

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Freisetzung und Ausbreitung von Wasserstoff in Tiefgaragen oder Tunnel

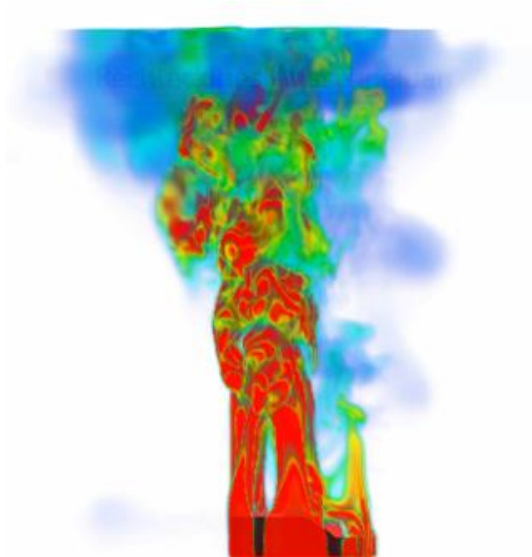
von

D. Schelb

I. Dinkov

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Forschungsstelle für Brandschutztechnik



223

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

Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder,

Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Forschungsbericht Nr. 223

**Freisetzung und Ausbreitung von Wasserstoff
in Tiefgarage oder Tunnel**

von

Dr. rer.-nat. Dietmar Schelb

Dr.-Ing. Ilian Dinkov

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Forschungsstelle für Brandschutztechnik

Karlsruhe

2025

Berichtskennblatt

| | | | |
|--|---|--|------------------------------|
| Nummer des Berichtes: 223 | Titel des Berichtes: Freisetzung und Ausbreitung von Wasserstoff in Tiefgarage oder Tunnel | ISSN: 0170-0060 | |
| Autoren Dr. rer.-nat. Dietmar Schelb Dr.-Ing. Ilian Dinkov | | durchführende Institution: Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik Hertzstrasse 16, D-76187 Karlsruhe | |
| Nummer des Auftrages: FA 259 (1, 2024) | | auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung | |
| Abschlussdatum: | | | |
| Seitenzahl: 59 | Bilder: 49 | Tabellen: 1 | Literaturverweise: 12 |
| Kurzfassung: <p>Wenn Wasserstoff freigesetzt wird, dann können sich explosionsfähige Mischungen bilden.</p> <p>Es wird untersucht, ob und wie lange eine Gefahrenlage für Einsatzkräfte vorliegt, wenn diese am Ort einer Wasserstoffleckage eintreffen. Hierzu wird mit Hilfe von dreidimensionaler numerischer Strömungssimulation die zeitliche und räumliche Ausbreitung des Wasserstoffs, insbesondere in Tunnel und Tiefgaragen, berechnet.</p> <p>Die Animationen der in diesem Bericht dargestellten Simulationsberechnungen sind frei verfügbar und ermöglichen eine zeitliche und räumliche Vorstellung von der Ausbreitung des Wasserstoffs. Der Link zu den Videos ist auf der Homepage der Forschungsstelle für Brandschutztechnik (FFB) https://www.ffb.kit.edu/ verfügbar.</p> | | | |
| Schlagwörter: Wasserstoff, zündfähiges Gemisch, Tunnel, Tiefgarage, Längslüftung, Belüftung | | | |

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|---|-----------|
| ABBILDUNGSVERZEICHNIS | I |
| 1. EINLEITUNG | 4 |
| 1.1. Simulation vs. Realversuch | 5 |
| 2. WASSERSTOFF-LUFT-GEMISCHE | 6 |
| 3. SZENARIO DER WASSERSTOFFFREISETZUNG | 9 |
| 3.1. Freigesetzte Menge und Massenstrom | 9 |
| 3.2. Ausströmen durch eine 4 mm-Düse nach oben | 10 |
| 3.3. Seitliches Ausströmen durch eine 4 mm-Düse | 14 |
| 3.4. Seitliches Ausströmen durch eine 20mm-Düse | 15 |
| 3.5. Diffuses Ausströmen | 18 |
| 3.6. Annahmen und Vereinfachungen | 19 |
| 4. CFD-SIMULATIONEN: RANDBEDINGUNGEN UND DARSTELLUNG | 21 |
| 4.1.1. Geometrie | 22 |
| 4.1.2. Darstellung der Ergebnisse | 23 |
| 5. CFD-SIMULATIONEN | 24 |
| 5.1. H ₂ -Freisetzung im Freien | 24 |
| 5.2. H ₂ -Freisetzung im Raum | 26 |
| 5.2.1. Freisetzung im geschlossenen Raum | 26 |
| 5.2.2. Freisetzung im Raum mit Öffnung oben | 29 |
| 5.3. Freisetzung in Tiefgarage | 33 |
| 5.3.1. Freisetzung in Tiefgarage mit einer glatten Decke | 33 |
| 5.3.2. Freisetzung in Tiefgarage mit Unterzügen an der Decke | 36 |
| 5.3.3. Einsatz von Kleinlüftern | 38 |
| 5.3.4. Freisetzung unterhalb der Lüftungskanäle | 41 |
| 5.4. H ₂ -Ausbreitung im Tunnel mit hufeisenförmigen Querschnitt | 43 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 5.4.1. | Tunnel ohne Steigung | 43 |
| 5.4.2. | Tunnel mit 5 % Steigung | 45 |
| 5.4.3. | Tunnel mit 10 % Steigung | 47 |
| 5.5. | Freisetzung im Tunnel mit rechteckigem Querschnitt | 49 |
| 5.5.1. | Tunnel ohne Steigung und ohne Längsströmung | 49 |
| 5.5.2. | Tunnel offener Bauweise mit Längsströmung / Axiallüfter in Betrieb | 52 |
| 6. | ZUSAMMENFASSUNG | 56 |
| 7. | LITERATURVERZEICHNIS | 58 |

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Dichte (in blau) und äquivalente Lufttemperatur (rot) bei 20 °C und 1013 hPa. Beispiel: Die Dichte einer 30 % H ₂ und 70 % Luft-Mischung bei 20 °C beträgt ca. 0,87 kg/m ³ , entsprechend einer Lufttemperatur von 130°C | 7 |
| Abbildung 2: Dauer der Entleerung eines Drucktanks bei verschiedenen Öffnungsdurchmessern [3]. | 9 |
| Abbildung 3: Geometrie des Behälters (Viertelmodell). Der Behälter ist 6 m lang und hat einen Durchmesser von 3m Die beiden runden Öffnungen haben einen Durchmesser von 2 m. Der Pfeil zeigt auf die Position der Düse. | 10 |
| Abbildung 4: Behälter mit Düse (Viertelmodell) im CFD Modell. Doppelte Symmetrie, zwei Öffnungen, Gitter lokal verfeinert | 10 |
| Abbildung 5: Mittenschnitt der Geschwindigkeit von H ₂ beim Ausströmen, links bei 100 gr/s, rechts bei 5 gr/s. | 11 |
| Abbildung 6: Wie in Abb. 5 rechts der Mittenschnitt der Geschwindigkeit von H ₂ beim Ausströmen in Luft mit verschiedenen Skalierungen (0-100 m/s und 0-10 m/s). | 12 |
| Abbildung 7: Mittenschnitt des Molenbruchs von H ₂ in Luft. In einer Entfernung von 5m zur Düse beträgt bei einem hohen Massenstrom von 100 gr/s die max. Konzentration noch 20 %, bei einem geringen Massenstrom gerade noch 5 %. | 12 |
| Abbildung 8: Der Geschwindigkeit (links) und Machzahlen (mittig) des Freistrahls kurz hinter der Düse. Zu erkennen sind die für eine unterexpandierte Überschallströmung typischen Machschen Knoten. In der Abbildung rechts im Abgasstrahl eines Überschallflugzeugs [5] | 13 |
| Abbildung 9: Mittenschnitt der Geschwindigkeitsverteilung, links bei 100 gr/s, rechts bei 5 gr/s | 14 |
| Abbildung 10: Mittenschnitt des Molenbruchs, links bei 100 gr/s, rechts bei 5 gr/s | 14 |
| Abbildung 11: Mittenschnitt der Geschwindigkeitsverteilung, in der Abbildung links bei 100 gr/s, rechts bei 5 gr/s | 15 |
| Abbildung 12: Mittenschnitt des Molenbruchs, in der Abbildung links bei 100 gr/s, rechts bei 5 gr/s. | 15 |
| Abbildung 13: Isoflächen der 4 % Konzentration bei einem auf den Boden gerichteten Freistrah. Innerhalb der Umrandungen ist die H ₂ -Konzentration gleich oder höher als 4 %. Freisetzung bei Windstille [2]: | 17 |
| Abbildung 14: Zeitliche Verlauf der Wasserstofffreisetzung. | 21 |

- Abbildung 15: CAD-Modell des PKW mit der rechteckigen Auslassöffnung hinter der Hinterachse (Fläche in orange). 22
- Abbildung 16: Gleiche Längsschnitte der Konzentration bei $t=60$ s. Links sind die Konzentrationen zw. 0 und 5 %, rechts mit veränderter Skala zw. 0 und 25 % abgebildet. 24
- Abbildung 17: Längsschnitt der Konzentration bei $t=75$ s, d.h. 15 s nach Ende des H_2 -Ausströmens. 25
- Abbildung 18: Geometrie des Raums ($L=22,5$ m, $B=12$ m, $H=12$ m) mit der Ebene des Längsschnitts. Links unten befindet sich eine Öffnung, die einen Druckausgleich im Raum ermöglicht. Sie hat keinen Einfluss auf die H_2 -Verteilung im Raum. 26
- Abbildung 19: Gleiche Längsschnitte der Konzentration bei $t=60$ s. Oben sind die Konzentrationen von 0 bis 5 %, rechts von 0 bis 25 % abgebildet. 27
- Abbildung 20: Längsschnitt der Konzentration bei $t=120$ s, d. h. 60 s nach Ende des H_2 -Ausströmens. 28
- Abbildung 21: Geometrie des Raums mit kleiner Öffnung. $L=22,5$ m, $B=12$ m, $H=12$ m. Links oben eine kleine Öffnung $h=100$ mm, $b=500$ mm. Links unten eine Öffnung in Größe einer Tür, die wie bei Abb. 18 nur zum Druckausgleich vorhanden ist. 29
- Abbildung 22: Gleiche Längsschnitte der Konzentration bei $t=60$ s. Oben sind die Konzentrationen von 0 bis 5 %, unten von 0 bis 25 % abgebildet. 30
- Abbildung 23: Längsschnitt der Konzentration bei $t=120$ s, d.h. 60 s nach Ende des H_2 -Ausströmens. 31
- Abbildung 24: Längsschnitt der Konzentration bei $t=300$ s. 31
- Abbildung 25: Geometriemodell der Tiefgarage (hier mit Unterzügen) mit Fahrzeug. Die blau eingefärbten Flächen der beiden Quader links und rechts bilden geometrisch vereinfacht die Auslassöffnungen. 33
- Abbildung 26: H_2 -Konzentration in mehreren Längsschnitten unmittelbar nach Ende des Ausströmens von H_2 . 34
- Abbildung 27: H_2 -Konzentration in mehreren Längsschnitten knapp 2 Minuten (119 s) nach Ende des Ausströmens von H_2 . 34
- Abbildung 28: H_2 -Konzentration in mehreren Längsschnitten unmittelbar nach Ende des Ausströmens von H_2 . 36
- Abbildung 29: H_2 -Konzentration in mehreren Längsschnitten knapp 2 Minuten (119s) nach Ende des Ausströmens von H_2 . 37
- Abbildung 30: Geschwindigkeitsverteilung im Längsschnitt mit horizontal ausgerichtetem Lüfter, rechts mit 20° angestelltem Lüfter. 38

| | |
|---|----|
| Abbildung 31: H ₂ -Konzentration in mehreren Längsschnitten knapp 2 Minuten (119 s) nach Ende des Ausströmens von H ₂ . Der horizontal ausgerichtete Lüfter startete zu t=60 s und lief 119 s. | 39 |
| Abbildung 32: H ₂ -Konzentration in mehreren Längsschnitten 2 Minuten (119 s) nach Ende des Ausströmens von H ₂ . Der 20° nach oben angestellte Lüfter startete zu t=60 s und lief 119 s. | 39 |
| Abbildung 33: Garagenmodell mit Lokalisation der Randbedingungen; Breite in x-Richtung: 16 m, Länge in y-Richtung: 15 m, Höhe: 2 m.. | 41 |
| Abbildung 34: Längsschnitt der Methanausbreitung nach 5 Minuten bei $m = 50$ g/s und diffuser Ausströmung. Die zündfähigen Konzentrationen (UEG 4,4%, OEG 17%) sind gelb, hellorange und orange eingefärbt. Blau und hellblau liegen unterhalb der UEG und rot oberhalb der OEG | 41 |
| Abbildung 35: H ₂ -Konzentrationen nach 60 s (unmittelbar nach Ende des Ausströmens von H ₂) im Tunnel ohne Steigung. | 43 |
| Abbildung 36: H ₂ -Konzentrationen nach 5 min im Tunnel ohne Steigung. | 44 |
| Abbildung 37: H ₂ -Konzentrationen nach 60 s im Tunnel mit 5% Steigung | 45 |
| Abbildung 38: H ₂ -Konzentrationen nach knapp 5 min im Tunnel mit 5 % Steigung. | 46 |
| Abbildung 39: H ₂ -Konzentrationen nach 60s im Tunnel mit 10% Steigung. | 47 |
| Abbildung 40: H ₂ -Konzentrationen nach 5 min im Tunnel mit 10 % Steigung. | 48 |
| Abbildung 41: H ₂ -Konzentrationen nach 30 s. | 49 |
| Abbildung 42: H ₂ -Konzentrationen nach 60 s. | 50 |
| Abbildung 43: H ₂ -Konzentrationen nach 90 s | 50 |
| Abbildung 44: H ₂ -Konzentrationen nach 119 s | 51 |
| Abbildung 45: H ₂ -Konzentrationen nach 15 s | 52 |
| Abbildung 46: H ₂ -Konzentrationen nach 30 s | 53 |
| Abbildung 47: H ₂ -Konzentrationen nach 60 s | 53 |
| Abbildung 48: H ₂ -Konzentrationen nach 90 s | 54 |
| Abbildung 49: H ₂ -Konzentrationen nach 120 s | 54 |

1. Einleitung

Wird Wasserstoff, z.B. bei einem technischen Defekt, freigesetzt können sich zündfähige Gemische bilden. In diesem Forschungsbericht werden die zeitlichen und räumlichen Ausdehnungen potentieller zündfähiger Mischungen bei unterschiedlichen Szenarien analysiert.

Hierzu wird mittels numerischer Strömungssimulation (CFD) die räumliche und zeitliche Ausbreitung von Wasserstoff bei einer Freisetzung in verschiedenen teilverbauten Umgebungen untersucht, wie z.B. in einem Tunnel mit unterschiedlichen Steigungen, einem Tunnel mit Längslüftung und in einer Tiefgarage. Angenommen wird das Szenario Freisetzung von 6 kg Wasserstoff innerhalb einer Minute und die Berechnung der Ausbreitung bzw. der Mischungsverhältnisse in den folgenden Minuten.

In dieser Arbeit mussten bei der Simulation Vereinfachungen und Annahmen getroffen werden, die allerdings die Zuverlässigkeit der Ergebnisse nicht mindern. Da der Feuerwehr, die am Ereignisort eintrifft, eine Hilfe zur Einschätzung der Gefahrensituation gegeben werden soll, muss stets das „Worst-Case-Szenario“ angenommen werden, welches durch die Vereinfachungen auch simuliert wird.

In diesem Bericht wird die zeitliche und räumliche Ausbreitung von Wasserstoff bei einer Freisetzung untersucht. Es werden hier keine Untersuchungen über das Nahfeld beim Ausströmen durchgeführt, sondern in erster Linie über die maximalen Entfernungen, in denen potentiell zündfähige Mischungen noch auftreten können. Sämtliche Annahmen und Vereinfachungen führen zu einer möglichen Überschätzung der Ausbreitung der zündfähigen Mischungen, sodass stets das Worst-Case-Szenario abgebildet wird.

1.1. Simulation vs. Realversuch

Versuche mit Wasserstoff könnten prinzipiell durchgeführt werden, aber im Realmaßstab bergen sie ein hohes Gefahrenpotential. Ist es noch möglich, in einem Verkehrstunnel, z. B. während einer Instandhaltungsphase, Rauchausbreitungsversuche mit künstlichem Nebel mit überschaubarem Aufwand durchzuführen, verbieten sich Realversuche mit großen Mengen Wasserstoff schon wegen der potentiellen Schäden bei diesem Experiment, falls es zur Zündung kommen sollte. Modellversuche in einem verkleinerten Maßstab, der aufgrund der geringeren Wasserstoffmenge keine Gefährdung des technischen Personals oder der Infrastruktur darstellt, müssten bei so niedrigen Temperaturen stattfinden, dass zur Kühlung flüssiger Stickstoff benötigt würde, weil die Strömung nur bei gleichen Reynolds-Zahlen vergleichbar ist [1]. Der Aufwand wäre für die Versuche ungleich höher als bei einer numerischen Simulation mit einem CFD (computational fluid dynamics) Modell, zumal sich die Frage stellt, wie denn ein modellhaft verkleinertes Leck aussähe. Die Berechnungen wurden mit dem kommerziellen Programm Ansys CFX durchgeführt.

2. Wasserstoff-Luft-Gemische

Wasserstoff ist mit einer Dichte von $0,084 \text{ kg/m}^3$ das leichteste Gas, Luft ist gut 14mal schwerer $1,22 \text{ kg/m}^3$ (jeweils bei 15°C und 1013 mbar , [2]). Aufgrund der geringen Dichte strömt Wasserstoff auftriebsbedingt rasch nach oben, wobei er sich dabei mit der umgebenden Luft vermischt.

Die Zündgrenzen in Luft liegen in einem sehr weiten Bereich zwischen 4 % und 77 %, besonders kritisch sind Konzentrationen ab etwa 10 %, da eine Entzündung eine Detonation mit entsprechender Auswirkung verursachen kann [2].

Die UEG ist die Mindestkonzentration an Brennstoff in der Luft bei der die Verbrennung noch selbständig stattfinden kann. Die UEG entspricht also der maximalen Verdünnung des Brennstoffes.

Wasserstoffs strömt bei einer Freisetzung aufgrund der geringen Dichte auftriebsbedingt nach oben. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass sich der Wasserstoff dabei mit der umgebenden Luft vermischt. Für die auftriebsbedingte Strömung ist daher die lokale Dichte der jeweiligen Wasserstoff-Luft-Mischung entscheidend.

Im folgenden Diagramm (Abb. 1) sind die Dichte und äquivalente Lufttemperatur von H_2 -Luft-Mischungen abgebildet. Für die Berechnung der Ausbreitung von Wasserstoff muss jeweils lokal die H_2 -Luft-Mischung betrachtet werden, denn diese erfährt die Auftriebskraft und vermischt sich beim Strömen mit der umgebenden Luft bzw. H_2 -Luft-Mischung.

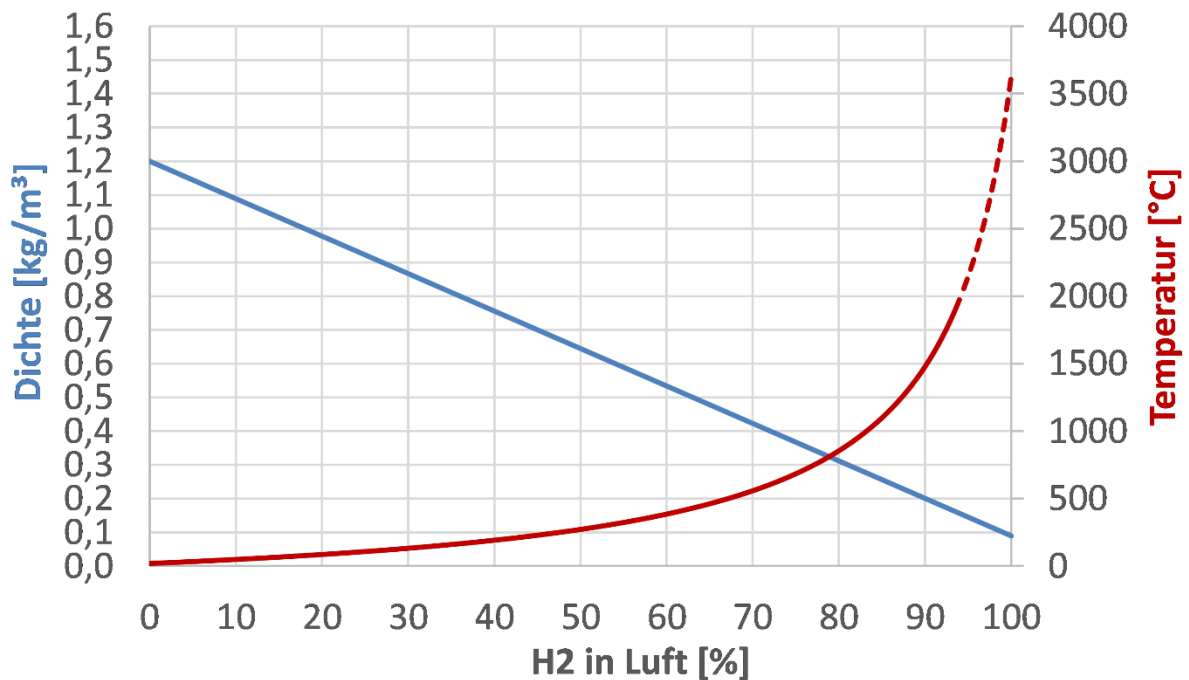


Abbildung 1: Dichte (in blau) und äquivalente Lufttemperatur (rot) bei 20 °C und 1013 hPa. Beispiel: Die Dichte einer 30 % H₂ und 70 % Luft-Mischung bei 20 °C beträgt ca. 0,87 kg/m³, entsprechend einer Lufttemperatur von 130°C

| | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-----------|
| Konzentration H ₂ in Luft | 0,4 % | 1 % | 4 % | 10 % | 17 % | 50 % | 77 % | 100 % |
| Äquivalente Lufttemperatur | 21 °C | 23 °C | 31 °C | 50 °C | 71 °C | 275 °C | 710 °C | (3900 °C) |

Tab. 1: Äquivalente Lufttemperaturen für H₂-Luft-Mischungen bei 20 °C und 1013 hPa. Kritische, d.h. zündfähige oder potentiell zündfähige Mischungen, sind rot unterlegt. Die äquivalente Temperatur bei 100 % H₂ ist lediglich zur Veranschaulichung aufgelistet, da das ideale Gasgesetz bei derart hohen Temperaturen nicht mehr gültig ist.

