

Informationssammlung

Berechnungen zu H₂-Leckage- Szenarien – Wasserstoffleckage im Raum

Autor: Werner Fröhlingsdorf | Stand: Januar 2026

1 Wasserstoffleckage im Raum

1.1 Mittlere Raumkonzentration bei aktiver Lüftung

Zuordnung zu AP 2.3 Beschreibung verschiedener grundlegender räumlicher Szenarien

In geschlossenen Räumen erfolgt durch eine Lüftungsanlage ein Luftaustausch (Luftwechsel), welcher die H₂-Konzentration bei einer Leckage maßgeblich beeinflusst (s. Abbildung 1).

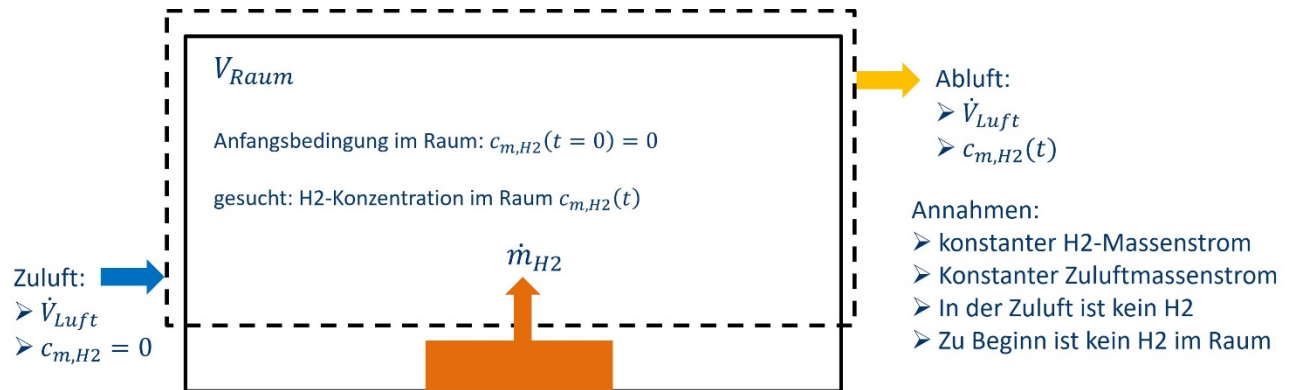


Abbildung 1: Annahmen für die Berechnung der zeitabhängigen mittleren H₂-Raumkonzentration

Bei Vernachlässigung von Konzentrationsunterschieden im Raum kann die zeitabhängige mittlere H₂-Konzentration im Raum mit folgender Kontinuitätsgleichung (Bilanzierung der Massenströme im Raum) berechnet werden:

$$\underbrace{\dot{m}_{H_2}}_{\text{In den Raum zugeführter H}_2\text{-Massenstrom}} - \underbrace{\dot{V}_{Luft} \cdot c_{m,H_2}(t)}_{\text{Aus dem Raum abgesaugter H}_2\text{-Massenstrom}} = \underbrace{V_R \cdot \frac{dc_{m,H_2}}{dt}}_{\text{Änderung der H}_2\text{-Masse im Raum mit der Zeit}}$$

Die Konzentration c_{m,H_2} hat die Einheit kg H₂ / m³ Luft, d.h. die Multiplikation mit $\dot{V}_{Luft}$ [m³ Luft/h] ergibt den mit der Abluft aus dem Raum gesaugten H₂-Massenstrom in kg H₂/h.

Der zeitabhängige Anstieg der mittleren H₂-Konzentration im Raum kann wie folgt berechnet werden (Lösung der angegebenen Differentialgleichung ¹):

$$c_{m,H_2}(t) = \frac{\dot{m}_{H_2}}{\lambda \cdot V_{Raum}} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t})$$

$$c_{v,H_2}(t) = \frac{c_{m,H_2}(t)}{\rho_{H_2}} = \frac{\dot{m}_{H_2}}{\rho_{H_2} \cdot \lambda \cdot V_{Raum}} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t}) = \frac{\dot{V}_{H_2}}{\dot{V}_{Luft}} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t})$$

λ : Luftwechselrate in 1/h, $\lambda = \dot{V}_{Luft} / V_{Raum}$

Die Konzentration $c_{v,H_2}(t)$ hat die Einheit m³ H₂ / m³ Luft. Die Dichte des H₂ ρ_{H_2} wird für eine Referenztemperatur und einen Referenzdruck berechnet.

