

AUS LEIDENSCHAFT FÜR PERFEKTION

PFEIFFER  **VACUUM**

LECKSUCHE

KOMPENDIUM

Impressum

Autor:

Autorenteam

Veröffentlicht von:

Pfeiffer Vacuum GmbH, Headquarters
Berliner Strasse 43, D-35614 Asslar/Deutschland
T +49-(0) 6441-802-0, F +49-(0) 6441-802-1202
info@pfeiffer-vacuum.de, www.pfeiffer-vacuum.de

Änderungen vorbehalten

Hinweis

Lecksuche-Kompodium

Die in diesem Kompodium enthaltenen Informationen und werblichen Aussagen und insbesondere die Beschreibungen, Fotos, Abbildungen, Zeichnungen, Beispiele und Informationen zu Qualität, Beschaffenheit, Zusammensetzung, Leistung, Verbrauch und Nutzbarkeit sowie die Abmessungen und Gewichte der enthaltenen Produkte können unabhängig von ihrer Art ohne Vorankündigung geändert werden, sofern sie nicht ausdrücklich als verbindlich gekennzeichnet sind. Solche Informationen stellen keine Garantie- oder Gewährleistungsverpflichtung irgendeiner Art dar. Wir behalten uns ausdrücklich das Recht vor, Fehler zu korrigieren und technische Informationen zu ändern. Alle in diesem Kompodium enthaltenen Fotos, Abbildungen und Zeichnungen, für die keine eindeutige Quelle angegeben ist, sind das Eigentum der Pfeiffer Vacuum GmbH.

Pfeiffer Vacuum GmbH, Februar 2014

	Seite
1 Einführung in die Lecksuche	6
1.1 Was ist ein Leck? – Definition	6
1.2 Wie groß ist ein Leck?	8
2 Theoretische Grundlagen der Lecksuche	9
2.1 Mathematische Grundlagen	10
2.2 Einheiten	10
2.3 Formeln für Berechnungen zur Lecksuche	11
2.3.1 Kalibrierung	11
2.3.2 Abpumpzeit	12
2.3.3 Effektives Saugvermögen	13
2.3.4 Reihenschaltung von Strömungswiderständen	13
2.3.5 Signalansprechzeit	14
2.3.6 Permeation	16
2.3.7 Umrechnung von Gasleckageraten im laminaren Strömungsbereich	18
2.3.8 Umrechnung von Gasleckageraten im molekularen Strömungsbereich	18
2.3.9 Umrechnung einer Flüssigkeitsleckagerate in eine Gasleckagerate	19
2.3.10 Durch Flüssigkeiten verschlossene Lecks	20
2.3.11 Massenverlustraten und Gasleckageraten im laminaren Strömungsbereich	21
2.3.12 Massenverlustraten und Gasleckageraten im molekularen Strömungsbereich	21
2.3.13 Standardisierte Leckagerate – Druckabhängigkeit	21
2.3.14 Temperaturabhängigkeit der Leckagerate	23
2.3.15 Akkumulationsprüfung	23
3 Prüfgase	25
3.1 Einführung	25
3.2 Helium	26
3.3 Wasserstoff	27
3.4 Physikalische Eigenschaften von Prüfgasen	28
4 Sensortechnologien	29
4.1 Massenspektrometrische Analysegeräte	29
4.1.1 Magnetisches Massenspektrometer	32
4.1.2 Quadrupol-Massenspektrometer	36
4.2 Quarzfenstersensor	41
4.3 Detektortechnologien von Pfeiffer Vacuum im Vergleich	43
4.4 Andere Detektortechnologien	44
5 Detektoren und Lecksuchgeräte	45
5.1 Lecksucher auf Basis von magnetischen Sektorfeld-Massenspektrometern	45
5.2 Lecksucher auf Basis von Quadrupol-Massenspektrometern	47
5.3 Lecksucher auf Basis von Quarzfenstersensoren	47
5.4 Vergleich von Lecksuchgeräten	49

	Seite
6 Methoden der Lecksuche und Dichtheitsprüfung	50
6.1 Einführung	50
6.2 Integraltest von Gegenständen, die im Vakuum eingeschlossen sind	52
6.3 Sprühtest	54
6.4 Schnüffelprüfung	55
6.5 Integraltest bei Atmosphärendruck	57
6.6 Integraler Vakuumtest	58
6.7 Drucklagerungstest	58
6.8 Methoden und Geräte	60
7 Auswahl eines Lecksuchverfahrens	61
7.1 Schaumbildende Mittel	61
7.2 Blasenprüfung	61
7.3 Druckabfall	62
7.4 Lecksuche mit Prüfgasen	62
7.5 Prüfgase und geeignete Analysegeräte	63
8 Industrielle Dichtheitsprüfung und Helium-Rückgewinnungsanlagen	64
8.1 Lecksuchanlagen	64
8.1.1 Übersicht	65
8.1.2 Abdichtwerkzeuge	67
8.1.3 Prüfflecks	67
8.1.4 Anwendungsbeispiel	68
8.2 Helium-Rückgewinnungsanlagen	70
8.2.1 Übersicht	70
8.2.2 Anwendungsbeispiel	70
9 Lecksuchseminare und praktische Schulungen	72
10 Service und Wartung	73
11 Anhang	74
11.1 Tabellen	74
11.1.1 Umrechnungstabelle für Leckagerateneinheiten	74
11.1.2 Umrechnungstabelle für Druckeinheiten	74
11.1.3 Konstanten	76
11.2 Helium-Lecksucher – Baureihen und Anwendungen im Überblick	76
11.3 Weiterführende Literatur	77
11.3.1 Normen und Richtlinien	77
11.3.2 Bücher	77
11.3.3 Webseiten	77

1 Einführung in die Lecksuche

1.1 Was ist ein Leck? – Definition

Ein Leck wird definiert als eine Struktur in der Wand eines Objekts, die in der Lage ist, Gase und Flüssigkeiten von der einen Seite der Wand zur anderen durchzulassen. Bei dieser Struktur kann es sich um ein Loch, eine Porosität, einen mediendurchlässigen Bereich oder eine beliebige andere Struktur handeln. Jedes technische Objekt weist solche Fehlstellen auf. Aus diesem Grund ist nicht zu erwarten, dass der Durchfluss eines Mediums durch die Wand gleich Null ist. Daher können die Begriffe „Dichtigkeit“ oder „dicht“ nicht absolut verwendet werden – es gibt kein „absolut dichtes“ Objekt. Dichtigkeit richtet sich immer nach den Anforderungen einer bestimmten Maschine, eines bestimmten Systems oder Produkts. Die Kriterien für Dichtigkeit müssen individuell nach den jeweiligen Bedürfnissen definiert und quantifiziert werden.

Der Medientransfer durch eine Wand kann als „Leckagerate“ beschrieben werden. Die gebräuchliche Beschreibung „Leckrate“ könnte als Häufigkeit des Vorkommens von Lecks missverstanden werden. Aus diesem Grund ist „Leckagerate“ der korrekte technische Ausdruck, der in dieser Broschüre benutzt wird. Die Leckagerate wird definiert als Durchsatz einer Flüssigkeit oder eines Gases, der unter bestimmten Bedingungen durch ein Leck strömt. Der Durchsatz kann beispielsweise ausgedrückt werden als Mas-

senverlust pro Zeit oder Gasstrom (Gasmenge, beschrieben als Produkt aus Druck mal Volumen pro Zeit).

Die treibende Kraft für den Medientransfer kann ein Druckgefälle oder ein Konzentrationsunterschied auf den beiden Seiten der Wand sein.

Wie im ersten Abschnitt beschrieben, ist ein Loch für den Durchtritt eines Mediums durch eine Wand nicht unbedingt erforderlich. Gase können auch eine Verpackungsfolie für Lebensmittel oder die Elastomerdichtung eines Vakuumsystems durchdringen. Dieser Wirkungsmechanismus wird „Permeation“ genannt. Grundsätzlich erfolgt die Permeation in drei Schritten:

1. Adsorption eines Mediums auf der Oberfläche des Feststoffs.
2. Diffusion durch das Material des Feststoffs. Diffusion ist ein natürlicher Mischvorgang, der so lange andauert, bis kein Konzentrationsgefälle mehr vorhanden ist. Als Beispiel sei das Mischen eines Tropfens Tinte in Wasser genannt. Wenn Sie lange genug warten, stellt sich im Glas eine homogene Blaufärbung ein.
3. Desorption eines Mediums von der entgegengesetzten Seite des Feststoffs.

In Abbildung 1-1 ist eine Übersicht über die Wechselwirkungen zwischen der Wand einer Vakuumkammer und den Gasen auf beiden Seiten der Kammerwand dargestellt.

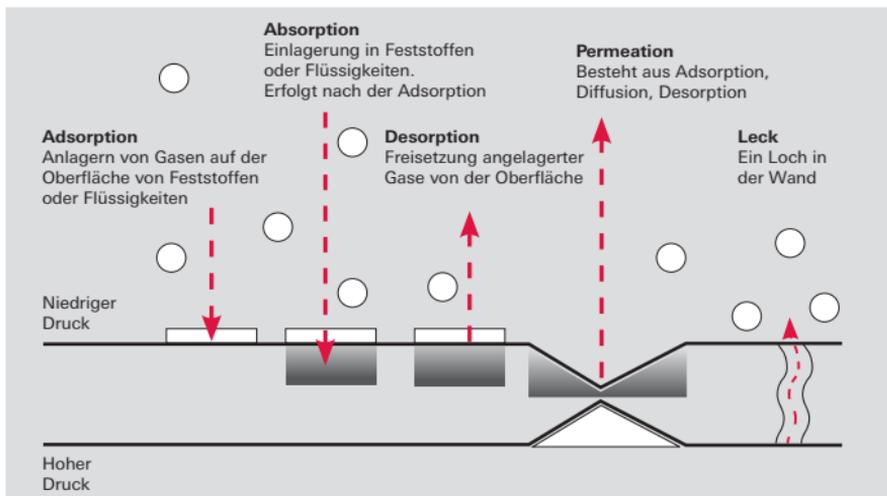


Abbildung 1-1: Wechselwirkungen zwischen den Oberflächen einer Vakuumkammer und dem umgebenden Gas

Weist die Wand eines Prüfbjektivs wirklich ein kleines Loch auf und gibt es eine Druckdifferenz zwischen der einen Seite der Wand und der anderen, können wir einen Medienstrom von der Seite mit dem hohen Druck zur Seite mit dem niedrigen Druck beobachten. Sowohl Flüssigkeiten als auch Gase können durch dieses Loch strömen.

Die Auswirkungen eines Lecks können sehr unterschiedlich sein. Ein leckender, also tropfender Wasserhahn in einem Privathaushalt ist zwar nervenaufreibend, hat aber nur geringe Konsequenzen für die Funktion, die Umwelt oder den Energieverbrauch. Entdeckt man jedoch, dass ein Wasserversorger in einer großen Stadt 26% des Trinkwassers in seinem Rohrleitungssystem verliert (reales Fallbeispiel), dann ist dies eine massive Verschwendung von Ressourcen und Geld, die behoben werden muss. Wenn Sie Wassertröpfchen in Ihrer wasserdichten Armbanduhr entdecken, ist dies einfach unangenehm und bedeutet, dass Sie die Uhrzeit zukünftig durch Wasserblasen ablesen müssen. Das

Eindringen von Wasser in den Zünder und Gasgenerator Ihres Airbags kann zu Störungen führen und lebensgefährlich sein.

Durch große Lecks können außerdem ätzende oder toxische Substanzen freigesetzt werden. Einer der schwersten Vorfälle durch das Versagen einer Dichtung war die Katastrophe mit dem Space Shuttle *Challenger* im Januar 1986.

Lecks können zu Störungen oder einer reduzierten Lebensdauer bei vielen technischen Produkten führen. Beispiele sind:

- Kühl- und Klimaanlage bei Anwendungen im Haushalt oder im Kfz-Bereich
- Leichtmetallfelgen bei Rädern
- Kraftstoff- und Öltanks
- Prozessanlagen in der chemischen und pharmazeutischen Industrie
- Kondensatoren und Dampfleitungen in Kraftwerken

Die Lecksuche bei Maschinen und Produktionsanlagen ist häufig eine unverzichtbare Voraussetzung für die Produktqualität.

1.2 Wie groß ist ein Leck?

Um ein Gefühl für die Dimensionen eines Leckkanals zu bekommen, kann man diese berechnen. Dabei geht man von der Annahme aus, dass es sich um ein ideales Rohr mit glatten Wänden handelt.

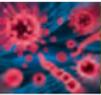
							
Beschreibung	Technisch dicht	Gasdicht	Virusdicht	Bakteriendicht	Wasserdicht	Tropfendes Wasser	Laufendes Wasser
Leckdurchmesser	0,1 μm	0,8 μm	3 μm	10 μm	30 μm	100 μm	1 mm
Leckagerate	10^{-12} Pa m^3s^{-1}	10^{-10} Pa m^3s^{-1}	10^{-8} Pa m^3s^{-1}	10^{-6} Pa m^3s^{-1}	10^{-4} Pa m^3s^{-1}	10^{-2} Pa m^3s^{-1}	1 Pa m^3s^{-1}
Entweichzeit einer Blase mit 1 cc	> 1000 Jahre	> 30 Jahre	> 100 Tage	> 1 Tag	> 15 Min.	10 Sek.	0,1 Sek.
Leckageortung mit Schnüffelmethoden							
Quantitative Leckageratenmessung unter atmosphärischen Bedingungen							
Lokale und integrale Vakuumprüfung							
Prüfung abgedichteter Objekte							
Prüfmethode(n)					Sichtprüfung Ultraschall		
					Druckabfall Blasenprüfung		
			Prüfgas bei Umgebungsdruck				
	Prüfgas im Vakuum						

Abbildung 1-2: Größenordnungen von Leckagerate und den Abmessungen eines Leckkanals

Abbildung 1-2 zeigt uns, dass die Abmessungen der meisten technischen Lecks kleiner sind als die optische Auflösung des Auges. Deshalb ist es nutzlos, eine Sichtinspektion durchzuführen, wenn Sie ein Leck mit der Prüfgasmethode festgestellt haben.

Andererseits können wir sehen, dass die Leckabmessungen mindestens 1.000 mal größer sind als der Durchmesser eines Prüfgasatoms oder -moleküls (das im Bereich 10^{-10} m liegt). Das bedeutet, dass jedes Prüfgas durch einen Leckkanal strömen kann. Im nächsten Kapitel behandeln wir das Verhalten unterschiedlicher Prüfgase in Bezug auf die Lecksuche.

2 Theoretische Grundlagen der Lecksuche

Im letzten Kapitel haben wir die „Leckagerate“ als Durchsatz eines bestimmten Gases oder Flüssigkeit eingeführt, die unter definierten Bedingungen durch ein Leck strömt. Aus dieser Definition ergeben sich mehrere Fragen:

- Wie wird das Gas oder die Flüssigkeit durch das Leck transportiert?
- Wie sieht die Leckgeometrie aus?
- Welchen Einfluss haben die „Bedingungen“?

Die Geometrie des Lochs ist in den meisten Fällen unbekannt. Das Prüfpersonal weiß nicht, ob der Leckkanal ein rundes Loch mit glatten Wänden ist oder ob es sich um einen Riss, eine klaffende Verbindung oder eine Spalte handelt. Die Berechnung kann nur für ideale Geometrien erfolgen. Da wir die tatsächliche Leckgeometrie nicht kennen, müssen wir Annahmen treffen. Berechnun-

gen nach den klassischen Methoden der Fluidodynamik ergeben eine Obergrenze für den Medientransport durch das Loch.

Die Strömung des Prüfgases durch ein Leck kann in verschiedenen Strömungsbereichen erfolgen:

- Laminare Strömung
- Übergangs- oder Knudsenströmung
- Molekulare Strömung

Die laminare Strömung ist charakterisiert durch einen vergleichsweise hohen Druck und eine hohe Gasdichte mit starker Wechselwirkung zwischen den einzelnen Atomen oder Molekülen des Prüfgases. Die starke Wechselwirkung erzeugt eine laminare Strömung durch ein Leck. Als Faustregel gilt, dass diese Art der Strömung bei Leckageraten über $10^{-5} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$ vorherrschend ist.

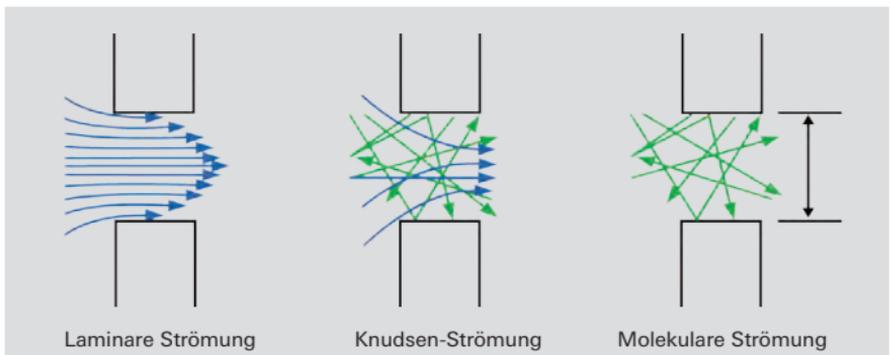


Abbildung 2-1: Strömungsbereiche

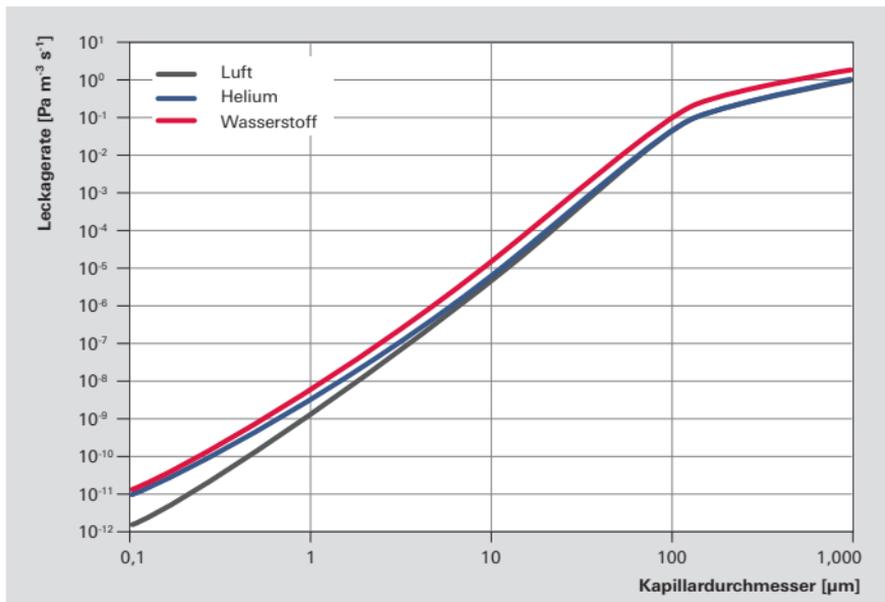


Abbildung 2-2: Transport von verschiedenen Prüfgasen durch ein ideales kreisrundes Leck (berechnet für eine Temperatur von 20 °C und eine Wandstärke von 1 cm)

Die molekulare Strömung ist charakterisiert durch einen niedrigen Druck und eine niedrige Gasdichte. Es gibt fast keine Wechselwirkung zwischen den einzelnen Atomen oder Molekülen des Prüfgases. Die molekulare Strömung ist bei Leckageraten unter $10^{-8} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$ vorherrschend.

Der Übergang zwischen laminar-viskoser Strömung und molekularer Strömung ist nicht sprunghaft. Die Strömung im Übergang zwischen laminarer und molekularer Strömung wird Knudsenströmung genannt. Wenn Sie nicht sicher sind, welche Strömung in Ihrem Anwendungsfall vorherrscht, berechnen Sie bitte beide Alternativen und wählen Sie den ungünstigsten Fall.

In Abbildung 2-2 kann man sehen, dass die blaue Kurve für Helium mit der grauen Kurve für Luft bei Leckageraten oberhalb von etwa $10^{-5} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$ fast deckungsgleich ist. Dann

entfernt sich die Heliumkurve und nähert sich bei Leckageraten unter $10^{-8} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$ der roten Kurve für Wasserstoff. Dies ist eine praktische Auswirkung der oben genannten Strömungsbereiche. Wir werden später sehen, wie dies quantitativ beschrieben werden kann (siehe 2.3.7 Umrechnung von Gasleckageraten und die nachfolgenden Kapitel).

2.1 Mathematische Grundlagen

In der Dichtheitsprüfung haben wir es mit einem breiten dynamischen Bereich von Leckageraten zu tun. Daten werden meist in Form von exponentiellen Zahlen angezeigt. In Tabelle 2-1 sind relevante Zahlenangaben und Präfixe aufgeführt.

2.2 Einheiten

Wir haben sie bereits mehrere Male ohne Definition verwendet: die aus den SI-Ein-

Milliarde				Million	Hunderttausend	Zehntausend	Tausend	Hundert	Zehner	Einer	Zehntel			Hundertstel	Tausendstel	Zehntausendstel	Hunderttausendstel	Millionstel			Milliardstel	Präfix	Exponent	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0												Giga	$1 \cdot 10^9$	
			1	0	0	0	0	0	0	0												Mega	$1 \cdot 10^6$	
				1	0	0	0	0	0	0													$1 \cdot 10^5$	
					1	0	0	0	0	0													$1 \cdot 10^4$	
						1	0	0	0	0												Kilo	$1 \cdot 10^3$	
							1	0	0	0												Hekto	$1 \cdot 10^2$	
								1	0	0												Deka	$1 \cdot 10^1$	
									1	0													$1 \cdot 10^0$	
									0,	1												Dezi	$1 \cdot 10^{-1}$	
									0,	0	1											Zenti	$1 \cdot 10^{-2}$	
									0,	0	0	1										Milli	$1 \cdot 10^{-3}$	
									0,	0	0	0	1										$1 \cdot 10^{-4}$	
									0,	0	0	0	0	1									$1 \cdot 10^{-5}$	
									0,	0	0	0	0	0	1							Mikro	$1 \cdot 10^{-6}$	
									0,	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	Nano	$1 \cdot 10^{-9}$

Tabelle 2-1: Zahlen und Präfixe

heiten zusammengesetzte Einheit für die Leckagerate ist „Pa m³ s⁻¹“. Bei der Analyse der Einheit können wir die folgenden physikalischen Größen finden:

- Druck [Pa]
- Volumen [m³]
- Zeit [s]
- Gasmenge [Pa m³]
- Saugvermögen [m³ s⁻¹]
- Gasdurchsatz [Pa m³ s⁻¹]

Eine Leckagerate kann also grundsätzlich als eine Gasströmung oder eine bestimmte Gasmenge, die in einer bestimmten Zeit durch einen Leckkanal strömt, verstanden werden. Um die benötigte Gasmenge zu beschreiben, benötigen wir das Produkt aus Druck und Volumen, da Gase kompressibel sind oder sich ausdehnen können. Dies ist der große Unterschied zu flüssigen Medien, wo das Volumen allein zur Beschreibung einer Menge ausreicht.

Alle anderen Einheiten für die Leckagerate basieren auf dem gleichen Konzept. Wenn wir wie beispielsweise bei Druckänderungsverfahren üblich eine Einheit finden, die sich nur aus Volumen und Zeit zusammensetzt, wird immer ein Bezug zu „Standardbedingungen“ angegeben. Diese enthalten einen Referenzdruck. Demnach können wir alle Leckagerateinheiten umrechnen, indem wir die einzelnen physikalischen Eigenschaften umrechnen. Kapitel 11 enthält eine Umrechnungstabelle für Leckageraten.

2.3 Formeln für Berechnungen zur Lecksuche

2.3.1 Kalibrierung

Wird ein Lecksucher parallel zu einer Vorvakuumpumpe oder einem Pumpstand (beispielsweise einem Wälzkolben- oder Turbopumpstand) betrieben, sollten Signalansprechzeit und Teilstromverhältnis im-

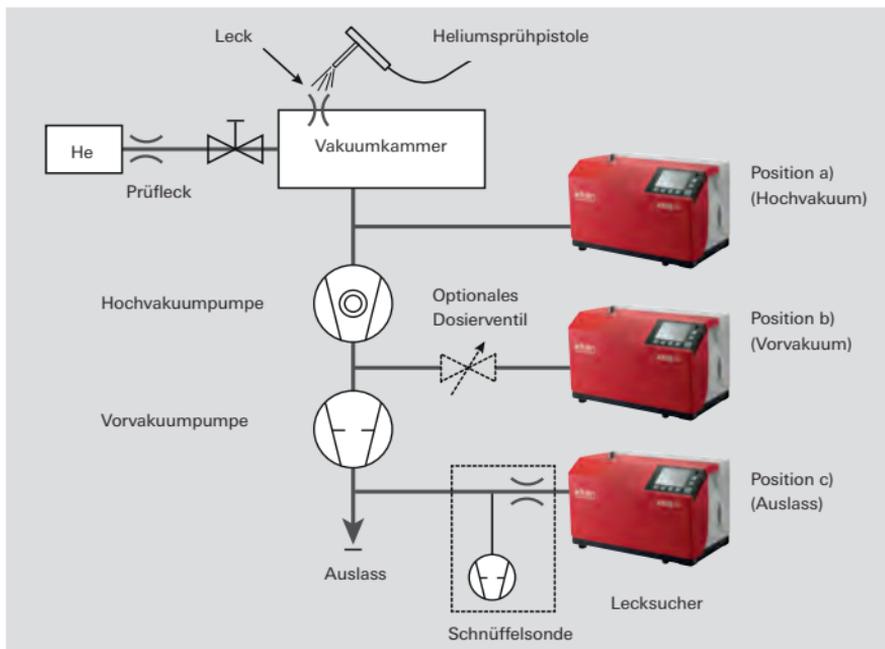


Abbildung 2-3: Anschlussmöglichkeiten eines Lecksuchers an ein Vakuumsystem

mer mit einem Prüfling gemessen werden. Die korrekte Position des Prüflings wird in Abbildung 2-3 gezeigt. Der Gasstrom aus dem Prüfling teilt sich in zwei Ströme auf: der eine Teilstrom geht zum Lecksucher und der andere wird über das Pumpensystem abgesaugt. Vergleicht man den Wert des Prüflings bei direktem Anschluss an den Lecksucher mit dem Messwert an der gezeigten Position, so kann man das Teilstromverhältnis präzise messen und die tatsächliche Leckagerate berechnen. Man multipliziert also die im Teilstrom gemessene Leckagerate mit einem gemessenen Faktor und tut so, als ob der gesamte Prüfgasstrom vom Lecksucher gemessen wird.

Wenn Überdruck in der Leitung zwischen Prüfling und Absperrventil vermieden wird, ist eine präzise Bestimmung der Ansprechzeit ebenfalls möglich.

2.3.2 Abpumpzeit

Die Abpumpzeit im laminar-viskosen Strömungsbereich ist in Formel 2-1 angegeben.

$$t = \frac{V}{S_{\text{eff}}} \ln \frac{p_1}{p_2}$$

Formel 2-1: Abpumpzeit im laminar-viskosen Strömungsbereich

- t Abpumpzeit
- V Volumen
- S_{eff} Effektives Saugvermögen
- p_1 Anfangsdruck
- p_2 Enddruck

Das effektive Saugvermögen im Nenner ist linear. Eine parallel zum Lecksucher betriebene Vorvakuumpumpe, wie in Abbildung 2-3 gezeigt, beschleunigt also das Abpumpen.

Desorption von Dämpfen, Aufwirbelung und Transport von Partikeln sind Prozesse, die bei hohen Drücken stattfinden. Wird also zu Beginn des Abpumpens eine externe Pumpe ohne gleichzeitigen Einsatz des Lecksuchers betrieben, wird nur die Hilfspumpe mit Kondensat und Staub belastet. Der Lecksucher wird geschützt, seine Lebensdauer und Wartungsintervalle verlängert. Zudem ist die Wartung einer Vakuumpumpe normalerweise preisgünstiger als die Wartung eines Lecksuchers.

2.3.3 Effektives Saugvermögen

In einem realen Pumpensystem reduziert sich das verwendete spezifizierete Nennsaugvermögen durch den Strömungswiderstand der installierten Komponenten, den sogenannten Leitwert. Das effektive Saugvermögen wird in Formel 2-2 berechnet.

$$\frac{1}{S_{\text{eff}}} = \frac{1}{S_{\text{Nenn}}} + \frac{1}{C}$$

Formel 2-2: Effektives Saugvermögen

S_{eff}	Effektives Saugvermögen	[l/s]
S_{Nenn}	Nennsaugvermögen	[l/s]
C	Leitwert	[l/s]

Beispiel: Eine Turbopumpe mit einem Saugvermögen von 67 l/s wird an einen DN 63 Flansch einer Vakuumkammer angeschlossen. Sie soll als Boosterpumpe bei der Lecksuche agieren (siehe 2.3.5 Signalansprechzeit). Um die Pumpe mit einem Ventil abzusperrern, können wir entweder ein Eckventil mit einem Leitwert von 160 l/s oder einen Schieber (der teurer ist) mit einem Leitwert von 550 l/s verwenden. Welches Absperrorgan sollen wir wählen?

Mit dem Eckventil erreichen wir ein effektives Saugvermögen von 47 l/s und verlieren damit 30% des Nennsaugvermögens der Pumpe. Mit dem Schieber erreichen wir ein effektives Saugvermögen von 60 l/s und ver-

lieren nur 11%. Im Ergebnis ist der teurere Schieber also sein Geld wert.

2.3.4 Reihenschaltung von Strömungswiderständen

In den meisten Fällen ist mehr als nur ein Bauteil zwischen Prüfobjekt oder Kammer und dem Pumpensystem vorhanden. Formel 2-3 zeigt, dass sich die einzelnen Leitwerte in einer Reihenschaltung wie Widerstände in der Elektrotechnik verhalten. Dabei bestimmt das Teil mit dem kleinsten Leitwert die Leistung des ganzen Systems.

$$\frac{1}{C_{\text{Ges}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Formel 2-3: Reihenschaltung von Leitwerten

Beispiel: Sie haben einen Hochleistungs-Lecksucher mit einem Saugvermögen von 7 l/s am Einlass. Sie schließen ihn an ein von Ihnen gefertigtes Teil an, das auf einer Werkbank liegt. Das Teil hat eine DN 16 Flanschverbindung mit einem DN 16 Absperrventil. Sie schließen es über ein 2 m langes DN 16 Rohr an Ihren Lecksucher an. Der resultierende Leitwert bei molekularer Strömung ist:

$$\frac{1}{C_{\text{Ges}}} = \frac{1}{C_{\text{Ventil}}} + \frac{1}{C_{\text{Leitung}}} + \frac{1}{7 \text{ l/s}} + \frac{1}{0,25 \text{ l/s}}$$

$$C_{\text{Ges}} = 0,24 \text{ l/s}$$

Nach Formel 2-2 wird das effektive Saugvermögen von 7 l/s auf 0,24 l/s reduziert und wir behalten 3% des ursprünglichen Saugvermögens. Die sich daraus ergebenden Konsequenzen für die Ansprechzeit behandeln wir im folgenden Abschnitt 2.3.5 Signalansprechzeit.

