

Versuche zum Ausbreitungsverhalten von wasserstoffhaltigen Gasgemischen

Institut für Sicherheitstechnik/Schiffssicherheit.de

Friedrich-Barnewitz-Str. 4c
18119 Rostock-Warnemünde

Tel.: 0381 / 77899 628

Mail: institut@schiffssicherheit.de

Web: schiffssicherheit.de

Dr. Werner Frühlingsdorf

Dr. Dana Meißner

Stand April 2026

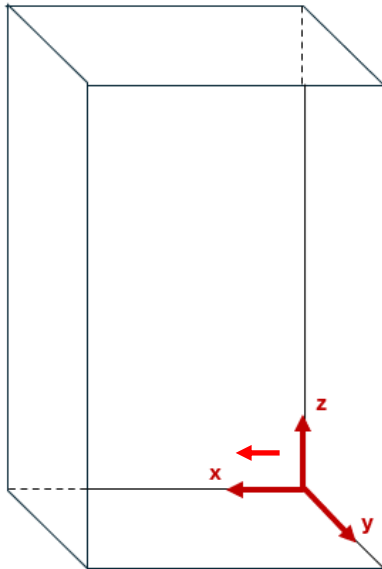
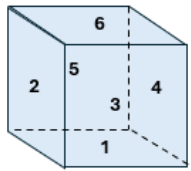


Mit den durchgeführten Messungen soll untersucht werden

- wie sich verschiedene wasserstoffhaltige Gasgemische in einem geschlossenen Volumen ausbreiten.
- wie sich bestimmte Randbedingungen (z.B. ein Temperaturgradient im Messvolumen) auf das Ausbreitungsverhalten auswirken.
- ob sich sensorisch unterschiedliche Muster in Abhängigkeit vom Einlassort des Gasgemisches ergeben, so dass ein intelligentes Sensornetzwerk auf die Erkennung des Gasfreisetzungsortes trainiert werden könnte.

- Die Messungen wurden in einem gasdichten Schaltschrank (Messvolumen) durchgeführt (Höhe: 2,00 m, Breite 0,8 m, Tiefe 0,6 m).
- Die verwendeten Wasserstoffsensoren sind elektrochemische Sensoren. Sie messen fortlaufend ca. alle 4 Sekunden und übertragen das Signal per Funk an die Datenbank, aus der die Auswertung erfolgt.
- Die Messungen wurden mit zwei verschiedenen Gasgemischen durchgeführt:
Gasgemisch 1: $N_2/H_2 = 80/20$ („Formiergas“) und Gasgemisch 2 = $He/H_2 = 60/40$
- Bei den Messungen wurden variiert:
 - Temperaturgradient zwischen Boden und Decke des Messvolumens
 - Geschwindigkeit des Einspritzens des Gasgemisches
 - Ort des Einspritzens (von unten (Boden) oder von oben (Decke) des Messvolumens)
 - Richtung des Einspritzens (nach links, nach rechts, nach vorn, nach hinten, nach oben, nach unten)

$x = 0$: rechte Wand
 $y = 0$: Rückwand
 $z = 0$: Boden



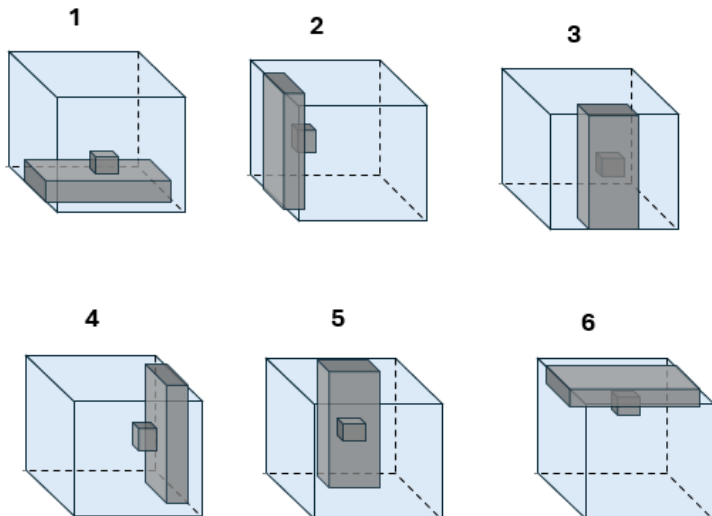
Das Messvolumen wurde in räumliche Volumen-Teilbereiche (Voxel) unterteilt, um die Position der Sensoren genau zu beschreiben und einen Vergleich mit Simulationsergebnissen zu ermöglichen. Ein Voxel ist ein Würfel mit einer Kantenlänge von 10 cm.

Für die Zuordnung der Voxel-Koordinaten wird ein Koordinatensystem in das Messvolumen gelegt, dessen Ursprung in der hinteren rechten Ecke liegt.

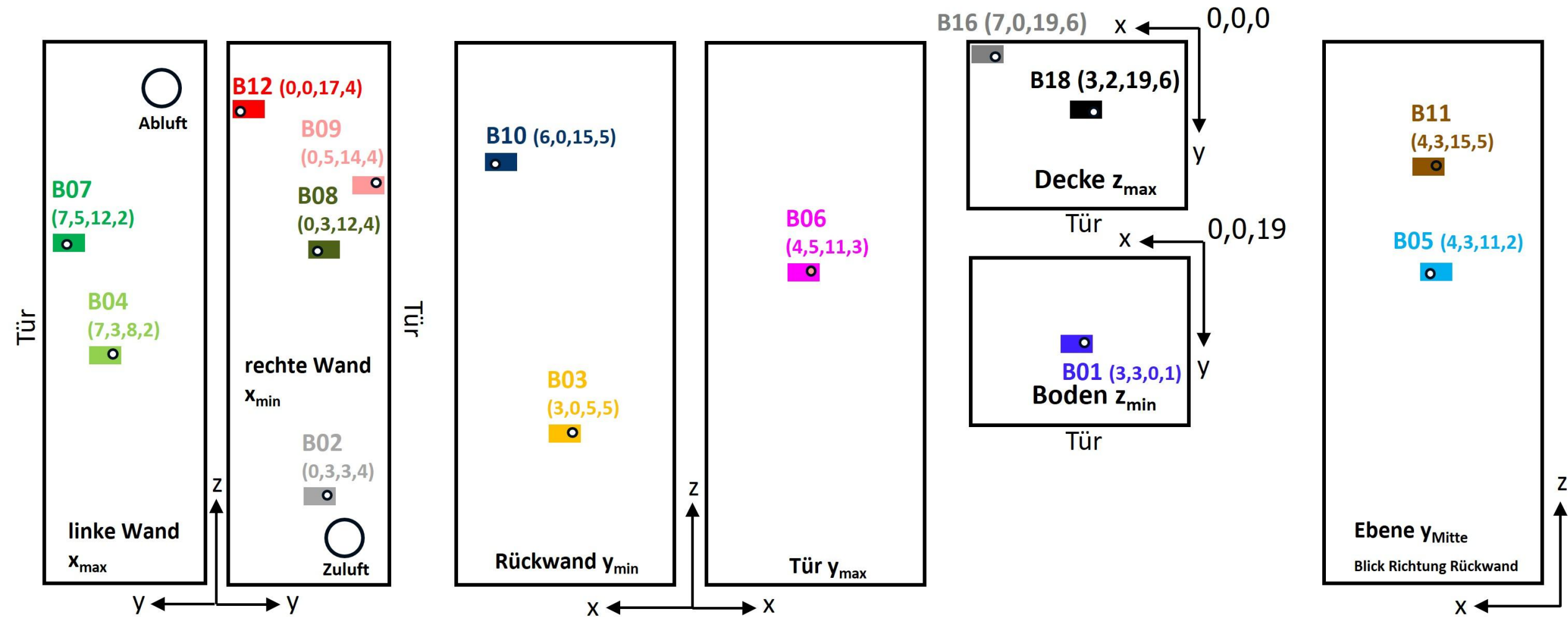
Jeder Sensor hat eine aktive Fläche, die innerhalb des Raumes in verschiedene Richtungen zeigen kann. Jedem Sensor wurde zur Positionsbeschreibung daher neben seinem Voxel eine weitere Zahl (1-6) zugefügt, um seine Orientierung im Voxel-Würfel zu beschreiben.

Beispiel:

der Sensor B01 (3,3,0,1) befindet sich im Voxel 3,3,0 (also am Boden des Messvolumens, da $z=0$) und seine aktive Fläche zeigt nach oben, da letzter Parameter = 1)

