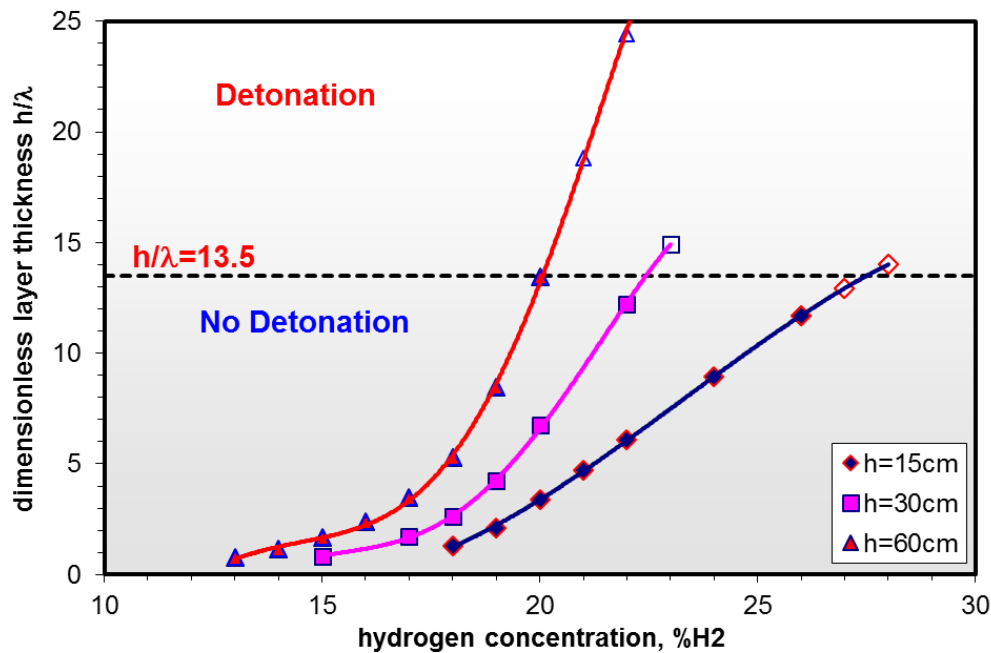


Abbildung 12 Kritische Bedingungen für DDT in der Beziehung zwischen der dimensionslosen Schichtdicke und der Wasserstoffkonzentration: Detonation (offene Punkte); keine Detonation (durchgezogene Punkte) [22].

10. Regime von Wasserstoffbränden in Innenräumen

Das Thema der Wasserstoffbrände wurde bereits in der entsprechenden Lektionen behandelt. Bei Wasserstoffbränden in Innenräumen ist das in der vorherigen Lektionen vorgestellte Nomogramm zur Vorhersage der Flammenlänge anwendbar, wenn das Feuer ausreichend kurz ist und nicht auf eine Wand oder eine andere Oberfläche auftrifft. Die in "Vortrag 10 - Umgang mit Wasserstoffexplosionen" beschriebenen Arbeiten über die Auswirkungen von Wänden und Barrieren sind auch für Strahlbrände relevant, die direkt auf Hindernisse innerhalb des Gehäuses treffen. Eine Wasserstofffreisetzung in der Umschließung erfolgt häufig in der Nähe oder entlang einer Wand oder einer Oberfläche, die die Länge der Stichflamme oder das Ausmaß des nicht gezündeten Strahls vergrößern kann, indem sie die Mitnahme der Luft verringert. Dadurch können sich die Gefahrenabstände vergrößern. Dies ist wichtig, wenn es darum geht, die Position von Geräten und Wasserstoffspeichern (insbesondere die Position von TPRDs an einem Speicher) in Bezug auf Wände und den Boden zu berücksichtigen. Das Brandverhalten hängt auch von den Freisetzungsbedingungen und der Geometrie des Gehäuses und der Belüftung ab. Wasserstoffbrände in Innenräumen können sowohl gut belüftet als auch unterbelüftet sein.

10.1 Gut belüftete Brände

Wenn das Gehäuse mit einer Belüftung ausgestattet ist, gelangt der zur Aufrechterhaltung der Wasserstoffverbrennung erforderliche Sauerstoff durch die Lüftungsöffnungen in das

Lektion 11: Beengte Räume

Gehäuse. Wenn die Belüftung im Gehäuse ausreichend ist, wird die Flamme brennstoffgesteuert und kann als gut belüftet angesehen werden [11].

Die allgemeine Regel für einen Innenraumbrand mit einer oberen Entlüftung lautet wie folgt: Die Erhöhung der Wasserstofffreisetzungsrate ändert das Brandverhalten von:

- gut belüftetes Feuer (bei kleinen Durchflussmengen), um
- unterbelüftetes Feuer mit externer Flamme (für mäßige Durchflussmengen), bis
- unterbelüftetes Feuer mit Selbstverbrennung (bei höheren Durchflussmengen), und wiederum
- Unterbelüftetes Feuer mit externer Flamme (für sehr hohe Durchflussraten).

Es wurde eine numerische Studie unter Verwendung eines modernen Modells durchgeführt, um die zugrundeliegenden physikalischen Phänomene des Wasserstoffbrandes in Innenräumen zu verstehen. Das verwendete CFD-Modell wurde in [12, 13] beschrieben. Sieben numerische Experimente mit einer einzigen Entlüftungsöffnung wurden für ein FC-ähnliches Gehäuse mit den Abmessungen $L \times B \times H = 1 \times 1 \times 1$ m durchgeführt, wobei sich die Entlüftungsöffnung mittig an der Oberseite einer Wand befand (Tabelle 1). Die Freisetzung war vertikal nach oben gerichtet. Das Wasserstoffabgaberohr war 10 cm lang und hatte einen Innendurchmesser von 5,08 mm. Es befand sich in der Mitte des Kabinenbodens, 10 cm über dem Boden. Die Dicke der Aluminiumwände der Kabine betrug 2 cm. Weitere Einzelheiten zu den Berechnungsbereichen sind in [13] zu finden.

Tabelle 1. Einzelheiten zu den numerischen Experimenten [13].

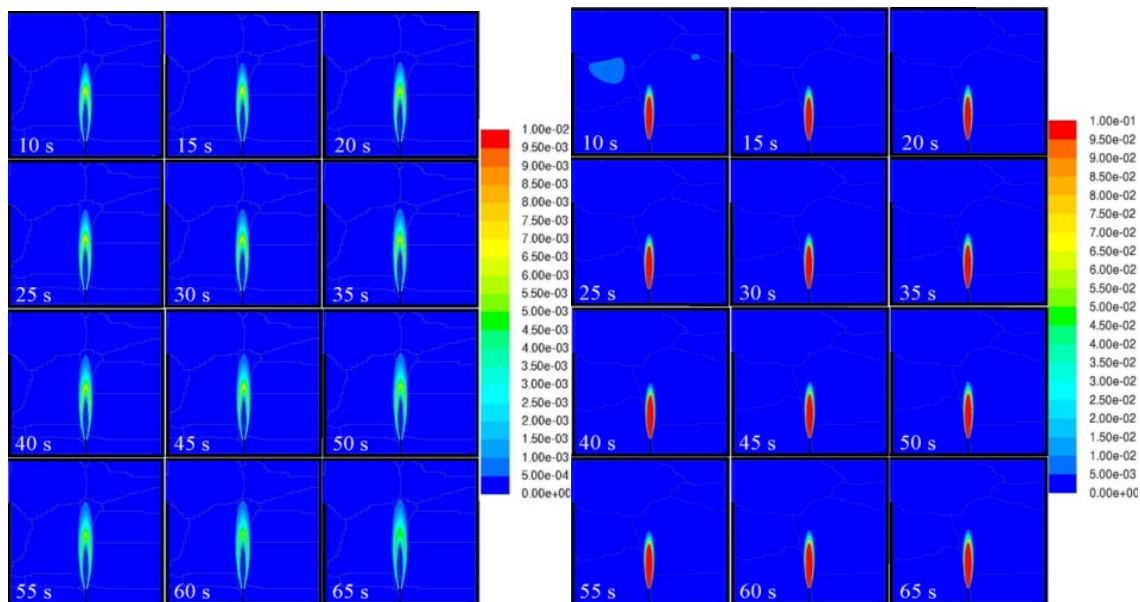
Nein.	Größe der Entlüftung, HxB	Geschwindigkeit, m/s	Durchflussmenge, g/s	Ergebnis
1	Horizontal 3×30 cm	600 m/s	1.0857	Selbstausslöschung
2	Horizontal 3×30 cm	300 m/s	0.5486	Selbstausslöschung
3	Horizontal 3×30 cm	150 m/s	0.2714	Externe Flamme
4	Vertikal 30×3 cm	600 m/s	1.0857	Externe Flamme
5	Vertikal 30×3 cm	60 m/s	0.1086	Gut belüftet
6	Vertikal 13,9 ×3 cm	600 m/s	1.0857	Selbstausslöschung
7	Vertikal 13,9 ×3 cm	300 m/s	0.5486	Externe Flamme

Abbildung 13 zeigt die Dynamik eines gut belüfteten Wasserstoffstrahlfeuers im numerischen Versuch Nr. 5 mit der niedrigsten Freisetzungsgeschwindigkeit von 60 m/s. Die vertikale Entlüftung befindet sich an der linken Wand. Am Ende des numerischen Experiments befand sich das Feuer im quasi-stabilen Zustand. Die Reaktionszone, die mit dem Vorhandensein von Hydroxylradikalen OH verbunden ist, vergrößert sich leicht im Zeitraum von 10 s bis 65 s (Abbildung 13a). Es verlässt praktisch kein Wasserstoff das Gehäuse (Abbildung 13b). Der Wasserstoffmolanteil in der Lüftungsöffnung ist vernachlässigbar und liegt in der

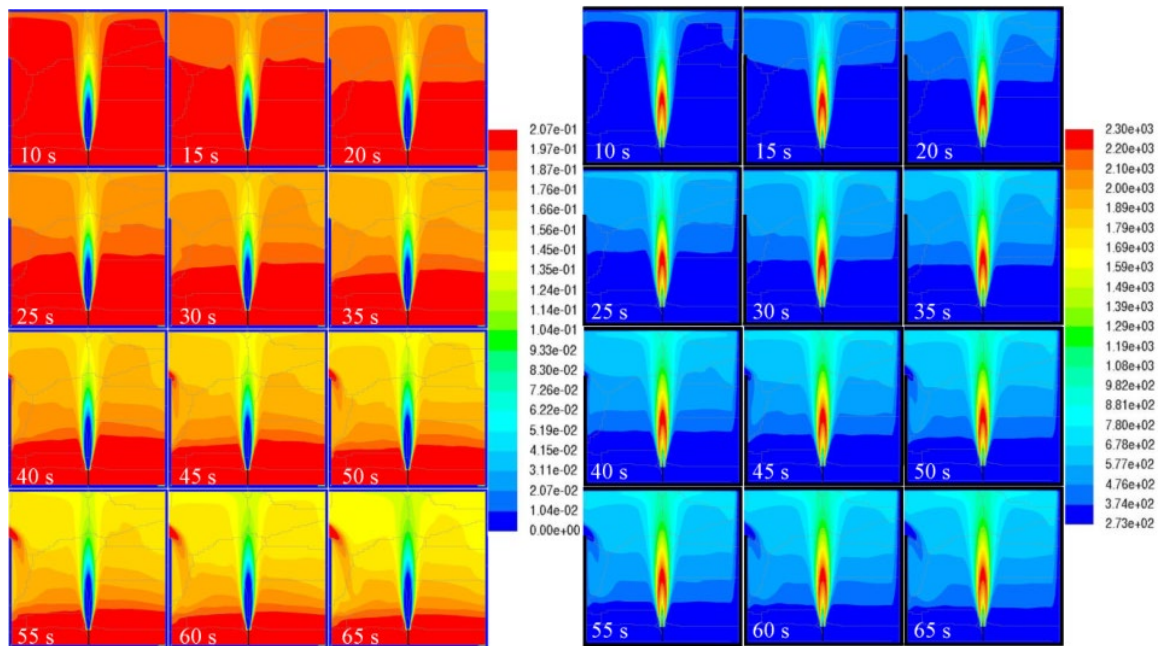
Lektion 11: Beengte Räume

Größenordnung von 2×10^{-4} . Dies zeigt, dass das Feuer unter den Bedingungen der Simulation Nr. 5 gut belüftet ist.