Im zuvor genannten Beispiel kann man im Hinblick auf den Anschlussstutzen und das Ventil nichts unternehmen. Aber man kann direkt nach dem Ventil ein Reduzierstück anschließen, um den Durchmesser von DN 16 auf DN 40 zu vergrößern. Außerdem kann

man versuchen, den Lecksucher näher an das Teil heranzubringen und 1 m Leitungslänge zu sparen. Mit dieser Anordnung können wir ein effektives Saugvermögen von 2,1 l/s erzielen und zehnmal schneller messen als mit der vorherigen Anordnung.

Daher sollten Sie für die Verbindung von Prüfobjekt und Lecksucher eine möglichst kurze und dicke Leitung wählen. Wenn Sie einen Kompromiss zwischen Länge und Durchmesser der Leitung eingehen müssen, dann wählen Sie den größeren Durchmesser. Der Leitwert hängt linear von der Länge ab, aber in der dritten Potenz vom Durchmesser bei molekularer Strömung.

2.3.5 Signalansprechzeit

Wird ein Behälter an einen Lecksucher angeschlossen und evakuiert, dann besteht eine Zeitverzögerung zwischen dem Ansprühen mit Prüfgas und dem Auftreten des Signals. Es gibt eine Anstiegszeit (oder Zeitkonstante), eine Totzeit und eine Anlaufzeit.

Die Anstiegszeit ist eine Zeit, die vergeht, bis ein Volumen mit dem Prüfgas bis auf einen

bestimmten Gleichgewichtsdruck gefüllt ist. Dies geschieht in jedem Strömungsbereich. Per Definition ist die Zeitkonstante bei einem Vakuumsystem die Zeit, bis 63% des Gleichgewichtsdrucks erreicht ist (siehe Formel 2-4).

$$\tau_{63\%} = \frac{V}{S_{eff}}$$

Formel 2-4: Zeitkonstante

$\tau_{63\%}$ Zeitkonstante
 S_{eff} Effektives Saugvermögen
 V Volumen des Prüfobjekts

Bitte beachten Sie, dass das effektive Saugvermögen im Nenner steht. Dies erklärt die Wichtigkeit der Beispiele aus dem vorigen Abschnitt. Wenn wir also von einem Volumen von 30 l ausgehen und das berechnete effektive Saugvermögen bei den zwei verschiedenen Gasleitungen ansetzen, ergeben sich die Werte in Tabelle 2-2. Wir können also nur durch die Auswahl einer Leitung den Zeitaufwand einer Messung erheblich beeinflussen.

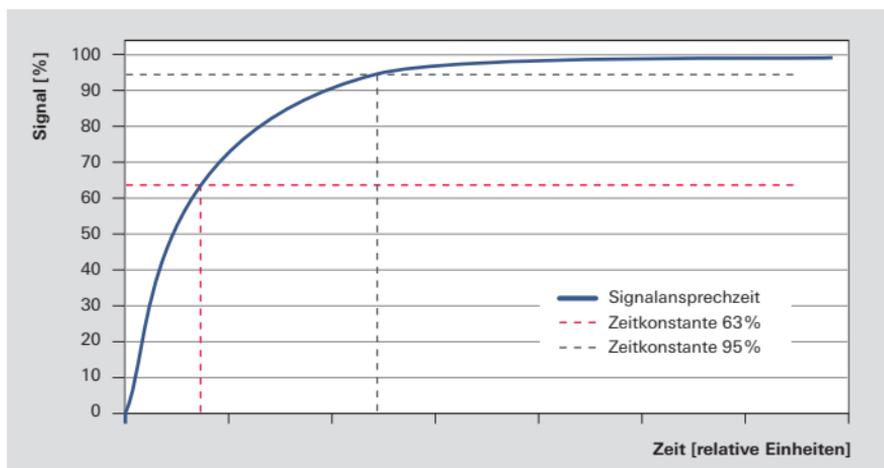


Abbildung 2-4: Signalansprechzeit

Komponente	Saugvermögen/ Leitwert (DN 16)	Saugvermögen/ Leitwert (DN 40)
Helium-Lecksucher	7 l/s	7 l/s
Absperrventil DN 16	5 l/s	5 l/s
Leitung DN 16, 2 m	0,25 l/s	
Leitung DN 40, 1 m		7,7 l/s
Effektives Saugvermögen	0,23 l/s	2,1 l/s
Signalansprechzeit	131 s	14 s

Tabelle 2-2: Beispiel Signalansprechzeit

Der exponentielle Anstieg der Prüfgaskonzentration kann modelliert werden. Der Partialdruck des Prüfgas in Abhängigkeit von der Zeit kann nach Formel 2-5 berechnet werden.

$$q_{He}(t) = q_{He,end} \cdot \left[1 - e \left(- \frac{S_{eff} \cdot t_s}{V} \right) \right]$$

Formel 2-5: Prüfgas-Partialdruck in Abhängigkeit von der Zeit

$q_{He,end}$ Endwert der Leckagerate
 t_s Signalansprechzeit

Theoretisch gibt es nur eine exponentielle Konvergenz zum Endwert. Jedoch wird nach der dreifachen Zeit der Zeitkonstanten $\tau_{63\%}$ bereits ein Wert von 95 % erreicht.

Folglich beschleunigt eine Hochvakuumpumpe, die mit dem Lecksucher in Reihe geschaltet ist, die Messung erheblich aufgrund des viel höheren Saugvermögens für das Prüfgas Helium.

Beispiel: Wird ein Bauteil mit einem Volumen von 100 l geprüft, so ist die Signalansprechzeit $\tau_{63\%}$ 100 s, wenn ein Lecksucher mit einem effektiven Saugvermögen von 1 l/s verwendet wird. Diese Zeitkonstante kann auf eine Sekunde reduziert werden, wenn der Lecksucher als „Vorpumpe“ für eine 100 l/s Turbopumpe direkt am Prüfobjekt angeflanscht ist.

Das Arbeiten mit Turbopumpen in Reihenschaltung zum Lecksucher ist ein sehr effektives Mittel zur Verkürzung der Prüfzeit bei

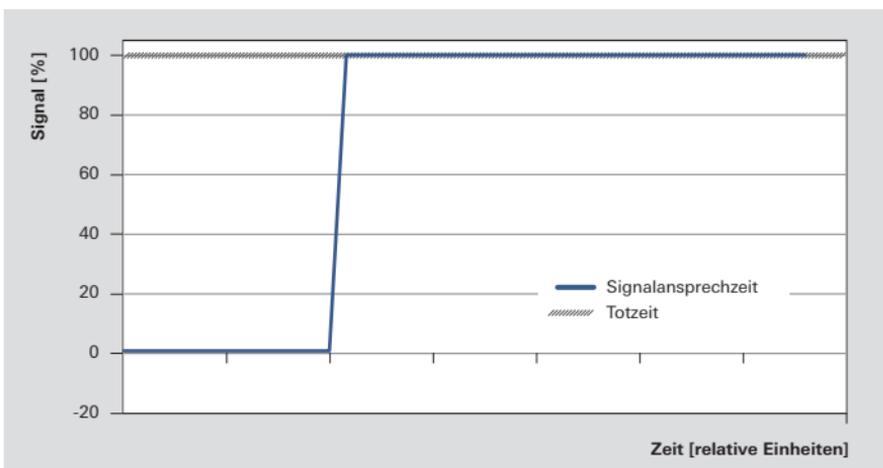


Abbildung 2-5: Totzeit

der industriellen Serienprüfung oder bei der Prüfung sehr großer Objekte.

Eine Totzeit kommt nur bei einem laminar-viskosen Strömungsbereich vor. In erster Näherung hängt sie von der zurückgelegten Entfernung und der Strömungsgeschwindigkeit des Prüfgas ab (siehe Formel 2-6).

$$t_0 = \frac{l}{v}$$

Formel 2-6: Totzeit

- t_0 Totzeit
- v Strömungsgeschwindigkeit
- l Zurückgelegte Entfernung

Das Ansprechen des Signals ist vergleichsweise schnell mit einer steilen Flanke. Damit können Lecks auch bei hohem Untergrundsignal gut identifiziert werden. Da eine Totzeit nur bei laminar-viskosen Strömungsbedingungen auftritt, kann sie technisch genutzt werden, um bei erhöhtem Prüfdruck schneller zu messen als im molekularen Strömungsbereich. Dies ist besonders hilfreich bei Teilen mit niedrigem Leitwert wie langen Rohren mit kleinem Durchmesser.

Eine Anlaufzeit tritt auf, wenn das Prüfgas über eine bestimmte Länge ohne aktiven Gastransport zum Lecksucher diffundiert. Dies kann der Fall sein, wenn ein Lecksucher über ein langes Rohr unter hohem Druck mit einem Dosierventil direkt am Lecksucher an das Prüfobjekt angeschlossen ist. In diesem Fall ist die Diffusion durch das lange Rohr ein zeitaufwändiger Schritt und sollte möglichst vermieden werden. Möglicherweise gibt es zu prüfende Objekte mit mehreren in Reihe befindlichen Dichtungen mit jeweils kleinen Totvolumina. Bauteile dieser Art sind schwer zu prüfen und erfordern lange Prüfzeiten. Muss ein derartiges Teil produktionsbegleitend in einer Serienprüfung getestet werden, sollte diese Überlegung bereits in der Kon-

struktionsphase des Bauteils erfolgen und gekoppelte Totvolumina vermieden werden.

$$t_i = \frac{L^2}{2 \cdot D}$$

Formel 2-7: Anlaufzeit aufgrund von Diffusion

- t_i Anlaufzeit
- L Permeationslänge
- D Diffusionskoeffizient

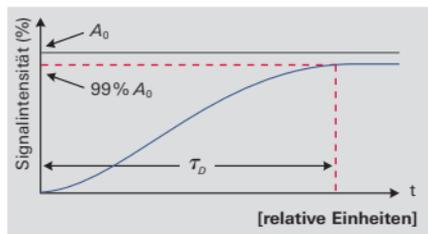


Abbildung 2-6: Anlaufzeit

Das sich daraus ergebende Anlaufzeitprofil ist in Abbildung 2-6 gezeigt. Zu Beginn der Prüfphase erfolgt der Signalanstieg viel langsamer als bei einer normalen Zeitkonstante. Die Anlaufzeit hängt quadratisch von der Diffusionslänge ab. Daher ist es wichtig, die Diffusionslänge kurz zu halten.

2.3.6 Permeation

Permeation ist ein Transportmechanismus, bei dem ein Prüfgas nicht durch Löcher, sogenannte Kapillarlecks, hindurchtritt, sondern durch Vollmaterial hindurchwandert. Materialien, die von Gasen durchdrungen werden können, sind Elastomerdichtungen, Klebstoffe, Quarz usw. Permeation besteht aus mehreren Schritten: Adsorption auf der dem Gas ausgesetzten Seite des Materials, Diffusion durch die Wand und Desorption von der anderen Seite des Materials. Es gibt also aufeinanderfolgende Wechselwirkungen zwischen Gas und Material, die stark von den verwendeten Materialien und Gasen abhängen.

Die Leckagerate ist proportional zur Permeationsfläche und dem Druckgefälle. Sie sinkt linear zur Permeationslänge. Die Abhängigkeit vom Material wird mit dem Permeationskoeffizienten ausgedrückt.

$$q_{\text{Gas}}^{\text{Permeation}} = P \cdot \frac{A}{L} \cdot (\rho_1 - \rho_2)$$

Formel 2-8: Permeation

- P* Permeationskoeffizient
- A* Permeationsfläche
- L* Permeationslänge
- $\rho_{1,2}$ Druck

Beispiel: Wenn wir ein Vakuumsystem mit vielen Flanschen aufbauen, ist es interessant, sich ein Bild über die Gasströmung über einen Permeationsmechanismus durch die Dichtungen zu machen. Betrachten wir die Kammerdichtung einer rechteckigen Tür mit einer Länge von 500 mm auf jeder Seite. Der Durchmesser des Dichtungsrings ist 5 mm. Daraus ergibt sich eine Querschnittsfläche von $A = 4 \cdot 500 \text{ mm} \cdot 5 \text{ mm} = 10.000 \text{ mm}^2 = 1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$

Die Permeationslänge beträgt 5 mm und das Druckgefälle reicht vom Atmosphärendruck zum Vakuum, also rund 1 bar.

Der Permeationskoeffizient ist in mehreren Vakuumlehrbüchern zu finden. Bei einer FKM-Dichtung können wir einen Wert von $4 \cdot 10^{-3} \text{ (mbar l mm)/(s m}^2 \text{ bar)}$ annehmen. Die Einheit enthält die Gasströmung in mbar l/s, eine Permeationslänge in mm, eine Permeationsfläche in m^2 und das Druckgefälle in bar. Viele Permeationskoeffizienten wurden veröffentlicht, bevor es die SI-Einheiten gab. Daher verwenden wir diese Einheiten in unserer Schätzung.

$$P = 4,0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{mm}}{\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{bar}}$$

$$q_{\text{Gas}}^{\text{Permeation}} = 4,0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{mm}}{\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{bar}} \cdot \frac{1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2}{5 \text{ mm}}$$

$$\frac{1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2}{5 \text{ mm}} \cdot (1 \text{ bar} - 0 \text{ bar}) = 8,0 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s}}$$

$$q_{\text{Gas}}^{\text{Permeation}} = 8,0 \cdot 10^{-7} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$$

Abbildung 2-7 zeigt, dass die Permeationskoeffizienten (bei 20 °C) durch Metallwände sehr klein sind. Mit Ausnahme spezieller

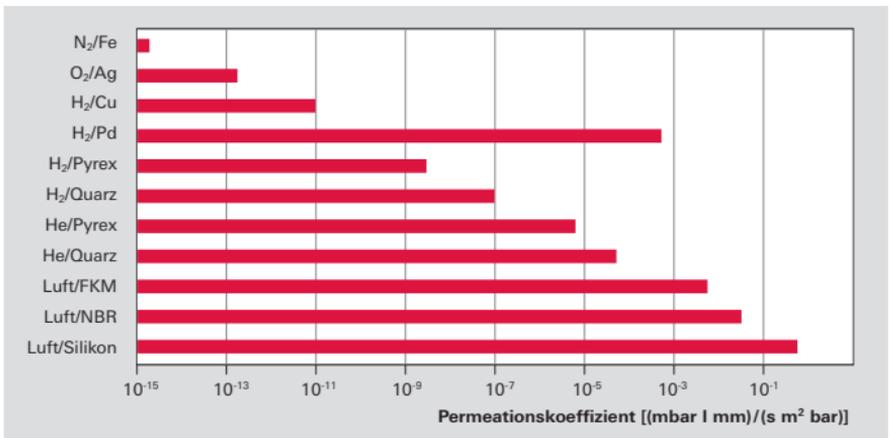


Abbildung 2-7: Permeationskoeffizienten

Medium	Name	Formel	Dynamische Viskosität [10 ⁻⁶ Pa s']	Zur Umrechnung von Gas auf Helium die Gasleckagerate multiplizieren mit	Zur Umrechnung von Helium auf Gas die Gasleckagerate multiplizieren mit
H ₂	Wasserstoff	H ₂	8,80	0,45	2,23
He	Helium	He	19,60	1,00	1,00
NH ₃	Ammoniak	NH ₃	9,91	0,51	1,98
N ₂	Stickstoff	N ₂	17,48	0,89	1,12
–	Luft	N ₂ +O ₂ +Ar+CO ₂	18,19	0,93	1,08
O ₂	Sauerstoff	O ₂	20,24	1,03	0,97
Ar	Argon	Ar	22,11	1,13	0,89
CO ₂	Kohlendioxid	CO ₂	14,63	0,75	1,34
SF ₆	Schwefelhexafluorid	SF ₆	15,00	0,77	1,31
R50	Methan	CH ₄	10,87	0,55	1,80
R134a	1,1,1,2-Tetrafluorethan	CH ₂ F-CF ₃	11,61	0,59	1,69

Tabelle 2-3: Umrechnungsfaktoren für häufig verwendete Gase im laminaren Strömungsbereich

Wasserstoffspeichermaterialien beeinträchtigt die Permeation durch Metalle nicht den Enddruck eines Vakuumsystems. Bei der Permeationsgasbelastung in einem Vakuumsystem spielt hauptsächlich die Permeation durch Elastomerdichtungen eine Rolle.

Die Permeation von Gasen ist ein interessanter Parameter in der Verpackungsindustrie. In vielen Fällen erfolgen die Messungen mit echten Material-/Gaskombinationen. Es wurde jedoch nachgewiesen, dass Helium als ein schnell permeierendes Modelliergas für kürzere Messzeiten verwendet werden kann.

2.3.7 Umrechnung von Gasleckageraten im laminaren Strömungsbereich

Wir können die in einem Kapillarleck gemessenen Leckageraten von einem Prüfgas zu einem anderen messen. Im laminaren Strömungsprofil ist die Leckagerate von zwei Gasen umgekehrt proportional zu ihren dynamischen Viskositäten.

$$\frac{q_{Gas1}}{q_{Gas2}} = \frac{\eta_{Gas2}}{\eta_{Gas1}}$$

Formel 2-9: Umrechnung von Gasleckageraten im laminaren Strömungsbereich

Beispiel: Was ist der Unterschied zwischen einer Heliumleckagerate und einer Luftleckagerate in einem laminaren Strömungsprofil?

$$q_{Luft} = q_{Helium} \cdot \frac{\eta_{Helium}}{\eta_{Luft}} = q_{Helium} \cdot \frac{19,6 \mu Pa s}{18,2 \mu Pa s} = 1,08 \cdot q_{Helium}$$

In Tabelle 2-3 sind verschiedene Umrechnungsfaktoren für häufig verwendete Gase zusammengefasst. Bitte beachten Sie, dass diese Umrechnungsfaktoren nur für die Gasart und nicht für unterschiedliche Temperaturen oder Drücke gelten. Wir werden diese Aspekte in den folgenden Kapiteln behandeln.

2.3.8 Umrechnung von Gasleckageraten im molekularen Strömungsbereich

Im molekularen Strömungsbereich sind die Leckageraten zweier Gase umgekehrt proportional zu ihren Molmassen.

$$\frac{q_{Gas1}}{q_{Gas2}} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}$$

Formel 2-10: Umrechnung von Gasleckageraten im molekularen Strömungsbereich

M Molmasse

Medium	Name	Formel	Molekularmasse [u]	Zur Umrechnung von Gas auf Helium die Gasleckagerate multiplizieren mit	Zur Umrechnung von Helium auf Gas die Gasleckagerate multiplizieren mit
H ₂	Wasserstoff	H ₂	2,02	0,71	1,41
He	Helium	He	4,00	1,00	1,00
NH ₃	Ammoniak	NH ₃	17,03	2,06	0,48
N ₂	Stickstoff	N ₂	28,01	2,65	0,38
–	Luft	N ₂ +O ₂ +Ar+CO ₂	28,96	2,69	0,37
O ₂	Sauerstoff	O ₂	32,00	2,83	0,35
Ar	Argon	Ar	39,95	3,16	0,32
CO ₂	Kohlendioxid	CO ₂	44,01	3,32	0,30
SF ₆	Schwefelhexafluorid	SF ₆	146,05	6,04	0,17
R50	Methan	CH ₄	16,04	2,00	0,50
R134a	1,1,1,2-Tetrafluorethan	CH ₂ F-CF ₃	102,03	5,05	0,20

Tabelle 2-4: Umrechnungsfaktoren für häufig verwendete Gase im molekularen Strömungsbereich

Beispiel: Was ist der Unterschied zwischen einer Heliumleckagerate und einer Luftleckagerate im molekularen Strömungsbereich?

$$q_{\text{Luft}} = q_{\text{Helium}} \cdot \sqrt{\frac{M_{\text{Helium}}}{M_{\text{Luft}}}} = q_{\text{Helium}} \cdot \sqrt{\frac{4}{29}} = 0,37 \cdot q_{\text{Helium}}$$

In Tabelle 2-4 sind verschiedene Umrechnungsfaktoren für häufig verwendete Gase zusammengefasst. Bitte beachten Sie, dass diese Umrechnungsfaktoren nur für die Gasart und nicht für unterschiedliche Temperaturen oder Drücke gelten. Wir werden diese Aspekte in den folgenden Kapiteln behandeln.

2.3.9 Umrechnung einer Flüssigkeitsleckagerate in eine Gasleckagerate

Wenn wir die Wassermenge beobachten (die als Volumen angegeben werden kann), die aus einem Leck pro Zeit ausströmt, dann können wir die Wasserleckagerate messen. Durch Berücksichtigung der Druckbedingungen und Medienviskositäten können wir daraus eine Prüfgasleckagerate berechnen.

$$q_{\text{Gas}} = \frac{\eta_{\text{Flüssigkeit}}}{\eta_{\text{Gas}}} \cdot q_{\text{Flüssigkeit}} \cdot \frac{p_1 + p_2}{2}$$

Formel 2-11: Flüssigkeitsleckagerate und Gasleckagerate

Beispiel: Ein tropfender Wasserhahn produziert pro Sekunde einen Tropfen mit einem Durchmesser von 4 mm. Der Druck in der Wasserleitung ist 0,5 MPa. Wie groß ist die Leckagerate bezogen auf das Prüfgas Helium? Das Volumen des Wassertropfens beträgt:

$$V = \frac{4}{3} \cdot r^3 \cdot \pi = \frac{4}{3} \cdot 2^3 \cdot \pi = 33,51 \text{ mm}^3 = 3,35 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^3$$

Wasserströmung:

$$q_{\text{Wasser}} = \frac{V}{t} = \frac{3,35 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^3}{1 \text{ s}} = 3,35 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} = 3,35 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

Für das Prüfgas Helium und Wasser können wir Formel 2-11 in folgender Form schreiben:

$$q_{\text{Helium}} = \frac{\eta_{\text{Wasser}}}{\eta_{\text{Helium}}} \cdot q_{\text{Wasser}} \cdot \frac{p_1 + p_2}{2}$$

Mit den oben berechneten Werten für den Wassertropfen erhalten wir:

$$q_{\text{Helium}} = \frac{1,002 \cdot 10^6 \text{ Pa s}^{-1}}{19,6 \cdot 10^6 \text{ Pa s}^{-1}} \cdot 3,35 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot \frac{0,5 \cdot 10^6 \text{ Pa} + 0,1 \cdot 10^6 \text{ Pa}}{2} = 0,60 \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$$

2.3.10 Durch Flüssigkeiten verschlossene Lecks

Ein Leck kann bei kleinem Leckdurchmesser und hoher Oberflächenspannung der betreffenden Flüssigkeit blockiert sein. Formel 2-12 zeigt den maximalen Durchmesser eines Lecks, das für das entsprechende Medium gerade noch dicht ist. Durch ein größeres Leck entweicht das Medium.

$$d_{max} = \frac{4 \cdot \sigma \cdot \cos \phi}{\Delta \rho}$$

Formel 2-12: Durch Flüssigkeiten verschlossene Lecks

σ Oberflächenspannung
 $\cos \phi$ Kontaktwinkel
 $\Delta \rho$ Druckgradient

Tabelle 2-5 zeigt Oberflächenspannungen ausgewählter Medien.

Flüssigkeit	Formel	Oberflächenspannung bei 298 K (σ in $N \cdot m^{-1}$)
Wasser	H ₂ O	72,3 · 10 ⁻³
AdBlue®	(CO(NH ₂) ₂); 35 % in H ₂ O	1,4 · 10 ⁻³
Benzol	C ₆ H ₆	28,9 · 10 ⁻³
Ethanol	C ₂ H ₅ OH	22,5 · 10 ⁻³
R134a (Kältemittel)	CF ₃ -CH ₂ F	8,1 · 10 ⁻³

Tabelle 2-5: Ausgewählte Oberflächenspannungen

Die Tabelle zeigt deutlich, dass die Kältemittel die niedrigste Oberflächenspannung haben und durch Lecks mit einem Durchmesser entweichen werden, der von Wasser noch blockiert wird. Obwohl AdBlue® (verwendet in Verbrennungsmotoren für die selektive katalytische Reduktion von NO_x) nur eine wässrige Lösung von Harnstoff ist, ist die Oberflächenspannung mehr als 50mal niedriger als die von reinem Wasser. Folglich sind für Wasser und wässrige Lösungen

unterschiedliche Dichtheitsspezifikationen anzuwenden.

Bei der Anwendung der zuvor genannten Werte ist größte Sorgfalt geboten. Reinigungsmittel können die Oberflächenspannung drastisch reduzieren. Es ist zu beachten, dass die Oberflächenspannungswerte von Medien auf definierten Oberflächen gemessen wird. Die Oberflächenspannung von Wasser auf einer Stahlplatte ist völlig anders als die Oberflächenspannung auf einer wasserabweisenden Kunststoffoberfläche. Die Dichtheitsspezifikationen der „Wasserdichtheit“ variieren über einen breiten Bereich und hängen stark von den Materialien und Wasserzusätzen ab.

Häufig kennen wir den Kontaktwinkel nicht. Mit einem konservativen Ansatz können wir $\cos \phi = 1$ festlegen. Dies ist das Szenario für den ungünstigsten Fall, da es die Obergrenze des Cosinus für unsere Berechnungen verwendet.

Beispiel: Wenn wir eine Druckdifferenz von 0,3 MPa ansetzen, ergibt sich ein Durchmesser von etwas unter einem 1 µm für Wasser. Für AdBlue® ergibt die Berechnung weniger als 0,2 µm. AdBlue® fließt durch Löcher, die mit Wasser blockiert sind.

Die Frage ist nun, ob wir dieses Leck noch mit Prüfgasmethoden erkennen können. Betrachten wir den Gasdurchgang durch ein Rohr nach der Hagen-Poiseuille-Formel:

$$q_{pV, \text{la min ar}} = \frac{\pi}{8} \left(\frac{d}{2} \right)^4 \frac{\bar{p}}{\eta \cdot L} \cdot (\rho_1 - \rho_2) \text{ mit } \bar{p} = \frac{(\rho_1 + \rho_2)}{2}$$

Formel 2-13: Hagen-Poiseuille-Formel

Setzen wir nun den maximalen Durchmesser aus Formel 2-12 und die Bedingung für \bar{p} in diese allgemeine Form der Formel ein, erhalten wir:

$$q_{pV, \text{la min ar}} = \frac{\pi}{8} \left(\frac{d_{\text{max}}}{2} \right)^4 \frac{(\rho_1^2 - \rho_2^2)}{\eta \cdot L \cdot 2}$$

Wenn wir das Druckgefälle von 0,3 MPa und die dynamische Viskosität für Helium für die Berechnung verwenden und eine Wanddicke von 1 mm ansetzen, ergibt sich eine Leckagerate von $1,6 \cdot 10^{-7} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$. Demnach könnten wir dieses Leck mit einem Standard-Helium-Lecksucher ohne Probleme messen. Wenn wir dies jedoch nach einer Wasserdruck-Berstrüfung versuchen, kann das Leck nicht erkannt werden, da es mit Wasser blockiert ist, das sich noch im Leckkanal befindet.

2.3.11 Massenverlustraten und Gasleckageraten im laminaren Strömungsbereich

Die Umrechnung von Massenverlustraten in pV -Prüfgasleckageraten erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird die Massenverlustrate des jeweiligen Mediums umgerechnet in eine pV -Leckagerate des Mediums. Im zweiten Schritt erfolgt die Medienumrechnung nach den für den jeweiligen Strömungsbereich gültigen Formeln. Dann können wir entweder die Formeln für die laminar-viskose Strömung oder die molekulare Strömung verwenden. Falls nicht bekannt ist, in welchem Strömungsbereich wir uns befinden, müssen wir beide Werte berechnen und den ungünstigeren Fall annehmen.

Beispiel: Eine Klimaanlage darf nicht mehr als 1 g Kältemittel R134a pro Jahr verlieren, um ihre Funktionsfähigkeit beizubehalten – wie ist die Heliumleckagerate bei einer Temperatur von 25 °C?

Erster Schritt: Umrechnung des Kältemittel-massenverlusts in einen Kältemittelgasstrom.

$$q_{pV} = q_M \cdot \frac{R \cdot T}{M}$$

Formel 2-14: Umrechnung einer Massenverlust-rate in einen pV -Gasstrom

q_{pV}	Leckagerate
q_M	Masseverlustrate
R	Allgemeine Gaskonstante
T	Temperatur (absolut)
M	Molmasse

$$q_{pV, R134a} = \frac{1 \text{ g/a}}{365 \cdot 24 \cdot 3.600 \text{ s/a}}$$

$$\frac{83,14 \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 298 \text{ K}}{102 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}} =$$

$$7,7 \cdot 10^{-6} \text{ mbar l/s}$$

$$q_{pV, R134a} = 7,7 \cdot 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Zweiter Schritt: Umrechnung des Kältemittel- pV -Gasstroms in einen Helium- pV -Gasstrom (d. h. Leckagerate).

$$q_{pV, \text{Helium}} = q_{pV, R134a} \cdot \frac{\eta_{R134a}}{\eta_{\text{Helium}}} = 7,7 \cdot 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\cdot \frac{11,6 \mu\text{Pas}}{19,1 \mu\text{Pas}} = 4,7 \cdot 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

2.3.12 Massenverlustraten und Gasleckageraten im molekularen Strömungsbereich

Im zuvor genannten Beispiel wurde von laminaren Strömungsbedingungen ausgegangen. Was geschieht nun im molekularen Strömungsbereich?

Beispiel: Eine Klimaanlage verliert 0,01 g des Kühlmittels R134a pro Jahr – was ist die Heliumleckagerate unter identischen Druckbedingungen bei einer Temperatur von 25 °C?

$$q_{pV, \text{Helium}} = q_{pV, R134a} \cdot \sqrt{\frac{M_{R134a}}{M_{\text{Helium}}}} = q_{M, R134a} \cdot \frac{R \cdot T}{M_{R134a}} \cdot \sqrt{\frac{M_{R134a}}{M_{\text{Helium}}}}$$

$$q_{pV, \text{Helium}} = \frac{0,01 \text{ g/a}}{3,15 \cdot 10^7 \text{ s/a}} \cdot \frac{83,14 \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot 298 \text{ K}}{102 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}}$$

$$\cdot \sqrt{\frac{102}{4}} = 3,9 \cdot 10^{-7} \text{ mbar l/s}$$

$$q_{pV, \text{Helium}} = 3,9 \cdot 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

2.3.13 Standardisierte Leckagerate – Druckabhängigkeit

Eine standardisierte Leckagerate ist die äquivalente Luftmenge, die im Zeitverlauf

durch ein gemessenes Leck unter den folgenden Bedingungen strömt.

