

Neue DGZfP - Richtlinie zur praktischen Bewertung von Prüfgasen bei der Lecksuche

W. Große Bley, Inficon, Köln

Kurzfassung:

Für anspruchsvolle Dichtheitsprüfungen werden anstelle von Luft besondere Prüfgase eingesetzt, die spezifisch nachweisbar sind und dadurch besonders sichere und quantitative Aussagen erlauben. Insbesondere gibt es für solche Prüfgase auch so genannte Prüflecks, d.h. Standardlecks, deren abgegebene Gasstromrate rückführbar auf nationale Standards kalibriert ist. Neben Helium, das wohl am meisten angewendete Prüfgas, werden in letzter Zeit weitere Prüfgase industriell eingesetzt, insbesondere Formiergas 5 (5% Wasserstoff in Stickstoff) und Schwefelhexafluorid (SF_6). Darüber hinaus werden Prozessgase, insbesondere Kältemittel, als Prüfgase benutzt. In allen Fällen stellt sich die Frage nach dem besonderen Verhalten der einzelnen Gase und der Vergleichbarkeit der Messungen. Bei Prozessmedien, die im späteren Betrieb vom Prüfgas verschieden sind, muss auch die Leckrate umgerechnet werden können. Die DGZfP- Richtlinie „Prüfgase für die Dichtheitsprüfung“, die der Fachausschuss Dichtheitsprüfung erarbeitet hat, liefert die zur Beantwortung dieser Fragen notwendigen Daten, auf die damit jeder Hersteller von Geräten und Anwender von Verfahren zurückgreifen kann.

1 Dichtheitsprüfung mit Prüfgasen

Wenn ein Reifen Druckabfall zeigt, geht man im allgemeinen von einem Leck aus. Jeder stand schon einmal vor der Aufgabe, an seinem Fahrradschlauch das Leck dann auch zu finden. Üblicherweise setzt man dazu den Schlauch mit Luft unter Druck und hält ihn unter Wasser, um an eventuellen Lecks aufsteigende Luftblasen zu entdecken.

Anspruchsvolle Dichtheitsprüfverfahren, mit denen auch um Größenordnung kleinere Undichtigkeiten festgestellt und Lecks lokalisiert werden müssen, können mit Luftdruckabfall und Blasenmethode nicht mehr durchgeführt werden. Hier greift man zu spezifischen Gasen als Prüfmedium, so genannten Prüfgasen. Entweder setzt man das Prüfobjekt unter Prüfgasdruck und weist austretendes Prüfgas in der Umgebungsluft nach oder man evakuiert das Prüfobjekt, beaufschlagt mit Prüfgas von außen und weist eindringendes Prüfgas nach. In beiden Fällen benötigt man ein nur selektiv für das Prüfgas empfindliches Nachweisgerät, einen Leckdetektor.

