

DIN ISO 21360-1

ICS 23.160

Einsprüche bis 2015-12-28

Entwurf

**Vakuumtechnik –
Standardverfahren zur Messung der Leistungsdaten von
Vakuumpumpen –
Teil 1: Grundlegende Beschreibungen (ISO 21360-1:2012);
Text Deutsch und Englisch**

Vacuum technology –
Standard methods for measuring vacuum-pump performance –
Part 1: General description (ISO 21360-1:2012);
Text in German and English

Technique du vide –
Méthodes normalisées pour mesurer les performances des pompes à vide –
Partie 1: Description générale (ISO 21360-1:2012);
Texte en allemand et anglais

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2015-08-28 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfes besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal des DIN unter www.entwuerfe.din.de bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nam@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/stellungnahme oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Maschinenbau (NAM), 60498 Frankfurt am Main, Postfach 71 08 64 (Hausanschrift: Lyoner Str. 18, 60528 Frankfurt am Main).

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 67 Seiten

DIN-Normenausschuss Maschinenbau (NAM)

Inhalt

Seite

Nationales Vorwort	4
Einleitung.....	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	6
4 Symbole und Abkürzungen	8
5 Prüfverfahren	10
5.1 Messung des Volumenstroms (Saugvermögen) nach dem Durchflussverfahren	10
5.1.1 Allgemeines	10
5.1.2 Messdom für das Durchflussverfahren	10
5.1.3 Prüfanordnung	11
5.1.4 Bestimmung des Volumenstroms	12
5.1.5 Messverfahren	13
5.1.6 Messunsicherheiten	13
5.1.7 Überprüfung der Messung	14
5.2 Messung des Volumenstroms (Saugvermögen) nach dem Blendenverfahren	14
5.2.1 Allgemeines	14
5.2.2 Messdom für das Blendenverfahren	14
5.2.3 Prüfanordnung	15
5.2.4 Bestimmung des Volumenstroms	16
5.2.5 Messverfahren für das Blendenverfahren	17
5.2.6 Einstellung der Druckmessgeräte	17
5.2.7 Messung des Volumenstroms	18
5.2.8 Messunsicherheiten	18
5.2.9 Überprüfung der Messung	18
5.3 Messung des Volumenstroms (Saugvermögen) nach dem Auspumpverfahren	19
5.3.1 Allgemeines	19
5.3.2 Messdom für das Auspumpverfahren	20
5.3.3 Schnellschlussventil	21
5.3.4 Prüfanordnung	21
5.3.5 Bestimmung des Volumenstroms	21
5.3.6 Messverfahren	23
5.3.7 Anwendbarkeitsgrenzen	23
5.3.8 Überprüfung der Messung	24
5.3.9 Messunsicherheit	24
5.4 Bestimmung des Enddrucks	24
5.4.1 Betriebsbedingungen	24
5.4.2 Prüfverfahren für Pumpen mit einem Enddruck $> 10^{-4}$ Pa	24
5.4.3 Prüfverfahren für Pumpen mit einem Enddruck $< 10^{-4}$ Pa	25
5.4.4 Überprüfung der Messung	25
5.5 Messung von Kompressionsverhältnis und kritischem Vorvakuumdruck	25
5.5.1 Prüfanordnung	25
5.5.2 Bestimmung von Kompressionsverhältnis und kritischem Vorvakuumdruck	26
5.5.3 Messverfahren	27
5.5.4 Messunsicherheit	27
5.5.5 Überprüfung der Messungen	27

5.5.6	Besondere Empfehlungen für die Messung außergewöhnlich hoher Kompressionsverhältnisse.....	27
Anhang A (informativ)	Mittlere freie Weglänge einiger wichtiger Gase	29
Anhang B (informativ)	Messunsicherheiten	30
B.1	Allgemeines	30
B.2	Unsicherheit der Messung des Volumenstroms nach dem Durchflussverfahren.....	30
B.3	Unsicherheit der Messung des Volumenstroms nach dem Blendenverfahren	31
B.4	Unsicherheit der Messung des Volumenstroms nach dem Auspumpverfahren.....	31
Literaturhinweise		33

Nationales Vorwort

Dieses Dokument wurde durch den Arbeitsausschuss NA 060-07-01 AA „Vakuumpumpen“ des Fachbereiches „Vakuumtechnik“ im DIN-Normenausschuss Maschinenbau (NAM) erarbeitet. Es ist die deutsche Übersetzung der Internationalen Norm ISO 21360-1:2012.

Die ISO 21360-1 wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 112, *Vacuum technology*, erstellt.

Diese erste Ausgabe von ISO 21360-1 wird ISO 21360:2007 löschen und ersetzen, gegenüber der sie eine geringfügige Änderung darstellt.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung der ISO 21360-1 entsprechend der diesbezüglich durch ISO erteilten Erlaubnis beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen ISO-Text.

ISO 21360 besteht aus den folgenden Teilen, unter dem allgemeinen Titel *Vacuum technology — Standard methods for measuring vacuum-pump performance*:

Part 1: General description

Part 2: Positive displacement vacuum pumps

Vakuumtechnik — Standardverfahren zur Messung der Leistungsdaten von Vakuumpumpen — Teil 1: Grundlegende Beschreibungen (ISO 21360-1:2012)

Einleitung

Dieser Teil von ISO 21360 ist eine Grundnorm zur Messung der Leistungsdaten von Vakuumpumpen. Die hier angegebenen Verfahren haben sich aus bestehenden nationalen und internationalen Normen etabliert. Die Zielsetzung bei der Entwicklung dieses Teils von ISO 21360 bestand darin, die Verfahren zur Messung der Leistungsdaten von Vakuumpumpen in einem einzelnen Dokument zusammenzufassen und die zukünftige Entwicklung spezifischer Normen zu Vakuumpumpen zu vereinfachen.

Spezifische Normen zu Vakuumpumpen werden in Zukunft eine geeignete Auswahl von Messverfahren aus diesem Teil von ISO 21360 enthalten; dadurch wird auf Grundlage der besonderen Eigenschaften des bestimmten Pumpentyps eine Bestimmung der Leistungsdaten, Grenzwerte und besonderen Betriebsbedingungen ermöglicht. Bei Abweichungen zwischen diesem Teil von ISO 21360 und der spezifischen Norm, ist die spezifische Norm als gültig anzusehen.

1 Anwendungsbereich

In diesem Teil von ISO 21360 werden drei Verfahren zur Messung des Volumenstroms festgelegt sowie jeweils ein Verfahren zur Messung von Enddruck, Kompressionsverhältnis und kritischem Vorvakuumdruck einer Vakuumpumpe.

Das erste Verfahren zur Messung des Volumenstroms (das Durchflussverfahren) basiert darauf, dass während des Einlasses eines stationären Gasstroms in die Pumpe der Ansaugdruck gemessen wird. In der Praxis kann sich die Messung des pV -Durchflusses als kompliziert oder ungenau erweisen. Aus diesem Grund werden zwei weitere Verfahren festgelegt, mit denen die direkte Messung des pV -Durchflusses umgangen wird.

