

Durchströmung von Glaskapillaren mit Lachgas und Helium

Eva SCHLICK-HASPER¹, Uwe SCHNEIDER¹, Thomas GOEDECKE¹,
Matthias KRAUME²

¹ BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

² Technische Universität Berlin, Berlin

Kontakt E-Mail: eva.schlick-hasper@bam.de

Kurzfassung

Distickstoffmonoxid (N₂O, Lachgas) und Helium (He) sind gängige Prüfgase für Dichtheitsprüfungen. Die einfachste Leckgeometrie stellt ein ideal zylindrisches Rohr dar. Es wurden Glaskapillaren verschiedener Abmessungen mit Lachgas und Helium durchströmt. Der Überdruck am Kapillareingang lag zwischen 100 mbar und 400 mbar. Es handelte sich um vier annähernd zylindrische Glaskapillaren mit den mittleren Durchmessern: Kapillare 1: ca. 102 µm; Kapillare 2: ca. 71 µm; Kapillare 3B: ca. 49 µm; Kapillare 4: ca. 53 µm. Zudem wurde eine nichtzylindrische Kapillare geprüft (Kapillare 3A). Die Kapillaren 1, 2 und 3B wurden mit beiden Prüfgasen getestet. Kapillare 3A wurde nur mit Lachgas durchströmt, Kapillare 4 nur mit Helium.

Für die Messung der Leckageraten kam das Überdruckverfahren mit Ansammlung (Verfahren B3 nach DIN EN 1779: 1999-10) zum Einsatz. Als Detektor für Lachgas diente der Lachgasdetektor Maihak Unor 6 N, für Helium der Leckdetektor T-Guard der Firma Inficon.

Es wurden verschiedene Theorieansätze verglichen. Beim Theorieansatz Ib erfolgte die Umrechnung der Lachgas-Messwerte auf die Helium-Messwerte und umgekehrt anhand der Druck-, Temperatur- und Gasartabhängigkeit der Leckagerate für laminar-viskose Gasströmung (DIN EN 1779: 1999-10; DGZfP-Richtlinie DP2: 2009-12). Beim Theorieansatz II wurde die Berechnung der Leckagerate für die laminar-viskose Rohrströmung unter der Annahme einer ideal zylindrischen Kapillare durchgeführt. Zusätzlich wurde mit „ANSYS Fluent“ eine CFD-Simulation vorgenommen. Bei Kapillare 3A wurde eine Serienschaltung der Strömungsleitwerte von Rohr und Düse angesetzt.

Bei Anwendung des Ansatzes Ib werden bei Umrechnung der Helium-Messwerte auf Lachgas die Lachgas-Messwerte überschätzt. Umgekehrt werden bei der Umrechnung der Lachgas-Messwerte auf Helium die Helium-Messwerte unterschätzt. Bei Analyse der Einlaufängen der Rohrdurchströmung ist festzustellen, dass diese für Lachgas stets größer als für Helium sind. Bei Lachgas liegt daher für einige Messwerte noch keine ausgebildete laminare Rohrströmung vor. Einlaufeffekte können somit nicht vernachlässigt werden. Als Fazit ergibt sich, dass bei Verwendung von Helium als Prüfgas und Umrechnung der Helium-Messwerte auf Lachgas die Lachgas-Leckageraten sicherheitstechnisch konservativ abgeschätzt werden.

20.-21.09.2016

DURCHSTRÖMUNG VON GLASKAPILLAREN MIT LACHGAS UND HELIUM

Eva Schlick-Hasper¹, Uwe Schneider¹, Thomas Goedecke¹,
Matthias Kraume²

¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM); ² TU Berlin

Gliederung

Ziel der Messungen

Versuchsaufbau

Versuchsdurchführung

Ergebnisse

Vergleich der Leckageraten von Lachgas und Helium

Zusammenfassung

Ziel der Messungen

- Distickstoffmonoxid (N₂O, Lachgas) und Helium (He) sind häufig angewandte Prüfgase für die Durchführung von Dichtheitsprüfungen
- Vergleich der gemessenen Leckageraten beider Gase anhand einer einfachen Geometrie (annähernd zylindrisches Rohr)
- Vergleich verschiedener Theorieansätze
- Physikalische Eigenschaften¹:
 Molmasse:
 $\tilde{M}_{N_2O} \approx 44 \text{ kg/kmol}$
 $\tilde{M}_{He} \approx 4 \text{ kg/kmol}$
 Dynamische Viskosität (20 °C):
 $\eta_{N_2O} \approx 14,4 \text{ } \mu\text{Pa s}$
 $\eta_{He} \approx 19,1 \text{ } \mu\text{Pa s}$