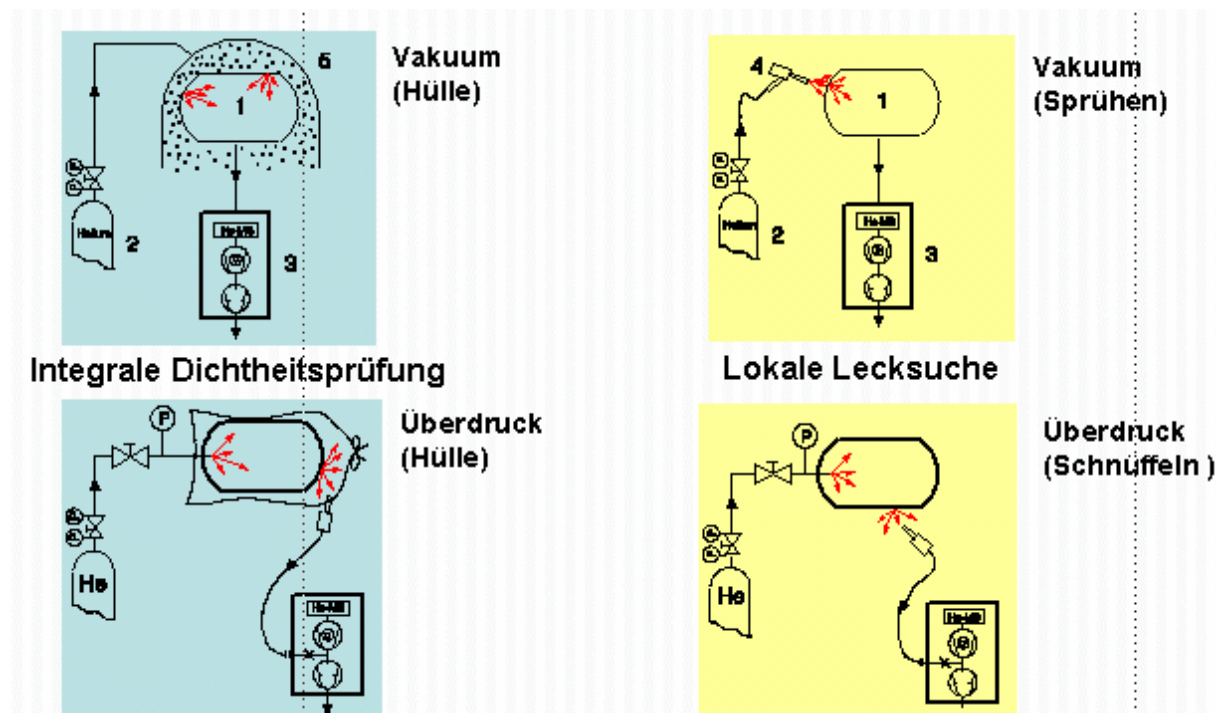


Bild 1 Einige grundlegende Prüfverfahren nach DIN EN1779 (siehe auch Anhang A der vorliegenden Richtlinie)

2 Warum Prüfgas statt Luftdruckänderung?

Ein Leck von 10^{-6} mbarl/s erzeugt in einem Volumen von 1l einen Druckabfall von 10^{-6} mbar/s. In einer Stunde sind das erst 0,003 mbar, in einem Tag 0,09 mbar, in einem Jahr 32 mbar. Bauteilen für Klimaanlage, die eine solche Dichtigkeit aufweisen müssen, um jahrelang sicher zu arbeiten und keine umweltschädlichen Gase abzugeben, werden typischerweise mit einigen bar Überdruck betrieben und müssten deshalb auch mit ca. 10 bar Überdruck geprüft werden.

Messgeräte, die eine Auflösung von $0,003 \text{ bar} / 10 \text{ bar} = 30 \text{ ppm}$ bei 10bar Vollausschlag aufweisen, sind nicht verfügbar. Darüber hinaus würde schon eine Temperaturänderung von $0,01^\circ\text{C}$ eine Druckänderung von 0,4 mbar ($1/273 \text{ pro } ^\circ\text{C}$) verursachen. Das ist 40 mal soviel wie das Leck in einem Tag

erzeugt! Man erkennt leicht, dass eine Druckabfallmethode so kleine Undichtigkeiten nicht feststellen kann.

Bei der Verwendung von Prüfgas spielen Temperaturänderungen praktisch keine Rolle und der Nachweis von austretendem Prüfgas ist auch bei kleinen Lecks kein Problem, da es keinen riesigen Offset gibt, auf dem kleine Änderungen gefunden werden müssen. Mit geeigneten Prüfgasen lassen sich also sehr empfindliche und dennoch störsichere Dichtheitsprüfungen durchführen.