Das zweite Verfahren zur Messung des Volumenstroms (das Blendenverfahren) wird verwendet, wenn bei sehr kleinen Ansaugdrücken, ein sehr kleiner pV -Durchfluss besteht (im Hochvakuum- oder Ultrahochvakuumbereich). Das Verfahren basiert auf der Bestimmung des Verhältnisses der Drücke in einem Doppelkammernessystem, in dem die beiden Kammern durch eine Wand mit einer Kreisblende getrennt sind.

Das dritte Verfahren zur Messung des Volumenstroms (das Auspumpverfahren) ist gut für automatisierte Messungen geeignet. Grundlage ist die Evakuierung eines großen Behälters. Der Volumenstrom errechnet sich aus den beiden Drücken zu Beginn und zum Ende eines Auspumpintervalls und dem Volumen des Messdoms. Verschiedene Parameter, wie z. B. Leck- und Desorptionsraten, Abkühlung des Gases durch eine nahezu isentrope Expansion während des Auspumpintervalls und der durch Molekularströmung bei niedrigen Drücken ansteigende Strömungswiderstand in der Verbindungsleitung zwischen Messdom und Pumpe, beeinflussen die Ergebnisse der Druckmessungen und den sich daraus ergebenden Volumenstrom.

Die Auswahl der erforderlichen Messverfahren findet in Abhängigkeit des zu messenden Vakuumpumpentyps statt, so ist z. B. die Messung des kritischen Vorvakuumdrucks nur bei Vakuumpumpen erforderlich, die eine Vorvakuumpumpe benötigen. Sämtliche an Vakuumpumpen gemessenen Daten, die nicht in diesem Teil von ISO 21360 festgelegt sind (z. B. Messung des Energieverbrauchs), sind in der spezifischen Pumpennorm festgelegt.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ISO 3529-2, *Vacuum technology — Vocabulary — Part 2: Vacuum pumps and related terms*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach ISO 3529-2 und die folgenden Begriffe.

3.1 Volumenstrom

q_V

$$q_V = \frac{dV}{dt}$$

Dabei ist

V das Volumen

t die Zeit

[QUELLE: ISO 80000-4:2006, Begriff 4-30]

BEISPIEL Im Zusammenhang mit diesem Teil von ISO 21360 ist der Volumenstrom das Gasvolumen, das unter idealen Bedingungen je Zeiteinheit vom Messdom durch den Pumpeneinlass strömt.

ANMERKUNG 1 Für die Praxis ist man übereingekommen, den Volumenstrom einer bestimmten Vakuumpumpe für ein bestimmtes Gas gleich dem Quotienten aus pV-Durchfluss dieses Gases und Gleichgewichtsdruck an einer bestimmten Stelle zu setzen. Der Volumenstrom wird in Kubikmeter je Stunde oder Liter je Sekunde ausgedrückt.

ANMERKUNG 2 Anstelle des Begriffes „Volumenstrom“ werden oftmals auch der Begriff „Saugvermögen“ und das Symbol „S“ verwendet.

3.2

Ansaugdruck

p_1, p_d, p_e

Druck, der an der Einlassöffnung der Pumpe herrscht, gemessen an einer im Messdom festgelegten Stelle

3.3

Enddruck

p_b

Druck, der nach Konditionierung von Vakuumpumpe und Messdom im Messdom erhalten wird

Siehe 5.4

ANMERKUNG Der Enddruck ist der Wert, dem sich der Druck im Messdom asymptotisch nähert. Er ist der niedrigste Druck, der mit der Pumpe erreicht werden kann. Es gibt jedoch kein praktikables Verfahren zur Messung oder Ermittlung des Enddrucks.

3.4

maximaler Arbeitsdruck

$p_{1\max}$

höchster Druck an der Einlassseite, dem Vakuumpumpe und Antriebsvorrichtung für eine längeren Betriebszeitraum ohne Beschädigung standhalten können

3.5

Vorvakuumdruck

p_3

Druck auf der Auslassseite einer Vakuumpumpe

3.6

kritischer Vorvakuumdruck, Vorvakuumbeständigkeit

p_c

maximaler Vorvakuumdruck, für den die Bedingungen in der Bedienungsanleitung oder in einer spezifischen Norm für die bestimmte Vakuumpumpe definiert sind

3.7

Kompressionsverhältnis

K_0

Verhältnis des Vorvakuumdrucks, p_3 , zum Ansaugdruck, p_1 , der Vakuumpumpe ohne pV-Durchfluss, ausgedrückt durch folgende Gleichung:

$$K_0 = \frac{p_3}{p_1}$$

3.8

Messdom

spezieller Vakuumbehälter mit genau festgelegter Größe, Durchmesser und Anschlussflanschen, der zur Messung genormter Leistungsdaten von Vakuumpumpen verwendet wird

3.9**pV-Durchfluss** Q

durch eine Leitung strömendes Gas, ausgedrückt durch folgende Gleichung:

$$Q = \frac{p_1 V}{t} = p_1 q_V$$

Dabei ist

p_1 der (Hochvakuum) Druck auf der Einlassseite;

q_V der Volumenstrom der Prüfpumpe;

t die Zeit;

V das Volumen des Messdoms

3.10**Normgasvolumenstrom** q_{Vstd}

Volumenstrom unter Normbezugsbedingungen, d. h. 0 °C und 101 325 Pa

ANMERKUNG Die Normbezugsbedingungen sind in ISO 3529-1:1981, 1.0.2^[1], festgelegt.

4 Symbole und Abkürzungen

Symbol	Bezeichnung	Einheit
a	Innendurchmesser der Verbindungsleitung zwischen Prüfpumpe und Schnellschlussventil (Punkte 3 und 5 in Bild 6)	m
A	Leistungsquerschnitt der Verbindungsleitung zwischen Prüfpumpe und Schnellschlussventil (Punkte 3 und 5 in Bild 6)	m ²
C	Strömungsleitwert	m ³ /s (= 10 ³ l/s)
d	Blendendurchmesser	m
D	Innendurchmesser des Messdoms	m
D_N	Nennendurchmesser des Messdoms	m
K_0	Kompressionsverhältnis der Vakuumpumpe mit Null-pV-Durchfluss	—
l	Länge der Verbindungsleitung zwischen Prüfpumpe und Schnellschlussventil (Punkte 3 und 5 in Bild 6)	m
$\bar{l}$	mittlere freie Weglänge	m
M	molare Masse des Gases	kg/mol
p_0	Normatmosphärendruck —101 325 Pa (in ISO 3529-1:1981,	Pa

1.0.2^[1], definiert.)

