

Informationssammlung

Berechnungen zu H₂-Leckage-Szenarien

Autor: Werner Fröhlingdorf | Stand: Januar 2026

Inhaltsverzeichnis

1	Wasserstoffleckage im Raum	3
1.1	Mittlere Raumkonzentration bei aktiver Lüftung	3
1.2	Maximale Raumkonzentration bei natürlicher Lüftung	6
1.3	Druckanstieg in einem geschlossenen Raum	7
2	Ausström- und Füllprozesse	10
2.1	Ausströmen aus einem Behälter	10
2.1.1	H2APEX 500 bar Druckgasspeicher	10
2.1.2	Vergleich Berechnung / Messergebnisse	15
2.2	Inertisierung eines Raumes	18
2.2.1	Vergleich Berechnung / Experiment	21
3	Literatur	22



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).

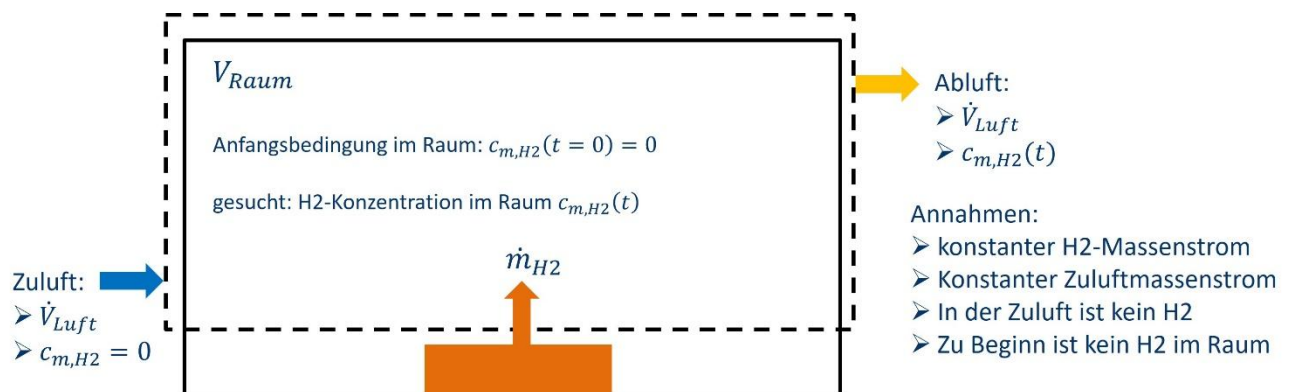


Abbildung 1: Annahmen für die Berechnung der zeitabhängigen mittleren H₂-Raumkonzentration

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.

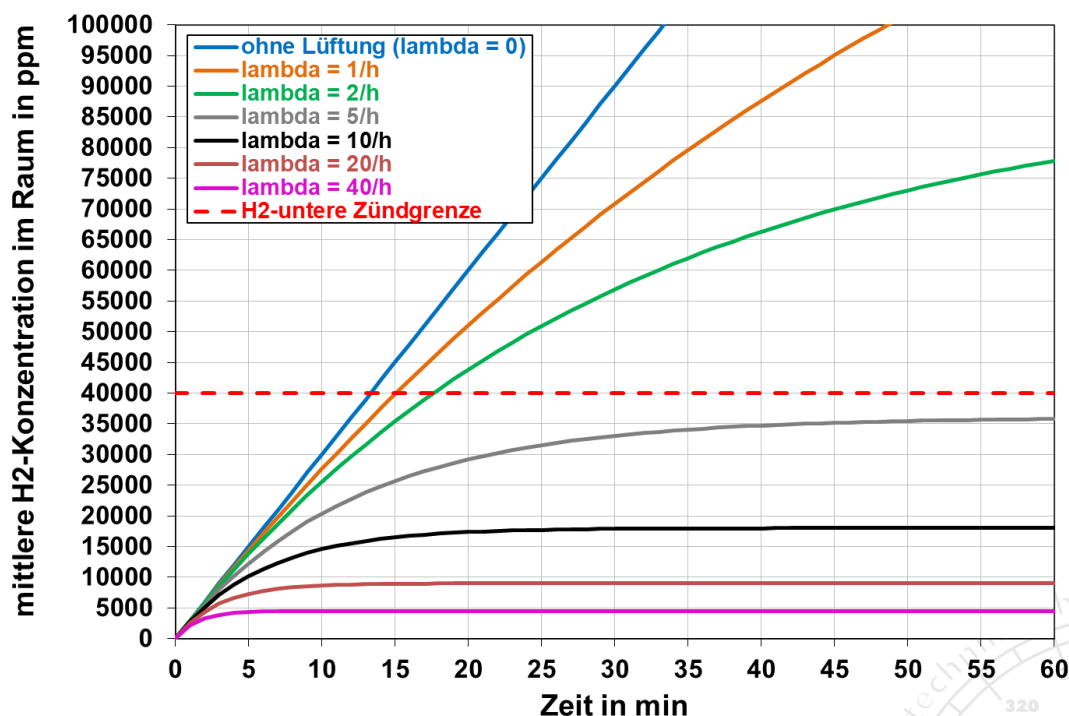


Abbildung 2: Raumvolumen 1 m³: Zunahme der mittleren H₂-Konzentration mit der Zeit in Abhängigkeit vom Luftwechsel λ (es gelten die Annahmen in Abbildung 1 und die zuvor aufgeführten Parameter)

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 $t \Rightarrow \infty$):

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

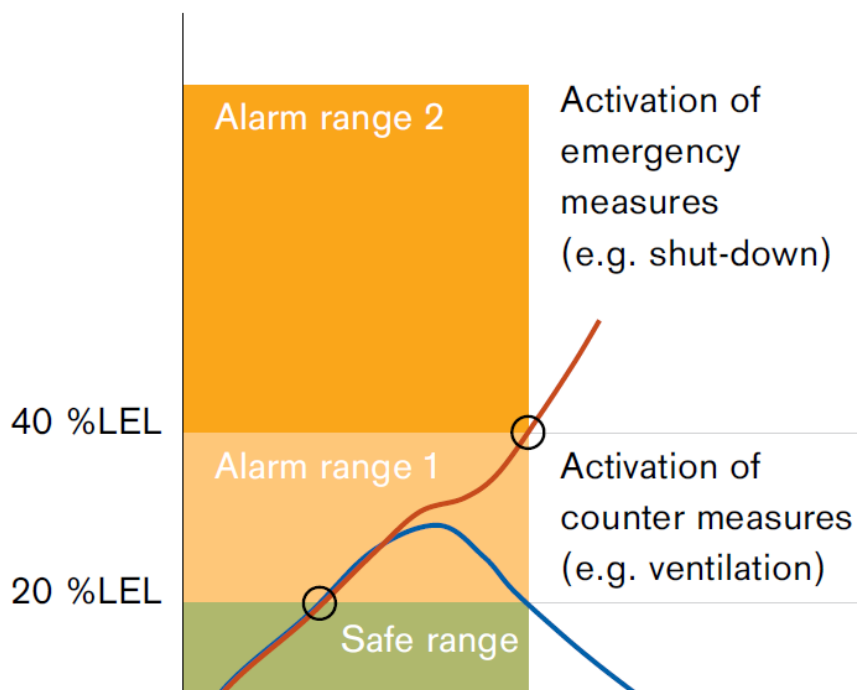


Abbildung 3: Notfallmaßnahmen bei H₂-Freisetzung in Abhängigkeit von den erreichten Schwellenwerten (LEL: Lower Explosive Limit – 4 Vol% für H₂)²

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.