3 Gibt es das ideale Prüfgas?

Um die Vorteile von Prüfgasen nutzen zu können, müssen die verwendeten Gase einige Anforderungen erfüllen. Da in einem spezifischen Anwendungsfall die Umgebungsbedingungen und Prüflingseigenschaften sehr verschieden sein können, gibt es nicht ein Gas, das für alle Fälle optimal einsetzbar wäre. Darüber hinaus hängt die Brauchbarkeit eines Prüfgases auch entscheidend davon ab, wie gut es nachweisbar ist, d.h. wie selektiv und wie empfindlich. Die folgenden Kriterien stellen eine Checkliste zur Verfügung, nach der ein geeignetes Prüfgas ausgewählt werden kann. Ein Prüfgas sollte

- in natürlicher Luft möglichst nicht vorhanden sein
- ungiftig und unbrennbar sein
- sich chemisch inert (=reaktionsträge) verhalten
- kostengünstig im Verbrauch sein
- empfindlich nachweisbar sein (in Luft bzw. Vakuum)
- unschädlich für die Umwelt und den Prozess sein

Man erkennt sofort, dass die genannten Kriterien nie alle ideal erfüllt sein werden, das bedeutet, dass es das ideale Prüfgas nicht geben wird. Man muss deshalb in jedem Anwendungsfall prüfen, was optimal ist. Hierzu soll die neue DGZfP - Richtlinie zu Prüfgasen beitragen.

Bei der Auswahl eines Prüfgases darf aber auch die Weiterentwicklung der Nachweisgeräte, also der Sensoren und Leckdetektoren, die auf dem Markt angeboten werden, nicht unberücksichtigt bleiben. Bei der Auswahl spielt nicht nur die Empfindlichkeit für das Prüfgas eine Rolle, sondern insbesondere die Messwertstabilität und Ansprechzeit. Nur bei ausreichend hoher Messbeständigkeit ist eine Kalibrierung gegen Referenzlecks möglich, was die Voraussetzung zur Dichtheitsprüfung gegen geforderte Grenzspezifikationen ist. Zur Lokalisierung von Lecks spielt die Ansprechzeit eine entscheidende Rolle. Reagiert ein Leckdetektor oder Sensor erst nach vielen Sekunden auf eine Gaskonzentrationsänderung, so kann der Ort des Lecks nicht mehr festgestellt werden, da die Sonde dann meist schon weit vom Leckort entfernt ist. Auch die Erholzeit von großen Konzentrationen, die bei Groblecks auftreten können, ist ein wesentliches Kriterium für effizientes Arbeiten. Muss das Nachweisgerät nach einem Grobleck erst langwierig „entseucht“ werden, ist eine kostengünstige Prüfung unmöglich.

4 Was sind brauchbare Prüfgase?

Wie findet man nun das für eine gegebene Prüfaufgabe richtige Prüfgas? Die vorliegende Richtlinie hat die Kriterien dafür in zwei Abschnitte aufgespalten:

- im ersten Abschnitt wird das typische Verhalten der Prüfgase bei der Lecksuche behandelt (auch im Zusammenhang mit dem jeweiligen Nachweisprinzip)

- im zweiten Abschnitt werden die physikalischen Kenngrößen der Prüfgase aufgelistet, die im Hinblick auf die Lecksuche von Bedeutung sind. (diese Kenngrößen wurden im ersten Abschnitt verwendet, um das Verhalten der Gase bei der Lecksuche zu beschreiben)

Es soll mit dieser Aufteilung erreicht werden, dass auch der Leser ohne vertiefte Kenntnisse der Gas- und Vakuumphysik im ersten Abschnitt Kriterien für die Brauchbarkeit eines Prüfgases erhält. Mit den quantitativen Kenngrößen des zweiten Teils kann dann der Experte alle weiteren Effekte selbst berechnen, insbesondere Umrechnungen zwischen verschiedenen Gasarten vornehmen.

4.1 Abschnitt 1: Lecksucheigenschaften der Prüfgase

4.1.1 Untergrundkonzentration in natürlicher Luft

Eine der wichtigsten Eigenschaften, die ein Gas als Prüfgas qualifizieren, ist die Konzentration in natürlicher Luft, auch Untergrundkonzentration genannt. Wenn die Untergrundkonzentration zu groß ist, kann das Prüfgas nur für größere Lecks verwendet werden oder es muss Aufwand für Spülgas, Abschirmungen o.ä. getrieben werden.