Die Zuluft in den Raum $\dot{V}_{Luft} = \lambda \cdot V_{Raum}$, verdünnt das H₂-Gas. Gleichzeitig wird ein gleichwertiger Abluftvolumenstrom aus dem Raum abgesaugt. Bei der Herleitung der oben

angegebenen Gleichung wird angenommen, dass die Abluft die zu berechnende mittlere H₂-Konzentration des Raumes $c_{H_2}(t)$ hat. Durch die Freisetzung des H₂ im Raum entsteht ein mit zunehmender Ausströmzeit exponentielles Wachstum der H₂-Konzentration im Raum.

Ohne Lüftung steigt die H₂-Konzentration im Raum linear mit der Zeit an:

$$c_{H_2}(t, \lambda = 0) = \frac{\dot{V}_{H_2} \cdot t}{V_{Raum}}$$

Zur Veranschaulichung der Zusammenhänge werden Berechnungen mit folgenden Parametern durchgeführt:

- Raumvolumen 1 m³ (entspricht dem Schaltschrankvolumen im Container)
- H₂-Massenstrom 15.3 g/h (3 L/min bei 10°C und 1 bar)
- Luftwechselrate: 0, 1, 2, 5, 10, 20, 40
- Temperatur 10°C,
- kein Druckanstieg im Raum durch zugeströmtes H₂
- Anfangsbedingung: 100% Luft im Raum

Das Raumvolumen von 1 m³ entspricht näherungsweise dem Schaltschrankvolumen im Container. Der H₂-Massenstrom von 15.3 g/h bzw. Volumenstrom von 3 L/min entspricht der Annahme bei den von ASD durchgeführten Simulationen. Bei den Berechnungen wird ein konstanter H₂-Massenstrom über eine Stunde angenommen.

Die Berechnungen können für beliebige Parameter durchgeführt werden.

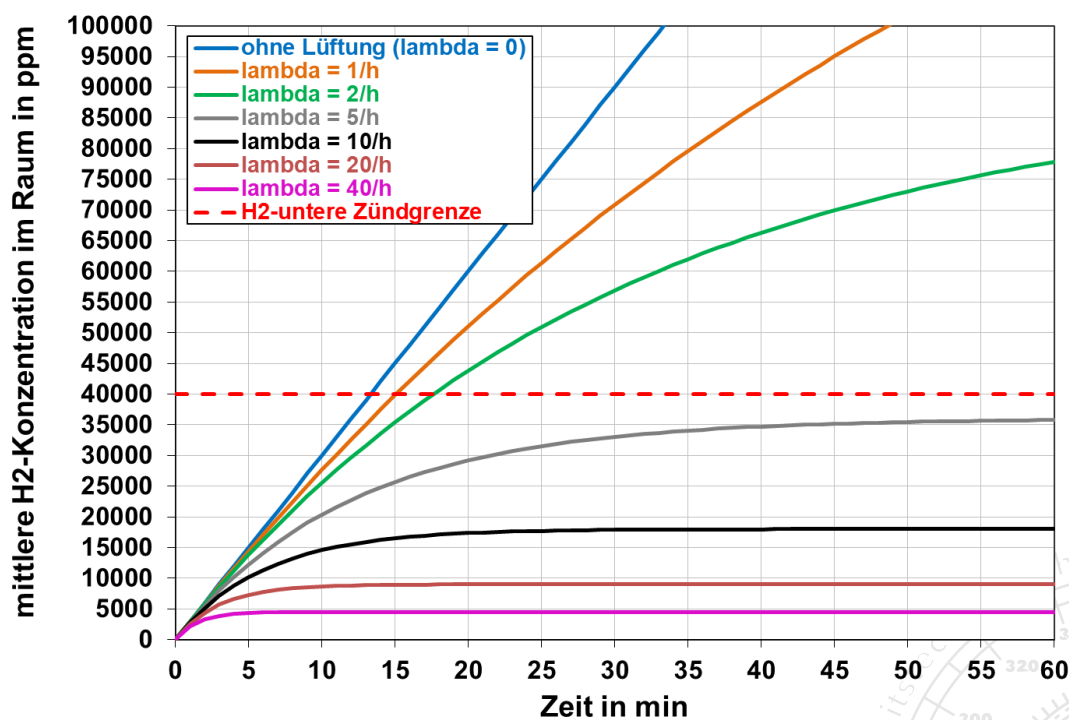


Abbildung 2: Raumvolumen 1 m³: Zunahme der mittleren H₂-Konzentration mit der Zeit in Abhängigkeit vom Luftwechsel λ (es gelten die Annahmen in Abbildung 1 und die zuvor aufgeführten Parameter)