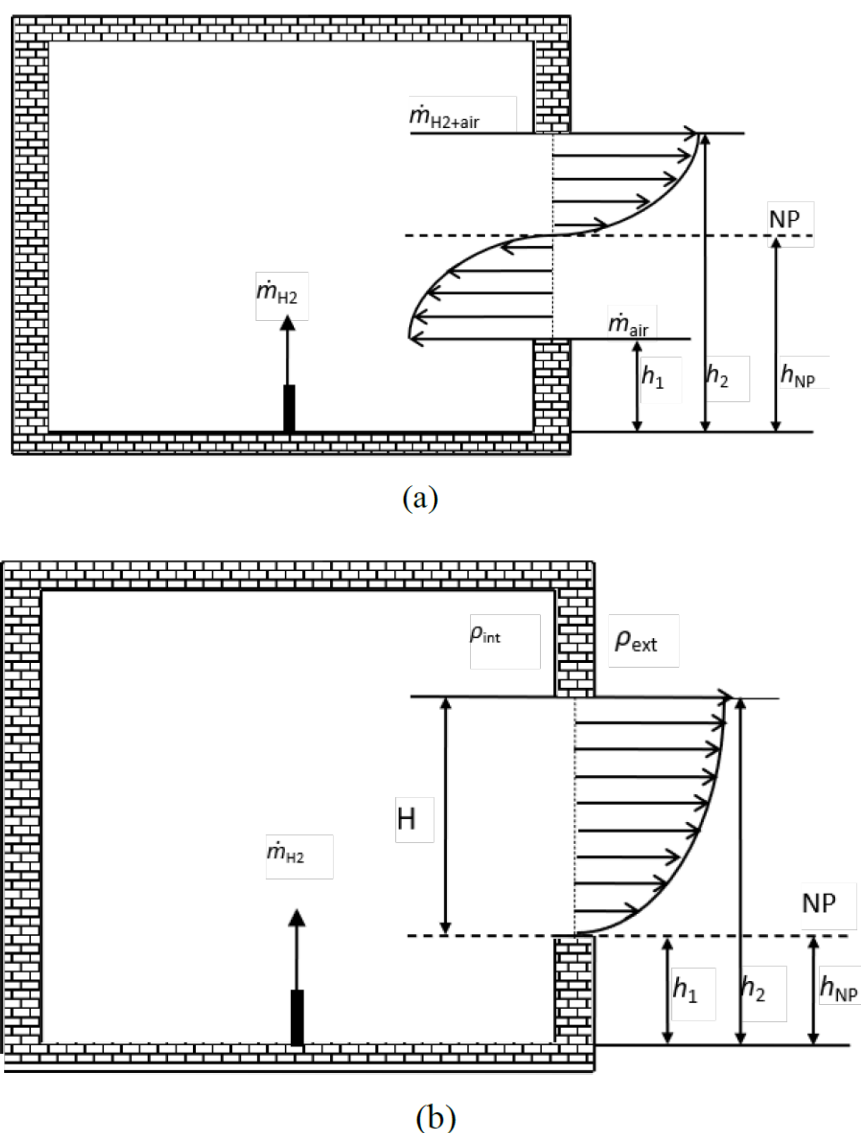


Abbildung 4: Strömungsgeschwindigkeit durch den Schlot bei natürlicher (a) und passiver (b) Belüftung³.



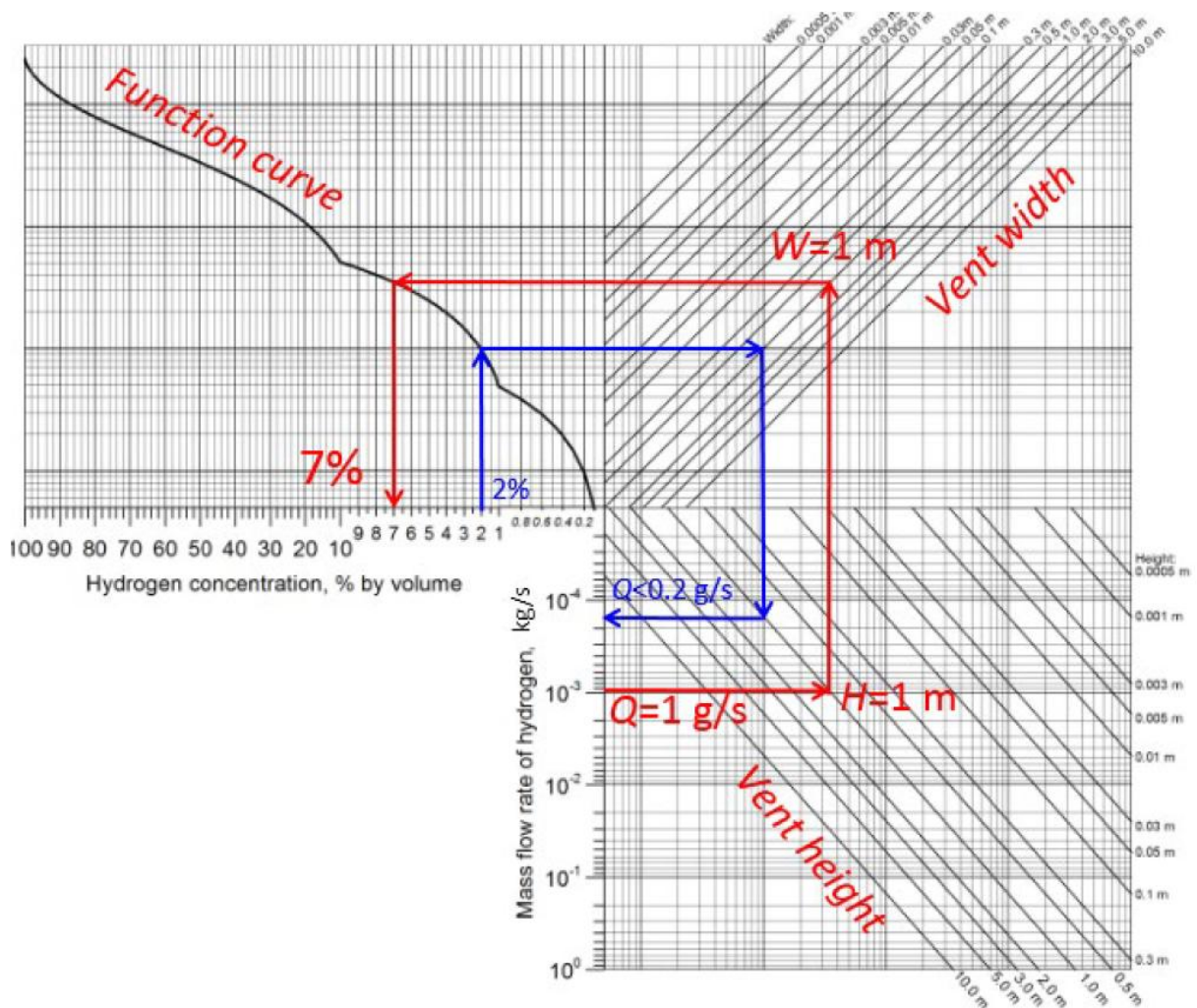


Abbildung 5: Technisches Nomogramm zur Berechnung des Höchstwerts der stationären Wasserstoffkonzentration im Gehäuse mit einer Entlüftung (Abflusskoeffizient $C=0,6$)³.

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.

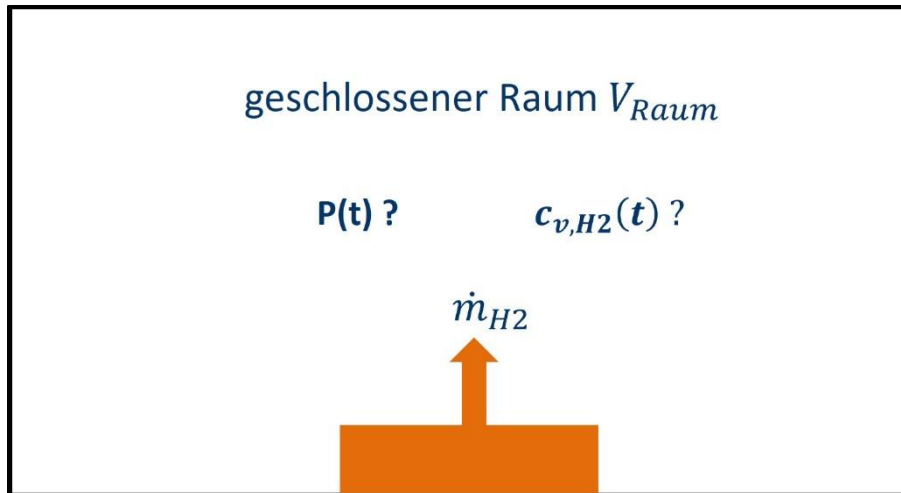


Abbildung 6: Modellskizze für die Berechnung des Druck- und Konzentrationsanstiegs in einem geschlossenen Raum

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-Eintrömdauer: 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):

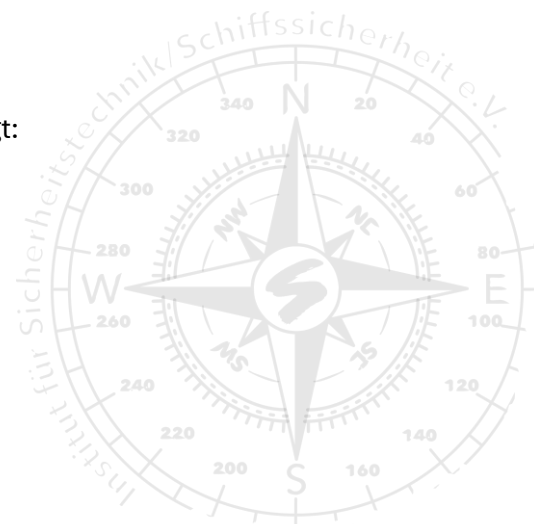
$$m(t) = m_{H_2}(t) + m_{Luft}$$

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

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

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).