Hieraus ist ersichtlich, dass zündfähige Mischungen aufgrund der Auftriebskräfte schnell nach oben abströmen. Im Freien wird daher eine zündfähige Mischung in Bo-

dennähe nur dann auftreten, während H_2 freigesetzt wird und die Richtung des Ausströmens seitlich bzw. zum Boden hin gerichtet ist. Sobald die H_2 -Freisetzung endet, sind nach wenigen Sekunden die zündfähigen Gemische nach oben weggeströmt.

3. Szenario der Wasserstofffreisetzung

Damit die Unterschiede bei der Freisetzung im Freien gegenüber der in teilverbauten Räumen klar aufgezeigt und verglichen werden können, liegt allen nachfolgenden Berechnungen dasselbe Szenario vor. Zugrunde gelegt wird die kontinuierliche Freisetzung von 6 kg H₂ innerhalb einer Minute, wobei der Wasserstoff nicht als Freistrahle ausbläst, sondern diffus über eine Fläche von 0,27 m².

3.1. Freigesetzte Menge und Massenstrom

Druckbehälter in Fahrzeugen verfügen über ein TPRD (thermally-activated pressure relief device, thermische Druckentlastungsvorrichtung), welches den im Druckbehälter gespeicherten Wasserstoff in einer zeitlichen Größenordnung von einer Minute ausströmen lässt [3], [4]. Die Öffnung hat dabei einen Durchmesser von einigen mm.

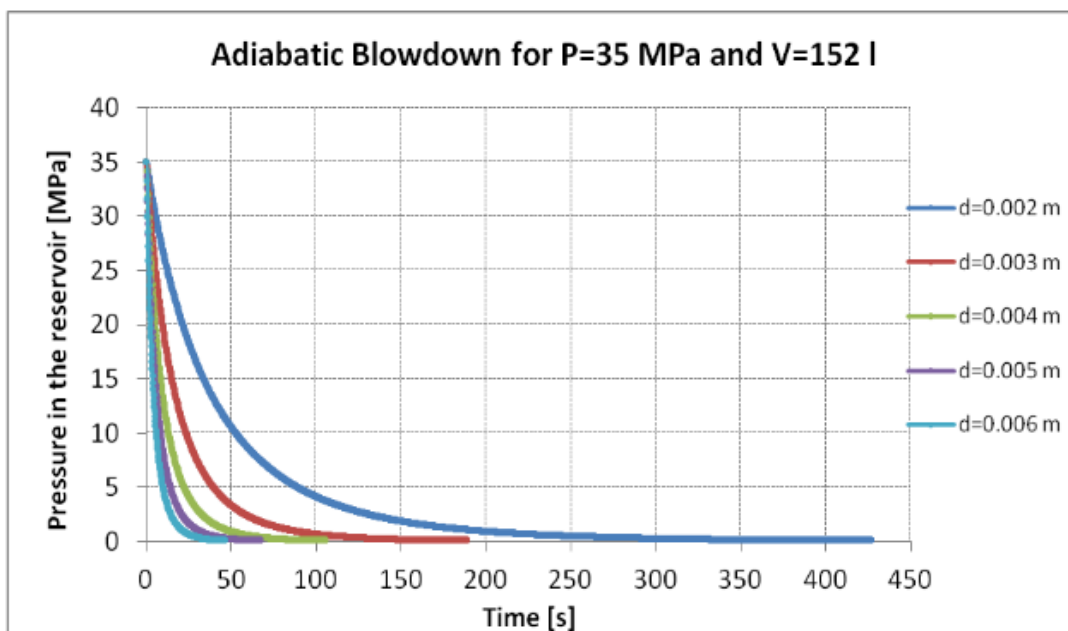


Abbildung 2: Dauer der Entleerung eines Drucktanks bei verschiedenen Öffnungsdurchmessern [3].

3.2. Ausströmen durch eine 4 mm-Düse nach oben

Begleitend zu Messungen in einem Testbehälter am KIT wurden an der FFB Berechnungen des Ausströmens durchgeführt.

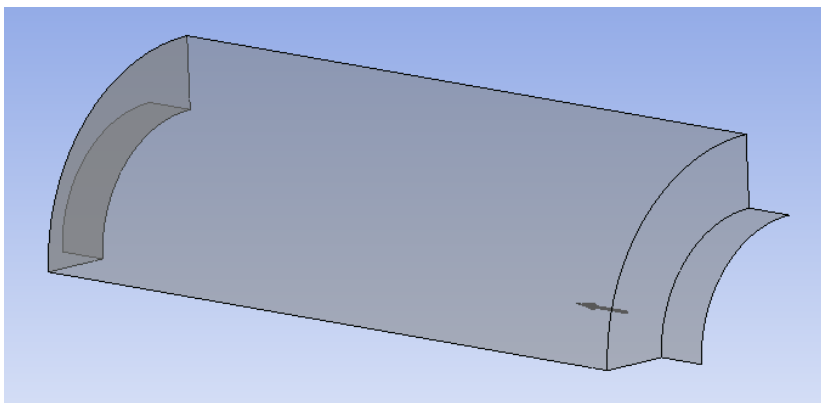


Abbildung 3: Geometrie des Behälters (Viertelmodell). Der Behälter ist 6 m lang und hat einen Durchmesser von 3m. Die beiden runden Öffnungen haben einen Durchmesser von 2 m. Der Pfeil zeigt auf die Position der Düse.

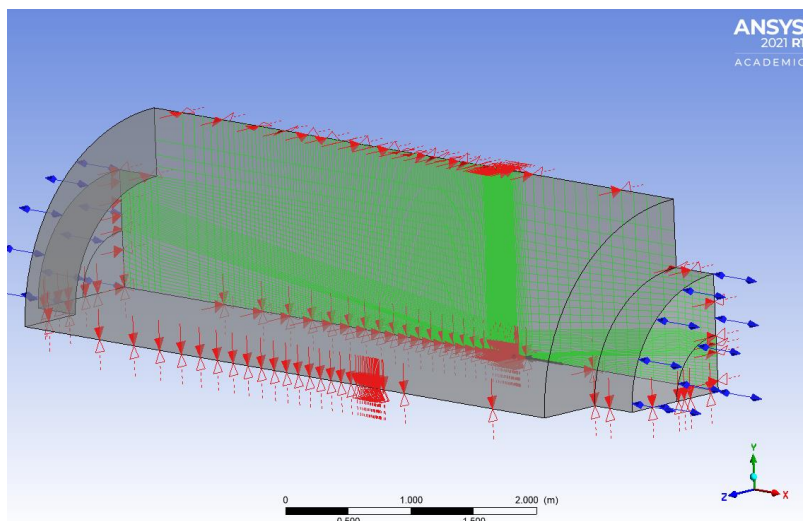


Abbildung 4: Behälter mit Düse (Viertelmodell) im CFD Modell. Doppelte Symmetrie, zwei Öffnungen, Gitter lokal verfeinert

Mit abnehmenden Behälterdruck sinkt auch der zeitliche freigesetzte Massenstrom. In der Simulation wurde mit einem jeweils konstanten H_2 - Massenstrom von 100 gr/s entsprechend einem Volumen von rund 1100 Liter und von 5 gr/s (55 Liter) gerechnet. Ersterer entspricht zu Beginn der Freisetzung bei vollem Druckbehälter, letzterer bei fast entleertem Tank.

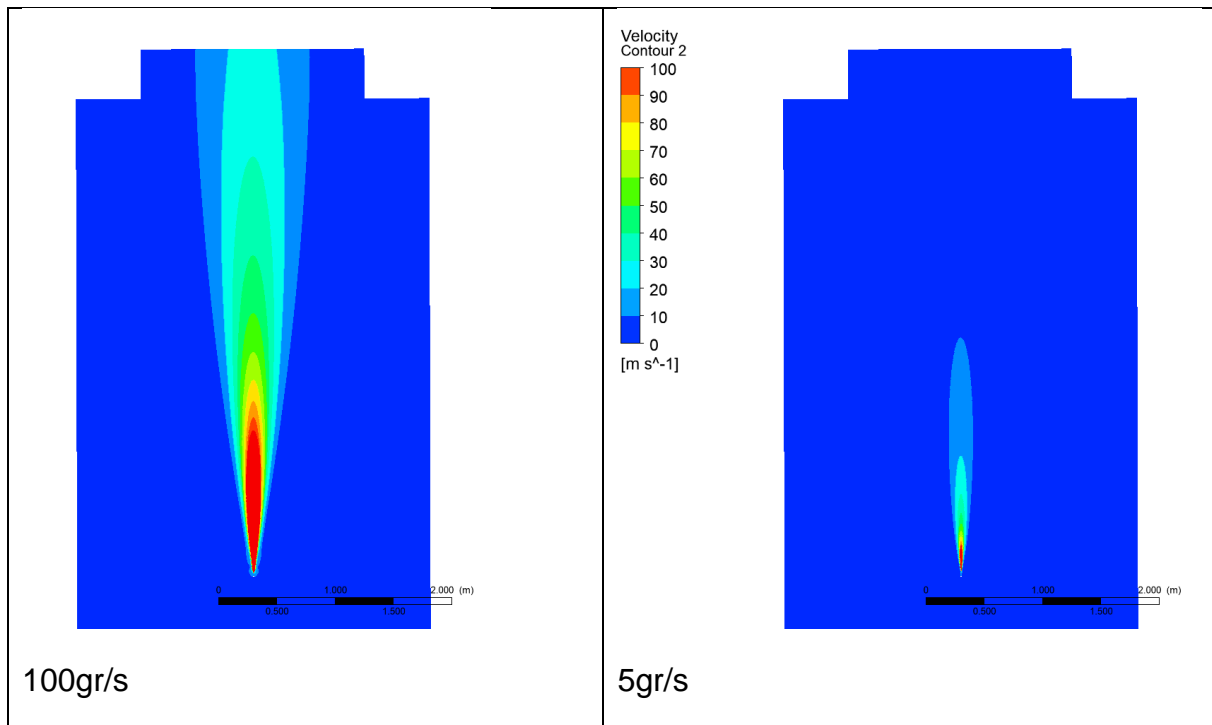


Abbildung 5: Mittenschnitt der Geschwindigkeit von H_2 beim Ausströmen, links bei 100 gr/s, rechts bei 5 gr/s.

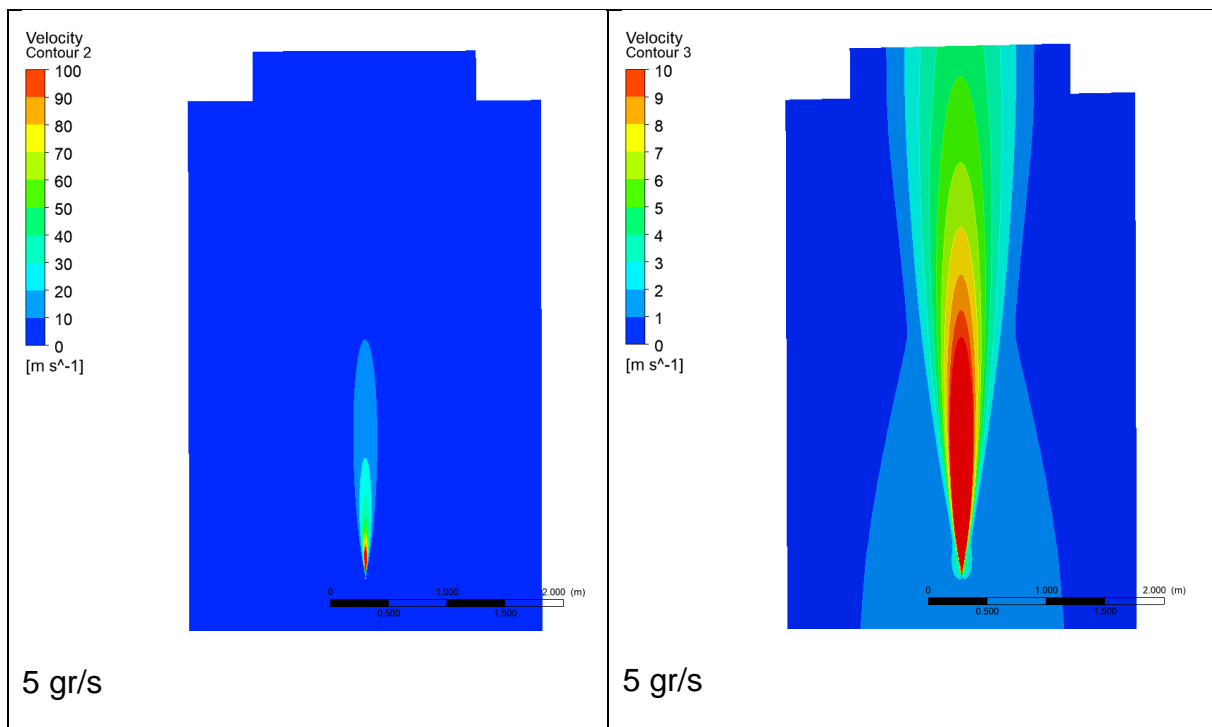


Abbildung 6: Wie in Abb. 5 rechts der Mittenschnitt der Geschwindigkeit von H₂ beim Ausströmen in Luft mit verschiedenen Skalierungen (0-100 m/s und 0-10 m/s).

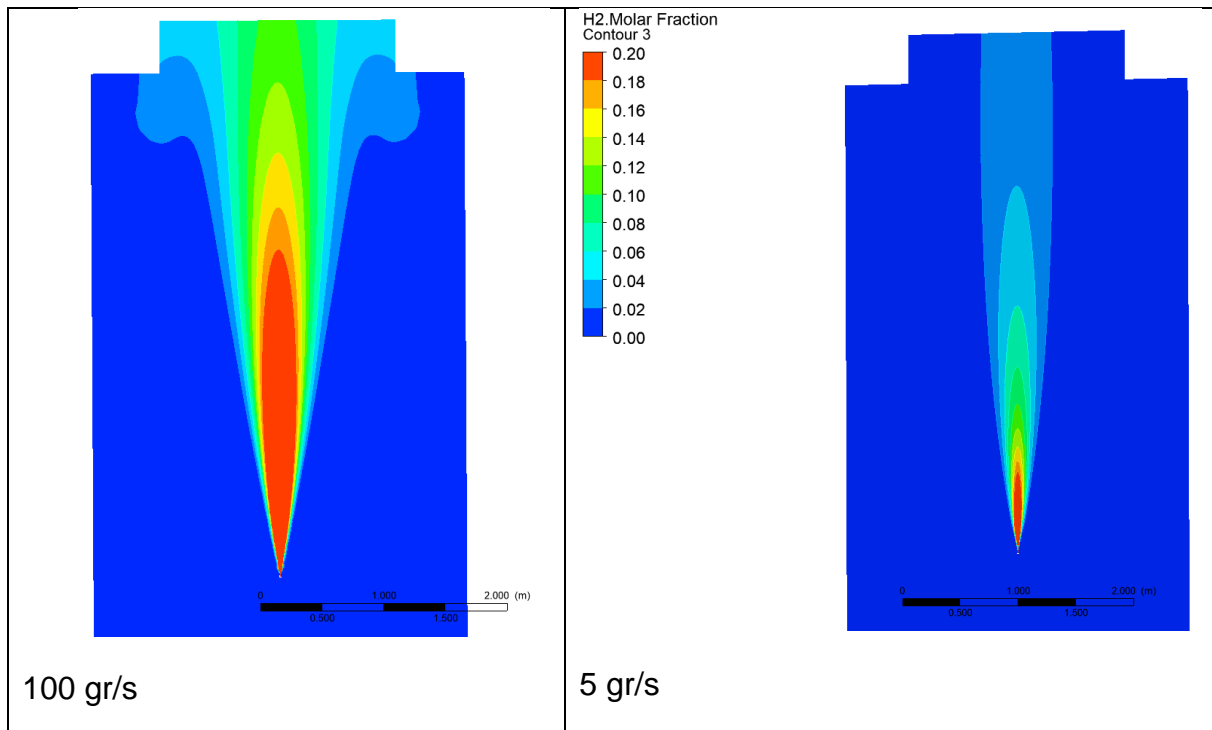


Abbildung 7: Mittenschnitt des Molenbruchs von H₂ in Luft. In einer Entfernung von 5m zur Düse beträgt bei einem hohen Massenstrom von 100 gr/s die max. Konzentration noch 20 %, bei einem geringen Massenstrom gerade noch 5 %.

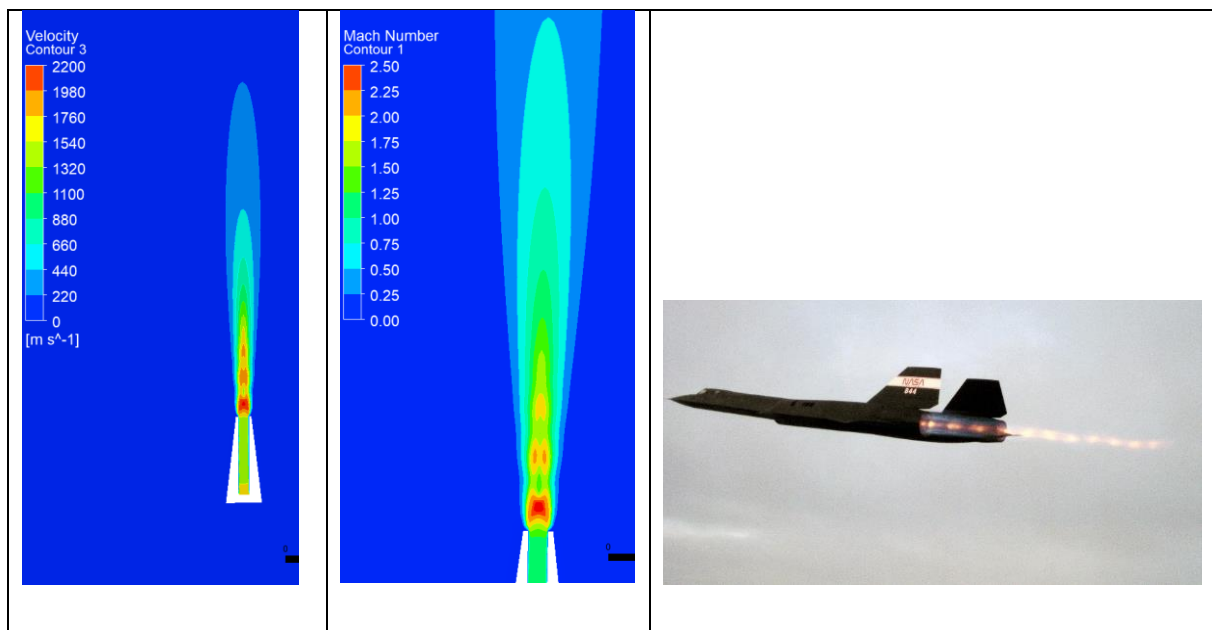


Abbildung 8: Der Geschwindigkeit (links) und Machzahlen (mittig) des Freistrahls kurz hinter der Düse. Zu erkennen sind die für eine unterexpandierte Überschallströmung typischen Machschen Knoten. In der Abbildung rechts im Abgasstrahl eines Überschallflugzeugs [5]

3.3. Seitliches Ausströmen durch eine 4 mm-Düse

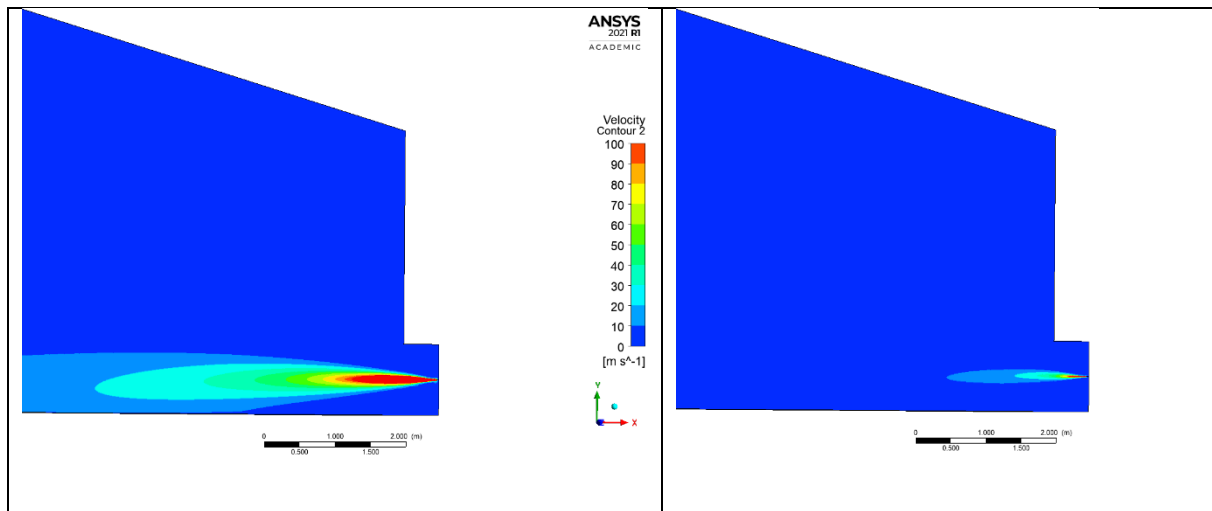


Abbildung 9: Mittenschnitt der Geschwindigkeitsverteilung, links bei 100 gr/s, rechts bei 5 gr/s

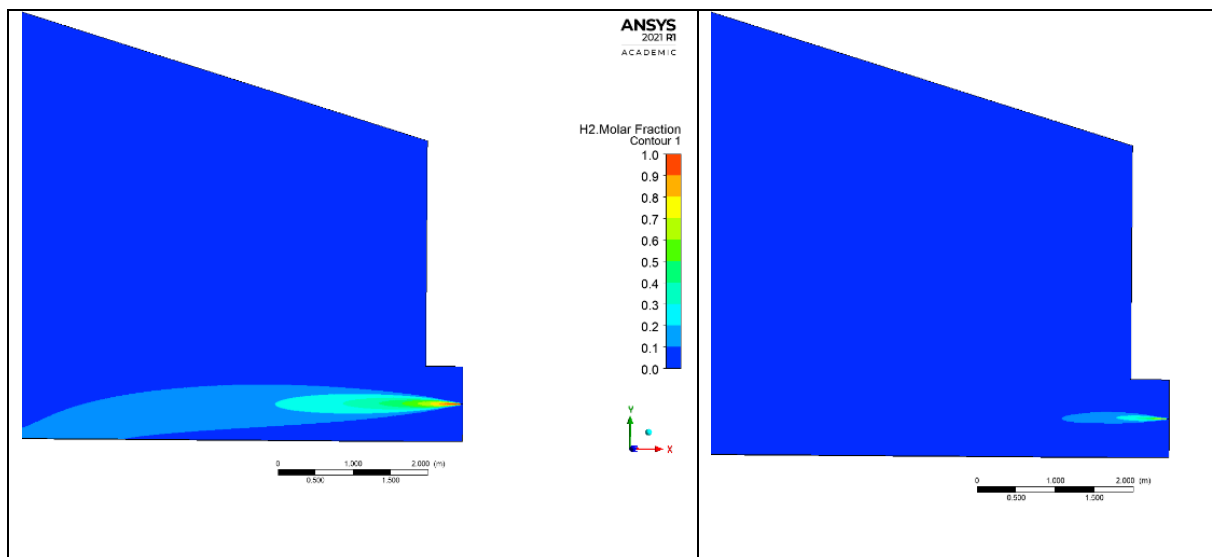


Abbildung 10: Mittenschnitt des Molenbruchs, links bei 100 gr/s, rechts bei 5 gr/s

Durch den Coanda-Effekt wird der Freistrahle nach unten zum Boden hin abgelenkt. Die Auftriebskräfte machen sich praktisch nicht bemerkbar, weil die Geschwindigkeit im Freistrahle in einer Entfernung von 2 Metern zur Düse selbst bei dem geringen Massenstrom von 5 gr/s noch 10 m/s beträgt.