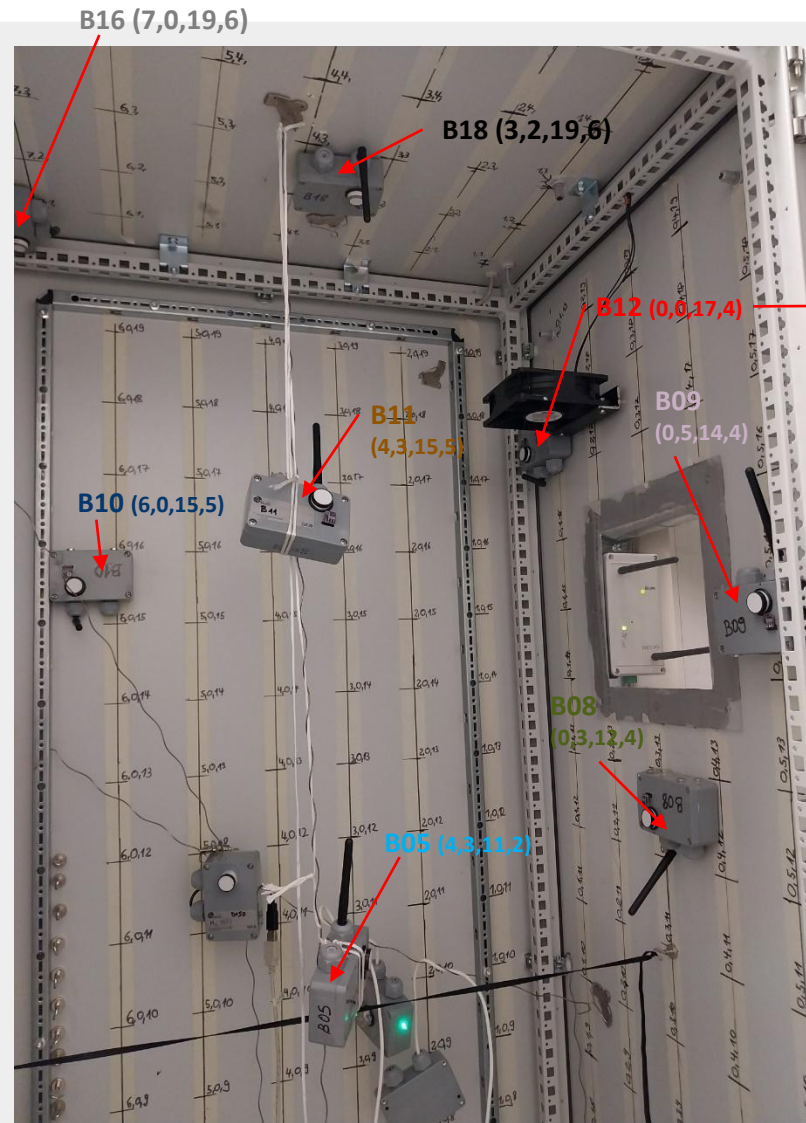
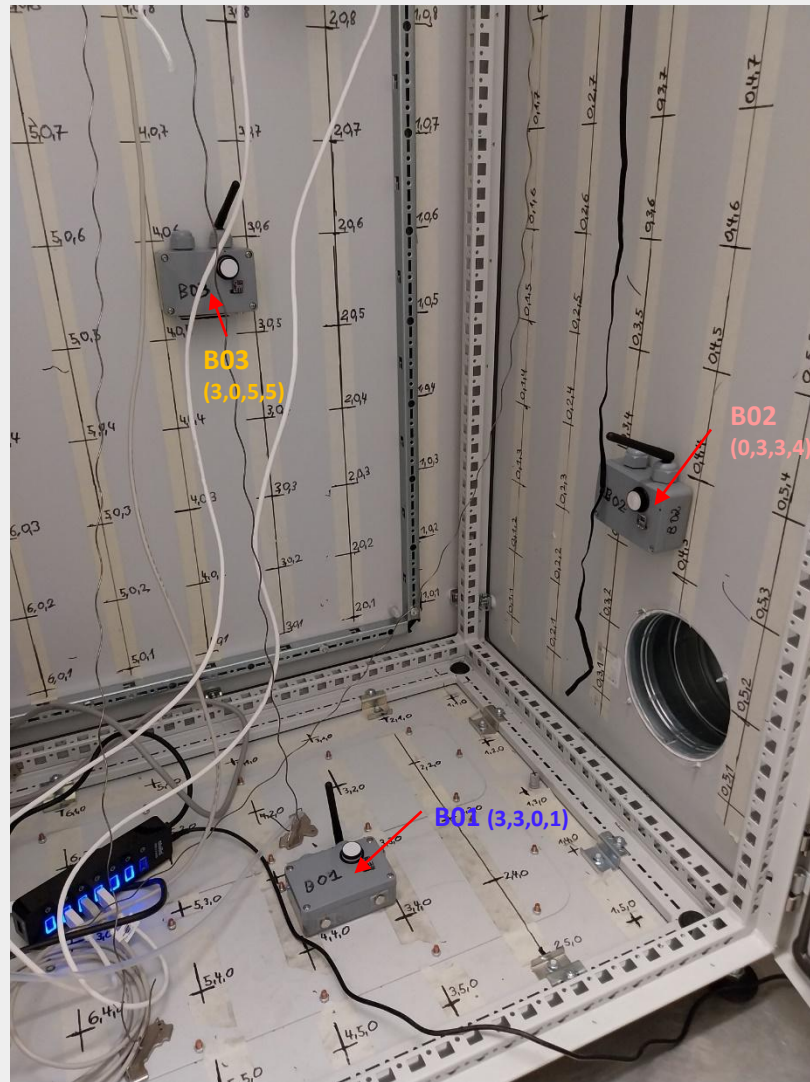


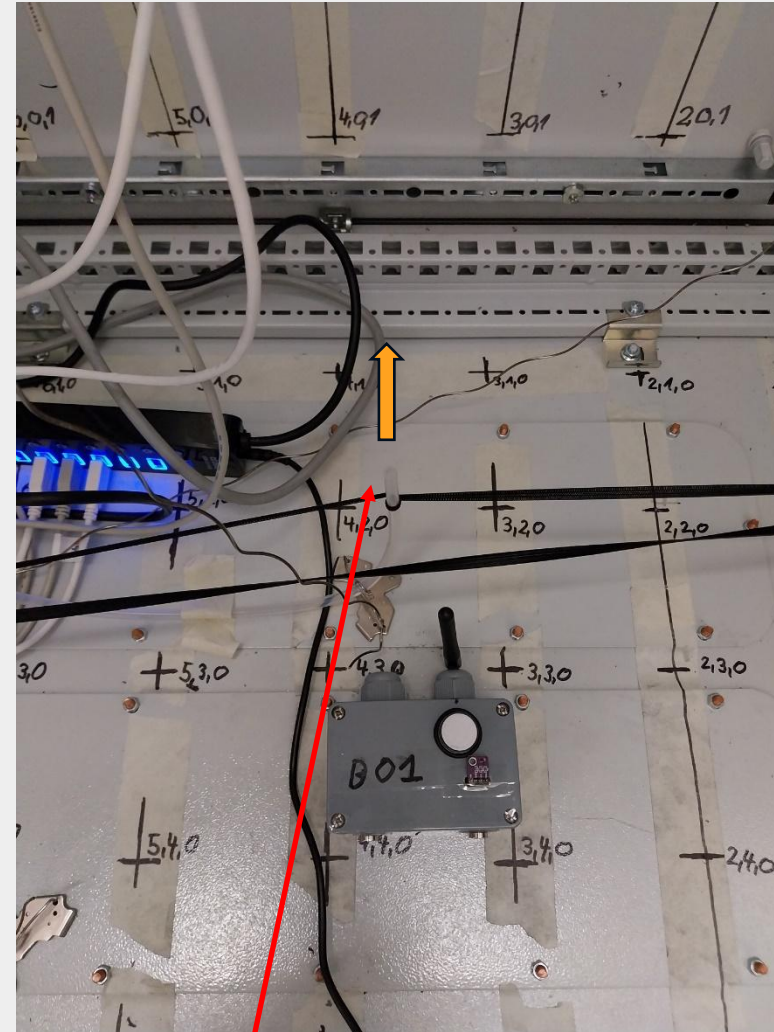
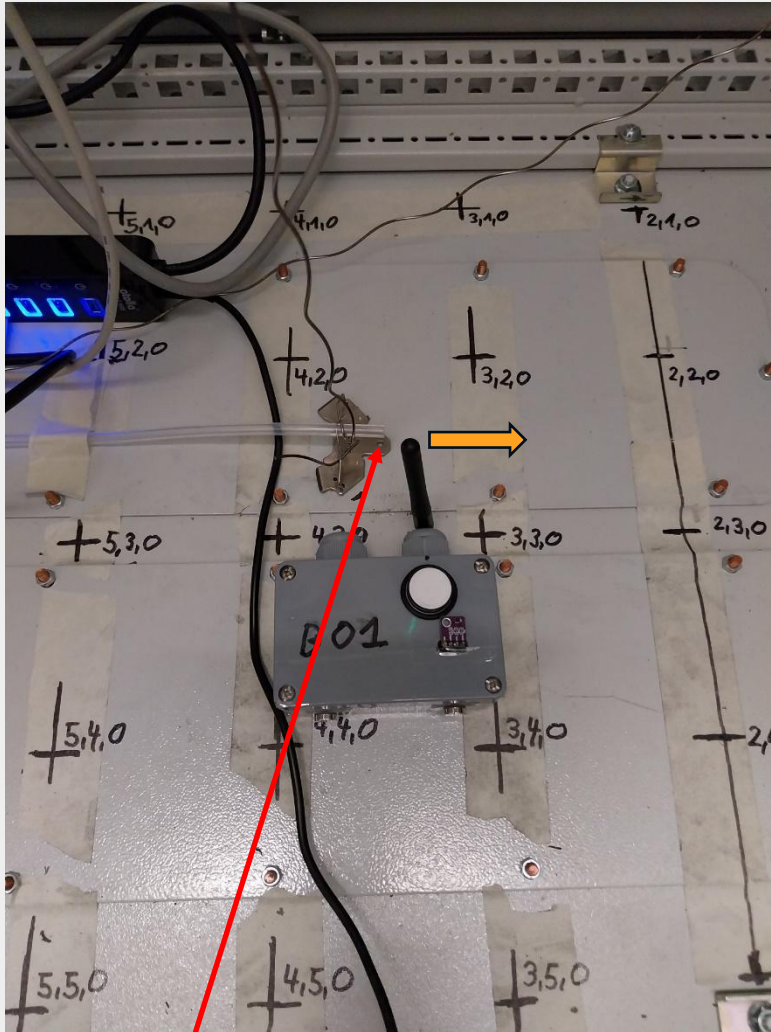
Beispiel Sensoranordnung



B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B09	B10	B11	B12	B18
3,3,0,1	0,3,3,6	3,0,5,6	7,3,8,6	4,3,11,6	4,5,11,6	7,5,12,6	0,3,12,6	0,5,14,6	6,0,15,6	4,3,16,6	0,0,17,6	3,2,19,6

Beispiel Sensoranordnung





**Einlassstelle 1 cm über Boden (3,2,0,2),
in Richtung rechte Wand**

Versuch Nr. 1 bis 7

Schlauch:
 $d_i = 4 \text{ mm}$
 $d_a = 6 \text{ mm}$

**Einlassstelle 10 cm über Boden (3,2,1,1),
nach oben**

Versuch Nr. 8 und 9

Auch der Ort und die Ausrichtung
des Gas-Einlasses wird mit dem
Voxelsystem beschrieben.