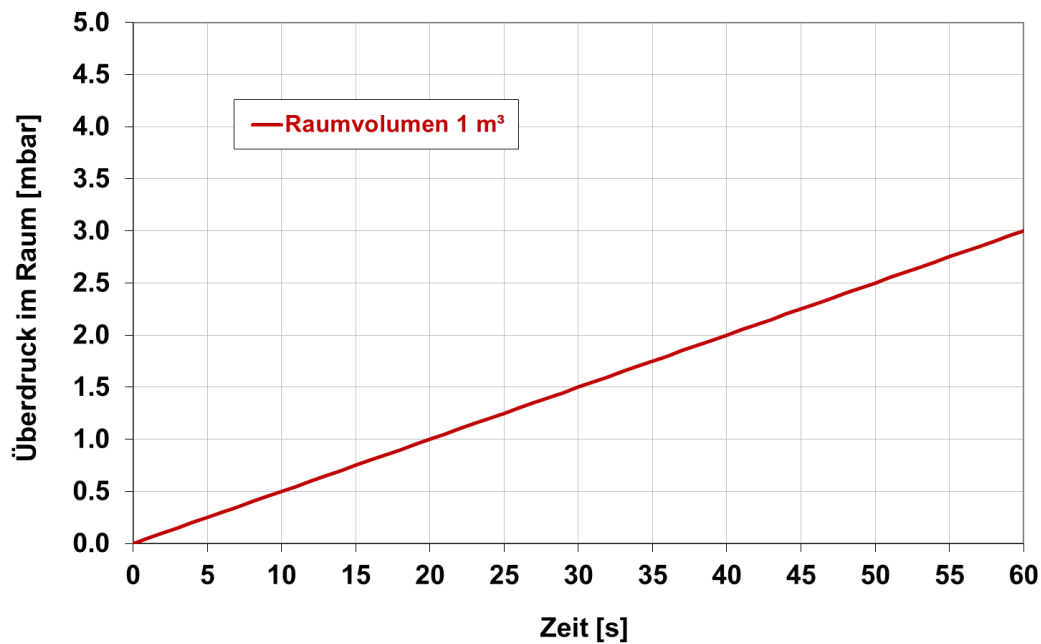


Abbildung 7: Linearer Anstieg des Überdrucks im Raum mit der Zeit (H₂-Massenstrom 15.3 g/h)

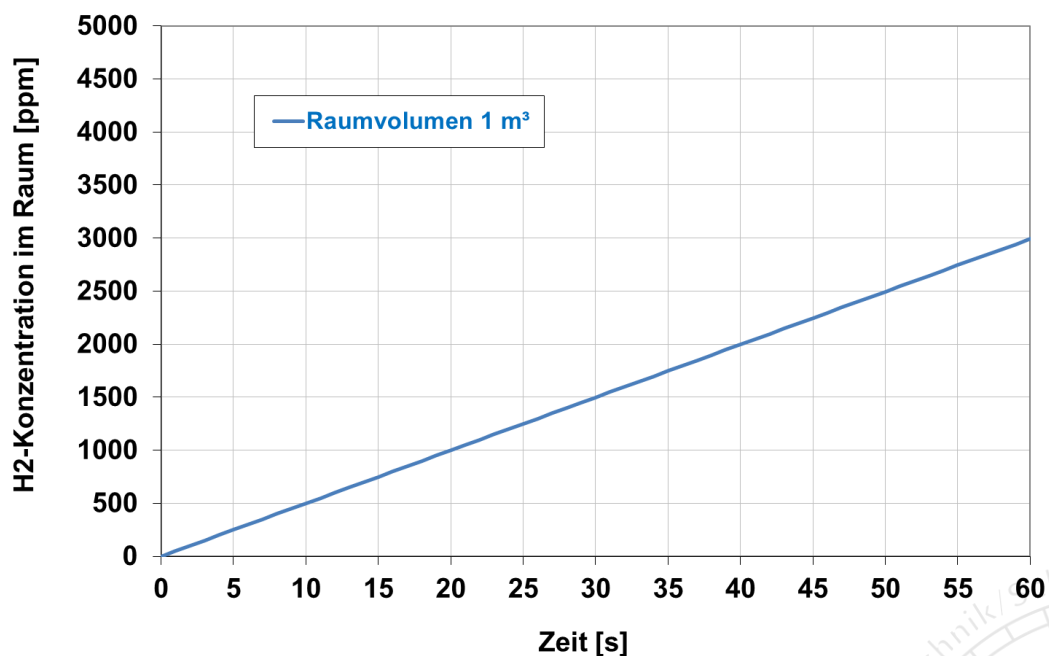
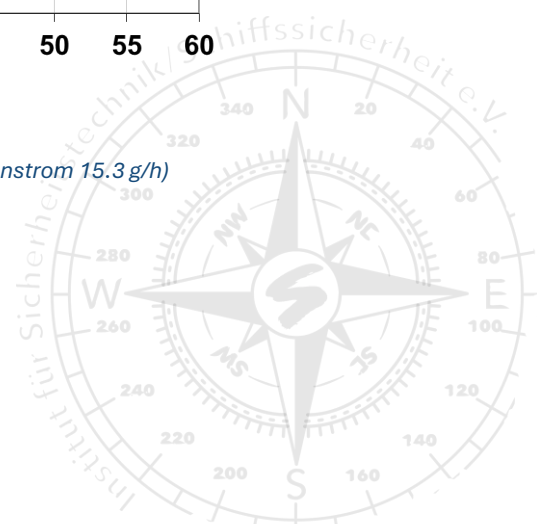


Abbildung 8: Linearer Anstieg der H₂-Konzentration im Raum mit der Zeit (H₂-Massenstrom 15.3 g/h)



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 Ausström- und Füllprozesse

2.1 Ausströmen aus einem Behälter

Zuordnung zu AP 4.1 Erfassung der die freigesetzte Wasserstoffmenge beeinflussenden Parameter oder AP 4.3 Modellentwicklung zur Berechnung der freigesetzten Menge

Zur Beurteilung der H₂-Quellen ist es hilfreich das Ausströmverhalten aus einem Behälter bei einer Leckage zu untersuchen. Hierzu soll mit Hilfe eines parametrisierten Zeitschrittverfahrens die zeitabhängige Entleerung eines Druckgasbehälters berechnet werden. Die Ergebnisse ermöglichen eine Darstellung der zeitabhängigen Druckabnahme im Behälter und des ausströmenden Gasmassenstroms.

2.1.1 H2APEX 500 bar Druckgasspeicher

Für die Berechnung der Entleerungszeit gelten folgende Annahmen:

- Gas: Wasserstoff
- Volumen des Druckgasbehälters: 420 L (entspricht dem Volumen eines Behälters von H2APEX, s. Abbildung 9)
- Anfangsdruck im Behälter: 500 bar absolut => der gespeicherte Wasserstoff hat bei 1 bar absolut ein Volumen von 210 m³
- H₂-Masse: 13.3 kg
- Gas-Temperatur im Behälter: 15°C
- Druck im Raum: 1 bar absolut
- Leckage-Durchmesser: 0.5 mm / 1 mm / 2 mm / 4 mm / 5 mm
- Ausflusszahl $\mu = 0.82$ (s. Tabelle 2)
- Zeitschritt für Berechnung: 1s





Abbildung 9: Typ IV 500 bar Druckgasspeicher von H2APEX⁴

Das Berechnungsverfahren wird nachfolgend beschrieben. Die Dichte von Wasserstoff kann bei dem hohen Druck von 500 bar anstelle einer idealen Gasgleichung mit der Abel-Noble-Gleichung für Realgase⁵ berechnet werden:

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T + b \cdot p}$$

b : Kovolumen, welches das Eigenvolumen der Moleküle berücksichtigt, $b = 0.007691 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Bei 500 bar und $T_0 = 15^\circ\text{C}$ ergibt sich für Wasserstoff eine Dichte von 31.6 kg/m^3 und eine Gasmasse im 420L-Behälter von 13.3 kg.

Für den Ausströmvorgang kann der zeitabhängige Behälterdruck $p_b(t)$ durch Umstellung der Abel-Noble-Gleichung aus der zeitabhängigen Gasdichte im Behälter $\rho_b(t)$ berechnet werden:

$$p_b(t) = \frac{\rho_b(t) \cdot R \cdot T}{1 - \rho_b(t) \cdot b}$$

Die zeitabhängige Dichte $\rho_b(t)$ berechnet sich aus der zeitabhängigen Gasmasse $m_b(t)$ im Behälter:

$$\rho_b(t) = \frac{m_b(t)}{V}$$

Bei Verwendung eines Zeitschrittverfahrens mit der Zeitschrittweite Δt ergeben sich folgende diskretisierten Gleichungen (Index b: Behälter, Index a: Auslassöffnung, u: Umgebung):

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t$$

$$p_{b,i+1} = \frac{\rho_{b,i+1} \cdot R \cdot T_0}{1 - \rho_{b,i+1} \cdot b}$$

$$\rho_{b,i+1} = \frac{m_{b,i+1}}{V_b}$$

$$m_{b,i+1} = m_{b,i} - \dot{m}_{a,i} \cdot \Delta t$$



$$\dot{m}_{a,i} = \mu \cdot \rho_{a,i} \cdot v_{a,i} \cdot A_{Leck}$$

$$\rho_{a,i} = \frac{p_{a,i}}{R \cdot T_{a,i} + b \cdot p_{a,i}}$$

$$T_{a,i} = T_0 - \frac{v_{a,i}^2}{2 \cdot c_p}$$

$$\text{Kritisches Druckverhältnis für Wasserstoff: } P_{krit} = \frac{p_u}{p_{b,krit}} = \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = \left(\frac{2}{1.41+1} \right)^{\frac{1.41}{1.41-1}} = 0.5266.$$

Bei einem Umgebungsdruck von $p_u = 1$ bar absolut ist der kritische Behälterdruck $p_{b,krit} = 1.9$ bar absolut. Bei einem Behälter-Druck von $p_{b,i} \geq 1.9$ bar absolut kann in der Auslassöffnung Schallgeschwindigkeit angenommen werden:

$$v_{a,i} = a = \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\kappa+1} \cdot R \cdot T_0} = 1183.9 \text{ m/s}$$

Der Druck in der Auslassöffnung wird mit dem kritischen Druckverhältnis P_{krit} und dem aktuellen Behälterdruck $p_{b,i}$ berechnet: $p_{a,i} = P_{krit} \cdot p_{b,i} = 0.5266 \cdot p_{b,i}$.