Abbildung 13c zeigt eine sehr langsame Erschöpfung der anfänglichen Sauerstoffschicht am Boden des Gehäuses, die dadurch erklärt werden kann, dass die Flamme durch eine Sauerstoffzufuhr von außen durch den unteren Teil der Lüftungsöffnung aufrechterhalten wird (die Luftzufuhr ist in den Schnappschüssen deutlich zu sehen). Die Temperaturkonturen (Abbildung 13d) bestätigen das Vorhandensein der Schicht am Boden der Kabine, wo die Anfangstemperatur erhalten bleibt. In einer raumähnlichen Umhüllung würde dies günstige Bedingungen für die Evakuierung der Insassen schaffen. Es ist anzumerken, dass die Strahlung in diesem Modell nicht berücksichtigt wird, was die Akzeptanz einer sicherheitstechnischen Auslegung auf der Grundlage schädlicher Kriterien des Wärmestrahlungsflusses beeinträchtigen würde. Die Temperatur fällt von 2300 K in der Flamme auf etwa 750-1000 K in der heißen Strömung unter der Decke ab. Diese Temperatur reicht wahrscheinlich nicht aus, um brennbare Materialien zu entzünden, insbesondere in Gegenwart von Wasserdampf (der H_2O -Molanteil unter der Decke liegt im Bereich von 0,11-0,13 bei 65 s). Dennoch könnten einige Komponenten innerhalb der FC-Box zerstört werden. Der einzige Unterschied zum numerischen Experiment Nr. 4 ist eine Verzehnfachung der Wasserstofffreisetzungsgeschwindigkeit. Der gut belüftete Brand wird bei einer Wasserstofffreisetzungsgeschwindigkeit von 60 m/s beobachtet, und ein unterbelüfteter Brand mit Übergang zu einer äußeren Flamme wird bei einer Freisetzungsgeschwindigkeit von 600 m/s beobachtet.



(a) (b)



(c) (d)

Abbildung 13. 2D-Schicht entlang der Mittellinie des Gehäuses, Simulation Nr. 5 (gut belüftetes Feuer) [13]: (a) OH-Radikal-Molanteil, (b) H₂-Molanteil, (c) O₂-Molanteil und (d) Temperatur.

10.2 Unterbelüftete Brände

Bei unzureichender Belüftung wird die Flamme durch die Belüftung gesteuert und kann als *unterbelüftet* betrachtet werden. Wenn die Flamme nicht ausreichend belüftet ist, wird der gesamte Wasserstoff nicht in der Nähe des Lecks verbrannt, sondern nur dort, wo Sauerstoff vorhanden ist, so dass sowohl heiße Produkte als auch potenzieller Wasserstoff oder eine externe Flamme an der Entlüftung entstehen [14].

Die Entwicklung einer heißen Schicht an der Decke hängt von der Größe und der Lage der Entlüftungsöffnungen (falls vorhanden) im Verhältnis zur Größe des Lecks ab. Bei unzureichender Belüftung im Verhältnis zum Leck wächst die heiße Schicht durch die Umhüllung nach unten. Dies birgt sowohl thermische als auch Erstickungsgefahren.

Mit zunehmender Unterbelüftung der Flamme sinkt der Sauerstoffgehalt in der Kabine bis zu dem Zeitpunkt, an dem in der Nähe der Entlüftungsöffnung Sauerstoff und damit Verbrennung vorhanden sind und eine äußere Flamme entsteht. Im Rest des Gehäuses kann es zu einer geringen oder gar keiner Verbrennung kommen, so dass sich Wasserstoff ansammelt. Wird in diesem Fall das Leck anschließend gestoppt (Abspernung) oder durch Abblasen reduziert, kann die externe Flamme in das Gehäuse zurückbrennen, wo eine vorgemischte entzündliche Atmosphäre vorhanden sein kann, was zu einer Explosion führt [14].

Lektion 11: Beengte Räume

Wenn die Kabine nicht belüftet ist, kann kein Sauerstoff in die Kabine eindringen, so dass die Flamme den Sauerstoff in der Kabine aufbraucht, bis entweder der Brennstoff oder der Sauerstoff verbraucht ist und die Flamme erlischt [14].

Das Produkt der Wasserstoffverbrennung ist Wasser, so dass es bei minimaler Belüftung und einer kleinen Flamme möglich ist, dass der bei der Wasserstoffverbrennung entstehende Wasserdampf in Verbindung mit dem Sauerstoffmangel zu einer Selbstverlöschung der Flamme führen kann. Sollte es zu einer Selbstlöschung kommen und das Wasserstoffleck an der Löschstelle nicht gestoppt werden, so würde sich die Kabine mit unverbranntem Wasserstoff füllen. Wird das Leck anschließend geschlossen und der Wasserstoff nach unten geblasen, würde sich in der Kabine eine vorgemischte entzündliche Atmosphäre bilden. Das Vorhandensein von heißen Oberflächen oder einer ähnlichen Zündquelle könnte zu einer erneuten Entzündung und einer möglichen Explosion führen. Im Grenzbereich eines unterbelüfteten Gehäuses befindet sich die äußere Flamme an der Entlüftung. Im Falle der Selbstlöschung gibt es keine Flamme, weder intern noch extern. Die Einzelheiten der numerischen Experimente (Tabelle 1) zum Brand eines unterbelüfteten Wasserstoffstrahls und zur Dynamik der Selbstlöschung in einem Gehäuse sind [13] entnommen und werden im Folgenden beschrieben.

10.3 Selbstausslöschende Flammenart

Betrachten wir ein Szenario mit einem Jet-feuer aus einem TPRD in einer kleinen Garage mit den Abmessungen $L \times B \times H = 4,5 \times 2,6 \times 2,6$ m und einem Volumen von $30,4 \text{ m}^3$. Eine einzige Entlüftungsöffnung, die in der Fläche einem typischen Ziegelstein $L \times H = 25 \times 5$ cm entspricht, ist bündig mit der Decke angeordnet, so dass Druckeffekte nicht berücksichtigt werden. Der Wasserstoff wird durch das 5,08-mm-Rohr mit einer Geschwindigkeit von 390 g/s freigesetzt. Die Verbrennung des freigesetzten Wasserstoffs in der Garage verbraucht den Luftsauerstoff und erzeugt Wasser. Es ist zu erwarten, dass sich der Wasserstoff in der Garage in Kürze selbst auslöscht. Numerische Simulationen dieses Szenarios zeigten bereits nach 3 s einen Temperaturabfall in der Kabine, wie in Abbildung 14 dargestellt, und die mit den Reaktionszonen verbundenen Hydroxylbereiche (OH).

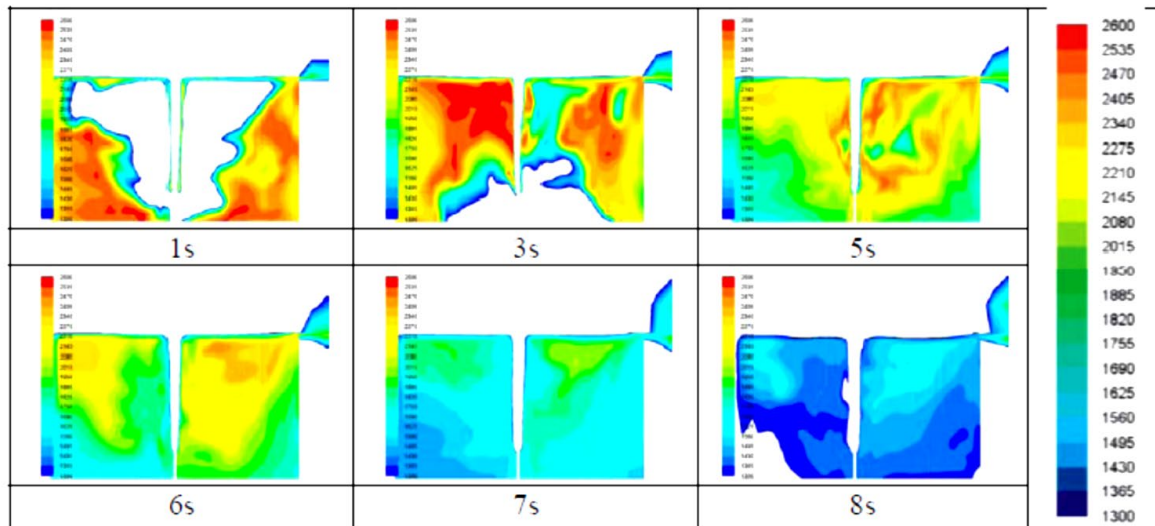


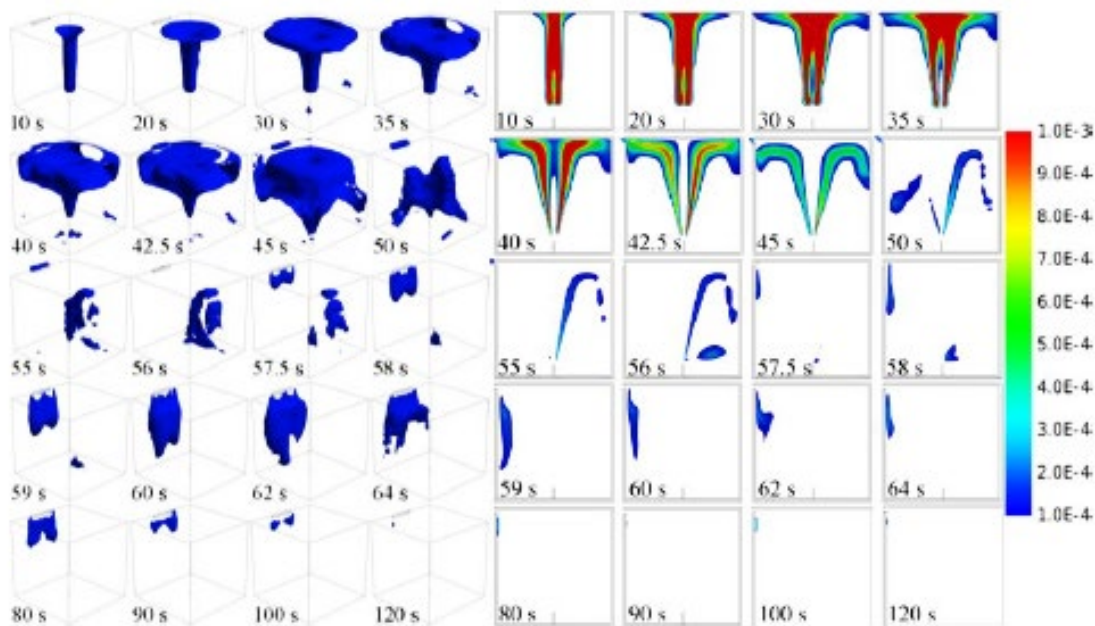
Abbildung 14. Konturen der statischen Temperatur im Bereich von 1300 bis 2600°C entsprechend der sichtbaren Flamme (2D-Schnitt durch die Mitte der Garage) [15].