p_1	(Hochvakuum) Druck auf Einlassseite	Pa (oder mbar)
$p_{1\max}$	maximaler Arbeitsdruck auf Einlassseite	Pa (oder mbar)
p_3	Druck in der Vorvakuumleitung	Pa (oder mbar)
p_{t1}, p_{t2}, p_{t3}	Drücke im Messdom für das Auspumpverfahren, gemessen vor und nach den Zeitintervallen $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$	Pa (oder mbar)
p_{b1}, p_{b2}, p_{b3}	Enddrücke	Pa (oder mbar)
p_c	kritischer Vorvakuumdruck, Vorvakuumbeständigkeit	Pa (oder mbar)
p_d, p_e	Drücke im Messdom beim Blendenverfahren	Pa (oder mbar)
Q	pV-Durchfluss der Vakuumpumpe	Pa•l/s (oder mbar•l/s)
q_V	Volumenstrom der Prüfpumpe	l/s (oder m ³ /h)
q_{VBP}	Volumenstrom der Vorvakuumpumpe	l/s (oder m ³ /h)
$q_{V\text{sccm}}$	Volumenstrom bei Normbezugsbedingungen für Gase, d. h. 0 °C und 101 325 Pa	sccm (oder cm ³ /min)
$q_{V\text{std}}$	Volumenstrom bei Normbezugsbedingungen für Gase, d. h. 0 °C und 101 325 Pa	l/s (oder m ³ /h)
$Q_{\max}$	maximaler pV-Durchfluss, dem die Pumpe ohne Beschädigung standhalten kann	Pa•l/s (oder mbar•l/s)
R	molare Gaskonstante	8,314 J/(mol•K)
T	thermodynamische Temperatur	K
T_0	273,15 K (in ISO 3529-1:1981 ^[1] , 1.0.2, als 0 °C definiert)	K
T_D	Temperatur des Messdoms	K
T_f	Temperatur des Durchflussmessgerätes	K
u	Messunsicherheit	—
V	Volumen des Messdoms	l, m ³
V_i	Volumen der Verbindungsleitung zwischen Prüfpumpe und Schnellschlussventil (Punkte 3 und 5 in Bild 6)	l, m ³
δ	Blendendicke am Blendendurchmesser	M

5 Prüfverfahren

5.1 Messung des Volumenstroms (Saugvermögen) nach dem Durchflussverfahren

5.1.1 Allgemeines

Das Durchflussverfahren ist das für Vakuumpumpen am meisten verwendete Messverfahren und ist anwendbar auf alle Druckbereiche und Pumpengrößen, für die Durchflussmessgeräte mit ausreichender Genauigkeit verfügbar sind. Die Gasstrommessbereiche ergeben sich aus der Multiplikation des erwarteten Volumenstroms mit dem maximalen und dem minimalen Arbeitsdruck der Prüfpumpe.

Die Kalibrierung sämtlicher Messgeräte muss entweder:

- a) auf ein Vakuum-Primärnormal oder ein nationales Mess-Normal rückführbar sein, oder
- b) durch absolut messende Geräte stattfinden, die rückführbar auf die SI-Einheiten sind, und denen Messunsicherheiten zugewiesen werden können.

Für kalibrierte Messgeräte sollte ein Kalibrierschein nach ISO/IEC 17025^[3] vorhanden sein.

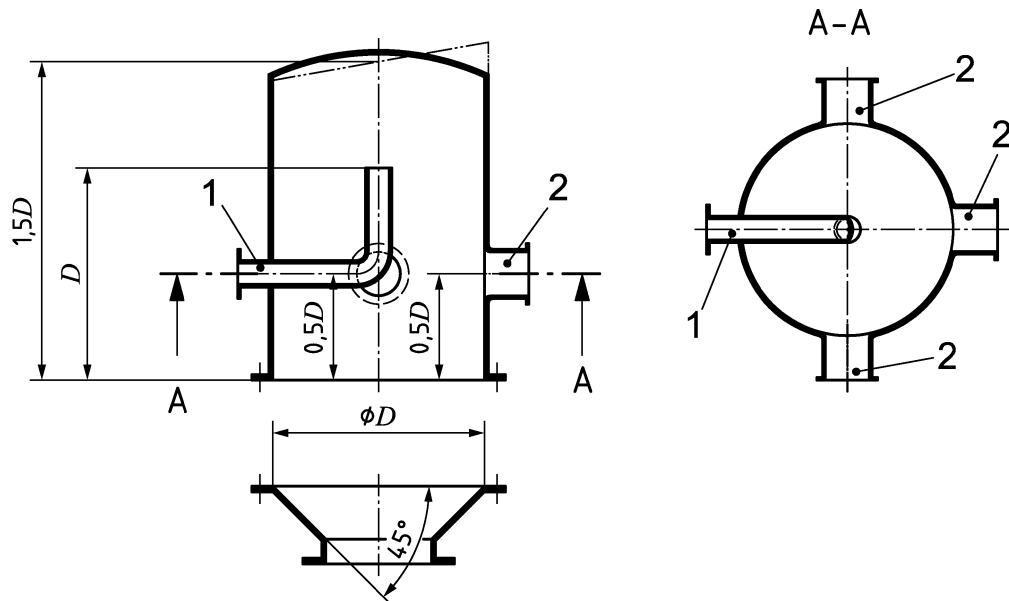
5.1.2 Messdom für das Durchflussverfahren

Für diese Messungen ist ein Messdom nach Bild 1 zu verwenden, der über den gleichen Nenndurchmesser, D_N , wie der Pumpeneinlass verfügt. Die dem Einlassflansch der Pumpe gegenüberliegende Fläche des Messdomes kann flach, konisch oder leicht gewölbt sein, mit der gleichen mittleren Höhe über dem Anschlussflansch wie die ebene Fläche. Falls mehr als ein Druckmessgerät verwendet wird, sind vorzugsweise drei Flansche zur Druckmessung auf einer Höhe von $D/2$ oberhalb des unteren Flansches zu verwenden. Der Durchmesser dieser Flansche sollte größer oder gleich dem Flanschdurchmesser der verwendeten Druckmessgeräte sein, und ihre Anschlussmaße sind festzuhalten. Keine der Messöffnungen darf sich im Winkelbereich von $\pm 45^\circ$ neben einer Gaseinlassöffnung befinden. Mit Ausnahme des Gaseinlassrohres dürfen keine der Verbindungsleitungen zwischen Flansch und Messdom die innere Wand des Messdoms überragen.

Falls es die Prüfpumpe erfordert, ist der Messdom mit einer Vorrichtung zum Ausheizen zu versehen, der eine gleichmäßige Erwärmung des Doms zum Erreichen des Enddrucks sicherstellt.

Das Volumen des Messdoms kann vom Pumpentyp abhängen. Nähere Angaben sind der spezifischen Pumpennorm zu nehmen.

Bei Pumpen mit einem Einlassflanschdurchmesser kleiner als $D_N = 100$ mm muss der Durchmesser des Messdoms $D_N = 100$ mm entsprechen. Der Übergang zum Einlassflansch der Pumpe muss durch ein 45° konisches Verbindungsstück nach Bild 1 erfolgen.



Legende

- 1 Gaseinlassrohr und Temperaturmessstelle für T_D
- 2 Anschlüsse für Druckmessgerät und Massenspektrometer
- D Innendurchmesser des Messdoms, in Meter

Bild 1 — Messdom für das Durchflussverfahren

5.1.3 Prüfanordnung

Siehe Bild 2.