3.4. Seitliches Ausströmen durch eine 20mm-Düse

Wie in der vorherigen Berechnungen strömt jetzt der Wasserstoff durch eine runde Öffnung mit 20 mm Durchmesser, d. h. gegenüber der 4mm-Düse durch eine um den Faktor 25 größere Austrittsfläche.

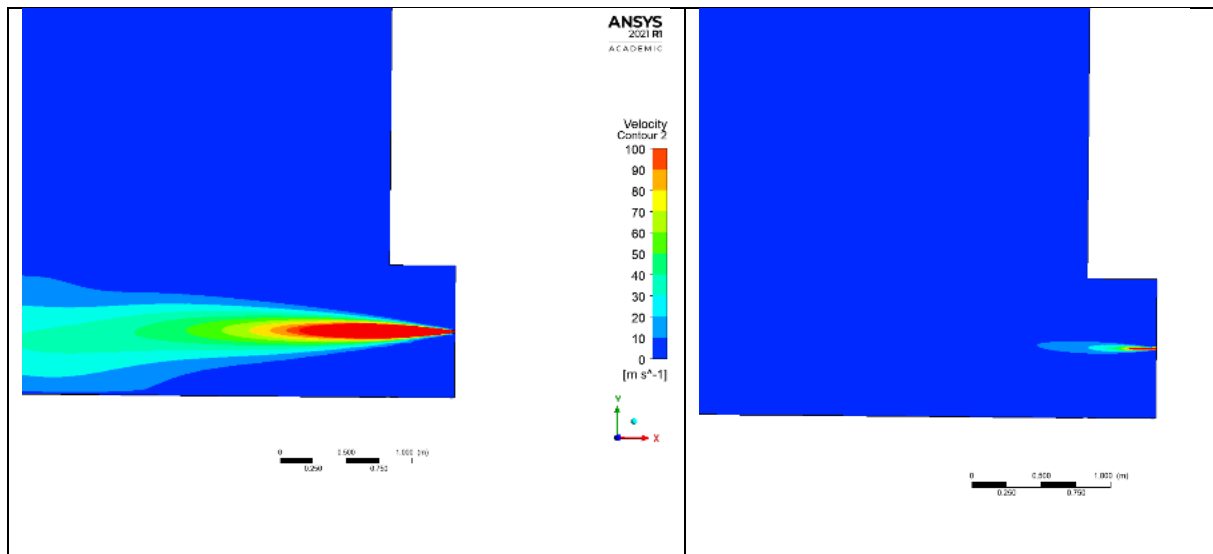


Abbildung 11: Mittenschnitt der Geschwindigkeitsverteilung, in der Abbildung links bei 100 gr/s, rechts bei 5 gr/s

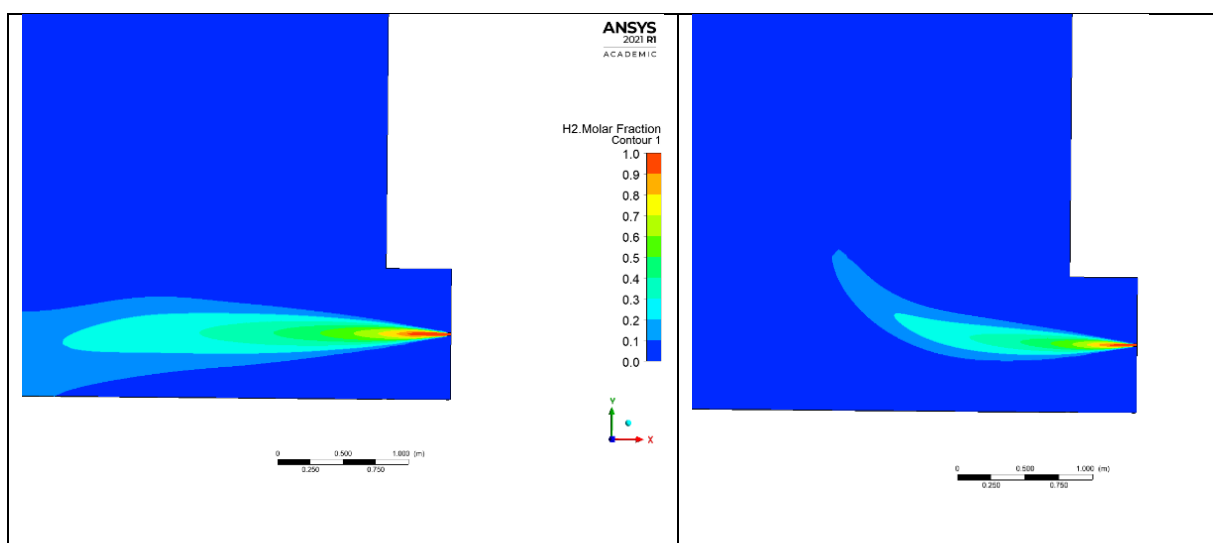


Abbildung 12: Mittenschnitt des Molenbruchs, in der Abbildung links bei 100 gr/s, rechts bei 5 gr/s.

Der Wasserstoff wird im Freistrahle deutlich weniger verdünnt als bei einer Düse mit einem Durchmesser von 4 mm, weil die Austrittsgeschwindigkeit geringer und der Strahl an der Düse breiter ist.

Bei dem hohen Massenstrom spielen im Nahfeld des Freistrahls die Auftriebskräfte noch keine Rolle, bei dem kleinen Massenstrom hingegen zeigt sich deutlich, wie der Freistrahle nach oben abgelenkt wird.

Für die Berechnung der Mischungsverhältnisse des Wasserstoffs im Nahfeld der Düse bzw. der Leckage ist die genaue Kenntnis der Position und Ausrichtung der Leckageöffnung unabdingbar. Ausführliche Untersuchung hierzu in der Arbeit von Kazemi et al. [6] im Rahmen des EU-Projekts HyTunnel [7]

Bei einem realen Szenario liegen diese Kenntnisse bei Eintreffen der Einsatzkräfte nicht vor. Daher muss von dem ungünstigsten Szenario ausgegangen werden, d. h. die Freisetzung des Wasserstoffs geschieht so, dass er nicht durch das Ausströmen im Nahfeld bereits unterhalb der Zündgrenze verdünnt wird.

Je nach Ausrichtung und Durchmesser der Auslassöffnung strömt H_2 auf den Boden und verteilt sich seitlich. In den Untersuchungen [2] und [3] wurde ein nötiger Mindest-Sicherheitsabstand von ca. 10 – 12 Metern berechnet.

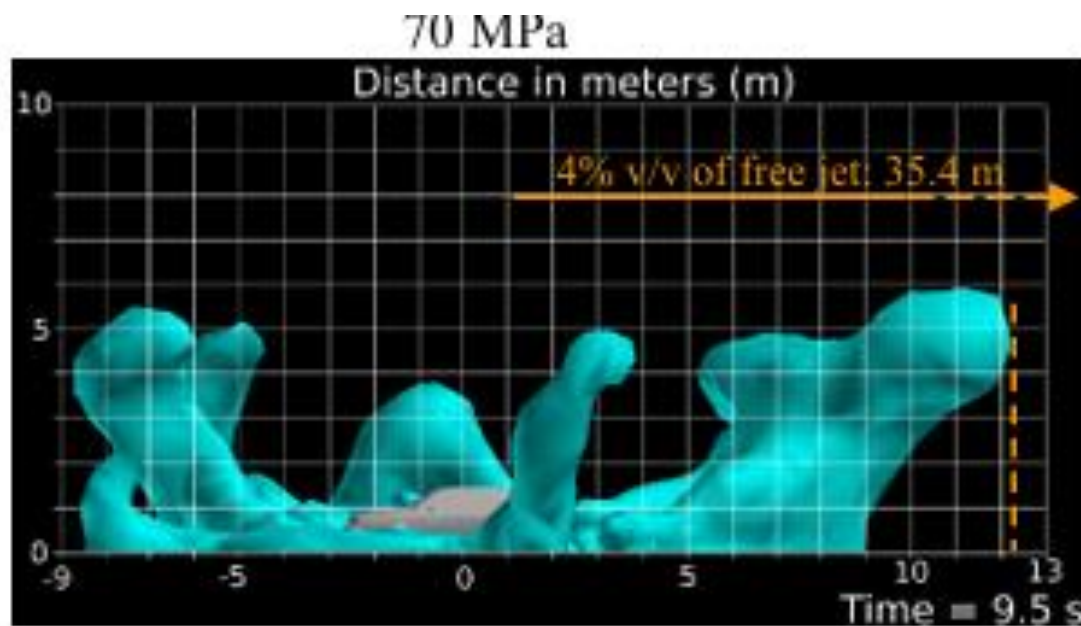


Abbildung 13: Isoflächen der 4 % Konzentration bei einem auf den Boden gerichteten Freistrah. Innerhalb der Umrandungen ist die H_2 -Konzentration gleich oder höher als 4 %. Freisetzung bei Windstille [2]:

3.5. Diffuses Ausströmen

Das diffuse Ausströmen wird aus zwei Gründen angenommen: Zum einen vermischt sich der Wasserstoff dabei unmittelbar nach dem Ausströmen nur gering mit der Umgebungsluft, so dass sich die denkbar ungünstigsten Szenarien hinsichtlich der Ausbreitung zündfähiger Mischungen einstellen. Zum anderen kann zwar ein Freistrahls mit H_2 im Überschallbereich berechnet werden – aber in Kombination mit der räumlichen Ausdehnung eines Tunnels lägen die Berechnungszeiten eines einzigen Szenarios selbst auf für CFD Berechnungen optimierten leistungsstarken workstations im Bereich von mehreren Monaten oder gar Jahren. Der Grund liegt im kleinsten Zeitschritt, welcher in der Numerik durch die sogenannte Courant-Zahl C , die im einstelligen Bereich liegen sollte, vorgegeben ist [8].

$$C = U \Delta t / \Delta x, \text{ wobei}$$

U = Geschwindigkeit

Δt = Zeitschritt

Δx = Gitterweite

Diese berechnet sich aus der Geschwindigkeit mal Zeitschritt dividiert durch die Gitterweite. Beim diffusen Ausströmen beträgt die typische Gitterweite 20 mm, die Ausströmgeschwindigkeit 4 ms^{-1} , so dass sich bei einem Zeitschritt von 5 ms eine C -Zahl von 1 ergibt.

Bei einem Überschall-Freistrahls hingegen liegt die Geschwindigkeit bei 2000 ms^{-1} und auch die Gittergröße müsste um die 1 mm betragen um die Geometrie auflösen zu können. Somit ergäbe sich bei einem um den Faktor 10.000 geringeren Zeitschritt von $0,5 \mu\text{s}$ eine C -Zahl von 1.

Für die Berechnung derselben Raelzeit müssen also rund 10.000-mal mehr Zeitschritte bei der Überschallströmung gegenüber der diffusen Ausströmung berechnet werden.

Prinzipiell können Überschallströmungen mit ANSYS CFX simuliert werden, aber die Rechenzeiten würden bei Betrachtung des Gesamtmodells (Leck mit Überschallströmung plus teilverbauter Raum) den zeitlichen Rahmen sprengen.

3.6. Annahmen und Vereinfachungen

1. Die Ausströmung aus dem Druckbehälter innerhalb einer Minute wird vereinfacht dargestellt, da der Wasserstoff im realen Fall aus einer kleinen Leckage mit Überschallgeschwindigkeit austritt.
2. Im Modell wird weder Diffusion durch Wände noch molekulare Diffusion berücksichtigt. Die Mischungsverhältnisse sind rein konvektiver Art, d. h. die durch Auftriebskräfte nach oben und dann zur Seite beschleunigten Wasserstoff-Luft-Gemische vermischen sich turbulent mit der umgebenden Luft. Sobald die Strömung zur Ruhe gekommen ist, ändert sich nichts mehr an den Mischungsverhältnissen.

Daher können folgende Fragestellungen nicht beantwortet bzw. aus den Simulationsergebnissen abgeleitet werden:

1. Die Mischungsverhältnisse im Nahfeld des Druckbehälters bzw. des PKWs sind während des einminütigen Abblasens ungenau. Je größer der Abstand zum PKW und je später nach Beendigung des Ausblasens, desto weniger spielt es eine Rolle.
2. In jedem Fall ist das diffusive Ausströmen wie in diesem Bericht angenommen für die Ausbreitung in teilverbauten Räumen das Worst-Case-Szenario, da H_2 als langsam ausströmendes Gas sich deutlich langsamer mit der Luft vermischt.
3. Wenn Wasserstoff sich in Bereichen angesammelt hat, wo er nicht mehr wegströmen kann, z. B. zwischen zwei Unterzügen, kann über die Verweilzeit keine Aussage gemacht werden, weil diese u. a. von der Diffusivität der Wände bzw. Decken abhängt.

Beispiel: In einem geschlossenen Raum, z.B. einem Labor, werden 100 gr Wasserstoff aus einer 10 Liter-Druckflasche innerhalb 10 Sekunden freigesetzt.

Wie die Wasserstoffkonzentrationen räumlich und zeitlich danach aussehen, kann für die folgenden Minuten zufriedenstellend simuliert werden. Keine Antwort gibt es auf die Frage, wie lange eine Gefahrenlage vorliegt, denn mit Sicherheit diffundiert Wasserstoff durch Wände und Decken, je nach Material. Untersuchungen der Diffusivität von Kohlenmonoxid [9] legen nahe, dass Wasserstoff ebenfalls sehr rasch durch die Wände diffundiert. Da aber insbesondere in Tunnel und Tiefgaragen die Decken aus Beton bestehen, der je nach Festigkeit unterschiedliche Porosität aufweist, wird in einem Forschungsprojekt 2025/26 die Durchlässigkeit von Beton untersucht.

4. CFD-Simulationen: Randbedingungen und Darstellung

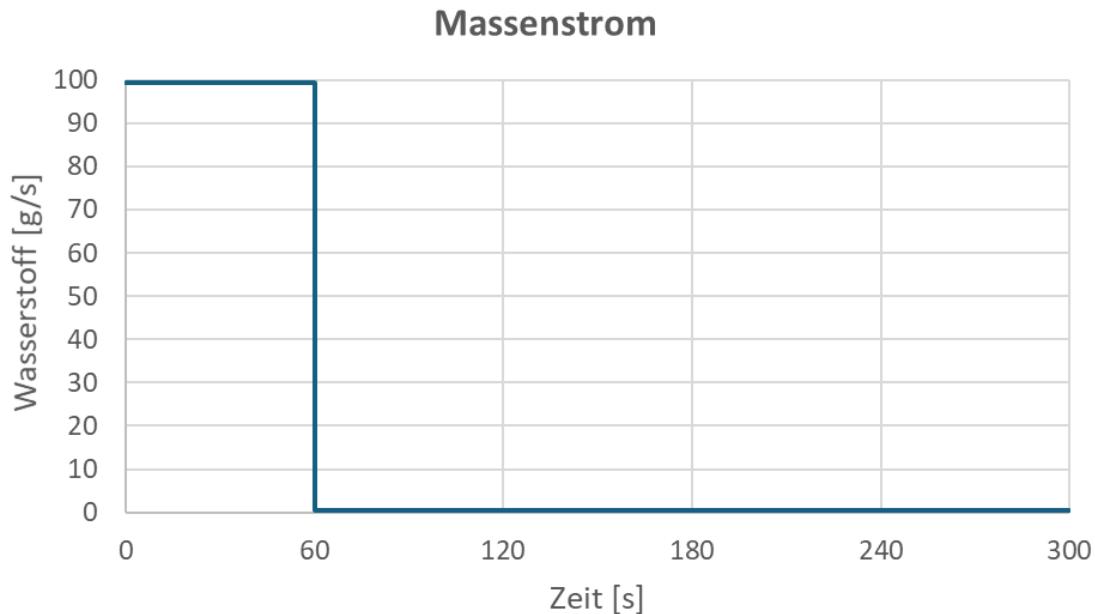


Abbildung 14: Zeitliche Verlauf der Wasserstofffreisetzung.

Soweit nicht anders vermerkt, beziehen sich die Zeitangaben in den Abbildungen auf diese Zeitskala.

CFD-Tool: Ansys CFX 2021 R1

Bei der Berechnung wird das DES- (detached eddy simulation) Turbulenzmodell angewandt, welches ein Hybrid zwischen der LES und RANS-Methoden darstellt.

Diskretisierungsschemata: second order bzw. high resolution

Zeitschritt: Abhängig von der Courant-Zahl (bis max. 5), zw. 10 und 100 Millisekunden

Fluid: Homogenes Gemisch aus H_2 , O_2 und N_2

Buoyancy force: $9,81 \text{ ms}^{-2}$

Umgebungsdruck – und temperatur 1013 hPa und 20°C

Vernetzung: Außerhalb des Fahrzeugs hexaedrisch, sonst tetraedrisch

Anzahl der Gitterelemente zw. 4 und 10 Mio., je nach Szenario

4.1.1. Geometrie

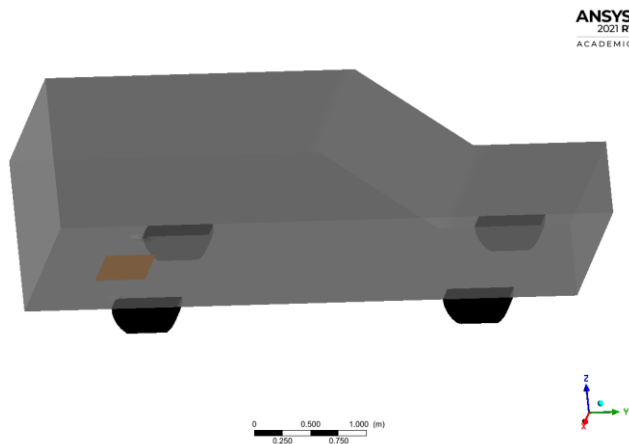


Abbildung 15: CAD-Modell des PKW mit der rechteckigen Auslassöffnung hinter der Hinterachse (Fläche in orange).

Durch die rechteckige Öffnung mit einer Fläche von $0,27 \text{ m}^2$ wird der Wasserstoff gleichmäßig über den Zeitraum von einer Minute freigesetzt, s. Abb. 14. In der Realität tritt der Wasserstoff mit Überschallgeschwindigkeit durch eine kleinere Öffnung aus. Dabei durchmischt sich der freigesetzte Wasserstoff bereits mit der umgebenden Luft stärker als bei der großflächigen Öffnung. Von daher findet bei der der Simulation zugrunde gelegten Annahme im weiteren Verlauf eine geringere Durchmischung des Wasserstoffs mit der Luft statt, weil die Ausströmgeschwindigkeit viel geringer ist (ca. 4 m/s). Dies beeinflusst aber lediglich die Ergebnisse im Nahfeld der Öffnung. Je größer der Abstand im Modell, desto zuverlässiger sind dort die qualitativen Simulationsergebnisse.

4.1.2. Darstellung der Ergebnisse

Die zeitliche und räumliche Darstellung von CFD Simulationen anhand einzelner Bilder ist nur eingeschränkt möglich. Sämtliche in diesem Bericht dargestellten Simulationen sind als Animationen frei abrufbar auf dem YouTube Kanal der FFB [10].

In den Abbildungen mit den H₂-Konzentrationen ist die Skala mit *molar fraction* (= Molbruch) bezeichnet, wobei 1 = 100 % entspricht. Bei der Skalierung der molare fraction von 0 – 0,05 (=5 %) entspricht die rote Farbcodierung einer Konzentration oberhalb 4,5 %, d.h. dieser Bereich liegt oberhalb der Unteren Zündgrenze und muss als kritischer Bereich angesehen werden. Eine Skalierung von 0 – 0,25 (=25 %) dient in den Abbildungen dazu, die hohen Konzentrationen (größer 5 %) feiner aufzulösen.