Die Ergebnisse in Abbildung 2 zeigen ohne Lüftung ($\lambda = 0$) einen linearen Anstieg der mittleren H₂-Konzentration im Raum (erreicht nach 1 Minute 3.000 ppm), welcher mit zunehmendem Luftwechsel abnimmt. Bei einem Luftwechsel von $\lambda = 4.5/h$ wird eine Grenzkonzentration von 40.000 ppm erreicht (untere Zündgrenze von H₂), bei $\lambda = 9/h$ verringert sich diese auf 20.000 ppm (50% der unteren Zündgrenze von H₂).

Als Beispiel zur Anwendung können die Notfallmaßnahmen von Firma Dräger in Abbildung 3² genannt werden. Damit bei einem H₂-Leckage-Volumenstrom von 3 L/min bei 10°C und 1 bar und einem Raumvolumen von 1m³ der „Safe range“ von 20% LEL (LEL: Lower Explosive Limit, 4 Vol% für H₂) nicht überschritten wird, ist folgende Mindest-Luftwechselrate erforderlich (Betrachtung des Grenzwertes für $t \Rightarrow \infty$):

$$\lambda_{Min} = \frac{\dot{V}_{H_2}}{c_{H_2}(20\% LEL) \cdot V_{Raum}} = \frac{0.003 \text{ m}^3 \cdot 60 \text{ min}}{0.2 \cdot 0.04 \cdot \text{min} \cdot h \cdot 1 \text{ m}^3} = 22.5 \frac{1}{h}$$

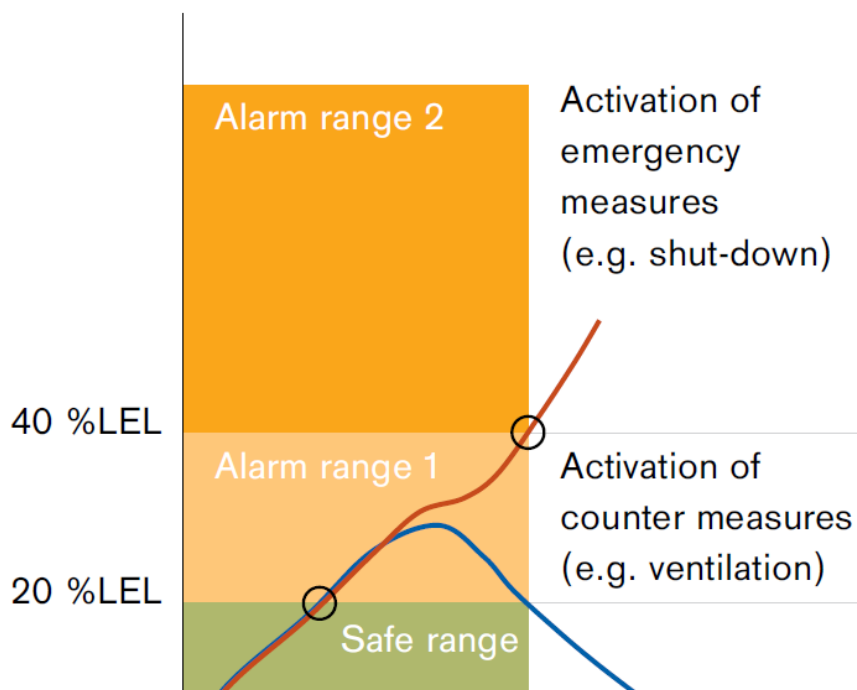


Abbildung 3: Notfallmaßnahmen bei H₂-Freisetzung in Abhängigkeit von den erreichten Schwellenwerten (LEL: Lower Explosive Limit – 4 Vol% für H₂)²

Die Bestimmung des H₂-Massen- bzw. Volumenstroms bei einer Leckage, entsprechend den Zielstellungen des Projektes HyMeAs, ermöglicht eine Berechnung des erforderlichen Zuluftvolumenstroms, damit die H₂-Konzentration z.B. unterhalb von 20% LEL bleibt. Es ist dann sofort zu erkennen, ob die vorhandene Kapazität der Ventilatoren ausreicht, um die notwendige Zuluft zu liefern. Falls nicht, ist gegebenenfalls ein sofortiger shut-down der Anlage erforderlich.