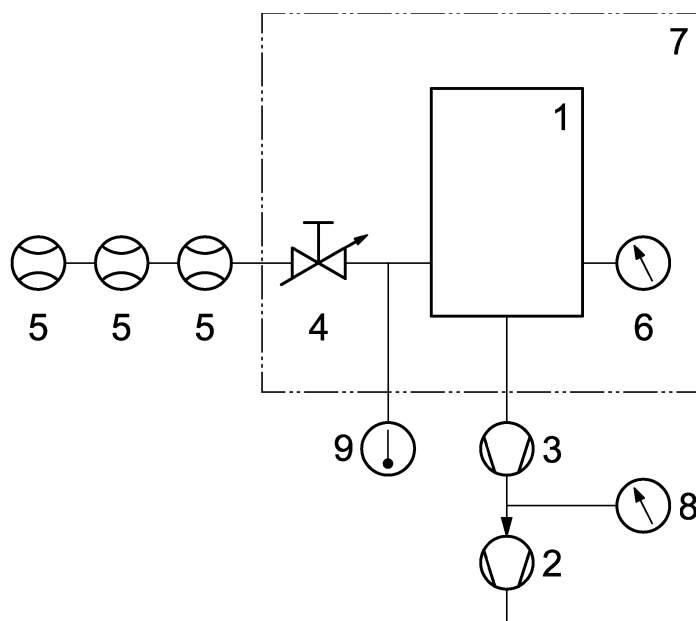
Der Messdom muss sauber und trocken sein. Pumpe, Dichtungen und andere Bauteile müssen dem erwarteten Enddruck entsprechend sauber sein. Alle Bauteile werden unter sauberen Bedingungen nach Bild 2 zusammengebaut. Wegen des engen Messbereichs dürfen Durchflussmesser mit verschiedenen Messbereichen in Reihe geschaltet werden.

Falls der Durchfluss durch einen kleinen Querschnitt eines Durchflussmessers begrenzt wird, dürfen sie parallel zu einer Sammelleitung verwendet werden, wobei zwischen jedem Durchflussmesser und der Sammelleitung ein Ventil anzubringen ist. Anstelle von Durchflussmesser und Gaseinlassventil können Massenflussregler mit programmierbaren Durchflüssen verwendet werden. Diese sind parallel an eine Sammelleitung zu schalten.

Die Dichtheit von großen Massenflussreglern erweist sich in vielen Fällen als unzureichend. In solchen Fällen empfiehlt sich die Verwendung von Ventilen zwischen Massenflussregler und Sammelleitung.

Ionisationsvakuummeter und Massenspektrometer müssen so montiert sein, dass Gasteilchen zwischen ihnen keinen geraden, direkten geometrischen Weg nehmen können. .

ACHTUNG — Die Sicherheitsvorschriften des Pumpenherstellers sind zu beachten.

**Legende**

- 1 Messdom
- 2 Vorvakuumpumpe
- 3 Prüfpumpe
- 4 Gaseinlassventil
- 5 Durchflussmesser zur Messung von Q
- 6 Vakuummeter zur Messung von p_1
- 7 Heizmantel (optional)
- 8 Vakuummeter zur Messung von p_3
- 9 Temperaturmessstelle zur Messung von T_D

ANMERKUNG 2 und 8 werden nur in Verbindung mit Hochvakuum-Prüfpumpen verwendet.

Bild 2 — Anordnung zur Messung des Volumenstroms (Saugvermögen) nach dem Durchflussverfahren

5.1.4 Bestimmung des Volumenstroms

Das zur Messung des Volumenstroms, q_V , angewendete Verfahren ist das Durchflussverfahren, bei dem der Gasstrom, Q , außerhalb des Messdoms gemessen wird. Falls der Druck, p_1 , im Messdom, gemessen mit einem Vakuummeter auf der festgelegten Höhe oberhalb des Unterflansches (siehe Bild 1), konstant gehalten wird, lässt sich der Volumenstrom, q_V , aus folgender Beziehung erhalten

$$q_V = \frac{Q}{p_1 - p_b} \quad (1)$$

Dabei ist p_b der Enddruck im Messdom (siehe 5.4).

Eine analoge Gleichung gilt für den Volumenstrom der Vorvakuumpumpe, q_{VBP} .

$$q_{VBP} = \frac{Q}{p_3 - p_{b3}} \quad (2)$$

Der Gasstrom kann volumetrisch (Gasbüretten, Gaszähler), mithilfe von viskosen Strömungseffekten (Rotationsdurchflussmesser, Durchflussmessgeräte mit Kapillaren) oder, in den meisten Fällen, mithilfe von thermoelektrischen Massendurchflussmessern gemessen werden (siehe Literaturhinweis [6], S. 109-113).

Aufgrund der Abhängigkeit des Gasvolumens von der Temperatur sind für alle volumetrischen Messungen Korrekturen um einen Faktor von T_D/T_f erforderlich, wenn die Temperatur, T_f , des Durchflussmessers und die Temperatur, T_D , des Messdomes voneinander abweichen.

ANMERKUNG Thermoelektrische Massendurchflussmesser messen nicht den pV -Durchfluss, sondern den Volumenstrom, q_{Vstd} , bei Normbezugsbedingungen für Gase (d. h. $p_0 = 101\,326\text{ Pa}$ und $T_0 = 273,15\text{ K}$, siehe ISO 3529-1:1981^[1], 1.0.2). Um den pV -Durchfluss zu erhalten, wird q_{Vstd} mit dem Faktor $T_D p_0/T_0$ multipliziert. Demzufolge ist q_V gegeben durch:

$$q_V = \frac{q_{Vstd} p_0 T_D}{T_0 (p_1 - p_b)} \quad (3)$$

Häufig wird für q_{Vstd} die Einheit „sccm“ (Standardkubikzentimeter je Minute, en: standard cubic centimetre per minute) verwendet. Falls dies der Fall ist, ergibt sich q_V in Liter je Sekunde, indem $[q_{Vstd} = (q_{Vscm}/\text{sccm}) \times 10^{-3} \text{ l/60 s}]$, $[p_0 = 101\,325\text{ Pa}]$ und $[T_0 = 273,15\text{ K}]$ in Gleichung (3) eingegeben werden, wie folgt:

$$q_V = \frac{(q_{Vscm}/\text{cm}^3 \text{ min}^{-1}) \times 10^{-3} \text{ l} \times 101\,325\text{ Pa} \times T_D}{60 \text{ s} \times 273,15\text{ K} \times (p_1 - p_b)} \text{ l/s} \quad (4)$$

5.1.5 Messverfahren

Bild 2 zeigt die Anordnung der Messeinrichtung mit dem Messdom aus Bild 1. Zu Beginn, bei geschlossenem Gaseinlassventil, muss im Messdom der Enddruck vorherrschen (siehe 5.4). Dann wird Gas durch das einstellbare Ventil in den Messdom eingelassen. Die Messungen werden mit einem ab einem Schwellenwert ansteigenden Druck durchgeführt, der die ordnungsgemäße Verwendung des Durchflussmessers zulässt. Während dieser Zeitspanne muss die Umgebungstemperatur innerhalb $\pm 2\text{ °C}$ konstant bleiben.