Die Selbsterlöschung einer Wasserstoffflamme in einem Gehäuse mit einer horizontalen Entlüftungsöffnung an der Oberseite einer Wand wurde erstmals in [12] beschrieben. Die Analyse des numerischen Experiments, insbesondere der Hydroxyl (OH)-Konzentration, trug zum Verständnis des Selbstausschlagungsprozesses bei. Die Verwendung von gemittelten Parametern für das gesamte Raumvolumen während des unterbelüfteten Brandes kann einen Hinweis auf den Zeitpunkt geben, an dem die Verbrennung nachlässt, kann jedoch den Zeitpunkt, an dem die Flamme vollständig erloschen ist, erheblich unterschätzen. Die numerischen Experimente zeigten ein komplexes Muster der Strömung durch die Entlüftungsöffnung in beide Richtungen während des unterbelüfteten Brandes. Das vollständige Erlöschen der Flamme wurde beobachtet, wenn der gesamte Schlotbereich für eine begrenzte Zeit durch den Lufteintritt in die Kabine belegt war. Als Grund für diese Beobachtung wurde die Abkühlung der heißen Verbrennungsprodukte durch die anhaltende Wasserstofffreisetzung und bis zu einem gewissen Grad durch die Wärmeübertragung auf die Umfassungswände angenommen. Die Arbeit [13] erweitert die ersten numerischen Experimente und zielt auf das Verständnis von Wasserstoffbränden in Innenräumen mit einer horizontalen oder vertikalen Entlüftungsöffnung an der Oberseite einer Wand und einer anhaltenden Wasserstofffreisetzung mit konstanter Strömungsgeschwindigkeit und Temperatur ab.

Die Selbsterlöschung von Wasserstoffflammen in Innenräumen wurde auch im numerischen Experiment Nr. 1 mit dem horizontalen Schlot simuliert (Tabelle 1) [12]. Betrachten wir die Dynamik der Selbsterlöschung, die in der Simulation Nr. 2 (Freisetzungsgeschwindigkeit von 300 m/s) beobachtet wurde, und vergleichen sie mit der Simulation Nr. 1 (Freisetzungsgeschwindigkeit von 600 m/s). Abbildung 15 zeigt die Dynamik des OH-Molanteils für die Simulation Nr. 2 in 3D (Abbildung 15a) und 2D (Abbildung 15b). Die Reaktionskontur (OH-Molanteil-Isofläche von 1×10^{-4}) zeigt den Ort der flammenden

Lektion 11: Beengte Räume

Verbrennung und bewegt sich bei etwa 30 s aus dem Gehäuse heraus. Diese Reaktionszone außerhalb des Gehäuses trennt sich bei 45 s von der Reaktionszone innerhalb des Gehäuses und besteht bis etwa 56 s. Die Größe dieser externen kleinen Reaktionszone übersteigt nicht zwei Schlothöhen. Etwa zur gleichen Zeit (56-57 s) dringt Luft in die Kabine ein, die eine schwache Reaktion direkt unterhalb der Entlüftungsöffnung unterstützt. Im Gegensatz zum Versuch Nr. 4 mit der externen Flamme endet die Verbrennung im Strahl bei der Simulation Nr. 2 mit der Selbsterlöschung zuerst auf der linken Seite, die näher an der Entlüftungsöffnung liegt, um 55-56 s. Dies lässt sich durch das Vorhandensein einer etwas größeren Sauerstoffmenge zu diesem Zeitpunkt am Boden auf der rechten Seite des Strahls erklären (Abbildung 15a).



(a) (b)

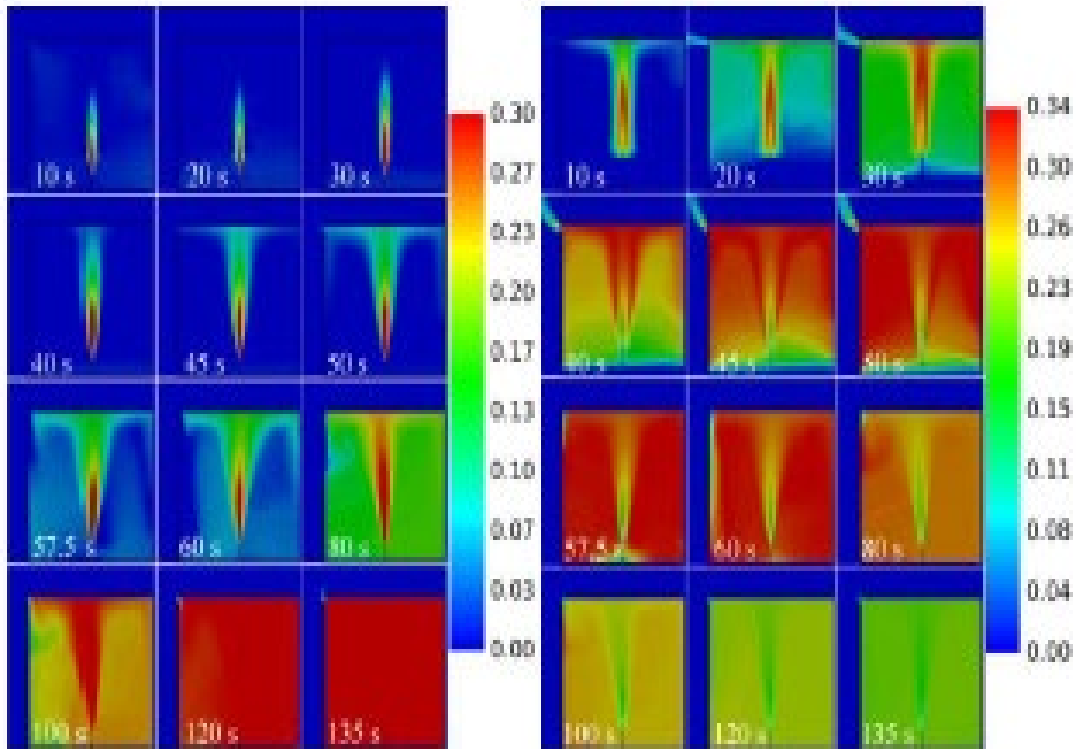
Abbildung 15. Hydroxyl-OH-Molanteil in einem $1 \times 1 \times 1$ m großen Gehäuse, Simulation Nr. 2 (Selbstausslöschung des Wasserstoffjetfeuers) [13]: (a) 3D-Ansicht der Iso-Oberfläche von $\text{OH } 1 \times 10^{-4}$, (b) 2D-Schnitt entlang der Mittellinie des Gehäuses.

Die geringe Größe der Reaktionszone außerhalb des Gehäuses im Zeitraum von 30-56 s lässt sich durch die Analyse der in Abbildung 16 dargestellten Spezieskonzentrationen erklären. Während dieses Zeitraums übersteigt die Wasserstoffkonzentration im Strom aus dem Gehäuse nicht etwa 7-10 Vol.-%, die Wasserkonzentration steigt von etwa 15 auf mehr als 34 Vol.-%. Das Entflammbarkeitsdiagramm zeigt, dass dieses Gemisch mit der Luft gerade an der Grenze des entflammbaren Bereichs liegt [16]. In der Simulation Nr. 2 reagiert dieses Gemisch mit Luft unter Bedingungen, bei denen die Temperatur des Gemischs recht hoch ist und erst am Ende dieses Zeitraums auf etwa 800 K sinkt.

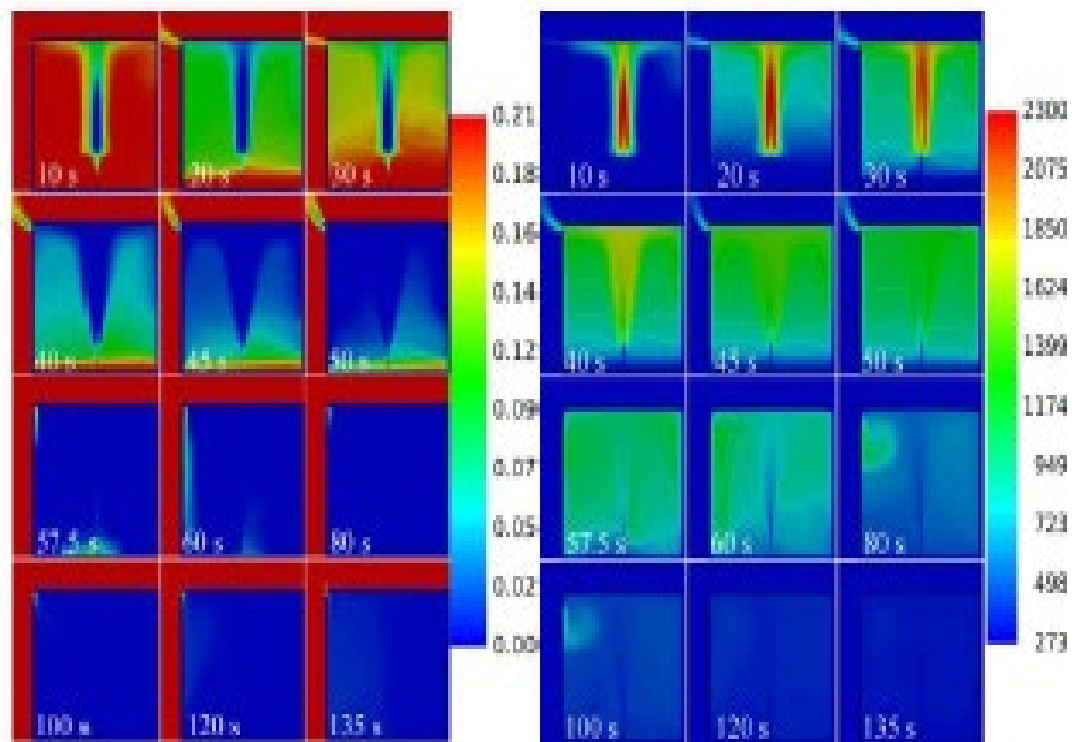
Wie aus Abbildung 16 hervorgeht, endet die Strömung aus dem Gehäuse nach 50 s und es findet nur noch ein Zufluss in das Gehäuse statt (siehe die Momentaufnahmen von 57,5 s bis

Lektion 11: Beengte Räume

120 s). In Übereinstimmung mit der Simulation Nr. 1 muss es also eine längere Zeitspanne geben, in der nach der Anfangsphase der internen Verbrennung und der anschließenden Abkühlung der heißen Produkte durch "kalten" Wasserstoff Luft über den gesamten Bereich der Entlüftungsöffnung in das Gehäuse einströmt, damit die Selbstauslöschung stattfinden kann.



(a) (b)



(c) (d)

Lektion 11: Beengte Räume

Abbildung 16. 2D-Schicht entlang der Mittellinie des Gehäuses, Simulation Nr. 2 (Selbstausslöschung des Wasserstoffstrahls) [13]: (a) H₂-Molanteil, (b) H₂O-Molanteil, (c) O₂-Molanteil und (d) Temperatur.