Falls die Konzentration in Luft sehr präzise angegeben werden kann, d.h. wenn die Untergrundkonzentration örtlich und zeitlich hochkonstant ist, dann kann ein etwas höherer Wert noch akzeptabel sein. In der folgenden Tabelle ist die Zusammensetzung der Atmosphäre zu finden:

Tabelle 1: Zusammensetzung der wasserdampflosen, reinen Atmosphäre nahe dem Meeresniveau¹

Bestandteil	Vol. %
Stickstoff (N ₂)	78,084
Sauerstoff (O ₂)	20,948
Argon (Ar)	0,934
Kohlendioxid (CO ₂)	0,035 (350 ppm, variabel)
Neon (Ne)	0,001818 (18,18 ppm)
Wasserstoff (H ₂)	0,001-0,00005 (10ppm – 0,5ppm)
Methan (CH ₄)	0,0002 (2ppm)
Helium (He)	0,00052 (5,24± 0,05ppm)
Krypton (Kr)	0,000114 (1,14ppm)
Schwefeldioxid (SO ₂)	0,0001 (1ppm, variabel)
Distickstoffoxyd (N ₂ O)	0,000 05 (0,5ppm)
Xenon (Xe)	0,000 0087 (0,087ppm)
Ammoniak (NH ₃)	0,000 0026 (2,6ppb)
Ozon (O ₃)	0,000 002 (2ppb, variabel)

Für die Edelgase und insbesondere Lufthelium sind die natürlichen Konzentrationswerte hochgenau bekannt²,

⁴ He-Konzentration	$x_{\text{He}}^{\text{a}} = (5.24 \pm 0.05) \text{ ppmV}$	Ozima und Podosek, 1983
³ He/ ⁴ He-Verhältnis	$R_{\text{a}} = (1.384 \pm 0.006) \cdot 10^{-6}$	Clarke et al., 1976

Tab 2.1. Heliumgehalt und Isotopenverhältnis in der Atmosphäre.

während z.B. der CO₂-Wert stark von der Anwesenheit von Menschen und Pflanzen an einem Ort abhängt und bekanntlich auch langfristig durch die Industrialisierung ansteigt.

Um die natürliche Untergrundkonzentration in ihrer Auswirkung bewerten zu können, ist die Prüfgaskonzentration vor einem kleinen Leck von 5×10^{-7} mbarl/s angegeben (je höher diese Konzentration ist, um so leichter lässt sich ein Leck trotz hoher Untergrundkonzentration in der Umgebung finden). Man erkennt, dass das genannte Leck Prüfgaskonzentrationen von einigen ppm erzeugt, wobei deutlich wird, dass diese Konzentration um so höher ausfällt (und damit das Leck einfacher messbar ist), je schwerer das Gas ist (SF₆ und R134a haben daher die höchsten Werte). Besonders niedrig fällt der Wert für Formiergas aus, da hier zusätzlich zu der hohen Diffusion des Wasserstoffs die geringe Konzentration von 5% im Prüfgas hinzukommt.

Zur Bestimmung der Leckgröße aus der Prüfgaskonzentration muss der stationäre Zustand abgewartet werden, bei dem die Konzentration nur noch durch das Verhältnis der Leckrate zur Strömung in der Schnüffelleitung (inkl. Untergrund) gegeben ist (die Wolke ist dann abgesaugt).