¹ DGZFP Richtlinie DP1: 2005-06

Ziel der Messungen

Überblick über die durchströmten Glaskapillaren („Testleck in Einschraubhülse“ der Firma Inficon)

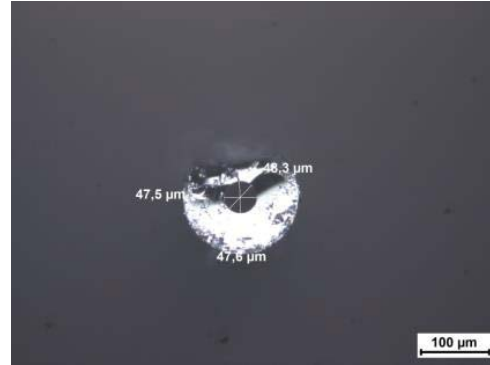
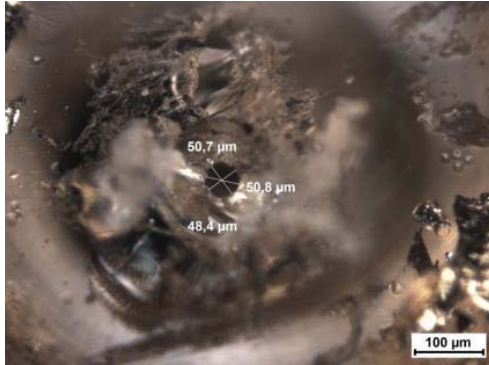
Kap. Nr.	Standard-leckagerate Luft (1 bar gegen 0 bar, Fa. Inficon) [Pa m ³ /s]	Leckagerate Helium (1,2 bar gegen Atm., Fa. Inficon) [Pa m ³ /s]	Mittl. Durchmesser [μm]	Länge [mm]	Verhältnis Länge/Durchmesser [-]	Durchströmt mit
1	0,05	0,031	102	10,2	100	N ₂ O, He
2	0,01	0,0047	70,9	17	240	N ₂ O, He
3A	0,001	-	Ein: 44,7 Aus: 24,5	32,8	Nicht zylindrisch	N ₂ O
3B	0,0016	0,00066	49,0	30	612	N ₂ O, He
4	0,0012	0,00055	52,8	38	720	He

Ziel der Messungen

Glaskapillaren Nr. 1, 2, 3A



Glaskapillare 3B: Ein- und Austrittsdurchmesser



Ziel der Messungen

Folgende Ansätze werden verglichen:

- **Praxis:** Direkte Messung der Leckagerate
- **Theorieansatz Ib:** Umrechnung der Leckageraten eines Prüfgases auf das andere gemäß Druck-, Temperatur- und Gasartabhängigkeit für laminar-viskose Gasströmung^{2,3}
- **Theorieansatz II:** Berechnung der Leckagerate für laminar-viskose Rohrströmung für die Annahme einer ideal zylindrischen Kapillare (anhand gemessener Länge und Durchmesser der Kapillaren)³
- **Simulation** der Leckageraten (ANSYS Fluent)
- Vergleich mit dem **Kalibrierwert der Fa. Inficon** (umgerechnet auf Betriebsbedingungen)

² DIN EN 1779: 1999-10; ³ DGZfP Richtlinie DP2: 2009-12

Ziel der Messungen



- **Praxis:** Direkte Messung der Leckagerate: Überdruckverfahren mit Ansammlung (Verfahren B3 nach DIN EN 1779: 1999-10)

$$q = p \cdot V \cdot \frac{\Delta c}{\Delta t} \cdot e^{n \cdot \Delta t}$$

mit

p : Atmosphärischer Luftdruck in Prüfkammer [Pa]

V : Freies Volumen in Prüfkammer [m³]

Δc : Konzentrationsanstieg des Prüfgas [ppm]

Δt : Prüfdauer [s]

q : Leckagerate [Pa m³/s]

$e^{n \cdot \Delta t}$: Korrekturfaktor (Verlustrate der Kammer) [-]