Abbildung 16 (a) zeigt, dass das Gehäuse 2 Minuten nach der Freisetzung mit Wasserstoff gefüllt ist, dessen Molenbruch über dem stöchiometrischen Wert ($> 0,30$) liegt. Ähnlich wie bei der Simulation Nr. 4 mit der vertikalen Entlüftung ist der Strahl leicht zur Wand mit der Entlüftung geneigt. Der maximale Molenbruch von Wasser wird bei 50-60 s beobachtet. Es gibt eine starke "Schichtung" von Sauerstoff zum Zeitpunkt von 40-50 s, mit einer Konzentration von praktisch Null oben und einer Anfangskonzentration von Sauerstoff von 20,7 Vol.-% unten. Die Temperatur fällt nach 2 Minuten nach der Zündung auf etwa 100 Grad über der Anfangstemperatur. Dieses Ergebnis kann als Hinweis auf die Feuerwiderstandsdauer der Komponenten innerhalb des Brennstoffzellegehäuses verwendet werden.

Die frühere Schlußfolgerung, daß die Selbsterlöschung immer dann zu beobachten ist, wenn es eine Zeitspanne gibt, in der Luft durch den gesamten Entlüftungsbereich in das Gehäuse einströmt, wird in dem Experiment bestätigt, das den Bedingungen der Simulation Nr. 6 (Tabelle 1) mit der vertikalen Entlüftung mit der kleinsten Fläche entspricht. Zur weiteren Untermauerung dieser Regel gab es in der Simulation Nr. 7 (externe Flamme) keinen solchen Zeitraum.

10.4 Externer Flammenmodus

Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse der Simulation Nr. 4 für die Freisetzung mit einer Geschwindigkeit von 600 m/s, bei der ein Übergang von einem internen Strahlfeuer in der Umhüllung zu einem externen Flammenmodus stattfindet. Der Hydroxyl-Molanteil in der Flamme ist bei 10 s gleich 0,01, was für eine Verbrennung unter normalen atmosphärischen Bedingungen charakteristisch ist. Danach nimmt der maximale OH-Molanteil ab, während die Zone mit dem höchsten OH-Molanteil schrumpft. Dies ist vermutlich auf die Verdünnung der Stichflamme durch mitgerissene Verbrennungsprodukte zurückzuführen. Der maximale OH-Molanteil übersteigt bei 20 s nicht $7,5 \times 10^{-3}$.

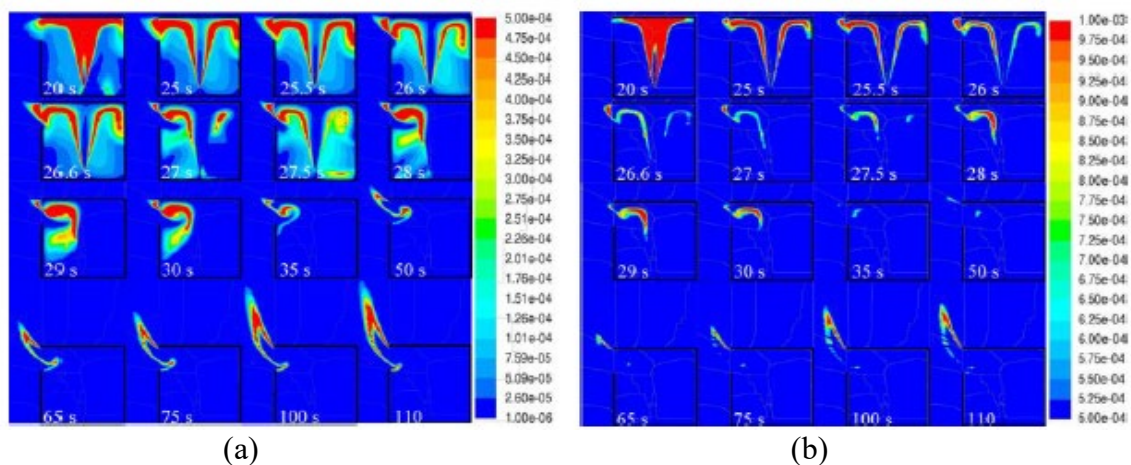
Abbildung 17a zeigt die Entwicklung der Reaktionszone während des Übergangs von der inneren Verbrennung zur äußeren Flamme durch Visualisierung des OH-Molanteils im Bereich von 1×10^{-6} bis 5×10^{-4} , während ein Bild in Abbildung 17b dem Bereich 5×10^{-4} - 1×10^{-3} entspricht. Während die Verbrennungsrate im Inneren des Gehäuses nach 20 s abnimmt, beginnt sich die Reaktionszone durch die Entlüftungsöffnung aus dem Gehäuse herauszubewegen, wobei die äußere Flamme nach 50 s oberhalb des Gehäuses sichtbar wird. Die Abbildungen 17a und 17b zeigen deutlich, dass die Reaktion zuerst auf der der Entlüftungsöffnung gegenüberliegenden Seite der Strahlflamme aufhört, die sich oben an der linken Wand befindet. Abbildung 17b zeigt, dass es auf beiden Seiten der Entlüftungsöffnung eine kontinuierliche Reaktionszone gibt. Diese Zone verbindet die interne Reaktion in dem Bereich, in dem Frischluft in das Gehäuse eintritt, mit der externen Flamme, die aus dem

Lektion 11: Beengte Räume

Gehäuse strömt und ein Gemisch aus Wasserstoff und Verbrennungsprodukten in der atmosphärischen Luft enthält. Diese beiden gegenläufigen Ströme durch die Entlüftungsöffnung erzeugen einen Reaktionswirbel, der sich innerhalb des Gehäuses in der Nähe der Entlüftungsöffnung festsetzt und die untere Flammenkante stabilisiert. Die Oberkante der externen Flamme ist an der Oberkante des Schlots befestigt.

Die Entwicklung des Wasserstoffmolanteils in der Kabine ist in Abbildung 17c dargestellt. Das Feuer befindet sich bis etwa 20 Sekunden im gut belüfteten Bereich, dann verlässt kein Wasserstoff mehr das Gehäuse, da er im Inneren vollständig verbrannt ist. Die Ansammlung von Wasserstoff ist auf der Seite des Strahls, die der Wand mit der Entlüftung gegenüberliegt, etwas höher. Es besteht eine gewisse Neigung des Strahls in Richtung der Entlüftungsöffnung (siehe Schnappschuss bei 50 s). Der Wasserstoff-Molanteil liegt zum Zeitpunkt 65 s praktisch in der gesamten Kabine über 0,30, mit Ausnahme eines kleinen Bereichs in der Nähe der Entlüftungsöffnung, wo die Luft eintritt. Zum Zeitpunkt 110 s beträgt der Molanteil von Wasserstoff 0,48 bis 0,50 am Boden bzw. an der Decke.

Die maximale Wasserdampfmenge wird bei 27-30 s beobachtet (Abbildung 17d), ähnlich wie bei der Simulation Nr. 1 mit einer horizontalen Entlüftungsöffnung der gleichen Fläche in [12]. Danach nimmt der Molenbruch des Wassers mit der Zeit monoton ab, da das Wasser in den anhaltenden Wasserstoffstrahl mitgerissen wird und aus dem Gehäuse fließt (als Teil des brennbaren Gemischs).



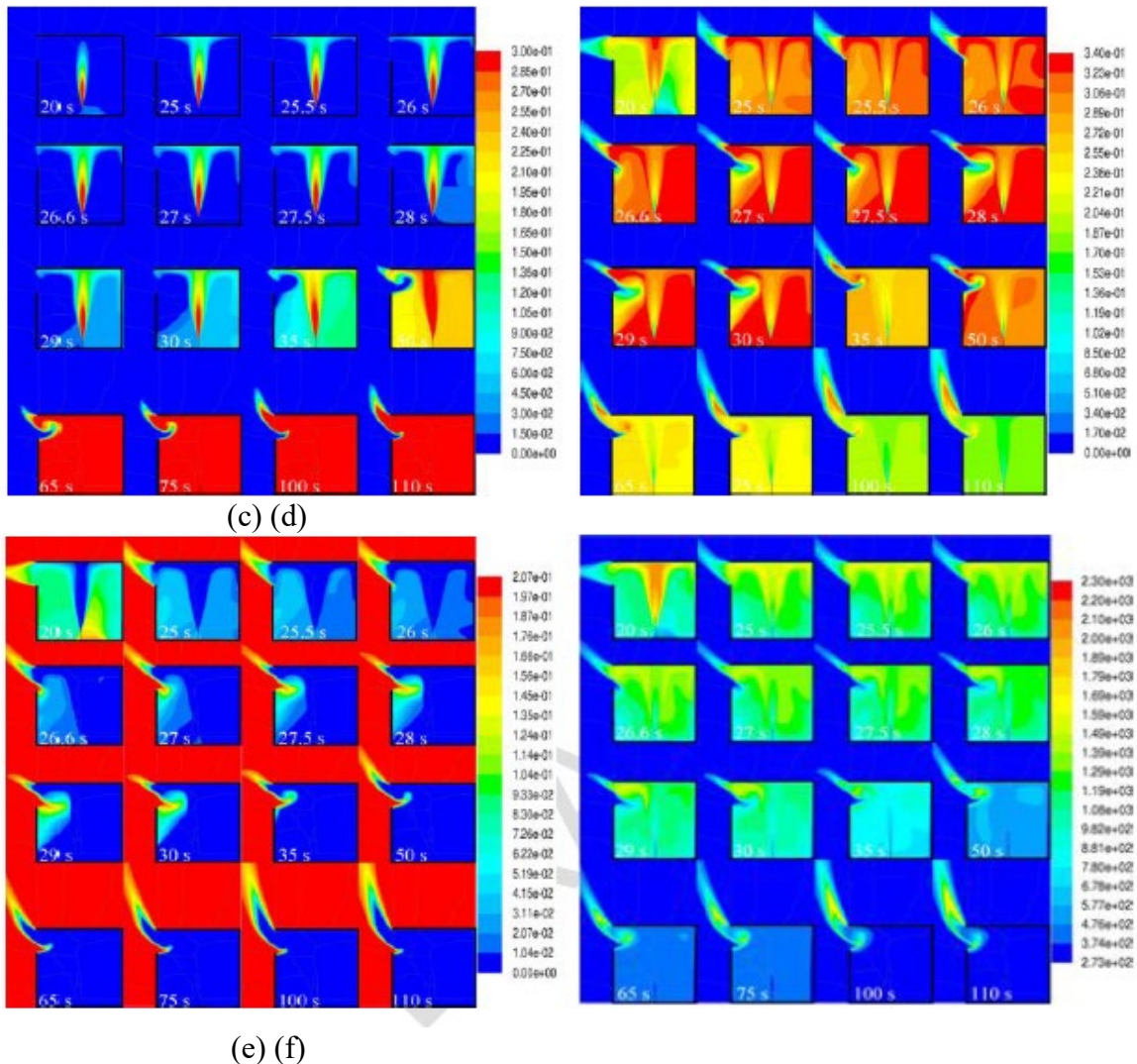


Abbildung 17. 2D-Schicht entlang der Mittellinie des Gehäuses, Simulation Nr. 4 (externer Flammenmodus des Wasserstoffstrahlfeuers) [13]: (a) OH-Molanteil, Bereich 1×10^{-6} - 5×10^{-4} , (b) OH-Molanteil, Bereich 5×10^{-4} - 1×10^{-3} , (c) H_2 -Molanteil, (d) H_2O -Molanteil, (e) O_2 -Molanteil und (f) Temperatur.

Bei einem für das "Überleben" der Flamme kritischen Zeitpunkt von etwa 50 s, wenn der Übergang zur äußeren Flamme beginnt, steigt der Molanteil des Wasserstoffs im Ausfluss auf etwa 0,2 und der des Wassers (Verdünnungsmittel) sinkt auf 0,2 - 0,3. Diese Gemischzusammensetzung liegt nach dem Entflammbarkeitsdiagramm für ein Wasserstoff-Luft-Verdünnungsmittel-Gemisch bei Atmosphärendruck und -temperatur im entflammaren Bereich, wenn man den Einfluss der Temperatur vernachlässigt. Das Vorhandensein eines entflammaren Gemischs, das aus dem Gehäuse fließt, und das Vorhandensein einer Reaktion (Zündquelle) schaffen somit die Voraussetzungen für den Übergang der Verbrennung außerhalb des Gehäuses.