5. CFD-Simulationen

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der einzelnen Szenarien aufgezeigt.

5.1. H₂-Freisetzung im Freien

Bei der Strömung im Freien zeigt sich, dass der Wasserstoff rasch nach oben wegströmt (Abb. 16), und sich die zündfähigen Bereiche nur in unmittelbarer Nähe des Fahrzeugs und darüber befinden. Bereits 15 Sekunden nach Ende des Ausströmens (Abb. 17) ist der Wasserstoff nach oben weggeströmt, lediglich unterhalb des Fahrzeugs befindet sich noch ein kleiner Bereich zündfähigen Gemischs. Oberhalb des Fahrzeugs gibt es keine zündfähigen Mischungen mehr. Der Wasserstoff ist nun so weit verdünnt, dass nur noch ein sehr geringer Dichteunterschied zur umgebenden Luft vorhanden ist, und die auftriebsbedingte Strömungsgeschwindigkeit daher praktisch zum Erliegen kommt.

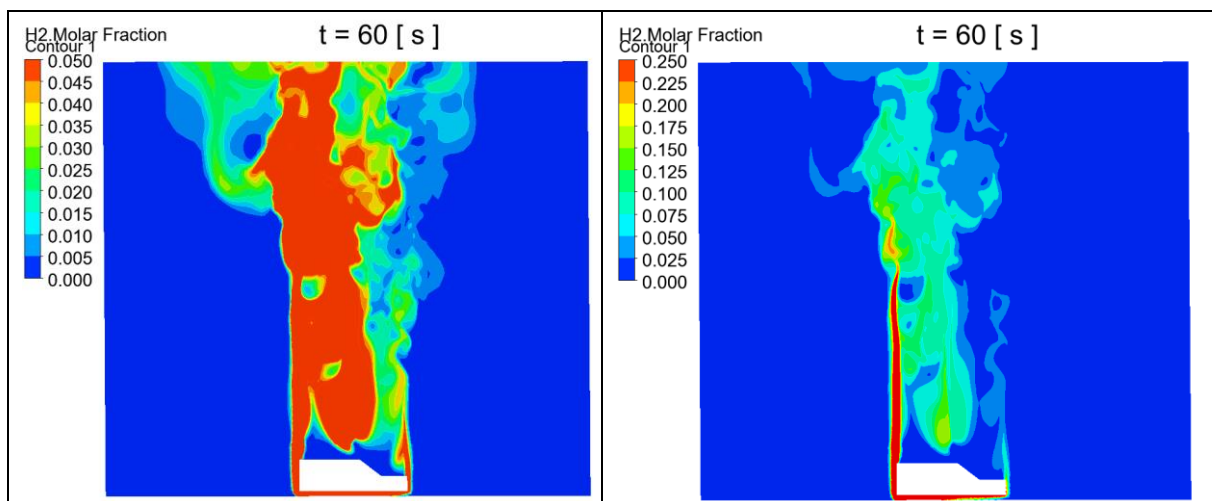


Abbildung 16: Gleiche Längsschnitte der Konzentration bei t=60 s. Links sind die Konzentrationen zw. 0 und 5 %, rechts mit veränderter Skala zw. 0 und 25 % abgebildet.

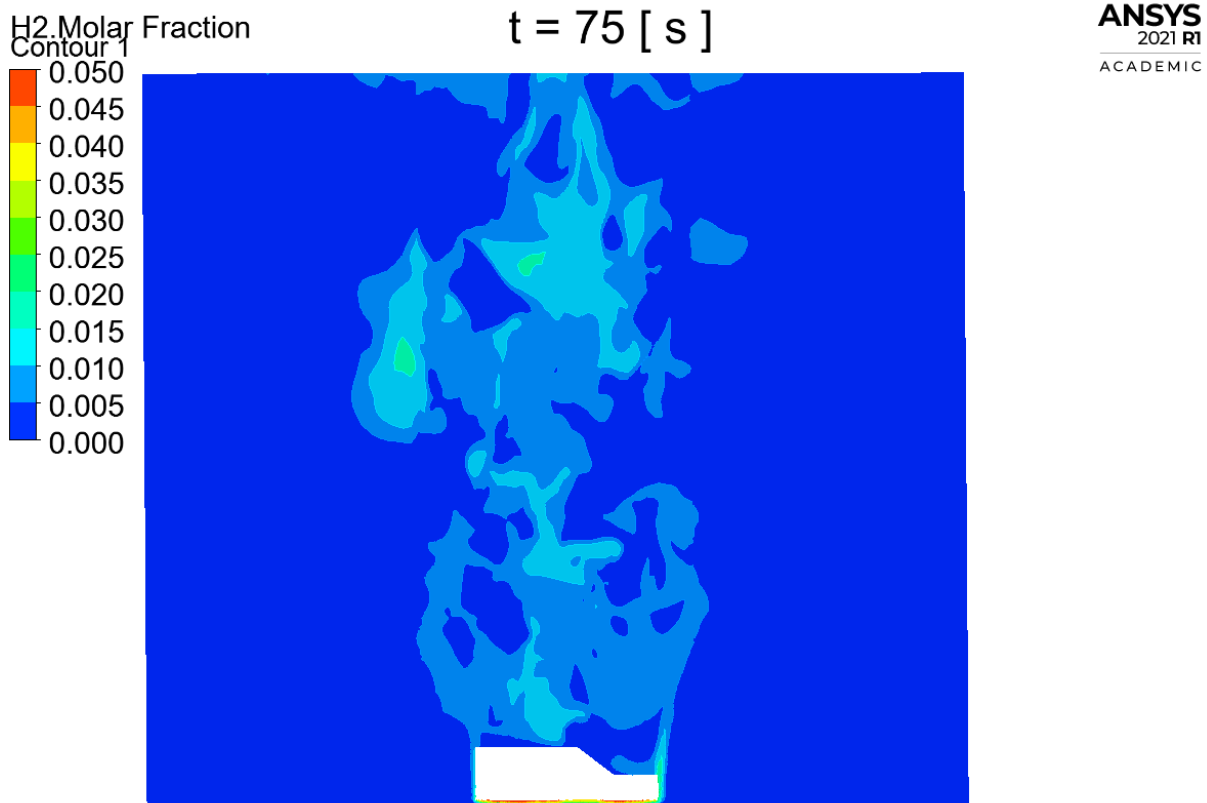


Abbildung 17: Längsschnitt der Konzentration bei $t=75 \text{ s}$, d.h. 15 s nach Ende des H_2 -Ausströmens.

Üblicherweise liegen die Alarmschwellen bei Überwachung brennbarer Gase zwischen 10 % und 40 % der UEG [11]. Daher kann auch in Bodennähe die Alarmschwelle erreicht werden, da 0,4 % H_2 in Luft nur eine Differenztemperatur von gerade mal einem Grad Kelvin aufweist. Bei diesen geringen Dichteunterschieden wird eine Auftriebsströmung nicht zwingend in Gang gesetzt.

Es ist also durchaus realistisch, dass durch Windeinfluss H_2 -Luftgemische mit geringer Konzentration seitlich wegströmen und weiter entfernt von der Austrittsöffnung ein Warngerät anschlägt. Es ist aber ausgeschlossen, dass zündfähige Mischungen vorliegen, da diese auftriebsbedingt nach oben wegströmen.

Bei diesem Szenario muss berücksichtigt werden, dass das Ausströmen des Wasserstoffs diffus unterhalb des Fahrzeugs erfolgt. In der Realität kann es im Nahfeld anders aussieht. Wesentlich ist: Brennbare Mischungen strömen rasch nach oben weg.

5.2. H₂-Freisetzung im Raum

5.2.1. Freisetzung im geschlossenen Raum

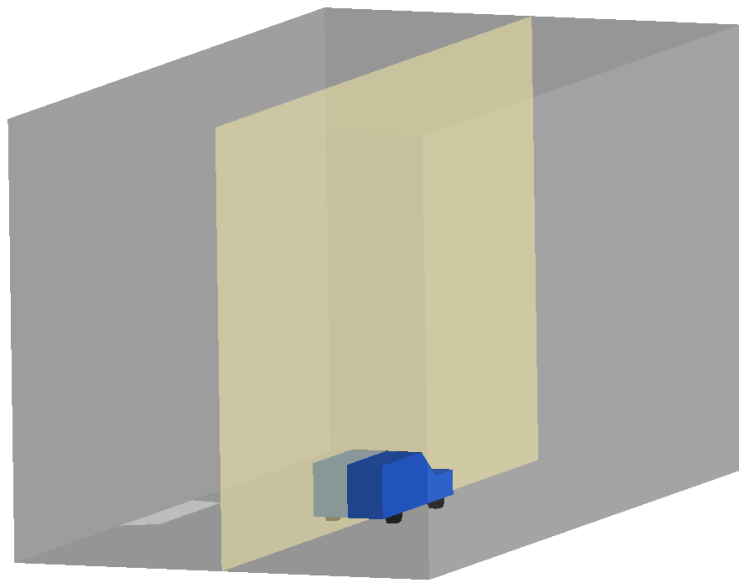


Abbildung 18: Geometrie des Raums ($L=22,5$ m, $B=12$ m, $H=12$ m) mit der Ebene des Längsschnitts. Links unten befindet sich eine Öffnung, die einen Druckausgleich im Raum ermöglicht. Sie hat keinen Einfluss auf die H₂-Verteilung im Raum.

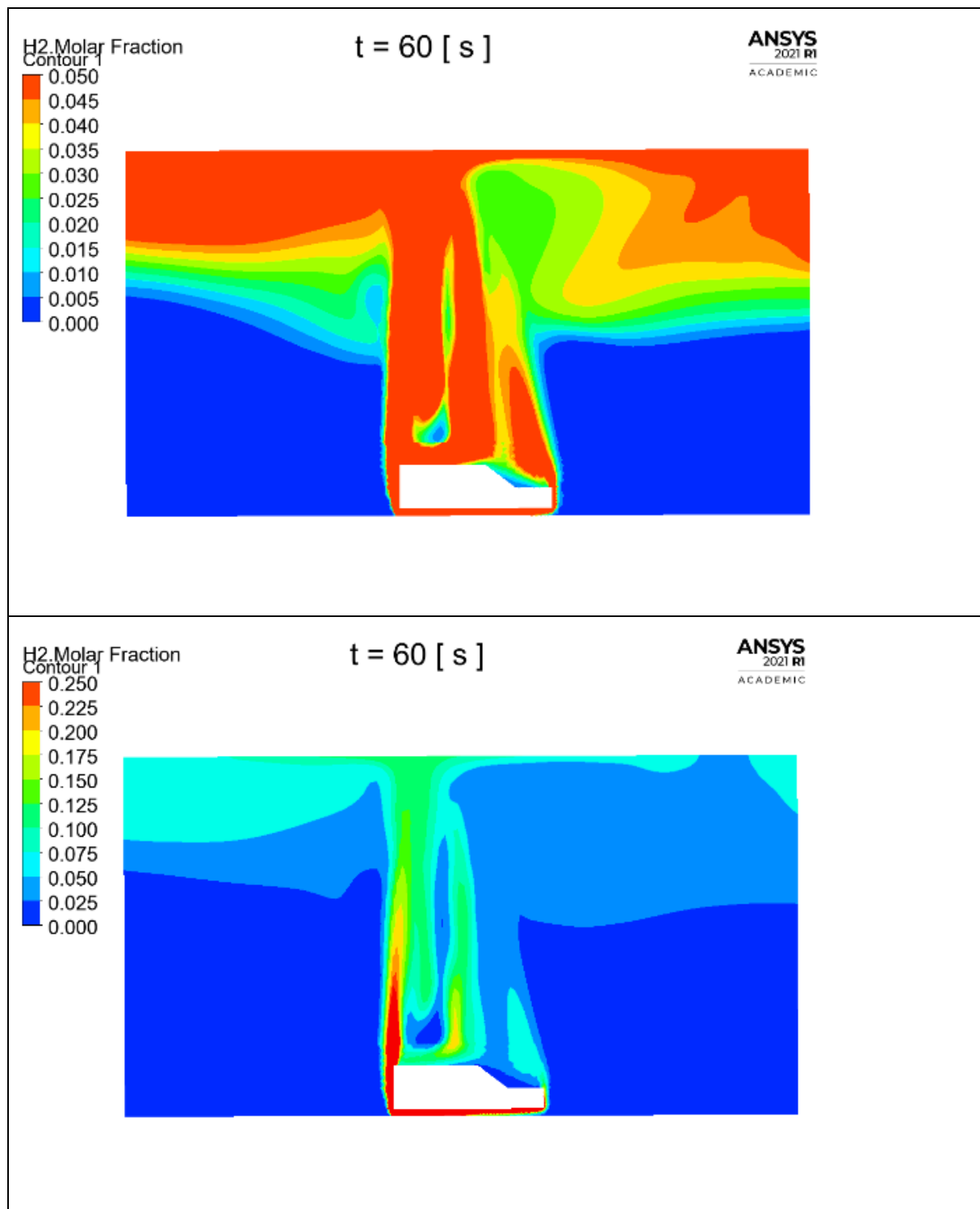


Abbildung 19: Gleiche Längsschnitte der Konzentration bei $t=60$ s. Oben sind die Konzentrationen von 0 bis 5 %, rechts von 0 bis 25 % abgebildet.

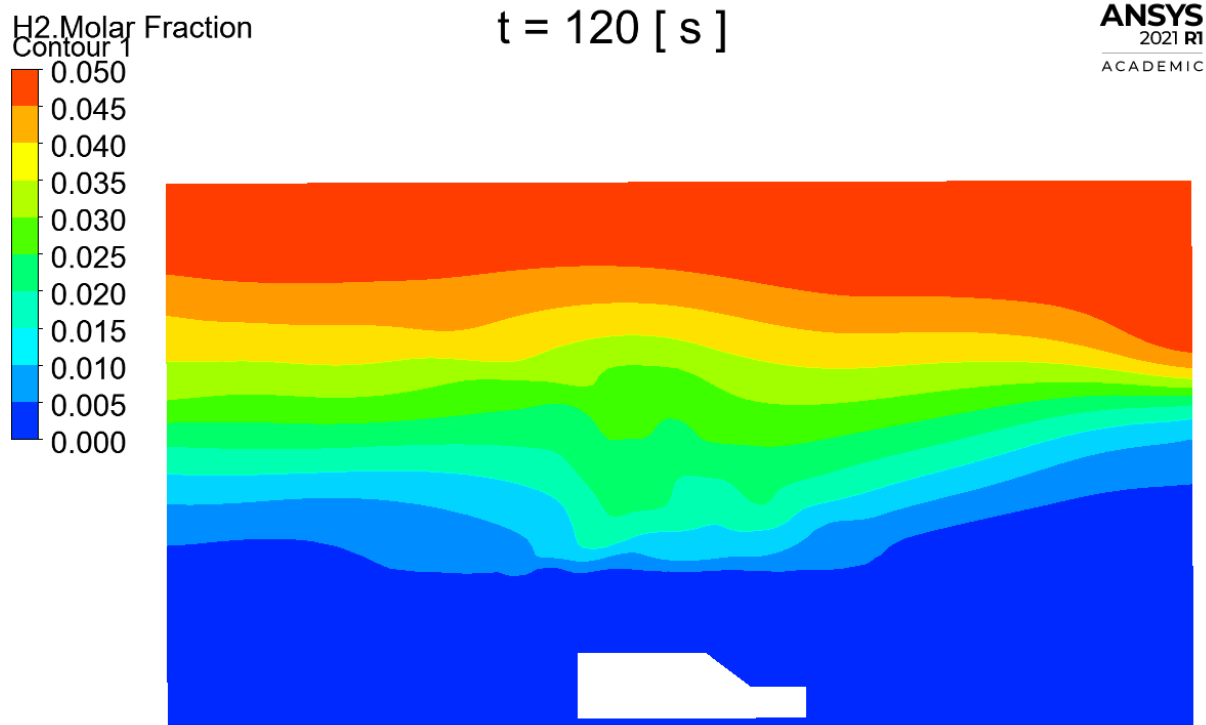


Abbildung 20: Längsschnitt der Konzentration bei $t=120 \text{ s}$, d. h. 60 s nach Ende des H₂-Ausströmens.

Wie bei der Ausströmung im Freien steigt der Wasserstoff rasch nach oben (Abb. 19, 20) und sammelt sich unter der Decke. Der zündfähige Bereich befindet sich nach 2 Minuten bis etwa 2 Meter unterhalb der Decke. Die Strömung ist fast vollständig zur Ruhe gekommen.

Aus der Simulation können jetzt aber keine Rückschlüsse über den weiteren zeitlichen Verlauf gezogen werden. Da die Strömung zur Ruhe gekommen ist, verringert sich die Konzentration nur noch durch Diffusion durch die Wand und Decke sowie durch molekulare Diffusion. Die molekulare Diffusion sorgt dafür, dass durch die sehr hohe mittlere Geschwindigkeit des Wasserstoffmoleküls (ca. 2000 m/s vs. 500 m/s bei N₂/O₂) das Gasgemisch sich im weiteren Verlauf von einigen Stunden bis Tagen weiter im gesamten Raum durchmischt, falls die Wände diffusionsdicht sind und der Wasserstoff nicht durch sie entweichen kann.

5.2.2. Freisetzung im Raum mit Öffnung oben

Am oberen Teil der Wand unmittelbar unterhalb der Decke befindet sich eine horizontale Öffnung mit 500 mm Breite und 100 mm Höhe.

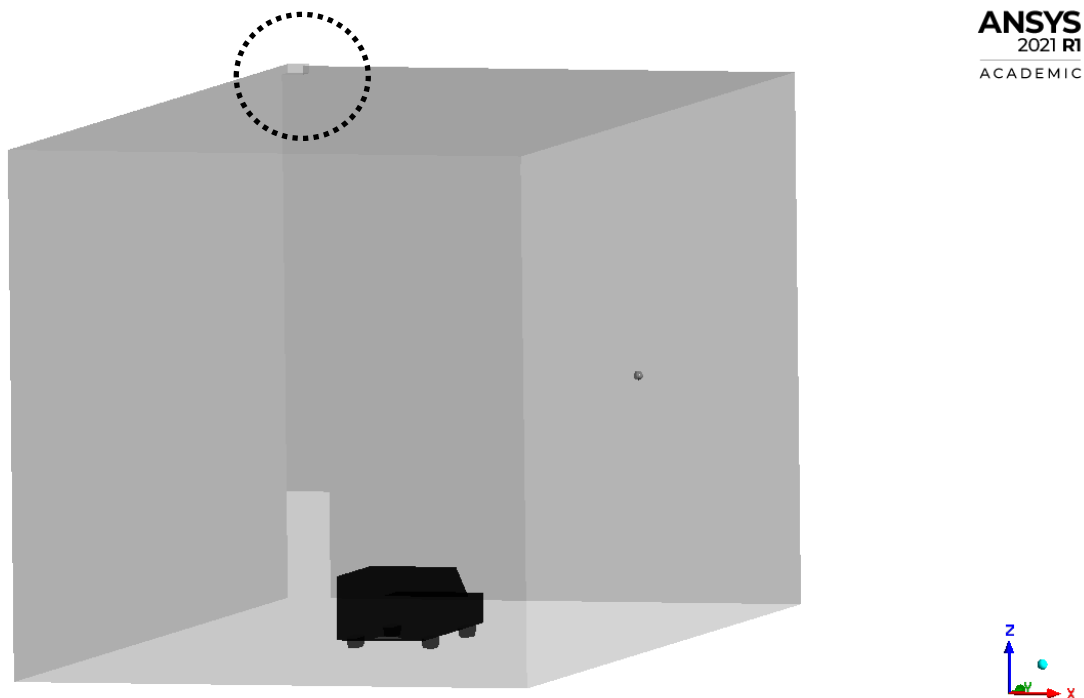


Abbildung 21: Geometrie des Raums mit kleiner Öffnung. $L=22,5\text{ m}$, $B=12\text{ m}$, $H=12\text{ m}$. Links oben eine kleine Öffnung $h=100\text{ mm}$, $b=500\text{ mm}$. Links unten eine Öffnung in Größe einer Tür, die wie bei Abb. 18 nur zum Druckausgleich vorhanden ist.