Ziel der Messungen



- **Theorieansatz Ib:** Umrechnung der Leckageraten von Prüfgas I auf Prüfgas II:

$$q_{II} = q_I \cdot \frac{(p_1^2 - p_2^2)_{II}}{(p_1^2 - p_2^2)_I} \cdot \frac{\eta_I}{\eta_{II}}$$

p_1, p_2 : Absolutdruck am Kapillarein- und Austritt [Pa]

η_I, η_{II} : Dynamische Viskosität des Prüfgas bei der jeweiligen Versuchstemperatur [Pa s]

- **Theorieansatz II:** Berechnung der Leckagerate für laminar- viskose Rohrströmung:

$$q = \frac{\pi}{128} \cdot \frac{d^4}{\eta \cdot l} \cdot \frac{p_1^2 - p_2^2}{2}$$

d, l : Durchmesser und Länge der Kapillare

Ziel der Messungen

- **Nur für die nicht-zylindrische Kapillare 3A:**
Serienschaltung der Strömungsleitwerte von Rohr und Düse⁴:

$$q = C_{\text{Serie}} \cdot (p_1 - p_2)$$

mit

$$\frac{1}{C_{\text{Serie}}} = \frac{1}{C_{\text{Rohr}}} + \frac{1}{C_{\text{Düse}}}$$

wobei

$$C_{\text{Rohr}} = \frac{\pi}{128} \cdot \frac{d^4}{\eta \cdot l} \cdot \frac{(p_1 + p_2)}{2}$$

und

$$C_{\text{Düse}} = \frac{A_{\text{min}} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{4}} \cdot p_1 \cdot \bar{c}_1 \cdot \Psi\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}{(p_1 - p_2)}$$

Ausflussfkt.

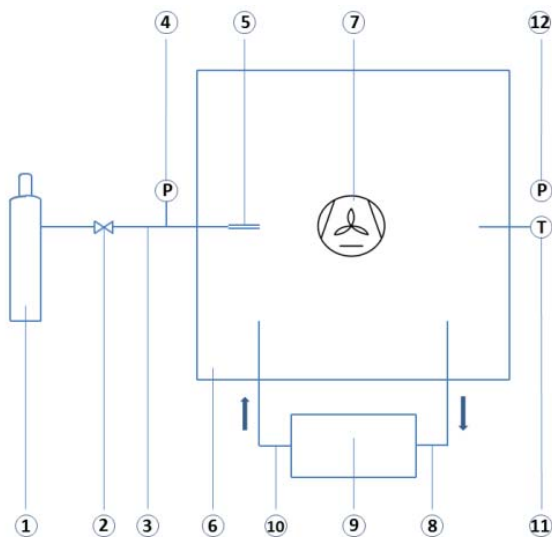
$$\Psi\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1+\kappa}{\kappa}} \right]}$$

⁴ Wutz Handbuch Vakuumtechnik

Versuchsaufbau

Messung mit Lachgas (1 m³-Kammer)

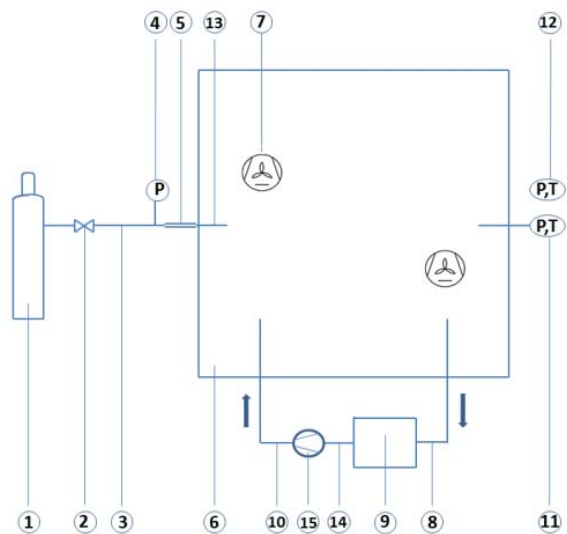
Nr.	Bezeichnung
1	Lachgas-Druckgasflasche
2	Flaschendruckminderer
3	Zufuhrschlauch zur Kammer
4	Manometer LEO 2, Fa. Keller
5	Glaskapillare
6	1 m ³ Klimakammer
7	Ventilator
8	Zufuhrschlauch zum Detektor
9	Lachgasdetektor Maihak UNOR 6N
10	Messgaskückführung vom Detektor
11	ALMEMO 2890-9 (T, φ in Kammer)
12	Manometer LEO 2, Fa. Keller (p _{atm})