Der Einlass erfolgte von außen
über gasdichte Spritzen, die an
einen Schlauch angeschlossen
sind, der ins Innere des
Messvolumens führt. Das Ende
des Schlauches kann im
Messvolumen beliebig platziert
werden.

Eingelassene Mengen:

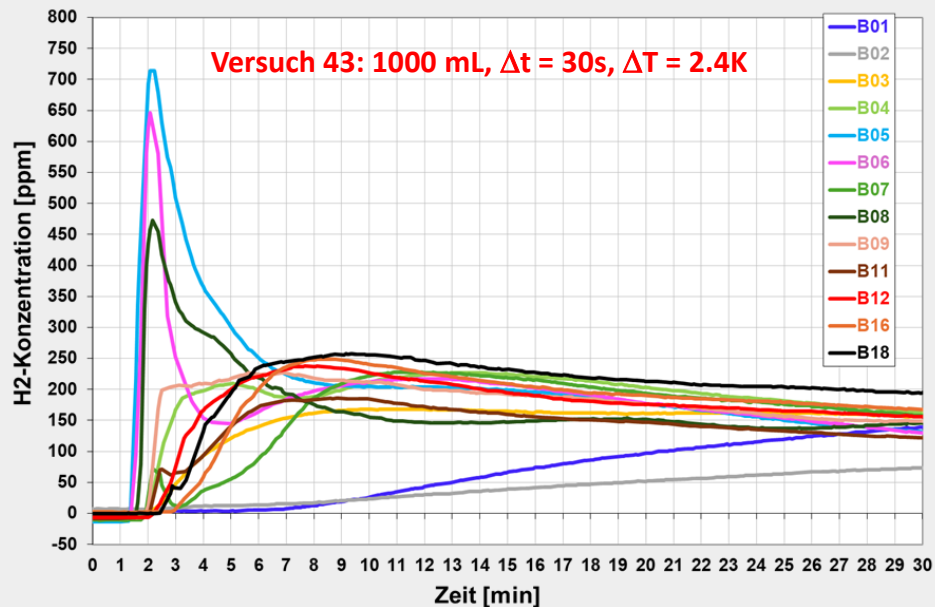
1000ml N_2 / H_2

500 ml He / H_2

**Vergleich H₂-Konzentrationsverläufe Formiergas 80/20 mit
Helium/Wasserstoff 60/40 für „Einlass von unten“ und „Einlass von oben“**

Konzentrationsverlauf an den einzelnen Sensoren (Beispiele)

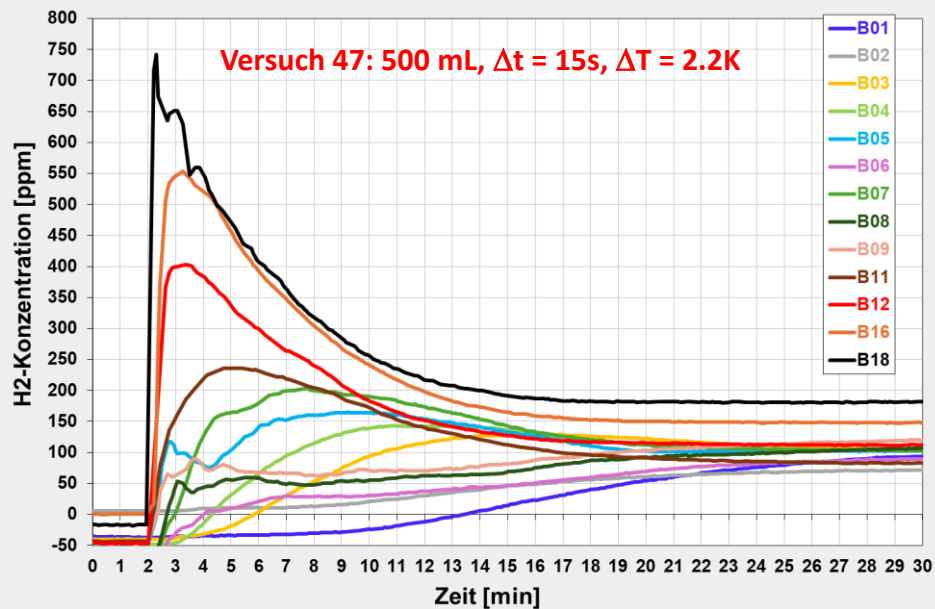
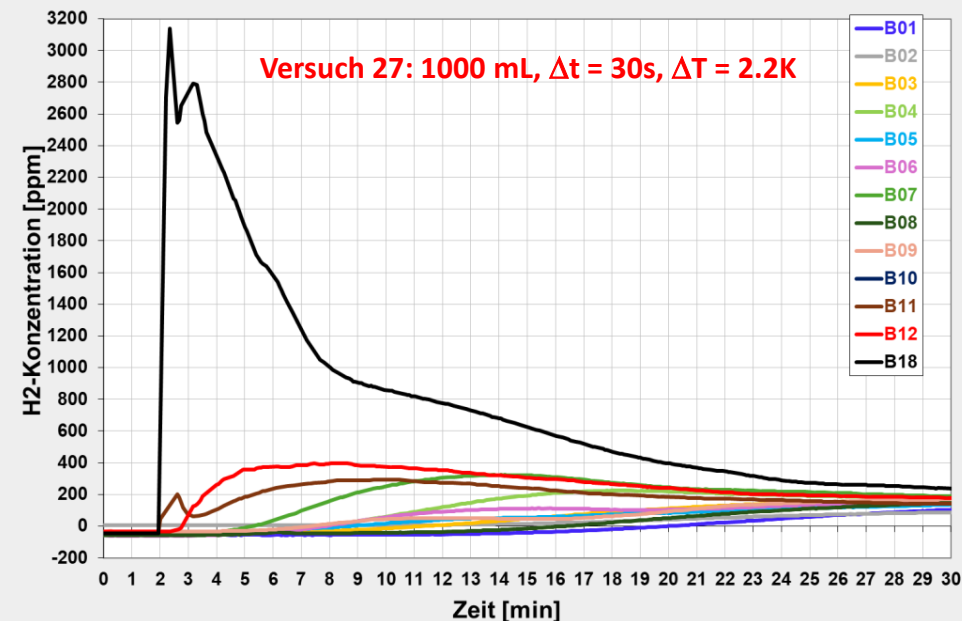
von unten



N_2 / H_2
80 / 20

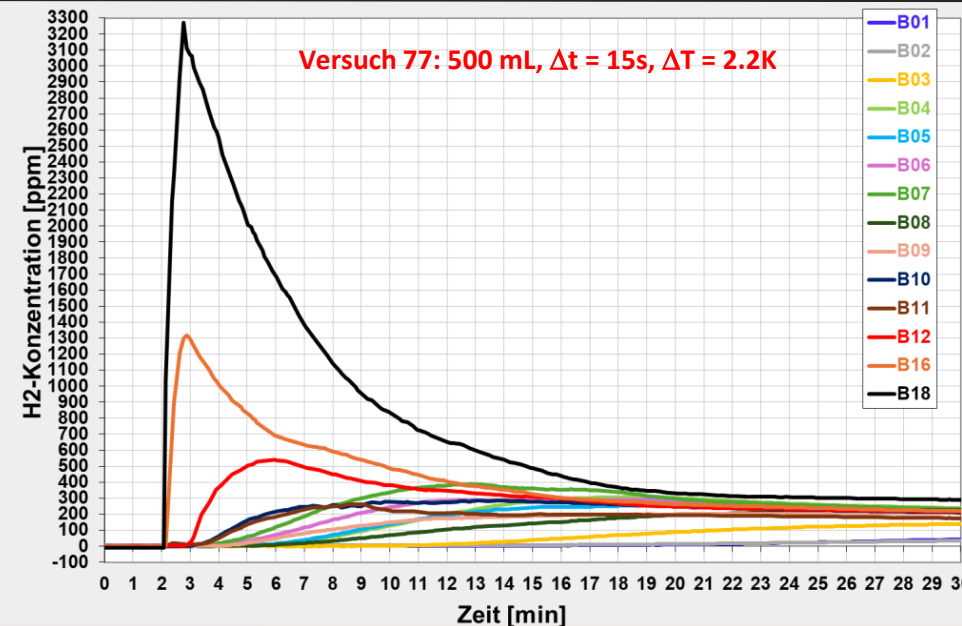
Beim Formiergas steigt die H_2 -Konzentration an der Decke (B18) beim Einspritzen von unten deutlich langsamer an als beim Einspritzen von oben.

von oben



He / H_2
60 / 40

Bei He 60 H2 40 steigt die H_2 -Konzentration an der Decke (B18) beim Einspritzen von unten und von oben relativ schnell an