Abbildung 17e zeigt, dass der Sauerstoffmolanteil in der Kabine allmählich abnimmt und zum Zeitpunkt von 35 s praktisch gleich Null ist, mit Ausnahme eines kleinen Bereichs in der Nähe der Entlüftungsöffnung. Dann verbrennt die Luft, die bis zu einer gewissen Tiefe in die Kabine

Lektion 11: Beengte Räume

eindringt, und wird sofort in den Strom von Wasserstoff und Verbrennungsprodukten mitgerissen, der durch den oberen Teil der Entlüftungsöffnung aus der Kabine strömt. Die Temperaturdynamik innerhalb und außerhalb des Gehäuses ist in Abbildung 17f dargestellt. Die Momentaufnahme von 50 s zeigt, dass der Reaktionswirbel, der sich in der Scherschicht zwischen dem aus der Kabine austretenden Gemisch und der in die Kabine eintretenden Luft bildet, eine wichtige Rolle für die Nachhaltigkeit der Flamme und den Übergang des unterbelüfteten internen Feuers zur externen Flammenform spielt.

Bei der horizontalen Entlüftung derselben Fläche wurde die Entstehung der äußeren Flamme in der Simulation Nr. 3 bei einer geringeren Wasserstoffgeschwindigkeit von 150 m/s beobachtet. Die gleiche Freisetzungsgeschwindigkeit wie in der Simulation Nr. 4 (vertikale Entlüftung), d. h. 600 m/s, führte bei der horizontalen Entlüftung zum Selbstauslöchen der Flamme (Simulation Nr. 1). Die Selbsterlöschung wurde auch bei einer Geschwindigkeit von 300 m/s beobachtet (Simulation Nr. 2). Somit liegt die Geschwindigkeitsgrenze zwischen dem externen Flammenmodus und dem Selbsterlöschungsmodus bei der gegebenen Gehäusegeometrie zwischen 150 m/s und 300 m/s.

Die äußere Flamme wird in der Simulation Nr. 7 mit einer vertikalen Entlüftungsöffnung mit der kleinsten Fläche und für eine Auslösegeschwindigkeit von 300 m/s beobachtet. Die Erhöhung der Freisetzungsgeschwindigkeit auf 600 m/s (Simulation Nr. 6) führte zum Selbstauslöchen. Ein charakteristisches Merkmal der Selbsterlöschungserscheinung ist die Tatsache, dass während eines bestimmten Zeitraums Luft über die gesamte Fläche der Entlüftungsöffnung (und nicht nur über einen Teil der Entlüftungsfläche) in das Gehäuse einströmt.

11. Nutzung des E-Labors

11.1 Passive Belüftung in einem Gehäuse mit einer Lüftungsöffnung: gleichmäßige Wasserstoffkonzentration

Dieses Tool besteht aus drei Optionen, die die Berechnung der folgenden drei Merkmale ermöglichen:

1. Gleichmäßige Wasserstoffkonzentration im stationären Zustand für die gegebene Freisetzungsrate und Entlüftungsgröße;
2. Parameter der Entlüftung, um die gewünschte Konzentration für die gegebene Freisetzung zu erhalten;
3. Die Freisetzungsrate, um die gewünschte Konzentration für die gegebenen Entlüftungsgrößen zu erhalten.

Die Theorien sind in Abschnitt 5 dieser Lektion zu finden. Zur Implementierung des Tools, wie in Abbildung 18 dargestellt, muss zunächst das Modell ausgewählt werden, das für bestimmte Probleme verwendet wird.

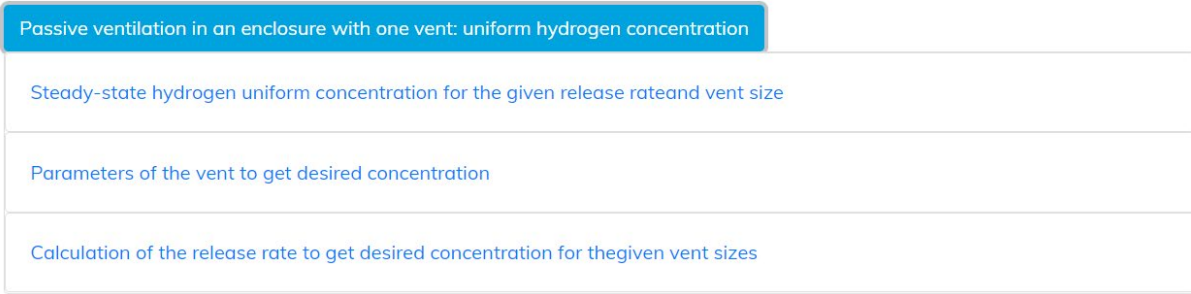


Abbildung 18 Auswahl eines geeigneten Modells für ein bestimmtes Problem

Problem 1: Gleichförmiger Wasserstoff im stationären Zustand bei gegebener Freisetzungsrate und Entlüftungsgröße.

Die Eingabeparameter sind in Tabelle 2 aufgeführt, und der Bildschirmausschnitt mit den Einstellungen des Tools ist in Abbildung 19 zu sehen.

Tabelle 2 Eingabeparameter für Problem 1

Name des Parameters	Symbol	Einheit	Grenzwerte (min-max)	Standardeinstellungen
Massendurchsatz von Wasserstoff	\dot{m}_{H_2}	kg/s	0.0001-1	0.001
Umgebungsdruck	p_2	Pa	33700-107900	101325
Temperatur in der Umgebung	T_2	K	240-350	293
Höhe der Entlüftung	H	m	0.001-10	2
Breite der Entlüftung	W	m	0.001-10	1
Entladungskoeffizient	C_D	-	0.4-1	0.6

Lektion 11: Beengte Räume

Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Steady-state hydrogen uniform concentration for the given release rate and vent size

Ambient pressure

p_{atm} 101325 Pa

Ambient temperature

T_{atm} 293 K

Hydrogen mass flow rate

\dot{m}_{H_2} 0.00001 kg/s

Discharge coefficient

C_D 0.6

Vent height

H 0.2 m

Vent width

W 0.2 m

Calculate Reset

Abbildung 19. Die Einstellung des Werkzeugs für Problem 1

Der Ausgangsparameter ist der Wasserstoff-Volumenanteil. Ein Beispiel für den Ausgangsparameter ist in Abbildung 20 dargestellt, aus dem hervorgeht, dass der berechnete Wasserstoff-Volumenanteil im Gehäuse bei dem in Abbildung 19 angegebenen Wert der Eingangsparameter 0,048377 beträgt.

Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Steady-state hydrogen uniform concentration for the given release rate and vent size

Name	Symbol	Value	Unit
Ambient pressure	p_{atm}	1.01325e+5	Pa
Ambient temperature	T_{atm}	293	K
Hydrogen mass flow rate	\dot{m}_{H_2}	1e-5	kg/s
Volume fraction of hydrogen	X	0.048377	
Discharge coefficient	C_D	0.6	
Vent height	H	0.2	m
Vent width	W	0.2	m

Export to CSV Change inputs Dataset name Save

Abbildung 20. Die Ausgabe des Tools für Problem 1

Problem 2: Parameter der Entlüftung, um die gewünschte Wasserstoffkonzentration zu erhalten.

Mit diesem Tool kann der Benutzer die Parameter der Entlüftung, z. B. Breite oder Höhe, für die mögliche Freisetzung berechnen, um die erforderliche Wasserstoffkonzentration, z. B. 25 % der unteren Entflammbarkeitsgrenze von 4 % (UEG), nicht zu überschreiten.

Die Eingabeparameter sind in Tabelle 3 aufgeführt, und der Bildschirmausschnitt für die Einstellung des Tools ist in Abbildung 21 zu sehen. Es ist zu beachten, dass in diesem Fall entweder die Lüftungshöhe (H) oder die Lüftungsbreite (W) angegeben werden muss, indem entweder für H oder W ein Wert eingegeben wird und der nicht benötigte Parameter (H oder W) leer gelassen wird. Wenn beispielsweise H als Eingabeparameter verwendet wird, muss W leer bleiben und umgekehrt.

Tabelle 3 Eingabeparameter für Problem 2

Name des Parameters	Symbol	Einheit	Grenzwerte (min-max)	Standardeinstellungen
Massendurchsatz von Wasserstoff	\dot{m}_{H_2}	kg/s	0.0001-1	0.001
Umgebungsdruck	p_2	Pa	33700-107900	101325
Temperatur in der Umgebung	T_2	K	240-350	293
Wählen Sie entweder Höhe oder Breite	H/W	m	0.001-10	2
Entladungskoeffizient	C_D	-	0.4-1	0.6
Gewünschter Molenbruch von Wasserstoff	X	-	0-1	0.04

Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Parameters of the vent to get desired concentration

Ambient pressure

P_{atm} 101325 Pa

Ambient temperature

T_{atm} 293 K

Hydrogen mass flow rate

\dot{m}_{H_2} 0.00001 kg/s

Volume fraction of hydrogen

X 0.04837701757210591

Discharge coefficient

C_D 0.6

Vent height

H 0.2 m

Vent width

W m

Calculate Reset

Abbildung 21. Die Einstellung des Werkzeugs für Problem 2

Lektion 11: Beengte Räume

Der Ausgangsparameter ist entweder die Entlüftungshöhe oder die Entlüftungsbreite bei einem bestimmten Massendurchsatz. Ein Beispiel für den Ausgangsparameter ist in Abbildung 22 dargestellt, aus dem hervorgeht, dass für den gegebenen Wert der Eingangsparameter in Abbildung 21 die erforderliche Entlüftungsbreite 0,2 m beträgt, wenn die Entlüftungshöhe auf 0,2 m eingestellt ist.

Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Parameters of the vent to get desired concentration

Name	Symbol	Value	Unit
Ambient pressure	p_{atm}	1.01325e+5	Pa
Ambient temperature	T_{atm}	293	K
Hydrogen mass flow rate	\dot{m}_{H_2}	1e-5	kg/s
Volume fraction of hydrogen	X	0.048377	
Discharge coefficient	C_D	0.6	
Vent height	H	0.2	m
Vent width	W	0.2	m

Export to CSV Change inputs Dataset name Save

Abbildung 22. Die Ausgabe des Tools für Problem 2

Problem 3: Freisetzungsrates zur Erreichung der gewünschten Konzentration bei gegebenen Entlüftungsgrößen

Mit diesem Werkzeug lässt sich der Massendurchsatz berechnen, der für die jeweiligen Entlüftungsparameter zulässig ist, damit die erforderliche Wasserstoffkonzentration, z. B. 25 % der unteren Entflammbarkeitsgrenze von 4 % (UEG), nicht überschritten wird.

Die Eingabeparameter sind in Tabelle 4 aufgeführt, und der Bildschirmausschnitt mit den Einstellungen des Tools ist in Abbildung 23 zu sehen.