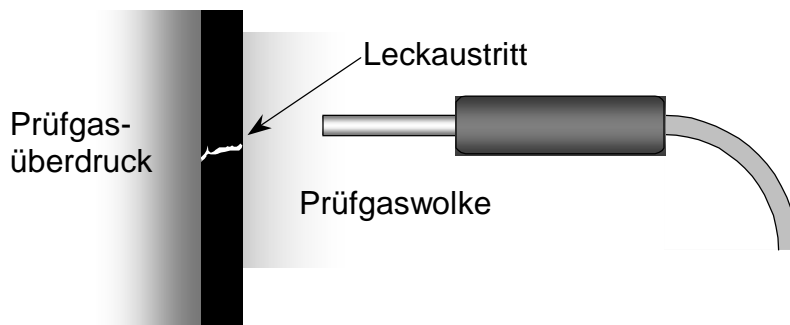


Bild 2 Prüfgaswolke in der Atmosphäre vor einem Leck: die Schnüffelspitze „findet“ das Leck zunächst durch die erhöhte Konzentration in der Wolke. Die Messung erfolgt dann bei Absaugung im stationären Zustand (dann ist die Konzentration nur noch durch das Verhältnis von Leckrate und Schnüffelleitungsdurchfluss gegeben)

4.1.2 Messgenauigkeit und Nachweisgrenzen mit den Prüfgasen

Um die Genauigkeit von Prüfgasmessungen bezogen auf in der Anwendung auftretende Luftlecks beurteilen zu können, ist der Prüfgasstrom durch ein Luftleck von 1×10^{-6} mbarl/s Größe angegeben. Man erkennt, dass die Abweichungen (außer für R134a, Methan und Ammoniak) 20% nicht überschreiten. Man muss im allgemeinen keine Umrechnung vornehmen, wenn man Prüfgase zur Prüfung auf Luftleckagen einsetzt.

Neben den genannten Zahlenangaben führt die Richtlinie im Bereich Lecksuchigenschaften noch auf, was in DIN EN 1779 und DIN EN 1518 zu Messverfahren und Nachweisgrenzen mit den Gasen steht. Bei den Nachweisgrenzen wurde außer bei Helium ein Signal/Rauschverhältnis von 1 für die Definition der kleinsten messbaren Leckrate angenommen (damit wird die

Drift des Untergrundsignals vernachlässigt, was insbesondere bei CO₂ und Argon mit Ihren hohen Untergrundkonzentrationen in Luft zu ungünstigeren werten führt). Unter dieser Voraussetzung hat SF₆ die beste (1ppb) und Formiergas 5 die schlechteste Nachweisgrenze (0,4ppm).

Entscheidend für die quantitative Ermittlung von Leckraten, welche bei vorgeschriebenen Grenzleckagen notwendig ist, um eine Gut/Schlecht-Aussage treffen zu können, ist die Verfügbarkeit von kalibrierten Referenzlecks. Nicht für alle Prüfgase und von allen Herstellern sind solche Lecks mit spezifizierter Unsicherheitsangabe und rückführbar auf nationale Standards verfügbar. Meist erhält man ein so genanntes „Herstellerprüfzertifikat“ (nach DIN 55350-18 oder ISO 10474), nur für Helium sind Kalibrierzertifikate der PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) oder des DKD (Deutscher Kalibrierdienst) erhältlich. Die Unsicherheiten der Leckratenangaben auf Prüflecks bewegen sich typischerweise zwischen 5 und 15%.

4.1.3 Empfehlungen und Einschränkungen

Die letzten beiden Zeilen der Tabelle werden Hinweise zu den Grenzen bzw. der bevorzugten Anwendung des betrachteten Prüfgases gegeben. Hier ist insbesondere auf toxische oder explosive Risiken zu achten, außerdem auf Ozonpotential und Treibhauspotential des Prüfgases. Natürlich spielt auch der Preis eine wichtige Rolle, allerdings ist immer zu berücksichtigen, welche Mengen wirklich verbraucht werden (Rückgewinnung lohnt sich unter Umständen). Bei der bevorzugten Anwendung ist darauf zu achten, ob das Gas als Prozessgas oder als Prüfgas eingesetzt wird. Kältemittel wie z.B. R134a sind Prozessgase, die wegen ihres Treibhauspotentials (und ggf. Ozonschädigungspotentials) nur noch als Prozessgas z.B. bei der Dichtheitsprüfung nachgewiesen werden: nach einer Vorprüfung der Komponenten mit Helium wird eine Kälteanlage montiert und mit Kältemittel befüllt. Danach können die Fügestellen auf austretendes Kältemittel geprüft werden.