Die vorgestellte Rechenmethode gibt einen Überblick über den zu erwartenden zeitabhängigen Anstieg der mittleren H₂-Konzentrationen in einem Raum bei bekannten Größen für den H₂-Leckagemassenstrom, Luftvolumenstrom und Raumvolumen.

Die reale H₂-Konzentrationsverteilung im Raum ist Forschungsgegenstand von HyMeAs.

1.2 Maximale Raumkonzentration bei natürlicher Lüftung

In ³ wird ein Nomogramm zur Berechnung des Höchstwerts der stationären Wasserstoffkonzentration im Gehäuse mit einer Entlüftung angegeben.

Es wird hierzu angenommen, dass sich ein Gleichgewicht zwischen zuströmender Außenluft und aus dem Raum ausströmendem Gas (Gemisch aus Luft und H₂) einstellt (s. Abbildung 4).

Weiterhin wird bei der Herleitung der angegebenen Gleichungen angenommen, dass die Massenströme konstant sind und eine gleichmäßige Verteilung der Wasserstoffkonzentration im Raum vorliegt. Das erstellte Nomogramm soll sowohl für gleichförmige als auch für ungleichförmige Gemische (mit Wasserstoffschichtung) in einem Gehäuse / Raum mit einer Entlüftungsöffnung anwendbar sein.

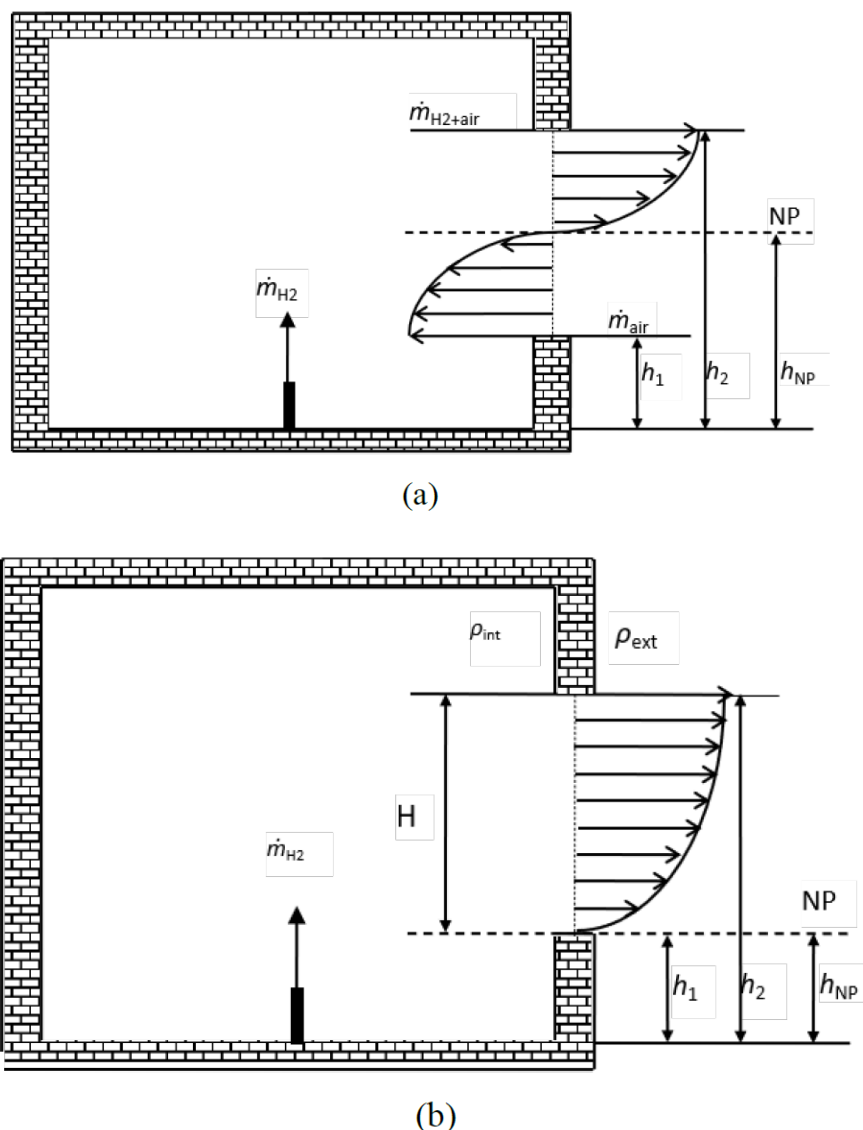


Abbildung 4: Strömungsgeschwindigkeit durch den Schlot bei natürlicher (a) und passiver (b) Belüftung³.