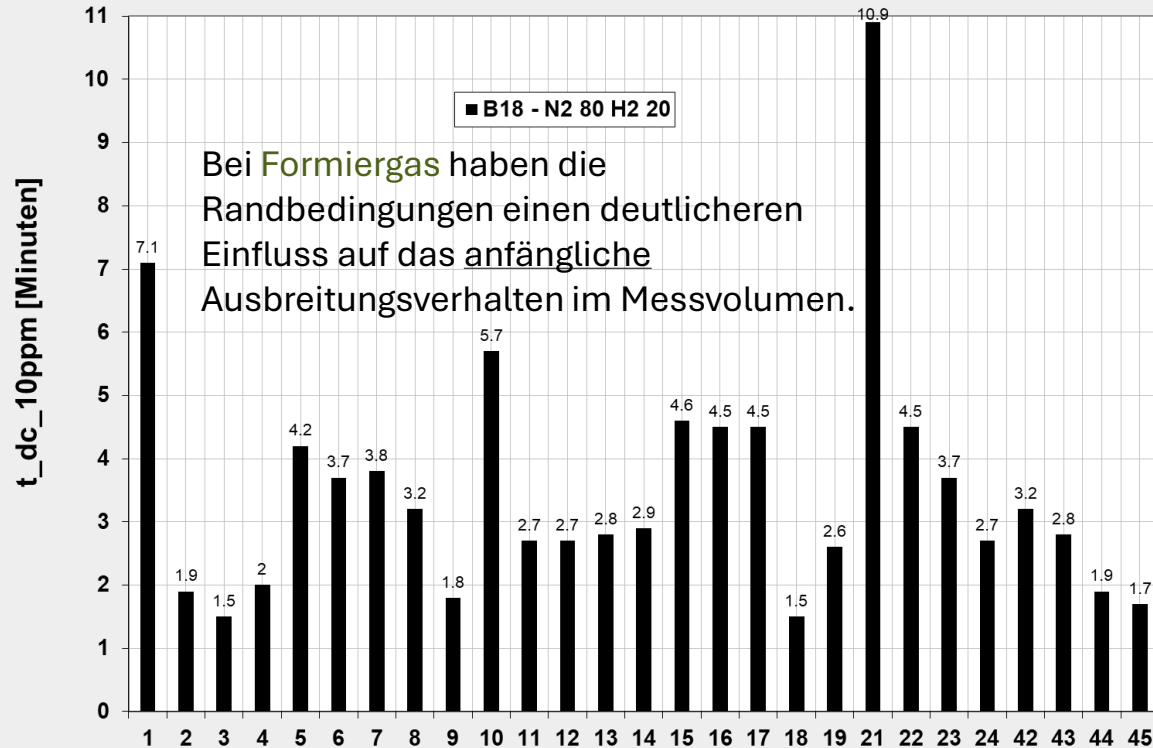
Wann kommt der Wasserstoff an der Decke (Sensor B18) an?

N_2 / H_2
80 / 20

Einspritzen von unten, Richtung nach oben

He / H_2
60 / 40

Ergebnisse von 27 Versuchen



Ergebnisse von 29 Versuchen



In den beiden Balkendiagrammen ist die Zeitdifferenz t_{dc_10ppm} bis zum Anstieg der H_2 -Konzentration um 10 ppm in B18, in Bezug auf die H_2 -Konzentration zur Zeit $t = 0$, dargestellt:

$$t_{dc_10ppm} = t_{c(t) - c(t=0) \approx 10 \text{ ppm}} - t_{c(t=0)}$$

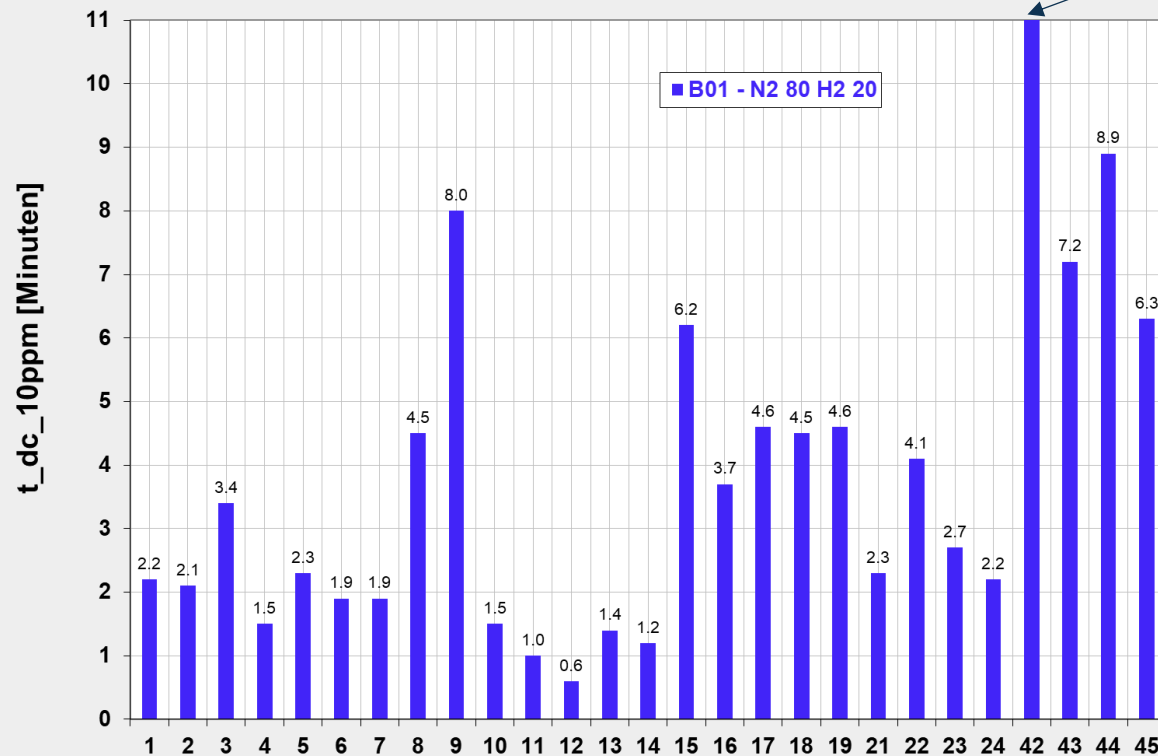
Wann kommt der Wasserstoff am Boden (Sensor B01) an?

N_2 / H_2
80 / 20

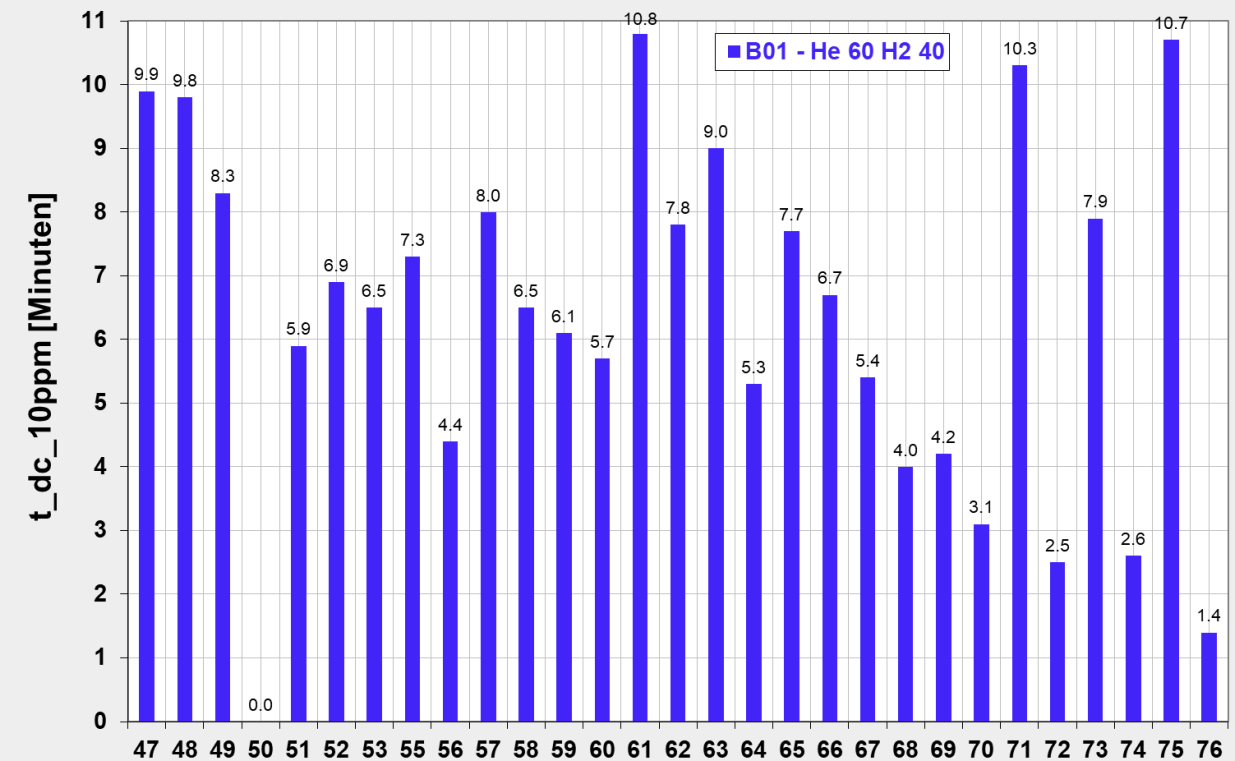
Einspritzen von unten, Richtung nach oben

He / H_2
60 / 40

Ergebnisse von 27 Versuchen



Ergebnisse von 29 Versuchen



Aufgrund des größeren Auftriebs von **Helium/Wasserstoff 60/40** im Vergleich zum **Formiergas**, erreicht der Wasserstoff den Boden beim **Helium/Wasserstoff 60/40** deutlich später als beim **Formiergas**

In den beiden Balkendiagrammen ist die Zeitdifferenz t_{dc_10ppm} bis zum Anstieg der H_2 -Konzentration um 10 ppm in B01, in Bezug auf die H_2 -Konzentration zur Zeit $t = 0$, dargestellt:

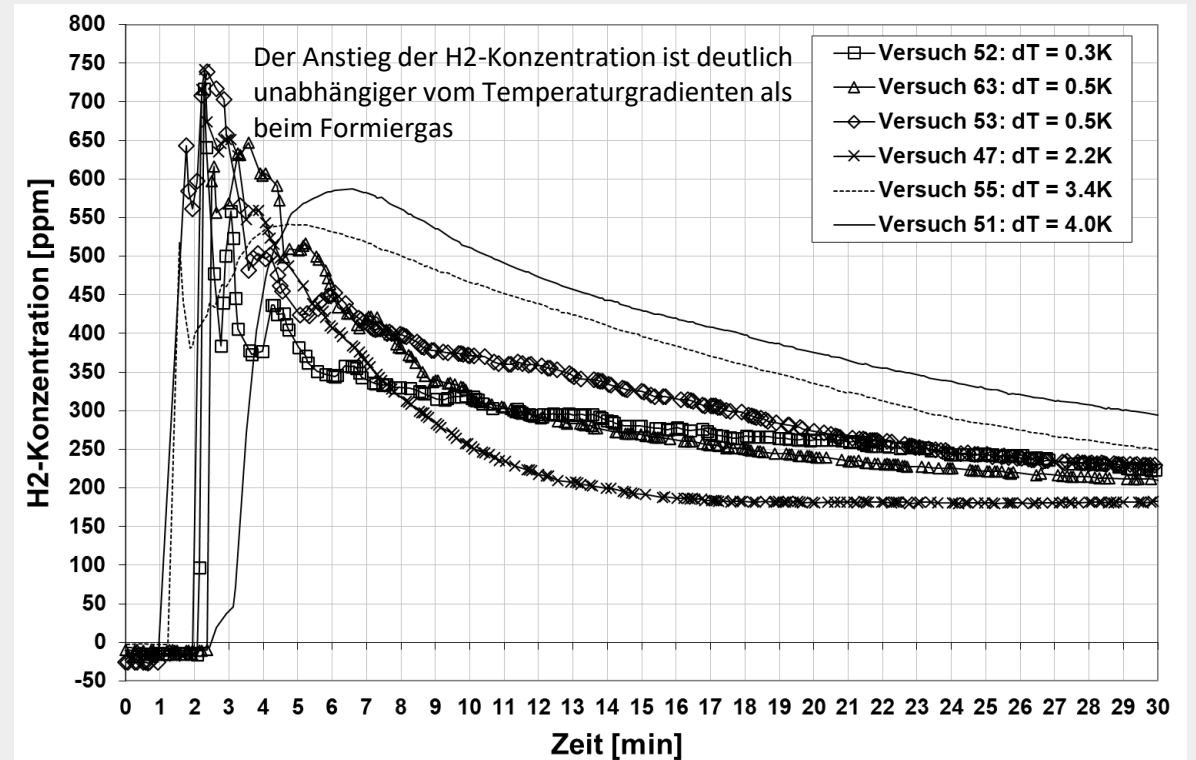
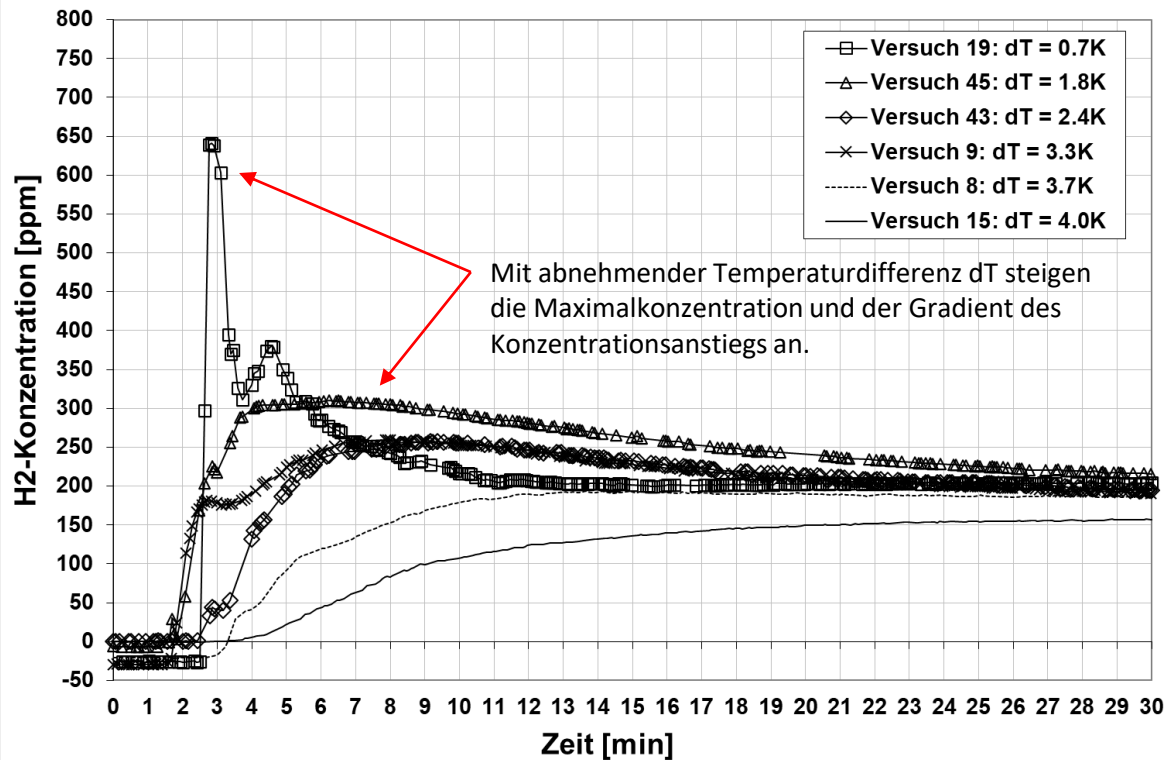
$$t_{dc_10ppm} = t_{c(t) - c(t=0) \approx 10 \text{ ppm}} - t_{c(t=0)}$$

**Wie beeinflusst der Temperaturgradient im
Messvolumen das Ausbreitungsverhalten?**

N_2 / H_2
80 / 20

Einspritzen von unten, Richtung nach oben

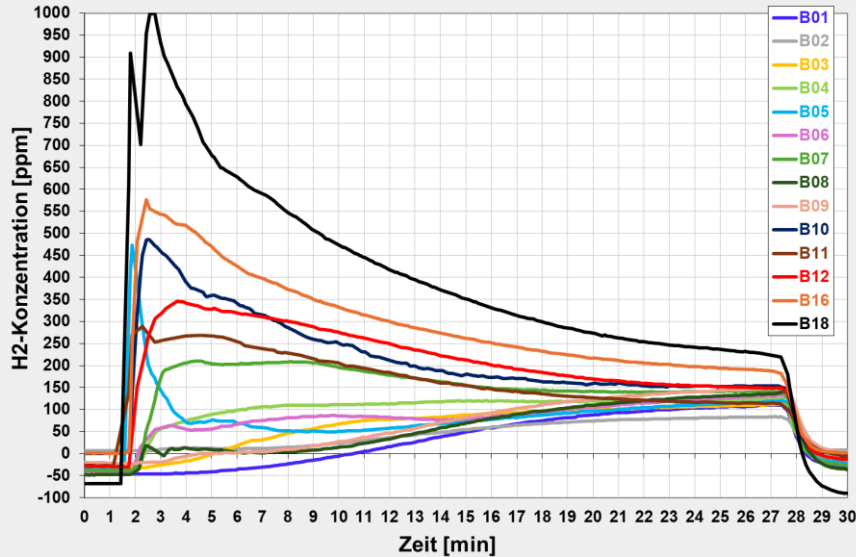
He / H_2
60 / 40



Wasserstoff-Konzentrationsverläufe des Sensors B18 (an der Decke des Messvolumens bei unterschiedlichen Temperaturgradienten zwischen Boden und Decke des Messvolumens)