Versuchsaufbau

Messung mit Helium (40 l-Kammer)

Nr.	Bezeichnung
1	Helium-Druckgasflasche
2	Flaschendruckminderer
3	Zufuhrschlauch zur Kammer
4	Drucksensor Sensormaster 9158
5	Glaskapillare
6	40 l Akkumulationskammer
7	Ventilator (2 Stück)
8	Zufuhrschlauch zum Detektor
9	Heliumsensors T-Guard, Fa. Inficon
10	Ausgangsleitung der Pumpe
11,12	Datenlogger DCX 22, Fa. Keller
13	Schlauch Festo PUN 6x1
14	Ausgangsleitung des Sensors
15	Vorpumpe KNF Neuberger

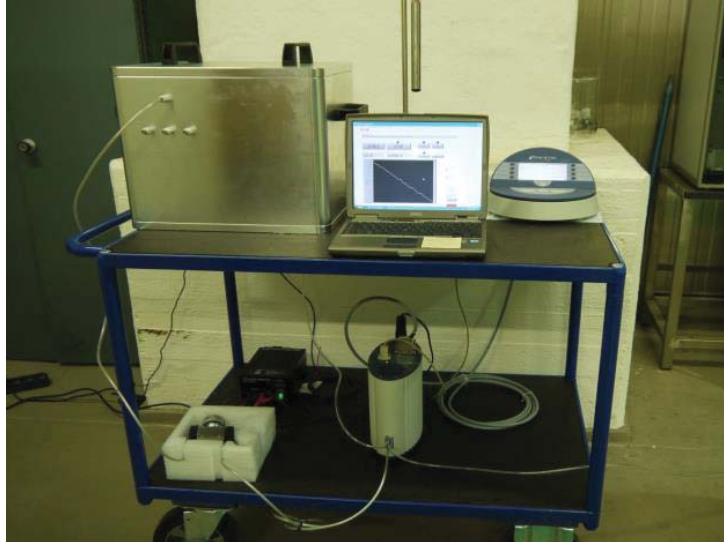


Versuchsaufbau

Messung mit Lachgas (1 m³-Kammer)



Messung mit Helium (40 l-Kammer)



Versuchsdurchführung

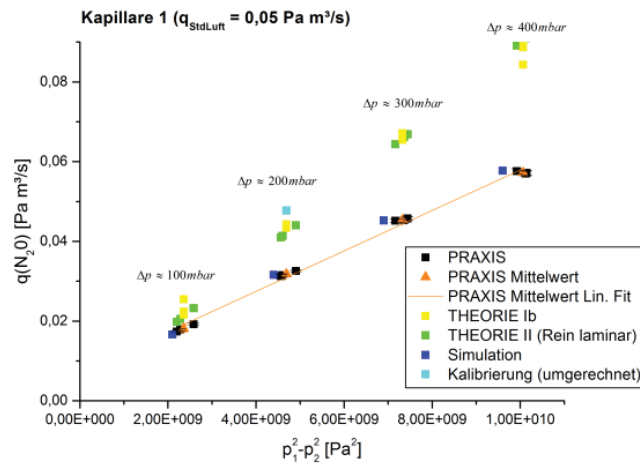
Messung mit Lachgas und Helium

- Beaufschlagung der Kapillaren mit reinem Prüfgas bei den Prüfgasüberdrücken 100 mbar, 200 mbar, 300 mbar und 400 mbar
- Strömung gegen atmosphärischen Druck
- Messung des Konzentrationsanstiegs über die Prüfzeit in der jeweiligen Prüfkammer:
 - Helium, Kapillare 1, 2, 3B, 4 : 40 l-Prüfkammer
 - Lachgas, Kapillare 3A: 25 l-Exsikkator
 - Lachgas, Kapillare 1, 2, 3B: 1 m³-Prüfkammer
- Berechnung der Leckagerate gemäß Gleichung für Akkumulationsverfahren (Verfahren B3 nach DIN EN 1779: 1999-10)
- Berechnung der hydrodynam. Einlauflänge für Rohrströmung für alle Versuchspunkte:

$$x_{ein} = 0,056 \cdot Re \cdot d$$

Ergebnisse Lachgas

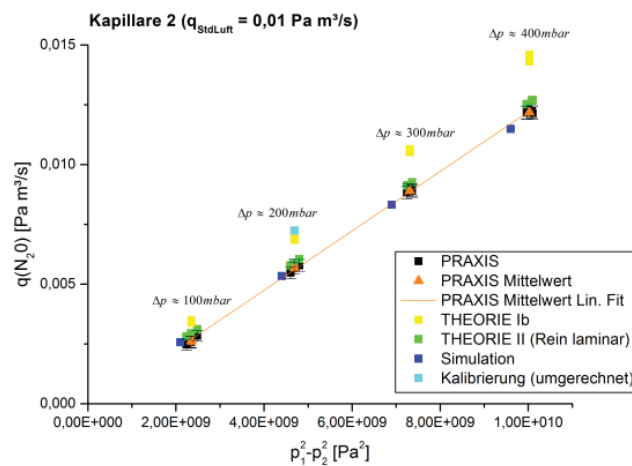
Kap. 1



- Bei 400 mbar: Einlaufänge ca. 5 mm (Hälfte der Kapillarlänge)
- Daher: Werte für PRAXIS und Simulation < THEORIE II

Ergebnisse Lachgas

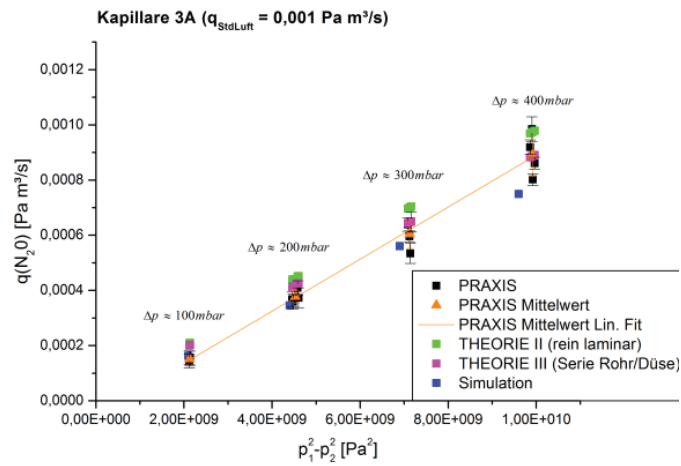
Kap. 2



- Bei 400 mbar: Einlaufänge < 1 mm
- Werte für PRAXIS, Simulation und THEORIE II gut übereinstimmend

Ergebnisse Lachgas

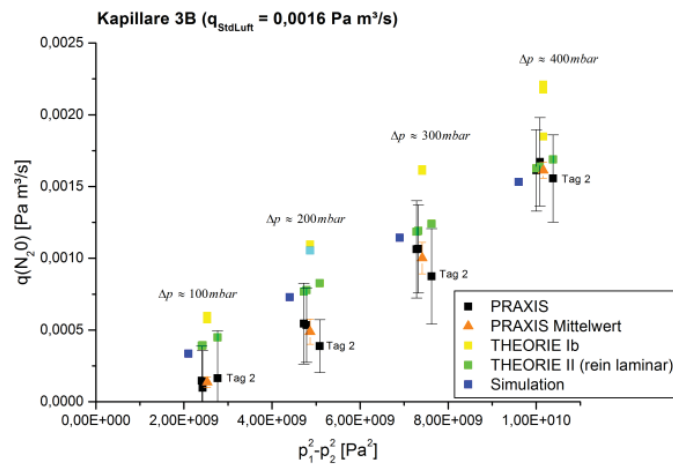
Kap. 3A



- Kapillare 3A ist nicht zylindrisch
- Ansatz der Serienschaltung von Rohr und Düse zufriedenstellend

Ergebnisse Lachgas

Kap. 3B

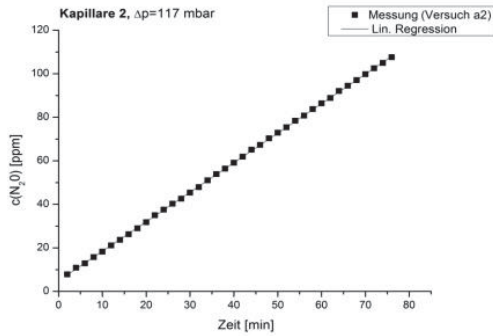


- Abhängigkeit von Versuchsreihenfolge; Abhängigkeit nicht linear
- Messwerte nur bedingt auswertbar; keine gute Reproduzierbarkeit

