

Informationssammlung

Berechnungen zu H₂-Leckage-Szenarien – Inertisierung eines Raumes

Autor: Werner Fröhlingsdorf | Stand: Januar 2026

1 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 1)
- Konstanter N₂-Massenstrom
- Zeitschritt für Berechnung: 1s

Tabelle 1¹: 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)



Berechnungen zu H₂-Leckage-Szenarien

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 $L/d_a = 3$		<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 1):

- 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.

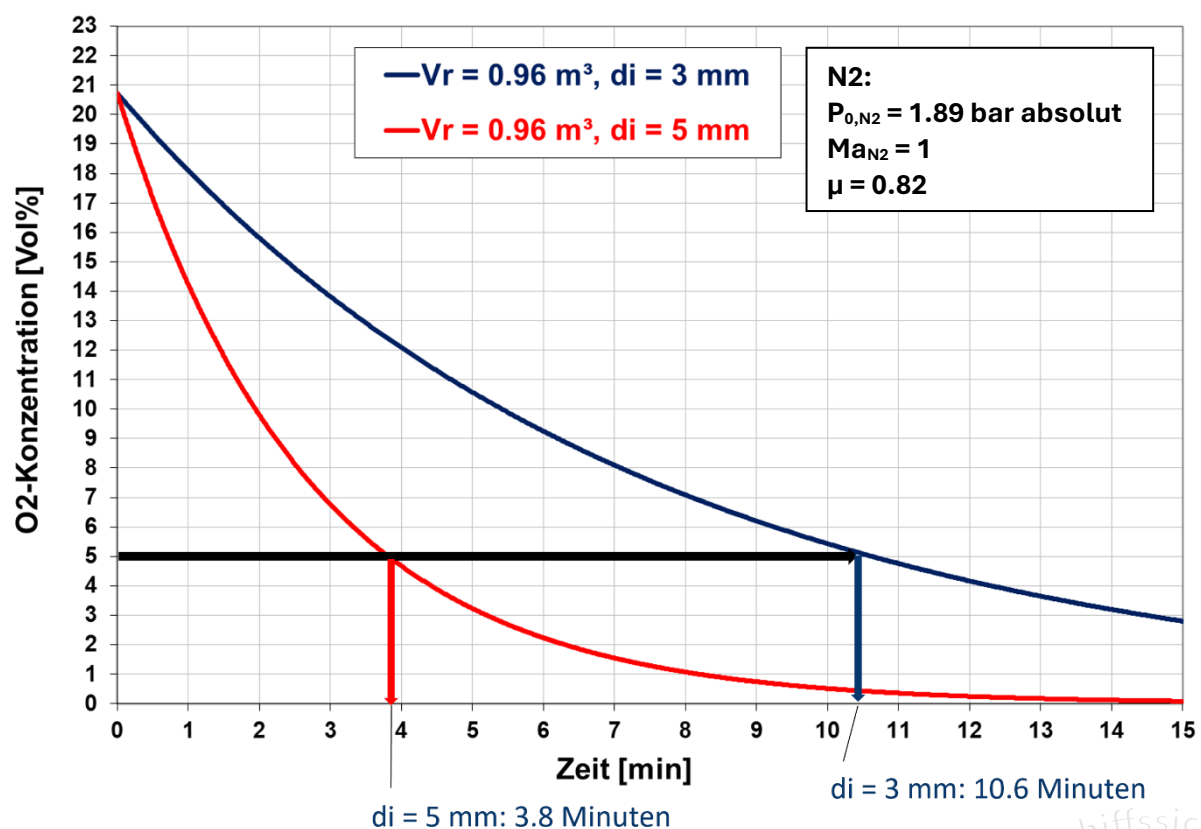


Abbildung 1: Ergebnisse der Berechnungen für die zeitabhängige Abnahme der mittleren O₂-Konzentration im Versuchsraum durch Zustrom von N₂



1.1 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 durchgeführt².

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 berechnet³, 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 2 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.



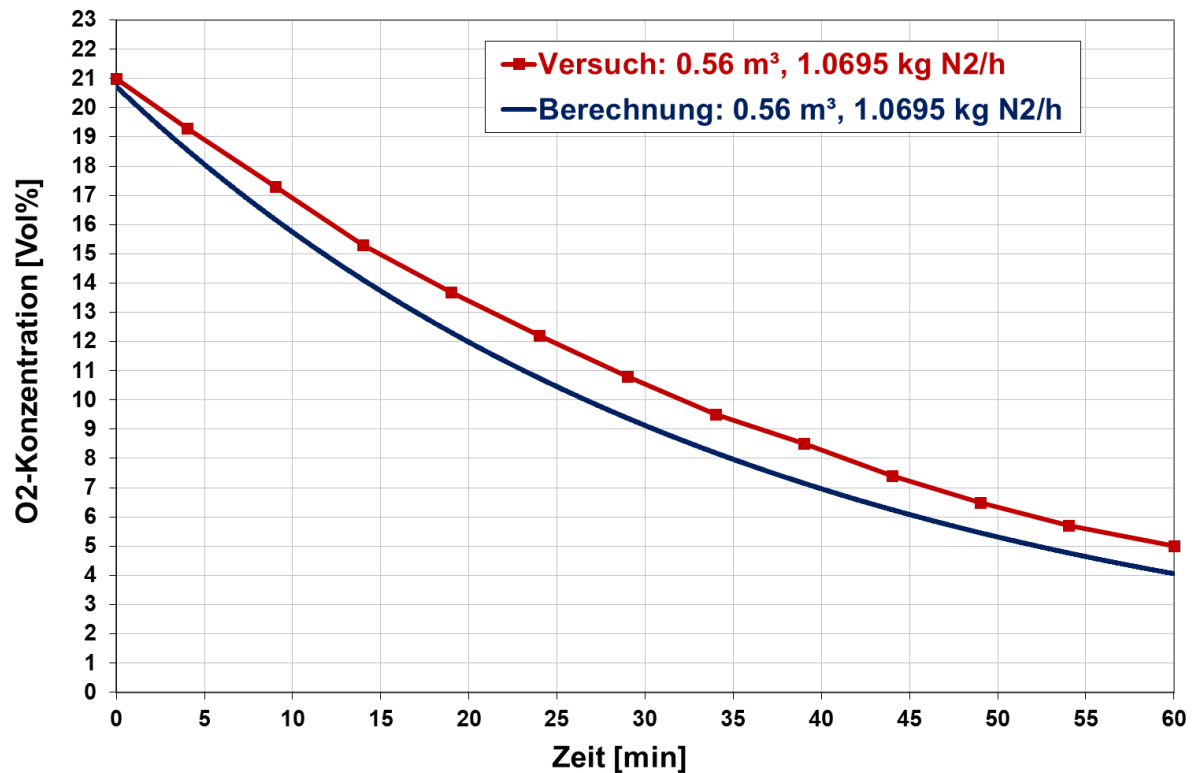


Abbildung 2: Vergleich Versuch / Berechnung - zeitabhängige Abnahme der O₂-Konzentration in der Messkammer (0.56 m³) bei einem konstanten N₂-Massenstrom von 1.09 kg N₂/h

2 Literatur

- ¹ <https://www.schweizer-fn.de/stroemung/ausflussstroemung/ausflussstroemung.php>
- ² HyMeAS O2 Reduktion 25_08_11.docx
- ³ <https://www.peacesoftware.de/einigewerte/stickstoff.html>