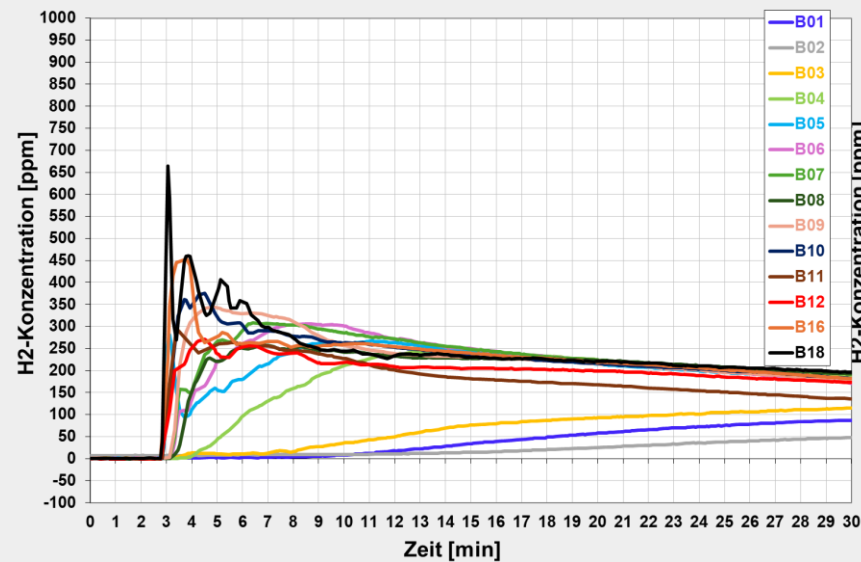
He / H₂ 60 / 40

Versuch 59: $\Delta t = 15s$, $\Delta T = 2.9K$

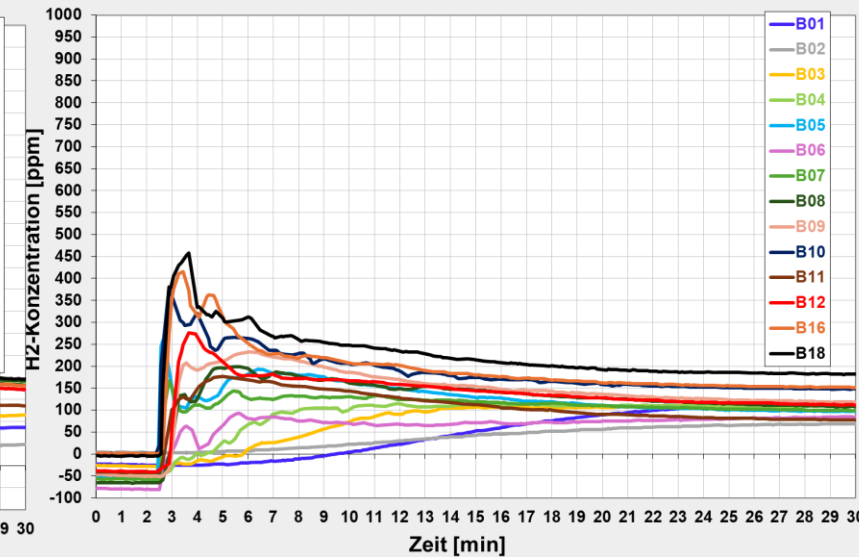


Eindüsen von unten nach oben

Versuch 61: $\Delta t = 15s$, $\Delta T = 0.5K$



Versuch 62: $\Delta t = 2s$, $\Delta T = 0.4K$



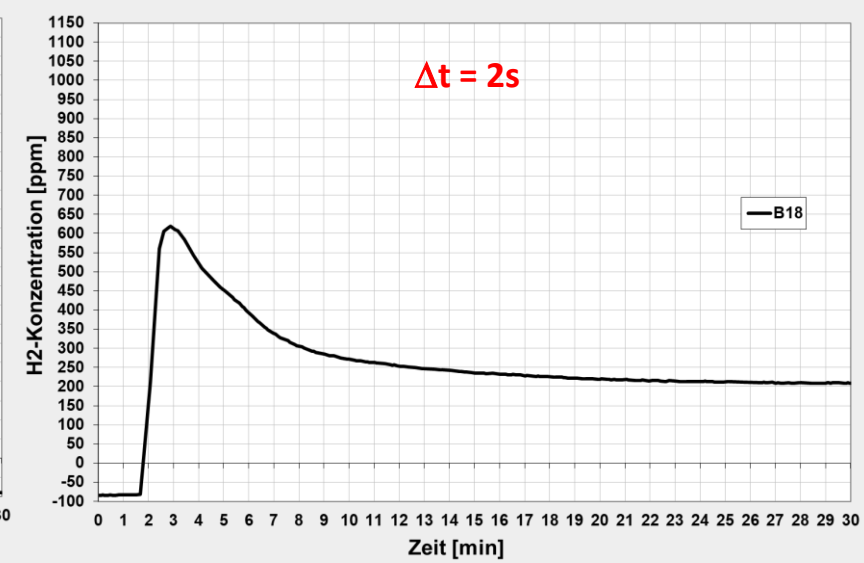
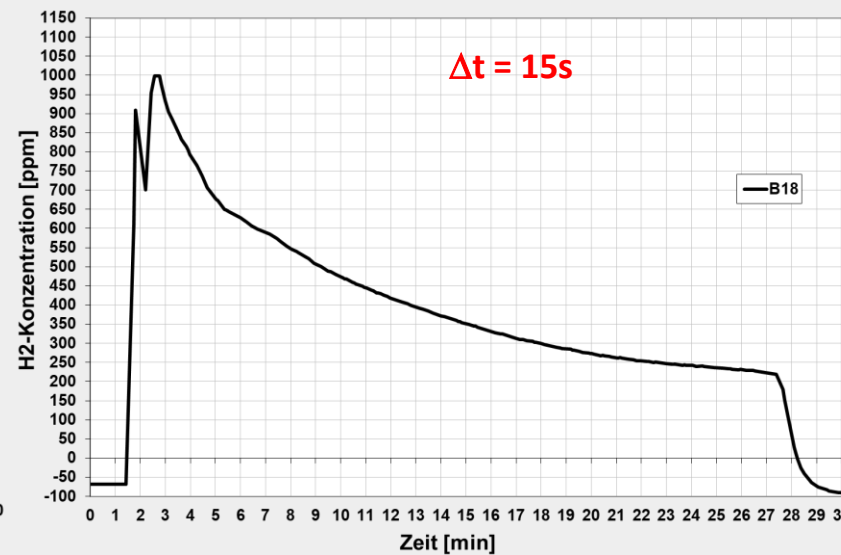
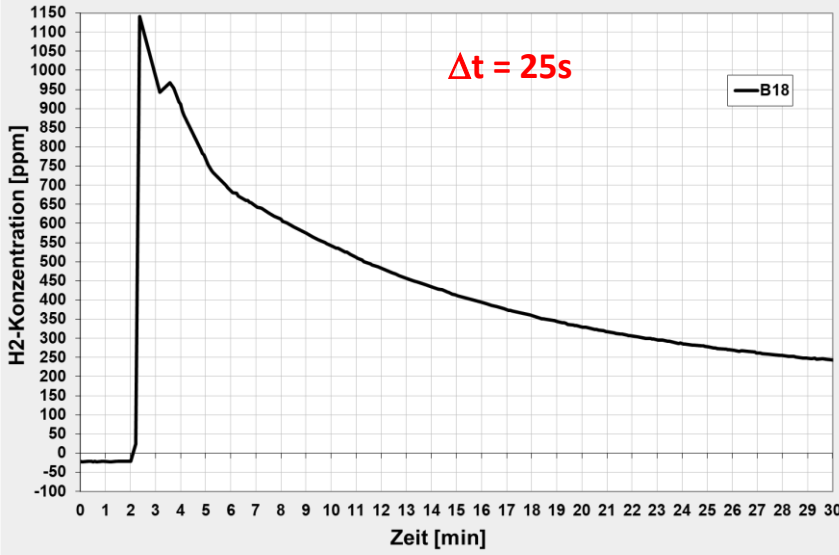
Bei einem verringerten Temperaturgradienten ΔT ergibt sich eine Trennung zwischen höheren Konzentrationen in oberen Bereichen des Messvolumens und niedrigeren Konzentrationen in unteren Bereichen des Messvolumens (Vergleich Abbildung links und Mitte).

Beim schnellen Einspritzen ($\Delta t = 2s$) verringert sich die Trennwirkung (Vergleich Abbildung Mitte und rechts). Der größere Impuls kann durch stärkere Wechselwirkung mit der Luft eine stärkere Vermischung mit unteren Schichten erzeugen, wodurch die H₂-Konzentration im unteren Bereich schneller ansteigt als bei $\Delta t = 15s$ (Bild Mitte).

Wie beeinflusst die Einspritzgeschwindigkeit das Ausbreitungsverhalten?

He / H₂ = 60 / 40

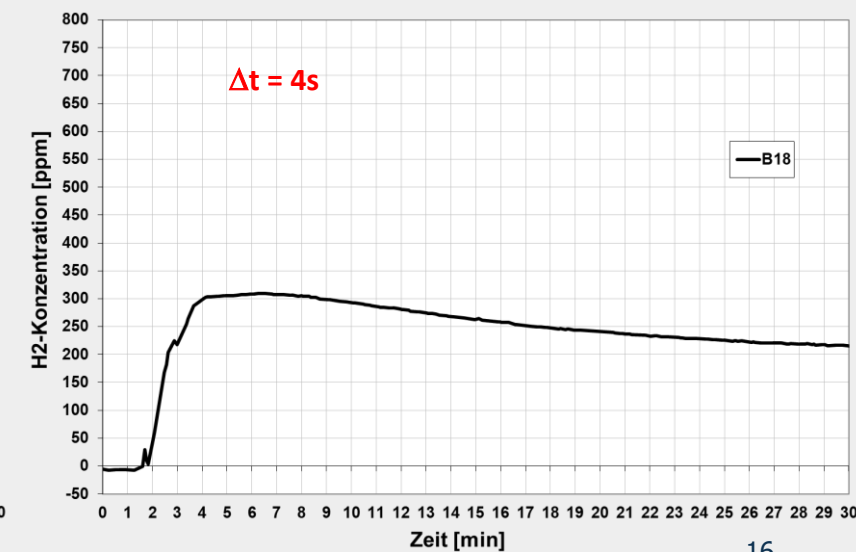
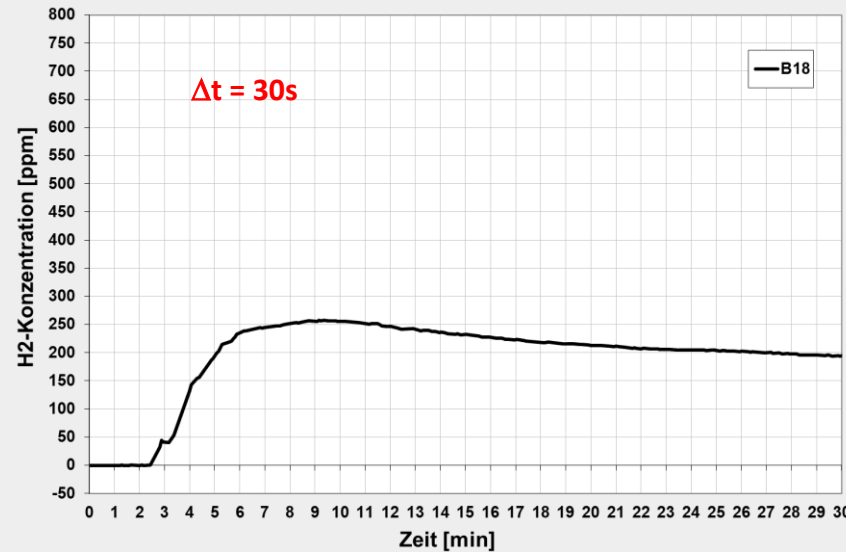
Einspritzen von unten, Richtung nach oben



Je länger die Einspritzzeit, umso höher die Maximalkonzentration an der Decke.

N₂ / H₂ = 80 / 20

Je kürzer die Einspritzzeit, umso höher die Maximalkonzentration an der Decke.