4.2 Abschnitt 2: Physikalische Eigenschaften der Prüfgase

4.2.1 Kenngrößen für Gasströmung durch Lecks

Bei den physikalischen Eigenschaften sind solche Kenngrößen aufgeführt, die für die Tauglichkeit eines Prüfgases in bestimmten Applikationen entscheidend sind und die zur Umrechnung von Leckgeräten für andere Gasarten oder andere Drücke und Temperaturen benötigt werden.

Molekulargewicht und Viskosität sind für die molekulare und viskose Strömungsmenge bestimmend und stehen daher ganz oben (zur Berechnung der Viskosität für Gase gibt es einen ausführlichen Anhang). Mit den Angaben zur mittleren thermischen Geschwindigkeit und mittleren freien Weglänge kann der Diffusionskoeffizient D in Gasen bestimmt werden, wobei $D_{\text{Gas in Luft}}$ extra aufgeführt ist, da sich daraus die Größe der Prüfgaswolke vor einem Leck bei der Schnüffellecksuche errechnet.

4.2.2 Kenngrößen für Löslichkeit und Permeation

Die Löslichkeit des Prüfgases in Wasser ist ebenfalls angegeben und kann z.B. benutzt werden, wenn flüssigkeitsgefüllte Systeme geprüft werden sollen. Um den Effekt von Gaspermeation einschätzen zu können, sind soweit wie möglich Permeationskoeffizienten durch gängige Elastomere aufgeführt. Hiermit kann sowohl der Störeffekt von Fügestellen mit Kunststoffen oder Klebern bei der Lecksuche als auch die Permeationsleckrate von Dichtungen berechnet werden.

Zu beachten ist allerdings, dass die genaue Permeationsrate sehr von herstellerepezifischen Parametern des Dichtungsmaterials abhängen kann, so dass die Größen nur als Richtwerte zu betrachten sind.

4.2.3 Kenngrößen für Lagerung, Handhabung und Transport

Im unteren Teil der Tabelle sind die für sicheren Transport, Lagerung und Handhabung wesentlichen Größen aufgeführt. Hierzu gehören: die Explosionsgrenzen in Luft, die Zersetzung- und Zündtemperatur, der MAK-Wert und das Treibhauspotential. Für den Transport ist auch die UN-Nummer angegeben.

Wenn Prüfgase in Zusammenhang mit der Prüfung von Lebensmittelverpackungen eingesetzt werden sollen, stellt sich immer wieder die Frage nach der Zulassung des Gases in Lebensmitteln. Um hier Klarheit zu schaffen, ist die Lebensmittelzusatzstoffkennung in der letzten Zeile zu finden.

5 Mit welchen Verfahren und Geräten kann man Dichtheitsprüfungen mit Prüfgasen durchführen?

5.1.1 Genormte Verfahren

Die Verfahren der Dichtheitsprüfung werden in der DIN EN 1779 beschrieben. Zur Erläuterung dieser Norm enthält die vorliegende Richtlinie einen Anhang, in dem die einzelnen Verfahren der DIN EN 1779 jeweils mit einem Prinzipdiagramm dargestellt sind. Hier sind auch die Verfahren ohne Verwendung von Prüfgas mit dargestellt.

Die Prüfgasverfahren sind in der Norm DIN EN 13185 im Einzelnen erläutert. Weitere Europäische Normen zur Lecksuche können einer Liste in einem weiteren Anhang entnommen werden.

5.1.2 Geräte zur Dichtheitsprüfung mit Prüfgasen

Prüfgase können mit einer Vielzahl von Sensoren nachgewiesen werden. Nicht alle diese Sensoren eignen sich gleich gut für die Lecksuche.

Grundvoraussetzung ist eine ausreichende Nachweisempfindlichkeit, da es sich bei den Prüfgaskonzentrationen bzw. Partialdrücken immer um recht kleine Werte handelt. Konzentrationen in Luft liegen typischerweise im Bereich einiger ppm, im Vakuum im Partialdruckbereich von $< 10^{-10}$ mbar.