- Eingangsdruck 1.013,25 hPa
- Ausgangsdruck „0“ hPa
- Raumtemperatur.

Es gibt keinen Druck „0“ Pa. Diese Zahl soll einfach zeigen, dass der Ausgangsdruck gegenüber dem Eingangsdruck vernachlässigbar klein ist. „Raumtemperatur“ muss ebenfalls definiert werden. Es gibt Standarddefinitionen im Bereich zwischen 20 °C und 25 °C. Diese Differenz ist vergleichsweise klein. Es gibt jedoch auch Standarddefinitionen, die bei 0 °C (273 K) definiert sind. Um Unsicherheiten zu vermeiden, sollten alle Referenzparameter zwischen Lieferant und Kunde abgeklärt werden.

Man kann eine Berechnung von Betriebsbedingungen für eine standardisierte Leckagerate durchführen. Wieder müssen wir zwischen viskoser (laminarer) und molekularer Strömung unterscheiden. Für die laminare

$$\frac{q_{\text{Gas, Betrieb}}}{q_{\text{Gas, Standard}}} = \frac{(p_{\text{Einlass, Betrieb}}^2 - p_{\text{Auslass, Betrieb}}^2)}{(p_{\text{Einlass, Standard}}^2 - p_{\text{Auslass, Standard}}^2)}$$

und molekulare Strömung gelten die folgenden Gleichungen:

$$\frac{q_{\text{Gas, Betrieb}}}{q_{\text{Gas, Standard}}} = \frac{(p_{\text{Einlass, Betrieb}} - p_{\text{Auslass, Betrieb}})}{(p_{\text{Einlass, Standard}} - p_{\text{Auslass, Standard}})}$$

Formel 2-15: Standardisierte Leckagerate – laminare Strömungsbedingungen

Formel 2-16: Standardisierte Leckagerate – molekulare Strömungsbedingungen

Beispiel: Ein großer Behälter wird beim Betrieb unter einen Druck von 30 bar (relativ) gesetzt. Die spezifizizierte Leckagerate unter Betriebsbedingungen ist 10^{-4} Pa m³ s⁻¹. Aus Sicherheitsgründen führen wir die Prüfung nicht bei Betriebsdruck aus, sondern evakuieren den Behälter. Damit haben wir Standardbedingungen wie oben definiert.

Die Umrechnung von Formel 2-15 ergibt:

$$q_{\text{Gas, Standard}} = q_{\text{Gas, Betrieb}} \cdot \frac{(p_{\text{Einlass, Betrieb}}^2 - p_{\text{Auslass, Betrieb}}^2)}{(p_{\text{Einlass, Standard}}^2 - p_{\text{Auslass, Standard}}^2)}$$

Die Prüfbedingungen sind also von Umgebungsdruck (1 bar) gegen Vakuum („0“ bar). Beim Betrieb ist der relative Druck 30 bar, was einem absoluten Druck von 31 bar entspricht. Der Behälter leckt gegenüber Atmosphärendruck (1 bar), was zu den folgenden Zahlen führt:

$$q_{\text{Gas, Standard}} = 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \frac{(1^2 - 0^2)}{(31^2 - 1^2)} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Der Sicherheitsbedarf bei einer Prüfung bedeutet also, dass wir ein Signal nachweisen müssen, das 1.000 mal kleiner ist als die tatsächliche Leckagerate im Betrieb. Dieses Konzept mit höheren oder niedrigeren Prüfdrücken wird oft angewendet zur Optimierung von

- Sicherheit
- Prüfgasverbrauch
- Prüfzeit.

Anders herum können beispielsweise der Prüfdruck erhöht und/oder Gasmischungen verwendet werden, um kurze Prüfzeiten und einen niedrigen Prüfgasverbrauch zu erzielen.

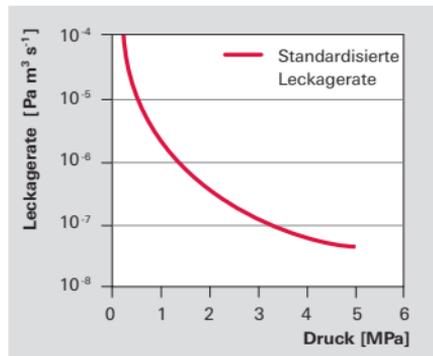


Abbildung 2-8: Abhängigkeit der standardisierten Leckagerate vom Betriebsdruck im laminaren Strömungsbereich

Abbildung 2-8 zeigt die Abhängigkeit der standardisierten Leckgerate (bei Annahme einer gemessenen Leckgerate von $1,0 \cdot 10^{-4}$ Pa m^3 s $^{-1}$) vom Betriebsdruck bei laminaren Strömungsbedingungen.

2.3.14 Temperaturabhängigkeit der Leckgerate

Die Temperaturabhängigkeit des Gasflusses durch ein Leck lässt sich leicht vom idealen Gasgesetz ableiten. Wir erhalten:

$$\frac{q_{\text{Gas, Betrieb}}}{T_{\text{Betrieb}}} = \frac{q_{\text{Standard}}}{T_{\text{Standard}}}$$

Formel 2-17: Temperaturabhängigkeit der Leckgerate im laminaren Strömungsbereich I

Die Umrechnung von Formel 2-15 ergibt:

$$q_{\text{Gas, Betrieb}} = q_{\text{Gas, Standard}} \cdot \frac{T_{\text{Betrieb}}}{T_{\text{Standard}}}$$

$$q_{\text{Gas, Standard}} = q_{\text{Gas, Betrieb}} \cdot \frac{T_{\text{Betrieb}}}{T_{\text{Operation}}}$$

Formel 2-18: Temperaturabhängigkeit der Leckgerate im laminaren Strömungsbereich II

Beispiel: Die Leckgerate eines Rohrs in einer Kfz-Anwendung wird definiert mit $1,0 \cdot 10^{-6}$ Pa m^3 s $^{-1}$ für eine maximale Temperatur von 120 °C. Diese Prüfung wird bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C durchgeführt.

$$q_{\text{Gas, Standard}} = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ Pa } m^3 \text{ s}^{-1} \cdot \frac{293 \text{ K}}{393 \text{ K}}$$

$$= 7,5 \cdot 10^{-7} \text{ Pa } m^3 \text{ s}^{-1}$$

Es ist zu beachten, dass absolute Temperaturen in [K] in die Formel eingesetzt werden müssen. Dies führt zu vergleichsweise kleinen Schwankungen durch Temperaturänderungen. Formel 2-17 gilt für den laminarviskosen Strömungsbereich. Im molekularen Strömungsbereich gilt Formel 2-19.

$$\frac{q_{\text{Gas, Betrieb}}}{q_{\text{Gas, Standard}}} = \sqrt{\frac{T_{\text{Betrieb}}}{T_{\text{Standard}}}}$$

Formel 2-19: Temperaturabhängigkeit der Leckgerate im molekularen Strömungsbereich

2.3.15 Akkumulationsprüfung

In Kapitel 6 beschreiben wir eine integrale Prüfung, die mit einer Schnüffelsonde bei Atmosphärendruck durchgeführt wird, die sogenannte „Akkumulationsprüfung“. Bei einem Leck kann die Konzentration in einem Gehäuse um das zu prüfende Teil wie folgt beschrieben werden:

$$q_{pV} = \frac{\Delta c \cdot 10^{-6} \cdot V_{\text{Kammer}} \cdot p_{\text{Kammer}}}{t}$$

Formel 2-20: Akkumulationsprüfung

Δc	Konzentrationsanstieg des Prüf gases in der Kammer	[ppm]
V_{Kammer}	Freies Kammervolumen	[m 3]
p_{Kammer}	Druck in der Prüfkammer	[Pa]
t	Messzeit	[s]

Dieser Konzentrationsanstieg erfolgt beim natürlichen Hintergrund des verwendeten Prüf gases. Bei Helium handelt es sich um einen natürlichen Hintergrund von 5 ppm in Luft. Daher müssen wir entscheiden, welchen Konzentrationsanstieg wir als eindeutig über dem Hintergrundsignal definieren.

Beispiel 1: Für ein zu prüfendes Teil wurde die Leckgerate mit $1 \cdot 10^{-6}$ Pa m^3 s $^{-1}$ festgelegt. Es soll die minimale Prüfzeit festgelegt werden, die noch eine prozesssichere Messung eines Konzentrationsanstiegs von 5 ppm ermöglicht. Der Prüfdruck ist 4 bar (rel). Der Kammerdruck ist atmosphärisch (100.000 Pa). Wenn wir von einem kleinen Teil wie einem Kraftstofffilter ausgehen, wird das Nettovolumen im Gehäuse, d.h. das Volumen der leeren Kammer minus dem Volumen des zu prüfenden Teils, grundsätzlich von dem Ge-

bläse bestimmt, das für die Gasrücksaugung notwendig ist: Wir gehen aus von einem Nettovolumen von 100 cc (= 10^{-4} m^3).

$$t = \frac{\Delta c \cdot 10^{-6} \cdot V_{\text{Kammer}} \cdot p_{\text{Kammer}}}{q_{pV}}$$

$$= \frac{5 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 10^5 \text{ m}^3 \text{ Pa s}}{1 \cdot 10^{-6} \text{ Pa m}^3}$$

$$t = 5 \cdot 10^{-6-4+5+6} \text{ s} = 5,0 \cdot 10^1 = 50 \text{ s}$$

Folglich müssen wir in diesem Beispiel den Atmosphärendruck von etwa 100.000 Pa im Zähler einsetzen. Der Innendruck des geprüften Objekts spielt nur eine Rolle als treibende Kraft für das Gas, durch das Leck aus dem Inneren des geprüften Objektes zu entweichen.

Trägt man den zeitlichen Verlauf des Konzentrationsanstiegs während der Messung auf, so erhält man eine lineare Kurve beginnend vom Hintergrundniveau des Prüfgas (siehe Abbildung 2-9).

Beispiel 2: Nehmen wir an, dass ein Hersteller von Rohrbündelwärmetauschern gelegentlich den intakten Zustand der Rohre gegenüber dem Mantel prüfen muss. Während des Herstellungsprozesses werden die Rohre deshalb mit Druck beaufschlagt. Der Mantel ist noch nicht installiert, um die Möglichkeit zur Reparatur zu haben, wenn ein Leck entdeckt wird. Nehmen wir an, die Vormontage erfolgt auf einem Gestell und das freie Volumen ist 5 m^3 . Das Teil wird mit einer Plastikfolie abgedeckt, die am Boden

fixiert wird. Ein Gebläse unter der Folie sorgt für Durchmischung und eine homogene Gaskonzentration. Mit einer zulässigen Leckrate von $1 \cdot 10^{-4} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$ erzielen wir das folgende Ergebnis:

$$t = \frac{\Delta c \cdot 10^{-6} \cdot V_{\text{Kammer}} \cdot p_{\text{Kammer}}}{q_{pV}}$$

$$= \frac{5 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 1 \cdot 10^5 \text{ m}^3 \text{ Pa s}}{1 \cdot 10^{-4} \text{ Pa m}^3}$$

$$t = 2,5 \cdot 10^{1-6+5+4} \text{ s} = 2,5 \cdot 10^4 = 25.000 \text{ s} \approx 7 \text{ h}$$

In diesem Fall scheint eine Akkumulationsprüfung nicht angemessen wegen

- des hohen Zeitbedarfs,
- der Gefahr eines Prüfgasverlustes durch Permeation durch die Folie,
- Begrenzungen hinsichtlich der eingeschränkten Eignung und Handhabung von Folie und Kleband.

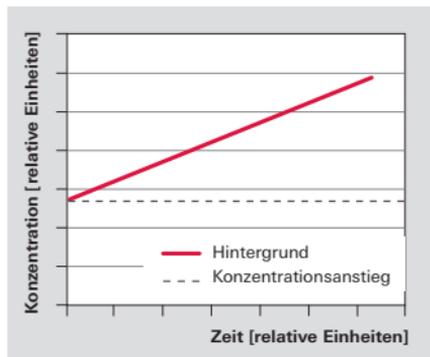


Abbildung 2-9: Akkumulationsprüfung

3 Prüfgase

3.1 Einführung

Das einfachste Prüfgas für die Lecksuche ist Luft. Komprimierte Luft wird verwendet zur Druckbeaufschlagung von Prüfobjekten vor der Messung des Druckabfalls mit einem einfachen Totaldruckmessgerät. Luft kann durch ein Leck in eine Vakuumkammer eindringen und als Druckanstieg erkannt werden. In Vakuumprozessen mit Gasströmung können Luftlecks leicht mittels Massenspektrometrie erkannt werden. Die eingesetzten Detektortechnologien werden in Kapitel 4 erläutert.

Bei den oben genannten Beispielen ist jedoch keine Lecklokalisierung möglich. Die als Minimum erkennbare Leckagerate ist durch einen Druckabfall und Druckanstieg

begrenzt. Um die Empfindlichkeit der Lecksuche zu erhöhen, müssen wir die Trennschärfe für die Lecklokalisierung und die Empfindlichkeit für Leckageratenmessungen verbessern, die niedriger ist als z. B. die mit einem Druckabfall erreichbaren Empfindlichkeit. Möglicherweise müssen wir auch eine schnellere Methode als den Druckabfall bei einem hohen Durchsatz zu prüfender Teile verwenden. Alle diese Anforderungen führen zum Einsatz spezieller Prüfgase.

Die Anforderungen, die ein Prüfgas erfüllen muss, sind:

- Geringe natürliche Konzentration für niedrige Nachweisgrenze bei Messungen unter atmosphärischen Bedingungen
- Hochempfindliche Detektortechnologie
- Selektive Sensortechnologie

Anforderung	Helium	Wasserstoff
Niedrige Umweltkonzentration	5 ppm in Luft	0,5 ppm in Luft
Hochempfindliche Detektortechnologie	Massenspektrometrie, Nachweisgrenze $< 5 \cdot 10^{-13} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$	Massenspektrometrie, höherer Untergrund als mit Helium Für Schnüffelverfahren sind Detektoren auf Transistorbasis verfügbar
Selektive Sensortechnologie	Massenspektrometrie, keine Querempfindlichkeit auf die Masse 4 u	Massenspektrometrie, Querempfindlichkeit auf Masse 2 u Detektoren auf Transistorbasis sprechen auf Wasserstoffquellen in der Arbeitsumgebung an
Umweltfreundlich	Edelgas, natürliches Vorkommen in Luft, kein Treibhauspotenzial	natürliches Vorkommen in Luft, kein Treibhauspotenzial
Kostengünstig	Mittlere Prüfgaskosten	Geringe Prüfgaskosten
Inert und nicht toxisch	Inert, nicht entflammbar, nicht explosibel	Wird als Prüfgas nur in Konzentrationen unter der unteren Explosionsgrenze eingesetzt

Tabelle 3-1: Ausgewählte Eigenschaften der Prüfgase Helium und Wasserstoff

- Umweltfreundlich
- Kostengünstig
- Inert und nicht toxisch

Diese Anforderungen werden von dem weit verbreiteten Prüfgas Helium erfüllt. In den letzten Jahren hat auch eine Mischung aus 5% Wasserstoff und 95% Stickstoff (auch bekannt als Formiergas 95/5) eine gewisse Verbreitung in der Industrie erlebt. Tabelle 3-1 enthält die Vor- und Nachteile für diese beiden Prüfgase.

In der Industrie werden noch weitere Prüfgase wie beispielsweise Kältemittel, Schwefelhexafluorid (SF_6) oder Ammoniak (NH_3) eingesetzt. Der Einsatz dieser Gase ist aber mit Beschränkungen in Bezug auf Preis, Umweltfreundlichkeit, etc. verbunden. Daher haben sich Helium und in geringerem Umfang auch Formiergas 95/5 als die wichtigsten Prüfgase durchgesetzt.

3.2 Helium

Helium ist mit einem Anteil von 23% der gesamten Materie das zweithäufigste Element im Universum. Nur noch Wasserstoff ist mit einem Anteil von 76% häufiger. Alle anderen Elemente stellen einen unbedeutend kleinen Bruchteil der gesamten Materie dar. Helium ist ein zu 100% grünes Gas und hat absolut keinen Umwelteinfluss auf die Atmosphäre. Helium wurde durch Spektroskopie bei einer Sonnenfinsternis am 18. August 1868 entdeckt. Die Entdeckung in der Chromosphäre der Sonne gab dem neuen Element den Namen: Das griechische Wort „helios“ bedeutet „Sonne“. Helium kommt im Universum zwar häufig vor, doch die größte Menge befindet sich in den Sternen: Auf der Erde ist es nicht im Übermaß vorhanden. Da es so leicht ist, entwich ein Großteil des Heliums bei der Entstehung der Erde in den Weltraum.

Helium entsteht in der Erde durch den radioaktiven Zerfall von Uran und Thorium. Auf der Erde wurde Helium 1881 durch Spektroskopie von Vulkangasen des Vesuvus in Italien entdeckt – die von diesem Berg ausgestoßenen Gase wiesen die gleichen Linien im Spektrum auf wie die bereits von der Sonne bekannten. Die Konzentration von Helium in der Atmosphäre ist 5 mal höher als die Konzentration von Krypton und 60 mal höher als Xenon. Die schwereren Edelgase werden durch Luftrektifikation gewonnen. Im Gegensatz dazu wird Helium aus Erdgas und Ölvorkommen gewonnen und gespeichert. Erdgasvorkommen mit einer ausreichenden Heliumkonzentration zur wirtschaftlichen Gewinnung von Helium wurden in den USA, in Russland, Algerien, Quatar und Polen erschlossen. Die jährliche weltweite Produktion liegt bei etwa $2,8 \cdot 10^7 \text{ m}^3$ oder 4.500 Tonnen. Helium tritt konstant aus dem Boden um uns herum aus, ist aber so leicht, dass es recht schnell fast vollständig in den Weltraum entweicht. Als Heliumzustrom gibt es einen konstanten Fluss aus dem Weltall und von der Sonne zur Erde. Dadurch stellt sich ein dynamisches Gleichgewicht ein und dies ist der Grund für die weltweit konstante Konzentration von 5 ppm Helium in der atmosphärischen Luft. Helium ist ein sehr leichtes farbloses Element und eines der sechs Edelgase. Dies bedeutet, dass es unter Normalbedingungen mit keinem anderen Stoff reagiert.

Helium wird in den folgenden Anwendungen eingesetzt:

- Schutzgas für Schweißen und Schneiden
- Füllgas (Resonator) in Lasern
- Trägergas in der Gaschromatographie
- Beimischung für Atemluft zum Tauchen
- Kühlung, z. B. bei der Produktion von Glasfasern
- Ballongas
- Kühlung supraleitender Magnete (in flüssiger Form)
- Tieftemperaturphysik (flüssig)

- Kernresonanz- bzw. Magnetresonanzspektroskopie (flüssig)
- Prüfgas bei der Lecksuche (12 % des jährlichen Heliumverbrauchs)

Helium wird in vielen verschiedenen Reinheitsstufen angeboten, von Ballongas mit etwa 90% Helium bis zu einer Reinheit von 6.0, was 99,99990% Helium entspricht. Welchen Reinheitsgrad sollte man nun bei der Lecksuche verwenden? Die bestmögliche Reinheit wird bei der Lecksuche selten verwendet. Dies macht nur Sinn beispielsweise bei nuklearen Anwendungen, um unerwünschte Spaltprodukte zu vermeiden oder in UHP-Gasleitungen (UHP: Ultra High Purity), die durch Spülen mit ultrareinem Argon vorbehandelt und zudem auf Partikelverunreinigungen geprüft werden. In diesen Anwendungen sollte also mit hochreinem Helium geprüft werden und zusätzlich die Einflüsse von Verbindungen, Anschlussstücken und Druckminderern analysiert werden.

Für Standard-Industrieanwendungen ist eine Reinheit im Bereich von 97% bis 99% mehr als ausreichend. Es besteht kein Risiko eines Genauigkeitsverlustes oder einer Verunreinigung des Lecksuchers, wenn Standardreinheitsgrade von Heliumgas (2.8 oder 4.6) verwendet werden. Die Verdünnung von Helium auf bis zu 1% wird bei ausreichender Empfindlichkeit oft eingesetzt, um Prüfgaskosten zu sparen. Und bei einer Auftragslecksuche, bei der ein Leck lediglich lokalisiert werden muss, reicht auch Ballongasqualität aus.

3.3 Wasserstoff

Wasserstoff (H_2) ist das leichteste chemische Element. Es ist ein farbloses, geruchloses, geschmackloses, brennbares Gas, das in Konzentrationen von etwa 0,5 ppm in der Umgebungsluft vorkommt. Wasserstoff wird mittels verschiedener Methoden produziert. Dazu zählen großtechnische Prozesse wie

zum Beispiel Kohlenwasserstoff-Wasserdampf-Reforming oder die Gewinnung aus Nebenprodukten in der chemischen Produktion oder das Erdöl-Reforming. Für den lokalen Einsatz kann Wasserstoff z. B. aus Zersetzung von Säuren, katalytische Zersetzung eines Methanol/Wasser-Gemischs oder Elektrolyse gewonnen werden. Wasserstoff kann entweder als Gas oder kryogene Flüssigkeit gespeichert und transportiert werden.

Wasserstoff ist im Konzentrationsbereich von 4% bis 77% in Luft oder Sauerstoff entflammbar und kann im Bereich von 18% bis 60% in Luft oder Sauerstoff explodieren. Wenn Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) gemischt und erhitzt werden, reagieren sie unter Bildung von Wasserdampf (H_2O). Bei diesem Prozess wird Reaktionswärme erzeugt, die das Umgebungsgas entzünden kann, sofern die Konzentration hoch genug ist. Breitet sich dieser Prozess aus, explodiert das Gas. Bei einer niedrigen Wasserstoffkonzentration (< 4% in Luft) reicht die Reaktionswärme nicht aus, um das Umgebungsgas zu entzünden. Bei Konzentrationen im Bereich von 4–12% kann sich die Verbrennung nur ausbreiten, wenn die erzeugte Wärme nicht abgeführt werden kann. Es ist ein häufiges Missverständnis, dass Wasserstoff explodiert, sobald die Konzentration 4% übersteigt. Der Wasserstoff kann nur explodieren, wenn die Bedingungen zur spontanen Ausbreitung der Verbrennung günstig sind. Liegt die Konzentration über 18%, kann sich die Verbrennung selbständig schnell im Gas ausbreiten. Wenn sie sich schneller ausbreitet als die Schallgeschwindigkeit, dann gibt es eine Explosion und einen Knall.

Bei Wasserstoffkonzentrationen über 75% ist nicht genügend Sauerstoff vorhanden, um das Gas zu entzünden. Dies ist die obere Explosionsgrenze. Kommt das empfohlene Prüfgas mit einem Konzentrationsverhältnis von 5% H_2 und 95% N_2 mit Luft in Kontakt,

so ist entweder zu wenig Wasserstoff oder zu wenig Sauerstoff vorhanden, um ein brennbares Gasgemisch zu bilden. Dadurch wird ein Gasgemisch mit 5% H₂ und 95% N₂ als nicht entflammbar klassifiziert.

erhöhte Sicherheit durch Reduzierung des Prüfdrucks. Als Grundlage für Berechnungen sind in Tabelle 3-2 einige physikalische Eigenschaften von Prüfgasen angegeben.

3.4 Physikalische Eigenschaften von Prüfgasen

Viele Anwendungen in der industriellen Lecksuche erfordern Berechnungen zur Optimierung des Prüfablaufs. Motivation für solche Kalkulationen sind beispielsweise Umrechnungen von anderen Medien auf das verwendete Prüfgas, Reduzierung des Prüfgasverbrauchs, Verkürzung der Prüfzeit oder

	Helium	Wasserstoff	Formiergas 95/5	Luft
Natürliche Konzentration in Luft	5 ppm	> 0,5 ppm	–	–
Molekülmasse	4 g mol ⁻¹	2 g mol ⁻¹	29 g mol ⁻¹	29 g mol ⁻¹
Dynamische Viskosität bei 20 °C	19,1 µPa s	8,9 µPa s	17,5 µPa s	18,0 µPa s
Diffusionskoeffizient in Luft	7,1 · 10 ⁶ m ² s ⁻¹	7,2 · 10 ⁶ m ² s ⁻¹	–	2,2 · 10 ⁶ m ² s ⁻¹ (Stickstoff)
Permeationskoeffizient in Silikon	25 000 · 10 ⁻¹⁰ mbar l s ⁻¹ cm cm ⁻² bar ⁻¹ (1)	50 000 · 10 ⁻¹⁰ mbar l s ⁻¹ cm cm ⁻² bar ⁻¹	–	12 000 · 10 ⁻¹⁰ mbar l s ⁻¹ cm cm ⁻² bar ⁻¹ (Stickstoff)
Permeationskoeffizient in NBR	900 · 10 ⁻¹⁰ mbar l s ⁻¹ cm cm ⁻² bar ⁻¹	1 200 · 10 ⁻¹⁰ mbar l s ⁻¹ cm cm ⁻² bar ⁻¹	–	90 · 10 ⁻¹⁰ mbar l s ⁻¹ cm cm ⁻² bar ⁻¹ (Stickstoff)
Permeationskoeffizient in Polyamiden	50 · 10 ⁻¹⁰ mbar l s ⁻¹ cm cm ⁻² bar ⁻¹	144 · 10 ⁻¹⁰ mbar l s ⁻¹ cm cm ⁻² bar ⁻¹	–	2 · 10 ⁻¹⁰ mbar l s ⁻¹ cm cm ⁻² bar ⁻¹ (Stickstoff)
Sensortechnologien (2)	Massenspektrometrie Quarzfenstersensor	Massenspektrometrie Transistor (MOSFET)	Massenspektrometrie Transistor (MOSFET)	Massenspektrometrie Totaldruckmessung
Verfügbarkeit von Prüfleck	+	+	+	Nicht zutreffend
Untere Explosionsgrenze (Konzentration in Luft)	Nicht zutreffend	4 %	Nicht zutreffend	Nicht zutreffend
Obere Explosionsgrenze (Konzentration in Luft)	Nicht zutreffend	77 %	Nicht zutreffend	Nicht zutreffend

Tabelle 3-2: Ausgewählte physikalische Eigenschaften von Prüfgasen

- (1) Die Einheit beschreibt einen Gasfluss in mbar l s⁻¹ durch eine Wand mit einer Dicke in cm über einer Fläche in cm² und mit einem Differenzdruck in bar.
 (2) Bitte beachten Sie Kapitel 4 für eine Beschreibung von Detektoren für die Lecksuche

4 Sensortechnologien

Pfeiffer Vacuum verwendet in seinen Analysegeräten und Lecksuchern vor allem die folgenden Detektortechnologien:

- Magnetisches Massenspektrometer
- Quadrupol-Massenspektrometer
- Quarzfenstersensor

4.1 Massenspektrometrische Analysegeräte

Die Massenspektrometrie ist eines der am häufigsten eingesetzten Nachweisprinzipien in der Analytik. Massenspektrometer analysieren die Beschaffenheit chemischer Substanzen durch eine Partialdruckmessung im Vakuum.

Der Partialdruck ist der Druck, der von einem Gas oder einem Dampf ausgeübt würde, wenn dieses alleine in einem Behälter vorhanden wäre. Nehmen wir Luft als Beispiel: Luft ist eine Mischung aus vielen Gasen. Das häufigste Gas ist Stickstoff mit einer Konzentration von 78,1%. Wenn man nun alle anderen Gase aus der Luft mit einem Druck von 1.000 hPa entfernen würde, würde der übrig bleibende Stickstoff einen Druck von 781 hPa ausüben. So wurde Stickstoff übrigens im späten 18. Jahrhundert entdeckt: durch die Entfernung von Sauerstoff mittels Verbrennung und das Entfernen der gasförmigen Reaktionsprodukte. Das übrige Gas war hauptsächlich Stickstoff.

Nehmen wir ein weiteres Beispiel: Helium als häufig verwendetes Prüfgas bei der Lecksuche hat eine Konzentration von 5 ppm (ppm: „Teile pro Million“) in Luft, was zu einem Partialdruck von $5 \cdot 10^{-3}$ hPa führt.

Massenspektrometer werden für eine große Bandbreite an Analysen und Prozesssteuerungen verwendet.

Forschung und Entwicklung

- Katalysatorforschung
- Pharmazeutische Entwicklung
- Neue Materialien

Prozesssteuerung

- Metallurgie
- Chemische Synthese
- Halbleiterproduktion
- Oberflächenanalytik

Dopingkontrolle und Umweltüberwachung

- Aerosole
- Verbrennungsgase
- Dopingkontrolle
- Forensische Analysen
- Isotopenanalyse für Altersbestimmung und Herkunftsermittlung

Produktanalyse

- Chemische Industrie
- Hochreine Gase
- Pharmazie
- Lebensmittelüberwachung
- Lecksuche

In dieser Broschüre wollen wir uns auf Lecksuchanwendungen konzentrieren.

Ein Massenspektrometer analysiert gasförmige Komponenten. Feste oder flüssige Medien können ebenfalls analysiert werden, wenn sie in einem Einlasssystem verdampft werden. Das Einlasssystem reduziert den Gesamtdruck und die Gasdichte bis in den molekularen Strömungsbereich. Dann wird die gasförmige Mischung durch Elektronenstoß ionisiert. Es ist notwendig, das Gas zu ionisieren, da Massentrennung in einem elektrischen oder magnetischen Feld erfolgt. Wir können ionisierte, d.h. geladene Teilchen in einem externen Feld ablenken; mit neutralen Teilchen ist dies nicht möglich. In einem nachfolgenden Schritt werden die produzierten Ionen in einem Massenfilter aufgrund ihres Masse-/Ladungs-Verhältnisses getrennt.

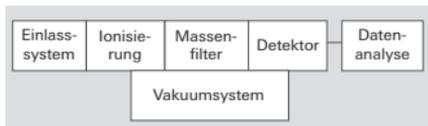


Abbildung 4-2: Komponenten eines Massenspektrometers

Abbildung 4-2 zeigt typische Komponenten eines Massenspektrometers.

- Das Einlasssystem ermöglicht den Einlass der zu analysierenden Medien. Dies kann beispielsweise über eine Kapillare oder ein Dosierventil in eine Vakuumkammer erfolgen.
- Ein Vakuumsystem reduziert den Druck der eingelassenen Medien auf den Arbeitsdruck des Analysensystems und hält ihn auch bei einlassseitigen Schwankungen aufrecht.