Sobald der erforderliche Druck p_1 innerhalb eines Schwankungsbereichs von 3 %/min erreicht wird, müssen die Drücke p_1 und p_3 , die Umgebungstemperatur und die Messdomtemperatur, T_D , sowie der eingelassene Gasstrom, Q , gemessen werden. Falls der pV -Durchfluss innerhalb von $\pm 3\%$ konstant bleibt, kann die Messung an diesem Punkt als gültig angesehen werden. Erweist sich der pV -Durchfluss aufgrund einer instationären Strömungsbedingung als instabil, ist abzuwarten, bis er sich stabilisiert. Falls die Messung des pV -Durchflusses 60 s übersteigt, ist der Druck, p_1 , innerhalb des Messdoms, in Abständen von mindestens einer Minute aufzuzeichnen. In diesem Fall ergibt sich der Druck aus dem Durchschnittswert der gemessenen Drücke. Falls während einer Messung der Druck oder der pV -Durchfluss um mehr als $\pm 3\%$ variieren, ist die Messung zu wiederholen, bis die abgelesenen Werte stabil sind.

Die Messungen sind an mindestens drei Punkten je Druckdekade von p_1 durchzuführen. Wird der pV -Durchfluss bis auf den maximal zulässigen Wert, Q_{max} , erhöht, wird der maximale Ansaugdruck erreicht, dessen Grenzwerte durch den Hersteller festgelegt sein können.

ANMERKUNG Messungen des Volumenstroms können mit unterschiedlichen Gasen durchgeführt werden. Wenn das Gas gewechselt wird, werden alle mit dem Gaseinlassventil verbundenen Leitungen vor Beginn der neuen Messreihe mit dem neuen Gas gespült.

5.1.6 Messunsicherheiten

Der Gasstrom sollte mit einer Standardmessunsicherheit von $\pm 2,5\%$, und der Druck mit einer Standardmessunsicherheit von weniger als $\pm 3\%$ gemessen werden. Siehe Anhang B für die genaue Berechnung. Die Gesamtmessunsicherheit des Volumenstroms muss $< 10\%$ betragen.

5.1.7 Überprüfung der Messung

In einem semi-logarithmischen Diagramm (ähnlich dem in Bild 5) ist der Volumenstrom, q_V , der Prüfpumpe, nach Gleichung (1) in Abhängigkeit vom Ansaugdruck graphisch darzustellen. Um die Größe der Vorvakuumpumpe (sofern verwendet) aufzuzeigen, ist der Volumenstrom, q_{VBP} , der Vorvakuumpumpe, berechnet aus Q_{std} und p_3 , in Abhängigkeit von p_3 in demselben Diagramm darzustellen.. Der Abszissenbereich muss den gesamten Druckbereich von p_1 und p_3 abdecken. Der Enddruck der Vakuumpumpe, p_{b1} , und der Vorvakuumpumpe, p_{b3} , müssen angezeigt werden.

Der Prüfbericht muss mindestens folgende Angaben beinhalten:

- a) Typ, Seriennummer, Messunsicherheit und Betriebsbedingungen aller verwendeten Vakuummeter und Durchflussmesser;
- b) Typ und Seriennummer der Prüfpumpe;
- c) Drehfrequenz („Drehzahl“) und/oder andere Betriebsbedingungen der Prüfpumpe;
- d) in der Prüfpumpe verwendete Flüssigkeiten und deren Dampfdrücke bei 20 °C;
- e) D_N (Nenndurchmesser des Messdoms und Flanschttyp);
- f) Typ und Saugvermögen der Vorvakuumpumpe (sofern verwendet);
- g) Typenbezeichnungen der verwendeten und dem Einlassflansch der Prüfpumpe vorgelagerten Dichtungen;
- h) Typenbezeichnungen der während der Prüfung eingesetzten Dampfsperren und Fallen, sowie deren Temperaturen;
- i) Kühlwassertemperaturen und Wasserdurchfluss;
- j) Umgebungstemperatur und Temperatur des Messdoms;
- k) Ausheizdauer und –temperaturen.

5.2 Messung des Volumenstroms (Saugvermögen) nach dem Blendenverfahren

5.2.1 Allgemeines

Das Blendenverfahren ist auf Hochvakuum pumpen anwendbar. Im Messdom müssen molekulare Strömungsbedingungen vorhanden sein. Dieses Verfahren wird bei niedrigen pV -Durchflüssen empfohlen, für die keine geeigneten Durchflussmesser verfügbar sind. Zur Vermeidung übermäßig hoher Drücke, die zu einer laminaren Strömung durch die Blende führen würden, muss der Blendendurchmesser im Messdom an den erwarteten Volumenstrom der Prüfpumpe angepasst werden.

5.2.2 Messdom für das Blendenverfahren

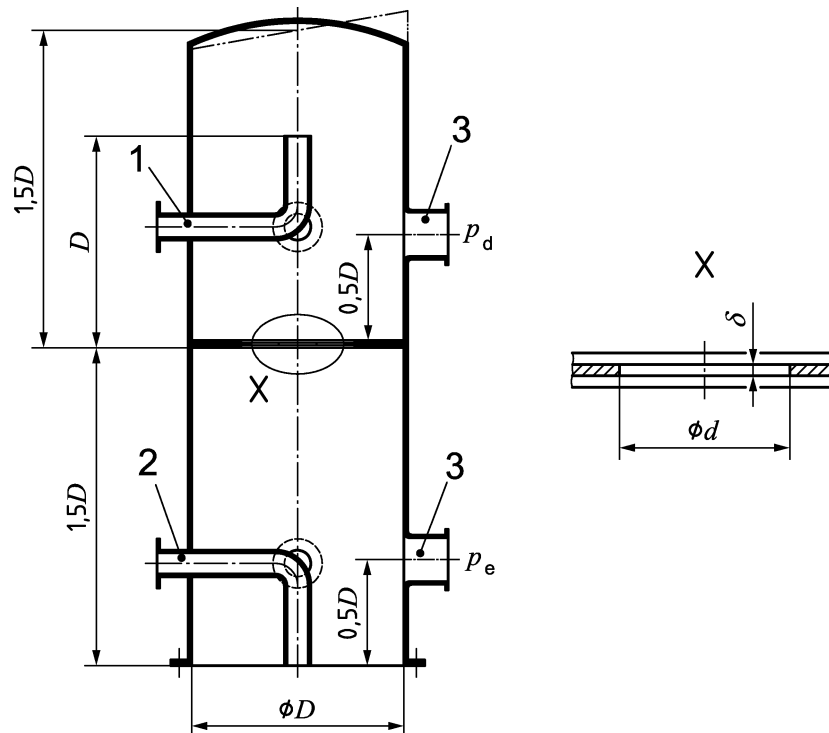
Der Messdom muss zylindrisch entsprechend Bild 3 konstruiert sein. Eine Wand mit einer (austauschbaren) kreisförmigen Blende teilt den Messdom in zwei Kammern. Benötigt wird eine Einrichtung zum Ausheizen, die eine gleichmäßige Erwärmung des Doms sicherstellt.

Der Durchmesser der dünnwandigen Blende ($\delta d < 0,1$) ist entsprechend dem erwarteten Durchfluss auszuwählen und muss so gewählt werden, dass das Verhältnis der Drücke p_d und p_e zwischen 3 und 30 liegt. Es muss darauf geachtet werden, dass die mittlere freie Weglänge der Gasteilchen, $\bar{l}$, in der Blende nicht kleiner ist als der doppelte Blendendurchmesser, $2d$.

Siehe Anhang A zu spezifischen $\bar{l}$ -Werten.

Bei Pumpen mit einem Einlassflanschdurchmesser größer oder gleich $D_N = 100$ mm, muss der Nenndurchmesser, D_N , des Messdoms gleich dem tatsächlichen Durchmesser des Einlassflansches sein.