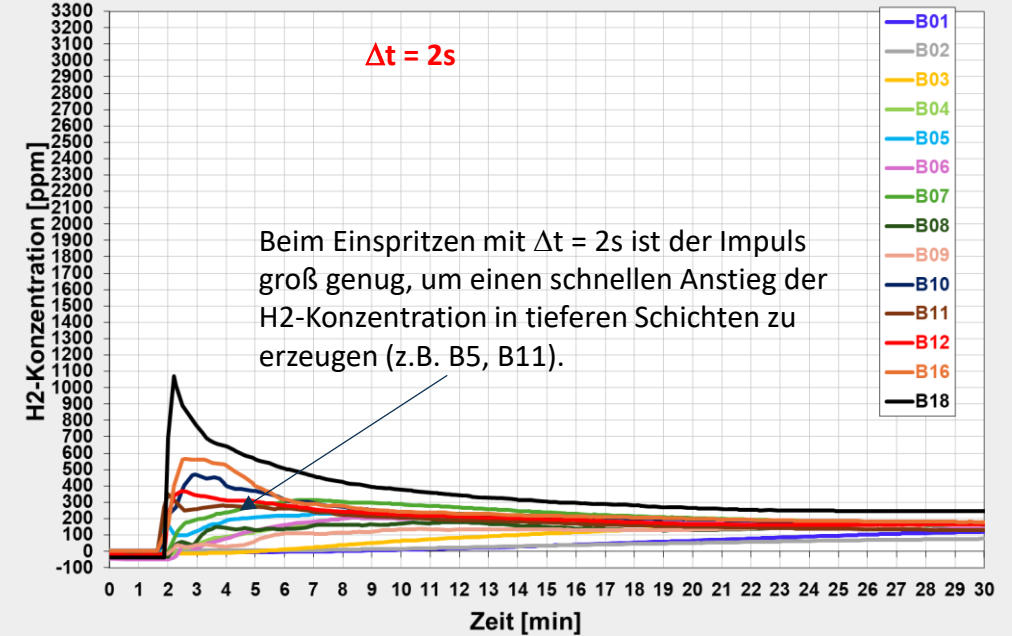
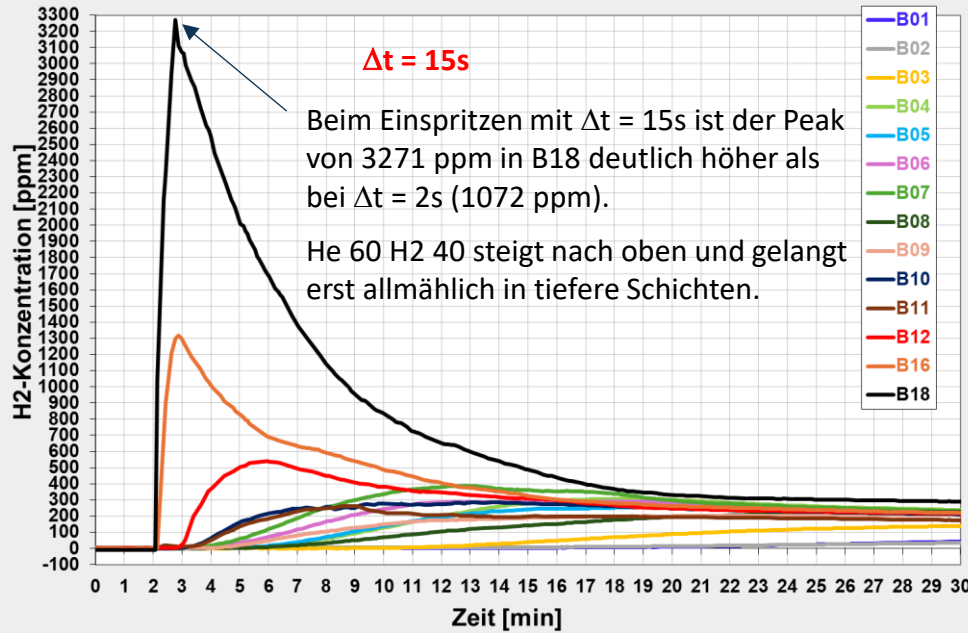


Einspritzen von oben, Richtung nach unten

He / H₂ = 60 / 40

Beim Einspritzen von oben ist die Maximalkonzentration bei $\Delta t = 15s$ höher als beim Einspritzen von unten.

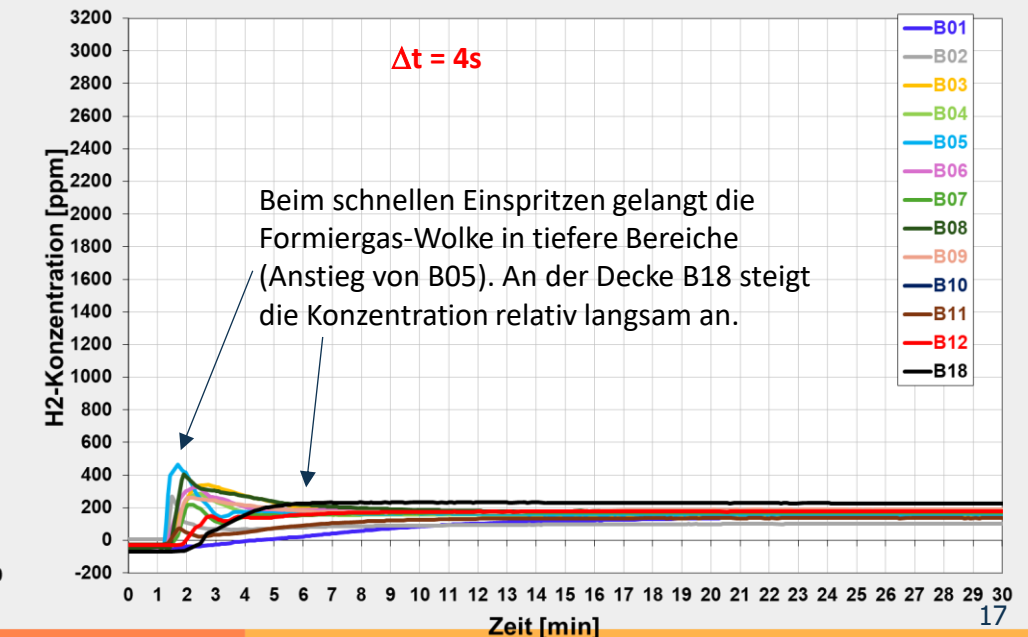
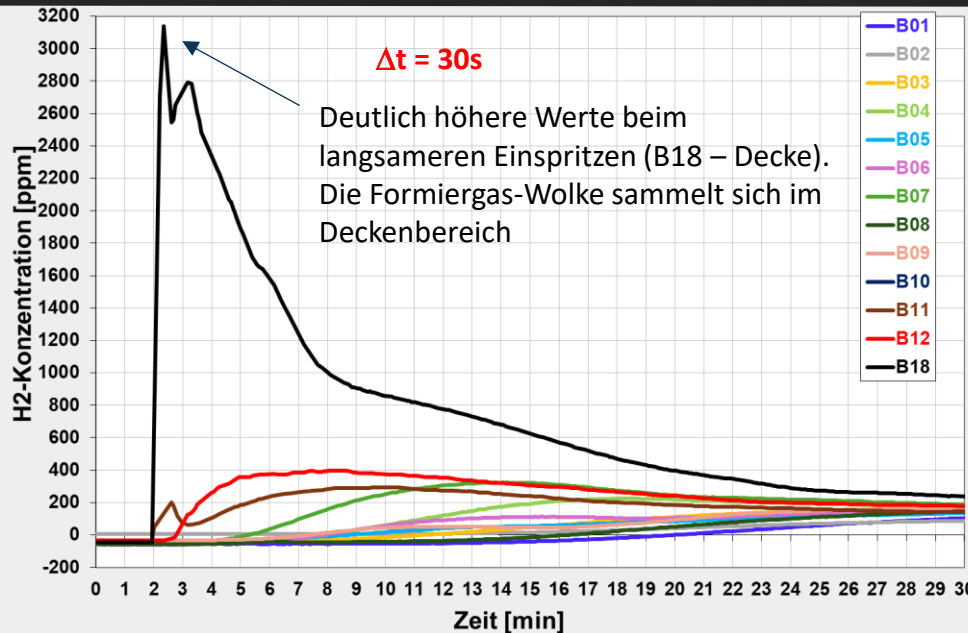
Die Abnahme des Peaks in B18 beim schnellen Einspritzen $\Delta t = 2s$ ist, relativ zu $\Delta t = 15s$, größer als beim Einspritzen von unten.



N₂ / H₂ = 80 / 20

Beim Einspritzen von oben ist die Maximalkonzentration bei $\Delta t = 30s$ in B18 höher als beim Einspritzen von unten.

Beim schnellen Einspritzen $\Delta t = 4s$ entsteht ein geändertes Ausbreitungsverhalten mit einem Transport des Formiergases in tiefere Schichten und einem langsamen Anstieg der Konzentration in B18.

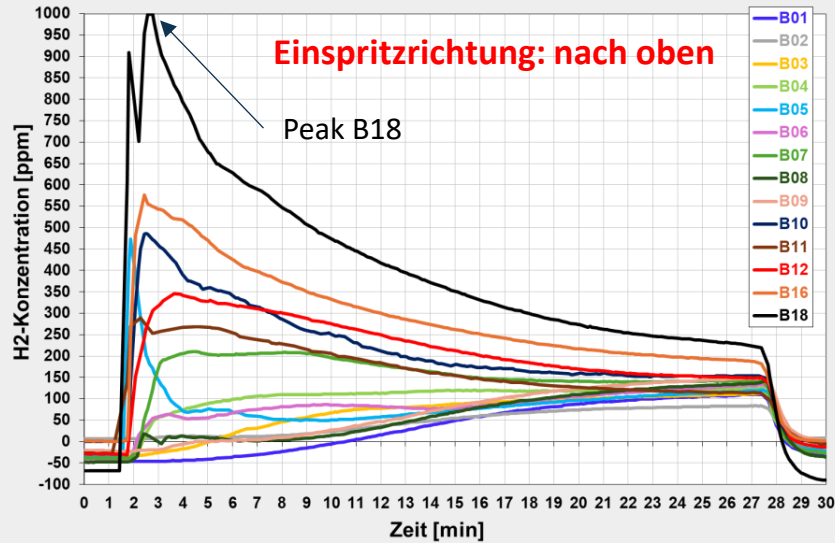


Wie beeinflusst die Einspritzrichtung das Ausbreitungsverhalten?