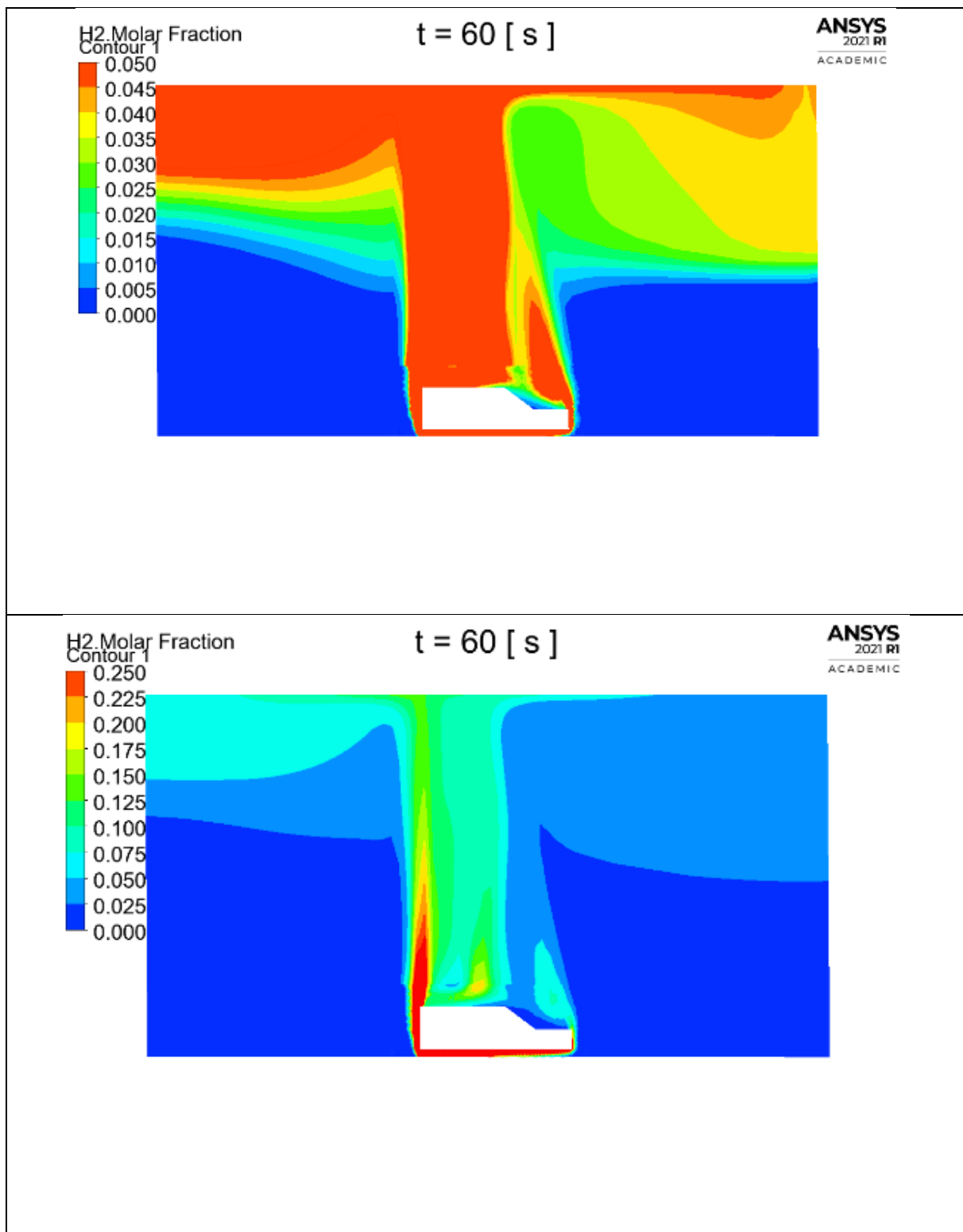


Abbildung 22: Gleiche Längsschnitte der Konzentration bei $t=60$ s. Oben sind die Konzentrationen von 0 bis 5 %, unten von 0 bis 25 % abgebildet.

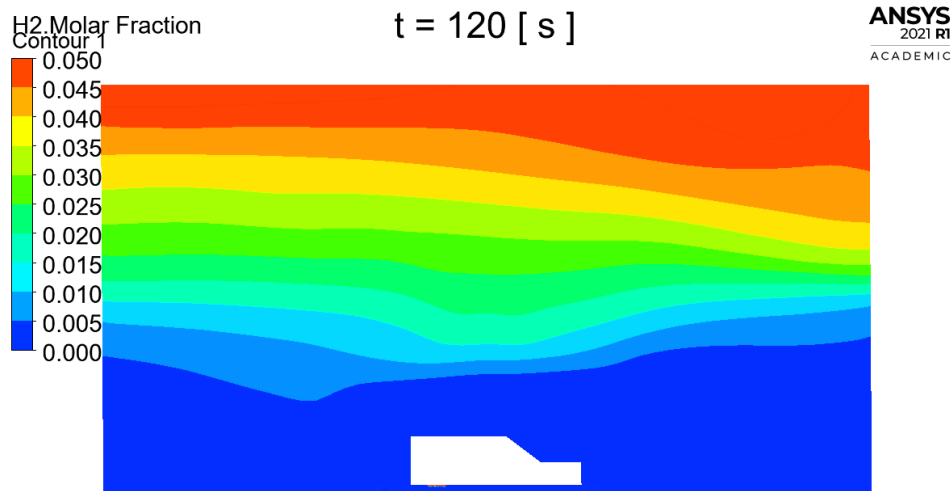


Abbildung 23: Längsschnitt der Konzentration bei $t=120$ s, d.h. 60 s nach Ende des H₂-Ausströmens.

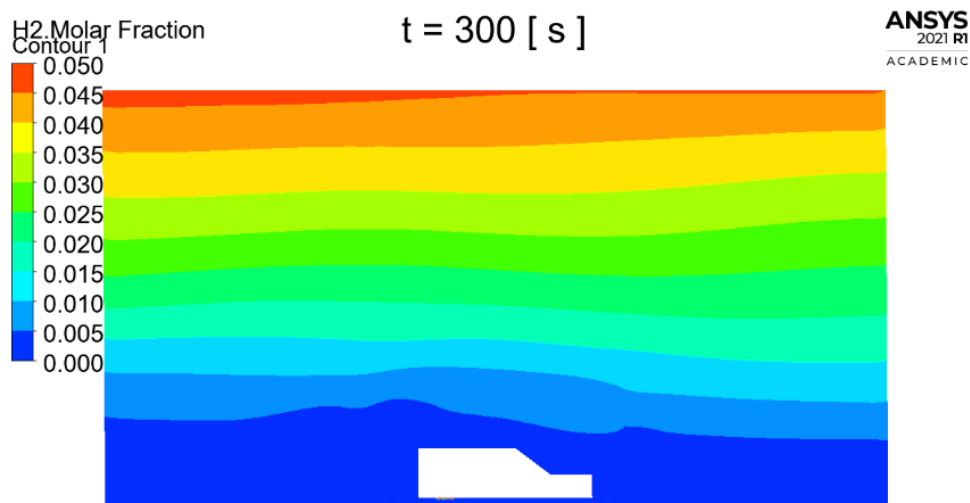


Abbildung 24: Längsschnitt der Konzentration bei $t=300$ s.

Der zündfähige Bereich befindet sich nach 2 Minuten (Abb. 22, 23) wie bei dem Fall ohne Öffnung bis etwa 2 Meter unterhalb der Decke.

Nach 5 Minuten ist nur noch auf der gegenüberliegenden Seite der Öffnung eine kleine Menge zündfähiges Gemisch unterhalb der Decke (Abb. 24). Die Simulation endet

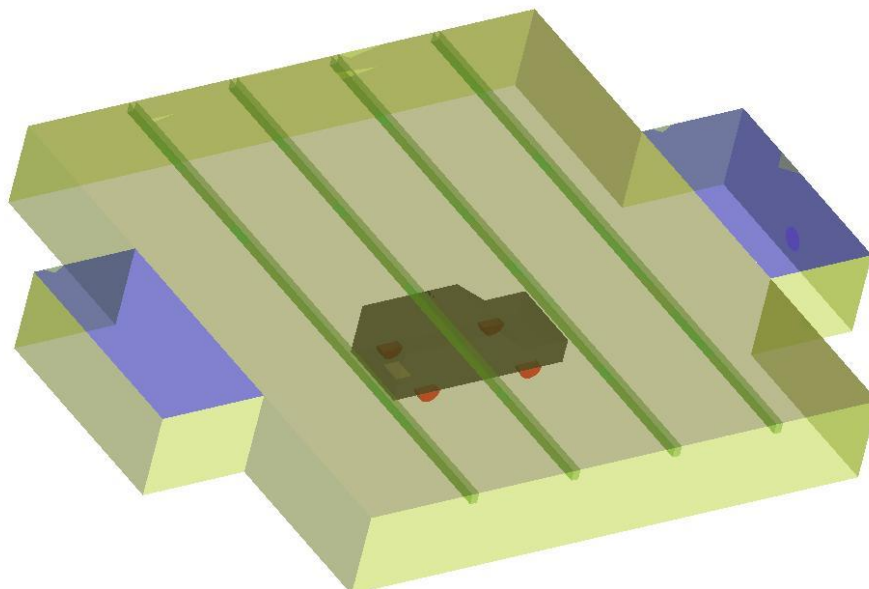
nach 5 Minuten, es ist aber sicher, dass im weiteren Verlauf die Konzentration noch weiter abnehmen wird.

Für die eintreffenden Einsatzkräfte kann die Freisetzung von Wasserstoff insbesondere in hohen Räumen ein besonderes Gefährdungspotential aufweisen: Denn wenn mittels Messgerät Wasserstoff oder ex-fähige Mischungen detektiert werden sollen, zeigen die Geräte einen unkritischen Wert an, da üblicherweise das Messgerät in der Hand gehalten wird und somit die Höhe über Boden kaum über 2 Meter betragen wird.

5.3. Freisetzung in Tiefgarage

5.3.1. Freisetzung in Tiefgarage mit einer glatten Decke

Die Tiefgarage misst 15 m x 16 m x 2,5 m. Das Fahrzeug steht nicht exakt mittig, sondern in Fahrtrichtung 1 m versetzt nach rechts positioniert. Es herrschen keine Luftströmungen vor, d. h. die Umgebungsluft ist in Ruhe.



ANSYS
2021 R1

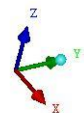


Abbildung 25: Geometriemodell der Tiefgarage (hier mit Unterzügen) mit Fahrzeug. Die blau eingefärbten Flächen der beiden Quader links und rechts bilden geometrisch vereinfacht die Auslassöffnungen.

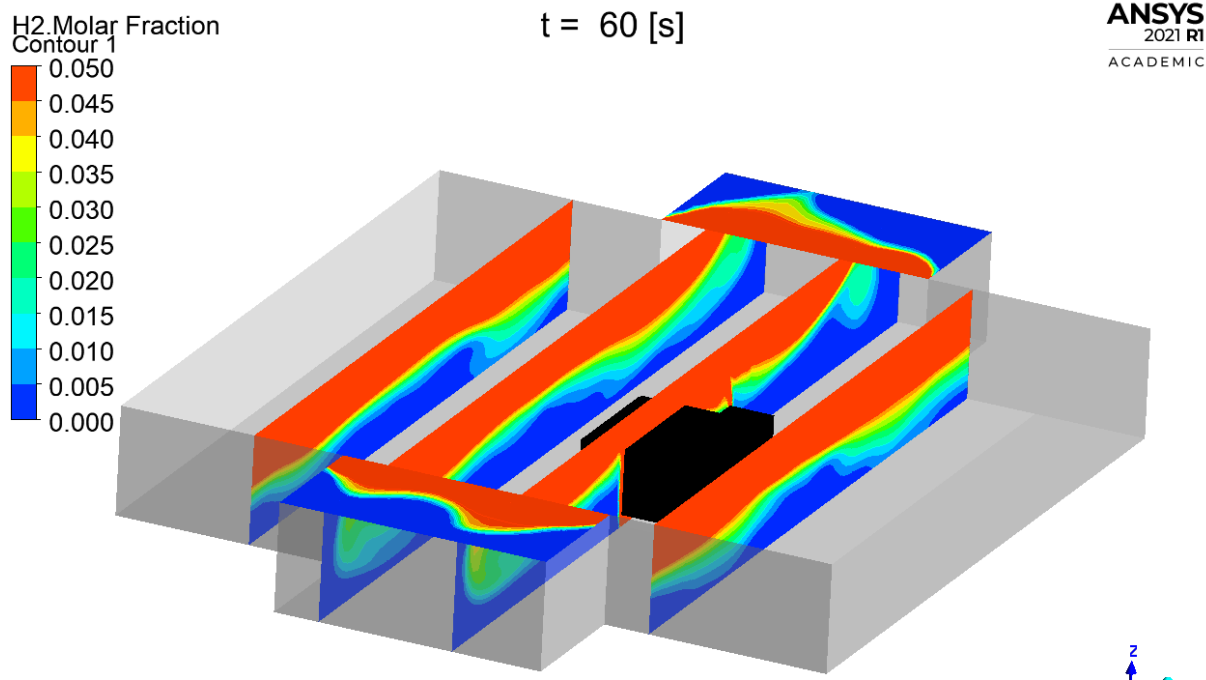


Abbildung 26: H_2 -Konzentration in mehreren Längsschnitten unmittelbar nach Ende des Ausströmens von H_2 .

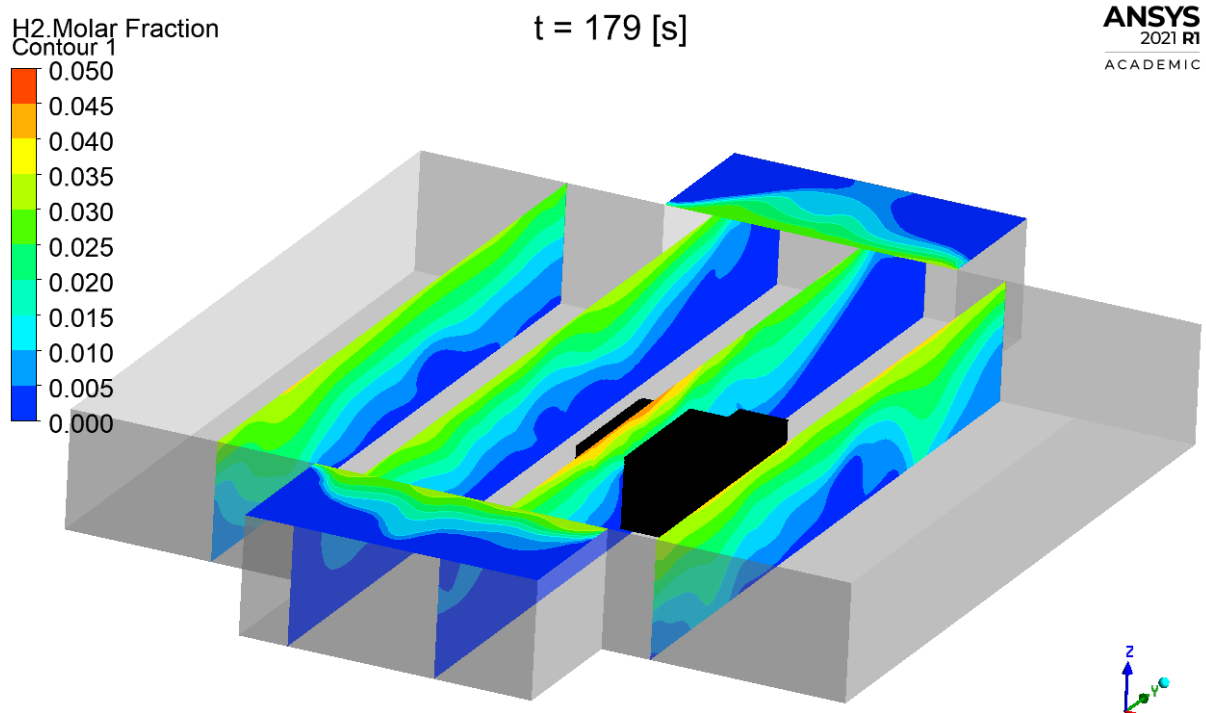


Abbildung 27: H_2 -Konzentration in mehreren Längsschnitten knapp 2 Minuten (119 s) nach Ende des Ausströmens von H_2 .

In der (kleinen) Tiefgarage steht ein einzelnes Fahrzeug aus dem H_2 am Unterboden ausströmt. Dieser strömt rasch nach oben bis zur glatten, hindernisfreien Decke und breitet sich daran entlang ungehindert aus. 60 Sekunden nach Beginn des Ausströmens (Abb. 26) ist etwa die obere Hälfte der Tiefgarage mit zündfähigem Gemisch gefüllt, nach weiteren 2 Minuten (Abb. 27) ist kein zündfähiges Gemisch mehr vorhanden. Der Wasserstoff bzw. die zündfähigen H_2 -Luft-Gemische sind an der hindernisfreien Decke seitlich zu den beiden Öffnungen ausgeströmt.

5.3.2. Freisetzung in Tiefgarage mit Unterzügen an der Decke

In der Realität sind wohl selten glatte und hindernisfreie Decken anzutreffen, daher wurde die Geometrie für eine weitere Simulation durch 300 mm hohe und 200 mm breite Unterzüge ergänzt.

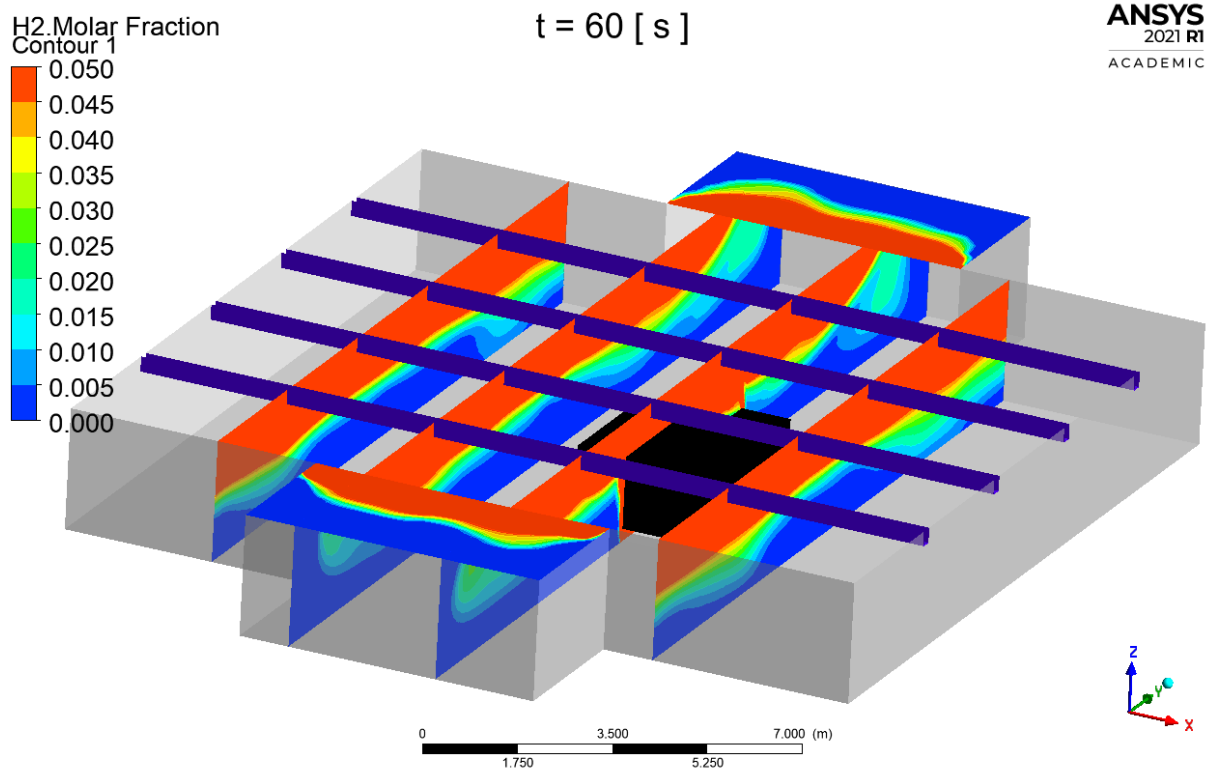


Abbildung 28.: H_2 -Konzentration in mehreren Längsschnitten unmittelbar nach Ende des Ausströmens von H_2 .

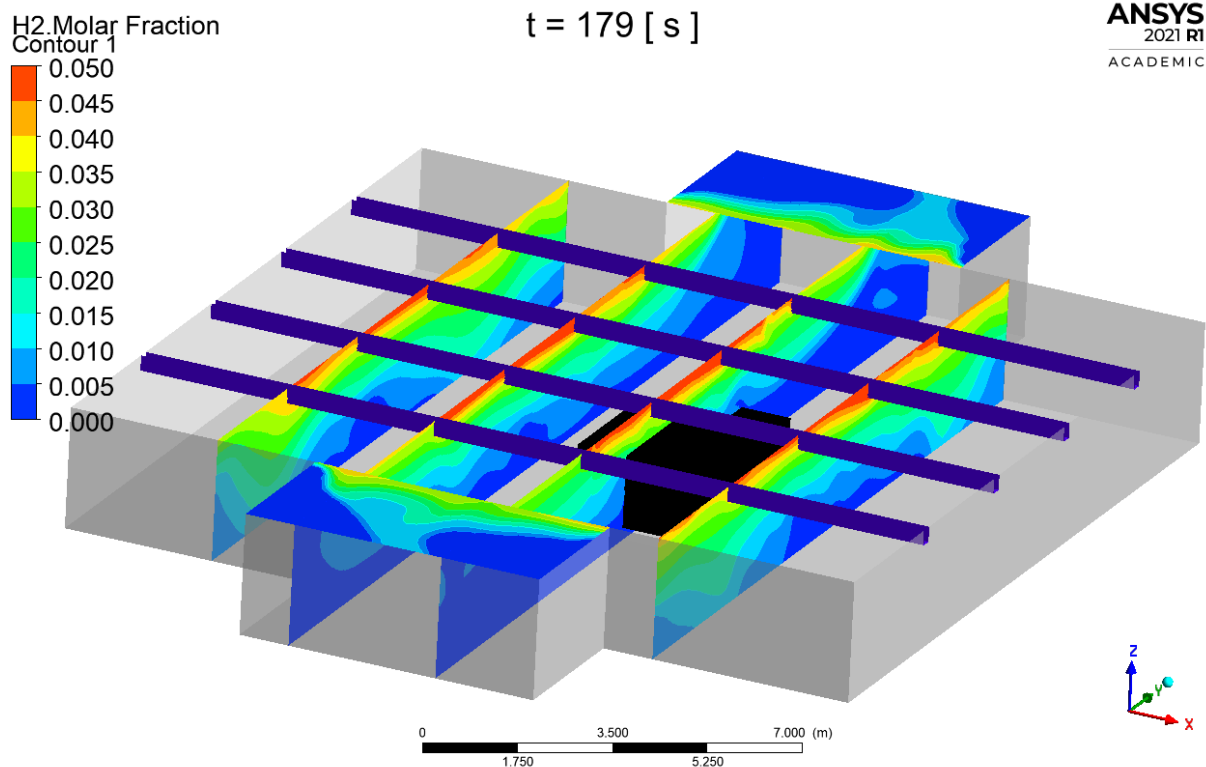


Abbildung 29: H₂-Konzentration in mehreren Längsschnitten knapp 2 Minuten (119s) nach Ende des Ausströmens von H₂.