Masse und Ladung

- Der Gesamtdruck ist die Summe aller Teildrücke einer vorgegebenen Gas Mischung.
- Um den Teildruck einer bestimmten Gas Komponente zu bestimmen, muss diese aus der Mischung abgeschieden werden.
- Vor der Suche ist die Abscheidung der Gasmischung und die Isolierung der jeweiligen Komponente erforderlich.
- Die Isolierung erfolgt nach dem Masse/Ladung-Verhältnis der jeweiligen Komponente.

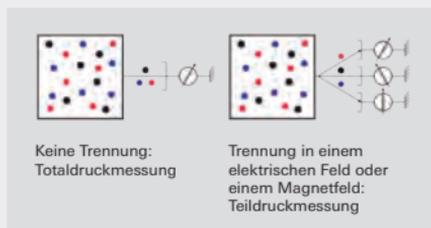


Abbildung 4-1: Totaldruck- und Partialdruckmessung

Die Analyse erfolgt in einem Detektorsystem unter Vakuum. Die Analyse wird aus den folgenden Gründen im Vakuum durchgeführt:

- Ein zur Ionisierung verwendeter Heizfaden, das sogenannte Filament würde nach einer kurzen Betriebszeit bei Umgebungsluft verbrennen. Dies ist auf den Sauerstoff in der Luft zurückzuführen. Deshalb müssen wir den Sauerstoff durch Abpumpen entfernen.
- Bei Umgebungsdruck haben wir eine Teilchendichte von über $2,7 \cdot 10^{19}$ (27.000.000.000.000.000) Teilchen pro cm^3 (Kubikzentimeter). Aufgrund dieser hohen Dichte würde ein Teilchen mit einem anderen Teilchen nach einer Flugstrecke von nur $6,8 \cdot 10^{-8}$ m (6,8 / 100.000.000 m) kollidieren. Unter diesen Bedingungen würde das Medium, das wir analysieren wollen, den Detektor nie erreichen. Deshalb müssen wir die Teilchendichte (in anderen Worten den Druck) auf ein Niveau reduzieren, das eine Wegstrecke des Teilchens (die sogenannte mittlere freie Weglänge) ermöglicht, die größer ist als die Abmessungen

des Analysengeräts. Dies wird bei einem Druckniveau von etwa $1 \cdot 10^{-3}$ hPa erreicht.

Weitere Detailangaben zur Vakuumphysik sind in unserem Vakuum-Know-how-Buch enthalten.



Ein Massenspektrometer besteht aus den folgenden Komponenten:

- Eine Ionenquelle, die neutrale Gasatome und -moleküle in geladene (ionisierte) Teilchen umwandelt.
- Ein Massenfilter, der die geladenen Teilchen nach ihrem Masse/Ladung-Verhältnis abscheidet.
- Ein Detektor in Form eines Faraday-Auffängers oder eines Sekundärelektronen-

vervielfachers, der den Ionenstrom nach der Trennung durch den Massenfilter misst. Der gemessene Strom ist ein Maß für den Partialdruck der jeweiligen Gas-Komponente.

- Ein Datenanalysesystem verarbeitet Ionenströme, die vom Detektor gemessen werden, und zeigt sie in einer benutzerfreundlichen Form an. In einem Lecksucher können die Ionenströme nach der Kalibrierung quantifiziert und als Leckgerate angezeigt werden.

Es gibt eine große Bandbreite an Massenspektrometern. Die Hauptunterschiede liegen im Massenfilter. Häufig verwendete Technologien sind in Tabelle 4-1 zusammengefasst.

In dieser Broschüre beschreiben wir nur das magnetische Sektorfeld- und das Quadrupol-Massenspektrometer, da sie die am häufigsten verwendeten Analysegeräte in kommerziell verfügbaren Prüfgaslecksuchern sind.

Name	Magnetisches Sektorfeld-Massenspektrometer	Flugzeit-Massenspektrometer	Ionenfallen-Massenspektrometer	Quadrupol-Massenspektrometer
Funktionsprinzip	Massentrennung durch verschiedene Ablenkradien geladener Teilchen mit unterschiedlichen Massen in einem Magnetfeld.	Teilchen mit der gleichen Energie, aber verschiedenen Massen haben unterschiedliche Geschwindigkeiten. Detektoren mit einer hohen Zeitauflösung ermöglichen die Massentrennung durch verschiedene Flugzeiten.	Ionenflugbahnen sind bestimmt durch ein hochfrequentes elektrisches Feld.	Resonanz beweglicher Ionen in einem elektrischen Feld mit hoher Frequenz.

Tabelle 4-1: Massenspektrometer-Technologien

4.1.1 Magnetisches Massenspektrometer

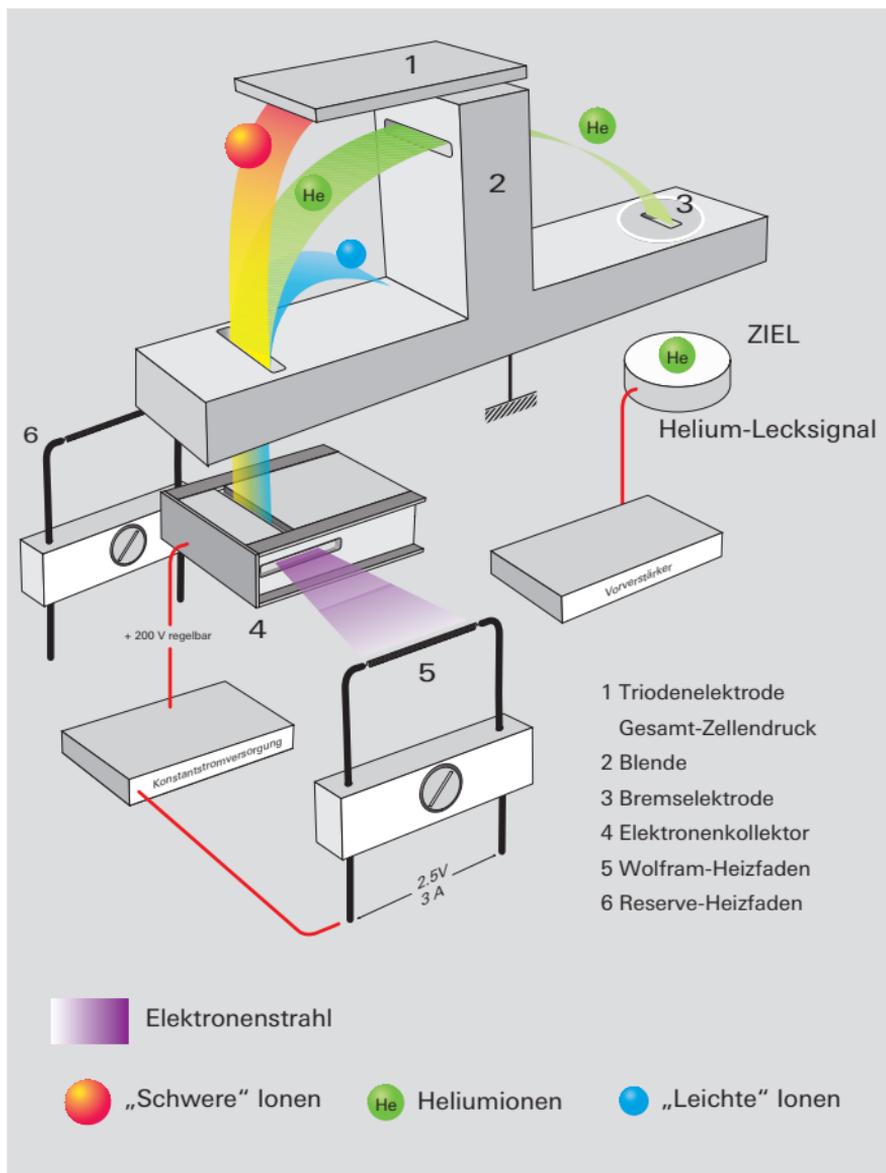


Abbildung 4-3: Funktionsprinzip eines magnetischen Massenspektrometers

Magnetische Sektorfeld-Massenspektrometer sind die wichtigsten Detektoren in Helium-Lecksuchern. Der Grund für ihre hauptsächlichliche Verwendung ist ihr einfaches und robustes Design, das auf Verschmutzungen unempfindlicher reagiert als andere massenspektrometrische Detektoren. Standardmäßig ist das Massenspektrometer auf die Masse 4 u für die häufigsten Heliumisotope eingestellt. Alternativ kann der Detektor auf 3 u eingestellt werden (z.B. für das Heliumisotop mit der Masse 3 u) oder auf die Masse 2 (z.B. für das Wasserstoffmolekül mit der Masse 2 u). Die Begrenzung des Massenbereichs ermöglicht den Bau kleiner, kompakter und dabei leistungsfähiger Massenspektrometer mit niedrigen Nachweisgrenzen.

Abbildung 4-3 zeigt das Funktionsprinzip eines magnetischen Sektorfeld-Massenspektrometers.

In einem ersten Schritt werden neutrale Gasatome oder -moleküle durch Elektronenstoß in einer Ionenquelle ionisiert (siehe

Abbildung 4-4). Wir brauchen ionisierte, d.h. geladene Partikel, um sie in einem elektrischen oder magnetischen Feld abzulenken. Dies ist mit neutralen Gaspartikeln nicht möglich.

Die Elektronen werden durch einen Heizfaden, das sogenannte Filament, erzeugt.

Das neutrale Molekül M in der Ionenquelle (siehe Abbildung 4-3) wird von einem Elektron mit hoher Energie getroffen. Dies führt zur Freisetzung eines weiteren Elektrons aus der Elektronenwolke des Moleküls und zur Spaltung des neutralen Moleküls M in ein positiv geladenes Ion M^+ und ein negativ geladenes Elektron e^- .



Das positive Ion M^+ wird dann beschleunigt und in eine von einem Magnetfeld umschlossene Zone eingeschossen. Dieses Magnetfeld lenkt die Ionen je nach Masse in verschiedenen Kurven ab. Genauer gesagt werden die Ionen nach dem Masse-zu-

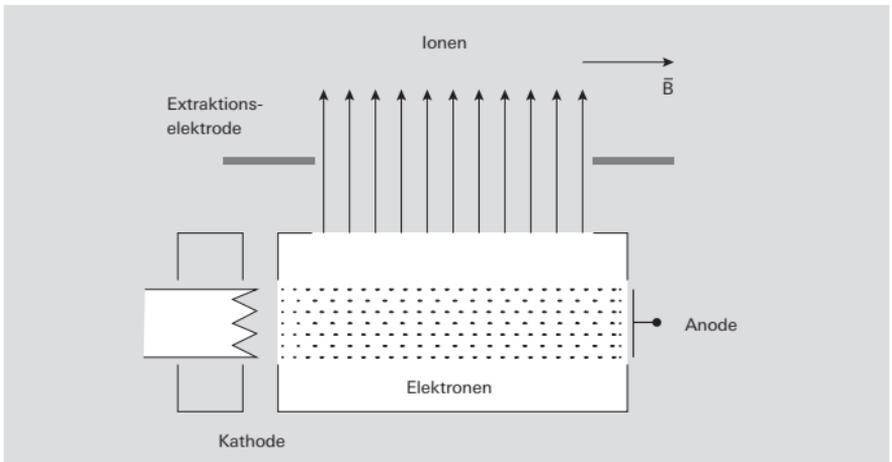


Abbildung 4-4: Ionisierungsprozess in einer Ionenquelle

Ladungs-Verhältnis abgelenkt, da auch mehrfach ionisierte Gase vorliegen können. Dadurch wird der eingeschlossene Ionenstrahl, der eine Mischung aus verschiedenen Ionen mit verschiedenen Massen enthält, in mehrere Strahlen aufgeteilt. Jeder Einzelstrahl enthält Ionen mit nur einer einzigen Masse. Zum Beispiel werden ${}^4\text{He}^+$ -Ionen (Masse/Ladungs-Verhältnis $m/e = 4$) von leichteren Ionen getrennt (z.B. Wasserstoffarten wie H_2^+ , $m/e = 2$ oder H^+ , $m/e = 1$) oder schwerere Ionen (z.B. Stickstoff N_2^+ , $m/e = 28$ oder Sauerstoff O_2^+ , $m/e = 32$).

Die Triode (siehe Abbildung 4-3, Pos. 1) sammelt die Ionen, die schwerer sind als die Masse des Prüfgases. Dieser Ionenstrom wird gemessen, um einen Hinweis auf den Gesamtdruck in der Analysezelle zu erhalten.

Das zuvor erwähnte Magnetfeld wird durch einen externen Permanentmagneten erzeugt und ist konstant. Die Beschleunigungsspannung wird so eingestellt, dass das Prüfgas auf einem vorher festgelegten Weg durch eine Blende (2) geleitet wird und am Detektor ankommt. Dies ist das ZIEL in Abbildung 4-3. Der Detektor wandelt den

Ionenstrom des jeweiligen Prüfgases in einen elektrischen Strom um, der dann in der Lecksucherelektronik verarbeitet und als das Leckageratensignal angezeigt wird. Der Detektor muss hochempfindlich sein, um kleinste Leckageraten nachweisen zu können. Einfache Faraday-Auffänger, die seit jeher in Lecksuchern verwendet wurden, erfüllen diese Anforderungen nur unzureichend. In modernen Geräten werden Mikrokanalplatten verwendet (siehe Abbildung 4-5).

Mikrokanalplatten sorgen für eine sehr kompakte Geometrie, die mit einer hohen Verstärkung und niedrigem Rauschpegel verbunden ist. Sie bestehen aus einer Vielzahl kleiner Glaskapillaren mit einem Durchmesser von $8\ \mu\text{m}$. Die Kapillaren haben eine leitfähige Beschichtung und sind zur Oberfläche hin leicht geneigt. Jede Kapillare agiert als ein unabhängiger Sekundärelektronenvervielfacher. Trifft ein Prüfgas auf die Oberfläche einer Kapillare, generiert es eine Kaskade sekundärer Elektronen. Das Potential über die Platte hinweg beschleunigt die Elektronen zum Detektor hin.

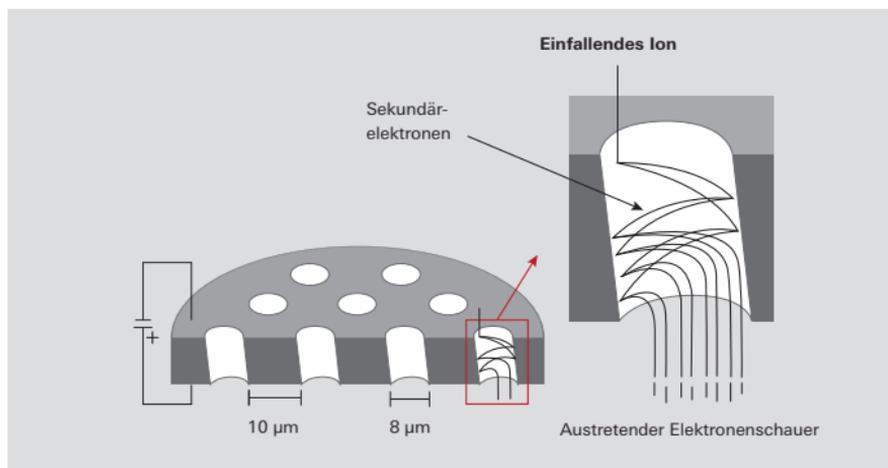


Abbildung 4-5: Mikrokanalplatte (Sekundärelektronenvervielfacher)

Eine Bremsselektrode (Abbildung 4-3, Pos. 3) stößt Elektronen vom Detektor ab und vermindert so dessen Grundrauschen. Das Nutzsignal der Prüfgasionen wird also erhöht.

Der Ionenstrom des Prüfgases ist proportional zum Partialdruck. Durch Vergleich des gemessenen Ionenstroms mit einem durch eine Referenz (ein kalibriertes Leck) produzierten Ionenstrom lässt sich die Durchflussmenge des erkannten Lecks ermitteln.

In der Analysezelle gibt es ein zusätzliches Filament (Abbildung 4-3, Pos. 6). Dieses wird als Ersatzheizfaden verwendet, falls das erste Filament ausfällt. Er garantiert den unterbrechungsfreien Betrieb des Lecksuchers bei einer Messreihe oder bei der industriellen Serienprüfung, die in einen Produktionsprozess integriert ist. Wenn jedoch der erste Heizfaden bricht, sollte der Bediener eine vorbeugende Wartung planen.

Wir können die Ablenkung der Ionen in einem Massenspektrometer auch auf quantitative Weise beschreiben:

Durch Elektronenstoßionisation haben wir ein positives Ion M^+ mit der Ladung q erzeugt. Im nächsten Schritt wird das positive Ion M^+ in einem elektrischen Feld durch die Spannung U beschleunigt. Durch die Beschleunigung erhöht sich die kinetische Energie des Partikels E_{kin} .

$$E_{kin} = q \cdot U = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

Formel 4-1: Kinetische Energie

- E_{kin} Kinetische Energie
- q Ladung
- U Spannung (Potential)
- m Masse
- v Geschwindigkeit

Umformung von Formel 4-1 ergibt die Geschwindigkeit der Ionen auf ihrem Weg durch das Sektorfeld.

$$v = \sqrt{\frac{2q \cdot U}{m}}$$

Formel 4-2: Teilchengeschwindigkeit

Bei gleicher Ladung q hängt die Geschwindigkeit und damit die Zeit zum Zurücklegen einer gegebenen Strecke von der Masse ab. Dies wird in Flugzeit-Massenspektrometern direkt zur Massentrennung genutzt. In einem Sektorfeld-Massenspektrometer beschreiben die Ionen im homogenen Magnetfeld eine kreisförmige Flugbahn. Dies wird verursacht durch die Lorentzkraft (benannt nach dem holländischen Mathematiker und Physiker Hendrik A. Lorentz, 1853 – 1928), die auf die bewegten Ionen senkrecht zur Geschwindigkeit und senkrecht zum Magnetfeld wirkt.

$$F = q \cdot v \cdot B$$

Formel 4-3: Lorentzkraft

- F Lorentzkraft
- B Magnetfeld

Auf der Kreisbahn mit dem Radius r ist die Lorentzkraft gleich der Zentripetalkraft.

$$q \cdot v \cdot B = m \cdot v^2 / r$$

Formel 4-4: Gleichgewicht zwischen Lorentzkraft und Zentripetalkraft

Ersetzen wir die Geschwindigkeit v durch Kombination der Gleichungen 4-2 und 4-5, so erhalten wir

$$r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$$

Formel 4-5: Bahnradius der Ionen im Magnetfeld

Ersetzen wir die Geschwindigkeit v durch Kombination der Gleichungen 4-2 und 4-5, so erhalten wir

$$r = \sqrt{\frac{2mU}{qB^2}}$$

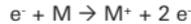
Formel 4-6: Bahnradius als Funktion von Masse, Spannung, Ladung und Magnetfeld

In magnetischen Sektorfeld-Massenspektrometern ist das Magnetfeld B von einem externen Permanentmagneten bestimmt. Das konstante Magnetfeld steht senkrecht zur Bildebene in Abbildung 4-3. Die Massenspektrometer in Helium-Lecksuchgeräten sind so abgestimmt, dass die Flugbahn von einfach geladenen Heliumionen ${}^4\text{He}^+$ durch eine Blende und einen Austrittsspalt auf den Detektor trifft. Alle anderen Teilchen können das Blendensystem nicht passieren und werden wieder neutralisiert.

Aus Formel 4-6 ist ersichtlich, dass der Bahnradius r über die Beschleunigungsspannung U beeinflusst werden kann. In kommerziell erhältlichen Lecksuchern ist der verfügbare Massenbereich auf die Massen 2 (Wasserstoff H_2^+), 3 (Heliumisotop ${}^3\text{He}^+$, möglicherweise Tritium ${}^3\text{H}$), und 4 (Helium ${}^4\text{He}^+$) beschränkt.

4.1.2 Quadrupol-Massenspektrometer

Der erste Schritt beim Eintritt eines neutralen Gasatoms oder -moleküls in ein Quadrupol-Massenspektrometer ist exakt der gleiche wie im vorhergehenden Kapitel für Sektorfeld-Massenspektrometer beschrieben: Elektronenstoßionisation in einer Ionenquelle (siehe Abbildung 4-4).



Das positive Ion M^+ wird dann beschleunigt und in eine Zone eingeschlossen, auf die

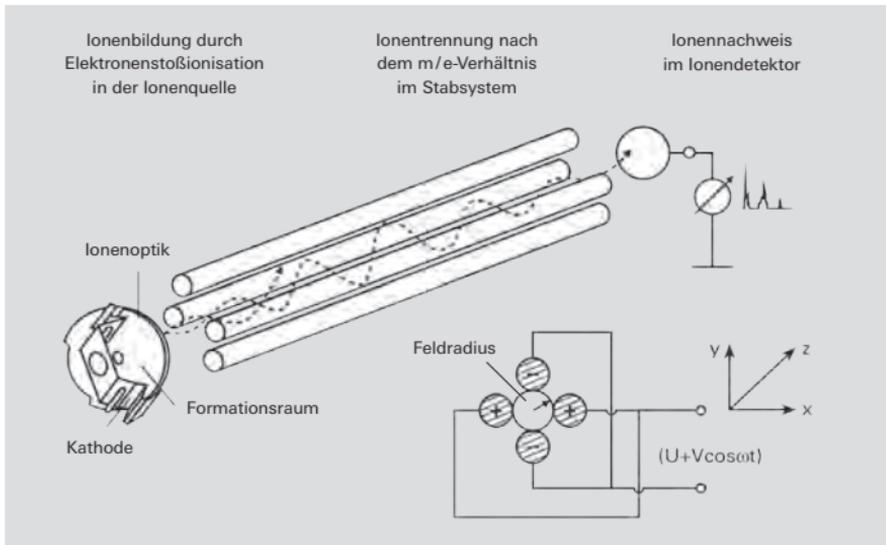


Abbildung 4-6: Funktionsprinzip eines Quadrupol-Massenspektrometers

ein elektrisches Feld wirkt. Dieses elektrische Feld wird zwischen vier zylindrischen Stäben erzeugt, die parallel zueinander angeordnet sind (siehe Abbildung 4-6). Die Stäbe bilden den Massenfiter. Idealerweise haben die Stäbe ein hyperbolisches Profil. Da hyperbolische Profile jedoch schwer herzustellen sind, nähert man sich der idealen Form durch zylindrische Stäbe an. Die zylindrischen Stäbe weisen ein bestimmtes Verhältnis zwischen Stabdurchmesser und Abstand zwischen den Stäben auf.

Die gegenüberliegenden Stabpaare sind elektrisch miteinander verbunden. Eine hochfrequente Wechselspannung wird zwischen zwei jeweils gegenüberliegenden Stabpaaren angelegt. Die RF-Spannung wird einer Gleichspannung überlagert. Ein Stabpaar ist positiv geladen, das andere ist negativ geladen. Wir können die Bewegung der Ionen im elektrischen Feld in vereinfachter Form verstehen, wenn wir

- a) die elektrostatische Anziehung – gleiche Ladungen stoßen sich ab, entgegengesetzte Ladungen ziehen sich an –
- b) und die Massenträgheit großer und kleiner Ionen betrachten.

Wenn wir zwei positiv geladene Ionen mit verschiedenen Massen zwischen das positive Stabpaar des Massenfilters beschleunigen, würden sie von den zwei positiv geladenen Stäben einfach abgestoßen werden und das Filter ohne Trennungseffekt durchströmen. Legen wir nun zusätzlich ein hochfrequentes (HF) Wechselfeld an das Stabpaar an, werden die Ionen das Feld eines zeitweise negativ geladenen Stabs sehen. Dies geschieht, wenn die Sinuskurve des HF-Wechselstroms negativ wird und die negative Ladung größer ist als die positive Gleichstrom-Komponente. Die Massenträgheit der schweren Ionen ist zu groß, um die Ionen in Richtung des zeitweise negativ geladenen Stabs zu lenken. Wenn das schwere

Ion seine Bewegung auf die anziehende negative Ladung begonnen hat, befindet sich die Sinuskurve schon wieder im positiven Bereich und das Ion wird wieder abgestoßen. Dadurch stößt das schwere Ion auf seinem Weg durch das positive Stabpaar des Massenfilters nicht mit den Stäben zusammen. Im Gegensatz dazu kann ein leichtes positives Ion den schnellen Ladungsänderungen im HF-Feld aufgrund seiner geringeren Trägheit folgen. Nach einigen Zyklen trifft das leichte Ion deshalb auf die Stäbe, wird neutralisiert und fliegt aus dem Quadrupol. In diesem Sinne ist das positive Paar der zwei Stäbe ein Highpass-Massenfilter.

Verwenden wir nun den gleichen Ansatz bei dem negativen Stabpaar: Mit nur einer Gleichstrom-Ladung würden die positiven Ionen angezogen werden und nicht ein einziges Ion würde den Massenfiter passieren. Legen wir nun die HF-Spannung an, gibt es für das schwere Ion aufgrund der Trägheit keine Möglichkeit, der negativen Anziehung der Stäbe über einen längeren Zeitraum auszuweichen. Nach einigen Zyklen trifft es auf die Stäbe, wird neutralisiert und fliegt aus dem Quadrupol. Im Gegensatz dazu ist ein leichtes Ion in der Lage, den HF-Zyklen zu folgen und den Massenfiter zu passieren. Das negative Paar der zwei Stäbe ist also ein Tiefpass-Massenfilter.

Nun können wir für drei Dimensionen kombinieren, was wir für zwei Dimensionen erklärt haben. Wenn wir die vier Stäbe wie in Abbildung 4-6 dargestellt anordnen, befindet sich das Hochpass-Massenfilter auf der x/z -Ebene und das Tiefpass-Massenfilter in der y/z -Ebene. Die Ionen folgen nicht einer sinusartigen Flugbahn sondern einer Flugbahn wie einem Korkenzieher.

Durch Einstellung der Gleich- und Wechselspannung können wir entscheiden, wie breit das Massenfiter ist, durch das wir die Ionen passieren lassen. Wir können ein

Durchgangsband bestimmen, dessen Breite wir beim Wandern über den Massenbereich beeinflussen können. Und wir können entweder einen Massenbereich erfassen, um eine Vorstellung zu bekommen, was sich im Inneren der Vakuumkammer befindet, oder wir können die Spannungen stabil halten und zeitaufgelöste Prozesse analysieren. Bei der Heliumlecksuche entscheiden wir uns für die zweite Option, indem wir das Massenfilter auf Parameter einstellen, die unseren Prüfgasionen den Durchgang erlauben.

Diesen Vorgang beschreiben wir nun etwas ausführlicher mit Hilfe von Formeln:

Die Spannung zwischen den beiden Stabpaaren besteht aus einer Gleichstromkomponenten U und einer Wechselspannungskomponente mit der Amplitude V und der Frequenz $f = \omega/2\pi$.

Formel 4-7: Spannungen am Quadrupol

$$U_{quad} = U + V \cdot \cos\omega t$$

- U Gleichspannung
- V Wechselspannungsamplitude
- F Frequenz
- ω Kreisfrequenz

Zur Lösung der Bewegungsgleichungen führt man die sogenannten Stabilitätsparameter a und q ein. Dies sind dimensionslose Variablen, welche die variablen Parameter des Quadrupols und des Ions zusammenfassen.

Formel 4-8: Stabilitätsparameter a

Q Ionenladung

$$a = \frac{8 \cdot Q \cdot U}{m \cdot r_0^2 \cdot \omega^2}$$

- m Ionenmasse
- r_0 Feldradius

$$q = \frac{4 \cdot Q \cdot U}{m \cdot r_0^2 \cdot \omega^2}$$

Formel 4-9: Stabilitätsparameter q

Damit haben wir ein sechsdimensionales Problem auf ein zweidimensionales Problem vereinfacht. Diese Vereinfachung führt zu den Mathieu'schen Differentialgleichungen von Bewegungen. Die Lösungen dieser Formeln legen den Bereich der stabilen Ionenflugbahnen fest. Stabile Ionenflugbahnen sind nur im Bereich unter dem roten Dreieck (in Abbildung 4-7) definiert durch a und q mit Amplituden $r_{max} < r_0$.

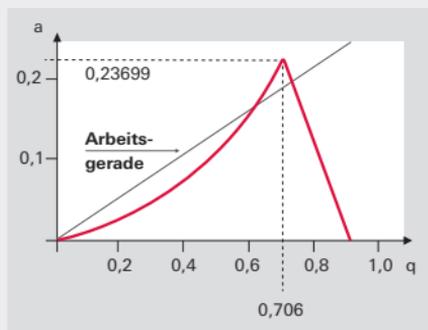


Abbildung 4-7: Stabilitätsdiagramm eines Quadrupol-Massenfilters

Dividiert man nun Formel 4-8 durch Formel 4-9 erhält man

$$\frac{a}{q} = \frac{2 \cdot U}{V}$$

Formel 4-10: Verhältnis Stabilitätsparameter

Dies ist die Steigung der Arbeitsgeraden des Quadrupol-Massenfilters. Durch Anpassung der Steigung ist die Breite des Bandpasses variierbar. Mit anderen Worten kann man damit die Massenauflösung der jeweiligen Anwendung anpassen.

Wenn die Massenauflösung maximiert wird, geht die Massenabstastlinie durch die Spitze des Dreiecks mit den Werten

$$a_{\text{Spitze}} = 0,237 \text{ und } q_{\text{Spitze}} = 0,706.$$

Der Massenfilter ist nur transparent für die Spannungsverhältnisse

$$\frac{U}{V} = \frac{a_{\text{Spitze}}}{2 \cdot q_{\text{Spitze}}} < 0,1678$$

Unterhalb dieser Werte überlappt die Arbeitsgerade mit dem Stabilitätsbereich. Alle Ionen, deren Parameter a und q in das Dreieck oberhalb der Arbeitsgerade fallen, passieren den Quadrupol-Massenfilter und erreichen den Detektor.

Wir führen nun das Verhältnis $\frac{m_U}{e}$ ein mit

$$m_U \text{ atomare Masseneinheit } 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$e \text{ elementare Ladung } 1,6602 \cdot 10^{19} \text{ A} \cdot \text{s}$$

$$\frac{m_U}{e} = 1,0365 \cdot 10^{-8} \text{ kg A}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

Multiplizieren wir nun das Verhältnis $\frac{m_U}{e}$

mit der dimensionslosen Massenzahl M des jeweiligen Ions, erhalten wir die folgenden Parameter für die Spannungen U_{Spitze} und V_{Spitze} an der Spitze des Stabilitätsdiagramms:

$$U_{\text{Spitze}} = k_u \cdot M \cdot r_0^2 \cdot f^2$$

Formel 4-11: Stabilitätsbedingung für U

$$k_u \quad 1,2122 \cdot 10^{-8} \text{ kg A}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

$$V_{\text{Spitze}} = k_v \cdot M \cdot r_0^2 \cdot f^2$$

Formel 4-12: Stabilitätsbedingung für V

$$k_v \quad 7,2226 \cdot 10^{-8} \text{ kg A}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

Die Stabilitätsbedingungen zeigen, dass man am Quadrupol-Massenfilter bei fester Frequenz eine direkte Proportionalität zwischen

Spannungen und Masse hat und damit bei Variation der Spannungsamplituden eine lineare Massenskala erhält.