Bei Pumpen mit einem Einlassflanschdurchmesser von weniger als $D_N = 100$ mm, muss der Durchmesser des Messdoms $D_N = 100$ mm entsprechen. In diesem Fall muss der Übergang zum Einlassflansch der Pumpe durch ein 45° konisches Verbindungsstück nach Bild 1 erfolgen.



Legende

- 1 Gaseinlass
- 2 Gaseinlass und Temperaturmesspunkt für T_D
- 3 Anschlüsse für Vakuummeter und Massenspektrometer
- D Innendurchmesser des Messdoms, in Meter
- δ Blendendicke am Blendendurchmesser, in Meter
- p_d, p_e Drücke im Messdom für das Blendenverfahren, in Pascal (oder Millibar)

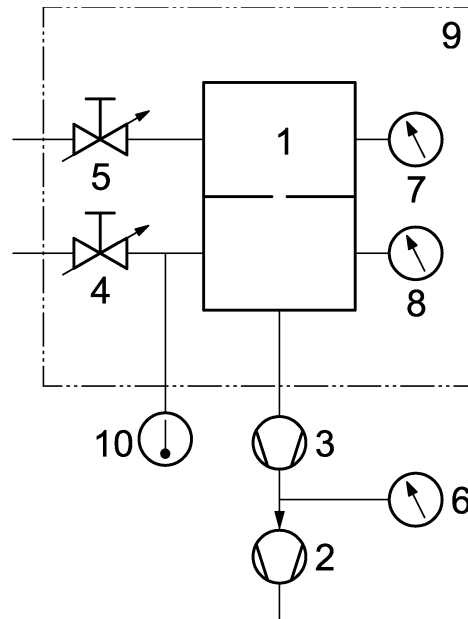
Bild 3 — Messdom für das Blendenverfahren

5.2.3 Prüfanordnung

Siehe Bild 4.

Der Messdom muss sauber und trocken sein. Für sämtliche Anschlüsse auf der Hochvakuumseite werden ausheizbare CF-Flansche mit Schneidkante empfohlen.

ACHTUNG — Innenflächen nicht mit den Händen berühren. Während der Montage Schutzhandschuhe tragen.



Legende

- 1 Messdom
- 2 Vorvakuumpumpe
- 3 Prüfpumpe
- 4 Gaseinlassventil
- 5 Gaseinlassventil
- 6 Vakuummeter zur Messung von p_3
- 7 Vakuummeter zur Messung von p_d
- 8 Vakuummeter zur Messung von p_e
- 9 Heizmantel
- 10 Temperaturmesspunkt für die Messung von T_D

Bild 4 — Anordnung zur Messung des Volumenstroms (Saugvermögen) nach dem Blendenverfahren

5.2.4 Bestimmung des Volumenstroms

Der Messdom wird durch eine dünne Kreisblende in zwei Raumbereiche geteilt (siehe Bild 3). Der Volumenstrom ist gegeben durch

$$q_V = C \left(\frac{p_d - p_{bd}}{p_e - p_{be}} \right) - 1. \quad (5)$$

Dabei ist C der berechnete Strömungsleitwert, unter Berücksichtigung von Blendengröße und Gaseigenschaften.

Die Enddrücke, p_{bd} und p_{be} , in der oberen und der unteren Kammer des Messdoms werden nach dem Ausheizen (siehe 5.4) und vor dem Einlassen des Gases gemessen. Der Strömungsleitwert der Blende mit dem Durchmesser d und der Dicke δ kann durch Gleichung (6) berechnet werden:

$$C = \sqrt{\frac{\pi R T_D}{32 M}} \left[\frac{1}{1 + (\delta / d)} \right] d^2 \quad (6)$$

Der Term $1/[1 + (\delta / d)]$ ist ein Korrekturfaktor (nur gültig für $\delta \ll d$), der als Durchschnittswert der Übergangswahrscheinlichkeit durch die Blende definiert werden kann.

Es ist darauf zu achten, dass die Zahlenwertgleichung mit entsprechenden Einheiten verwendet wird. Das Einfügen der Werte

$$R = 8,314 \text{ J/(mol K)}$$

$$M_{\text{Luft}} = 28,97 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$$

$$T_D = 293 \text{ K (20 °C)}$$

ergibt, in Kubikmeter je Sekunde,

$$C_{\text{Luft}} = \frac{91d^2}{1+(\delta/d)} \quad (7)$$

oder, in Liter je Sekunde,

$$C_{\text{Luft}} = \frac{91\,000d^2}{1+(\delta/d)} \cdot \quad (8)$$

Dabei werden δ und d in Meter gemessen.

5.2.5 Messverfahren für das Blendenverfahren

Bild 4 zeigt die Anordnung der Messeinrichtung. Zu Beginn, nach dem Ausheizen bei geschlossenen Gaseinlassventilen, müssen im Messdom die Enddrücke p_{bd} und p_{be} vorherrschen (siehe 5.4).

5.2.6 Einstellung der Druckmessgeräte

Nachdem die Enddrücke p_{bd} und p_{be} im Messdom erreicht und aufgezeichnet wurden, wird das Gas über das Einlassventil (siehe Bild 4, Punkt 4) eingeleitet, um die Messempfindlichkeit der Druckmessgeräte (Bild 4, Punkt 7 und 8) zu überprüfen.

Weil das Gas direkt zum Pumpeneinlass strömt, sind die tatsächlichen Drücke, $p_d - p_{bd}$, und $p_e - p_{be}$, bei einem konstantem Gasstrom durch das Ventil gleich hoch.

ACHTUNG — Um Adsorptions- und Desorptionsvorgänge zu vermeiden, sind nur trockene Gase (99,9 % Massenanteil) für die Messungen zu verwenden.

Je Dekade von p_e sind mindestens drei Messungen mit ansteigenden Drücken durchzuführen, wobei von einem Schwellenwert auszugehen ist, der dem zweifachen Wert des Enddrucks, p_{be} , entspricht.

Für jedes Druckwertepaar ist das Verhältnis $(p_d - p_{bd})/(p_e - p_{be})$ zu berechnen, welches dem Wert 1 entsprechen sollte. Falls Abweichungen von 1 auftreten, muss die Messempfindlichkeit eines der Druckmessgeräte für jede Dekade um den Korrekturfaktor der mittleren Abweichung korrigiert werden.

Nach diesen Einstellvorgängen wird der Messdom bis fast auf den Enddruck ausgepumpt, anschließend kann mit der Messung des Volumenstroms begonnen werden.

5.2.7 Messung des Volumenstroms

Das Gas wird durch das einstellbare Ventil (Bild 4, Punkt 5) in den Messdom eingelassen. Es sind Messungen mit ansteigenden Drücken aufzunehmen, die ab einem Schwellenwert beginnen, der dem zweifachen Wert des Enddrucks, p_{be} , entspricht. Sobald der erforderliche Druck, p_{be} , erreicht wird und für die darauffolgende Minute innerhalb $\pm 3 \%$ stabil bleibt, kann die Messung an diesem Punkt als gültig angesehen werden. Erweist sich der Druck aufgrund einer instationären Strömungsbedingung als instabil, ist abzuwarten, bis er sich stabilisiert.