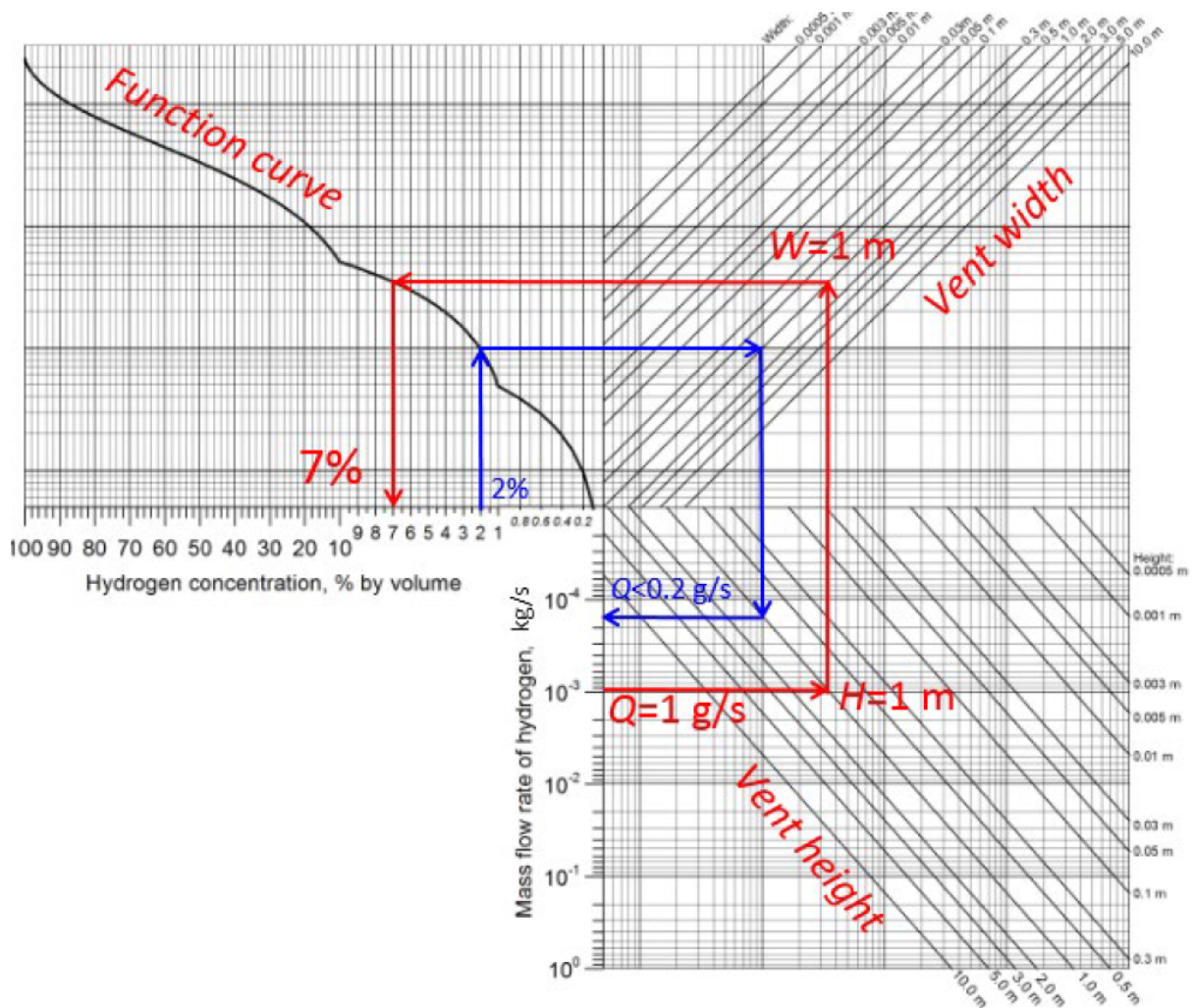


Abbildung 5: Technisches Nomogramm zur Berechnung des Höchstwerts der stationären Wasserstoffkonzentration im Gehäuse mit einer Entlüftung (Abflusskoeffizient $C=0,6$)³.

In dem in dem Nomogramm in Abbildung 5 gezeigten Beispiel (blaue Linien) sollte die Kabine (Raum) 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.