Die nachfolgenden Auswirkungen der Expansion auf Umgebungsdruck (Überschallströmung, Verdichtungsstöße, Freistrah) führen zu einer Dissipation der Strömung.

Bei $p_{b,i} < 1.9$ bar kann die Machzahl in der Auslassöffnung aus dem Druckverhältnis berechnet werden:

$$Ma_i = \sqrt{\frac{2}{\kappa-1} \cdot \left[\left(\frac{p_{b,i}}{p_u} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]}$$

$$\Rightarrow v_{a,i} = Ma_i \cdot a$$

Der Druck in der Auslassöffnung ist dann gleich dem Umgebungsdruck: $p_{a,i} = p_u$.

Die Berechnungsergebnisse in Abbildung 10 zeigen die zeitabhängige Absenkung des H₂-Drucks im 420L Behälter für 4 unterschiedliche Leckage-Durchmesser. Die Entleerungszeiten sind in Tabelle 2 enthalten. Bei einer Halbierung des Leckage-Durchmessers steigt die Entleerungszeit, aufgrund des verringerten Querschnitts auf den 4-fachen Wert an.



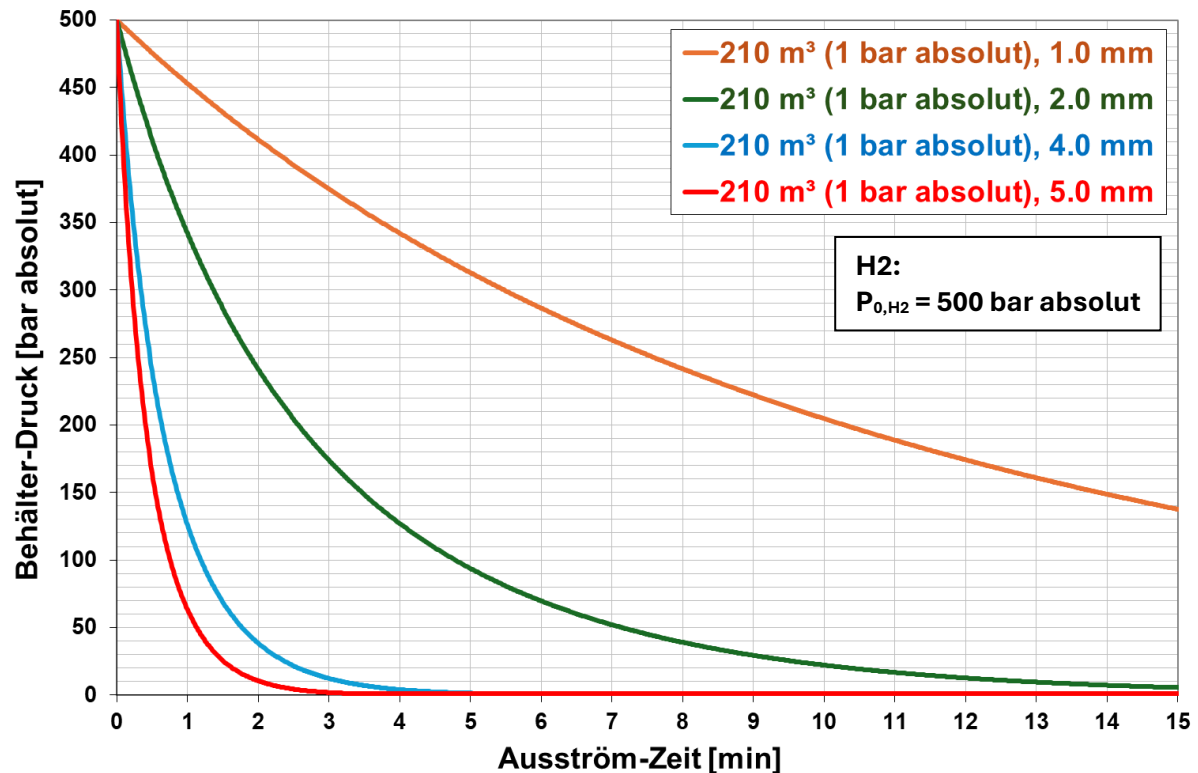


Abbildung 10: Zeitabhängige Absenkung des H₂-Behälter-Drucks (Behältervolumen 420 L) für die Leckagedurchmesser 1 mm, 2 mm, 4 mm und 5 mm. Die Berechnung erfolgt bis zu einem Behälter-Druck von 1 bar absolut. Das H₂-Restvolumen im Behälter von 420 L bei 1 bar absolut ist vernachlässigbar.

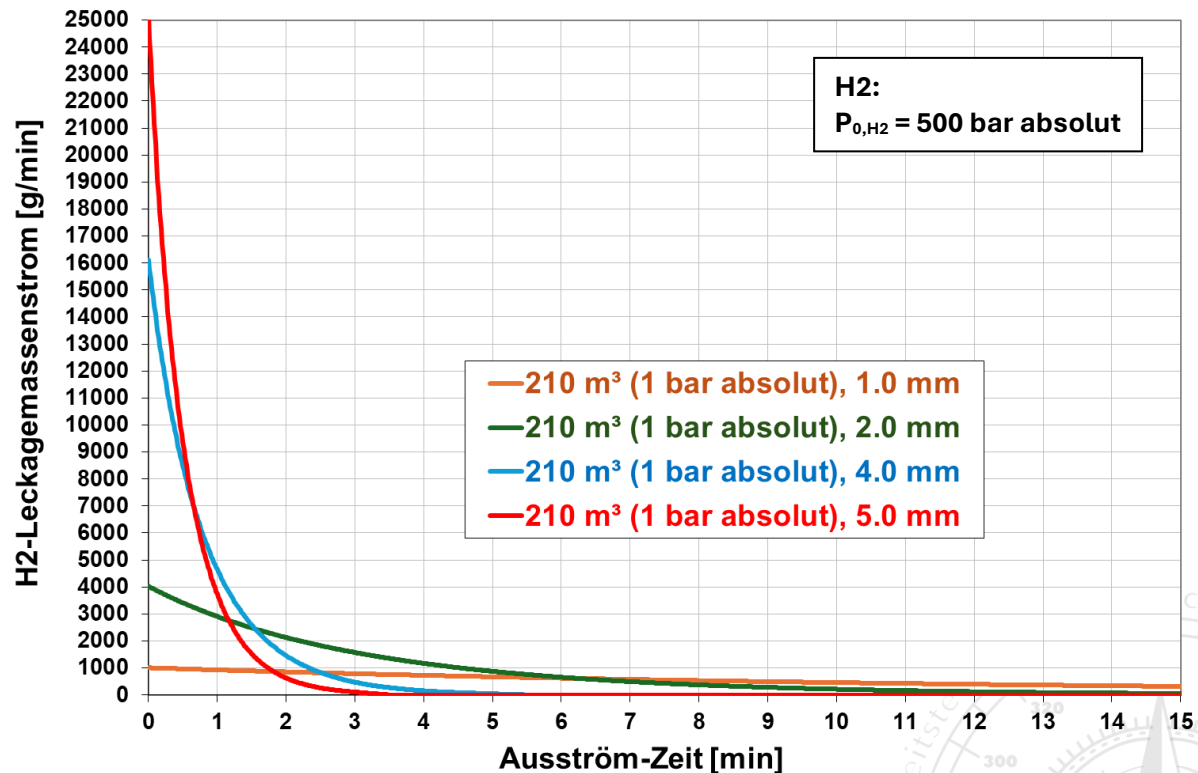


Abbildung 11: Zeitabhängige Absenkung des H₂-Leckagemassenstroms (Behältervolumen 420 L) für die Leckagedurchmesser 1 mm, 2 mm, 4 mm und 5 mm. Die Berechnung erfolgt bis zu einem Behälter-Druck von 1 bar absolut. Das H₂-Restvolumen im Behälter von 420 L bei 1 bar absolut ist vernachlässigbar.

Der zeitabhängige Behälter-Druck (s. Abbildung 10) und H₂-Leckagemassenstrom (Abbildung 11) zeigen, dass beide Größen mit ansteigendem Leckagedurchmesser stärker abfallen (Anstieg des negativen Gradienten). Bei z.B. 5 mm unterschreitet der Massenstrom nach ca. 1.8 Minuten, aufgrund der schnellen Abnahme des Behälterdrucks, den von 1 mm.