Bis zu $p_e = 1 \times 10^{-3}$ Pa oder einem Druck, bei dem die mittlere freie Weglänge (siehe Literaturhinweis [7], S. 43) der Gasmoleküle im oberen Teil des Messdoms weniger als $2d$ beträgt, wobei d den Blendendurchmesser darstellt (siehe Anhang A) sollten je Druckdekade an mindestens drei Punkten Messungen durchgeführt werden. Die Drücke p_d , p_e , und p_3 werden bei jeder Messung aufgezeichnet.

Der Volumenstrom, q_V , ist mittels Gleichung (5) zu berechnen.

ANMERKUNG Messungen des Volumenstroms können mit unterschiedlichen Gasen durchgeführt werden. Wenn das Gas gewechselt wird, werden alle mit dem Gaseinlassventil verbundenen Leitungen vor Beginn der neuen Messreihe mit dem neuen Gas gespült.

5.2.8 Messunsicherheiten

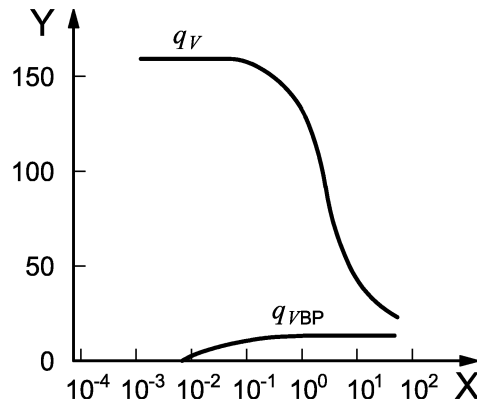
Die Druckverhältnisse sollten mit einer Messunsicherheit von $\leq 3 \%$, und der Blendendurchmesser mit einer Unsicherheit von $0,5 \%$ gemessen werden. Falls der Druck in der oberen Kammer auf einen Wert ansteigt, bei dem die mittlere freie Weglänge sich dem Wert des zweifachen Blendendurchmessers nähert, nimmt der Strömungsleitwert um 3% des Wertes der Molekularströmung (siehe Literaturhinweis [7], S. 147-150) zu. Siehe Anhang B für die genaue Berechnung. Die Gesamtmessunsicherheit des Volumenstroms muss $< 10 \%$ betragen.

5.2.9 Überprüfung der Messung

In einem semi-logarithmischen Diagramm (siehe Bild 5) ist der Volumenstrom, q_V , der Prüfpumpe, nach Gleichung (5) in Abhängigkeit vom Ansaugdruck graphisch darzustellen. Um die Größe der Vorvakuumpumpe (sofern verwendet) aufzuzeigen, ist der Volumenstrom, q_{VBP} , der Vorvakuumpumpe, berechnet aus $Q = p_e q_V = C(p_d - p_e)$ und p_3 , in Abhängigkeit von p_3 in demselben Diagramm darzustellen. Der Abszissenbereich muss den gesamten Druckbereich von p_e und p_3 abdecken. Der Enddruck der Vakuumpumpe, p_{be} , und der Vorvakuumpumpe, p_{b3} , müssen angezeigt werden.

Der Prüfbericht muss mindestens folgende Angaben beinhalten:

- Typ, Seriennummer, Messunsicherheit und Betriebsbedingungen aller verwendeten Druckmessgeräte;
- Typ und Seriennummer der Prüfpumpe;
- Drehfrequenz („Drehzahl“) und/oder andere Betriebsbedingungen der Prüfpumpe;
- in der Prüfpumpe verwendete Flüssigkeiten und deren Dampfdrücke bei 20 °C ;
- D_N (Nenndurchmesser des Messdoms und Flanschtyp);
- Typ und Saugvermögen der Vorvakuumpumpe (sofern verwendet);
- Typenbezeichnungen der verwendeten und dem Einlassflansch der Prüfpumpe vorgelagerten Dichtungen;
- Typenbezeichnungen der während der Prüfung eingesetzten Dampfsperren und Fallen, sowie deren Temperaturen;
- Kühlwassertemperaturen und Wasserdurchfluss;
- Umgebungstemperatur und Temperatur des Messdoms;
- Ausheizdauer und –temperaturen.

**Legende**

X	Ansaugdruck, in Pascal
Y	Volumenstrom, in Liter je Sekunde
q_V	Volumenstrom der Prüfpumpe
q_{VBP}	Volumenstrom der Vorvakuumpumpe

Bild 5 — Beispiel für die Volumenstromkurve (Saugvermögenskurve)**5.3 Messung des Volumenstroms (Saugvermögen) nach dem Auspumpverfahren****5.3.1 Allgemeines**

Das Auspumpverfahren sollte für kleine Pumpen verwendet werden. Das Saugvermögen wird erhalten, indem ein Messdom durch die Prüfpumpe evakuiert wird. Dieses Verfahren erfordert eine Messung des Drucks über der Zeit sowie Kenntnisse über das Volumen des Messdoms. Die Vorteile dieses Verfahrens liegen darin, dass der Gasstrom nicht gemessen werden muss und dass die Durchführung sich einfach automatisieren lässt.

Ein ständiges Evakuieren bringt jedoch auch bestimmte Nachteile mit sich, wie z. B. im Folgenden angegeben.

- Die Messung des Drucks kann durch die Ansprechzeiten von Druckmessgeräten und Datenerfassungssystem gestört werden.
- Die Evakuierung eines Behälters entspricht einer Expansion des Gases aus dem Behälter, die zu einer Abkühlung des Gases führt. Demzufolge entsteht der beobachtete Druckabfall sowohl durch das Entfernen des Gases durch die Pumpe als auch durch die Abkühlung des Gases im Behälter. Im Laufe des Auspumpens verändert sich diese Kühlwirkung, da die Geschwindigkeit des Wärmeübergangs zwischen Gas und Behälterwänden vom Druck abhängt. Bei Atmosphärendruck verläuft die Gasexpansion nahezu isentrop (was zu einer erheblichen Abkühlung führt), im Feinvakuumbereich ist sie jedoch nahezu isotherm (was zu einer schnellen Aufwärmung des gekühlten Gases auf Umgebungstemperatur führt).

Diese Probleme werden durch unterbrochenes Auspumpen umgangen, bei dem der Behälter in wiederholten Auspumpzyklen, Δt_1 , mit dazwischenliegenden Wartezeiten, Δt_2 , evakuiert wird. Zu Beginn eines Zyklus wird das Einlassventil des Behälters geschlossen und der gemessene Druck wird als Anfangsdruck aufgezeichnet. Der Behälter wird für eine bestimmte Zeitspanne, Δt_1 , ausgepumpt, bis der Druck um mehrere Prozentpunkte gefallen ist. Der Pumpvorgang wird dann unterbrochen und der zweite Druckwert erst nach der Zeitspanne Δt_2 aufgezeichnet, wodurch ein thermischer Ausgleich stattfinden kann. Der Ausgleich ist erfolgt, sobald der Druck einen stationären Wert annimmt. Anschließend wird der Auspumpzyklus auf die gleiche Art wiederholt.