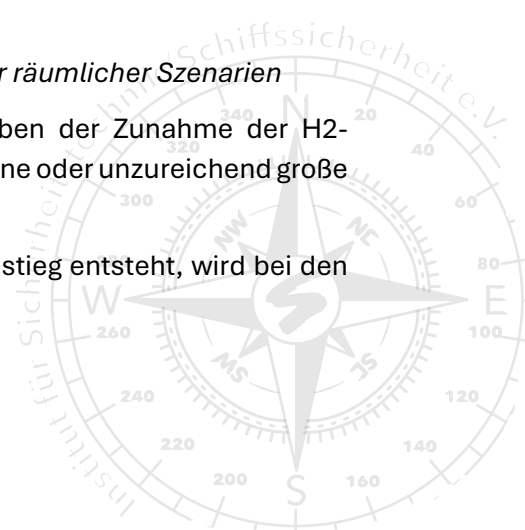
Bei Vorgabe eines Wasserstoffmassenstroms Q sowie der maximalen Wasserstoffkonzentration im Raum kann die erforderliche Höhe und Breite einer Lüftungsöffnung bestimmt werden.

1.3 Druckanstieg in einem geschlossenen Raum

Zuordnung z.B. zu AP 2.3 Beschreibung verschiedener grundlegender räumlicher Szenarien

Bei einer H₂-Leckage in einem geschlossenen Raum besteht neben der Zunahme der H₂-Konzentration (s. Kapitel 1.1) die Gefahr eines Druckanstiegs, falls keine oder unzureichend große Öffnungen vorhanden sind.

Um ein Gefühl dafür zu bekommen, welcher zeitabhängige Druckanstieg entsteht, wird bei den Berechnungen der Raum als geschlossen angenommen.



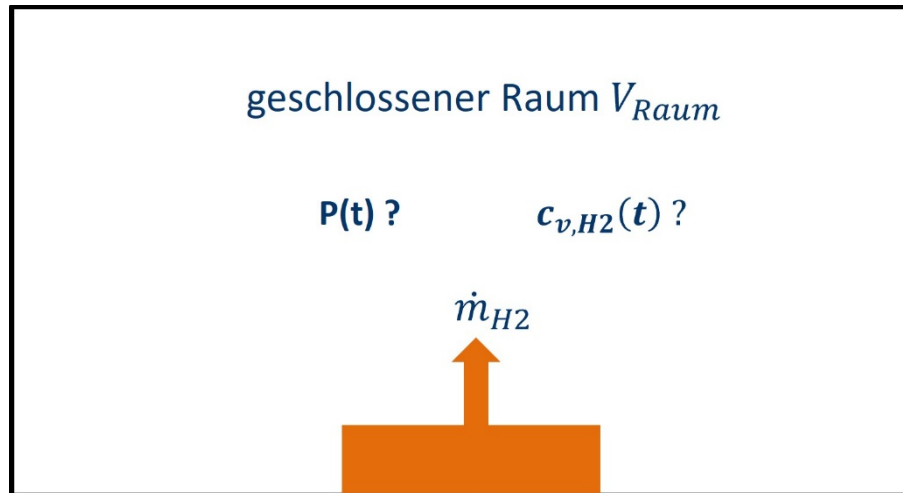


Abbildung 6: Modellskizze für die Berechnung des Druck- und Konzentrationsanstiegs in einem geschlossenen Raum

Für die Berechnungen gelten folgende Annahmen (s. auch Abbildung 6):

- Raumvolumen 1 m³ (entspricht dem Schaltschrankvolumen im Container)
- geschlossener Raum ($\lambda = 0$)
- H₂-Massenstrom 15.3 g/h (3 L/min bei 10°C und 1 bar)
- H₂-Einströmdauer: 60s
- Temperatur 10°C
- Anfangsbedingung: 100% Luft im Raum, 10°C, 1 bar absolut

Der Druck im Raum kann aus dem idealen Gasgesetz berechnet werden:

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T$$

Für die Masse m und die Gaskonstante R sind die zeitabhängigen Werte für das Gasgemisch aus Luft und Wasserstoff einzusetzen (die Temperatur T wurde als konstant angenommen, V ist das Raumvolumen):