Für die Lokalisierung von Lecks (im Vakuum- wie im Schnüffelverfahren) kommt es neben der Empfindlichkeit entscheidend auf die Ansprechzeit des Nachweissystems an. Eine Ansprechzeit bis zum Endwert von ca. 1 bis 2 Sekunden sollte erreicht werden, um sicherzustellen, dass die „Aktion“ (Prüfgas sprühen oder Schnüffelspitze bewegen) eindeutig mit der „Reaktion“ (Anzeige) verknüpft ist. Anderenfalls ist die Lage des gefundenen Lecks nicht eindeutig bestimmbar.

Darüber hinaus ist die Selektivität des verwendeten Sensors wichtig, um das Prüfgas sicher von anderen Gasen unterscheiden zu können. Wünschenswert ist auch eine Möglichkeit, Untergrundkonzentrationen des Prüfgases in der Anzeige gleitend unterdrücken zu können (AutoZero-Funktion).

Aus dem Gesagten wird klar, dass Überwachungsgeräte und -sensoren selbst bei ausreichender Empfindlichkeit im allgemeinen nicht als Leckdetektorgeräte brauchbar sind. Im folgenden sind die wichtigsten Nachweisprinzipien für Prüfgase in der Lecksuche etwas näher beschrieben.

5.2 Massenspektrometer³ in Leckdetektoren

Ein Massenspektrometer weist Gas im Vakuum nach, indem es Gasteilchen ionisiert, elektromagnetisch trennt und dann über die elektrische Ladungsmenge ihre Menge bestimmt. Im Prinzip kann damit jedes Gas nachgewiesen werden, Helium spielt aber eine besondere Rolle, da es als Prüfgas im Vakuumverfahren fast die einzige sinnvolle Möglichkeit darstellt. Heliumleckraten werden überwiegend mit spezialisierten magnetischen Sektorfeldmassenspektrometern in Heliumleckdetektoren gemessen.

Zum Nachweis anderer Prüfgase, insbesondere auch Kältemitteln, wird das Quadrupolmassenspektrometer eingesetzt. Es hat den Vorteil geringer Baugröße und hoher Flexibilität bei rein elektrischer Ansteuerung (keine variable Mechanik oder Magnet).

Beide Systeme benötigen ein Hochvakuumssystem mit Drücken unter 10^{-4} mbar, wodurch die Anschaffungskosten relativ hoch sind.

Selektivität und Empfindlichkeit ebenso wie Ansprechzeit sind dafür unübertroffen gut.