Bei Pumpen mit hoher Rückströmung von der Auslass- zur Einlassseite kann die Verwendung dieses Verfahrens das Saugvermögen dieser Pumpen für leichte Gase aufgrund des Spülgaseffekts erhöhen. Während der Wartezeit für den thermischen Ausgleich erreicht die Pumpe den Enddruck mit einer Restgaszusammensetzung, die der Luft am Pumpenauslass gleicht. Zu Beginn eines neuen Auspumpintervalls wird das Auspumpen von leichten Gasen, wie z. B. Wasserstoff, durch dieses Restgas beschleunigt. In solchen Fällen kann das Auspumpverfahren nicht empfohlen werden.

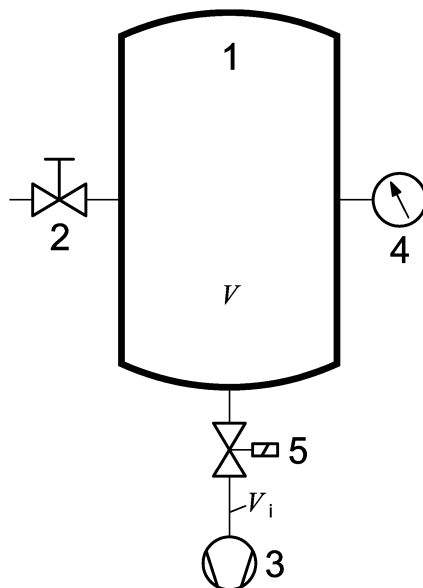
Die Kalibrierung sämtlicher Messgeräte muss entweder:

- a) auf ein Vakuum-Primärnormal oder ein nationales Normal rückführbar sein, oder
- b) durch absolut messende Geräte stattfinden, die rückführbar auf die SI-Einheiten sind, und denen Messunsicherheiten zugewiesen werden können.

Für kalibrierte Messgeräte muss ein Kalibrierschein nach ISO/IEC 17025^[3] vorhanden sein.

5.3.2 Messdom für das Auspumpverfahren

Für die Messung des Volumenstroms durch das Auspumpverfahren ist ein Messdom zu verwenden, dessen Volumen nicht kleiner ist als der Wert, der sich aus der Multiplikation des erwarteten Volumenstroms der Pumpe mit 120 s ergibt. Die Maße des Messdoms in den drei Raumdimensionen dürfen sich um nicht mehr als einen Faktor von zehn unterscheiden. Sämtliche Innenflächen des Messdoms und die Verbindungsleitung zur Pumpe müssen sauber und trocken sein. Der Messdom muss über einen Sauganschluss mit einem Nenndurchmesser größer oder gleich dem des Einlassflansches der Prüfpumpe, über zusätzliche Anschlüsse für ein Gaseinlassventil und über einen oder mehrere Vakuummeteranschlüsse verfügen. Die Anschlüsse für die Vakuummeter dürfen sich nicht in unmittelbarer Nähe des Pumpenanschlusses befinden (siehe Bild 6).



Legende

- 1 Messdom
- 2 Gaseinlassventil
- 3 Prüfpumpe
- 4 Vakuummeter zur Messung von p_{i1} , p_{i2} , p_{i3}
- 5 Schnellschlussventil
- V Volumen des Messdoms
- V_i Volumen der Verbindungsleitung zwischen Prüfpumpe und Schnellschlussventil

Bild 6 — Anordnung zur Messung des Volumenstroms (Saugvermögen) nach dem Auspumpverfahren

5.3.3 Schnellschlussventil

Die Öffnungs- oder Schließzeit des Schnellschlussventils sollte $< 0,5$ s betragen. Das Messintervall, Δt_1 , muss im Vergleich mit dieser Dauer groß ausfallen (d. h. $\Delta t_1 > 8$ s), damit sein Beitrag zur Messunsicherheit der Saugvermögensbestimmung auf ein Minimum verringert wird. Für eine genaue Messung von Δt_1 , ist die tatsächliche Öffnungszeit des Schnellschlussventils mit ausreichender Genauigkeit zu erfassen und in die Berechnung einzubeziehen. Diese Öffnungszeit kann je nach Ventiltyp von der Ansteuerungszeit abweichen.

Da der Strömungsleitwert des Ventils den gemessenen Volumenstrom der Prüfpumpe verringert, sollte ein Durchgangsventil mit einem großen Querschnitt gewählt werden.

5.3.4 Prüfanordnung

Vakuumpumpe, Dichtungen und andere Bauteile müssen dem erwarteten Enddruck entsprechend sauber sein. Alle Bauteile werden unter sauberen Bedingungen nach Bild 6 zusammengebaut. Die Vakuumpumpe muss über das Schnellschlussventil und einer kurzen Anschlussleitung mit einem ausreichenden Querschnitt (siehe 5.3.7) mit dem Messdom verbunden sein. Das Ventil muss nahe am Einlassflansch der Pumpe angebracht werden, um das Volumen, V_i , dieses Teils der Verbindungsleitung möglichst gering zu halten. Das Rohr zwischen Ventil und Messdom kann auf einen großen Querschnitt erweitert werden. Die Nenndurchmesser der Verbindungselemente sollten größer oder gleich der Ansaugöffnung der Pumpe sein. Das Volumen, V_i , der Verbindungsleitung zwischen dem Schnellschlussventil und dem Einlass des Pumpsystems der Vakuumpumpe muss kleiner ausfallen als 1 % des Volumens, V , des Messdoms, d. h. $V_i < 0,01V$.

Die Druckmessung ist mit einem Totaldruckvakuummeter durchzuführen. Die Verbindungsleitung vom Messdom zum Vakuummeter darf eine Länge von 1 m nicht überschreiten. Die Nennweite der Leitung muss größer als 16 mm sein.

5.3.5 Bestimmung des Volumenstroms

Der Volumenstrom, q_V , der Vakuumpumpe während des Auspumpintervalls, Δt_1 , zwischen den Drücken p_{t1} und p_{t2} (unter Voraussetzung einer isothermen Expansion) ist gegeben durch Gleichung (9):

$$q_V = \frac{V}{\Delta t_1} \ln \frac{p_{t1}}{p_{t2}} \quad (9)$$

Die Unsicherheit des Volumens, V , des Messdoms sollte $< 0,5$ % betragen. Zur Bestimmung der Drücke p_{t1} und p_{t2} , und von Δt_1 , wird das Schnellschlussventil (Bild 6, Punkt 5) zwischen Vakuumpumpe und Messdom für eine festgelegte Zeitspanne, Δt_1 , geöffnet.

Die Druckdifferenz, $\Delta p = p_{t1} - p_{t2}$, muss so gewählt werden, dass $\Delta p/p_{t1} < 0,1$ entspricht.

Gleichung (9) ist nur bei isothermer Gasexpansion gültig. Nach dem Schließen des Schnellschlussventils wird der Druck p_{t2} durch die Kühlwirkung der nahezu isentropen Gasexpansion während des Auspumpens verfälscht. Deswegen muss p_{t2} nach einer Wartezeit Δt_2 zur Temperaturangleichung gemessen werden.

Das Verfahren zur Berechnung des Volumenstroms mithilfe von Gleichung (9) enthält zwei systematische Fehlerquellen, die korrigiert werden können.