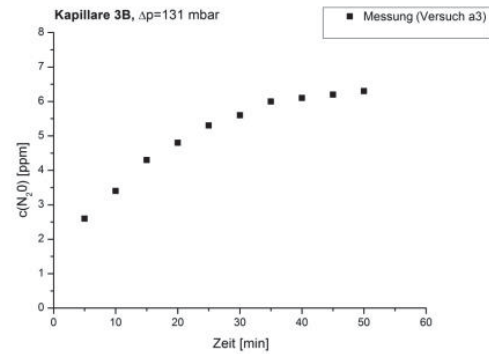
Ergebnisse Lachgas

Vergleich des Verlaufs des Konzentrationsanstiegs

Kap. 2



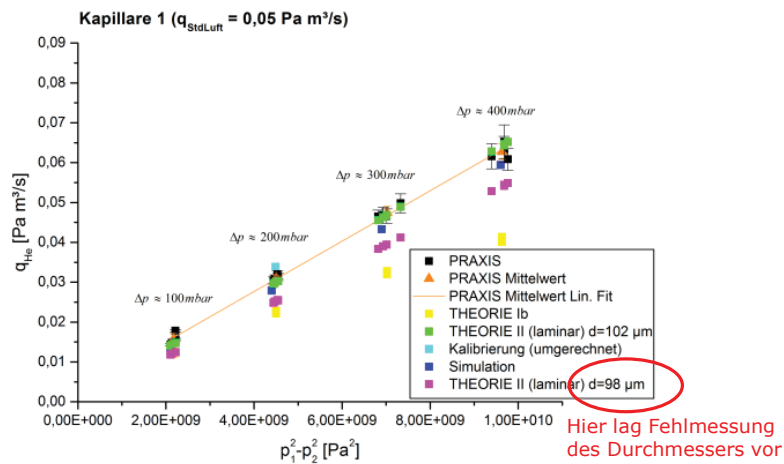
Kap. 3B



- Kapillare 1 und 2: Konzentrationsanstieg linear
- Kapillare 3B, 3A: Konzentrationsanstieg z. T. abknickend

Ergebnisse Helium

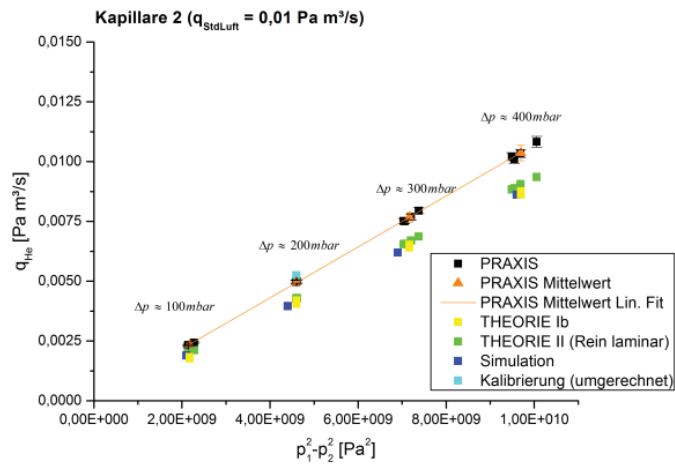
Kap. 1



- Bei 400 mbar: Einlaufänge < 0,5 mm: Ansatz II passt daher gut
- Abhängigkeit der Leckagerate vom Durchmesser: d^4 !

Ergebnisse Helium

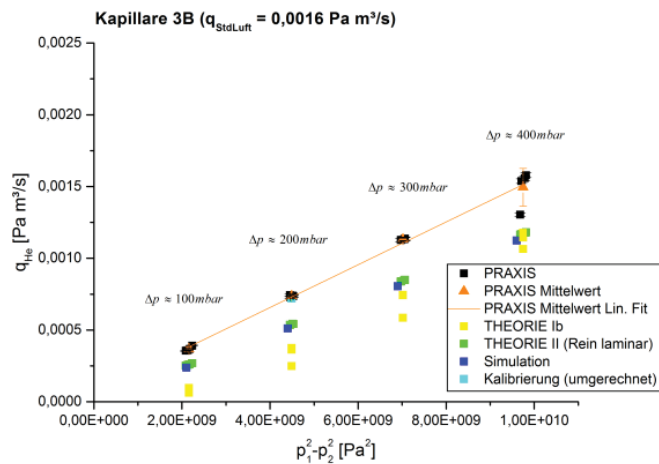
Kap. 2



- Gute Übereinstimmung von Messwert und Helium-Kalibrierwert
- Messwerte > Simulation und THEORIE II