Die zeitabhängige Änderung des Behälterdrucks ist ein wichtiger Indikator für den Leckage-Massenstrom (bei geschlossenen Ventilen).

Bei dem Vergleich mit Luft in Abbildung 12 ist die längere Entleerungszeit bei Luft im Vergleich zu H₂ zu erkennen. Die Anfangs-Luftmasse im Behälter von 192.5 kg sowie die Dichte sind das 14.5-fache von Wasserstoff (29/2). Die Schallgeschwindigkeit von Luft ist $\sqrt{\frac{2}{29}} = \frac{1}{3.8}$ von H₂, weshalb die Entleerungszeit bei Luft ca. das 3.8-fache von H₂ beträgt (14.5 / 3.8), s. Tabelle 2.

Tabelle 2: Vergleich H₂ / Luft: Entleerungszeit (der Behälter-Druck erreicht 1 bar absolut) in Abhängigkeit vom Leckage-Durchmesser (420 L Behälter, Anfangsdruck 500 bar absolut)

Leckdurchmesser	H ₂ - Entleerungszeit	Luft - Entleerungszeit
mm	Minuten	Minuten
1	89.5	341.9
2	22.3	85.4
4	5.5	21.3
5	3.5	13.6

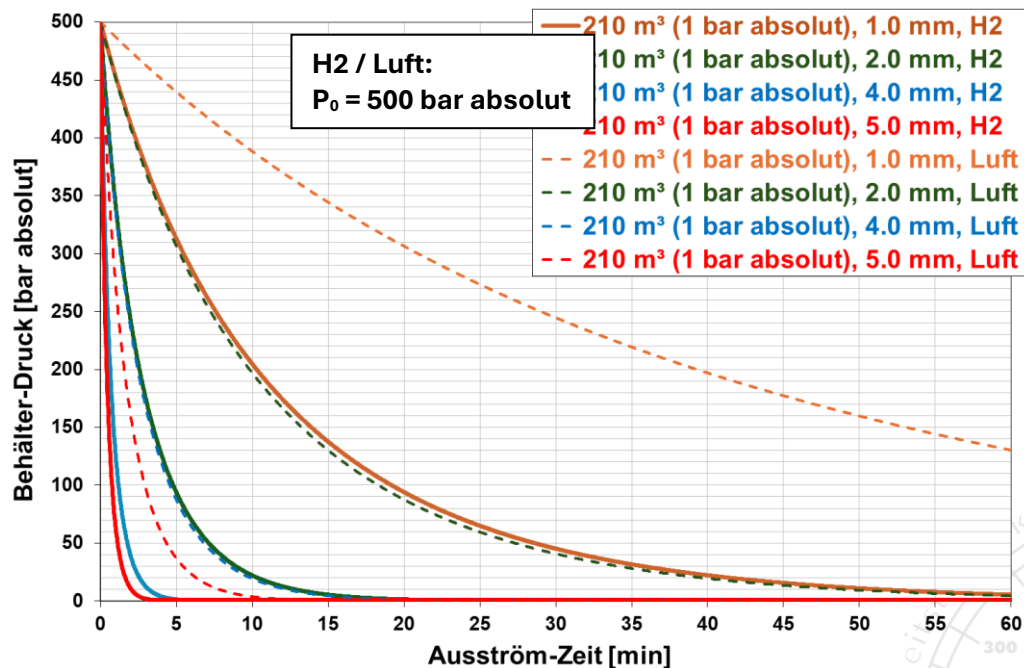


Abbildung 12: Vergleich H₂ / Luft: Zeitabhängige Absenkung des Behälter-Drucks (Behältervolumen 420 L) für die Leckagedurchmesser 1 mm, 2 mm, 4 mm und 5 mm. Die Berechnung erfolgt bis zu einem Behälter-Druck von 1 bar absolut. Das H₂-Restvolumen im Behälter von 420 L bei 1 bar absolut ist vernachlässigbar.

2.1.2 Vergleich Berechnung / Messergebnisse

In ⁶ sind Messergebnisse von der zeitabhängigen Druckabnahme in einem mit Stickstoff gefüllten Zylinder (5 bar) enthalten (s. Abbildung 13).

Für Module 1 bis 4 (Öffnungsdurchmesser 8.1 mm / 25.7 mm / 44.5 mm / 57.4 mm, s. Abbildung 13) werden die Messergebnisse der zeitabhängigen Druckabnahme mit Ergebnissen der erstellten Berechnungsmethode verglichen. Das Volumen des Druckgaszylinders (Vessel) wird in ⁶ zu 35.6 L angegeben. Angaben zum Innendurchmesser und Länge des Zylinders werden nicht gemacht. Bei Annahme eines Innendurchmessers vom 3-fachen des Öffnungsdurchmessers von Module 4 von 57.4 mm (s. Abbildung 13) ist der Innendurchmesser 172.2 mm und die Länge des Zylinders 1529 mm (Volumen 35.6 L).

In den Abbildung 14 und Abbildung 15 sind die berechneten zeitabhängigen Verläufe der Druckabnahme für die 4 Öffnungsdurchmesser für eine Ausflusszahl von 0.62 und 0.82 dargestellt. In Tabelle 1 (nicht die Tabelle 2 in Abbildung 2) erfolgt ein Vergleich von Berechnung und Experiment.

Bei Module 1 (8.1 mm) ist die berechnete Entleerungszeit größer, bei Module 2 (25.7 mm) näherungsweise gleich groß und bei den Modulen 3 und 4 (44.5 mm / 57.4 mm) kleiner als die der Experimente in ⁶. Bei den Modulen 2 bis 4 ist die experimentell ermittelte Entleerungszeit kleiner als 1s. Bei diesen Messungen ist die Messunsicherheit voraussichtlich größer als bei Module 1. Es können u.a. Trägheitseffekte entstehen, durch die Beschleunigung der Gasmasse und den Strömungsvorgang im Zylinder, welche bei dem Berechnungsverfahren nicht berücksichtigt werden. Bei Module 1 kann der axiale Druckgradient ein beschleunigtes Ausströmen erzeugen (Entleerungszeit des Experiments ist geringer als bei der Berechnung).



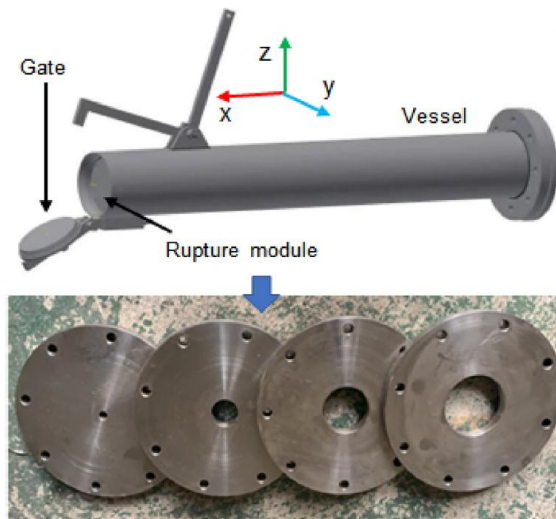


Fig. 1. The main vessel and rupture modules of the GROSS experimental system. The replaceable rupture modules simulate the varied sizes of the damages on the vessel.

Table 1
Calculation for the design of rupture modules.

	Module 1	Module 2	Module 3	Module 4
Eu	1.78	17.78	59.27	94.83
A/A_0	0.15‰	1.5‰	5‰	8‰
A [mm ²]	51.7	517.1	1551.2	2585.4
d [mm]	8.1	25.7	44.5	57.4

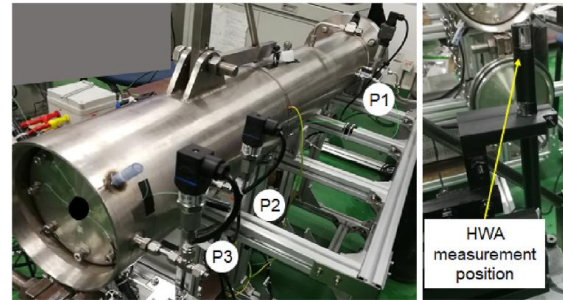


Fig. 2. Pressure and velocity measurement devices of the GROSS experimental system.

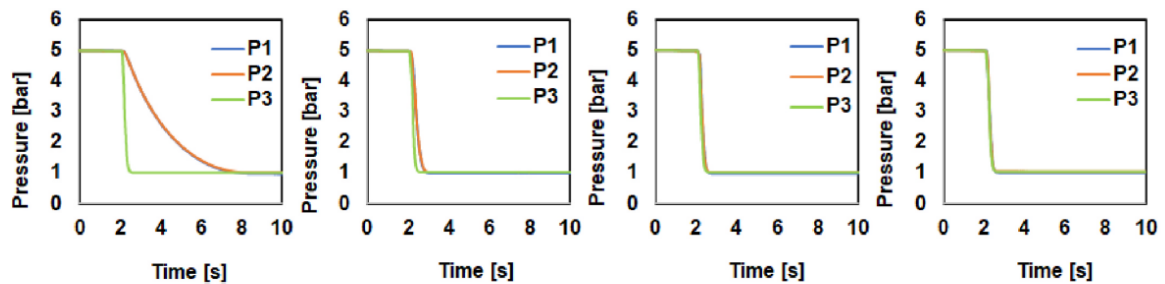


Fig. 8. Pressure measurement results of modules 1 to 4 from left to right.