Bei abgeschalteter Gleichspannung $U = 0$ sind alle Bahnen der Ionen mit $q < 0,905$ stabil. Nach Formel 4-9 sind dies alle Massen mit

$$M > \frac{k_H \cdot V}{r_0^2 \cdot f^2}$$

Formel 4-13: Hochpassbedingung

$$K_H \text{ konstant } \quad 1,0801 \cdot 10^7 \text{ A s kg}^{-1}$$

In diesem Betriebsmodus arbeitet das Quadrupol-Massenfilter als Hochpass. Mit steigender Hochfrequenzamplitude V werden, von den leichten Massen her beginnend, immer schwerere Ionenarten instabil und damit ausgesondert. Man erhält in diesem Betriebsmodus ein integrales Spektrum und kann so eine Totaldruckmessung vornehmen.

Entscheidend für die Transmission von Ionen durch das Quadrupol sind die Einschussbedingungen. Die Ionen müssen in einem möglichst engen Bereich um die Mitte des Stabsystems in den Quadrupol eintreten und sich dabei möglichst parallel zur Stabachse bewegen.

Diese Forderungen lassen sich einfacher erfüllen mit

- einem großen Abstand zwischen den Stäben (was auch den Stabdurchmesser beeinflusst) und
- langen Stäben.

Werden die Stäbe länger und dicker, sind auch Anforderungen hinsichtlich der Fertigungstoleranzen einfacher zu erfüllen. In unserem Know-How-Buch beschreiben wir die Vorteile der Ionenquellen von Pfeiffer Vacuum, die zu hoher Transparenz und damit hoher Empfindlichkeit führen.

Im praktischen Betrieb wird nicht die Frequenz zum Durchstimmen des Quadrupol-Massenfilters variiert, sondern das Spannungsverhältnis $\frac{U}{V}$ um die Linienbreite

ΔM konstant zu halten. Dies bedeutet eine

Zunahme des Auflösungsvermögens $\frac{M}{\Delta M}$

proportional zur Massenzahl. Aus der in Formel 4-12 gezeigten Proportionalität von V und M ergibt sich, dass die Massenskala eines Quadrupol-Massenspektrometers im Gegensatz zu einem Sektorfeld-Massenspektrometer linear ist.

Einer der wesentlichen Faktoren für ein Quadrupol-Massenspektrometer ist die erforderliche Hochfrequenzleistung.

$$N_{HF} \approx \frac{C}{Q} \cdot M^2 \cdot f^5 \cdot r_0^2$$

Formel 4-14: Hochfrequenzleistung

- C Kapazität des Systems
- Q Kreisgüte des Leistungskreises

Die erforderliche Hochfrequenzleistung steigt mit hohen Potenzen von f und r_0 . Eine Vergrößerung des Feldradius r_0 verringert die auftretenden mechanischen Toleranzen und führt so zu einem verbesserten Verhalten des Massenfilters. Formel 4-14 legt nahe, den Feldradius r_0 und die Frequenz f so groß wie möglich zu wählen. Wegen der damit verbundenen Zunahme der Hochfrequenzleistung sind dem jedoch Grenzen gesetzt. Eine Verlängerung des Stabsystems erlaubt eine geringere Betriebsfrequenz. In der Serienproduktion ist die Länge von Stäben oft auf 300 mm begrenzt.

Der erforderliche Massenbereich und die gewünschte Auflösung bestimmen die Abmessungen des Massenfilters und die

Betriebsfrequenz. In der Praxis werden Quadrupol-Massenfilter mit Stabdurchmessern von 6, 8 und 16 mm mit jeweils angepasster Elektronik verwendet.

Betrachten wir nun noch den Zusammenhang zwischen Auflösung und mechanischer Präzision. Gehen wir von einem Quadrupol-Massenfilter aus, das nahe der Spitze des Stabilitätsdiagramms (siehe Abbildung 4-7) betrieben wird. Mit den Formeln 4-11 und 4-12 können wir die Gleichspannung und die Wechselspannungsamplitude bestimmen:

$$U_{Spitze} = 1,2122 \cdot 10^{-8} \text{ kg A}^{-1} \text{ s}^{-1} \cdot M \cdot r_0^2 \cdot f^2$$

$$V_{Spitze} = 7,2226 \cdot 10^{-8} \text{ kg A}^{-1} \text{ s}^{-1} \cdot M \cdot r_0^2 \cdot f^2$$

Wenn wir davon ausgehen, dass beide Spannungen und die Frequenz mit unendlicher Präzision eingestellt werden können, erhalten wir:

$$M = c_k \cdot \frac{1}{r_0^2}$$

c_k konstant

Nach der Differenzierung, Teilung durch M und Festlegung des absoluten Wertes erhalten wir die Dispersion des Massenfilters, die vom Feldradius r_0 verursacht ist.

$$\frac{\Delta M}{M} = \frac{2 \cdot r_0}{r_0}$$

Formel 4-15: Dispersion

Nehmen wir an, dass sich der Feldradius r_0 über die Länge des Massenfilters um $\delta r_0 = 0,03 \text{ mm}$ ändert. Betrachten wir nun die Auswirkung dieser Änderung auf die Streuung bei zwei unterschiedlich großen Massenfiltern mit unterschiedlichen Abmessungen. Für die optimale Transmission muss gelten, dass die am Spektrometer eingestellte Auflösung (wir definieren

$\frac{\Delta M}{M} = 0,01$) größer ist als die durch die

Schwankung von r_0 erzeugte Streuung. Bei einem Massenfilter mit dem Feldradius von 3 mm ergibt sich

$$\frac{\Delta M}{M} = \frac{2 \cdot r_0}{r_0} = \frac{2 \cdot 0,03 \text{ mm}}{3 \text{ mm}} = 0,02$$

Die Streuung durch die nicht perfekte Geometrie steht also der gewünschten Auflösung entgegen.

Nehmen wir nun ein Massenfilter mit einem Feldradius von 12 mm ist das Ergebnis

$$\frac{\Delta M}{M} = \frac{2 \cdot r_0}{r_0} = \frac{2 \cdot 0,03 \text{ mm}}{3 \text{ mm}} = 0,005$$

Die gewünschte Auflösung kann mit einem größeren Feldradius, also einem größeren Stabsystem erreicht werden. Mit anderen Worten bedeutet dies auch, dass die Transmission des kleinen Quadrupols nahe Null ist, wogegen beim großen Filter des zweiten Quadrupols alle Ionen den Filter passieren können.

Diese vereinfachte Fehlerrechnung berücksichtigt bei weitem nicht alle Effekte, die zur Transmission beitragen, aber einige fundamentale Beziehungen können daraus abgeleitet werden:

- Der Feldradius muss über die gesamte Länge des Quadrupols wesentlich besser als 1% eingehalten werden.
- Schwankungen im Feldradius führen zu Transmissionsverlusten.
- Je größer die Abmessungen des Stabsystems sind, desto geringer ist der Einfluss der absoluten mechanischen Toleranzen.
- Je höher der Massenbereich ist, in dem man benachbarte Massen noch voneinander trennen will, um so höher werden die Anforderungen an die relative Genauigkeit des Massenfilters.

4.2 Quartzfenstersensor

Die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen massenspektrometrischen Detektoren erkennen das Prüfgas durch Ionisierung einer Gasmischung mit nachfolgender Massentrennung der Ionen in einem elektrischen oder magnetischen Feld. Der in diesem Kapitel beschriebene Quartzfenster-Sensor führt die Trennung durch unterschiedliche Permeationseigenschaften von Gasen durch. Helium und Wasserstoff können eine dünne Quarzmembran durchdringen – andere Gase können dies nicht. Dieser Effekt wird bereits seit längerer Zeit in kommerziell erhältlichen Prüfflecks angewandt. Helium strömt aus einem Vorrat mit definiertem Druck durch ein Quarzelement und bildet einen kleinen und sehr präzisen Gasstrom, der dann zur Kalibrierung eines Lecksuchers eingesetzt werden kann.

Eine Quarzmembran kann verwendet werden, um Helium aus einem Gasgemisch zu isolieren. Wenn Helium aus dem Gemisch in einen Vakuumbehälter übergeht, wird der Gesamtdruck im Vakuumbehälter rein durch den Partialdruck des Heliums bestimmt. So kann eine quantitative Messung von Helium mit einem einfachen Totaldruckmessgerät erfolgen

Die Serienproduktion geeigneter Quarzmembranen wurde möglich mit der Verfügbarkeit moderner mikromechanischer Technologien. Die Oberfläche eines Siliciumwafers wird kontrolliert oxidiert. Dadurch entsteht auf der Oberfläche des Wafers eine homogene Quarzschicht mit einer Dicke von 7 μm (siehe Abbildung 4-8). In einem mikromechanischen Plasma-Ätzprozess werden mehrere tausend Löcher mit einem Durchmesser von 200 μm von der anderen Seite der Scheibe geätzt, bis die Quarzschicht erreicht ist. Damit können alle Gase die Quarzschicht erreichen und Helium kann selektiv durch die Membran strömen. Die

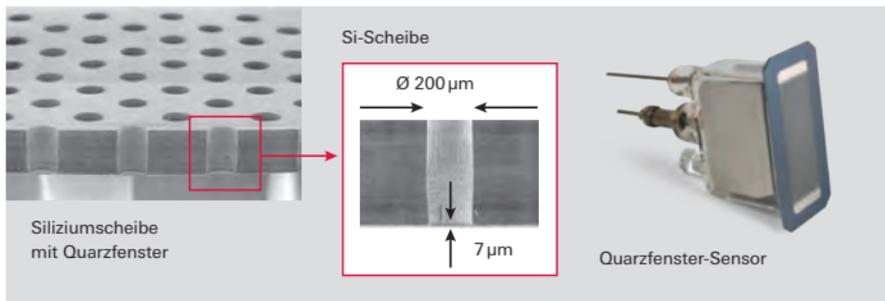


Abbildung 4-8: Quarzfenster

Messung erfolgt umso schneller, je dünner die Membran und je höher die Temperatur ist. Deshalb wird die Membran von einer aufgesputterten Platinheizung auf Temperaturen von mehreren Hundert Grad Celsius erhitzt.

Die Membran wird dann an ein Glasgehäuse mit elektrischen Durchführungen für das Totaldruckmessgerät gefügt. Die Zelle wird über ein Glasrohr auf ein extrem niedriges Vakuum (XHV) mit Drücken unter 10^{-11} hPa evakuiert. Danach wird das Rohr abgeschmolzen und die Zelle ist versiegelt.

Die Druckmessung erfolgt mit einer wohl bekannten Ionisationsmessröhre (Kaltkathode). Weitere Details über Ionisationsmessröhren und die Totaldruckmessung sind in unserem Know-How-Buch enthalten.

Mit der Quarzfenstertechnologie wird nicht die gleiche Empfindlichkeit wie bei massenspektrometrischen Geräten erreicht. In Tabelle 4-2 und Kapitel 5 sind die Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Detektoren und den darauf basierenden Messgeräten übersichtlich zusammengefasst.

4.3 Detektortechnologien von Pfeiffer Vacuum im Vergleich

	Magnetsektorfeld-Massenspektrometer	Quadrupol-Massenspektrometer	Quartzfensterensor
Funktionsprinzip	Massenabtrennung von Ionen in einem Magnetfeld	Massenabtrennung von Ionen in einem elektrischen Feld	Trennung von Helium durch selektive Permeation durch eine Quarzmembran, Erkennung mit dem Gesamtdruckmesser
Prüfgase	⁴ He, ³ He, H ₂	Alle Arten, die gasförmig sind oder verdampft werden können	He, H ₂
Lecklokalisierung Vakuum / Überdruck	+ / +	+ / o	+ / -
Integrale Leckprüfung Vakuum / Akkumulation / Trägergas	+ / + / +	+ / o / -	+ / - / -
Virtuelles Leck, Ausgasen	-	+	-
Quantitativer Lecktest	+	+	+
Kalibrierung	+	o	+
Permeation und Desorptionsmessung	Nur Helium und Wasserstoff	Mehrere Gase, Informationen über die Gasart, falls unbekannt	-
Empfindlichkeitsbereich [Pa m ³ s ⁻¹]	Prüfgas Helium: 10 ⁻¹³ bis 10 ⁻³	Stark abhängig vom Prüfgas, für Helium <10 ⁻¹¹	Prüfgas Helium: 10 ⁻⁸ bis 10 ⁻³
Ansprechzeit [s]	< 1	< 1	< 1
Trennschärfe	Prüfgas Helium: Sehr hoch Prüfgas Wasserstoff Medium	Stark abhängig vom Prüfgas	Prüfgas Helium: Sehr hoch
Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> + Kann zur Lecklokalisierung und Quantifizierung verwendet werden + Reife und felderprobte Technologie + Sehr gute Trennschärfe mit Prüfgas Helium + Ausgezeichnete Empfindlichkeit und niedrigste Nachweisgrenze + Sehr große dynamische Bandbreite + Schnelle Signalansprechzeit 	<ul style="list-style-type: none"> + Kann mit nahezu jeder gasförmigen Substanz als Prüfgas verwendet werden + Bietet einzigartige Flexibilität bei der Anpassung an die jeweilige Anwendung + Identifikation unbekannter Gaskomponenten, z. B. in Permeations- oder Diffusionsexperimenten + Hohe Zeitauflösung + Kann als Messgerät, aber auch zur Prozessregelung verwendet werden + Kontinuierliche Überwachung der Gaszusammensetzung und Dichtigkeit + Erkennung virtueller Lecks 	<ul style="list-style-type: none"> + Kann zur Lecklokalisierung und Quantifizierung eingesetzt werden + Geringer Wartungsaufwand + Breiterer Druckbereich verglichen mit Analysegeräten auf Massenspektrometerebasis + Leichtes Gewicht und damit optimal für Servicemitarbeiter im Außendienst
Einschränkungen	<ul style="list-style-type: none"> - Begrenzte Mobilität durch Pumpentechnologie und Gewicht - Begrenztes Spektrum an Prüfgasen 	<ul style="list-style-type: none"> - Einzelanalysegeräte benötigen Hochvakuumsysteme, atmosphärische Systeme benötigen spezielle Probeneinlasssysteme - In den meisten Fällen nur stationäre Anwendung - Schwierige Kalibrierung - Erfordert höchstes Bedienerschulungsniveau für alle zerstörungsfreien Methoden 	<ul style="list-style-type: none"> - Sorptionspumpe im Sensor kann nach langfristiger Anwendung (mehrere Jahre) gesättigt werden und muss ausgetauscht werden - Begrenzte Empfindlichkeit und höhere Nachweisgrenze verglichen mit Analysegeräten auf Massenspektrometerebasis - Nachweisgrenze abhängig vom Probenvolumen

Tabelle 4-2: Detektortechnologien von Pfeiffer Vacuum im Vergleich

4.4 Andere Detektortechnologien

In der zerstörungsfreien Prüfung werden zahlreiche Detektortechnologien eingesetzt. Die einfachsten Detektoren sind unsere Augen und Ohren. Sie werden bei klassischen

Sichtinspektionen wie Blasenprüfungen eingesetzt. Die empfindlichsten Methoden basieren dagegen auf Massenspektrometrie. Eine Übersicht der Sensortechnologien in der zerstörungsfreien Prüfung ist in Tabelle 4-3 zusammengefasst.

Methode / Detektor	Prüfgas	Geprüftes Objekt unter Überdruck	Geprüftes Objekt unter Vakuum	Quantitative Prüfung	Lokalisierung	Leckagerate [Pa m ³ s ⁻¹]										
						10 ¹	10 ³	10 ⁵	10 ⁷	10 ⁹	10 ¹¹	10 ¹³				
Schaumbildende Mittel	beliebig	+	-	-	+											
Blasenprüfung	beliebig	+	-	- ¹⁾	+											
Schall- oder Ultraschallsensor	beliebig	+	-	-	+											
Ultraschall-Gasblasenprüfung	beliebig	+	-	+	+											
Druckanstiegsprüfung	beliebig	-	+	+	-											
Druckabfallprüfung	beliebig	+	-	+	-											
Durchflussprüfung	beliebig	+	-	+	-											
Photoakustische Prüfung	Prüfgase wie SF ₆ , CO ₂ , N ₂ O	+	-	+	+											
Kältemittelschnüffler (Infrarot-Detektor)	Kältemittel	+	-	-	+											
Kältemittelschnüffler (einfache Infrarot-Detektoren, Halbleitersensor, Rice-Diode, ...)	Kältemittel	+	-	-	+											
Wasserstoffschnüffler (MOSFET)	Prüfgas mit Wasserstoffanteil	+	-	+ ²⁾	+											
Quartzfenstersensor	Helium	- ³⁾	+	+	+ ⁴⁾											
Magnetisches Sektorfeld-Massenspektrometer, Schnüffeln	Prüfgase ⁴ He, ³ He, H ₂	+	-	+ ²⁾	+											
Magnetisches Sektorfeld-Massenspektrometer, Vakuum	Prüfgase ⁴ He, ³ He, H ₂	-	+	+	+											
Quadrupol-Massenspektrometer	beliebig	+	+	+	+											

Tabelle 4-3: Sensortechnologien in der Zerstörungsfreien Prüfung (NDT)

¹⁾ Möglich mit Auffangen der Blasen und volumetrischer Quantifizierung

²⁾ Nur Akkumulationsprüfung (Schnüffel-Hülle-Verfahren), siehe Kapitel 6 Lecksuchmethoden

³⁾ Von Pfeiffer Vacuum nicht lieferbar

⁴⁾ Nur Sprühmethode, siehe Kapitel 6 Lecksuchmethoden

Das Verfahren mit der niedrigsten Nachweisgrenze bietet nicht unbedingt die beste Lösung für jede Lecksuchaufgabe. Es sind Überlegungen zu wirtschaftlichen, umweltrelevanten und rechtlichen Aspekten nötig. Die industrielle Lecksuche muss die durch die Produktion vorgegebenen Anforderungen erfüllen. Ein Teil wird beispielsweise einer Wärmebehandlung unterzogen und muss im nächsten Schritt auf Lecks geprüft werden. Die mit einer Abkühlung einherge-

hende Komprimierung der eingeschlossenen Luft schließt möglicherweise eine Druckabfallprüfung als geeignete Testmethode aus. Ein weiteres Beispiel ist das Benetzen der geprüften Teile in einer klassischen Blasenprüfung. Wenn das Prüfobjekt nicht befeuchtet werden kann oder die nachfolgende Trocknung zu aufwändig wäre, wird man sich häufig zugunsten einer Lecksuchmethode mit Prüfgas entscheiden.

5 Detektoren und Lecksuchgeräte

5.1 Lecksucher auf der Basis von magnetischen Sektorfeld-Massenspektrometern

Das Funktionsprinzip eines Detektors auf der Basis eines magnetischen Sektorfeld-Massenspektrometers haben wir in Kapitel 4 erläutert. In einem Helium-Lecksucher ist dieser Detektor mit einem Hochvakuum-pumpstand sowie einer automatischen Ventil- und Pumpensteuerung integriert.

Befindet sich das Gerät nicht im Prüfmodus (Standby oder Abpumpen), entspricht die angezeigte Leckagerate dem internen Heliumhintergrund des Geräts.

Das Massenspektrometer (8) für die Massen 2, 3 und 4 u (entsprechend den Prüfgasen Wasserstoff, ³Helium und ⁴Helium) ist am Hochvakuumflansch der Hochvakuum-Turbopumpe (7) montiert. Eine Vorpumpe (5) erzeugt das Vorvakuum für die Turbopumpe,

die mit dem Auslassventil abgesperrt werden kann (6). Nach dem Zyklusstart wird das Prüfobjekt über das Grobvakuumventil evakuiert (3). Das Auslassventil (6) ist geschlossen. Wenn der am Messgerät (2) gemessene Ansaugdruck den maximalen Prüfdruck des Lecksuchers erreicht, öffnet sich das Auslassventil (6). Nun kann der Gasstrom aus dem Prüfobjekt zusammen mit eventuell durch eine Leckage eingetretenem Prüfgas die Vorvakuumleitung zwischen der Turbopumpe (7) und der Vorpumpe (5) erreichen. Aufgrund des begrenzten Kompressionsverhältnisses der Turbopumpe (= das Druckverhältnis zwischen Auslassdruck und Ansaugdruck der Turbopumpe, das von der Gasart abhängt), kann das leichte Prüfgas von der Hochdruckseite durch die Turbopumpe (7) zur Spektrometierzelle (8) diffundieren und nachgewiesen werden. Diese Betriebsart wird „Gegenstrom“ oder „Grobleck“ genannt. In dieser Betriebsart erreicht der

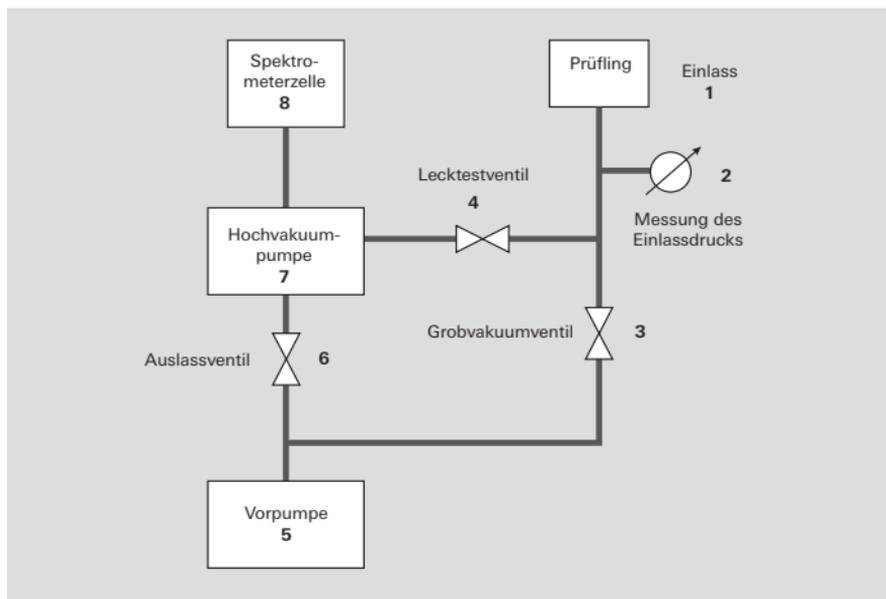


Abbildung 5-1: Allgemeines Vakuumschema eines Helium-Lecksuchers

Lecksucher nicht seine volle Empfindlichkeit aufgrund des kleinen Anteils an der Gasströmung, die den Detektor erreicht.

Um Messungen mit höherer Empfindlichkeit durchzuführen, muss weiter abgepumpt werden. Bei einem geräteabhängigen, niedrigeren Druck schließt sich das Grobvakuumventil (3) und das Lecktestventil (4) öffnet sich. Diese Betriebsart wird „Hauptstrom“ oder „Feinleck“ genannt und stellt den Prüfmodus mit der höchsten Empfindlichkeit dar. In fast allen modernen Lecksuchgeräten ist ein Prüflack integriert, um eine Autokalibrierung des Systems zu ermöglichen.

Der Gegenstrommodus wird verwendet, wenn z. B. ein großes Leck lokalisiert werden muss. Andere Anwendungen sind der Schutz der Analysenzelle gegen einen Luft-einbruch, falls das Prüfobjekt implodiert. Der Hauptstrommodus wird hauptsächlich

für die quantitative Erkennung kleiner Lecks verwendet.

	Gegenstrom	Hauptstrom
Einlassdruck	Hoch	Niedrig
Abpumpzeit	Kurz	Lang
Kleinste nachweisbare Leckagerate	Mittel	Klein
Luft-einbruchstabilität	Hoch	Mittel

Tabelle 5-1: Gegenstrom- und Hauptstromprinzip im Vergleich



Abbildung 5-2: Helium-Lecksucher ASM 340

5.2 Lecksucher auf der Basis von Quadrupol-Massenspektrometern

Quadrupol-Massenspektrometer werden häufig als Partialdruckmessgeräte oder Restgasanalysatoren (RGA) in Hochvakuumsystemen verwendet. Die Auswahl von Ionenquelle, Massenfilter und Detektor ermöglicht eine Anpassung an hauptsächlich analytische Anwendungen. Die Lecksuche durch Analyse eines Luftfingerabdrucks im Massenspektrum oder durch ein zeitaufgelöstes Heliumsignal ist eher ein Nebenprodukt der Hauptanwendung.



Abbildung 5-3: Gasanalysegerät OmniStar

Viele Prozesse, die mit Quadrupol-Massenspektrometern überwacht werden, werden bei Prozessdrücken oberhalb des maximalen Betriebsdrucks eines Quadrupols von 10^{-4} hPa betrieben. Eine wichtige Komponente eines QMS-basierten Gasanalyseystems wie dem OmniStar von Pfeiffer Vacuum (siehe Abbildung 5-3) ist ein Gaseinlasssystem, das auf den jeweiligen Prozessdruck abgestimmt ist. Gasgemische müssen vom Prozessdruck zur Analyse ohne Änderung der Zusammensetzung transferiert werden. Abhängig vom Ansaugdruck können die folgenden Einlasssysteme eingesetzt werden:

- Bei einem Ansaugdruck > 10 hPa wird eine Kapillare zur Druckreduzierung ver-

wendet. Bei kondensierbaren Prozessgasen kann die Kapillare beheizt werden. In der Kapillare herrschen laminaire Strömungsbedingungen. Ein Dosierventil stellt optimale Druckverhältnisse in der Ionenquelle des Massenspektrometers her. Als Option kann die Kapillare mit einer zusätzlichen Pumpe ausgestattet werden. Dies gewährleistet eine schnelle Reaktionszeit und einen hohen Druck vor dem Dosierventil gepaart mit einer hohen Empfindlichkeit.

- Bei einem Ansaugdruck < 10 hPa erfolgt eine Druckreduzierung über eine Blende oder einen Skimmer mit einem differentiell gepumpten Massenspektrometer. Eine Zwischenkammer zwischen Einlass und Massenspektrometergehäuse wird mit einer Turbopumpe evakuiert.
- Bei Drücken $< 10^{-4}$ hPa kann das Massenspektrometer ohne ein zusätzliches Einlasssystem verwendet werden.

QMS-basierte Gasanalysegeräte können z. B. für Permeationsmessungen verwendet werden. Die Analysen werden entweder in einem Vakuumsystem durch z. B. eine Folie oder bei Umgebungsdruck mit einem Kapillar-Einlasssystem – wie einer Schnüffelsonde – durchgeführt. Quadrupol-Massenspektrometer bieten eine maximale Flexibilität bei der Auswahl des Prüfgas. Klassische Helium-Lecksucher können für Permeationsmessungen mit Helium verwendet werden. Dies kann angewendet werden, wenn schnellere Prozesszeiten als mit schwereren Gasen erreicht werden müssen und Helium als schnell permeierendes Gas eingesetzt werden kann.

5.3 Lecksucher auf der Basis von Quartzfenstersensoren

Massenspektrometer trennen ein Gasgemisch nach der Ionisierung mit nachfolgender Trennung in ein magnetisches oder elektrisches Feld. Quartzfenster-Lecksucher

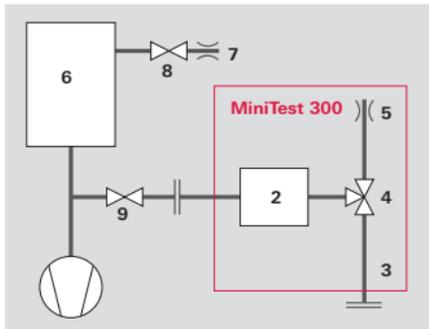


Abbildung 5-4: Quarzfenster-Lecksucher an einem Vakuumssystem

nutzen verschiedene Permeationseigenschaften von Prüfgasen.

Quarzfenster-Lecksucher haben kein integriertes Pumpensystem. In Abbildung 5-4 ist gezeigt, wie dieser Lecksucher-Typ in der Vorvakuumleitung des Pumpsystems für eine Vakuumkammer über ein externes Ventil (9) angeschlossen wird.

Ein externes Prüflack (7) am Vakuumbehälter ermöglicht die Quantifizierung und Messung der Reaktionszeit. Nach Detektion eines intensiven Signals kann der Lecksucher zum schnellen Signalabbau über einen Drosselinlass (5) mit Luft gespült werden und/oder an eine externe Pumpe über das Ventil (3) angeschlossen werden. Der MiniTest 300 von Pfeiffer Vacuum wird hauptsächlich mit Ansaugdrücken unterhalb von 200 hPa eingesetzt. Im Vergleich zu einem massenspektrometer-basierenden Lecksucher werden also die Anwendungsbereiche hin zu „schmutzigen“ oder kondensatbeladenen Prozessen erweitert. Durch den hohen maximalen Ansaugdruck kann der MiniTest z.B. in Dampfleitungen ohne zusätzliche Schutzmaßnahmen verwendet werden. Der wichtigste Einsatzbereich ist die Erkennung großer Lecks (immer noch kleiner als die Nachweisgrenze einer Druckabfallmessung) zur Lokalisierung und Reparatur.



Abbildung 5-5: MiniTest 300 mit drahtloser Fernbedienung

5.4 Vergleich von Lecksuchgeräten

Tabelle 5-2 zeigt eine Zusammenfassung einiger Parameter von Lecksuchgeräten.

Lecksucher	Quarzfenster-Lecksuchgeräte	Magnetfeld-Massenspektrometer	Quadrupol-Massenspektrometer
Lokalisierung	Ja	Ja	Ja
Quantifizierung	Ja, externes Prüfleck	Ja, internes und externes Prüfleck	Ja, mit Kalibriergasgemisch
Virtuelles Leck	Nein	Nein	Ja
Permeation	Nein	Kein Unterschied zwischen Permeation und Desorption. Kann für Permeationsmessungen mit Helium als schnelle Alternative zu schwereren Prozessgasen verwendet werden.	Ja, Prüfgas beliebig
Desorption	Nein		Ja, Prüfgas beliebig
Prüfdruck	Sehr hoch	Hoch	Niedrig, zur Messung ab Umgebungsdruck sind Einlasssysteme erforderlich
Kleinste nachweisbare Leckagerate	$5 \cdot 10^{-9} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$	$5 \cdot 10^{-13} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$	Ionenstrom abhängig von Massenfilter und Detektor
Allgemeines	Qualitative und nach externer Kalibrierung quantitative Messung, höchste Robustheit, leichtestes Gewicht.	Qualitative und quantitative Messung, höchste Flexibilität bei der Auswahl der Prüfmethode.	Eher ein qualitatives oder halb-quantitatives Gerät. Kalibrierung und Quantifizierung im Vergleich am schwierigsten. Höchste Flexibilität in Bezug auf Wahl des Prüfgases. Bietet die meisten Informationen. Erfordert Know How und das höchste Mass an Ausbildung des Anwenders.