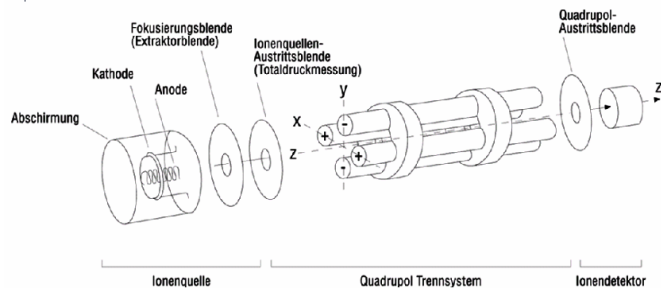


Bild 3a Schema Quadrupolmassenspektromer
Heliumsektorfeldspektrometer

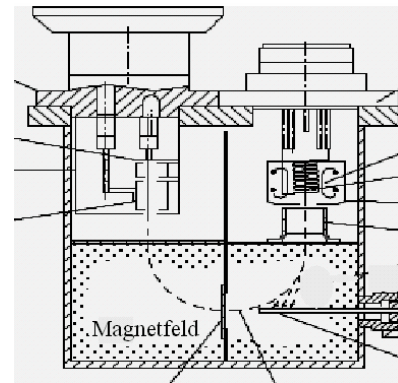


Bild 3b Querschnitt

5.3 Infrarotabsorptionsdetektor

Gase, die „infrarotaktiv“ sind, können durch die Absorption von infrarotem Licht nachgewiesen werden. Dabei wird bei Bestrahlung mit Licht ein spezifischer Wellenlängenbereich absorbiert, der wobei eine quantitative Bestimmung der Gaskonzentration möglich ist. „Infrarotaktiv“ sind allerdings nur molekulare Gase (mit mehreren Atomen im Molekül), die außerdem so gebaut sind, dass sie von elektromagnetischer Strahlung im infraroten Wellenlängenbereich anzuregen sind (ein Dipolmoment haben). Beispiele sind die Kohlenwasserstoffe und Kältemittel, Edelgase sind so nicht nachweisbar, auch Wasserstoff ist nicht infrarotaktiv.

Leckdetektoren auf Infrarotbasis müssen speziell gebaut sein, um kleine Gaskonzentrationen bis unter 1ppm mit Ansprechzeiten unter 1 sec nachweisen zu können. Sie haben dann ähnlich wie Massenspektrometer die Eigenschaft, sehr stabil und selektiv zu sein. Ihr Einsatz erfolgt praktisch nur im Schnüffelverfahren in atmosphärischer Luft.

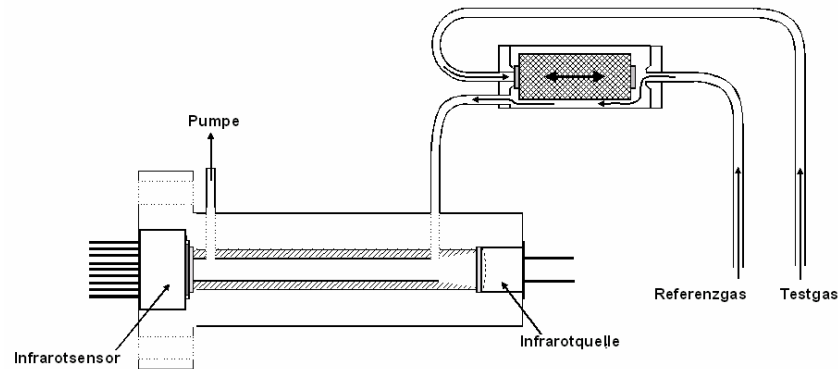


Bild 4 Schema eines Schnüffelleckdetektors mit Infrarotabsorption und Referenzgasmessung aus der Atmosphäre

5.4 Gassensoren in Leckdetektoren

Zunehmend wird auch versucht, Gassensoren zur Leckdetektion einzusetzen. Gassensoren sind in der Regel nicht so selektiv und so schnell wie Massenspektrometer oder Infrarotmesszellen. Sie können für bestimmte Gase sehr empfindlich sein, haben aber oft lange Ansprechzeiten weit über 2 Sekunden bis zu einigen hundert Sekunden. Dies wird meist über eine differentielle Auswertung kompensiert, die auf Änderungen relativ schnell anspricht. Dafür geht aber die Information über die Leckgröße weitgehend verloren, so dass man vor allem den Ort eines Lecks damit finden kann. Eine Kalibrierung mit Prüflecks ist deshalb, wenn überhaupt, nur eingeschränkt möglich. Für preiswerte Servicegeräte im Kälteanlagenbau oder in Werkstätten sind solche Geräte völlig ausreichend. In der industriellen Prüfung sind aber kalibrierbare und direkt anzeigende Geräte (mit Triggergrenzwertanzeige) unabdingbar.

Literatur:

- ¹ Blüthgen, Weisheit: Allgemeine Klimageographie (Lehrbuch der Allgemeinen Geographie), 3.Aufl., Berlin 1980, S.43.
- ² Dissertation Aeschbach-Hertig, ETH Zürich 1994
- ³ Wutz, Handbuch Vakuumtechnik, Hrsg. Karl Jousten, 8. Aufl. Vieweg 2004, Seite 506ff.