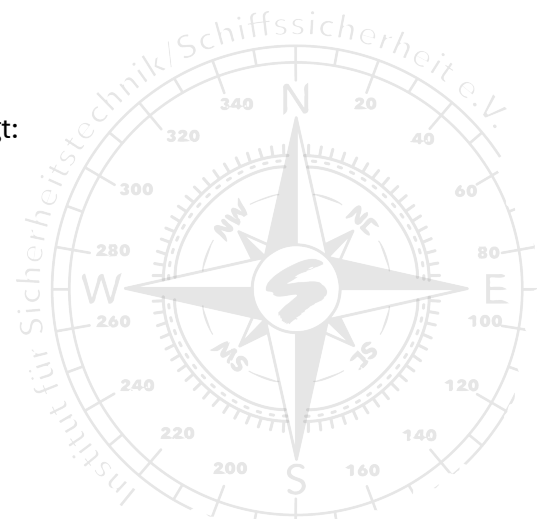
$$m(t) = m_{H_2}(t) + m_{Luft}$$

$$R(t) = \frac{m_{H_2}(t)}{m(t)} \cdot R_{H_2} + \frac{m_{Luft}}{m(t)} \cdot R_{Luft}$$

$$\Rightarrow p(t) = \frac{m(t) \cdot R(t) \cdot T}{V}$$

Die H₂-Volumen-Konzentration (Raumanteil) berechnet sich wie folgt:

$$c_{v,H_2}(t) = \frac{V_{H_2}(t)}{V} = \frac{m_{H_2}(t) \cdot R_{H_2} \cdot T}{p(t) \cdot V}$$



Der nach den Gleichungen berechnete zeitabhängige Anstieg des Überdrucks im Raum (s. Abbildung 7) ergibt nach 60s einen Überdruck von 3 mbar (300 Pa).

Die H₂-Konzentration erreicht nach 60s 2993 ppm (s. Abbildung 8).

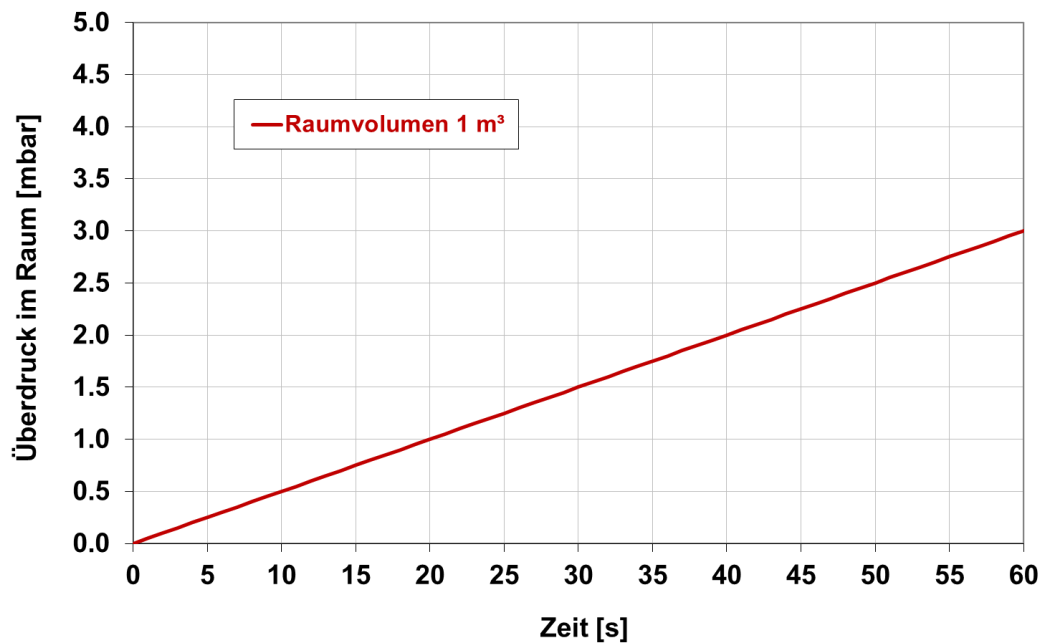


Abbildung 7: Linearer Anstieg des Überdrucks im Raum mit der Zeit (H₂-Massenstrom 15.3 g/h)