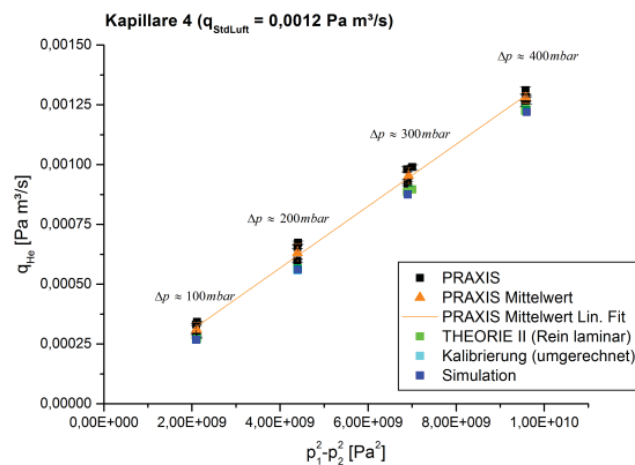
Ergebnisse Helium

Kap. 3B



- Gute Übereinstimmung von Messwert und Helium-Kalibrierwert
- Messwerte > Simulation und THEORIE II

Kap. 4



- Gute Übereinstimmung von Messung, THEORIE II und Simulation
- Messwerte bei kleinen Leckgeraten reproduzierbarer als für N₂O

Vergleich der Leckageraten von Lachgas und Helium

Theorieansatz Ib

- Bei Umrechnung der Helium-Messwerte (PRAXIS und Kalibrierwert) auf Lachgas: Lachgas-Messwerte werden überschätzt
 - Bei Umrechnung der Lachgas-Messwerte auf Helium: Helium-Messwerte werden unterschätzt
 - Die Einlaufängen sind für Lachgas größer als für Helium
 - Für Lachgas liegt daher für einige Messwerte noch keine ausgebildete Laminarströmung vor (Einlaufeffekte)
 - Ansatz Ib basiert jedoch auf der Annahme eines ausgebildeten laminaren Strömungsprofils
- => Bei Messung mit Helium und Umrechnung mit Ansatz Ib auf Lachgas: Konservative Ergebnisse

Vergleich der Leckageraten von Lachgas und Helium



Eignung als Prüfgas für Dichtheitsprüfung

- Bei den Kapillaren mit Durchmessern $< 50 \mu\text{m}$ (Nr. 3A und 3B): Z. T. abknickender Konzentrationsverlauf bei Lachgas
- Bei Helium: Stets linearer Konzentrationsanstieg
- Bei Lachgas: Abhängigkeit von der Versuchsreihenfolge
- Bei kleineren Leckageraten: Messwerte für Lachgas haben stärkere Streuung als für Helium
- Mögliche Erklärung: Verunreinigungen der Kapillare (Staub) wirken sich bei Lachgas stärker aus als bei Helium
- Helium-Messwerte stets gut übereinstimmend mit Kalibrierung
- Messwerte $>$ Simulation und Theorie II
- Mögliche Erklärung: Bei Helium zusätzliche Effekte (Permeation durch Dichtring, Bypassströmung)

Zusammenfassung



- Durchströmung von Glaskapillaren mit Durchmessern zwischen ca. $102 \mu\text{m}$ und ca. $49 \mu\text{m}$ sowohl mit Lachgas als auch mit Helium
- Für Helium: Mit eigenen Messungen: Kalibrierung bestätigt
- Für geringere Leckageraten bzw. kleinere Durchmesser verfügt Helium im Akkumulationsverfahren über bessere Lecksucheigenschaften (stabilerer Konzentrationsanstieg, bessere Wiederholbarkeit, geringere Streuung)
- Verwendung von Helium als Prüfgas und Umrechnung nach Theorieansatz Ib (Umrechnung von Leckageraten nach DIN EN 1779: 1999-10): Ergibt Überschätzung der Lachgas-Messwerte
- Dies bedeutet: Bei der Umrechnung von Helium auf Lachgas liegt man auf der sicheren Seite: Sicherheitstechnisch konservative Abschätzung

Fragen?

20. - 21. September 2016, Dortmund
7. DGZfP Fachseminar Dichtheitsprüfung
Dipl.-Ing. Eva Schlick-Hasper