Table 2

Duration of the pressure reduction to the atmospheric level

	$\Delta t_{@}(P3 \text{ to } 1 \text{ atm})$ [s]	$\Delta t_{@}(P1, P2 \text{ to } 1 \text{ atm})$ [s]
Module 1	0.46	5.31
Module 2	0.48	0.84
Module 3	0.54	0.54
Module 4	0.53	0.53

Abbildung 13: Versuchsaufbau und Messergebnisse für die zeitabhängige Druckabnahme⁶



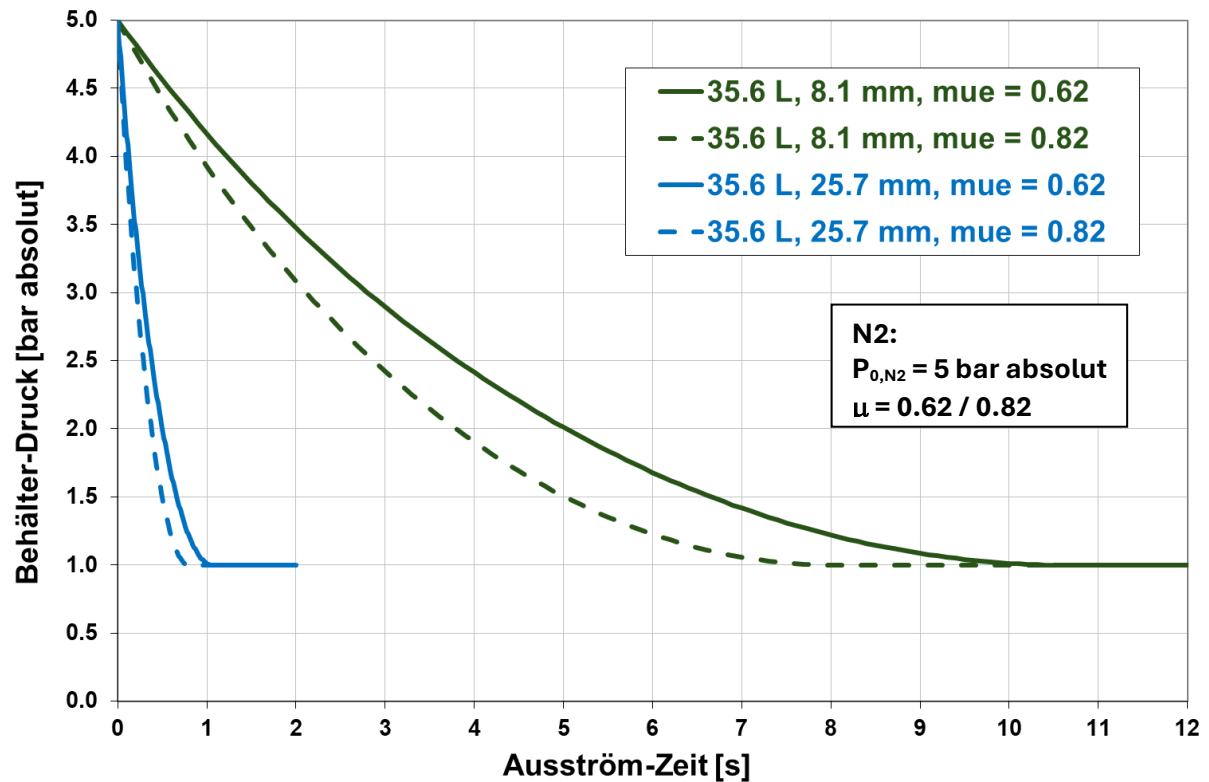


Abbildung 14: Berechnete zeitabhängige Druckabnahme für die Experimente Module 1 (8.1 mm) und Module 2 (25.7 mm)

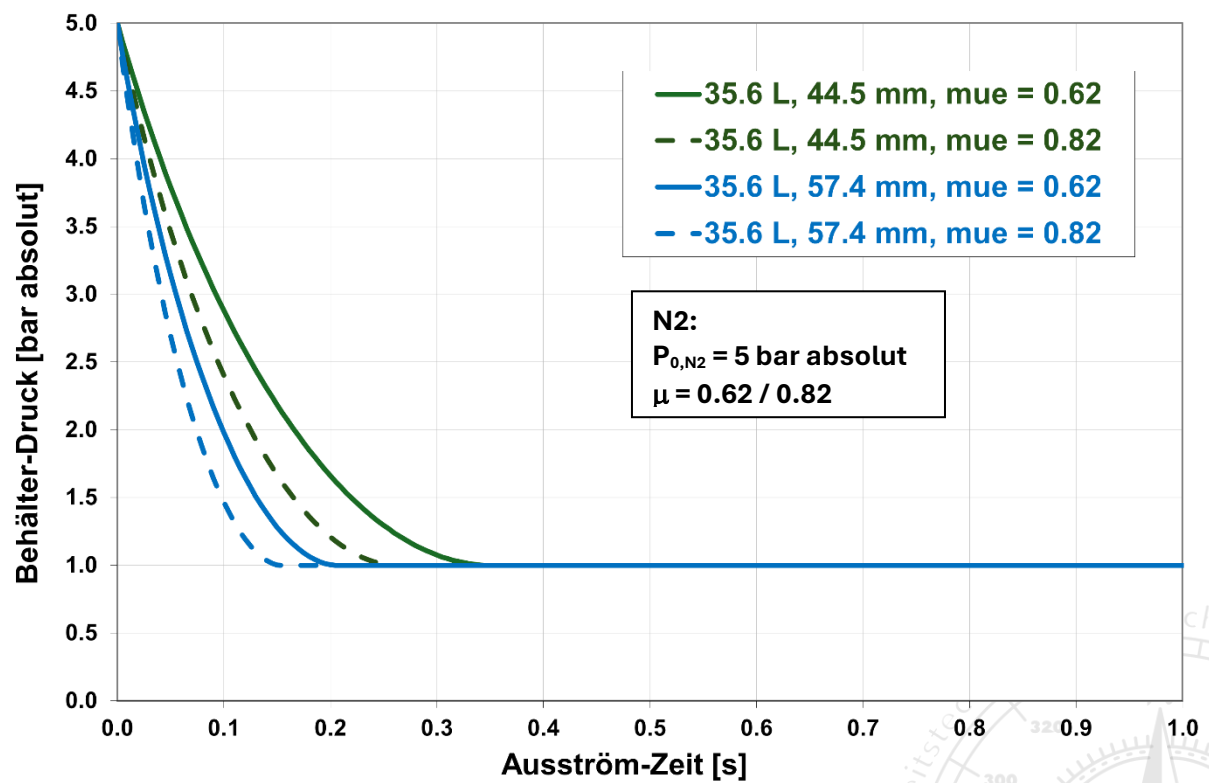


Abbildung 15: Berechnete zeitabhängige Druckabnahme für die Experimente Module 3 (44.5 mm) und Module 4 (57.4 mm)

Tabelle 1: Entleerungszeit (der Behälter-Druck erreicht 1 bar absolut) von Experiment und Berechnung für Module 1 (8.1 mm) und Module 2 (25.7 mm), 35.6 L Zylinder, N₂-Anfangsdruck 5 bar absolut

Öffnungsdurchmesser in mm	Entleerungszeit in s, Experiment	Entleerungszeit in s, Berechnung, $\mu = 0.82$	Entleerungszeit in s, Berechnung, $\mu = 0.62$
8.1 (Module 1)	5.31	7.9	10.6
25.7 (Module 2)	0.84	0.79	1.05
44.5 (Module 3)	0.54	0.26	0.35
57.4 (Module 4)	0.53	0.16	0.21

2.2 Inertisierung eines Raumes

Zuordnung zu AP 3.2 Konzeption der Vorversuche

Aus sicherheitstechnischen Gründen wird der Versuchsraum mit Stickstoff inertisiert. Durch die Stickstoffzuführung soll die Sauerstoffkonzentration von 21 Vol% auf ≤ 5 Vol% sinken. Zur Einschätzung der notwendigen Inertisierungszeit wird die zeitabhängige Abnahme der mittleren Sauerstoffkonzentration im Versuchsraum mit einem numerischen Zeitschrittverfahren berechnet.