Die H₂-Konzentration nach 60 s ähnelt stark derjenigen in der Tiefgarage mit der glatten Decke, d. h. die obere Hälfte der Garage ist auch hier mit zündfähigem Gemisch gefüllt. 2 Minuten später (bzw. 119 s) ist aber noch in den Bereichen zwischen den Unterzügen zündfähiges Gemisch vorhanden, da der Wasserstoff bzw. die Wasserstoff-Luft-Gemische nicht seitlich wegströmen können.

5.3.3. Einsatz von Kleinlüftern

Hier wird jetzt exemplarisch der Einsatz von Lüftungsmaßnahmen untersucht. Hierzu wird ein bei der Feuerwehr typisch benutzter Kleinlüfter mit 400 mm Laufraddurchmesser untersucht.

Der Lüfter startet unmittelbar mit einer mittleren Austrittsgeschwindigkeit von 20 m/s nach Ende des H₂-Ausströmens, d.h. zum Zeitpunkt $t=60$ s. Es ist sicherlich eine unrealistisch kurze Zeitspanne zwischen Auftreten Leckage und Einsatz Lüfter. Hier soll aber der Einfluss auf die H₂-Verteilung im direkten Vergleich zur natürlichen Entlüftung untersucht werden.

Der Lüfter steht ca. 2 m mittig vor der Einfahrt und ist einmal horizontal und einmal mit einem Winkel von 20° nach oben ausgerichtet.

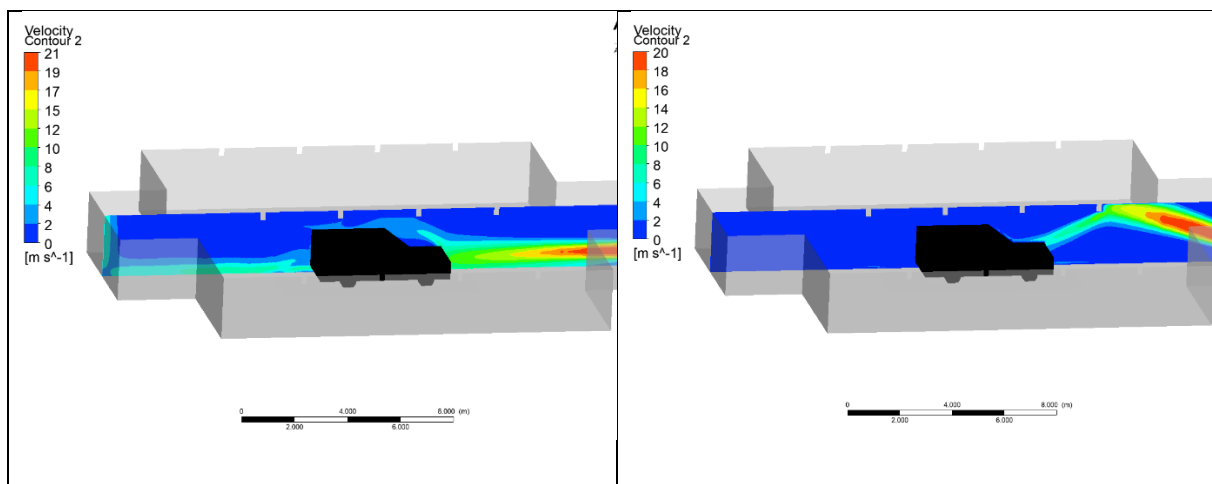


Abbildung 30: Geschwindigkeitsverteilung im Längsschnitt mit horizontal ausgerichtetem Lüfter, rechts mit 20° angestelltem Lüfter.

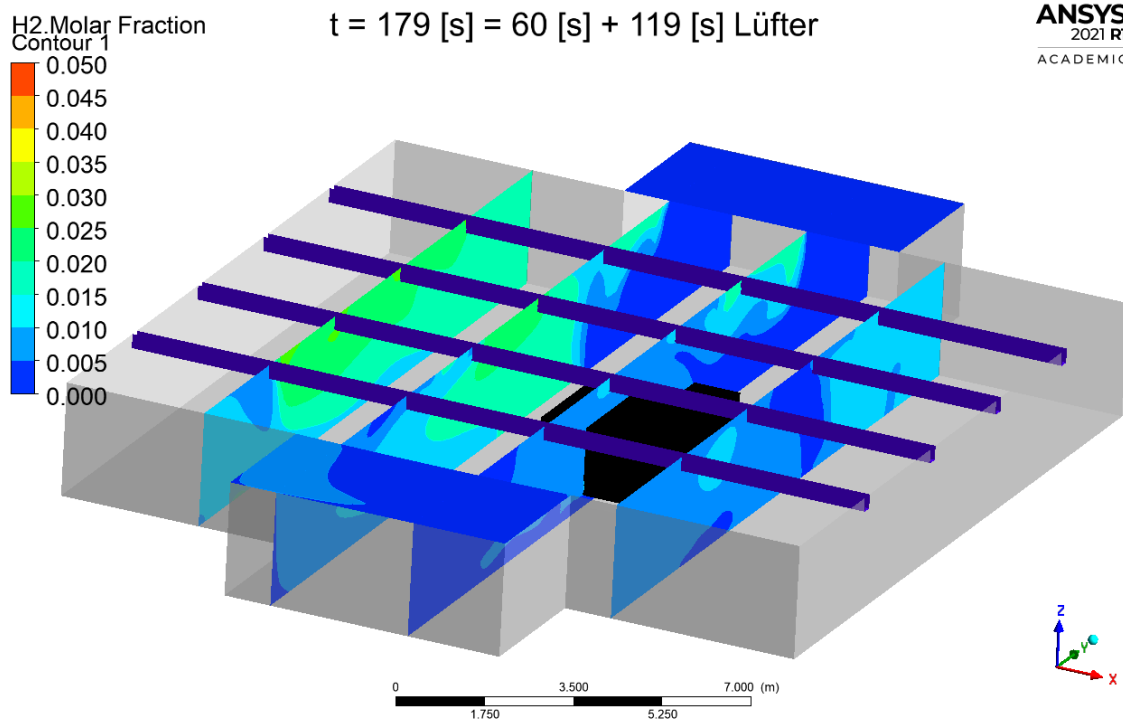


Abbildung 31: H₂-Konzentration in mehreren Längsschnitten knapp 2 Minuten (119 s) nach Ende des Ausströmens von H₂. Der horizontal ausgerichtete Lüfter startete zu $t=60 \text{ s}$ und lief 119 s.

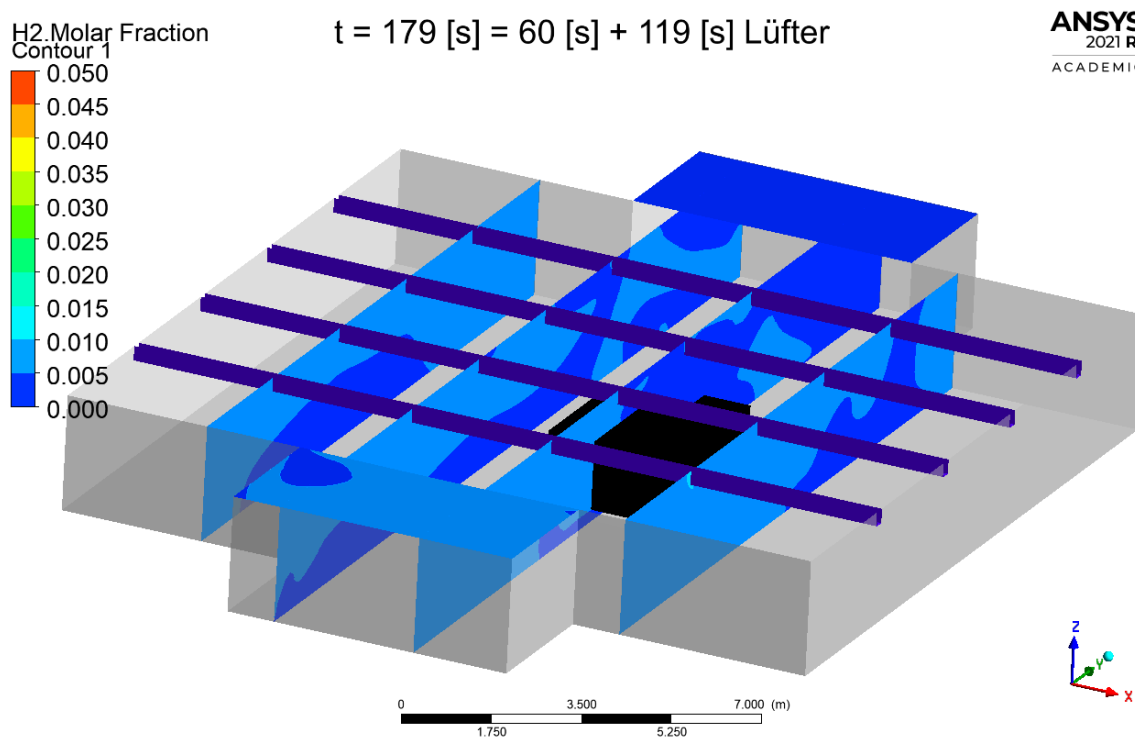


Abbildung 32: H₂-Konzentration in mehreren Längsschnitten 2 Minuten (119 s) nach Ende des Ausströmens von H₂. Der 20° nach oben angestellte Lüfter startete zu $t=60 \text{ s}$ und lief 119 s.

Nachdem der horizontal ausgerichtete Lüfter knapp 2 Minuten gelaufen ist, ist kein zündfähiges Gemisch mehr vorhanden, die maximale Konzentration liegt bei etwa 3 % (Abb. 31).

Nachdem der um 20° nach oben angestellte Lüfter knapp 2 Minuten gelaufen ist, ist auch hier kein zündfähiges Gemisch mehr vorhanden, die maximale H₂-Konzentration liegt sogar unterhalb von 1 %. Eine Ausrichtung des Ventilators zur Decke hin ist noch effektiver, weil die höhere Strömungsgeschwindigkeit in der Nähe der Decke die dort verbliebenen H₂-Gemische stärker mitreißt (Abb. 32).

5.3.4. Freisetzung unterhalb der Lüftungskanäle

In einem Forschungsbericht aus dem Jahr 2020 [10] wurde die Freisetzung von Erdgas in einer Tiefgarage bei laufender Lüftung untersucht.

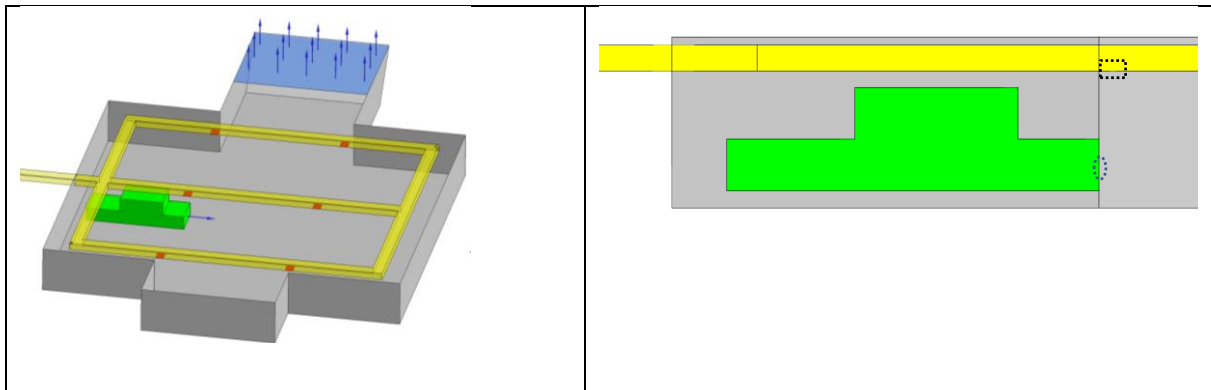


Abbildung 33: Garagenmodell mit Lokalisation der Randbedingungen; Breite in x-Richtung: 16 m, Länge in y-Richtung: 15 m, Höhe: 2 m..

Es sollte untersucht werden, ob zündfähige Erdgas-Luft-Mischungen in der Lüftung auftreten können. Hierzu wurde das Fahrzeug unterhalb der Ansaugöffnung eines Lüftungskanals positioniert, das Erdgas trat hierbei wieder diffus unterhalb des Fahrzeugs aus. Es zeigte sich, dass zündfähige Mischungen in den Lüftungskanälen vorliegen können (Abb. 34).

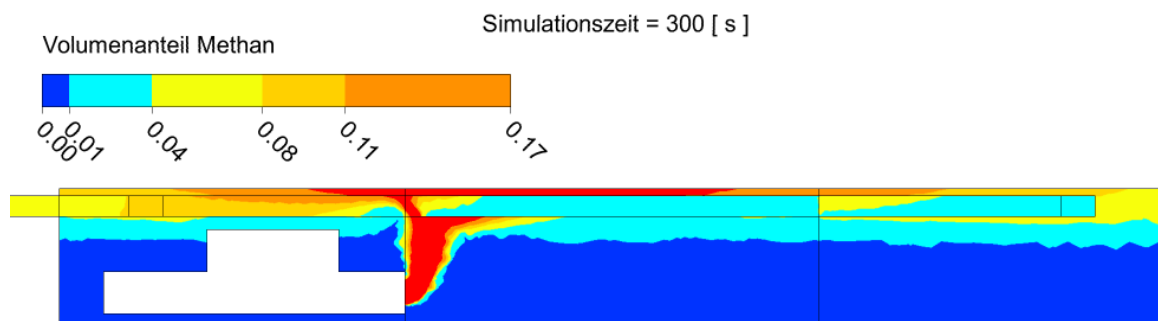


Abbildung 34: Längsschnitt der Methanausbreitung nach 5 Minuten bei $\dot{m} = 50 \text{ g/s}$ und diffuser Ausströmung. Die zündfähigen Konzentrationen (UEG 4,4%, OEG 17%) sind gelb, hellorange und orange eingefärbt. Blau und hellblau liegen unterhalb der UEG und rot oberhalb der OEG

Mit Wasserstoff wurden hierzu keine Berechnungen durchgeführt, es ist aber mit Sicherheit davon auszugehen, dass bei einer Freisetzung von Wasserstoff unterhalb der Öffnung eines Lüftungskanals ebenfalls zündfähige Mischungen auftreten können.

5.4. H₂-Ausbreitung im Tunnel mit hufeisenförmigen Querschnitt

Das gleiche Fahrzeug steht bei diesen Berechnungen in einem Tunnel bergmännischer Bauweise, d. h. mit einem hufeisenförmigen Querschnitt. Der Tunnel hat eine Gesamtlänge von 257,5 Meter, der Abstand zum Fahrzeug beträgt nach links bzw. nach unten hin 102 Meter und nach rechts hin 151 Meter. Die Steigung beträgt jeweils 0 %, 5 % und 10 %.

Im Tunnel liegt bei der Simulation zu Beginn der Wasserstofffreisetzung jeweils ruhende Luft vor.

5.4.1. Tunnel ohne Steigung

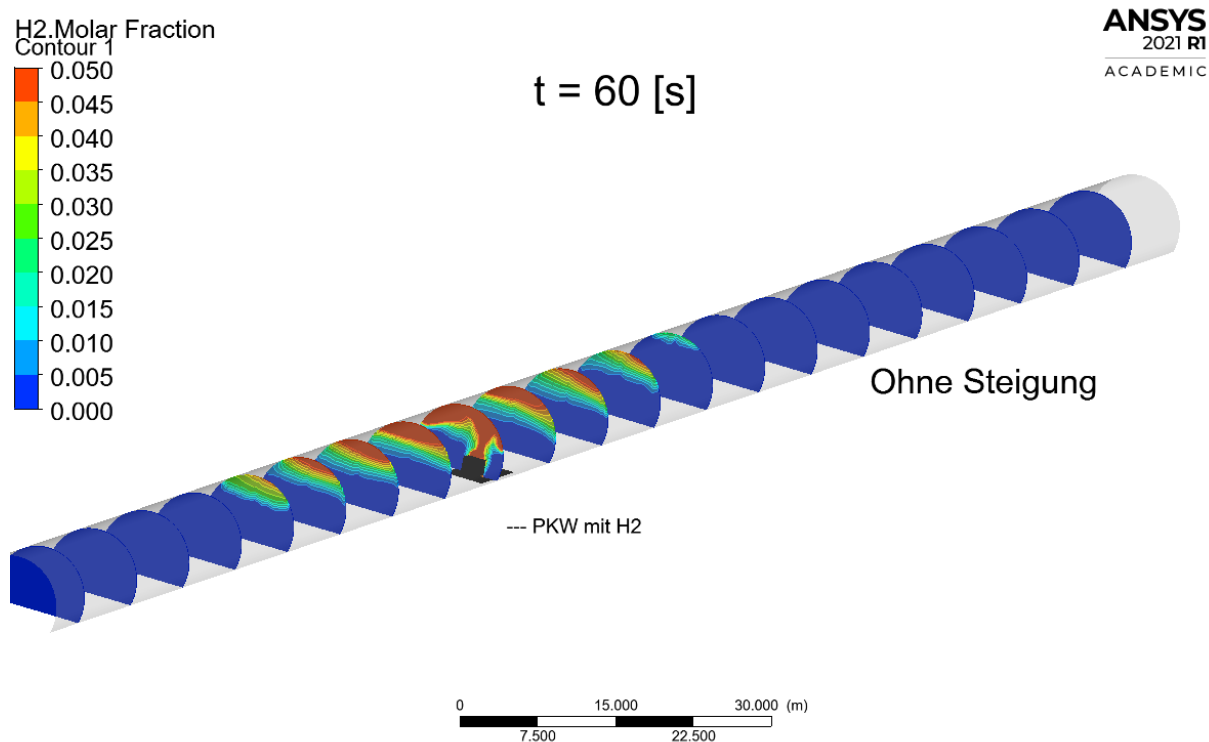


Abbildung 35: H₂-Konzentrationen nach 60 s (unmittelbar nach Ende des Ausströmens von H₂) im Tunnel ohne Steigung.

Nach 60 Sekunden haben sich in einem Abstand von rund 50 Metern vor und hinter dem Fahrzeug zündfähige Mischungen an der Tunneldecke entlang ausgebreitet.

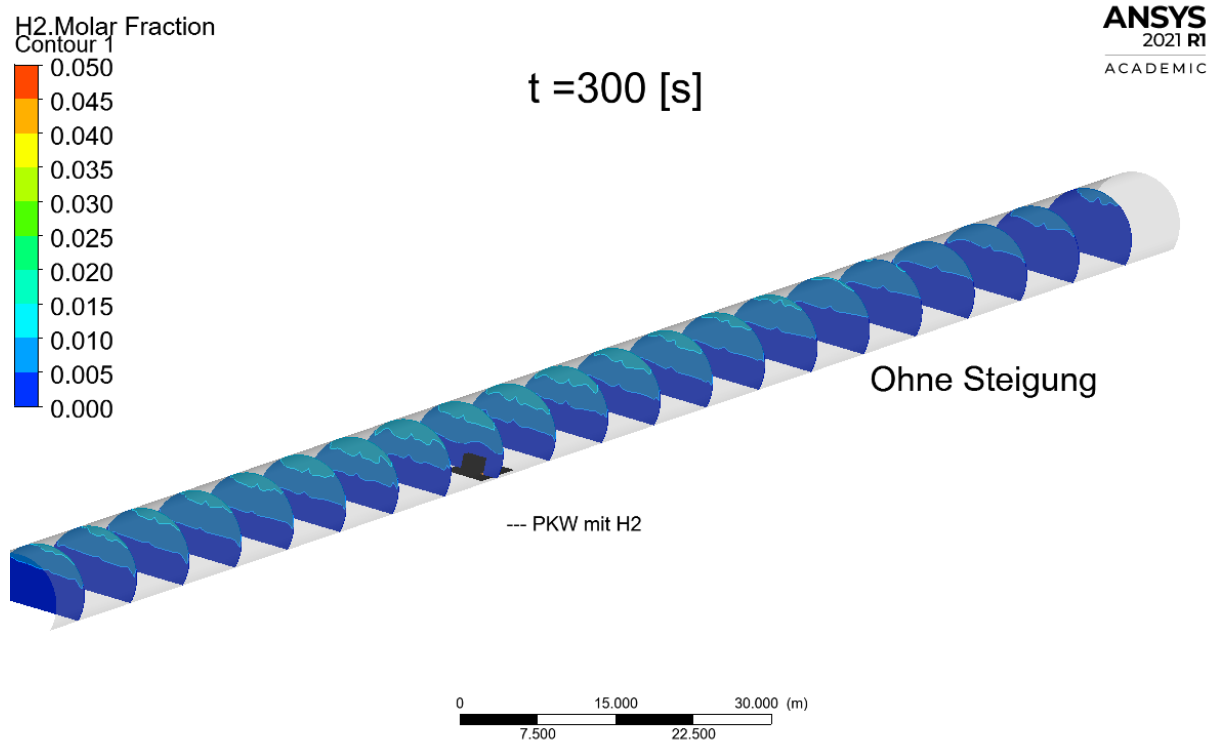


Abbildung 36: H_2 -Konzentrationen nach 5 min im Tunnel ohne Steigung.

Beim Tunnel ohne Steigung breitet sich H_2 in beide Richtungen praktisch gleich schnell aus, wobei die Ausbreitungsgeschwindigkeit mit zunehmender Verdünnung abnimmt. Nach 60 s ist H_2 in beide Richtungen etwa 50 m weit geströmt (Abb. 35), so dass eine mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit von 1 m/s abgeschätzt werden kann. Im weiteren Verlauf benötigt es 300 s, bis H_2 am Ende des Tunnels nach 150 m ausströmt, die mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit ist auf 0,5 m/s gesunken (Abb. 36). Der Wasserstoff wurde dabei an der Tunneldecke entlang so weit verdünnt, dass keine zündfähigen Gemische mehr vorliegen.