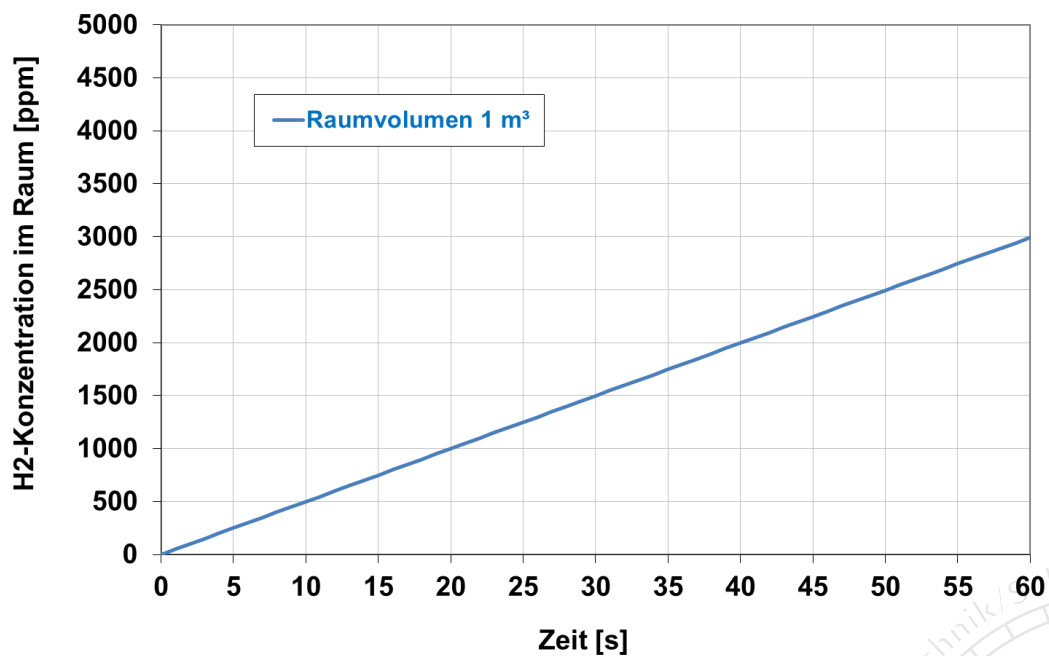
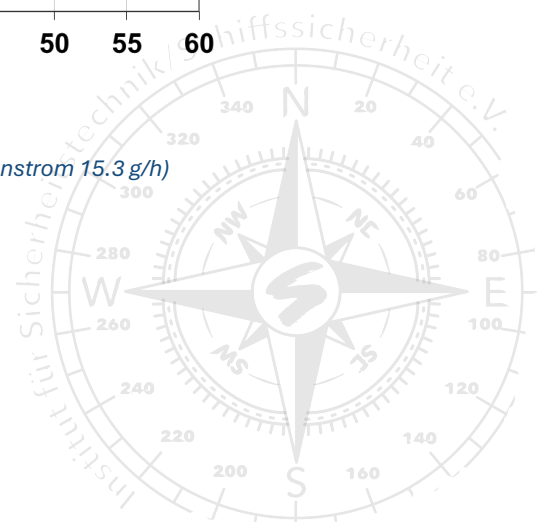


Abbildung 8: Linearer Anstieg der H₂-Konzentration im Raum mit der Zeit (H₂-Massenstrom 15.3 g/h)



Anmerkungen zur Druckerhöhung im Raum:

- Ein Überdruck von bereits 50 Pa ist schon relativ hoch, wenn gegen diesen Druck z.B. eine Fluchttür geöffnet werden müsste (bei 2 m² wäre eine Kraft von 100 N erforderlich, entspricht einem Gewicht von ca. 10 kg). Weiterhin kann das H₂-Luftgemisch an undichten Stellen in einen Nachbarraum oder die Umgebung abströmen.
- Der Überdruck kann durch eine geeignete Lüftungsanlage reduziert bzw. verhindert werden. Hierzu kann z.B. die Lüftungsanlage so eingestellt werden, dass der aus dem Raum abgesaugte Volumenstrom größer ist als der Zuluftvolumenstrom. Ohne Leck entsteht im Raum ein Unterdruck (in Bezug auf die Umgebung oder die Nachbarräume), welcher verhindert, dass bei einer H₂-Leckage Wasserstoff über undichte Stellen aus dem Raum in Nachbarräume strömt. Ein Überdruck entsteht dann im Raum, wenn der freigesetzte H₂-Volumenstrom größer wird als die Volumenstromdifferenz zwischen Ab- und Zuluft.

2 Literatur

- ¹ Recknagel, Sprenger: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, 1985, S. 1195
- ² <https://www.draeger.com/Content/Documents/Content/explosion-protection-gas-detection-systems-br-9046262-en-gb-1802-2.pdf>
- ³ https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2023/03/L11_HyResponder_Level4_DE.pdf