Für die Berechnung der Inertisierungszeit gelten folgende Annahmen:

- Volumen des Versuchsraums: $2 \text{ m} * 0.8 \text{ m} * 0.6 \text{ m} = 0.96 \text{ m}^3$, das Volumen der Belüftungsrohre (bis zu den Klappen) wird nicht berücksichtigt
- Es strömt keine Zuluft in den Raum, die Klappe in der Zuluft-Leitung wird als vollkommen dicht angenommen (kein Luftaustausch mit der Umgebung), über die Abluft-Klappe kann ein N₂ / O₂ –Gemisch abströmen (s. nächster Punkt)
- Es entsteht Kein Druckaufbau im Messvolumen: $\dot{m}_{N_2, zu} = \dot{m}_{ab}$, die N₂ / O₂ –Konzentration der Abluft entspricht der mittleren Raumkonzentration
- O₂-Anfangskonzentration: 21 Vol%
- O₂-Endkonzentration: 5 Vol%
- Temperatur 10°C = konstant
- Druck im Raum: 1 bar absolut
- N₂-Rohrinnendurchmesser: 3 mm / 5 mm
- N₂: Schallgeschwindigkeit im Auslass (Ma = 1)
- Ausflusszahl $\mu = 0.82$ (s. Tabelle 2)
- Konstanter N₂-Massenstrom
- Zeitschritt für Berechnung: 1s



Berechnungen zu H₂-Leckage-Szenarien

Tabelle 2⁷: Auswahl der Ausflusszahl von $\mu = 0.82$ für ein zylindrisches Ansatzrohr (eine Ausflusszahl $\mu < 1$ bedeutet, dass ein Teil des Querschnitts aufgrund einer Strömungseinschnürung oder anderen Effekten nicht durchströmt wird)

Geschwindigkeitsbeiwert - Kontraktionszahl - Ausflusszahl verschiedener Ausflussöffnungen

Form Ausflussöffnung	Geschwindigkeitsbeiwert φ	Kontraktionszahl α	Ausflusszahl μ														
 scharfkantig	0,97	0,61...0,64	0,59...0,62														
 abgerundete Düse	0,97...0,99	$\approx 1,0$	0,97...0,99														
 zylindrisches Ansatzrohr $L/d = 2...3$	$\approx 0,82$	$\approx 1,0$	$\approx 0,82$														
 konisches Ansatzrohr $L/d = 3$		<table><tr><td>β</td><td>10°</td><td>20°</td><td>45°</td><td>90°</td></tr><tr><td>μ</td><td>0,95</td><td>0,94</td><td>0,88</td><td>0,74</td></tr></table>	β	10°	20°	45°	90°	μ	0,95	0,94	0,88	0,74					
β	10°	20°	45°	90°													
μ	0,95	0,94	0,88	0,74													
 0,97 kleines L 0,95 großes L		<table><tr><td>da^2/de^2</td><td>0,1</td><td>0,2</td><td>0,4</td><td>0,6</td><td>0,8</td><td>1,0</td></tr><tr><td>α</td><td>0,83</td><td>0,84</td><td>0,87</td><td>0,90</td><td>0,94</td><td>1,0</td></tr></table>	da^2/de^2	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	α	0,83	0,84	0,87	0,90	0,94	1,0	
da^2/de^2	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0											
α	0,83	0,84	0,87	0,90	0,94	1,0											

Die wichtigsten Berechnungsgleichungen sind:

$$\text{Massenstrom: } \dot{m}_{N_2} = \mu \cdot \rho_{N_2} \cdot a_{N_2} \cdot A$$

$$\text{Schallgeschwindigkeit: } a_{N_2} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} \cdot R \cdot T_{Ruhe}} = 313.2 \text{ m/s}$$

$$\text{kritisches Druckverhältnis: } \Pi_{krit} = \left(\frac{p_u}{p_o}\right)_{krit} = \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 0.5283, \left(\frac{p_o}{p_u}\right)_{krit} = 1.89$$

$$\text{Ruhedruck des Stickstoffs: } p_{0,N_2} = 1.89 \text{ bar absolut}$$

$$\text{Ruhedichte des Stickstoffs: } \rho_{0,N_2} = \frac{p_{0,N_2}}{R_{N_2} \cdot T_{0,N_2}} = 2.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Dichte bei Schallgeschwindigkeit: } \rho_{N_2} = \rho_{0,N_2} \cdot (\Pi_{krit})^{\frac{1}{\chi}}$$

Die verwendeten diskretisierten Gleichungen des Zeitschrittverfahrens lauten:

$$\text{N}_2\text{-Masse im Volumen: } m_{N_2,i+1} = m_{N_2,i} + \dot{m}_{N_2} \cdot \Delta t \cdot (1 - c_{mass,N_2,i})$$

$$\text{O}_2\text{-Masse im Volumen: } m_{O_2,i+1} = m_{O_2,i} - \dot{m}_{N_2} \cdot \Delta t \cdot c_{mass,O_2,i}$$

$$\text{Massenanteil N}_2: c_{mass,N_2,i+1} = \frac{m_{N_2,i+1}}{m_{N_2,i+1} + m_{O_2,i+1}}$$

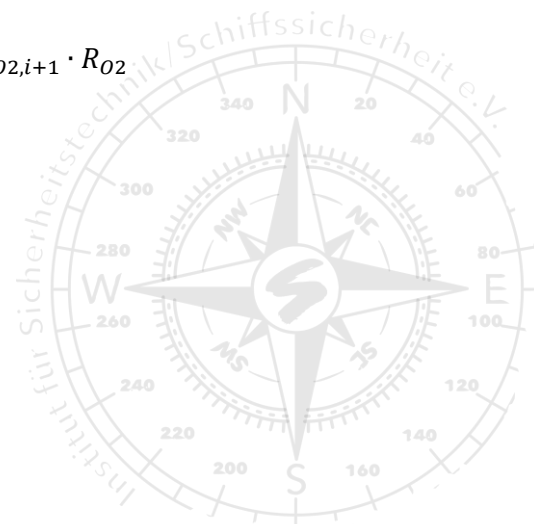
$$\text{Massenanteil O}_2: c_{mass,O_2,i+1} = 1 - c_{mass,N_2,i+1}$$

$$\text{Gaskonstante Gasgemisch: } R_{Gemisch,i+1} = c_{mass,N_2,i+1} \cdot R_{N_2} + c_{mass,O_2,i+1} \cdot R_{O_2}$$

$$\text{Molgewicht Gasgemisch: } M_{Gemisch,i+1} = R_{mol} / R_{Gemisch,i+1}$$

$$\text{Raumanteil N}_2: c_{Volumen,N_2,i+1} = c_{mass,N_2,i+1} \cdot \frac{M_{Gemisch,i+1}}{M_{N_2}}$$

$$\text{Raumanteil O}_2: c_{Volumen,O_2,i+1} = 1 - c_{Volumen,N_2,i+1}$$



Ergebnisse (s. auch Abbildung 16):

- N₂ Schallgeschwindigkeit: 313 m/s
- **Inertisierungszeit: 10.6 Minuten (di = 3 mm), 3.8 Minuten (di = 5 mm)**
- Massenstrom 155.5 g/min = 9.3276 kg/h (di = 3 mm), 431.8 g/min = 25.9098 kg/h (di = 5 mm)
- Volumenstrom 2.2 L/s (di = 3 mm), 6.1 L/s (di = 5 mm), bezogen auf $\rho_{N_2} = 1.189 \text{ kg/m}^3$ bei 10°C, 1 bar absolut
- dem Volumen zugeführte N₂-Masse: 0.205 kg
- insgesamt zugeströmte N₂-Masse: 1.6505 kg

Die Ergebnisse zeigen, dass bei der Annahme von Schallgeschwindigkeit im Auslass die zu erwartende Inertisierungszeit einige Minuten beträgt. Bei einer Drosselung der Zuströmung durch ein Ventil erhöht sich die Füllzeit entsprechend. Bei z.B. einer Machzahl von $Ma = 0.1$ im Auslass beträgt die Füllzeit näherungsweise das 10-fache von $Ma = 1$, also bei $di = 3 \text{ mm}$ 106 Minuten und bei $di = 5 \text{ mm}$ 38 Minuten.

Die Berechnung der Inertisierungszeit kann für beliebige Parameter (s. Annahmen) durchgeführt werden.