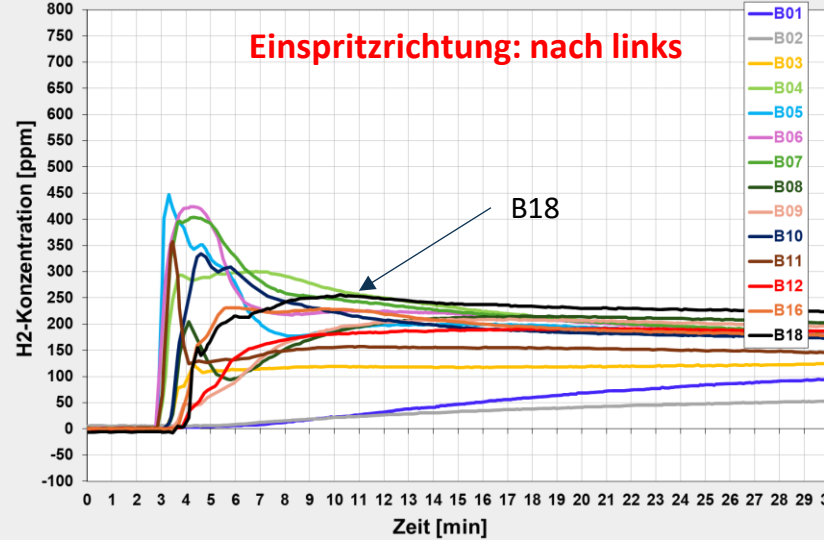
**Vergleich H₂-Konzentrationsverläufe Helium/Wasserstoff 60/40
für unterschiedliche Eindüsrichtungen (aber immer von unten)**

Einspritzen von unten: H₂-Konzentration

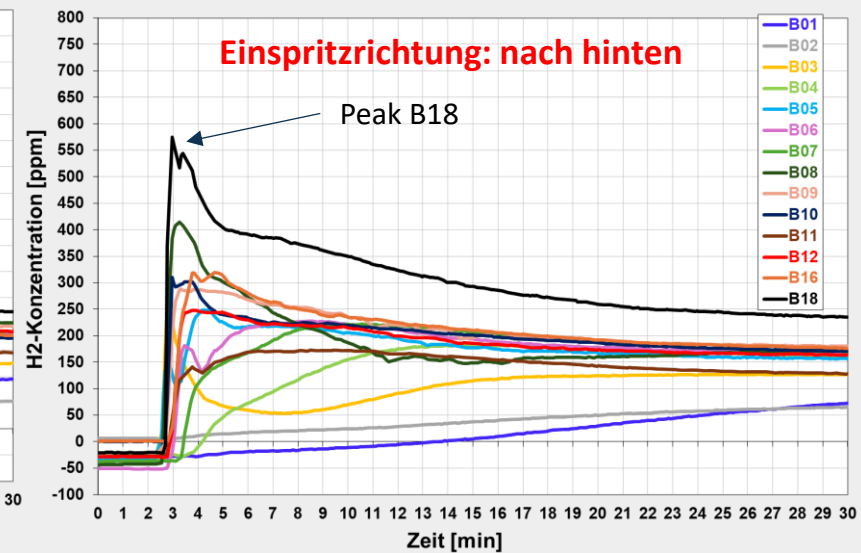
Versuch 59: He 60 H₂ 40, 500 mL, $\Delta t = 15s$, K1 bis K4 zu, $\Delta T = 2.9K$



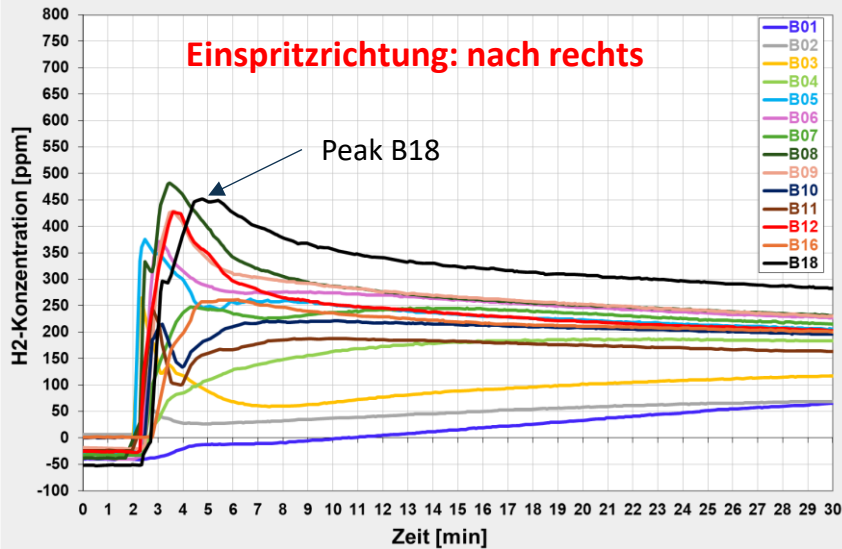
Versuch 65: He 60 H₂ 40, 500 mL, $\Delta t = 15s$, K1 bis K4 zu, $\Delta T = 1.8K$



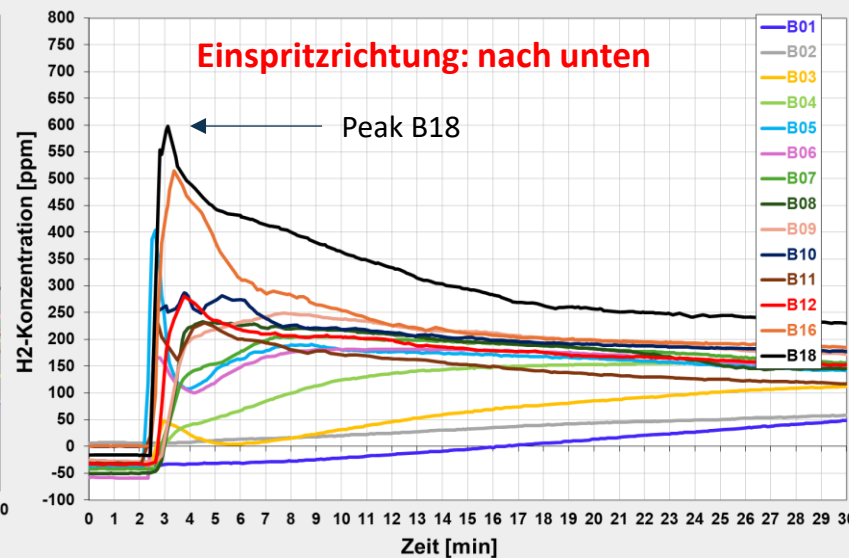
Versuch 67: He 60 H₂ 40, 500 mL, $\Delta t = 15s$, K1 bis K4 zu, $\Delta T = 1.7K$



Versuch 69: He 60 H₂ 40, 500 mL, $\Delta t = 15s$, K1 bis K4 zu, $\Delta T = 2.2K$



Versuch 73: He 60 H₂ 40, 500 mL, $\Delta t = 15s$, K1 bis K4 zu, $\Delta T = 2.1K$



Der Peak an Sensor B18 (Decke) entsteht bei allen untersuchten Einspritzrichtungen bis spätestens 4 Minuten nach Einspritzen. Der schnellste Anstieg entsteht bei der Einspritzrichtung „nach oben“, „nach unten“ und „nach hinten“. Der höchste Peak entsteht bei der Einspritzrichtung „nach oben“. Es ist eine Abhängigkeit von der Einspritzrichtung zu erkennen. B01 (Boden) steigt relativ langsam an.

- Bei **Formiergas 80/20** unterscheiden sich die H_2 -Konzentrationsverläufe für „Einspritzen von unten“ und für „Einspritzen von oben“ deutlicher als für **Helium / Wasserstoff 60/40**. Es ergeben sich jedoch sowohl für Formiergas als auch für He/H_2 unterschiedliche Muster an den Sensoren in Abhängigkeit vom Einlassort. Das Trainieren eines Sensorsystems zur Leckageortung erscheint möglich.
- Bei **Formiergas 80/20** haben die Randbedingungen einen deutlicheren Einfluss auf das anfängliche Ausbreitungsverhalten im Messvolumen.
- **Helium/Wasserstoff 60/40** steigt relativ unabhängig vom Einspritzort und von den Randbedingungen schnell an die Decke. Die Randbedingungen beeinflussen eher das längerfristige Ausbreitungsverhalten.
- Aufgrund des größeren Auftriebs erreicht der Wasserstoff den Boden beim **Helium/Wasserstoff 60/40** deutlich später als beim **Formiergas 80/20**.
- **Helium/Wasserstoff 60/40**: Der Anstieg der H_2 -Konzentration an der Decke ist deutlich unabhängiger vom Temperaturgradienten als beim Formiergas.
- **Formiergas 80/20**: Mit abnehmender Temperaturdifferenz steigen die Maximalkonzentration und der Gradient des Konzentrationsanstiegs an.
- **Helium/Wasserstoff 60/40**: je länger die Einspritzzeit, umso größer die Maximalkonzentration an der Decke. Beim schnelleren Einspritzen verringert sich die Maximalkonzentration an der Decke. Der Gasstrahl ändert seine Charakteristik von auftriebsdominant in Richtung impulsdominant.
- **Formiergas 80/20**: je kürzer die Einspritzzeit, umso größer die Maximalkonzentration an der Decke. Der zunehmende Impuls des Gasstrahls erhöht den Gastransport, z.B. von unten nach oben.