Tabelle 5-2: Vergleich von Lecksuchern auf Basis unterschiedlicher Detektoren

6 Methoden der Lecksuche und Dichtheitsprüfung

Vor dem Beginn einer Lecksuche oder Dichtheitsprüfung sollte der Anwender Überlegungen über das Prüfobjekt anstellen. Beispiel: Eine dampfführende Leitung in einem Kraftwerk kann durch den hohen Ansaugdruck und die Wasserdampfverträglichkeit mit einem Lecksucher MiniTest 300 problemlos geprüft werden. Ein Massenspektrometer-Lecksucher sollte jedoch durch eine Kondensatfalle zwischen Prüfobjekt und Lecksucher geschützt werden. In diesem Beispiel betrachten wir sehr große Lecks. In einer industriellen Prüfung auf geringe Leckageraten kann Feuchtigkeit die Leckkanäle blockieren. Dies ist eine Folge intermolekularer Kräfte, die makroskopisch zur Oberflächenspannung von Wasser führen. Anders ausgedrückt muss das Prüfobjekt trocken sein. In den meisten Fällen ist es völlig nutzlos, eine mechanische Festigkeitsprüfung (mittels Wasser-Berstdruckprüfung) vor der Prüfgas-Lecksuche durchzuführen, da das Wasser in den Leckkanälen jedes Leck maskiert.

Nicht nur Feuchtigkeit oder Prozessrückstände müssen vor einer Dichtheitsprüfung entfernt werden. Dies gilt auch für Staub und Partikel. Ein menschliches Haar in einer Dichtung kann Lecks in der Größenordnung von 10^{-3} bis 10^{-2} Pa m^3 s^{-1} verursachen. Sauberkeit ist daher Voraussetzung für eine erfolgreiche Lecksuche.

Hinsichtlich der Kräfte, die auf das Prüfobjekt einwirken, sollte man immer versuchen,

den realen Betrieb des Prüflings zu kopieren. Das bedeutet, dass die Druckrichtung während Prüfung und Betrieb gleich sein sollte.

Das Gleiche gilt für die Probetemperaturen. Einer der größten Vorteile der Prüfgas-Lecksuche gegenüber Druckänderungsmethoden ist die niedrige Empfindlichkeit hinsichtlich Temperatureinwirkungen. Jedoch kann das Prüfgas durch die Temperatur ausgelöste strukturelle Veränderungen am Prüfobjekt nicht beeinflussen, die zum Öffnen oder Schließen eines Leckkanals führen können. Beispiele sind Kaltlecks in der Tieftemperaturphysik, die sich durch das Zusammenziehen des Materials öffnen können.

6.1 Einführung

Vor dem Beginn einer Leckprüfung sollte der Bediener sicherstellen, dass die Prüfeinrichtung ordnungsgemäß funktioniert. Außerdem wird empfohlen, eine Autokalibrierung am Lecksucher und eine Kalibrierung der gesamten Vorrichtung durchzuführen. Das bedeutet, dass man die Reaktionszeit und das Teilstromverhältnis prüfen sollte, wenn man mit Pumpen parallel zum Lecksucher arbeitet.

Der Testablauf sollte mit einer integralen Prüfung gestartet werden. Falls keine Lecks erkannt werden, ist die Prüfung beendet und man muss nicht weiter suchen. Nur wenn bei einer integralen Prüfung eine Undichtigkeit gefunden wird, sollte man diese genau-

er lokalisieren. Der Bediener sollte das komplette Teil prüfen und nicht nach Erkennen des ersten Lecks die Arbeit beenden – die Prüfung muss möglicherweise wiederholt werden und dabei verliert man Zeit.

Es ist gute Praxis, die bereits geprüften Komponenten und Anbauteile einer größeren Anlage mit Aufklebern zu markieren (z. B. grün für dichte und rot für undichte Bereiche) und die undichten Bereiche zeitweise abzudichten. Dadurch wird das zufällige Eintreten von Prüfgas durch ein Leck, das bereits identifiziert wurde, vermieden und es erleichtert die folgenden Prüfungen. Das Abdichten kann mit einem beliebigen Material erfolgen, das eine niedrigere Prüfgas-Permeation oder eine Speicherwirkung aufweist und das einfach ohne Rückstände entfernt werden kann. Mögliche Materialien sind Klebeband (möglicherweise metallbeschichtet), Folie, Karosseriekleber oder Fensterkitt. Prüfen Sie die Eignung des ausgewählten Materials, bevor Sie es in realen Prüfreihen verwenden.

Nach der Identifikation des Lecks und der Reparatur muss die Leckprüfung wiederholt werden, um nachzuweisen, dass die Reparaturaktion erfolgreich war. Nachdem der Bediener nachgewiesen hat, dass das Teil

die Dichtigkeitsanforderungen erfüllt, kann er das Prüfprotokoll ausfüllen.

In der Vakuumtechnik wird die anfängliche integrale Prüfung häufig mit einem Totaldruckmessgerät durchgeführt, das sowieso an der Kammer installiert ist. Ein Beispiel aus der Halbleiterindustrie ist die Leckprüfung mittels Druckanstiegsmethode, die nach jeder Wartung an der jeweiligen Vakuumproduktionsplattform durchgeführt wird. Alle Ventile aus der Gasversorgung und zum Pumpensystem sind geschlossen und die Druckerhöhung wird im Zeitverlauf überwacht. Der zeitaufgelöste Druckanstieg ist in Abbildung 6-1 dargestellt. Auf den

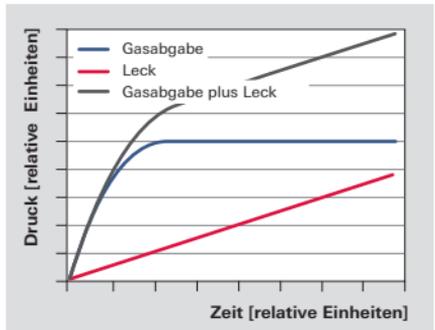


Abbildung 6-1: Zeitabhängiger Druckanstieg

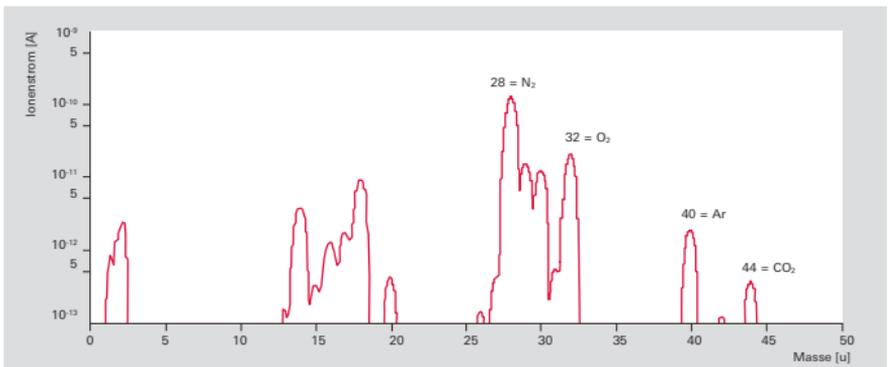


Abbildung 6-2: Massenspektrum eines Behälters mit einem Luftleck

Kammerwänden ist immer Gas adsorbiert. Damit wird zumindest die Anfangsphase einer Druckanstiegsprüfung durch Oberflächen-desorption beherrscht. Da sich die Gasmenge, die auf der Kammerwand adsorbiert ist (in der Anfangsphase sprechen wir über etwa 10^{19} Atome oder Moleküle pro Quadratmeter), im Verlauf der Zeit verringert, erzielt eine erste Prüfung möglicherweise ein negatives Ergebnis und eine zweite Prüfung erkennt die Kammer bereits als dicht.

Da die Wartezeit für einen eindeutigen Nachweis der oben angezeigten Kurven lang ist, kann eine integrale Leckprüfung mit einem Prüfgas schneller sein.

Ist ein Massenspektrometer in einem Vakuumsystem installiert, lässt sich ein Luftleck durch die Analyse des Massenspektrums nachweisen. Die hauptsächlichsten Gase in Luft, nämlich Stickstoff, Sauerstoff und Argon zeigen Signale bei den Massen 28, 32, und 40 u an. Das Verhältnis dieser Signale ist ein klarer Hinweis auf ein Luftleck.

Ausgehend von der Empfindlichkeit des jeweiligen Massenspektrometers für Stickstoff (die Empfindlichkeit des Massenspektrometers wird in den technischen Daten spezifiziert) lässt sich der Stickstoffpartialdruck berechnen. Dies ist nur möglich in Vakuumsystemen bei niedrigen Drücken, um kleine Lecks mit Leckageraten $< 10^{-5}$ Pa m³ s⁻¹ zu erkennen.

$$p_{(N_2)} = \frac{i_{(N_2)}}{Se_{(N_2)}}$$

$p_{(N_2)}$	Stickstoffpartialdruck
$i_{(N_2)}$	Stickstoffionenstrom
$Se_{(N_2)}$	Empfindlichkeit des Massenspektrometers für Stickstoff

In einem zweiten Schritt lässt sich der Stickstoff-Gasfluss aus dem Stickstoffpartialdruck und dem Saugvermögen abschätzen

$$Q_{(N_2)} = p_{(N_2)} \cdot S_{(N_2)}$$

$Q_{(N_2)}$	Leckagerate für Stickstoff
$S_{(N_2)}$	Saugvermögen für Stickstoff

Dies erlaubt zumindest eine grobe Abschätzung der Größenordnung des Lecks, welches dann mit einer Prüfgas-Sprühmethode gefunden werden muss.

Wir haben in diesem Abschnitt Verfahren zur integralen Lecksuche mit Totaldruck- und Partialdruck-Messgeräten aufgezeigt. Diese Methoden sind auch mit Prüfgasen durchzuführen.

6.2 Integraltest von Gegenständen, die in Vakuum eingeschlossen sind

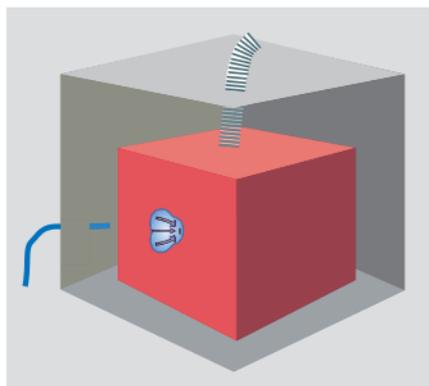


Abbildung 6-3: Integraler Vakuumtest eines evakuierten Prüfobjekts

In einer Prüfkammer wird das Prüfobjekt an einen Lecksucher angeschlossen und evakuiert. Zur Frage des Zeitaufwands, der Ansprechzeit und des weiteren theoretischen Hintergrunds verweisen wir auf Kapitel 2. Die Kammer wird mit Prüfgas gefüllt. Dies

ermöglicht definierte Prüfbedingungen mit präzisen Parametern für die Prüfgaskonzentration und den Prüfdruck. Falls ein Leck vorhanden ist, dringt das Prüfgas in das Teil und kann vom Lecksucher gemessen werden. Die Kammer kann sehr unterschiedlich sein. Es kann sich um eine steife Metallkammer handeln, die eine Vorevakuierung ermöglicht. Die nachfolgende Befüllung der evakuierten Kammer mit Prüfgas auf einen definierten Druck ist ein sehr schneller Prozess, der sicherstellt, dass Prüfgas um das Prüfobjekt verteilt wird, unabhängig von der Komplexität der Geometrie. Eine einfachere Einrichtung der Prüfkammer kann eine Plastikfolie sein, die um das Teil herum geklebt ist. Die Prüfgaskonzentration kann immer noch kontrolliert werden und der Prüfdruck ist 1.000 hPa.

Mit einer Folie kann die Vorevakuierungs-„Pumpe“ ein einfacher Staubsauger sein. Wir benötigen keinen extrem niedrigen Druck, wir müssen lediglich sicherstellen, dass die Prüfgasverteilung nicht von langsamer Diffusion beherrscht wird (Geschwindigkeit unter 1 cm pro Sekunde), sondern von einer schnellen Konvektion während des Befüllens.

Muss nicht der gesamte Prüfling getestet werden (z. B. nach einer lokalen Reparatur) ist es auch möglich, nur Abschnitte des zu prüfenden Teils abzukleben. Dies kann der Flansch eines großen Wärmetauschers oder eine einfache Schweißnaht sein. Im ersten Fall würde man immer noch eher eine Plastikfolie verwenden, die um den Wärmetauscher geklebt wird. Im zweiten Fall kann man einfach die Schweißnaht abkleben.

Stellen wir uns vor, dass das zu prüfende Teil eine Schweißnaht hat und vom Lecksucher evakuiert wird. Um schnell zu prüfen, ob die Naht undicht ist, kann man die Schweißnaht mit einer nicht klebenden Folie wie einem

FKM-Band abdecken. Dann wird dieses FKM-Band mit einem Klebeband überklebt und Prüfgas wird unter das FKM-Band injiziert. Das Druckdifferential zwischen Sprühsonde und Atmosphärendruck führt zu einer schnellen Gasverteilung unter dem FKM-Band und einem schnellen integralen Prüfergebnis.

Die integrale Prüfung eines evakuierten Teils ermöglicht quantitative Prüfungen mit sehr hoher Empfindlichkeit. Für die Serienproduktion ist ein hohes Maß an Automatisierung mit hohem Durchsatz und hoher Wiederholgenauigkeit möglich.

Wenn wir festgestellt haben, dass ein Teil undicht ist, müssen wir das Leck lokalisieren. Wenn das Teil noch an den Lecksucher angeschlossen ist, können wir einfach das Prüfgas entfernen. Dies kann durch Evakuierung der Kammer oder dem Entfernen des Klebebandes oder der Folie geschehen. Eine weitere Teilverbehandlung ist nicht erforderlich.

Hauptvorteile:

- Hoher Automatisierungsgrad möglich
- Sehr hohe Empfindlichkeit
- Hoher Durchsatz
- Hohe Wiederholbarkeit
- Kann auf internationale Richtlinien zurückverfolgt werden

6.3 Sprühtest

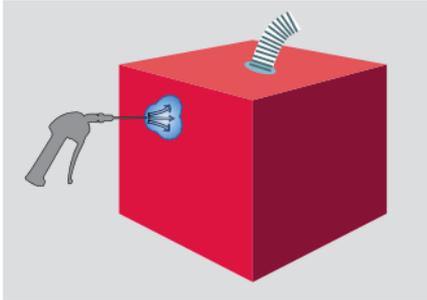


Abbildung 6-4: Sprühtest eines evakuierten Objekts

Der Lecksucher evakuiert das Gas im Inneren des Prüfobjekts. Danach wird das Prüfgas auf die äußere Fläche des Teils gesprüht. Der Detektor misst den Gasstrom durch den Leckkanal in der Wand des Prüfteils. Das Leck kann lokalisiert werden. Diese Methode gilt häufig als quantitative Messung. Da der Bediener jedoch nicht die Menge des Prüfgasess spezifizieren kann, die am Eintritt des Leckkanals vorhanden ist, gibt es keine Möglichkeit, das Ergebnis zu quantifizieren.

Wenn ein Bediener ein sehr großes Objekt prüfen muss, wie einen großen Behälter für tiefkalte Flüssigkeiten oder einen großen Wärmetauscher, muss er sich nicht um die Verbindung zwischen Prüfgasflasche und Sprühpistole kümmern, wenn er eine prüfgasgefüllte Blase direkt an die Verbindung seiner Sprühpistole anschließt.

Zur Prüfung großer Geräte ist es auch sehr hilfreich, eine kabellose Fernbedienung wie die RC 500 WL von Pfeiffer Vacuum zu haben. (Abbildung 6-5).



Abbildung 6-5: Kabellose Fernbedienung RC 500 WL

Es ist wichtig, mit so wenig Prüfgas wie möglich zu arbeiten. Andernfalls wird die Umgebung mit einem Überschuss an Prüfgas geflutet, das in nicht erkannte Lecks eindringt und das Hintergrundsignal erhöht. Der erste Schritt, dies zu vermeiden, ist der Einsatz eines guten Druckminderers an der Prüfgasflasche. „Gut“ bedeutet einen zweistufigen Druckminderer mit Durchflussregelung. Die Niederdruckseite sollte auf einen Druck leicht über dem Umgebungsdruck eingestellt werden. Die flexible Gasleitung zwischen Gasflasche und Sprühpistole sollte kurz sein, um Anreicherung und Druckaufbau des Prüfgasess in der Leitung zu vermeiden. Das Auslösen der Sprühpistole sollte nicht zu einer plötzlichen Freisetzung einer großen Prüfgasmenge führen, die das komplette zu prüfende Objekt fluten könnte. Die Sprühpistole sollte eine Heliumsprühpistole sein – nicht für Druckluft. Diese ist zu undicht und die Durchflussregelung ist nahezu unmöglich. Der Prüfgasstrom sollte etwa eine kleine Blase in einem Glas Wasser oder einen sehr leichten Gasstrom produzieren, den Sie gerade mit der Zunge spüren können. Beim Beginn der Lecksuche sollte das potentiell akkumulierte Prüfgas im Schlauch durch Betätigung der Sprühpistole hinter Ihrem Rücken oder überall außer in der Richtung des Prüfobjekts freigesetzt werden.

Der Sprühtest ist eine der häufigsten Prüfungsmethoden. Er ist einfach durchzuführen und ermöglicht die Lokalisierung von Lecks mit hoher Empfindlichkeit.

Die Ortsauflösung eines Sprühtests hängt stark von der verwendeten Sprühpistole ab. Mit den Sprühpistolen von Pfeiffer Vacuum kann man auch Nadeln in die Sprühspitzen einführen, um die Strömung zu minimieren und eine präzise Dosierung im Zielbereich zu ermöglichen.

Stellen Sie sich vor, dass Sie eine Durchführung mit vielen Pins prüfen müssen. Sie wissen, dass die Durchführung undicht ist, können aber die Leckagestelle nicht orten. Sie können den zu prüfenden Bereich mit einem konstanten Prüfgasstrom von der Sprühsonde ansprühen. Der Lecksucher zeigt eine bestimmte Leckagerate an. Dann benetzen Sie die einzelnen Pins mit Alkohol (Isopropanol) aus einer kleinen Flasche. Wenn Sie eine Signalerniedrigung sehen, haben Sie den undichten Pin erkannt.

Hauptvorteile:

- Möglichkeit der Leckageortung
- Sehr hohe Empfindlichkeit
- Einfache Durchführung
- Prüfung von Teilbereichen eines Objekts oder des gesamten Objekts
- Kosten nur für den Lecksucher, keine zusätzlichen Werkzeug- oder Anlagenkosten

Bisher haben wir ausschließlich Lecksuchverfahren mit evakuierten Prüfobjekten gezeigt. Jedoch werden viele Objekte unter Überdruck betrieben. Da man bei der Prüfung immer das gleiche Druckgefälle wie beim realen Betrieb des jeweiligen Teils verwenden sollte, brauchen wir auch Methoden für die Prüfung druckbeaufschlagter Objekte. Die einfachste dieser Methoden ist die Schnüffelprüfung.

6.4 Schnüffelprüfung

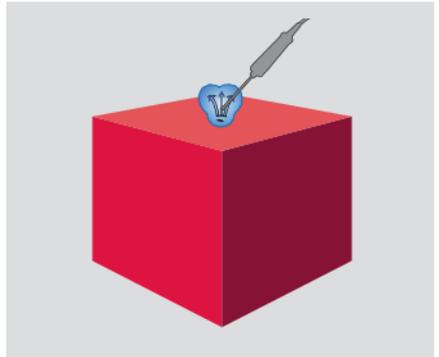


Abbildung 6-6: Lokalisierende Schnüffelprüfung eines druckbeaufschlagten Objekts

Das Prüfobjekt wird mit Prüfgas oder einem prüfgashaltigen Gasgemisch druckbeaufschlagt. Danach wird die Schnüffelsonde um das Teil herum bewegt. Wenn ein Leck vorhanden ist, erkennt der Lecksucher das entweichende Prüfgas und ermöglicht die Lecklokalisierung.

Durchsatz und Schlauchlänge der Schnüffelsonde beeinflussen die Signalansprechzeit und die angezeigte Signalintensität. Abbildung 6-7 zeigt für eine Schnüffelsonde mit kleinem Durchsatz eine Intensitätsabnahme, die quadratisch mit dem Abstand vom Leck sinkt. Dies ist ideal für eine gute Ortsauflösung bei der Lecklokalisierung. Für schnelle Messungen sollte man Schnüffelsonden mit hohem Gasdurchsatz verwenden.

Eine Schnüffelsonde sollte immer möglichst nahe am Leck positioniert werden. Die Schnüffelgeschwindigkeit sollte im Bereich von 1 cm pro Sekunde liegen. Da es eine Zeitverzögerung aufgrund des Gastransports durch die Schnüffelleitung gibt (abhängig von der Länge der Leitung), hat der Bediener das Leck passiert, wenn die maximale Signalintensität angezeigt wird. Aus

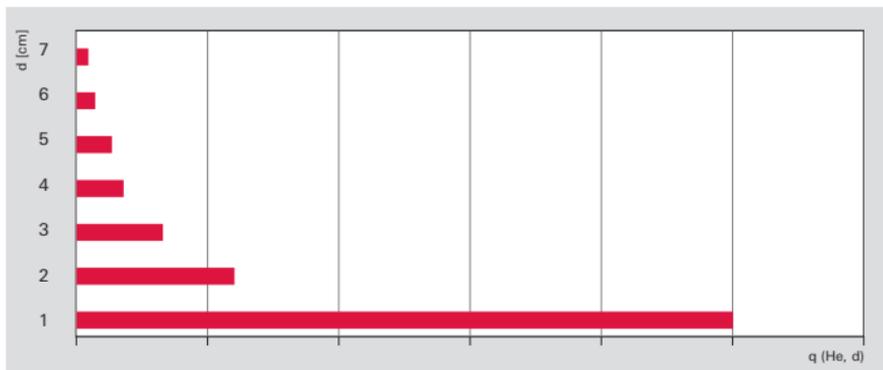


Abbildung 6-7: Angezeigte Signalintensität als Funktion des Abstands vom Leck

diesem Grund sollte man nach Detektion eines Lecks die Sonde in Gegenrichtung zurückfahren und immer langsamer werdend rückwärts und vorwärts um das vermutete Leck bewegen. Dies ermöglicht in Kombination mit der langsamen Links- und Rechtsbewegung eine optimale Lecklokalisierung.

Für die Schnüffellecksuche auf einem Gestell oder Gerüst sind leichte Lecksucher optimal, die zur jeweiligen Position transportiert werden können. In der Praxis muss die Lecksuche häufig mit einem stationären Lecksucher erfolgen, während der Bediener auf dem Gerüst arbeitet. In diesem Fall werden Schnüffelschläuche mit einer Länge von mehreren Dutzend Metern benötigt. Pfeiffer Vacuum liefert lange Schläuche oder Schlauchverlängerungen für diese Art der Anwendung. Jedoch wird die Ansprechzeit im Vergleich zum Arbeiten mit einer kurzen Schnüffelleitung verlängert.

Man kann auch eine auf Lecks zu prüfende Fläche mit Plastikfolie abdecken (Volumen unter der Folie minimieren!) und warten, bis das Prüfgas, das aus einem einzelnen oder mehreren Lecks herausströmt, zu einer erhöhten Konzentration unter der Folie geführt

hat. Nach einer bestimmten Zeit durchsticht der Bediener die Folie und kann prüfen, ob er einen Konzentrationsanstieg erkennen kann. Mit dieser Methode kann man beispielsweise Rohrplatten von Wärmetauschern mit Dutzenden oder Hunderten von Rohrverbindungen prüfen. Das vollständige Prüfen dieses Bereichs oder von Abschnitten unter einer Folie kann Zeit sparen, bis es sich lohnt, die einzelnen Rohrverbindungen zu prüfen.

Die Schnüffelprüfung gilt als eine lokalisierende Prüfmethode, nicht als Methode zur quantitativen Messung. Der Abstand vom Leck und die Orientierung der Schnüffelsonde zum Leck haben Einfluss auf das Prüfergebnis. Quantitative Messungen mit Schnüffelsonden sind im folgenden Kapitel beschrieben.

Hauptvorteile:

- Einfache Leckageortung
- Meist kein Evakuieren des Prüflings erforderlich
- Einfaches Verfahren
- Kosten nur für den Lecksucher, keine zusätzlichen Werkzeug- oder Anlagenkosten

6.5 Integraltest bei Atmosphärendruck

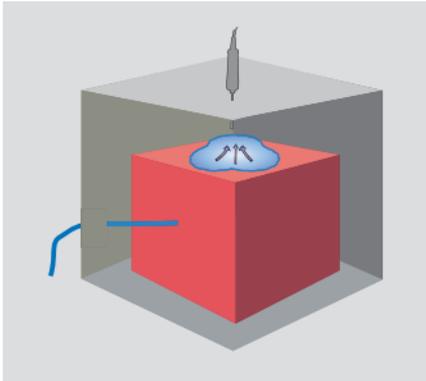


Abbildung 6-8: Integrale Prüfung eines druckbeaufschlagten Objekts unter Atmosphärendruck

Das Prüfobjekt wird mit Prüfgas druckbeaufschlagt und in eine einfache Akkumulationskammer gelegt, die unter Atmosphärendruck steht. Nach einer zu definierenden Akkumulationszeit analysiert der Detektor die Gaszusammensetzung im Inneren der Kammer und ermittelt, ob eine Erhöhung der Prüfgaskonzentration gemessen werden kann.

Mit Wasserstoff, Helium und vielen anderen Prüfgasen haben Sie immer ein natürliches Hintergrundsignal, da diese Gase natürliche Luftbestandteile sind. Mit der Akkumulationsmethode (auch Schnüffel-Hülle-Methode genannt) muss der Konzentrationsanstieg definiert werden, der auf dem natürlichen Untergrund noch als prozesssicher betrachtet wird.

Es ist wichtig, dass das freie Kammervolumen so klein wie möglich gehalten wird. Je kleiner das Volumen ist, desto sicherer ist die Messung und desto weniger Zeit brauchen Sie. Beachten Sie dazu Kapitel 2 für den theoretischen Hintergrund und Rechenbeispiele. Sie müssen auch sicherstel-

len, dass das aus dem Leck entweichende Prüfgas schnell und homogen im Kammervolumen verteilt wird. Dazu wird das Gas mit einem Gebläse umgewälzt. Als Faustregel sollten Sie ein Gebläse verwenden, das das Gas fünfmal umgewälzt hat, bevor Sie das Signal auf dem Detektor ablesen.

Die integrale Prüfung eines druckbeaufschlagten Objektes unter Atmosphärendruck ist eine kostengünstige integrale Methode. Sie kann zurückverfolgt werden auf Vorschriften, in denen sie als quantitative Methode gilt. Aus diesem Grund erfolgt die gelegentliche Prüfung großer Objekte häufig nach diesem Verfahren. Stellen Sie sicher, dass die Prüfeinrichtung den gemessenen Hintergrund nicht regelmäßig auf „NULL“ stellt, was auch den Konzentrationsanstieg durch Lecks eliminieren würde. Eine Lösung ist eine nicht kontinuierliche Prüfung der gemessenen Leckagerate in bestimmten Intervallen. Dies ist die einzige Lösung bei manchen kommerziell verfügbaren Wasserstoff-Lecksuchern. Die andere ist eine kontinuierliche Messung mit einer Schnüffelsonde mit geringer Durchflussmenge, was mit jedem Helium-Lecksucher möglich ist.

Falls eine Folie oder ein Kunststoffbehälter verwendet wird, sollte auch das Permeationsverhalten der verwendeten Abdeckung geprüft werden. Der Prüfgasverlust durch Permeation durch eine Folie sollte mindestens eine Dekade unter der gewünschten Nachweisgrenze liegen

Hauptvorteile:

- Kostengünstige Prüfkammer
- Einfache Integration in eine Produktionslinie

6.6 Integraler Vakuumtest

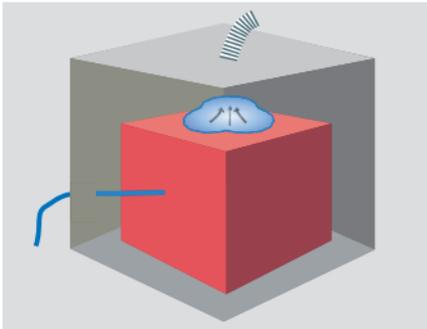


Abbildung 6-9: Integrale Prüfung eines druckbeaufschlagten Objekts unter Vakuum

Das Prüfobjekt wird in eine Vakuumprüfkammer eingebracht und mit Prüfgas gefüllt. Sollte ein Leck vorhanden sein, entweicht das Prüfgas aus dem Objekt in die Prüfkammer und wird vom Lecksucher gemessen.

Diese Methode ist normalerweise viel schneller als die im vorherigen Kapitel beschriebene Lecksuche unter atmosphärischen Bedingungen. Die Prüfgeschwindigkeit im Vakuum ist viel höher als unter Atmosphärenbedingungen und die Reaktionszeit wird bestimmt durch das zu evakuierende Volumen und das effektive Saugvermögen. Durch Minimierung des Totvolumens und Maximierung des effektiven Saugvermögens kann man für eine sehr schnelle Messung und eine sehr kurze Zykluszeit sorgen. Aus diesem Grund ist die integrale Prüfung eines druckbeaufschlagten Objekts die wichtigste Methode bei der industriellen Lecksuche.