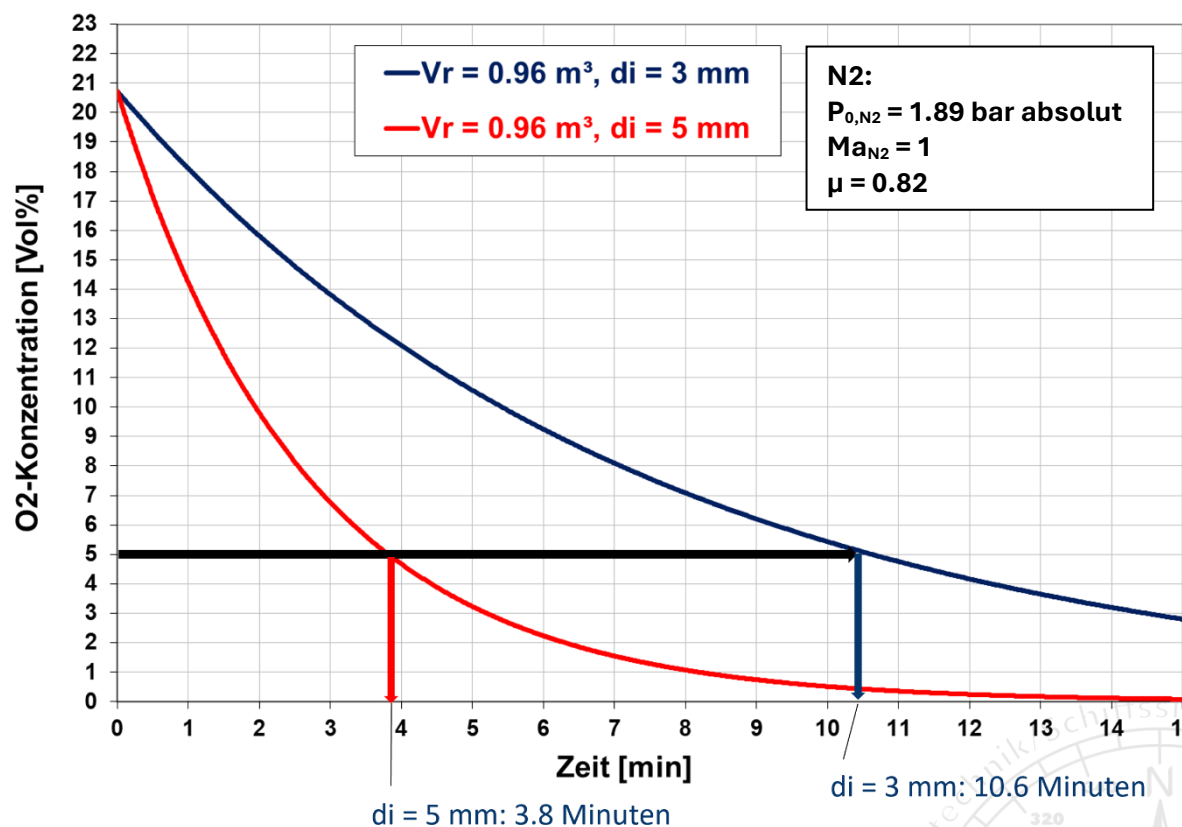


Abbildung 16: Ergebnisse der Berechnungen für die zeitabhängige Abnahme der mittleren O₂-Konzentration im Versuchsraum durch Zustrom von N₂

2.2.1 Vergleich Berechnung / Experiment

Bei GTE wurde am 11.08.2025 ein Experiment zur O₂-Reduzierung in einer Messkammer mit einem Volumen von 0.56 m³ durchgeführt⁸.

Bei der Versuchsbeschreibung wird angegeben, dass der Druck in der 50L N₂-Flasche in 1 Stunde von 100 bar auf 81 bar sinkt. Aus der Dichtedifferenz der beiden Zustände kann die ausgeströmte N₂-Masse und der mittlere Massenstrom berechnet werden (die Dichte wurde online berechnet⁹, d.h. die Dichten von Stickstoff für 101 bar absolut und 82 bar absolut bei 20°C):

$$\rho_{N_2,100 \text{ bar},20^\circ\text{C}} = 116.126 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{N_2,81 \text{ bar},20^\circ\text{C}} = 94.7368 \text{ kg/m}^3$$

$$\Delta m_{N_2} = \Delta \rho \cdot V = \frac{(116.126 - 94.7368) \text{ kg}}{\text{m}^3} \cdot 50 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 1.06946 \text{ kg}$$

$$\dot{m}_{N_2} = \frac{\Delta m_{N_2}}{\Delta t} = \frac{1.06946 \text{ kg}}{1 \text{ h}} = 1.06946 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Die für diesen N₂-Massenstrom berechnete zeitabhängige Abnahme der O₂-Konzentration in der Messkammer (0.56 m³) ist in Abbildung 17 dargestellt. Der Vergleich mit den Versuchsergebnissen zeigt bei der Berechnung eine etwas schnellere Absenkung der O₂-Konzentration. Die Inertisierungszeit bis zum Erreichen von 5 Vol% O₂ ist bei der Berechnung 52.3 Minuten, beim Versuch 60 Minuten.

Erklärungen für die Abweichung sind z.B.:

- Im Versuch strömt im Mittel eine höhere N₂-Konzentration aus als die mittlere Konzentration im Raum, weshalb insgesamt mehr N₂ ausströmt bis 5 Vol% O₂ erreicht werden.
- Die Messung der O₂-Konzentration erfolgt an einer Position (z.B. Raumecke mit vergleichsweise schlechter N₂-Zuführung), wo die O₂-Konzentration größer ist als die mittlere Konzentration im Raum.

Trotz dieser Abweichung kann das entwickelte Berechnungsverfahren für die näherungsweise Berechnung der Inertisierungszeit eingesetzt werden. Der wichtigste Parameter ist neben dem zu inertisierenden Raumvolumen der N₂-Massenstrom, wozu separate Berechnungen oder auch Messungen durchgeführt werden können.

Mit Hilfe weiterer Ergebnisse, bei denen der Versuchsraum inertisiert werden muss, kann eine weitere Validierung des Berechnungsverfahrens zur Bestimmung der Inertisierungszeit erfolgen.



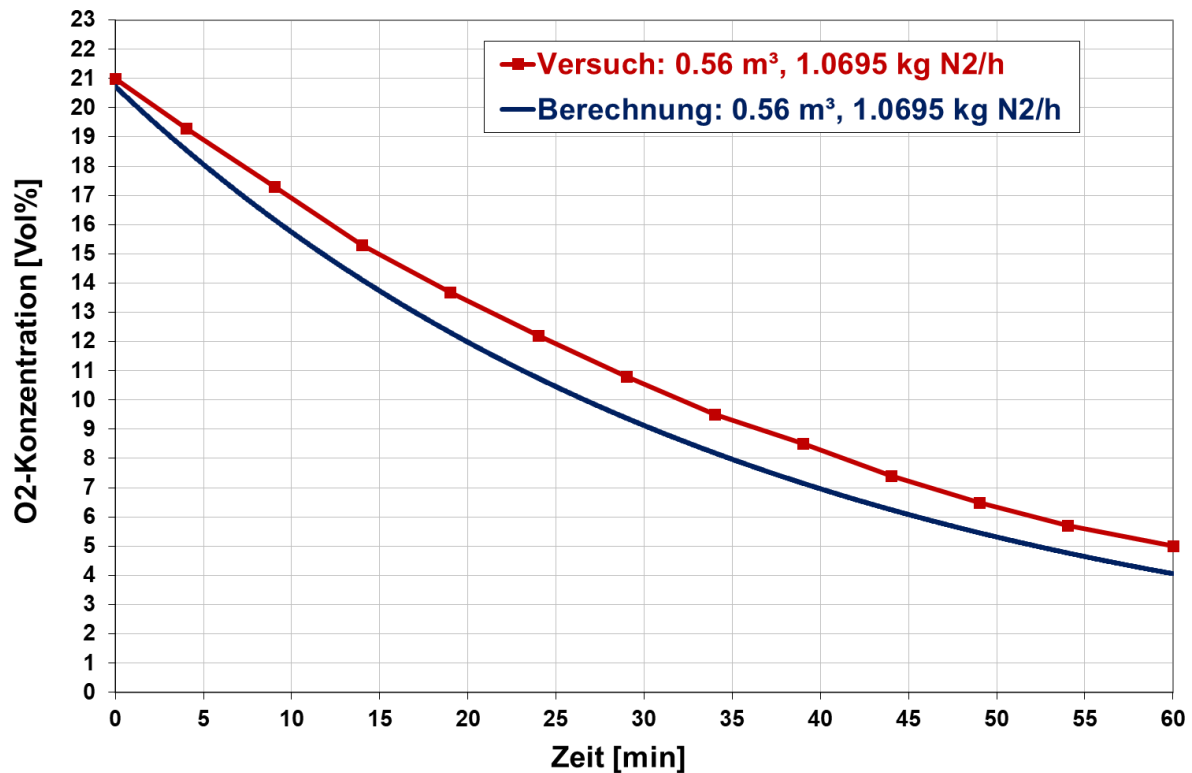


Abbildung 17: Vergleich Versuch / Berechnung - zeitabhängige Abnahme der O₂-Konzentration in der Messkammer (0.56 m³) bei einem konstanten N₂-Massenstrom von 1.09 kg N₂/h

3 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
- ⁴ <https://h2apex.com/de/leistungen/stationaere-und-mobile-speicherloesungen-fuer-den-individuellen-bedarf/>
- ⁵ 1-Chapter-P-slides-Hydrogen-fundamental-properties-VM-130228-altered-UU.pdf
- ⁶ https://www.researchgate.net/publication/370114620_Experimental_investigation_of_LPG-releasing_processes_with_varied_damage_sizes_on_a_pressurized_vessel
- ⁷ <https://www.schweizer-fn.de/stroemung/ausflusstroemung/ausflusstroemung.php>
- ⁸ HyMeAS O₂ Reduktion 25_08_11.docx
- ⁹ <https://www.peacesoftware.de/einigewerte/stickstoff.html>