Tabelle 4 Eingabeparameter für Problem 3

Name des Parameters	Symbol	Einheit	Grenzwerte (min-max)	Standard-einstellungen
Umgebungsdruck	p_2	Pa	33700-107900	101325
Temperatur in der Umgebung	T_2	K	240-350	293
Höhe der Entlüftung	H	M	0.001-10	2
Breite der Entlüftung	W	m	0.001-10	1
Entladungskoeffizient	C_D	-	0.4-1	0.6
Gewünschter Molenbruch von Wasserstoff	X	-	0-1	0.04

Lektion 11: Beengte Räume

Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Calculation of the release rate to get desired concentration for the given vent sizes

Ambient pressure

P_{atm} 101325 Pa

Ambient temperature

T_{atm} 293 K

Volume fraction of hydrogen

X 0.04837701757210591

Discharge coefficient

C_D 0.6

Vent height

H 0.2 m

Vent width

W 0.2 m

Calculate Reset

Abbildung 23. Die Einstellung des Werkzeugs für Problem 3

Der Ausgangsparameter ist der erforderliche Wasserstoffmassendurchsatz. Ein Beispiel für den Ausgangsparameter ist in Abbildung 24 dargestellt, aus dem hervorgeht, dass für den gegebenen Wert der Eingangsparameter in Abbildung 23 der erforderliche Wasserstoffmassendurchsatz $1e-5 \text{ kg s}^{-1}$ beträgt.

Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Calculation of the release rate to get desired concentration for the given vent sizes

Name	Symbol	Value	Unit
Ambient pressure	P_{atm}	1.01325e+5	Pa
Ambient temperature	T_{atm}	293	K
Hydrogen mass flow rate	\dot{m}_{H_2}	1e-5	kg/s
Volume fraction of hydrogen	X	0.048377	
Discharge coefficient	C_D	0.6	
Vent height	H	0.2	m
Vent width	W	0.2	m

Expert to CSV Change inputs Dataset name Save

Abbildung 24. Die Ausgabe des Tools für Problem 3

11.2 Druckspitzenphänomen bei nicht gezündeter Freisetzung

Dieses Tool besteht aus zwei Optionen, die es ermöglichen, die folgenden zwei Probleme zu lösen:

1. Druckspitzenphänomen bei konstantem Massendurchsatz
2. Druckspitzenphänomen mit Tankabschlammung

Die Theorie des Druckspitzenphänomens (PPP) wurde in Abschnitt 6 dieser Vorlesung ausführlich behandelt. Um das Tool, wie in Abbildung 25 gezeigt, zu implementieren, muss zunächst das Modell ausgewählt werden, das für bestimmte Probleme verwendet wird. Die

Lektion 11: Beengte Räume

Modellbeschreibung sollte nach Drücken der entsprechenden Schaltfläche auf dem Startbildschirm des Tools erscheinen.

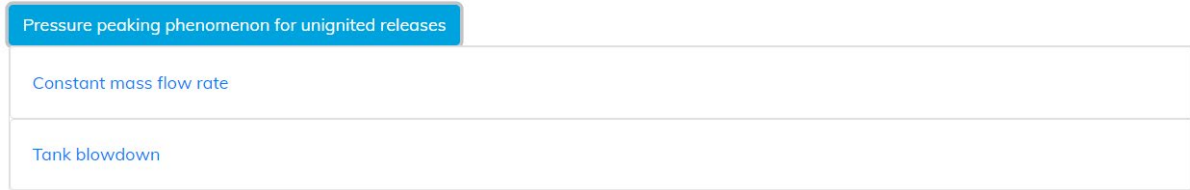


Abbildung 25. Auswahl eines geeigneten Modells für ein bestimmtes PPP-Problem

Problem 1: Druckspitzenphänomen bei konstantem Massendurchsatz.

Die Eingabeparameter sind in Tabelle 5 aufgeführt, und der Bildschirmausschnitt mit den Einstellungen des Tools ist in Abbildung 26 zu sehen.

Tabelle 5 Eingangsparameter für Problem 1 von PPP (nicht gezündeter Fall)

Name des Parameters	Symbol	Einheit	Grenzwerte (min-max)	Standardeinstellungen
Atmosphärischer Druck	p_{atm}	Pa	101325 – 90,000,000	101325
Temperatur des Gehäuses	T_{encl}	K		293.15
Volumen des Gehäuses	V_{encl}	m ³		30.42
Höhe der Entlüftung	H_{vent}	m		0.05
Breite der Entlüftung	W_{vent}	m		0.25
Massendurchsatz von Wasserstoff	\dot{m}_{H_2}	kg/s		0.39
Koeffizient des Abflusses	C_D	-		0.6
Zeitschritt für die Integration	Δt	s		1
Anzahl der Zeitschritte für Integrationen	n_{last}	-	500-100000	1000

Pressure peaking phenomenon for unignited releases

» Constant mass flow rate

Atmospheric pressure

 Pa

Enclosure temperature

 K

Enclosure volume

 m³

Vent height

 m

Vent width

 m

Hydrogen mass flow rate

 kg/s

Coefficient of discharge

Time step for integration

 s

Number of time steps for integration

Abbildung 26. Eingangsparameter von Problem 1 des PPP (nicht gezündeter Fall)

Nach Abschluss der Berechnung sollte das Diagramm für den Druck p_{g_encl} (Y-Achse) gegen die Zeit t (X-Achse) PPP aufgezeichnet werden. Die Druckachse sollte einen Achsentitel haben, der sich auf die zu Beginn gewählten Druckeinheiten bezieht, z. B. Druck (bar/Pa/kPa usw.). Ein Beispiel für den Ausgabeparameter ist in Abbildung 27 dargestellt.

Pressure peaking phenomenon for unignited releases

» Constant mass flow rate

Name	Symbol	Value	Unit
Atmospheric pressure	p_{atm}	1.01325e+5	Pa
Enclosure temperature	T_{encl}	293.15	K
Enclosure volume	V_{encl}	30.42	m ³
Vent height	H_{vent}	0.05	m
Vent width	W_{vent}	0.25	m
Hydrogen mass flow rate	\dot{m}_{H_2}	0.39	kg/s
Coefficient of discharge	C_D	0.6	
Time step for integration	Δt	1	s
Number of time steps for integration	n_{max}	1000	
Time	t	view	s
Mass of gases in enclosure	m_{encl}	view	kg
Vent mass flow rate	\dot{m}_{vent}	view	kg/s
Overpressure	p_{gencl}	view	Pa

[Plot](#)
[Export to CSV](#)
[Change inputs](#)

[Save](#)

Abbildung 27. Die Ausgabe des Tools für Problem 1 von PPP (nicht gezündeter Fall)

Die Darstellung des Drucks als Funktion der Zeit ist in Abbildung 28 zu sehen.

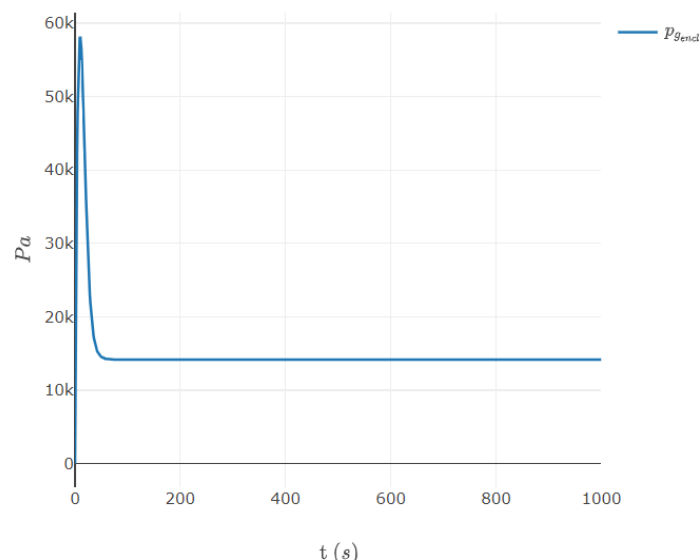


Abbildung 28. Druck-Zeit-Diagramm von Problem 1 des PPT (nicht gezündeter Fall)

Problem 2: Druckspitzenphänomen mit Tankabschlammung.

Die Eingabeparameter sind in Tabelle 6 aufgeführt, und der Bildschirmausschnitt mit den Einstellungen des Tools ist in Abbildung 29 dargestellt.

Tabelle 6 Eingangsparameter für Problem 2 von PPP (nicht gezündeter Fall)

Name des Parameters	Symbol	Einheit	Grenzwerte (min-max)	Standardeinstellungen
---------------------	--------	---------	----------------------	-----------------------

Lektion 11: Beengte Räume

Atmosphärischer Druck	p_{atm}	Pa	101325 – 90,000,000	101325
Temperatur des Gehäuses	T_{encl}	K		
Volumen des Gehäuses	V_{encl}	m ³		
Höhe der Entlüftung	H_{vent}	m		
Breite der Entlüftung	W_{vent}	m		
Koeffizient des Abflusses	C_D	-		0.6
Anfänglicher Wasserstoffdruck im Reservoir	p_{res}^0	Pa		
Anfangstemperatur des Wasserstoffs im Reservoir	T_{res}	K		
Volumen des Reservoirs	V_{res}	m ³		
Durchmesser der Blende	d_3	m		
Anfängliche Schätzung der Integrationszeit	t_{f0}	s		
Anzahl der Zeitschritte für Integrationen	i_{last}	-		

Pressure peaking phenomenon for unignited releases

» Tank blowdown

Atmospheric pressure

 Pa

Enclosure temperature

 K

Enclosure volume

 m³

Vent height

 m

Vent width

 m

Coefficient of discharge

 H₂ pressure in reservoir

 Pa

 H₂ temperature in reservoir

 K

Reservoir volume

 m³

Orifice diameter

 m

Initial guess for integration time

 s

Number of time steps for integration

Abbildung 29. Eingangsparameter von Problem 2 des PPP (nicht gezündeter Fall)

Sobald die Berechnung abgeschlossen ist, wird das Diagramm für den Druck pg_{encl} (Y-Achse) gegen die Zeit t (X-Achse) PPP aufgezeichnet. Die Druckachse sollte einen Achsentitel haben, der sich auf die zu Beginn gewählten Druckeinheiten bezieht, z. B. Druck (bar/Pa/kPa usw.). Ein Beispiel für den Ausgabeparameter ist in Abbildung 30 dargestellt.

Pressure peaking phenomenon for unignited releases

» Tank blowdown

Name	Symbol	Value	Unit
Atmospheric pressure	p_{atm}	1.01325e+5	Pa
Enclosure temperature	T_{encl}	293.15	K
Enclosure volume	V_{encl}	30.42	m ³
Vent height	H_{vent}	0.05	m
Vent width	W_{vent}	0.25	m
Coefficient of discharge	C_D	0.6	
H2 pressure in reservoir	p_{res}	8.45344e+5	Pa
H2 temperature in reservoir	T_{res}	114.878	K
Reservoir volume	V_{res}	0.196	m ³
Orifice diameter	d_3	0.0095	m
Initial guess for integration time	t_{f_0}	10	s
Number of time steps for integration	n_{max}	1000	
Time	t	view	s
H2 mass in reservoir	m_{H_2}	view	kg
Hydrogen mass flow rate	\dot{m}_{H_2}	view	kg/s
Density in notional nozzle	ρ_4	view	kg/m ³
Velocity in notional nozzle	V_4	view	m/s
Notional nozzle diameter	d_4	view	m
Mass of gases in enclosure	m_{encl}	view	kg
Vent mass flow rate	\dot{m}_{vent}	view	kg/s
Overpressure	p_{gend}	view	Pa

[Plot](#)
[Export to CSV](#)
[Change inputs](#)

[Save](#)

Abbildung 30. Die Ausgabe des Tools für Problem 2 von PPP (nicht gezündeter Fall)

Die Darstellung des Drucks als Funktion der Zeit ist in Abbildung 31 zu sehen.