5.4.2. Tunnel mit 5 % Steigung

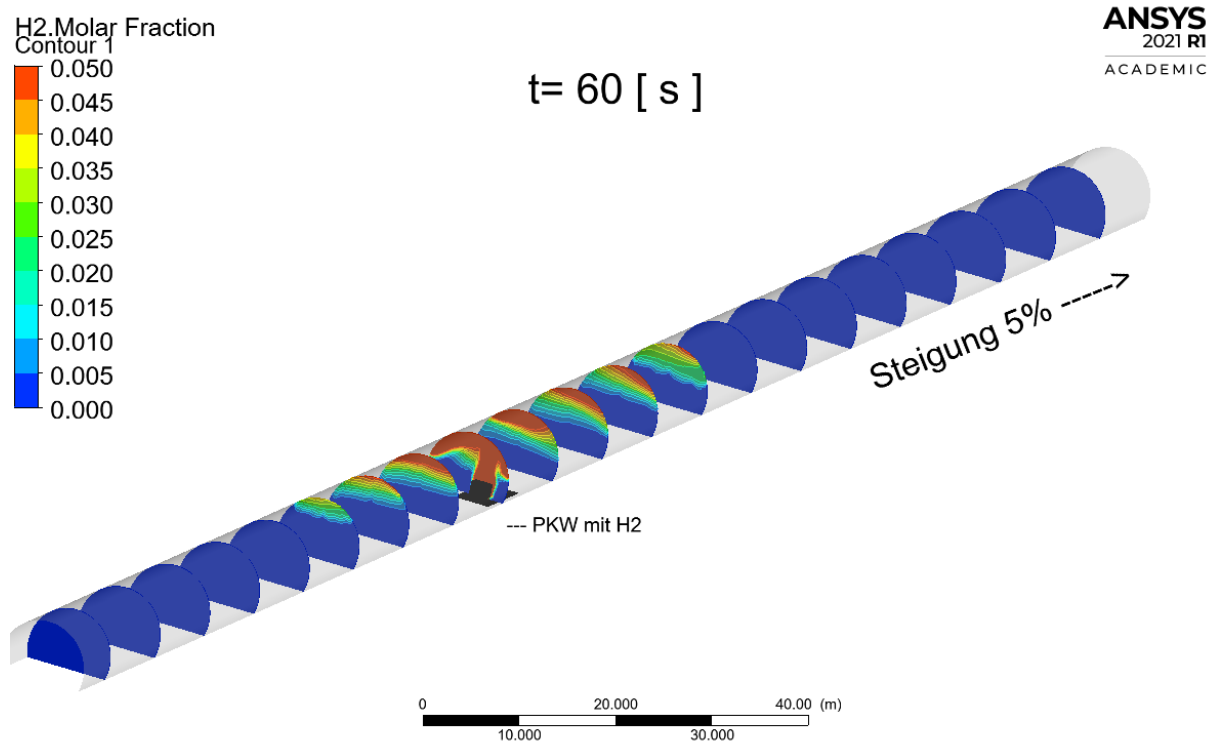


Abbildung 37: H₂-Konzentrationen nach 60 s im Tunnel mit 5% Steigung

Nach 60 Sekunden haben sich in einem Abstand von rund 60 Metern vor rund 40 Meter hinter dem Fahrzeug zündfähige Mischungen an der Tunneldecke entlang ausgebreitet. Die Steigung von 5 % ist nicht ausreichend, um eine ausschließliche Ausbreitung des Wasserstoffs in Richtung der Steigung zu bewirken. Endet die Freisetzung, strömt Wasserstoff ausschließlich in Richtung des Anstiegs.

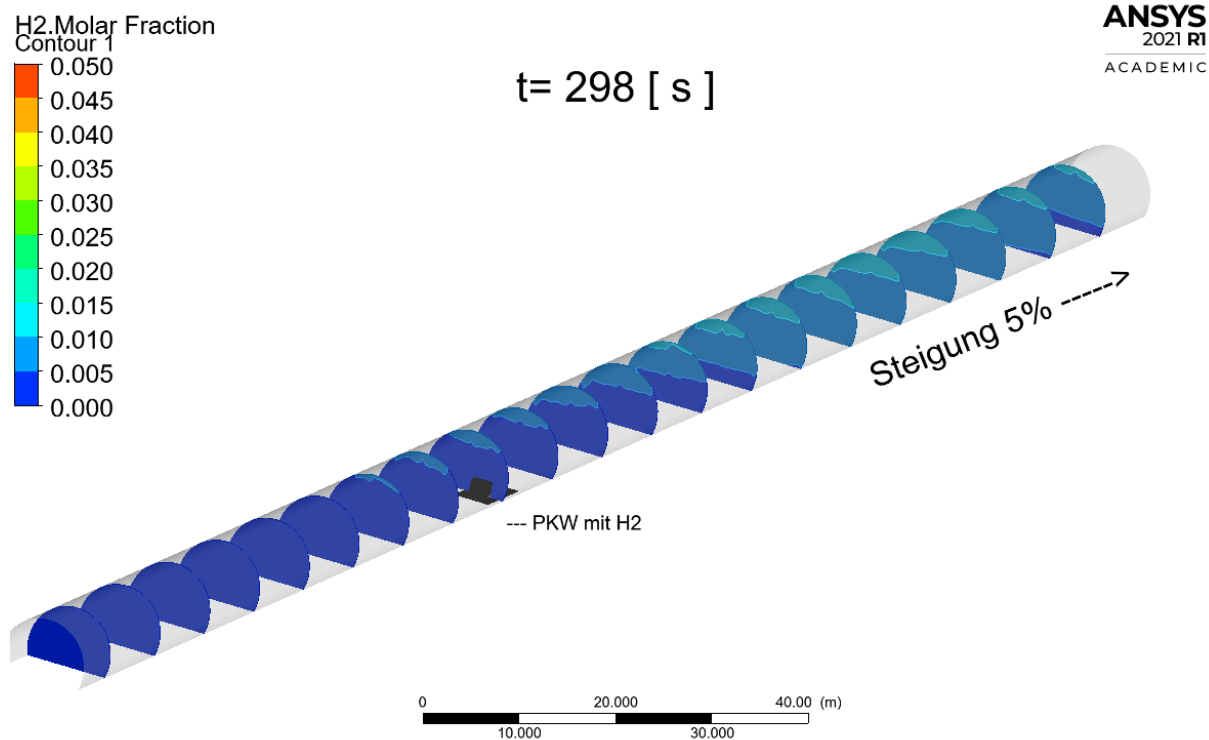


Abbildung 38: H₂-Konzentrationen nach knapp 5 min im Tunnel mit 5 % Steigung.

H₂ breitet sich jetzt stärker und etwas schneller als beim ebenen Tunnel in Richtung des Anstiegs aus. Nach einigen Minuten hat sich der Wasserstoff auch hier so weit verdünnt, dass keine zündfähigen Gemische mehr vorliegen (Abb. 38), wobei der Wasserstoff der Steigung entlang strömt. Im Nahbereich des PKW sind an der Tunneldecke noch geringe Konzentrationen H₂ vorhanden.

5.4.3. Tunnel mit 10 % Steigung

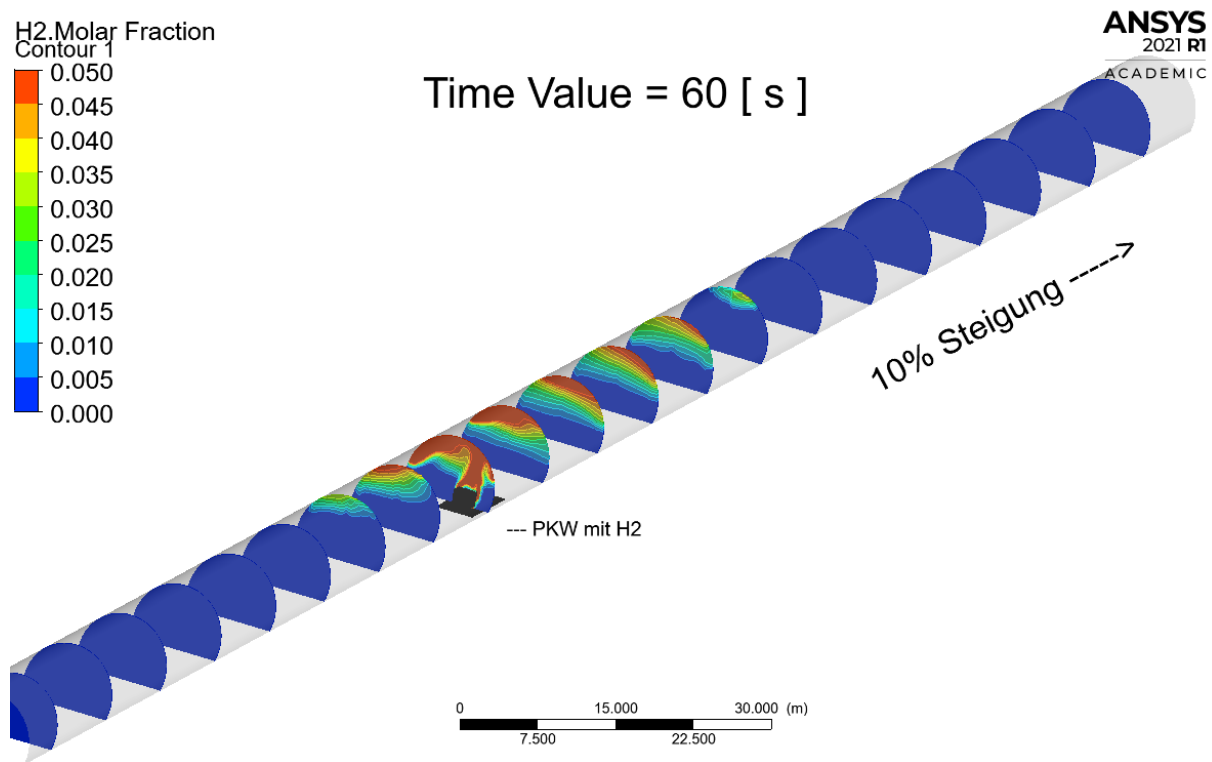


Abbildung 39: H₂-Konzentrationen nach 60s im Tunnel mit 10% Steigung.

Nach 60 Sekunden haben sich in einem Abstand von rund 75 Metern vor und rund 25 Meter hinter dem Fahrzeug zündfähige Mischungen entlang der Tunneldecke ausgebreitet. Auch hier ist die Steigung von 10 % ist nicht ausreichend, um eine ausschließliche Ausbreitung des Wasserstoffs in Richtung der Steigung zu gewährleisten. Endet die Freisetzung, strömt Wasserstoff ausschließlich in Richtung des Anstiegs.

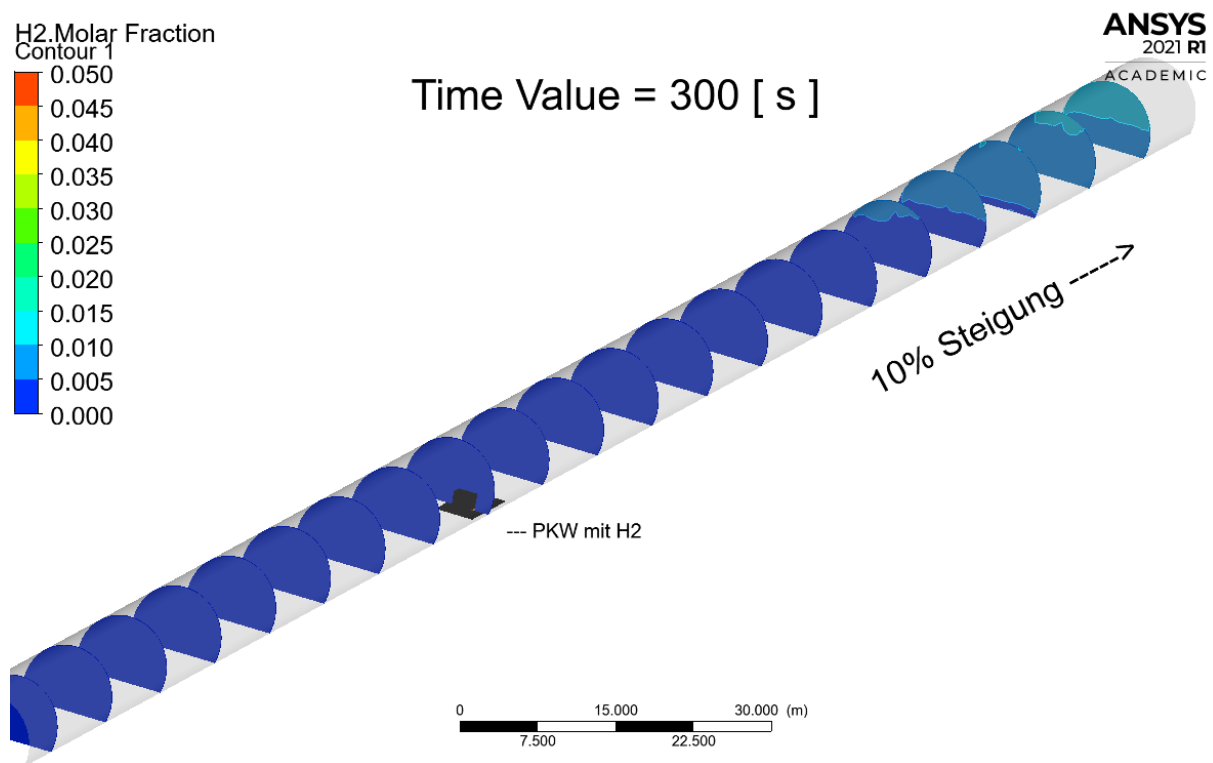


Abbildung 40: H_2 -Konzentrationen nach 5 min im Tunnel mit 10 % Steigung.

H_2 breitet sich jetzt ausschließlich in Richtung des Anstiegs aus, zündfähige Mischungen sind im Tunnel keine mehr vorhanden. Nach fünf Minuten ist ein Großteil des Wasserstoffs (Abb. 40) aus dem oberen Tunnelportal bereits ausgeströmt.

5.5. Freisetzung im Tunnel mit rechteckigem Querschnitt

5.5.1. Tunnel ohne Steigung und ohne Längsströmung

Hier wird die Freisetzung in einem Tunnel offener Bauweise mit annähernd rechteckigem Querschnitt und ohne Längsströmung untersucht. Die Röhre hat eine Breite von 11 m, eine Höhe von 5,2 m und eine Länge von 200 m.

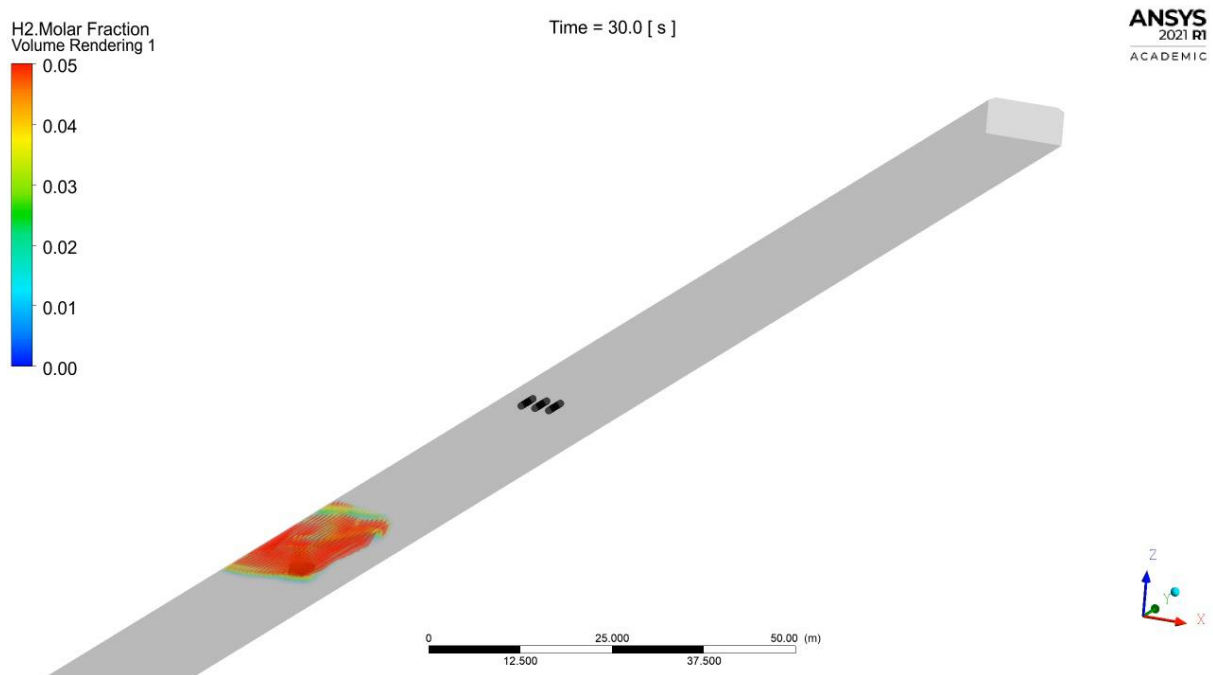


Abbildung 41: H₂-Konzentrationen nach 30 s.

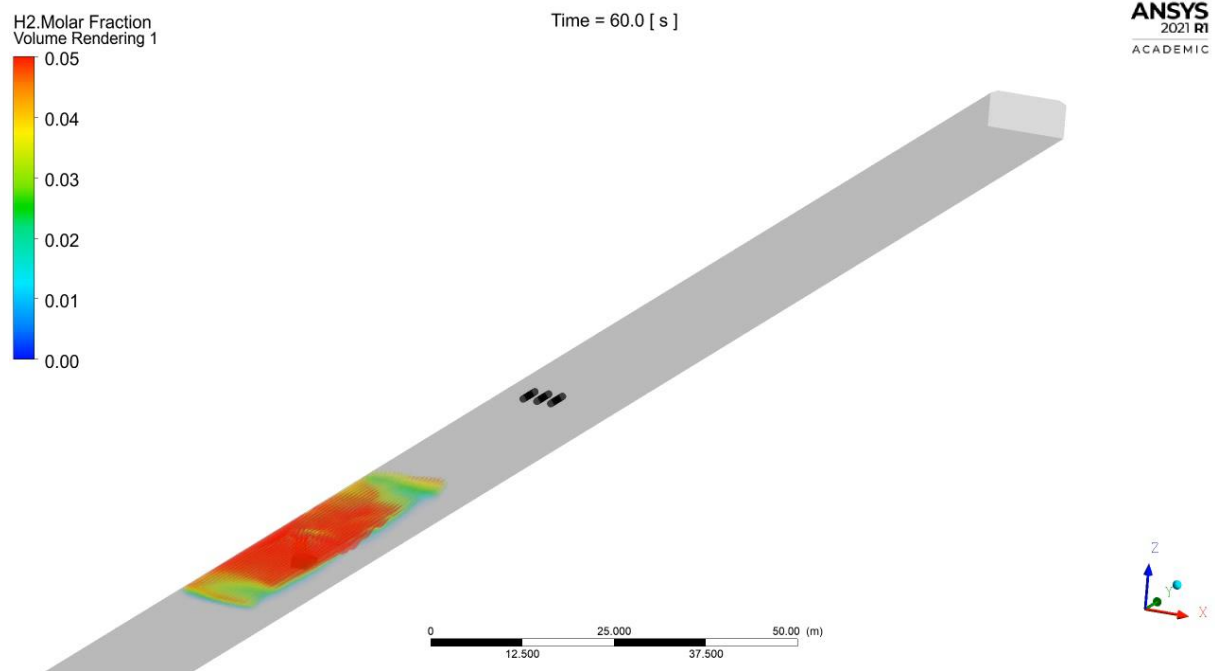


Abbildung 42: H_2 -Konzentrationen nach 60 s.