Hauptvorteile:

- Sehr hohe Empfindlichkeit
- Hoher Teiledurchsatz
- Einfache Integration in eine Produktionslinie
- Einfache Kalibrierung
- Hohe Wiederholgenauigkeit
- Kann auf internationale Normen und Richtlinien zurückgeführt werden

6.7 Drucklagerungstest

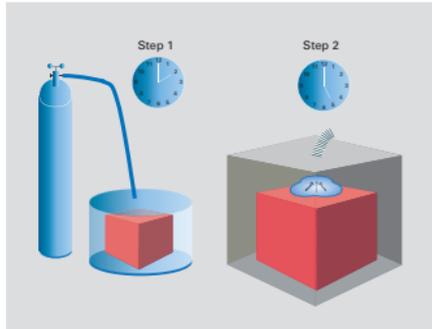


Abbildung 6-10: Integrale Drucklagerungsprüfung (Bombing-Test)

Die integrale Drucklagerungsprüfung (auch Bombing-Test genannt) wird bei Teilen angewendet, die hermetisch dicht sind und nicht in einem Vakuumsystem evakuiert oder mit einer Prüfgasversorgung druckbeaufschlagt werden können. Das freie Volumen (welches das Prüfgas enthalten kann – das Gesamtvolumen kann größer sein) der Teile ist typischerweise einige Kubikzentimeter oder -millimeter. Beispiele sind kleine gekapselte elektrische oder elektronische Bauteile, Herzschrittmacher, Leuchtmittel, Airbag-Gasgeneratoren und Lebensmittel- oder Arzneimittelverpackungen. Die Funktion dieser Teile muss über einen Zeitraum von mehreren Jahren garantiert werden und erfordert eine niedrige Nachweisgrenze. Aus diesem Grund kann die zu erfassende Leckagerate nur mit einem Helium-Lecksucher gemessen werden.

Der zweite Schritt einer Bombing-Prüfung ist identisch mit der im vorhergehenden Kapitel beschriebenen integralen Prüfung eines druckbeaufschlagten Objekts unter Vakuum. Zunächst muss das Prüfgas in das zu prüfende Teil eingebracht werden. Dies kann entweder durch Versiegeln des Objekts in einer prüfgashaltigen Atmosphäre oder durch Drucklagerung erfolgen. Im zweiten

Fall wird das Prüfteil in eine spezielle Kammer (Bombing-Kammer) gebracht und mit Prüfgas druckbeaufschlagt. Sollte ein Leck vorhanden sein, wird das Prüfgas durch den Gasdruck in das Teil hineingedrückt. Die Gasmenge, die in das Prüfobjekt hineingedrückt wird, wird durch die Parameter Leckgröße, freies Innenvolumen des Prüfobjekts und Bombing-Druck bestimmt.

Nach der Druckbeaufschlagung wird das Teil aus der Kammer entfernt und über einen kurzen Zeitraum atmosphärischen Bedingungen ausgesetzt. Das auf der Oberfläche oder in kleinen Löchern vorhandene Helium lässt man desorbieren.

Danach wird das Prüfteil in eine Vakuumkammer gelegt, die dann evakuiert wird. Das Prüfgas, das durch ein eventuelles Leck in das Innere des Prüfobjekts gedrückt wurde, wird nun entweichen und vom Lecksucher gemessen.

Die Bombing-Prüfung ist keine Prüfung, für die gilt: „What you see is what you get“. Jedes angezeigte Leckageratensignal an einem Helium-Lecksucher kann entweder ein großes oder ein kleines Leck sein. Die obere und untere Nachweisgrenze der Methode kann berechnet werden und eine Hüllkurve für die nachzuweisenden Leckageratenbereiche wird modelliert. Der dynamische Bereich der Methode kann durch Wahl der Bombingparameter beeinflusst werden.

Der Prüfgasverlust über ein großes Leck kann so schnell sein, dass der gesamte mühsam in das Prüfteil gedrückte Prüfgasvorrat verloren geht und die Methode gegen große Lecks blind ist. Aus diesem Grund, muss eine zweite Prüfmethode angewendet werden, um sicherzustellen, dass kein Leck übersehen wird. Dies ist z. B. möglich durch einen Blasentest oder eine optische Inspektion (häufig automatisiert mit CCD-Kamera und Bilddatenverarbeitung). Die Dichtheits-

prüfung mit Prüfgas sollte immer zuerst durchgeführt werden.

Hauptvorteile:

- Einzige Lösung zur Prüfung hermetisch dichter Bauteile mit hoher Empfindlichkeit
- Hohe Wiederholgenauigkeit

6.8 Methoden und Geräte

In den Abschnitten unten haben wir gezeigt, dass die Prüfgas-Lecksuche eine sehr leistungsfähige und vielseitige zerstörungsfreie Prüfmethode ist. Pfeiffer Vacuum bietet ein

einzigartiges Spektrum an Lecksuchern für viele Anwendungen

Die empfohlenen Lecksucher für die jeweiligen Prüfmethoden sind:

	Vakuumentest: Sprühtest	Schnüffel- prüfung	Integraler Vakuumentest	Vakuumentest: Drucklage- rungstest	Integraltest bei Atmos- phärendruck	Integraltest von Gegen- ständen, die im Vakuum eingeschlos- sen sind
Mini Test	■					
ASM 310	■	■				
ASM 340	■	■	■		■	■
ASM 340 D	■	■	■		■	■
ASM 380	■	■	■		■	■
ASM 182 T	■	■	■	■	■	■
ASM 182 TD+	■	■	■	■	■	■
ASM 192 T	■	■	■	■	■	■
ASM 192 T2D+	■	■	■	■	■	■
ASM 1002	■	■	■	■	■	■
ASI 30		■	■		■	■
ASM 102 S		■				
Quadrupol MS	■					■
QMS-basierendes Gasanalyse- system		■			■	

Tabelle 6-1: Empfohlene Lecksucher für die jeweiligen Prüfmethoden

7 Auswahl eines Lecksuchverfahrens

Die Anforderungen von Hochtechnologien und moderne Fertigungsmethoden haben zu einer Spezialisierung von Lecksuchverfahren geführt. Lecksuchmethoden müssen sowohl in Fertigungslinien mit kurzen Taktzeiten, unter ungünstigen Betriebsbedingungen oder an Bauteilen mit komplexen Geometrien eingesetzt werden können.

Wie in Kapitel 1 dargelegt, gibt es keine absolut dichten Bauteile. Die Leckagerate ist eine messbare Eigenschaft der Komponente oder des Systems, das geprüft werden muss. Ein Dichtheitskriterium muss nach der Funktion und Lebensdauer des jeweiligen Objekts definiert werden. Unter der Voraussetzung, dass das Dichtheitskriterium gemessen werden kann, wird die maximale Leckagerate als Kriterium für die Annahme oder Zurückweisung nach technischen und wirtschaftlichen Überlegungen festgelegt. Wenn das Dichtheitskriterium definiert ist, kann die am besten geeignete Lecksuchmethode ausgewählt werden.

7.1 Schaumbildende Mittel

Das Auftragen eines dünnen Films aus Seifenlauge (oder einer schaumbildenden Spezialchemikalie) auf ein druckbeaufschlagtes Teil ist eine traditionelle und einfache Methode zur Lecksuche. Mit ihr können Leckagen lokalisiert werden. Zu den Nachteilen der Prüfung mit schaumbildenden Mitteln gehört die Benetzung der Prüfteile mit einer möglichen daraus folgenden Be-

schädigung, Korrosion oder Beeinträchtigung des Aussehens der geprüften Teile. Die Prüfung mit schaumbildenden Mitteln ist zudem keine sehr empfindliche Methode, die Wiederholgenauigkeit ist beschränkt und die Quantifizierung der Lecks ist nicht möglich. Die Prüfung sehr großer Leckagen ist nicht möglich, da der Film möglicherweise durch den Gasstrom durch das Leck sogar weggeblasen wird. Der Haupteinsatzbereich der Prüfung mit schaumbildenden Mitteln ist eine schnelle und einfache Werkerprüfung im industriellen Einsatz.

7.2 Blasenprüfung

Die Blasenprüfmethode ist vermutlich eine der ältesten Methoden der Dichtheitsprüfung und wird von vielen Anwendern bereits im Kindesalter angewendet. Ein Loch in einem Fahrradreifen ist ein gutes Beispiel für den Effekt eines Lecks auf die Leistung des Bauteils sowie für die Diagnose und Reparatur. Die Diagnose mittels Blasenprüfung, also Eintauchen eines druckbeaufschlagten Objekts (des aufgepumpten Fahrradreifens) in Wasser ist eine traditionelle und einfache Methode der Leckprüfung. Das Leck kann einfach und zuverlässig lokalisiert werden. Der aufsteigende Blasenstrom gibt einen groben Hinweis auf die Größe des Lecks. Es ist aber nicht immer möglich, ein Prüfobjekt mit einem vermuteten Leck einzutauchen. Ein Blasentest kann zudem zu Korrosion führen. Unter bestimmten Umständen kann das Trocknen viel Zeit in Anspruch nehmen. Die

Empfindlichkeit der Blasenprüfung im Wasserbad ist begrenzt. Die Wiederholbarkeit ist wegen der Werkerabhängigkeit der Prüfung eingeschränkt. Wegen ihrer Einfachheit wird sie aber trotzdem oft als erste Methode eingesetzt, wenn ein Betrieb Dichtheitsprüfungen einführt.

7.3 Druckabfall

Bei Druckabfallprüfungen wird das zu prüfende Bauteil mit Überdruck beaufschlagt. Prüfmedium ist meistens trockene Luft. Nach der Beaufschlagung wird eine Druckänderung im abgesperrten Bauteil überwacht. Wird ein Druckabfall beobachtet, ist dies ein Hinweis auf ein Leck.

Druckabfallmethoden sind sehr häufig und haben viele Anwendungen in der integralen Dichtheitsprüfung. Druckabfallmethoden können jedoch keine Lecks lokalisieren. Die

Anwendungsbereiche einer Druckabfallprüfung sind begrenzt durch die eingeschränkte Empfindlichkeit der Methode sowie Einflüsse der Prüfobjekte und der Prüfumgebung. Prüflinge mit großen Innenvolumina, Prüfobjekte mit flexiblen Wänden oder auch Temperaturänderungen während der Prüfung machen den Einsatz einer Druckabfallprüfung oft unmöglich.

7.4 Lecksuche mit Prüfgasen

Bei Pfeiffer Vacuum sind wir auf die Lecksuche mit Prüfgas spezialisiert. Der Grund dafür liegt darin, dass das hauptsächlich eingesetzte Prüfgas Helium hochempfindlich nachgewiesen werden kann und die Detektortechnologie extrem selektiv ist. Helium ist ein leichtes Gas mit schnellen Diffusions- und Permeationszeiten. Es weist ein reproduzierbares Verhalten auf und ermöglicht unbegrenzt wiederholbare Prüfungen,

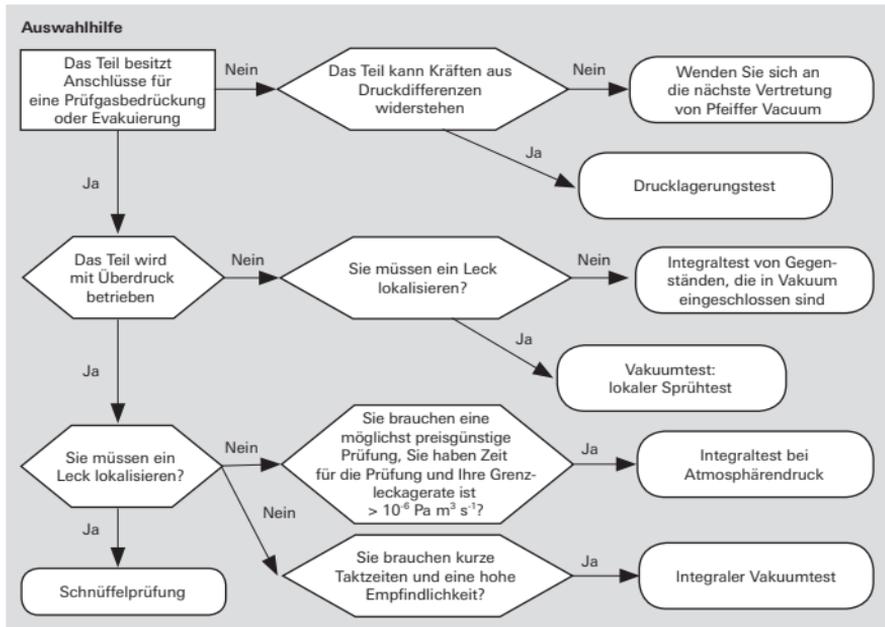


Tabelle 7-1: Auswahlhilfe für Lecksuchverfahren

was besonders in der Serienproduktion ein wichtiges Entscheidungskriterium ist. Die zu prüfenden Teile werden nicht befeuchtet, die Gefahr der Korrosion durch das Prüfmedium besteht nicht. Mit Helium ist keine Probenachbehandlung wie Trocknen nach der Prüfung erforderlich. Helium ist ein Edelgas, das nicht mit anderen Stoffen reagiert. Helium ist ein 100% umweltfreundliches Gas ohne Einfluss auf Umwelt oder Atmosphäre. Es ist FDA-zugelassen und hat die Nummer E939 als Lebensmittelzusatzstoff.

Warum sollte man nun eine Prüfgaslecksuche anwenden? Aus der Sicht eines Produktionsleiters sind die Hauptvorteile:

- Man repariert nur, was wirklich repariert werden muss.
- Man erhält ein schnelles Qualitätsfeedback im Produktionsprozess, das korrigierende Maßnahmen in unmittelbar vorgeschalteten Produktionsschritten erlaubt.
- Man findet Lecks, die mit anderen Methoden nicht mehr nachzuweisen sind.
- Man vermeidet teure „Überqualität“.
- Man vermeidet das Trocknen/Reinigen der Produkte nach der Lecksuche.
- Man kann heiße/kalte Produkte prüfen.
- Man kann die Prüfung automatisieren und erhält ein zuverlässiges Ergebnis.

Obwohl die Prüfgas-Lecksuche nicht die kostengünstigste Prüfmethode ist, bietet sie einige wirtschaftliche Vorteile:

- Weniger Prozessschritte führen zu geringeren Produktionskosten pro Bauteil.
- Weniger Ausschuss, schnellerer Durchsatz.
- Geringere qualitätsbedingte Kosten.
- Höhere Margen / bessere Wettbewerbsposition.
- Weniger gebundenes Kapital in der Produktion.
- Bessere Wettbewerbsposition durch hohe Akzeptanz und Normenkonformität.

Die Prüfgaslecksuche kann in einer Vielzahl von Verfahrensvarianten eingesetzt werden, die von der aktuellen Prüfaufgabe bestimmt wird. Tabelle 7-1 gibt einen Auswahlleitfaden für die am besten anzuwendende Lecksuchmethode.

7.5 Prüfgase und geeignete Analysegeräte

Wird Helium als Prüfgas definiert, ist der Weg zu einem Helium-Lecksucher als Analysegerät ein logischer Schritt. Einige spezielle Prüfgeräte für Formiergas (95% Stickstoff, 5% Wasserstoff) sind auf dieses Prüfgas und den reinen Schnüffelbetrieb beschränkt. Dagegen kann ein klassischer Helium-Lecksucher sowohl mit den Prüfgasen Helium, Wasserstoff bzw. Formiergas und auch für Schnüffel- und Vakuummethoden eingesetzt werden. Mit Formiergas als Prüfgas wird der Signaluntergrund allerdings höher sein als mit dem Prüfgas Helium.

Für alle anderen Prüfgase ist ein Gasanalyssystem basierend auf einem Quadrupol-Massenspektrometer das Instrument der Wahl.

8 Industrielle Dichtheitsprüfung und Helium-Rückgewinnungsanlagen

8.1 Lecksuchanlagen

Die industrielle Dichtheitsprüfung vieler Teile kann üblicherweise mit Standardlecksuchern und mit manueller Be- und Entladung erfolgen. Ein Beispiel ist die Dichtheitsprüfung eines hermetisch geschlossenen elektronischen Bauteils. Der Bediener legt die Bauteile in eine Prüfkammer, die in der Arbeitsfläche des Lecksuchers integriert ist, und erhält das Ergebnis durch ein einfaches optisches Signal im Stil einer Verkehrsampel.

Häufig gibt es Anforderungen, die von einem Standardlecksucher nicht erfüllt werden können. Dies kann die Rückverfolgbarkeit eines Teils durch den Produktionsprozess sein, die Menge der zu prüfenden Teile oder die Umsetzung einer Dichtheitskontrolle in einer Produktionslinie. Ein hoher Automatisierungsgrad ermöglicht beispielsweise die optimale Reproduzierbarkeit der Messungen mit definiertem Untergrundsignal und Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Ein anderes Kriterium kann sein, dass von einer werkerabhängigen Prüfung auf eine vollautomatische Prüfung mit systemintegrierter Datenanalyse und fehlerfreiem, bedienerunabhängigem Ausschleusen der undichten Teile umgestellt werden soll. Im Allgemeinen können die Anforderungen an eine industrielle Lecksuchanlage wie folgt zusammengefasst werden:

- hoher Durchsatz der zu prüfenden Teile
- hohe Zuverlässigkeit des eingesetzten Prüfprozesses
- hohe Reproduzierbarkeit der Prüfergebnisse

- hoher Automatisierungsgrad
- hohe Anlagenverfügbarkeit
- Robustheit in industrieller Produktionsumgebung
- Datenanalyse und -transfer
- Selbstdiagnose des Systems
- Ferndiagnose und kurzfristige Verfügbarkeit eines weltweiten Servicenetzes

Die größte Herausforderung bei der Auslegung einer Lecksuchanlage ist das technische Verständnis des zu prüfenden Teils. Die detaillierte Prozessanalyse kombiniert mit einem umfassenden Know-how zur Lecksuch- und Vakuumtechnologie sind die wichtigsten Fähigkeiten, die mit klassischen Kenntnissen des Maschinen- und Anlagenbaus kombiniert werden müssen.

Für quantitative Ergebnisse benötigen wir immer eine Prüfkammer. Die gewünschte Taktzeit und Dichtheitsspezifikation bestimmen hauptsächlich, ob eine atmosphärische Kammer oder eine Vakuumkammer eingesetzt werden muss. Kurze Zykluszeiten erfordern häufig Vakuumsysteme. Eine typische Prüfeinrichtung besteht immer aus

- dem zu prüfenden Teil
- teilespezifischen Abdichtwerkzeugen zur Adaptierung des zu prüfenden Teils
- Prüfkammer
- Lecksucher
- kalibriertem Prüffleck
- Pumpen für die Vorevakuierung des Prüfobjektes, Kammerevakuierung und Abpumpen des Prüfgases
- Prüfgasversorgung

- Anlagensteuerung
- Probentransfersystem

Abbildung 8-1 zeigt die schematische Darstellung einer Lecksuchanlage.

Wichtige Anwendungen der industriellen Dichtheitsprüfung sind:

- Automobilbau
 - Kraftstoffführende Bauteile: Tanks aus Kunststoffen und Metall, Kraftstofffilter, Kraftstoffzuführung und -leitungen, Kraftstoffpumpen und -filter, Tankdeckel
 - Bauteile für die Kälte- und Klimatechnik: Kompressoren, Kondensatoren, Kältemittelschläuche und -baugruppen, Kältemittelpumpen, Heizungsregelventile, Thermostatventile, Hochdruckventile
 - Bauteile für die Abgasreinigung: AdBlue®-Tanks, AdBlue®-Füllstandssensoren, AdBlue®-Schlauchbaugruppen, Zuführmodule, Dosiermodule
 - Airbagkomponenten: Anzünder, Gasgeneratoren
 - Bauteile für Luftfederungssysteme: Luftfedern, Luftspeicherbehälter, Kompressoren, Magnetventile

- Medizinische Geräte: Katheder, Herzschrittmacher, Endoskope, Implantate, Einwegkomponenten wie Schläuche und Zubehör
- Energie: Hoch- und Mittelspannungsschalter, Überspannungsableiter, Solar-Receiver
- Industrie: Feuerlöscher, Druckbehälter, Wärmetauscher, Filter, Druck- und Durchflusssensoren, Lebensmittel- und Arzneimittelverpackungen
- Luft- und Raumfahrtindustrie: Kraftstoffsysteme, Motoren, Fahrwerke, Belüftungssysteme

8.1.1 Übersicht

Jede Lecksuchanlage besteht mindestens aus den Kernkomponenten Lecksucher, Pumpsystem, Gasversorgung und Prüfkammer. Durch die Standardisierung dieser vier Hauptfunktionsgruppen kann man ein kostengünstiges Einzel- oder Doppelkammersystem mit manueller Bestückung aufbauen. Anpassungen erfolgen nur im Hinblick auf die Auslegung der Prüfkammer und die spezifische Adaptierung der zu prüfenden Teile.

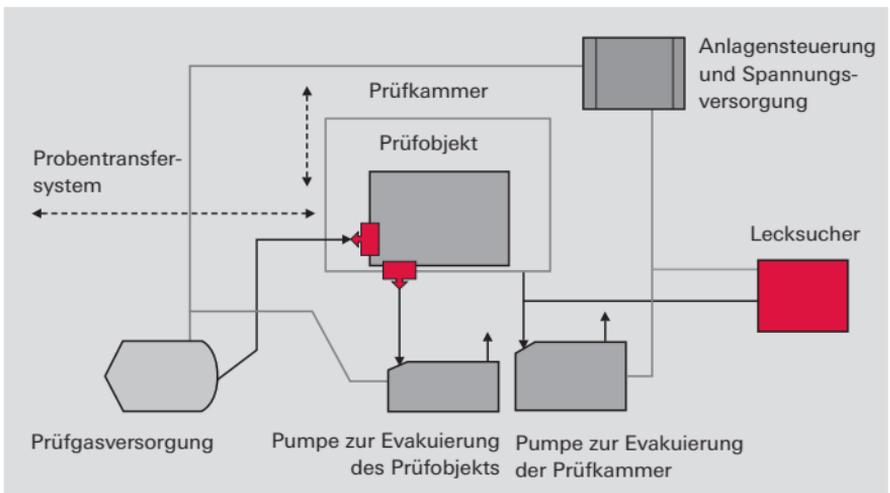


Abbildung 8-1: Schematische Darstellung einer industriellen Dichtheitsprüfanlage

Abbildung 8-2 zeigt die standardisierte Prüfanlage LTS_{eco} von Pfeiffer Vacuum.



Abbildung 8-2: Lecksuchanlage Pfeiffer Vacuum LTS_{eco}

Dieses halbautomatische System kann mit einer oder zwei Prüfstationen und Kammern mit einem Volumen von maximal 50 Litern ausgestattet werden. Die Prüfkammern können ausgetauscht werden.

Die in Abbildung 8-3 gezeigte Serie LTS_{compact} ist ein voll integriertes Lecksuchsystem mit einer Mindeststellfläche von weniger als 2 Quadratmetern. Mit einem Kammervolumen von maximal 3 Litern ist es für kleine Teile ausgelegt. Eine optionale Hochdruck-Prüfgasversorgung ermöglicht Testdrücke bis zu 25 MPa. Die automatische Kammerabdeckung ist mit einer Lichtschranke ausgestattet. Der höhere Automatisierungsgrad kann durch ein Probentransfersystem ergänzt werden.



Abbildung 8-3: Lecksuchanlage Pfeiffer Vacuum LTS_{compact}

Prüflecks und Abdichtwerkzeuge (siehe Kapitel 8.1.2 Abdichtwerkzeuge) sind in allen Lecksuchsystemen von Pfeiffer Vacuum integriert. Wenn die Anforderungen nicht mit den Systemen LTS_{eco} oder LTS_{compact} erfüllt werden können, kann eine kundenspezifische Anlage aus den Baureihen LTS_{clima} oder LTS_{fuel} auf die jeweiligen Bedürfnisse abgestimmt werden. Häufig werden sehr kurze Taktzeiten bei der Prüfung angestrebt, die noch unter der Rate der Produktionsanlagen liegen.

Die Identifikation der Prüfteile im Produktionsfluss kann durch eine Produktetikettierung und Markierung der guten Teile oder Zerstörung der schlechten Teile noch in der Prüfanlage unterstützt werden.

Das modulare Design der Prüfanlagen vereinfacht sowohl Transport und Lieferung als auch die Nach- oder Umrüstung. Module sind z. B. das Pumpenmodul, das Kammermodul, das Türmodul und der elektrische Schaltschrank.

Zusätzlich zur Kernaufgabe „Lecksuche“ können industrielle Dichtheitsprüfanlagen auch andere Funktionen integrieren wie

- mechanische Prüfungen (z. B. Berstdruckprüfung)
- Gasdurchfluss- / Durchsatzmessungen (z. B. bei Rohren oder Leitungen)
- Elektrische Prüfungen

Die Prüfanlagen können mit maximaler Flexibilität ausgelegt werden, um beispielsweise höchste Auflösung beim Prüfdruck einstellen zu können. Der große dynamische Bereich eines oder mehrerer Prüfparameter erlaubt bestmögliche Flexibilität bei der Entwicklung und Industrialisierung eines neuen Teiledesigns und Untersuchung von dessen Prüfbarkeit.

8.1.2 Abdichtwerkzeuge

Die Abdichtung des Prüfbjektivs mit höherer Dichtheit als die Spezifikation des zu prüfenden Objekts ist eines der Schlüsselkriterien der gesamten Dichtheitsprüfanlage.

Sind für ein Prüfbjektiv keine Standardwerkzeuge verfügbar, ist Pfeiffer Vacuum in der Lage, eigene Adaptierungswerkzeuge für alle Anforderungen zu konstruieren:

- Glatte Enden
- Gequetschte, konische, gebördelte, geflanschte oder konische Schlauchenden
- Minidurchmesser
- Internes oder externes Gewinde

8.1.3 Prüfflecks

Integrierte Prüfflecks mit einem leicht höheren Wert als der festgelegte Schwellenwert ermöglichen die Kalibrierung im Empfindlichkeitsbereich, in dem die Prüfung statt-

findet. Die Wiederholbarkeit der Prüfung kann mit dem Prüffleck überwacht werden. Die Autokalibrierung kann in regelmäßigen Abständen oder nach einer festgelegten Teileanzahl erfolgen. Der Vergleich der Grenzleckagerate und des Hintergrundsignals ermöglicht eine präzise Bestimmung eines minimalen Signal-zu-Rausch-Verhältnisses und der Zuverlässigkeit der Messung. Wenn ein festgelegter Hintergrund nicht erreicht wird, startet das System mit einer automatischen Spülfunktion, welche die optimale Prozesszuverlässigkeit sicherstellt.

Die Integration eines Prüfflecks in ein dicht geprüftes reales Prüfbjektiv ermöglicht den Bau eines Master-Teils. Mit einem Master-Teil werden sowohl die quantitative Kalibrierung als auch die Integrität der Abdichtungswerkzeuge in einem einzigen Testlauf unter Prüfbedingungen bestätigt.



Abbildung 8-4: Beispiel für spezielle Abdichtwerkzeuge von Pfeiffer Vacuum



Abbildung 8-5: Beispiel eines Helium-Prüfleckes von Pfeiffer Vacuum



Abbildung 8-6: Beispiel eines Prüfleckes (Kapillarleck) integriert in eine Schraube zum Einbau in ein Master-Teil

8.1.4 Anwendungsbeispiel: Doppelkammer-Prüfanlage für Kältemittelschläuche

Die integrale Doppelkammer-Heliumdichtheitsprüfanlage LTS_{clima} KLS/72 wird eingesetzt für die Prüfung von bis zu 200 Kfz-Kältemittelleitungen pro Stunde. Die kleinste nachweisbare Leckagerate des Systems ist $8 \cdot 10^{-7} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$ ($8 \cdot 10^{-6} \text{ mbar l s}^{-1}$) bei einem Prüfdruck von 5 MPa und einer Heliumkonzentration von 100% (äquivalent zu einem Verlust von 2 g Kältemittel R134a pro Jahr).

Für die zu prüfenden Kältemittelleitungen wurden spezielle Abdichtwerkzeuge entwickelt. Dies war Voraussetzung für die höchste Effizienz des Prüfzyklus. Bis zu vier identische Kältemittelleitungen können gleichzeitig geprüft werden. Das System bietet die Option, entweder die integrale Leckagerate für alle vier Kältemittelleitungen

oder die individuellen Leckageraten jeder einzelnen Leitung nacheinander zu bestimmen, was eine längere Taktzeit erfordert. Außerdem ist es auch möglich, eine Handschnüffelsonde zu verwenden, um die Leckstellen in einer einzelnen Leitung exakt zu lokalisieren.

Durch Integration der Abdichtwerkzeuge in austauschbare Rahmen beträgt die Umrüstzeit der gesamten Anlage für den Test eines anderen Typs von Kältemittelleitungen weniger als fünf Minuten.

Teile, die die Prüfungen bestanden haben, werden markiert, undichte Teile nicht. Die Markierung erfolgt noch in der Kammer und es besteht keine Notwendigkeit zur manuellen Intervention durch den Bediener nach der Kammeröffnung. Kein undichtiges Teil kann die Fabrik verlassen.

Die Anlage wird von einer SPS Siemens S7 (andere SPS sind auf Wunsch verfügbar) gesteuert, wobei der Prüfprozess auf einem Monitor angezeigt wird. Der Monitor ermöglicht auch einen einfachen Zugang zur Steuerung, die weitere Daten speichert wie die Prozessparameter, ergänzende statistische Daten, Fehlerhistorie, Servicemodus, Schnüffelmodus, Einzelleitungsprüfung usw.

Zusätzlich ist das System mit internen Prüflecks ausgestattet, die regelmäßig eine

automatisierte Kalibrierung der Anlage durchführen und diese auf ordnungsgemäßen Betrieb überprüfen.

Um die Heliumkosten zu minimieren, ist eine Helium-Rückgewinnungsanlage (siehe nächstes Kapitel) in die Lecksuchanlage integriert.

Die Betriebsparameter der Helium-Lecksuchanlage LTS_{clima} KLS/72 sind in Tabelle 8-1 aufgeführt.



Abbildung 8-7: Helium-Lecksuchanlage LTS_{clima} KLS/72 zur Dichtheitsprüfung von Kältemittelleitungen

Typ Lecksuchanlage	LTS _{clima} KLS/72
Prüfobjekt	Kältemittelleitungen mit unterschiedlichen Geometrien
Max. Prüfdruck, Luft	4 MPa (40 bar)
Max. Prüfdruck, Helium	5 MPa (50 bar)
Heliumkonzentration	100 % (variabel)
Max. Teiledurchsatz	200 Kältemittelleitungen pro Stunde
Abmessungen Prüfkammer	1.500 x 1.000 x 480 mm (B x H x T)
Grenzlackgerate	2 g/a R134a = $8 \cdot 10^{-7}$ Pa m ³ s ⁻¹ bei 5 MPa Prüfdruck und 100% Heliumkonzentration
Abmessungen Anlage	5.400 x 3.100 x 3.000 mm (B x H x T)

Tabelle 8-1: Betriebsparameter Lecksuchanlage LTS_{clima}-KLS/72

8.2 Helium-Rückgewinnungsanlagen

Eine Helium-Rückgewinnungsanlage fängt das Helium aus einer Helium-Lecksuchanlage (möglicherweise auch aus einem kryogenen System, das Helium als Kältemittel verwendet) in einem Lagerbehälter auf und bereitet es für die Wiederverwendung vor. Angeschlossen an eine Lecksuchanlage wird die Heliumkonzentration konstant von einem Online-Sensor überwacht, wobei gegebenenfalls Helium aus einem Standardgaszylinder nachgefüllt wird.