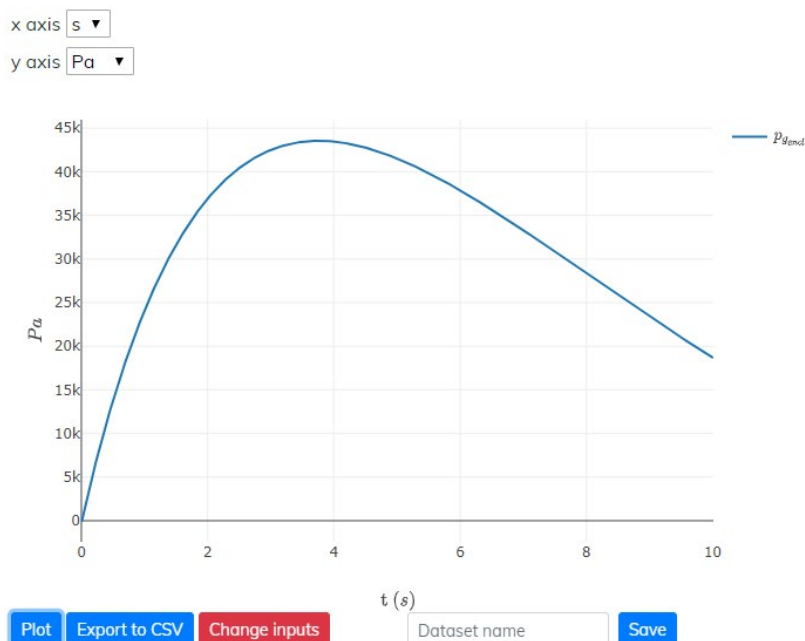


Abbildung 31. Druck-Zeit-Diagramm von Problem 2 des PPT (nicht gezündeter Fall)

11.3 Druckspitzenphänomen bei gezündeter Freisetzung

Ähnlich wie das Druckspitzenphänomen (PPP) für die nicht gezündete Freisetzung besteht auch das Tool zur Berechnung des PPP für die gezündete Freisetzung aus zwei Optionen, die sich auf zwei verschiedene Probleme beziehen, die denen des PPP für die nicht gezündete Freisetzung entsprechen.

Zunächst müssen die Benutzer das Tool mit dem Titel Pressure peaking phenomenon for ignited release (Druckspitzenphänomen bei gezündeter Freisetzung) aus den aufgelisteten Tools des e-Labors auswählen. Wählen Sie dann Druckspitzenphänomen gezündet (konstanter Massendurchsatz), um Problem 1 zu lösen, oder Druckspitzenphänomen gezündet (Tankabblasen), um Problem 2 zu lösen, wie in Abbildung 32 dargestellt.

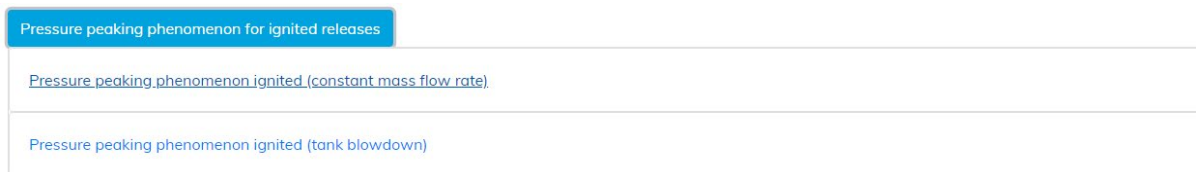


Abbildung 32. Auswahl des richtigen Werkzeugs für ein Partikelproblem.

Problem 1: Druckspitzenphänomen bei konstantem Massendurchsatz.

Die Eingabeparameter sind in Tabelle 7 aufgelistet und der Bildschirmausdruck der Werkzeugeinstellung ist in Abbildung 33 zu sehen. Der Unterschied bei den Eingabeparametern für den gezündeten Fall ist die Notwendigkeit eines zusätzlichen Parameters, C_I .

Tabelle 7 Eingabeparameter für Problem 1 von PPP (gezündeter Fall)

Name des Parameters	Symbol	Einheit	Grenzwerte (min-max)	Standardeinstellungen
Atmosphärischer Druck	p_{atm}	Pa	101325 – 90,000,000	101325
Temperatur des Gehäuses	T_{encl}	K		293.15
Volumen des Gehäuses	V_{encl}	m ³		30.42
Höhe der Entlüftung	H_{vent}	m		0.05
Breite der Entlüftung	W_{vent}	m		0.25
Massendurchsatz von Wasserstoff	\dot{m}_{H_2}	kg/s		0.39
Koeffizient des Abflusses	C_D	-		0.6
Zeitschritt für die Integration	Δt	s		1
Anzahl der Zeitschritte für Integrationen	n_{last}	-		1000
Koeffizient für die gezündete Freisetzung	C_I	-		1

Lektion 11: Beengte Räume

Hinweis: Der gelb markierte Eingabewert für C_I sollte nur für den gezündeten Fall erscheinen.

Pressure peaking phenomenon for ignited releases

» Pressure peaking phenomenon ignited (constant mass flow rate)

Atmospheric pressure

P_{atm} 101325 Pa

Enclosure temperature

T_{encl} 293.15 K

Enclosure volume

V_{encl} 30.42 m³

Vent height

H_{vent} 0.05 m

Vent width

W_{vent} 0.25 m

Hydrogen mass flow rate

\dot{m}_{H_2} 0.017 kg/s

Coefficient of discharge

C_D 0.6

Sought factor

α_c 22

Time step for integration

Δt 1 s

Number of time steps for integration

n_{max} 1000

Calculate Reset

Abbildung 33. Eingangsparameter von Problem 1 des PPP (gezündeter Fall)

Der Screenshot der Ausgabeparameter und ein Beispiel für die Darstellung des Drucks als Funktion der Zeit sind in Abbildung 34 bzw. Abbildung 35 zu sehen.

Pressure peaking phenomenon for ignited releases

» Pressure peaking phenomenon ignited (constant mass flow rate)

Name	Symbol	Value	Unit
Atmospheric pressure	p_{atm}	1.01325e+5	Pa
Enclosure temperature	T_{encl}	293.15	K
Enclosure volume	V_{encl}	30.42	m ³
Vent height	H_{vent}	0.05	m
Vent width	W_{vent}	0.25	m
Hydrogen mass flow rate	\dot{m}_{H_2}	0.017	kg/s
Coefficient of discharge	C_D	0.6	
Sought factor	α_e	22	
Time step for integration	Δt	1	s
Number of time steps for integration	n_{max}	1000	
Time	t	view	s
Mass of gases in enclosure	m_{encl}	view	kg
Vent mass flow rate	\dot{m}_{vent}	view	kg/s
Overpressure	$p_{g_{encl}}$	view	Pa

[Plot](#)
[Export to CSV](#)
[Change inputs](#)

[Save](#)

Abbildung 34. Die Ausgabe des Tools für Problem 1 von PPP (gezündeter Fall)

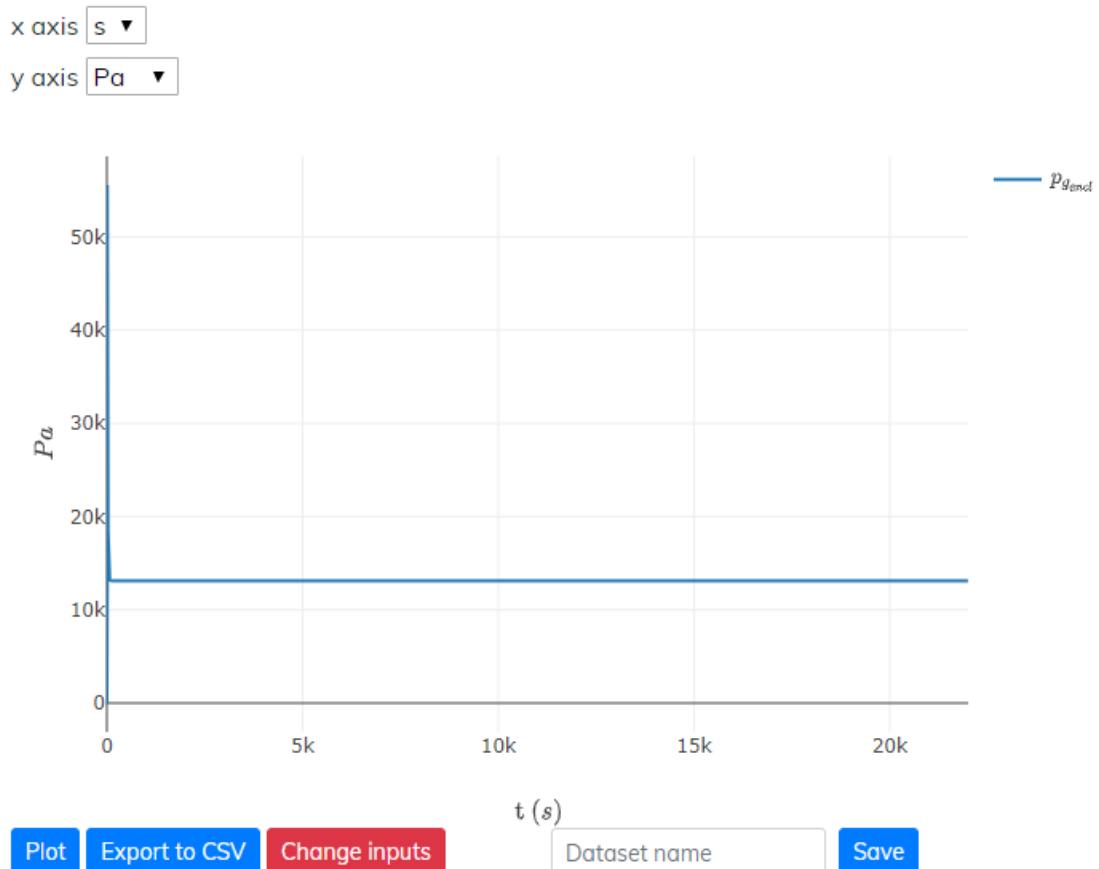


Abbildung 35. Druck-Zeit-Diagramm für Problem 1 von PPT (gezündeter Fall)

Problem 2: Druckspitzenphänomen mit Tankabschlämmung.

Die Eingabeparameter sind in Tabelle 8 aufgelistet und der Bildschirmausdruck der Werkzeugeinstellung ist in Abbildung 36 zu sehen.

Tabelle 8 Eingangsparameter für Problem 2 von PPP (gezündeter Fall)

Name des Parameters	Symbol	Einheit	Grenzwerte (min-max)	Standardeinstellungen
Atmosphärischer Druck	p_{atm}	Pa	101325 – 90,000,000	101325
Temperatur des Gehäuses	T_{encl}	K		
Volumen des Gehäuses	V_{encl}	m ³		
Höhe der Entlüftung	H_{vent}	m		
Breite der Entlüftung	W_{vent}	m		
Koeffizient des Abflusses	C_D	-		0.6
Anfänglicher Wasserstoffdruck im Reservoir	p_{res}^0	Pa		
Anfangstemperatur des Wasserstoffs im Reservoir	T_{res}	K		
Volumen des Reservoirs	V_{res}	m ³		
Durchmesser der Blende	d_3	m		
Anfängliche Schätzung der Integrationszeit	t_{j0}	s		
Anzahl der Zeitschritte für Integrationen	i_{last}	-		
Koeffizient für die gezündete Freisetzung	C_I	-		1

Pressure peaking phenomenon for ignited releases

» Pressure peaking phenomenon ignited (tank blowdown)

Atmospheric pressure

P_{atm} 101325 Pa

Enclosure temperature

T_{enc} 293.15 K

Enclosure volume

V_{enc} 30.42 m³

Vent height

H_{vent} 0.05 m

Vent width

W_{vent} 0.25 m

Coefficient of discharge

C_D 0.6

Sought factor

α_c 22

H2 pressure in reservoir

P_{res} 20500000 Pa

H2 temperature in reservoir

T_{res} 288 K

Reservoir volume

V_{res} 0.196 m³

Orifice diameter

d_s 0.0095 m

Initial guess for integration time

t_{j0} 10 s

Number of time steps for integration

n_{max} 1000

Calculate Reset

Abbildung 36. Eingangsparameter von Problem 2 des PPP (gezündeter Fall)

Der Screenshot der Ausgabeparameter und ein Beispiel für die Darstellung des Drucks als Funktion der Zeit sind in Abbildung 37 bzw. Abbildung 38 zu sehen.