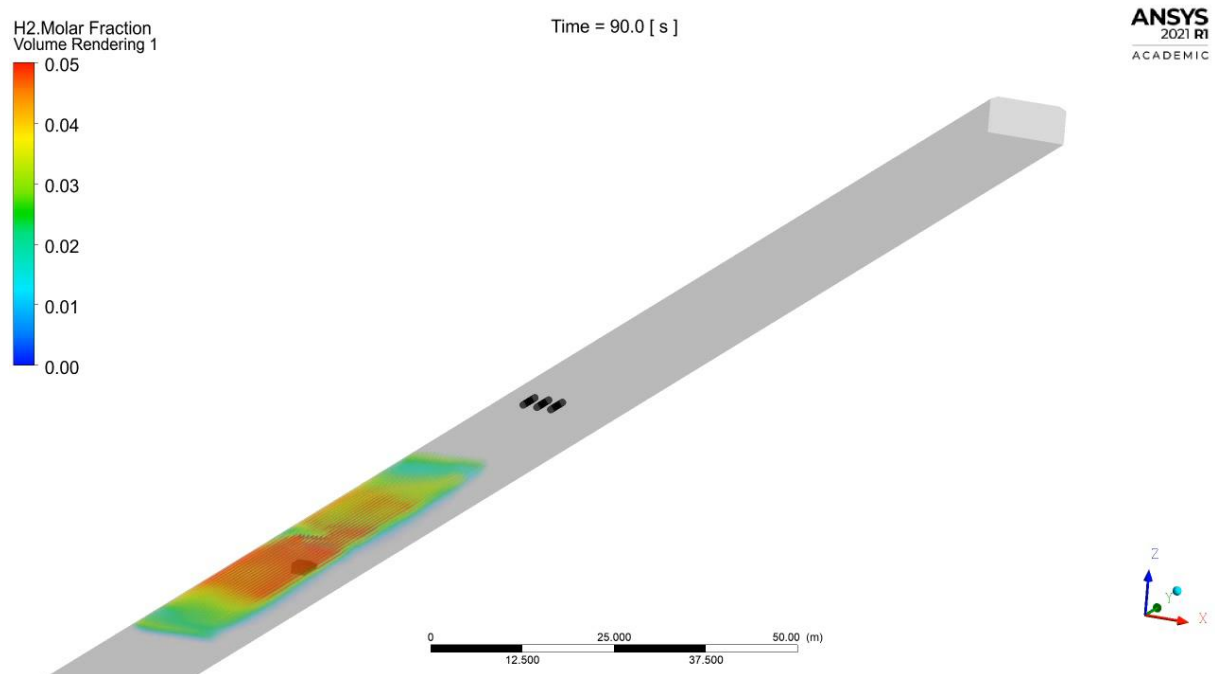


Abbildung 43: H_2 -Konzentrationen nach 90 s

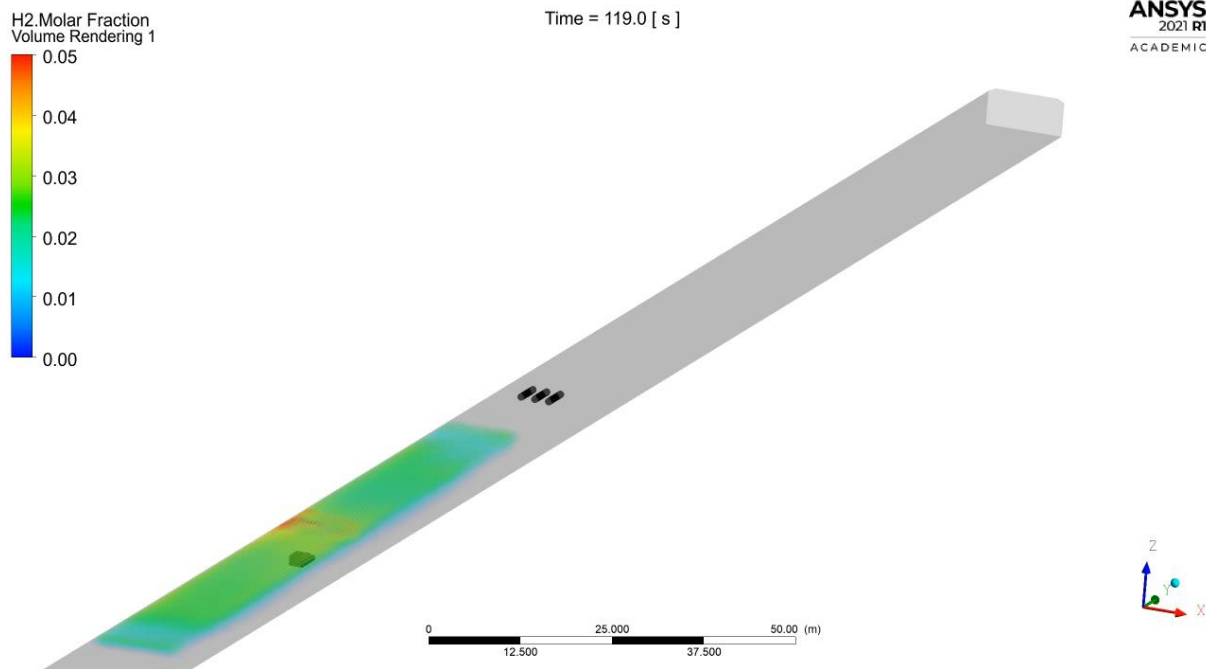


Abbildung 44: H₂-Konzentrationen nach 119 s

Zum Ende des Ausströmens (nach 60 s) liegen ca. 25 m vor und hinter dem Fahrzeug zündfähige Mischungen unter der Decke vor. Die Ausbreitung ist langsamer als beim Tunnel bergmännischer Bauweise in Kap. 5.4., weil die Decke breiter ist.

Bereits nach einer weiteren Minute ist der Wasserstoff so weit verdünnt, dass nur noch unmittelbar oberhalb des Fahrzeugs eine zündfähige Mischung vorliegt.

5.5.2. Tunnel offener Bauweise mit Längsströmung / Axiallüfter in Betrieb

Die Axialventilatoren erzeugen eine mittlere Längsgeschwindigkeit von 3 ms^{-1} im freien Tunnelquerschnitt. Numerisch werden die Ventilatoren als Impulsquelle dargestellt, d. h. Luft wird am Eintritt angesaugt und beschleunigt ausgestoßen.

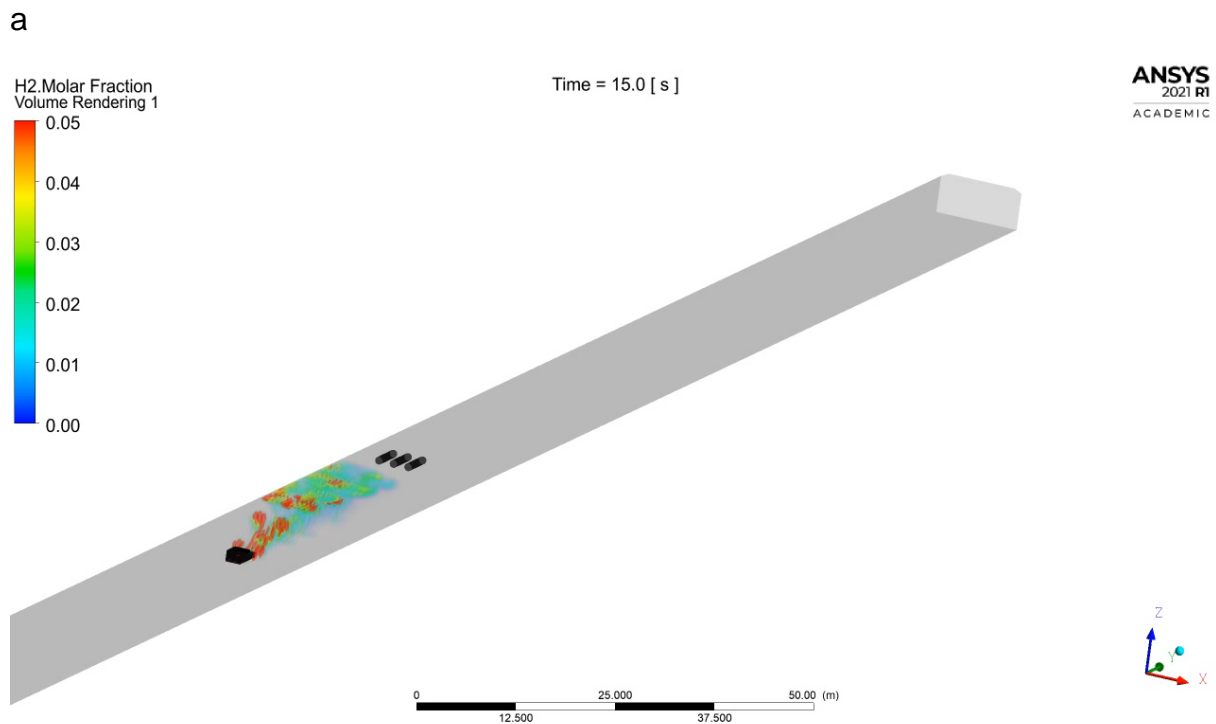


Abbildung 45: H_2 -Konzentrationen nach 15 s

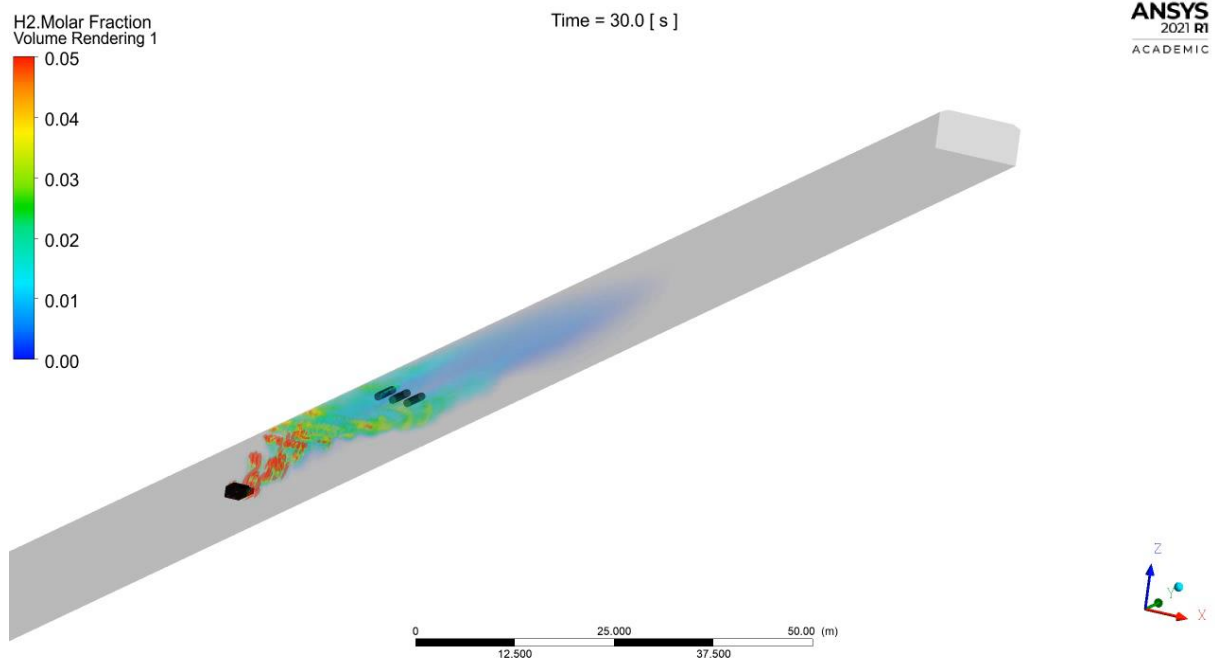


Abbildung 46: H_2 -Konzentrationen nach 30 s

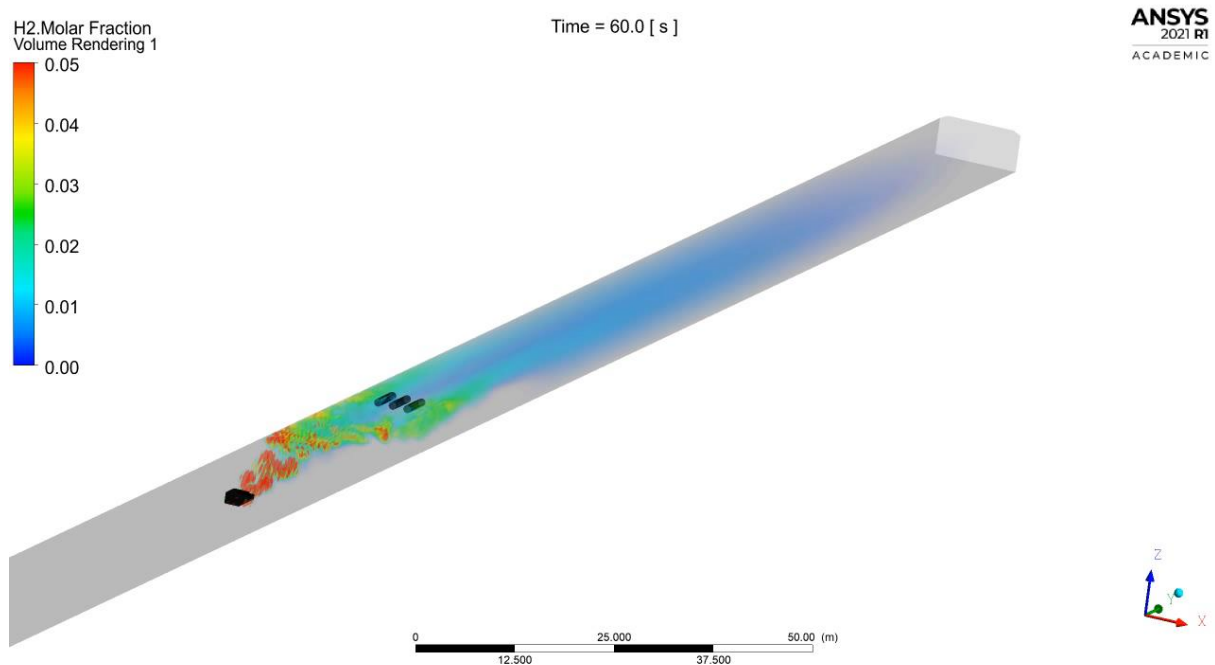


Abbildung 47: H_2 -Konzentrationen nach 60 s

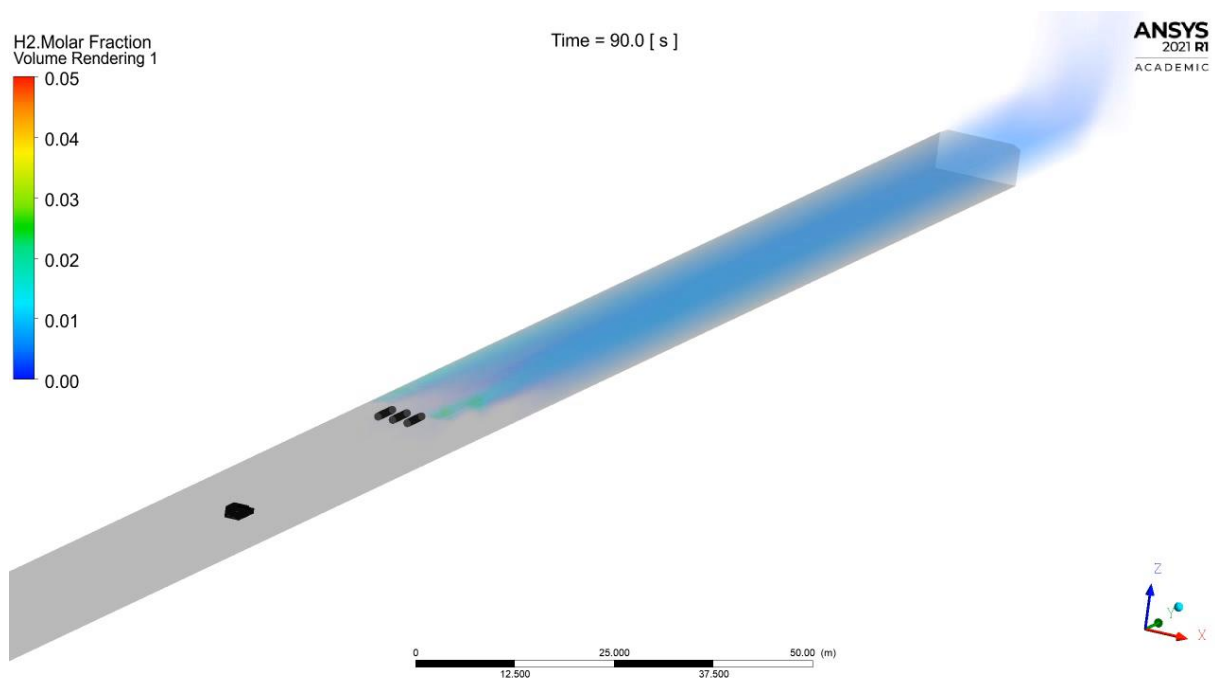


Abbildung 48: H_2 -Konzentrationen nach 90 s

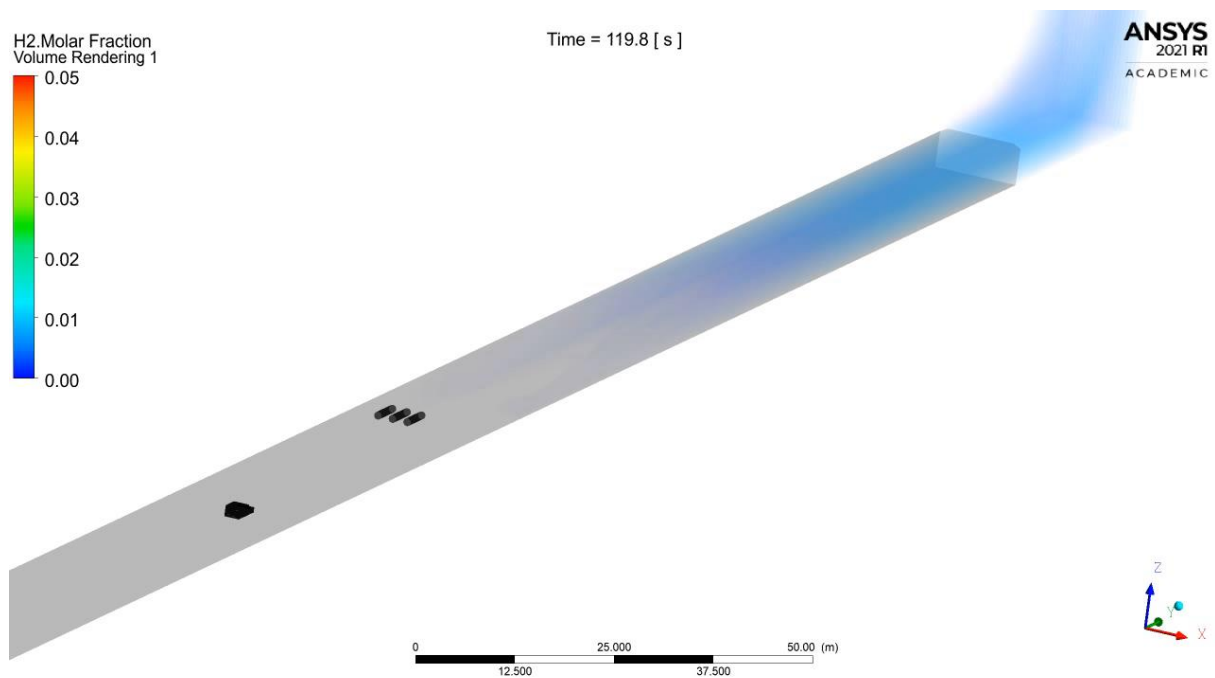


Abbildung 49: H_2 -Konzentrationen nach 120 s

Der PKW steht 50 Meter vor den Axialventilatoren. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Tunnelquerschnitt beträgt 3 ms^{-1} . Die maximale H_2 -Konzentration beim Eintritt in die Ventilatoren beträgt 2-3 %. Es ist offensichtlich, dass bei einem geringeren Abstand des Fahrzeugs zum Lüfter zündfähige Mischungen durch den Lüfter hindurchströmen. In diesem Fall wäre eine Entzündung der H_2 -Luft-Gemische sehr wahrscheinlich.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Bei der Freisetzung von Wasserstoff bilden sich in der Luft zündfähige Mischungen, die auftriebsbedingt rasch nach oben strömen.

Im Freien führt dies dazu, dass kurz nach Stoppen der Wasserstofffreisetzung die zündfähigen Mischungen nach oben weggeströmt sind. In Bodennähe können zündfähige Mischungen nur dann in weiterer Entfernung vorliegen, wenn der Wasserstoff in einem horizontal ausgerichteten Freistrahle austritt oder starker Wind weht.

In teilverbauten Räumen wie Tunnel oder Tiefgaragen strömen die zündfähigen Mischungen hoch zur Decke und dann an ihr entlang, wobei sie sich bei ungehinderter Ausbreitung rasch bis unterhalb der Zündgrenzen verdünnen.

In hohen, oben geschlossenen Räumen befinden sich nach Ende der Wasserstofffreisetzung zündfähige Mischungen nur unterhalb der Decke. Sind während der Freisetzung noch zündfähige Mischungen in Bodennähe anzutreffen, verdünnen sich diese nach Stoppen der Freisetzung entweder bis weit unter die UEG verdünnt oder sie strömen nach oben weg. Bei diesem Szenario besteht die Gefahr, dass die Einsatzkräfte durch die Nutzung von Handgeräten zur Ex-Messung scheinbar unkritische Konzentrationen im Raum vorfinden, weil die Proben typischerweise in 1-2 Meter Höhe entnommen werden.

In einer Tiefgarage, in der keine Luftströmung vorhanden ist, können sich die H₂-Luft – Mischungen unter der Decke zwischen den Unterzügen ansammeln, da diese die weitere Ausbreitung und Verdünnung verhindern.

Mithilfe eines Lüfters könnten die Mischungen schnell entfernt werden. Allerdings erscheint die Notwendigkeit des Einsatzes von Lüftern in einer Tiefgarage oder Tunnel überhaupt nicht nötig zu sein. Denn beim Eintreffen der Feuerwehr dürfte nur in den seltensten Fällen noch lokal eine Ex-fähige Atmosphäre vorliegen.

Lediglich bei Ansammlungen mit Räumen ohne durchlässige Decke könnte es sinnvoll oder gar notwendig sein, die Ex-fähigen Mischungen mit einem Lüfter zu entfernen. Es hängt davon ab, wie durchlässig die Decke bzw. Wand für Wasserstoff ist. Dies kann

zum jetzigen Zeitpunkt nicht abgeschätzt werden und ist daher Thema eines laufenden Forschungsprojektes, dessen Ergebnisse spätestens Ende 2026 vorliegen sollten.

7. Literaturverzeichnis

- [1] z. B. Zierep, J: Grundzüge der Strömungslehre, 1987. G. Braun Karlsruhe
- [2] z. B. Gestis Datenbank, <https://gestis.dguv.de/>
- [3] Li, Z.Y., Makarov, D., Keenan, J. and Molkov, V: CFD STUDY OF THE UNIGNITED AND IGNITED HYDROGEN. RELEASES FROM TRPD UNDER A FUEL CELL CAR https://h2tools.org/sites/default/files/2019-08/paper_322.pdf
- [4] https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2023/03/L7_HyResponder_Level4_DE.pdf
- [5] https://de.wikipedia.org/wiki/Machscher_Knoten
- [6] Kazemi, M., Brennan, S., Molkov, V: Hydrogen Safety by Design: Exclusion of Flame Blow-Out from a TPRD. *Hydrogen* **2024**, 5(2), 280-292; <https://doi.org/10.3390/hydrogen5020016>
- [7] <https://hytunnel.net/>
- [8] z.B. Ansys CFX User's Guide, <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx>
- [9] Untersuchung der Permeation von Kohlenstoffmonoxid durch komplette Wandaufbauten. IMK Bericht 209, **2021**. https://ibk-heyrothsberge.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MI/IDF/IBK/Dokumente/Forschung/Fo_Publikationen/imk_ber/IMK-209neu.pdf
- [10] <https://www.youtube.com/channel/UCiS7b8U81cf3kB67xCQQQag> oder auf der homepage der FFB <https://www.ffb.kit.edu/> nach unten scrollen und auf QRcode YTKanal klicken,
- [11] <https://www.bgrci.de/exinfode/ex-schutz-wissen>
- [12] Besonderheiten und Risiken bei alternativ angetriebenen Fahrzeugen, IMK Bericht 159, **2020**, https://www.ffb.kit.edu/download/Forschungsbericht_159_21_Dez2022_korr.pdf