Helium-Rückgewinnungsanlagen werden hauptsächlich in Anwendungen mit hohem Prüfgasverbrauch eingesetzt – in anderen Worten, wenn eine große Menge großvolumiger Teile bei hohen Drücken geprüft wird. Es können Rückgewinnungsraten von über 98% erzielt werden. Eine optionale Reinigungsstufe ermöglicht noch höhere Gasqualitäten.

8.2.1 Überblick

Die Parameter der Pfeiffer Vacuum Standard-Helium-Rückgewinnungsanlagen sind in Tabelle 8-2 aufgeführt.

Zusätzlich können kundenspezifische Helium-Rückgewinnungsanlagen geliefert werden. Basierend auf den folgenden Parametern kann Pfeiffer Vacuum Speziallösungen vorschlagen:

- Taktrate
- Volumen des geprüften Teils
- Teildurchsatz
- Prüfdruck
- Maximaler und durchschnittlicher Gasdurchsatz
- Prüfgaskonzentration

8.2.2 Anwendungsbeispiel

Eine Standard-Helium-Rückgewinnungsanlage kann mit einer oder mehreren Lecksuchanlagen kombiniert werden. Das bei einem Test verwendete Prüfgas wird in einen Pufferbehälter evakuiert.

Betrachten wir das zuvor genannte Beispiel einer Lecksuchanlage. Wenn wir pro Testzyklus von der gleichzeitigen Prüfung von vier Teilen mit einem Volumen von jeweils 0,3 Litern, einem Prüfdruck von 5 MPa und



Abbildung 8-8: Pfeiffer Vacuum Helium-Rückgewinnungsanlage

Parameter	Ballon			Behälter		
Modell	CB13-35	CB11-55	CB10-200	CV12-10	CV16-55	CV33-55
Max. Durchsatz	210 NI min ⁻¹	180 NI min ⁻¹	180 NI min ⁻¹	200 NI min ⁻¹	260 NI min ⁻¹	550 NI min ⁻¹
Max. Betriebsdruck	3,5 MPa	5,5 MPa	20 MPa	1,0 MPa	5,5 MPa	5,5 MPa
Verdichtung Kompressor	Ölgedichtet	Ölgedichtet	Ölgedichtet	Ölgedichtet	Ölfrei	Ölfrei
Rückgewinnungsrate	< 95 %	< 95 %	< 95 %	< 98 %	< 98 %	< 98 %

Tabelle 8-2: Übersicht der Pfeiffer Vacuum Standard-Helium-Rückgewinnungsanlagen

einem Durchsatz von 200 Zyklen pro Stunde ausgehen, haben wir einen Gasverbrauch von 1.200 MPa l pro Stunde. Eine Standard-Gasflasche mit 50 Litern mit einem Fülldruck von 20 MPa enthält 1.000 MPa l. Mit 100% Helium als Prüfgas, einem Zweischiebtbetrieb und 260 Arbeitstagen pro Jahr würden wir fast 7.000 Heliumflaschen pro Jahr benötigen. Mit einer Helium-Rückgewinnungsanlage können wir bis zu 98% des Prüfgases sparen. Wenn wir einfach die Prüfgaskosten ohne Stromkosten für die Helium-Rückgewinnungsanlage betrachten, lässt sich eine Investitionsrentabilität in weit weniger als einem Jahr erreichen.

9 Lecksuchseminare und praktische Schulungen

Pfeiffer Vacuum bietet ein komplettes Schulungsprogramm für alle Themen im Zusammenhang mit Vakuumtechnologie und Lecksuche.

Die Grundlagen der Lecksuche und der theoretische Hintergrund werden in Seminaren von unseren Experten vermittelt. Die effektive Bedienung der Geräte und eine gute Praxis in den unterschiedlichsten Methoden der Lecksuche werden in praktischen Schulungen unter Einsatz der jeweiligen Lecksuchermodelle des Anwenders demonstriert und geübt. Die Benutzer lernen die präventive Wartung und Reparatur unserer Lecksucher unter Anleitung der erfahrenen Servicemitarbeiter von Pfeiffer Vacuum.

Eine typische Schulung für Bediener und Instandhalter eines Lecksuchers oder einer Anlage kombiniert die Lecksuchgrundlagen mit einem ausreichenden theoretischen Hintergrund als Vorbereitung für die auszuführende Aufgabe. Die verschiedenen Prüfmethoden werden nach der jeweiligen Anwendung erklärt und bewertet. Ein systematischer praktischer Ansatz zur Lecksuche wird erläutert und vermittelt. Es werden viele Tipps und Hinweise für eine gute Lecksuchpraxis gegeben.

In theoretischen Seminaren für Qualitätsmanager oder Konstrukteure der Prüfeinrichtungen wird der Hintergrund detailliert mit Anwendungs- und Berechnungsbeispielen erläutert. Wir können Sie von einer qualitativen funktionsgerechten Beschreibung der

Prüfaufgabe zu einer quantitativen Definition einer Rückweisleckgerate und eines Prüfrezeptes führen. Es wird eine Auswahlhilfe gegeben für die optimale Prüfmethode in der industriellen Lecksuche mit Entwicklung einer detaillierten Prüfprozedur.

Selbstverständlich können alle Kurse über Lecksuche mit anderen Modulen für eine benutzerorientierte umfassende Schulung kombiniert werden.

Es werden Standardkurse und individuell angepasste Schulungen angeboten. Beide können entweder in einem unserer Schulungszentren oder am Kundenstandort stattfinden.

Auf den globalen und regionalen Webseiten von Pfeiffer Vacuum erhalten Sie erste Informationen über das Schulungsangebot in der jeweiligen Landessprache. Um Ihre individuellen Bedürfnisse zu besprechen, wenden Sie sich bitte an unseren weltweiten Schulungsleiter

Timo Birkenstock

T +49 6441 802-1267

F +49 6441 802-1202

Mail: Timo.Birkenstock@pfeiffer-vacuum.de

Sie finden eine vollständige Übersicht über unsere weltweiten Servicestandorte unter „Service > Servicekontakt weltweit“ im Internet: www.pfeiffer-vacuum.de



10 Service und Wartung

Für uns bei Pfeiffer Vacuum bedeutet „Service“ nicht nur „Reparatur“, sondern auch umfassende Beratung vor dem Verkauf und Anwendungsunterstützung im Einsatz.

Pfeiffer Vacuum fertigt alle wichtigen Komponenten einer Lecksuchlösung, einschließlich Detektortechnologie, Hochvakuum- und Vorvakuumumpfen sowie Kammern und mechanische Bauteile. Aus diesem Grund hängen wir nicht von externen Zulieferern für Service und Wartung ab, sondern können uns voll auf unsere eigenen Ressourcen verlassen. Dazu gehört die Verwendung von Original-Ersatzteilen sowie geprüften und qualifizierten Service-Werkzeugen. Originale Pfeiffer Vacuum-Teile und -Werkzeuge werden hergestellt, wenn das Produkt entwickelt und in extremen Situationen geprüft wird und passen deshalb perfekt zu jedem Produkt. Jede Verbesserung eines Lecksuchers, einer Pumpe oder Komponente wird automatisch in unsere Originalteile integriert. Sowohl neue als auch gewartete Produkte müssen die gleichen strengen Qualitätsanforderungen erfüllen.

Das Benutzerhandbuch jedes Lecksuchers enthält Empfehlungen für Wartungsintervalle. Diese Empfehlungen sind ein Durchschnittswert aus unserer installierten Basis, die an die spezielle Anwendung des Geräts angepasst werden muss. Das Gleiche gilt für Lecksuchanlagen. Nach der Inbetriebnahme und dem endgültigen Abnahmetest läuft die Anlage in einer realen Produktionsumgebung für mehrere Monate. Nach einem fest-

gelegten Zeitraum erfolgt eine Statusanalyse und Wartungsempfehlungen werden von unseren Lecksuchexperten ausgesprochen. Die Verschleißanalyse des jeweiligen Lecksuchers oder Systems führt zu Empfehlungen für die Lagerhaltung von Ersatzteilen, um eine schnelle Reparatur vor Ort zu ermöglichen. Der Inhalt des Ersatzteilkpakets richtet sich nach dem Bedarf des Kunden. Drei Kundendienststufen ermöglichen die Anpassung an die Bedürfnisse für die Lecksuchanlage, z. B. Anreizezeit und internationale Verfügbarkeit.

Da eine Ausbildung zur Lecksuche in den meisten Berufsbildern nicht enthalten ist, bieten wir eine große Bandbreite an Schulungen, die von unseren Lecksuchexperten gehalten werden, wobei diese häufig aktive Mitglieder der nationalen Organisationen für zerstörungsfreie Prüfung sind. Bei Standardlecksuchern kann der Benutzer lernen, wie er den eigenen Lecksucher warten und reparieren kann. Dies geschieht unter Aufsicht eines erfahrenen Servicetechnikers innerhalb einer Wartungsschulung.

Pfeiffer Vacuum betreibt etwa 50 Servicestandorte weltweit. Daher können wir eine schnelle Reparatur jeder Standardkomponente ermöglichen und mit Bedienern in ihrer Muttersprache kommunizieren. Die Systemwartung während eines geplanten Stillstands wird im Voraus in Kooperation mit Bedienern, dem lokalen Service und – falls erforderlich – Spezialisten aus unserem Stammwerk durchgeführt.

11.1 Tabellen

11.1.1 Umrechnungstabelle für Leckgerateneinheiten

	Pa m ³ s ⁻¹	mbar · s ⁻¹	Pa · s ⁻¹	Torr · l s ⁻¹	atm cm ³ s ⁻¹
Pa m ³ s ⁻¹	1	10	1 · 10 ³	7,5	9,87
mbar · s ⁻¹	1 · 10 ⁻¹	1	1 · 10 ²	7,5 · 10 ⁻¹	9,87 · 10 ⁻¹
Pa · s ⁻¹	1 · 10 ⁻³	1 · 10 ⁻²	1	7,5 · 10 ⁻³	9,87 · 10 ⁻³
Torr · l s ⁻¹	1,33 · 10 ⁻¹	1,33	1,33 · 10 ²	1	1,32
atm cm ³ s ⁻¹	1,01 · 10 ⁻¹	1,01	1,01 · 10 ²	7,5 · 10 ⁻¹	1
lusec (μ Hg · s ⁻¹)	1,33 · 10 ⁴	1,33 · 10 ³	1,33 · 10 ¹	1 · 10 ⁻³	1,32 · 10 ⁻³
sccm	1,69 · 10 ⁻³	1,69 · 10 ⁻²	1,69	1,27 · 10 ⁻²	1,67 · 10 ⁻²
slm	1,69	1,69 · 10 ¹	1,69 · 10 ³	1,27 · 10 ¹	1,67 · 10 ¹
Moleküle s ⁻¹	3,77 · 10 ²¹	3,77 · 10 ²⁰	3,77 · 10 ¹⁸	2,83 · 10 ²⁰	3,77 · 10 ²⁰
Mol s ⁻¹	2,27 · 10 ³	2,27 · 10 ⁴	2,27 · 10 ⁶	1,70 · 10 ⁴	2,27 · 10 ⁴

Tabelle 11-1: Umrechnungstabelle für Einheiten von Leckgeräten, Gasdurchsatz und Saugleistung

11.1.2 Umrechnungstabelle für Druckeinheiten

	Pa	bar	hPa	μbar	Torr
Pa	1	1 · 10 ⁻⁵	1 · 10 ⁻²	10	7,5 · 10 ⁻³
bar	1 · 10 ⁵	1	1 · 10 ³	1 · 10 ⁶	750
hPa	100	1 · 10 ⁻³	1	1.000	0,75
μbar	0,1	1 · 10 ⁻⁶	1 · 10 ⁻³	1	7,5 · 10 ⁻⁴
Torr	1,33 · 10 ²	1,33 · 10 ⁻³	1,33	1.330	1
micron	0,133	1,33 · 10 ⁻⁶	1,33 · 10 ⁻³	1,33	1 · 10 ⁻³
atm	1,01 · 10 ⁵	1,013	1.013	1,01 · 10 ⁶	760
at	9,81 · 10 ⁴	0,981	981	9,81 · 10 ⁵	735,6
mm WS	9,81	9,81 · 10 ⁻⁵	9,81 · 10 ⁻²	98,1	7,36 · 10 ⁻²
psi	6,89 · 10 ³	6,89 · 10 ⁻²	68,9	6,89 · 10 ⁴	51,71
psf	47,8	4,78 · 10 ⁻⁴	0,478	478	0,359

Tabelle 11-2: Umrechnungstabelle für Druckeinheiten

	lusec (μ Hg · s ⁻¹)	sccm	slm	Moleküle s ⁻¹	Mol s ⁻¹
	$7,5 \cdot 10^3$	$5,92 \cdot 10^2$	$5,92 \cdot 10^{-1}$	$2,65 \cdot 10^{20}$	$4,40 \cdot 10^{-4}$
	$7,5 \cdot 10^2$	$5,92 \cdot 10^1$	$5,92 \cdot 10^{-2}$	$2,65 \cdot 10^{19}$	$4,40 \cdot 10^{-5}$
	7,5	$5,92 \cdot 10^{-1}$	$5,92 \cdot 10^{-4}$	$2,65 \cdot 10^{17}$	$4,40 \cdot 10^{-7}$
	$1 \cdot 10^3$	$7,89 \cdot 10^1$	$7,89 \cdot 10^{-2}$	$3,54 \cdot 10^{19}$	$5,87 \cdot 10^{-5}$
	$7,5 \cdot 10^2$	$5,98 \cdot 10^1$	$5,98 \cdot 10^{-2}$	$2,65 \cdot 10^{19}$	$4,40 \cdot 10^{-5}$
	1	$7,89 \cdot 10^{-2}$	$7,89 \cdot 10^{-5}$	$3,54 \cdot 10^{16}$	$5,87 \cdot 10^{-8}$
	$1,27 \cdot 10^1$	1	$1 \cdot 10^{-3}$	$4,48 \cdot 10^{17}$	$7,45 \cdot 10^{-7}$
	$1,27 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^3$	1	$4,48 \cdot 10^{20}$	$7,45 \cdot 10^{-4}$
	$2,83 \cdot 10^{17}$	$2,23 \cdot 10^{16}$	$2,23 \cdot 10^{21}$	1	$1,66 \cdot 10^{24}$
	$1,703 \cdot 10^7$	$1,34 \cdot 10^6$	$1,34 \cdot 10^2$	$6,02 \cdot 10^{23}$	1

	micron	atm	at	mm WS	psi	psf
	7,5	$9,87 \cdot 10^{-6}$	$1,02 \cdot 10^{-5}$	0,102	$1,45 \cdot 10^{-4}$	$2,09 \cdot 10^{-2}$
	$7,5 \cdot 10^5$	0,987	1,02	$1,02 \cdot 10^4$	14,5	$2,09 \cdot 10^3$
	750	$9,87 \cdot 10^{-4}$	$1,02 \cdot 10^{-3}$	10,2	$1,45 \cdot 10^{-2}$	2,09
	0,75	$9,87 \cdot 10^{-7}$	$1,02 \cdot 10^{-6}$	$1,02 \cdot 10^{-2}$	$1,45 \cdot 10^{-5}$	$2,09 \cdot 10^{-3}$
	1.000	$1,32 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$	13,6	$1,93 \cdot 10^{-2}$	2,78
	1	$1,32 \cdot 10^{-6}$	$1,36 \cdot 10^{-6}$	$1,36 \cdot 10^{-2}$	$1,93 \cdot 10^{-5}$	$2,78 \cdot 10^{-3}$
	$7,6 \cdot 10^5$	1	1,03	$1,03 \cdot 10^4$	14,7	$2,12 \cdot 10^3$
	$7,36 \cdot 10^5$	0,968	1	$1 \cdot 10^{-4}$	14,2	$2,04 \cdot 10^3$
	73,6	$9,68 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	1	$1,42 \cdot 10^{-3}$	0,204
	$5,17 \cdot 10^4$	$6,8 \cdot 10^{-2}$	$7,02 \cdot 10^{-2}$	702	1	144
	359	$4,72 \cdot 10^{-4}$	$4,87 \cdot 10^{-4}$	4,87	$6,94 \cdot 10^{-3}$	1

11.1.3 Konstanten

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Avogadro-Konstante	N_A	$6,022 \cdot 10^{23}$	mol^{-1}
Molvolumen bei Normalbedingungen	V_{mol}	0,02241	$\text{m}^3 \text{mol}^{-1}$
Boltzmann-Konstante	k	$1,3807 \cdot 10^{-23}$	J K^{-1}
Gaskonstante	$R = k \cdot N_A$	8,314	$\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$
Elementarladung	e	$1,602 \cdot 10^{-19}$	C
Atomare Masseinheit	amu	$1,661 \cdot 10^{-27}$	kg
Stefan-Boltzmann-Konstante	σ	$5,670 \cdot 10^{-8}$	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$
Normaldruck	p_0	101.325	Pa
Normaltemperatur	T_0	273,15	K
Normaldichte Luft	ρ_0	1,293	kg/m^3
Dyn. Viskosität Luft	η	$18,19 \cdot 10^{-6}$	$\text{kg/(m} \cdot \text{s)}$

Tabelle 11-3: Wichtige Naturkonstanten für die Vakuumtechnik

11.2 Helium-Lecksucher – Baureihen und Anwendungen im Überblick

	Analytik	Halbleiter	Beschichtung	Industrie	F&E
■ empfohlen für	Elektronenmikroskopie Lecksuche Massenspektrometrie Oberflächenanalyse Plasmaplasmamonitoring Restgasanalyse Lithographie PVD (Physikalische Dampfabcheidung) CVD (Chemische Dampfabcheidung) Plasmatzen Implantation – Quelle Implantation – Beamline Inspektion Bonding MBE (Molecular Beam Epitaxy) Schleusen, Transferrkammern, Handlingsysteme Flat Panel Display (FPD) LED / OLED Festplattenbeschichtung Photovoltaik Glasbeschichtung (PVD) CD- / DVD- / Blu-Ray-Fertigung (PVD) Optische Beschichtung (PVD) Verschleißschutz (PVD, CVD) Hartstoffbeschichtung Medizintechnik Industrielle Lecksuche Elektroenstrahlachweißern Isolationsvakua Lampen- und Röhrenherstellung Wärmebehandlung Vakuumtrocknung Vakuumöfen Kernforschung Fusionstechnik Plasmaforschung Teilchenbeschleuniger Welt raumsimulation Tief temperaturforschung Elementarteilchenphysik Nanotechnologie Biotechnologie				
Portabel					
MiniTest 300					
ASM 310	■				
Universell					
ASM 340	■				
ASM 340 D	■				
Hochleistung - Mobil					
ASM 380	■				
Hochleistung - Kompakt					
ASM 182 T	■	■			
ASM 182 TD+	■	■			
Hochleistungs-Konsolengerät					
ASM 192 T					
ASM 192 T2D+		■	■		
Arbeitsstation					
ASM 1002		■		■	
Modular					
ASI 30				■	
Schnüffellecksuche					
ASM 102 S	■	■		■	■

Tabelle 11-4: Helium-Lecksucher – Baureihen und Anwendungen im Überblick

11.3 Weiterführende Literatur

11.3.1 Normen und Richtlinien

Nummer	Datum	Titel
DIN EN 1330-8	1998-07	Zerstörungsfreie Prüfung – Terminologie – Teil 8: Begriffe der Dichtheitsprüfung; Dreisprachige Fassung
DIN EN 1518	1998-06	Zerstörungsfreie Prüfung – Dichtheitsprüfung Charakterisierung von massenspektrometrischen Leckdetektoren
DIN EN 1779	1999-10 2005-02	Zerstörungsfreie Prüfung – Dichtheitsprüfung Kriterien zur Auswahl von Prüfmethoden und -verfahren Berichtigung 1
DIN EN 1593	1999-11	Zerstörungsfreie Prüfung – Dichtheitsprüfung Blasenprüfverfahren
DIN EN 13184	2001-07	Zerstörungsfreie Prüfung – Dichtheitsprüfung Druckänderungsverfahren
DIN EN 13185	2001-07	Zerstörungsfreie Prüfung – Dichtheitsprüfung Prüfgasverfahren
DIN EN 13192	2002-03	Zerstörungsfreie Prüfung – Dichtheitsprüfung Kalibrieren von Referenzlecks für Gase
DIN EN 13625	2002-03	Zerstörungsfreie Prüfung – Dichtheitsprüfung Anleitung zur Auswahl von Geräten zur Messung von Gasleckagen
DIN EN ISO 9712	2012	Zerstörungsfreie Prüfung Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung
DGZfP Richtlinie DP1	2005-06	Richtlinie über die Auswahl eines geeigneten Prüfgases für die Dichtheitsprüfung nach DIN EN 13185 (mit Anhang zur Auswahl eines Dichtheitsprüfverfahrens nach DIN EN 1779)
DGZfP Richtlinie DP2	2009-12	Richtlinie zur Umrechnung der mit Prüfgasen gemessenen Leckageraten in andere Medien (Gase, Flüssigkeiten)
DGZfP Merkblatt 3	2013-10	Merkblatt zur Charakterisierung von Prüfgas-Nachweisystemen für Dichtheitsprüfungen

Tabelle 11-5: Normen und Richtlinien

11.3.2 Bücher

1. Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, Vieweg 2013, 11. Auflage
2. Jobst H. Kerspe (Hrsg.), Vakuumtechnik in der industriellen Praxis, expert Verlag 2003, 3. Auflage
3. Klaus Kutzke, Dichtheitsprüfungen und Lecksuche mit dem Helium-Leckdetektor, expert Verlag 1998
4. Christian Edelmann, Vakuumphysik, Spektrum Verlag, 1998
5. P. O. Moore (Hrsg.), Nondestructive Testing Handbook, Band 1, Leak Testing, 3. Auflage, American Society for Nondestructive Testing, 1998

11.3.3 Webseiten

Pfeiffer Vacuum:
www.pfeiffer-vacuum.de

Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (FAQ in deutsch):
www.dgzfp.de/Fachausschüsse/Dichtheitsprüfung/FAQ.aspx

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Wechselwirkungen zwischen den Oberflächen einer Vakuumkammer und dem umgebenden Gas	7
Abbildung 1-2: Größenordnungen von Leckgeraten und den Abmessungen eines Leckkanals	8
Abbildung 2-1: Strömungsbereiche	9
Abbildung 2-2: Transport von verschiedenen Prüfgasen durch ein ideales kreisrundes Leck	10
Abbildung 2-3: Anschlussmöglichkeiten eines Lecksuchers an ein Vakuumsystem	12
Abbildung 2-4: Signalansprechzeit	14
Abbildung 2-5: Totzeit	15
Abbildung 2-6: Anlaufzeit	16
Abbildung 2-7: Permeationskoeffizienten	17
Abbildung 2-8: Abhängigkeit der standardisierten Leckgerate vom Betriebsdruck im laminaren Strömungsbereich	22
Abbildung 2-9: Akkumulationsprüfung	24
Abbildung 4-1: Totaldruck- und Partialdruckmessung	30
Abbildung 4-2: Komponenten eines Massenspektrometers	30
Abbildung 4-3: Funktionsprinzip eines magnetischen Massenspektrometers	32
Abbildung 4-4: Ionisierungsprozess in einer Ionenquelle	33
Abbildung 4-5: Mikrokanalplatte (Sekundärelektronenvervielfacher)	34
Abbildung 4-6: Funktionsprinzip eines Quadrupol-Massenspektrometers	36
Abbildung 4-7: Stabilitätsdiagramm eines Quadrupol-Massenfilters	38
Abbildung 4-8: Quarzfenster	42
Abbildung 5-1: Allgemeines Vakuumschema eines Helium-Lecksuchers	46
Abbildung 5-2: Helium-Lecksucher ASM 340	46
Abbildung 5-3: Gasanalysesystem OmniStar	47
Abbildung 5-4: Quarzfenster-Lecksucher an einem Vakuumsystem	48
Abbildung 5-5: MiniTest 300 mit drahtloser Fernbedienung	48
Abbildung 6-1: Zeitabhängiger Druckanstieg	51
Abbildung 6-2: Massenspektrum eines Behälters mit einem Luftleck	51
Abbildung 6-3: Integraler Vakuumtest eines evakuierten Prüfobjekts	52
Abbildung 6-4: Sprühtest eines evakuierten Objekts	54
Abbildung 6-5: Drahtlose Fernbedienung RC 500 WL	54
Abbildung 6-6: Lokalisierende Schnüffelpprüfung eines druckbeaufschlagten Objektes	55
Abbildung 6-7: Angezeigte Signalintensität als Funktion des Abstands vom Leck	56
Abbildung 6-8: Integrale Prüfung eines druckbeaufschlagten Objekts unter Atmosphärendruck	57
Abbildung 6-9: Integrale Prüfung eines druckbeaufschlagten Objektes unter Vakuum	58
Abbildung 6-10: Integrale Drucklagerungsprüfung (Bombing-Test)	58
Abbildung 8-1: Schematische Darstellung einer industriellen Dichtheitsprüfanlage	65
Abbildung 8-2: Lecksuchanlage Pfeiffer Vacuum LTS _{eco}	66
Abbildung 8-3: Lecksuchanlage Pfeiffer Vacuum LTS _{compact}	66
Abbildung 8-4: Beispiel für spezielle Abdichtwerkzeuge von Pfeiffer Vacuum	67
Abbildung 8-5: Beispiel eines Helium-Prüflecks von Pfeiffer Vacuum	68
Abbildung 8-6: Beispiel eines Prüflecks (Kapillarleck) integriert in eine Schraube zum Einbau in ein Master-Teil	68
Abbildung 8-7: Helium-Lecksuchanlage LTS _{clima} KLS/72 zur Dichtheitsprüfung von Kältemittelleitungen	69
Abbildung 8-8: Helium-Rückgewinnungsanlage	70

Formelverzeichnis

Formel 2-1:	Abpumpzeit im laminar-viskosen Strömungsbereich	12
Formel 2-2:	Effektives Saugvermögen	13
Formel 2-3:	Reihenschaltung von Leitwerten	13
Formel 2-4:	Zeitkonstante	14
Formel 2-5:	Prüfgaspartialdruck in Abhängigkeit von der Zeit	15
Formel 2-6:	Totzeit	16
Formel 2-7:	Anlaufzeit aufgrund von Diffusion	16
Formel 2-8:	Permeation	17
Formel 2-9:	Umrechnung von Gasleckageraten im laminaren Strömungsbereich	18
Formel 2-10:	Umrechnung von Gasleckageraten im molekularen Strömungsbereich	18
Formel 2-11:	Flüssigkeitsleckgerate und Gasleckgerate	19
Formel 2-12:	Durch Flüssigkeiten verschlossenen Lecks	20
Formel 2-13:	Hagen-Poiseuille-Formel	20
Formel 2-14:	Umrechnung einer Massenverlustrate in einen pV -Gasstrom	21
Formel 2-15:	Standardisierte Leckgerate – laminare Strömungsbedingungen	22
Formel 2-16:	Standardisierte Leckgerate – molekulare Strömungsbedingungen	22
Formel 2-17:	Temperaturabhängigkeit der Leckgerate im laminaren Strömungsbereich I	23
Formel 2-18:	Temperaturabhängigkeit der Leckgerate im laminaren Strömungsbereich II	23
Formel 2-19:	Temperaturabhängigkeit der Leckgerate im molekularen Strömungsbereich	23
Formel 2-20:	Akkumulationsprüfung	23
<hr/>		
Formel 4-1:	Kinetische Energie	35
Formel 4-2:	Teilchengeschwindigkeit	35
Formel 4-3:	Lorentzkraft	35
Formel 4-4:	Gleichgewicht zwischen Lorentzkraft und Zentripetalkraft	35
Formel 4-5:	Bahnradius der Ionen im Magnetfeld	35
Formel 4-6:	Bahnradius als Funktion von Masse, Spannung, Ladung und Magnetfeld	36
Formel 4-7:	Spannungen am Quadrupol	38
Formel 4-8:	Stabilitätsparameter a	38
Formel 4-9:	Stabilitätsparameter q	38
Formel 4-10:	Verhältnis Stabilitätsparameter	38
Formel 4-11:	Stabilitätsbedingung für U	39
Formel 4-12:	Stabilitätsbedingung für V	39
Formel 4-13:	Hochpassbedingung	39
Formel 4-14:	Hochfrequenzleistung	40
Formel 4-15:	Dispersion	40

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Zahlen und Präfixe	11
Tabelle 2-2: Beispiel Signalansprechzeit	15
Tabelle 2-3: Umrechnungsfaktoren für häufig verwendete Gase im laminaren Strömungsbereich	18
Tabelle 2-4: Umrechnungsfaktoren für häufig verwendete Gase im molekularen Strömungsbereich	19
Tabelle 2-5: Ausgewählte Oberflächenspannungen	20
Tabelle 3-1: Ausgewählte Eigenschaften der Prüfgase Helium und Wasserstoff	25
Tabelle 3-2: Ausgewählte physikalische Eigenschaften von Prüfgasen	28
Tabelle 4-1: Massenspektrometer-Technologien	31
Tabelle 4-2: Detektortechnologien von Pfeiffer Vacuum im Vergleich	43
Tabelle 4-3: Sensortechnologien in der Zerstörungsfreien Prüfung (NDT)	44
Tabelle 5-1: Gegenstrom- und Hauptstromprinzip im Vergleich	46
Tabelle 5-2: Vergleich von Lecksuchern auf Basis unterschiedlicher Detektoren	49
Tabelle 6-1: Empfohlene Lecksucher für die jeweiligen Prüfmethode	60
Tabelle 7-1: Auswahlhilfe für Lecksuchverfahren	62
Tabelle 8-1: Betriebsparameter Lecksuchanlage LTS _{clima} -KLS/72	69
Tabelle 8-2: Übersicht der Pfeiffer Vacuum Standard-Helium-Rückgewinnungsanlagen	70
Tabelle 11-1: Umrechnungstabelle für Einheiten von Leckagerate, Gasdurchsatz und Saugleistung	74
Tabelle 11-2: Umrechnungstabelle für Druckeinheiten	74
Tabelle 11-3: Wichtige Naturkonstanten für die Vakuumtechnik	76
Tabelle 11-4: Helium-Lecksucher – Baureihen und Anwendungen im Überblick	76
Tabelle 11-5: Normen und Richtlinien	77