Pressure peaking phenomenon for ignited releases

» Pressure peaking phenomenon ignited (tank blowdown)

Name	Symbol	Value	Unit
Atmospheric pressure	p_{atm}	1.01325e+5	Pa
Enclosure temperature	T_{encl}	293.15	K
Enclosure volume	V_{encl}	30.42	m ³
Vent height	H_{vent}	0.05	m
Vent width	W_{vent}	0.25	m
Coefficient of discharge	C_D	0.6	
Sought factor	α_c	22	
H2 pressure in reservoir	p_{res}	8.45344e+5	Pa
H2 temperature in reservoir	T_{res}	114.878	K
Reservoir volume	V_{res}	0.196	m ³
Orifice diameter	d_3	0.0095	m
Initial guess for integration time	t_{f_0}	10	s
Number of time steps for integration	n_{maz}	1000	
Time	t	view	s
H2 mass in reservoir	m_{H_2}	view	kg
Hydrogen mass flow rate	\dot{m}_{H_2}	view	kg/s
Density in notional nozzle	ρ_4	view	kg/m ³
Velocity in notional nozzle	V_4	view	m/s
Notional nozzle diameter	d_4	view	m
Mass of gases in enclosure	m_{encl}	view	kg
Vent mass flow rate	\dot{m}_{vent}	view	kg/s
Overpressure	p_{gencl}	view	Pa

[Plot](#)
[Export to CSV](#)
[Change inputs](#)

[Save](#)

Abbildung 37. Die Ausgabe des Tools für Problem 2 von PPP (gezündeter Fall)

Lektion 11: Beengte Räume

x axis

y axis

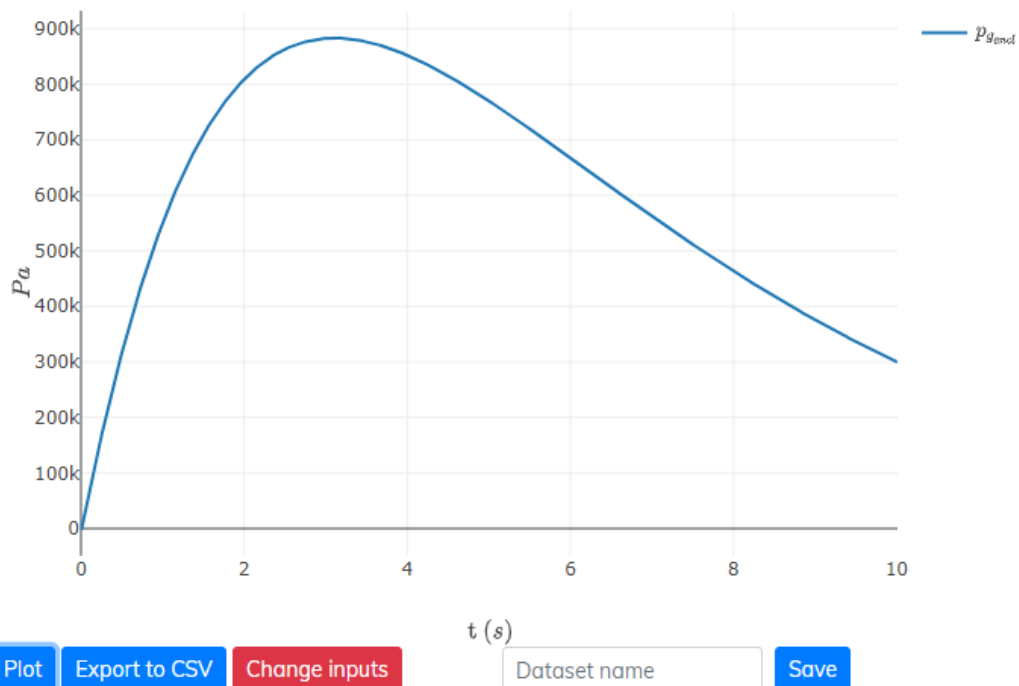


Abbildung 38. Druck-Zeit-Diagramm von Problem 2 des PPT (gezündeter Fall)

Danksagung

Das HyResponse-Projekt wird anerkannt, da die hier vorgestellten Materialien auf der Grundlage der ursprünglichen HyResponse-Vorlesungen erweitert wurden.

Referenzen

1. HyIndoor project. Available from <https://hydrogeneurope.eu/project/hyindoor>. [accessed 07.12.20]
2. HyResponder Deliverable D1.1 – Report on hydrogen safety aspects of technologies, systems and infrastructures (2020). Deliverable will be publically available from: <https://hyresponder.eu/deliverables/> when approved
3. Saffers, J-B and Molkov, V (2014). Hydrogen safety engineering framework. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 39, pp. 6268-6285.
4. HyIndoor Deliverable D5.1 – Widely accepted guidelines on FC indoor installation and use (2015). Available from: http://www.hyindoor.eu/wp-content/uploads/2014/06/HyIndoor-Guidelines_D5.1_Final-version3a.pdf [accessed 07.12.20].
5. Karlsson, B and Quintiere, J (2000). Enclosure fire dynamics. CRC Press.
6. Molkov, V (2012). Fundamentals of hydrogen safety engineering, Part I and Part II. Available from: www.bookboon.com, free download e-book.
7. Brennan, S and Molkov, V (2013). Safety assessment of unignited hydrogen discharge from onboard storage in garages with low levels of natural ventilation. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 38, pp. 8159-8166.
8. ISO/TR 15916 (2004). Basic considerations for the safety of hydrogen systems. International Organization for Standardization. ISO Technical Committee 197 Hydrogen Technologies. International Organization for Standardization, Geneva.
9. Baker, WE, Cox, PA, Westine, PS, Kulesz, JJ and Strehlow, RA (1983). Explosion hazards and evaluation. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Co, The Netherlands.
10. Molkov, V, Shentsov, V and Quintiere, J (2014). Passive ventilation of a sustained gaseous release in an enclosure with one vent. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 39 (15), pp. 8158– 8168
11. Molkov, V, Shentsov, V, Brennan, S, and Makarov, D , Hydrogen non-premixed combustion in enclosure with one vent and sustained release: Numerical experiments International Journal of Hydrogen Energy Volume 39, Issue 20, 3 July 2014, Pages 10788-10801
12. Molkov, V, Shentsov, V, Brennan, S, and Makarov, D (2013). Dynamics of Hydrogen Flame Self-Extinction in a Vented Enclosure. Proceedings of the 7th International Seminar on Fire and Explosion Hazards”, 5-10 May 2013, Providence, RI, USA.

Lektion 11: Beengte Räume

13. Molkov, V, Shentsov, V, Brennan, S, and Makarov, D (2013). Hydrogen non-premixed combustion in enclosure with one vent and sustained release: numerical experiments. Proceedings of ICHS 2013, 9-11 September 2013, Brussels, Belgium.
14. HyTunnel Deliverable D3.1 – Detailed research programme for hydrogen fires in confined structures (2019). Available from: https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/12/HyTunnel-CS_D3.1_Detailed-research-programme-on-hydrogen-fires-in-confined-structures.pdf [accessed 07.12.20].
15. Molkov, V, Bragin, M, Brennan, S, Makarov, D, and Saffers, J-B (2010). Hydrogen Safety Engineering: Overview of Recent Progress and Unresolved Issues. International Symposium of Combustion and Fire Dynamics, October 2010, Santander, Spain.
16. Trevino, C and Mauss, F (1992). Chapter 10 “Structure and Extinction of Non-Diluted Hydrogen-Air Diffusion Flames”, In: Peters, N., Rogg, B., Reduced Kinetic Mechanisms for Applications in Combustion Systems. Lecture Notes in Physics, Volume m15. Springer-Verlag, 1992.
17. EU No 406/2010, Commission Regulation of 26 April 2010 implementing Regulation (EC) No 79/2009 of the European Parliament and of the Council on type-approval of hydrogen-powered motor vehicles. Official Journal of the European Union. Vol. 53, 18 May 2010. Available from: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:122:FULL:EN:PDF> [accessed on 07.12.20].
18. Brennan, S, Makarov, D and Molkov, V (2010). Dynamics of flammable hydrogen-air mixture formation in an enclosure with a single vent. Proceedings of the 6th International Seminar on Fire and Explosion Hazards, Leeds, April 2010.
19. SAE J2579 (2009). Technical information report for fuel systems in fuel cell and other hydrogen vehicles, SAE International, Detroit, Michigan, USA, January, 2009.
20. Emmons, DD (1995). Vent flows, SFPE Handbook, ed. P. J. Di Nenno, (2nd Edition). Society of Fire Protection Engineers, Boston, MA, USA.
21. Brennan, S and Molkov, V (2013). Safety assessment of unignited hydrogen discharge from onboard storage in garages with low levels of natural ventilation. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 38, pp. 8159-8166.
22. Kuznetsov, M., Grune, J., Friedrich, A., Sempert, K., Breitung, W., Jordan, T. (2011) Hydrogen-air deflagrations and detonations in a semi-confined flat layer. In: Fire and Explosion Hazards, Proceedings of the Sixth International Seminar (Edited by D. Bradley, G. Makhviladze and V. Molkov), 125-136.
23. Alekseev, V.I., Kuznetsov, M.S., Yankin, Yu., G., Dorofeev, S.B. (2001) Experimental study of flame acceleration and DDT under conditions of transverse venting. J. Loss Prev. Proc. Ind., 14/6: 591-596.

Lektion 11: Beengte Räume

24. Dorofeev, S.B., Kuznetsov, M.S., Alekseev, V.I., Efimenko, A.A., Breitung, W. (2001) Evaluation of limits for effective flame acceleration in hydrogen mixtures. *J. Loss Prev. Proc. Ind.*, 14 (6): 583-589.
25. Friedrich, A., Grune, J., Jordan, T., Kotchourko, A., Kotchourko, N., Kuznetsov, M., Sempert, K., Stern, G. (2007) Experimental study of hydrogen-air deflagrations in flat layer. In: *Proc. 2nd ICHS International Conference on Hydrogen Safety*. September 11 - 13, 2007 San Sebastian – SPAIN, paper 1.3.106, 1-12.
26. United States, Department of Energy.
http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/current_technology.html.
27. Brennan S, Makarov D and Molkov V. “Dynamics of flammable hydrogen-air mixture formation in an enclosure with a single vent”. In: *Proceedings of the 6th International seminar on fire and explosion hazards*. England: Research Publishing; July 2011. ISBN 978-981-08-7724-8.
28. S. Brennan, V. Molkov. Safety assessment of unignited hydrogen discharge from onboard storage in garages with low levels of natural ventilation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38: 8159-8166.
29. H. Hussein, S. Brennan, V. Molkov. Dispersion of hydrogen release in a naturally ventilated covered car park. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45: 23882-23897.